

平成16年度～平成19年度科学研究費補助金
基盤研究(A) 研究成果報告書

住宅換気システムの総合的コミッショニング 手法の提案と設計支援・評価ツールの開発

課題番号 16206058

平成20年5月

研究代表者 吉野 博

東北大学大学院 工学研究科
都市・建築学専攻
サステナブル環境構成学分野

平成16年度～平成19年度科学研究費補助金
基盤研究（A） 研究成果報告書

住宅換気システムの総合的コミッショニング 手法の提案と設計支援・評価ツールの開発

課題番号 16206058

平成20年5月

研究代表者 吉野 博

東北大学大学院 工学研究科
都市・建築学専攻
サステナブル環境構成学分野

はしがき

本研究「住宅換気システムの総合的コミッショニング手法の提案と設計支援・評価ツールの開発」は、科学研究費補助金・基盤研究(A)として、平成16年度から19年度の4年間に実施されたものである。

研究組織

- 研究代表者： 吉野 博（東北大学大学院工学研究科 教授）
研究分担者： 内海 康雄（宮城工業高等専門学校建築学科 教授）
研究分担者： 持田 灯（東北大学大学院工学研究科 教授）
研究分担者： 佐藤 洋（独立行政法人 産業技術総合研究所 研究員）
研究分担者： 池田 耕一（国立保健医療科学院建築衛生部 部長）
研究分担者： 野崎 淳夫（東北文化学園大学科学技術学部学科 教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	20,000,000 (0)	6,000,000 (0)	26,000,000 (0)
平成17年度	7,500,000 (0)	2,250,000 (0)	9,750,000 (0)
平成18年度	6,000,000 (0)	1,800,000 (0)	7,800,000 (0)
平成19年度	3,800,000 (0)	1,140,000 (0)	4,940,000 (0)
総計	37,300,000 (0)	11,190,000 (0)	48,490,000 (0)

研究発表

(1) 雑誌論文

- 高木 理恵、吉野 博、尹 星勲、鈴木 憲高、足立 真弓：壁体内通気層を利用した床下給気型第一種換気システムの性能評価実験、日本建築学会技術報告集、第18号、pp.187-190、2003.12
- 吉野 博、高木 理恵、林 基哉、李 重勲、田村 一美、丹羽 清美、野村 覚浩：熱交換器付きハイブリッド換気システムの性能評価に関する研究、第1報—実験家屋を用いたシステムの性能評価実験、空気調和・衛生工学会論文集、第94号、pp.87-94、2004.7
- 三原邦彰、三田村輝章、鈴木憲高、熊谷一清、奥泉裕美子、野口美由貴、柳沢幸雄：居住状態の住宅24戸における3種類の方法による換気量測定、日本建築学会技術報告集、20号、pp.167-170、2004.12
- 吉野 博、吉田真理子、角田和彦、池田耕一、野崎淳夫、北條祥子、柗津紘司、石川 哲：シックハウスにおける室内空気質と居住者の症状に関する長期追跡調査、臨床環境医学、第16巻、第1号、38-50、2007年7月

(2) 学会発表

1. Hiroshi Yoshino, Kentaro Amano, Mari Matsumoto, Koichi Ikeda, Atsuo Nozaki, Kazuhiko Kakuta, Sachiko Hojo, Satoshi Ishikawa: LONG-TERMED FIELD SURVEY OF INDOOR AIR QUALITY AND HEALTH HAZARS IN SICK HOUSES, Proceedings of CIB World Building Congress 2004, May 2004
2. 高木 理恵、吉野 博、林 基哉、田村 一美、野村 覚浩：熱交換器付きハイブリッド換気システムの性能評価に関する研究 その 4 補助ファン運転時の換気量と熱交換特性に関する数値実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.773-774、札幌、2004.8
3. 吉野博、三原邦彰、三田村輝章、鈴木憲高、熊谷一清、奥泉裕美子、野口美由貴、柳沢幸雄、大澤元毅：居住状態の住宅 24 戸における換気量測定 -3 種類の測定法による比較-、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.765-766、2004.9
4. 三原邦彰、吉野博、持田灯、佐々木澄、熊谷一清、柳沢幸雄：実験及び CFD 解析による簡易換気量測定法の基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.865-866、2004.9
5. H. Yoshino, Y. Yanagisawa, K. Kumagai, H. Osawa, T. Mitamura, N. Suzuki, K. Mihara, Y. Okuizumi, M. Noguchi: Evaluation of the Ventilation Rate via Four Different Measuring Methods, Proceedings of ROOMVENT 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Coimbra, Portugal, September 5-8, 2004
6. 三原邦彰、吉野博、三田村輝章、鈴木憲高、熊谷一清、奥泉裕美子、野口美由貴、柳沢幸雄、大澤元毅：居住状態の住宅 34 戸における換気量測定、日本環境管理学会・室内環境学会合同研究発表会講演予稿集、pp.166-169、2004.10
7. Hiroshi Yoshino, Kentaro Amano, Mari Matsumoto, Koji Netsu, Koichi Ikeda, Atsuo Nozaki, Kazuhiko Kakuta, Sachiko Hojo, Satoshi: Long-Termed Field Survey of Indoor Air Quality and Health Hazards in Sick House, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, vol.3, no.2, 297-303, November 2004
8. 内海 康雄、石野久彌：IBSPA と日本の学会におけるシミュレーションツール関連の研究開発状況、空気調和・衛生工学会大会学術論文集、pp137-141、2005.8
9. 高木 理恵、吉野 博、柳沢 幸雄、熊谷 一清、三田村 輝章、三原 邦彰、野口 美由貴、大澤元毅：実在住宅における換気の実態と換気量測定法の比較、第 14 回空気シンポジウム、大阪、pp.1-7、2005.8
10. 高木 理恵、吉野 博：壁体内通気層を利用した換気・空調併設型システムの性能評価実測 その 1 夏期における実測調査結果について、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.683-684、大阪、2005.9
11. 佐々木 睦史、石川 善美、内海 康雄、小林 仁、吉野 博、高木 理恵：壁体内通気層を排気経路とする第一種換気システムの性能評価実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.685-686、大阪、2005.9
12. 祢津紘司、吉野博、池田耕一、野崎淳夫、角田和彦、北條祥子、石川 哲：シックハウスにおける室内空気質と居住者の健康状況に関する調査研究 その 10 2004 年度室内環境測定調査の結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.929-930、2005.9
13. Rie Takaki, Hiroshi Yoshino, Yukio Yanagisawa, Kazukiyo Kumagai, Teruaki Mitamura, Kuniaki Mihara, Miyuki Noguchi, Haruki Osawa: Measurement of ventilation rates of occupied houses by three different methods -measurement results by constant concentration method-, Indoor Air 2005, pp.603-607, Beijing, 2005.9

14. Kuniaki Mihara, Hiroshi Yoshino, Yukio Yanagisawa, Kazukiyo Kumagai, Teruaki Mitamura, Rie Takaki, Miyuki Noguchi, Haruki Osawa : Measurement of ventilation airflow rates of occupied houses by three different methods - comparison between three different methods, Indoor Air 2005, pp.587-592, Beijing, 2005.9
15. K Netsu, H Yoshino, K Ikeda, A Nozaki, K Kakuta, S Hojo, S Ishikawa: FIELD SERVEY ON INDOOR AIR POLLUTIÓN AND FACTOR CAUSING SYMPTOM IN SICK HOUSES, Proceedings of Indoor Air 2005, 3696-3700, Sep.4-9, 2005
16. Yoshino Hiroshi, Netsu Koji, Ikeda Koichi, Nozaki Atsuo, Kakuta Kazuhiko, Hojo Sachiko, Ishikawa Satoshi: Field survey of indoor air quality and health hazards in 53 sick houses, Proceedings of The 2005 World Sustainable Building Conference in Tokyo (SB05Tokyo) 03-006, 101, Sep. 27-29,2005
17. H.Yoshino, K.Netsu, M.Yoshida, K.Ikeda, A.Nozaki, S.Hojo, H.Yoshino, K.Amano, S.Ishikawa : Long-Term Field Survey on IAQ and Occupant's Health in 57 Sick Houses in Japan, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Lisbon, 315-320, June 4-8, 2006
18. M. Yoshida, H. Yoshino, K. Netsu, K. Ikeda, A. Nozaki, K. Kakuta, S. Hojo, H. Yoshino, K. Amano, S. Ishikawa : Field Survey about IAQ, Building Performance and Occupant's Health of Sick Houses in Japan, Proceedings of 8th International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering (BUEE2006), Tokyo, 10th-13th, July 2006
19. H. Yoshino, K. Netsu, M. Yoshida, K. Ikeda, A. Nozaki, K. Kakuta, S. Hojo, H. Yoshino, K. Amano, S. Ishikawa: Field survey on IAQ, Building Performance and Occupant's Health of 60 Sick Houses in Japan, Proceedings of Indoor Environmental Quality, July 17-19, 2006
20. 高木 理恵、吉野 博、三原 邦彰、Maatouk Khoukhi : 住宅 12 戸を対象とした機械換気システムの給排気口の風量とメンテナンスに関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.719-720、横浜、2006.9
21. 三原邦彰、吉野博、熊谷一清、野口美由貴、柳沢幸雄 : 4 種類のパッシブトレーサーガスを用いた換気性能評価 ー実験及び数値計算による測定精度検証ー、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.689-690、2006.9
22. Jacques NDIONE、吉野博、持田灯 : Integration of the multi-zone model COMIS with CFD for indoor environmental analyses、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.705-706、2006.9
23. 田村翔、小林仁 : 簡易換気量計算ツールの開発に関する研究 (その 1) 反復法を用いない計算方法の提案と実大住宅モデルにおける換気計算、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1405-1408、2006.9
24. 野崎淳夫、早坂友規、横山英智 : 各種生活用品からの化学物質発生に関する研究 (その 1) 室内空気環境とその快適性に関する研究 (その 55)、第 13 回 (社) 大気環境学会北海道東北支部学術集会、pp.14-15、2006.10
25. 野崎淳夫、横山英智、早坂友規 : 各種生活用品からの化学物質発生に関する研究(その 3)室内空気環境とその快適性に関する研究(その 56)、第 13 回 (社) 大気環境学会北海道東北支部学術集会、pp.16-17、2006.10
26. Rie Takaki, Hiroshi Yoshino, Kuniaki Mihara, Khoukhi Maatouk : Study on Performance Evaluation of Mechanical Ventilation Systems for Occupied Houses, EPIC 2006 AIVC, pp.755-760, Lyon, 2006.11

27. 高木 理恵、吉野 博、三原 邦彰：東北地方の住宅を対象とした機械換気システムの給排気口の風量とメンテナンスに関する調査、平成 18 年度室内環境学会総会講演集、pp.182-183、秋田、2006.11
28. Hiroshi Yoshino, Mariko Yoshida, Koichi Ikeda, Atsuo Nozaki, Kazuhiko Kakuta, Sachiko Hojo, Hideaki Yoshino, Kentaro Amano, Koji Netsu, Satoshi Ishikawa: Long – term field survey about IAQ and occupants' health of 60 sick houses in Japan, Proceedings of 4th International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings Conference(IWEERB2007), 209-212, Harbin, China, January 15-16, 2007
29. 高木 理恵、吉野 博、藤川 光利、和田 浩行：住宅 25 戸における機械換気システムの給排気口の風量とメンテナンスに関する調査、日本建築学会東北支部研究報告集計画系、第 70 号、pp.57-60、岩手、2007.6
30. Jacques Ndione, Hiroshi Yoshino, Akashi Mochida: Development of a Coupled CFD-Multizone Method for Indoor Air Quality Analysis, Proceedings of Roomvent 2007, 184, Helsinki, Finland, June 13-15, 2007
31. Mitsutoshi Fujikawa, Hiroshi Yoshino, Rie Takaki : Measurement method of multi-zone airflow rate using human expiration, Palenc 2007, Crete Island, Greece, 2007.8
32. 藤川 光利、吉野 博、高木 理恵、奥山 博康、林 基哉、菅原 正則：居住者の呼気を用いた多数室換気量の測定 換気実験棟を対象とした測定精度の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp.665-666、福岡、2007.8
33. 藤川 光利、吉野 博、高木 理恵、奥山 博康、林 基哉、菅原 正則：居住者の呼気を利用した換気量推定方法の提案 ー換気実験棟を対象とした測定精度の検証ー、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.1071-1074、仙台、2007.9
34. Mitsutoshi Fujikawa, Hiroshi Yoshino, Rie Takaki : Development of Ventilation Measurement Method Using Human Expiration - Experimental Study for Estimation Accuracy -, IAQVEC2007, Sendai, 2007.10
35. Hiroshi Yoshino, Rie Takaki, Kuniaki Mihara, Khoukhi Maatouk : Performance Measurement of Mechanical Ventilation Systems for Occupied Houses in Japan, International Workshop on Residential Mechanical Ventilation, pp.75-80, Tsukuba, 2007.5
36. Aki Nakamura, Hiroshi Yoshino, Mariko Yoshida, Koichi Ikeda, Atsuo Nozaki, Kazuhiko Kakuta, Sachiko Hojo, Hideaki Yoshino, Kentaro Amano, Satoshi Ishikawa: FIELD SURVEY AND STATISTICS ANALYSIS ON IAQ, BUILDING PERFORMANCE AND OCCUPANT'S HEALTH OF 60 HOUSES IN JAPAN, Proceedings of The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC), Sendai, Japan, Vol.1, 535-540, Oct.28-31, 2007
37. Jacques Ndione, Hiroshi Yoshino, Akashi Mochida: IMPACT OF MULTIZONE MODEL BOUNDARY CONDITIONS ON THE CFD PREDICTION OF ROOM AIRFLOW AND CONTAMINANT CONCENTRATIONS DISTRIBUTION, Proceedings of The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC), Sendai, Japan, Vol.2, 467-474, Oct.28-31, 2007

38. Mitsutoshi Fujikawa, Hiroshi Yoshino, Rie Takaki, Hiroyasu Okuyama, Motoya Hayashi, Masanori Sugawara: DEVELOPMENT OF VENTILATION MEASUREMENT METHOD USING HUMAN EXPIRATION - EXPERIMENTAL STUDY FOR ESTIMATION ACCURACY -, Proceedings of The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC), Sendai, Japan, Vol.3, 177-184, Oct.28-31, 2007
39. 中村安季, 吉野 博, 吉田真理子, 池田耕一, 野崎淳夫, 角田和彦, 北條祥子, 吉野秀明, 天野健太郎, 石川 哲: 60 軒の住宅における居住者の健康と居住環境に関する調査研究, 室内環境学会総会東北大会, 150-151, 2007. 12

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

特になし

目 次

第1章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	既往の研究	3
1.2.1	住宅における室内空気汚染とその対策	3
1.2.2	シックハウス問題と建築基準法の改正	5
1.2.3	機械換気設備の換気量測定・予測に関する研究	9
1.2.4	研究代表者及び研究分担者の関連研究	11
1.3	研究の目的と報告書の構成	13
1.3.1	研究の目的	13
1.3.2	報告書の構成	13
	参考文献	15

第2章 設計段階における事前評価方法とシミュレーションツールの検討

2.1	はじめに	21
2.2	簡易換気設計シミュレーションツールの開発	21
2.2.1	はじめに	21
2.2.2	従来の換気量の計算方法	21
2.2.3	開口の置換による換気量の算定方法	22
2.2.4	置換方法の精度の検証	26
2.2.5	実大住宅モデルでの換気量の計算の試み	27
2.2.6	まとめ	30
2.3	COMIS と CFD 解析の連成計算に関する検討	31
2.3.1	Introduction	31
2.3.2	Coupling of Multizone and CFD models	31
2.3.3	Analysis of the Combined Program	36
2.3.4	Coupling Algorithm	44
2.3.5	Experimental validation	46
2.3.6	Application of the Coupled Program	51
2.3.7	Conclusion	56
2.4	建物の隙間特性に関する測定	57
2.4.1	はじめに	57
2.4.2	モデルハウスを対象とした建具の気密性能測定	57
2.4.3	天井裏等の建物内部空間からの汚染物質の室内侵入に関する研究	62
2.5	室内化学物質濃度の予測手法の開発と換気による汚染質制御	76

2.5.1	はじめに	76
2.5.2	家電製品・生活用品からの化学物質放散量の測定	76
2.5.3	室内化学物質濃度の予測と換気による汚染質制御	86
2.5.4	まとめ	100
	参考文献	102

第3章 施工後・居住後における性能検証のための現場測定法の検討

3.1	はじめに	105
3.2	PFT法（東大柳沢研究室製）の検討	105
3.2.1	はじめに	105
3.2.2	人工気象室におけるPFT法測定精度検証実験	106
3.2.3	4種類のトレーサーガスを用いたPFT法実験	113
3.2.4	4種類のトレーサーガスを用いたPFT法再実験	131
3.2.5	数値計算による実験結果の検討	142
3.2.6	COMISを用いた数値解析による測定器の最適な設置位置の検討	145
3.2.7	CFDを用いた数値解析による測定器の最適な設置位置の検討	160
3.2.8	まとめ	221
3.3	居住状態における換気量測定法の検討	223
3.3.1	実測概要	223
3.3.2	実測結果	227
3.4	3つの換気量測定法の比較	242
3.4.1	はじめに	242
3.4.2	排気口における風量測定と一定濃度法の比較	243
3.4.3	排気口における風量測定とPFT法の比較	244
3.4.4	一定濃度法とPFT法の比較	245
3.5	機械換気システムの給排気口における風量測定とメンテナンスに関する調査	246
3.5.1	はじめに	246
3.5.2	対象住宅の概要	246
3.5.3	メンテナンスに関する居住者へのヒアリング調査結果	247
3.5.4	フィルター等の汚れに関する調査	252
3.5.5	フィルター等の清掃前後における給排気口の風量の比較	255
3.6	kファクター法による換気量測定	258
3.6.1	はじめに	258
3.6.2	実測概要	258
3.6.3	実測結果	261
3.6.4	まとめ	262
3.7	居住者の呼気を用いた換気量測定	263

3.7.1	はじめに	263
3.7.2	測定法の概要	263
3.7.3	実在住宅における換気量測定法の試行	265
3.7.4	まとめ	278
3.8	特殊な換気システムに対応した性能検証の検討	279
3.8.1	床下等をダクトスペースとして利用する換気システムの性能検証	279
3.8.2	熱交換器付き換気システムの性能検証	380
3.9	まとめ	443
	注釈	444
	参考文献	447

第4章 実在住宅におけるコミッショニングの適用と 総合的なコミッショニング手法の検討

4.1	はじめに	451
4.2	実在住宅を対象とした設計段階・施工後におけるコミッショニングの適用	451
4.2.1	はじめに	451
4.2.2	対象住宅の概要	451
4.2.3	設計段階におけるコミッショニング	459
4.2.4	施工後におけるコミッショニング	462
4.2.5	まとめ	464
4.3	各種の換気システムに対応した各段階における性能評価の検討	465
4.3.1	性能評価の必要性	465
4.3.2	住宅性能表示制度の現状	466
4.3.3	住宅換気システムの要求性能と評価項目	468
4.3.4	住宅性能表示制度への適用のための評価項目と測定法の検討	470
4.4	まとめ	473
	参考文献	474

第5章 結論

5.1	研究の成果	475
5.2	今後の課題と展望	482

付録

付録-1	換気計算プログラム COMIS の概要	485
付録-2	CFD を用いた乱流数値シミュレーション手法	494

謝辞

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

地球規模の温暖化への対応を図るため、1999年に改正されたいわゆる次世代省エネルギー基準により住宅の断熱・気密性能が規定されるようになり¹⁻¹⁾、住宅の断熱化・気密化が更に進みつつある。住宅の気密化は、漏気による熱負荷の低減、結露の防止、計画的な換気の実現などのために有効であるが、気密住宅において換気が不十分な場合、建材や什器に多用される化学物質などにより室内空気が汚染されやすくなり、居住者の健康被害を引き起こすシックハウスの原因となる可能性が高い。

従来の住宅と比較して自然換気量の少ない気密住宅では、室内空気環境を清浄に維持しシックハウスを防止するために、機械換気システムが導入され始めるようになった。この動きは、2002年7月の建築基準法の改正へと繋がり、シックハウス防止対策として、有害な化学物質を含有する建材の使用量を制限するとともに、住宅への機械換気設備の義務付けなどにより、居室において換気回数0.5回/h以上の換気量を確保することが規定された^{1-2) 1-3)}。しかしながら、これまでシックハウスの実態把握を目的として行ってきた実測結果(図1-1-1)^{1-4) 1-5) 1-6)}によると、機械換気システムの設置された住宅では、換気設計が一応行われているはずであるが、機械換気システムの設置された調査住宅のうち、換気回数0.5回/hが確保されているのは数件にすぎない。また、各室の換気回数にも大きな分布があり、2階の居室では換気回数は0.2回/h程度しかない例も多い。このような問題を解決するためには、実在住宅における換気性能の実態を把握し、換気量不足の原因を探り対処法を考える必要がある。一方で、換気回数0.5回/h以上を確保するために換気ファンの風量を増大させることは容易であるが、換気負荷の増大による冷暖房負荷の増加を招く。即ち、空気汚染防止のための換気とエネルギー消費は相反するものであり、適切な換気量を確保するためには、換気量、室内温熱環境、エネルギー消費量のトレードオフに関する検討が不可欠である。

換気量の測定法に関しては、これまでに数多くの研究が行われており、その手法は多岐に渡る。実在住宅において換気性能の実態を把握するためには、各測定法の測定項目、測定機器、測定期間、適用条件、適用範囲、居住者や測定者への負担などを考慮し、適切な測定法を選定し適用しなければならない。特に、居住状態において換気量を測定する場合、居住者への負担を最小限に抑えた手法が望まれる。

2005年2月に京都議定書が発効されたことにより、地球温暖化防止への動きは更に活発になり、京都議定書の中で掲げられたCO₂の削減目標を達成するために、民生部門でもエネルギー消費量の大幅な削減が要求されている。このような動きの中で、近年、シックハウス防止および省エネルギー促進を目的とした新しい機械換気システムが登場し始めている。建物全体の換気を行うことにより建物の耐久性を高め、床下・壁体内・小屋裏等の内部空間で発生する有害な化学物質の濃度を低減させる、内部空間をダクトスペースとして利用した換気システム、熱交換換気を行うことにより冷暖房負荷を削減する熱交換器付き換気システムが、その例として挙げられる。このような新しい換気システムの測定事例は数少なく、換気性能の評価手法も確立されていないのが

現状である。

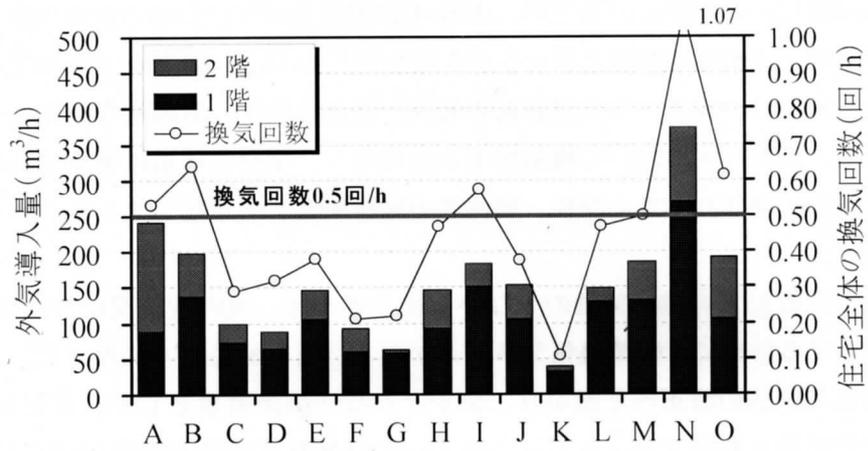


図 1-1-1 各階の外気導入量と住宅全体の換気回数の比較
(測定対象：機械換気システムを保有する住宅)

1.2 既往の研究

1.2.1 住宅における室内空気汚染とその対策

図 1-2-1 に、人体の全物質摂取量を示す¹⁻⁷⁾。食料や飲料と比較して、空気の摂取量は非常に大きい。特に、室内空気は約 6 割を占めており、90%以上の時間を室内で過ごす現代人のライフスタイルを反映した結果となっている。従って、室内空気を清浄に維持することは、居住者が安全で快適に過ごす上で非常に重要なことであるが、視覚的に認識できない空気に対して、居住者は無防備であり、食料や飲料と比較して関心が薄いのが現状である。

住宅内で問題となる汚染物質としては、開放型燃焼器具から発生する二酸化炭素や一酸化炭素、窒素炭化物、湿気のある環境で繁殖するカビやダニ、台所で発生する煙や臭い、建材や什器などから発生する様々な揮発性有機化合物などが挙げられる。表 1-2-1 に、空気調和・衛生工学会の換気規格によって定められた室内空気汚染物質の設計基準濃度の許容値を示す¹⁻⁸⁾。二酸化炭素は、居住者の呼気にも含まれており、その室内濃度は室内空気汚染の指標として用いられている。開放型燃焼器具による汚染は、密閉型暖房器具の普及、ガスコンロやガスオーブンに代わる電気式調理器具の開発と導入により減少している。一方で、生活水準の向上のために、化学物質を原料とした経済性や利便性の高い建築材料や家庭生活用品が急激に増加しており、住宅の気密化の進行に伴いシックハウス問題へと発展することになった^{1-9) 1-10) 1-11)}。また、ごく最近では、建材に含まれているアスベストによる健康障害（中皮腫）が大きな問題になっている。

室内の汚染物質の濃度 C は、原理的には式 1-2-1 に示すように、室内における汚染物質の発生量 K と換気量 Q により決定される。なお、式 1-2-1 では、瞬時一様拡散、すなわち、室内で発生した汚染物質によって汚染された空気、換気によって室内に供給された新鮮空気が、室内に瞬時に一様に拡散することが前提となっている。

$$C = K / Q \quad (1-2-1)$$

C : 汚染物質の室内濃度 (外気濃度基準) K : 汚染物質の発生量 Q : 換気量

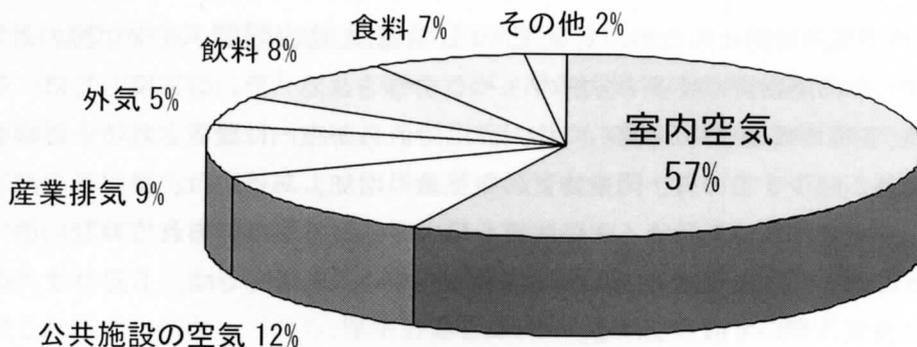


図 1-2-1 人体の全物質摂取量 (質量比)

表 1-2-1 室内空気汚染物質の設計基準濃度の許容値

(a) 総合的指標としての汚染質と設計基準濃度

汚染質	設計基準濃度*3	備考
二酸化炭素*1	1000 ppm	ビル管理法*2の基準を参考とした

(b) 単独指標としての汚染質と設計基準濃度

汚染質	設計基準濃度	備考
二酸化炭素	3500 ppm	カナダの基準を参考とした
一酸化炭素	10 ppm	ビル管理法の基準を参考とした
浮遊粉塵	0.15 mg/m ³	ビル管理法の基準を参考とした
二酸化窒素	210 ppb	WHO*2の1時間基準値を参考とした
二酸化硫黄	130 ppb	WHOの1時間基準値を参考とした
ホルムアルデヒド	0.08 ppm	WHOの30分基準値を参考とした
ラドン	150 Bq/m ³	EPA*2の基準値を参考とした
アスベスト	10 本/L	大気汚染防止法の基準を参考とした
総揮発性有機化合物 (VOC)	0.3 mg/m ³	WHOの基準値を参考とした

- *1 二酸化炭素の設計基準濃度 1000ppm は、二酸化炭素自体の健康影響に基づくものではない。室内に存在する各種汚染物質の個別の発生量が定量できない場合、二酸化炭素の濃度がこの程度になれば、それに比例して他の汚染物質の濃度も上昇するであろうと推定する際に用いる。
- *2 建築物環境衛生管理基準をビル管理法、世界保健機関を WHO、米国環境保護庁を EPA と記した。
- *3 設計基準濃度のうち [ppm] [ppb] で記したものは、質量濃度を 25℃、1 気圧にて体積濃度に換算した。

従って、汚染物質の濃度を低くするためには、汚染物質の発生量を小さくする、または、換気量を大きくする必要がある。しかし、前述したように、近年、省エネルギーに対する社会的な要請が強くなっており、暖冷房負荷を増加させることなく、換気量は必要最小限に抑えることが望ましい。

表 1-2-2 に、室内空気汚染防止のための対策を示す。対策は、基本的に、①発生源の対策、②適切な換気、③発生した汚染物質の吸着・分解の 3 つに分類される¹⁻¹²⁾。③に関しては、近年、高性能の空気清浄機、各種の吸着建材が開発されており、それらが室内に設置されている場合には、汚染物質の濃度自体が減少するので、汚染物質の発生量の増加、あるいは、換気量の減少が許容される。しかし、空気清浄機はあらゆる汚染物質を除去するようには作られていないので、換気量を削減することについては慎重に対応しなければならない。本研究では、上記の 3 つの対策のうち、②の適切な換気について取り上げる。

表 1-2-2 室内空気汚染防止の対策

1. 発生源対策	1-1 汚染物質の発生原因を作らない、持ち込まない (1) 適切な建材、施工材の使用 ・化学物質の放散量の少ない構造用建材、床材、畳、壁紙、接着剤、塗料などを使用する (2) 適切な建材、施工材の使用 ・床下防蟻処理の不要なべた基礎とする ・対腐朽性、対蟻性のある樹種の心材を使用する (3) 家具、什器、生活用品の選択 ・化学物質の放散がある家具、什器などを持ち込まない ・化学物質、薬剤が含まれる芳香剤、洗剤、防虫剤などの使用を控える
	1-2 汚染物質の発生を抑える (1) 発生源の封じ込め ・特殊な塗料、シートで発生源を覆う (2) 発生源の強制揮発(ベイクアウト) ・空間を暖め強制的に揮発させて除去する
2. 適切な換気	2-1 入居前の換気 ・窓を開放して可能な限り換気する
	2-2 適切な換気システムによる入居時の常時換気 ・必要換気量を確保し、押入れ等の収納スペースも含めて家全体を換気する
3. 発生した汚染物質の吸着・分解	3-1 建材・ボード・シートの利用 ・塗料材料(珪藻土、漆喰、シラスなど) ・塗料・塗布液体(木炭粉、薬剤など) ・浄化シート(木炭粉、吸着剤など) ・吸着・分解ボード(ゼオライト、光触媒など)
	3-2 空気清浄機の使用 ・フィルタろ過(活性炭、吸着剤など) ・分解除去(プラズマ放電、光触媒、オゾン脱臭など)

1.2.2 シックハウス問題と建築基準法の改正

シックハウスの定義には様々なものがあるが、厚生労働省の参考定義によると、「住宅の高気密化や化学物質を放散する建材・内装材の使用等により、新築・改築後の住宅やビルにおいて、化学物質による室内空気汚染等により、居住者の様々な体調不良が生じている状態が、数多く報告されている。症状が多様で、症状発生の仕組みをはじめ、未解決な部分が多く、また様々な複合要因が考えられることから、シックハウス症候群と呼ばれる。」とされている。シックハウス問題が重要視されるようになってから、厚生労働省は、ホルムアルデヒドに関するガイドラインを1997年に定めたのを皮切りに、特に問題になっている揮発性有機化合物に関するガイドライン化を進めた。表 1-2-2 に、そのガイドライン値を示す¹⁻¹³⁾。

表 1-2-3 厚生労働省のガイドライン値

揮発性有機化合物名	主な用途	室内濃度指針値*1	設定日
ホルムアルデヒド	接着剤、防腐剤	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)	1997.6.13
アセトアルデヒド	接着剤、防腐剤	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03ppm)	2002.6.13
トルエン	油性ニスなど塗料の有機溶剤	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)	2002.6.13
キシレン	油性ペイントなど塗料の有機溶剤	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20ppm)	2002.6.13
パラジクロロベンゼン	防虫剤、芳香剤	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2002.6.13
エチルベンゼン	油性ラッカーなど塗料の有機溶剤	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88ppm)	2002.6.13
スチレン	樹脂や合成ゴムの原材料	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05ppm)	2002.6.13
クロルピリフォス	防蟻剤、木材保存剤	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppb) (小児の場合は0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2002.6.13
フタル酸ジ-n-ブチル	塗料、顔料、接着剤、可塑剤*2	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)	2002.6.13
テトラデカン	塗料の有機溶剤	330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	2002.6.13
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	可塑剤*2、塗料	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.6ppb)	2002.6.13
ダイアジノン	防虫・防ダニ剤(量)	0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppb)	2002.6.13
フェノブカルブ	防蟻剤	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.8ppb)	2002.6.13
総揮発性有機化合物(TVOC)		暫定目標値400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2002.6.13

*1：両単位の換算は25°Cの場合による *2：材料に柔軟性を持たせるために使用する薬剤

シックハウスによる健康被害報告の増加に伴い、1990年代中頃から化学物質による室内空気汚染の実態調査研究が精力的に行われるようになった。2000年には、大澤らが5000件の実在住宅を対象とした全国的な室内空気環境実態調査を実施しており、この中で、化学物質の濃度と換気量の関係について言及している¹⁻¹⁴⁾。換気システムに関しては、24時間連続機械換気設備を備えた住宅が1060件あり、その中の約14%が換気設備を使用していないという状況で、ホルムアルデヒドの換気設備の連続運転による濃度低減効果は約10%程度、トルエン、キシレン、エチルベンゼンの低減効果は更に小さかった。この結果より、24時間換気設備の設置と運転による濃度低減効果あるいは設計上の換気回数増加は、予測されるほど明らかではなく、換気設備の設計や運転実態の把握が今後の調査課題であるとしている。

シックハウス防止対策として、2002年7月に建築基準法が改正され、関連する法令が2003年7月に施行された^{1-2) 1-3)}。規制対象となる化学物質は、接着剤や防腐剤に使用されるホルムアルデヒドと、防蟻剤や木材保存剤に使用されるクロルピリフォスである。このうちホルムアルデヒドに関しては、前述した室内空気汚染の対策に基づき、建築材料(①発生源の対策)と換気設備(②適切な換気)が相互に関係する技術的基準が定められている。

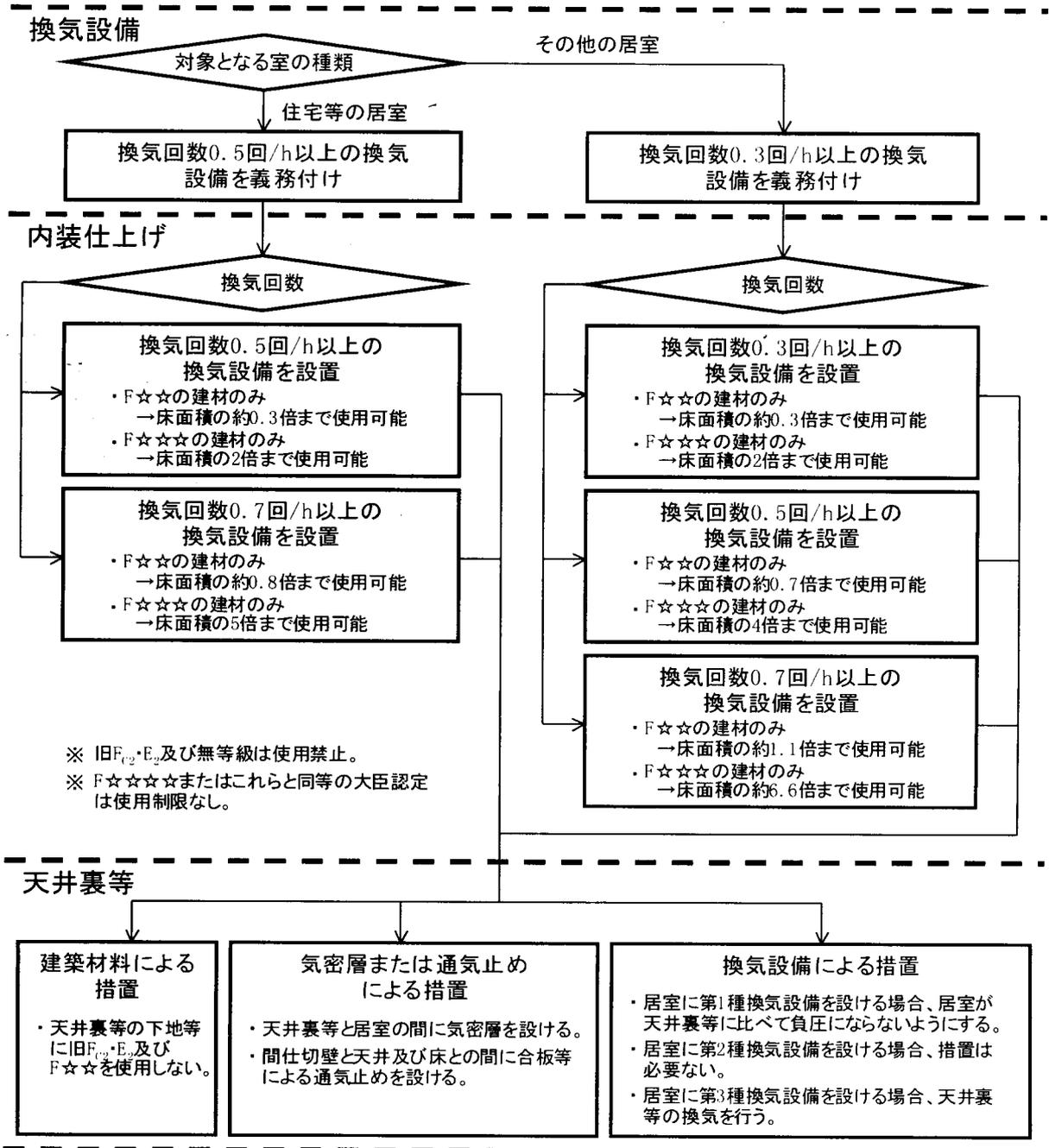


図1-2-2 建築基準法の改正内容（ホルムアルデヒドに関する基準）
 （換気設備の設置免除の場合は除く）

表 1-2-4 日本農林規格 (JAS) による
合板および複合フローリングのホルムアルデヒド放散量規格

建築基準法改正前			建築基準法改正後			備考
表示記号	基準値		表示記号	基準値		
	平均値	最大値		平均値	最大値	
			F☆☆☆☆	0.3mg/L	0.4mg/L	追加
F _{C0}	0.5mg/L	0.7mg/L	F☆☆☆	0.5mg/L	0.7mg/L	
F _{C1}	1.5mg/L	2.1mg/L	F☆☆	1.5mg/L	2.1mg/L	
F _{C2-S}	3.0mg/L	4.2mg/L	F☆S	3.0mg/L	4.2mg/L	集成材のみ
F _{C2}	5.0mg/L	7.0mg/L	F☆	5.0mg/L	7.0mg/L	上記以外

表 1-2-5 日本工業規格 (JIS) による建材 (ボード) のホルムアルデヒド放散量規格

建築基準法改正前		建築基準法改正後			備考
表示記号	基準値	表示記号	基準値		
			平均値	最大値	
		F☆☆☆☆	0.3mg/L	0.4mg/L	追加
E0	0.5mg/L	F☆☆☆	0.5mg/L	0.7mg/L	
E1	1.5mg/L	F☆☆	1.5mg/L	2.1mg/L	
E2	5.0mg/L				

図 1-2-2 に、ホルムアルデヒドに関する技術的基準 (機械換気設備の設置免除の場合は除く)、表 1-2-4・1-2-5 に、JAS および JIS で定められている建材のホルムアルデヒド放散量規格を示す。基本的な対策は、①原則として、全ての住宅に機械換気設備の設置を義務付けること (令第 20 条の 6、告示第 273、274 号)、②内装仕上げに使用するホルムアルデヒドを放散する建材の面積制限を行うこと (令第 20 条の 5 第 1 項第三～五号、告示第 1113～1115 号)、③天井裏から居室へのホルムアルデヒドの流入を抑制するための必要な措置が講じられること (告示第 274 号第 1 第三号) の 3 つである。

①に関しては、通常の状態における 30 分間平均のホルムアルデヒド濃度を、前述した厚生労働省のガイドライン値 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下に維持するために、建築材料の規制と併せて、(a) 機械換気設備 ((b) 以外)、(b) 空気を浄化して供給する方式の機械換気設備、(c) 中央管理方式の空気調和設備のいずれかの設置が義務付けられ、住宅等の居室で換気回数 0.5 回/h 以上の換気が確保できる有効換気量を有することが明記されている。従って、今後、様々な機会に換気量の測定が必要となることが予想される。「居室」については、「居住、執務、作業、集会、娯楽その他これらに類する目的のために継続的に使用する室をいう」と定義されており、住宅では居間・寝室・食堂等が相当し、浴室・トイレは居室ではないとされている (法第 2 条第四号)。また、収納スペース (押入れ、造り付け収納、小屋裏収納、床下収納、ウォークインクローゼット等) は、原則として③の規制対象である天井裏等に含まれる (告示第 274 号第 1 第三号)。いずれも、ドアのアンダーカット等を設け、建機計画上居室と一体的に換気を行う場合は、居室として取り扱われる (令第 20 条の 5 第 1 項第二号)。

建築基準法の改正は、実態調査の研究成果に基づいて行われている。以下に、その根拠となった主な事項と具体的な対応について述べる¹⁻¹³⁾。

- ① 開口部が締め切られる冬期よりも、材料温度が上昇してホルムアルデヒドの放散性が高まる夏期の危険性の方が高い。→28℃の夏期を想定した放散性試験結果に基づき、室内外温度差に伴う自然換気量が減少した条件下での換気シミュレーションをその規制根拠として採用している。
- ② 断熱性向上に対する社会的要請、内部結露防止を意図した防湿施工の普及による躯体の気密化の進行により、20年前と比べてその隙間量は数分の1まで減少した。当初、小屋裏や躯体内部から居室への汚染物質流入の阻止に寄与すると期待されていたこの隙間量の減少は、躯体内の空間が連続した我が国の住宅においては、相当量の汚染物質が移動・流入を引き起こす危険性がある¹⁻¹⁵⁾。→躯体内部の放散源、換気設備による躯体内部と居室との圧力バランスについても、一定の規制を講じている。
- ③ 住宅の気密化により、室内外温度差や自然風のみ依存した自然換気では、安定した換気量を確保できない。→機械換気設備の設置を義務付けている。

1.2.3 機械換気設備の換気量測定・予測に関する研究

住宅において室内空気環境の清浄性を評価するため、以前から、瞬時一様拡散（室内で発生した汚染物質によって汚染された空気、換気によって室内に供給された新鮮空気が、室内に瞬時に一様に拡散すること）の仮定に基づき、換気量測定・予測に関する研究が幅広く行われている¹⁻¹⁶⁾。我が国では、1950年代には既に換気回数の測定例が認められ、その後、トレーサーガスによる測定法を中心に研究が進められた。空気調和・衛生工学会では、既往の研究成果と海外の文献調査結果に基づき、トレーサーガス法を用いた単一空間の換気量測定法に関する規格を2003年に整備している¹⁻¹⁷⁾。換気量の予測法に関しては、質点系多数室換気計算プログラムを用いた数値解析による評価が行われている¹⁻¹⁸⁾。このプログラムは、各室での瞬時一様拡散を仮定した上で、各室の代表温度や外部の気象条件等を予め与えた上で、各室の代表点の圧力あるいは流れの経路における流量を未知数として解くもので、大学等の研究機関や企業の研究所等で独自に開発されている。公開されているものの代表例として、COMISが挙げられる¹⁻¹⁹⁾。

このように、瞬時一様拡散を仮定した上での換気量測定・予測に関する研究が行われてきたわけだが、実際の空間ではそのような仮定は成立せず、室内で発生した汚染物質によって汚染された空気、換気によって室内に供給された新鮮空気には分布がある。この分布に影響を与える因子には、建物の気密性能、室内外温度差（給気温度と室内温度の差）、外部風速、換気方式、給排気口の位置、換気量の程度、室内空気の攪拌程度、暖冷房方式などがあり、これらの因子によって、分布の状態が大きく異なる。省エネルギーや快適性の観点から、少ない換気量で効率よく換気を行うことが求められるようになり、室内の気流分布や汚染物質の分配を考慮できる換気効率の概念に基づく評価方法が提案され、1980年代から各国で検討されている^{1-20) ~1-30)}。空気調和・衛生工学会では、既往の研究成果と海外の文献調査結果^{1-31) 1-32)}に基づき、換気効率の測定に関する規格を1997年に整備している¹⁻³³⁾。換気効率の予測法に関しては、CFD（数値流体力学）解析プログラムを用いた数値解析による評価が行われている^{1-34) ~1-37)}。

2003年7月に改正建築基準法が施行され、機械換気設備の義務付けにより、住宅の居室において換気回数0.5回/hを確保することが規定されてから、換気量の現場測定法に関する研究が盛んに行われるようになった。

現場における換気量の簡易測定法の1つとして、PFT法が挙げられる。PFT法は、トレーサーガスを用いるパッシブトレーサー法で、1982年にアメリカで考案された新しい換気量測定法である。1990年代にはスウェーデンのPentiaq社¹⁻³⁸⁾で研究・開発が進められ、ヨーロッパにおいて広く用いられているなど、海外では以前から研究が行われている^{1-39) ~1-44)}。国内でもPFT法に対する関心が高まっており、多くの研究機関で研究・開発が行われている段階である^{1-45) ~1-53)}。

李らは、居住状態における住宅の換気量測定法に関して、一定濃度法とPFT法（Pentiaq社製）の適用可能性を検討しており、一定濃度法やPFT法を用いる際には、トレーサーガスの注入点やサンプリング点の設置位置を、対象住宅における給排気方法、給排気口の位置、換気経路、居住者の生活行動を考慮して決定することが最も重要であることを明らかにしている。本研究でも一定濃度法やPFT法を用いて居住状態における住宅実測を行っており、この研究成果に基づき、トレーサーガスの注入点やサンプリング点の設置位置を決定している。また、一定濃度法とPFT法による換気量の測定結果と、質点系多数室換気計算プログラムCOMISを用いた数値解析による予測結果の比較を行い、精度の高い換気量の現場測定のためには、今後、数多くの調査が必要であると^{1-54) 1-55) 1-56)}。

トレーサーガスを使用しない簡易測定法としては、風量測定器による換気システムの給排気口の風量測定に関する研究が行われており、海外の文献調査、風量測定器の精度に関する調査等が実施されている^{1-57) 1-58) 1-59)}。

また、ごく最近、機械換気システムの運転実態を把握するために、換気システムのメンテナンスに関する調査が行われており、換気システム内のフィルター、ファン、ダクト等の汚れの実態が報告され、メンテナンス不足による風量低下が指摘されている^{1-60) ~1-64)}。

一方、シックハウス防止および省エネルギー促進を目的とした新しい機械換気システム（床下・壁体内・小屋裏等の内部空間をダクトスペースとして利用した換気システム、熱交換器付き換気システム^{1-65) 1-66)}が導入され始めているが、新システムに関する換気量測定法の研究事例は数少ないのが現状である。

1.2.4 研究代表者及び研究分担者の関連研究

(1) 住宅の換気システムの性能評価に関する研究経過・研究成果

研究代表者の吉野は、平成13年～15年度 基盤研究B(2)「気密住宅における換気設備性能と換気量・室内空気質等との関係についての全国的調査」（研究代表者：吉野、研究分担者：持田、池田、野崎 他2名）において、2001年冬期に東北、関東、九州の断熱気密化住宅23件について、気密性能、換気量、室内空気質などの実測調査を行った。特に換気量の測定に関しては、詳細測定が可能な一定濃度法による測定の結果、必要換気量を満たす住宅は少なく、特に2階での換気量が少ないなど、換気システムの問題点などを把握し、本研究課題の必要性を痛感した¹⁻²⁾（図1-1-1参照）。

(2) 簡易型の換気量測定方法の開発に関する研究経過・研究成果

研究代表者の吉野は、平成14年～16年度 基盤研究A(1)「物理的原理に基づく地球環境に配慮したパッシブ型換気量測定法の開発」（研究代表者：柳沢幸雄 東京大学大学院教授、研究分担者：吉野）において、小型サンプラーおよびドーザーを用いた簡易型の換気量測定法（PFT法）の開発を行い、東北地方の戸建て住宅数件を対象としてPFT法と一定濃度法、風量測定器による換気量の測定結果を比較した^{1-5) 1-6) 1-67)}（図1-2-3）。ここで開発したPFT法は、住宅の換気システムのコミッショニングにおける換気量測定に適用できると考えられるが、各測定方法で大きなばらつきも見られたため、その原因について、今後、詳細に追求し、測定精度の向上について検討する必要性を感じた。

(3) 換気システムの給気方式の検討に関する研究経過・研究成果

研究代表者の吉野は、平成11年～12年度 基盤研究B(2)「外壁給気口からの冷気による温熱不快感の形成機構の解明とその防除に関する研究」（研究代表者：吉野、研究分担者：持田、内海 他2名）において、実大模型実験と三次元CFD解析により、温熱不快感の原因となる外壁給気口からの冷気浸入防止のための給気方式について検討した。ここでの検討結果は、本研究課題において、換気システムの設計方法や改善方法のための基礎資料となると考えられる^{1-68) 1-69)}。

(4) 多数室熱・換気シミュレーションシステムの開発に関する研究経過・研究成果

研究分担者の内海は、平成12年～13年度 基盤研究B(2)「オブジェクト指向型の質点系熱・空気シミュレーション・システムの開発」（研究代表者：内海、研究分担者：吉野 他1名）において、建物の計画と管理に係る質点系の熱と空気についての連成シミュレーションツールを開発した。本シミュレーション・システムにより、①夏期の試験住宅の実測と多数室熱計算プログラムTRNSYSによる計算、②実在住宅の換気量の実測と多数室換気計算プログラムCOMISによる計算により、

ほぼ実現象を再現できることがわかった^{1-70) 1-71) 1-73) 1-74) 1-75) 1-76)}。ここで開発した質点系熱・空気シミュレーション・システムは、住宅の換気システムのコミッショニングにおいて、予測・評価ツールとして利用できると考えている。

(5) CFDによる都市環境の数値解析技術に関する研究経過・研究成果

研究分担者の持田は、平成13年～14年度 基盤研究B(2)「都市気候に基づく新たな都市気候解析図を利用した仙台のアーバン・クールスポット配置計画」(研究代表者：持田、研究分担者：吉野 他3名)において、都市気候、市街地温熱空気環境の数値解析技術の開発に取り組み、これを利用した緑地・河川の熱的効果の定量化の検討や市街地域での風速分布、建物の風圧分布等の検討を進めている^{1-77) 1-78) 1-79)}(図1-2-4)。ここで開発した熱・空気環境の数値解析技術は、上記4:の質点系熱・空気シミュレーション・システムと連成することにより、研究目的で掲げた建物内外の熱・空気環境のミクロ・マクロ解析が可能となる。

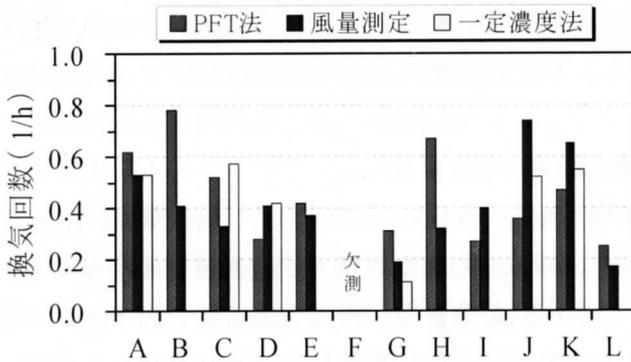


図 1-2-3 換気量の各測定方法の比較

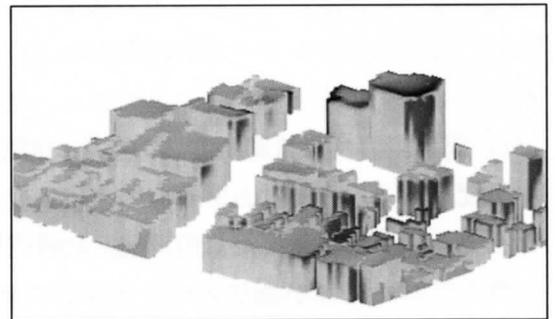


図 1-2-4 仙台市中心市街地の CFD 解析例

1.3 研究の目的と成果報告書の構成

1.3.1 研究の目的

前述した背景を受けて、シックハウス防止と省エネルギーを目的とした住宅換気システムの総合的コミッショニングのための新たな手法を提案するとともに、コミッショニングに必要となる設計支援・評価ツールを開発することを本研究の目的とする。

1.3.2 成果報告書の構成

図 1-3-1 に成果報告書の構成を示す。

第1章は序論として、研究の背景と目的、報告書の構成、既往の研究について述べる。

第2章では、設計段階における事前評価方法について述べる。事前評価を行うための数値解析ツールとして、簡易的に換気量を推定することが可能な換気設計シミュレーションツールを開発する。また、より詳細な解析が必要になった場合に用いる手法として、多数室質点系換気計算プログラム COMIS と数値流体解析プログラム CFD という2つの既存のツールを連成し、質点間の換気量を計算するためのマクロ解析と、対象ゾーンにおける空気の流れを計算するためのミクロ解析を同時に行う解析手法の開発を行う。更に、数値解析の精度を高めるために必要な建物の隙間特性と汚染質の放散特性について、測定法の検討とデータ収集を実施する。

第3章では、施工後・居住後における現場測定方法について述べる。居住状態で使用可能な換気量測定法を用いて実在住宅を対象とした実測を行い、実在住宅における換気量の実態、換気量不足の原因を把握するとともに、各測定法の適用方法や測定精度について検討する。特に、簡易的な測定法として注目されている PFT 法（東大柳澤研究室製）に関しては、実験棟を対象に実験と数値解析を行い、トレーサガスの発生位置及び捕集位置、4種類のトレーサガスを用いた場合の測定精度について検討する。また、近年、導入され始めている熱交換器付きシステムや床下等をダクトスペースとして利用するシステムといった特殊な換気システムの性能検証方法について検討する。

第4章では、実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行する。設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施する。そして、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施し、性能検証を行う。また、第3章で明らかになった実在住宅の換気量不足の解決、熱交換器付き換気システムや床下等をダクトスペースとして利用する換気システムのように、特殊な換気システムに対応した性能検証法の確立のため、2000年に制定された住宅性能表示制度をベースとした住宅換気システムの設計・竣工・運用段階における性能検証法を提案する。第2章・第3章で収集したデータ、検討した数値解析ツールや換気量等の測定法の適用方法について検討し、換気システムに関する評価項目、評価手順、使用する評価法などの基本事項について考察し整理する。

第5章では、本研究における研究成果を総括するとともに、住宅換気システムの総合的なコミッショニングに関する今後の課題と展望について言及し、結論とした。

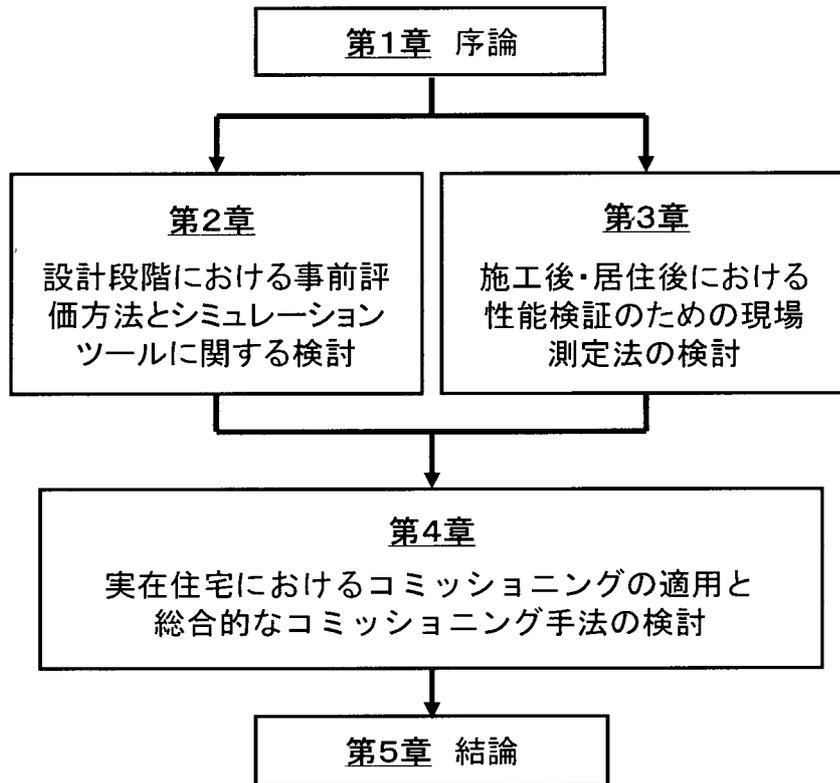


図 1-3-1 成果報告書の構成

第1章 参考文献

- 1-1) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅の次世代省エネルギー基準と指針、2000.9
- 1-2) 財団法人 日本建築設備・昇降機センター：2005年版 換気・空調設備技術基準・同解説、2005.5
- 1-3) 財団法人 日本建築センター：改正建築基準法に対応した建築物のシックハウス対策マニュアルー建築基準法・住宅性能表示制度の解説及び設計施工マニュアルー、2003.5
- 1-4) H. Yoshino, K. Amano, K. Ikeda, A. Nozaki, N. Iida, K. Kakuta, S. Hojo, S. Ishikawa : FIELD SURVEY ON INDOOR AIR QUALITY AND OCCUPANTS' HEALTH CONDITIONS IN SICK HOUSES, 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2002), Volume 4, pp.119-124, 2002.6
- 1-5) 吉野博, 大澤元毅, 桑沢保夫, 池田耕一 他3名：シックハウスに関連した室内空気質と換気量の調査研究 その1 調査の概要と宮城県内の住宅12件における換気量の測定結果、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.133-136、2002.9
- 1-6) 三田村輝章, 吉野博, 大澤元毅, 桑沢保夫, 天野健太郎：シックハウスに関連した室内空気質と換気量の調査研究 その2 宮城県内の住宅12件における室内空気質の測定結果、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.137-140、2002.9
- 1-7) 村上周三：室内環境と人体周辺の微気象ー化学物質汚染の防止の観点からー、空気調和・衛生工学会東北支部講演会資料、2000
- 1-8) 社団法人 空気調和・衛生工学会：換気規格 HASS102-1995 換気規準・同解説、1995
- 1-9) 池田耕一：室内空気汚染のメカニズム、鹿島出版会、1992
- 1-10) 田辺新一：室内化学汚染ーシックハウスの常識と対策ー、講談社現代新書、1998.1
- 1-11) 日本建築学会：シックハウス事典、技報堂出版、2001.9
- 1-12) 日本建築学会：室内空気質環境設計法、技報堂出版、2005.3
- 1-13) 健康住宅研究会：シックハウスを防ぐ最新知識ー健康な住まいづくりのためにー、技報堂出版、2005.3
- 1-14) 大澤元毅, 池田耕一, 林基哉, 桑沢保夫, 真鍋純, 中林由行：2000年全国実態調査に基づく住宅室内空気のVOC汚染の状況、日本建築学会環境系論文集、No.575、pp.61-66、2004.1
- 1-15) 林基哉, 大澤元毅：天井裏等の建物内部空間からの汚染物質の室内侵入に関する研究、室内空気対策実態調査・実証実験委員会資料、2005.3
- 1-16) 内海康雄, 小林仁：住宅用換気システムの評価手法開発の動向、IBEC、No.116、pp20-24、2000.1
- 1-17) 社団法人 空気調和・衛生工学会：SHASE-S 116-2003 トレーサーガスを用いた単一空間の換気量測定法、2003
- 1-18) H. E. Feustel and J. Dieris: A Survey of Air Flow Models for Multizone Structures, LBL-30288, Lawrence Berkeley Laboratory, 1991

- 1-19) J. M. Furbringer, C. A. Roulet and R. Borchiellini: Evaluation of COMIS, IEA Annex 23, 1996
- 1-20) AIVC Centre: AIVC Note 28, A Guide to Air Change Efficiency, 1990
- 1-21) 吉野博、長友宗重、小林仁: 気密住宅における集中換気システムの空気齢による性能測定、日本建築学会計画系論文集、第464号、pp.57-64、1994.10
- 1-22) 石川善美、佐々木睦史他: 人工気象室を用いた空気齢に基づく建物の換気性能評価に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、2000
- 1-23) 田野良輔、吉野博、小林仁、早瀬訓: 試験家屋における換気システムの空気齢による性能評価 その2 各種換気方式を対象とした実測の概要と実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp623-624、1996
- 1-24) 早瀬訓、吉野博、小林仁、田野良輔: 試験家屋における換気システムの空気齢による性能評価 その3 実測結果の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp625-626、1996
- 1-25) 小林仁、吉野博、早瀬訓: 漏入空気に対する空気齢の測定方法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp627-628、1996
- 1-26) 田野良輔、吉野博、小林仁: サンプルング方法が異なる場合の空気齢の比較検討 その1 測定概要と模型実験の結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp611-612、1997
- 1-27) 田野良輔、吉野博、小林仁: サンプルング方法が異なる場合の空気齢の比較検討 その2 試験家屋における測定結果および考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp613-614、1997
- 1-28) 白井正武、倉淵隆、吉原和正、澤地孝男: トレーサーガス減衰実験に基づく多数室間換気性状の評価法に関する研究 その1 任意の汚染質発生に対応した定常濃度の推定法について、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp937-938、1998.9
- 1-29) 白井正武、倉淵隆、吉原和正、澤地孝男: トレーサーガス減衰実験に基づく多数室間換気性状の評価法に関する研究 その2 多数室換気性状評価法の検証実験および高气密住宅への適用結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp939-940、1998.9
- 1-30) 大沢広明、平松徹也、新井政広、和田拓也、小林仁、内海康雄: 空気齢に基づく実在住宅の換気システムの性能評価に関する研究 その1 第3種換気システムを持つモデル住宅における空気齢の実測、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp599-560、1999
- 1-31) ASHRAE: ASHRAE Standard 62, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality
- 1-32) ASHRAE: ASHRAE Standard 129, Measuring Air Change Effectiveness
- 1-33) 社団法人 空気調和・衛生工学会: 換気規格 HASS102-1997 換気規準・同解説、1997
- 1-34) 村上周三、加藤信介: 新たな換気効率指標と3次元乱流数値シミュレーションによる算出法、換気効率の評価モデルに関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、pp91-102、第32号、1986
- 1-35) 村上周三: CFDによる建築・都市の環境設計工学、東京大学出版会、2000
- 1-36) 持田灯: 建築・都市環境工学分野におけるCWE研究の最近の動向、日本風工学会誌、第86号、pp11-20、2001.1

- 1-37) 吉野博、持田灯、掛川敏正、三田村輝章、佐々木澄：実測と数値シミュレーションに基づく大空間の換気性状と結露発生メカニズムの解析、空気調和・衛生工学会論文集、第 88 号、pp1-11、2003.1
- 1-38) Description and accuracy of the PFT-homogeneous emission technique, The method of Pentiaq
- 1-39) Hans Stymne, Anita Eliasson: A New Passive Tracer Gas Technique for Ventilation Measurements, The National Swedish Institute for Building Research, 1991.9
- 1-40) Hans Stymne, Carl Axel Boman: MEASUREMENT OF VENTILATION AND AIR DISTRIBUTION, USING THE HOMOGENEOUS EMISSION TECHNIQUE - A VALIDATION, Healthy Buildings 94, 1994.8
- 1-41) Dietz, R. N. and Cote, E. A.: Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique, Environ. Internatl. 8, pp419-433, 1982
- 1-42) Dietz, R. N. and Goodrich, R. W.: Measurement of HVAC system performance and local ventilation using passive perfluorocarbon tracer technology, Prepared in part for the State University of New York, College of Technology, Farmingdale, NY. Informal Report, BNL-61990, June 1995.
- 1-43) Matz, Hill, Robert Gehrig, Viktor Dorer, Andreas Weber and Peter Hofer: ARE MEASUREMENTS OF AIR CHANGE RATES WITH THE PFT- METHOD BIASED BY SINK AND TEMPERATURE EFFECTS, Proceeding of Healthy Buildings 2000, Vol.2, pp333-338
- 1-44) M. H. Sherman: Analysis of Errors Associated with Passive Ventilation Measurement Techniques, Building and Environment, Vol. 24, pp131-139, 1989
- 1-45) 山口一、赤林伸一、坂口淳、山岸明浩、渡辺澄：新潟県の住宅における室内化学物質汚染に関する調査研究 その1 ホルムアルデヒド、VOC による室内化学物質汚染に関する実態調査、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 43 号、2000.7
- 1-46) 渡辺澄、赤林伸一、坂口淳、山岸明浩、山口一：新潟県の住宅における室内化学物質汚染に関する調査研究 その2 新築住宅における化学汚染物質の放散量に関する実測調査、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 43 号、2000.7
- 1-47) 坂口淳、赤林伸一、山口一、山岸明浩、渡辺澄：新潟県の住宅における室内化学物質汚染に関する調査研究 その3 PFT 法による換気回数と VOCs 濃度の関係、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 43 号、2000.7
- 1-48) 山口一、赤林伸一、坂口淳：新潟県の住宅における室内化学物質汚染の実態調査 その3 室内化学物質汚染とシェルター性能・住まい方に関する調査結果、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、D-2、pp661-664、2001.9
- 1-49) 坂口淳、赤林伸一、山口一、佐々木淑貴：新潟県の住宅における室内化学物質汚染の実態調査 その4 戸建新築住宅を対象とした化学物質濃度に関する実測調査、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、D-2、pp665-668、2001.9

- 1-50) 坂口淳、赤林伸一、山岸明浩、富永禎秀：空間一様発生法による住宅の換気量測定手法の開発研究—居住状態の化学物質放散量に関する調査研究—、住総研・研究年報 No29、2002
- 1-51) 奥泉裕美子、吉野博、熊谷一清、伊藤一秀、義之信司、藤井実、柳沢幸雄：換気回数の簡易測定方法に関する研究、室内環境学会総会講演集、2002.12
- 1-52) 奥泉裕美子、吉野博、熊谷一清、篠原直秀、藤井実、柳沢幸雄：換気量および室内 VOC 濃度同時測定法、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003.9
- 1-53) 野口美由貴、熊谷一清、吉野博、藤井実、奥泉裕美子、三原邦彰、柳沢幸雄：換気量および室内 VOC 濃度同時測定法—4 種類のトレーサーガス同時捕集、同時分析法の検討および実住宅における PFT 法による換気量測定の適応—、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp453-456、2004.9
- 1-54) 李重勳、吉野博、石川善美：居住状態にある住宅の換気量測定 —SF₆を用いた一定濃度法—、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp539-540、2000.9
- 1-55) 李重勳、吉野博、石川善美、劉京：居住状態における換気量の測定方法に関する検討、第23回人間-生活系シンポジウム報告集、1999
- 1-56) Lee J, Yoshino H, Ishikawa Y: Measurement of Air Change Rates in Currently Occupied Residences, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architecture Institute of Japan, Vol.2, pp.539-540, 2000
- 1-57) 田島昌樹：住宅用全般換気設備の風量測定について —スウェーデン風量測定方法と我が国の換気設備への適用について—、建築設備&昇降機、No.56、pp.35-39、2005.7
- 1-58) 田島昌樹、澤地孝男、岡部実、瓦口泰一、大澤元毅：住宅用換気システムの風量測定に関する研究 第2報 端末部材におけるフード式風量測定器の測定精度に関する実験、空気調和・衛生工学会論文集、pp365-368、2005.8
- 1-59) 社団法人 空気調和・衛生工学会：換気風量測定基準に関する最新技術動向、空気調和・衛生工学会シンポジウム資料、2006.2
- 1-60) 松下和彦、山田裕巳：換気システムの汚染に関する調査 その1 換気システムのお手入れに関する居住者意識と行動の調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp1035-1036、2005.9
- 1-61) 山田裕巳、松下和彦：換気システムの汚染に関する調査 その2 お手入れ期間とフィルターへの汚染付着量、風量低下率の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp1037-1038、2005.9
- 1-62) 村田さやか、高倉政寛、鈴木大隆、福島明、片岡尚、大西茂樹：積雪寒冷地域の集合住宅で発生する冬季換気障害の原因について —その3 換気経路の設計が風量低下に及ぼす影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp1027-1028、2005.9
- 1-63) 大西茂樹、片岡尚、高倉政寛、村田さやか、鈴木大隆、福島明：積雪寒冷地域の集合住宅で発生する冬季換気障害の原因について —その4 換気装置内の汚れが風量低下に及ぼす影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp1029-1030、2005.9

- 1-64) 佐々木博明、河地竜一、竹原成彦:住宅用換気システムのメンテナンスの研究 その1 経年的なダクトの汚れの実態について、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp1031-1032、2005.9
- 1-65) 石川和良、倉渕隆、嵐口晃宏、田島昌樹、澤地孝男、瀬戸裕直、平野剛:全熱交換器の有効換気量率評価法に関する研究 その1 各種全熱交換器の有効換気量率測定結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp767-768、2004.8
- 1-66) 平野剛、倉渕隆、嵐口晃宏、田島昌樹、澤地孝男、瀬戸裕直、石川和良:全熱交換器の有効換気量率評価法に関する研究 その2 全熱交換器のネットワークモデリング、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp769-770、2004.8
- 1-67) 奥泉裕美子、藤井実、熊谷一清、伊藤一秀、吉野博、柳沢幸雄:換気回数の簡易測定法に関する研究、室内環境学会総会講演集、pp.186-187、2002.12
- 1-68) 李振海、吉野博、持田灯:外壁給気口からの冷気による温熱不快感の形成機構の解明とその防除に関する研究 その2 CFDによる給気口の噴出し方向の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、Vol.D-2、pp.1087-1088、2001.9
- 1-69) 李振海、吉野博、内海康雄 他4名:外壁給気口からの外気導入による室内温度分布の形成に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.83、pp.91-98、2001.10
- 1-70) 筋野嘉章、内海康雄、小林仁 他3名:換気効率に基づくオフィス空間の換気性能評価に関する研究 -その1 各種測定方法による換気効率の差異の検討-、日本建築学会学術講演梗概集、環境工学I、pp.689-690、2001.9
- 1-71) 佐々木美徳、内海康雄、小林仁 他3名:タイトル:換気効率に基づくオフィス空間の換気性能評価に関する研究 -その2 各種換気システムにおける換気効率の検討-、日本建築学会学術講演梗概集、環境工学II、pp.691-692、2001.9
- 1-72) 山田慎人、内海康雄、小林仁、宮本麻理子:夏期における住宅室内の温熱環境の改善に関する研究 その3 ルーパーを設置した改良システムの実測、日本建築学会東北支部研究報告集、第63号、pp.225-228、2000.6
- 1-73) 宮本麻理子、内海康雄、小林仁、山田慎人:夏期における住宅室内の温熱環境の改善に関する研究 その4 TRNSYSを用いた温度変動の解析、日本建築学会東北支部研究報告集、第63号、pp.229-232、2000.6
- 1-74) 内海康雄、小林仁、周波、三田村輝章、吉野博:TRNSYSによる熱・空気シミュレーションについて その1 TRNSYSによるシミュレーションの概要、日本建築学会学術講演梗概集、環境工学II、pp.985-986、2000.9
- 1-75) 宮本真理子、内海康雄、小林仁、菅野雅博、吉野博:TRNSYSによる熱・空気シミュレーションについて その2 夏期における実験室の温度変動の解析、日本建築学会学術講演梗概集、環境工学II、pp.987-988、2000.9

- 1-76) 平松徹也, 内海康雄, 小林仁: 換気効率を用いた実在住宅における換気システムの性能評価に関する研究 その4 空気齢の簡易測定と COMIS/TRNSYS を用いた熱-換気総合シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, I-B11, pp.109-112, 2000.10
- 1-77) 大黒雅之, 村上周三, 森川泰成, 持田灯 他 4 名: CFD を利用した屋外温熱空気環境設計手法に関する研究 -川風の温熱空気環境改善効果の解析-, 日本建築学会技術報告集, 第16号, pp.185-190, 2002.12
- 1-78) 持田灯, 金相璣, 近藤裕昭 他 3 名: ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のための Software Platform の開発と風環境の解析事例, 第16回風工学会シンポジウム論文集, pp.137-142, 2000.11
- 1-79) A.Mochida, H.Yoshino, T.Takeda, T.akegawa: Methods for Controlling Airflow in and around Building under Cross-Ventilation for Improving Indoor Thermal Comfort, 11th International Conference on Wind Engineering, Preprints Volume 1, , pp.697-704, 2003

第2章

設計段階における事前評価方法と
シミュレーションツールの検討

2.1 はじめに

本章では、設計段階における事前評価方法について述べる。事前評価を行うための数値解析ツールとして、簡易的に換気量を推定することが可能な換気設計シミュレーションツールを開発する。また、より詳細な解析が必要になった場合に用いる手法として、多数室質点系換気計算プログラム COMIS と数値流体解析プログラム CFD という2つの既存のツールを連成し、質点間の換気量を計算するためのマクロ解析と、対象ゾーンにおける空気の流れを計算するためのミクロ解析を同時に行う解析手法の開発を行う。更に、数値解析の精度を高めるために必要な建物の隙間特性と汚染質の放散特性について、測定法の検討とデータ収集を実施する。

2.2 簡易換気設計シミュレーションツールの開発

2.2.1 はじめに

近年、建物の断熱化・気密化により、冷暖房時の省エネルギー性と室内の温熱的快適性は向上してきているが、その反面で室内空気質は低下しており、シックビルディング症候群、化学物質過敏症などが顕在化してきている。これらの問題に対処すべく、換気に関する基準法やガイドライン等^{2-1), 2-2), 2-3)}が整備されてきているが、これらに基づいて設計を行うためには、複雑な換気計算が必要となるため、十分普及しているとはいえない。

本研究では、簡易換気量設計ツールの開発を目的としている。今回は、複数個の開口を一つの開口に置換する方法を提案し、その精度について検証した上で、それらを基に、繰り返し計算を伴わない換気量の計算方法を示し、換気システムに設置される実大建物を想定したモデルを対象に、換気量の計算を試みた。

2.2.2 従来の換気量の計算方法

(1) 差圧と流量の関係

開口*i*の前後の差圧 ΔP_i [mmAq]と流量 Q_i [m³/h]の関係は、一般に式2-2-1や式2-2-2で表される。

$$Q_i = Q_{oi} \Delta P_i^{\frac{1}{n_i}} \quad (2-2-1)$$

$$\Delta P_i = aQ_i^2 + bQ_i \quad (2-2-2)$$

ここに、 n_i は隙間特性を示す係数1~2、 Q_{oi} は ΔP_i [mmAq]のときの流量[m³/h]、 a 、 b は隙間抵抗や摩擦抵抗より求めた係数とする。

(2) 換気量の算定方法

質点系モデルによる換気計算を行う場合、各節点*j*では、次のような収支式が成り立つ。

$$\sum c_{ij} Q_i = 0 \quad (2-2-3)$$

ここに、 c_{ij} は i から流入がある場合は 1、 i から流出がある場合は -1、流入も流出もない場合は 0 とする。

一般に、隙間特性係数が全て 1 または 2 の場合は、各収支式を連立して換気量を求めるが、その他の場合は、反復法によって換気量を求める^{2-4), 2-5)}。

2.2.3 開口の置換による換気量の算定方法

(1) 提案の概要

気密性能の測定では、対象空間に多数の開口が存在している場合や、換気システムが設置されている場合でも、測定時の差圧と流量の間に、式 2-2-1 の関係が認められる。これらを基に、隙間特性係数が異なる場合において、図 2-2-1 に示すように、複数の差圧と流量の式が一つに置換可能であると仮定し、それをういた繰り返し計算を伴わない換気計算方法を提案する。なお、今回はポテンシャル(温度差、風圧、ファン)が一つの場合を提案する。また、差圧と流量の関係式として、式 2-2-2 も用いることも考えられるが、この式は直列の場合での置換が容易である²⁻⁵⁾ 反面、並列の場合は計算が複雑であるため、今回は使用しない。

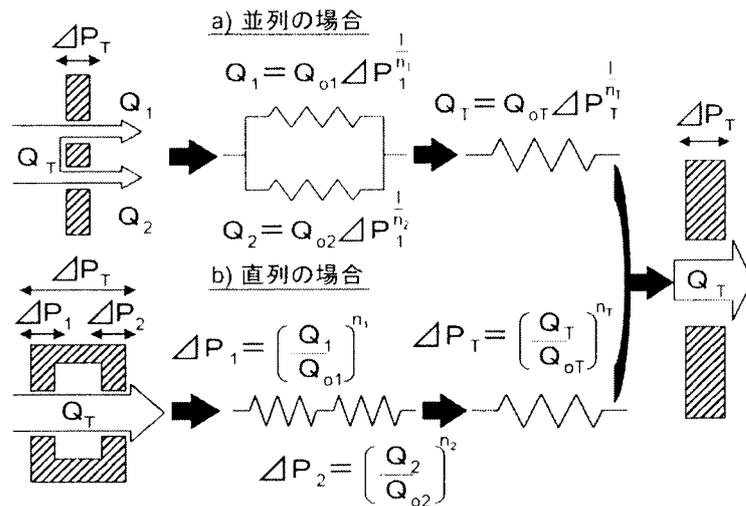


図 2-2-1 開口の置換

(2) 開口の置換方法

(a) テイラー展開に基づく指数関数の置換

関数 $f(x)$ のテイラー展開は、一般に式 2-2-4 のように表される。

$$f(x) \sim f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f^{(2)}(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (2-2-4)$$

ここに、 a はテイラー展開の中心値とする。

$f(x) = \alpha_i x^{\beta_i}$ (α_i, β_i は定数) に関して、 $f_1(x)+f_2(x)$ を $f_T(x)$ と置換可能であると仮定し、これらの式に二階微分項以降を無視して、テイラー展開式を代入すると、式 2-2-5 のように表せる。

$$\begin{aligned} & \alpha_1(1-\beta_1)a^{\beta_1} + \alpha_1\beta_1a^{\beta_1-1}x + \alpha_2(1-\beta_2)a^{\beta_2} + \alpha_2\beta_2a^{\beta_2-1}x \\ & = \alpha_T(1-\beta_T)a^{\beta_T} + \alpha_T\beta_Ta^{\beta_T-1}x \end{aligned} \quad (2-2-5)$$

上式が任意の x に対して常に成り立つために、次式を満たす必要がある。

$$\alpha_1(1-\beta_1)a^{\beta_1} + \alpha_2(1-\beta_2)a^{\beta_2} = \alpha_T(1-\beta_T)a^{\beta_T} \quad (2-2-6)$$

$$\alpha_1\beta_1a^{\beta_1-1} + \alpha_2\beta_2a^{\beta_2-1} = \alpha_T\beta_Ta^{\beta_T-1} \quad (2-2-7)$$

式 2-2-7 の両辺に a を掛け合わせ、式 2-2-6 と連立し α_T, β_T について解くと次式のように表せる。

$$\beta_T = \frac{\alpha_1\beta_1a^{\beta_1} + \alpha_2\beta_2a^{\beta_2}}{\alpha_1a^{\beta_1} + \alpha_2a^{\beta_2}} \quad (2-2-8)$$

$$\alpha_T = \frac{\alpha_1a^{\beta_1} + \alpha_2a^{\beta_2}}{a^{\beta_T}} \quad (2-2-9)$$

(b) 並列の場合

式 2-2-8 と式 2-2-9 の $\alpha_i \sim Q_{oi}, \beta_i \sim 1/n_i$ を代入し、 $a \sim$ それぞれ ΔP_{s1} と P_{s2} を代入すると、次式のようなになる。

$$\frac{1}{n_T} = \frac{\frac{Q_{o1}}{n_1} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_1}} + \frac{Q_{o2}}{n_2} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_2}}}{Q_{o1} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_1}} + Q_{o2} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_2}}} \quad (2-2-10)$$

$$Q_{o1} = \frac{Q_{o1} \Delta P_{s2}^{\frac{1}{n_1}} + Q_{o2} \Delta P_{s2}^{\frac{1}{n_2}}}{\Delta P_{s2}^{\frac{1}{n_T}}} \quad (2-2-11)$$

これらを複数個の開口に拡張すると次式になる。

$$\frac{1}{n_T} = \frac{\sum \frac{Q_{oi} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_i}}}{n_i}}{\sum Q_{oi} \Delta P_{s1}^{\frac{1}{n_i}}} \quad (2-2-12)$$

$$Q_{oT} = \sum \frac{Q_{oi} \Delta P_{s2}^{\frac{1}{n_i}}}{\Delta P_{s2}^{\frac{1}{n_T}}} \quad (2-2-13)$$

なお、 ΔP_{s1} 、 P_{s2} は、最小二乗法等を基に、 $0.1 < \Delta P < 10[\text{mmAq}]$ の範囲での置換による差異が最も小さくなるように、それぞれ 1.0、0.22 とする。

(c) 直列の場合

式 2-2-8 と式 2-2-9 の $\alpha_i \sim 1/Q_{oi}^{n_i}$ 、 $\beta_i \sim n_i$ を代入し、 $a \sim Q_{s1}$ 、 Q_{s2} をそれぞれ代入すると次式のようなになる。

$$n_T = \frac{\frac{n_1 Q_{s1}^{n_1}}{Q_{o1}^{n_1}} + \frac{n_2 Q_{s1}^{n_2}}{Q_{o2}^{n_2}}}{\frac{Q_{s1}^{n_1}}{Q_{o1}^{n_1}} + \frac{Q_{s1}^{n_2}}{Q_{o2}^{n_2}}} \quad (2-2-14)$$

$$\frac{1}{Q_{oT}^{n_T}} = \frac{\frac{Q_{s2}^{n_1}}{Q_{o1}^{n_1}} + \frac{Q_{s2}^{n_2}}{Q_{o2}^{n_2}}}{Q_{s2}^{n_T}} \quad (2-2-15)$$

これらを複数個の開口に拡張すると次式のようなになる。

$$n_T = \frac{\sum \frac{n_i Q_{s1}^{n_i}}{Q_{oi}^{n_i}}}{\sum \frac{Q_{s1}^{n_i}}{Q_{oi}^{n_i}}} \quad (2-2-16)$$

$$\frac{1}{Q_{oT}^{n_T}} = \sum \frac{\frac{Q_{s2}^{n_i}}{Q_{oi}^{n_i}}}{Q_{s2}^{n_T}} \quad (2-2-17)$$

なお、 Q_{s1} 、 Q_{s2} は $30 < Q < 300[\text{m}^3/\text{h}]$ の範囲での置換による差異が最も小さくなるように、それぞれ 95、44 とする。

(3) 差圧と流量の算定手順

(a) 並列の場合

図 2-2-1 で示したように、開口が並列に配置されている場合、全ての開口前後の差圧は一定である。流量の算定手順を図 2-2-2 に示す。

1) 差圧が既知の場合

差圧を、各開口の差圧と流量の関係式に代入して、流量を求める(a)。

2) 全体の流量が既知の場合

各開口を、式 2-2-12、式 2-2-13 を用いて一つに置換(b)した後、全体の流量をその式に代入し、差圧を求める(c)。差圧を基に、(1)と同様の手順で流量を計算する(a)。

(b) 直列の場合

図 2-2-1 で示したように、開口が直列に配置されている場合、全ての各開口で流量は一定である。差圧の算定手順を図 2-2-3 に示す。

1) 流量が既知の場合

全体の流量を、各開口の差圧と流量の関係式に代入して、差圧を求める(a)。

2) 全体の差圧が既知の場合

各開口を、式 2-2-16、式 2-2-17 を用いて一つに置換(b)した後、全体の差圧をその式に代入し、流量を求める(c)。それを基に、(1)と同様の手順で差圧を計算する(a)。

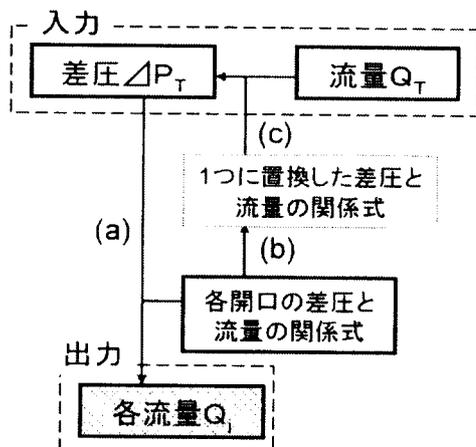


図 2-2-2 開口が並列の場合の流量の算定手順

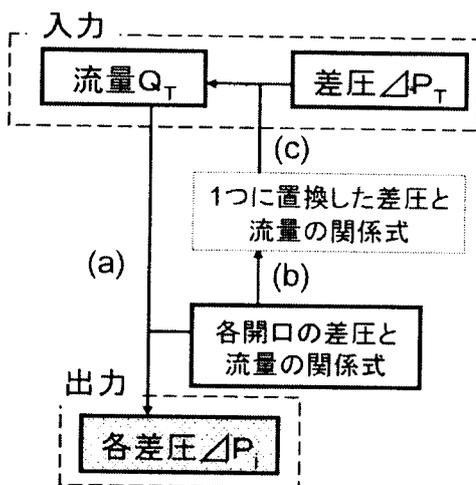


図 2-2-3 開口が直列の場合の差圧の算定手順

2.2.4 置換方法の精度の検証

(1) 計算概要

住宅の隙間と換気システムの開口 w_p 、一つに置換することを想定して、その換気の制度を計算により検証する。

(a) 住宅の隙間

表 2-2-1 に示すように、単位面積当たりの隙間の相当開口面積 $\alpha A'$ [cm^2/m^2] で 0.5/2.5/5.0、延べ床面積 A [m^2] を 20/100/200 とかえて 9 段階で変化させる。なお、隙間特性係数は 1 とする。

(b) 換気システムの開口

表 2-2-2 に示すように、3つの換気システム(a)、(b)、(c)のうちの一つを、1ないし2セット設置する。各換気システムは、(a)室内外用の $\phi 150$ のグリルから構成、(b)室内外用の $\phi 100$ のグリルと 50cm のダクトから構成、(c)室内外用の $\phi 100$ のグリルと 100cm のダクトから構成とし、開口面積はメーカーのカタログ値²⁻⁶⁾を基に、それぞれ 30/50/180 cm^2 とする。なお、隙間特性係数は 2 とする。

(c) 計算条件

1) 並列の場合

換気時におけるダクト内の差圧、住宅の室内外差圧を考慮し、圧力を 0.1~1.0 mmAq の間で 20 段階に変えて計算を行う

2) 直列の場合

一人当たりの必要換気量を 30 m^3/h 、滞在人数を、1~10 人と仮定し、換気量を 30~300 m^3/h の間で 20 段階に変えて計算を行う。

(2) 計算結果

(a) 並列の場合

条件ごとに各開口での流量を合計した値と、開口を一つに置換した後求めた全体の流量の差異(%:少数点以下を切り上げた値)を求め、それを基に、条件数を積算して、図 2-2-4 に示す。差異は-9%~7%の範囲に分布し、条件数は、差異-0%が約1割と最も多く、差異が大きくなるにつれて減少している。差異が最も大きい開口の組み合わせは、 Q_{01} が 15 m^3/h 、 Q_{02} が 60 m^3/h である。

(b) 直列の場合

条件ごとに各開口での差圧を合計した値と、開口を一つに置換した後求めた全体の差圧の差異を求める。条件数を積算して、図 2-2-4 に示す。差異は-9%~7%の範囲に分布、条件数は、差異 0%の範囲に入るデータが約2割と最も多く、差異が大きくなるにつれて減少している。また、差異が最も大きい開口の組み合わせは、 Q_{01} が 150 m^3/h 、 Q_{02} が 180 m^3/h である。

表 2-2-1 住宅の隙間相当開口面積

$Q_{01}(\text{cm}^2)$	$\alpha A'$ (cm^2/m^2)	$A(\text{m}^2)$		
		20	100	200
0.5	0.5	15	75	150
2.5	2.5	75	375	750
5.0	5.0	150	750	1500

表 2-2-2 換気システムの隙間相当開口面積

$Q_{02}(\text{cm}^2)$	換気システム		
	(a)	(b)	(c)
セット	1	30	50
数	2	60	100
			180
			360

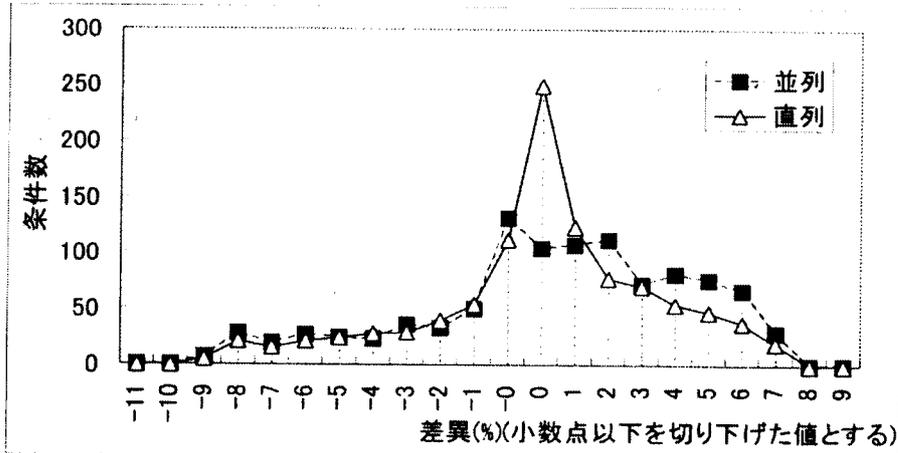


図 2-2-4 差異の分布

2.2.5 実大住宅モデルでの換気量の計算の試み

(1) 計算対象

図2-2-5に示すような、第3種換気システムが設置された3室から構成される建物を対象とする。各室の床面積は40 m²、高さ2.5m、単位床面積あたりの隙間相当開口面積は2.5 cm²/m²とする。換気システムによって、外気は室1に導入され、室2を経由して、室3より排出される。換気量は150 m³/hとする。差圧と流量の関係式は、換気設備はメーカーのカタログ²⁻⁶⁾、ドアの文献²⁻⁷⁾を基に、表2-2-3に示す。

(2) 置換の手順

式2-2-12、式2-2-13、式2-2-16、式2-2-17を基に図2-2-6のように、換気経路にそって開口を置換していく。置換後の差圧と流量の関係式を表2-2-4に示す

(3) 換気量の計算の手順

置換前後の差圧と流量の関係式を用いて、置換とは逆の流れで、図2-2-7に示すように、①～⑥の手順で差圧と流量を計算する。

表 2-2-3 差圧と流量の関係式

開口	関係式
A	$Q=33.3 \Delta P^{0.500}$ 式 2-2-18
B	$Q=100 \Delta P^{0.625}$ 式 2-2-19
C	$Q=240 \Delta P^{0.667}$ 式 2-2-20
D	$Q=100 \Delta P^{0.625}$ 式 2-2-21
E	$Q=240 \Delta P^{0.667}$ 式 2-2-22
F	$Q=100 \Delta P^{0.625}$ 式 2-2-23
G	$Q=37.7 \Delta P^{0.500}$ 式 2-2-24
H	$Q=59.2 \Delta P^{0.500}$ 式 2-2-25

表 2 置換後の差圧と流量の関係式

開口	関係式	置換の流れ
I	$Q=133 \Delta P^{0.589}$ 式 2-2-26	(α)
J	$Q=108 \Delta P^{0.611}$ 式 2-2-27	(β)
K	$Q=208 \Delta P^{0.618}$ 式 2-2-28	(γ)
L	$Q=142 \Delta P^{0.640}$ 式 2-2-29	(δ)
M	$Q=242 \Delta P^{0.634}$ 式 2-2-30	(ϵ)
N	$Q=31.2 \Delta P^{0.503}$ 式 2-2-31	(ζ)

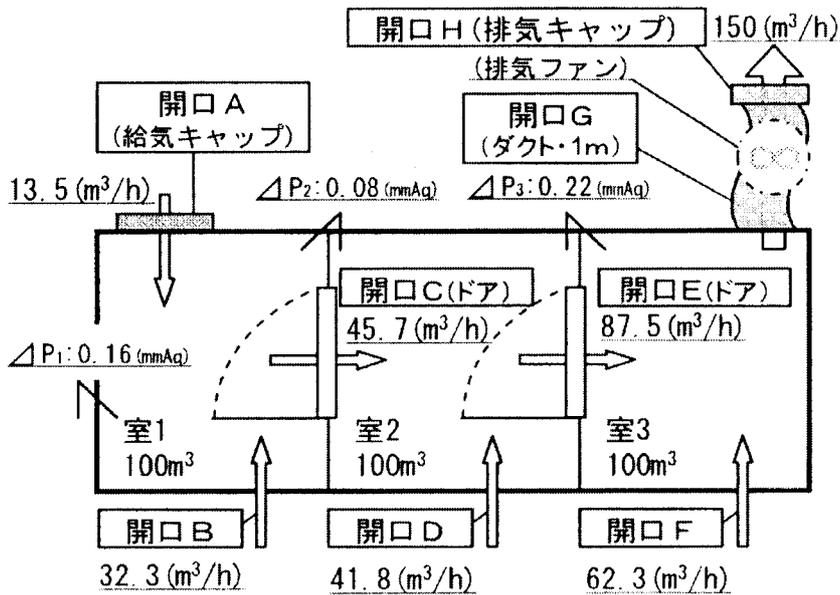


図 2-2-5 モデル住宅の平面及び差圧と流量の計算結果

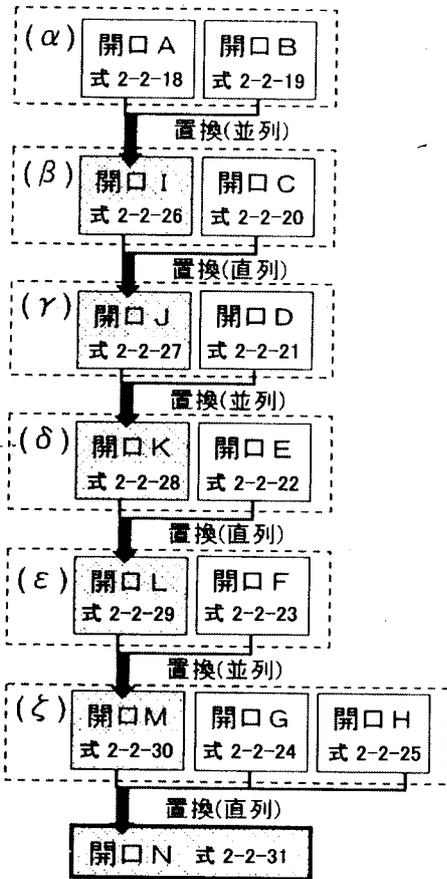


図 2-2-6 置換の流れ

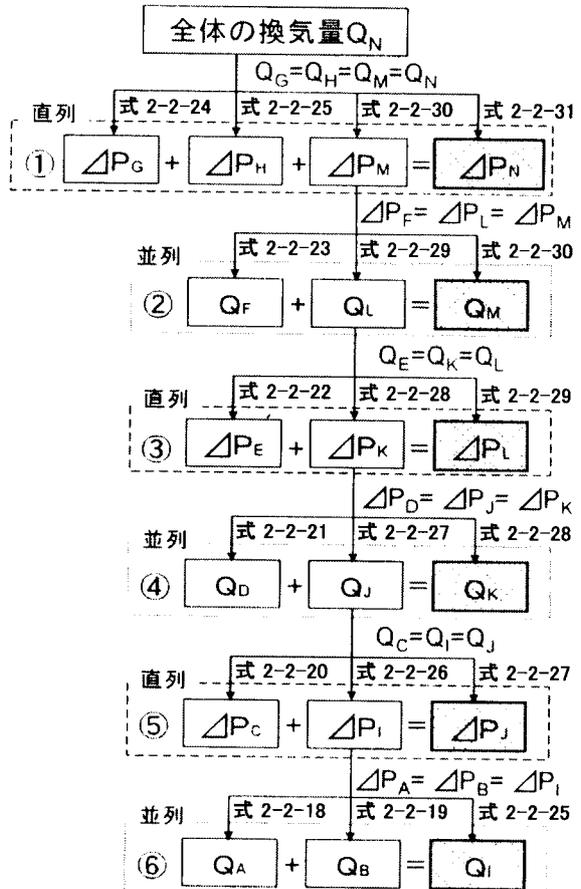


図 2-2-7 換気量計算の流れ

(4) 差圧と流量の計算結果

算定された各開口の差圧と流量を計算手順に沿って示す。

①開口 G・H・M の差圧 (ΔP_G 、 ΔP_H 、 ΔP_M)

全体の換気量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ を式 2-2-24、式 2-2-25、式 2-2-30 に代入してもとめた ΔP_G 、 ΔP_H 、 ΔP_M は、それぞれ 6.47 、 15.85 、 $0.47[\text{mmAq}]$ となる。一方、全体の換気量を、式 2-2-31 に代入して求めた開口 N の差圧 (ΔP_N) は、 $22.76[\text{mmAq}]$ となり、上記の 3 つの差圧の合計と一致しており、整合性が認められる。

②開口 F・L の流量 (Q_L 、 Q_F)

①で求めた ΔP_M を式 2-2-23、式 2-2-29 に代入して求めた Q_F 、 Q_L は、それぞれ 62.3 、 $87.5[\text{m}^3/\text{h}]$ となる。これらの合計は、全体の流量 $150[\text{m}^3/\text{h}]$ と一致しており、室 3 での流量の収支は合っている。

③開口 E・K の差圧 (ΔP_E 、 ΔP_K)

②で求めた Q_L を、式 2-2-22、式 2-2-28 に代入して求めた ΔP_E 、 ΔP_K は、それぞれ 0.22 、 $0.25[\text{mmAq}]$ となる。一方 Q_L を式 2-2-29 に代入して求めた開口 L の差圧 (ΔP_I) は $0.47[\text{mmAq}]$ となり、上記の 2 つの差圧の合計と一致する。

④開口D・Jの流量 (Q_D 、 Q_J)

③で求めた ΔP_K を、式2-2-21、式2-2-27に代入して求めた Q_D 、 Q_J は、それぞれ41.8、45.9[m³/h]となる。これらの合計は Q_E (Q_L) 87.7[m³/h]とほぼ合っている。

⑤開口C・Iの差圧 (ΔP_C 、 ΔP_I)

④で求めた Q_J を、式2-2-20、式2-2-26に代入して求めた ΔP_C 、 ΔP_I は、それぞれ0.08、0.16[mmAq]となる。一方 Q_J を式2-2-27に代入して求めた開口Jの差圧 (ΔP_J) は、0.25[mmAq]となり、これは上記の2つの差圧の合計と一致しており、整合性はとれている。

⑥開口A・Bの流量 (Q_A 、 Q_B)

⑤で求めた ΔP_I を、式5-1、式5-2に代入して求めた Q_A 、 Q_B は、それぞれ13.5、32.3[m³/h]となる。これらの合計は Q_C (Q_J) 45.8[m³/h]とほぼ一致しており、室1の流量収支はとれている。

以上のように、各室での換気量の収支は概ねとれており、提案している方法による本モデルでの換気計算はできたと考える。

2.2.6 まとめ

本研究を行った結果、以下の成果が得られた。

- ① 開口の置換に伴う差圧や流量の差異は概ね1割以内となっており、置換による精度が確認された。
- ② 置換を基にした実大住宅モデルでの換気量は、流量の収支がとれており、提案した方法で換気量が計算できると考える。

2.3 COMIS と CFD 解析の連成計算に関する検討

2.3.1 Introduction (COMIS と CFD については、付録を参照)

Assuming that air is perfectly mixed within each zone of a building, multizone models can simulate a whole building quickly with a simple description. However in the presence of large spaces such as atriums, auditoriums etc, this well-mixing assumption is no longer true. In addition, multizone models do not predict the airflow pattern in a room; therefore do not capture interior effects due to thermal plumes, jets from ventilation ducts, partitions and so forth. These effects can significantly change the mixing of pollutants within a large space and the transport of pollutants out of the space. Thus, the multizone assumption of instantaneous perfect mixing can lead to:

1. Over-prediction and under-prediction of the exposure of occupants in a large space
2. Over-prediction and under-prediction of the speed at which pollutants propagate from a large space to the other rooms, and
3. Over-prediction and under-prediction of the amount of pollutants that enter adjoining rooms.

On the other hand, Computational Fluid Dynamics has been proven to be able to give detailed information of a given space. Although the use of CFD to model a whole building is theoretically possible, it is time consuming and expensive to do because of the computational resources involved. Instead of a whole building simulation, CFD has been limited historically to a single room or a set of small rooms. In most cases, the boundary conditions of CFD are unknown and it needs an experienced user.

The purpose of this research is to demonstrate how to overcome the limitations of both models by combining them. This can be done by setting CFD to model a selected room in a building where the uniform assumption of multizone model is not fulfilled and let the multizone model handle the rest of the building and its surroundings.

2.3.2 Coupling of Multizone and CFD models

The basic idea of coupling multizone models with CFD is to apply CFD at a room or a set of rooms where the well-mixing assumption is not satisfied and have the multizone model handle the rest of the building and its surrounding. Figure 2.3.1 shows an illustration of a two story building that the author shall use to illustrate the coupling process between multizone and CFD. The building is composed of two rooms (A, B) and an atrium, with room B having a partition wall. The atrium is supposed to not fulfill the well-mixing assumption of multizone model because it is large and the temperature and contaminant concentrations may not be uniform. Therefore, it will be used as the zone where CFD will be applied.

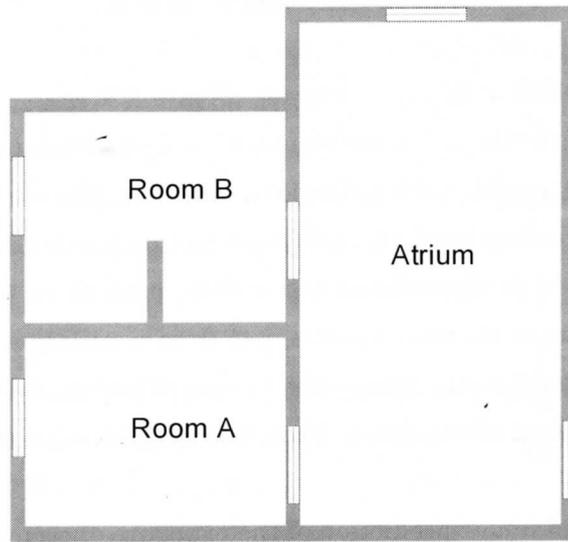


Figure 2.3.1 Example of a multizone building

(1) Multizone modeling of the building

To model the building with a multizone airflow model, each room of the building is replaced with a node where the air properties (temperature, pressure etc...) are supposed to be uniform. The effect of the outdoor environment such as the wind pressure on the building envelope is also taken into account by representing it with a node at each façade of the building. Each node is connected to another via a flow element. The flow elements can be doors, a crack, and HVAC ducts.

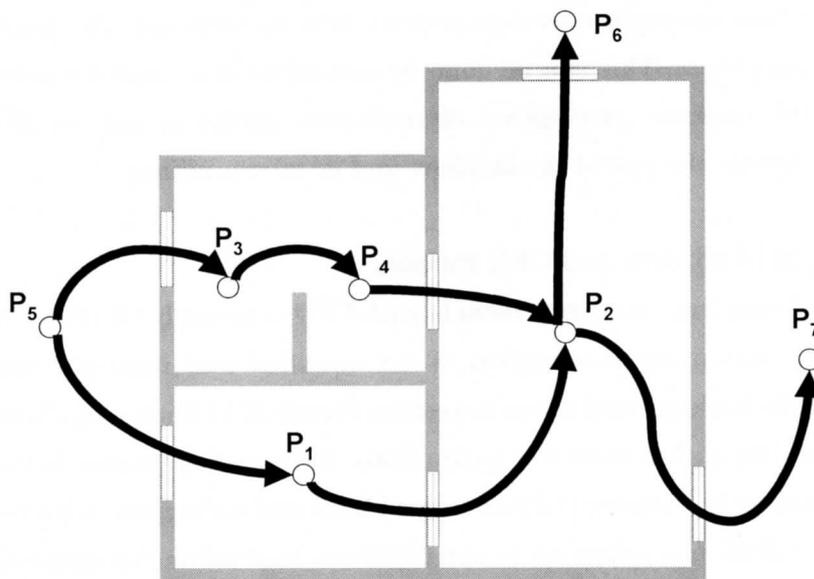


Figure 2.3.2 Airflow network model of the building

Figure 2.3.2 shows a airflow system of seven (7) nodes (P_1 to P_7). The outside node pressures (P_5 , P_6 , and P_7) are supposed to be known; therefore the network is reduced to four (4) variable-pressure zones (P_1 , to P_4). The multizone model treats these 4 unknown reference pressures as independent variables. Any two zones may share zero, one, or more flow paths. The net inter-zonal mass flow carried by these parallel paths is defined as:

$$\dot{m}_{i-j} = \sum_l f_{i-j}^l \quad (2-3-1)$$

where index l extends over every element connecting zone i and j . If the zones share no flow elements then, $\dot{m}_{i-j} = 0$. By definition it is considered that $\dot{m}_{i-i} = 0$.

At steady state, mass conservation of the example building (Figure 2.3.2) requires:

$$\sum_{k=1}^7 \dot{m}_{i-k} = 0 \quad (2-3-2)$$

Equation (2-3-2) means that the sum of the flows leaving zone i must be zero (where a positive flow entering a zone counts as a negative flow leaving the zone).

Mass conservation applies to all zones, $1 \leq i \leq 7$ in our example building. However, a numerical solution demands only 4 equations in the 4 unknown pressures. Therefore the multizone formulation defines residual equations only for the variable-pressure zones:

$$\sum_{k=1}^7 \dot{m}_{i-k} = b_i \quad 1 \leq i \leq 4 \quad (2-3-3)$$

The solution scheme adjusts the reference pressures to set the vector $b=0$, so that the sum of the flows leaving each variable-pressure zone is zero.

If Equation (2-3-3) is applied to zone 1 in our building example, it becomes:

$$\dot{m}_{1-1} + \dot{m}_{1-2} + \dot{m}_{1-3} + \dot{m}_{1-4} + \dot{m}_{1-5} + \dot{m}_{1-6} + \dot{m}_{1-7} = b_1 \quad (2-3-4)$$

If the zones share no flow paths $m_{i-j}=0$. By definition $m_{i-i} = 0$. Therefore Equation (2-3-4) becomes:

$$\dot{m}_{1-2} + \dot{m}_{1-5} = b_1 \quad (2-3-5)$$

The mass flow \dot{m}_{i-k} can usually be described by a non-linear relationship between the flow rates, pressure or temperature difference across the path. The relationship is generally an empirical function that can be found often in the literature²⁻⁸⁾. A very commonly used one is an exponential in the following form:

$$\dot{m}_{i-j} = \sum_l C_{i-j}^l (\Delta p_{i-j})^{n_{i-j}^l} \quad (2-3-6)$$

where the index l extends over every element connecting zone i and j . C_{i-j}^l is the flow coefficient of flow path l ; Δp_{i-j} is the pressure difference between nodes i and j ; n_{i-j}^l is the flow exponential coefficient of flow path l .

If we suppose that there is only one flow path between zones, Equation 2-3-5 can be written as below:

$$\dot{m}_{1-2} + C_{1-5}(p_1 - p_5)^{n-5} = b_1 \quad (2-3-7)$$

The same method applies to the rest of the zones in the building. These sets of non-linear equations which describe the network are solved numerically using a Newton-Raphson²⁻⁸⁾ algorithm with some modifications.

(2) CFD Modeling of the Selected Zone

Since the above formulations are based on the perfect mixing assumption within the zones, when refinements concerning the airflow patterns and contaminant dispersion are necessary in some zones, CFD is applied to those zones. In our example the atrium is the zone where CFD is applied.

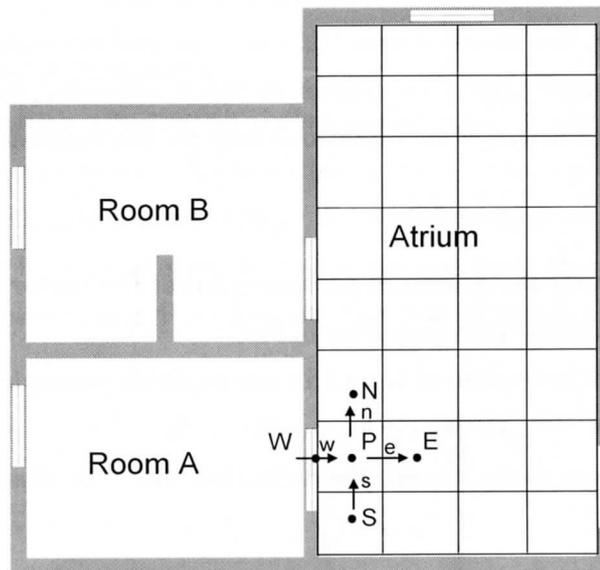


Figure 2.3.3 CFD modeling of the selected zone

The CFD model also involves the mass conservation principle in the calculated domain. For each cell in the CFD domain, to enforce mass conservation, in the SIMPLE algorithm²⁻⁹⁾ a pressure correction equation is used. Consider the near-cell boundary P in Figure 2.3.3. The cell P is surrounded by the cells W, E, S and N, they are considered to be its neighbors. The lower case letters w, e, s, n are the cell faces running for west face, east face, south face and north face.

The two-dimensional form of the pressure correction equation applied to the cell P is in this form:

$$a_P p'_P + a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S = \dot{m}_w - \dot{m}_e + \dot{m}_s - \dot{m}_n \quad (2-3-8)$$

The expression of the coefficients a_P, a_E, a_W, a_N, a_S in Equation (2-3-3) can be found in ²⁻⁹⁾. $\dot{m}_w, \dot{m}_e, \dot{m}_s$ and \dot{m}_n are the mass flow passing through face w, e, s, and n respectively. p' is pressure correction.

At each iteration in the CFD calculation the pressure p of cells is updated by adding the pressure correction to the guessed pressure p^* :

$$p = p^* + p' \quad (2-3-9)$$

however the boundary pressure p_W is not updated, it has to be given as boundary conditions.

Equation (2-3-8) can then be rewritten as follow:

$$a_P p'_P + a_E p'_E + a_W p_W + a_N p'_N + a_S p'_S = \dot{m}_w - \dot{m}_e + \dot{m}_s - \dot{m}_n \quad (2-3-10)$$

(3) Coupling CFD and Multizone models

The coupling of multizone with CFD is done by combining Equation (2-3-7) and Equation (2-3-10) with:

$$p_{1-2} = p_W \text{ and } \dot{m}_{1-2} = \dot{m}_w \quad (2-3-11)$$

As in CFD, one cannot specify at the same time pressure and mass flow because they are related; the two models can exchange either pressure or mass flow. The following scenario can be imagined:

- Multizone gives pressure to CFD and CFD returns pressure to multizone.
- Multizone gives pressure to CFD and CFD returns mass flow
- Multizone gives mass flow and CFD returns pressure.

In all scenarios the multizone node representing the room where CFD is be applied (the atrium in our example) is replaced then by new nodes that connect to the cell of the CFD domain. An illustration is shown in Figure 2.3.4. The dotted arrows show the effect of the CFD domain on the network model.

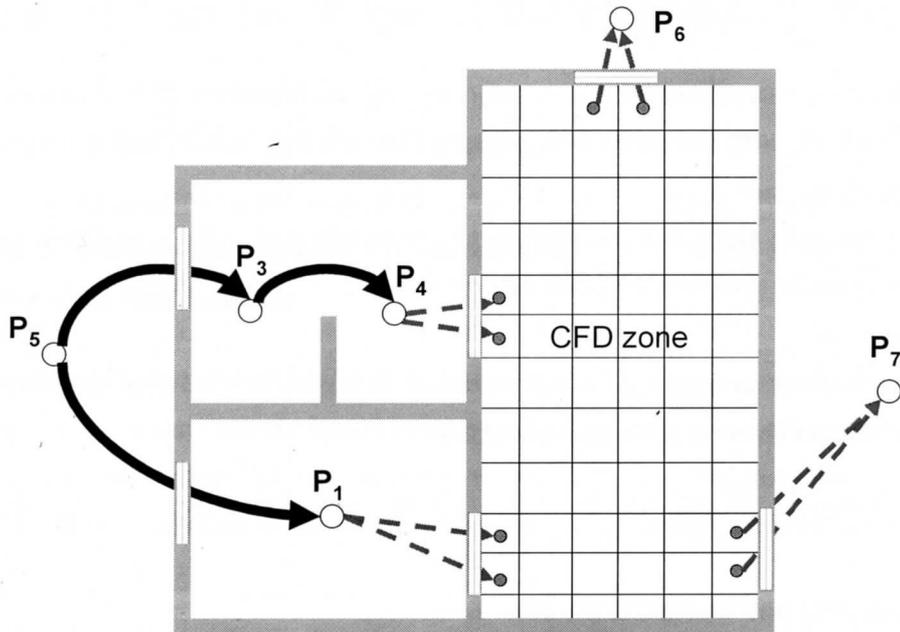


Figure 2.3.4 Illustration of the coupling of CFD with multizone

The next section analyses through numerical experiment the response of the CFD domain in the case of multizone model (COMIS in our study) giving pressures or mass flow rates, and compares them to the results of a CFD-only simulation of the whole building.

2.3.3 Analysis of the Combined Program

The computational domain used in our investigation is 9 m long, 3 m wide and 3 m tall. The room is divided in half by a wall with an opening in it. A two dimensional representation is shown in Figure 2.3.5. A supply diffuser, located on the upper portion of the front wall of the first room, supplies $0.214 \text{ m}^3/\text{s}$ to room 1. The air is freely split between the openings, some going out through Outlet 1 and some transferred to room 2 via the opening. Air exits room 2 through a passive Outlet 2 located on the lower portion of the back wall. The same configuration was used by Musser²⁻¹⁰⁾, but in his study Outlet 1 was treated as a forced one. This enabled him to fix the quantity of air going to room 2. In our study, there were no such constraints. The quantity of air from the inlet diffuser was freely separated between outlet 1 and the opening in the partition.

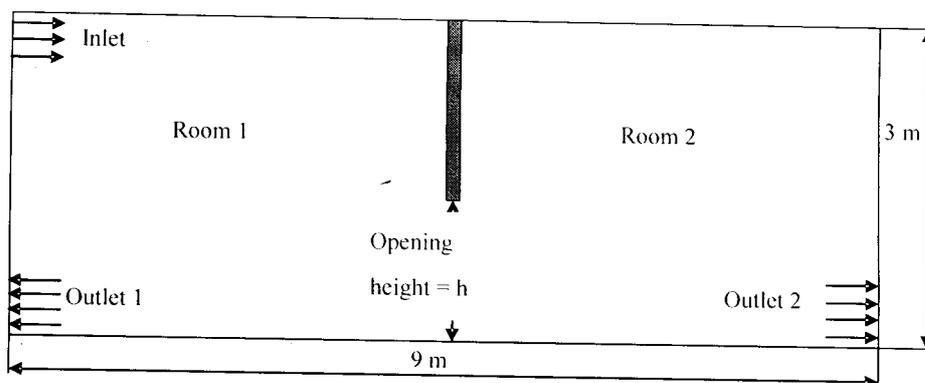


Figure 2.3.5 D configuration of the room geometry and boundary conditions

The size of the inlet is 0.168 m high and 3 m wide. Outlet 1 and Outlet 2 have the same geometry which is 0.48 m high and 3 m wide. The opening connecting room 1 and room 2 is 1 m wide. By varying its height, three scenarios were considered. The first is when the opening is the size is for a small opening $h = 0.07$ m, the second is for a moderate opening height ($h = 0.63$ m) and the last is the case where the opening is the size of an open doorway (1.8 m). In each of the three scenarios, three steady state CFD simulations were conducted:

- 1) CFD-CFD : both room 1 and room 2 with CFD
- 2) CFD-COMIS pressure BC: CFD in room 1 using pressure boundary conditions from COMIS
- 3) CFD-COMIS flow rate BC: CFD in room 1 using flow rate boundary conditions from COMIS

These numerical simulations were performed in isothermal conditions with the standard $k-\epsilon$ model using the first order upwind scheme for the convection term and wall function boundary conditions for the tangential velocity components near the walls. The number of grids used in the CFD-CFD simulation is $72 \times 32 \times 32$ and that of the CFD-COMIS simulations $35 \times 32 \times 32$. We decided on these grid configurations after studying the grid dependence solution and determining that there was no difference between these coarse grids and the finest. In the CFD-CFD simulation, outflow (zero gradient) boundary conditions were used at the outlets (Outlet 1 and Outlet 2). For the CFD-COMIS simulations, boundary conditions for Outlet 1 and Outlet 2 were extracted from the results of the multizone model COMIS which can be pressure or velocity (flow rate) boundary conditions. To evaluate the impact of the multizone model boundary conditions on contaminant concentrations prediction by CFD, a contaminant source of 1.10^{-7} kg/s was released at the centre of the floor of room 1.

In each calculation, velocity and concentration profiles were recorded at 3 poles in room 1. The first pole located at $x = 0.75$ m is near Outlet 1, the second pole located at $x = 2.25$ m is at the centre of room 1 and the last pole located at $x = 3.75$ m is near the opening connection

room 1 to room 2. At each pole the velocity was recorded simultaneously at a height of $z = 0.5$ m, $z = 1$ m and at $z = 1.5$ m.

(1) Case 1: Small Opening

Figures 2.3.6 and 2.3.7 compare the velocity and the concentration profiles when the opening connecting the rooms is 0.07 m.

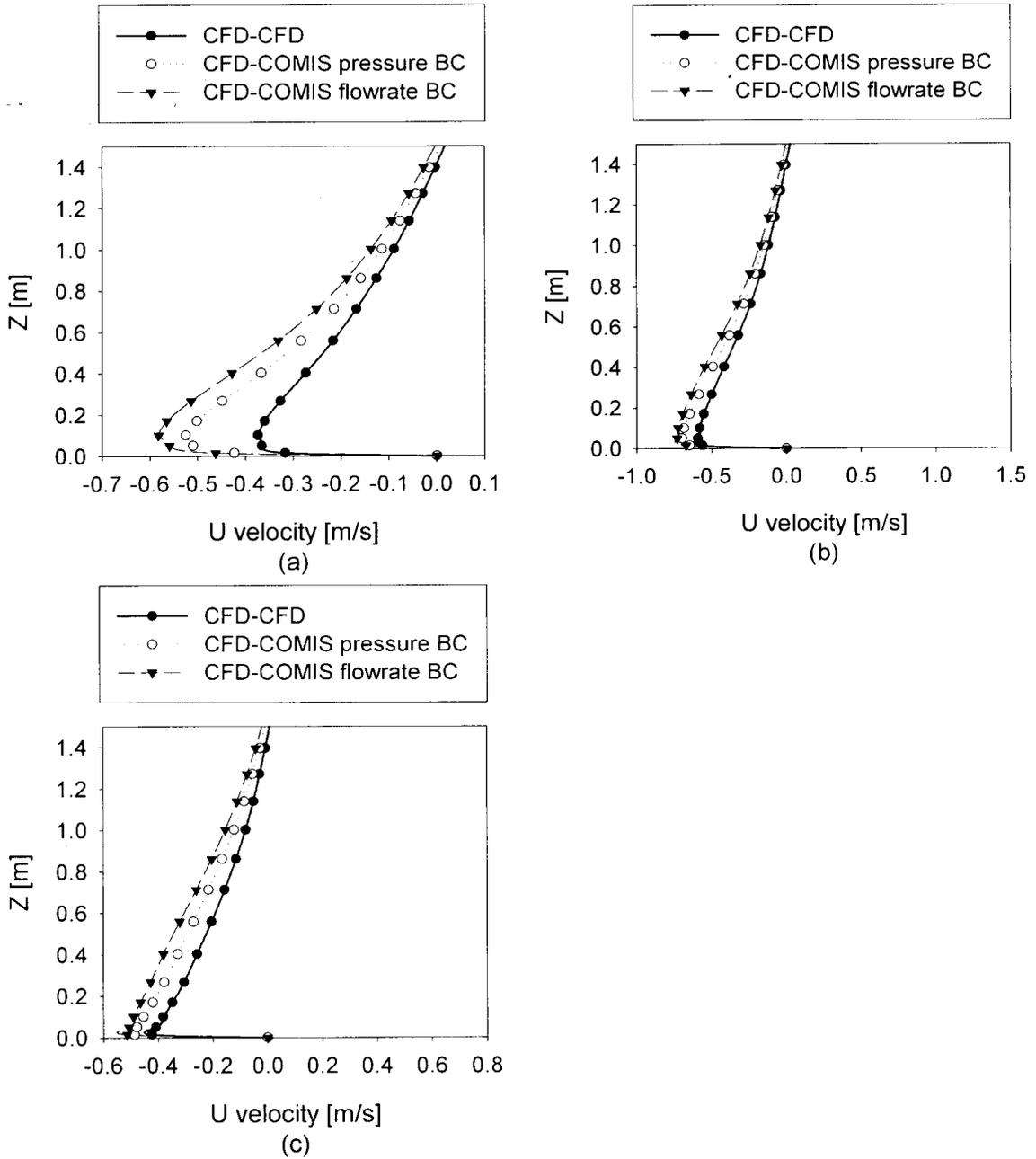


Figure. 2.3.6 Velocity profiles in case of $h=0.07$ m recorded at:
(a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

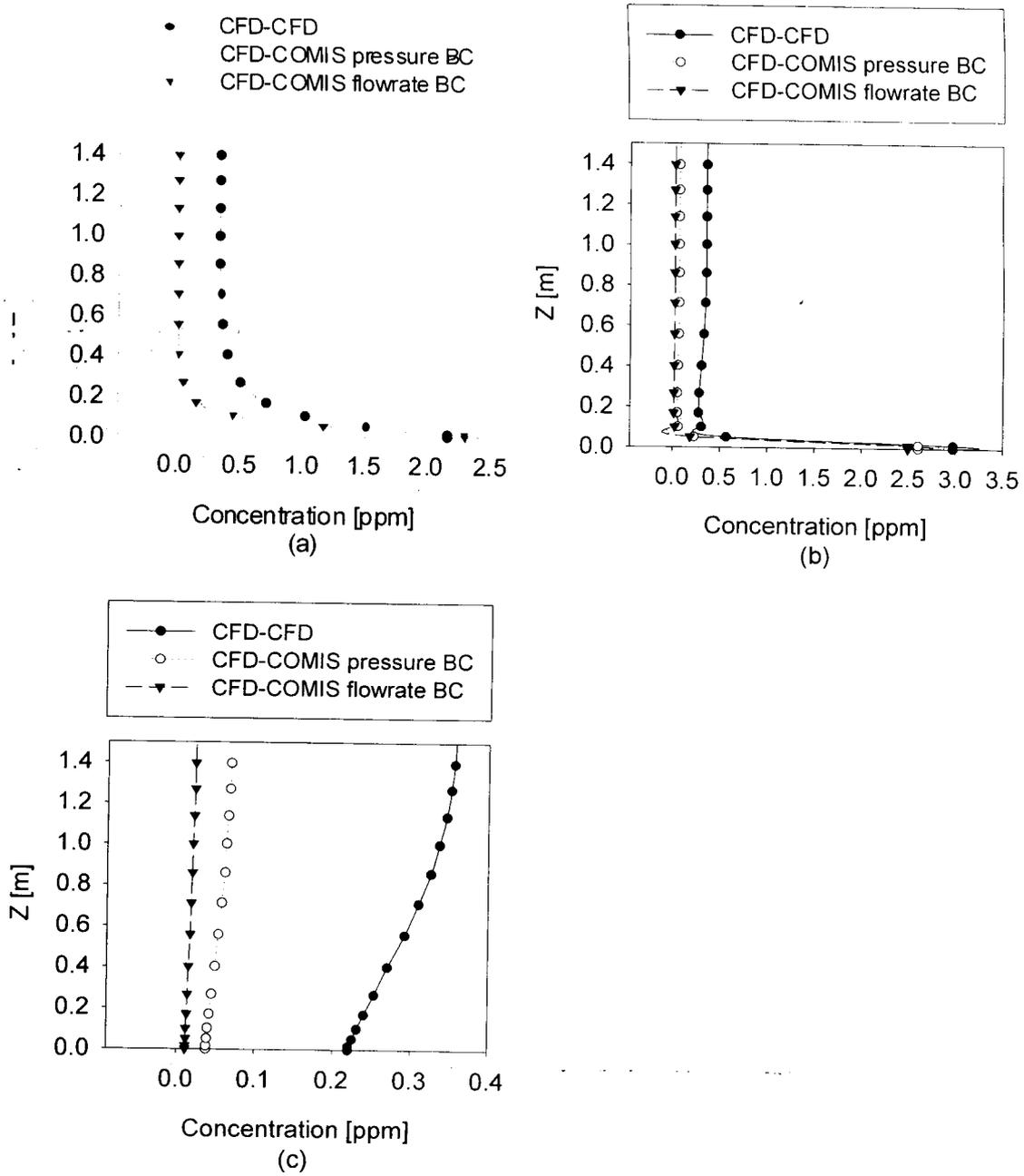


Figure 2.3.7 Concentration profiles in case of $h=0.07$ m recorded at:
 (a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

(2) Case 2: Mean Opening

Figures 2.3.8 and 2.3.9 compare the velocity and the concentration profiles respectively when the opening connecting the rooms is 0.63 m.

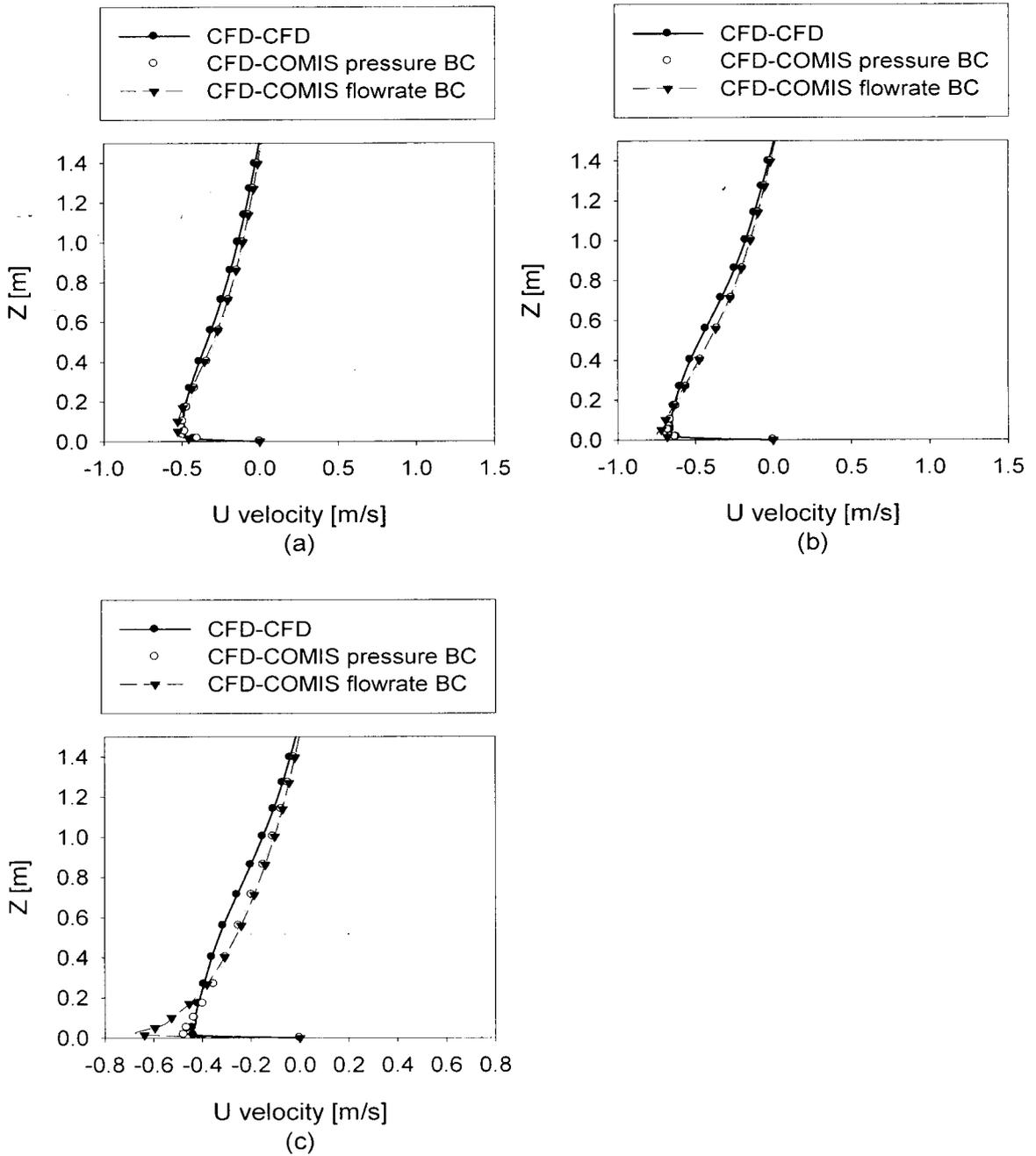


Figure 2.3.8 Velocity profiles in case of $h=0.63$ m recorded at:
(a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

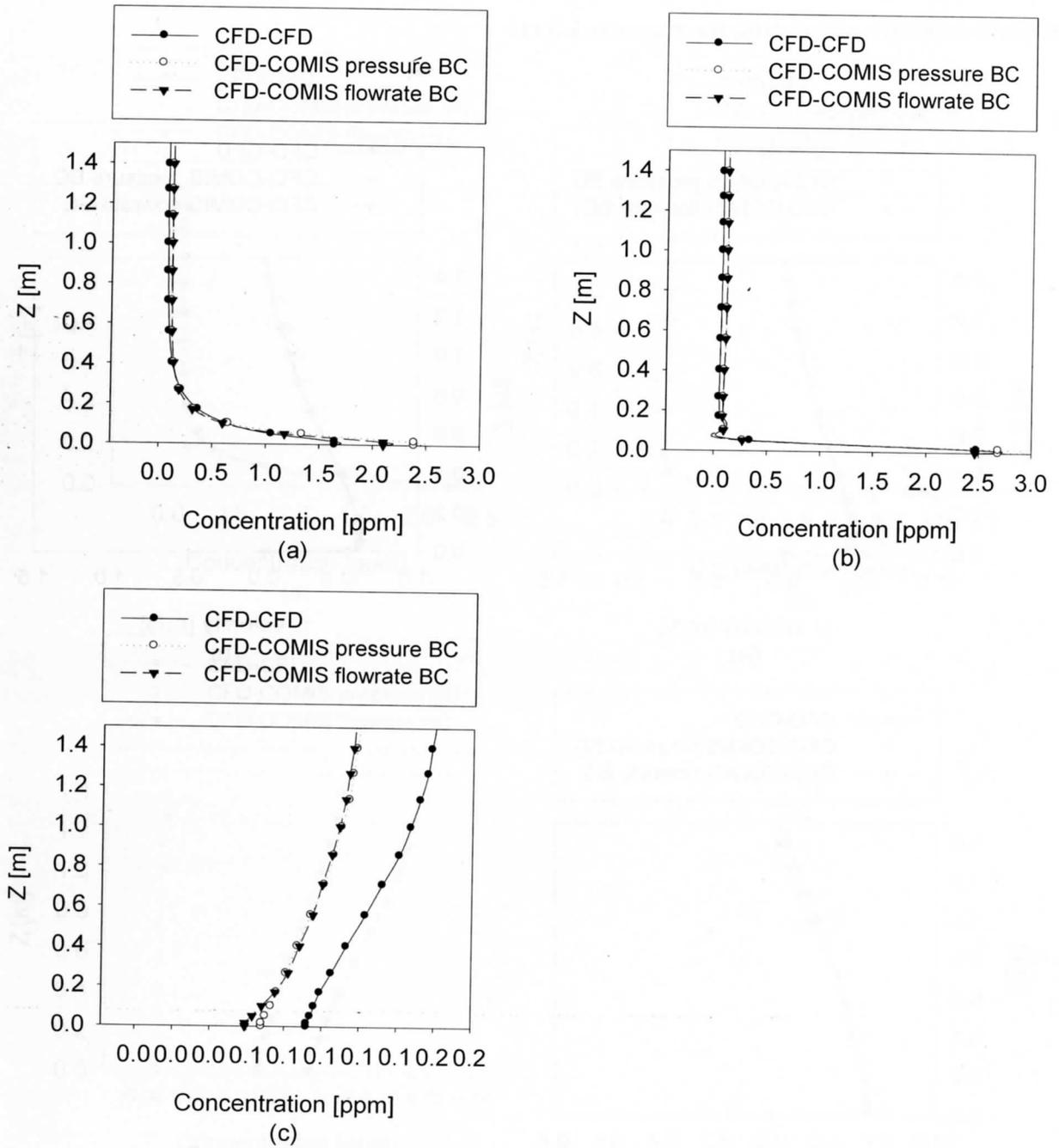


Figure 2.3.9 Concentration profiles in case of $h=0.63$ m recorded at:
 (a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

(3) Case 3: Large Opening

Figures 2.3.10 and 2.3.11 compare the velocity and the concentration profiles respectively when the opening connecting the rooms is 1.8 m.

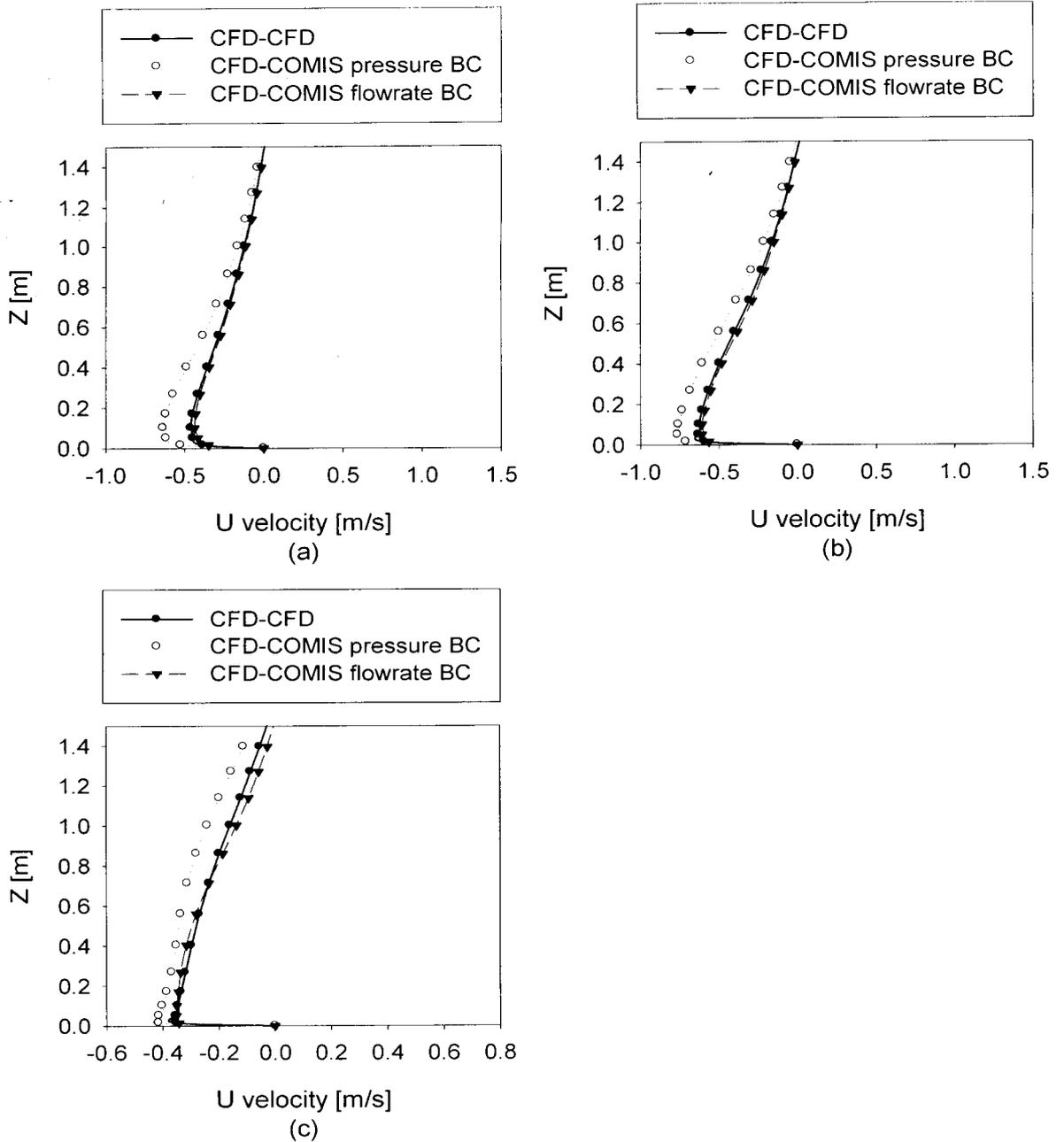


Figure 2.3.10 Velocity profiles in case of $h=1.8$ m recorded at:
 (a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

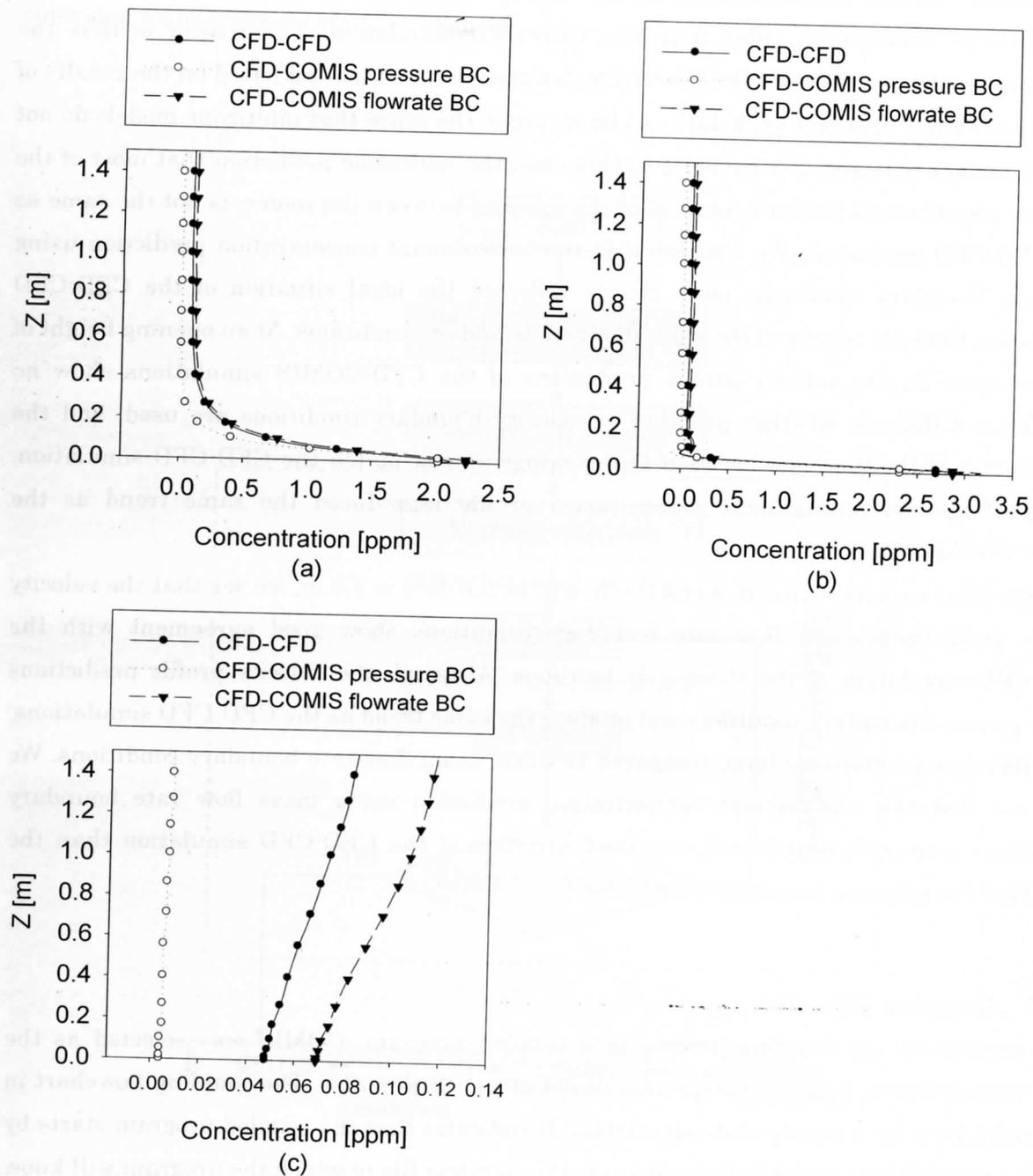


Figure 2.3.11 Concentration profiles in case of $h=1.8$ m recorded at:
 (a) $x=0.75$, (b) $x=2.25$ and (c) $x=3.75$ m

(4) Discussions

In the first case (case 1) where the height of the opening connecting the rooms is (0.07m), the velocity profile predictions show the same trend, but the actual profiles of the CFD-COMIS simulations differ from the CFD-CFD simulation. The reason is that the boundary conditions of the CFD-COMIS simulations were constructed based on the results of multizone model. However such data can be wrong in the sense that multizone models do not predict airflow patterns. For example in this case, the multizone prediction that most of the air flow goes through Outlet 1, instead of the opening between the rooms, is not the same as the CFD-CFD prediction. We also see that the contaminant concentration prediction using pressure boundary conditions more closely reflected the ideal situation of the CFD-CFD simulation than the results of the mass flow rate boundary conditions. At an opening height of 0.63 m (case 2), the velocity profile predictions of the CFD-COMIS simulations show no significant difference whether pressure or velocity boundary conditions are used, and the distribution of the flow rate between the openings almost match the CFD-CFD simulation. The prediction of contaminant concentration profile reproduced the same trend as the CFD-CFD calculation.

In the final scenario (case 3), when the height of the door is 1.8 m, we see that the velocity profile predictions using flow rate boundary conditions show good agreement with the CFD-CFD simulation at the three pole locations. Although the velocity profile predictions using pressure boundary conditions did produce the same trend as the CFD-CFD simulations, the difference is relatively large compared to when using flow rate boundary conditions. We also see that the contaminant concentration prediction using mass flow rate boundary conditions more closely reflected the ideal situation of the CFD-CFD simulation than the results of the pressure boundary conditions.

2.3.4 Coupling Algorithm

To implement the coupling process in a coupled program, COMIS was selected as the multizone program, and a zero-equation model of a CFD program. The coupling flowchart in Figure 2.3.12 is for a steady-state simulation. It indicates that the coupled program starts by reading the COMIS project file; also it reads the coupling file in which the program will know which zone is selected for the CFD simulation. Once the CFD zone identified, the coupled program performs a whole building simulation with the multizone model. From that, airflow boundary conditions are extracted and passed to CFD to simulate the selected zone where the well-mixing assumption of multizone is believed to be not satisfied. Once the CFD simulation for the selected zone finishes, the results are fed-back to COMIS. An iteration process

happens between the two models until a converged solution is found. Contaminant distribution can then be performed in the same way as the airflow coupling.

For a transient simulation, the same process can be applied by considering that at each time-step a quasi-steady state is assumed.

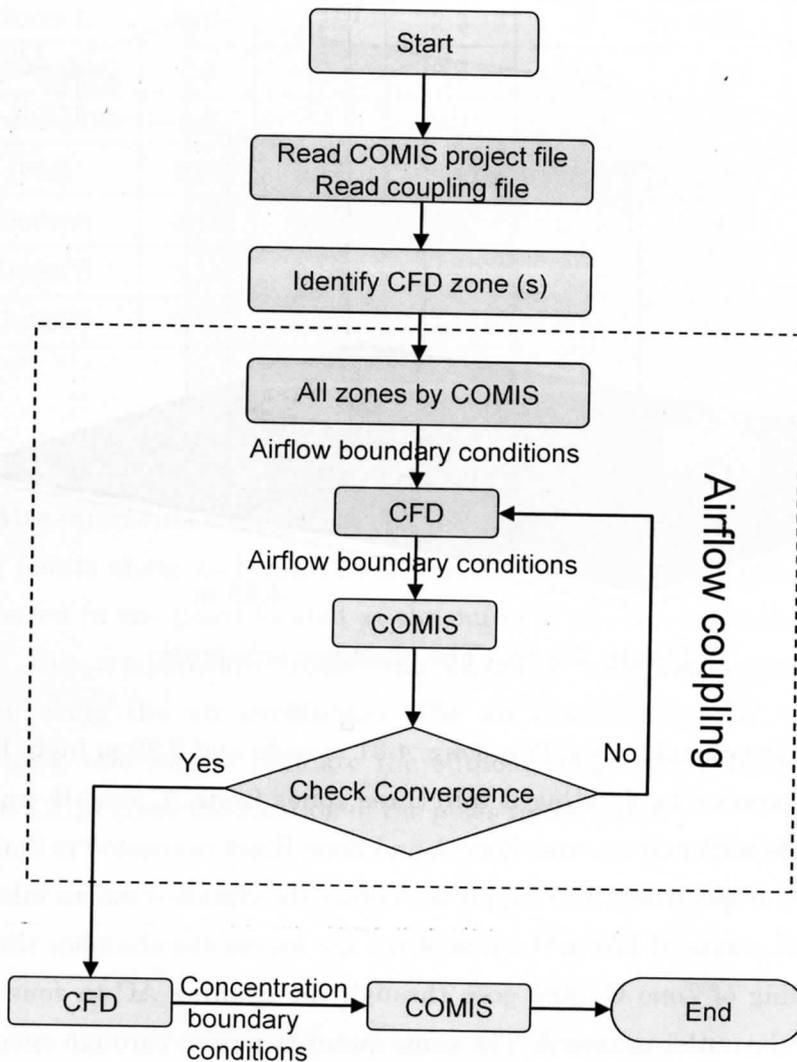


Figure 2.3.12 Coupling scheme for steady-state airflow and contaminant transport.

2.3.5 Experimental validation

Before fully applying the coupled program to more realistic cases, a validation is necessary. For this experimental measurements were conducted in a test chamber at Tohoku Institute of Technology. The chamber facility is shown in Figure 2.3.13

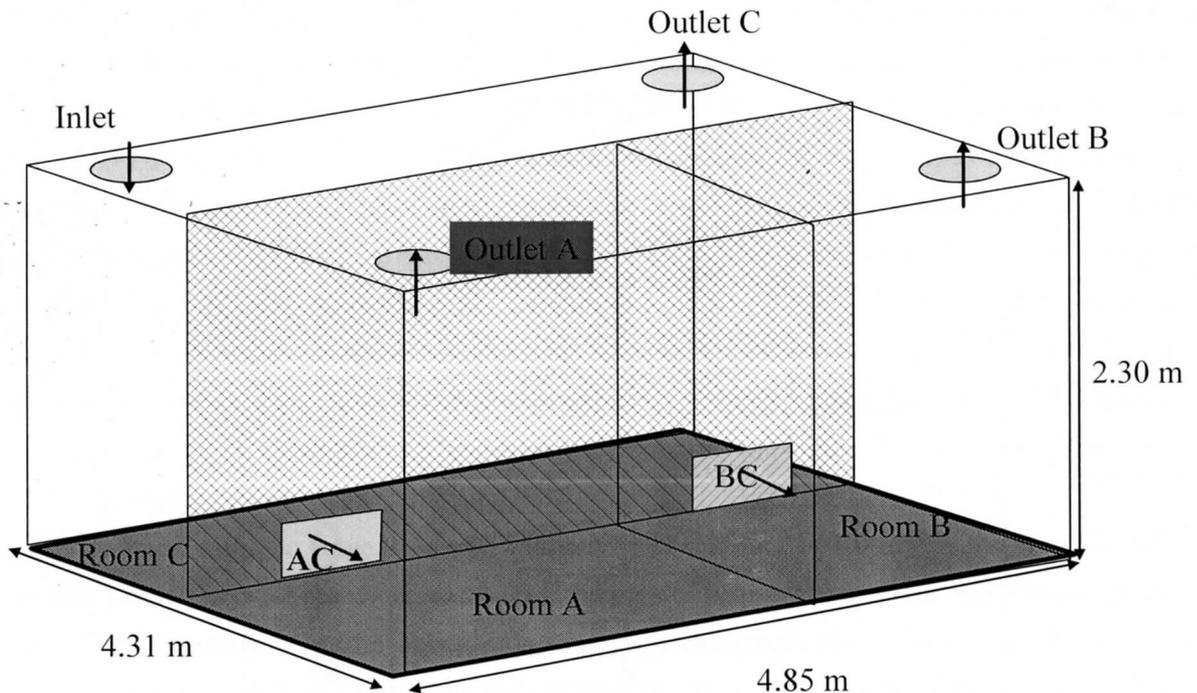


Figure 2.3.13 The chamber schematic

The geometry of the chamber is 4.85 m long, 4.31 m wide and 2.30 m high. It was rendered into a multizone chamber by dividing it into three zones (zone A, zone B, and zone C) with partition walls made with polystyrene. Zone A and Zone B are connected to Zone C by opening AC and opening BC respectively. The supply air enters the chamber via an inlet located at the ceiling of Zone C at a rate of 176 m³/h. 40% of the air leaves the chamber through an outlet located at the ceiling of Zone C, 30% goes through the opening AC to zone C before to be extracted through the outlet in zone A. The same quantity passes through opening BC to zone B and leaves at the outlet in zone B. Tracer gas SF₆ was used to simulate a contaminant source, which was located in zone C as shown in Figure 2.3.13. The geometry and location of items in the chamber are given in Table 2.3.1.

Table.2.3.1 Geometry and location of items in the chamber

Items	Length	Width	Height	Location		
	Δx [m]	Δy [m]	Δz [m]	x [m]	y [m]	z [m]
Chamber	4.85	4.31	2.3	0	0	0
Room A	2.77	2.012	2.3	0	0	0
Room B	1.992	2.012	2.3	2.858	0	0
Room C	4.85	2.25	2.3	0	2.06	0
Opening AC	0.9	[-]	0.3	0.9	2.012	0
Opening BC	0.9	[-]	0.3	3.05	2.012	0
Inlet	0.12	0.12	[-]	0.39	3.8	[-]
Outlet A	0.12	0.12	[-]	0.39	0.39	[-]
Outlet B	0.12	0.12	[-]	4.34	0.39	[-]
Outlet C	0.12	0.12	[-]	4.34	3.8	[-]

The spatial distribution of the SF₆ concentration was measured with a tracer gas sampler and analyzer. Measurements were taken at 3 poles located in zone C with each pole having five measuring points along its height. In zone A and zone B, the SF₆ concentration in each zone was measured in one point located at the outlet of the corresponding zone. During all measurements, the temperature inside the chamber was kept equal to the outdoor temperature by using the air conditioner. The air conditioners are located outside the chamber, and their role was to regulate the outdoor temperature according to the user's purpose. Figure 2.3.14 gives the location of the poles in the room.

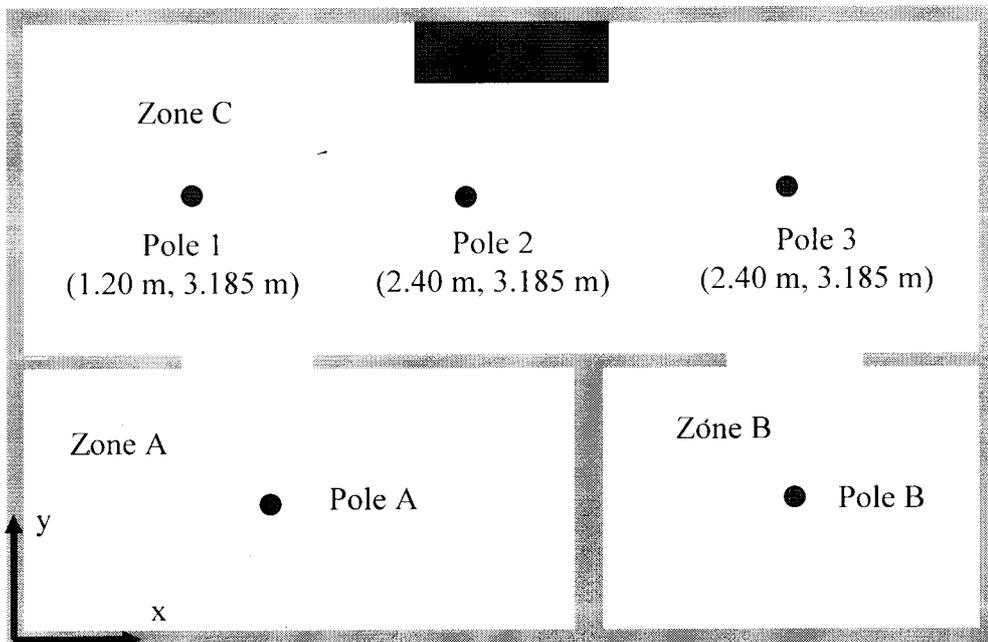


Figure 2.3.14 Measurements locations in the plan view of the chamber with the source location

To review, the idea behind coupling multizone and CFD is to model a room or set of rooms where the well-mixing assumption of multizone is not valid, and to model the rest of the building with a multizone model. The two models exchange boundary conditions at their interface. In our case, zone C was selected as the zone where CFD will be applied, so SF₆ was released in it. The boundary conditions of the CFD being given by the multizone model, in our study COMIS was chosen as the multizone program.

Simulation of the chamber was done:

- 1 Using only the COMIS program
- 2 Using a coupled COMIS and CFD program with Zone C as the CFD zone and Zone A and Zone B as COMIS zones
- 3 Using only CFD

The grid used for the only-CFD simulation of the full chamber was 50 x 40 x 20, while for the coupled CFD-COMIS program; the CFD part for the zone C used 50 x 21 x 20 grids. Steady state calculation was considered in both cases using upwind as the advection-diffusion discretization scheme.

Figure 2.3.15 shows the comparison of the prediction of the coupled CFD-COMIS program, a CFD-only, and a COMIS-only simulation with the results of the experiment at the three poles in zone C.

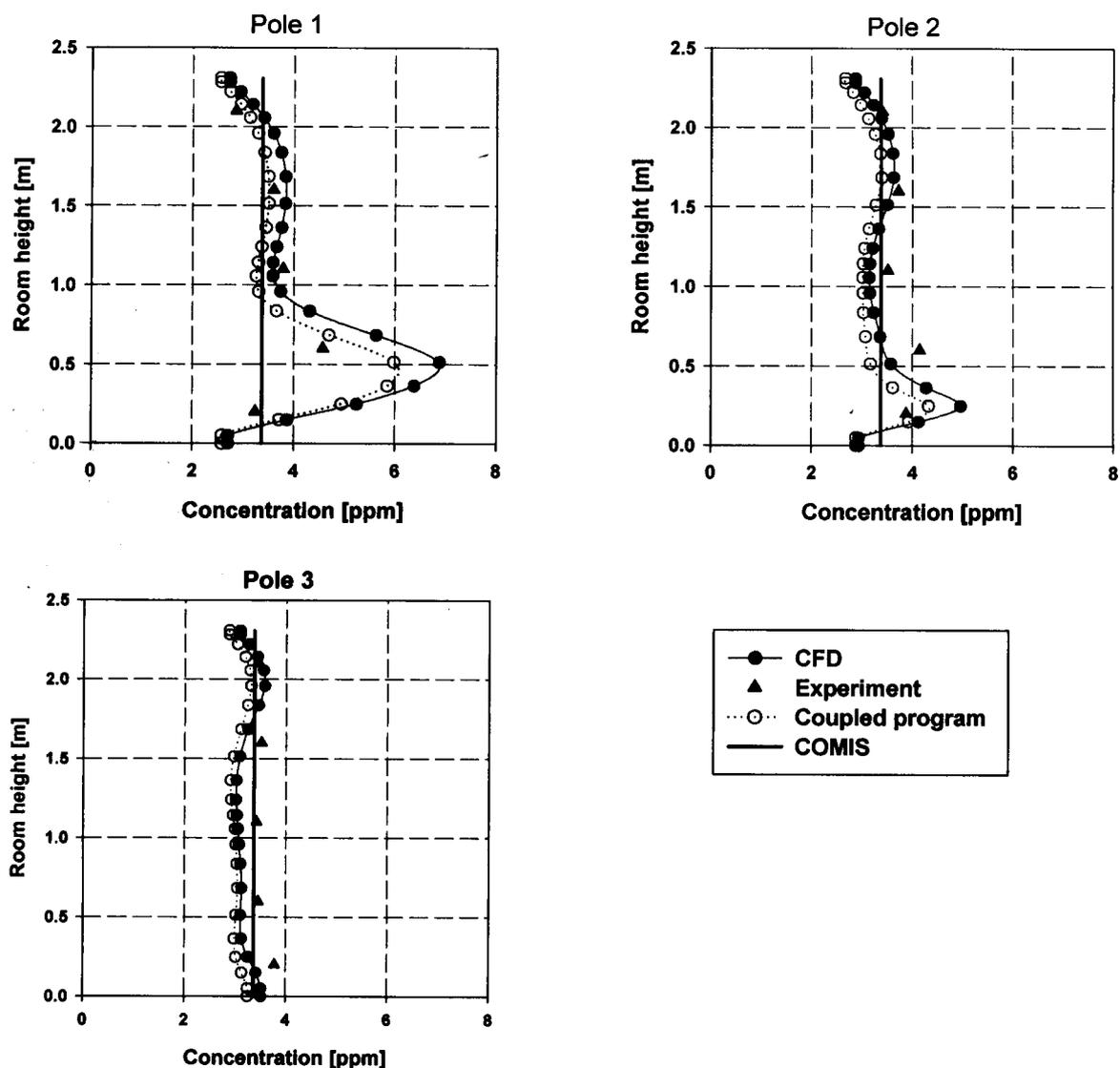


Figure 2.3.15 Concentration profiles at the poles in zone C

We see that the general trend of the experiment at the different poles is well reproduced by the coupled program and by a full CFD of the chamber. The full COMIS simulation gives only one value, which is represented by a vertical line in the graph of the different poles. The agreement of the prediction of the coupled program is acceptable if we take into account the fact the computational burden is reduce compared to a full CFD. The representation of each room by the multizone model can lead to under-prediction of the concentration as shown at the pole 1 and pole 2 in Figure 2.3.15. However, the result of the multizone model is better than the full CFD and the coupled program as shown in pole 3 in the Figure 2.3.15.

Figure 2.3.16 gives the concentration filled contour plot of the CFD-only program, the coupled program and the multizone-only program.

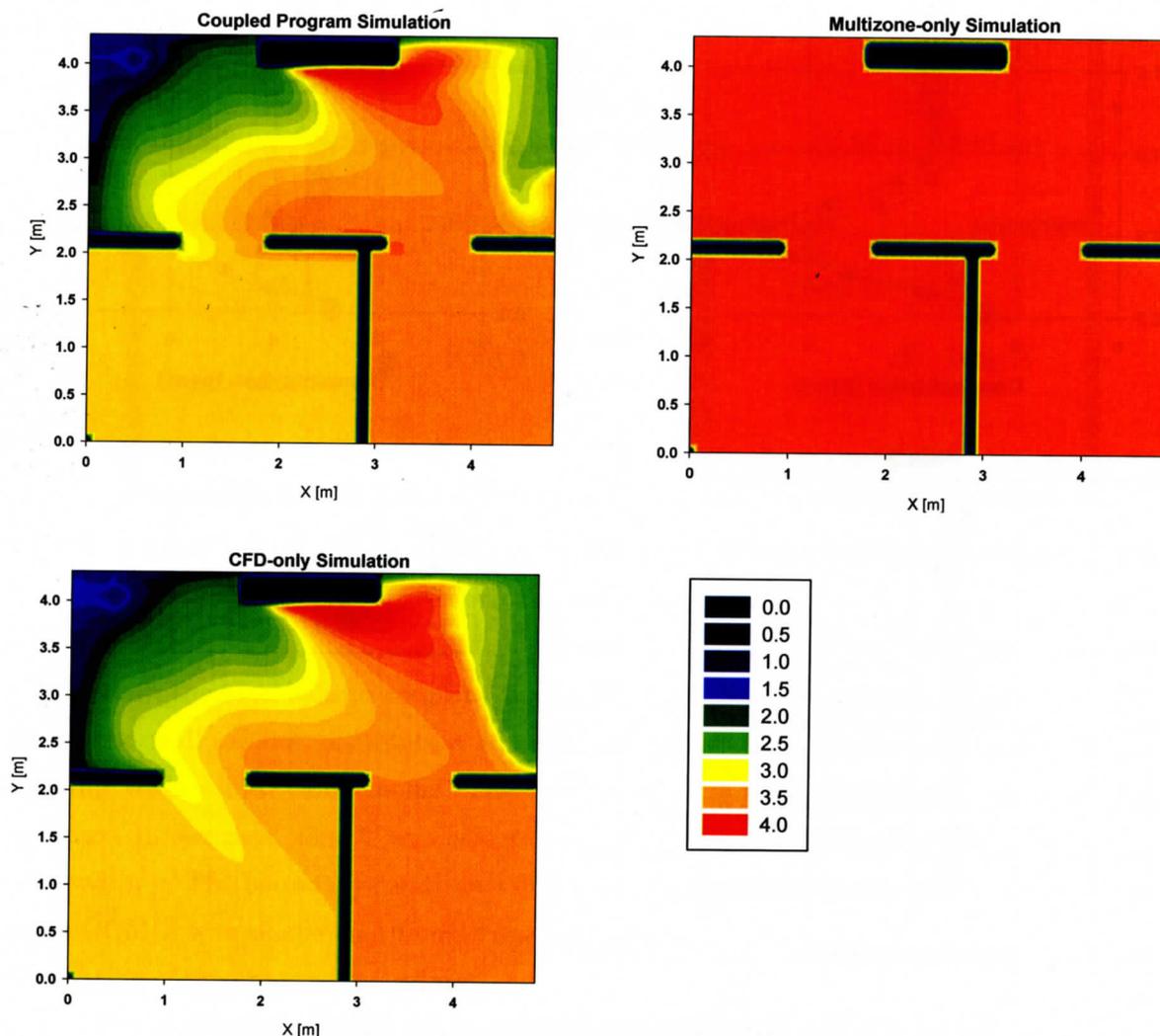


Figure 2.3.16 concentration distributions at the floor of the chamber given by the three programs [ppm]

Figure 2.3.16 shows that the coupled COMIS and CFD simulation can consider the non uniform SF₆ concentration in Zone C. The difference of SF₆ concentrations between Zones A and B was caused by the non-uniform SF₆ distribution in Zone C as illustrated in Figure 2.3.16 The coupled program can predicted correctly the SF₆ concentrations, by predicting the detailed SF₆ distribution in Zone C.

2.3.6 Application of the Coupled Program

We applied this method to an example case of Schaelin et al.²⁻¹¹⁾, a schematic of which is shown below in Figure 2.3.17

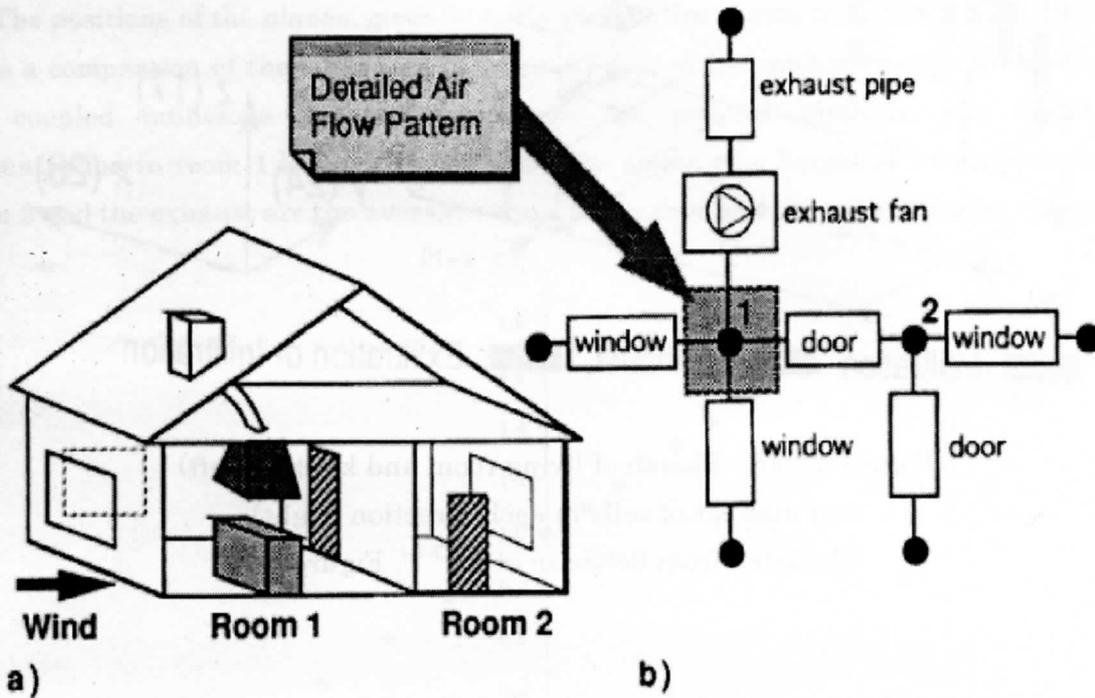


Figure 2.3.17 a) Example house with two rooms.
 b) Sub-zonal network of the whole building.
 (Adapted from Schaelin et al.²⁻¹¹⁾, Figure 1)

Figure 2.3.18 shows the sketch of the living room and kitchen, showing two windows with their infiltration areas, the kitchen cabinetry with exhaust, and a closed door with its exfiltration area. On the right is an illustration of the number of cells in each direction used by Schaelin et al.²⁻¹¹⁾ for their CFD calculation.

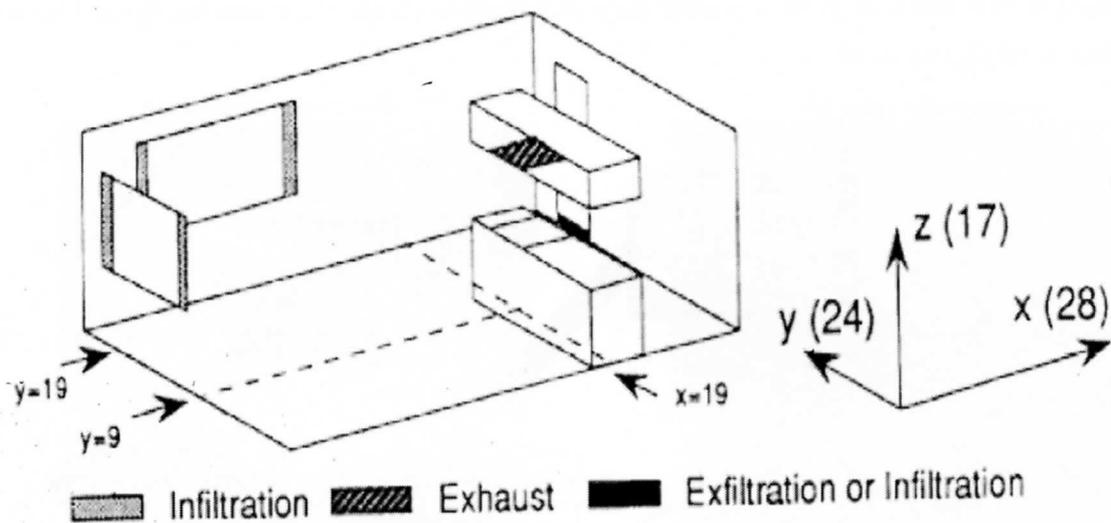


Figure 2.3.18 Sketch of living room and kitchen (left)
and number of cells in each direction (right)
(Adapted from Schaelin et al. ²⁻¹¹⁾, Figure 3)

We used the same boundary conditions as in Case K4 with no wind of Schaelin et al. ²⁻¹¹⁾. The kitchen ventilation was mechanically forced by an exhaust system above the cooking plate running at $200\text{m}^3/\text{h}$. The cooking plates were assumed to have a convective heat transfer of 500 W to the air. For the cooking process a unit contaminant source of 0.01 ml/s was assumed. The outdoor temperature was 20°C while the temperature in room 2 was assumed to be 22°C and adiabatic walls were supposed for the their CFD simulation. In their simulation the door connecting room 1 and room 2 was not open. However, in order to apply our method to a large opening, for our study the door is open. Using COMIS ²⁻⁸⁾ as the multizone network model, the calculated air infiltration rate through the windows and the effective flow rate through the open door are both $100\text{ m}^3/\text{h}$. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation was used as the CFD model. To couple CFD and COMIS at the open door, in the COMIS simulation, the door was described as a conjunction of parallel small openings, properly located with the height corresponding to that of the cells in the CFD domain, and with only a one-way flow allowed for each one. Each small opening was then described by a crack flow equation taking into account the local pressure drop. The velocity of the air flow at different heights was computed and then corrected in a way that satisfies the mass conservation; meaning that the mass flow rate calculated with those velocities must equal the effective flow rate through the door calculated by COMIS.

Figure 2.3.19 gives the pressure differences at the door in relationship to its height. These pressure differences were used to calculate the boundary velocities in the CFD simulation using. Figure 2.3.20 shows the color filled of the temperature and the contaminant concentration respectively at the plane $\bar{y} = 9$, while Figure 2.3.21 gives them at the plane $x = 19$. The positions of the planes, given in units of cells, are shown in Figure 2.3.18. Table 2.3.2 gives a comparison of the contaminant concentration of the multizone only simulation with the coupled multizone-CFD simulation. In the coupled analysis, the contaminant concentration in room 1 is a representative value taken at a height of 1.6 m while those of room 2 and the exhaust are the average values at the door and the exhaust outlet respectively.

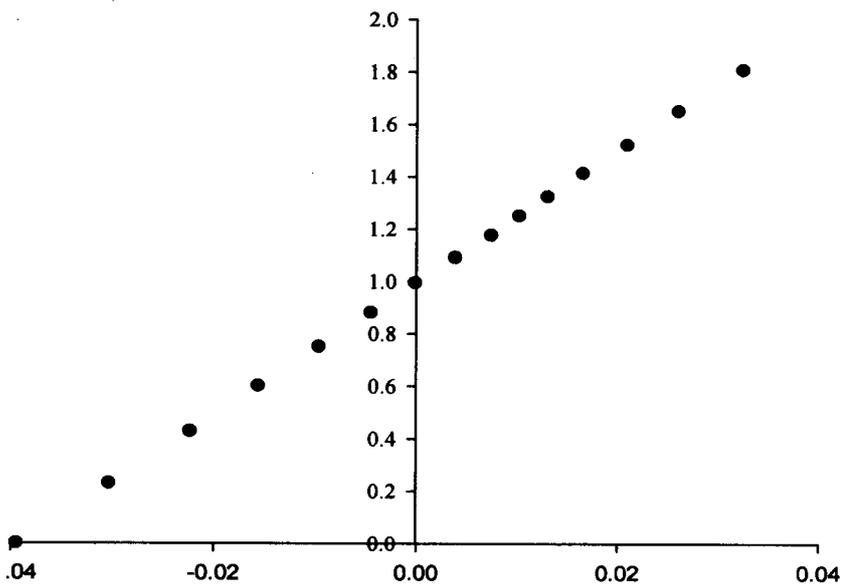


Figure 2.3.19 Pressure difference in relationship to the door height

The pressure differences in relationship to the door height described in Figure 2.3.19 indicate the bi-directional flow which is characteristic behavior of large openings. Here positive pressure differences mean that the flow is leaving the room, while negative pressure differences mean that the flow is entering the room. The pressure difference profile is an output of the multizone model and is used to calculate the boundary velocities at the door in the CFD calculation.

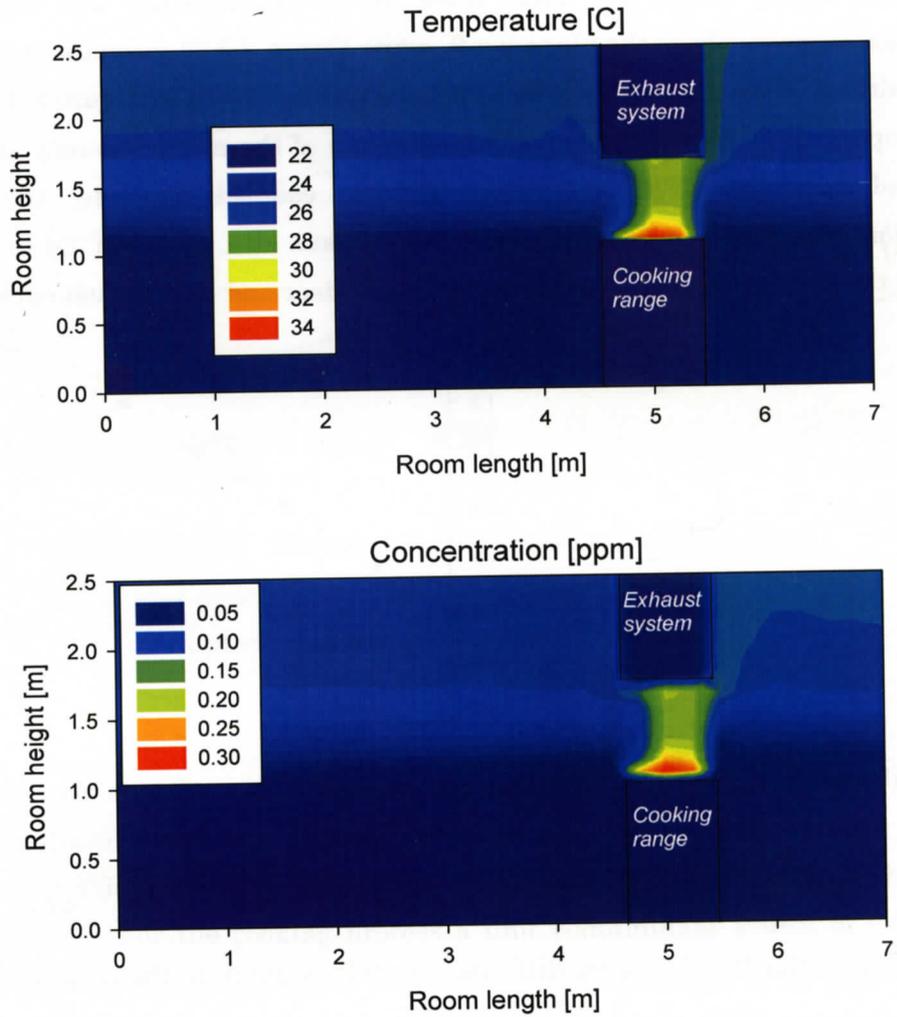


Figure 2.3.20 Color filled at y=9.for Temperature ($^{\circ}$ C), and Concentration (ppm).

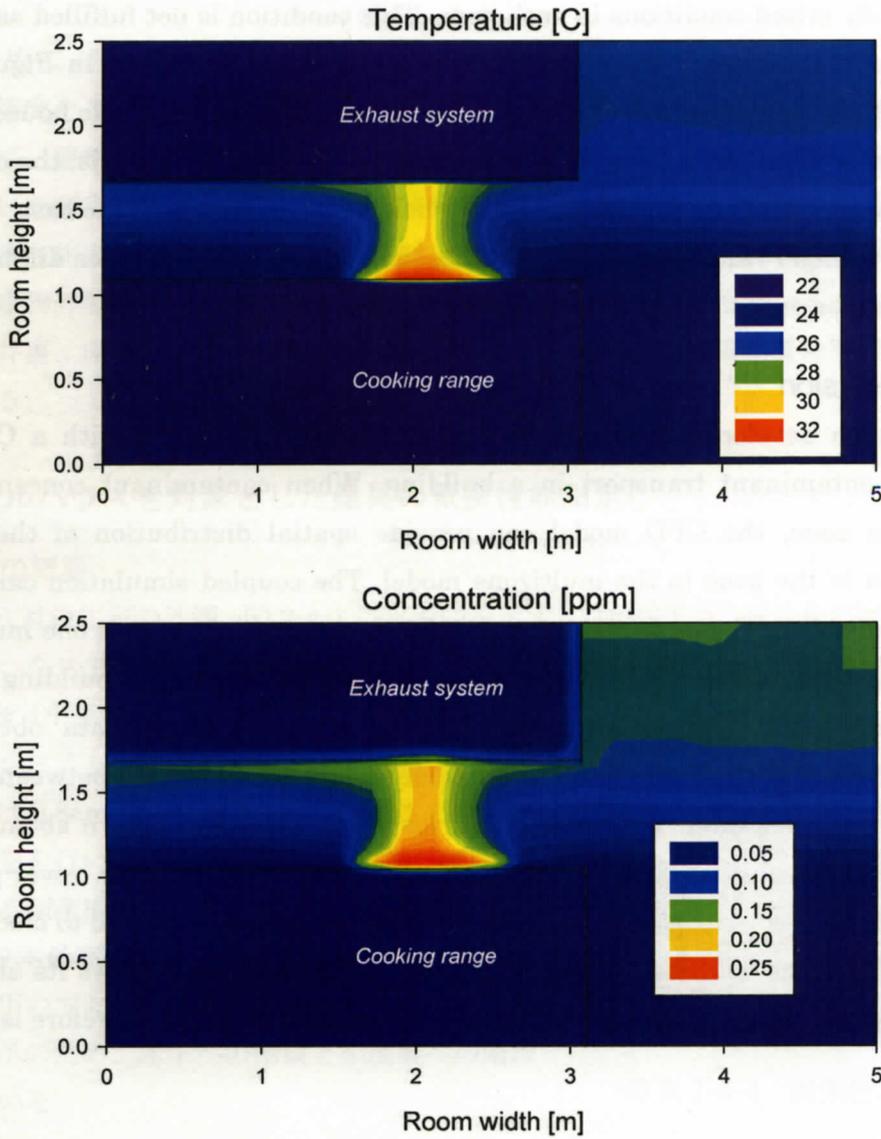


Figure 2.3.21 Color filled at x=19. for Temperature ($^{\circ}$ C), and Concentration (ppm).

Table 2.3.2 Contaminant concentration in room 1, room 2 and exhaust

	Room 1	Room 2	Exhaust
Multizone-only analysis	0.18 ppm	0.15 ppm	0.18 ppm
Coupled analysis	0.10 ppm	0.09 ppm	0.15 ppm

The accuracy of the results of multizone calculations is restricted by the assumption of homogeneously mixed conditions in each node. This condition is not fulfilled as shown by the stratification of the temperature and the contaminant concentration in Figure 2.3.20 and Figure 2.3.21. Therefore the use of multizone model to simulate the whole house would lead to false prediction. Table 2.3.2 illustrates, compared to the coupled analysis, the over-prediction of the multizone model used to calculate the whole house in this example case. The multizone model gives a single value for the space, while the coupled analysis gives different values for different zones or nodes.

2.3.7 Conclusion

This research developed a scheme to couple a multizone model with a CFD model for simulating contaminant transport in a building. When contaminant concentration is not uniform in a zone, the CFD model can provide spatial distribution of the contaminant concentration in the zone to the multizone model. The coupled simulation can lead to more accurate results than the multizone model while the computing costs is one magnitude order smaller than that of the CFD model when applied to the entire building. The coupled multizone and CFD program was validated with experimental data obtained from a three-zone environmental chamber. The agreement is reasonably good between the computed results and measured data. This study confirms what is already known about the failure of the well-mixing assumption of multizone models leading to over-prediction or under-prediction of contaminant in a space. Previous works were limited to modeling one-way orifice openings. The solution we propose in the outlined method shows its ability to model both small openings and large openings with bidirectional flow and therefore is universal.

2.4 建物の隙間特性に関する測定

2.4.1 はじめに

数値解析の精度を高めるために必要な建物の隙間特性について検討する。第一に、モデルハウスを対象として、建物の隙間の大部分を占める開口部の窓サッシや建具の隙間特性を測定し、気密測定器を用いた測定法の検証と窓サッシや建具の隙間特性の実態把握を行う。第二に、スライスモデル及び実在住宅を対象として、内部空間相互の相当隙間面積を把握するとともに、得られた結果を基に建物の隙間ネットワークを設定し、熱負荷換気濃度に関するシミュレーションを行うことで、天井裏、床下、外壁及び間仕切等の内部空間で発生した汚染物質の室内への侵入経路を明らかにする。

2.4.2 モデルハウスを対象とした建具の気密性能測定

(1) 対象住宅の概要

写真2-4-1に対象住宅の外観、図2-4-1に平面図を示す。対象住宅は、総合住宅展示場内に建設されたモデルハウスである。2004年4月に竣工し、延床面積は225.2m²（1階114.41 m²、2階97.34 m²、3階（小屋裏）10.56 m²）、建設時（換気システムや冷暖房システムの設置前）の単位床面積当たりの相当隙間面積は0.8cm²/m²である。また、高性能断熱材を用いて外断熱を行い、アルミに比べ約1000分の1の熱伝導率である国産樹脂のサッシを採用し、高断熱を実現している。日本最高級木材である木曾檜を柱や梁、扉、仕上げ材等に用いており、木のぬくもりが感じられる住宅である。展示のため、床下への階段と小屋裏への階段が設置されている。



写真 2-4-1 対象住宅の外観



図 2-4-1 モデルハウスの平面図

(2) 測定方法

写真 2-4-2 に示す気密測定器（コーナー札幌製、KNS-400）を用いて、和室・寝室の建具等の測定を行う。測定対象空間（和室または寝室）以外のゾーンは窓を開放して外気とみなし、測定対象となる窓や建具をビニールシートで目張りした状態から測定を開始する。窓や建具単位でシートを外して測定を行い、それらの隙間面積を求める。ビニールシートは室内側に設置するため、加圧法を用いて測定した。夏期の測定日は、9月3日、冬期は1月24日、春期は、和室が5月24日、寝室が25日である。

和室の建具等の測定対象は、襖（2枚組、写真 2-4-3）と障子（北面：4枚組×2、東面：2枚組×2、写真 2-4-4）である。障子は、広縁に接する北面と東面に設けられており、更に、出入り口だけでなく欄間部分にも設置されている。そこで、北面の上下、東面の上下の4つの部位に分割して測定を行った。測定器は東面の窓に設置した（写真 2-4-2）。

寝室の建具等の測定の測定対象は、窓（写真 2-4-5）、ドア2ヶ所（写真 2-4-6・2-4-7）、障子（写真 2-4-8）である。窓は、1つの枠に4つの開き戸がついているタイプだが、左端の開き戸に測定器を設置したため、測定したのは残りの部分の隙間である。ドアは両方とも開き戸である。

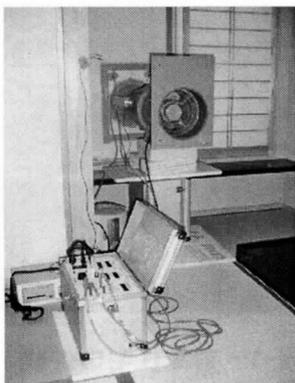


写真 2-4-2 気密測定器
（和室）

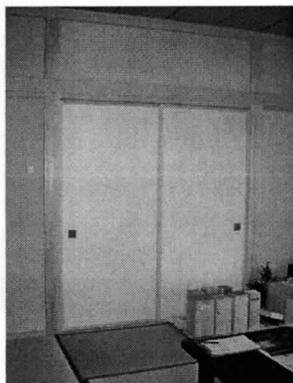


写真 2-4-3 襖（和室）

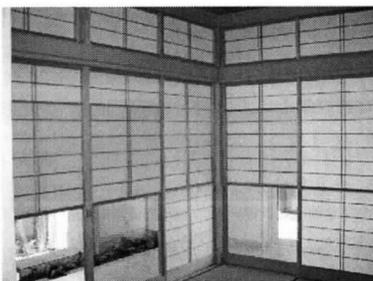


写真 2-4-4 障子（和室）



写真 2-4-5 窓（寝室）
（左端の窓に測定器を設置）

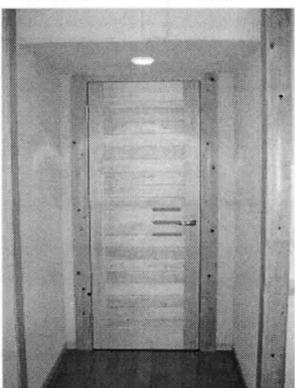


写真 2-4-6 ドア①（寝室）



写真 2-4-7 ドア②（寝室）
（クローゼット側）

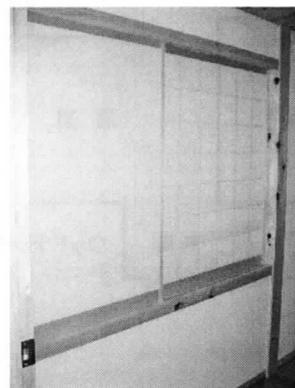


写真 2-4-8 障子（寝室）

(3) 夏期・中間期・冬期の測定結果

表2-4-1に、和室の測定ケースと測定結果、表2-4-2に、測定結果から算出した建具の隙間面積、図2-4-2に、建具の相当隙間面積の算出結果を示す。図2-4-2を見ると、襖や障子の隙間長さ当たりの相当隙間面積は3~14cm²/mであることが分かる。冬期では、夏期と比較して、襖と北面上の障子は隙間面積が大きくなり、他の障子は隙間面積が小さくなっている。これは、木材の調湿作用により、建具と建具が取り付けられている枠の間にできる隙間面積が変化した結果だと考えられる。建具面積当たりの相当隙間面積は8~55cm²/m²であり、建具の面積当たりと隙間長さ当たりの値を比較すると、面積の小さい欄間部分の障子は、建具面積当たりの場合に値が他より大きくなる。

表2-4-1 測定ケースと結果 (和室)

ケース番号	襖	障子 (北面上)	障子 (北面下)	障子 (東面上)	障子 (東面下)	隙間面積(cm ²)		
						夏期	冬期	春期
case1	シール	シール	シール	シール	シール	181	322	448
case2	開	シール	シール	シール	シール	280	446	594
case3	開	開	シール	シール	シール	357	526	644
case4	開	開	開	シール	シール	497	618	737
case5	開	開	開	開	シール	520	634	760
case6	開	開	開	開	開	567	661	822

表2-4-2 建具の隙間面積 (和室)

建具等	隙間の長さ (m)	建具等の 面積(m ²)	算出方法	隙間面積(cm ²)		
				夏期	冬期	春期
襖	9.09	3.22	case2-case1	99	124	146
障子(北面上)	9.45	1.46	case3-case2	77	80	50
障子(北面下)	16.52	6.67	case4-case3	140	92	93
障子(東面上)	4.73	0.72	case5-case4	23	16	23
障子(東面下)	9.09	3.22	case6-case5	47	27	62

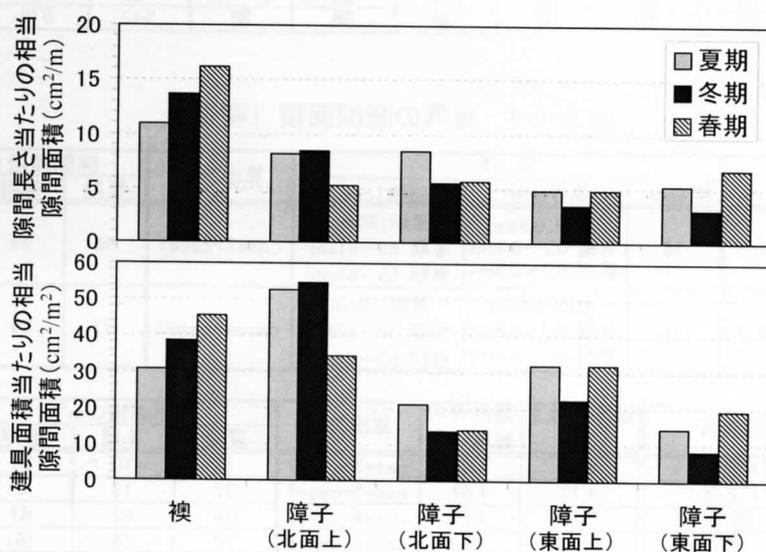


図2-4-2 建具の相当隙間面積 (和室)

表 2-4-3 に、寝室の測定ケースと測定結果、表 2-4-4 に、測定結果から算出した建具の隙間面積、図 2-4-3 に、建具の相当隙間面積の算出結果を示す。

アンダーカットの実寸は表 2-4-4 に示した通りである。夏期実測終了後の実寸の計測値は、ドア①、ドア②ともに $76\text{cm} \times 0.5\text{cm} = 38\text{cm}^2$ であり、夏期の測定結果と比較すると、ドア②は実寸とほぼ同じだが、ドア①は測定結果の方が大きくなっている。これは、頻繁なドアの開閉や通行や木材の調湿作用等によるドアや床の歪みの影響で、アンダーカットの高さが一律ではないためと考えられる。冬期の測定時にアンダーカットの高さを計測したところ、 $0.7 \sim 0.8\text{cm}$ と夏期よりも大きくなっており、アンダーカットの面積は $53 \sim 61\text{cm}^2$ になると推察される。冬期の測定結果と比較すると、ドア①がやや小さい一方で、ドア②はやや大きく、頻繁なドアの開閉や通行や木材の調湿作用等によるドアや床の歪みの影響と考えられる。春期の実寸の計測値は冬期とほぼ同じであり、測定結果も冬期と同じくらいの値であることから、妥当な結果と言える。なお、ドア②の値が小さくなったのは、シール状況の影響と考えられる。

図 2-4-3 を見ると、ドアの隙間長さ当たりの相当隙間面積は $2 \sim 6\text{cm}^2/\text{m}$ 、障子は約 $12\text{cm}^2/\text{m}$ で和室の襖と同じくらいである。窓は約 $2\text{cm}^2/\text{m}$ で最も小さい。春期の Case7 では風が強く、風量と差圧の対数を取った場合の相関が直線に近似できなかったため、窓の測定結果は参考値である。建具面積当たりと隙間長さ当たりの値を比較すると、傾向は同じである。

表 2-4-3 測定ケースと結果 (寝室)

ケース番号	ドア① アンダーカット	ドア①	ドア② アンダーカット	ドア②	障子	窓	隙間面積 (cm ²)		
							夏期	冬期	春期
case1	シール	シール	シール	シール	シール	シール	292	323	330
case2	開	シール	シール	シール	シール	シール	360	372	399
case3	開	開	シール	シール	シール	シール	377	382	421
case4	開	開	開	シール	シール	シール	414	451	472
case5	開	開	開	開	シール	シール	441	470	480
case6	開	開	開	開	開	シール	525	552	561
case7	開	開	開	開	開	開	542	570	(567)

表 2-4-4 建具の隙間面積 (寝室)

建具等	実寸			算出方法	隙間面積 (cm ²)		
	幅 (cm)	高さ (cm)	面積 (cm ²)		夏期	冬期	春期
ドア①アンダーカット	76	夏期: 0.5cm 冬期: 0.7~0.8cm 春期: 0.7~0.8cm	夏期: 38cm ² 冬期: 53~61cm ² 春期: 53~61cm ²	case2-case1	68	49	69
ドア②アンダーカット	76	夏期: 0.5cm 冬期: 0.7~0.8cm 春期: 0.7~0.8cm	夏期: 38cm ² 冬期: 53~61cm ² 春期: 53~61cm ²	case4-case3	37	69	51

建具等	隙間の長さ (m)	建具等の面積 (m ²)	算出方法	隙間面積 (cm ²)		
				夏期	冬期	春期
ドア①	4.68	1.49	case3-case2	17	10	22
ドア②	4.72	1.51	case5-case4	27	19	8
障子	7.33	2.24	case6-case5	84	82	81
窓	11.11	1.99	case7-case6	17	18	(6)

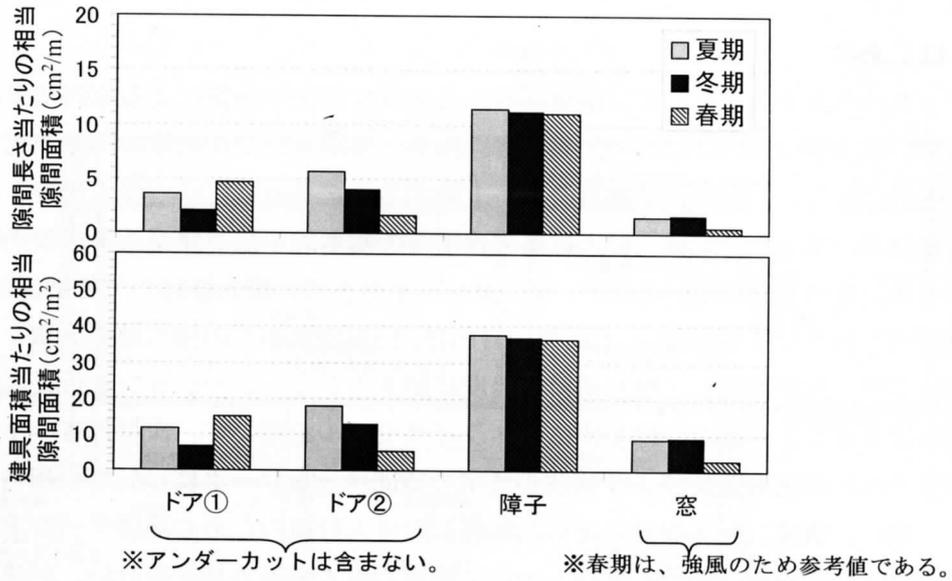


図 2-4-3 建具の相当隙間面積 (寝室)

(4) まとめ

- ・ 襖や障子、開き戸の隙間長さ当たりの相当隙間面積は2~14cm²/mである。
- ・ 窓サッシの隙間長さ当たりの相当隙間面積は約2cm²/mで、襖や障子、開き戸よりも小さい。
- ・ 頻繁な建具の開閉やドアの通行、木材の調湿作用等により、建具と建具が取り付けられている枠の間にできる隙間面積やアンダーカットの面積が季節毎に変化すると考えられる。

2.4.2 天井裏等の建物内部空間からの汚染物質の室内侵入に関する研究

(1) はじめに

シックハウス予防策として、建築材料から放散する化学物質による室内空気汚染の対策が進められている。既往の研究において、天井裏、床下、外壁及び間仕切等の内部空間で発生した汚染物質が室内に侵入し、室内化学物質濃度が上昇することが確認され、侵入対策として内部空間での発生量抑制、換気設計配慮、侵入経路の遮断等の基本的手法が建築基準法改正に含められた。これらの手法を効果的に用いるため、発生源から室内までの侵入経路の実態把握が望まれるが、その実態は明らかとなっていない。本研究の目的は、内部空間相互の相当隙間面積を把握して建物の隙間ネットワークを設定し、熱負荷換気濃度に関するシミュレーションを行うことで、侵入経路を明らかにすることである。はじめに、スライスモデルを用いて、次世代省エネ基準に準じて断熱気密化された在来木造及び2×4構法の住宅の隙間ネットワークについて、相当隙間面積の測定を行う。次に、構造、換気設備の種別を考慮した侵入対策のための基礎データを得るために、実建物を対象にした内部空間から室内への汚染物質の侵入率等の測定を行い、戸建住宅における侵入性状の概要を把握する。

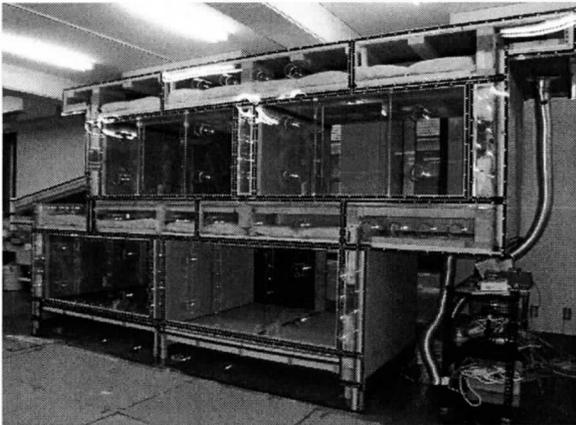


図 2.4.4 スライスモデル
(次世代省エネ基準 $C \leq 2$)

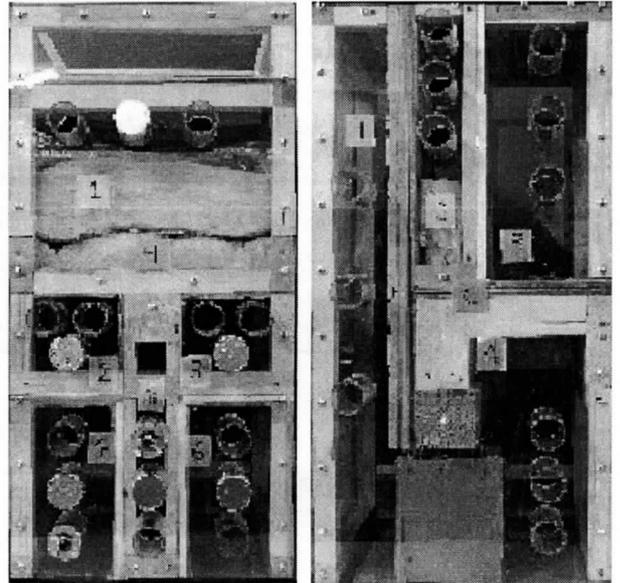


図 2.4.5 部分スライスモデル
(2×4 構法 NO3, NO8)

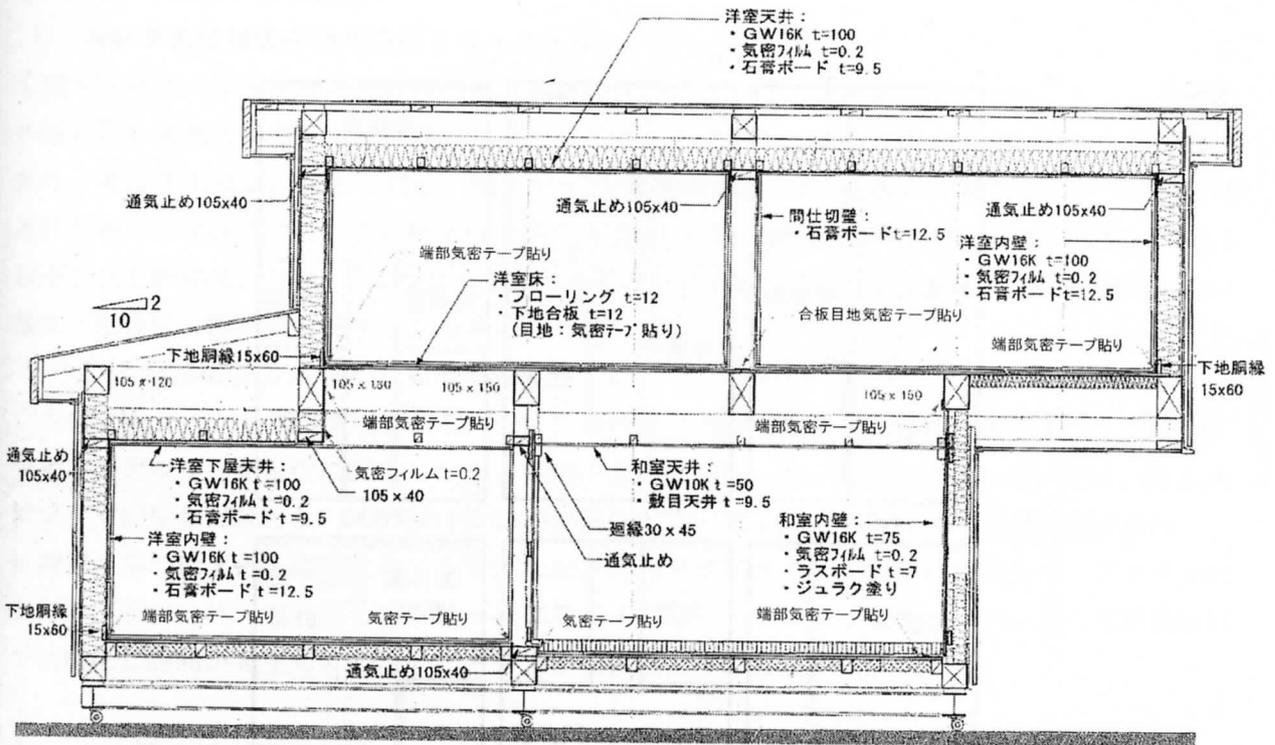


図 2.4.6 断熱気密化されたスライスモデルの仕様 (次世代省エネ基準の C 値 ≤ 2 の仕様に準じる)

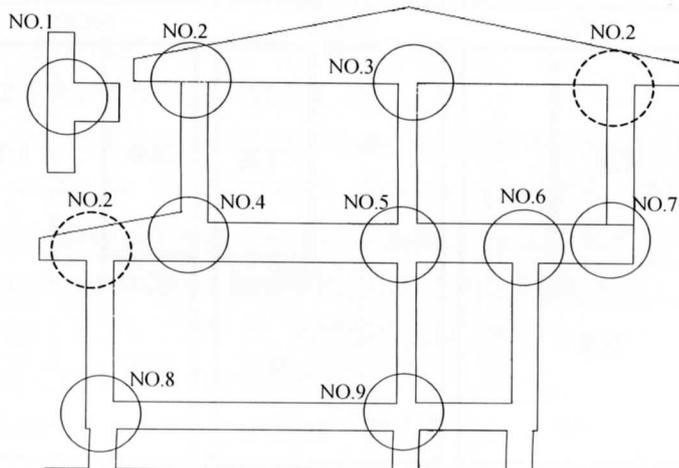


図 2.4.7 部分スライスモデル (2×4 構法) の断面

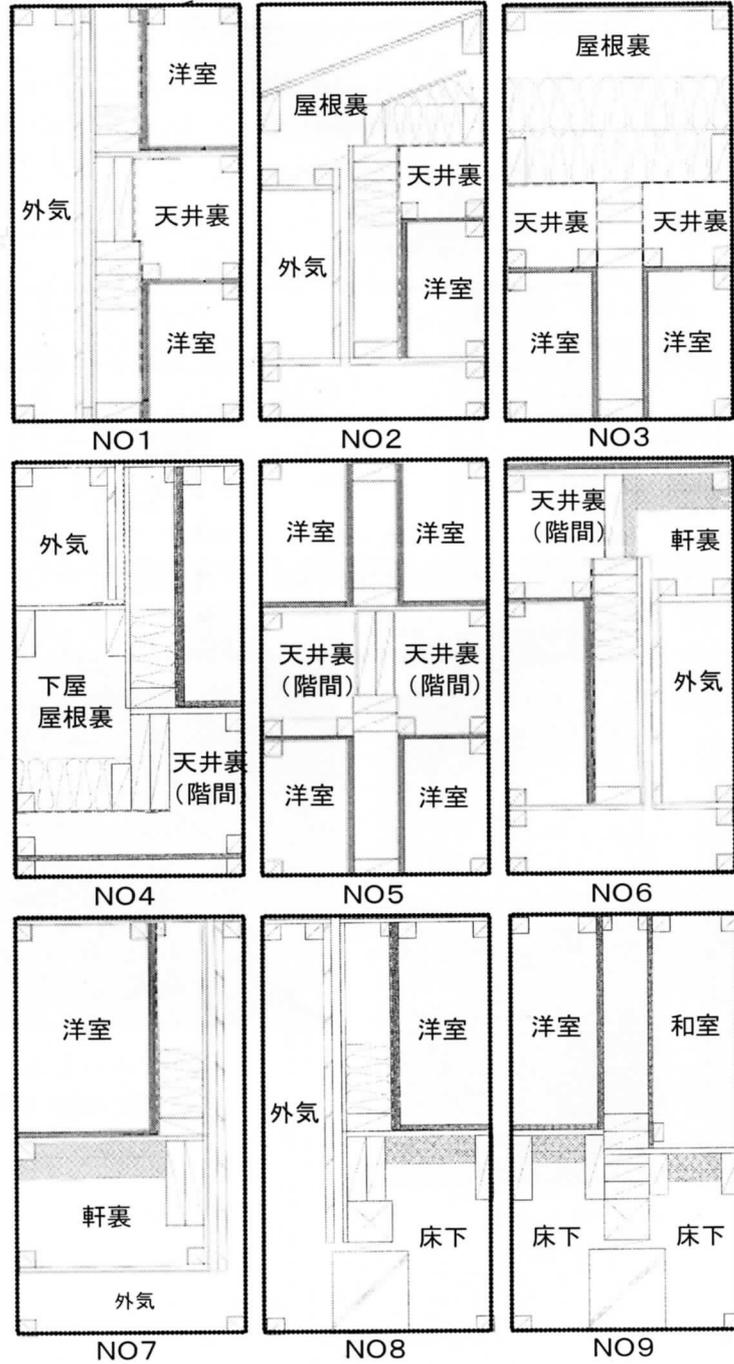


図 2.4.8 部分スライスモデル (2×4 構法) の断面

(2) 次世代仕様の在来木造と2×4構法のスライスモデルの相当隙間面積

(a) スライスモデルの概要

1) 断熱気密仕様の在来木造のスライスモデル

宮城学院女子大学構造材料実験室内に、戸建住宅の内部空間の連結状態をモデル化し、主な連結の組み合わせを含んだ非気密仕様のスライスモデルが在来軸組構法によって2004年度に建設された。奥行き1.35m、高さ2.72m、幅4.55mとし、実建物の通気性状が再現されるように適切な部位が組み込まれている。この構造体を用いて2005年春に次世代基準に準じた相当隙間面積が2以下となる断熱気密仕様²⁻¹⁶⁾に改修した。内装及び内装下地、断熱材が撤去され軸組が露出した状態にした後に、断熱気密施工を行った。

2) 2×4構法の部分スライスモデルの概要

宮城学院女子大学居住環境実験室内に、戸建住宅の内部空間の連結状態をモデル化した部分スライスモデルを、気密化に配慮した2×4構法によって制作した。部分スライスモデルは、図2.4.8に示す9部位を対象とし、900mm×450mm×455mmとした。部分スライスモデルを用いた理由は、主に測定作業の効率化を図るためである。なお、部分スライスモデル内の建物部分は、アクリルのケースに収められ、建物部分の切断面とアクリル面はシーリングと気密パッキン等の気密補助材で気密化し隙間が発生していないことを目視出来るようにした。

(b) セル間の相当隙間面積の測定方法

複数の空間が相互に隙間で連結しているために、空間の気圧を調整する方法(同圧法)を用いて、特定の空間間の相当隙間面積を測定した。断熱気密仕様のスライスモデルの測定では、第1報と同様に、ファンを用いて空間内を加圧しトレーサーガスによって風量を測定した。測定の手順については、以下のように行った。また、2×4構法による部分スライスモデルではマスフローコントローラーを用いた方法を相当隙間面積が小さい部分で必要に応じて用いた。

1) トレーサーガス法を用いた同圧法(図2.4.9)

図2.4.9のようにセル1-セル2間の相当隙間面積、N値を求める場合には、次の手順で測定する。①セル1(排気セルと呼ぶ)を外部に開放し基準圧と同じにする。②セル2、3、4(給気セルと呼ぶ)に給気し、セル内の気圧を高くする。③セル2、3、4の気圧を同じにする。④セル2への給気量をトレーサーガス法によって測定する。⑤以上の方法で、セル1、2の気圧差と風量を測定する。差圧を3段階以上変えて測定し、相当隙間面積、N値を求める。なお、図2.4.11のように、差圧を約1mmAqを挟んで3段階以上にした。

2) マスフローコントローラーを用いた同圧法(図2.4.10)

図2.4.10に示すように、エアコンプレッサーで加圧されたエアタンクからマスフローコントローラーを介して給気セル(図2.4.10中のセル2、3、4)に給気する。その他の手順はトレーサーガス法と同様である。

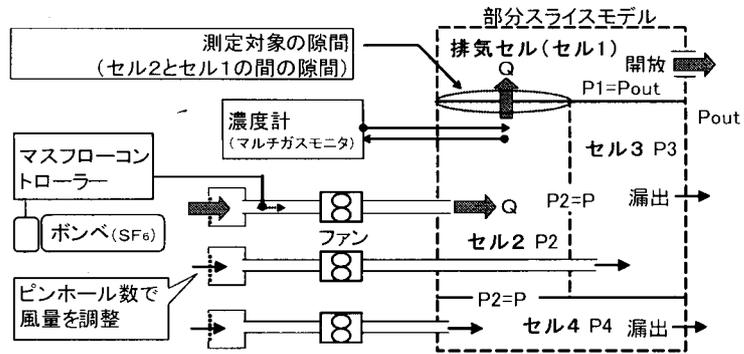


図 2.4.9 トレーサーガス法による同圧法システム

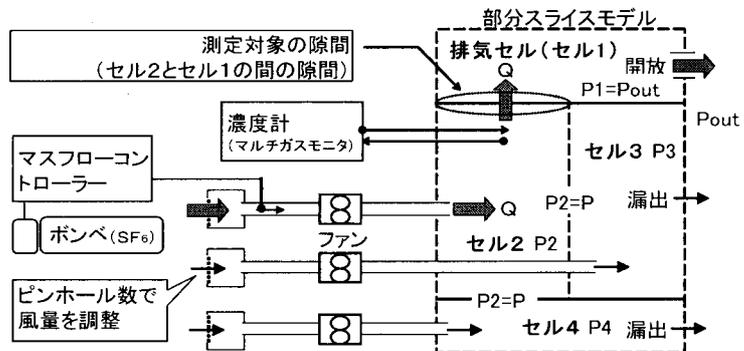


図 2.4.10 マスフローコントローラーによる同圧法システム

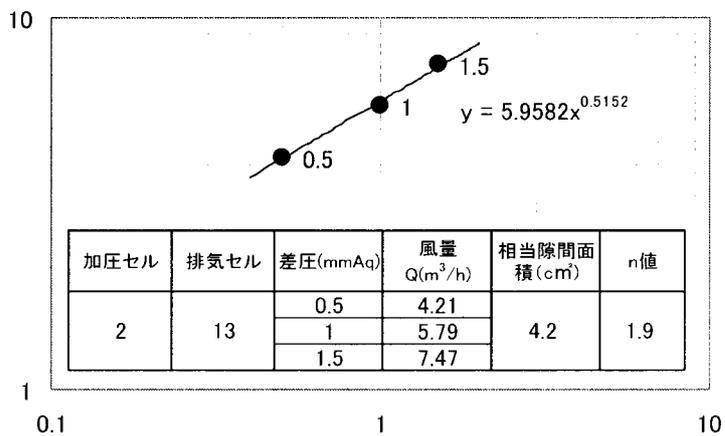


図 2.4.11 相当隙間面積測定例 (スライスモデル)

(c) 測定結果と考察

1) 非気密仕様と気密仕様の在来木造の比較

図 2.4.12 から図 2.4.14 に測定結果から換算した奥行き 1 m 当たりの相当隙間面積を示す。第 1 報で報告した非気密仕様の在来木造と断熱気密化仕様の在来木造の結果を比較すると、以下のようになる。なお、各空間と外気間の相当隙間面積については、施工内容が同じであるため基本的には大きく変わらないと考えられる。また、外壁については、通気層の室内側の断熱層を一つの空間として扱って、外壁と外気間の相当隙間面積は、防風層の隙間を介する外気までの経路を測定した結果となっている。

床下 (①) と 1 階の壁 (②、④、⑥) の間は、いずれのモデルでも相当隙間面積は小さく差がない。階間 (⑧) と 1 階間仕切壁 (④)、外壁 (⑥) の間は、木の通気止めが施工されたことで、相当隙間面積が大幅に小さくなった。階間 (⑧) と 2 階の壁 (⑩、⑫) の間の相当隙間面積は、いずれのモデルでも小さく差がない。屋根裏 (⑮) と 2 階の間仕切 (⑫) の間は、気密化によって相当隙間面積が小さくなったが、屋根裏 (⑮) と外壁 (⑩) との間では大きくなっている。これは、防風層の施工状態によるものである。

2) 断熱気密仕様の在来木造と 2×4 構法の比較

2×4 構法による部分スライスモデルと、次世代基準に準じた在来軸組構法によるスライスモデルでは、相当隙間面積の値は全体的に後者の方が小さい。また、断熱気密仕様の在来木造の方が、縦の経路 (床と室内、天井等と室内の間)、各内部空間と外との間の経路で相当隙間面積が大きい値を示すのに対して、2×4 構法では、横の経路 (室内と壁の間) で比較的大きな値を示した。また、内部空間と外との経路は非常に小さく、比較すれば、内部空間同士の経路のほうが大きい。

(d) まとめ

(3) 実在住宅を対象とした実測

(a) 測定対象と測定方法

測定対象は、在来木造、2×4 構法、工業化構法による合わせて9棟の2階建ての一般的規模の戸建住宅である。いずれも、次世代省エネルギー基準に準じた断熱気密仕様となっており、機械換気設備が備えられている。測定は、2003年から2005年にかけて主に春と秋の中間期に実施された。測定の項目は以下の通りである。

建物の相当隙間面積を、写真 2.4.9 に示すように窓に排気ファンを設置して測定(コーナー札幌住宅気密測定器使用)した。強制給排気風量を、写真 2.4.10 に示すように風量計(コーナー札幌 KNS-233)により測定した。内外の気圧差を5秒間隔で微差圧形により測定し、各室及び外気の温湿度を10分間で測定して、データロガー(差圧:T and D Voltage Recorder VR-71、温湿度:T and D Thermo Recorder TR-72s)で記録した。

換気量および侵入率 κ は、多種類のトレーサーガス(SF_6 , R22 , CO_2)を用いて測定した。換気量はトレーサーガス一定発生法により、各室で5Wのファンで攪拌した状態で室間の内部建具を開放して、トレーサーガスを各室で一定発生させて、機械換気の排気濃度を測定(写真 2.4.11 に示すように INNOVA マルチガスモニタを使用)した。

侵入率 κ の測定は、内部空間として床下、天井懐(階間)、屋根裏の3箇所を対象とし、換気量の測定と同時に、換気量測定用のトレーサーガスと異なるガスを内部空間で一定発生させ、機械換気の排気濃度を測定(写真 2.4.11 に示すように INNOVA マルチガスモニタを使用)した。なお、トレーサーガス漏出が測定結果に影響する危険性を抑えるために、写真 2.4.12 に示すようにガスボンベは屋外に設置した。



写真 2.4.9 相当隙間面積の測定



写真 2.4.10 風量測定



写真 2.4.11 換気量・侵入率 κ の測定

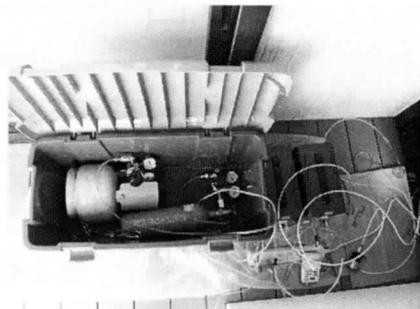


写真 2.4.12 トレーサーガスボンベ

侵入率 κ の定義とトレーサーガス濃度及び発生量から算出する方法を以下に示す。瞬時一様拡散の仮定の下で内部空間からの侵入を考慮した室内濃度 C を式 2-4-1 で示す。

$$C = E_t / Q + C_o \quad (2-4-1)$$

E_t は内部空間からの侵入量を含めた室内の発生量である。 Q は換気量である。

E_t は、式 2-4-2 によって示すことが出来る。

$$E_t = \kappa E_j + E_i \quad (2-4-2)$$

E_j は内部空間での発生量、 E_i は室内での発生量、 κ は内部空間から室内への侵入率である。

侵入率 κ は以下のように示すことが出来る。

$$\kappa = \{(C - C_o) Q - E_i\} / E_j \quad (2-4-3)$$

トレーサーガスを用いて侵入率 κ を測定するために、式 2-4-3 を基に式 2-4-4 を導く。

$$\kappa = \{(C - C_o) Q\} / E \quad (2-4-4)$$

ここに、 E は内部空間でのトレーサーガスの発生量、 C は室内濃度、 C_o は外気濃度である。

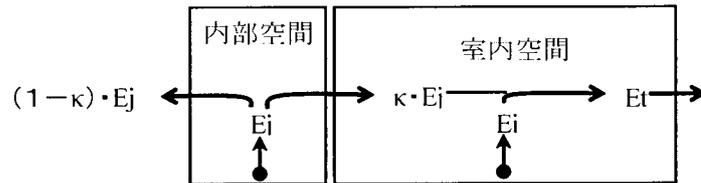


図 2.4.15 内部空間から室内への侵入の単純モデル

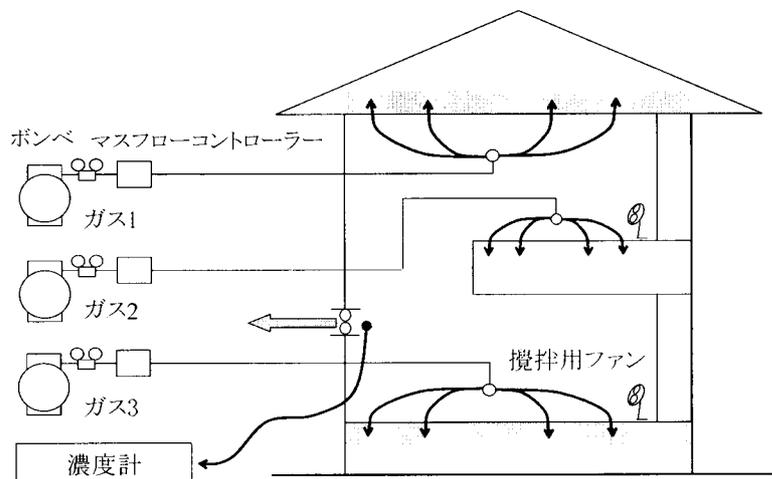


図 2.4.16 侵入率 κ の測定方法

(b) 測定結果

測定は在室者がいない状態で行い、内外の温度差が大きくなることに留意し、基本的には暖房冷房をおこなっていない。図 2.4.17 にコンクリートパネルによる工業化住宅の場合の測定期間中の温度推移を示すが、外気温は $5\sim 20^{\circ}\text{C}$ で、熱容量が大きいため室温 $18\sim 20^{\circ}\text{C}$ で安定している。図 2.4.18 に内外差圧の推移を示すが、内外温度差及び外部風の影響によって内外差圧は変動するが、測定者の入室によるドア解放時以外は、機械換気によって室内が $-0.6\sim -0.7\text{mmAq}$ 程度の負圧となっている。図 2.4.19 に機械換気の排気のトレーサーガス濃度推移を示すが、図中に示す発生箇所の切替に対応して、各トレーサーガスの濃度が変化している。この測定対象では2種類のガスを使用しており、はじめに室内で R22 を発生させ、屋根裏で SF_6 を発生させている。同時に同量のガスを一定発生させている場合、外気濃度が共に 0 である仮定の下では室内で発生させたトレーサーガスの安定濃度に対する内部空間で発生させたトレーサーガスの安定濃度の比が侵入率 κ に等しくなる。この時間帯の測定では、屋根裏から室内への侵入率 κ は 30%程度であった。また、10月17日の午後からは、室内で SF_6 を発生させている。いずれの場合も、換気量測定のために室内で発生量させたトレーサーガスは約 1.2ppm に安定し、機械換気によって換気量が大幅安定していたことを示した。ガス発生量はいずれのトレーサーガスの場合も 5ml/h とした。

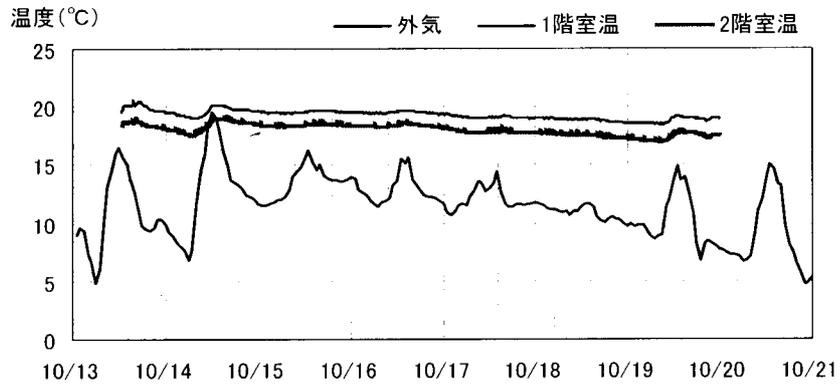


図 2.4.17 測定時の1階・2階・外気温度推移
(工業化住宅/コンクリートパネル)

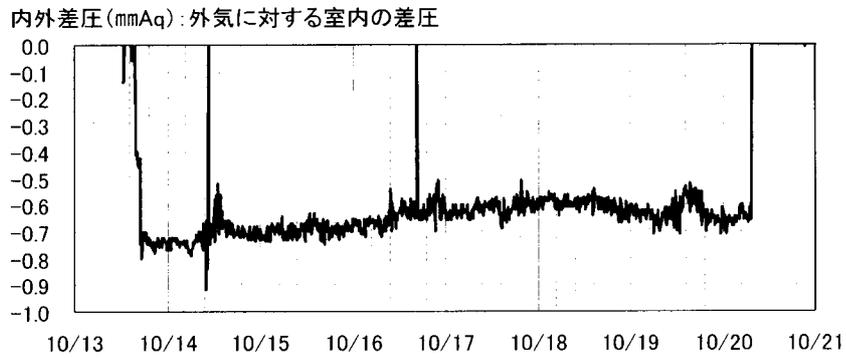


図 2.4.18 測定時の内外差圧推移
(工業化住宅/コンクリートパネル)

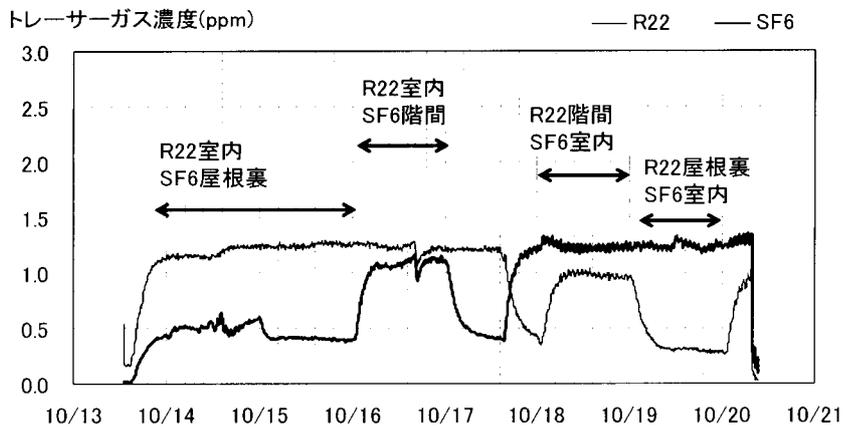


図 2.4.19 測定時のトレーサーガス濃度推移
(工業化住宅/コンクリートパネル)

表 2.4.5 に、測定対象の概要及び侵入率 κ の換算結果を示す。以下に、構法毎の測定結果を示す。

① 在来構法

- ・ C 値は $1.6 \sim 4.2 \text{ c m}^2 / \text{m}^2$ で気密住宅の範囲にあった。
- ・ 主な対象住宅には第三種換気設備が設置されている。
- ・ 内外差圧は、 $-0.05 \sim -0.25 \text{ mmAq}$ であった。
- ・ 階間からの侵入率 κ は $71 \sim 100\%$ 、床下からの侵入率 κ は $14 \sim 16\%$ であった。

② 2×4 構法

- ・ C 値は $2.5 \text{ c m}^2 / \text{m}^2$ で気密住宅の範囲にあった。
- ・ 第三種換気設備が設置されている。
- ・ 内外差圧は -0.16 mmAq であった。
- ・ 侵入率 κ は第三種換気で階間が 84% 、床下が 19% 、屋根裏が 11% であった。

③ 工業化構法

- ・ C 値は $1.0 \sim 2.9 \text{ c m}^2 / \text{m}^2$ で気密住宅の範囲にあった。
- ・ 第一種又は第三種換気設備が設置されている。
- ・ 内外差圧は、 $+0.17 \sim -0.7 \text{ mmAq}$ であった。
- ・ 侵入率 κ は、第一種換気状態で階間が 68% , 100% 、床下が 11% , 33% 。第三種換気で階間が 88% 、 100% 、床下が 47% 、屋根裏が 32% であった。
- ・ 基礎パッキンの場合に、床下からの侵入率 κ が高い場合が見られた。

以上のように、構法による差は顕著ではなかったが、内部空間の違いによる差が顕著であった。

図 2.4.20 に内外差圧と侵入率 κ の関係を示す。図中には本報告で示す新たな測定結果の他に、既往の測定結果²⁻¹⁵⁾が含まれている。基本的には、内外差圧がマイナス方向に大きくなると（室内が外気に対して負圧になるほど）、侵入率 κ が 100% に近づく傾向があるが、内部空間毎に、侵入率 κ の程度は以下のように異なる。

天井裏（階間）からの侵入率 κ は、内外差圧が正の値の場合（室内が正圧の場合）を除いて、約 70% 以上の高い値を示している。床下換気口が設置されている床下からの侵入率 κ は場合に 20% 以下であり、他の部位よりも低い。しかし、基礎断熱の住宅ばかりではなく基礎パッキンを用いた住宅でも、侵入率 κ が 30% 以上と高くなっている。基礎パッキンを用いた場合に基礎外面に仕上げのモルタルを施工しており、水切り下の基礎と土台の間の通気経路がふさがれ、換気性能が低下していることが考えられる。本測定結果にはこのような場合に床下からの侵入率 κ が高くなったと推定される。侵入率の問題に限らず、基礎パッキン仕様における床下換気確保の設計施工の徹底が必要である。

表 2.4.5 測定対象建物の概要と侵入率 κ 測定結果

測定対象	延床面積 (m^2)	C値 (cm^2/m^2)	換気	風量測定結果 (m^3/h)		トレーサーガ ス発生箇所	内外差圧 ($mmAq$)	測定時換気 量 (m^3/h)	侵入率 κ (%)
				給気	排気				
在来構法(関東)	122	4.2	第三種	-	118	階段	-0.05	205	96
在来構法(東北)	161	3.5	第三種	-	89	階段	0.06	214	71
在来構法(東北)	128	1.6	第三種	-	(102)	床下	-0.13	94	16
						階段	-0.1	100	100
在来構法(関東)	113	2.9	第三種	-	(162)	階段	-0.25	130	70
						床下	-0.25	143	14
						階段	-0.25	143	71
2×4構法(関東)	102	2.5	第三種	-	45	階段	-0.16	63	84
						床下	-0.16	61	19
						屋根裏	-0.16	63	11
工業化構法/木質パネル (東北)	121	2.9	第一種	158	165	階段	-0.42	220	100
						床下	-0.36	175	33
工業化構法/ 軽量鉄骨プレハブ(関西)	133	2.9	第三種	-	151	床下	-0.2	116	52
						階段	-0.25	193	100
工業化構法/ 軽量鉄骨プレハブ(東北)	125	2	第一種	168	175	階段	0.17	155	68
						床下	0.17	160	11
工業化構法/ コンクリートパネル(信州)	259	1	第三種	-	210	階段	-0.7	248	88
						屋根裏	-0.6	250	32

風量測定結果中の()内は設計風量

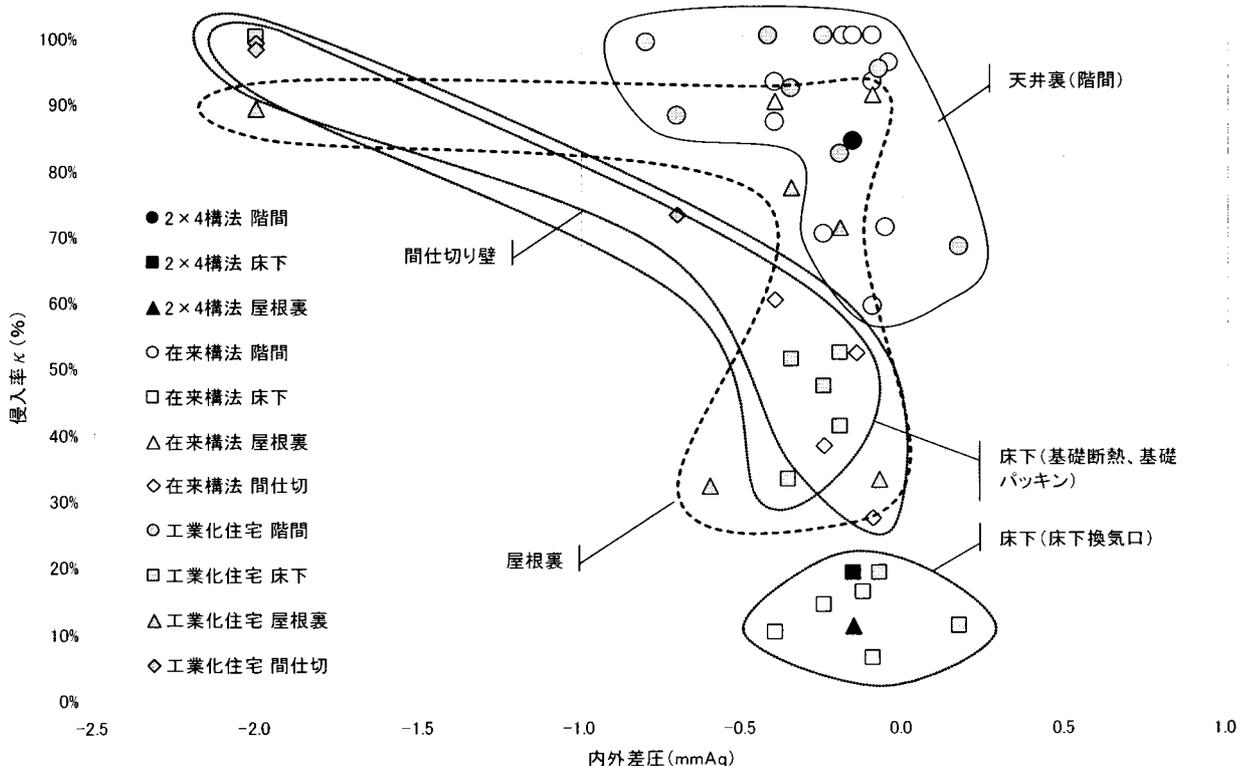


図 2.4.20 内外差圧と侵入率 κ の関係

(4) まとめ

(a) スライスモデルを用いた実験

断熱気密仕様の在来木造、2×4 構法のスライスモデルを作成して、内部空間相互の相当隙間面積の測定を行い、内部空間の連結状態に関するデータを取得した。非気密仕様の在来木造に比べて、断熱気密仕様の在来木造の内部空間相互の連結性は弱くなっていた。また、断熱気密仕様の在来木造に比べて、2×4 構法部では、さらに内部空間相互の連結が弱かった。

今後、実際の建物形状における侵入性状を、本測定による基礎データを用いた換気回路網計算によって示す予定である。

(b) 実在住宅を対象とした実測

構造、換気設備の種別を考慮した侵入対策のための基礎データを得るため、構法（在来木造、2×4 構法、工業化構法）の異なる 9 件の戸建住宅を対象に、内部空間から室内への汚染物質の侵入率等の測定を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ 室内が外気に対して負圧になるほど、侵入率 κ が 100% に近づく傾向があった。
- ・ 構法による差は顕著ではなかったが、内部空間の違いによる差が顕著であった。
- ・ 天井裏（階間）からの侵入率 κ は、内外差圧が正の値の場合（室内が正圧の場合）を除いて、約 70% 以上の高い値を示した。
- ・ 床下換気口が設置されている床下からの侵入率 κ は場合に 20% 以下であり、他の部位よりも低かった。
- ・ 基礎断熱の住宅ばかりではなく基礎パッキンを用いた住宅でも、侵入率 κ が 30% 以上と高くなった。基礎パッキンを用いた場合に基礎外面に仕上げのモルタルを施工しており、水切り下の基礎と土台の間の通気経路がふさがれ、換気性能が低下していることが考えられる。
- ・ 侵入率の問題に限らず、基礎パッキン仕様における床下換気確保の設計施工の徹底が必要である。

2.5 室内化学物質濃度の予測手法の開発と換気による汚染質制御

2.5.1 はじめに

数値解析の精度を高めるために必要な汚染物質の放散特性について、測定法の検討とデータ収集を実施する。また、換気による汚染質制御について、数値解析を用いた検討を行う。

2.5.2 家電製品・生活用品からの化学物質放散量の測定

(1) はじめに

室内における化学物質発生源は多岐にわたり、居住者が持ち込む家具、家電製品、燃焼器具、消臭・芳香剤、ホビー用品などの生活用品も軽視できない発生源である。また、これらの生活用品から発生化学物質により、健康被害を発症するケースも報告されている。このような背景から、筆者らは生活用品の化学物質発生量と発生特性を実験的に明らかにしてきた²⁻¹⁸⁾。

本研究では、生活用品の化学物質発生量を整理し、製品毎の VOC 発生量とホルムアルデヒド発生量を明らかにするものである。また、製品のホルムアルデヒド発生量を室内濃度予測式²⁻²³⁾に代入し、各種生活用品使用室のホルムアルデヒド定常濃度を予測するものである。これにより、室内濃度予測が実現し、また製品の室内化学物質許容発生量を決定する基礎資料を得るものである。

(2) VOC 発生量についての研究概要

(a) 生活用品の VOC 発生量

これまでに、筆者らが化学物質発生量を定量的に明らかにした生活用品を表 2.5.1、写真 2.5.1 に示す。



写真 2.5.1 ハロゲンヒーターの一例

表 2.5.1 生活用品のVOC発生量

製品名	検体名	VOC発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$]	捕集分析法 とVOC分析成分	消費電力、サイズ、形状等
電気式 暖房器具	電気ストーブA	51.1	【捕集分析法】 固相捕集-加熱導入- GC/MS法 【VOC分析成分】 ethanol acetone 2-propanol dichloromethane methylethylketone ethylacetate hexane chloroform 1,2-dichloroethane 2,4-dimethylpentane 1,1,1-trichloroethane butanol benzene carbon tetrachloride 1,2-dichloropropane bromodichloromethane trichloroethylene 2,2,4-trimethylpentane heptane methylisobutylketone toluene dibromochloromethane butylacetate octane tetrachloroethylene ethylbenzene m,p-xylene styrene o-xylene nonane a-pinene m,p-ethyltoluene 1,3,5-trimethylbenzene o-ethyltoluene b-pinene 1,2,4-trimethylbenzene decane p-dichlorobenzene 1,2,3-trimethylbenzene limonene nonanal Undecane 1,2,4,5-tetramethylbenzene decanal dodecane tridecane tetradecane pentadecane hexadecane	石英管ヒーター 800[W]
	電気ストーブB	1001 ^{※1}		遠赤外線ヒーター 700[W]
	セラミックヒーターA	80.0 ^{※1}		PCEサーミスタ 640[W]
	セラミックヒーターB	2576 ^{※1}		PCEサーミスタ 650[W]
	ハロゲンヒーターA	119 ^{※1}		ハロゲンランプ式ヒーター 800[W]
	ハロゲンヒーターB	11.7 ^{※1}		ハロゲン管 800[W]
	電気敷毛布	22.0 ^{※1}		綿100[%] 20[W]
電気コタツ	29.6 ^{※1}	ヒーターユニット部 300[W] × 2		
音響機器	マルチリスニングプレーヤーA	1.08 ^{※1}		
	マルチリスニングプレーヤーB	0.56 ^{※1}		
	マルチリスニングプレーヤーC	2.42 ^{※1}		
	MDプレーヤーA	2.50 ^{※1}		0.15[W]
	MDプレーヤーB	2.70 ^{※1}		0.10[W]
家電機器	電子レンジA	590 ^{※1}		オープン 1200[W]
	電子レンジB	657 ^{※1}		オープン 1280[W]
	電子レンジC	1992 ^{※1}		オープン 1360[W]
	掃除機A	1301 ^{※1}		強 1000[W]
	掃除機B	236 ^{※1}		強 1000[W]
事務機器	電子辞書A	3.82 ^{※1}		0.45[W]
	電子辞書B	2.91 ^{※1}		0.40[W]
	電子辞書C	6.82 ^{※1}		0.43[W]
	ノートパソコン	30.8 ^{※1}		60[W]
プリンタ	レーザープリンタ	270 ^{※1}		
	インクジェットプリンタ	274 ^{※1}		
一般家具	コート掛けA	119		1000 × 560 × 470
	コート掛けB	38178		1000 × 560 × 1830
	マットレス(ウレタンスプリング)	538		97 × 195 × 18
	マットレス(ワラマット)	29.2		95 × 190 × 16
	ベッド(杉無垢材)	43.9		1950 × 950 × 270
オーディオラック	1158		1500 × 450 × 1700	
衣類	衣類(未洗浄)	3.57		
	衣類(ゾール洗浄)	96.7		
	衣類(水洗浄)	3.54		
	衣類(水洗浄+ゾール洗浄)	29.8		
住設機器	システムキッチン	669		VOCはトルエン+キシレン
	洗面化粧台A	74		VOCはトルエン+キシレン
	洗面化粧台B	155		
	トイレ収納棚	57		VOCはトルエン+キシレン
消臭芳香 剤 その他	消臭・芳香剤A	49.9		液状
	消臭・芳香剤B	4.58		液状
	消臭・芳香剤C	0.11		ゼリー状
	消臭・芳香剤D	3.02		ゼリー状(ホルムアルデヒド除去)
	消臭・芳香剤E	55.4		ゼリー状
	消臭・芳香剤F	349		ゼリー状
	消臭・芳香剤G	282		液状
	消臭・芳香剤H	56.9 ^{※2}		液状(ファン+電池式)
	消臭I	0.82		液状
	消臭J	2.14		ゼリー状
	消臭K	305		ゼリー状
	消臭L	49.2		ゲル状(ホルムアルデヒド除去)
	脱臭剤M	109		ゼリー状
	脱臭剤N	69.2		ゼリー状+活性炭
	防虫剤O	108		粉末状(ホルムアルデヒド除去)
	除湿剤P	N.D.		粒状(ホルムアルデヒド除去)
脱臭・除湿シートQ	4.00		粉末状(ホルムアルデヒド除去)	

※1:機器運転中の発生量、※2:ファン稼働中の発生量

(b) 実験概要

試験体のサイズに相応しいチェンバーシステム（気積:0.02[m³]、0.065[m³]、1[m³]、4.98[m³])を構築して、実験を行った。いずれの実験に於いても、チェンバー内環境条件を温度：(25~28)±1[°C]、相対湿度:50±1[%]、換気回数：0.50±0.01[1/h]、気流速度：0.2~0.3[m/s]に制御した。（図 2.5.1、写真 2.5.2 参照）。

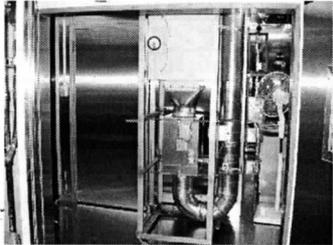


写真 2.5.2 大型環境制御型
チェンバー (23[m³])

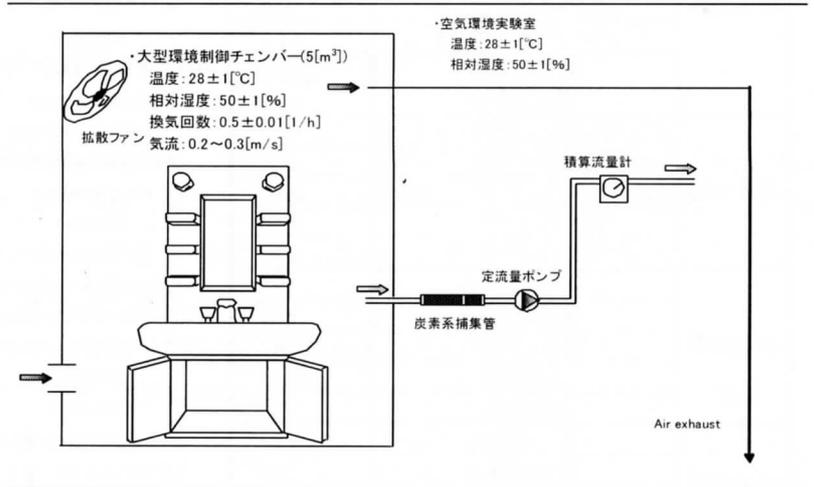


図 2.5.1 実験装置の一例（チェンバー気積:5[m³])

(c) 化学物質発生量の算出

1) 定常状態における算出法

チェンバー内の定常濃度 C_{ss} を式(2-5-1)に代入し、1 製品当たりの化学物質発生量 M [μg/h·unit] を算出した。

$$M = Q(C_{ss} - C_o) \quad (2-5-1)$$

ここで、 Q :チェンバー換気量[m³/h]、 C_{ss} :チェンバー内対象汚染物質定常濃度[μg/m³]、 C_o :チェンバー供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m³]とする。

2) 非定常状態における算出法

発生源発生量が比較的一定で、チェンバー内の定常濃度が得られない場合には、次式(2-5-2)を用いて、1 製品あたりの VOC 発生量 M [μg/h·unit] を算出した。

$$M = \frac{R(n + \alpha)(C - C_1 e^{-(n + \alpha)t})}{1 - e^{-(n + \alpha)t}} - Q C_o \quad (2-5-2)$$

ここで、 R :チェンバー気積[m³]、 n :チェンバー換気回数[1/h]、 α :チェンバー吸着率[1/h]、 C :チェンバー内対象汚染物質濃度[μg/m³]、 C_1 :チェンバー内対象汚染物質初期濃度[μg/m³]、 Q :チェンバー換気量[m³/h]、 C_o :チェンバー供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m³]、 t :時間[h]とする。

(3) VOC 発生量の結果

(a) 製品別の VOC 発生量

製品別の VOC 発生量を図 2.5.2 に示す。

1) 消臭芳香剤その他の VOC 発生量

消臭、脱臭、芳香を目的とした製品の VOC 発生量は 0~305[$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$]の範囲にあった。芳香剤では天然系芳香族炭化水素（例えば、 α 、 β ピネン）を含む製品もあるが、エタノールを発生する製品が多い²⁻²⁰⁾。

2) 一般家具の VOC 発生量

一般家具の VOC 発生量は 29.2~38178[$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$]の範囲にあり、平均値は 6678[$\mu\text{g}/\text{h}$]と大きな値を示した。最大発生量（38178[$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$])を示した家具はコート掛け B であるが、エタノールの発生量が約 90[%]を占めている。これは、家具表面に塗布されたアクリルエマルジョン系封止系塗料の影響である。

生活用品の VOC 発生量

(b) 生活用品の VOC 発生量を図 2.5.3 に示す。

電気式暖房器具（11.7~2576[$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$])、家電製品（236~1992[$\mu\text{g}/\text{h}\cdot\text{unit}$])において比較的大きな発生量が示された。また、家電製品に於いては器具使用による VOC 発生量の増大化現象が見られる²⁻¹⁹⁾。

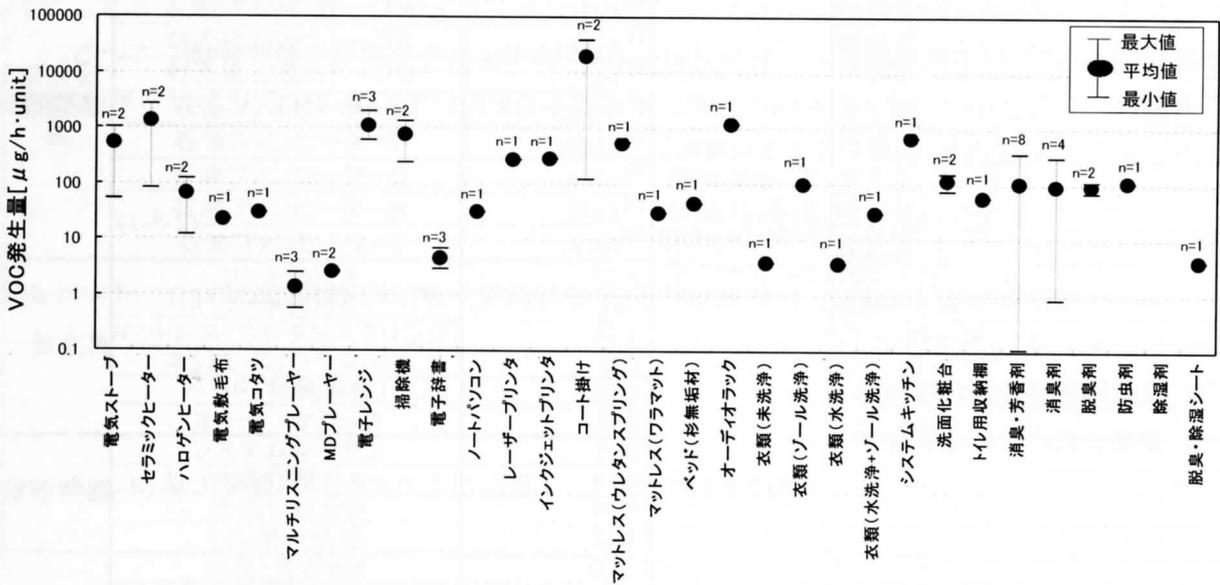


図 2.5.2 製品別の VOC 発生量

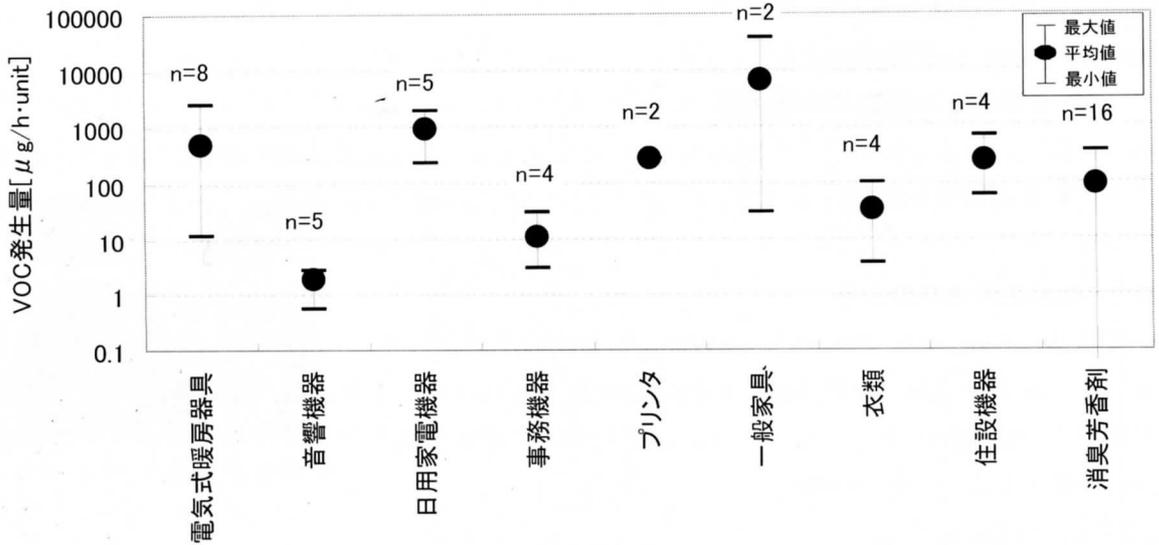


図 2.5.3 生活用品の VOC 発生量

(4) ホルムアルデヒド発生量についての研究概要

(a) 生活用品のホルムアルデヒド発生量

生活用品の概要と実験的に求められたホルムアルデヒド発生量の一覧を表 2.5.2 に示す。なお、既往研究²⁻²¹⁾における燃焼器具発生量 M_1 [ml/kg] は灯油 1kg 当たりの発生量で評価している。

今回は、発生量単位の統一化を図るため、次式(2-5-3)を用いて室温 25[°C]における単位時間当たりの発生量 M [μg/h]に換算した。

$$M = M_1 \times \frac{Q}{K} \times 1228 \quad (2-5-3)$$

ここで、 Q :機器発熱量 [kcal/h]、 K :灯油発熱量(一般灯油発生量は約 10500[kcal/kg])、 M :ホルムアルデヒド発生量[μg/h]とする。

(b) 化学物質発生量の算出

1) 定常状態における算出法

チェンバー内の定常濃度 C_{ss} を式(2-5-1)に代入し、1 製品当たりの化学物質発生量 M [μg/h·unit] を算出した。

$$M = Q(C_{ss} - C_o) \quad (\text{前出、2-5-1})$$

ここで、 Q :チェンバー換気量[m³/h]、 C_{ss} :チェンバー内対象汚染物質定常濃度[μg/m³]、 C_o :チェンバー供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m³]とする。

2) 非定常状態における算出法

発生源発生量が比較的一定で、チェンバー内の定常濃度が得られない場合には、次式(2-5-2)を用いて、1製品あたりのVOC発生量M [μg/h・unit]を算出した。

$$M = \frac{R(n + \alpha)(C - C_1 e^{-(n + \alpha)t})}{1 - e^{-(n + \alpha)t}} - Q C_0 \quad (\text{前出、2-5-2})$$

ここで、R:チェンバー気積[m³]、n:チェンバー換気回数[1/h]、α:チェンバー吸着率[1/h]、C:チェンバー内対象汚染物質濃度[μg/m³]、C₁:チェンバー内対象汚染物質初期濃度[μg/m³]、Q:チェンバー換気量[m³/h]、C₀:チェンバー供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m³]、t:時間[h]とする。

表 2.5.2 生活用品のホルムアルデヒド発生量

商品群	検体名	発生量[μg/h]	捕集分析法	消費電力、発生量、サイズ、形状等
電気式暖房器具	電気ストーブA	78.7 ^{※1}	【捕集分析法】 固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法	石英管ヒーター 800[W]
	電気ストーブB	260 ^{※1}		遠赤外線ヒーター 700[W]
	セラミックヒーターA	1.61 ^{※1}		PCEサーミスタ 640[W]
	セラミックヒーターB	205 ^{※1}		PCEサーミスタ 650[W]
	ハロゲンヒーターA	398 ^{※1}		ハロゲンランプ式ヒーター 800[W]
	ハロゲンヒーターB	64.3 ^{※1}		ハロゲン管 800[W]
	電気敷毛布	5.46 ^{※1}		綿100[%] 20[W]
	電気コタツ(ヒーター部)	18.6 ^{※1}		ヒーターユニット部 300[W]×2
開放型燃焼器具	反射式石油ストーブA	986 ^{※2}	【捕集分析法】 固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法	発熱量 2300Kcal/h
	反射式石油ストーブB	1709 ^{※2}		発熱量 2300Kcal/h
	対流式石油ストーブC	16978 ^{※2}		発熱量 5270Kcal/h
	対流式石油ストーブD	5524 ^{※2}		発熱量 4200Kcal/h
	石油ファンヒーターE	23076 ^{※2}		発熱量 2750Kcal/h
	石油ファンヒーターF	28939 ^{※2}		発熱量 2580Kcal/h
	石油ファンヒーターG	8311 ^{※2}		発熱量 2580Kcal/h
	石油ファンヒーターH	2169 ^{※2}		発熱量 2700Kcal/h
	石油ファンヒーターI	4600 ^{※2}		発熱量 2840Kcal/h
一般家具	コート掛けA	53.8	【捕集分析法】 固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法	1000×560×470
	コート掛けB	360		1000×560×1830
	マットレス(ウレタンスプリング)	92.1		97×195×18
	マットレス(ワラマット)	N.D.		95×190×16
	ベッド(杉無垢材)	20.0		1950×950×270
	オーディオラック	286		1500×450×1700
住設機器	システムキッチン	235	【捕集分析法】 固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法	
	洗面化粧台A	54.0		
	洗面化粧台B	26.0		
	トイレ用収納棚	54.8		
消臭芳香剤	消臭・芳香剤E	0.22	【捕集分析法】 固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法	ゼリー状
	消臭・芳香剤F	0.52		ゼリー状
	消臭・芳香剤G	0.14		液状
	消臭・芳香剤H	0.29 ^{※3}		液状(ファン+電池式)
	消臭J	N.D.		ゼリー状
	消臭K	0.22		ゼリー状

※1:機器運転中の発生量、※2:灯油燃焼中の発生量、※3:ファン稼働中の発生

(c) ホルムアルデヒド濃度の測定・分析機器

1) 捕集管と捕集機器

- ・DNPH カートリッジ: (Waters 社製、Sep-pak Xposure sampler)
- ・定流量ポンプ: (柴田科学社製、Model:MP-Σ30H 型)
- ・積算流量計: (シナガワ社製、Model:DC-1A 型)

2) 分析機器

- ・高速液体クロマトグラフ: (日立社製、Model: L-7000 シリーズ)

(5) 室内汚染物質濃度予測式

求められた製品毎に異なるホルムアルデヒド発生量を次式(2-5-4)に代入し、室内ホルムアルデヒド濃度の予測を行った。予測条件は室換気回数 $n: 0.5[1/h]$ 、室気積 $R: 23.8[m^3]$ 、吸着速度 $a: 0[m/h]$ とした。

$$C_{ss} = \frac{M + n R C_0}{n R + \alpha A} \quad (2-5-4)$$

ここで、 C_{ss} : ホルムアルデヒド定常濃度 $[\mu g/m^3]$ 、 M : ホルムアルデヒド発生量 $[\mu g/h]$ 、 a : ホルムアルデヒド吸着速度 $[m/h]$ 、 R : 室気積 $[m^3]$ 、 C_0 : 外気ホルムアルデヒド濃度 $[\mu g/m^3]$ 、 A : ホルムアルデヒド吸着面積 $[m^2]$ とする。

(6) ホルムアルデヒド発生量の結果

各製品のホルムアルデヒド発生量について、最大値、平均値、最小値を図 2.5.4 に示す。

概して、数十～400 $[\mu g/h]$ 以下の発生量を示した製品が多い中、開放型燃焼器具が大きな発生量を示した。

電気毛布や芳香消臭剤は一桁あるいは一桁未満の発生量である。本来換気の不要なはずの電気式暖房器具のホルムアルデヒド発生量は意外に大きい。

寝具は発生汚染物質が室内に拡散される以前に、呼吸器から直接吸入される可能性が高い。寝具について、ウレタンマットレス、わらマットレス、杉無垢材ベッドの3品について、ホルムアルデヒド発生量を求めたが、発生量に大きな違いが見られた。因みに、ワラマットレス発生量は0 $[\mu g/h]$ であった。

木質建材が使用されている製品で、大きなホルムアルデヒド発生量を示す傾向が見られたが、この要因は木材に使用された接着剤と塗料に起因するものと思われる。

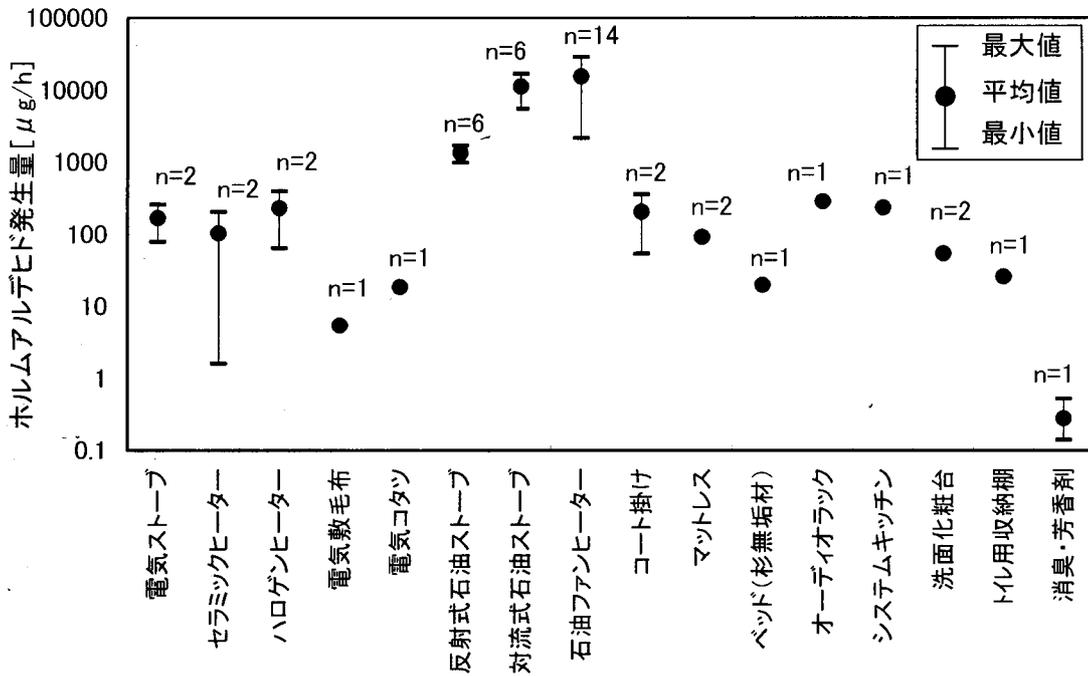


図 2.5.4 各種生活用品ホルムアルデヒド発生量

(7) 室内ホルムアルデヒドの濃度予測

実験的に求められた製品発生量の平均値を(2)式に代入して室内濃度予測を行った。各製品毎の室内濃度予測値を図 2.5.5～2.5.8 に示す。例えば、6 畳間の居室に反射式ストーブ(1 検体)、一般家具(4 検体)、消臭芳香剤(1 検体)を設置した場合の各製品が室内濃度に与える影響を示した(表 2.5.3 参照)。

(a) 電気式暖房器具

電気式暖房器具の室内ホルムアルデヒド濃度予測値は、0.37～15.8[ppb]と比較的低濃度となったが、製品によって大きな差が見られた。

(b) 開放型燃焼器具

開放型燃焼器具の室内ホルムアルデヒド濃度は、92.2～1579[ppb]の範囲であり、「厚生労働省の室内濃度指針値」と比較し、最大で約 20 倍の高濃度となった。

(c) 一般家具

一般家具の室内ホルムアルデヒド濃度予測値は、1.37～19.6[ppb]となり、オーディオラック使用室で比較的大きな値が示された。

(d) 住設機器

システムキッチン、洗面化粧台、トイレ用収納棚などの住設機器設置室の濃度を予測した。室内ホルムアルデヒド濃度予測値は、1.78～16.1[ppb]となった。また、システムキッチンの発生量が一番大きく、同住設機器設置室で約 16[ppb]のホルムアルデヒド濃度上昇が生ずる。

表 2.5.3 室内濃度予測値から求めた各製品が室内ホルムアルデヒド汚染に寄与する割合

商品群	反射式石油ストーブ	一般家具	消臭芳香剤
室内化学物質汚染割合[%]	69.0	31.0	0.01

※:開放型燃焼器具は反射式石油ストーブの発生量が一番小さいものを設置した。

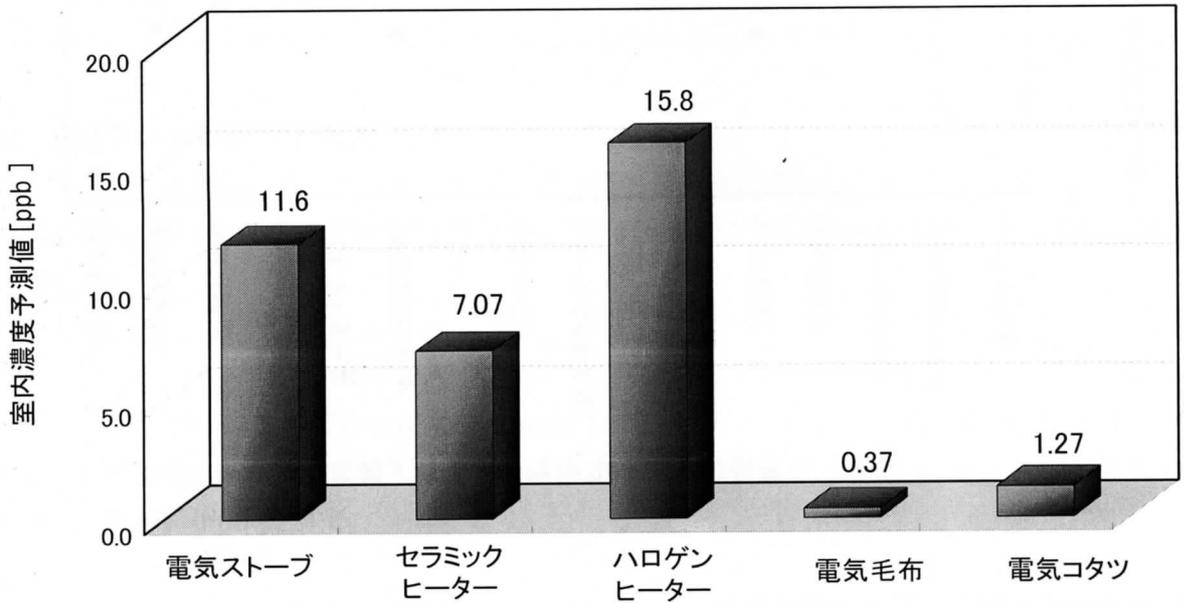


図 2.5.5 電気式暖房器具設置の室内ホルムアルデヒド濃度予測

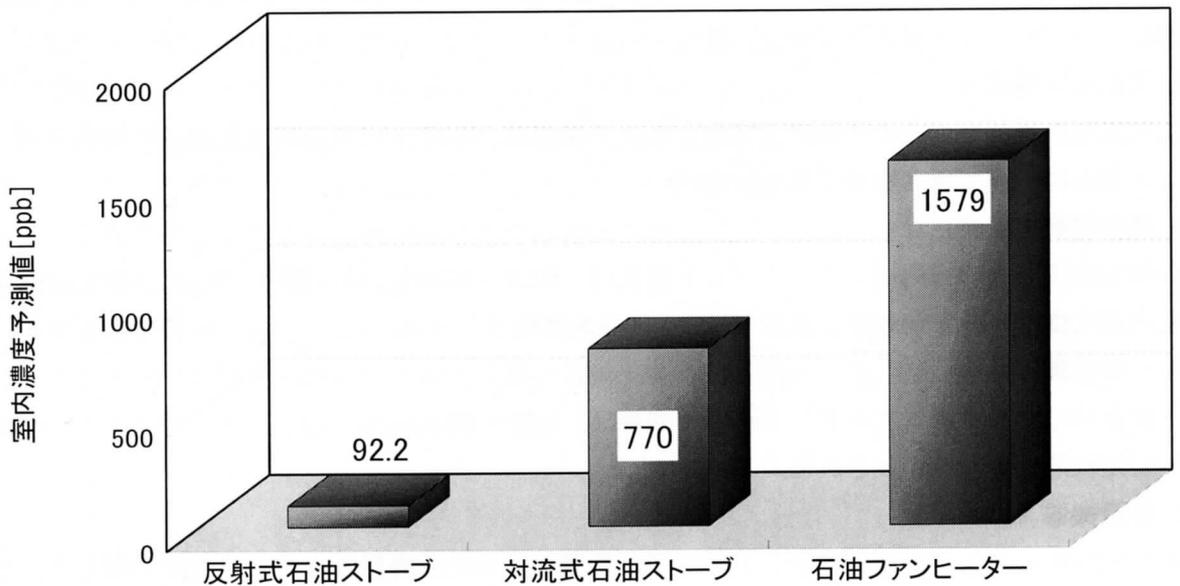


図 2.5.6 燃焼器具設置の室内ホルムアルデヒド濃度予測値

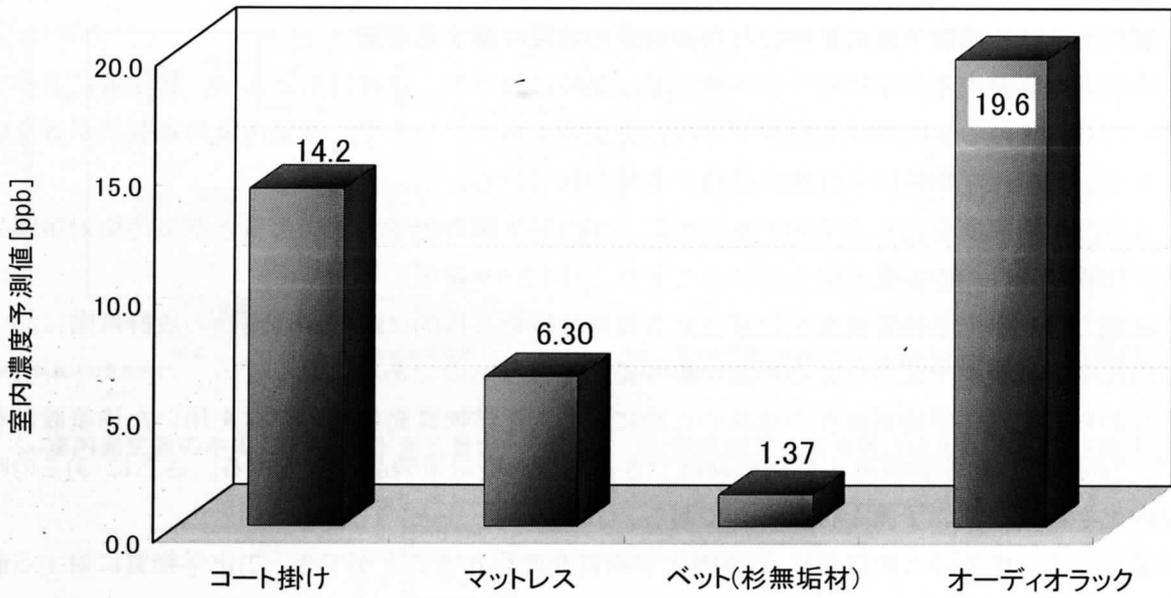


図 2.5.7 一般家具設置の室内ホルムアルデヒド濃度予測値

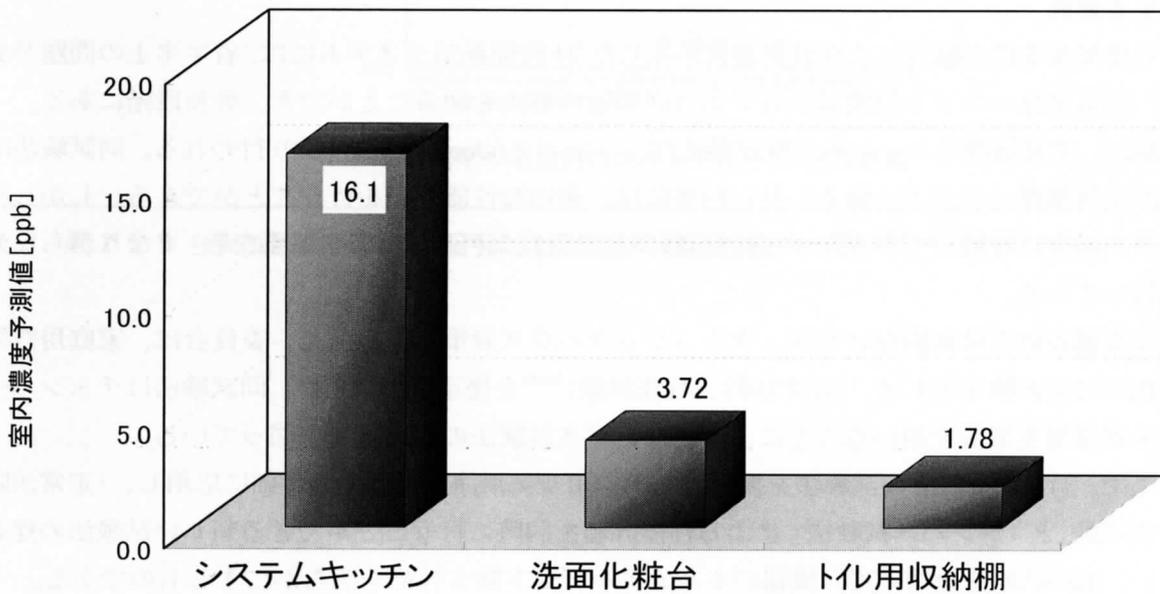


図 2.5.8 住設機器設置の室内ホルムアルデヒド濃度予測値

2.5.3 室内化学物質濃度の予測と換気による汚染質制御

(1) はじめに

(a) 室内化学物質濃度予測式を用いた汚染対策の効果に関する研究

健康被害を誘発する化学物質の室内発生源は多岐にわたり、建材はもとより、居住者によって室内に持ち込まれる家庭用品も軽視できない発生源である。一方で、空気汚染対策製品が普及段階にあり、その化学物質除去性能に期待が寄せられている。

筆者らは室内濃度を正しく予測するために、室内発生源の化学物質発生量と空気汚染対策製品の化学物質除去性能の実態を明らかにしてきた。(図2.5.9参照)

本研究では室内化学物質濃度を低減させる建築仕様を具体的に示し、建築物の設計段階において室内化学物質濃度予測が行える予測手法の提案を行うものである。

すなわち、室内化学物質濃度の低減のために、1)低化学物質発生量の建材を用いた建築設計を行い、2)同住宅に化学物質除去性能の期待できる空気汚染対策製品を導入する。さらに3)この時の室内化学物質濃度の予測を行うものである。

結果として、住宅の入居以前に1)室内化学物質濃度を知ることができ、2)化学物質に対する個人曝露量の推計が実現する。また、これにより3)製品毎の化学物質の許容発生量、と4)空気汚染対策製品に求められる化学物質除去性能を決定できる科学的資料が得られるものである。

(b) 空気清浄ユニット付き換気システムのホルムアルデヒド除去性能の実態と試験法の提案に関する研究

改正建築基準法の施行により設置義務が生じた24時間換気システムには、省エネ上の問題があるが、空気清浄ユニット付換気システムは同問題の解決を図ることができ、普及段階にある。

一般に、空気清浄ユニットの試験評価法は、ワンパス(One-pass)法により行われる。同試験法は汎用の空気清浄ユニットで除去し易い粉塵には、適切な性能評価を行うことができる。しかし、除去率が粉塵に比較して小さなガス状物質に対しては、評価上の誤差範囲が大きくなりがちな欠点を持っている。

国土交通省総合技術開発プロジェクト「シックハウス対策技術の開発」委員会は、家庭用空気清浄機の性能試験法として、「定常法除去性能試験」^{2,38)}を提示しているが、同試験法はチェンバーとガス定常発生装置を用いることにより、ワンパス試験法の問題解決を図っている。

そこで、1)上記委員会の試験法を換気システム用空気清浄ユニットの評価に応用し、「定常法除去性能試験」と「ワンパス試験法」による性能評価を同時に行うことができる新しい試験法の提案を行い、2)同試験法を用いて、機器のホルムアルデヒド除去性能を明らかにするものである。

(c) 循環濾過型空気清浄ユニット付き換気システムの化学物質除去性能に関する研究

循環濾過型空気清浄ユニット併用型換気システムは省エネの観点からもその有効性に期待が高まっており、同機器搭載の汚染物質除去フィルタの除去性能向上は重要課題である。そこで、この研究ではガス除去効率の大きな新型フィルタの開発を行い、同フィルタを搭載した換気システムの化学物質除去性能と室内化学物質の低減性を明らかにする事を目的とする。

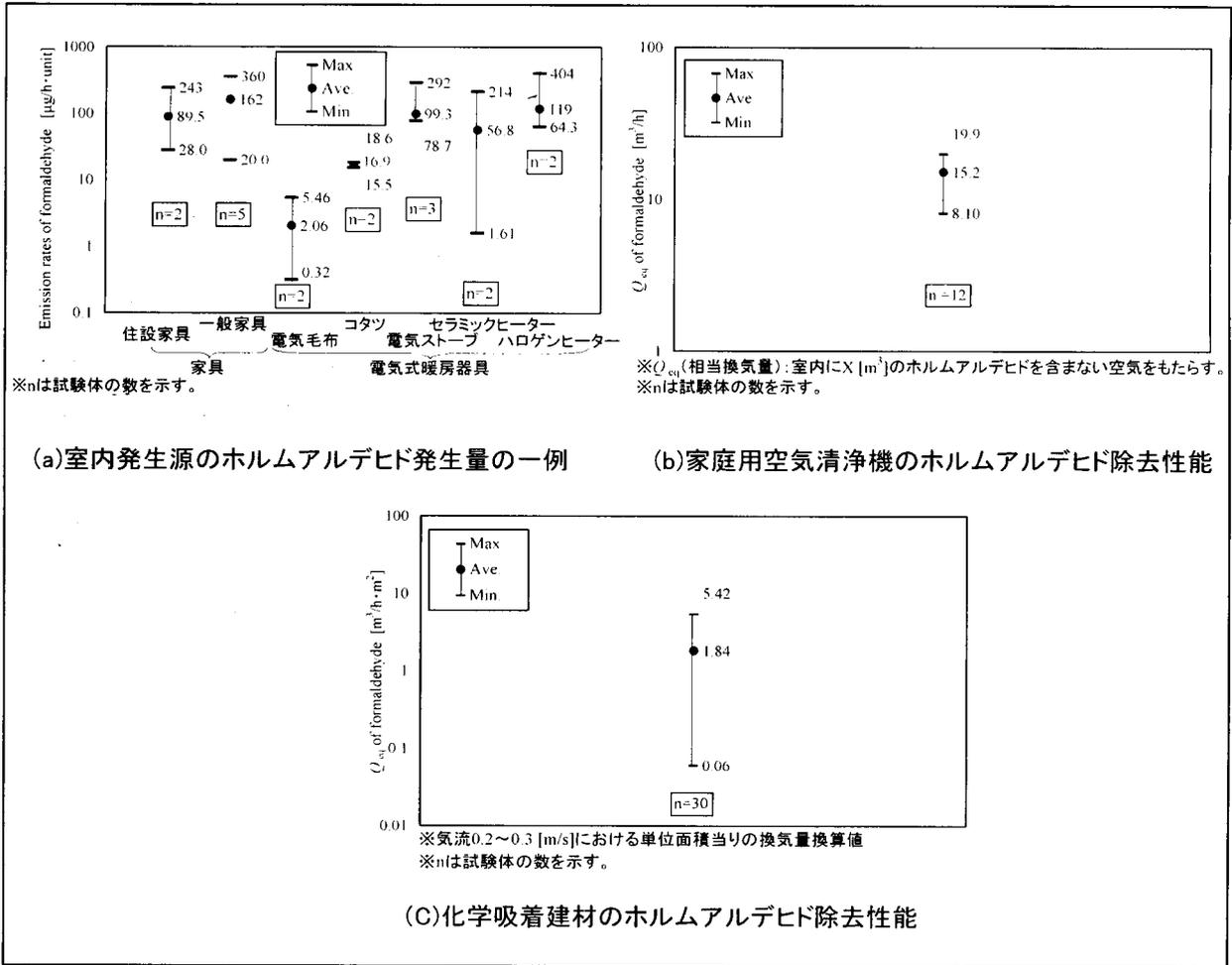
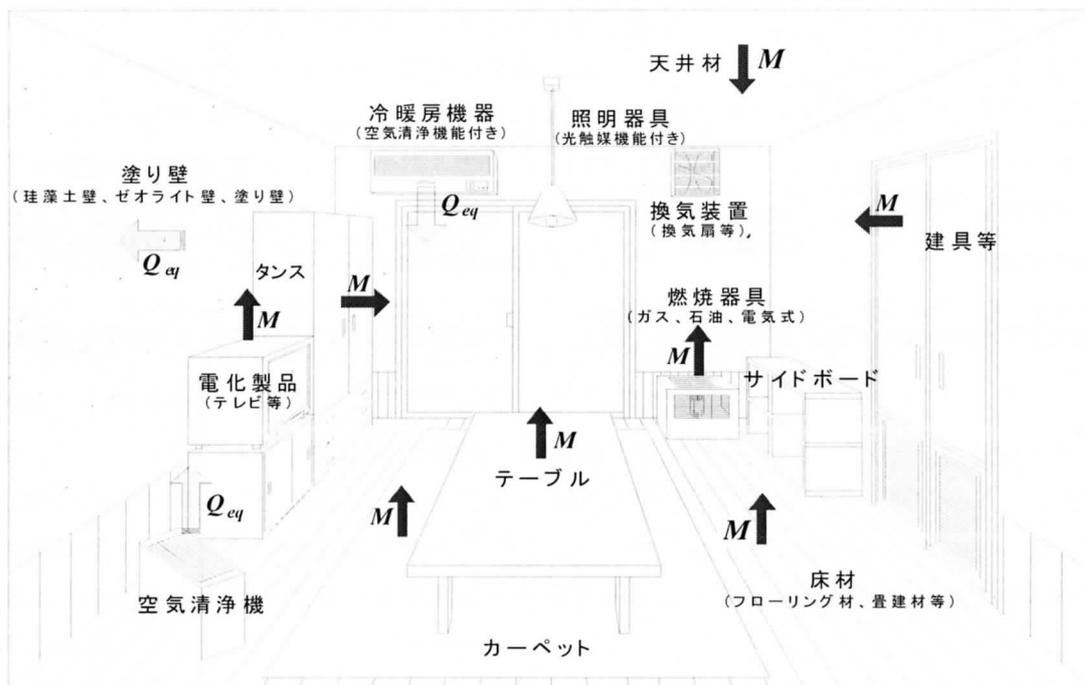


図 2.5.9 発生源発生量と空気汚染対策製品の除去性能の一例 (2-24)~(2-29)、(2-33)、(2-36)、(2-37)

(2) 室内化学物質濃度予測式を用いた汚染対策の効果に関する研究

(a) 室内化学物質濃度の構成

室内における化学物質の発生源と除去機構を図 2.5.10 に示す。



※室内には、ある種の化学物質を発生させる建材と家庭用品がある。また、一方で化学物質を積極的に除去する空気汚染対策製品が普及段階にある。図中で M は化学物質発生源の発生量、 Q_{eq} は除去機構の除去性能を意味する。

図 2.5.10 室内における化学物質の発生源と除去

ある任意時刻の室内化学物質濃度(C)は、1)室内における総化学物質発生量($M : M = \sum_{k=1}^n m_k$)、2)空気汚染対策製品の対象化学物質総除去性能($Q_{eq} : Q_{eq} = \sum_{k=1}^n q_{eq,k}$)、3)室換気量(Q)、4)室内における対象化学物質の吸着量と化学反応量(aA)等により構成される。

(b) 室内濃度予測式の提案

筆者らは、汚染物質の発生源と除去機構が混在する室における室内汚染物質濃度予測式を図 2.5.11 のように提案している²⁻²⁴⁾。本予測式により、室内化学物質濃度の正確な予測が行える。

在来、ほとんどの室内濃度予測式は、室内の総発生量と換気のパラメータにより構成されているが、本予測式は各種発生源発生量、空気汚染対策製品の汚染物質除去性能、汚染物質吸着性を考慮したユニークな濃度予測式であり、その予測精度は高い^{2-30)、2-31)、3-35)}。

汚染物質の発生源と除去機構が混在する一般的室内の汚染物質濃度予測式を理論的に検討した。ある任意の時間における室内汚染物質濃度を C [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]とすると、ある限られた短時間 dt [h]における室内汚染物質濃度の変化 dC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]は、次式(1)で表される。

$$\frac{dt}{R} (M + QC_0 - QC - V_l S C - a A C - Q_{eq} C) = dC \quad (1)$$

M : 対象汚染物質の発生量 [$\mu\text{g}/\text{h}$]	a : 対象汚染物質の吸着速度 [m/h] (建材や物品表面における化学変化を含む)
Q : 室換気量 [m^3/h]	A : 対象汚染物質の吸着面積 [m^2]
C_0 : 対象汚染物質の外気濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	R : 室気積 [m^3]
V_l : 対象汚染物質の落下速度 [m/h] (分子量の大きなガス状物質や粒子状物質の場合に適用)	C_1 : 対象汚染物質の室内初期濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
S : 床面積 [m^2]	Q_{eq} : 空気汚染対策製品の対象汚染物質除去性能 (相当換気量) [m^3/h]

ここで、 $t=0$ [h]の時、室内汚染物質濃度を C_1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]とし、 $C=C_1$ として(1)式を解くと、次式(2)が得られる。

$$C = C_1 e^{-\left(\frac{Q+V_l S+aA+Q_{eq}}{R}\right)t} + \frac{M+QC_0}{Q+V_l S+aA+Q_{eq}} (1 - e^{-\left(\frac{Q+V_l S+aA+Q_{eq}}{R}\right)t}) \quad (2)$$

また、室内発生源の汚染物質総発生量 M [$\mu\text{g}/\text{h}$]は、建物に起因した建材関連の発生量と居住者による持ち込み品(家庭用品等)の発生量 m_k [$\mu\text{g}/\text{h}$]の総和で示され、次式(3)が成立する。

$$M = \sum_{k=1}^n m_k \quad (3)$$

さらに、空気汚染対策製品の対象汚染物質総除去性能 Q_{eq} [m^3/h]は、空気清浄機等の除去性能 $(q_{eq})_k$ [m^3/h]の総和により示され、次式(4)が成立する。

$$Q_{eq} = \sum_{k=1}^n (q_{eq})_k \quad (4)$$

(3)、(4)式を(2)式に代入することにより、汚染物質の発生源と除去機構が混在する一般的室内の汚染物質濃度予測式(5)が得られる。

$$C = C_1 \cdot e^{-\frac{Q+V_l S+aA+\sum_{k=1}^n (q_{eq})_k}{R} t} + \frac{\sum_{k=1}^n m_k + QC_0}{Q+V_l S+aA+\sum_{k=1}^n (q_{eq})_k} (1 - e^{-\frac{Q+V_l S+aA+\sum_{k=1}^n (q_{eq})_k}{R} t}) \quad (5)$$

図 2.5.11 室内汚染物質濃度予測式

(3) 健康的室内空気環境を提供する住宅設計手法とこれによる室内化学物質濃度予測

(a) 建築設計上の基本方針

室内化学物質汚染防止のため、構造材は無垢材を使用し、仕上げ材、施工材（接着剤や塗料など）は、化学物質発生量の小さな建材を使用し、システムキッチンと家具等の家庭用品についても、チェンバー実験で発生量を確認し、発生量の小さなものを使用するものとする（表 2.5.4 参照）。

(b) 室内化学物質濃度の予測

予測対象室は8畳大の2室(LDK,寝室)で、LDK室、寝室共に(幅):3.50[m]×(奥行):3.50[m]×(高さ):2.50[m]のサイズを有する。室内化学物質濃度の予測計算を行う場合の予測条件は表2.5.4に示されている。

(c) LDK室における予測結果

表2.5.4にオーディオラック、システムキッチン、使用建材の化学物質発生量と予測対象室の換気回数等が示されている。

図2.5.12(a)に示されるように、在来仕様の建材で施工し、家具などを設置する以前のLDK室のホルムアルデヒド濃度は $81.9[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ と予測される。同様に、図2.5.12(b)に示すようにVOC濃度は $208[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ となる。ところが、家具などを設置すると、ホルムアルデヒド濃度は 81.9 から $117[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に、VOC濃度は 208 から $424[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に上昇し、厚生労働省室内濃度指針値(ホルムアルデヒド濃度)または暫定目標値(TVOC濃度)を超過する。

ここで、VOCは揮発性有機化合物(Volatile organic compounds)の略称であり、脂肪族炭化水素(13物質)、芳香族炭化水素(14物質)、テルペン類(3物質)、ハロゲン類(11物質)、エステル類(2物質)、アルデヒド類(2物質)、ケトン類化合物(3物質)からなるもので、TVOCは上記VOC物質の総和とする。

(d) 汚染対策のLDK室の化学物質濃度を与える影響

床材を合板で構成される複合フローリング建材から、化学物質発生量の小さな無垢材フローリングへと変更し、壁材もビニールクロス仕上げ(石膏ボード+化学糊)から、化学物質の吸着性を有する珪藻土建材(ホルムアルデヒドキャッチャー剤添加)へと変更した。

これにより、図2.5.12(e)と図2.5.12(f)に示されるように、LDK室の化学物質濃度はホルムアルデヒドが 117 から $63.0[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に、VOCは 424 から $187[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に低下し、ホルムアルデヒド濃度は 46% 、VOC濃度は 56% 低減する。

また、実験的に検証した家庭用空気清浄機の中で一番性能が良いものを室内で運転させた場合、ホルムアルデヒド濃度はさらに 63.0 から $27.0[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に低下し、 56% 低減する。また、VOC濃度は 187 から $63.9[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に低下し、 66% 低減する予測結果が示された。

ちなみに、実験的に検証した空気清浄機は12台で、求められたホルムアルデヒド相当換気量は $8.10\sim 19.9[\text{m}^3/\text{h}]$ の範囲にあり、平均値は $15.2[\text{m}^3/\text{h}]$ であった。

また、濃度予測計算に用いた家庭用空気清浄機は、ガス除去フィルタに活性炭が使用されているフィルタ濾過式の器具でホルムアルデヒド相当換気量: $19.9[\text{m}^3/\text{h}]$ 、VOC相当換気量: $16.3[\text{m}^3/\text{h}]$ で、機器風量は $312[\text{m}^3/\text{h}]$ である。

(e) 寝室における化学物質濃度予測

LDK室と同様に、表2.5.4に示す在来仕様の建材とベッドを使用した時の室内ホルムアルデヒドとVOC濃度の予測を行った。図2.5.12(c)と図2.5.12(d)に示されるように、ベッドを持ち込む以前のホルムアルデヒド濃度は $55.6[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ 、VOC濃度は $77.6[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ と予測される。ベッドを持ち込むことにより、ホルムアルデヒド濃度は 55.6 から $70.5[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ に、VOC濃度は 77.6 から $219[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

に上昇する。

(f) 汚染対策の寝室の化学物質濃度に与える影響（寝室）

寝室においても、LDK 室と同様の対策を行った。すなわち、床材を合板の複合フローリング建材から化学物質発生量の小さな無垢材フローリングへと変更し、壁材もビニールクロス仕上げ（石膏ボード+化学糊）から、化学物質の吸着性を有する珪藻土建材（ホルムアルデヒドキャッチャー剤添加）へと変更した。ただし、珪藻土建材に添加されているホルムアルデヒドキャッチャー剤は、VOC に対して化学吸着力が無いことが判明しており、VOC に対しては珪藻土の物理吸着力のみが期待できる。

図 2.5.12(g)と図 2.5.12(h)に示すように、建材仕様の変更に伴い寝室のホルムアルデヒド濃度は 70.5 から 40.8[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]に、VOC 濃度は 219 から 131[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]に低減する。建材仕様の変更に伴う汚染対策後の室内濃度低減率はホルムアルデヒドが 42[%]、VOC 濃度では 40[%]である。

また、建材仕様を変更した後に、LDK 室同様の家庭用空気清浄機を運転して室内化学物質濃度の低減を図ったところ、ホルムアルデヒド濃度はさらに 40.8 から 17.5[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]に低下し、VOC 濃度も 131 から 35.5[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]に低下した。

表 2.5.4 家具と建材の化学物質発生量^{2-27)、2-28)、2-29)、2-33)、2-36)}と室内濃度予測条件

	対策前			予測条件	対策後				
	家具と建材	発生量 M[$\mu\text{g}/\text{h}$]	仕様		家具と建材	発生量 M[$\mu\text{g}/\text{h}$]	仕様	予測条件	
LDK 室	オーディオラック(ホルムアルデヒド)	286	上段:パーティクルボード(F☆☆☆☆)、合板(F☆☆☆☆)、下段: MDF(F☆☆☆)、集成材	換気回数 0.5[1/h]、 気積 30[m ³]、 室換気量 15[m ³ /h]	オーディオラック(ホルムアルデヒド)	286	対策前と同様	換気回数 0.5[1/h]、 気積 30[m ³]、 室換気量 15[m ³ /h]	
	オーディオラック(VOC)	1158			オーディオラック(VOC)	1158			
	システムキッチン(ホルムアルデヒド)	236	フロアユニット:メラミン樹脂、パーティクルボード、合板、PET系シート、人造大理石(不飽和ポリエステル)アッパーユニット:メラミン樹脂、パーティクルボード、合板、PET系シート		システムキッチン(ホルムアルデヒド)	236			
	システムキッチン(VOC)	2083			システムキッチン(VOC)	2083			
	天井材(ホルムアルデヒド)	82.0	AFP塗装(F☆☆☆☆)、珪酸カルシウム板、LGS下地		天井材(ホルムアルデヒド)	5.80			杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)
	天井材(VOC)	404			天井材(VOC)	35.0			
	壁材(ホルムアルデヒド)	142	ビニールクロス(F☆☆☆☆)、接着剤(澱粉系)(F☆☆☆☆)、石膏ボード		壁材(ホルムアルデヒド)	0			珪藻土壁(F☆☆☆☆)・炭酸カルシウム、珪藻土
	壁材(VOC)	460			壁材(VOC)	1.39			
	フローリング材(ホルムアルデヒド)	1004	合板(F☆☆☆)、UV塗料		フローリング材(ホルムアルデヒド)	5.80			杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)
	フローリング材(VOC)	2254			フローリング材(VOC)	35.0			
寝室	ベッド(2台)(ホルムアルデヒド)	224	杉無垢材、マットレス ウレタン、スプリング	ベッド(2台)(ホルムアルデヒド)	224	対策前と同様	換気回数 0.5[1/h]、 気積 15[m ³]		
	ベッド(2台)(VOC)	1164			ベッド(2台)(VOC)			1164	
	天井材(ホルムアルデヒド)	55.0	ビニールクロス(F☆☆☆☆)、接着剤(澱粉系)(F☆☆☆☆)、石膏ボード	天井材(ホルムアルデヒド)	5.80	杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)			
	天井材(VOC)	271		天井材(VOC)	35.0				
	壁材(ホルムアルデヒド)	107	AFP塗装(F☆☆☆☆)、珪酸カルシウム板、LGS下地	壁材(ホルムアルデヒド)	0	珪藻土壁(F☆☆☆☆)・炭酸カルシウム、珪藻土			
	壁材(VOC)	346		壁材(VOC)	1.39				
	フローリング材(ホルムアルデヒド)	672	合板(F☆☆☆)、UV塗料	フローリング材(ホルムアルデヒド)	5.80	杉無垢材(表面塗装、フィンガージョイント無し)			
	フローリング材(VOC)	1508		フローリング材(VOC)	35.0				

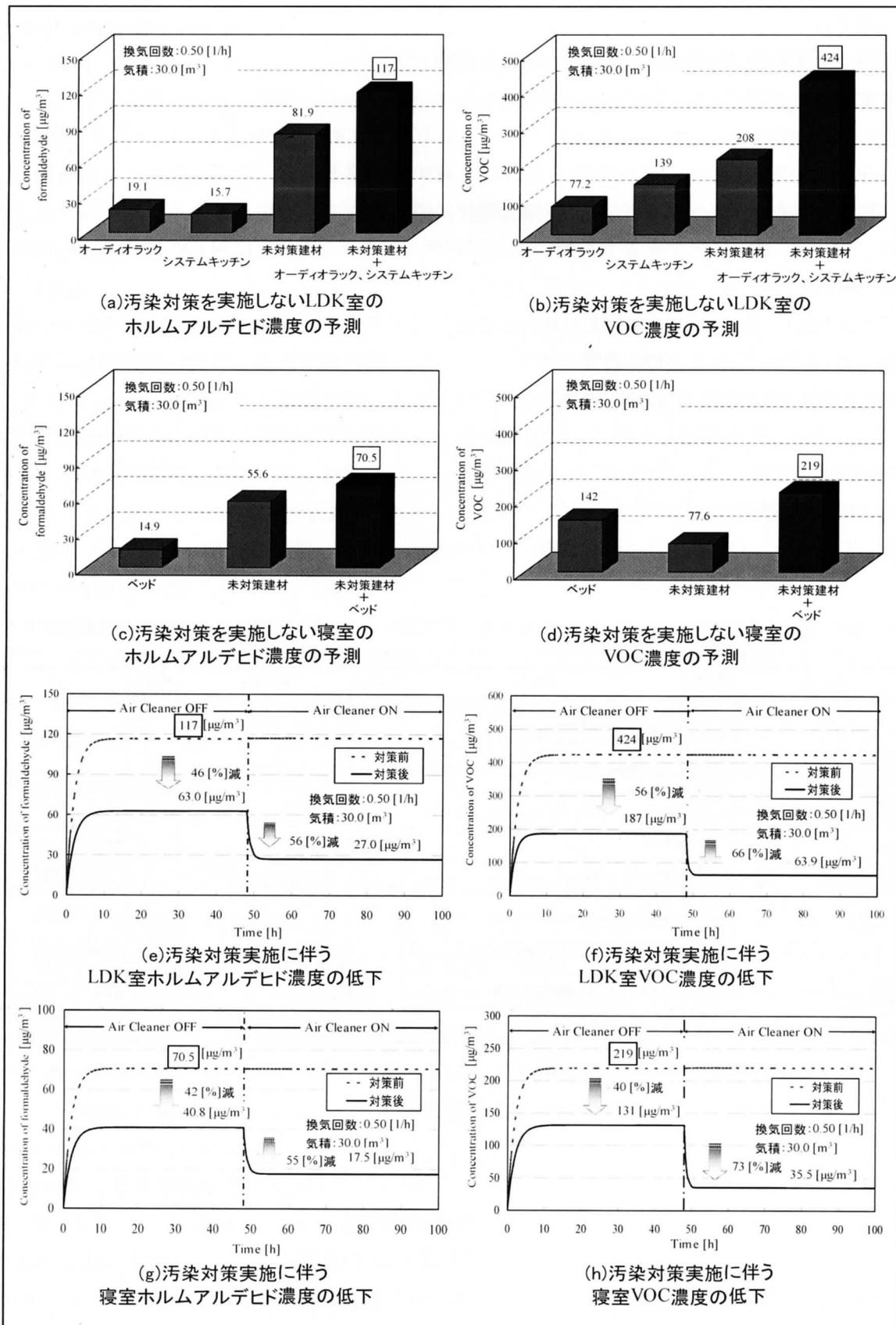


図 2.5.12 室内化学物質汚染対策の実施に伴う室内濃度の低減性

(4) 空気清浄ユニット付き換気システムのホルムアルデヒド除去性能の実態と試験法の提案に関する研究

(a) 試験概要

1) 試験室概要

本試験は、任意の環境条件に制御できるステンレス製の大型チェンバーを用いて行った。チェンバー内の環境条件は、温度： $28\pm 1[^\circ\text{C}]$ 、相対湿度： $50\pm 1[\%]$ 、換気回数： $0.50\pm 0.01[1/\text{h}]$ 、気流速度 $0.2\sim 0.3[\text{m/s}]$ に制御した。

写真 2.5.3 に本チェンバーへの機器設置時の風景、図 2.5.13、2.5.14 に定常法除去性能試験とワンパス試験法が同時に行える新型試験法と筆者らの JIS 準用のワンパス試験法の試験装置をそれぞれ示す。



写真 2.5.3 大型チェンバーへの機器設置時の状況

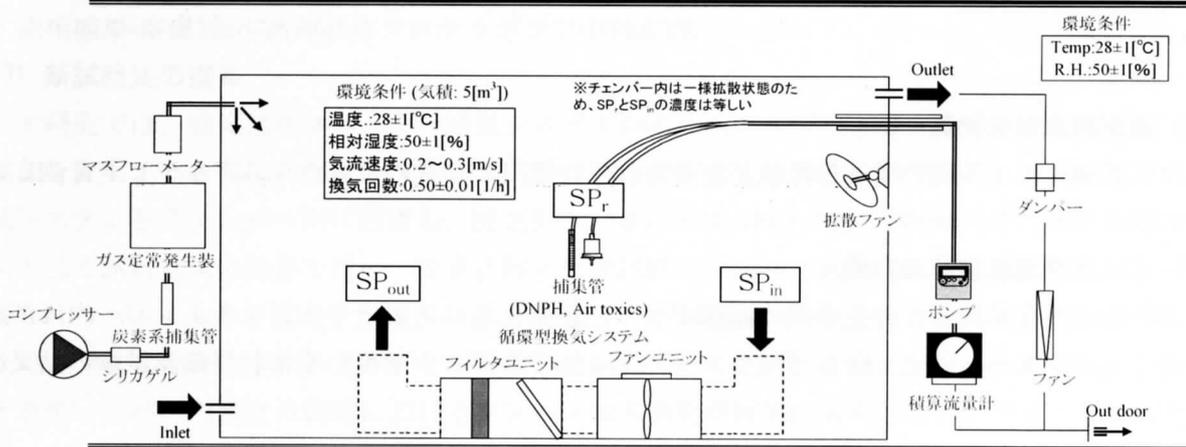


図 2.5.13 定常法除去性能試験における試験装置

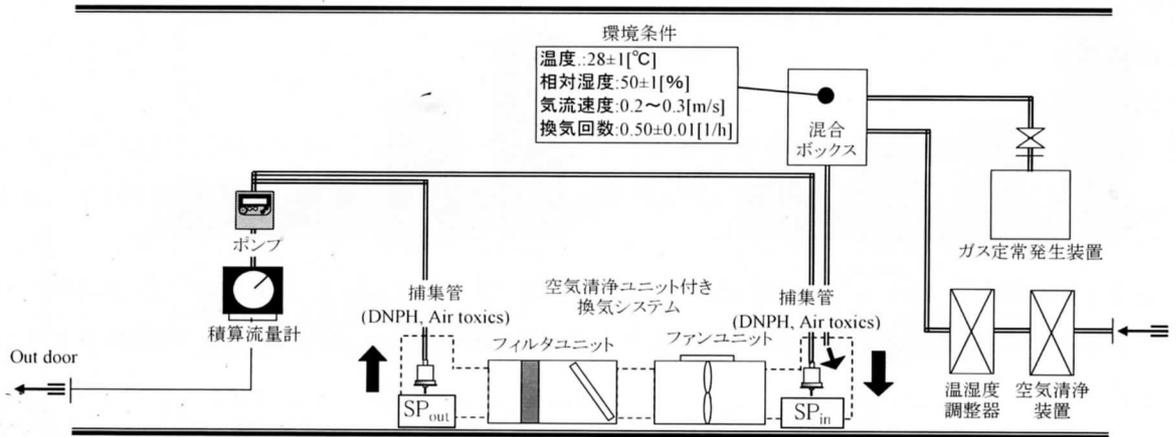


図 2.5.14 ワンパス試験法における試験装置

2) 試験対象機器

既成の空気清浄ユニット付き換気システムを試験対象とした。機器風量は $75[m^3/h]$ とし、換気量制御は機器付属のインバーター制御器により行った。表 2.5.5 に機器の概要を示す。

表 2.5.5 機器の概要

	機器風量	フィルタ	フィルタユニット寸法 [mm]	ファンユニット寸法 [mm]
循環型換気システム	$75[m^3/h]$	活性炭フィルタ + 抗菌HEPAフィルタ	[L]225 × [W]357 × [T]357	[L]235 × [W]450 × [T]275

3) 測定対象汚染物質

厚生労働省により室内濃度指針値が定められている 13 物質のうちホルムアルデヒドを測定対象物質とした。

4) ガス定常発生装置の概要

ガス定常発生装置は、発生条件の制御により任意発生量の対象化学物質をチェンバー内に供給できるものである。図 2.5.15 にチェンバー内ホルムアルデヒド濃度の定常状態確認試験の結果を示す。

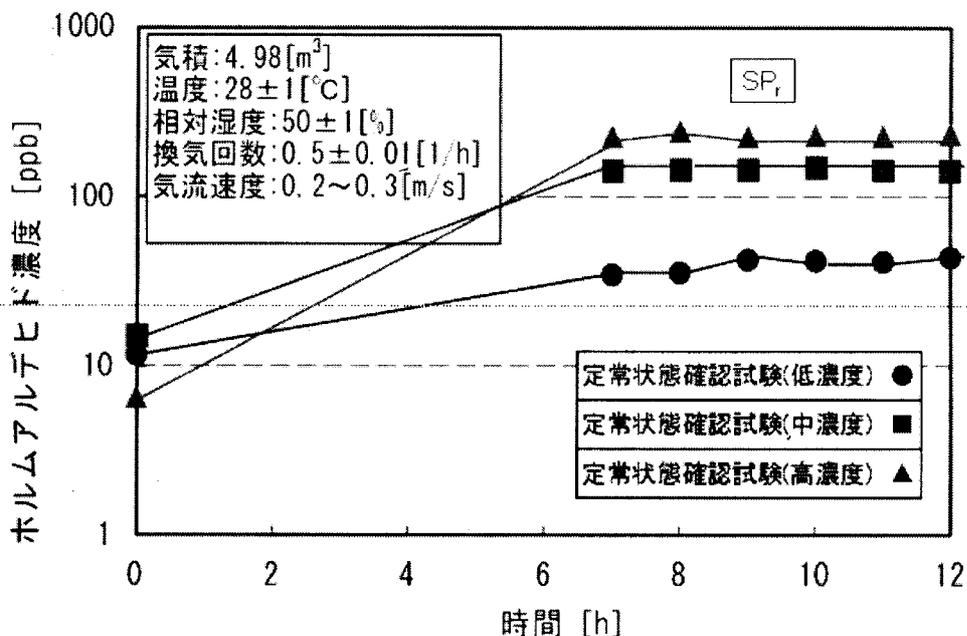


図 2.5.15 ホルムアルデヒド濃度の定常状態確認試験

5) 捕集・分析装置

- ・DNPH カートリッジ:(Waters 社製、Sep-pak Xposure sampler)
- ・定流量ポンプ:(柴田科学社製、Model:MP-Σ30H 型)
- ・積算流量計:(シナガワ社製、Model:DC-1A 型)
- ・高速液体クロマトグラフ:(日立社製、Model:L-7000 シリーズ)

6) 捕集・分析方法

- ・固相捕集-溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ(HPLC)法

7) 新試験法の提案

本研究では、空気清浄ユニット付換気システムのホルムアルデヒド除去性能を求める新たな試験法を提案すると共に、同試験法により試験を行い測定値を求めるものである。本試験法は、換気システムをチェンバー内に設置し、図 2.5.13、14 に示す SP_{in}(=SP_r),SP_{out} のサンプリングポイントにて試料空気の捕集を行い、定常法除去性能試験とワンパス試験法による機器性能が同時に得られるものである。また、図 2.5.16 に示すように空気清浄ユニット付き換気システムの運転に伴い、チェンバー内ホルムアルデヒド濃度が減衰していくため、初期チェンバー内濃度から低下するチェンバー内濃度の範囲におけるワンパス除去率を連続的に求めることができる。

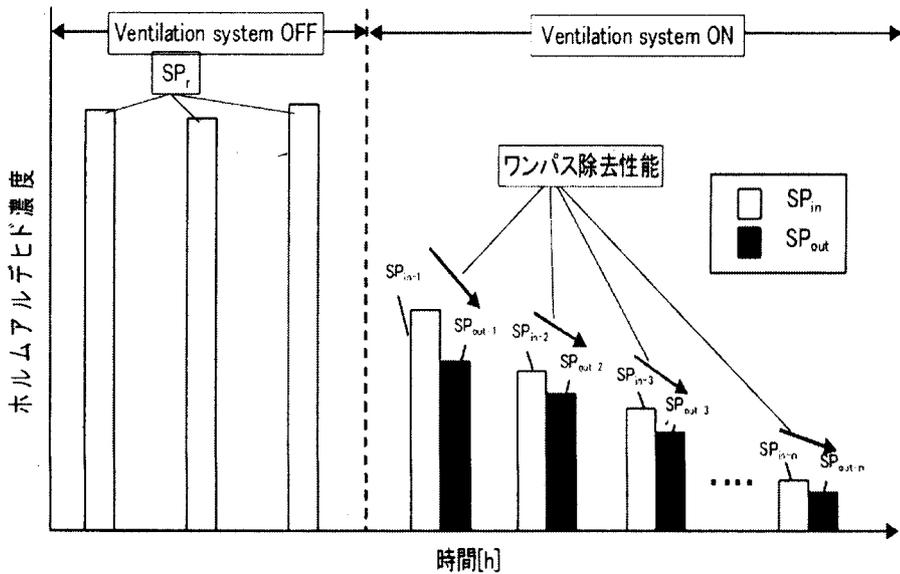


図 2.5.16 新試験法におけるホルムアルデヒド濃度変化の模式図

8) 試験手順

本試験の手順を以下に示す。

- 1) チェンバー内を洗浄し、一定時間換気を行う。
- 2) チェンバー環境条件を所定の値に制御する。
- 3) ガス定常発生装置を用いて、チェンバー内に目標のホルムアルデヒド定常濃度を再現する。
- 4) 定常状態の確認を行う為に、(チェンバー換気回数が 0.5(1/h)の場合) 機器運転 7、8、9 時間後のチェンバー内空気の捕集を行う。サンプリングポイントは汚染物質の供給側(SP_{in})と機器の排出側(SP_{out})の 2 箇所とする。
- 5) 機器運転 9 時間後のチェンバー内空気を捕集し、空気清浄ユニット付き換気システムを運転させる。9.5、10、11 時間後におけるチェンバー内空気を捕集する。

(b) 試験評価方法

2 つの試験評価方法(定常法除去性能試験とワンパス試験法)を用いて空気清浄ユニット付き換気システムの機器性能を相当換気量 Q_{eq} [m³/h]を用いて算出した。

1) 定常法除去性能試験における相当換気量算出式

定常法除去性能試験における相当換気量 Q_{eq} [m³/h]は、次式(2-5-5)により求められる。

$$Q_{eq} = \frac{M}{C_{ss}} + Q \left(\frac{C_o}{C_{ss}} - 1 \right) - aA \tag{2-5-5}$$

ここで、M：対象汚染物質発生量[μg/h]、Q：チェンバー換気量[m³/h]、CO：供給空気中の対象汚染物質濃度[μg/m³]、C_{ss}：チェンバー内対象汚染物質定常濃度、a：対象汚染物質の吸着速度[m/h] (建材や物品表面における化学変化を含む)、A：対象汚染物質の吸着面積[m²]とする。

2) ワンパス試験法における相当換気量算出式

ワンパス試験法における測定対象汚染物質の除去率 η [%] は式(2-5-6)により求められる。また、相当換気量 Q_{eq} [m^3/h] は機器のワンパス除去率 η [%] に機器風量 Q [m^3/h] を乗じて求められる (式(2-6-7))。

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100 \quad (2-5-6)$$

$$Q_{eq} = \eta \times Q \quad (2-6-7)$$

ここで、 C_{in} : 供給空気中の対象汚染物質濃度 [$\mu g/m^3$]、 C_{out} : 排出空気中の対象汚染物質濃度 [$\mu g/m^3$] とする。

(c) 結果

1) チェンバー内におけるホルムアルデヒド濃度の経時変化

換気システム運転に伴うホルムアルデヒド濃度の経時変化を図 2.5.17 に示す。

チェンバー内は拡散ファンにより一様拡散状態にあるため、SPr と SPin におけるホルムアルデヒド濃度は同一になる。チェンバー内ホルムアルデヒド濃度は、ガス定常発生装置運転開始から 7~9[h]後に定常状態に達した。その後、空気清浄ユニット付き換気システムの運転によるホルムアルデヒド除去により、チェンバー内ホルムアルデヒド濃度は 258[ppb]から 69.5[ppb]へと減衰した。機器運転直後の供給・排出空気中ホルムアルデヒド濃度は、9.5[h]後では 69.5[ppb]から 37.4[ppb]へ、10[h]後では 35.3[ppb]から 22.0[ppb]へ、11[h]後では 35.9[ppb]から 24.7[ppb]へと減衰し、機器のホルムアルデヒドに対する優れた除去性能が確認された。

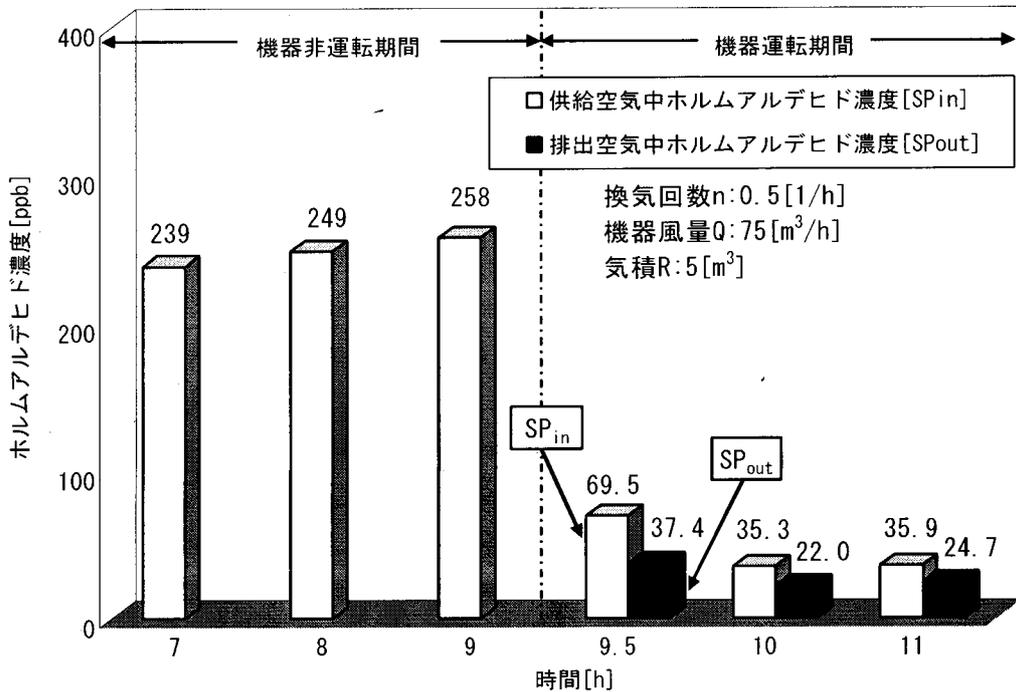


図 2.5.17 換気システム運転に伴う各測定点におけるホルムアルデヒド濃度の経時変化

2) 定常法除去性能試験における機器の相当換気量

試験により得られた測定値を式(2-5-5)に代入し、機器のホルムアルデヒド相当換気量を求めた。定常法除去性能試験におけるホルムアルデヒドの相当換気量は31.4[m³/h]を示した。

3) ワンパス試験法における機器の相当換気量

試験により得られた測定値を式(2-5-6)に代入し

除去率を算出した。さらに得られた除去率を式(2-5-7)に代入し、機器のホルムアルデヒド相当換気量を求めた。

ワンパス試験法により求めた機器のホルムアルデヒド除去率と相当換気量を表 2.5.6 に示す。

ワンパス試験法におけるホルムアルデヒド相当換気量は 9.5[h] で 34.6[m³/h]、10[h] で 28.9[m³/h]、11 [h] で 23.4[m³/h]を示し、平均で 29.0[m³/h]と定常法除去性能試験における相当換気量と同程度の値を示した。

4) 定常法除去性能試験とワンパス試験法により算出されたホルムアルデヒド相当換気量

定常法除去性能試験とワンパス試験法により算出されたホルムアルデヒド相当換気量 Q_{eq} [m³/h] を表 2.5.7 に示す。

定常法除去性能試験とワンパス試験法により算出した相当換気量 Q_{eq} [m³/h]の値を比較したところ、両者の符合率は92.4[%]となり、高い符合性を示した。

表 2.5.6 ワンパス除去率とワンパス試験法により求めたホルムアルデヒド相当換気量

	9.5[h]	10[h]	11[h]	平均値
除去率[%]	46.2	38.5	31.2	38.6
相当換気量 Q_{eq} [m ³ /h]	34.6	28.9	23.4	29.0

表 2.5.7 定常法除去性能試験とワンパス試験法により算出したホルムアルデヒド相当換気量

	相当換気量 Q_{eq} [m ³ /h]
定常法除去性能試験	31.4
ワンパス試験法	29.0

(7) 循環濾過型空気清浄ユニット付き換気システムの化学物質除去性能に関する研究

(a) 実験概要

一定の環境条件に制御された気積4.98[m³]のステンレスチェンバー内に同換気システムを設置した。ガス定常発生装置を用いてチェンバー内へ定常的に汚染ガス(ホルムアルデヒド、エチルベンゼン、m-キシレン、スチレンの混合ガス)を供給し、機器運転に伴う汚染ガス濃度の低減性を調べることで機器の性能評価を行った。また、搭載したフィルタは、4種類の活性炭や化学吸着剤(写真2.5.4,2.5.5参照)などで構成されており、第1案から第3案に分類した。

(b) 結果

機器のホルムアルデヒド除去能力は、第1案:42.3[m³/h]、第2案:33.3[m³/h]、第3案:22.8[m³/h]であった。

(c) 濃度予測法

実験結果を基に同機器運転に伴う室内化学物質濃度予測を行い、新たに開発した各フィルタの室内ホルムアルデヒド濃度の低減性を比較した。予測条件は、実測調査(シックハウス事例)による室内濃度²⁻⁴⁾を基に算出した発生量(2975 [μg/h])を用い、室と物品の吸着率 α :0[1/h]、室気積 R :23.8[m³](6畳大)とした。また、換気装置のみ運転の場合と換気装置運転+開発フィルタ(3種類)搭載の場合(機器風量:75[m³/h])のそれぞれ比較・検討を行った。

予測の結果(図 2.5.18)、当該予測条件では、換気装置の運転のみでは初期濃度(200[ppb])は全く低下しないが、新開発のフィルタを搭載すると全ての案でホルムアルデヒド濃度は厚生労働省の室内濃度指針値(80[ppb])以下に低下した。特に第1案は、第2,3案と比較してホルムアルデヒド濃度の顕著な減衰効果が予測された。

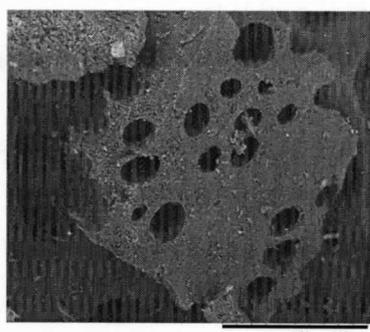


写真 2.5.4 活性炭の顕微鏡写真

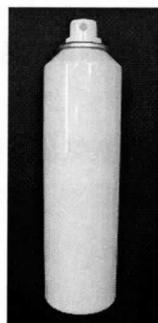


写真 2.5.5 化学吸着剤

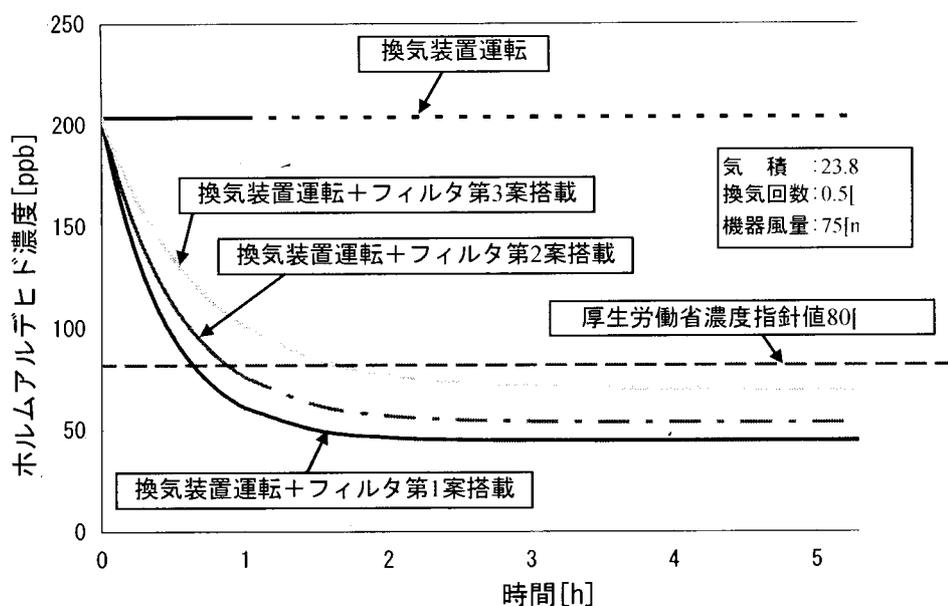


図 2.5.18 換気システム導入室のホルムアルデヒド濃度の予測

2.5.4 まとめ

(1) 家電製品・生活用品からの化学物質放散量の測定

- 1) 生活用品（55品目）について、実験的に求められた VOC 発生量を整理した。
- 2) 電気式暖房器具や家電製品など機器使用により発生量が増大する製品もある。
- 3) 各種生活用品のホルムアルデヒド発生量を整理し、生活用品による室内空気汚染に関する総合的資料を作成した。
- 4) 各製品の平均ホルムアルデヒド発生量を用いて、室内ホルムアルデヒド濃度予測値を求めた。

(2) 室内化学物質濃度の予測と換気による汚染質制御

(a) 室内化学物質濃度予測式を用いた汚染対策の効果に関する研究

- 1) 化学物質の発生源発生量と除去機構の化学物質除去性能を筆者らの予測式に代入することで、建築物の設計段階における室内化学物質濃度の予測が実現した。
- 2) LDK 室と寝室に室内化学物質濃度の汚染対策を施すことにより、室内濃度が有効に低減することが示された。
- 3) 吸着建材と家庭用空気清浄機における化学物質除去性能の持続性の解明が、今後の検討課題である。

(b) 空気清浄ユニット付き換気システムのホルムアルデヒド除去性能の実態と試験法の提案に関する研究

- 1) 定常法除去性能試験とワンパス試験法による相当換気量を同時に求める事ができる新しい試験法を提案した。
- 2) 提案した新試験法により定常法除去性能試験とワンパス試験法における空気浄化ユニット付き換気システムのホルムアルデヒド相当換気量を求めた。
- 3) 定常法除去性能試験とワンパス試験法におけるホルムアルデヒド相当換気量の値を比較検討したところ、両者の符号率は92.4[%]と高い値を示した。
- 4) 今回提案したチェンバーを用いた新型試験により、在来のワンパス試験法では測定誤差の大きかったガス状物質除去率を正しく求められる。

(c) 循環濾過型空気清浄ユニット付き換気システムの化学物質除去性能に関する研究

予測の結果、当該予測条件では、換気装置の運転のみでは初期濃度(200[ppb])は全く低下しないが、新開発のフィルタを搭載すると全ての案(搭載したフィルタは、4種類の活性炭や化学吸着剤などで構成されており、第1案から第3案に分類)でホルムアルデヒド濃度は厚生労働省の室内濃度指針値(80[ppb])以下に低下した。特に第1案は、第2,3案と比較してホルムアルデヒド濃度の顕著な減衰効果が予測された。

第 2 章 参考文献

- 2-1) 建築法令研究会：建築関係法令集、井上書院、2004
- 2-2) SHSSE-S-102-2003：空調調和・衛生工学会、2003
- 2-3) SHSSE-S-116-2003：空調調和・衛生工学会、2003
- 2-4) 山下一彦・後藤立夫・山崎均：衛生工学会論文集、No.70、1998
- 2-5) 木村健一：建築設備基礎理論演習、学献社、1970
- 2-6) 松下電器：環境総合カタログ、2004
- 2-7) 渡辺要：建築計画言論、丸善株式会社、1965
- 2-8) Feustel, H.E., A. Rayner-Hooson., 1990 : Fundamental of the multizone air flow model COMIS. Technical Note AIVC 29. AIVC, Coventry, GB., Fisk, W., 2000, "Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency", Annu. Rev. Energy Environ. 25:537-66.
- 2-9) S. Patankar. : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGaw-Hill Book Company, New York, 1980.
- 2-10) Musser, A. : An analysis of combined CFD and multizone IAQ model assembly issues, ASHRAE Transactions, 107(1) AT-01-13, 2001.
- 2-11) Schaelin, A., Dorer V., et al. : "Improvement of multizone model predictions by detailed flow path values from CFD calculation," ASHRAE Transactions, 93-7-4, pp. 709-720, 1993.
- 2-12) 本間義規、鈴木大隆、坂本雄三、広田誠一、福島明：戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究その 10 プラットホーム床面の隙間測定と間仕切壁の通気・隙間特性、日本建築学会学術講演梗概集、D-2 分冊、pp.35、1999
- 2-13) 林基哉、大澤元毅：内部建材の化学物質放散が室内空気質に与える影響 第 3 種換気システムを用いた戸建木造住宅に関する基礎実験、日本建築学会環境系論文集、NO.573、pp.63、2003.11
- 2-14) 大澤元毅、林基哉、本間義規：戸建住宅の内部建材からの化学物質放散が室内空気質に与える影響その 1 戸建住宅を用いたホルムアルデヒドの測定、日本建築学会大会梗概集、D-2 分冊、pp.869、2003. その 2 部分構造モデルを用いたホルムアルデヒドに関する長期測定、D-2 分冊、pp.871、2003. その 3 換気回路網シミュレーションに基づく化学物質流入の定量的検討、D-2 分冊、pp.1057、2004. その 4 換気方式が侵入率に与える影響に関する測定、D-2 分冊、pp.1059、2004.
- 2-15) M Hayashi, H Osawa : THE INFLUENCE OF THE CONCEALED POLLUTION SOURCES UPON THE INDOOR AIR QUALITY IN HOUSES, Proc.int.conf. " INDOOR AIR '05 ", Paper ID: 2.7-30, 2005.9.
- 2-16) 財団法人住宅金融普及協会：枠組壁工法住宅工事共通仕様書《住宅金融公庫基準適合仕様書確認書付き》平成 15 年改訂（全国版）

- 2-17) 財団法人住宅金融普及協会：木造住宅工事共通仕様書《住宅金融公庫基準適合仕様確認書付き》平成15年改訂（全国版）
- 2-18) 野崎淳夫:厚生科学研究『生活用品、対策品からの化学物質の発生と除去性能に関する研究（課題番号:H13-生活-018）』、2004年3月
- 2-19) 野崎淳夫、浅野康明：電器式暖房機器の化学物質発生量 日用品からの化学物質の発生に関する研究(その1)、日本建築学会環境系論文集、No.591、pp.23-29、2005年8月
- 2-20) 野崎淳夫、早坂友規他:日用空気汚染対策品の化学物質除去性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、D- 、pp.985-986、2006年9月
- 2-21) 野崎淳夫、折笠智昭、吉澤晋:開放型石油暖房器具からの VOC の発生、開放型燃焼器具からのガス状汚染物質の発生に関する研究(その1)、日本建築学会環境系論文集、No.591、31~35、2005年5月
- 2-22) 野崎淳夫、成田泰章:機器備品による化学物質汚染と室内濃度予測に関する研究、第1報-事務機器のオゾン発生量算定と室内濃度予測法-、空気調和・衛生工学会論文集、No.100、pp.9~16、2005年7月
- 2-23) 野崎淳夫、早坂友規他：各種生活用品からの化学物質発生に関する研究(その3)、室内空気環境とその快適性に関する研究、第13回大気環境学会北海道東北支部学術集会講演要旨集、2006年11月
- 2-24) A. Nozaki, S. Yoshizawa : Studies on the NO_x Emission Characteristics from Domestic Kerosene Fired Space Heaters with Indoor Oxygen Depletion, Proceedings of INDOOR AIR 93, Vol. 3, pp. 177-182, June, 1993
- 2-25) A. Nozaki, S. Yoshizawa, K. Ikeda : A Study on the Prediction of Nitrogen Oxides Indoors with Flue-less Kerosene Space Heaters, Healthy Buildings '94, Vol. 2, pp. 167-172, August, 1994
- 2-26) 野崎淳夫他:家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究(その1)、日本建築学会計画系論文集、No. 576、pp.37~42、2004年2月
- 2-27) 野崎淳夫、浅野康明：電気式暖房機器の化学物質発生量、日用品からの化学物質の発生に関する研究（その1）、日本建築学会環境系論文集、No. 591、pp.23~29、2005年5月
- 2-28) 野崎淳夫、折笠智昭、吉澤 晋：開放型石油暖房器具からの VOC の発生、開放型燃焼器具からのガス状汚染物質の発生に関する研究（その1）、日本建築学会環境系論文集、No. 591、pp.31~35、2005年5月
- 2-29) 野崎淳夫、成田泰章:機器備品による化学物質汚染と室内濃度予測に関する研究（第1報）、事務機器のオゾン発生量算定と室内濃度予測法、空気調和・衛生工学会論文集、No. 100、pp.9~16、2005年7月
- 2-30) A. Nozaki, Y. Ichijo, S. Yoshizawa : Studies on Chemical Substance Removal Rates of Domestic Air Cleaners and Development on the Indoor Pollutant Concentration Prediction Method, Proceedings of INDOOR AIR 2005, pp.2991-2995, Sept., 2005

- 2-31) 清澤裕美、野崎淳夫、吉澤 晋：家庭用空気清浄機の汚染物質除去性能と室内濃度予測に関する研究（その2）、花粉粒子に対する除去効果、日本建築学会環境系論文集、No. 596、pp.29～35、2005年10月
- 2-32) 野崎淳夫、工藤彰訓、大澤元毅、坊垣和明、桑沢保夫、吉澤 晋：家庭用空気清浄機のVOC除去性能の実態解明、家庭用空気清浄機のガス状汚染物質除去特性に関する研究(その2)、日本建築学会環境系論文集、No. 599、pp.67～72、2006年1月
- 2-33) A. Nozaki, Y. Hashimoto, Y. Narita, H. Yokoyama, H. Jinno, R. Kou, M. Ando: A Study on the Chemical Substance Emissions from Electric Household Appliances, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Vol. ,pp.317-320, June, 2006
- 2-34) A. Nozaki, Y. Hashimoto, S. Sasaki, A. Ona, Y. Nagatomo, H. Hashiguchi: A Study on the Mitigation Technique for Indoor Chemical Pollution by Circulating Ventilation System with Air Purifying Devices, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Vol. ,pp.23-27, June, 2006
- 2-35) A. Nozaki, Y. Ichijo, T. Hayasaka, A. Kikkawa, H. Honma, K. Ikeda, S. Yoshizawa: Studies on Formaldehyde Removal Rates of Domestic Air Cleaners and the Indoor Concentration Prediction, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Vol. ,pp.229-232, June, 2006
- 2-36) A. Nozaki, A. Suzuki, N. Sugiyama: Study on the Emission of Chemical Substances from Housing Equipments, Proceedings of Healthy Buildings 2006, Vol. ,pp.259-262, June, 2006
- 2-37) 野崎淳夫、山下祐希、一條佑介：グラフトン重合技術利用吸着材の化学物質除去性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、D- 、pp.969～970、2006年9月
- 2-38) 野崎淳夫他：家庭用空気清浄機のVOC除去性能の実態解明、家庭用空気清浄機のガス状汚染物質除去特性に関する研究（その2）、日本建築学会環境系論文集、No.599、pp.67～72 2006年1月
- 2-39) 野崎淳夫他：循環型換気システムの化学物質除去性能の実態把握に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、D-2、pp.1185～1186、2006年7月
- 2-40) 野崎淳夫他：循環濾過型空気清浄ユニット併用型換気システムの化学物質除去性能に関する研究、第15回日本臨床環境医学会総会抄録集、pp. 59、2006年7月
- 2-41) 吉野博他：シックハウスにおける居住環境の実態と健康に関する調査研究日本建築学会環境系論文集、No.567,pp.57-64,2003年5月

第3章

施工後・居住後における性能検証の
ための現場測定法の検討

3.1 はじめに

本章では、施工後・居住後における現場測定方法について述べる。居住状態で使用可能な換気量測定法を用いて実在住宅を対象とした実測を行い、実在住宅における換気量の実態、換気量不足の原因を把握するとともに、各測定法の適用方法や測定精度について検討する。特に、簡易的な測定法として注目されている PFT 法（東大柳沢研究室製）に関しては、実験棟を対象に実験と数値解析を行い、トレーサーガスの発生位置及び捕集位置、4 種類のトレーサーガスを用いた場合の測定精度について検討する。また、近年、導入され始めている熱交換器付きシステムや床下等をダクトスペースとして利用するシステムといった特殊な換気システムの性能検証方法について検討する。

3.2 PFT 法（東大柳沢研究室製）の検討

3.2.1 はじめに

PFT 法を実際の住宅実測等に用いる前段階として、気象条件を制御した（濃度分布、空気流動の影響が考えられる）実大実験棟において測定器の精度の検証を行う。まずトレーサーガスが 1 種類の場合、PFT 法で測定した換気量が従来の換気量測定法と同様の結果を得ることができるかということを確認するため、換気経路が明確であり、気象条件が制御可能な人工気象室において、詳細な測定が可能で研究実績があるステップアップ法と PFT 法の測定結果を比較する。

次に、その発展的な内容として、PFT 法でトレーサーガスを数種類使用した場合、これまで測定が困難であった室間の換気量を測定することが可能になる。東大柳沢研においてチャンバー実験の段階で 4 種類のトレーサーガスを使用することが可能になった。そこで今回、実大実験棟を対象に室間の換気量をファンで制御した状態を作り、PFT 法で制御したとおりの室間換気量を測定することができるかを検証する。

住宅実測等で換気量測定を行う場合、サンプラー、ドーザーの設置位置は、経験と勘によるところが大きい。理想的にはドーザーを換気経路として風上側に配置し、サンプラーは風下側に配置することが望ましいが、換気を測定する前に、この状態を理解することは難しい課題である。また、実際の住宅では予期せぬ隙間の影響や窓の開閉等により換気経路が変化すること、もしくは換気経路外に測定器を設置することで換気回数が過大評価されるという問題がある。そこで、多数室換気計算プログラム COMIS³⁻³⁾ と数値流体計算プログラム CFD を用いた数値解析により、戸建標準住宅の居室を対象に、換気方式・気密性能・窓の開閉等の条件を変更して、居室の換気経路について明らかにし、PFT 測定器の設置位置について検討する。

3.2.2 人工気象室における PFT 法測定精度検証実験

(1) 実験の目的

トレーサーガスが1種類の場合、PFT法で測定した換気量が従来の換気量測定法と同様の結果を得ることができるか、ということを確認するため、換気経路が明確であり、気象条件が制御可能な人工気象室において、詳細な測定が可能で研究実績があるステップアップ法とPFT法の測定結果を比較する。

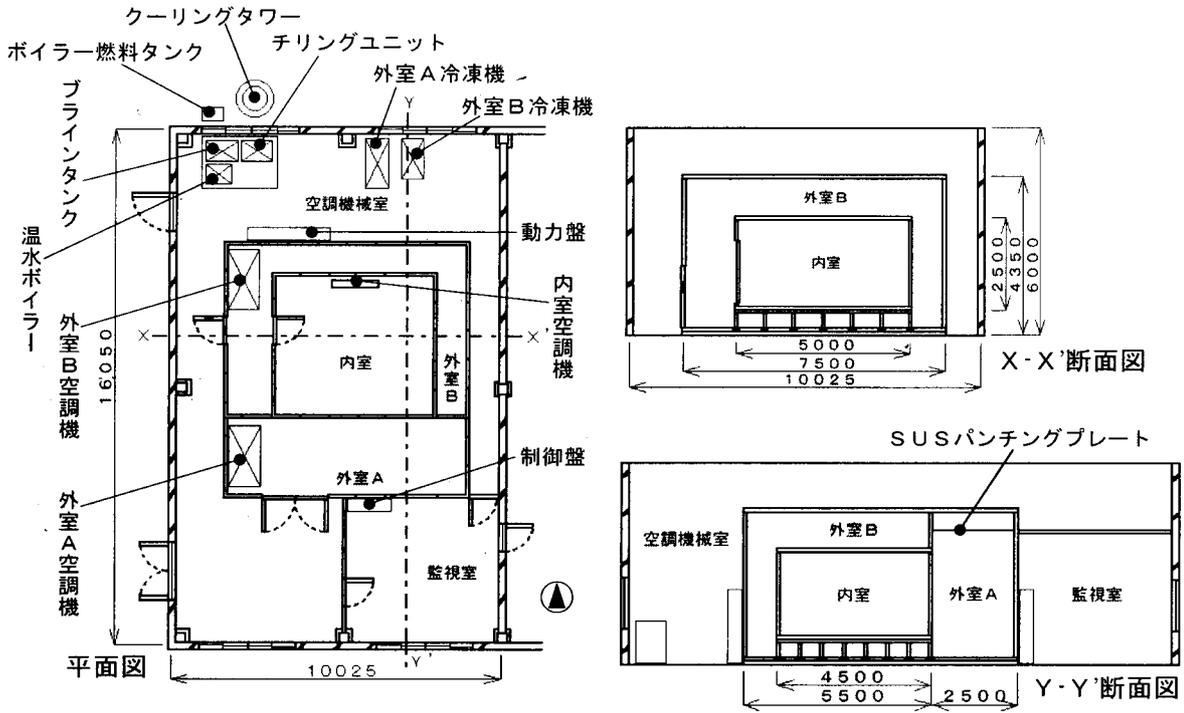
(2) 実験概要

(a) 実験対象

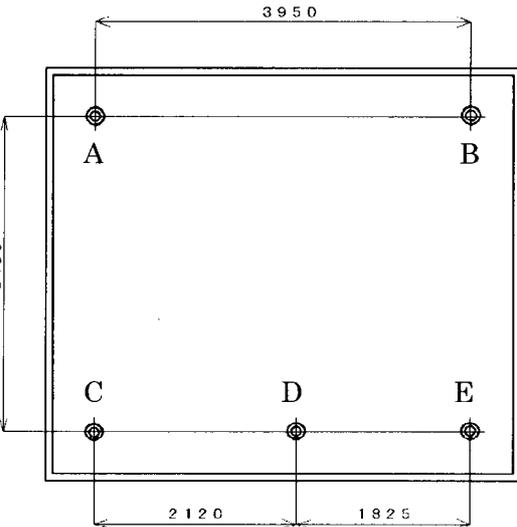
実験対象は東北工業大学の人工気象室³⁻¹⁾(図3-2-1)である。人工気象室は、室内環境を想定した内室を外部環境を想定した外室が取り囲むように配置されており、外室においては $-15\sim 40$ ℃の範囲で自由に温度を制御して任意の気象条件を作り出すことができる。図3-2-1(2)は人工気象室の天井伏図(写真3-2-1)であり、図中のA~Eの給排気口において自由に風量調節の設定を変えることができる。図3-2-1(3)は人工気象室の南側壁面図(写真3-2-2)でa~dの自然換気口を開放することができる。また、室内には室内の温度を調節するための空調機があり、吹出し口の開口面積を調節することで風量を調節することができる。人工気象室内室の容積は約 50m^3 (縦 $4350\text{mm}\times$ 横 $4850\text{mm}\times$ 高さ 2350mm)、床面積当りの相当隙間面積 $0.64\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、給排気口内径 110mm である。

(b) 実験期間

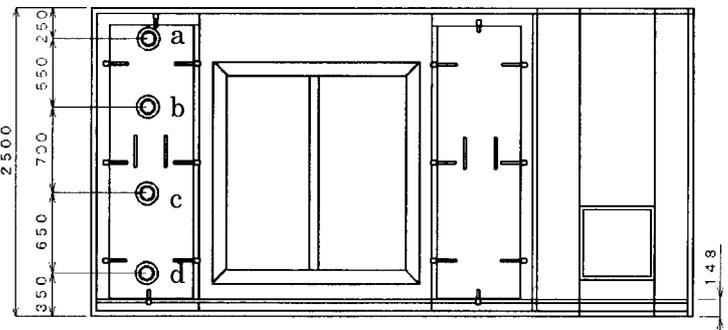
実験期間はステップアップ法が2003年8月5日から8月6日の24時間、ステップダウン法は2003年9月1日から9月3日の3日間である。PFT法は2003年8月7日から8月27日までそれぞれ1週間の測定を2ケース行った。



(1) 人工気象室の平面図および断面図



2) 内室の天井開口部の位置



(3) 内室の南壁面開口部の位置

図 3-2-1 人工気象室図

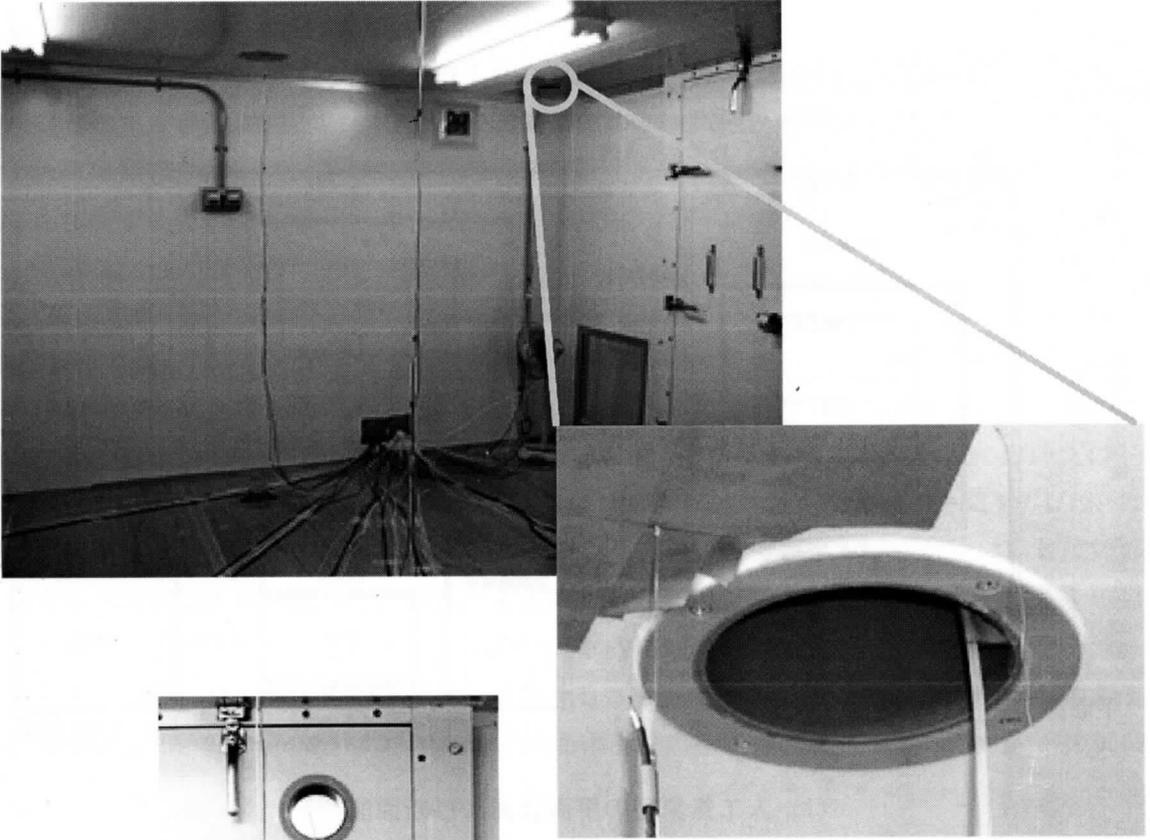


写真 3-2-1 内室の天井開口部

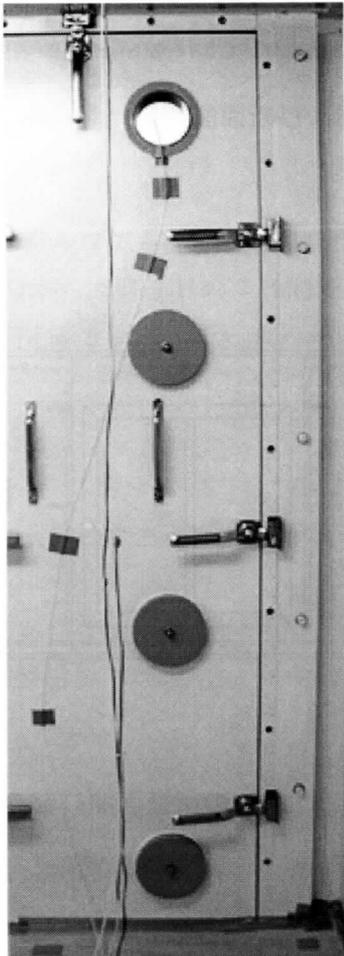


写真 3-2-2 内室の南壁面開口部

(c) ステップアップ法、ステップダウン法の測定概要と結果

1) 実験方法

実験では、トレーサースガスに SF₆（六フッ化硫黄）を用いた。測定点は室内環境を想定した内室に水平・垂直位置の異なる 27 点を設けた（図 3-2-2）。この 27 点以外に、給気ダクト内（Inlet）と排気ダクト内（Exit）にも測定点を設けている。マルチポイントサンプラーで測定点のガス濃度の測定を行った。また、各測定点には熱電対が設置してあり、温度の測定も行った。ステップアップ法は給気口よりトレーサースガスを注入した。ステップアップ法の測定が終了後、室内でトレーサースガスが均一になるようにファンで攪拌してから、ステップダウン法の測定を行った。

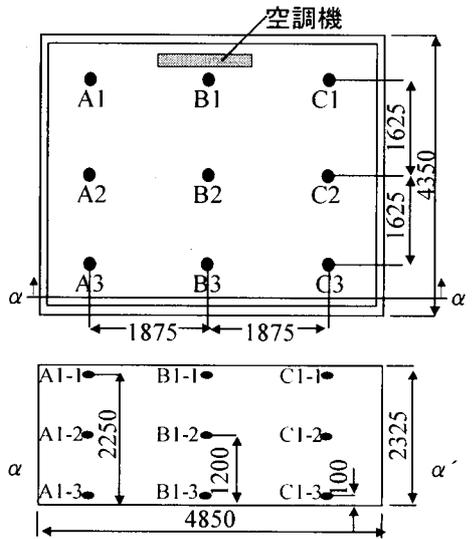


図 3-2-2 ステップアップ法、ステップダウン法測定位置（人工気象室内室）

2) 実験条件

表 3-2-1 に実験ケースを示す。実験はステップアップ法、ステップダウン法それぞれ 1 ケースずつ測定を行い、内室と外室の温度は等温に設定した（温度測定結果：内室 22℃、外室 20℃）条件で測定を行った。実験中は内室の換気回数が 0.5 回/h になるように機械ファンの風量を 25m³/h に調節した。Case1、2 それぞれの給排気口の風量測定結果を表 3-2-2 に示す。また、実験中は内室空調機を使用しなかった。

Case1 について測定方法はステップアップ法、換気方式は第 1 種換気システム、給気口は図 3-2-1 (2) 点 E の位置から天井機械給気を行い、排気口は図 3-2-1 (2) 点 A の位置から天井機械排気を行った。測定点は 12 点（図 3-2-2）で、給気口内部（Inlet）、床上 10cm 部分は A1-3、A3-3、B1-3、C1-3、C3-3 で、床上 120cm 部分は C2-2 で、床上 225cm 部分は A1-1、A3-1、B1-1、C1-1、C1-3 でそれぞれガス濃度の測定を行った。

Case2 について測定方法はステップダウン法、換気方式は第 3 種換気システム、給気口は図 3-2-1 (3) 点 b の位置から壁面の自然給気を行い、排気口は図 3-2-1 (2) 点 B の位置から天井機械排気

を行った。測定点は内室 27 点 (図 3-2-2) で、その他に給気口内部 (Inlet) と排気口内部 (Outlet) でガス濃度の測定を行った。

表 3-2-1 実験ケース

CASE	実験方法	換気方式	給気口	排気口
1	ステップアップ法	第1種	天井給気 (図3-2-1(2)点E)	天井排気 (図3-2-1(2)点A)
2	ステップダウン法	第3種	壁給気 (図3-2-1(3)点b)	天井排気 (図3-2-1(2)点B)

表 3-2-2 風量測定結果

CASE	測定回数	風量(m ³ /h)	
		給気口	排気口
1	1	24.3	24.3
	2	24.3	25.5
2	1	21.9	25.2
	2	23.6	25.2

3) 実験結果

Case1 (ステップアップ法: 第1種) の測定結果を図 3-2-3 に、Case2 (ステップダウン法: 第3種) の測定結果を図 3-2-4 に示す。Case1 は、空気齢は給気口 (C3) から排気口 (A1) に向かって少しずつ高くなっていることが分かる。最も効率よく換気が行われているのは C3 で空気齢が 107 分で、最も効率が悪いのは A3 で空気齢が 139 分であった。求めた空気齢を平均して室内の換気回数を求めると 0.47[回/h]であった。Case2 は、給気口付近 (A3) で空気齢が低く、排気口付近 (C1) で空気齢が高いことが分かる。最も効率よく換気が行われているのは A1 で空気齢が 93 分で、最も効率が悪いのは C1 で空気齢が 118 分であった。求めた空気齢を平均して室内の換気回数を求めると 0.59 回/h であった。

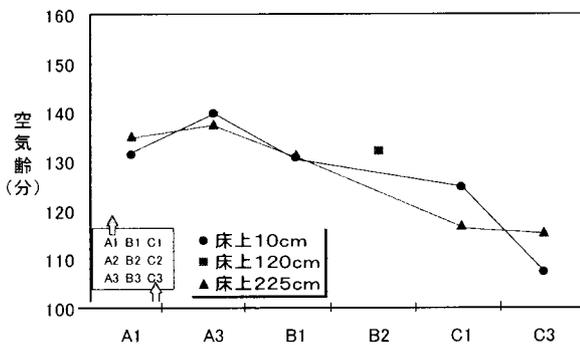


図 3-2-3 ステップアップ法実験結果

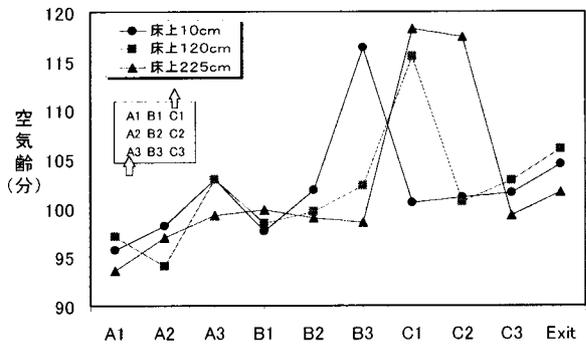


図 3-2-4 ステップダウン法実験結果

(d) PFT 法測定概要と結果

1) 実験方法

PFT 法で換気量の測定を行ったほか、給排気口の風量測定と熱電対による温度測定を行った。

2) 実験条件

実験ケースを表 3-2-3 に示す。実験はステップアップ法に対応する Case1 とステップダウン法に対応する Case2 の 2 ケース行った。1 ケースの測定期間は約 4 日間である。温度、機械ファンの風量 (表 3-2-4) などの条件は前節の実験と同様である。

Case1 は第1種換気システムで、給気口は図3-2-1(2)点Eの位置から天井機械給気を行い、排気口は図3-2-1(2)点Aの位置から天井機械排気を行った(実験条件はステップアップ法と同条件)。ドーザーは換気経路の風上側で直接風速の影響を受けない口(図3-2-5(1))の位置から行った。サンプラーは換気経路上と予想される9点にて測定を行った(図3-2-5(1)点A~I)。

Case2 は第3種換気システムで、給気口は図3-2-1(3)点bの位置から壁面の自然給気を行い、排気口は図3-2-1(2)点Bの位置から天井機械排気を行った(実験条件はステップダウン法と同条件)。ドーザーは換気経路の風上側で直接風速の影響を受けない口(図3-2-5(2))の位置から行った。サンプラーは換気経路上と予想される9点にて測定を行った(図3-2-5(2)点a~i)。

表3-2-3 実験ケース

CASE	換気方式	給気口	排気口	ドーザー	サンプラー
1	第1種	天井給気 (図3-2-1 (2)点E)	天井排気 (図3-2-1 (2)点A)	図3-2-5 (1)☆印	図3-2-5 (2)☆印
2	第3種	壁給気 (図3-2-1 (3)点b)	天井排気 (図3-2-1 (2)点B)	図3-2-5 (1)点A~I	図3-2-5 (2)点a~i

表3-2-4 風量測定結果

CASE	測定回数	風量(m ³ /h)	
		給気口	排気口
1	1	24.3	24.3
	2	24.3	25.5
2	1	21.9	25.2
	2	23.6	25.2

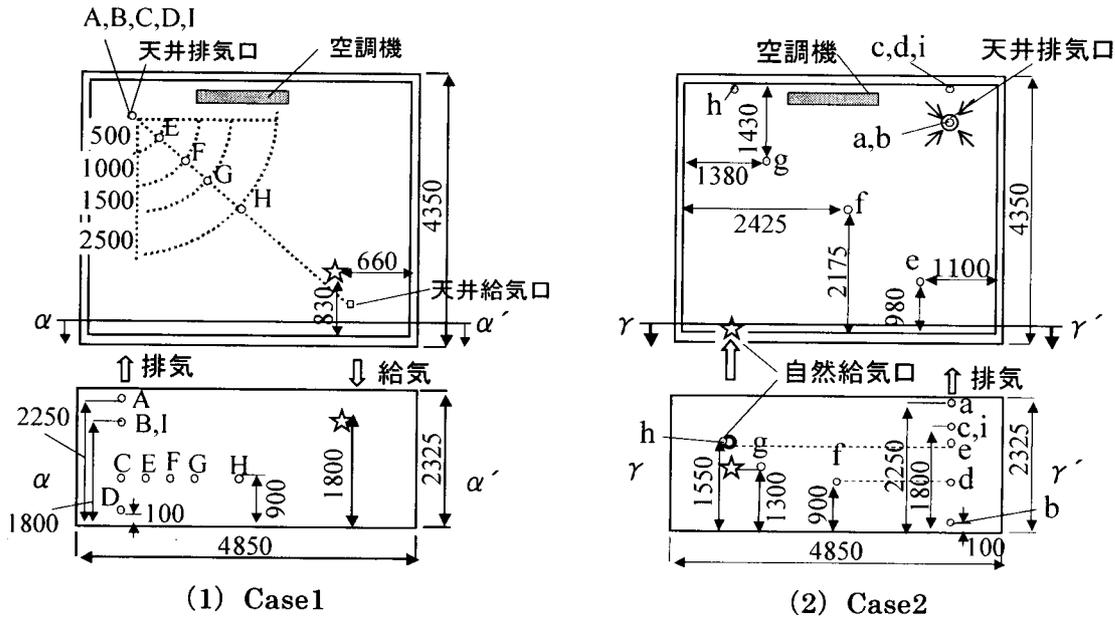


図3-2-5 PFT法測定器設置位置

3) 実験結果

Case1の実験結果を表3-2-5に、Case2の結果を表3-2-6に示す。Case1は、測定点Aの換気回数が高い原因としては点Aの測定点は排気口から10cmしか離れておらず、排気口の吸込み気流の影響を受けたため、サンプラーがガスをうまく捕集できなかったことが原因と考えられる。他の点について換気回数はほぼ0.5[回/h]であった。点Bと点Iは同点で測定を

行った結果である。Case2 で測定点 a の換気回数が大きくなった原因も Case1 と同様と思われる。他の点について換気回数はほぼ 0.6[回/h]であった。点 c と点 i で同点測定を行った。

表 3-2-5 Case1 測定結果

測定点	換気回数 (回/h)	局所空気齢 (h)
A	0.77	1.30
B	0.55	1.82
C	0.49	2.04
D	0.49	2.04
E	0.49	2.04
F	0.5	2.00
G	0.48	2.08
H	0.52	1.92
I	0.46	2.17

表 3-2-6 Case2 測定結果

測定点	換気回数 (回/h)	局所空気齢 (h)
a	0.97	1.03
b	0.62	1.61
c	0.62	1.61
d	0.62	1.61
e	0.62	1.61
f	0.56	1.79
g	0.61	1.64
h	0.58	1.72
i	0.55	1.82

■ は同点測定結果

(3) ステップアップ法、ステップダウン法と PFT 法の実験結果の比較

ステップアップ法と PFT 法実験 Case1 の実験結果の比較を図 3-2-6、表 3-2-7 に、ステップダウン法と PFT 法実験 Case2 の実験結果の比較を図 3-2-7、表 3-2-8 に示す。図 3-2-6 より風速の影響を強く受けた点 A を除くと、PFT 法は測定誤差 15%程度でステップアップ法の測定結果と一致した。図 3-2-7 より風速の影響を強く受けた点 a を除くと、PFT 法は測定誤差 8%程度でステップダウン法の測定結果と一致した。

表 3-2-7 PFT 法と SU 法測定結果

測定点	空気齢[h]	
	PFT法	SU法
A	1.30	2.25
B	1.82	-
C	2.02	-
D	2.02	2.19
E	2.02	-
F	2.00	-
G	2.09	-
H	1.92	2.20
I	2.16	-

■ は同点測定結果

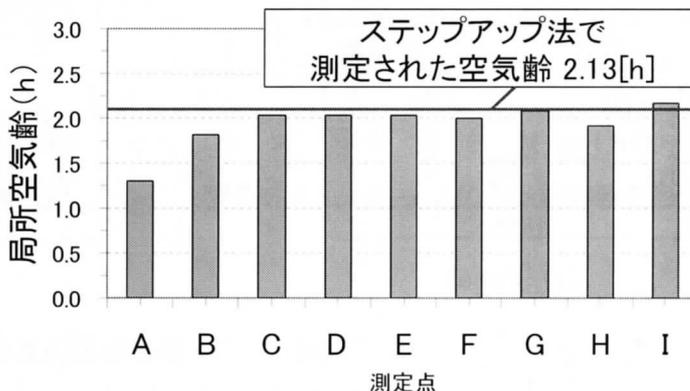


図 3-2-6 PFT 法と SU 法測定結果の比較

表 3-2-8 PFT 法と SD 法測定結果

測定点	空気齢[h]	
	PFT法	SD法
a	1.03	1.97
b	1.62	1.68
c	1.61	-
d	1.61	-
e	1.61	-
f	1.78	1.66
g	1.63	-
h	1.71	-
i	1.83	-

■ は同点測定結果

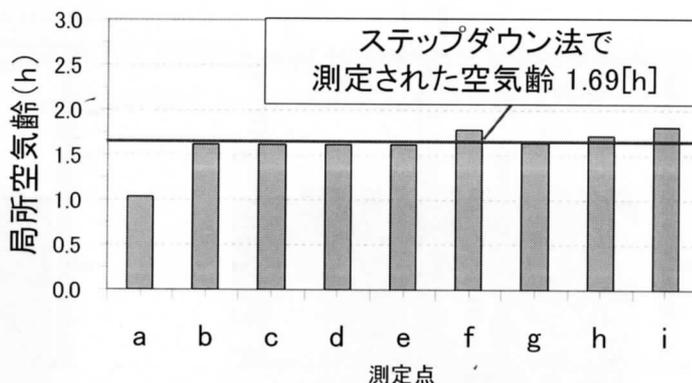


図 3-2-7 PFT 法と SD 法測定結果の比較

(4) まとめ

換気経路が明確な空間で、気象条件が制御可能な人工気象室において、詳細な測定が可能で研究実績があるステップアップ法と PFT 法の測定結果の比較を行った。測定結果を比較した結果、PFT 法は測定誤差 10%程度で既往の測定法の結果と一致することが確認できた。今後は、気象条件や隙間風など制御ができない住宅実測について PFT 法を実際に用いて、その問題点について検討を行う。

3.2.3 4種類のトレーサーガスを用いた PFT 法実験

(1) 実験の目的

換気実験棟を用いて空間相互の換気量を制御した状態を作り、PFT 法で測定した室間の換気量とファンで制御した換気量を比較し、その精度を確かめる。

(2) 実験概要

(a) 実験対象

実験対象は東北大学構内に設けられた換気実験棟³⁻²⁾である。平面図を図 3-2-8 に示す。換気実験棟の延べ床面積は 78.9m²、室容積は 163.9m³である。1階と2階ともに廊下を挟んで左右にそれぞれ同じ大きさの部屋を設けている。各部屋の間仕切り扉には 10×10cm の大きさの換気口を1階は床上 40cm、2階は床上 50cm の位置に2個ずつ設けている。1階と2階は南側に設けた吹き抜けによって空間的につながっている。この吹き抜けには扉がついており、必要に応じて開閉が可能となっている。

(b) 実験期間

測定期間は 2004 年 9 月 6 日から 9 月 13 日の 1 週間である。

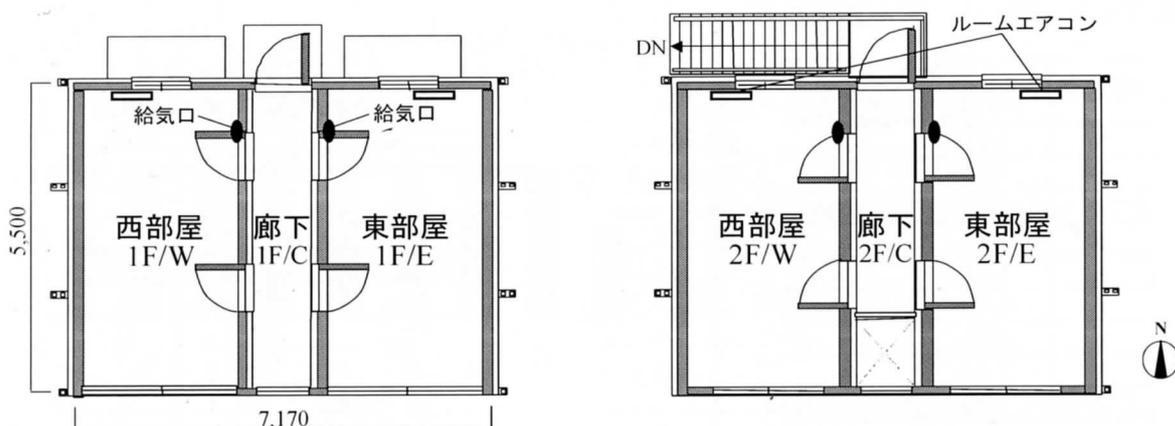


図 3-2-8 換気実験棟平面図

(c) 実験方法

測定項目は、温湿度、換気量、屋外風向風速である。それぞれの測定の様子を写真 3-2-3～3-2-4 に示す。また、一定濃度法と PFT 法による測定位置を図 3-2-9、3-2-10 に示す。

1) 温湿度

室内温度・外気温度は湿温度センサ付小型データロガー(測定精度 温度： $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度： $\pm 5.0\%\text{RH}$)を用いて測定した。室内では各室床上 1.1m の高さで、屋外では直射日光が当たらない場所で空気温度を 10 分間隔で測定した。各測定点における空気温度のデータは測定器のメモリに自動的に記録される。

2) 換気量

2-a) 一定濃度法による換気量測定

測定器を屋外に置き、測定器に接続させた 2 種類のチューブを室内に張り巡らす。設置したチューブ(ビニールチューブ)からトレーサーガスを放出し、別のチューブ(テフロンチューブ)により室内の空気をサンプリングし測定を行う。トレーサーガスには SF_6 を使い、設定濃度は 5ppm とした。注入されるガスが室内に均等に分布するように攪拌用ファンを用い、広い部屋ではチューブの分岐を行った。

2-b) PFT 法による換気量測定

小指大のトレーサーガス源とサンプラーそれぞれ設置した。設置個数及び設置場所については、実験棟の図面から換気経路を予測してサンプラー、ドーザーを設置した。基本的にトレーサーガス源の設置場所は各部屋の給気点であり、サンプラーの設置場所は部屋の排気点である。今回はドーザー、サンプラー共に高さ 1.8m に設置した。4 種類のトレーサーガスは PMCH、HFE-7200、HFB、OFT を使用した。OFT は放散量が小さいため、2 本 1 組で使用した。

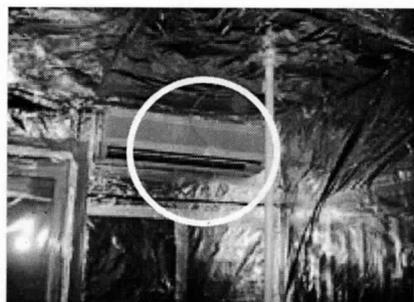
2-c) 風量測定

室間の換気量を制御するために、室間をつなぐ扉にスタイロフォームをはめこみそこに小型ファンを取り付け、強制的に室間換気を行った。小型ファンの風量は風量計(コーナー札幌、Swema

Flow 65)を用いて測定した。給排気口の風量が安定した後、10秒間の平均値を測定結果とした。

(c) 屋外風向風速

印字式多測点風向風速計を用い、換気量測定と同時に、測定間隔を10分として連続測定した。風向と風速の発信器設置場所は換気実験棟の西側にある広場であり、測定高さは8mである。



(a) ドージングの様子



(b) サンプルングの様子

写真 3-2-3 一定濃度法測定の様子

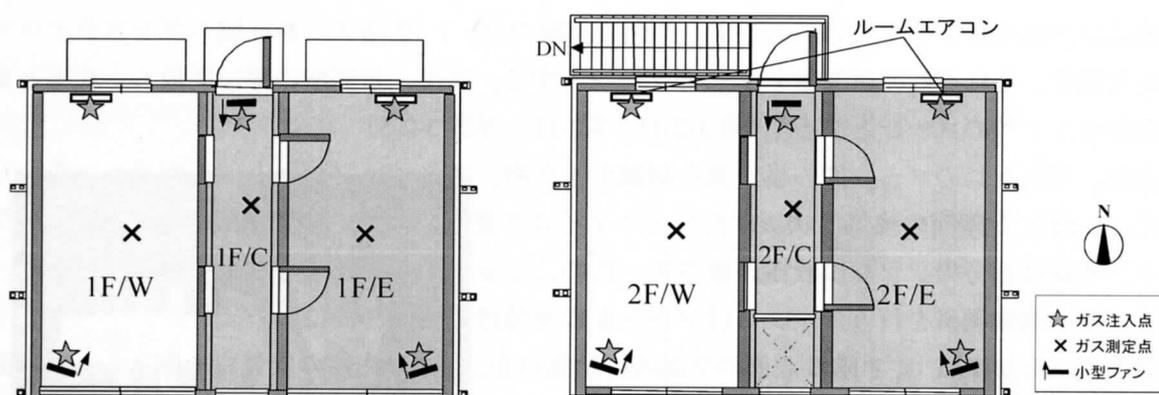


図 3-2-9 一定濃度法の測定位置



(a) ドーザーの様子



(b) サンプラーの様子

写真 3-2-4 PFT 法測定の様子

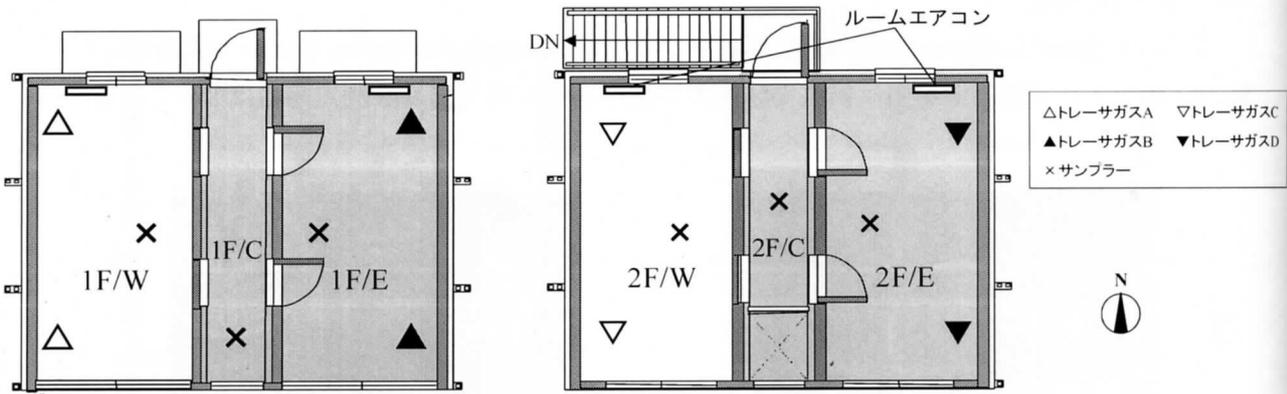


図 3-2-10 PFT 法の測定器設置位置

(d) 実験条件

換気実験棟の間取りは図 3-2-8 に示したとおりであるが、今回の実験ではトレーサーガスを 4 種類用いるため、実験棟を 4 つのゾーンに分けて換気量の測定を行う。換気実験棟の西部屋、東部屋にはそれぞれ 2 つずつ扉があるが、今回の実験では、1・2 階共に西部屋の扉をスタイロフォームで塞ぎ、それぞれの西部屋を 1 つのゾーンとする。また、東部屋の扉は開放し、廊下と東部屋を併せて 1 つのゾーンとする。(図 3-2-11、3-2-13、写真 3-2-5)

また、それぞれのゾーン間の換気量を制御するため、スタイロフォームに小型ファンを取り付けた。1 階と 2 階間の換気は吹抜け部分をスタイロで塞ぎ、ファンを取り付けて上下間の換気を行う。吹抜け部分のファンは設置距離が近いので、ショートサーキットを起す可能性がある。よって 2 階へ強制換気を行うファンにはダクトを取り付けた (図 3-2-12)。

換気方式は自然換気で、1 階は北側の 2 箇所給気口を、2 階は南北の給気口を開放し、開口面積を等しい条件にした (図 3-2-14)。各室の温度はルームエアコンを使用して 16°C に設定した。また、トレーサーガスの吸着を懸念して、スタイロフォームの表面はアルミ箔で覆った。

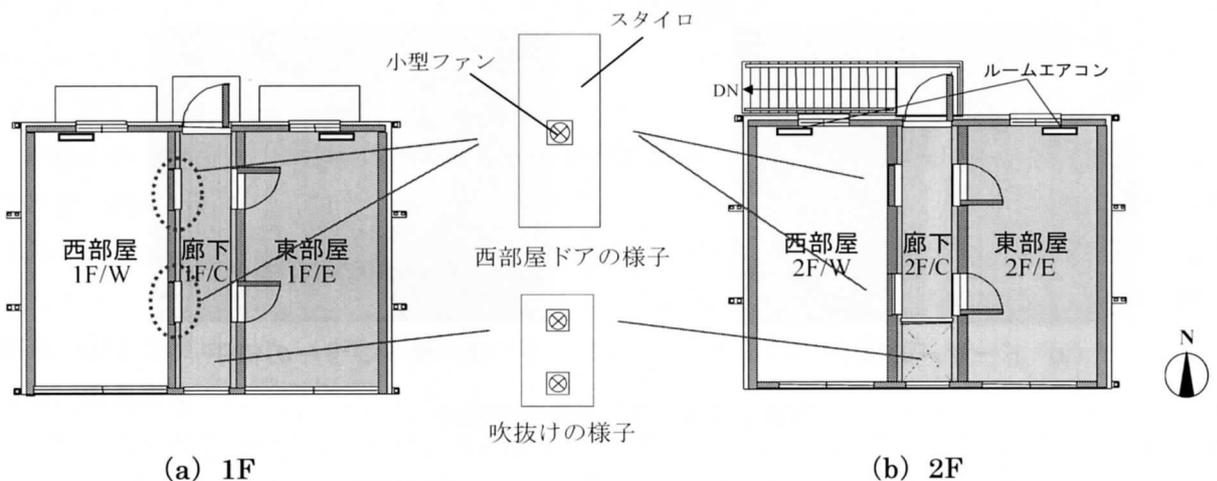


図 3-2-11 実験棟ゾーン割り

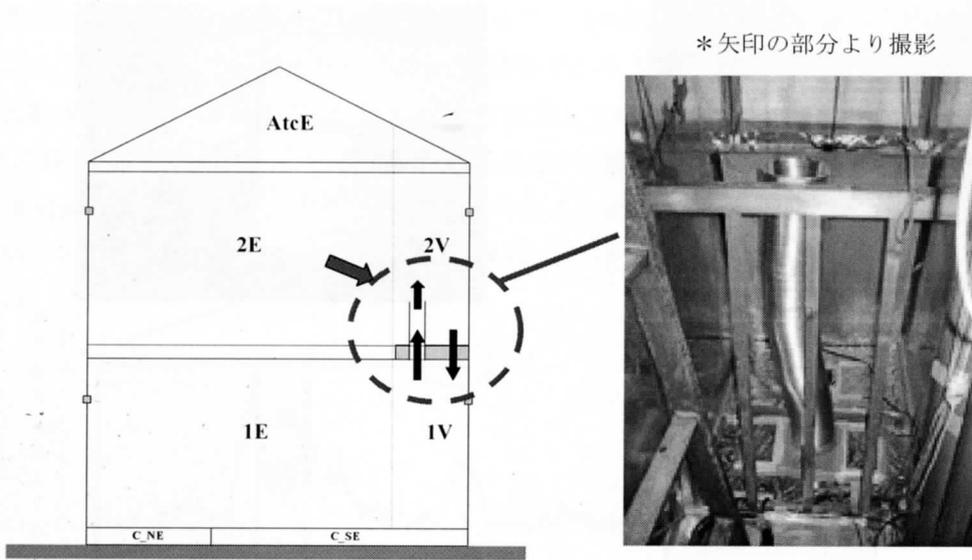


図 3-2-12 小型ファンを使用した1・2階間の換気の様子



写真 3-2-5 西部屋ドアの様子

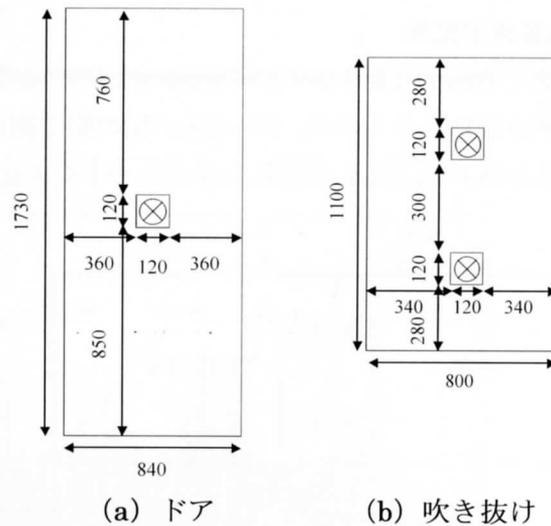


図 3-2-13 西部屋ドアと吹き抜けの寸法

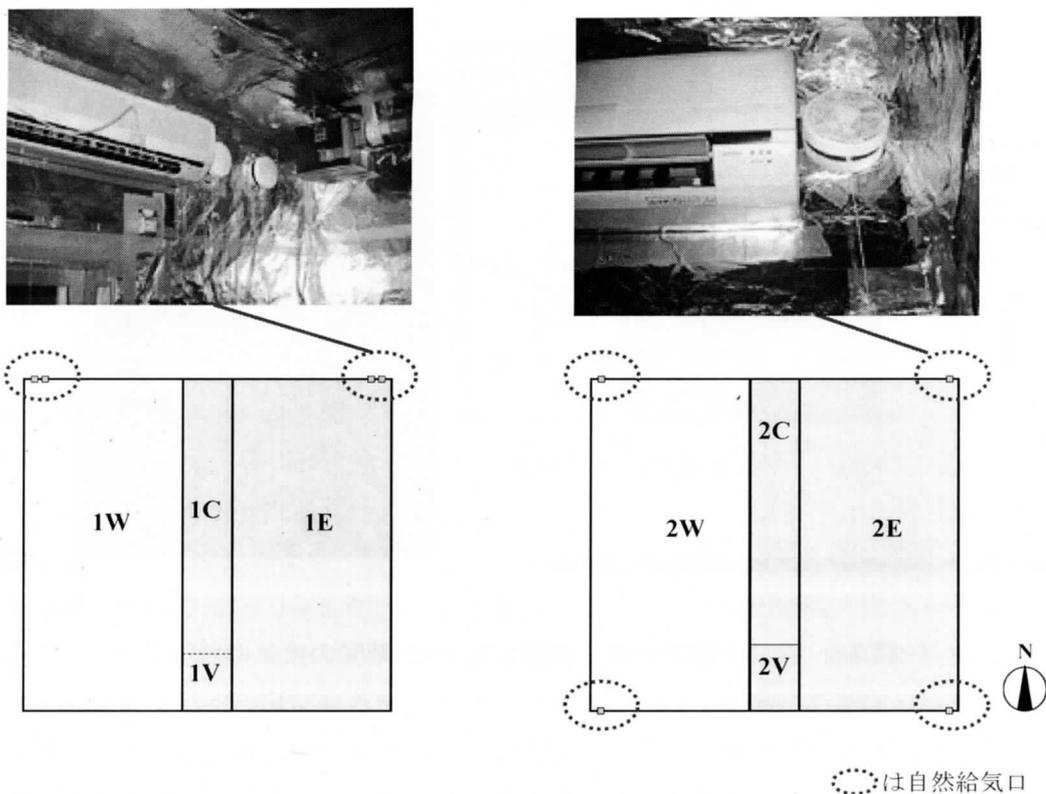
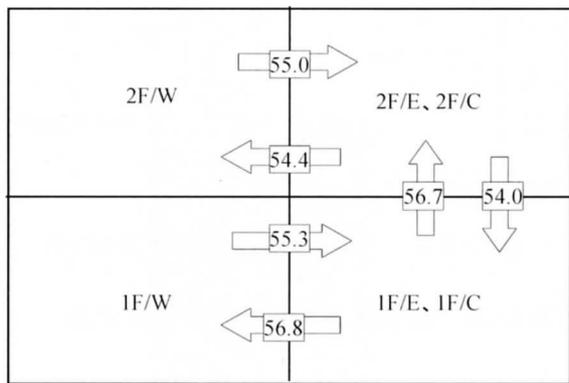


図 3-2-14 換気システムの概要

(3) 実験結果

(a) 風量測定結果

風量測定の結果を表 3-2-9 と図 3-2-15 に示す。小型ファンはすべて同じ性能のものを使用した。風量に多少差はあるものの、54~57[m³/h]の間で測定された。下記の風量が室間の空気交換量となる。図 3-2-15 は表 3-2-9 の結果を分かりやすく表記した概念図である。



単位: [m³/h]

表 3-2-9 小型ファンの風量測定結果

室名		風量[m ³ /h]
1F	E→W	56.8
	W→E	55.3
吹抜け	1F→2F	56.7
	2F→1F	54.0
2F	E→W	54.4
	W→E	55.0

図 3-2-15 小型ファンによる室間の空気交換量

(b) 一定濃度法の測定結果

一定濃度法による換気回数の測定結果と併せて、平均風速、室内外温度、SF₆濃度を図 3-2-16 に示す。SF₆濃度変動より、測定期間内は設定濃度である5[ppm]付近で安定して計測されていた。温度の変動を見ると、室内温度は19℃付近で安定している。室内外温度差は最大7℃程度で、9月10日以降の測定ではほとんど温度差は見られない。換気回数の経時変化を見ると換気回数はほとんど0.5[回/h]以下である。また、自然換気であるため、外部風速のデータとよく対応していることが分かる。なお、外部風向は風向計が故障していたため欠測である。

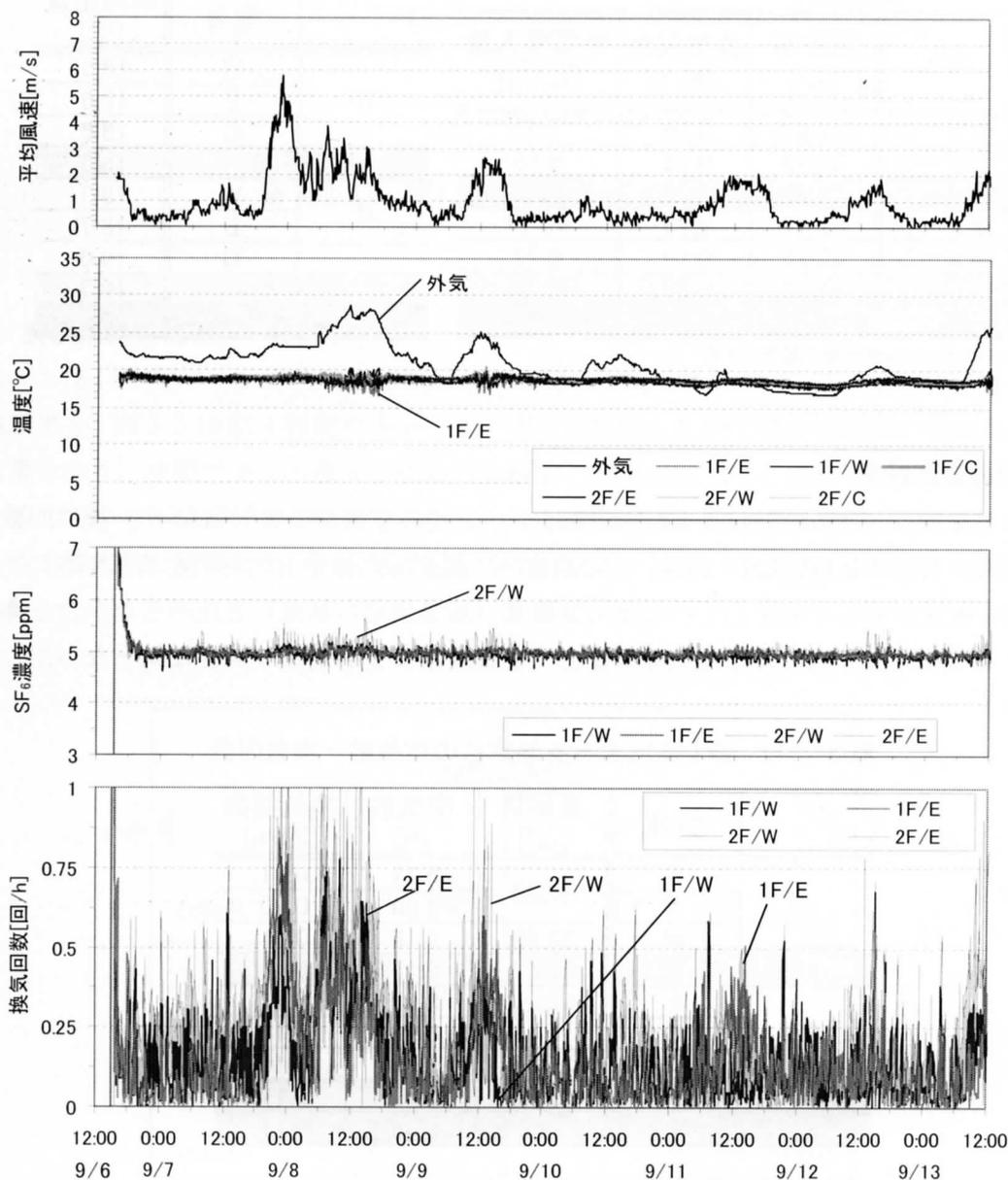


図 3-2-16 外部風速・温度・SF₆濃度・換気回数の経時変化

PFT法と同じ測定期間内(9/6 13:00 ~ 9/13 15:00)の換気回数・外気導入量の平均値を表3-2-10に、室内外温度差を表3-2-11に示す。外気導入量の平均値を見ると、1階、2階共に東部屋の方が西部屋より外気導入量が多い。換気実験棟は西側より東側の気密性能の方が低い³⁻²⁾ため、東ゾーンで外気導入量が多くなったと考えられる。室内温度の平均値を見ると、西部屋と東部屋をそれぞれルームエアコンで16°Cに設定したため、ほぼどの部屋でも19°C付近となっている。

表3-2-10 換気回数・外気導入量の平均値

測定期間は PFT と同時刻 (9/6 13:00 ~ 9/13

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]
1F	東ゾーン	47.63	0.16	7.43
	西ゾーン	32.89	0.16	5.16
1F合計・平均		80.52	0.16	12.59
2F	東ゾーン	52.47	0.25	13.17
	西ゾーン	35.75	0.19	6.77
2F合計・平均		88.22	0.23	19.94
合計・平均		168.74	0.19	32.53

※東ゾーンは東部屋+廊下とする

表3-2-11 室内外温度の平均値

	室名	平均温度 [°C]
1F	W	18.5
	E	18.6
	C	18.8
1F平均		18.6
2F	W	18.3
	E	18.7
	C	19.0
2F平均		18.7
外気		20.9

(c) PFT法の測定結果

表3-2-12にPFT法の測定結果を、図3-2-17にゾーン間の空気交換量^{注1)}を示す。換気回数を見るとどの空間でもほぼ0.11[回/h]であり、一定濃度法で測定した結果と比べると若干小さい。ゾーン間の空気交換量を見ると想定していた空気交換量(風量測定の結果)と比べるとかなり違いがある結果となった。PFT法による外気導入量も一定濃度法よりもかなり大きな値となった。

表3-2-12 PFT法による各測定点の空気齢・換気回数

	室名	室容積 [m ³]	空気齢 [h]	換気回数 [回/h]
1F	E	47.63	9.14	0.11
	C		9.80	0.10
	W	32.89	9.18	0.11
1F合計・平均		80.52	9.37	0.11
2F	E	52.47	9.12	0.11
	C		8.96	0.11
	W	35.75	9.83	0.10
2F合計・平均		88.22	9.30	0.11
合計・平均		168.74	9.34	0.11

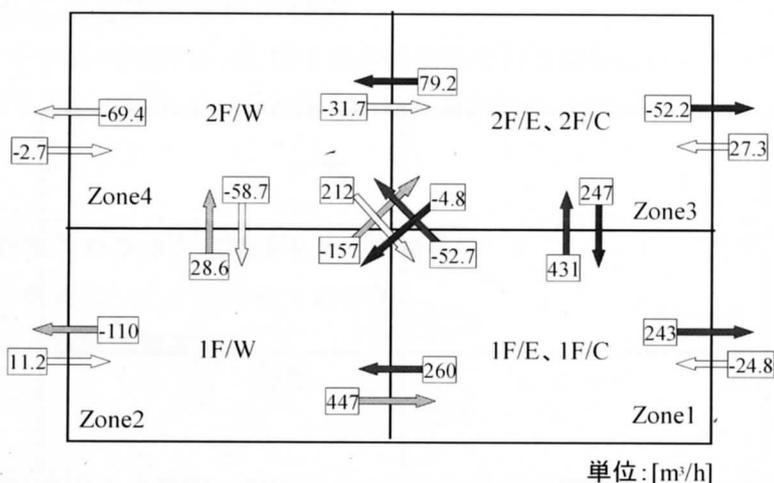


図 3-2-17 PFT 法によるゾーン間の空気交換量

(d) 実験結果の比較

図 3-2-18 に小型ファンを使用して制御した室間の空気交換量と一定濃度法による外気導入量の実験結果を、図 3-2-19 に 4 種類のトレーサーガスを使用した PFT 法から室間の空気交換量を求めた結果を示す。小型ファンの風量を測定した結果と PFT 法によって測定した室間の換気量の結果は一致しているとは言えない結果であった。一定濃度法による外気導入量による結果と PFT 法による外気導入量の結果についても PFT 法による外気導入量が一定濃度法よりもかなり大きな値となった。

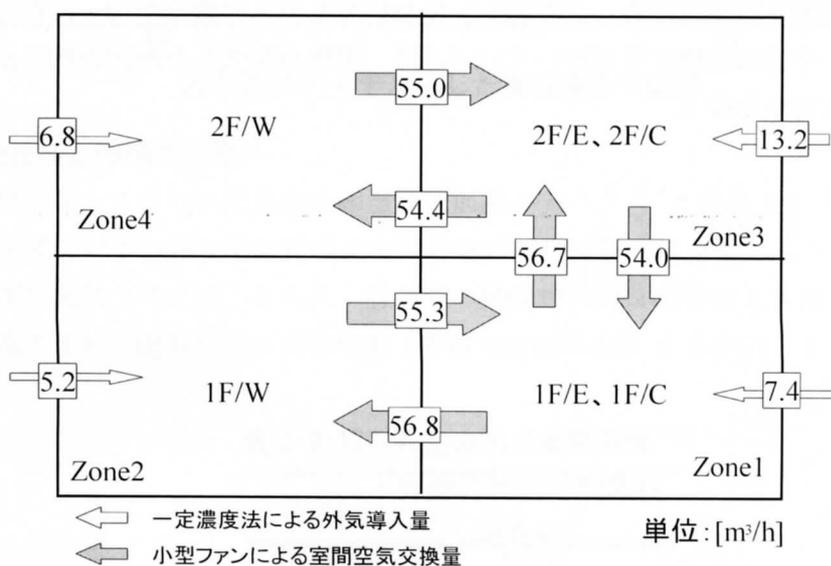


図 3-2-18 小型ファンによる室間の空気交換量と一定濃度法による外気導入量

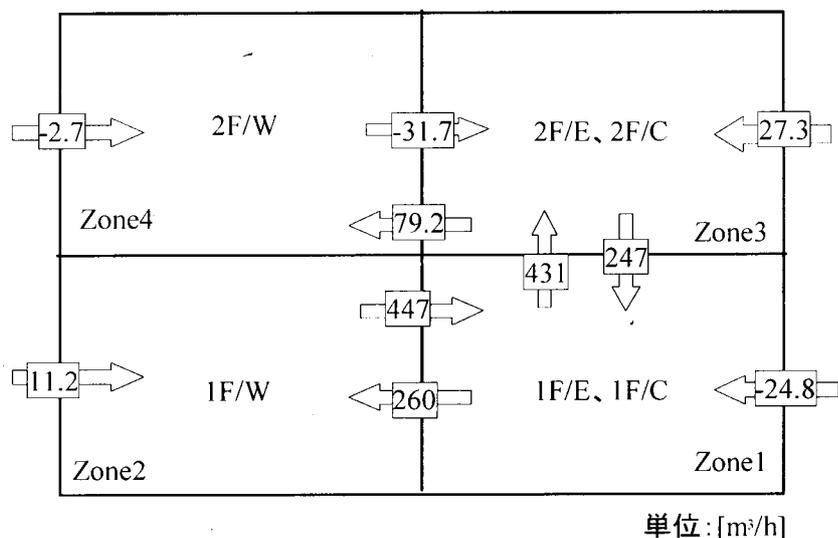


図 3-2-19 PFT 法によるゾーン間の空気交換量

(4) まとめ

小型ファンを用いて室間の換気量を制御した状態を作り、PFT 法の室間換気量を測定する実験を行った。小型ファンの風量を測定した結果と PFT 法によって測定した室間の換気量の結果は一致していなかった。一定濃度法による外気導入量による結果と PFT 法による外気導入量の結果も PFT 法による外気導入量が一定濃度法よりもかなり大きな値となった。この原因としては、実験条件が自然換気であり外気導入量が少なくトレーサーガスが屋外に抜けなかったこと、室容積に比べて室間換気量が大きかったため、どのゾーンにおいてもガスの濃度が均一になってしまったことが考えられる。 今後は数値計算を行い (3.2.4 節)、実験が失敗した原因を明らかにし、実験計画を立て直し、再実験を行う。

3.2.4 数値計算による実験条件の検討

4種類のトレーサーガスを使用したPFT法の再実験を行うにあたって、今後どのような測定ケースで再実験を行うことが望ましいか換気実験棟を対象にCOMIS（多数室換気計算プログラム）³⁻⁴⁾を使用して検討を行った。

(1) 多数室換気計算プログラムCOMISモデルの概要

COMISモデルの概要については付録-1に示す。

(2) 数値計算による実験結果の再現

(a) 計算概要

1) 平面構成

図3-2-20にモデル化した実験棟の平面図を示す。本計算は換気実験棟を対象に計算を行った。実験では東部屋と廊下の中の扉を開放して1ゾーンと見なしていたため、計算において東部屋と廊下は1ゾーンとして扱った。各部屋の天井高は2.5mとした。

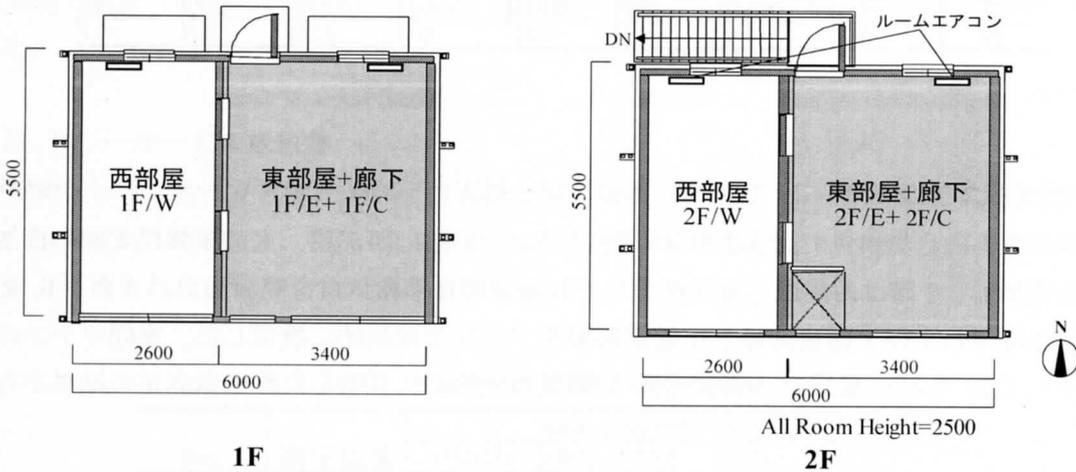


図3-2-20 モデル化した実験棟の平面図

2) 気密性能と隙間の設定

まず、実験によって得られた各室の相当隙間面積のデータ³⁻²⁾を使用する（表3-2-13）。各室毎に、全外壁面積に対する各外壁面積の比率に各室の相当隙間面積を乗じて、その外壁に存在する隙間の相当開口面積と考える。さらに、各外壁の隙間相当開口面積を2等分して、一方が床付近（各室天井高の1/4）、他方が室の天井付近（各室天井高の3/4）に点開口として存在するものとする。

表3-2-13 各室の相当隙間面積³⁻²⁾

Zone	外壁の相当隙間面積 $\alpha A, \text{cm}^2$
1E+1C	131.9
1W	31.6
2E+2C	34.4
2W	11.1

3) 風圧係数

数値計算に用いた風圧係数を表 3-2-14 に示す。風圧係数については、AIVC (Air Infiltration and Ventilation Center) で整備されたデータ³⁻³⁾より、周辺に対象建物の高さの 1/2 に相当する高さの建物が存在する場合の風圧係数を使用した。風圧係数は、気象データの風向に合わせて、建物の各面に対して 16 方位で示す。

表 3-2-14 風圧係数³⁻³⁾

壁方位	風向[°]							
	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5
北	0.4	0.25	0.1	-0.1	-0.3	-0.325	-0.35	-0.275
南	-0.2	-0.275	-0.35	-0.325	-0.3	-0.1	0.1	0.25
東	-0.3	-0.1	0.1	0.25	0.4	0.25	0.1	-0.1
西	-0.3	-0.325	-0.35	-0.075	0.2	-0.075	-0.35	-0.325

壁方位	風向[°]							
	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
北	-0.2	-0.275	-0.35	-0.325	-0.3	-0.1	0.1	0.25
南	0.4	0.25	0.1	-0.1	-0.3	-0.325	-0.35	-0.275
東	-0.3	-0.325	-0.35	-0.275	-0.2	-0.275	-0.35	-0.325
西	-0.3	-0.1	0.1	0.25	0.4	0.25	0.1	-0.1

4) 換気システム

換気システムは自然換気で図 3-2-21 に示すように、1 階は西部屋、東部屋共に北側の自然給気口 2 個を開放し、2 階は西部屋、東部屋それぞれ南北の自然給気口を開放した。また、1、2 階の西部屋と東部屋および 1 階東部屋と 2 階東部屋をファンで強制的に換気した。室間ファンの設定風量はすべて 55.2[m³/h]とした。室間ファンの風量は実験により得られた風量測定の結果から与えた。

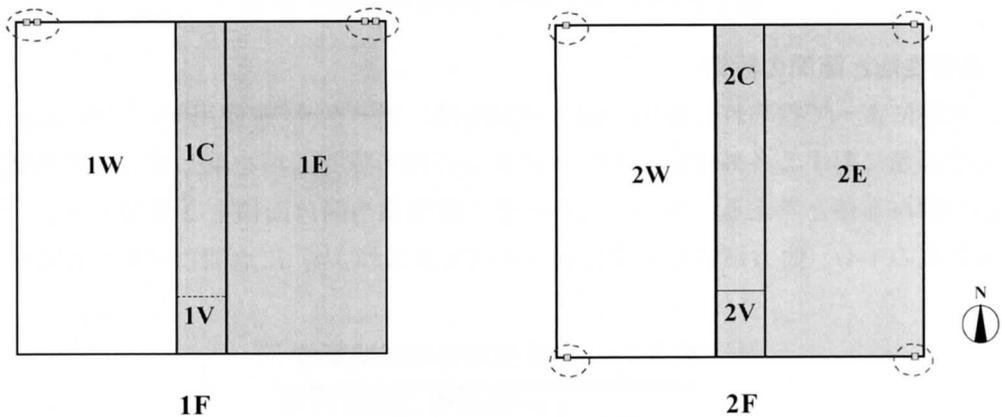


図 3-2-21 モデル化した換気システム

5) 室内温度

室内温度は実験期間の平均温度を入力した（表 3-2-15）。ちなみに実験期間はルームエアコンの設定温度を 16℃にして、部屋毎で温度の変動はほとんど見られなかった。

表 3-2-15 入力した室内温度

	室名	温度 [°C]
1F	W	18.5
	E+C	18.7
2F	W	18.3
	E+C	18.8

6) 気象条件

気象データとして、外気温・風速・絶対湿度は実験で得られたデータを使用した。風向については実験でデータが得られなかったため、代わりに実験棟の実験時期の典型的な風向データを使用した。

7) トレーサーガス放散量

4 種類のトレーサーガスは、それぞれ実験と同じ場所（PMCH：1 階東ゾーン、HFE：1 階西ゾーン、HFB：2 階東ゾーン、OFT：2 階西ゾーン）より発生させた。トレーサーガスの放散量は実験結果より得られた値を与えた（表 3-2-16）。

表 3-2-16 トレーサーガスの発生位置と放散量

No.	測定位置	emission rate (mg/hr)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	16.11			
2	1F/W		12.92		
3	2F/E+C			9.49	
4	2F/W				6.21

(c) 実験結果と計算結果の比較

表 3-2-18 に実験で得られた室内濃度の結果を、表 3-2-19 に COMIS の計算で得られた室内平均濃度の結果を示す。実験と計算結果を比較すると実験の PMCH の濃度が低い。これは、吸着競合が原因と考えられる。つまり、物質拡散の原理を考えると空気中の濃度差とサンプラー内のガスの濃度差でトレーサーガスが吸着するのだが、OFT のような重いガスが吸着するとそのガスがサンプラーの表面に張り付いて軽いガス (PMCH) をはじいくため、吸着しにくくなるということが考えられる。サンプラーに吸着したガスの濃度が高いと、競合吸着が起こりやすくなるため、ガス放散量を小さくする必要がありと考えられる。また、HFE や HFB の濃度を比較すると計算結果に比べて実験結果ではゾーン毎の濃度差が低いことが分かる。これは室間の空気交換量の値が大きすぎたこと、自然換気のためガスがうまく室外へ放出されなかったことなどが考えられる。

以上のことより、今回の実験を踏まえた改善点として、①サンプラーの容量限界を考えて、放散量を少なくすること、②自然換気ではなく、換気性状が安定した第一種機械換気システムの条件で実験を行うこと、③室間ファンの風量を小さくして実験を行うことが考えられる。

表 3-2-18 実験結果

Zone	測定位置	サンプラー捕集濃度 (mg/m ³)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	0.68	0.73	0.56	0.45
2	1F/W	0.66	0.78	0.53	0.41
3	2F/E+C	0.63	0.64	0.56	0.42
4	2F/W	0.63	0.65	0.57	0.53

表 3-2-19 COMIS の計算結果

Zone	測定位置	室内濃度平均値 (mg/m ³)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	1.10	0.84	0.59	0.37
2	1F/W	1.05	1.02	0.56	0.35
3	2F/E+C	1.00	0.76	0.69	0.43
4	2F/W	0.96	0.73	0.66	0.52

(3) 数値計算による再実験の検討

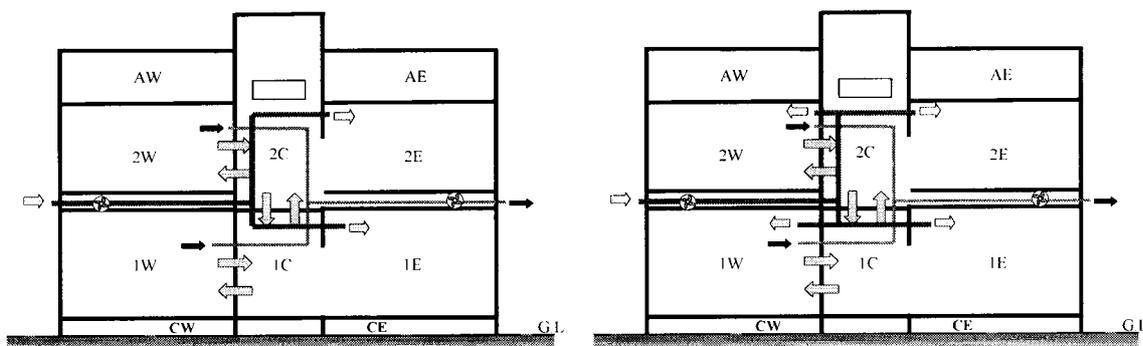
以上の改善点をもとに COMIS を用いて、それぞれのゾーンにおけるトレーサーガスの室内濃度を算出し、再実験に適切な実験条件の選定を行う。まず、実験に最適な換気システムについての検討を行い、次にガスの放散量についての検討を行う。

(a) 換気システムの検討

表 3-2-20、図 3-2-24 に再実験を検討するための計算ケースを示す。Case1 は上記 3.2.4(2)節で計算した実験と同条件の計算ケースである。Case2、3 は Case1 の基本ケースより換気方式や室間ファンの風量を変更したケース設定になっている。Case2・3 は換気経路が安定していることと、外部の気象条件によって換気量が変わ動しないことを考慮して第1種換気とした。排気場所は1・2階の西部屋と同じであるが、Case2 では給気場所を1・2階の東部屋、Case3 では給気場所を全室において行った (PFT 法のドーザーの設置位置が把握しやすい)。また、室間ファンの風量も既存の風量の半分程度としていた。

表 3-2-20 再実験検討計算ケース

Case	換気方式	給気	排気	室間ファン 風量[m ³ /h]	機械排気 風量[m ³ /h]	備考
1	自然換気	1・2階の部屋の自然換気口を開放		55.2	-	実験条件を再現
2	第1種	1・2階東部屋より 機械給気	1・2階西部屋より 機械排気	20.9	25.1	換気量を一定にするため、機械換気にした
3	第1種	1・2階全部屋より 機械給気	1・2階西部屋より 機械排気	20.9	25.1	Case2に加えて、全室給気とした



(a) Case2 (東で機械給気、西で機械排気)

(b) Case3、4、5
(全室で機械給気、西で機械排気)

図 3-2-24 再実験検討計算ケース

1) Case2 (東部屋で機械給気、西部屋で機械排気) 計算結果

図 3-2-25 に換気量計算の結果を、表 3-2-21 にトレーサーガスの放散量と室内濃度平均値の結果を示す。PFT 法では換気経路が把握できる空間で測定を行うことが望ましいため、第 1 種換気システムとした。Case1 と各ゾーンのガス濃度を比較すると、ガス濃度は Case1 の 1/3 程度であり、各ゾーンの濃度差も大きい結果となった。

表 3-2-21 各ゾーンのトレーサーガス濃度計算結果 (Case2)

Zone	測定位置	室内濃度平均値 (mg/m ³)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	0.36	0.14	0.08	0.03
2	1F/W	0.18	0.38	0.04	0.01
3	2F/E+C	0.14	0.06	0.21	0.07
4	2F/W	0.07	0.03	0.11	0.18

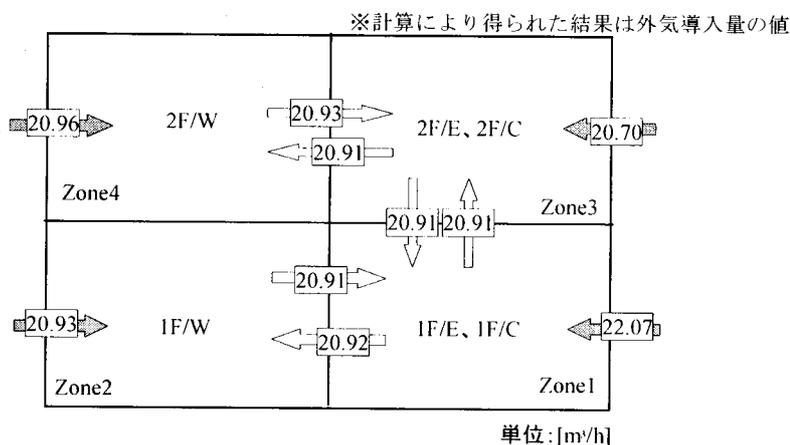


図 3-2-25 換気量計算結果 (Case2)

2) Case3 (全室で機械給気、西部屋で機械排気) 計算結果

図 3-2-26 に換気量計算の結果を、表 3-2-22 にトレーサーガスの放散量と室内濃度平均値の結果を示す。Case2 では東部屋のみに機械給気をしていたが、PFT 法のドーザーの設置位置が把握しやすいという理由から Case3 では全室で機械給気を行った。Case2 と同様、ガス濃度は Case1 の 1/3 であり、各ゾーンの濃度差も大きい。PFT 法のドーザーの設置位置が把握しやすいという観点から今回は Case3 の換気システムが適当であると考えた。

表 3-2-22 各ゾーンのトレーサーガス濃度計算結果 (Case3)

No.	測定位置	室内濃度平均値 (mg/m ³)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	0.48	0.19	0.14	0.05
2	1F/W	0.24	0.40	0.07	0.02
3	2F/E+C	0.24	0.09	0.29	0.10
4	2F/W	0.12	0.05	0.15	0.19

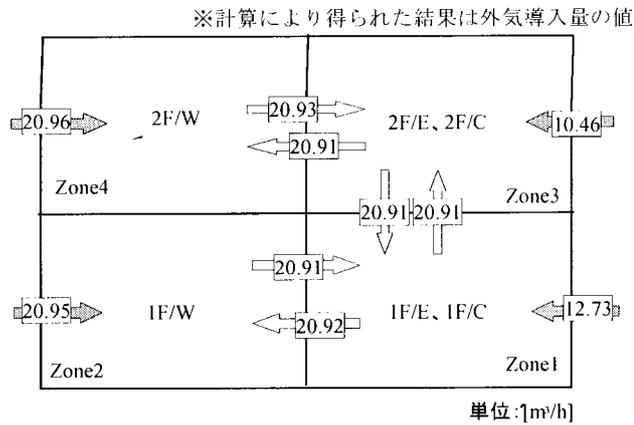


図 3-2-26 換気量計算結果 (Case3)

(b) ガス放散量の検討

上記で採用された Case3 の換気システムにおいて、ガス放散量についての検討を行う。Case3-a はトレーサーガスの放散量を前回の実験値を使用し、Case3-b はガス放散量を Case3-a の 1/2、Case3-c は放散量を Case3-a の 1/4 とした。表 3-2-23 に設定したトレーサーガス放散量と各室のトレーサーガス濃度の計算結果を示す。Case3-a は PMCH、HFE の濃度が少し高い。逆に Case3-c は全体的に濃度が低すぎ、サンプラーの定量限界以下 (0.02[μg]以下) になる可能性がある。よって Case3-b の既存の 1/2 の放散量が適当であると考える。

表 3-2-23 ガス放散量と各室のトレーサーガス濃度計算結果

(a) Case3-a (ガス放散量：前回の実験値を使用)

測定位置	emission rate (mg/hr)				室内濃度平均値 (mg/m³)				室容積 (m³)
	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	
1F/E+C	16.11				0.48	0.19	0.14	0.05	47.00
1F/W		12.92			0.24	0.40	0.07	0.02	32.18
2F/E+C			9.49		0.24	0.09	0.29	0.10	51.00
2F/W				6.21	0.12	0.05	0.15	0.19	34.32

(b) Case3-b (ガス放散量：前回の実験値の 1/2)

測定位置	emission rate (mg/hr)				室内濃度平均値 (mg/m³)				室容積 (m³)
	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	
1F/E+C	8.06				0.24	0.10	0.07	0.02	47.00
1F/W		6.46			0.12	0.20	0.03	0.01	32.18
2F/E+C			4.75		0.12	0.05	0.15	0.05	51.00
2F/W				3.11	0.06	0.02	0.07	0.10	34.32

(c) Case3-c (ガス放散量：前回の実験値の 1/4)

測定位置	emission rate (mg/hr)				室内濃度平均値 (mg/m³)				室容積 (m³)
	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	
1F/E+C	4.03				0.12	0.05	0.03	0.01	47.00
1F/W		3.23			0.06	0.10	0.02	0.01	32.18
2F/E+C			2.37		0.06	0.02	0.07	0.02	51.00
2F/W				1.55	0.03	0.01	0.04	0.05	34.32

(c) まとめ

PFT法の再実験計画について数値計算を行い、最適な換気システムとガス放散量について検討した。換気システムの検討について、Case2、3では比較的外部の気象条件を受けにくく、換気性状が安定した第1種換気システムについて検討を行った。前回の実験比べて、両Case共に換気量は安定し、各ゾーンの濃度が低いことやゾーン間での濃度差がはっきりと見られた。PFT法のドーザーの設置位置が把握しやすいという観点から今回はCase3の換気システムが適当であると考えた。ガス放散量の検討については既存のガス放散量では若干濃度が高いこと、既存の1/4の放散量では濃度が低すぎ、サンプラーの定量限界以下(0.02[μg]以下)になる可能性があることから、今回は既存の1/2の放散量が適当ではないかと考えた。

3.2.4 4種類のトレーサーガスを用いたPFT法再実験

(1) 実験の目的

3.2.3節の実験と同様、換気実験棟を用いて室間相互の換気量を制御した状態を作り、PFT法で測定した室間の換気量とファンで制御した換気量を比較し、その精度を確かめる。

(2) 実験概要

(a) 前回の実験を踏まえた改善点

- ・ サンプラーの容量限界を考慮して、使用するドーザーを1ゾーンに対して2本から1本へ減らし、放散量を少なくする(3.2.3節(3)-(b)で検討)。
- ・ 自然換気ではなく、換気性状が安定した第1種機械換気システム(全室給気、西部屋排気)の条件で実験を行う(3.2.3節(3)-(a)で検討)。
- ・ 室間ファンの風量が室容積に対して大きすぎるため、スライダックを使用して室間ファンの風量を抑える(3.2.3節(3)-(a)で検討)。
- ・ ドーザーを設置して1日置いてからサンプラーを設置する(室内のガス濃度・ドーザーの放散量が安定するため)。また、サンプラーは1箇所につき2本ずつ設置する。
- ・ アクティブサンプリングを行う。

(b) 実験対象

前回の実験と同様、東北大学構内に設けられた換気実験棟³⁻²⁾である(3.2.2節(2)-(a)参照)。気密性能は3.30[cm^2/m^2]である(2005年8月現在)。

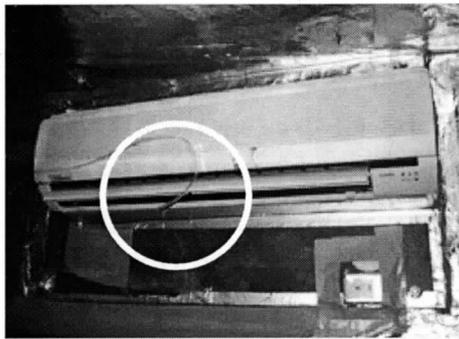
(c) 実験期間

測定期間は2005年9月24日から9月30日の1週間である。

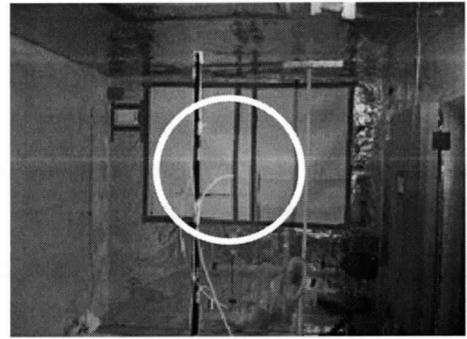
(d) 実験方法

測定項目は、温湿度、換気量、アクティブサンプリング、屋外風向風速である。温湿度、換気量、屋外風向風速の概要については前回の実験と同様である（3.2.2 節(2)–(c)参照）。一定濃度法について、今回はトレーサーガスにはCO₂を用い、設定濃度は1000ppmとした。それぞれの測定の様子を写真3-2-7～3-2-8に示す。また、一定濃度法とPFT法による測定位置を図3-2-27、3-2-28に示す。

アクティブサンプリングは、積算流量計とポンプを使用して行った。ポンプの先にPFTサンプラーを取り付け、高さ1.7m（パッシブサンプラーと同じ高さ）に設置し、流量を100[ml/min]として行った。通気量はサンプラーの吸着限界である1[μg]とCOMISで計算したそれぞれの室内濃度[μg/l]の結果から算出した^{注4)}。



(a) ドージングの様子



(b) サンプリングの様子

写真 3-2-6 一定濃度法測定の様子

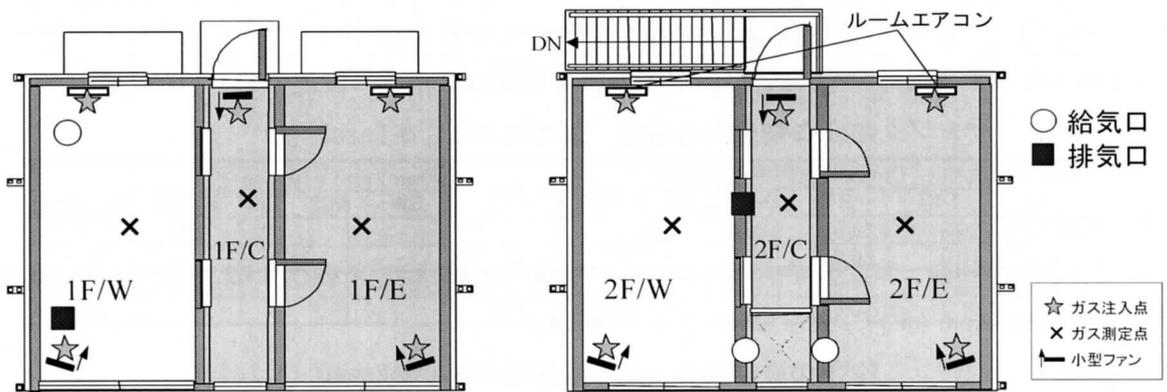
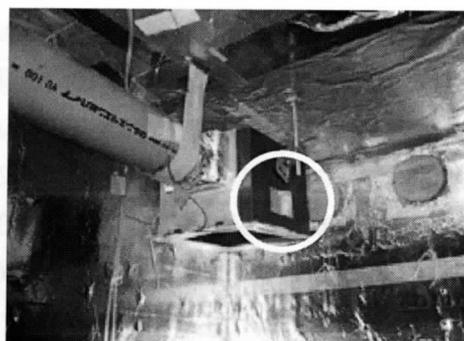
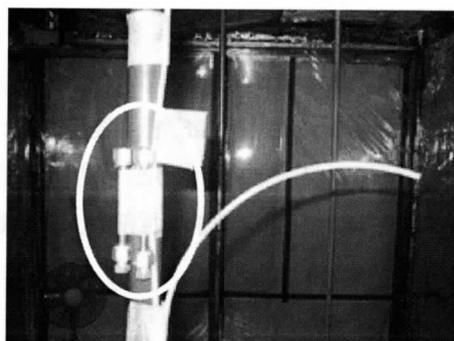


図 3-2-27 一定濃度法の測定位置



(a) ドーザーの様子



(b) サンプラーの様子

写真 3-2-7 PFT 法測定の様子

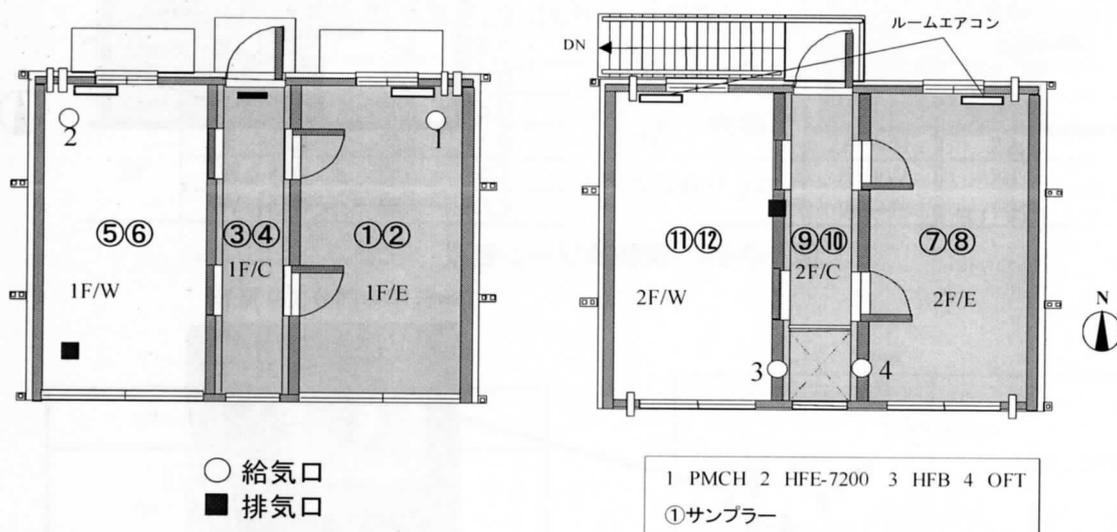
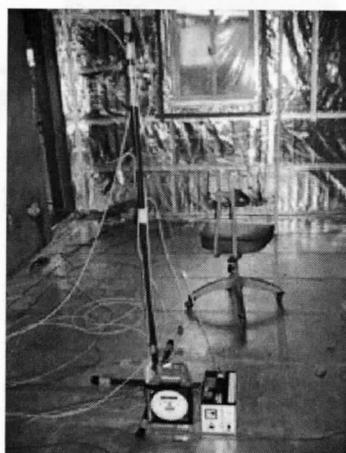


図 3-2-28 PFT 法の測定器設置位置



(a) 測定の様子



(b) 積算流量計 (左) とポンプ (右)

写真 3-2-8 アクティブサンプリングの様子

(e) 実験条件

基本的な実験の条件は前回の実験と同様である (3.2.2 節(2)-(d)参照)。図 3-2-29 に実験棟のゾーン割りを、図 3-2-30 に吹き抜けの様子を示す。前回の実験より変更した点は、小型ファンはそのまま使用すると風量が $55[m^3/h]$ 程度とかなり大きいため、スライダックで電圧を調節し、風量を $20[m^3/h]$ 程度に抑えて使用することと、換気方式は第1種換気システムで、1・2階のすべての部屋に機械給気をし、1・2階の西部屋より機械排気を行うことである (図 3-2-31)。

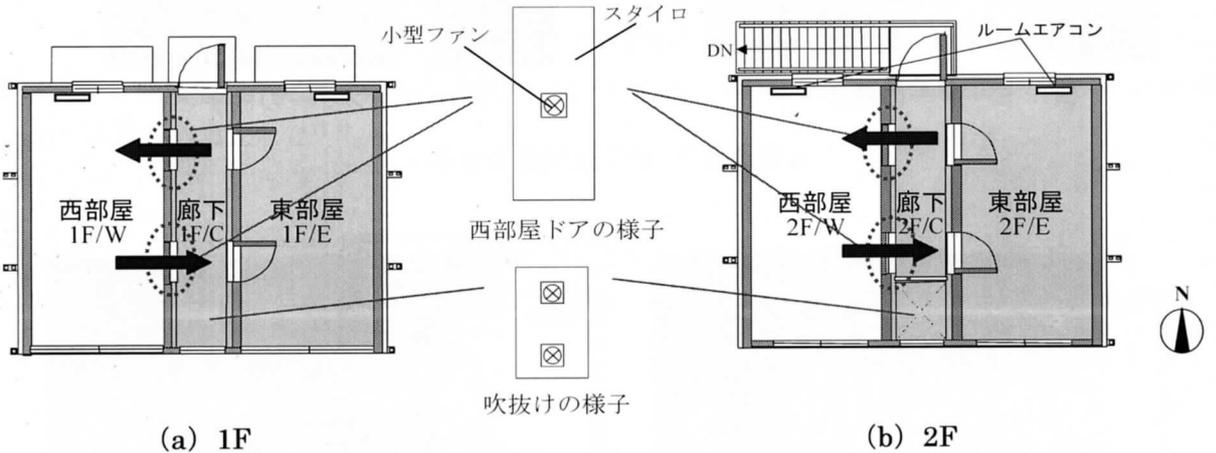


図 3-2-29 実験棟ゾーン割り

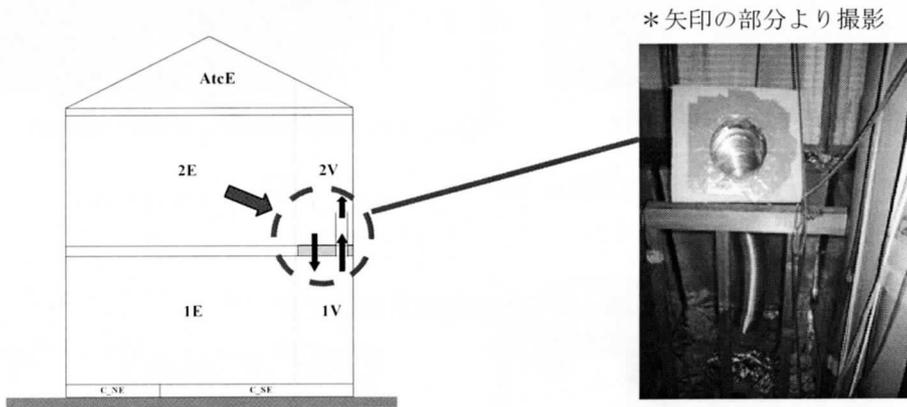


図 3-2-30 小型ファンを使用した1・2階間の換気の様子

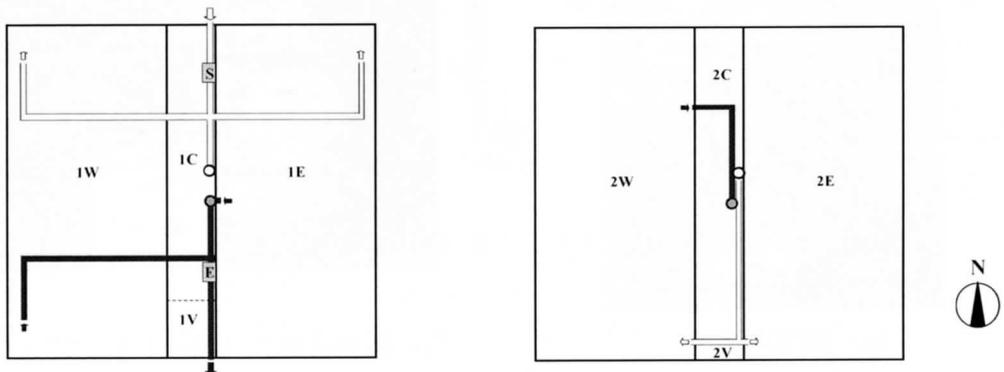


図 3-2-31 換気システムの概要

(3) 実験結果

(a) 風量測定結果

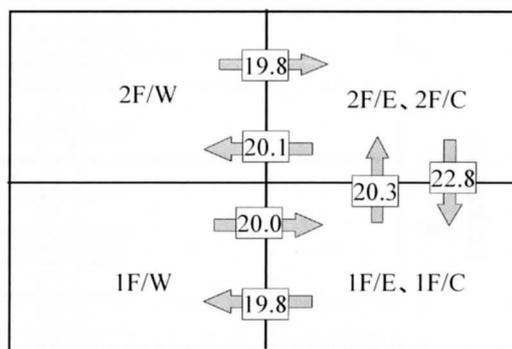
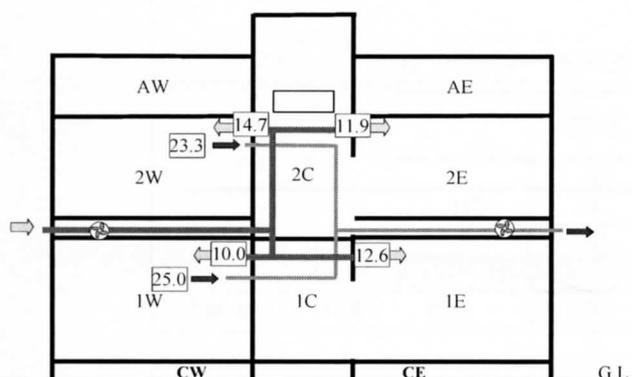
機械換気システムの風量測定の結果を表 3-2-24 と図 3-2-32 に、小型ファンの風量測定結果を表 3-2-25、図 3-2-33 に示す。測定はそれぞれ実験前と実験後 3 回ずつ行い、結果はその平均値を示している。機械換気システムはスライダックで電圧を調節し、各室への給気量は 10[m³/h]程度に、西部屋からの排気量は 20[m³/h]程度とした。小型ファンについてもスライダックで電圧を調節し、風量を 20[m³/h]程度に抑えて使用した。

表 3-2-24 機械換気システムの風量測定結果

室名		給排気	風量[m ³ /h]
1F	E	給気	12.6
	W	給気	10.0
	W	排気	25.0
2F	E	給気	11.9
	W	給気	14.7
	W	排気	23.3

表 3-2-25 小型ファンの風量測定結果

室名		風量[m ³ /h]
1F	E→W	19.8
	W→E	20.0
吹抜け	1F→2F	20.3
	2F→1F	22.8
2F	E→W	20.1
	W→E	19.8



← 小型ファンによる室間空気交換量

図 3-2-32 機械換気システムの風量

図 3-2-33 小型ファンによる室間の空気交換量

(b) 一定濃度法の測定結果

一定濃度法による換気回数の測定結果と併せて、平均風速、室内外温度、CO₂濃度を図 3-2-34 に示す。CO₂濃度変動を見ると、測定期間内は設定濃度である 1000[ppm]付近で安定して計測されていた。温度の変動を見ると、室内温度は 17℃付近で安定していた。室内外温度差は最大 7℃程度で、明け方に温度差が大きいことが分かる。換気回数の経時変化を見ると第 1 種換気システムであるため、外部風速の影響は受けず安定していた。1、2 階の東部屋が 0.25[回/h]、西部屋が 0.1[回/h]程度で安定していた。

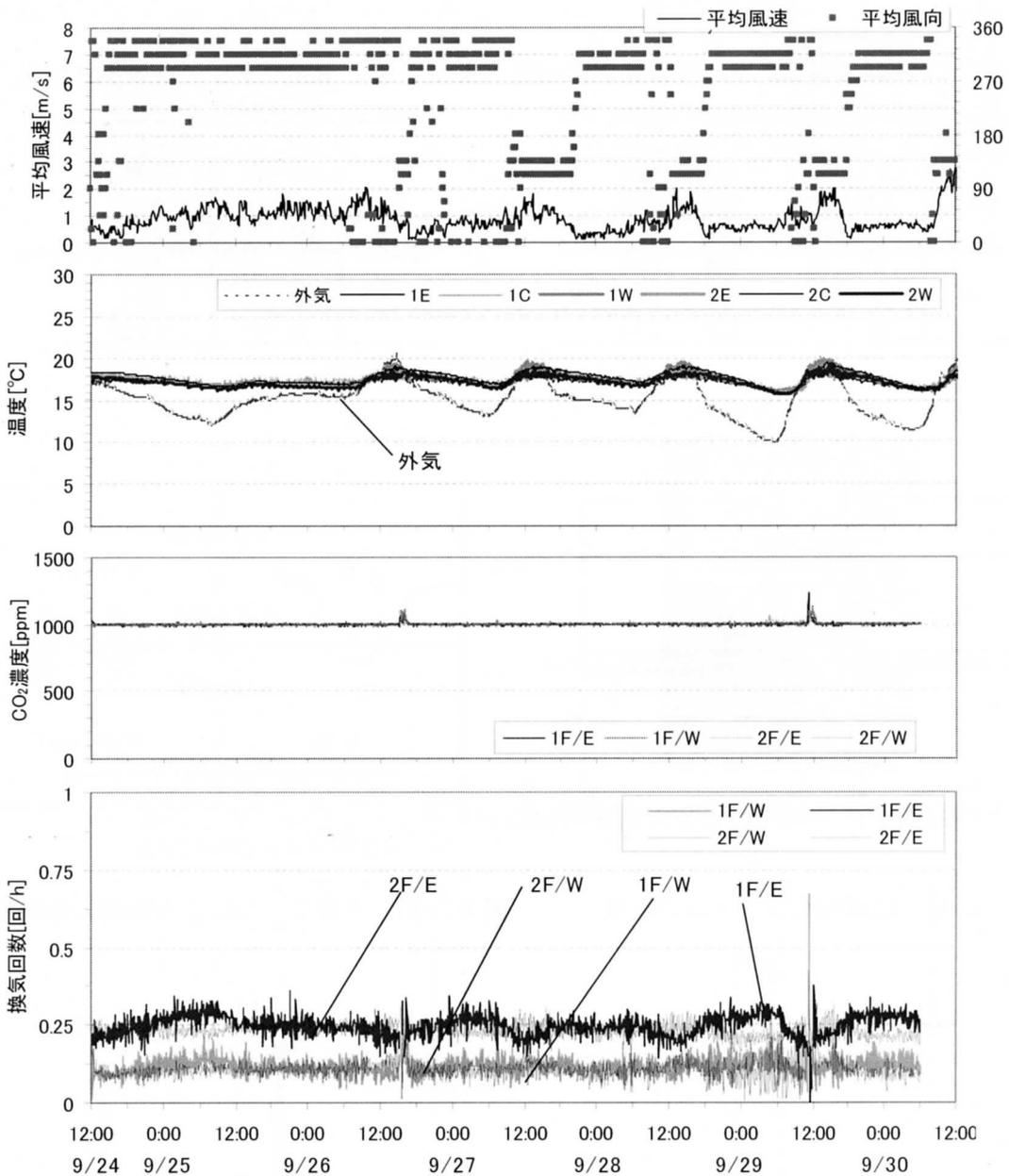


図 3-2-34 外部風向・風速・温度・CO₂濃度・換気回数の経時変化

PFT法と同じ測定期間内(9/24 12:00 ~ 9/30 12:00)の換気回数・外気導入量の平均値を表3-2-26に、室内外温度差を表3-2-27に示す。外気導入量の平均値を見ると、1階、2階共に東部屋の方が西部屋より外気導入量が多い。換気実験棟は西側より東側の気密性能の方が低い³⁻²⁾ため、東ゾーンで外気導入量が多くなったと考えられる。1階、2階共東部屋は換気回数0.23[回/h]、西部屋は0.11[回/h]であった。室内温度の平均値を見ると、西部屋と東部屋をそれぞれルームエアコンで16°Cに設定したため、ほとどの部屋でも17°C付近となっていた。

表3-2-26 換気回数・外気導入量の平均値

測定期間はPFTと同時刻(9/24 12:00 ~ 9/30 12:00)

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]
1F	東ゾーン	47.63	0.11	5.43
	西ゾーン	32.89	0.23	7.66
1F合計・平均		80.52	0.16	13.10
2F	東ゾーン	52.47	0.11	5.56
	西ゾーン	35.75	0.23	8.31
2F合計・平均		88.22	0.16	13.87
合計・平均		168.74	0.16	26.96

※東ゾーンは東部屋+廊下とする

表3-2-27 室内外温度の平均値

	室名	平均温度 [°C]
1F	W	17.5
	E	17.2
	C	17.5
1F平均		17.4
2F	W	17.2
	E	17.3
	C	17.6
2F平均		17.4
外気		15.2

(c) PFT法の測定結果

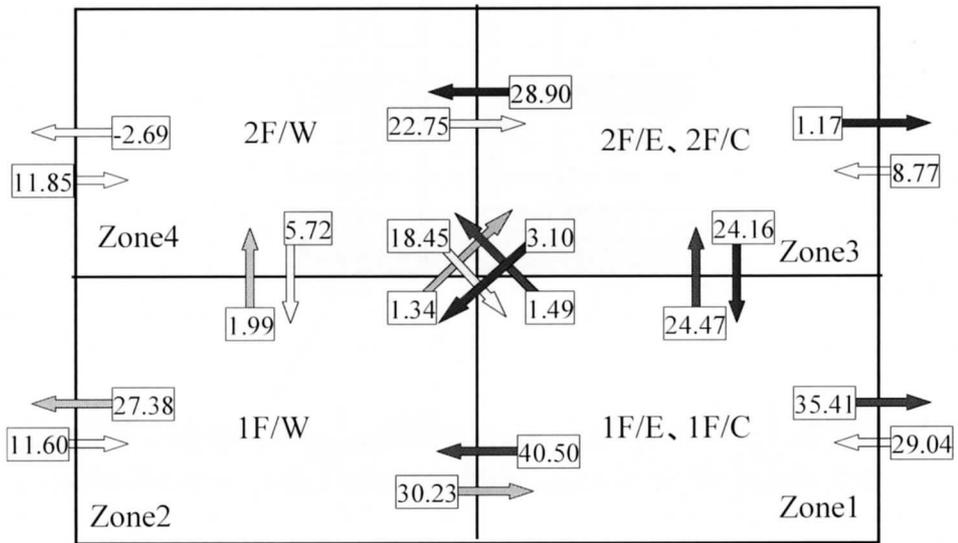
表 3-2-28、3-2-29 に PFT 法の測定結果を、図 3-2-35 にゾーン間の空気交換量を示す。外気導入量・換気回数を見るとどの空間でも一定濃度法で測定した結果より大きい。図 3-2-35 より PFT 法によるゾーン間の空気交換量と小型ファンによる空気交換量（風量測定の結果）を比べると 1 階の空気交換量が大きい値となったが、それ以外は比較的良好な対応を示した。

表 3-2-28 PFT 法による放散量と各測定点の室内濃度

	Emission Rate [mg/h]				室内濃度(mg/m ³)				室容積[m ³]
	PMCH	HFE	HFB	OFT	PMCH	HFE	HFB	OFT	
1F/E&C	8.54				0.155	0.076	0.078	0.045	47.63
1FW		7.66			0.115	0.184	0.070	0.043	32.89
2F/E&C			4.55		0.098	0.055	0.157	0.061	52.47
2FW				2.58	0.075	0.047	0.108	0.101	35.75

表 3-2-29 PFT 法による外気導入量と換気回数

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]
1F	E	47.63	0.61	29.04
	W	32.89	0.35	11.60
1F合計・平均		80.52	0.50	40.64
2F	E	52.47	0.17	8.77
	W	35.75	0.33	11.85
2F合計・平均		88.22	0.23	20.62
合計・平均		168.74	0.36	61.26



単位: [m³/h]

図 3-2-35 PFT 法によるゾーン間の空気交換量

(d) アクティブサンプリングの測定結果

アクティブサンプリングは9月26日と29日の2回行った。1回目の測定結果を表3-2-30、3-2-31に、図3-2-36にゾーン間の空気交換量を、2回目の測定結果を表3-5-32、3-5-33に、図3-2-37にゾーン間の空気交換量を示す。1回目の測定では、積算流量計の値の読み間違いをしたため、流量を引きすぎて測定に不適切な部分があった。表3-2-30の室内濃度の測定結果を見ても、それぞれのガスを放出している部屋でそのガスの濃度が高くなるはずであるが、そのようにはなっていない。外気導入量の結果も室間の空気交換量の結果も制御した値との対応は見られなかった。

表 3-2-30 アクティブサンプリングによる放散量と各測定点の室内濃度 (1回目)

	Emission Rate [mg/h]				室内濃度 (mg/m ³)				室容積 [m ³]
	PMCH	HFE	HFB	OFT	PMCH	HFE	HFB	OFT	
1F/E&C	8.54				0.148	0.302	0.101	0.094	47.63
1FW		7.66			0.113	0.101	0.058	0.074	32.89
2F/E&C			4.55		0.096	0.056	0.096	0.064	52.47
2FW				2.58	0.074	0.040	0.109	0.080	35.75

表 3-2-31 アクティブサンプリングによる外気導入量と換気回数 (1回目)

室名		室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]
1F	E	47.63	1.14	54.15
	W	32.89	0.00	0.00
1F合計・平均		80.52	0.67	54.15
2F	E	52.47	0.15	8.02
	W	35.75	3.19	114.02
2F合計・平均		88.22	1.38	122.04
合計・平均		168.74	1.04	176.19

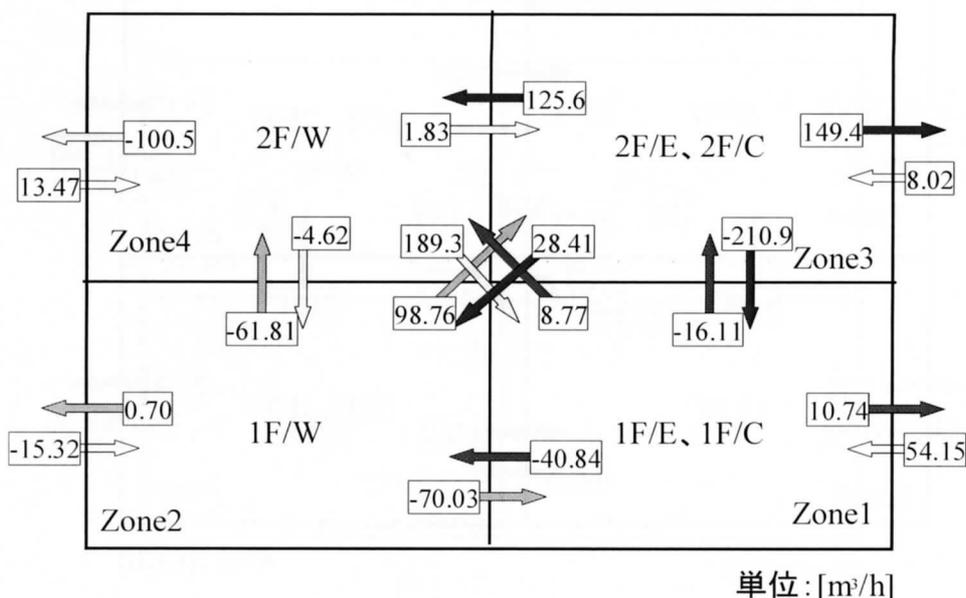


図 3-2-36 アクティブサンプリングによるゾーン間の空気交換量 (1回目)

2回目の測定は1回目のような失敗はなかったが、1度目と同様、それぞれのガスを放出している部屋でそのガスの濃度が高くなるはずであるが、そのようにはなっていなかった。この原因として、アクティブサンプリング測定時には人の出入りがあり、換気性状が乱れることと、測定時間が20~35分と短かったことが考えられる。

表 3-2-32 アクティブサンプリングによる放散量と各測定点の室内濃度 (2回目)

	Emission Rate [mg/h]				室内濃度 (mg/m ³)				室容積[m ³]
	PMCH	HFE	HFB	OFT	PMCH	HFE	HFB	OFT	
1F/E&C	8.54				0.148	0.088	0.130	0.083	47.63
1FW		7.66			0.132	0.120	0.120	0.072	32.89
2F/E&C			4.55		0.128	0.068	0.264	0.104	52.47
2FW				2.58	0.066	0.040	0.124	0.090	35.75

表 3-2-33 アクティブサンプリングによる外気導入量と換気回数 (2回目)

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]
1F	E	47.63	0.00	0.00
	W	32.89	0.80	26.48
1F合計・平均		80.52	0.33	26.48
2F	E	52.47	0.10	5.12
	W	35.75	1.92	68.50
2F合計・平均		88.22	0.83	73.63
合計・平均		168.74	0.59	100.10

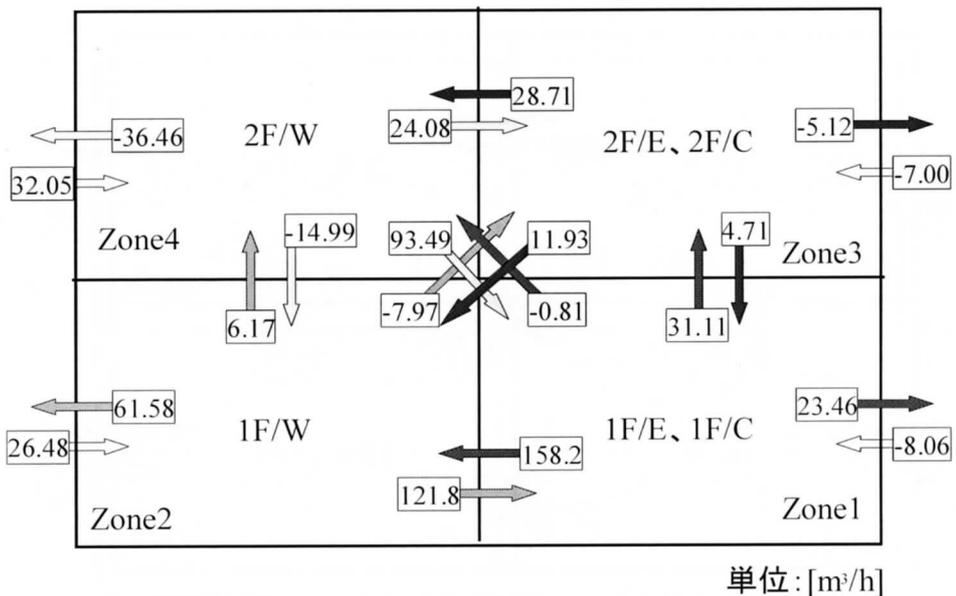


図 3-2-37 アクティブサンプリングによるゾーン間の空気交換量 (2回目)

(e) 実験結果の比較

図 3-2-38 に小型ファンを使用して制御した室間の空気交換量と一定濃度法による外気導入量の実験結果を、図 3-2-39 種類のトレーサーガスを使用した PFT 法から室間の空気交換量を求めた結果を示す。PFT 法によるゾーン間の空気交換量と小型ファンによる空気交換量（風量測定の結果）を比べると PFT 法の 1 階の空気交換量が制御した風量に比べて若干大きい値となったが、それ以外は比較的良好な対応を示した。

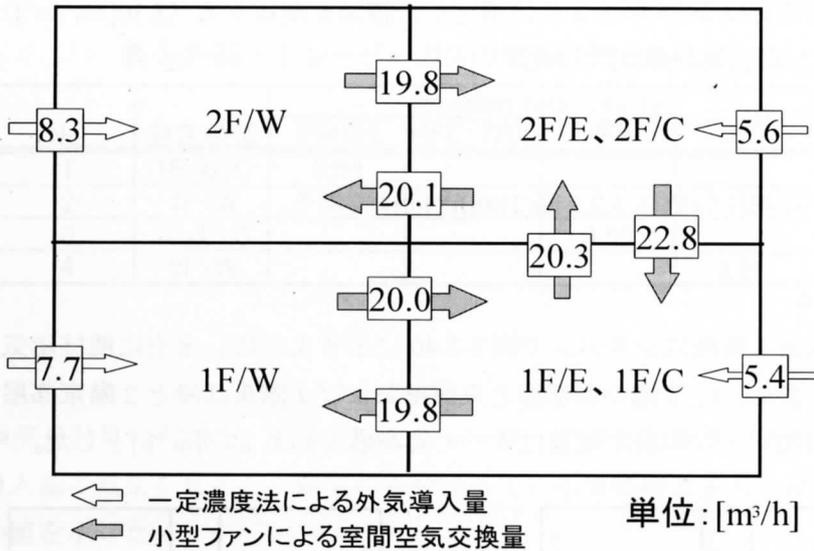


図 3-2-38 小型ファンによる室間の空気交換量と一定濃度法による外気導入量

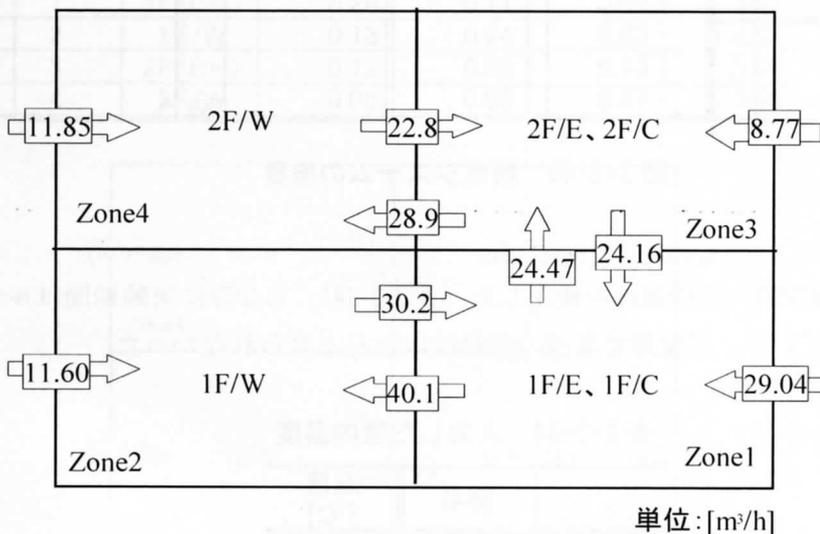


図 3-2-39 PFT 法によるゾーン間の空気交換量

3.2.5 数値計算による実験結果の検討

(1) 数値計算による実験結果の再現

(a) 計算概要

1) 平面構成

モデル化した実験棟は3.2.3節(2)-(a)と同様である。

2) 気密性能と隙間の設定

今回用いた気密性能は2005年度8月に測定した結果を使用する ($3.30[\text{cm}^2/\text{m}^2]$)。隙間の分配比率、与え方は3.2.3節(2)-(a)と同様である。

3) 風圧係数

数値計算に用いた風圧係数は3.2.3節(2)-(a)と同様である。

4) 換気システム

換気システムは第1種換気システムで図3-2-40に示すように、全室に機械給気をし、西部屋のみから排気する。また、1、2階の西部屋と東部屋および1階東部屋と2階東部屋をファンで強制的に換気した。室間ファンの設定風量はすべて実測値と同じ $20.9[\text{m}^3/\text{h}]$ とした。

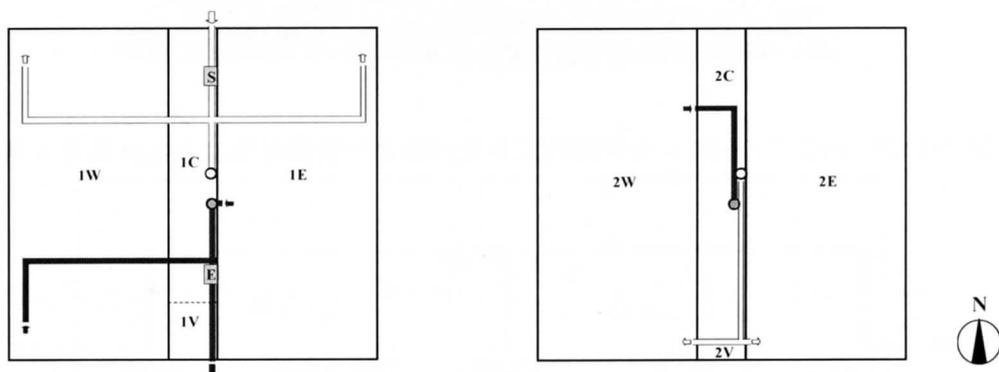


図3-2-40 換気システムの概要

5) 室内温度

室内温度は実験期間の平均温度を使用した (表3-2-34)。ちなみに実験期間はルームエアコンの設定温度を 16°C にして、部屋毎で温度の変動はほとんど見られなかった。

表3-2-34 入力した室内温度

	室名	温度 [$^\circ\text{C}$]
1F	W	17.5
	E+C	17.3
2F	W	17.2
	E+C	17.5

6) 気象条件

気象データとして、外気温・風速・風向・絶対湿度は実験で得られたデータを使用した。

7) トレーサーガス放散量

4種類のトレーサーガスは、それぞれ実験と同じ場所（PMCH：1階東ゾーン、HFE：1階西ゾーン、HFB：2階東ゾーン、OFT：2階西ゾーン）より発生させた。トレーサーガスの放散量は実験結果より得られた値を与えた（表3-2-35）。

表 3-2-35 トレーサーガスの発生位置と放散量

No.	測定位置	emission rate (mg/hr)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	8.54			
2	1F/W		7.66		
3	2F/E+C			4.55	
4	2F/W				2.58

(b) 計算結果

図3-2-41に換気量計算の結果を、表3-2-36にトレーサーガスの放散量と室内濃度平均値の結果を示す。外気導入量の結果を見ると、給気のみを行っている東部屋よりも、給排気を行っている西部屋で大きい値を示した。

表 3-2-36 各ゾーンのトレーサーガス濃度計算結果

No.	測定位置	室内濃度平均値(mg/m ³)			
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT
1	1F/E+C	0.26	0.11	0.07	0.02
2	1F/W	0.13	0.24	0.03	0.01
3	2F/E+C	0.13	0.06	0.14	0.04
4	2F/W	0.06	0.03	0.07	0.08

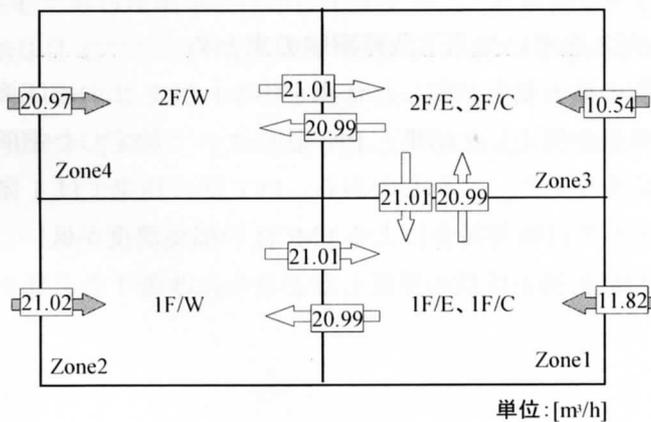


図 3-2-41 換気量計算結果

(c) 実験結果と計算結果の比較

表 3-2-37 に PFT 法による実験の結果を、表 3-2-38 には COMIS によって得られた各室の室内濃度の測定結果を示す。実験結果と計算結果を比較すると、PMCH の実験結果が計算に比べて小さいことがわかる。これは、吸着競合が原因と考えられる。つまり、物質拡散の原理を考えると空気中の濃度差とサンプラー内のガスの濃度差でトレーサーガスが吸着するのだが、OFT のような重いガスが吸着するとそのガスがサンプラーの表面に張り付いて軽いガス (PMCH) をはじくため、吸着しにくくなるということが考えられる。サンプラーに吸着したガスの濃度が高いと、競合吸着が起りやすくなるため、ガス放散量を小さくする必要があると考えられる。その他のガスについては PMCH ほどの大きな差は見られなかった。PMCH の濃度が低かったために 1 階における空気交換量を大きく評価してしまったと考えられる。

その他にも、ガス HFE、HFB、OFT については分析の際の補正係数は理論値を使用しており、実験値を使用していないため、この部分についても改善する必要があると考えられる。

表 3-2-37 PFT 法による放散量と各測定点の室内濃度 (表 3-5-5 の結果と同様)

	Emission Rate [mg/h]				室内濃度 (mg/m ³)				室容積[m ³]
	PMCH	HFE	HFB	OFT	PMCH	HFE	HFB	OFT	
1F/E&C	8.54				0.155	0.076	0.078	0.045	47.63
1FW		7.66			0.115	0.184	0.070	0.043	32.89
2F/E&C			4.55		0.098	0.055	0.157	0.061	52.47
2FW				2.58	0.075	0.047	0.108	0.101	35.75

表 3-2-38 COMIS 計算結果

測定位置	emission rate (mg/hr)				室内濃度平均値 (mg/m ³)				室容積 (m ³)
	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	
1F/E+C	8.54				0.258	0.114	0.068	0.019	47.00
1F/W		7.66			0.128	0.238	0.034	0.009	32.18
2F/E+C			4.55		0.128	0.057	0.140	0.040	51.00
2F/W				2.58	0.064	0.028	0.070	0.081	34.32

(2) 4 種類のトレーサーガスを用いた PFT 法再実験のまとめ

小型ファンを用いて室間の換気量を制御した状態を作り、PFT 法の室間換気量を測定する実験を行った。小型ファンの風量を測定した結果と PFT 法によって測定した室間の換気量の結果は前回よりも比較的良好な対応を示した。しかしながら、PFT 法の結果では 1 階の換気量は大きめに評価していた。この原因としては吸着競合による PMCH の捕集濃度が低いことが考えられる。今後はガス放散量の見直しや分析補正係数の見直しなどにさらに改善する必要があると考えられる。

3.2.6 COMIS を用いた数値解析による測定器の最適な設置位置の検討

(a) COMIS 計算概要

本節では、CFD 解析を行う前段階として、戸建標準住宅を対象に COMIS モデルで計算を行い、換気方式・気密性能・窓の開閉等の条件を変更してそれぞれのケースについて換気量を算出する。その結果から CFD 解析を行う数ケース選定する。

解析フローを図 3-2-42 に示す。解析はマクロモデル（多数室換気計算プログラム COMIS³⁻⁴⁾ によって住戸全体を、マイクロモデル（CFD 解析）により住戸内の 2 階居室を対象として行う^{注5)}。マクロモデルにより、居室に流入出する換気量を算出し、その結果をマイクロモデルの境界条件とするという方法^{3-5, 3-6)} を採用した。

換気経路の把握に関しては、近年、加藤、村上等により提案され、室内の温熱制御、室内空気汚染メカニズムの解明に利用されている CFD 解析に基づく各種の換気効率指標^{3-7, 3-8)} で導入された汚染質の定常一様な発生を仮定した換気効率指標第 3 (SVE3) を用いて、室内の空気齢の分布を評価し、明らかにする。

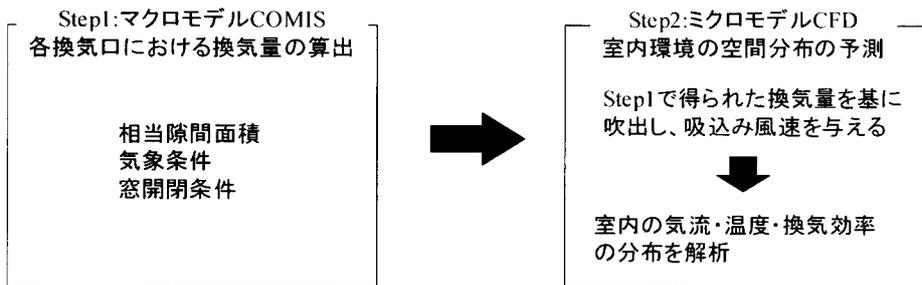


図 3-2-42 解析フロー

(b) 対象住宅の概要

図 3-2-43 に対象住宅である建築学会標準住宅モデル³⁻⁹⁾ の平面図を示す。延床面積は 126[m²]、容積は 297[m³]の 2 階建住宅である。階高は 2.7[m]、天井高は 2.4[m]である。居間と台所はほぼ一体と見なすことができ、浴室を除くすべての室がホールとドアを介してつながっている。マクロモデル (COMIS) では住戸全体を、マイクロモデル (CFD 解析) では 2F 主寝室 (図中網掛け部分) を解析対象とする。

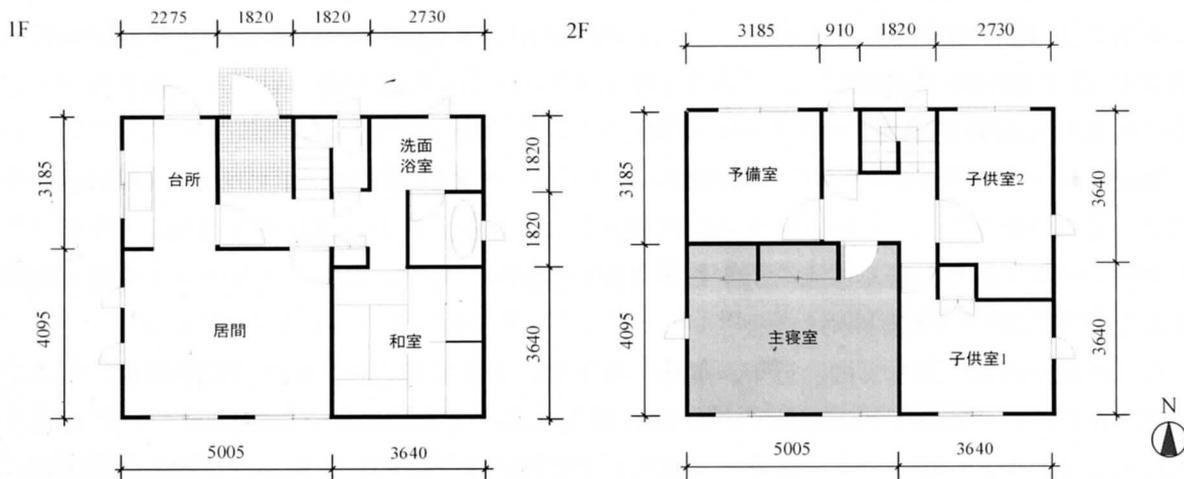


図 3-2-43 建築学会戸建標準モデル平面図

(b) 換気システム

1) 第1種換気システム

図 3-2-44 に各室の給気量及び排気量を示す。機械給排気量は換気回数で 0.5[回/h]となるように、150[m³/h]と設定し、給気量は各室の容積に応じて分配され、排気量は各階のホールから 75[m³/h]とした。

2) 第2種換気システム

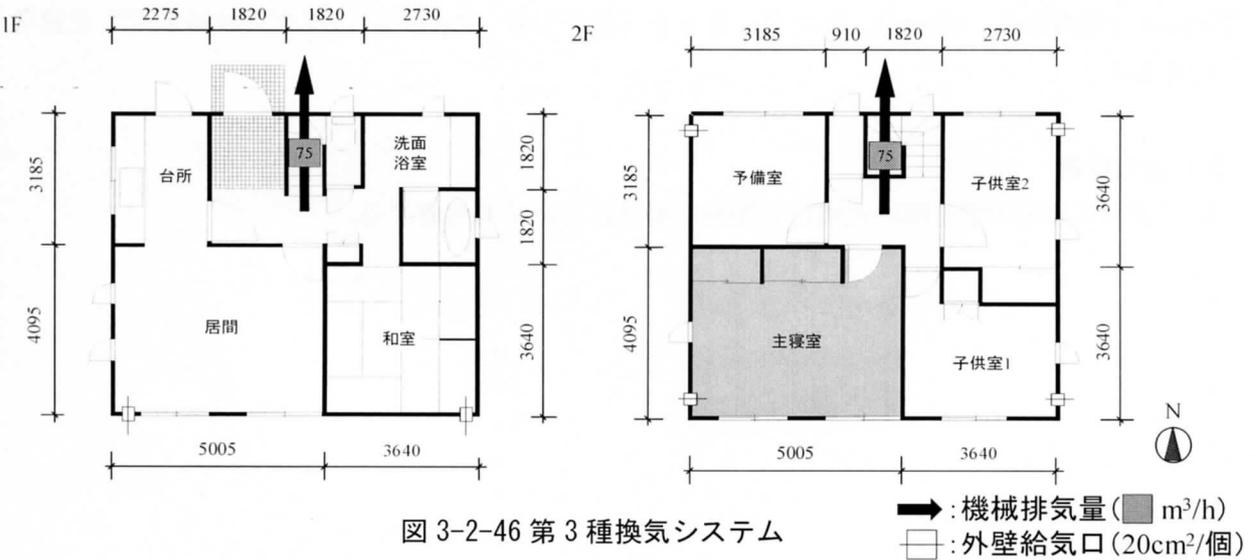
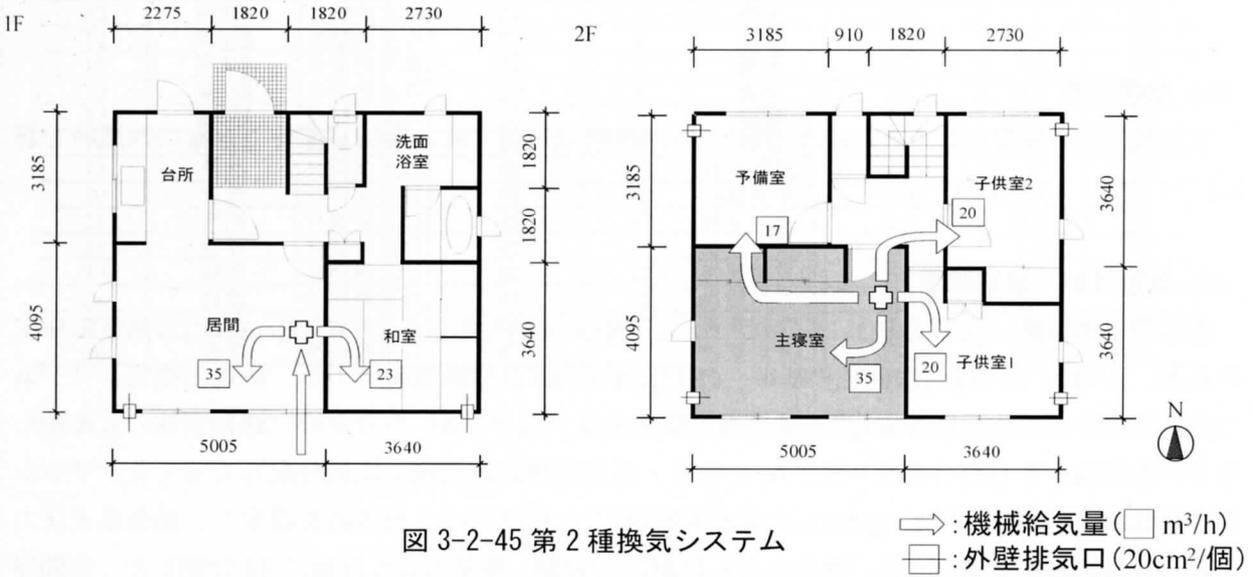
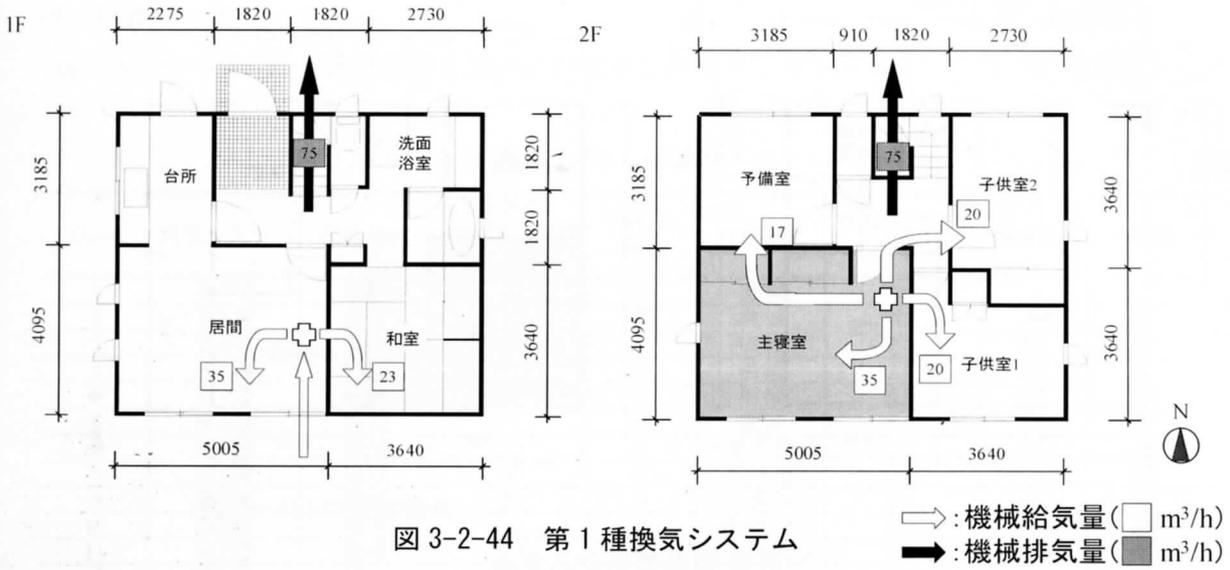
図 3-2-45 に各室の給気量及び排気口の設置場所を示す。機械給気量は換気回数で 0.5[回/h]となるように、150[m³/h]と設定した。給気量は各室の容積に応じて分配した。また、各居室（居間、和室、主寝室、子供室 1・2、予備室：計 6 箇所）に有効開口面積 20cm²/個の給気口を設置した。

3) 第3種換気システム

図 3-2-46 に各室の排気量及び給気口の設置位置を示す。機械排気量は換気回数で 0.5[回/h]となるように、150[m³/h]と設定し、排気量は各階のホールから 75[m³/h]とした。給気口は各居室（居間、和室、主寝室、子供室 1・2、予備室：計 6 箇所）に有効開口面積 20cm²/個の給気口を設置した。

4) 自然換気

図 3-2-47 に換気口の位置を示す。換気口は次世代省エネルギー基準に基づき、有効開口面積の合計値が 4[cm²/m²]となるようにし、1 個あたりの有効開口面積を 45[cm²]とした。



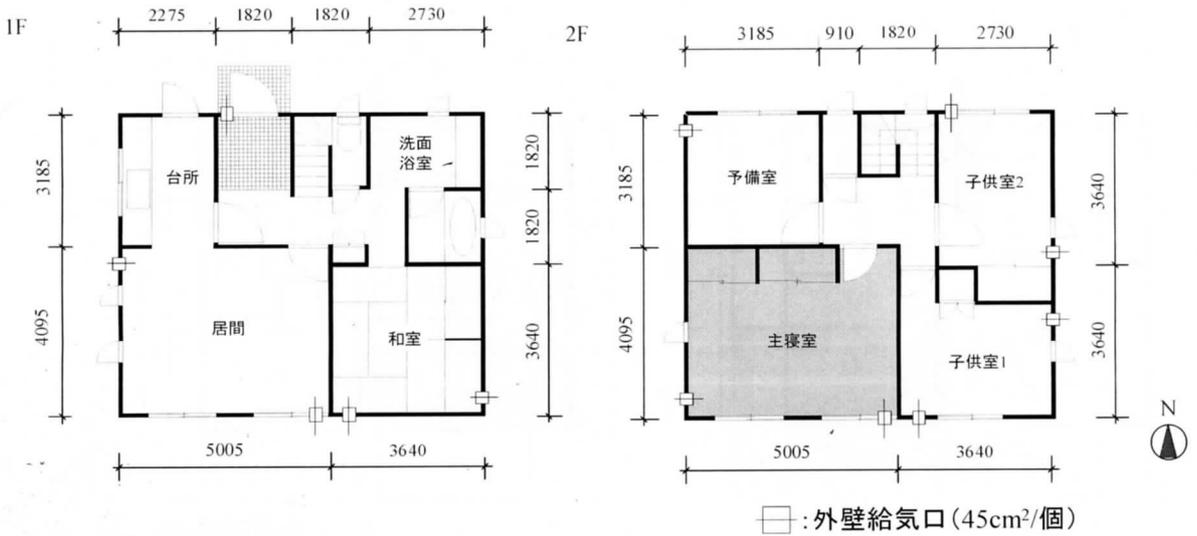


図 3-2-47 自然換気システム

(c) 気象条件

気象条件は外気温 0℃、室内温度 20℃、外部風速 0[m/s]（風力換気が期待できない無風時を想定）とする。

(d) 気密性能、建物隙間

住宅の気密性能（以下 C 値）は $C=0, 2, 5, 15[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ を想定した ($C=2[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ は高気密住宅の基準、 $C=5[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ は気密住宅の基準、 $C=15[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ は自然換気の時のみ。法規上換気システムの設置が免除される気密性能)。外壁の相当隙間面積（以下 αA ）の設定は、建物全体の αA から建具の想定値を差し引いた残りの αA を各室・各方位壁面の面積で比例分配して与えた。サッシ等の建具については、「JIS A4706」の気密等級線^{注6)}から建具の気密等級を設定し、通気量と圧力差から建具の αA を算出した。建具の αA は縦に 5 分割、外壁の αA は縦に 10 分割した。室間建具の αA （室内建具：65[cm²]、アンダーカット（以下 U.C：65[cm²]）は既往実験結果³⁻¹⁰⁾を参考に設定した。

(e) 生活行為

居住者が主寝室の窓を開けた場合と閉めた場合についても考慮する。

(f) 計算ケース

以上 6.2.2～6.2.5 節の計算条件を組み合わせると計算ケースが表 3-2-39 のように決定する。

表 3-2-39 計算ケース

Case	換気システム	給気方式	換気口 相当開口面積 [cm ² /個]	換気口 個数	排気方式	相当隙間面積 [cm ² /m ²]	サッシの 気密性能 [cm ² /m ²]	窓開閉
1	第1種	機械	-	-	機械	0.0	-	閉
2	第1種	機械	-	-	機械	0.0	-	開
3	第1種	機械	-	-	機械	2.0	0.5	閉
4	第1種	機械	-	-	機械	2.0	0.5	開
5	第1種	機械	-	-	機械	5.0	2.0	閉
6	第1種	機械	-	-	機械	5.0	2.0	開
7	第2種	機械	20	6	外壁換気口	0.0	-	閉
8	第2種	機械	20	6	外壁換気口	0.0	-	開
9	第2種	機械	20	6	外壁換気口	2.0	0.5	閉
10	第2種	機械	20	6	外壁換気口	2.0	0.5	開
11	第2種	機械	20	6	外壁換気口	5.0	2.0	閉
12	第2種	機械	20	6	外壁換気口	5.0	2.0	開
13	第3種	外壁換気口	20	6	機械	0.0	-	閉
14	第3種	外壁換気口	20	6	機械	0.0	-	開
15	第3種	外壁換気口	20	6	機械	2.0	0.5	閉
16	第3種	外壁換気口	20	6	機械	2.0	0.5	開
17	第3種	外壁換気口	20	6	機械	5.0	2.0	閉
18	第3種	外壁換気口	20	6	機械	5.0	2.0	開
19	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	0.0	-	閉
20	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	0.0	-	開
21	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	2.0	0.5	閉
22	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	2.0	0.5	開
23	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	5.0	2.0	閉
24	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	5.0	2.0	開
25	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	15.0	30.0	閉
26	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	15.0	30.0	開

(2) COMIS 計算結果

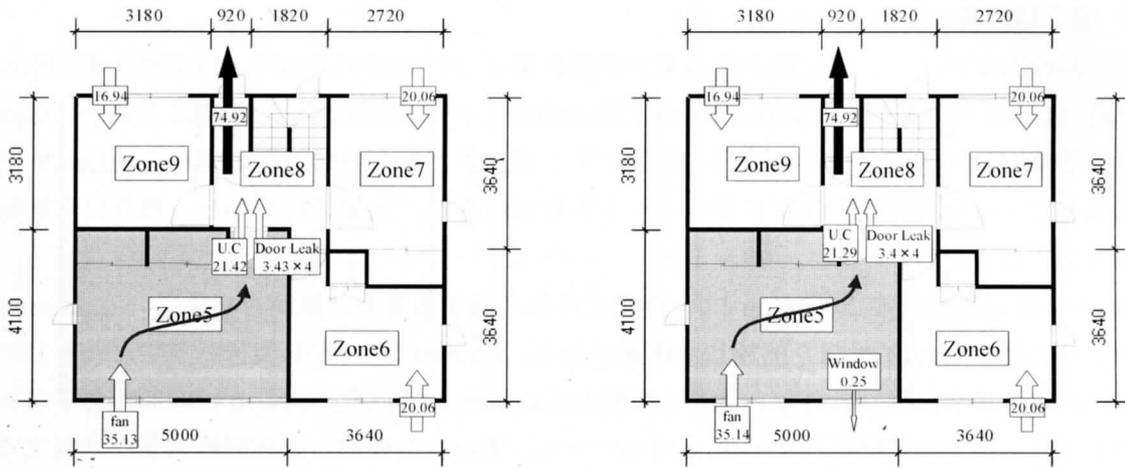
(a) 第1種換気システム (Case1~6)

図3-2-48Case1~6の2階居室の換気量の計算結果について示す。Case1は気密性能 $0.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ で窓を閉じている状態、Case2はCase1の窓を開放したケースである。Case1、2共に内部建具のドアを介して、ホールで機械排気されているため、ドア建具の隙間とドアのアンダーカットを通して、寝室の空気が排気されている。Case2は窓を開放した状態であるが、窓から室外への流出量は $0.3[\text{m}^3/\text{h}]$ 程度と非常に小さい値であり、Case1と換気経路はほぼ同じであった。

Case3、4は気密性能 $2.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ で、外壁と外部に接する建具に隙間を与えている。Case3は窓を閉じた状態で、Case4は窓を開放した状態である。Case3は天井から機械給気された空気が外壁、建具の隙間、ドア建具、アンダーカットを通じて排気されている。Case3はCase1とほぼ同じ換気経路をとる。一方、Case4は天井から機械給気された空気の大部分が窓から排気されるため、ドアの建具、アンダーカットを通してホールからの空気の流入がみられる。また、外壁部分の隙間換気量に注目すると、室内から高さ 0.8m 付近に中性帯ができ、床面付近では外気の流入が確認される。

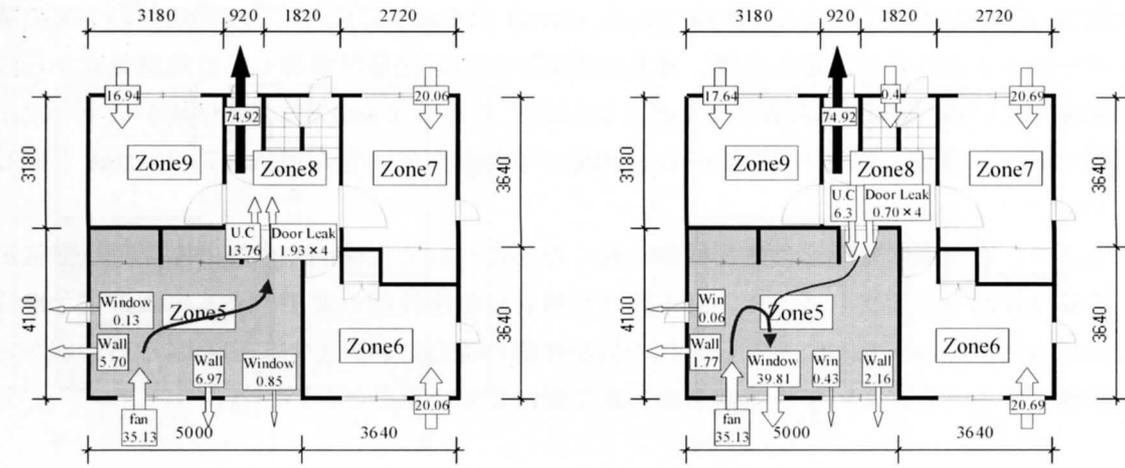
Case5、6はCase3、4よりも隙間を増やし、気密性能 $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ とした。Case5は窓を閉じた状態で、Case6は窓を開放した状態である。Case5はCase3と同様、天井から機械給気された空気が外壁、建具の隙間、ドア建具、アンダーカットを通じて排気されている。Case3より気密性能が低下し、隙間量が増えたため、内部建具のドアからの流出量が減少し、外壁、建具の隙間からの流出量が増加している。天井ファンから給気され、外壁の隙間を通して排気されるのが主な換気経路である。Case6はCase4とほぼ同じ換気経路であった。外壁、建具の隙間、ドア建具、アンダーカット、窓からの流出量がCase4より増加している。

以上より、窓を閉じた場合は気密性能が低くなるにつれて、壁面や窓面の隙間より空気が排出される換気経路へと変更していた。窓を開けた場合は気密性能が低くなるにつれて窓から排出される空気の割合が増えている。また、 $C=0.0$ の場合を除いて $C=2.0$ 及び $C=5.0$ の場合、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。



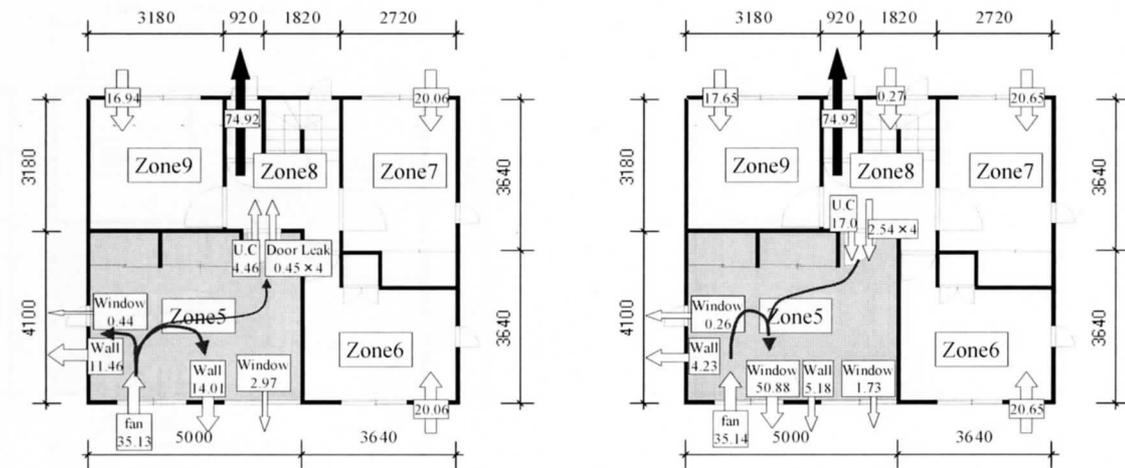
Case1(第1種 C=0.0 窓閉)

Case2(第1種 C=0.0 窓開)



Case3(第1種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5) 窓閉)

Case4(第1種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5) 窓開)



Case5(第1種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0) 窓閉)

Case6(第1種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0) 窓開)

図 3-2-48 第1種換気システム計算結果 (Case1~6) (2階の結果のみ表示)

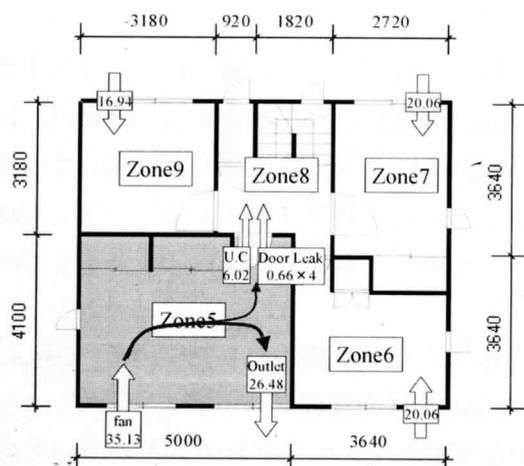
(b) 第2種換気システム (Case7~12)

図3-2-49Case7~12の2階居室の換気量の計算結果について示す。Case7,8は気密性能 $0.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ である。Case7は窓を閉じた状態、Case8は窓を開放した状態である。Case7は天井から機械給気された空気が自然換気口とドア建具の隙間とアンダーカットから排気されている。Case8では機械給気とドアの建具隙間及びアンダーカットから給気され、大部分は窓から、残りは自然換気口から排気されている。

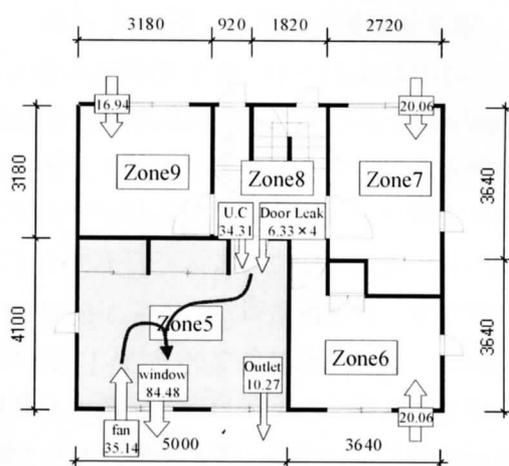
Case9,10は気密性能 $2.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ で、外壁と外部に接する建具に隙間を与えている。Case9は窓を閉じた状態、Case10は窓を開放した状態である。Case9は天井から機械給気された空気の半分は自然換気口から、残りは外壁、建具の隙間からの流出している。Case10は隙間から空気の流出量が小さく、主な換気経路はCase8と同じである。また、外壁部分の隙間換気量に注目すると、室内から高さ0.8m付近に中性帯ができ、床面付近では外気の流入が確認される。

Case11,12はCase9,10よりも隙間を増やし、気密性能 $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ とした。Case11は窓を閉じた状態で、Case12は窓を開放した状態である。Case11はCase9に比べて、内部建具のドアの隙間、アンダーカットからの流入量と外壁、建具の隙間からの流出量が増加し、自然換気口からの流出量が減少している。主な換気経路はCase9とほぼ同じである。Case12は気密性能が低下したため、Case10に比べて外壁と建具の隙間からの流出量が増加したが、主な換気経路はCase8と同じである。

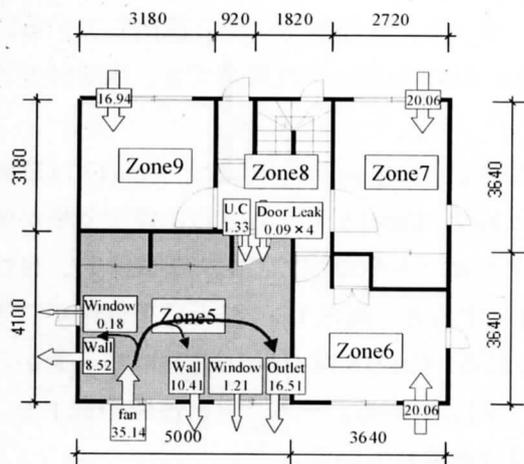
以上より、窓を閉じた場合は気密性能が低くなるにつれて、壁面や窓面の隙間より空気が排出される換気経路へと変更していた。窓を開けた場合は気密性能の変更による室内の主な換気経路の変化はみられなかった。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。



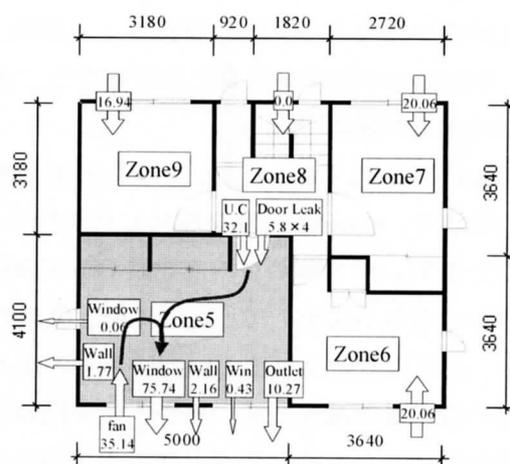
Case7(第2種 C=0.0 窓閉)



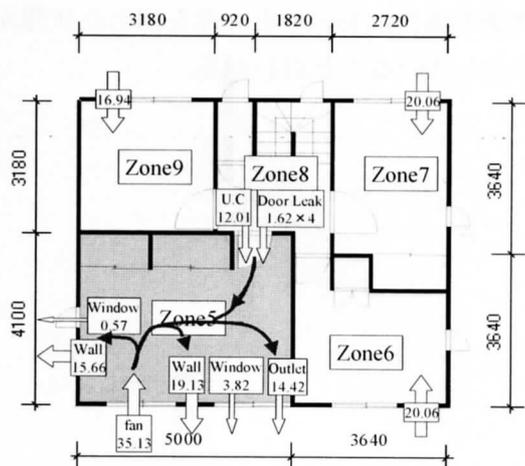
Case8(第2種 C=0.0 窓開)



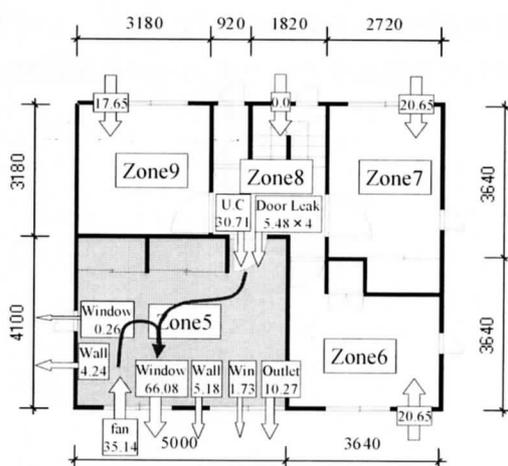
Case9(第2種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5) 窓閉)



Case10(第2種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5) 窓開)



Case11(第2種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0) 窓閉)



Case12(第2種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0) 窓開)

図 3-2-49 第 2 種換気システム計算結果 (Case7~12) (2 階の結果のみ表示)

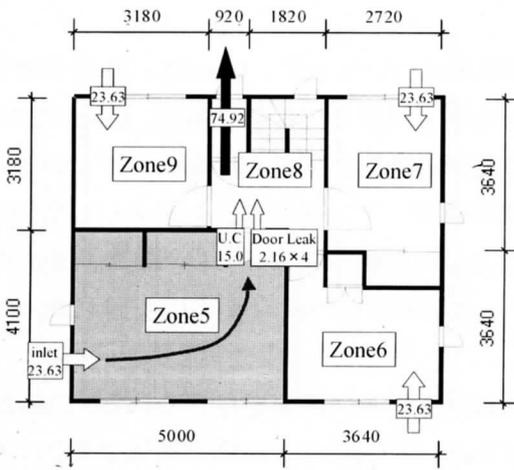
(c) 第3種換気システム (Case13~18)

図 3-2-50 Case13~18 の 2 階居室の換気量の計算結果について示す。Case13、14 は気密性能 $0.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ である。Case13 は窓を閉じた状態、Case14 は窓を開放した状態である。Case13、14 共に内部建具のドアを介して、ホールで機械排気されているため、Case13 では自然換気口から給気された空気はドア建具の隙間及びドアのアンダーカットを通して排気されている。一方、Case14 は窓からの大量の空気が流入し、ドアのアンダーカットを通して排気されている。また、Case13 とは異なり、自然換気口から空気が流出している。

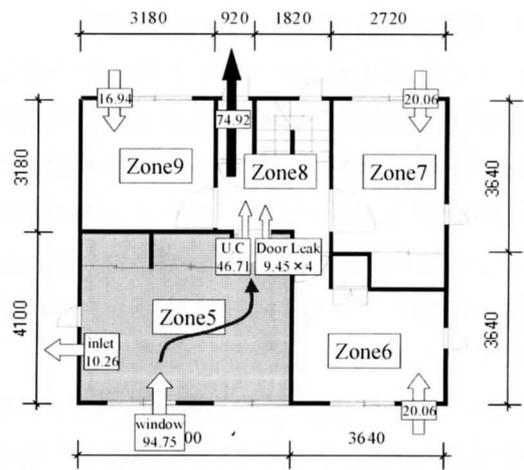
Case15、16 は気密性能 $2.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ で、外壁と外部に接する建具に隙間を与えている。Case15 は窓を閉じた状態、Case16 は窓を開放した状態である。Case15 は内部建具のドアを介して、ホールで機械排気しているが、煙突効果により 1 階ホールから 2 階ホールへの空気の流入が多いため、2 階居室における外気導入量が減少している。そのため自然給気口からではなく、外壁、建具の隙間から空気が流入し、内部建具のドア隙間、アンダーカットから排気されていた。Case16 は主に空気が窓から流入し、内部建具のドア隙間、アンダーカット、自然換気口から流出している。また、外壁部分の隙間換気量に注目すると、室内から高さ 0.8m 付近に中性帯ができ、床面付近では外気の流入が確認される。

Case17、18 は Case15、16 よりも隙間を増やし、気密性能 $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ とした。Case17 は窓を閉めた状態で、Case18 は窓を開放した状態である。Case17 は Case15 よりもさらに煙突効果が強くなったため、ホールから内部建具のドア隙間とアンダーカットを通して、空気が流入し、自然換気口から空気が流出している。外壁、建具の隙間に注目すると、高さ 1.3m 付近に中性帯ができるため、それ以下の高さにおいては外気の流入が確認される。Case18 は Case16 に比べて、窓からの空気の流入量が減少しているが、換気経路は Case16 と同じである。一方、気密性能が低下し、隙間量が増加したため、外壁と建具の隙間からの流出量は増加している。

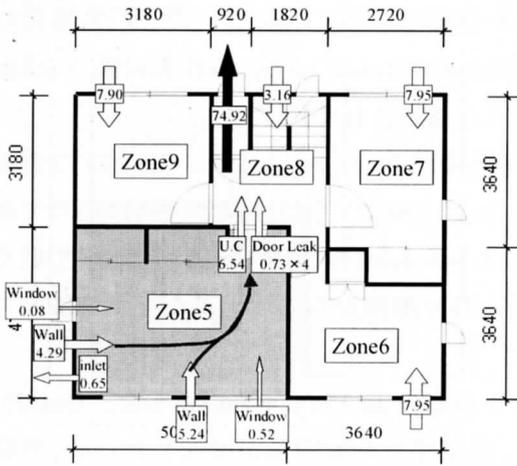
以上より、窓を閉じた場合は気密性能が低くなるにつれて、煙突効果が促進されるため、換気経路に大きな変化がみられた。一方、窓を開放した場合は気密性能の変更による室内の主な換気経路の変化はみられなかった。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。



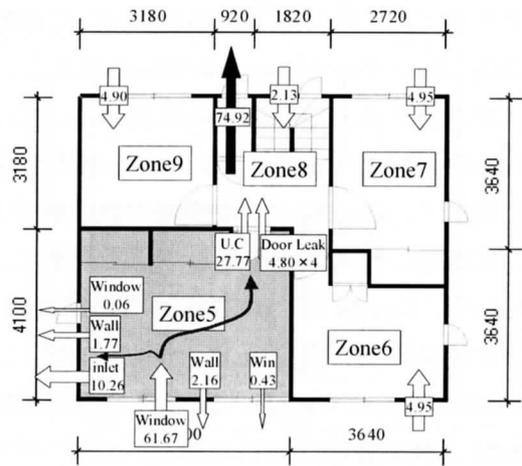
Case13(第3種 C=0.0 窓閉)



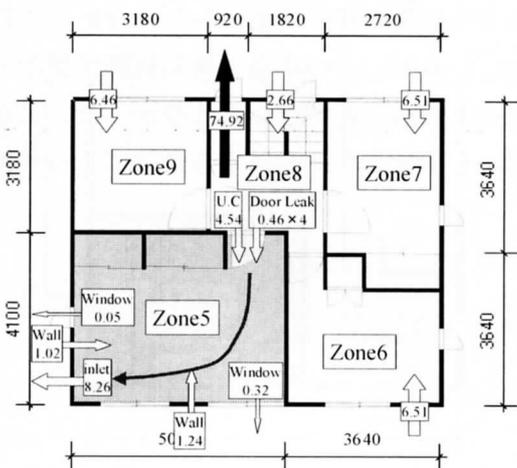
Case14(第3種 C=0.0 窓開)



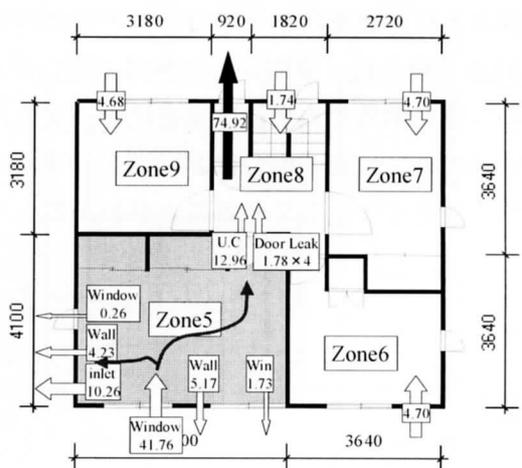
Case15(第3種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5)窓閉)



Case16(第3種 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5)窓開)



Case17(第3種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0)窓閉)



Case18(第3種 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0)窓開)

図 3-2-50 第3種換気システム計算結果 (Case13~18) (2階の結果のみ表示)

(d) 自然換気システム (Case19~26)

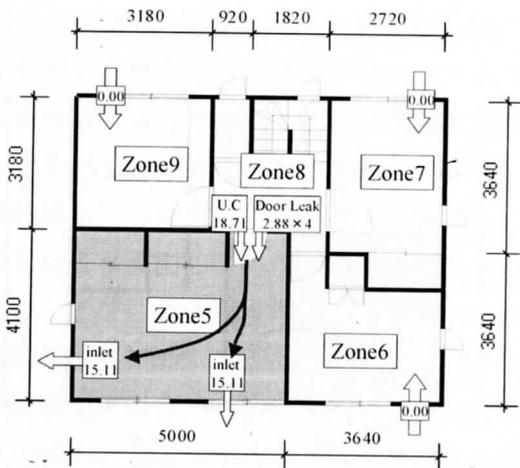
図 3-2-51 に Case19~26 の 2 階居室の換気量の計算結果について示す。Case19、20 は気密性能 $0.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ である。Case19 は窓を閉じた状態、Case20 は窓を開放した状態である。Case19、20 は部屋の南側と西側に自然換気口が取り付けられているだけで特に換気システムは取り付けしていない。Case19 は煙突効果により、ホールから内部建具のドアの隙間、アンダーカットを介して空気が流入し、自然換気口から流出している。Case20 は窓から大量の空気が流入し、自然換気口からの流出量が増加している。内部建具のドアの隙間、アンダーカットからの流入量は Case19 に比べて減少している。

Case21、22 は気密性能 $2.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ で、外壁と外部に接する建具に隙間を与えている。Case21 は窓を閉じた状態、Case22 は窓を開放した状態である。Case21 は Case19 と同様に煙突効果により、ホールから内部建具のドアの隙間、アンダーカットから流入した空気が自然換気口から流出している。外壁、外部に接する建具部分の隙間換気量に注目すると、室内から高さ 1.3m 付近に中性帯ができるため、それ以下の高さにおいては外気の流入が確認される。Case22 は窓と内部建具のドア隙間、アンダーカットから空気が流入し、自然換気口から流出している。中性帯は高さ 0.8m 付近にできるため、それ以下の高さにおいては外気の流入が確認される。

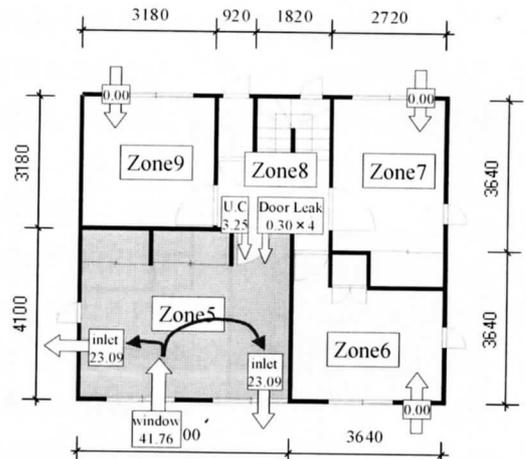
Case23、24 は Case21、22 よりも隙間を増やし、気密性能 $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ とした。Case23 は窓を閉じた状態で、Case24 は窓を開放した状態である。Case23 は Case21 とほぼ換気経路は同じであるが、流出量、流入量が増加している。また、中性帯の高さが 1.0m 付近と Case21 に比べて低くなっている。Case24 は Case22 と換気経路は同じであるが、外壁隙間からの流出量などが増加している。中性帯の高さは Case22 と同じである。

Case25、26 は Case23、24 からさらに隙間を増やし、気密性能 $15.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ とした。Case25 は Case23 と換気経路は同じであるが、前ケースに比べて、外部建具の隙間量が増加したため、外壁、建具の隙間からの流出量が増加している。中性帯の高さは Case23 と同じである。Case26 は Case22 と同じの換気経路である。外部建具の隙間からの流出量が増加している。

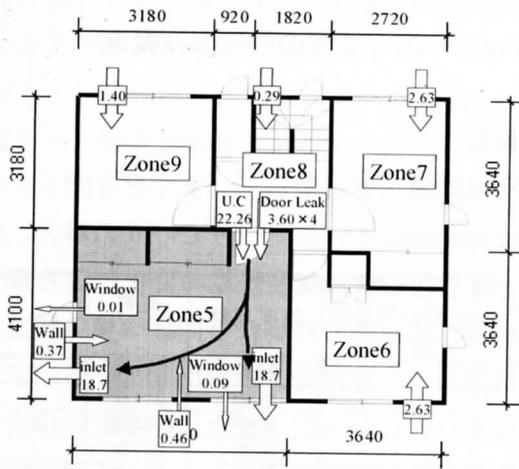
以上より、窓を閉じた場合は気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられない。ただし $C=15.0$ の場合は、隙間からの漏気の割合が大きいため、 $C=0.0\sim 5.0$ の場合と換気経路が異なっていた。窓を開放した場合は気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられなかった。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。



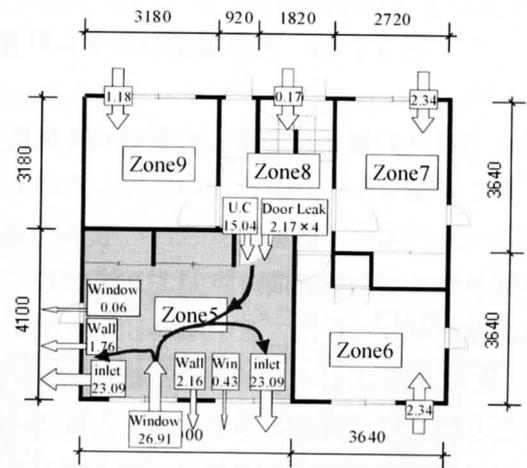
Case19(自然換気 C=0.0 窓閉)



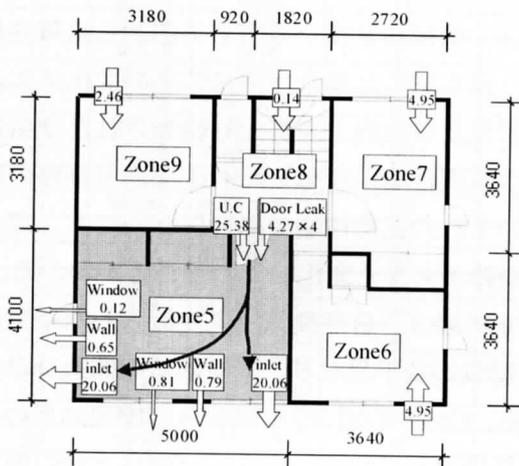
Case20(自然換気 C=0.0 窓開)



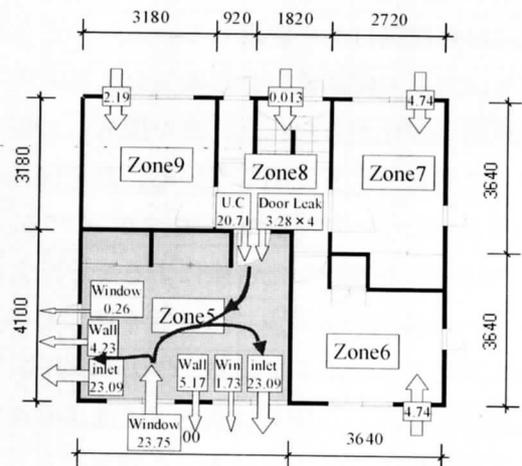
Case21(自然換気 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5)窓閉)



Case22(自然換気 C=2.0 窓サッシ A-4等級(C=0.5)窓開)

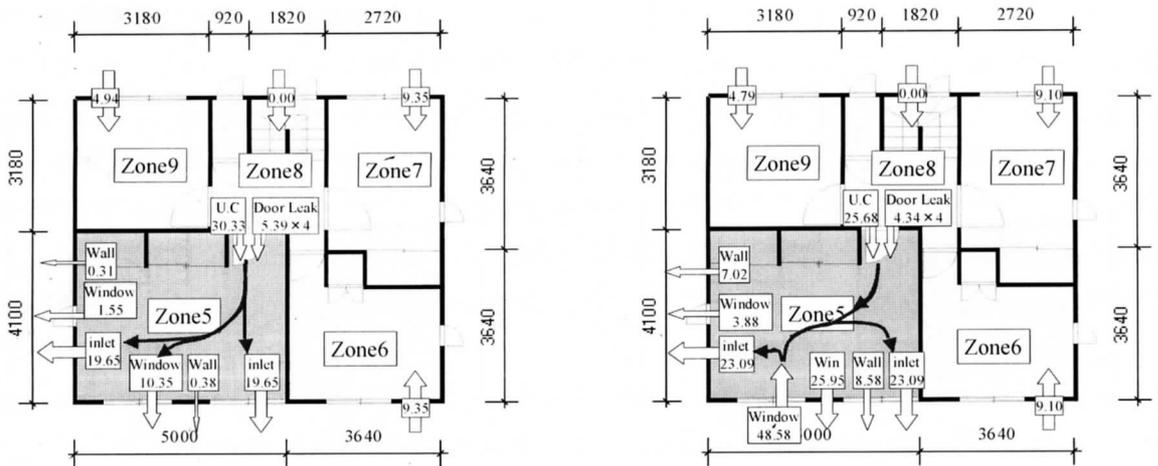


Case23(自然換気 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0)窓閉)



Case24(自然換気 C=5.0 窓サッシ A-3等級(C=2.0)窓開)

図 3-2-51 自然換気システム計算結果 (Case21~26) (2階の結果のみ表示)



Case25(自然換気 C=15.0 窓サッシ A-1等級(C=30)窓閉) Case26(自然換気 C=15.0 窓サッシ A-1等級(C=30)窓開)

図 3-2-51 自然換気システム計算結果 (Case21~26) (2階の結果のみ表示)

(e) COMIS 計算結果のまとめ及び CFD 解析ケースの検討

第1種換気システムについては、主寝室内の主な換気経路に着目すると、まず窓を閉じた場合は $C=0.0$ の場合、機械給気された空気は室内ドア部より流出している。一方 $C=5.0$ の場合、機械給気された空気は壁面の隙間より流出している。窓を閉じた場合は気密性能の変化による換気経路の変化がみられた。窓を開放した場合は $C=0.0$ の場合、窓を閉じた場合と同様の換気経路をとる。 $C=2.0$ 及び $C=5.0$ の場合、機械給気された空気は開放した窓部分より流出している。窓を開放した場合は気密性能が変化による換気経路の変化はみられなかった。また、 $C=0.0$ の場合を除いて $C=2.0$ 及び $C=5.0$ の場合、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。

第2種換気システムでは、第1種と同様に窓を閉じた場合は $C=0.0$ の場合、機械給気された空気は自然換気口から流出している。一方 $C=5.0$ の場合、機械給気及び室内ドア部から給気された空気は壁面の隙間及び自然換気口より流出している。窓を閉じた場合は気密性能の変化による換気経路の変化がみられた。窓を開放した場合、機械給気及び室内ドア部から給気された空気は開放した窓部分より流出している。窓を開放した場合は気密性能が変化しても主な換気経路の変化はみられなかった ($C=0.0 \rightarrow C=2.0 \rightarrow C=5.0$)。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。

第3種換気システムでは、窓を閉じた場合は $C=0.0$ の場合、自然換気口より流入した空気は室内ドア部より流出している。 $C=2.0$ の場合、 $C=0.0$ と給気が若干異なり、壁面部の隙間及び自然換気口より流入した空気は室内ドア部より流出している。 $C=5.0$ の場合、1階からの煙突効果の影響により室内ドア部より流入した空気は自然換気口より流出している。 $C=0.0$ の場合と逆の換気経路をとる。窓を閉じた場合は気密性能の変化による換気経路の変化がみられた。窓を開放した場合は $C=0.0$ の場合、窓部分から流入した空気は室内ドア部より流出していた。 $C=2.0$ 及び $C=5.0$

の場合、窓部分から流入した空気は室内ドア部及び自然換気口より流出していた。しかしながら、窓を開放した場合は気密性能が変化しても主な換気経路の変化はみられなかった。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。

自然換気については、窓を閉じた場合は $C=0.0\sim 5.0$ の場合、室内ドア部から流入した空気は自然換気口より流出している。窓を閉じた場合は気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられない。ただし $C=15.0$ の場合は、隙間からの漏気の割合が大きいため、 $C=0.0\sim 5.0$ の場合と換気経路が異なり、室内ドア部から流入した空気は自然換気口及び窓、壁面の隙間より流出している。窓を開放した場合、 $C=0.0$ の場合、窓から流入した空気は自然換気口より流出していた。 $C=2.0\sim 15.0$ の場合、窓及び室内ドア部より流入した空気は自然換気口より流出していた。窓を開放した場合は気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられなかった。また、いずれの気密性能の場合においても、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していることがわかる。

以上よりそれぞれの換気システムについて換気経路の異なるケースについて CFD 解析を行う。計算ケースを表 3-2-40 に示す。

表 3-2-40 CFD 計算ケース

Case	換気システム	給気方式	換気口 相当開口面積 [cm ² /個]	換気口 個数	排気方式	相当隙間面積 [cm ² /m ²]	サッシの 気密性能 [cm ² /m ²]	窓開閉	CFD
1	第1種	機械	-	-	機械	0.0	-	閉	○
2	第1種	機械	-	-	機械	0.0	-	開	
3	第1種	機械	-	-	機械	2.0	0.5	閉	
4	第1種	機械	-	-	機械	2.0	0.5	開	
5	第1種	機械	-	-	機械	5.0	2.0	閉	○
6	第1種	機械	-	-	機械	5.0	2.0	開	○
7	第2種	機械	20	6	外壁換気口	0.0	-	閉	○
8	第2種	機械	20	6	外壁換気口	0.0	-	開	○
9	第2種	機械	20	6	外壁換気口	2.0	0.5	閉	
10	第2種	機械	20	6	外壁換気口	2.0	0.5	開	
11	第2種	機械	20	6	外壁換気口	5.0	2.0	閉	○
12	第2種	機械	20	6	外壁換気口	5.0	2.0	開	
13	第3種	外壁換気口	20	6	機械	0.0	-	閉	○
14	第3種	外壁換気口	20	6	機械	0.0	-	開	○
15	第3種	外壁換気口	20	6	機械	2.0	0.5	閉	○
16	第3種	外壁換気口	20	6	機械	2.0	0.5	開	
17	第3種	外壁換気口	20	6	機械	5.0	2.0	閉	○
18	第3種	外壁換気口	20	6	機械	5.0	2.0	開	○
19	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	0.0	-	閉	○
20	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	0.0	-	開	○
21	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	2.0	0.5	閉	
22	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	2.0	0.5	開	
23	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	5.0	2.0	閉	
24	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	5.0	2.0	開	
25	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	15.0	30.0	閉	○
26	自然	外壁換気口	45	12	外壁換気口	15.0	30.0	開	○

3.2.7 CFDを用いた数値解析による測定器の最適な設置位置の検討

(1) CFD解析概要

CFD解析は表3-2-40に示す11ケースについて行った。以下にCFD解析の概要を示す。

(a) 解析対象

解析対象は建築学会標準住宅モデルの2F主寝室（図3-2-43網掛け部分）である。

(b) 乱流モデル

Viollet型の非等温 k - ϵ モデル（付録-2の表2-1参照）を採用した。

(c) メッシュ分割

第1種換気システム（Case1）は $39(x) \times 31(y) \times 21(z)$ の計25389メッシュ、第2種換気システム（Case7）は $42(x) \times 32(y) \times 25(z)$ の計33600メッシュ、第3種換気システム（Case13～18）は $40(x) \times 34(y) \times 25(z)$ の計34000メッシュ、自然換気（Case19）は $42(x) \times 35(y) \times 25(z)$ の計36750メッシュに空間を分割して解析を行った。一例として第3種換気システムのメッシュ分割を図3-2-51に示す。

(d) スキーム

運動方程式、 k 、 ϵ 輸送方程式の移流項にQUICKスキームを、汚染質濃度輸送方程式の移流項に1次精度風上差分スキーム、時間に関しては1次精度のfull implicitスキームを使用した。

(e) 境界条件

表3-2-41に示す。

(f) 初期条件

室内風速の初期値は全て0[m/s]、室内温度は20℃、外気温度0℃とした。以上のような初期値のより計算を開始し、流体・温度計算を実時間で2時間、濃度計算は室内の平均濃度が一定になるまで行った（ケースによって異なるが実時間で10～40時間計算を行った）。

※濃度計算

室内の換気性状を評価するため、換気効率指標第3（Scale for Ventilation Efficiency）を算出して検討を行った。SVE3は室内の空気齢の分布を評価する手法で、汚染質の定常一様な発生を仮定し、その条件下で得られる濃度分布を瞬時一様拡散濃度で無次元化することにより空気齢に読み換えることにより得られる。

また、測定器の設置位置の検討を行うため、給気口付近よりガスを発生させた場合の室の平均濃度を捕集できるガスの捕集位置についての検討も行った^{注8)}。

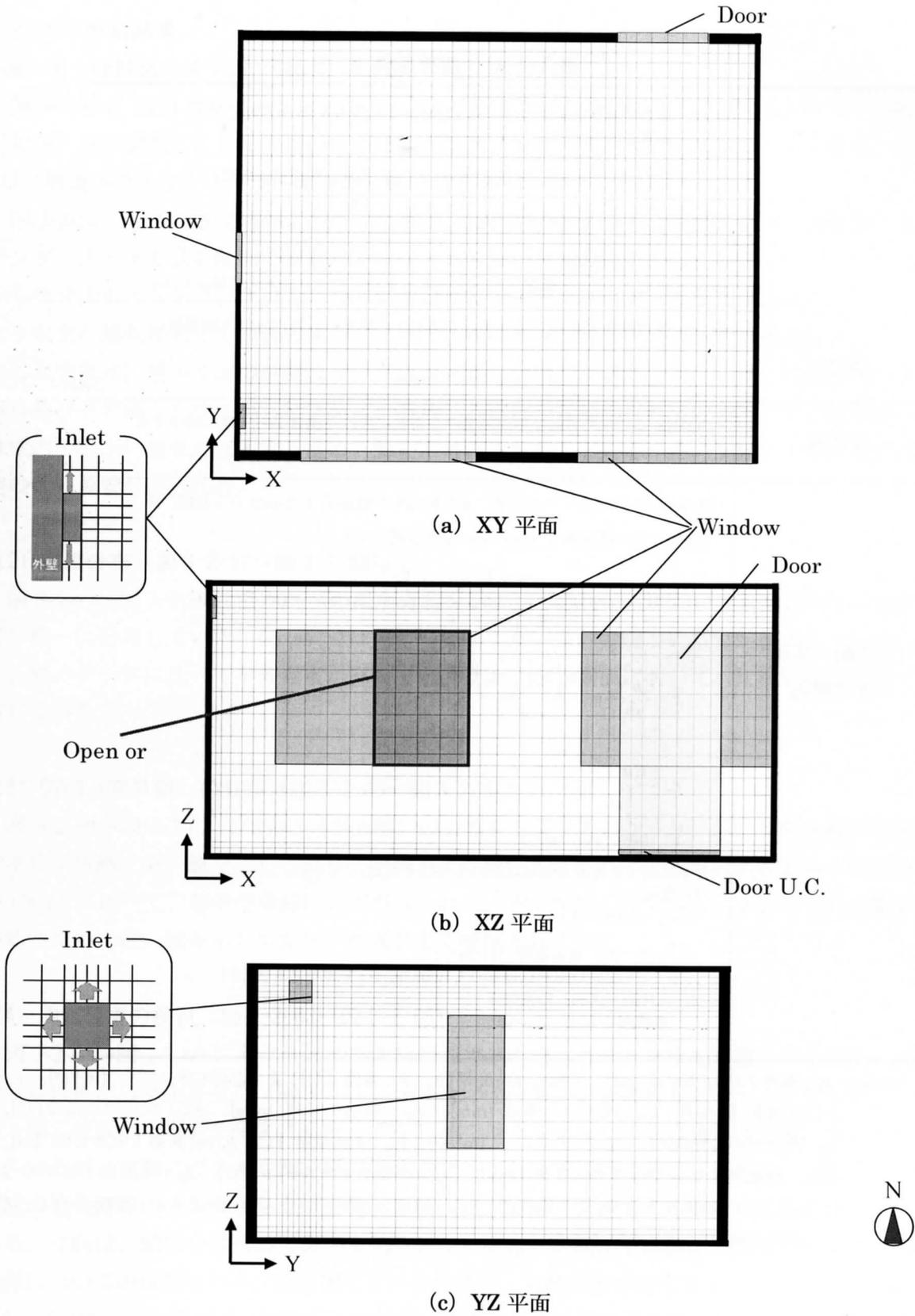


図 3-2-51 計算メッシュ (Case13~18)

表 3-2-41 境界条件

<p>吹出口</p>	<p>$\langle u_m \rangle$: 多数室換気計算プログラム COMIS の結果から算出される風量値を与える</p> <p>$k_m = \frac{3}{2} (0.05 \langle u_m \rangle)^2$ (乱れの強さ 5% とし、乱れの等方性を仮定)</p> <p>$\varepsilon_m = \frac{C_\mu k_m^3}{l_m}$ l_m は吹出口の短辺</p> <p>$\langle \theta_m \rangle = 0^\circ\text{C}$ (外気温)</p> <p>$\langle \theta_m \rangle = 20^\circ\text{C}$ (ドアの隙間・アンダーカットから空気が流入する場合のみ)</p>
<p>吸込口</p>	<p>$\langle u_{in} \rangle$: 多数室換気計算プログラム COMIS の結果から算出される風量値を与える。</p> <p>$k, \varepsilon, \langle \theta \rangle$ 等のスカラー量は法線方向の勾配 0</p>
<p>隙間風</p>	<p>・COMIS より求められる隙間風量が、帯状に設けた開口から一様に流出するものとして、流入風速を求めた⁷⁾。</p>
<p>天井面・床面 及び壁面</p>	<p>・壁面上のシアストレスは①式、k 方程式中の壁面第 1 セルの ε (ε_w) は②式、ε 方程式中の壁面第 1 セルの ε (ε_p) は③式で与えた。</p> $\frac{\langle u_w \rangle \rho}{\tau_w \rho} (C_\mu^2 k_p)^{-1} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{E^{\frac{1}{2}} h_p (C_\mu^{\frac{1}{2}} k_p)^{\frac{1}{2}}}{\nu} \right] \quad \dots \text{①}$ $\frac{\varepsilon_w}{\kappa h_p} = C_\mu^{\frac{1}{2}} k_p \ln \left[\frac{E^{\frac{1}{2}} h_p (C_\mu^{\frac{1}{2}} k_p)^{\frac{1}{2}}}{\nu} \right] \quad \dots \text{②}$ $\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{\frac{3}{2}} k_p^3}{2 \kappa h_p} \quad \dots \text{③}$ <p>k: 法線方向の勾配 0</p> <p>・熱量に関する境界条件は以下のように与えた。</p> <p>1) 窓面</p> $q_{cm} = \alpha_c (\theta_w - \theta_p)$ <p>ここで、θ_w: 表面温度 (11.78°C)</p> <p>α_c: 対流熱伝達率 (3.7w/m²K (ペアガラスを仮定))</p> <p>2) 天井面、床面、鉛直壁面</p> <p>断熱壁を仮定 ($q_{cm}=0$)</p>

(記号): u_i : 風速 3 成分 [m/s]、 $\langle f \rangle$: 変数の f 時間平均、 θ : 温度 [°C]、 k : 乱流エネルギー [m²/s²]、 ε : k の散逸率 [m²/s³]、 u_m : 吹出口の風速 [m/s]、 u_{out} : 吸込の風速 [m/s]、 θ_m : 吹出口の温度 [°C]、 k_m : 吹出口の k [m²/s²]、 ε_m : 吹出口の ε [m²/s³]、 θ_w : 表面温度 [°C]、 h_p : 壁面第 1 セルの幅 [m]、 $\langle u_w \rangle$: 壁面第 1 セルの接線方向風速 [m/s]、 θ_p : 壁面第 1 セルの θ [°C]、 k_p : 壁面第 1 セルの k [m²/s²]、 ε_p : 壁面第 1 セルの ε [m²/s³]、 τ_w : 壁面のシアーストレス [Pa]、 κ : 定数 (=0.4)、 C_μ : 定数 (=0.09)、 E : 定数 (=9.0)

(2) CFD 解析結果

(a) 第1種換気システム (Case1、5、6)

図 3-2-53 に CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量を示す。図 3-2-53 中の矢印は青が給気、赤が排気を、また網掛け矢印は隙間換気、矢印の大きさは換気量の大小を表している。

(1) 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (図 3-2-54～図 3-2-56)

図 3-2-54～図 3-2-56 に機械給気を含む断面、室内中心部の窓を含む断面、排気部分であるドアアンダーカットを含む断面の風速ベクトルとスカラー風速の分布を示す。Case1 では機械給気口から吹き出した空気は、床付近に沿って運ばれ、ドアアンダーカットから排出されている。このような主な換気経路上では他の部分に比べて比較的風速が強い。Case5 では機械給気口から吹き出した空気は、壁面や窓の隙間及びドア部などから分散して排出されている。Case6 では機械給気口及びドア部から吹き出した空気は、開放した窓部から排出されている。ドアの隙間部分からは室内の暖かい空気が流入するため、強い上昇気流が生じている。その影響により天井付近で風速の強い領域がみられる。

(2) 温度分布 (図 3-2-57～図 3-2-59)

図 3-2-57～図 3-2-59 に各ケースの温度分布を示す。どのケースにおいても空間全体で比較的溫度が均一に分布していた。Case6 ではドアの隙間より、室内の暖かい空気が流入していることより、他のケースに比べて平均溫度が高かった。また、どの断面においても比較的溫度が均一に分布していた。

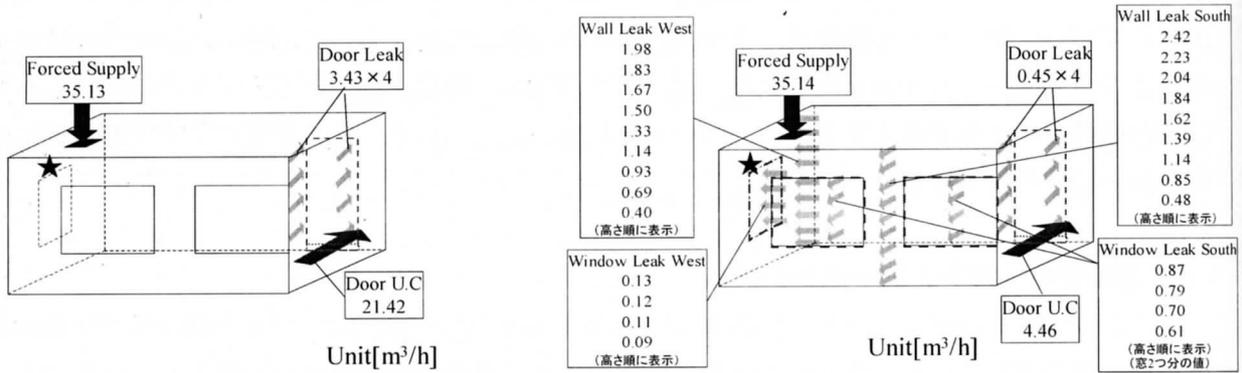
(3) SVE3 (空気齢) の分布 (図 3-2-60～図 3-2-62)

図 3-2-60～図 3-2-62 に SVE3 (空気齢) の分布を示す。どのケースにおいても比較的空間全体で平均空気齢に近い値を示しており、空気がよく攪拌されていた。隙間がある Case5 は隙間がない Case1 に比べて、若干空気齢に分布がみられた。窓を開放した Case6 においても、空間全体で平均空気齢に近い値を示しており、空気がよく攪拌されていた。

(4) 測定位置の検討 (図 3-2-63～図 3-2-65)

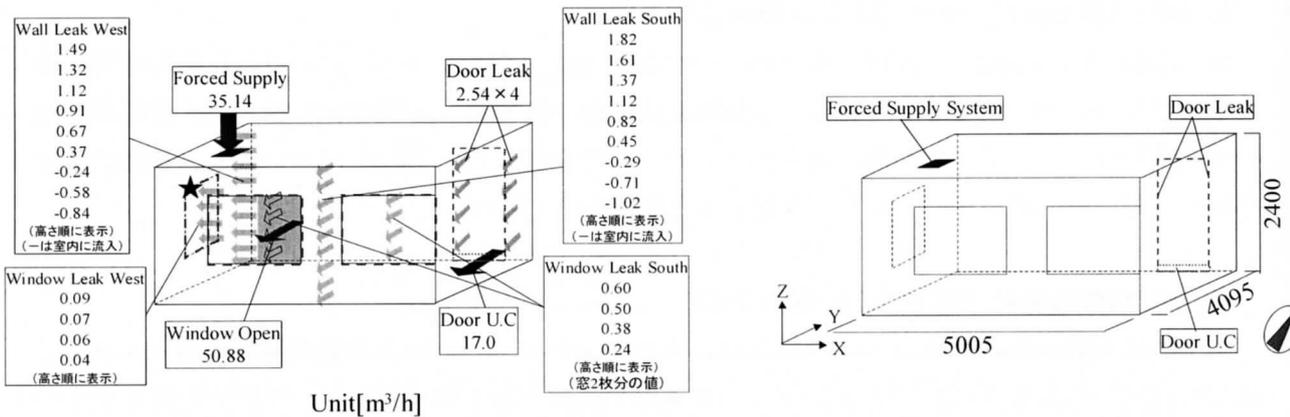
図 3-2-63～図 3-2-65 に各ケースの給気口からガスを発生させた場合の濃度分布を示す。ガスは給気口付近から発生させた (図 3-2-53 に示す★印の位置。窓を開放したケースは窓を閉じたケースと同じ位置からガスを発生させた。)。PFT 法ではトレーサーガスの発生は空間一様発生を仮定しているが、実際にガスを空間一様に発生させることは不可能である。そこで、一般的には測定空間の換気経路の風上側からガスを発生させ、風下でガスを捕集することが最適であると考えられる。今回は、給気口付近からガスを発生させた場合、空間の平均濃度が捕集できるガスの捕集位置についての検討を行う。窓を閉じている状態で、気密性能が変化するケース (Case1 (C=0.0) → Case5 (C=5.0)) では主に空間全体的において空気がよく攪拌されていることが確認された。ただし、Case1 では天井付近に高濃度の領域がみられた。これらのケースにおいて平均濃度に近い

値を示す領域として、空気が流出する付近の高さ 1.5m 付近にサンプラーを設置することが最適であると言える。Case5 の窓を閉じた状態から窓を開放した状態に変更した Case6 では、先ほど Case5 で最適な設置位置とされたドア部の高さ 1.5m 付近で平均濃度に近い値を示す領域がみられる。これは空気の給気場所が変わらないため、ガスが吹き出し空気に運ばれ、室内である程度攪拌することが原因であると考えられる。以上より、窓の開閉に関わらず平均濃度に近い値を示す領域として排気付近の高さ 1.5m 付近にサンプラーを設置することが最適であると言える（窓を開放した場合の設置位置について、今回は窓を開放した場合、風速や風向の変化の影響を考慮していないことに注意する必要がある）。



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)

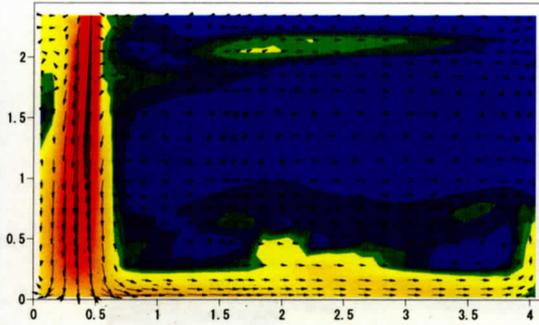
(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



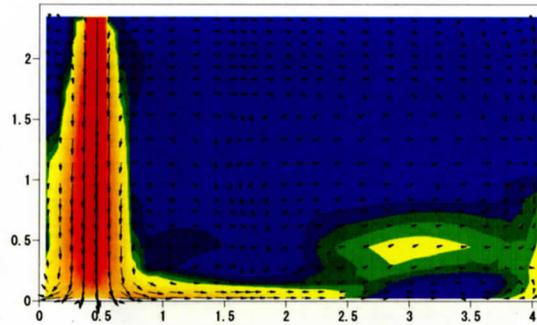
(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

※★はガス一点発生の場合の発生位置

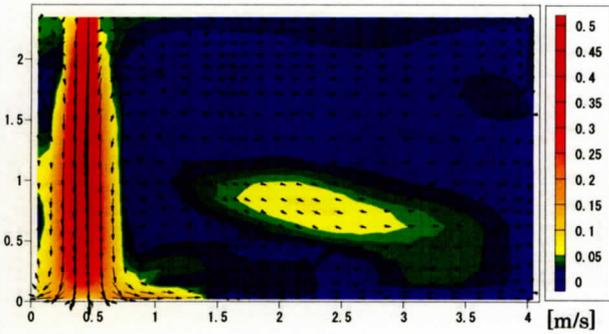
図 3-2-53 CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量 (Case1, 5, 6)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

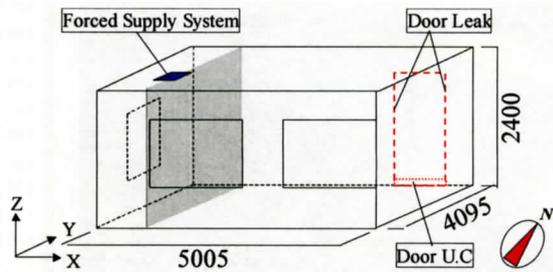
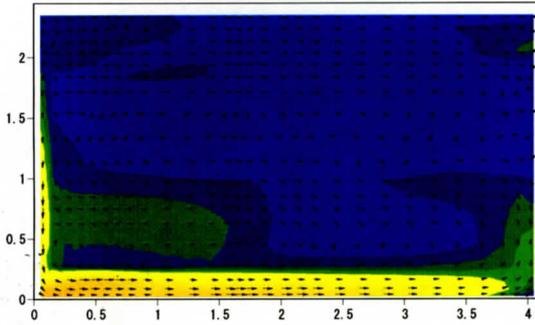
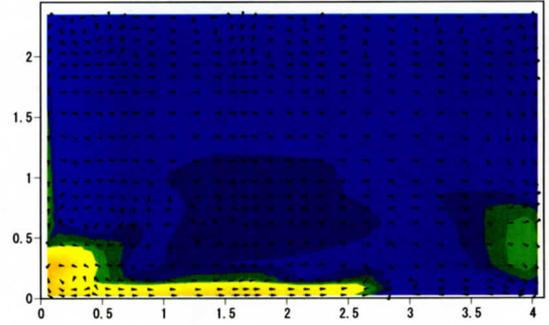


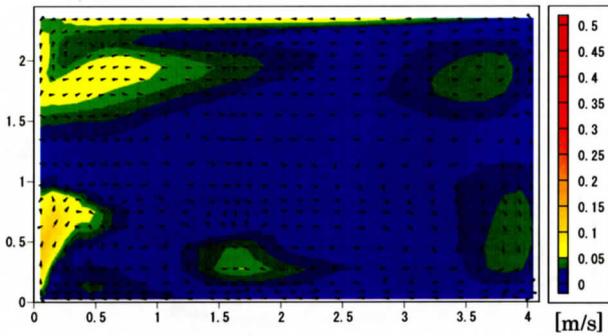
図 3-2-54 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

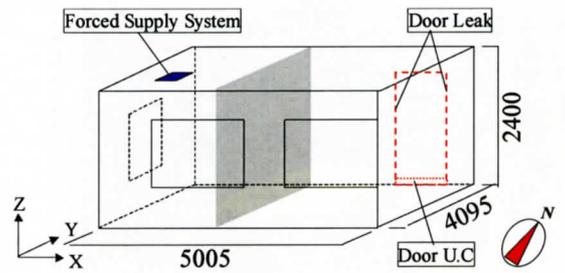
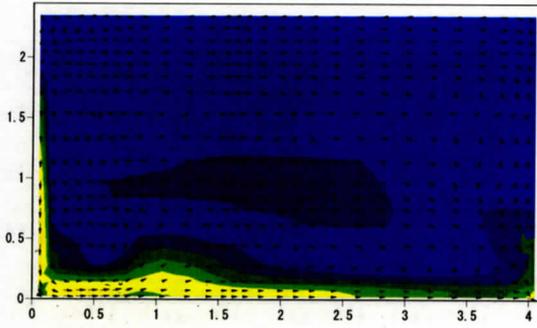
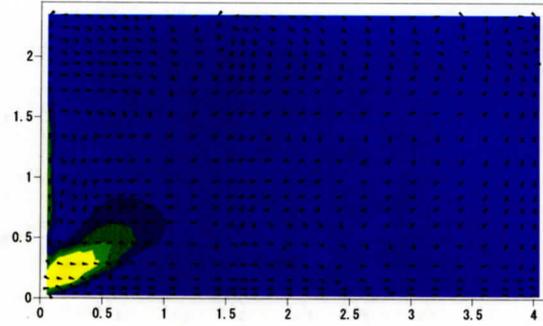


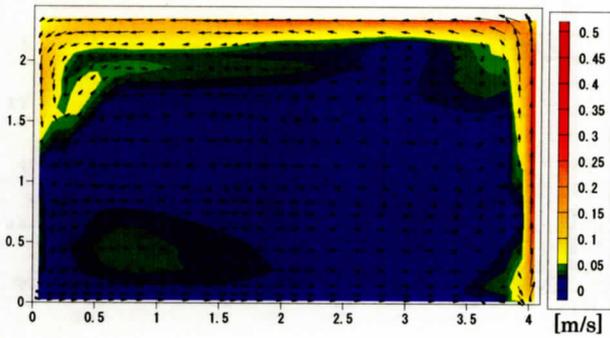
図 3-2-55 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

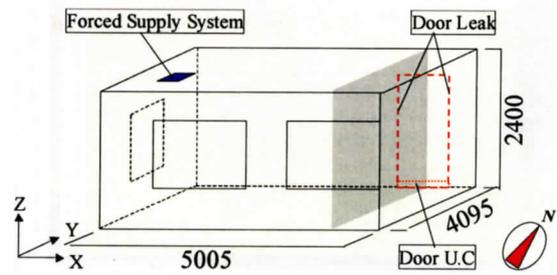
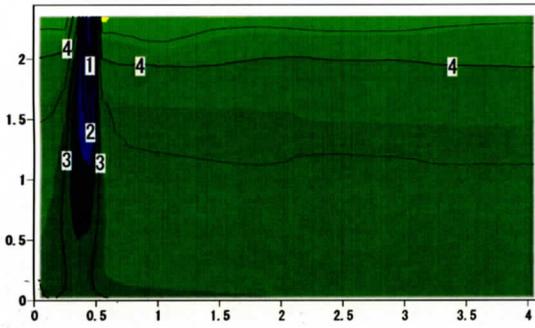
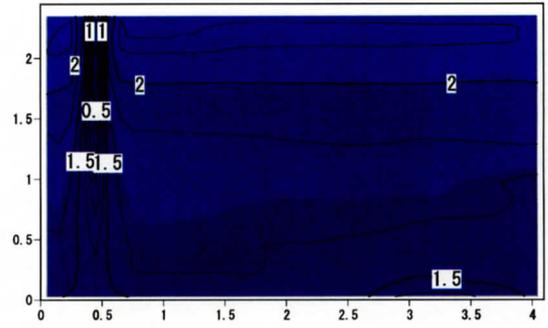


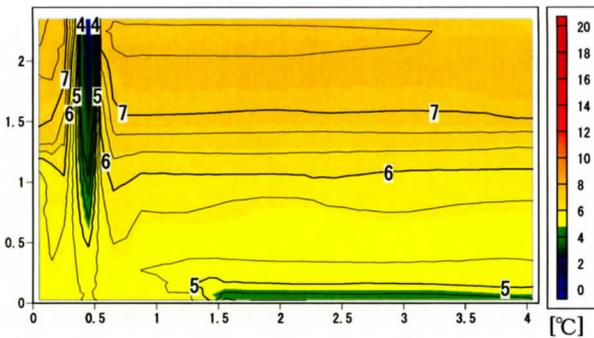
図 3-2-56 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=4.065m ドア U.C 有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

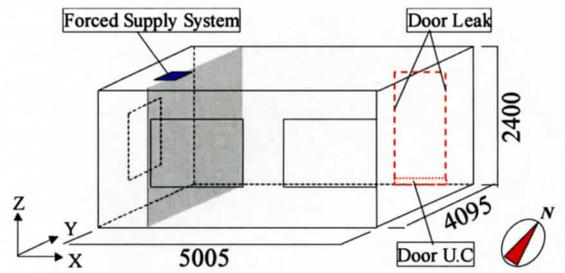
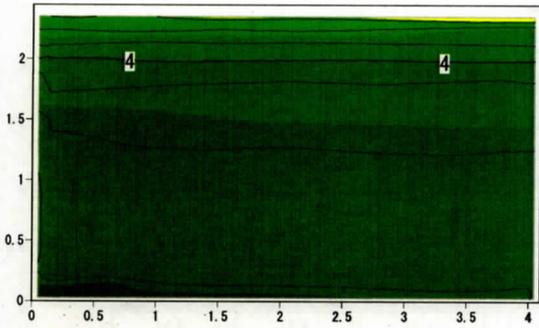
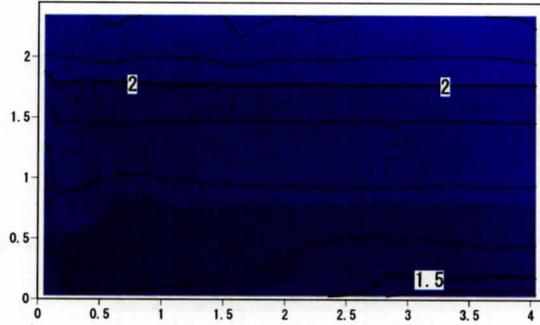


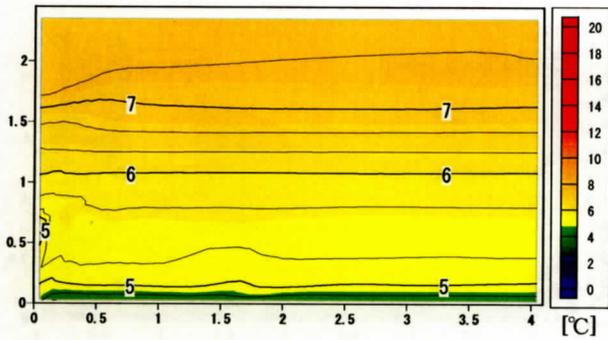
図 3-2-57 温度分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

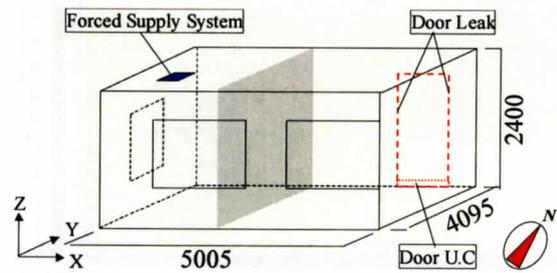
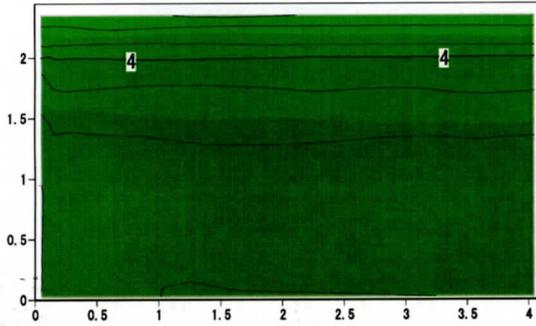
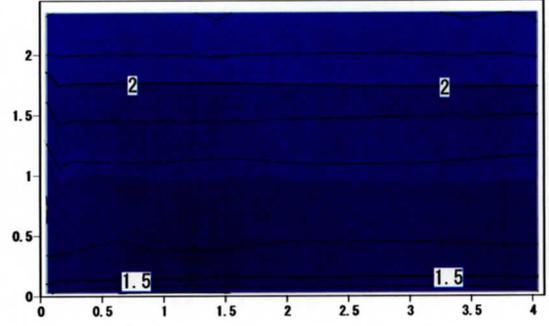


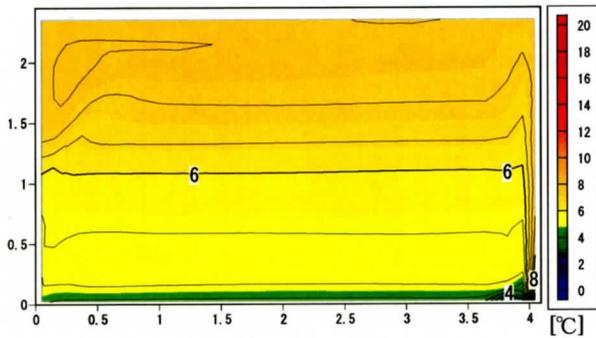
図 3-2-58 温度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

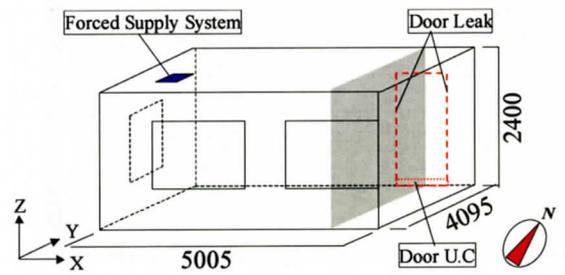
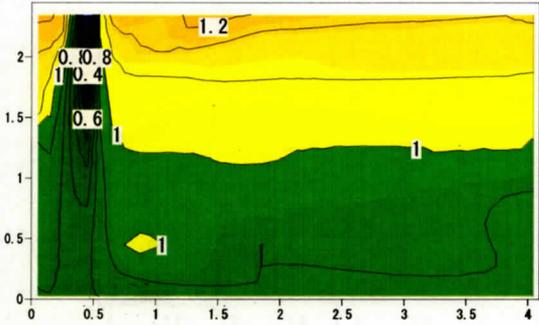
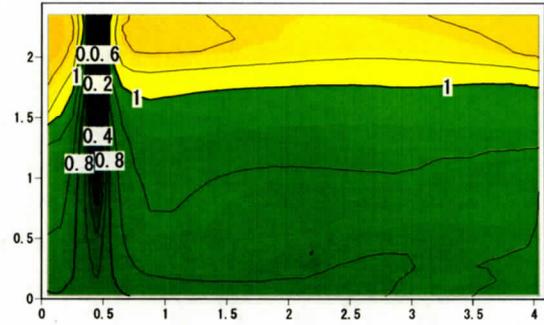


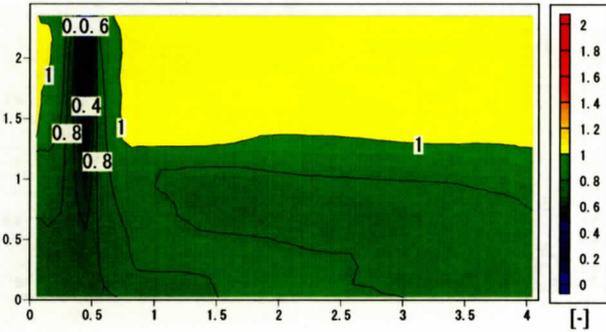
図 3-2-59 温度分布 (YZ 断面 X=4.065m ドア U.C 有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.048



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.998



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.987

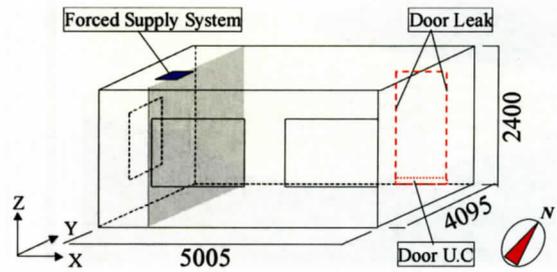
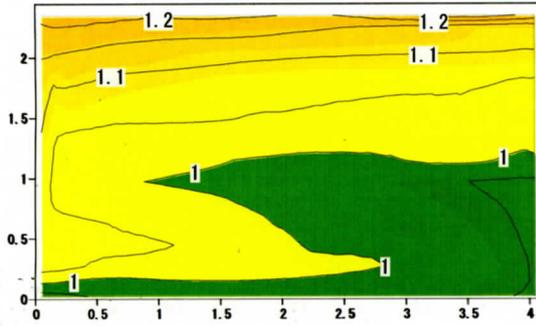
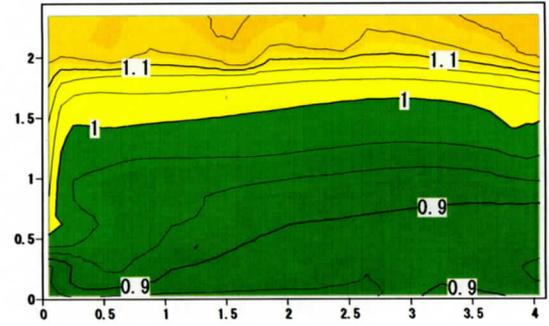


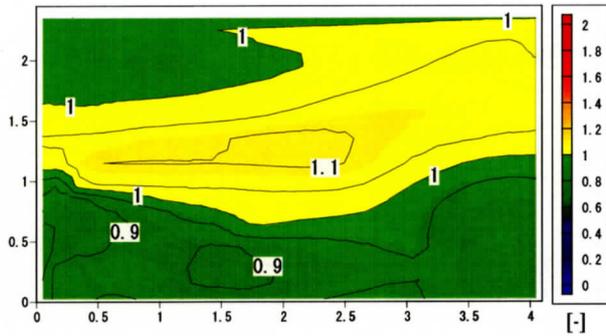
図 3-2-60 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.048



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.998



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.987

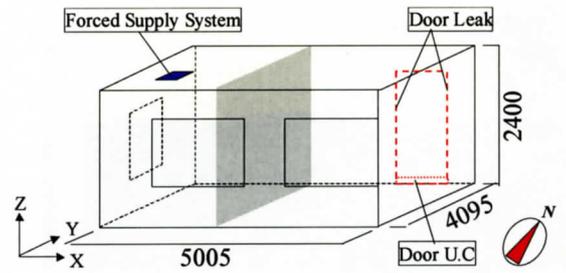
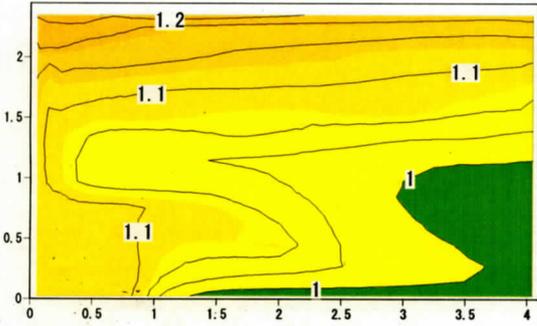
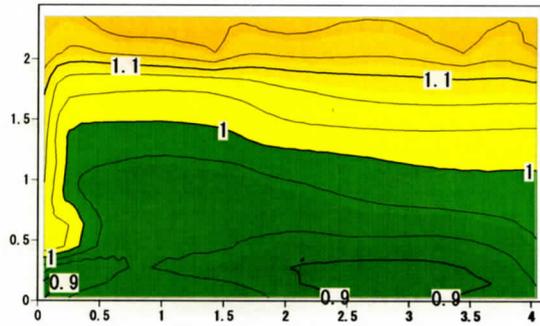


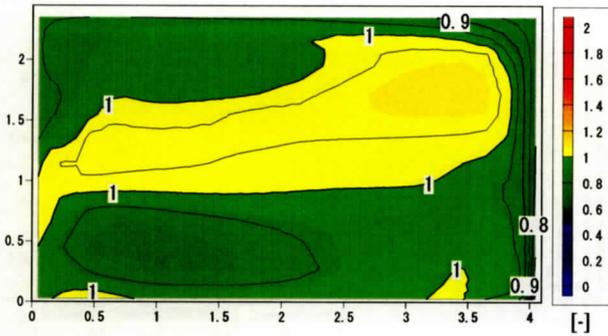
図 3-2-61 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.048



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.998



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.987

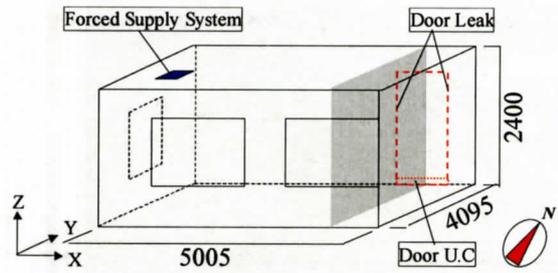
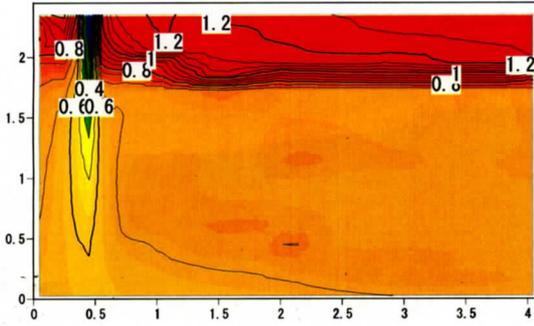
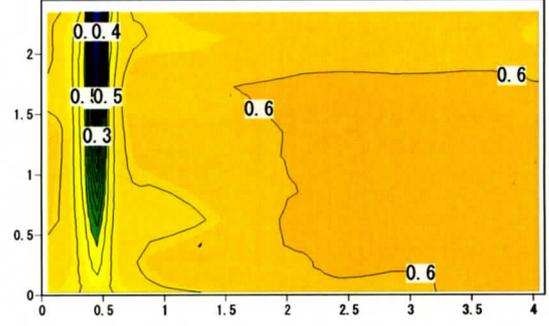


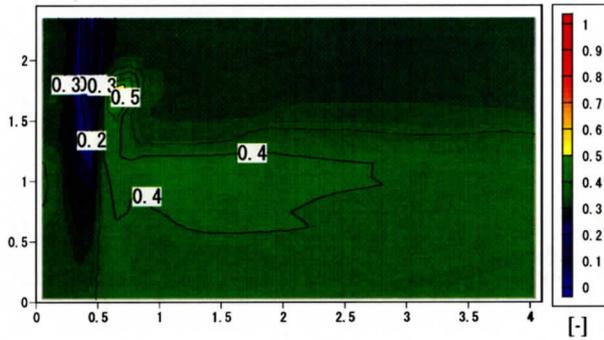
図 3-2-62 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=4.065m ドア U.C 有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.548



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.339

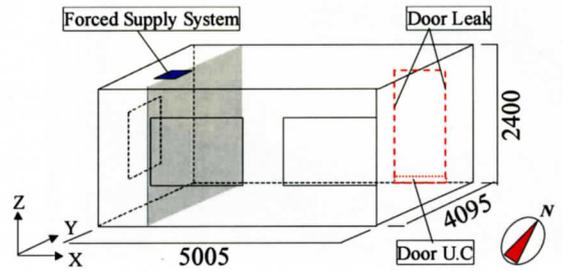
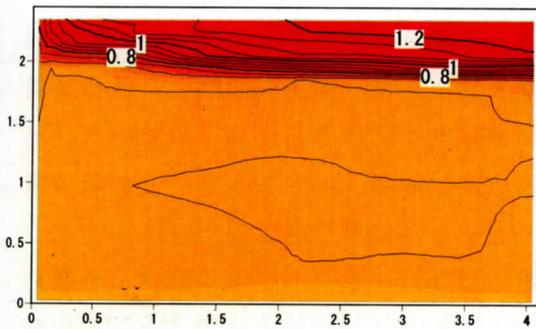
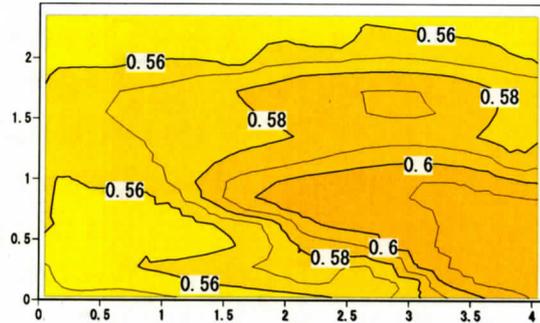


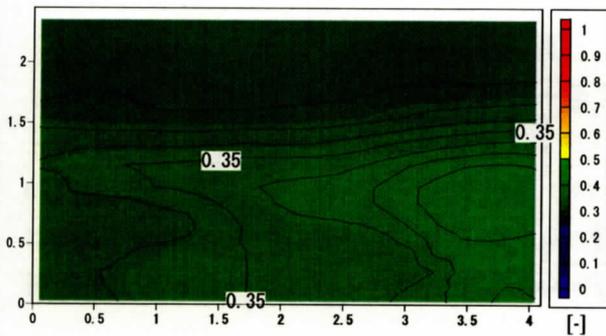
図 3-2-63 濃度分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.548



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.339

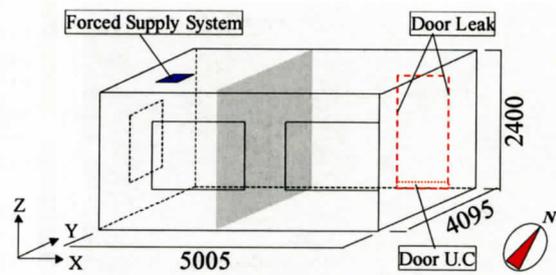
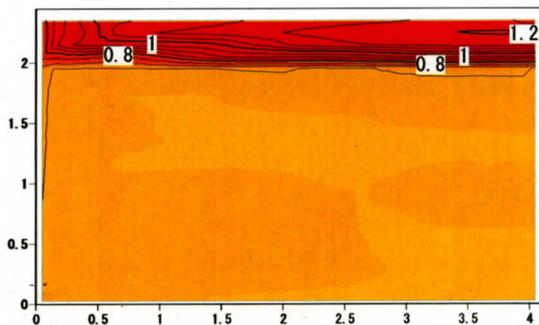
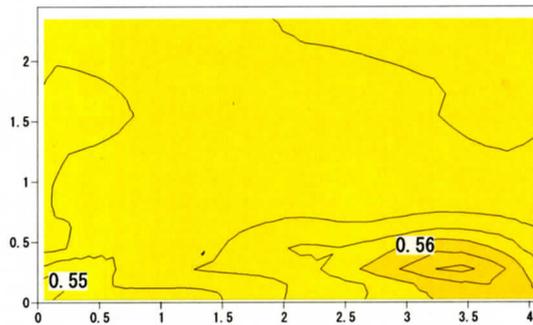


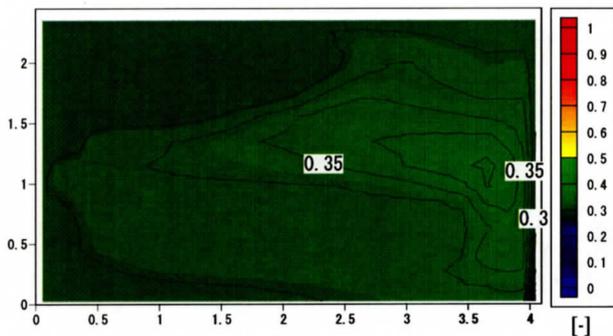
図 3-2-64 濃度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case1 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case5 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.548



(c) Case6 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.339

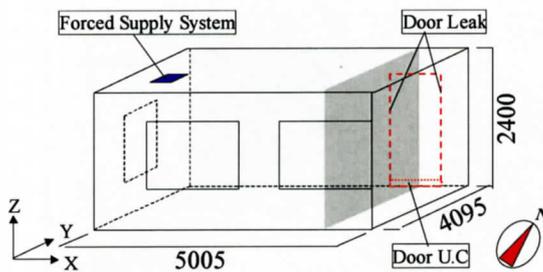


図 3-2-65 濃度分布 (YZ 断面 X=4.065m ドア U.C 有)

(b) 第2種換気システム (Case7、8、11)

図3-2-66にCFD解析ケースとCOMISにより計算された換気量を示す。図3-2-66中の矢印は青が給気、赤が排気を、また網掛け矢印は隙間換気、矢印の大きさは換気量の大小を表している。

(1) 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (図3-2-67～図3-2-69)

図3-2-67～図3-2-69に機械給気を含む断面、室内中心部の窓を含む断面、排気部分である自然換気口を含む断面の風速ベクトルとスカラー風速の分布を示す。Case7では機械給気口から吹き出した空気は、床付近に沿って運ばれ、自然換気口部分から排出されていた。Case7の状態から窓を開放したCase8では、機械給気口から吹き出した空気は、開放した窓部分より排出されていた。空気の排出口である窓付近及び自然換気口付近において高風速の領域がみられる。Case7の状態から隙間を増やしたCase11では、機械給気口から吹き出した空気は、主に壁面の隙間及び自然換気口より排出されている。空気の排出口である自然換気口付近において高風速の領域がみられる。

(2) 温度分布 (図3-2-70～図3-2-72)

図3-2-70～図3-2-72に各ケースの温度分布を示す。どのケースにおいても空間全体で比較的温度が均一に分布していた。Case8、11ではドアの隙間より、室内の暖かい空気が流入していることより、Case7に比べて平均温度が高かった。また、どの断面においても比較的温度が均一に分布していた。

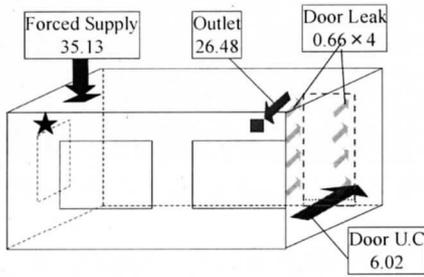
(3) SVE3 (空気齢) の分布 (図3-2-73～図3-2-75)

図3-2-72～図3-2-74に各ケースのSVE3 (空気齢) の分布を示す。どのケースにおいても比較的空間全体で平均空気齢に近い値を示しており、空気がよく攪拌されていた。隙間があるCase11は隙間がないCase7に比べて、若干空気齢に分布がみられた。窓を開放したCase8では、空気の排出口である自然換気口を含む断面においては、他の断面に比べ、空気齢の分布が大きかった。

(4) 測定位置の検討 (図3-2-76～図3-2-78)

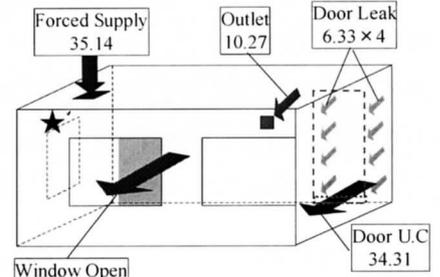
図3-2-76～図3-2-78に各ケースの給気口からガスを発生させた場合の濃度分布を示す。ガスは給気口付近から発生させた (図3-2-66に示す★印の位置。窓を開放したケースは窓を閉じたケースと同じ位置からガスを発生させた。)。給気口付近からガスを発生させた場合、空間の平均濃度が捕集できるガスの捕集位置についての検討を行う。窓を閉じている状態で、気密性能が変化するケース (Case7 (C=0.0) →Case11 (C=5.0)) では主に空間全体的において空気がよく攪拌されていることが確認された。これらのケースにおいて平均濃度に近い値を示す領域として、空気が流出する付近の高さ1.5m付近にサンプラーを設置することが最適であると言える。Case7の窓を閉じた状態から窓を開放した状態に変更したCase8では、先ほどCase7で最適な設置位置とされたドア部の高さ1.5m付近で平均濃度に近い値を示す領域がみられる。これは空気の給気場所が変わらないため、ガスが吹き出し空気に運ばれ、室内である程度攪拌することが原因であると考え

られる。以上より、窓の開閉に関わらず平均濃度に近い値を示す領域として排気付近の高さ 1.5m 付近にサンプラーを設置することが最適であると言える（窓を開放した場合の設置位置について、今回は窓を開放した場合、風速や風向の変化の影響を考慮していないことに注意する必要がある）。



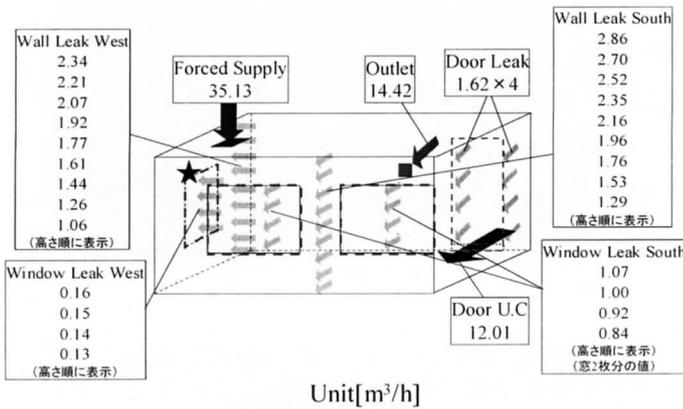
Unit[m³/h]

(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



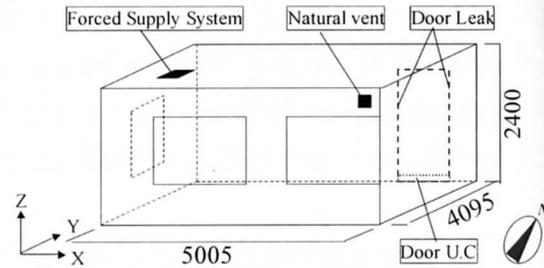
Unit[m³/h]

(b) Case8 (C=0.0 窓開)



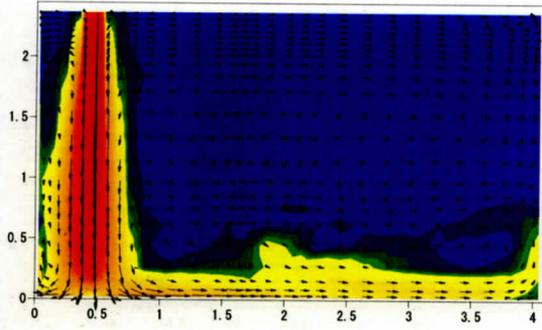
Unit[m³/h]

(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

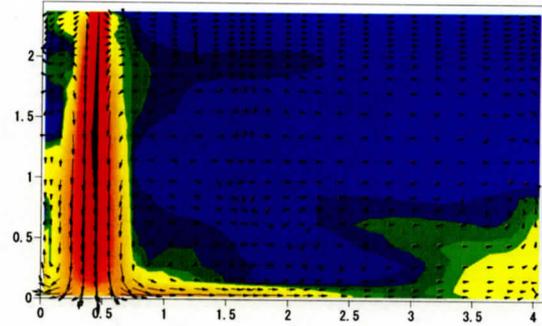


※★はガス一点発生の場合の発生位置

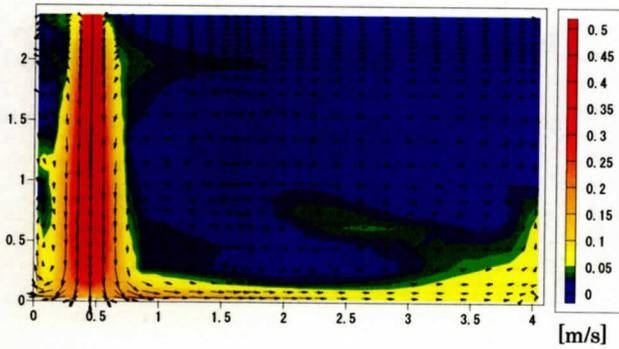
図 3-2-66 CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量 (Case7, 8, 11)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

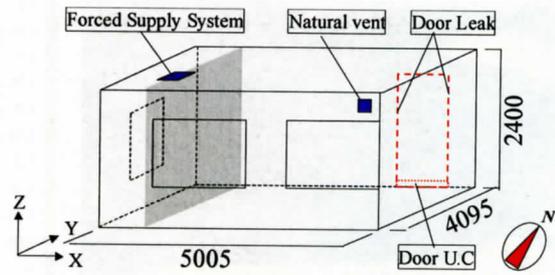
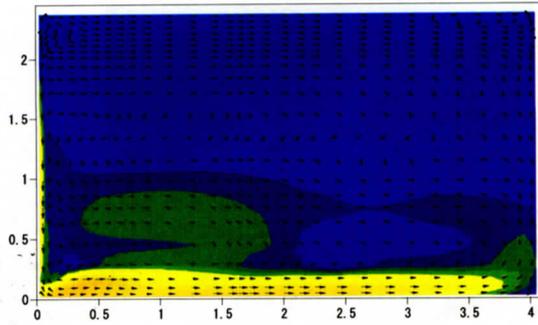
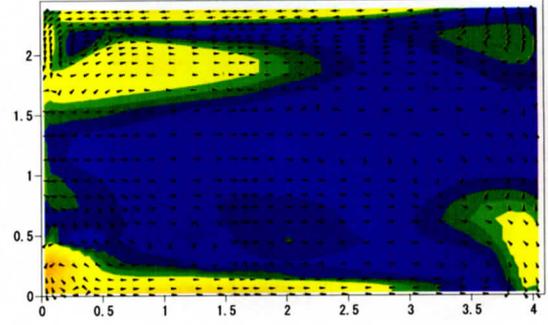


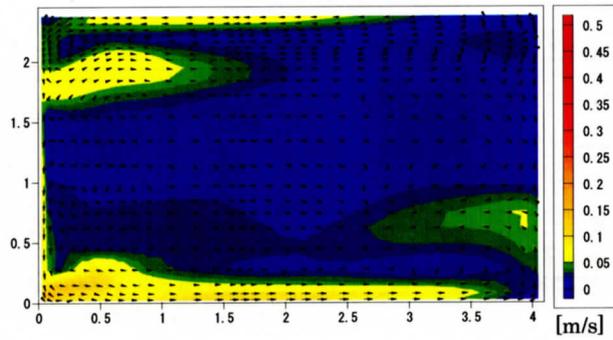
図 3-2-67 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

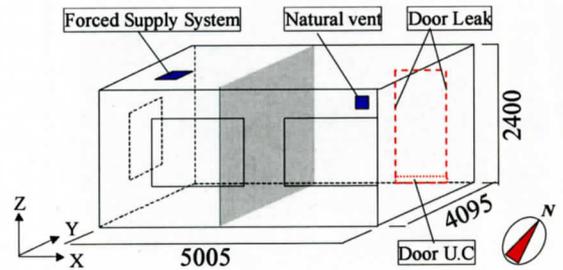
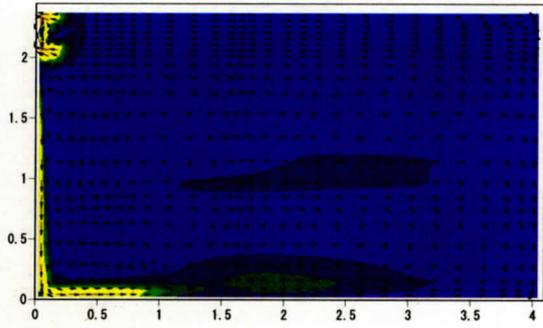
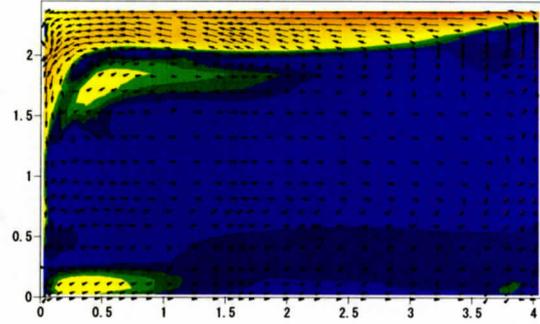


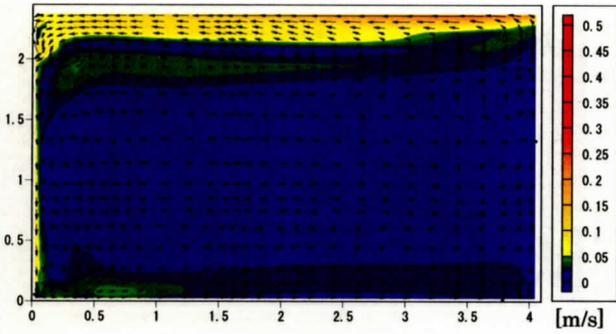
図 3-2-68 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

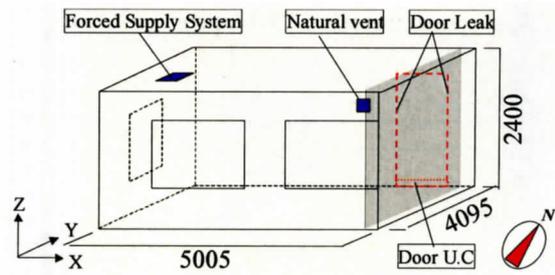
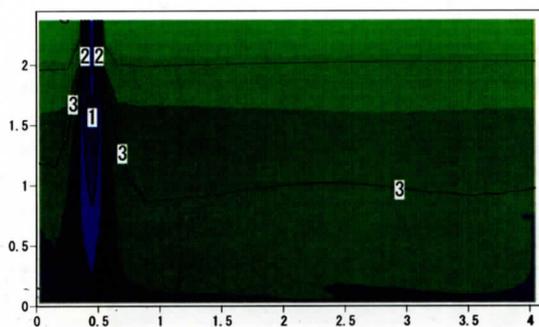
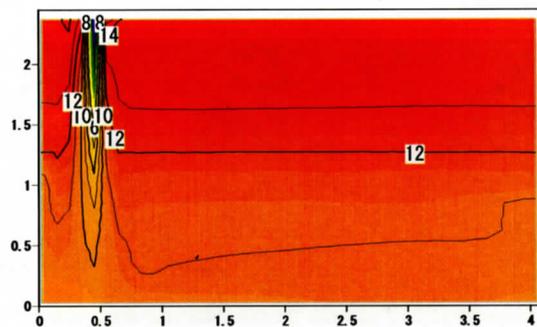


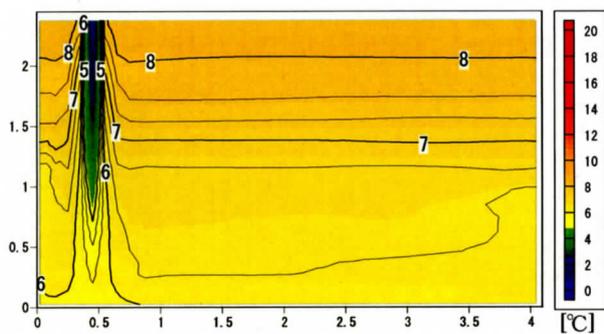
図 3-2-69 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=4.675m 自然換気口有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

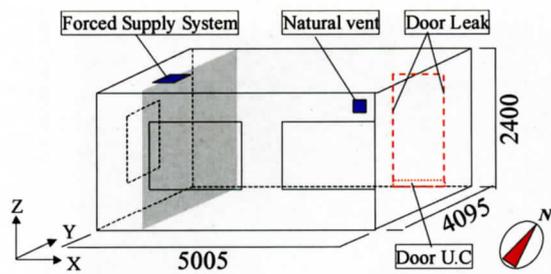
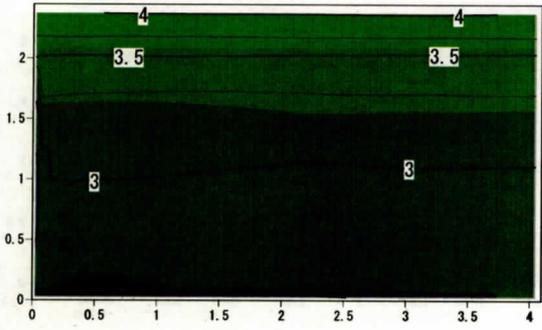
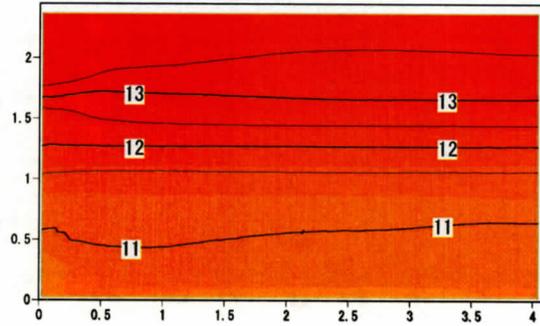


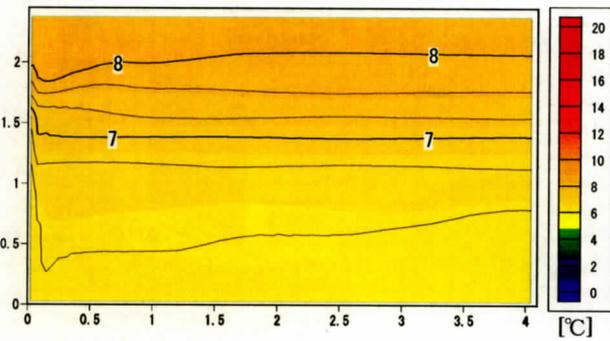
図 3-2-70 温度分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

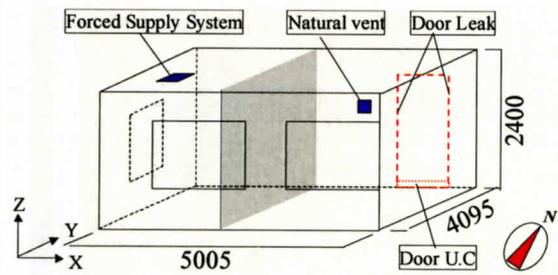
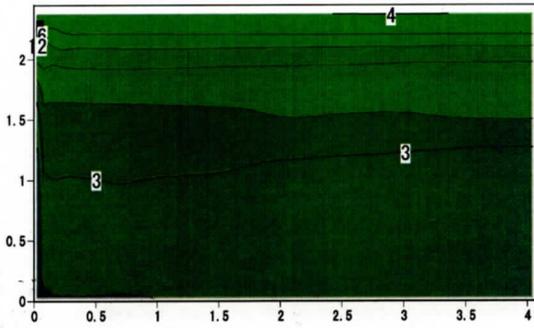
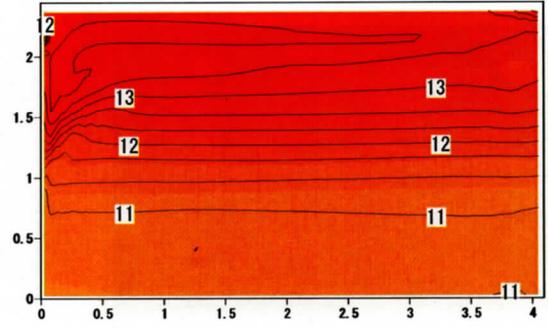


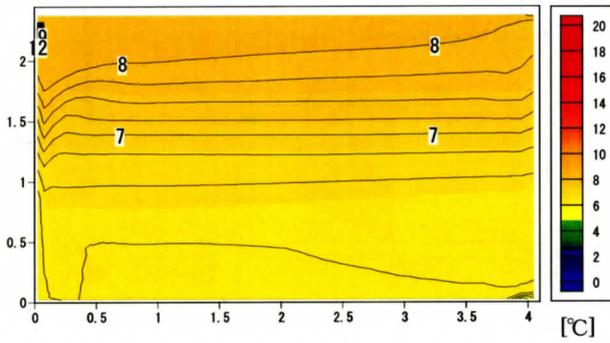
図 3-2-71 温度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)



(b) Case8 (C=0.0 窓開)



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

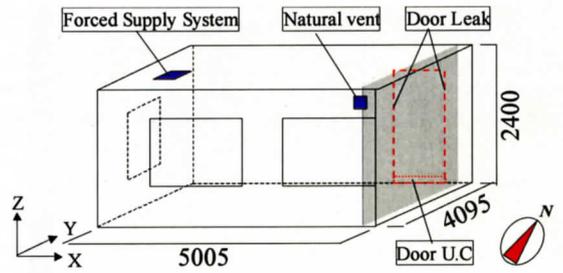
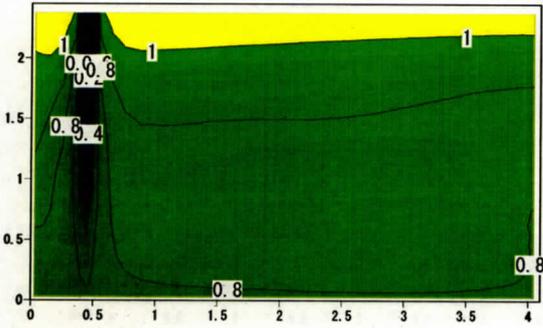
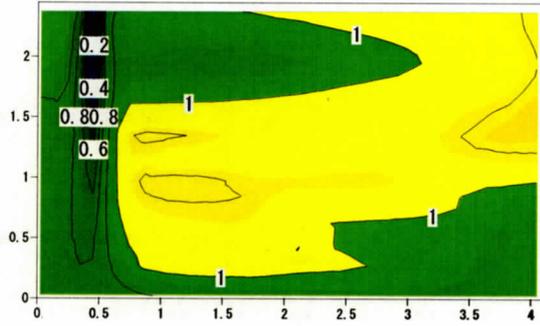


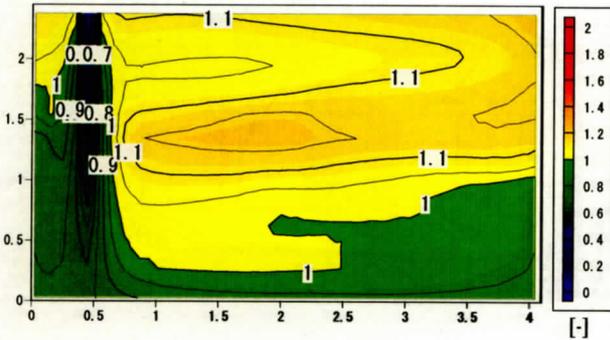
図 3-2-72 温度分布 (YZ 断面 X=4.675m 自然換気口有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.909



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.000



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 1.042

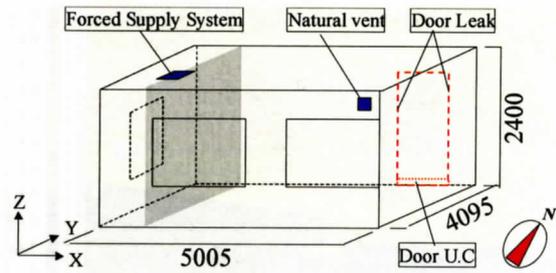
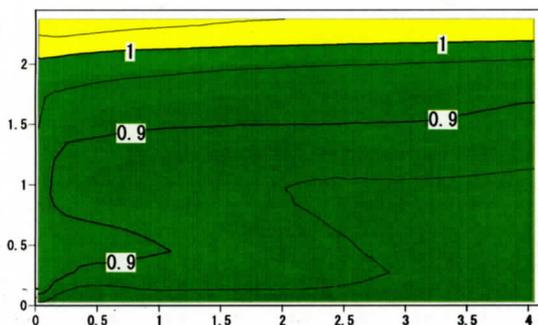
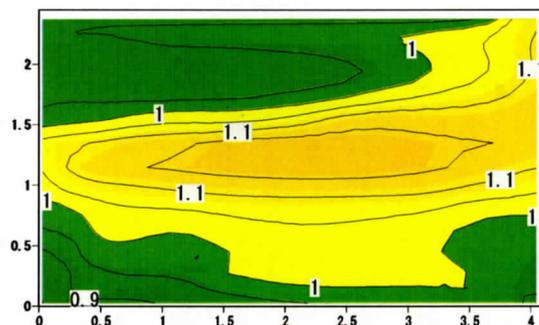


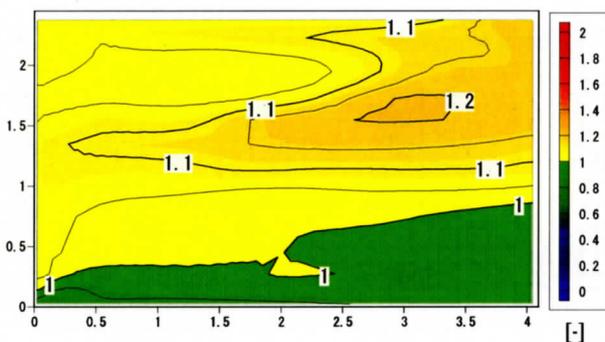
図 3-2-73 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.909



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.000



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 1.042

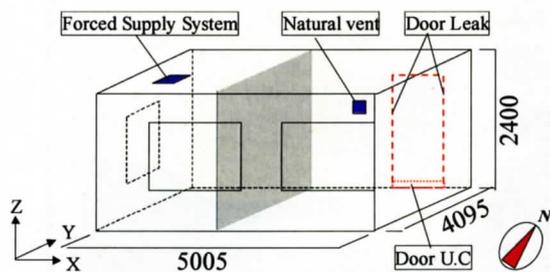
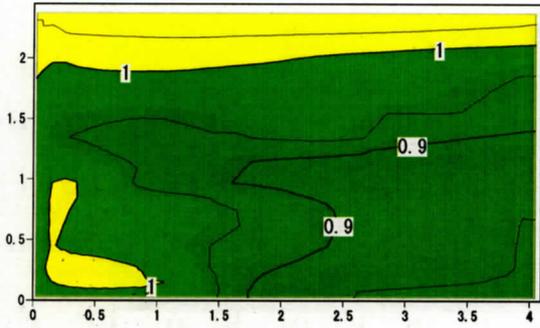
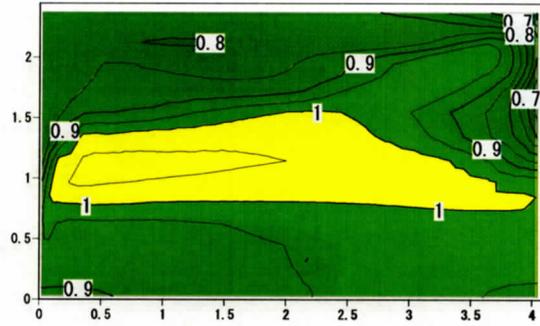


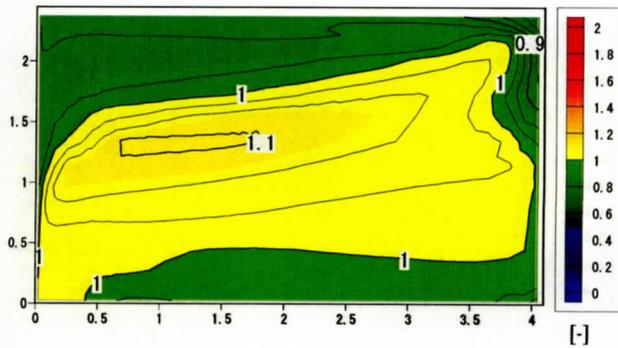
図 3-2-74 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.909



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.000



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 1.042

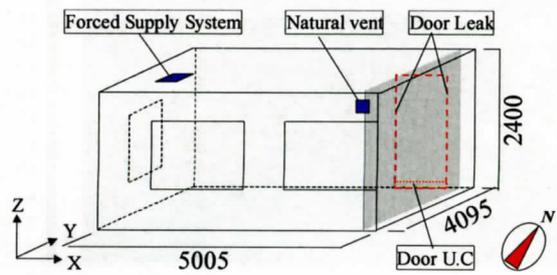
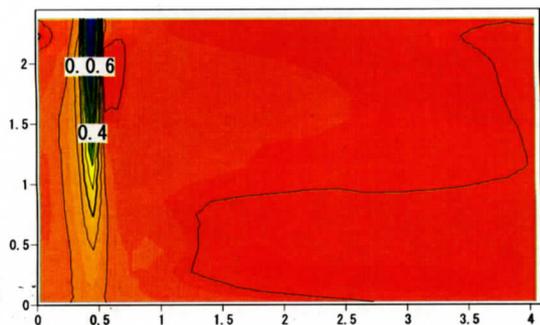
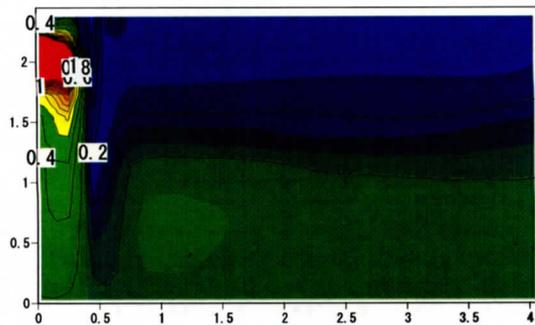


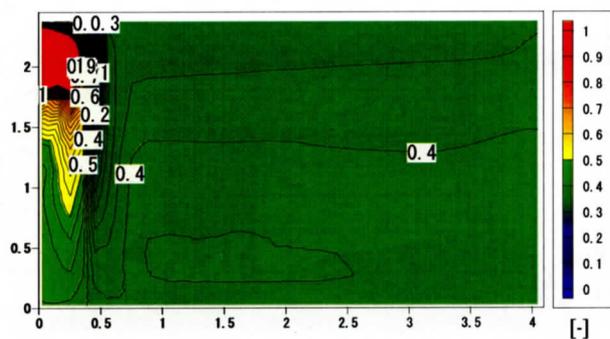
図 3-2-75 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=4.675m 自然換気口有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.290



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.410

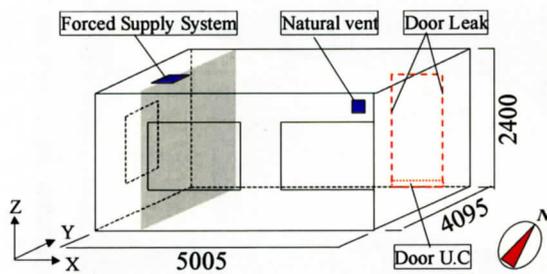
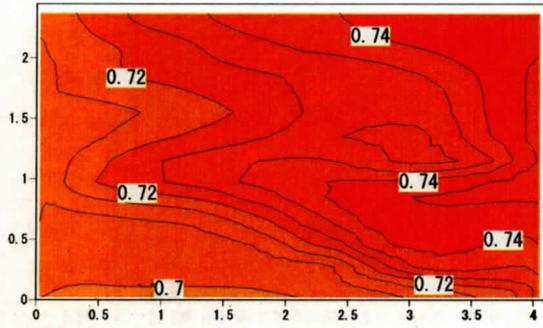
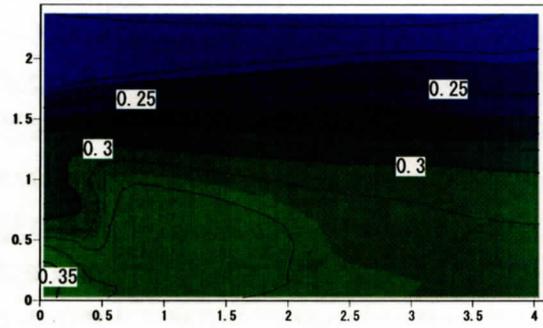


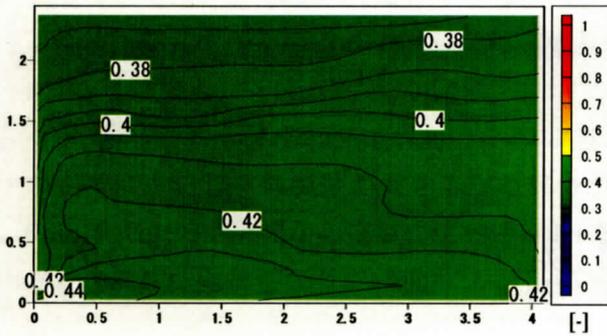
図 3-2-76 濃度分布 (YZ 断面 X=0.45m 機械給気有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.290



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.410

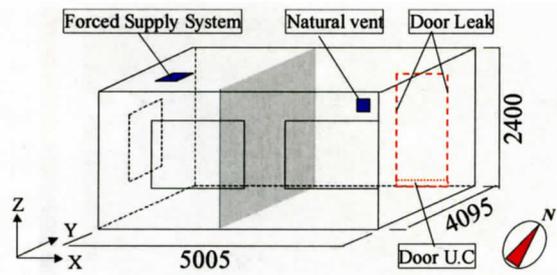
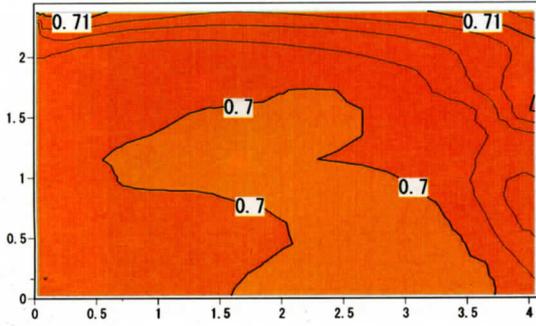
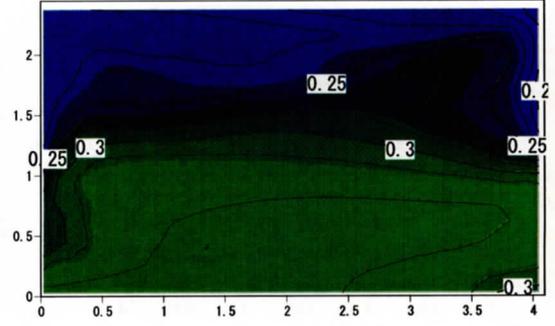


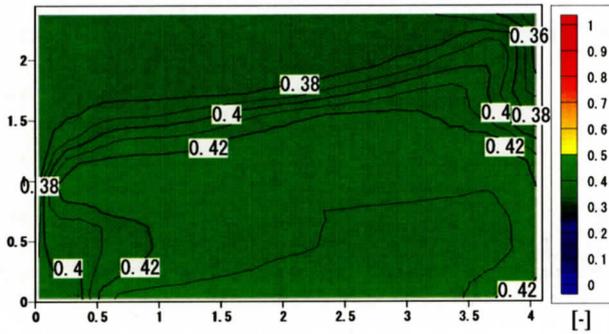
図 3-2-77 濃度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



(a) Case7 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.729



(b) Case8 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.290



(c) Case11 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 0.410

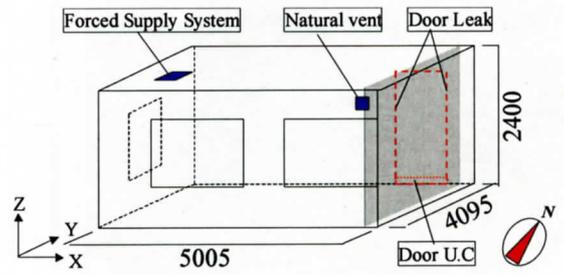


図 3-2-78 濃度分布 (YZ 断面 X=4.675m 自然換気口有)

(c) 第3種換気システム (Case13~15、17、18)

図 3-2-79 に CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量を示す。図 3-2-79 中の矢印は青が給気、赤が排気を、また網掛け矢印は隙間換気、矢印の大きさは換気量の大小を表している。

(1) 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (図 3-2-80~図 3-2-82)

図 3-2-80~図 3-2-82 に各ケースの風速ベクトルとスカラー風速の分布を示す。自然換気口を含む断面を示す図 3-2-80 より、自然換気口から室内に空気が流入する Case13 では換気口より吹き出した冷気が壁面に沿って、勢いよく流入していることが分かる。それ以外のケースでは自然換気口から室外に空気が流出している。Case14 では換気口付近にのみ強い風速が見られるが、Case15、Case17 では床付近及び窓面に比較的強い風速領域が見られる。これは壁面及び窓面においては室温と比べ相対的に温度の低い隙間風により下降気流が形成され、風速が大きくなっている。Case18 においても壁面及び窓面から流入する隙間風の影響が考えられるが、Case18 においては大開口である窓面からの冷気の流入のため Case15、Case17 よりも室内温度の低下が激しく、(実時間 2 時間の時点においては) 壁面及び窓面から流入する冷気と室内の温度が同等になり、Case15、Case17 のような強い下降流が生じないため図のような風速分布となる。

開閉する条件の窓面を含む断面を示す図 3-2-81 より、窓を閉じている条件は Case13、15、17 であるが、隙間風の影響がない Case13 では室中央部において風速の強い領域がみられる。気密性能の異なる Case15 と 17 では窓面を含む断面における風速分布に大きな差は見られない。窓を開放している条件の Case14、18 において、両ケース共に窓面から吹き出す冷気により風速の大きい下降流が生じているが Case14 は Case18 より窓から吹き出す風速が大きいため、その影響範囲は大きい。

ドアの隙間を含む断面を示す図 3-2-82 より、全てのケースにおいて壁面及び窓面からの隙間風の影響により、一部風速が大きくなる部分が見られるが、風速分布に大きな差は見られない。Case17 はドアの隙間から室温に比べ相対的に温度の高い隙間風が流入するため、上昇気流が形成され、風速が大きくなっている。

(2) 温度分布 (図 3-2-83~図 3-2-85)

図 3-2-83~図 3-2-85 に各ケースの温度分布を示す。Case13 では比較的空気がよく攪拌されており、均一な温度分布となっている。それ以外のケースは温度成層が形成されているが、窓を開放した Case14、18 は窓を閉鎖した Case15、17 よりも温度の低下が著しい。また、Case13 より給気口においては外気が下降している様子が見られる。

(3) SVE3 (空気齢) の分布 (図 3-2-86~図 3-2-88)

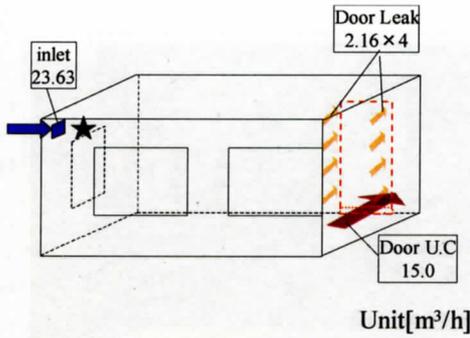
図 3-2-86~図 3-2-88 に各ケースの SVE3 (空気齢) の分布を示す。窓を閉鎖しており、隙間のない Case13 では比較的空間全体で平均空気齢に近い値を示しており、空気がよく攪拌されていることがわかる。また、窓を閉じており、気密性能の異なる Case15 (C=2.0) と Case17 (C=5.0) では、自然換気口以下の高さにおいて、空気がよく攪拌されていることがわかる。以上より窓を閉

じている状態で、気密性能が変化するケース (Case13 (C=0.0) →Case15 (C=2.0) →Case17 (C=5.0)) では主に空間全体的において空気がよく攪拌されていることが確認された。ただし、隙間を設けたケースにおいては、自然換気口以上の高さにおいて、空気が澱む領域がみられた。

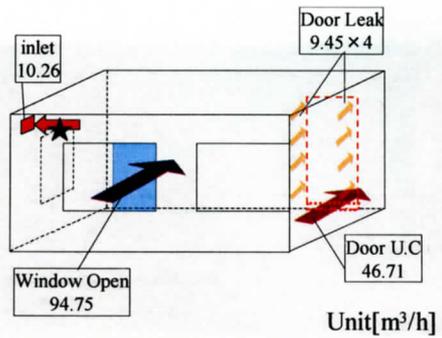
次に窓を開放した場合、隙間のない Case14 では、窓から流入した大部分の冷気が下降流となり、床付近に沿って室内ドアのアンダーカットより流出する経路をとる。これがショートサーキットとなるため、室内で十分に空気が攪拌されず室高さ 1/2 以上の領域においては空気齢が高く、空気が澱む領域がみられた。隙間を設けた Case18 (C=5.0) では、隙間のない Case14 ほど顕著ではないが、主に Case14 と同様の換気経路をとるため、室内において濃度成層が形成され、天井付近においては空気齢が高く、空気が澱む領域が確認された。以上より、窓を開放した状態では、窓を閉じた状態に比べて空気の攪拌が抑制され、室内で濃度成層が形成されることが確認された。

(4) 測定位置の検討 (図 3-2-89～図 3-2-91)

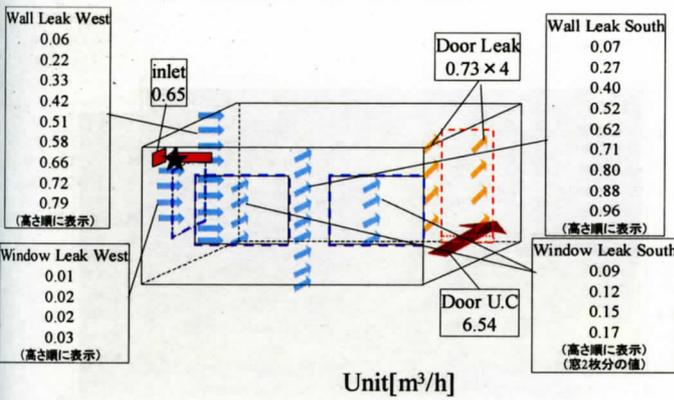
図 3-2-89～図 3-2-91 に各ケースの給気口からガスを発生させた場合の濃度分布を示す。ガスは給気口付近から発生させた (図 3-2-79 に示す★印の位置。窓を開放したケースは窓を閉じたケースと同じ位置からガスを発生させた。)。給気口付近からガスを発生させた場合、空間の平均濃度が捕集できるガスの捕集位置についての検討を行う。窓を閉じている状態で、気密性能が変化するケース (Case13 (C=0.0) →Case17 (C=5.0)) では主に空間全体的において空気がよく攪拌されていることが確認された。今回 Case15 では、自然換気口からガスを発生させたが、空間全体にうまくガスが拡散しなかった。Case15 は主に隙間から給気されているため、今後、ガスの発生位置について検討する必要がある。これらのケースにおいて平均濃度に近い値を示す領域として、空気が流出する付近の高さ 1.5m 付近にサンプラーを設置することが最適であると言える。それぞれのケースの窓を閉じた状態から窓を開放した状態に変更した場合、いずれのケースにおいても給気部分であった場所が排気場所に変化することにより、ガスが室内にうまく拡散されず、空間全体的に濃度が 0 に近い値を示した。以上より、窓を閉じたケースでは平均濃度に近い値を示す領域として排気付近の高さ 1.5m 付近にサンプラーを設置することが最適であると言える。一方、窓を閉じた状態から開放した状態にした場合、換気経路の変化により、ガスがうまく拡散せず窓を閉じた場合の最適なガス捕集位置においてはほとんど濃度が得られていなかったことより、窓開放による換気回数 of 過大評価の実態を明らかにした。窓を閉じた状態から開放した状態にした場合、測定を行うことが困難であると考えられる。



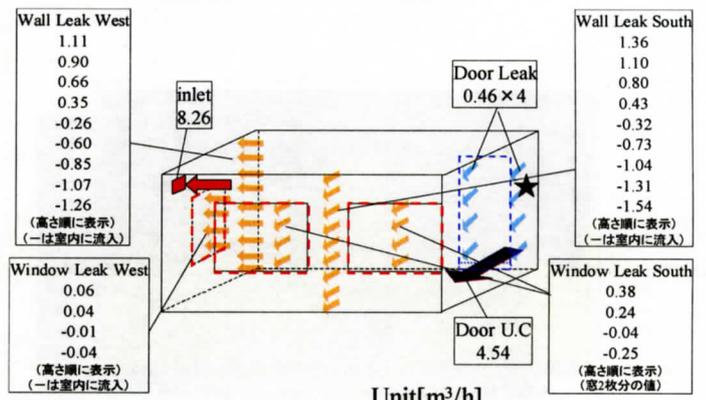
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



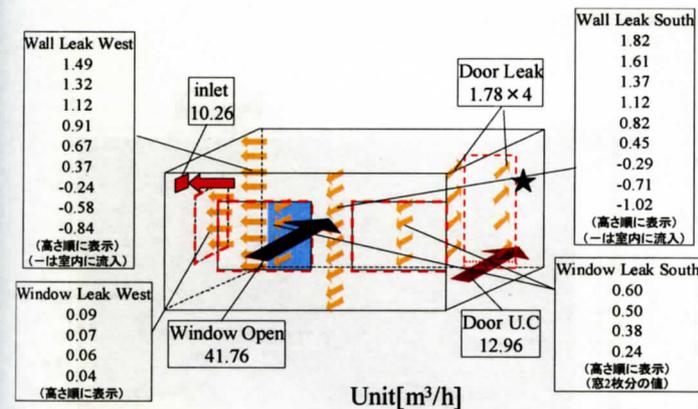
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



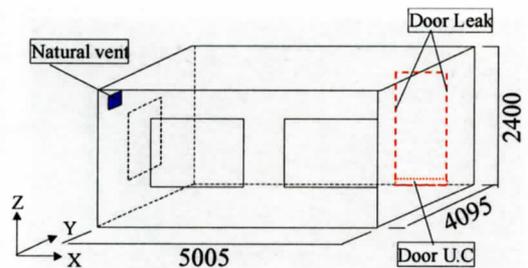
(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)

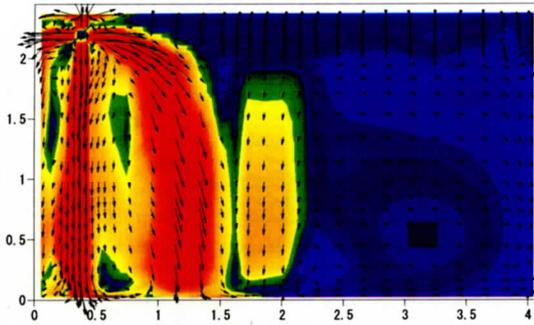


(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

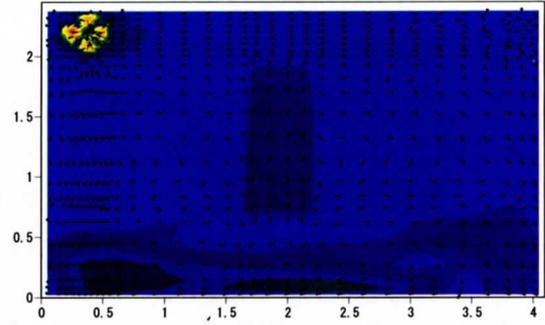


※★はガス一点発生の場合の発生位置

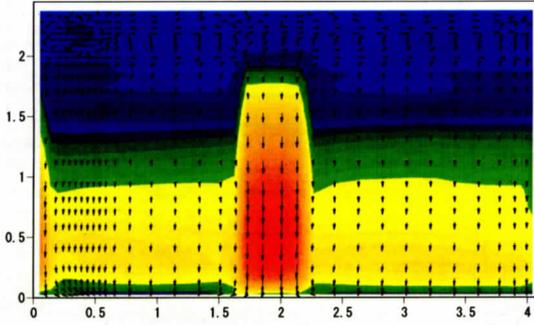
図 3-2-79 CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量 (Case13~18)



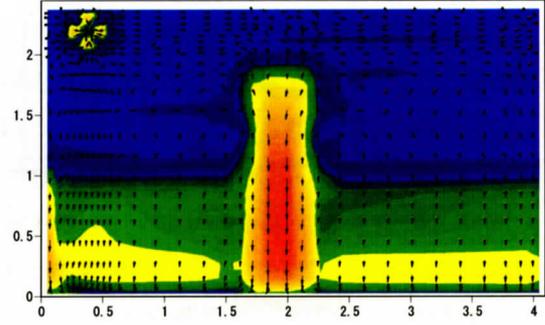
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



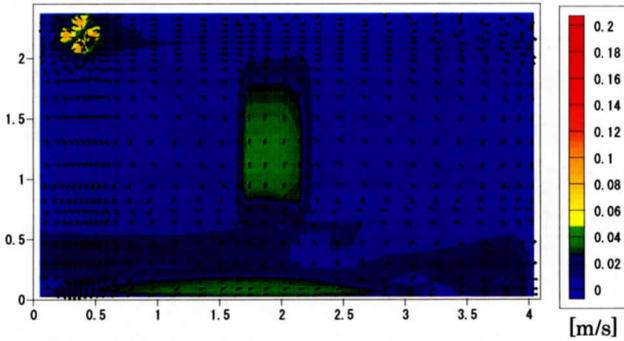
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

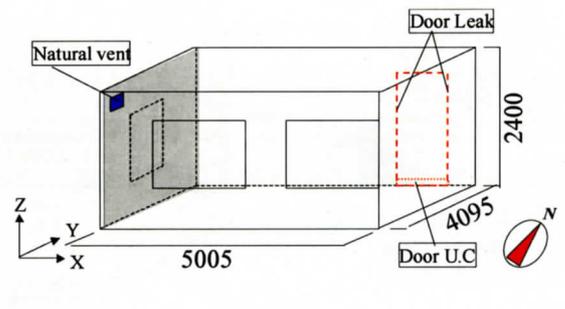
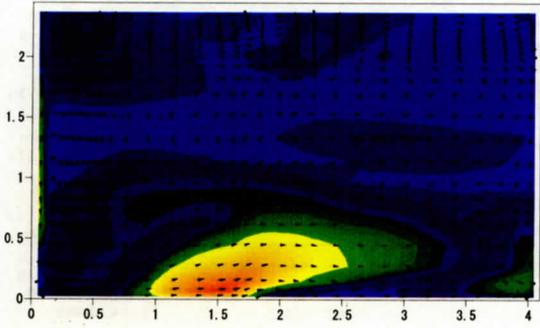
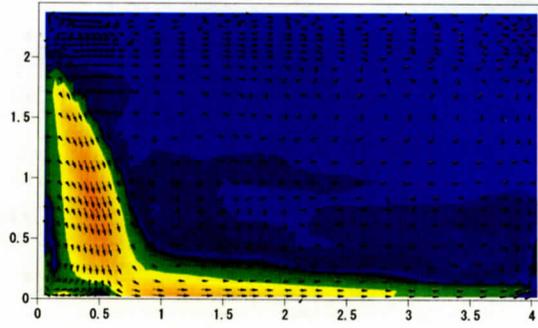


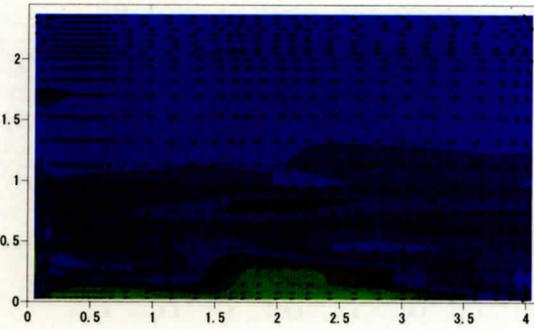
図 3-2-80 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



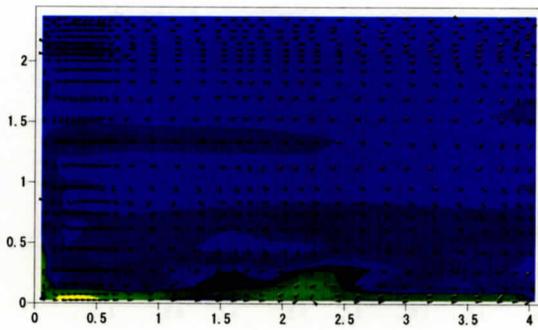
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



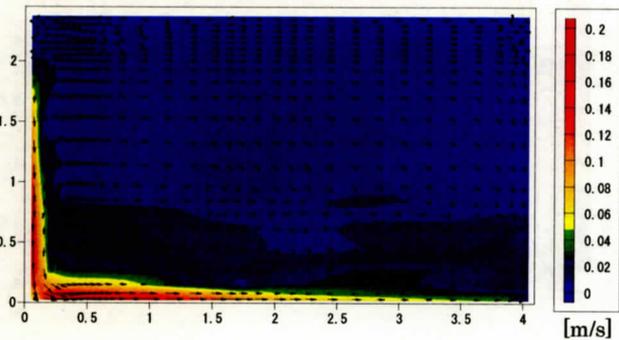
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

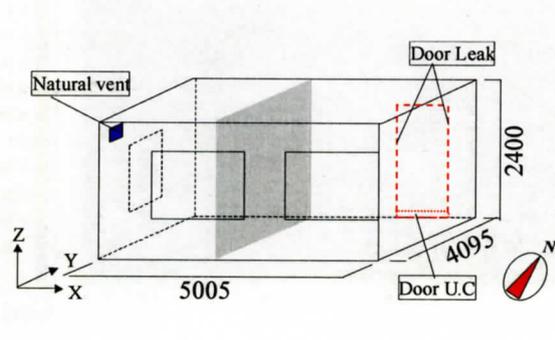
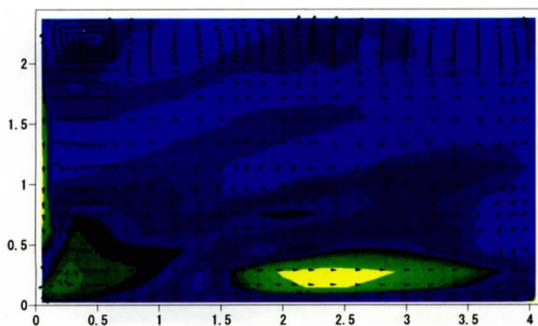
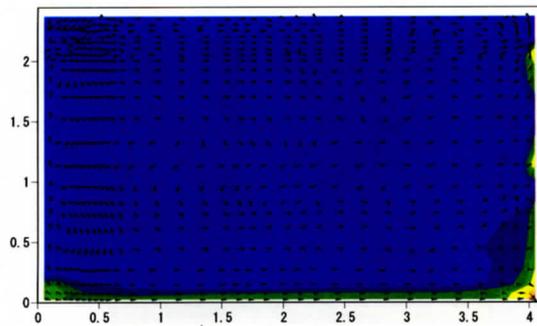


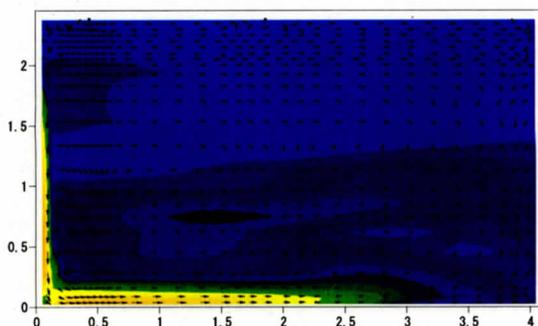
図 3-2-81 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



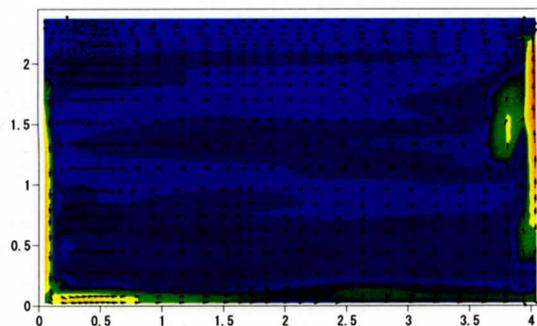
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



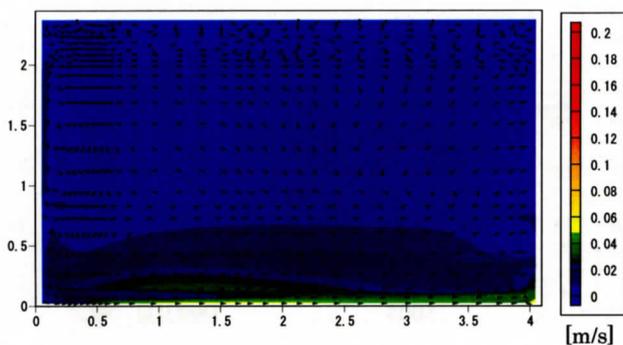
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

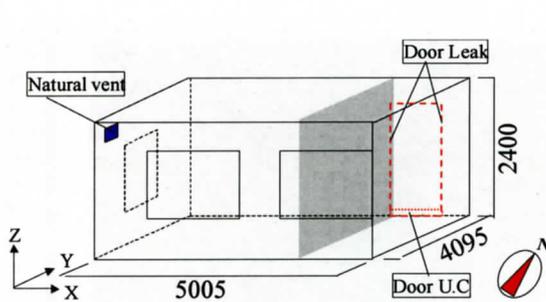
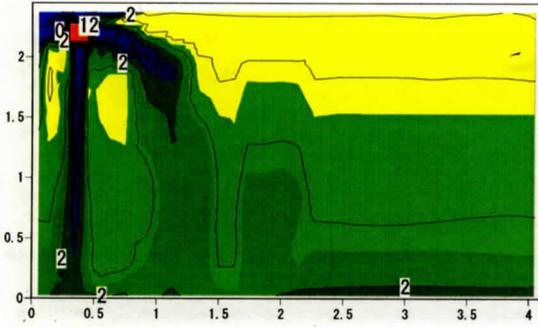
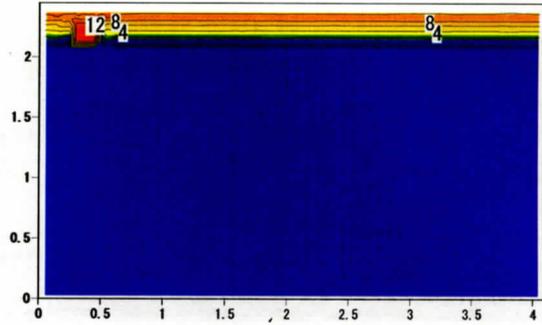


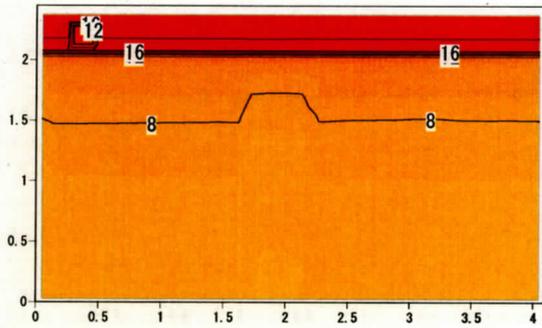
図 3-2-82 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=3.79m 窓、ドア隙間有)



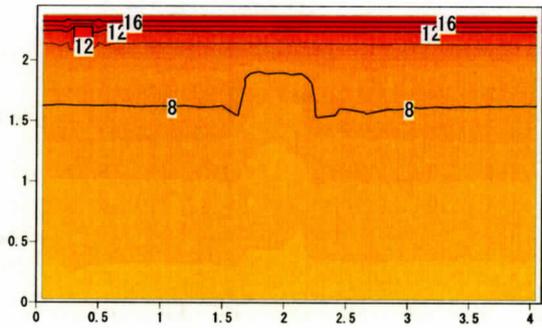
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



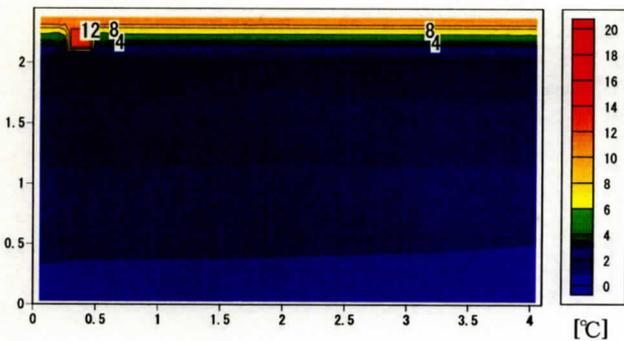
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

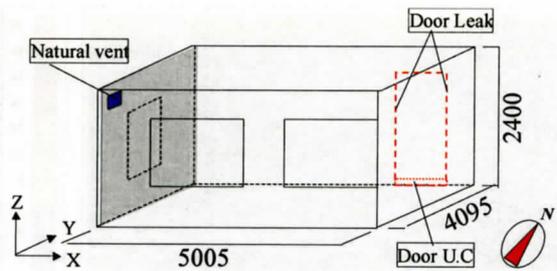
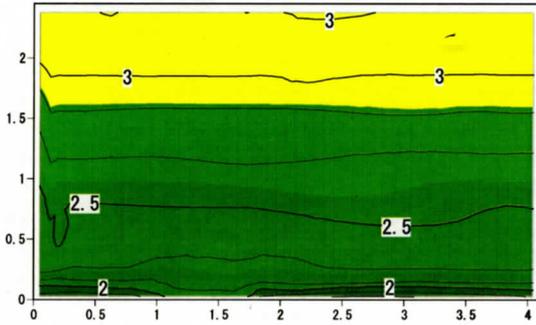
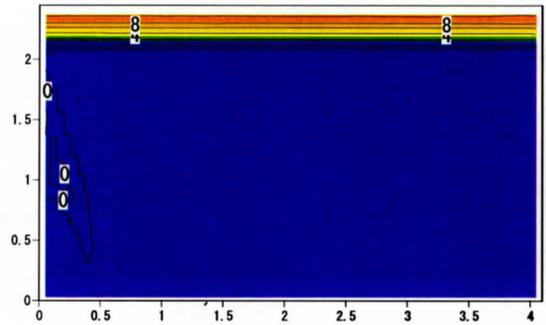


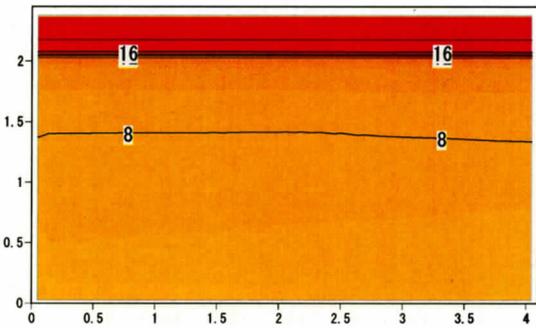
図 3-2-83 温度分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



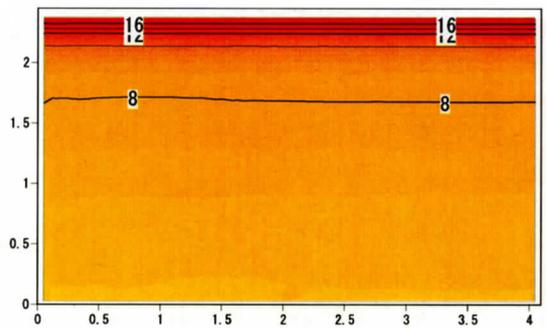
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



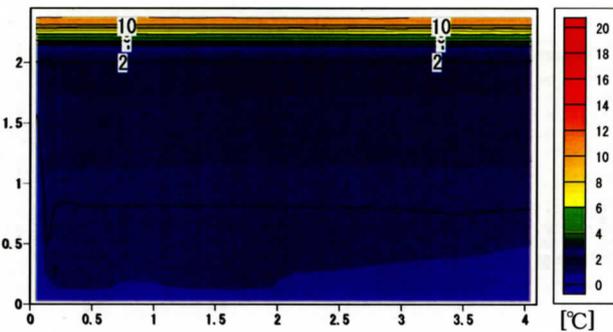
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

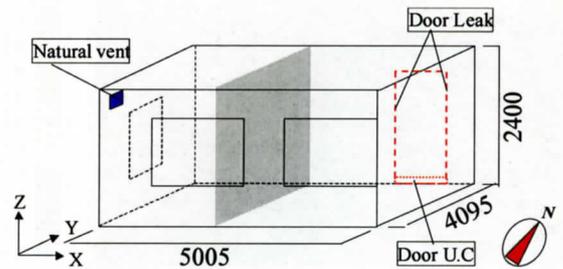
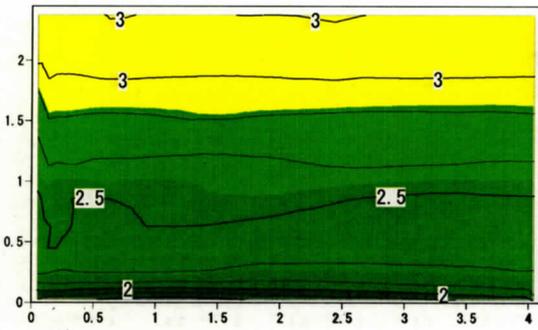
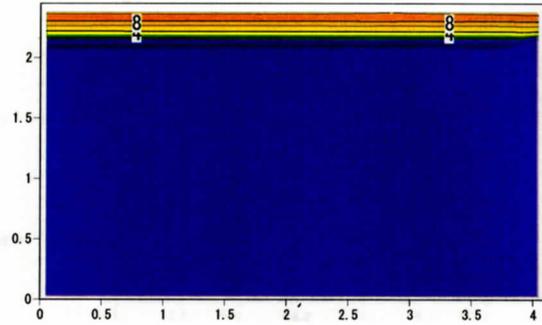


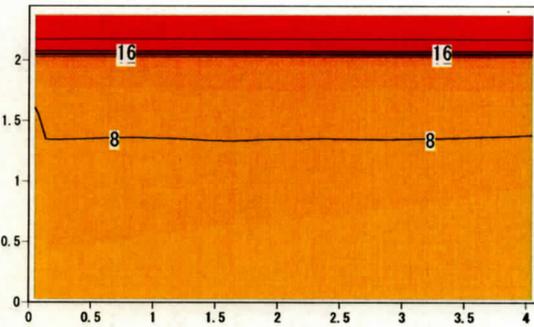
図 3-2-84 温度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



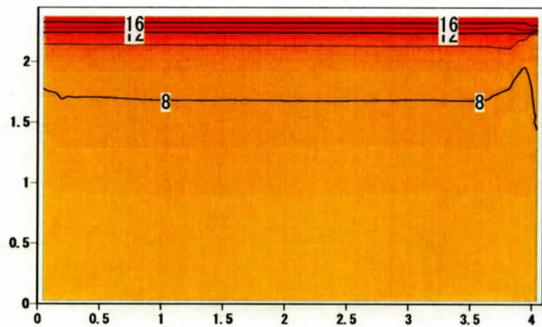
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)



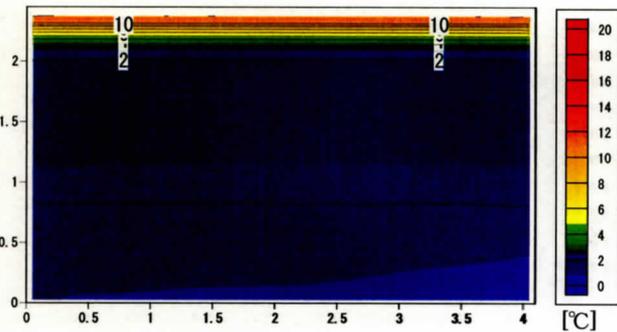
(b) Case14 (C=0.0 窓開)



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)

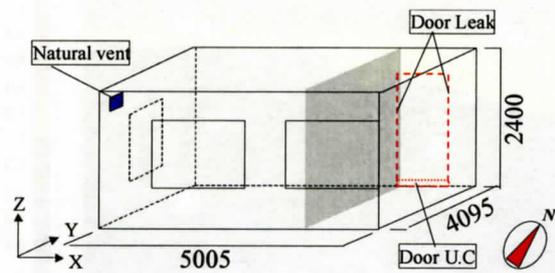
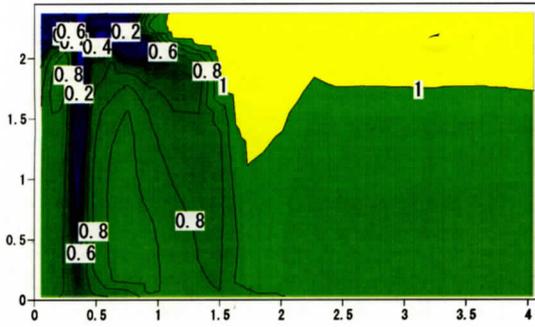
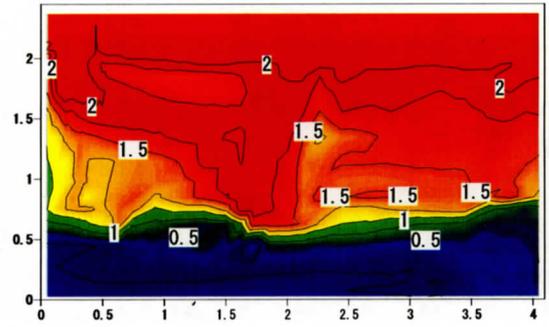


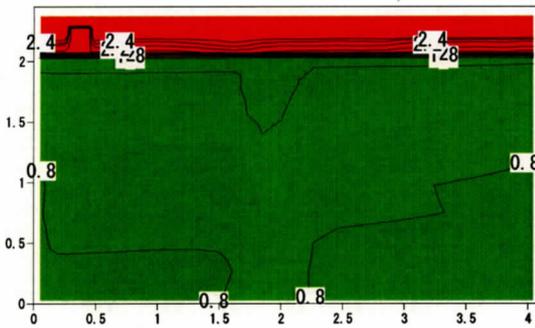
図3-2-85 温度分布 (YZ断面 X=3.79m 窓、ドア隙間有)



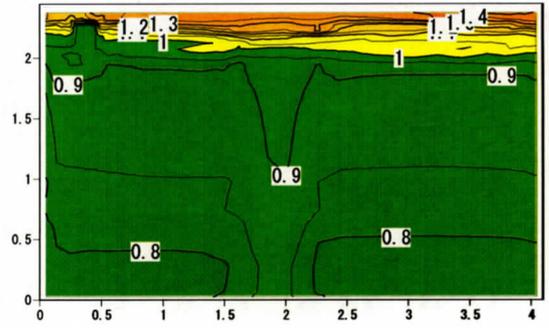
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.955



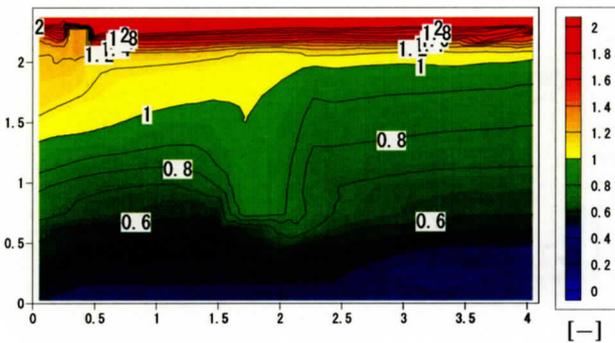
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.421



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均空気齢 1.119



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.887



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.949

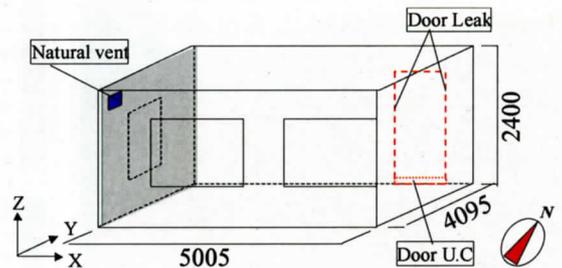
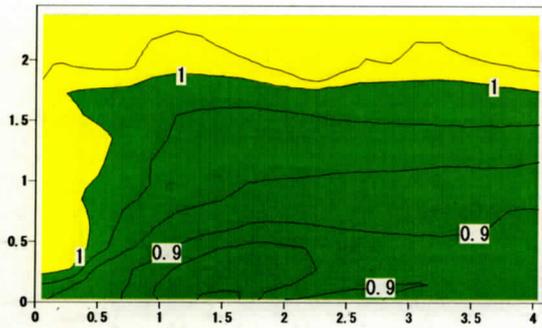
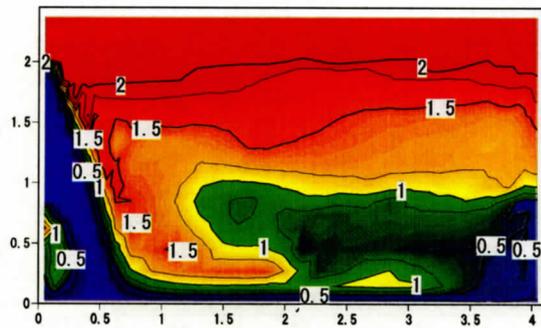


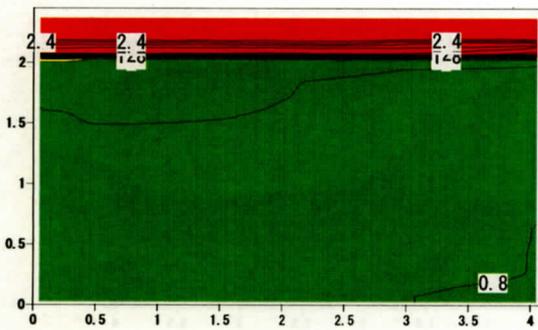
図 3-2-86 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



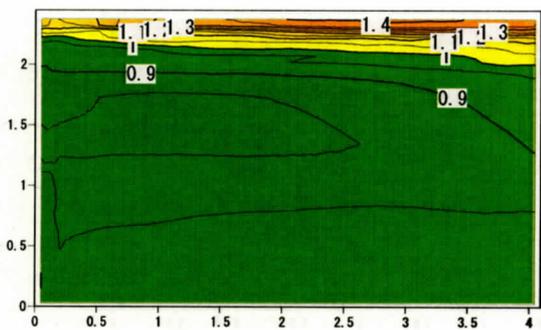
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.955



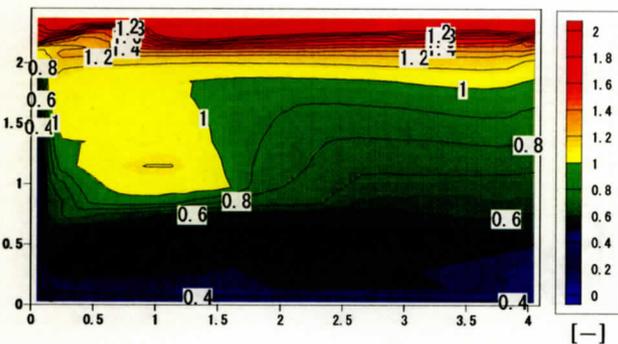
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.421



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均空気齢 1.119



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.887



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.949

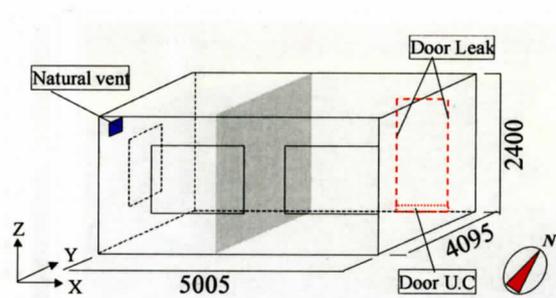
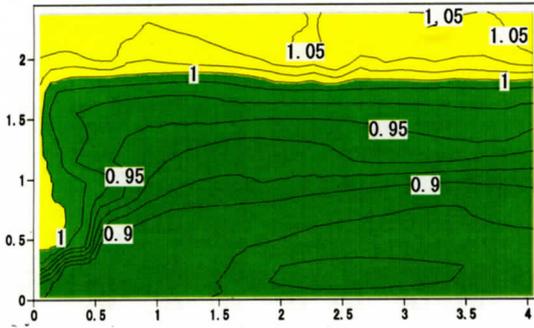
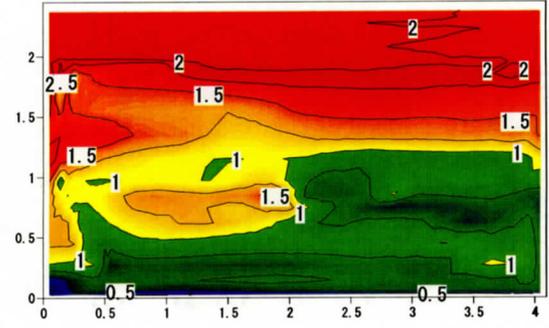


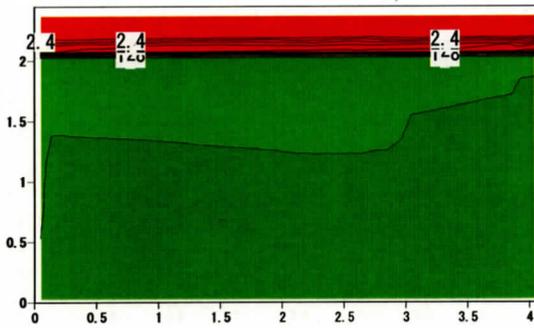
図 3-2-87 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



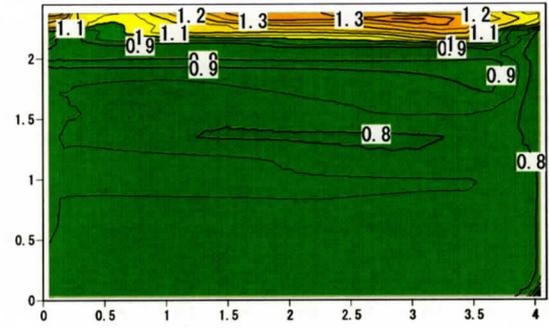
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 0.955



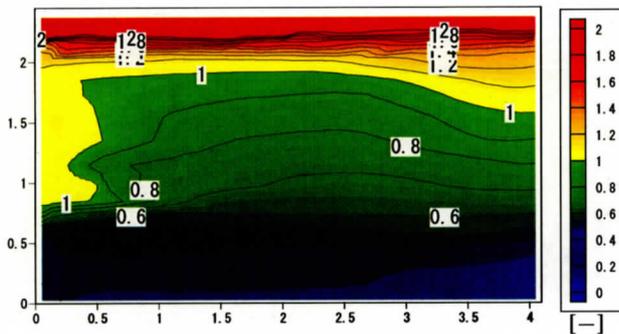
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 1.421



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均空気齢 1.119



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均空気齢 0.887



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均空気齢 0.949

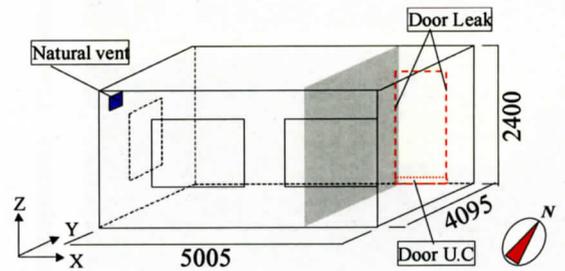
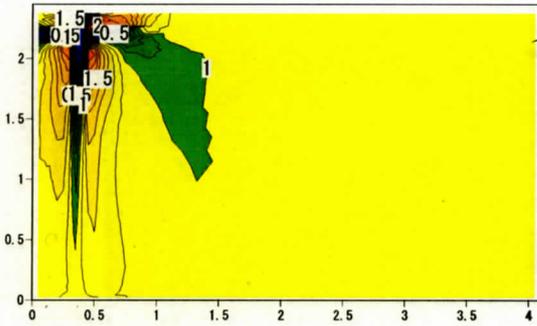
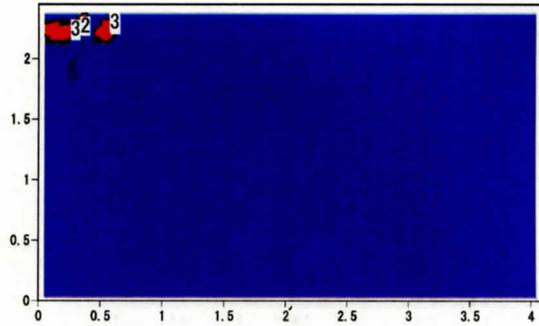


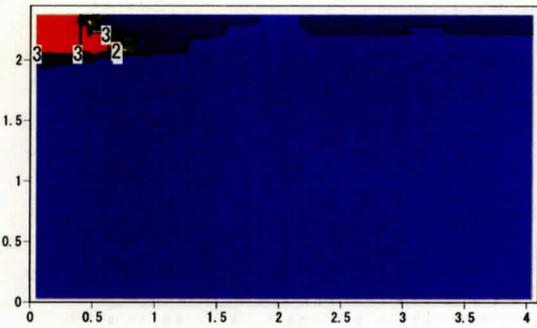
図 3-2-88 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=3.79m 窓、ドア隙間有)



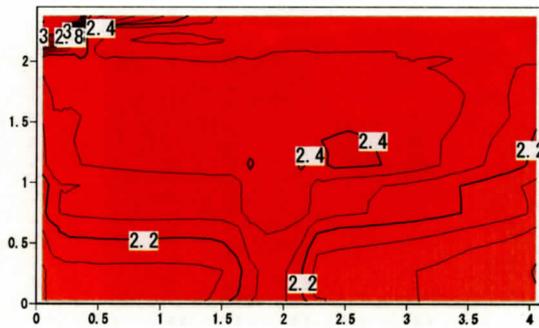
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 1.084



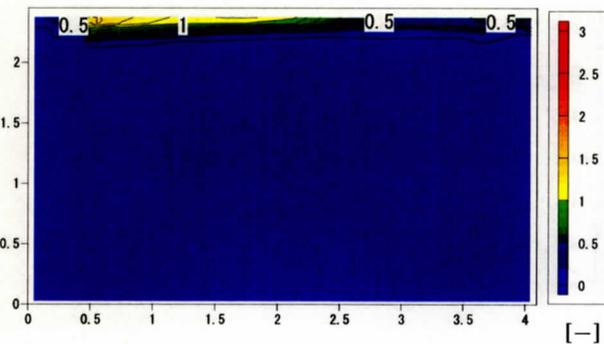
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.008



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均濃度 0.094



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 2.500



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.235

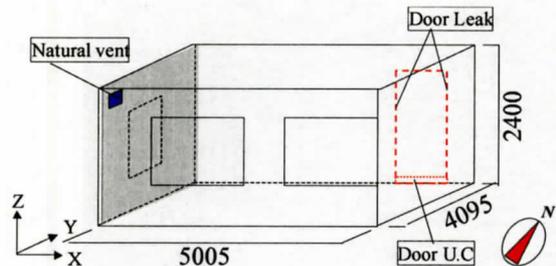
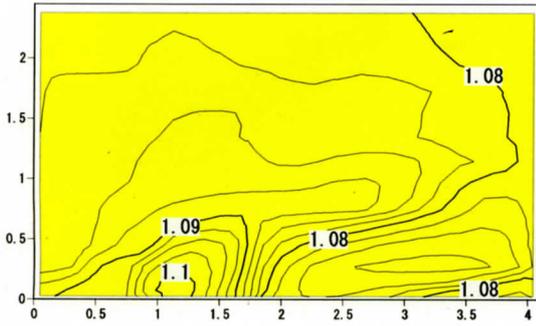
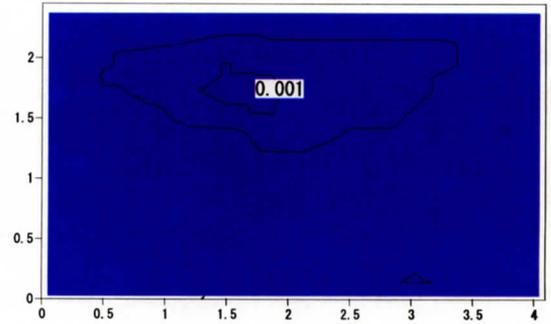


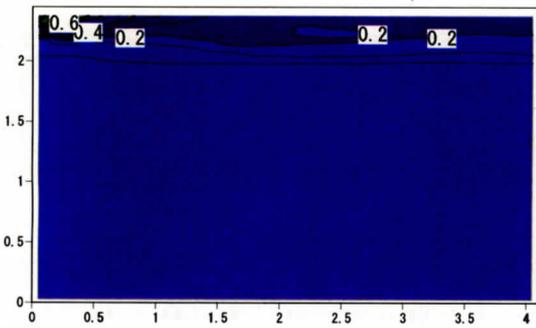
図 3-2-89 濃度分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



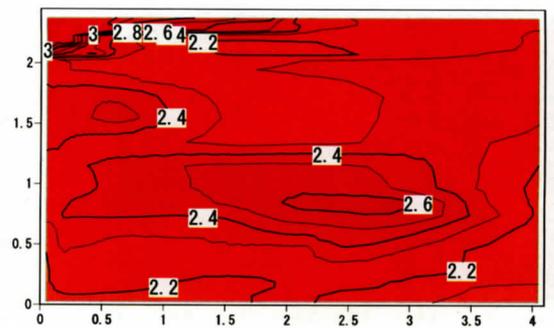
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 1.084



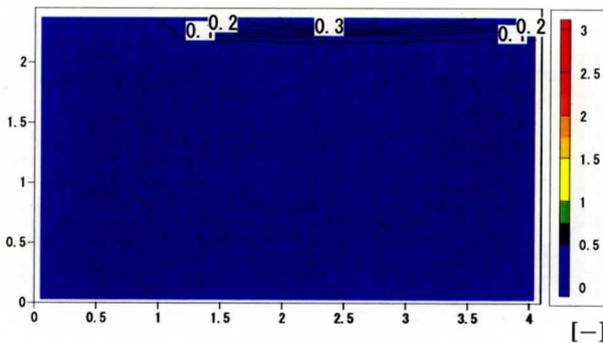
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.008



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均濃度 0.094



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 2.500



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.235

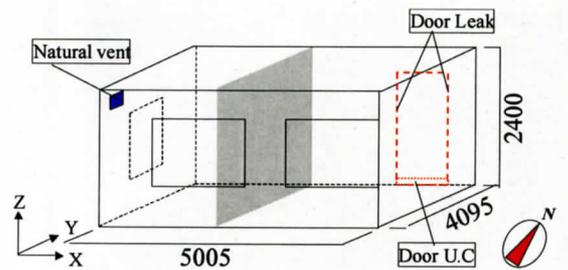
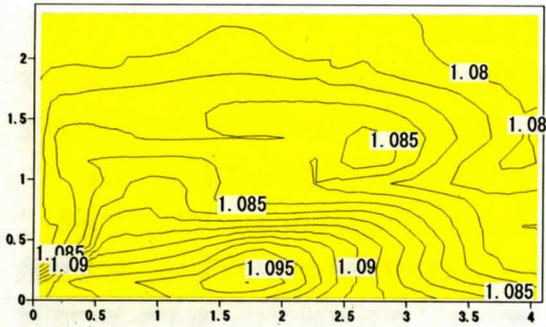
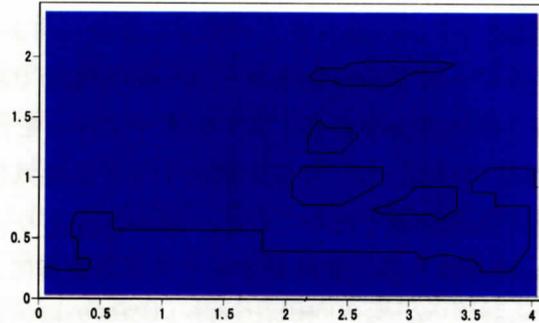


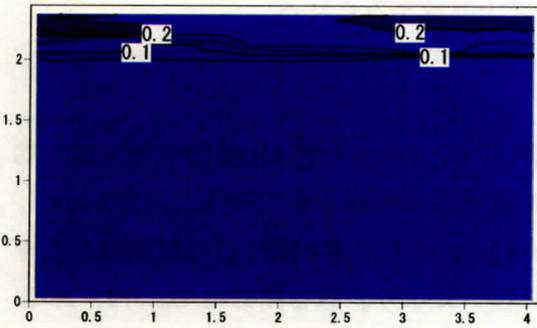
図 3-2-90 濃度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



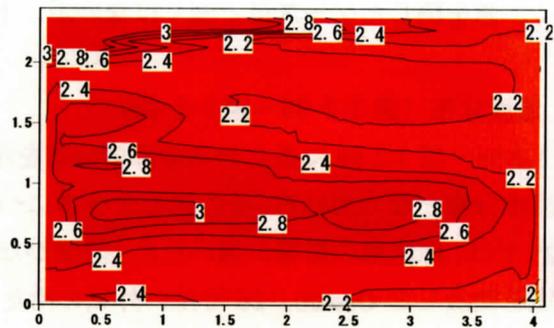
(a) Case13 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 1.084



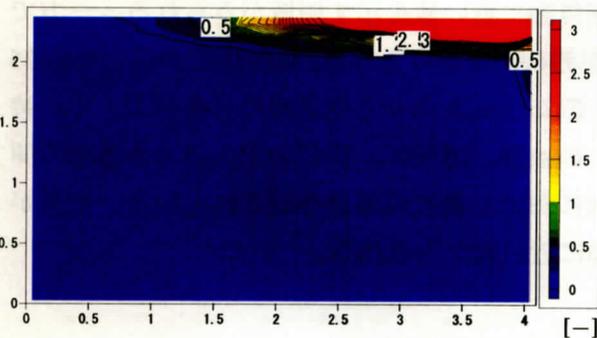
(b) Case14 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.008



(c) Case15 (C=2.0 窓サッシ C=0.5 窓閉)
平均濃度 0.094



(d) Case17 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓閉)
平均濃度 2.500



(e) Case18 (C=5.0 窓サッシ C=2.0 窓開)
平均濃度 0.235

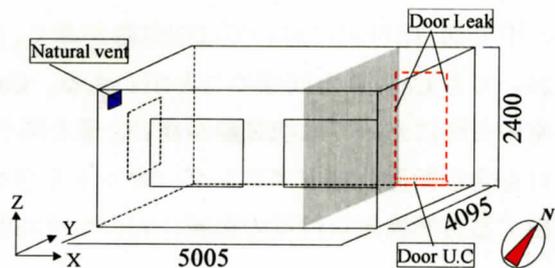


図 3-2-91 濃度分布 (YZ 断面 X=3.79m 窓、ドア隙間有)

(d) 自然換気システム (Case19~20、25~26)

図 3-2-92 に CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量を示す。図 3-2-92 中の矢印は青が給気、赤が排気を、また網掛け矢印は隙間換気、矢印の大きさは換気量の大小を表している。

(1) 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (図 3-2-93~図 3-2-95)

図 3-2-93~図 3-2-95 に各ケースの排気部分である自然換気口を含む断面、室内中心部の窓を含む断面、給気部分であるドアアンダーカットを含む断面の風速ベクトルとスカラー風速の分布を示す。図 3-2-93 より、空気が流出する自然換気口付近では風速が強い。また、窓付近において、下降流の風速が速くなっている。図 3-2-94 より、室中心部の窓を含む断面においては、窓を閉じた Case19、25 では、窓付近でドラフトの影響により、下降流の風速が強くなっている。窓を開放した Case20、26 では、外気の冷たい空気の侵入により、勢いよく空気が流入し、室中央部の床付近まで風速が強くなっている。図 3-2-95 より、空気が流入するドアアンダーカットを含む断面においては、窓を閉じた Case19、25 では、室内の暖かい空気が吹き込み上昇流となって、天井付近で強い風速領域がみられる。窓を開放した Case20、26 では、窓を開放しているため、室内の温度が低く、窓を閉じたケースほど強くはないが、ドア付近で上昇流がみられる。

(2) 温度分布 (図 3-2-96~図 3-2-98)

図 3-2-96~図 3-2-98 に各ケースの温度分布を示す。隙間がない Case19 では比較的空間全体で均一な温度分布となっている。その他のケースについては温度成層が形成されていることがわかる。Case25 では、隙間風の影響が強いため、隙間がない Case19 に比べて天井と床付近の温度差が大きい。窓を開放した Case20、26 では、外気の冷たい空気の侵入により、窓を閉じた Case19、25 よりも温度低下が著しい。

(3) SVE3 (空気齢) の分布 (図 3-2-99~図 3-2-101)

図 3-2-99~図 3-2-101 に各ケースの SVE3 の分布を示す。隙間がない Case19 では、天井付近および空気が流出する自然換気口付近において平均空気齢に近い値を示す領域がみられる。一方で室の中央部、床付近においては空気齢が高く、空気が澱む領域がみられる。気密性能が低い Case25 においても Case19 と同様のことがいえる。Case25 では Case19 よりも空気齢の分布が大きく、特に室中央部においては空気齢が高い。窓を開放した Case20、26 では、空気の流入口である窓の開放口を含む断面及びドアアンダーカットを含む断面において濃度成層が形成されている。空気が流出する自然換気口付近の領域において平均空気齢に近い値がみられる。

(4) 測定位置の検討 (図 3-2-102~図 3-2-104)

図 3-2-102~図 3-2-104 に各ケースの給気口からガスを発生させた場合の濃度分布を示す。ガスは給気口付近から発生させた (図 3-2-92 に示す★印の位置。窓を開放したケースは窓を閉じたケースと同じ位置からガスを発生させた。)。給気口付近からガスを発生させた場合、空間の平均濃度が捕集できるガスの捕集位置についての検討を行う。窓を閉じている状態で、気密性能が変化

するケース（Case19（ $C=0.0$ ）→Case25（ $C=15.0$ ））では、室内に空気が流入するドア部を含む断面（図3-2-104）では濃度に分布がみられるが、空気の流出口である自然換気口付近においては空気がよく攪拌されていることが確認された。これらのケースにおいて平均濃度に近い値を示す領域として、空気が流出する付近の高さ1.5m付近にサンプラーを設置することが最適であると言える。Case19、25の窓を閉じた状態から窓を開放した状態に変更したCase20、26では、先ほど窓を閉じたケースで最適な設置位置とされたドア部の高さ1.5m付近で平均濃度に近い値を示す領域がみられる。これは空気の給気場所が変わらないため、ガスが吹き出し空気に運ばれ、室内である程度攪拌することが理由と考えられる。以上より、窓の開閉に関わらず平均濃度に近い値を示す領域として排気付近の高さ1.5m付近にサンプラーを設置することが最適であると言える（窓を開放した場合の設置位置について、今回は窓を開放した場合、風速や風向の変化の影響を考慮していないことに注意する必要がある）。

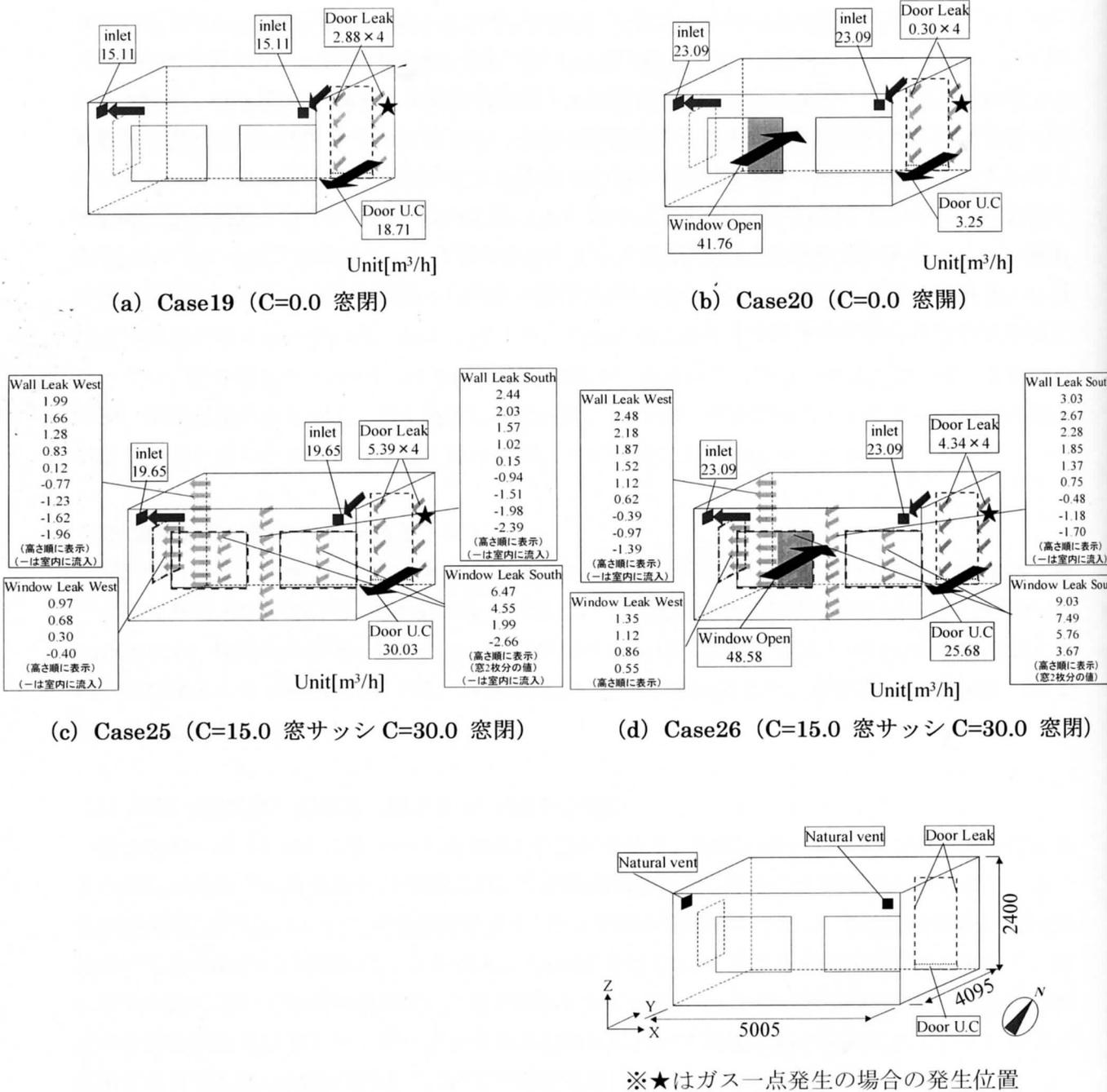
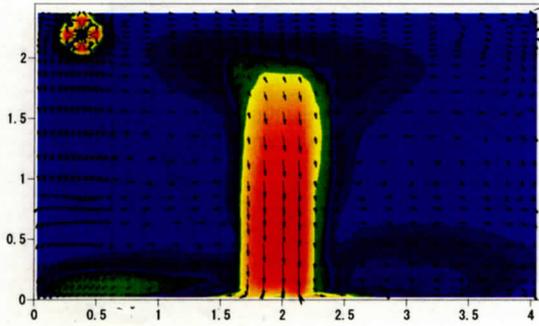
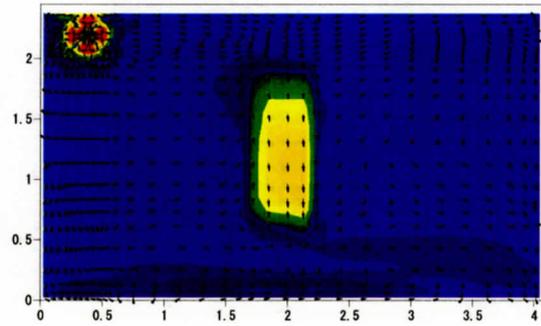


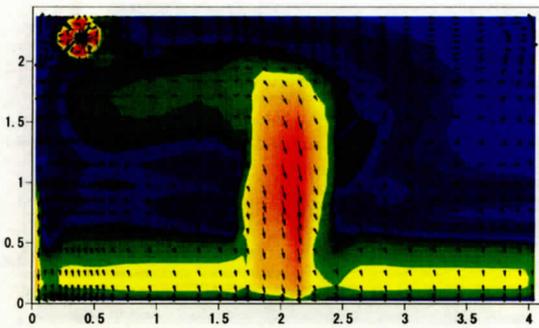
図 3-2-92 CFD 解析ケースと COMIS により計算された換気量 (Case19, 20, 25, 26)



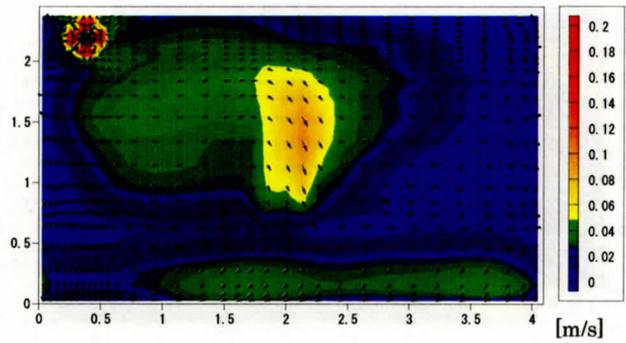
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

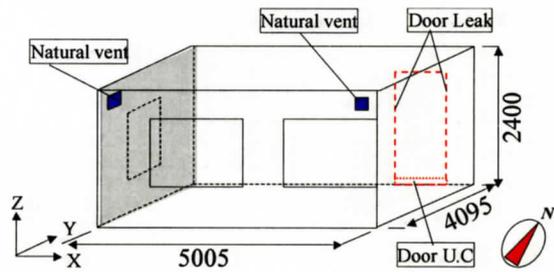
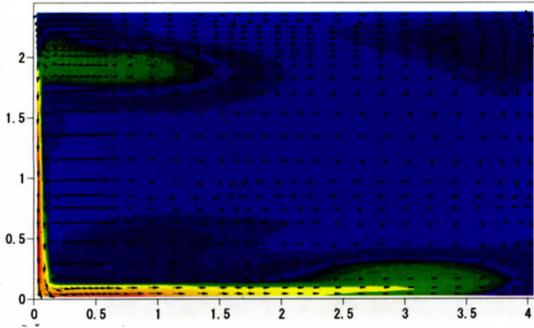
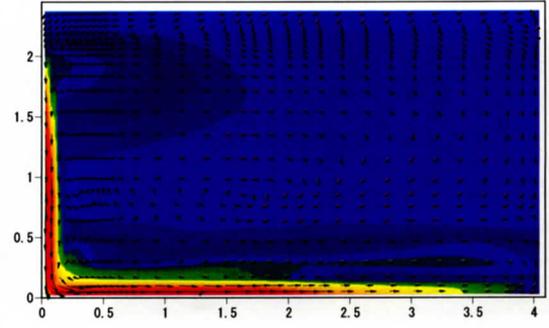


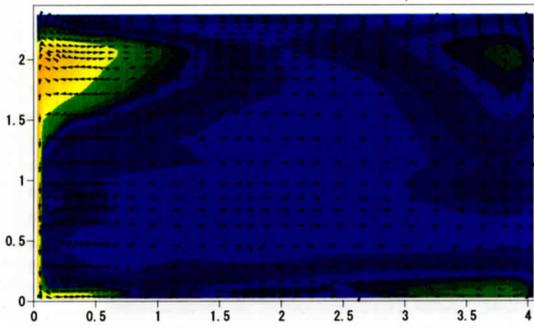
図 3-2-93 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



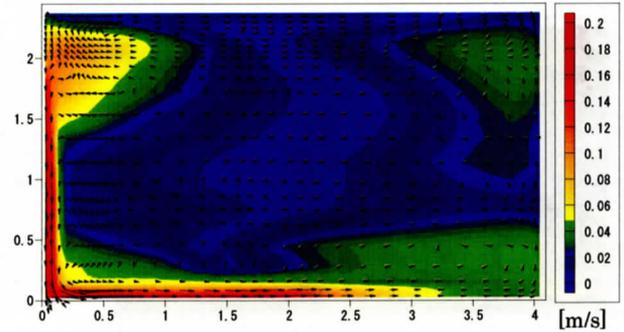
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

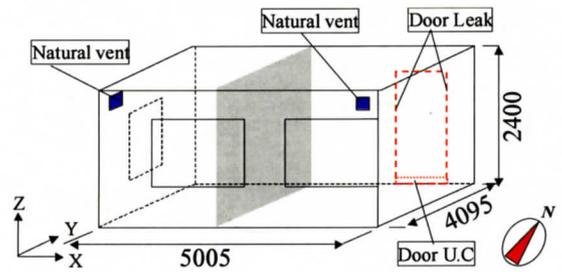
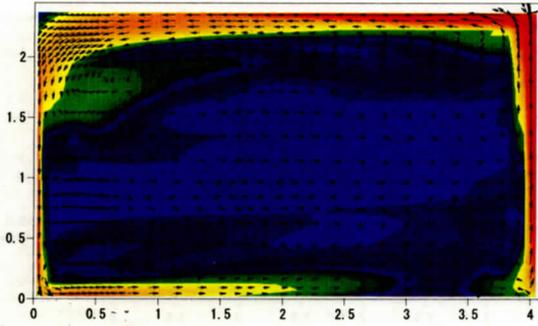
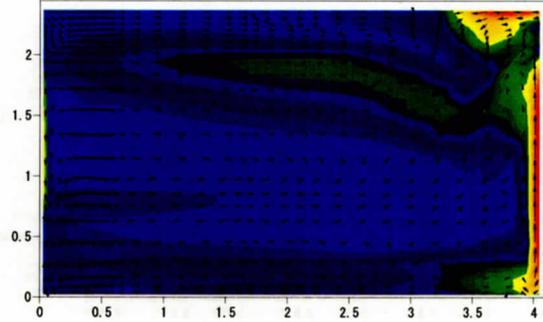


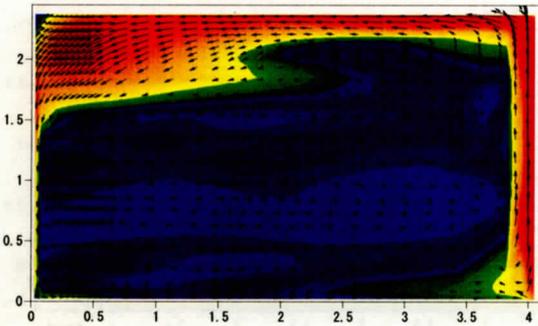
図 3-2-94 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



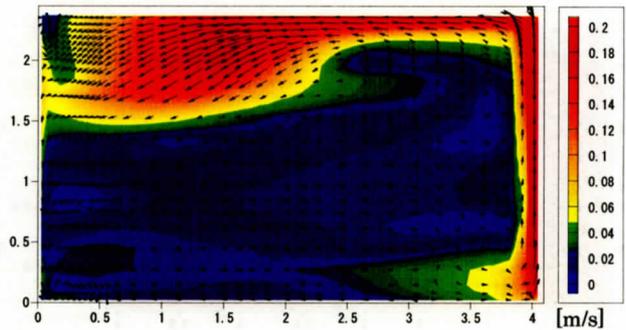
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

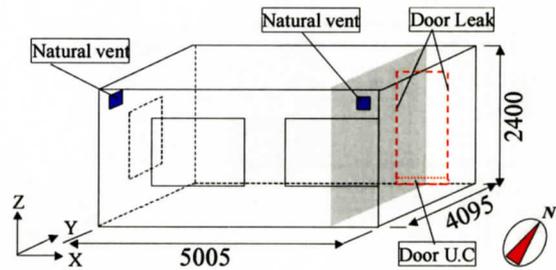
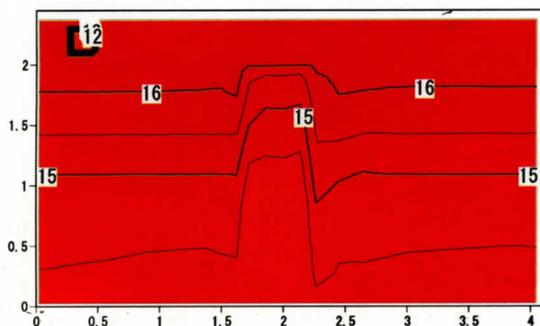
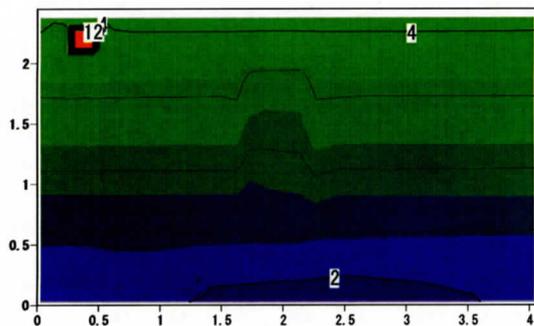


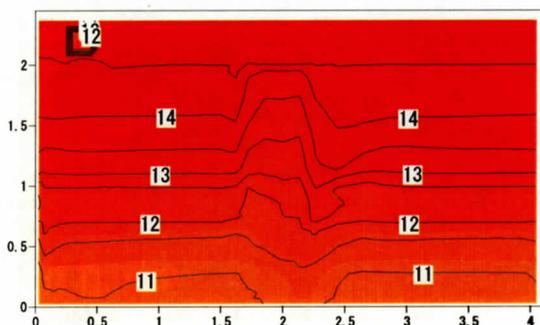
図 3-2-95 風速ベクトルとスカラー風速の分布 (YZ 断面 X=4.035m 窓、ドア U.C 有)



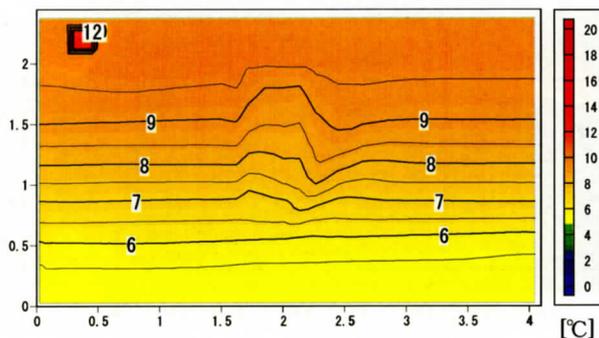
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

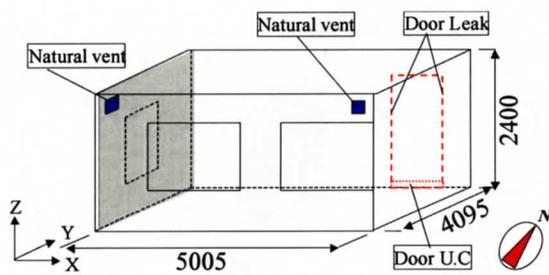
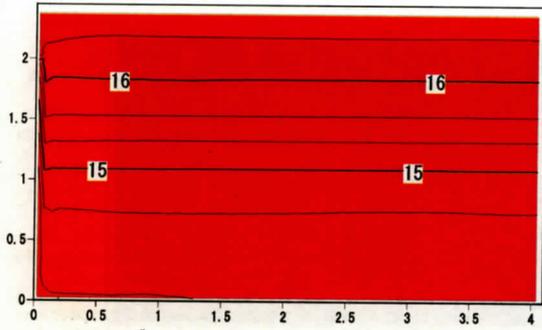
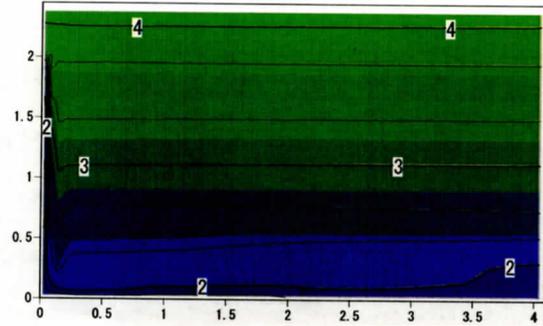


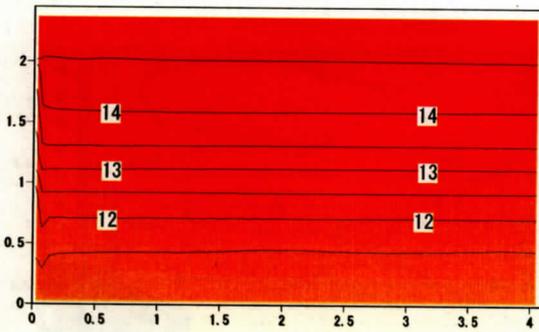
図 3-2-96 温度分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



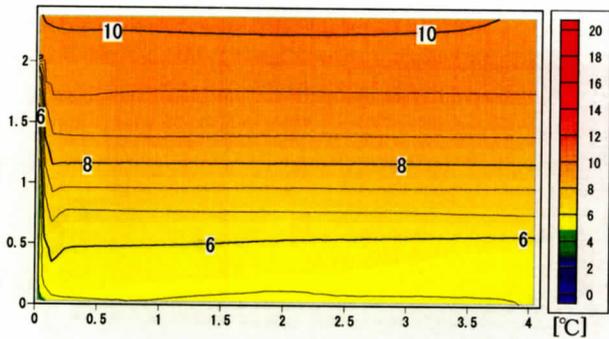
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

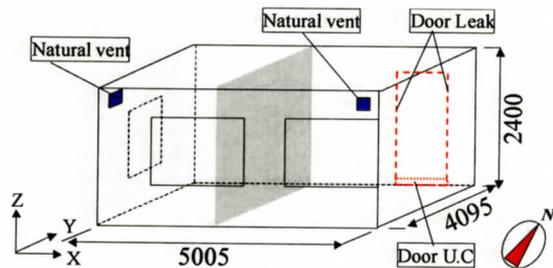
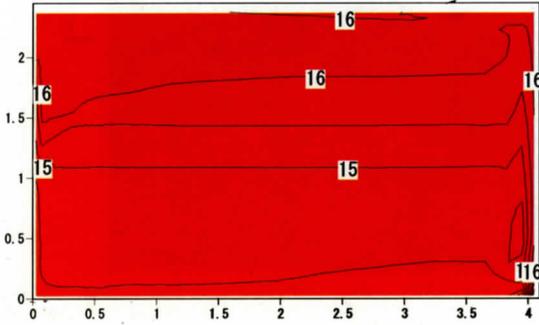
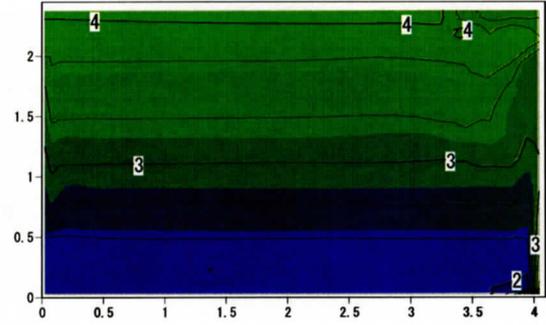


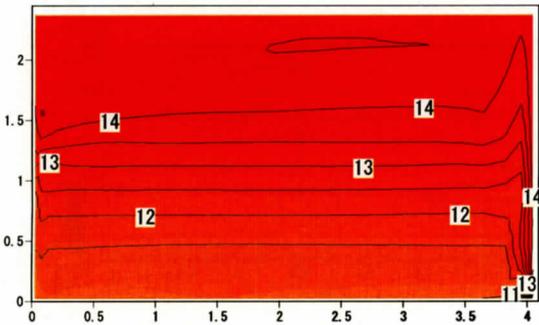
図 3-2-97 温度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



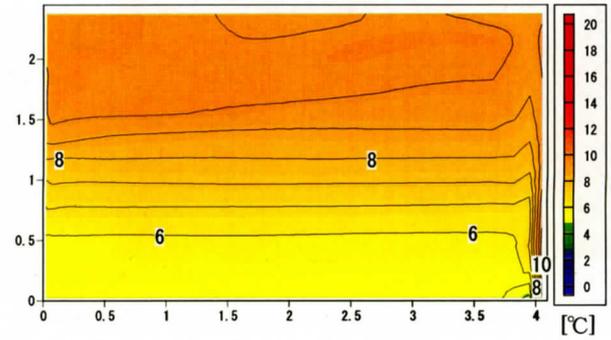
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)



(b) Case20 (C=0.0 窓開)



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)

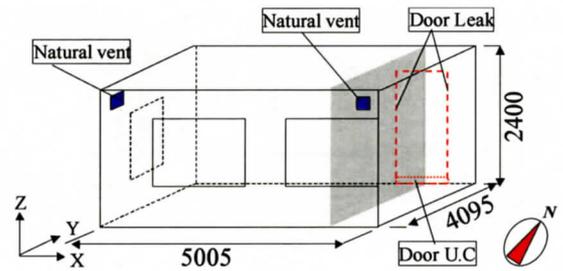
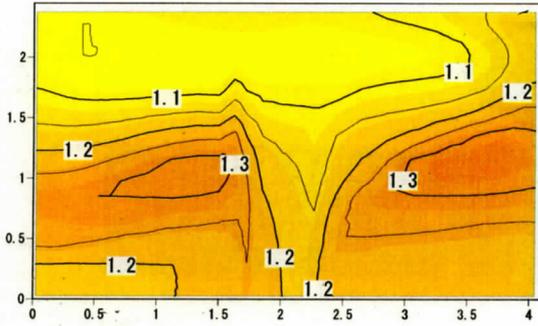
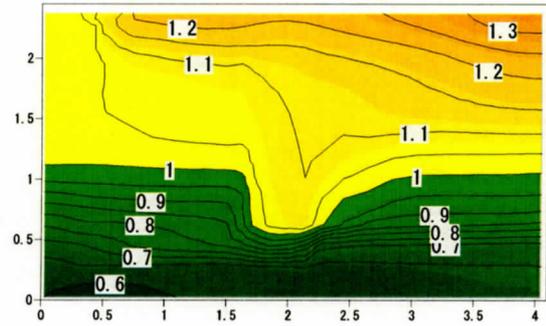


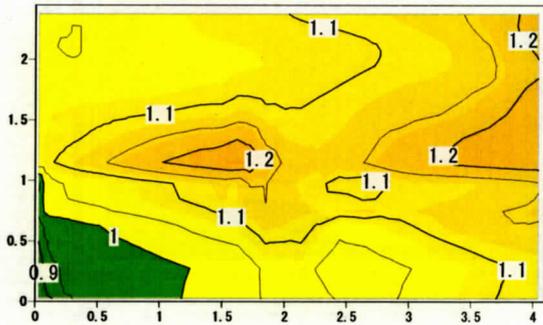
図 3-2-98 温度分布 (YZ 断面 X=4.035m 窓、ドア U.C 有)



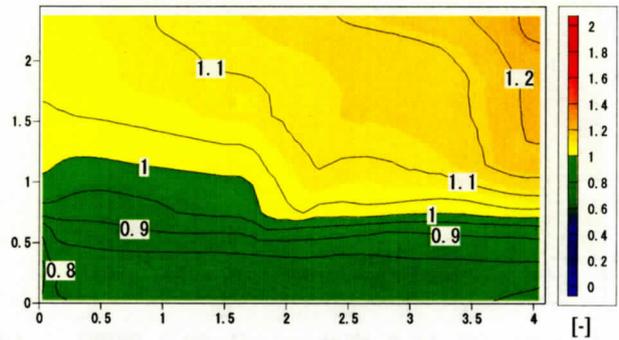
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.164



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 0.918



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均空気齢 1.152



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均空気齢 1.114

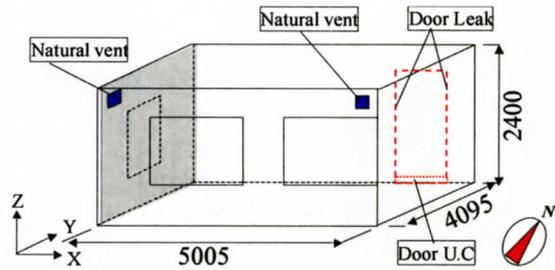
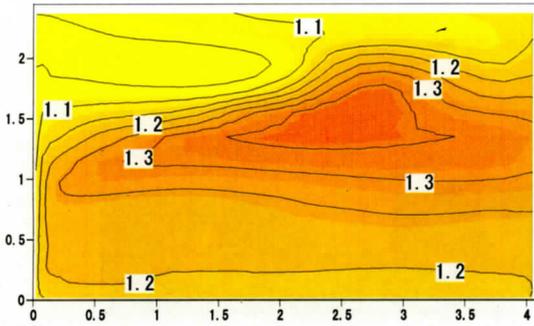
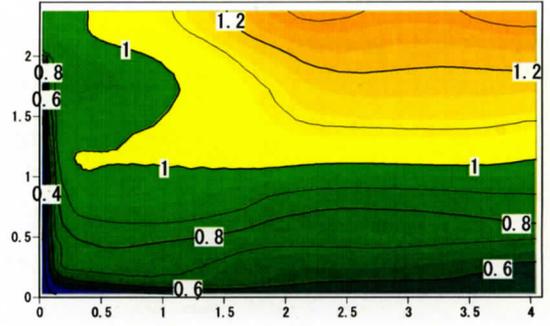


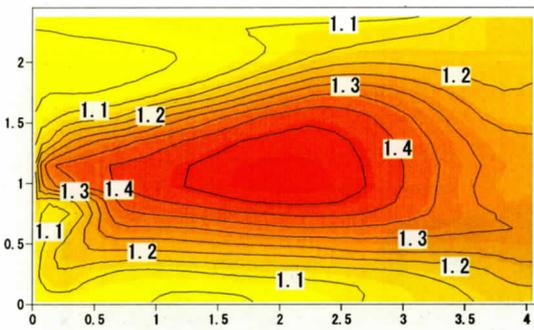
図 3-2-99 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



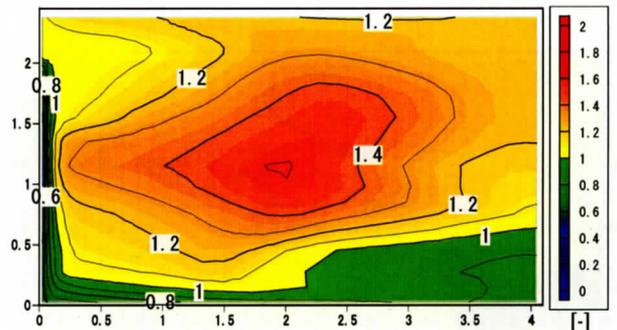
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.164



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 0.918



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均空気齢 1.152



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均空気齢 1.114

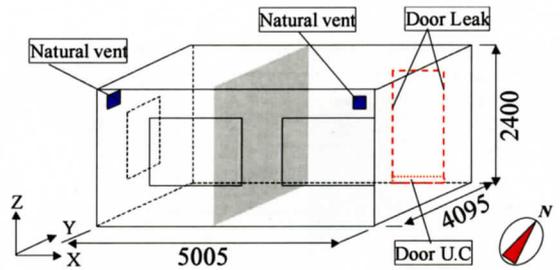
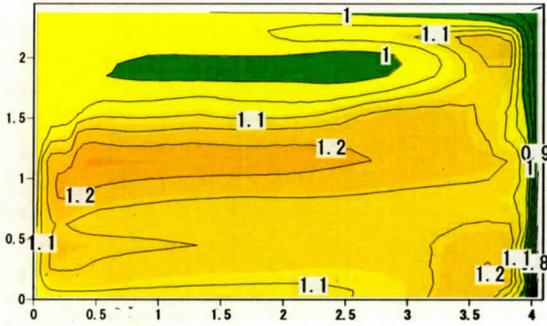
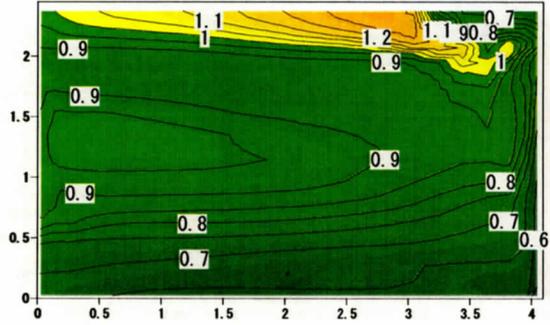


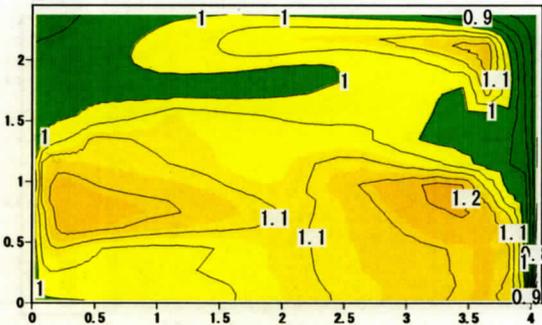
図3-2-100 SVE3の分布 (YZ断面 X=1.937m 窓有)



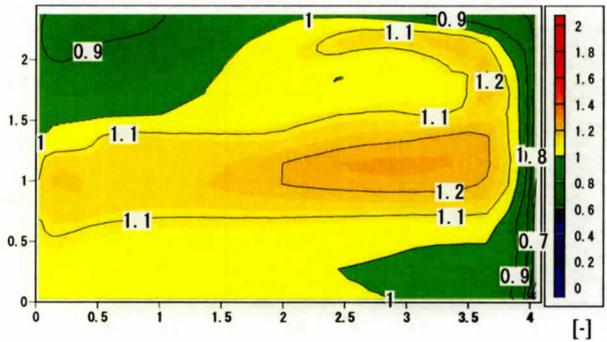
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均空気齢 1.164



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均空気齢 0.918



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均空気齢 1.152



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均空気齢 1.114

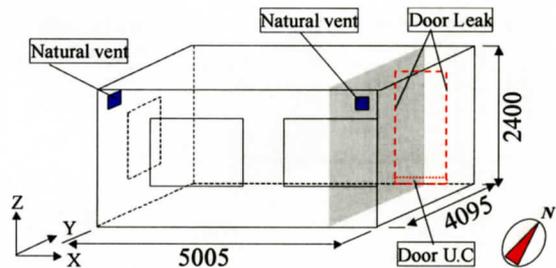
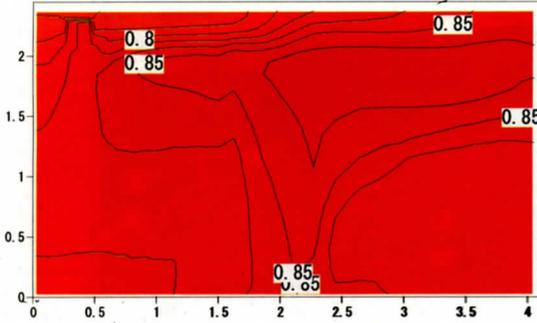
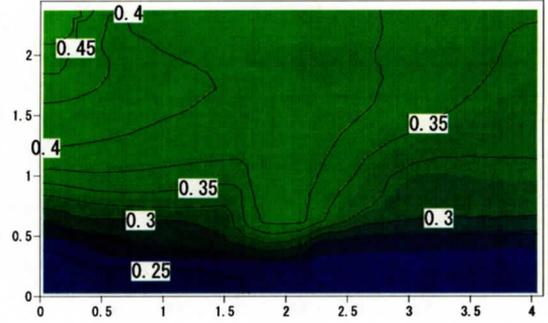


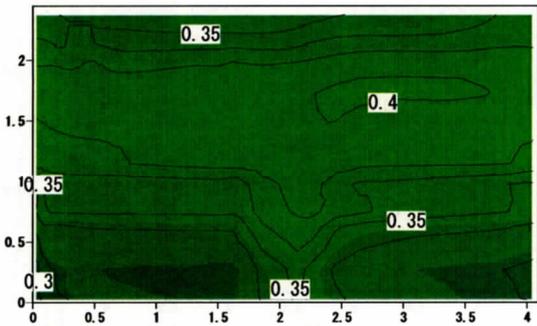
図 3-2-101 SVE3 の分布 (YZ 断面 X=4.035m 窓、ドア U.C 有)



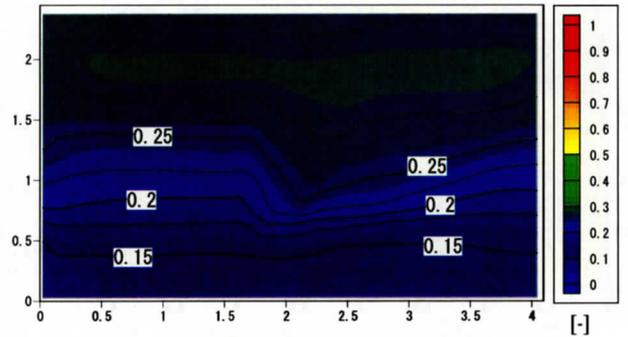
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.848



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.393



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均濃度 0.394



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均濃度 0.248

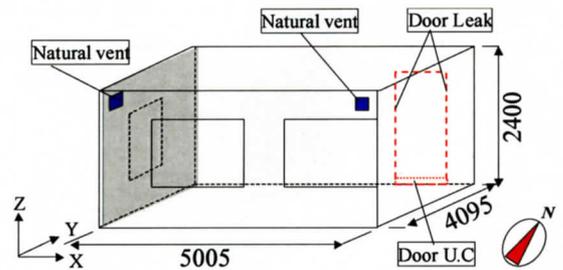
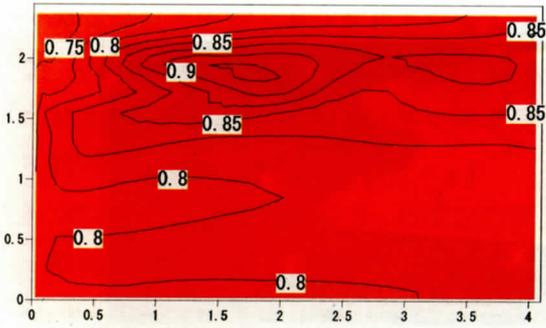
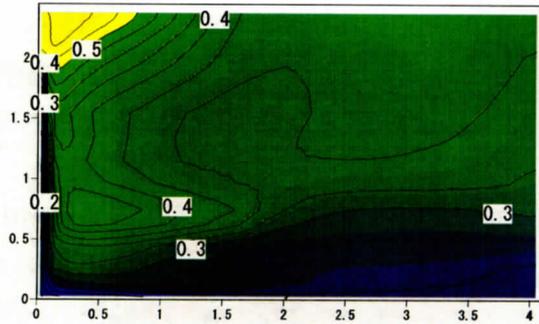


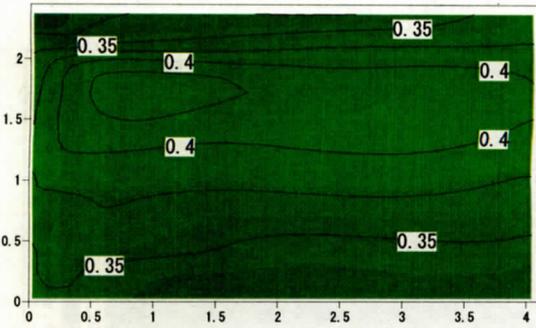
図 3-2-102 濃度分布 (YZ 断面 X=0.025m 自然換気口有)



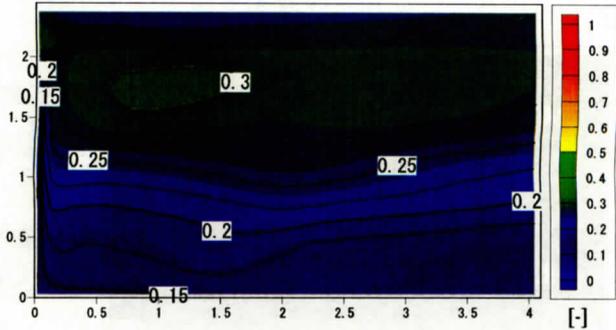
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.848



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.393



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均濃度 0.394



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均濃度 0.248

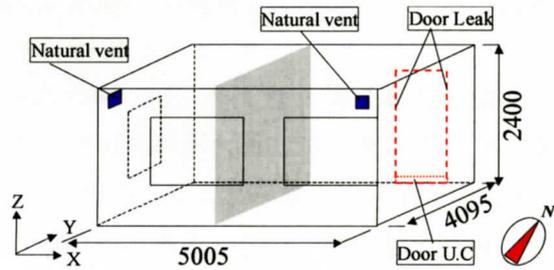
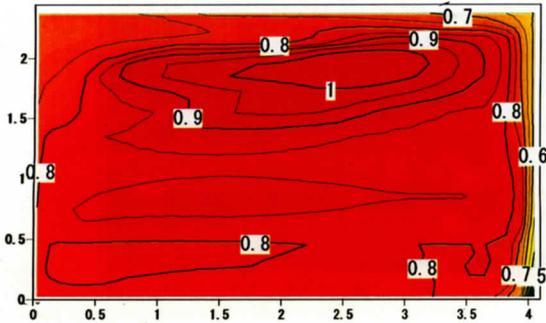
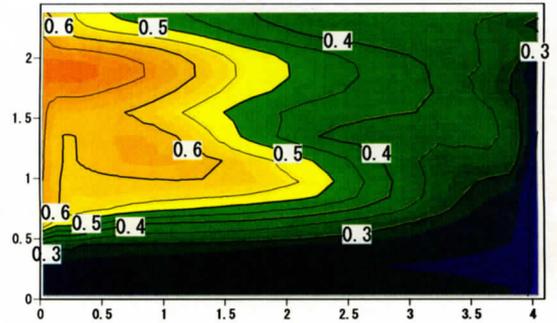


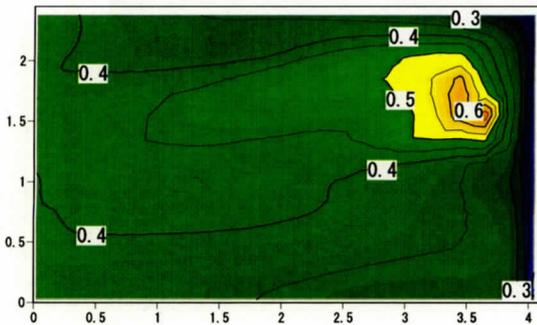
図 3-2-103 濃度分布 (YZ 断面 X=1.937m 窓有)



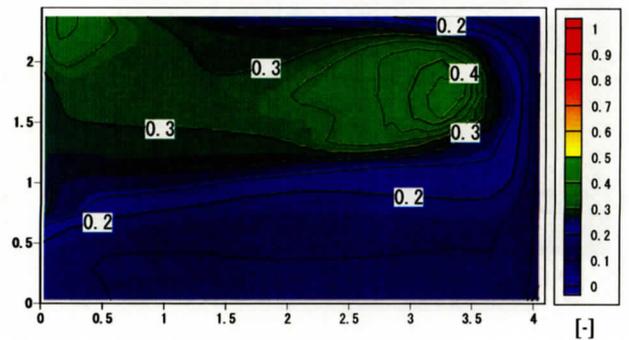
(a) Case19 (C=0.0 窓閉)
平均濃度 0.848



(b) Case20 (C=0.0 窓開)
平均濃度 0.393



(c) Case25 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓閉)
平均濃度 0.394



(d) Case26 (C=15.0 窓サッシ C=30.0 窓開)
平均濃度 0.248

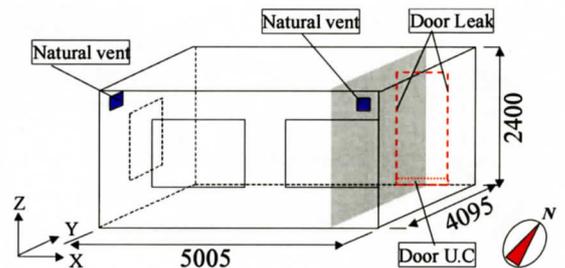


図3-2-104 濃度分布 (YZ断面 X=4.035m 窓、ドアU.C有)

3.2.8 まとめ

- 1) 本章では、PFT法を実際の住宅実測等に用いる前段階として、気象条件を制御した（濃度分布、空気流動の影響が考えられる）実大実験棟において測定器の精度の検証を行った。
- 2) トレーサーガスが1種類の場合、換気経路が明確な空間で、気象条件が制御可能な人工気象室において、詳細な測定が可能で研究実績があるステップアップ法とPFT法の測定結果の比較を行った。
- 3) 測定結果を比較した結果、PFT法は測定誤差10%程度で既往の測定法の結果と一致することが確認できた。
- 4) トレーサーガスが4種類の場合、換気経路が明確な空間で、室内温度を制御した換気実験棟において小型ファンを用いて室間の換気量を制御した状態を作り、PFT法の室間換気量を測定する実験を行った。
- 5) 測定結果を比較した結果、小型ファン風量とPFT法によって測定した室間の換気量の結果は比較的良好な対応を示した。今後はガス放散量の見直しや分析補正係数の見直しなどさらに改善することで測定精度が向上すると考えられる。
- 6) 以上より実大実験棟におけるPFT法の測定精度を確認し、さらに今後に繋がる発展的な内容として、トレーサーガスを数種類使用した測定法について問題点を明らかにし、実用化に向けた改善点を示した。
- 7) 戸建標準住宅を対象にして、換気方式・気密性能・窓の開閉等の条件を変更して、居室の換気経路について明らかにするため、数値解析を行った。
- 8) マクロモデルの計算結果より、機械換気システムについては、窓を閉じた場合は気密性能の変化による換気経路の変化がみられた。一方、窓を開放した場合は気密性能が変化による換気経路の変化はみられなかった。また、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していた。
- 9) 自然換気システムについては、窓を閉じた場合も開放した場合も、気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられなかった。一方、窓を閉じた状態から開放した状態にした場合は換気経路が大きく変化していた。
- 10) ミクロモデルの計算結果より、機械換気システムについては、第1種、第2種など機械で給気を行う換気システムについては、窓の開閉に関わらず給気位置付近でガスを発生させ、空気が流出する付近の高さ1.5m付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。これは窓の開閉に関わらず給気位置が変化しないためであると考えられる。第3種の場合、窓を閉じた場合では、給気位置付近でガスを発生させ、空気が流出する付近の高さ1.5m付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。一方、窓を閉じた状態から開放した状態にした場合、換気経路の変化により、窓を閉じた場合の最適なガス捕集位置においては濃度の分布が大きく、このような状態では測定を行うことが困難であると考えられる。

- 11) 自然換気システムについては、窓の開閉に関わらず給気位置付近でガスを発生させ、空気が流出する付近の高さ 1.5m 付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。これは窓の開閉に関わらず給気位置が変化しないためであると考えられる。
- 12) 以上より、マクロモデル及びマイクロモデルの解析により、戸建標準住宅の居室を対象にして、居室の換気経路について明らかにし、測定器の最適な設置位置についても示すことができた。

3.3 居住状態における換気量測定法の検討

3.3.1 実測概要

(1) 対象住宅

表 3-3-1 に調査対象住宅の概要（住戸形式・換気システム・延床面積・竣工時期・気密性能・参照圧力 9.8Pa 時の換気回数³⁻²⁰⁾・測定日・測定方法・内外温度差・屋外風速）を示す。調査期間は 2001 年 6 月から 2005 年 10 月である。調査対象住宅は 47 件で、いずれもシックハウス、ダンプビルの疑いがある住宅である。40 件が戸建住宅、7 件が集合住宅であった。複数回測定を行った住宅もあり、延べ件数では 71 件となる。単位面積あたりの相当開口面積は、27 件 (57%) の住宅が $2[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ 以下の高気密住宅、12 件 (26%) の住宅が $5[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ 以下の気密住宅、7 件 (15%) の住宅が $5[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ 以上³⁻²¹⁾、1 件 (2%) の住宅が測定不能であった (図 3-3-1)。換気システムについては、第 1 種換気システムを備えた住宅 9 件 (19%)、第 3 種換気システムを備えた住宅 19 件 (40%)、機械換気システムを備えていない住宅 18 件 (38%)、ハイブリット換気システムを備えた住宅 1 件 (2%) である (図 3-3-2)。内外温度差は (室内温度の平均値) - (外気温の平均値) である。外部風速はそれぞれの住宅の近くにある気象台の測定データであり、表に示した値は実測期間内の風速データの平均値である。気象データによる外部風速は 4 分の 1 乗則によって高さ 6m の風速に補正した。

表 3-3-1 (a) 調査対象住宅の概要

住宅 ID	住宅形式	換気システム	延床面積 [m ²]	竣工時期	気密性能 [cm ² /m ²]	9.8 Pa時の換気回数	測定日 (年.月)	測定方法				内外温度差 Δ[°C]	屋外風速 [m/s]
								一定濃度	風量測定	PFT-P	PFT-Y		
1	戸建	第1種	183.0	01.04	2.74	1.63	01.06	○	○	-	-	4.1	1.43
2-a					0.40	0.34	01.07	○	○	-	-	3.5	1.43
2-b	戸建	第3種	130.6	01.02	0.35	0.30	01.10	○	○	○	-	8.6	1.73
2-c					0.50	0.43	02.09	○	○	-	-	5.5	1.29
3	戸建	第3種	173.8	99.11	4.64	2.72	01.07	-	○	-	-	2.6	1.89
4-a					1.32	0.96	01.08	○	○	-	-	7.1	0.93
4-b					1.36	0.99	02.01	○	○	○	-	15	2.98
4-c	戸建	第3種	134.2	98.03	1.86	1.25	03.09	○	○	-	○	4.8	1.99
4-d					1.85	1.06	04.08	-	○	-	○	3.4	1.89
4-e					1.91	1.10	05.08	○	○	-	○	-	1.71
5-a					0.53	0.64	01.08	○	○	-	-	9.4	0.93
5-b					0.59	0.71	02.01	-	○	○	-	18.9	2.07
5-c	戸建	第3種	114.3	99.11	0.41	0.29	03.08	-	○	-	○	-	1.23
5-d					0.94	0.88	04.02	-	○	-	○	13.19	2.11
5-e					1.10	0.70	04.08	-	○	-	-	-	-
6	戸建	第3種	150.9	99.03	0.83	0.70	01.08	○	○	-	-	5.1	1.95
7-a					1.10	0.75	01.09	○	○	-	-	7.1	1.83
7-b					1.71	1.02	02.01	-	○	○	-	15.8	2.35
7-c	戸建	第1種	173.3	95.06	1.92	1.20	03.09	○	○	-	○	6.6	2.01
7-d					1.88	1.08	04.09	-	○	-	○	3.2	1.27
7-e					2.03	1.16	05.09	-	○	-	-	-	3.92
8-a					0.83	0.88	01.10	○	○	-	-	6.6	1.84
8-b	戸建	第1種	121.7	98.04	0.84	0.89	01.12	-	○	○	-	15	2.28
8-c					0.90	0.87	03.08	-	○	-	○	-3.6	1.44
8-d					0.94	0.97	04.03	-	○	-	○	12	3.40
9-a	戸建	第3種	126.0	97.01	0.93	0.79	01.11	-	○	○	-	10.5	2.05
9-b					1.14	0.83	03.09	-	○	-	○	-4.6	2.04
10	戸建	第1種	136.2	01.05	2.66	1.86	01.12	○	○	○	-	12.1	1.75
11-a	戸建	第3種	153.4	99.11	0.71	0.55	01.12	○	○	○	-	12.6	1.86
11-b					0.71	0.55	03.07	-	○	-	○	1.5	0.99

表 3-3-1 (b) 調査対象住宅の概要

住宅 ID	住宅 形式	換気 システム	延床面積 [m ²]	竣工時期	気密性能 [cm ² /m ²]	9.8 Pa時の 換気回数	測定日 (年.月)	測定方法				内外温度差 Δθ[°C]	屋外風速 [m/s]
								一定 濃度	風量 測定	PFT-P	PFT-Y		
12-a					1.22	0.90	02.01	○	○	○	-	13.7	2.43
12-b	戸建	第1種	145.6	00.02	1.41	1.04	02.10	○	-	-	-	6.7	1.78
12-c					1.45	0.98	03.08	-	○	-	○	-2	1.52
12-d					1.88	1.24	04.08	-	○	-	○	1.9	1.32
13-a	戸建	第3種	144.0	99.03	0.40	0.21	02.02	○	-	-	-	11.7	2.52
13-b					0.53	0.59	02.08	-	○	○	-	3.6	2.42
14	戸建	第1種	131.7	01.01	2.30	1.30	02.02	○	○	○	-	14.3	1.59
15	戸建	自然	125.7	95.09	2.63	1.83	02.09	○	-	-	-	5.2	1.62
16	戸建	ハイブリット	149.1	01.12	0.89	0.86	02.10	○	-	-	-	15.6	-
17	戸建	自然	110.6	97.01	8.16	4.90	03.02	○	-	-	○	-	2.25
18	戸建	自然	254.1	02.01	4.52	2.54	03.03	-	-	-	○	5.4	4.65
19	集合	自然	78.3	93.03	1.52	1.78	03.03	-	-	-	○	13.6	2.44
20-a	集合	第1種	80.0	00.12	0.20	0.20	03.02	-	-	-	○	-	2.89
20-b					0.20	0.20	03.08	-	○	-	○	-1.4	2.12
21	集合	第3種	72.3	00.03	1.65	1.28	03.02	-	-	-	○	16	1.14
22	集合	自然	78.3	00.04	0.31	0.27	03.02	-	-	-	○	13.4	2.70
23	集合	自然	32.6	00.02	13.54	8.65	03.02	-	-	-	○	11.2	2.23
24	戸建	自然	124.4	01.03	2.80	1.94	03.09	-	-	-	○	-2.4	1.62
25	戸建	第3種	159.3	01.12	1.56	1.82	03.12	○	○	-	○	0	2.89
26	戸建	自然	120.3	95.01	1.60	1.87	04.02	-	-	-	○	15.3	2.19
27	戸建	第3種	100.3	02.01	-	-	04.02	-	○	-	○	10.1	2.19
28	戸建	第3種	247.7	00.11	2.18	2.49	04.02	-	○	-	○	13.7	1.65
29	戸建	第1種	180.8	02.08	0.28	0.26	04.02	-	○	-	○	17	1.28
30	戸建	第3種	224.2	00.12	1.23	0.95	04.02	-	○	-	○	19.7	3.27
31	戸建	自然	91.0	94.01	5.42	3.86	04.03	-	-	-	○	6.7	1.99
32	戸建	第3種	149.4	97.03	2.27	1.70	04.03	-	○	-	○	9.5	2.02
33	戸建	第3種	132.7	02.07	1.12	1.12	04.03	-	○	-	○	12.7	1.40
34	戸建	第3種	229.6	99.01	0.65	0.52	04.04	-	○	-	○	7	2.82
35	戸建	自然	162.4	98.04	1.24	0.99	04.04	-	-	-	○	11	2.79
36	集合	第3種	66.3	87.04	1.13	1.04	04.08	○	○	-	○	2	1.49
37	戸建	自然	141.9	02.09	4.87	3.08	04.08	-	-	-	○	1.9	1.73
38	戸建	自然	90.3	94.12	9.41	2.94	04.08	-	-	-	○	-0.1	2.47
39	戸建	第3種	148.5	03.03	0.77	0.62	04.09	○	○	-	○	4.6	1.23
40	戸建	自然	121.6	83.01	10.84	6.43	05.08	-	-	-	-	-	1.96
41	集合	第3種	85.6	03.03	0.29	0.65	05.08	-	○	-	-	-	1.31
42	戸建	自然	192.1	99.04	3.74	2.02	05.08	-	-	-	-	-	2.57
43	戸建	自然	105.2	94.07	9.73	5.91	05.08	-	-	-	-	-	2.68
44	戸建	自然	108.1	97.10	9.15	5.58	05.08	-	-	-	-	-	1.24
45	戸建	自然	130.0	03.10	1.15	0.71	05.09	-	-	-	-	-	2.27
46	戸建	第1種	109.3	03.10	2.62	1.73	05.09	-	○	-	-	-	2.61
47	戸建	自然	199.8	95.05	1.91	1.16	05.09	-	-	-	-	-	2.52

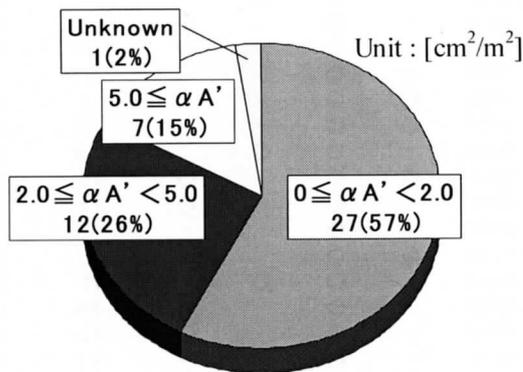


図 3-3-1 測定対象住宅の気密性能

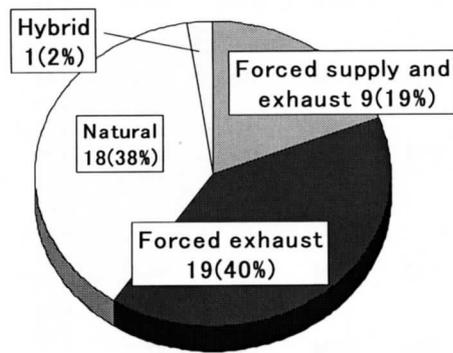


図 3-3-2 測定対象住宅の換気方式

(2) 測定方法

(a) 給排気口風量測定

給排気口の風量は風量計(コーナー札幌、Swema Flow 65)を用いて測定した。給排気口の風量が安定した後、10秒間の平均値を測定結果とした。写真3-3-1に風量測定の様子を示す。

(b) 一定濃度法

一定濃度法では測定器を屋外に置き、測定器に接続させた2種類のチューブを室内に張り巡らす。設置したチューブ(ビニールチューブ)からトレーサーガスを放出し、別のチューブ(テフロンチューブ)により室内の空気をサンプリングし測定を行う。トレーサーガスには SF_6 を用い、設定濃度は5ppmとした。注入されるガスが室内に均等に分布するように攪拌用ファンを用い、広い部屋ではチューブの分岐を行った。換気量測定期間中は居住者にできる限り窓を閉めてもらうようお願いした。換気量の測定と同時に CO_2 濃度の測定もマルチガスモニターとサンプラードーザーを用いて行った。

(c) PFT法

PFT法では、小指大のトレーサーガス源とサンプラーそれぞれ10本程度を約4~7日間、住宅内に設置した。設置個数及び設置場所については、住宅の図面から換気経路を予測してサンプラー、ドーザーを設置した。基本的にトレーサーガス源の設置場所は各部屋の給気点であり、サンプラーの設置場所は部屋の排気点である。

(d) 気密測定³⁻¹⁹⁾

気密性能は、気密測定器(コーナー札幌、KNS-400)を用いて減圧法で測定した。居室開口部に測定器を設置して排気を行い、その時に生じる室内外差圧と風量とを測定する。この測定結果を用いて、室内外差圧が1mmAq時の単位床面積あたりの相当隙間面積 $\alpha A'$ を算出し、気密性能を評価した。写真3-3-2に気密測定の様子を示す。

(e) 室内外温湿度

室内温度・外気温度は湿温度センサ付小型データロガー(測定精度 温度： $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、相対湿度： $\pm 5.0\%\text{RH}$)を用いて測定した。室内では各室床上1.1mの高さで、屋外では直射日光が当たらない場所で空気温度を10分間隔で測定した。各測定点における空気温度のデータは測定器のメモリに自動的に記録される。



写真 3-3-1 風量測定の様子

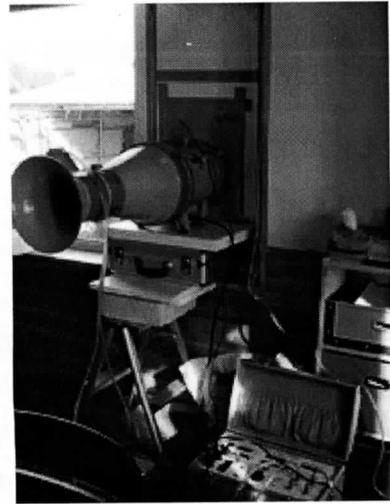


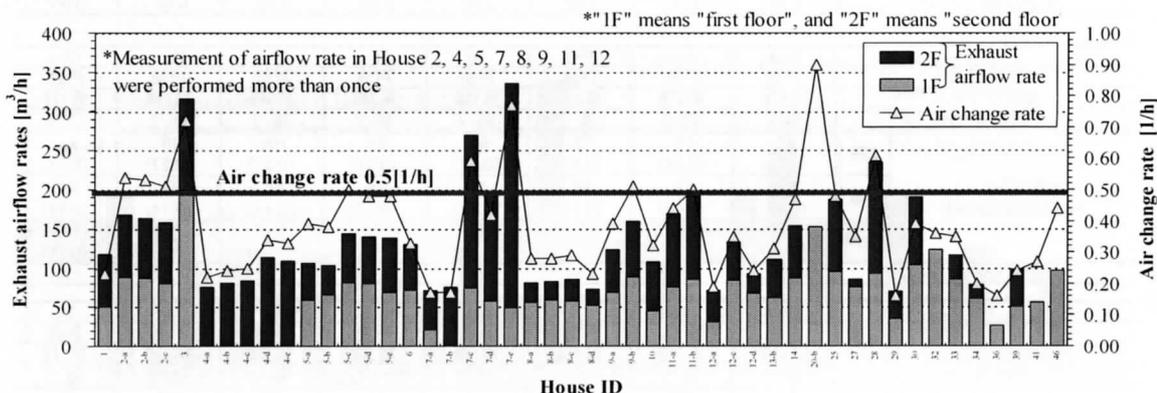
写真 3-3-2 気密測定の様子

3.3.2 実測結果

(1) 排気口における風量測定の結果

図 3-3-3 に 27 件の住宅（延べ件数 48 件）における風量測定器による排気口風量測定結果を、表 3-3-2 に測定結果の詳細を示す。図 3-3-3 に示す換気回数は排気口風量の値を住宅容積で除して求めた。

排気口風量から算出した換気回数が 0.5[回/h]³⁻²²⁾ を満たしていた住宅は 27 件中 7 件（延べ件数では 48 件中 11 件）であった。複数回測定を行った 7 邸では 1 回目（7-a）、2 回目（7-b）の測定に比べて 3 回目に、12 邸では 1 回目（12-a）に比べて 3 回目（12-c）の測定時に風量が大きくなっている。これは 7、12 邸ではそれぞれ 3 回目の測定前に新たな換気システムを設置したためである。7 邸では新たな換気システムの設置により換気回数 0.5[回/h] を上回った。4 邸では 4 回目（4-d）の測定時、5 邸では 3 回目（5-c）の測定時、9（9-b）、11（11-b）邸では 2 回目の測定時の風量が以前の測定時よりも増加している。これは居住者が普段使用している換気システムの運転モードを以前より強いモードに変更したからである。2 邸では 3 回目（2-c）の測定が 1 回目（2-a）よりも風量が低下している。その他にも 4 邸（4-e と 4-d）、5 邸（5-e と 5-c）、7 邸（7-d と 7-c）、12 邸（12-d と 12-c）において同様に風量が低下している。これは換気システムのメンテナンス不足により給排気口において埃による目詰まりを起こしていることが原因と考えられる。7 邸では 5 回目（7-e）の測定時は給排気口の清掃を行っていたため、4 回目（7-d）の測定時に比べて風量の増加が見られる。



House ID	1	2-a	2-b	2-c	3	4-a	4-b	4-c	4-d	4-e	5-a	5-b	5-c	5-d	5-e	6
Measurement month (month year)	6/01	7/01	10/01	9/02	7/01	8/01	1/02	9/03	8/04	8/05	8/01	1/02	8/03	2/04	8/04	8/01
Ventilation system	S&E		E		E			E					E			E
Air tightness	2.74	0.40	0.35	0.50	4.64	1.32	1.36	1.86	1.85	1.91	0.53	0.59	0.41	0.94	1.10	0.83

House ID	7-a	7-b	7-c	7-d	7-e	8-a	8-b	8-c	8-d	9-a	9-b	10	11-a	11-b	12-a	12-c
Measurement month (month year)	9/01	1/02	9/03	9/04	10/05	10/01	12/01	8/03	3/04	11/01	9/03	11/01	12/01	7/03	1/02	8/03
Ventilation system			S&E					S&E			E		S&E	E		S&E
Air tightness	1.10	1.71	1.92	1.88		0.83	0.84	0.90	0.94	0.93	1.14	2.66	0.71	0.71	1.22	1.41

House ID	12-d	13-b	14	20-a	25	27	28	29	30	32	33	34	36	39	41	46
Measurement month (month year)	8/04	8/02	2/02	2/03	12/03	2/04	2/04	2/04	2/04	3/04	3/04	4/04	8/04	9/04	8/05	9/05
Ventilation system	S&E	E	S&E	S&E	E	E	E	S&E	E	E	E	E	E	E	E	S&E
Air tightness	1.45	0.53	2.30	0.88	1.56	-	2.18	0.28	1.23	2.27	1.12	0.65	1.13	0.77	0.28	2.62

*"S&E" means forced Supply and Exhaust, "E" means forced Exhaust.

図 3-3-3 排気口風量測定の結果

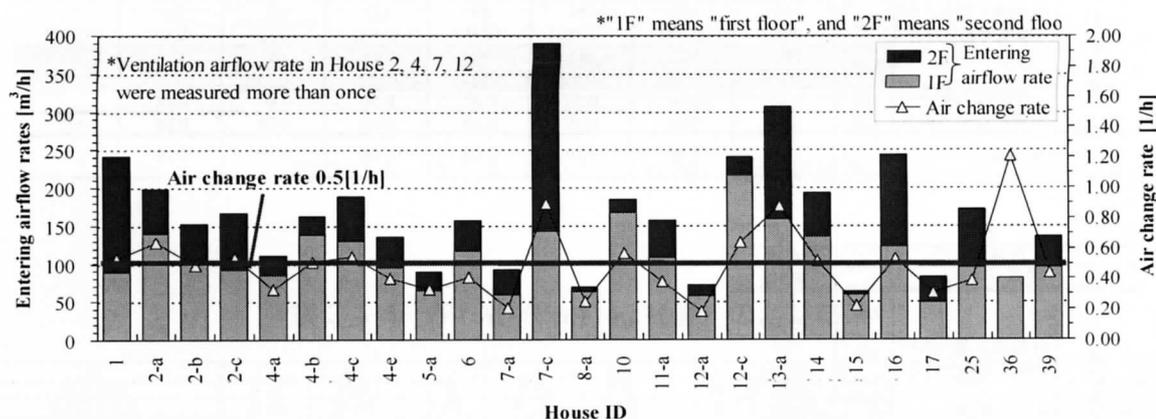
表 3-3-2 排気口風量測定の結果

ID		1	2-a	2-b	2-c	3	4-a	4-b	4-c
住戸形式		戸建							
換気システム		第1種	第3種						
運転モード		弱	中/3	中/3	中/3	-	2.5/5	2.5/5	3.2/5
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	68 (0.40)	80 (0.52)	78 (0.50)	78 (0.50)	116 (0.91)	76 (0.22)	82 (0.55)	84 (0.52)
	1階	50 (0.18)	88 (0.56)	87 (0.56)	80 (0.52)	201 (0.65)	-	-	-
	全体	102 (0.23)	168 (0.54)	164 (0.53)	158 (0.51)	316 (0.72)	76 (0.22)	82 (0.24)	84 (0.25)
気密性能[cm ² /m ²]		2.74	0.40	0.35	0.50	4.64	1.32	1.36	1.86
ID		4-d	4-e	5-a	5-b	5-c	5-d	5-e	6
住戸形式		戸建							
換気システム		第3種	第3種	第3種	第3種	第8種	第3種	第3種	第3種
運転モード		3.0/5	3.3/5	中/3	中/3	強/3	強/3	強/3	-
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	114 (0.34)	109 (0.33)	46 (0.33)	39 (0.27)	63 (0.44)	61 (0.42)	70 (0.48)	58 (0.32)
	1階	-	-	59 (0.45)	65 (0.45)	81 (0.56)	79 (0.55)	68 (0.47)	72 (0.35)
	全体	114 (0.34)	109 (0.33)	106 (0.39)	104 (0.38)	145 (0.50)	140 (0.48)	138 (0.48)	129 (0.33)
気密性能[cm ² /m ²]		1.85	1.91	0.53	0.59	0.41	0.94	1.10	0.83
ID		7-a	7-b	7-c	7-d	7-e	8-a	8-b	8-c
住戸形式		戸建							
換気システム		第1種	第1種	第1種	第1種	第3種	第1種	第1種	第1種
運転モード		弱/2	弱/2	弱+ロス/2	弱+ロス/2	弱+ロス/2	弱/2	弱/2	強/2
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	51 (0.23)	76 (0.33)	196 (0.87)	136 (0.60)	286 (1.31)	26 (0.20)	23 (0.15)	28 (0.18)
	1階	21 (0.10)	0 (0.00)	74 (0.41)	58 (0.25)	49 (0.23)	56 (0.37)	100 (0.60)	127 (0.76)
	全体	72 (0.17)	76 (0.17)	269 (0.59)	194 (0.42)	336 (0.77)	81 (0.28)	123 (0.39)	154 (0.49)
気密性能[cm ² /m ²]		1.10	1.71	1.92	1.88	2.03	0.83	0.84	0.90
ID		8-d	9-a	9-b	10	11-a	11-b	12-a	12-c
住戸形式		戸建							
換気システム		第1種	第3種	第3種	第1種	第3種	第3種	第1種	第1種
運転モード		強/2	弱/2	強/2	弱/2	弱/2	強/2	弱/2	強/2
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	22 (0.15)	54 (0.34)	72 (0.46)	63 (0.32)	94 (0.51)	106 (0.57)	40 (0.27)	49 (0.34)
	1階	104 (0.63)	69 (0.44)	88 (0.56)	45 (0.22)	76 (0.38)	86 (0.43)	31 (0.14)	84 (0.38)
	全体	126 (0.40)	123 (0.39)	160 (0.51)	108 (0.32)	170 (0.44)	192 (0.50)	71 (0.19)	133 (0.35)
気密性能[cm ² /m ²]		0.94	0.93	1.14	2.66	0.71	0.71	1.22	1.45
ID		12-d	13-b	14	20-b	25	27	28	29
住戸形式		戸建	戸建	戸建	集合	戸建	戸建	戸建	戸建
換気システム		第1種	第3種	第1種	第1種	第3種	第3種	第3種	第1種
運転モード		強/2	弱/2	中/3	強/2	モードなし	弱/2	強/2	強/3
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	26 (0.18)	49 (0.27)	68 (0.38)	-	94 (0.43)	10 (0.12)	143 (0.67)	35 (0.17)
	1階	67 (0.31)	62 (0.34)	87 (0.68)	-	95 (0.49)	75 (0.47)	92 (0.55)	35 (0.15)
	全体	93 (0.24)	110 (0.31)	154 (0.47)	152 (0.90)	188 (0.48)	85 (0.35)	235 (0.61)	70 (0.16)
気密性能[cm ² /m ²]		1.88	0.53	2.30	0.20	1.56	-	2.18	0.28
ID		30	32	33	34	36	39	41	46
住戸形式		戸建	戸建	戸建	戸建	集合	戸建	集合	戸建
換気システム		第3種	第1種						
運転モード		強/2	モードなし	強/3	強/2	モードなし	弱/2	弱/3	モードなし
排気量[m ³ /h] (換気回数[回/h])	2階	86 (0.36)	-	31 (0.20)	18 (0.14)	-	49 (0.24)	-	-
	1階	104 (0.41)	123 (0.65)	85 (0.50)	60 (0.23)	-	50 (0.24)	-	96 (0.74)
	全体	191 (0.39)	123 (0.36)	116 (0.35)	78 (0.20)	26 (0.16)	99 (0.24)	56 (0.27)	96 (0.44)
気密性能[cm ² /m ²]		1.23	2.27	1.12	0.65	1.13	0.77	0.29	2.62

(2) 一定濃度法による換気量の経時変化の平均値

図3-3-4に18件の住宅（延べ件数25件）における一定濃度法による外気導入量の測定結果を、表3-3-3に測定結果の詳細を示す。図3-3-4に示す換気回数は外気導入量の値を住宅容積で除して求めた。一定濃度法の測定結果は人の動きや外乱の影響が少ないと考えられる測定期間内の夜間のデータ（0:00～6:00）を使用している。外乱の影響を除くことでその住宅の換気量の最小値を得ることができると考えている。

外気導入量から算出した換気回数が0.5[回/h]を満たしていた住宅は18件中10件（延べ件数では25件中12件）であった。複数回測定を行った7、12邸で換気回数が大幅に増加している原因として、先ほどの排気口風量測定の結果と同様に新たな換気システムを設置したためである。4邸では3回目の測定で外気導入量が増加している。これは換気システムの運転モードを以前より強いモードに変更したからである。また、5回目の測定では前回の測定時よりモードを強くしたにも関わらず外気導入量が減少している。これは換気システムのメンテナンス不足により排気風量が低下したことが原因と考えられる。18件中16件（延べ件数では25件中23件）において2階の外気導入量が1階よりも少ない。これは温度差による浮力換気が原因と考えられる。浮力の影響は高低差や温度差により生じる自然駆動力である。このため戸建住宅では1階から外気が流入しやすく、2階には外気が流入しにくい。また、1階で汚染された空気が2階へ流入している可能性も考えられる。36邸では居住していない状態の測定であり、給気口が開け放たれていたこと、測定時の風速が強くSF₆濃度が安定しなかったことにより換気回数が極端に大きくなっている。



House ID	1	2-a	2-b	2-c	4-a	4-b	4-c	4-e	5	6	7-a	7-c	8-a
Measurement month (month / year)	6/01	7/01	10/01	9/02	8/01	1/02	9/03	8/05	8/01	8/01	9/01	9/03	10/01
Ventilation system	S&E		E				E		E	E	S&E		S&E
Air tightness	2.74	0.40	0.35	0.50	1.32	1.36	1.86	1.91	0.53	0.83	1.10	1.92	0.83

House ID	10	11-a	12-a	12-b	13-a	14	15	16	17	25	36	39
Measurement month (month / year)	11/01	12/01	1/02	8/03	8/02	2/02	9/02	9/02	2/03	12/03	8/04	9/04
Ventilation system	S&E	E	S&E		E	S&E	N	H	N	E	E	E
Air tightness	2.66	0.71	1.22	1.41	0.40	2.30	2.63	0.89	8.16	1.56	1.13	0.77

*"S&E" means forced Supply and Exhaust, "E" means forced Exhaust, "N" means Natural, "H" means Hybrid.

図3-3-4 一定濃度法の測定結果

表 3-3-3 一定濃度法の測定結果

ID		1	2-a	2-b	2-c	4-a	4-b	4-c	4-e	
住戸形式		戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	
換気システム		第1種	第3種							
一定濃度法	外気導入量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	2階	153 (0.90)	59 (0.38)	54 (0.35)	75 (0.48)	26 (0.16)	24 (0.16)	59 (0.37)	40 (0.25)
		1階	89 (0.33)	139 (0.89)	99 (0.64)	92 (0.59)	86 (0.48)	139 (0.82)	129 (0.71)	95 (0.53)
		全体	242 (0.53)	198 (0.64)	153 (0.49)	167 (0.54)	111 (0.33)	163 (0.51)	188 (0.55)	135 (0.40)
	外気導入量が 全体に占める割合	2階	0.63	0.30	0.35	0.45	0.23	0.15	0.32	0.30
		1階	0.37	0.70	0.65	0.55	0.77	0.85	0.69	0.70
気密性能[cm ² /m ²]		2.74	0.40	0.35	0.50	1.32	1.36	1.86	1.91	

ID		5-a	6	7-a	7-c	8-a	10	11-a	12-a	
住戸形式		戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	
換気システム		第3種	第3種	第1種	第1種	第1種	第1種	第3種	第1種	
一定濃度法	外気導入量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	2階	24 (0.17)	41 (0.23)	33 (0.15)	248 (1.14)	6 (0.04)	18 (0.14)	48 (0.23)	14 (0.09)
		1階	65 (0.49)	116 (0.57)	60 (0.27)	142 (0.65)	63 (0.42)	167 (0.84)	108 (0.54)	58 (0.26)
		全体	89 (0.33)	157 (0.41)	92 (0.21)	390 (0.89)	69 (0.25)	184 (0.57)	157 (0.38)	71 (0.19)
	外気導入量が 全体に占める割合	2階	0.27	0.26	0.35	0.64	0.08	0.10	0.31	0.19
		1階	0.73	0.74	0.65	0.36	0.91	0.90	0.69	0.81
気密性能[cm ² /m ²]		0.53	0.83	1.10	1.92	0.83	2.66	0.71	1.22	

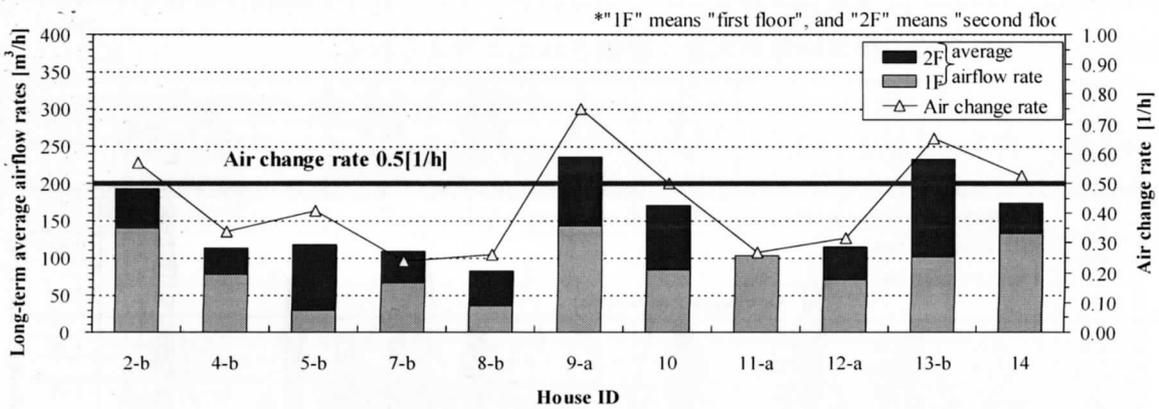
ID		12-c	13-a	14	15	16	17	25	36	
住戸形式		戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	集合	
換気システム		第1種	第3種	第1種	自然換気	ハイブリッド	自然換気	第3種	第3種	
一定濃度法	外気導入量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	2階	24 (0.17)	148 (0.85)	57 (0.30)	4 (0.03)	121 (0.46)	33 (0.29)	76 (0.30)	0 0.00
		1階	215 (0.93)	159 (0.81)	136 (0.76)	58 (0.36)	122 (0.64)	49 (0.32)	96 (0.47)	81 (1.21)
		全体	240 (0.64)	307 (0.88)	193 (0.52)	63 (0.22)	243 (0.53)	82 (0.31)	171 (0.39)	81 (1.21)
	外気導入量が 全体に占める割合	2階	0.10	0.48	0.30	0.07	0.50	0.40	0.44	0.00
		1階	0.90	0.52	0.70	0.93	0.50	0.60	0.56	1.00
気密性能[cm ² /m ²]		1.45	0.40	2.30	2.63	0.89	8.16	1.56	1.13	

ID		39	
住戸形式		戸建	
換気システム		第3種	
一定濃度法	外気導入量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	2階	53 (0.34)
		1階	107 (0.52)
		全体	160 (0.44)
	外気導入量が 全体に占める割合	2階	0.33
		1階	0.67
気密性能[cm ² /m ²]		0.77	

(3) PFT法 (Pentiaq社製) による測定期間内の平均換気量

図3-3-5に11件の住宅におけるPentiaq社製のPFT法による平均換気量の測定結果を、表3-3-4に測定結果の詳細を示す。2.2節でも述べたが、Pentiaq社のPFT法はトレーサーガスを2種類使用して測定を行っている。そのため1・2階の空気交換量と1・2階それぞれへの外気導入量を求めることができる。図3-3-5に示す換気量は1・2階それぞれの外気導入量であり、換気回数はその値を住宅容積で除して求めた。

平均換気量から算出した換気回数が0.5[回/h]を満たしていた住宅は11件中5件であった。11件中7件の住宅において1階の換気量が2階の換気量より大きい結果となった。この測定はすべて冬期に行ったため、室内外温度差が大きく浮力の効果の原因である考えられる。



House ID	2-b	4-b	5-b	7-b	8-b	9-a	10	11-a	12-a	13-b	14
Measurement month (month year)	10/01	1/02	1/02	1/02	12/01	11/01	11/01	12/01	1/02	1/02	2/02
Ventilation system*	E	E	E	S&E	S&E	E	S&E	E	S&E	E	S&E
Air tightness	0.35	1.36	0.59	1.71	0.84	0.93	2.66	0.71	1.22	0.53	2.30

*"S&E" means forced Supply and Exhaust, "E" means forced Exhaust.

図3-3-5 PFT法 (Pentiaq社製) の測定結果

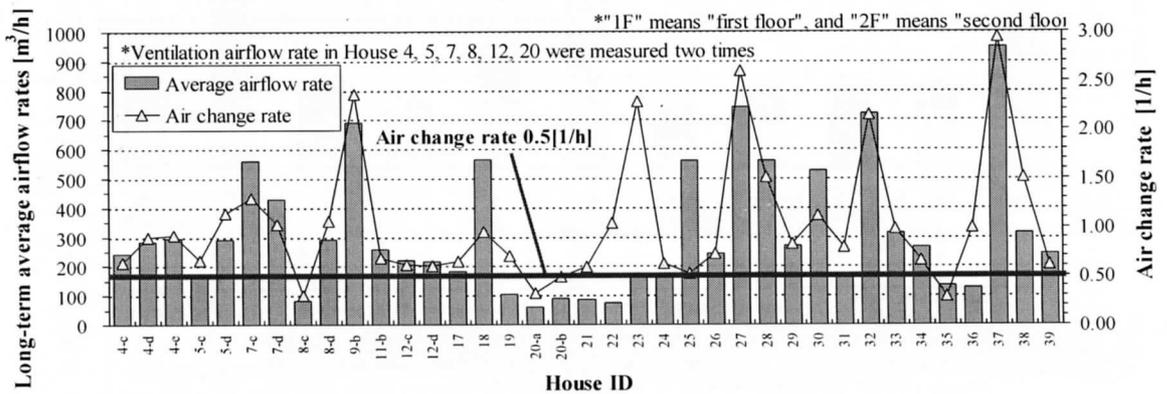
表3-3-4 PFT法 (Pentiaq社製) の測定結果

ID	2-b	4-b	5-b	7-b	8-b	9-a	10	11-a	12-a	13-b	14		
住戸形式	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建	戸建		
換気システム	第3種	第3種	第3種	第1種	第1種	第3種	第1種	第3種	第1種	第3種	第1種		
PFT法 (pentiaq)	外気導入量[m³/h] (換気回数[1/h])	2階	53 (0.52)	35 (0.35)	88 (0.38)	43 (0.27)	47 (0.30)	94 (0.68)	86 (0.48)	103 (0.29)	44 (0.32)	131 (0.69)	41 (0.50)
		1階	140 (0.60)	78 (0.44)	30 (0.32)	66 (0.28)	36 (0.28)	142 (0.78)	84 (0.44)	0 (0.21)	71 (0.33)	101 (0.63)	132 (0.57)
	全体	193 (0.57)	113 (0.34)	118 (0.41)	109 (0.24)	83 (0.26)	236 (0.75)	170 (0.50)	103 (0.27)	115 (0.32)	234 (0.65)	173 (0.53)	
	外気導入量が 全体に占める割合	2階	0.27	0.31	0.75	0.39	0.57	0.40	0.51	1.00	0.38	0.56	0.24
1階		0.73	0.69	0.25	0.61	0.43	0.60	0.49	0.00	0.62	0.43	0.76	
気密性能[cm²/m²]	0.35	1.36	0.59	1.71	0.84	0.93	2.66	0.71	1.22	0.53	2.30		

(4) PFT 法（東大柳沢研究室製）による測定期間内の平均換気量

図 3-3-6 に 30 件（延べ件数で 37 件）の住宅における東京大学柳沢研究室製の PFT 法による平均換気量の測定結果を、表 3-3-5 に測定結果の詳細を示す。図 3-3-6 に示す換気回数はそれぞれのゾーンで求められた平均換気量を足し合わせた値を住宅容積で除して求めた。

平均換気量から算出した換気回数が 0.5[回/h]を満たしていた住宅は 30 件中 27 件（延べ件数では 37 件中 33 件）であった。4 邸では 4 回目（4-d）の測定時の風量が以前の測定時よりも増加している。これは居住者が普段使用している換気システムの運転モードを以前より強いモードに変更したからである。9（9-b）、23、27、32、37、38 邸では換気回数が 1.5[回/h]以上と非常に大きい。この理由として、これらの家では、生活行為として窓開けが頻繁に行われていた。28 邸においても換気回数が 1.5[回/h]と非常に大きい、この原因としては、住宅の容積に対してドーザーの放散量が少なかったため、換気回数が大きく評価されたと考えられる。



House ID	4-c	4-d	4-e	5-c	5-d	7-c	7-d	8-c	8-d	9-b	11-b	12-c	12-d
Measurement month (month year)	9/03	8/04	8/05	8/03	2/04	9/03	9/04	8/03	3/04	9/03	7/03	8/03	8/04
Ventilation system*		E			E	S&E		S&E		E	E		S&E
Air tightness	1.86	1.85	1.91	0.41	0.94	1.92	1.88	0.90	0.94	1.14	0.71	1.45	1.88
House ID	17	18	19	20-a	20-b	21	22	23	24	25	26	27	
Measurement month (month year)	2/03	2/03	3/03	2/03	8/03	2/03	2/03	2/03	8/03	12/03	2/04	2/04	
Ventilation system*	N	N	N	S&E		E	N	N	N	E	N	E	
Air tightness	8.16	4.52	1.52	0.20	0.20	1.65	0.31	13.5	2.80	1.56	1.60	-	
House ID	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
Measurement month (month year)	2/04	2/04	2/04	3/04	3/04	3/04	4/04	4/04	8/04	8/04	8/04	9/04	
Ventilation system*	E	S&E	E	N	E	E	E	N	E	N	N	E	
Air tightness	2.18	0.28	1.23	5.42	2.27	1.12	0.65	1.24	1.13	4.87	9.41	0.77	

*"S&E" means forced Supply and Exhaust, "E" means forced Exhaust, "N" means Natural.

図 3-3-6 PFT 法（東京大学柳沢研究室製）の測定結果

表 3-3-5 PFT 法（東京大学柳沢研究室製）の測定結果

ID	4-c	4-d	4-e	5-c	5-d	7-c	7-d	8-c
住戸形式	戸建	戸建						
換気システム	第3種	第3種	第3種	第3種	第3種	第1種	第1種	第1種
換気量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	242 (0.64)	284 (0.89)	293 (0.92)	167 (0.66)	290 (1.14)	559 (1.30)	428 (1.03)	82 (0.30)
気密性能[cm ² /m ²]	1.86	1.85	1.91	0.41	0.94	1.92	1.88	0.90

ID	8-d	9-b	11-b	12-c	12-d	17	18	19
住戸形式	戸建	集合						
換気システム	第1種	第3種	第3種	第1種	第1種	自然換気	自然換気	自然換気
換気量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	292 (1.06)	690 (2.36)	259 (0.68)	219 (0.62)	217 (0.61)	184 (0.65)	564 (0.95)	106 (0.71)
気密性能[cm ² /m ²]	0.94	1.14	0.71	1.45	1.88	8.16	4.52	1.52

ID	20-a	20-b	21	22	23	24	25	26
住戸形式	集合	集合	集合	集合	集合	戸建	戸建	戸建
換気システム	第1種	第1種	第3種	自然換気	自然換気	自然換気	第3種	自然換気
換気量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	61 (0.33)	90 (0.49)	84 (0.59)	74 (1.04)	176 (2.28)	175 (0.63)	207 (0.53)	244 (0.73)
気密性能[cm ² /m ²]	0.20	0.20	1.65	0.31	13.54	2.80	1.56	1.60

ID	27	28	29	30	31	32	33	34
住戸形式	戸建							
換気システム	第3種	第3種	第1種	第3種	自然換気	第3種	第3種	第3種
換気量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	742 (2.60)	560 (1.51)	267 (0.83)	525 (1.12)	159 (0.80)	721 (2.15)	315 (0.98)	266 (0.66)
気密性能[cm ² /m ²]	-	2.18	0.28	1.23	5.42	2.27	1.12	0.65

ID	35	36	37	38	39
住戸形式	戸建	集合	戸建	戸建	戸建
換気システム	自然換気	第3種	自然換気	自然換気	第3種
換気量[m ³ /h] (換気回数[1/h])	135 (0.29)	125 (1.00)	947 (2.94)	312 (1.51)	242 (0.62)
気密性能[cm ² /m ²]	1.24	1.13	4.87	9.41	0.77

(5) 換気量測定の詳細事例

(a) 対象住宅の概要

外観を写真 3-3-3 に示す。7 邸は 1993 年 7 月、多賀城市に建設された住宅で、延床面積は 182.4[m²] (1F 92.2[m²]、2F 90.3[m²])、住宅全体の容積は 456.0[m³]である。居住者の構成は、夫婦、子供 5 人、祖母の 8 人である。換気システムは第 1 種換気システムである。居間や居室に給気口 (写真 3-3-4)、居室や水回りに排気口 (写真 3-3-5) が設置されている。台所には局所排気ファンが設置してある。また、1 階の和室と浴室、2 階の各子供部屋と書斎に熱交換型給排気口 (写真 3-3-6) が設置してある。7 邸の平面図と PFT 法の設置位置を図 3-3-7 に一定濃度法の設置位置を図 3-3-8 に示す。今回は 2003 年 9 月 29 日から 10 月 4 日に測定した結果について報告する。



写真 3-3-3 7 邸外観

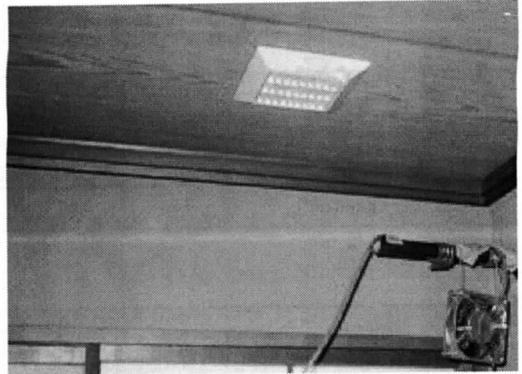


写真 3-4-4 24h システム給気口

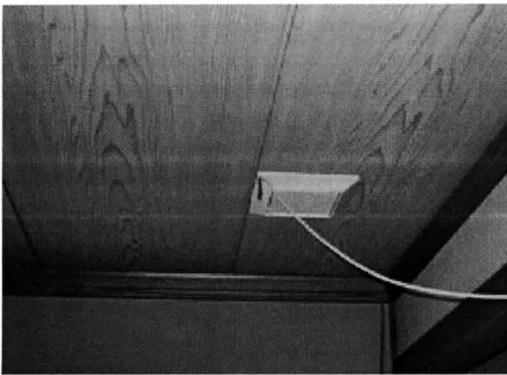


写真 3-3-5 24h システム排気口

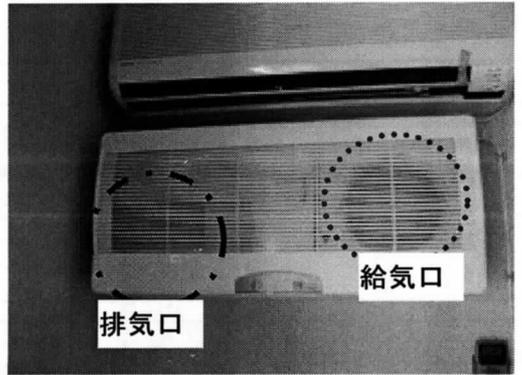
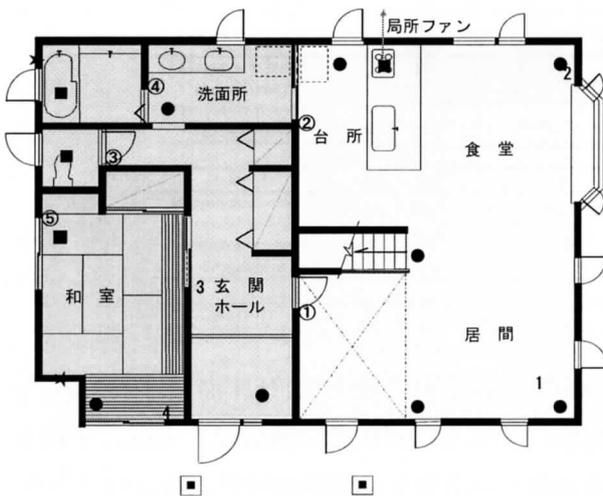
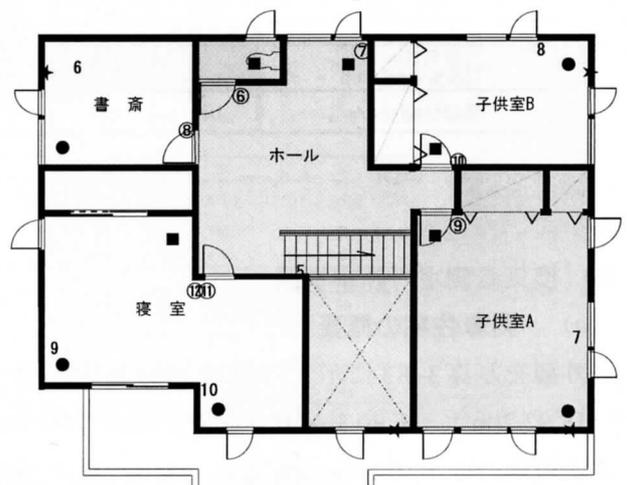


写真 3-3-6 熱交換型給排気口



1 階



2 階

- 機械排気口
- 機械給気口
- ★ 熱交換型給排気口 (ロスナイ)
- 浴室は排気のみ
- ① サンプラー
- 1 ドーザー



図 3-3-7 7 邸平面図と PFT 法設置位置

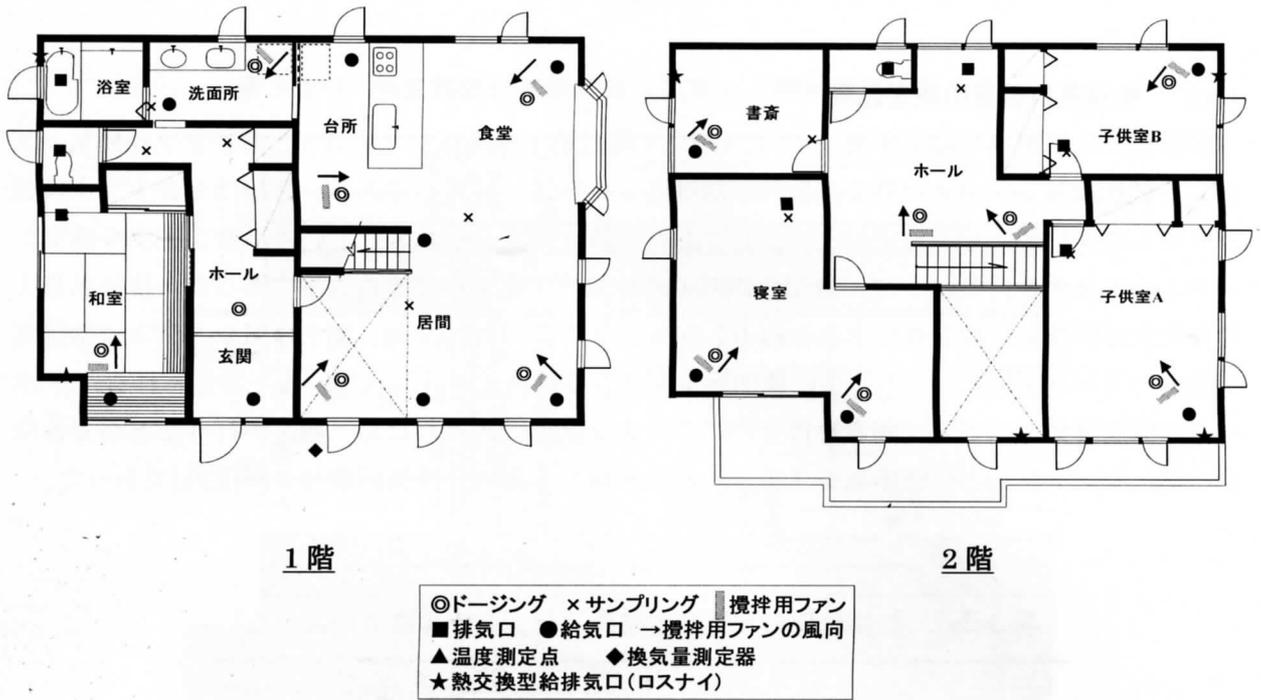


図 3-3-8 7 邸平面図と一定濃度法設置位置

(b) 気密性能の測定結果

表 3-3-6 に気密性能測定結果を示す。測定は条件を変えて 4 回行った。Case1 は給排気口をすべてシールで閉じた状態での測定である。Case2 は給気口をシールなしで、排気口をシールで閉じた状態である。Case3 は給気口をシールなしで、局所排気口とロスナイをシールで閉じた状態である。Case4 は給排気口をすべて開けた状態である。局所排気口のみをシールなしの状態での 24 時間換気システム、熱交換給排気口をシールした状態がこの住宅の気密性能である。気密性能は $1.92[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ であった。7 邸の気密性能は次世代省エネルギー基準による III 地域における単位面積あたりの相当隙間面積の基準値 $5[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ を満たしている。

また、Case1 と Case4 の測定結果より給排気口をシールで閉じていなくても結果に差がなかった。これより、給排気口の周りに隙間がほとんどないといえる。

表 3-3-6 気密試験測定結果

	給気口	排気口	局所機械排気口	熱交換給排気口	相当開口面積 (cm ²)	床面積あたり αA' (cm ² /m ²)
Case1	シール	シール	シール	シール	295	1.72
Case2	シールなし	シール	シール	シール	290	1.69
Case3	シールなし	シールなし	シール	シール	311	1.81
Case4	シールなし	シールなし	シールなし	シールなし	295	1.72

(c) 給排気口風量の測定結果

給排気口の風量測定結果を表3-3-7に示す。7邸は第1種換気システムで、セントラル換気システムと個別換気システム（熱交換器付き給排気システム）設置しており、普段はセントラル換気システムの運転モードを強運転に設定しており、熱交換器も稼働させている。セントラル換気システムの風量測定結果は2階の排気口以外の給排気口で測定可能風量以下であった。排気風量より住宅全体の換気回数を算出すると約0.2回/h以下であった。また、個別換気システムは給排気風量のバランスが取れており、主に個別換気システムで換気が行われていると考えられる。2Fホールの個別換気システムは測定を行うのに不可能な位置にあったため、測定が行うことができなかった。セントラルと個別換気システムの排気風量から求めた換気回数は0.59[回/h]であった。

表3-3-7 給排気口の風量測定結果（セントラル換気システム）

階	室名	給排気	風量(m ³ /h)	
			換気システムの運転モード [*]	
			強	弱
1階	居間	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		給気	(検知域以下)	(検知域以下)
	洗面所	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	(検知域以下)	(検知域以下)
	和室	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	(検知域以下)	(検知域以下)
	トイレ	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	(検知域以下)	(検知域以下)
1階 給気合計		-	-	
1階 排気合計		-	-	
1階の換気回数(h ⁻¹)		-	-	
2階	主寝室	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	8.1	(検知域以下)
	子供室A	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	16.0	14.0
	子供室B	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	14.5	11.9
	書斎	給気	(検知域以下)	(検知域以下)
		排気	(検知域以下)	(検知域以下)
	トイレ	給気	19.0	15.0
排気		19.0	15.0	
2階 給気合計		-	-	
2階 排気合計		57.6	40.9	
2階の換気回数(h ⁻¹)*		0.26	0.19	
家全体 給気合計		-	-	
家全体 排気合計		57.6	40.9	
家全体の換気回数(h ⁻¹)*		0.13	0.09	

*: 排気量より算出

表 3-3-7 熱交換器付き給排気システム（個別換気システム）

1 階	和室	給気(個別)	-	34.4
		排気(個別)	-	31.0
	浴室	排気(個別)	-	42.6
	1階	給気合計	-	34.4
	1階	排気合計	-	73.6
1階の換気回数(h ⁻¹)			-	0.32
2 階	子供室 A	給気(個別)	-	58.3
		排気(個別)	-	64.7
	子供室 B	給気(個別)	-	51.2
		排気(個別)	-	60.6
	書斎	給気(個別)	-	40.2
		排気(個別)	-	29.5
	ホール	給気(個別)	測定不可能	測定不可能
		排気(個別)	測定不可能	測定不可能
	2階	給気合計	-	149.7
	2階	排気合計	-	154.8
2階の換気回数(h ⁻¹)*			-	0.69
家全体 給気合計			-	184.1
家全体 排気合計			-	228.4
家全体の換気回数(h ⁻¹)*			-	0.50

*:排気量より算出

(d) 温度の測定結果

表 3-3-8 に室温・外気温の平均値を示す。9/29 12:00 ~ 10/7 12:00 のデータを用いた。図 3-3-9、図 3-3-10 に測定期間内の室温・外気温の経時変化を示す。1 階と 2 階での平均温度差はほとんどなかった。

表 3-3-8 温度測定結果

	室名	平均温度(°C)
2F	子供室A	23.5
	子供室B	22.5
	主寝室	22.8
	書斎	22.0
	ホール	23.3
1F	和室	22.0
	居間	23.5
	ホール	22.3
	外気	16.1

(5) PFT 法の測定結果

PFT 法による 7 邸の換気量測定の結果を表 3-3-9 に示す。PFT 法では測定位置の平均空気齢が算出される。表 3-3-9 に示す換気回数は各室での平均空気齢を逆数にして算出したものである。また、換気量は換気回数に室容積を掛けて算出した。7 邸では、どのゾーンにおいても換気回数は 1[回/h]程度であった。書斎では換気回数 3.3[回/h]と過換気であった。

表 3-3-9 PFT 法（東京大学柳沢研究室製）測定結果

No.	測定点	空気齢 (min)	換気回数 (1/h)	室容積 (m ³)	換気量 (m ³ /h)
1	LDK(居間)	60.2	1.0	116	116
2	LDK(台所)	49.0	1.2		142
3	ホール・浴室(ホール)	85.8	0.70	65.0	45.4
4	ホール・浴室(洗面所)	85.8	0.70		45.4
5	和室	51.6	1.2	37.3	43.4
1F合計・平均		66.5	1.0	218.6	216.4
6	2Fホール(トイレ前)	60.8	0.99	68.6	67.7
7	2Fホール	58.2	1.0		70.8
8	書斎	18.2	3.3	21.0	69.3
9	子供室A	44.6	1.4	46.1	62.0
10	子供室B	28.3	2.1	30.1	63.7
12	主寝室	41.2	1.5	52.6	76.7
2F合計・平均		41.9	1.7	218.4	342.5
全体		46.9	1.3	437	559

(6) 一定濃度法の測定結果

一定濃度法による換気量測定の結果として、トレーサーガス SF₆ 濃度、CO₂ 濃度、換気回数の経時変化を図 3-3-9、図 3-3-10 に示す。

図 3-3-9、図 3-3-10 について、SF₆ の設定濃度は 5ppm であり、1 階和室ではやや乱れが大きいのが全体的にほぼ安定している。測定は個別換気システム（熱交換器）を OFF にした場合と ON にした場合の 2 条件で行った。測定期間は個別換気システムが OFF の場合が 9/29 12:00 ~ 10/1 12:00 まで行い、個別換気システム ON の場合が 10/1 12:00 ~ 10/7 12:00 まで行った。図 3-3-9 より 1 階では個別換気システムが OFF の場合、全体的に換気回数が小さく、CO₂ 濃度が高い。個別換気システムを ON にした場合は全体的に換気回数が大きくなり、CO₂ 濃度もほぼ 1000ppm 以下に抑えられていることが分かる。2 階でも同様のことが言え、図 3-3-10 より個別換気システムを ON にした場合は全体的に換気回数が大きくなり、CO₂ 濃度もほぼ 1000ppm 以下に抑えられていることが分かる。特に、子供室 A では個別換気システム OFF の場合、CO₂ 濃度 2500ppm 付近まで上昇しているが、個別換気システムを ON にした場合は 1000ppm 以下に抑えられている。個別換気システムの設置により、室内空気汚染が抑制されていることが分かる。

表 3-3-10 に各部屋の換気回数、換気量の平均値を示す。これは人の出入りなど外乱の影響が少ない 9/29 ~ 10/7 の夜間 (0:00~6:00) のデータを使用した。(a)が個別換気システムを OFF にした状態のデータ(b)が個別換気システムを ON にした状態のデータを用いた。個別換気システムが OFF の状態は全体的に換気回数が小さいが、個別換気システムを ON の状態にすることで各部屋において必要換気回数 0.5[回/h]を上回り、換気性状が改善されていると言える。個別換気システム ON の場合、住宅全体の外気導入量に対して、1 階全体の外気導入量が占める割合は 35%、2 階全体の外気導入量が占める割合は 65%と OFF の場合に比べて 1 階と 2 階の外気導入量のバランスが悪い。これは 2 階の個別換気システムの設置箇所が 4 箇所に対し、1 階は 2 箇所であることが原因と考えられる。

表 3-3-10 換気回数・換気量の平均値

(a) 個別換気 OFF 夜間データ使用 (9/30 0:00~6:00)

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]	割合
2F	書斎	21.0	0.95	19.9	0.13
	子供室B	30.1	0.17	5.2	0.03
	子供室A	46.1	0.14	6.5	0.04
	寝室	52.6	0.45	23.9	0.16
	ホール	68.6	0.20	13.7	0.09
2Fの合計		218.4	0.32	69.2	0.45
1F	洗面・浴室	21.6	0.58	12.6	0.08
	玄関・ホール	43.4	0.52	22.7	0.15
	和室	37.3	0.59	21.9	0.14
	居間・食堂・台所	116.3	0.22	26.1	0.17
1Fの合計		218.6	0.38	83.4	0.55
合計		437.0	0.35	153	-

(b) 個別換気 ON 夜間データ使用 (10/2~10/7 0:00~6:00)

	室名	室容積 [m ³]	換気回数 [回/h]	外気導入量 [m ³ /h]	割合
2F	書斎	21.0	0.93	19.6	0.05
	子供室B	30.1	2.33	70.1	0.18
	子供室A	46.1	1.29	59.5	0.15
	寝室	52.6	0.48	25.2	0.06
	ホール	68.6	1.07	73.8	0.19
2Fの合計		218.4	1.14	248.1	0.64
1F	洗面・浴室	21.6	0.78	16.9	0.04
	玄関・ホール	43.4	0.67	29.2	0.07
	和室	37.3	1.07	39.8	0.10
	居間・食堂・台所	116.3	0.48	56.3	0.14
1Fの合計		218.6	0.65	142.3	0.36
合計		437.0	0.89	390	-

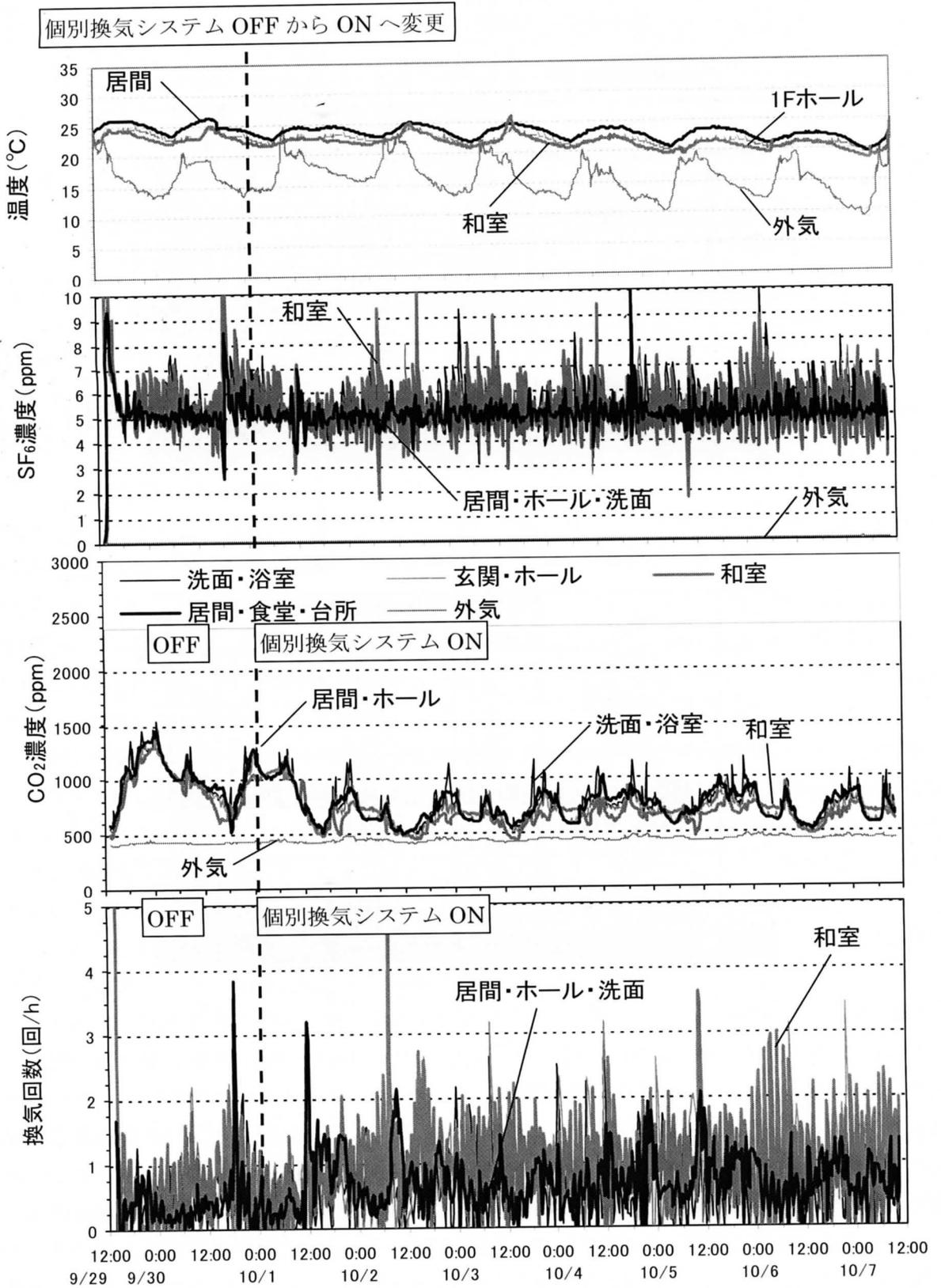


図 3-3-9 1階の温度・SF₆濃度・CO₂濃度・換気回数の経時変化

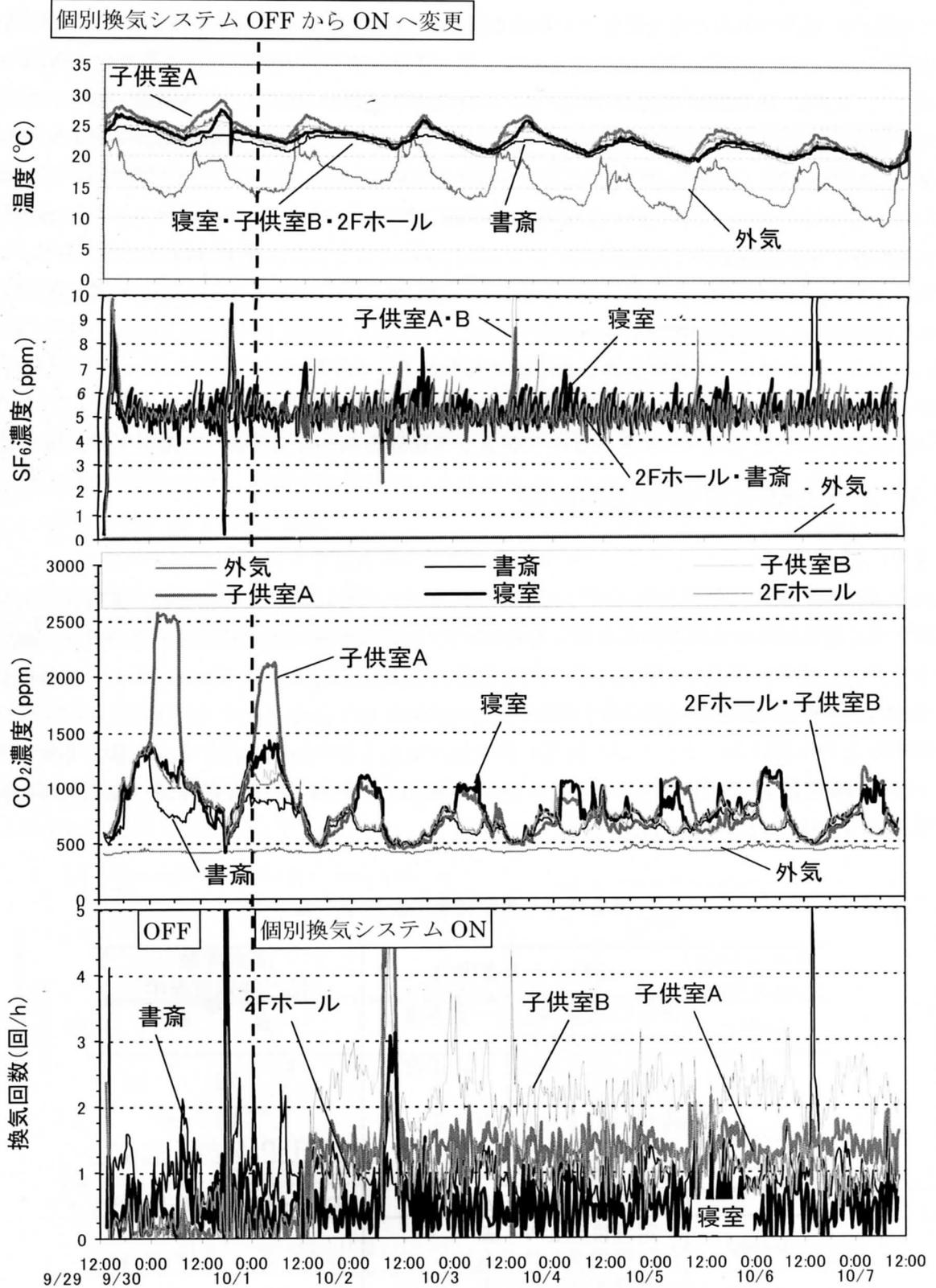


図 3-3-10 2 階の温度・SF₆ 濃度・CO₂ 濃度・換気回数の経時変化

(7) まとめ

多賀城市に建設されたI邸を対象とした実測調査について報告した。その結果、7邸では、単位床面積あたりの相当隙間面積が次世代省エネルギー基準によるIII地域における基準値 $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ を満たしていた。風量測定結果からセントラル換気システムからはほとんど風量が得られなかったが、個別換気システムは給排気風量のバランスが取れており、主に個別換気システムで換気が行われていると考えられる。PFT法による換気量測定結果から、ほとんどの空間において必要換気回数 $0.5[\text{回}/\text{h}]$ を上回った。2階の部屋では全体的に換気回数が高く、やや過換気ぎみであった。一定濃度法の測定結果から、個別換気システムをONにした場合、換気回数が大きくなり、 CO_2 濃度が 1000ppm 以下に抑えられていたことより、個別換気システムを用いることが効果的であることが分かった。

3.4 3つの換気量測定法の比較

3.4.1 はじめに

本節では、3種類の換気量測定法により得られたデータを比較し、それぞれの測定法の特徴を把握する。測定結果の比較ケースを表3-4-1に示す。排気口風量測定の結果と一定濃度法の測定結果を比較し、建物の漏気量を確認する。PFT法と一定濃度法を比較することにより、居住時におけるPFT法の測定精度について検討する。排気口風量とPFT法を比較することによって、ドアや窓開閉などの生活行為によってどの程度の換気量に変化するのかを検討する。比較するデータはすべて同時期に測定を行ったものである。以下、Pentiaq社製PFT法をPFT-P法、東京大学柳沢研究室製PFT法をPFT-Y法と呼ぶ。

表 3-4-1 測定結果の比較ケース

Comparison case No.	比較する測定方法	測定件数 (延べ件数で表示)
Case1	排気口風量測定と一定濃度法 (第1種換気システム)	7
Case2	排気口風量測定と一定濃度法 (第3種換気システム)	13
Case3	排気口風量測定とPFT法 (第1種換気システム)	13 (PFT-P: 5, PFT-Y: 8)
Case4	排気口風量測定とPFT法 (第3種換気システム)	22 (PFT-P: 6, PFT-Y: 16)
Case5	一定濃度法とPFT法 (第1種換気システム)	4 (PFT-P: 3, PFT-Y: 1)
Case6	一定濃度法とPFT法 (第3種換気システム)	8 (PFT-P: 3, PFT-Y: 5)

3.4.2 排気口における風量測定と一定濃度法の比較

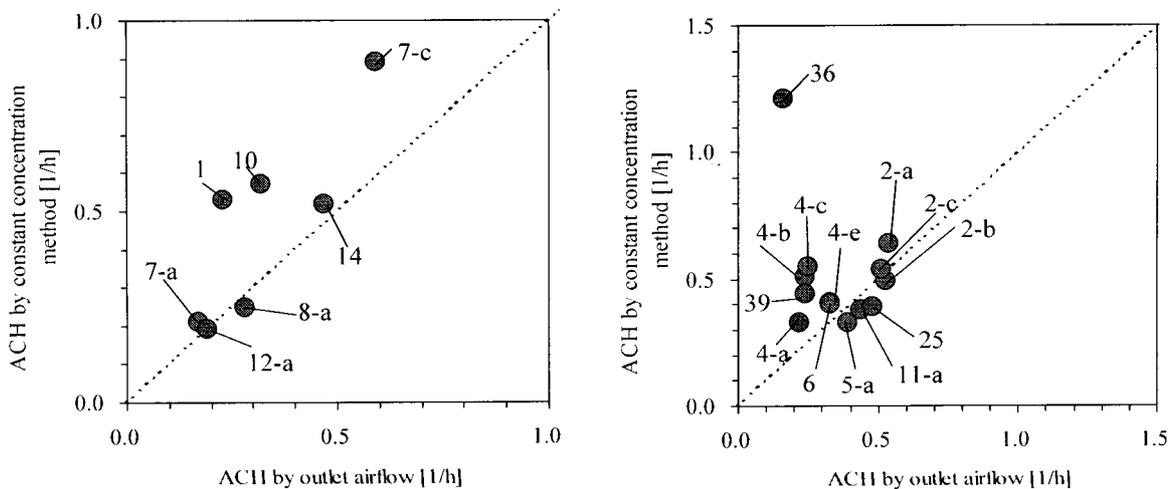
両測定は同時期に行われたが、排気口風量測定は風量が安定した後、10秒間の平均値を測定したのに対し、一定濃度法は測定期間内の夜間のデータ(0:00~6:00)を使用した。以下の比較については2つの測定法を行った測定期間が異なることに注意する必要がある。一定濃度法では人の動きや生活行為の影響が少ないと考えられる夜間のデータを使用することで住宅そのものの外気導入量を評価している。この値と排気口風量を比較することで、本節では、建物の漏気量について検討したい。

図3-4-1(a)に第1種換気システムを備え付けている住宅の排気口風量測定と一定濃度法の測定結果の比較を、図3-4-1(b)には第3種換気システムを備えている住宅の比較を示す。

図3-4-1(a)より7件中6件の住宅において一定濃度法による換気回数が排気口風量による換気回数を上回った。この2つの測定法の差は建物の漏気量と考えられる。7邸では3回目の測定(7-c)による換気回数が1回目の測定の約3倍程度となっている。これは7邸では3回目の測定を行う前に住宅に新しい換気システムを設置したためであると考えられる。なぜならば7邸は住宅の気密性能が高いため、外部の気象条件(内外温度差、屋外風速)の影響を受けにくいからである。また、7邸での3回目の測定(7-c)においては1回目の測定(7-a)より漏気量が大きくなっている。これは1回目の測定よりも住宅の気密性能が低下しているためであると考えられる。1、10邸では他の住宅よりも気密性能が低いため、漏気量も大きくなっていることが分かる。

図3-4-1(b)より13件中9件の住宅において一定濃度法による換気回数が排気口風量による換気回数を上回った。36邸では一定濃度法による換気回数が排気口風量の約7倍程度となった。36邸では給気口が開け放たれていたこと、測定時の風速が強くSF₆濃度が安定しなかったことにより換気回数が極端に大きくなっていた。

排気口風量と一定濃度法の換気回数の差は全体で約20%程度であった。この差は建物の漏気量を示している。



(a) 第1種換気システム

(b) 第3種換気システム

図3-4-1 排気口風量測定と一定濃度法の測定結果の比較

3.4.3 排気口における風量測定と PFT 法の比較

両測定は同時期に行われたが、排気口風量測定は風量が安定した後、10秒間の平均値を測定したのに対し、PFT-P法では1ヶ月間、PFT-Y法は1週間の平均換気量を測定している。以下の比較については2つの測定法を行った測定期間が異なることに注意する必要がある。PFT法の測定は測定期間内の平均換気量を示しており、居住者のドアや窓開閉行為による換気量の誤差が含まれている。この値と排気口風量を比較することで、本節では、ドアや窓開閉などの生活行為によってどの程度の換気量が増減するのかを検討する。

図3-4-2(a)に第1種換気システムを備え付けている住宅の排気口風量測定とPFT法の測定結果の比較を、図3-4-2(b)には第3種換気システムを備えている住宅の比較を示す。

図3-4-2(a)より13件中12件の住宅においてPFT法による換気回数が排気口風量による換気回数を上回った。この2つの測定法の差はドアや窓開閉による居住者の生活行為の影響と考えられる。7、12邸では先ほどと同様、新たな換気システムの設置により7、12邸共に以前の測定(7-b、12-a)に比べて3回目の測定(7-c、12-c)において換気回数が増加している。しかしながら、4回目の測定(7-d、12-d)は3回目の測定に比べて換気回数が低下している。これは換気システムのメンテナンス不足が原因と考えられる。20邸ではPFT法による換気回数が排気口風量による換気回数を下回った。20邸は日中、住宅に誰もおらず、普段から換気システムを常用していないことが原因と考えられる。

図3-4-2(b)より22件中21件の住宅においてPFT法による換気回数が排気口風量による換気回数を上回った。4邸では5回目の測定(4-e)、5邸では4回目の測定(5-d)において以前の測定(4-c、5-b)に比べて換気回数が大きくなっている。これは居住者が以前の測定時よりも換気システムの運転モードを強くしたためである。9(9-b)、27、32邸ではPFT法による換気回数が1.5[回/h]以上と非常に大きい。この理由として、これらの家では、生活行為として窓開けが頻繁に行われていた。28邸では住宅の容積に対してドーザーの放散量が少なかったため、換気回数が大きく評価された。

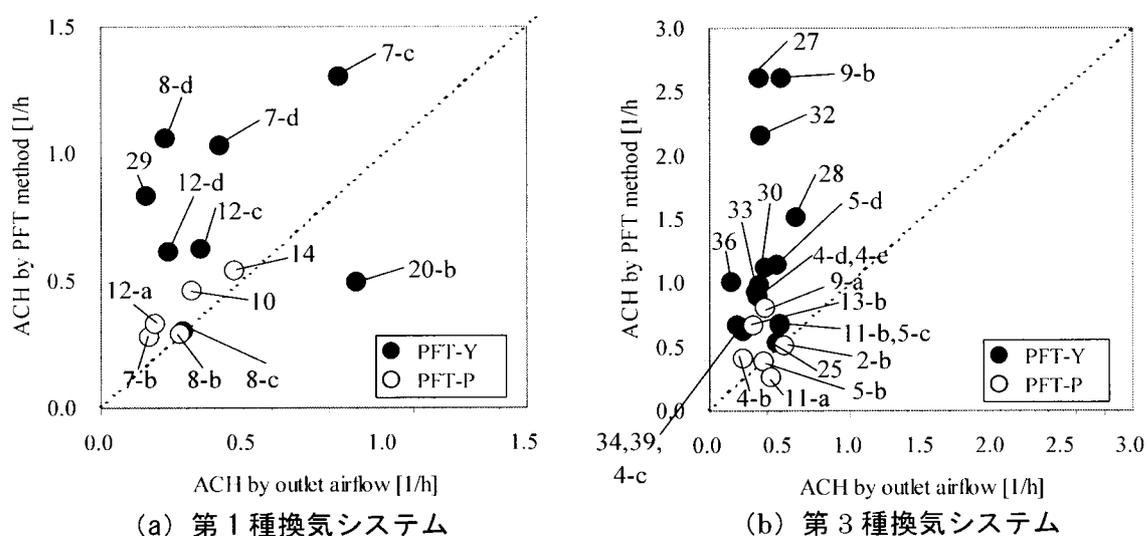


図3-4-2 排気口風量測定とPFT法の測定結果の比較

3.4.4 一定濃度法とPFT法の比較

両測定は同時期に行われたが、一定濃度法は1週間の測定期間全体の値を使用しているのに対し、PFT-P法では1ヶ月間の平均換気量を測定している。ただしPFT-Y法と一定濃度法の測定期間は完全に一致している。PFT法と一定濃度法を比較することにより、居住時におけるPFT法の測定精度について検討する。

図3-4-3(a)に第1種換気システムを備え付けている住宅の排気口風量測定とPFT法の測定結果の比較を、図3-4-3(b)には第3種換気システムを備えている住宅の比較を示す。

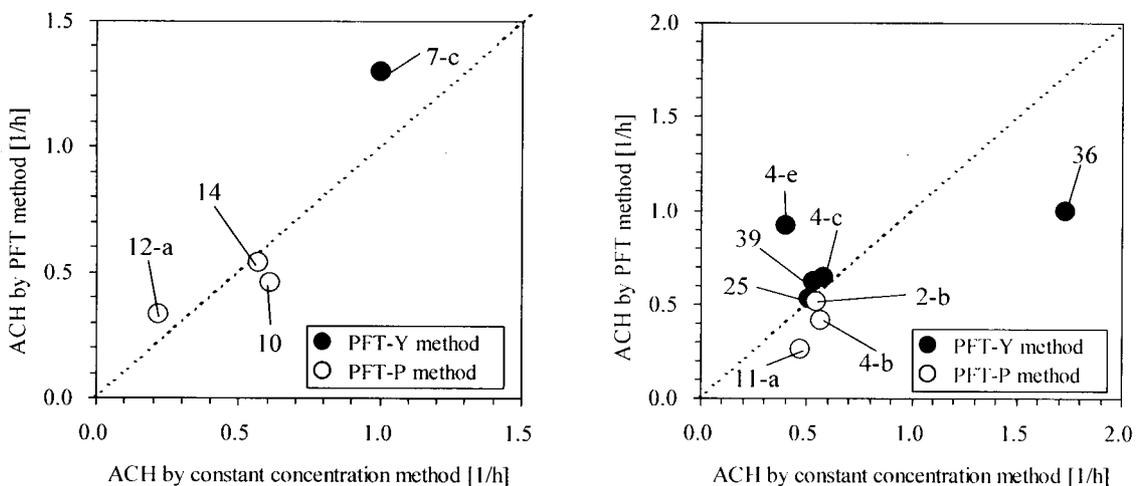
図3-4-3(a)よりPFT法と一定濃度法の測定結果は比較的良く一致していると言える。これらの住宅では測定期間中にほとんど窓開け換気は行われなかった。

図3-4-3(b)よりPFT法と一定濃度法の測定結果は比較的良く一致している。36邸では先ほどと同様、給気口が開け放たれていたこと、測定時の風速が強くSF₆濃度が安定しなかったことにより一定濃度法の換気回数が極端に大きくなっていった。第3種換気システムより、第1種換気システムを備えている住宅のPFT法と一定濃度法の測定結果がよく一致していた。第3種システムの住宅では自然換気口が外部の気象条件の影響を受けやすいため、PFT法による換気回数が大きくなり、第1種の住宅より結果が一致しなかったのではないかと考えられる。4、11邸では一定濃度法による換気回数がPFT法を上回った。これは4、11邸の測定時、外部の気象変化が激しかったため、SF₆濃度が安定しなかったことにより一定濃度法の換気回数が大きくなっている。

一定濃度法とPFT法の換気回数の誤差は全体で約12%程度と比較的良く一致していた。(36邸の結果を除く)

一定濃度法とPFT法の換気回数の誤差は最大で約40%程度であったが、回帰分析を行ったところ有意確率1%以下であり、有意な関連が見られた。(4-e、36邸の結果を除く)

4-e邸では測定器の設置位置が換気経路上から外れていたため、PFT法では換気回数を大きく評価してしまったと考えられる。



(a) 第1種換気システム

(b) 第3種換気システム

図3-4-3 一定濃度法とPFT法の測定結果の比較

3.5 機械換気システムの給排気口における風量測定とメンテナンスに関する調査

3.5.1 はじめに

機械換気設備が設置されているにも関わらず、住宅の換気量が不足している原因の1つとして、給排気口のガラリ、フィルター、防虫網の埃や虫などによる目詰まりが考えられる。そこで、機械換気設備が設置された東北地方の住宅12件を対象として、換気量測定と換気システムのフィルター等の汚れに関する調査を実施する。居住状態における換気量の簡易測定法として、フード式風量計を用いた換気システムの給排気口の風量測定を選定し、フィルター等の清掃前後における風量測定を行う。また、居住者に対して、換気システムの使用状況やフィルター等の清掃状況に関するヒアリング調査も行う。

3.5.2 対象住宅の概要

表3-5-1に、調査対象住宅の概要（住戸形式・換気システム・延床面積・竣工時期・気密性能・測定日・測定方法・内外温度差・屋外風速）を示す。調査期間は2005年8月・10月である。対象住宅は12件で、全て戸建住宅である。2件（住宅4・7）は前述の2001年～2005年に実施した調査の対象住宅で、シックハウスの疑いがある。残りの10件（住宅A～J）では、シックハウス等の問題は出ていない。住宅A～G、I～Jは、建築基準法の改正後に建設された住宅である。

住宅の気密性能は、気密測定器（コーナー札幌製、KNS-400）を用いて減圧法で測定した。居室開口部に測定器を設置して排気を行い、その時に生じる室内外差圧と風量とを測定する。この測定結果を用いて、室内外差圧が1mmAq時の単位床面積あたりの相当隙間面積 $\alpha A'$ を算出し、気密性能を評価した。住宅A～Jの気密性能は、単位床面積あたりの相当隙間面積で $2[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ よりも小さく、高气密住宅である。但し、住宅A～Hの表中の値は竣工直後の測定値であり、気密性能が劣化している可能性がある。特に、築年数が約4年の住宅Hは、他の住宅と比較して気密性能が大きく変化していると考えられる。設置されている換気システムは、熱交換器付き機械給排気（第1種換気）システムが9件、機械排気（第3種換気）システムが3件である。

換気システムの給排気口の風量は、熱線式風量計（コーナー札幌製、Swema Flow 65）を用いて測定した。給排気口の風量が安定した後、10秒間の平均値を測定結果とした。内外温度差は（室内温度－外気温）である。室内温度と外気温度は、湿温度センサ付小型データロガー（測定精度温度： $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、相対湿度： $\pm 5.0\% \text{RH}$ ）を用いて測定した。外部風速はそれぞれの住宅の近くにある気象台の測定データであり、表に示した値は実測期間内の風速データの平均値である。気象データによる外部風速は4分の1乗則によって高さ6mの風速に補正した。

表 3-5-1 対象住宅の概要

住宅ID	住戸形式	換気システム	延床面積 [m ²]	竣工時期	気密性能 [cm ² /m ²]	測定日	測定方法	内外温度差 [°C]	屋外風速 [m/s]
A	戸建	第1種熱交換	154.7	2004年11月	0.6	2005年10月	風量測定	0.8	1.05
B	戸建	第1種熱交換	124.6	2005年3月	0.5	2005年10月	風量測定	0	2.16
C	戸建	第1種熱交換	147.7	2005年3月	0.6	2005年10月	風量測定	-0.1	0.73
D	戸建	第1種熱交換	151.4	2004年12月	0.6	2005年10月	風量測定	-0.3	1.37
E	戸建	第1種熱交換	128.7	2005年3月	0.5	2005年10月	風量測定	-0.7	2.27
F	戸建	第1種熱交換	205.9	2004年11月	0.6	2005年10月	風量測定	0.2	1.34
G	戸建	第1種熱交換	151.4	2004年10月	0.6	2005年10月	風量測定	0.2	1.26
H	戸建	第1種熱交換	194.6	2001年11月	0.7	2005年10月	風量測定	5	1.24
I	戸建	第3種	121.8	2003年12月	0.8	2005年10月	風量測定	5.1	5.23
J	戸建	第3種	157.9	2004年3月	0.6	2005年10月	風量測定	3.2	4.57
4-e	戸建	第3種	134.2	1998年3月	1.91	2005年8月	風量測定	-	1.96
7-e	戸建	第1種熱交換	173.3	1995年6月	2.03	2005年10月	風量測定	-	3.92

※ 住宅A~Hの気密性能は竣工直後の測定値である。

3.5.3 メンテナンスに関する居住者へのヒアリング調査結果

表 3-5-2、図 3-5-1 に、調査住宅の居住者を対象として実施した、換気システムの使用状況およびメンテナンス（フィルター等の清掃）に関するヒアリング調査の結果を示す。

(1) 換気システムの運転状況

換気システムは、全ての住宅で常時運転されていた。運転モードに関しては、設置されている換気システムが住宅毎に異なるため、使用できる運転モードも様々である。風量を強・弱の2段階で変更できる住宅が9件と最も多く、3段階が1件、ダイヤル式が2件であった。日常的に使用している運転モードは、最も風量の大きい状態（強運転）で運転している住宅が4件（33%）、ダイヤル式で最大風量の65%で運転している住宅が1件（8%）、最も風量の小さい状態（弱運転）で運転している住宅が7件（58%）である（図 3-5-1 (a) 参照）。住宅Iでは、普段は強運転で使用しているが、居間の排気口における騒音が大きくなってきたため、測定日の1週間前から弱運転に変更して運転を行っていた。調査した結果、騒音の原因は、排気口内部に設置されているフィルターの埃による目詰まりであった。同様に、騒音の問題で、強ではなく弱で運転していたのが住宅Cである。この住宅では、換気システムのメンテナンス（清掃）が定期的に行われており、フィルター等の汚れ以外の原因が考えられたが、調査した結果、排気口の風量が100m³/h余りと非常に大きいことが確認された。

(2) 換気システムのメンテナンス（清掃）の状況

換気システムのメンテナンスが必要であることを知っているか質問したところ、図 3-5-1 (b) に示すように、半数の居住者が知っていた。しかし、そのうちの3件（住宅I・J・7-e）の居住者は住宅関連の職業に就いているので、実質的には、9件中3件（33%）の居住者しかメンテナンスの必要性について認識していないことが分かった。

換気システムのメンテナンスの方法は、メーカーの取扱説明書に記載されている。そこで、取扱説明書を読んだことがあるかという質問をしたところ、図 3-5-1 (c) に示すように、67%の居住者が呼んだことがあると回答した。しかし、他の質問に対する回答結果から総合的に判断すると、取扱説明書のメンテナンスに関する事項について熟読している居住者は少ないと考えられる。

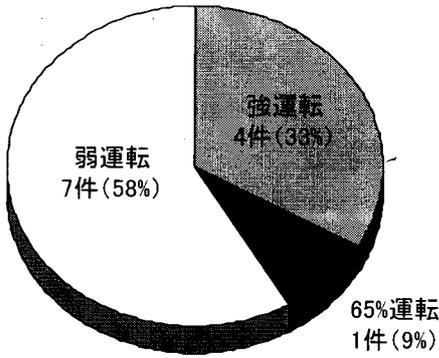
表 3-5-2 換気システムの使用状況・メンテナンスに関するヒアリング調査結果

	A	B	C	D	E	F
換気システムの方式	第1種熱交換	第1種熱交換	第1種熱交換	第1種熱交換	第1種熱交換	第1種熱交換
換気システムの運転状況	常時	常時	常時	常時	常時	常時
換気システムの運転モード	強(2)/2	弱(1)/2	弱(1)/2	弱(1)/2	強(2)/2	弱(1)/3
メンテナンス(清掃)の必要性を知っている	No	Yes	Yes	No	No	No
取扱説明書を読んだことがある	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No
メンテナンス(清掃)をしたことがある	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
メンテナンス(清掃)をした箇所						
①熱交換ユニット排気側フィルター	●(目視可能)	●(目視可能)	●(目視可能)	●(目視可能)	●(目視可能)	×
②熱交換ユニット給気側防虫網	×	●	●	×	×	
③熱交換ユニット給気側フィルター	×	●	●	×	×	×
④排気口フィルター	×(目視可能)	×(目視可能)	●(目視可能)	×(目視可能)	×(目視可能)	●(フィルター無) ^{注1)}
⑤給気口フィルター						
メンテナンス(清掃)の間隔	半年に1回	3ヶ月に1回	3ヶ月に1回	半年に1回	1ヶ月に1回	半年に1回
取扱説明書のメンテナンス(清掃)の間隔	1ヶ月に1回	1ヶ月に1回	1ヶ月に1回	1ヶ月に1回	1ヶ月に1回	1ヶ月に1回
前回のメンテナンス(清掃)からの経過時間	半年	3ヶ月	4日	?	1ヶ月	半年
換気システムの運用期間	11ヶ月	7ヶ月	7ヶ月	10ヶ月	7ヶ月	11ヶ月
メンテナンス(清掃)の方法	掃除機	掃除機	掃除機 水洗い	掃除機	掃除機	掃除機

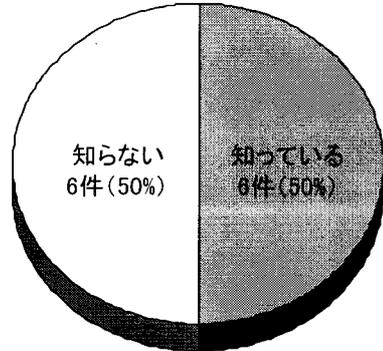
	G	H	I	J	4-e	7-e
換気システムの方式	第1種熱交換	第1種熱交換	第3種	第3種	第3種	第1種熱交換
換気システムの運転状況	常時	常時	常時	常時	常時	常時
換気システムの運転モード	弱(1)/2	弱(1)/2	強(2)/2	100%/100%	65%/100%	弱/2
メンテナンス(清掃)の必要性を知っている	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
取扱説明書を読んだことがある	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
メンテナンス(清掃)をしたことがある	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
メンテナンス(清掃)をした箇所						
①熱交換ユニット排気側フィルター	●(目視可能)	●				●
②熱交換ユニット給気側防虫網	×	●				●
③熱交換ユニット給気側フィルター	×	●				●
④排気口フィルター	×(フィルター無)		●	●	×	
⑤給気口フィルター			×	×		
メンテナンス(清掃)の間隔	1ヶ月に1回	1年に1回	1年に1回	1年に1回	-	3ヶ月に1回
取扱説明書のメンテナンス(清掃)の間隔	1ヶ月に1回	半年に1回	2ヶ月に1回	3ヶ月に1回	3ヶ月に1回	?
前回のメンテナンス(清掃)からの経過時間	1ヶ月	10ヶ月	5ヶ月	7ヶ月	1年 ^{注2)}	2ヶ月
換気システムの運用期間	1年	3年11ヶ月	1年10ヶ月	1年7ヶ月	7年7ヶ月	1年11ヶ月
メンテナンス(清掃)の方法	掃除機	掃除機 水洗い	掃除機 水洗い	掃除機	-	掃除機 水洗い

注1) フィルターは設置されていないが、ガラの埃を掃除機で吸引した。

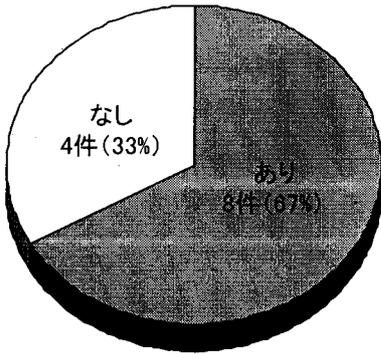
注2) 1年前の気密測定で住宅内を減圧した際に、フィルター表面の埃が落ちた。



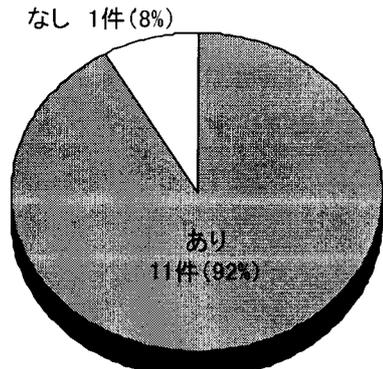
(a) 換気システムの運転モード



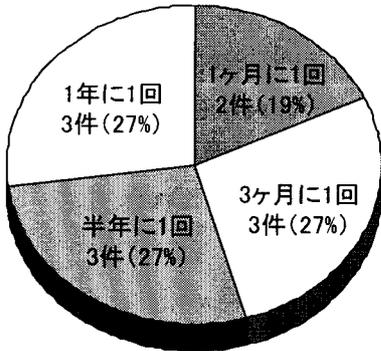
(b) メンテナンスの必要性を知っているか



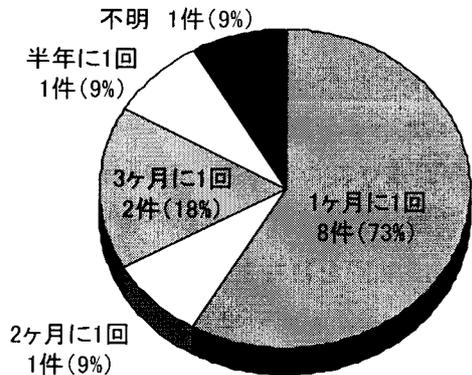
(c) 取扱説明書を読んだことはあるか



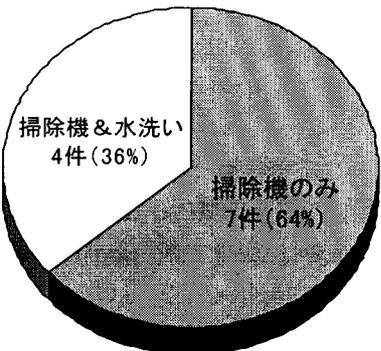
(d) メンテナンスをしたことはあるか



(e) メンテナンス（清掃）の間隔



(f) メンテナンスの間隔（取扱説明書）



(g) メンテナンス（清掃）の方法

図3-5-1 換気システムの使用状況・メンテナンスに関するヒアリング調査結果

この事実が明確に表れているのが、居住者が実際にメンテナンス（清掃）を行った箇所である。表3-6-2には、清掃の必要な箇所（換気システムの風量低下の原因となる可能性の高いフィルターを中心に）を示し、各住宅の清掃状況について、清掃したことがある場合には●を、入居後1度も清掃したことがない場合には×を表示している。

この結果を見ると、フィルターの大きさや設置位置により、換気システムのメンテナンスに関心の薄い居住者に対しても清掃を促すことができるということが分かる。例えば、住宅A・Gでは、居住者が「メンテナンスの必要性を知らない」、「取扱説明書を読んだことがない」と回答したのにも関わらず、両方の住宅において、熱交換ユニット排気側フィルターの清掃を実施している。写真3-5-1に示すように、このフィルターは約30cm角と大型で、目視できる位置に設置されており、居住者がフィルターの汚れを認識できたと推察される。「メンテナンスの必要性を知らない」と回答した住宅D・Eについても、同様のことが言える。図3-5-1(d)に示したように、メンテナンス（清掃）をしたことがあると回答したのが11件（92%）と非常に多かった理由も、汚れを認識しやすいフィルターが設置されていたためと考えられる。

同様に目視が可能な排気口フィルターは、トイレ等に設置された直径5cm程の小さなもので、汚れを認識しにくく清掃を行っていない住宅がほとんどであった。また、熱交換ユニット内に設置されたフィルターや防虫網（写真3-5-3～5）、給気口や排気口のガラリ（写真3-5-6、3-5-7）の奥に設置されたフィルターは清掃されにくいことが分かる。熱交換換気システムの設置された住宅では、ユニット内にフィルターや防虫網が設置されていることすら知らない居住者が多いことも判明した。

清掃が必要と考えられる箇所全てについて清掃を実施していた住宅は、3件（住宅C・H・7-e）のみであった。

次に、メンテナンス（清掃）を行ったことがあると回答した11件の居住者に対して、どの程度の間隔で清掃を実施しているかを質問した。取扱説明書には、フィルター清掃の目安として、1ヶ月～半年に1回を目安としており、その内訳は、1ヶ月に1回が7件（%）、2ヶ月に1回が1件（9%）、3ヶ月に1回が2件（18%）、半年に1回が1件（9%）、不明が1件（取扱説明書が見当たらなかった）である（図3-5-1(f)）。回答結果は、図3-5-1(e)に示すように、1ヶ月に1回が2件（18%）、3ヶ月に1回が3件（27%）、半年に1回が3件（27%）、1年に1回が3件（27%）であった。全ての必要箇所で行った清掃を実施していた3件（住宅C・H・7-e）においても（住宅7-eは、取扱説明書が確認できなかったため除く）、実際の清掃頻度は、推奨されている目安よりも少なかった。

メンテナンス（清掃）の方法については、取扱説明書では、掃除機による吸引と、汚れのひどい場合には、台所用中性洗剤を用いて水洗いすることを推奨している。結果は、図3-5-1(g)に示すように、掃除機のみが7件（64%）、水洗いも行うと回答したのが4件（36%）であった。



写真 3-5-1 熱交換ユニット排気側フィルター
(住宅 A~E・G、目視可能)

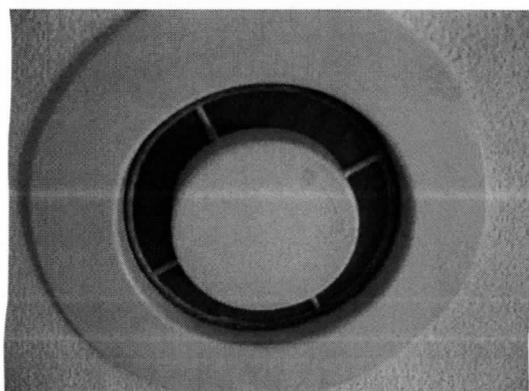


写真 3-5-2 フィルター付きの排気口
(住宅 A~E、目視可能)



写真 3-5-3 熱交換ユニット内部 (住宅 A~E・G)
(排気側・給気側フィルターを外した状態)



写真 3-5-4 給気側フィルター
(住宅 A~E・G、熱交換ユニットに内臓)

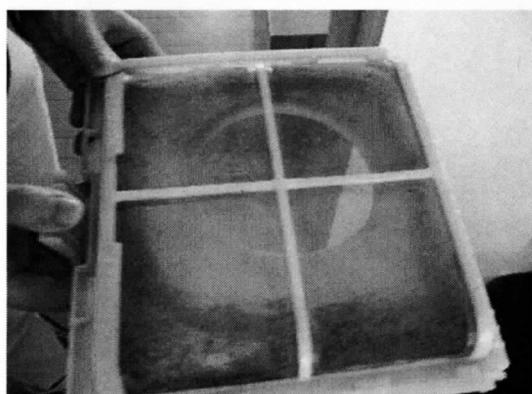


写真 3-5-5 給気側防虫網
(住宅 A~E・G、熱交換ユニットに内臓)

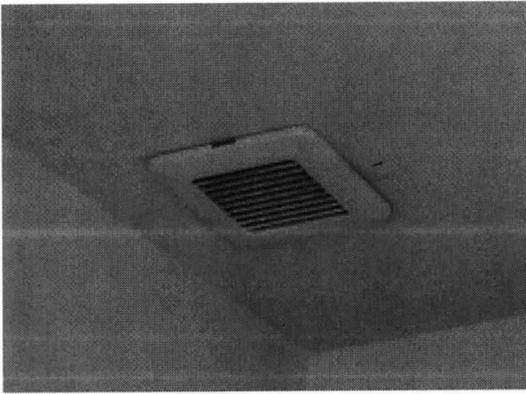


写真 3-5-6 排気口
(住宅 I・J、内部にフィルター有り)

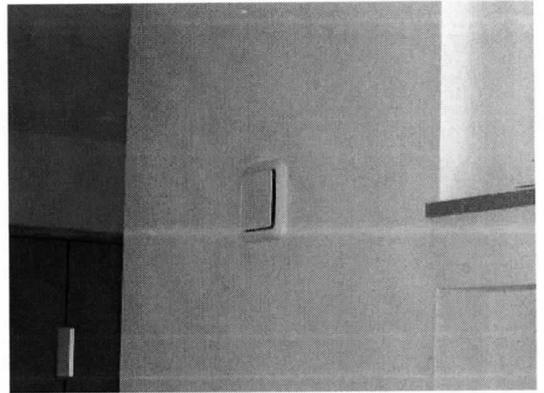


写真 3-5-7 給気口
(住宅 I・J、内部にフィルター有り)

3.5.4 フィルター等の汚れに関する調査

(1) 熱交換器付き機械給排気（第1種換気）システム

写真 3-5-8 に、熱交換ユニット排気側フィルター（住宅 A）を示す。これは、清掃中に撮影した写真で、上半分が清掃前、下半分が清掃後である。調査の結果、室内で発生した埃がフィルター表面に付着し目詰まりを起こしていることが確認された。住宅 A の換気システムは、1階と2階で別系統となっており、各階に1つずつ熱交換ユニットが備えられている。1階のユニットは、湿度の高い洗面所の天井裏に設置されているため、排気側フィルターに付着した埃が吸湿してこびりついた状態であった。他の何件かの住宅においても、同様のケースが確認された。

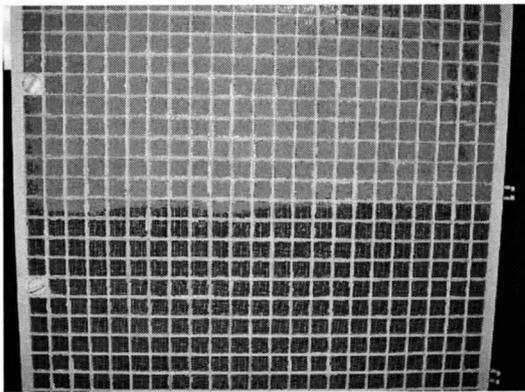


写真 3-5-8 熱交換ユニット排気側フィルター
(住宅 A、上半分：清掃前、下半分：清掃後)

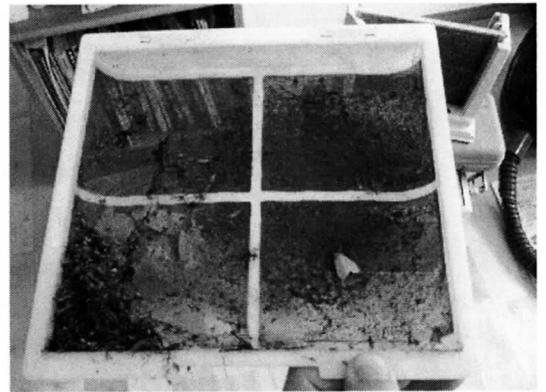


写真 3-5-9 給気側防虫網
(住宅 E、熱交換ユニットに内臓)



写真 3-5-10 排気口フィルター (住宅 A、左：清掃前、右：清掃後)



写真 3-5-11 熱交換ユニット排気側フィルター
(住宅 H、左：清掃後、右：清掃前)

写真 3-5-12 熱交換ユニット排気口
(住宅 H、内部にフィルター有り)



写真 3-5-13 給気側フィルター
(住宅 H、熱交換ユニットに内臓)

写真3-5-9に、熱交換ユニット給気側防虫網（住宅E）を示す。住宅Eは、山を切り開いて作られた新興住宅地に建設されている。また、虫が多く発生する夏期が過ぎてから、1度も清掃を行っていなかった。これらのことが原因で、防虫網に大量の虫が蓄積していたと考えられる。虫以外には、黒い砂埃が蓄積していた。防虫網の清掃を実施していなかった他の住宅でも、虫や砂埃の蓄積が確認された。前述の写真3-5-4に示した給気側フィルターは、小さな埃や花粉を除去するためのもので、目視による汚れは確認されなかった。

写真3-5-10に排気口フィルター（住宅A）を示す。これは、トイレに設置された排気口のフィルターで、埃が蓄積し空気が通過できなくなっているのを確認した。これは、住宅Aでは、入居してから11ヶ月間、1度も清掃が行われなかったことが原因と考えられる。

写真3-5-11～13に、熱交換ユニット内のフィルター（住宅H）を示す。住宅Hでは、住宅A～E・G（写真3-5-1～5、8～10）とは異なるメーカーの換気システムを採用している。このシステムの排気側フィルター（写真3-5-11）は、熱交換ユニット排気口（写真3-5-12）のガラルの奥に設置されており、ガラルを外さないと目視できない。また、住宅A～E・Gは網状であるのに対して、住宅Eのフィルターは繊維状であり、その繊維部分に埃が付着し目詰まりを起こしていることが確認された。給気側フィルター（写真3-5-13）については、フィルター下部の受け皿部分に多数の虫が落下していることが確認された。

(1) 機械排気（第3種換気）システム

写真3-5-14に、排気口フィルターとガラル（住宅I）を示す。このフィルターは繊維状で、その繊維部分に埃が蓄積し目詰まりを起こしていることが確認された。フィルターだけでなくガラルにも埃が付着していた。

写真3-5-15に給気口フィルター（住宅I）を示す。熱交換器付き機械給排気システムの場合は、熱交換ユニット内に設けられたフィルターにより汚れた外気を浄化するが、機械排気システムでは、各給気口にフィルターが1つずつ設置されている。従って、清掃箇所が多くなり、熱交換器付き機械給排気システムに比べて清掃に時間を要する。フィルターには、自然給気で風量が小さいため虫は確認されず、黒い砂埃のみが蓄積していた。

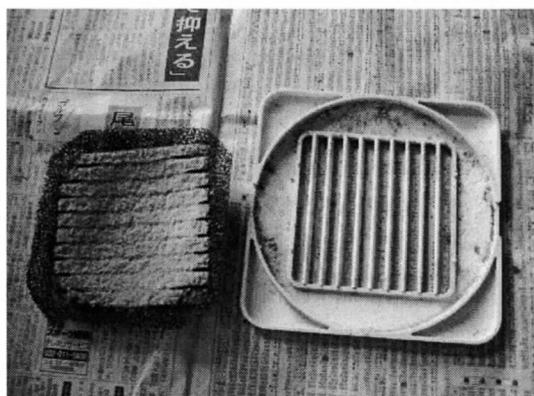


写真3-5-14 排気口フィルターとガラル(住宅I)

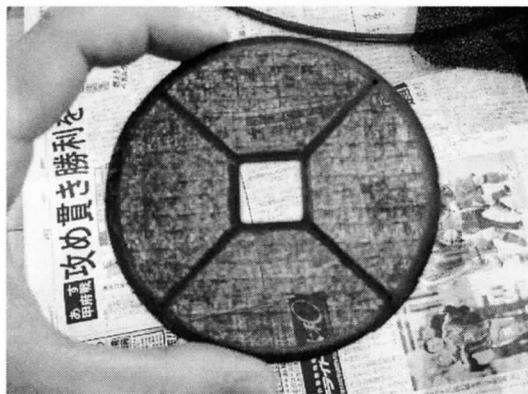


写真3-5-15 給気口フィルター（住宅I）

3.5.5 フィルター等の清掃前後における給排気口の風量の比較

図3-5-2に、フィルター等の清掃前後における排気口の風量測定の結果を示す。換気回数は排気口風量の値を住宅容積で除して求めている。清掃前の排気口風量から算出した換気回数が0.5回/hを満たしている住宅は12件中2件のみで、特に換気量が小さいのは住宅Fであった。住宅Fでは、ドイツ製の換気システムが採用されており、1階の天井裏に備えた大型の熱交換ユニットで住宅全体の換気を行う。しかし、延床面積が205.9m²と調査対象の中で最も規模が大きく、細長い敷地に建設された住宅であるため、ユニットから各部屋の給排気口までのダクトが長く、給排気口の個数が多いことから分岐も多用していると推察され、このようなダクト設計の問題が原因で、設計通りの風量が確保されなかったと考えられる。建築基準法改正後に建設された住宅が大半であるのにも関わらず、必要換気量の目標値が達成されていないことが確認された。高気密住宅で自然換気量が少ないと考えられるため、機械換気システムの風量が設計通りに確保されていないことによって、室内空気汚染が生じる可能性が高くなる。

次に、清掃前の換気回数と清掃後の排気口風量から算出した換気回数について比較を行う。住宅Cでは、測定日の4日前の連休に定期清掃が行われており、フィルターの目視による汚れもほとんど確認できなかったため、風量は変わらないものとした。清掃によって風量が増加した住宅は7件（住宅A・B・D・H～J・7-e）、ほとんど変わらない住宅は3件（住宅E・F・4-e）、僅かに減少したのが1件（住宅G）であった。

風量が増加した住宅に関しては、熱交換ユニット排気側フィルターや排気口フィルターの埃による目詰まりが、換気システムの風量低下の大きな原因となっていたことが分かる。

風量がほぼ同じだった住宅について見ると、住宅Eでは、1ヶ月に1回の頻度でユニット排気側フィルターの清掃を行っており、付着していた埃の量が少なかった（特に、2階のフィルターはほとんど汚れていなかった）ことが、風量がほとんど変わらない理由と考えられる。住宅Fでは、前述したようにダクト設計に問題があり、フィルターを清掃しただけでは風量増加につながらないと考えられる。住宅4-eでは、1年前に実施した気密測定で住宅内を減圧した際に、排気口フィルター表面に付着していた埃が落ちてから、1度も清掃を行っていなかったため（換気システムが古く、ドライバーを用いて排気口フィルターを外す必要があるなど、清掃がしにくい）、フィルターや排気ファンの羽などに埃が付着していた。しかし、清掃前後の風量はほとんど変わらず、排気の屋外への出口部分（棟換気部分）に問題があるのではないかと考えたが、高所に設置されているため確認することはできなかった。

住宅Gで風量が僅かに減少した原因は判明していないが、この住宅では1ヶ月に1回の頻度でユニット排気側フィルターの清掃を行っており、目詰まりを起こすほど埃が付着していなかったため、フィルターの汚れが風量低下の原因になっていた可能性は低い。

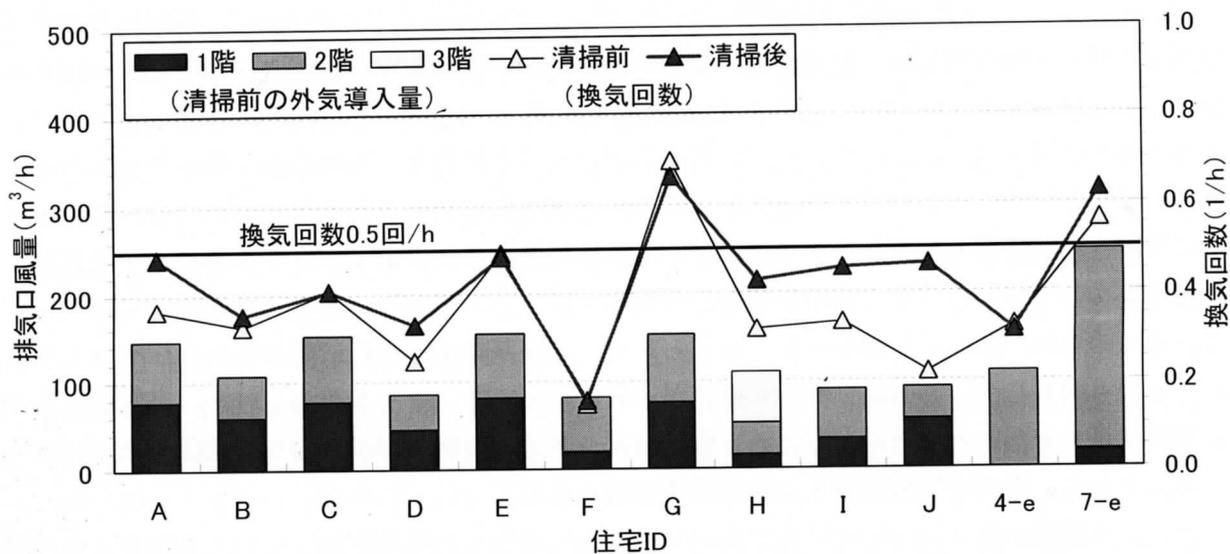


図 3-6-2 排気口における風量測定の結果(フィルター清掃前後)

図 3-5-3 に、フィルター等の清掃前後における給気口の風量測定の結果を示す。住宅 C では、測定日の 4 日前の連休に定期清掃が行われており、フィルターや防虫網の目視による汚れもほとんど確認できなかったため、風量は変わらないものとした。住宅 4-e では、測定のスケジュールの都合上、給気口の清掃を行う時間を確保することができなかった。清掃によって風量が増加した住宅は 6 件 (住宅 A・B・G~J)、ほとんど変わらない住宅は 2 件 (住宅 E・F)、僅かに減少したのが 1 件 (住宅 D・7-e) であった。住宅 A・B・G の風量増加率が他の住宅と比較して小さいことと、住宅 E で風量がほとんど変わらなかったのは、住宅 A~E・G の給気側防虫網(写真 3-6-5、3-6-9) は箱状になっており、虫で空気が通過できなくなるほどの目詰まりは起こしていなかったためと考えられる。機械排気システムの設置されていた住宅 I・J では、入居してから 1 度もフィルター (写真 3-5-15) の清掃をしていなかったため、風量が大幅に増加したと考えられる。住宅 H の給気側フィルター (写真 3-5-13) も、前回清掃を行ってから 10 ヶ月も経過していたため、清掃により風量が大幅に増加したと思われる。

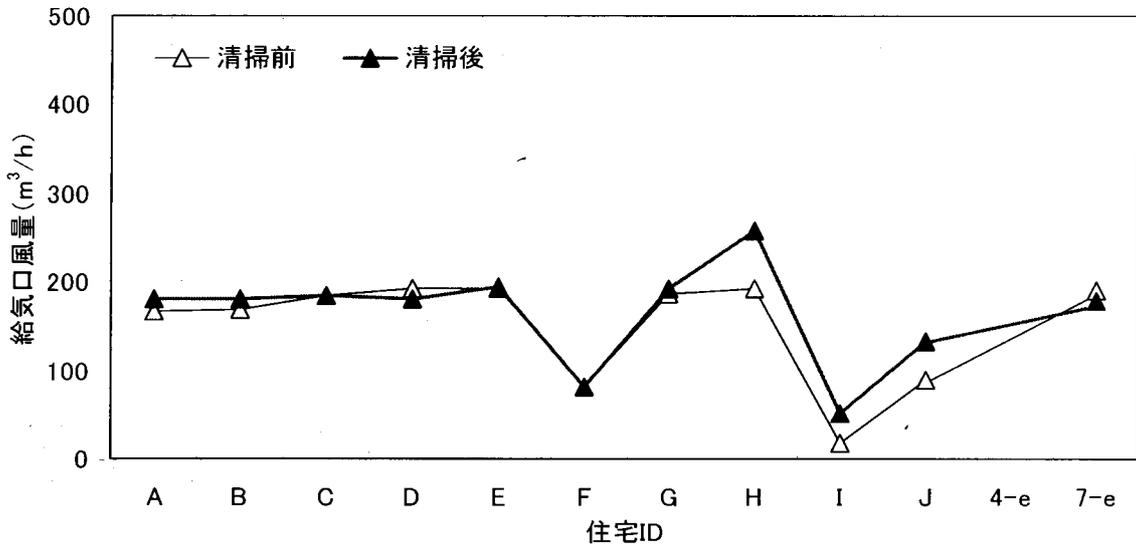


図 3-5-3 給気口における風量測定の結果 (フィルター清掃前後)

3.6 Kファクター法による換気量測定

3.6.1 はじめに

スウェーデンで開発された「kファクター法」は、換気システムの性能検証手法の1つとして海外で導入されている。しかし、日本では、kファクター法に対応した給排気端末は殆どないのが現状である。その中で、この度、日本住環境株式会社で開発されたkファクター法対応型換気システムの換気量測定を実施する機会を得たので、結果について報告する。

3.6.2 実測概要

(1) 対象住宅

- ・ 福島県郡山市内の新築の住宅（引き渡し前）
- ・ 延床面積：208.68m²
- ・ 測定日：2008年2月25日
- ・ 換気方式：第3種



写真 3.6.1 住宅外観

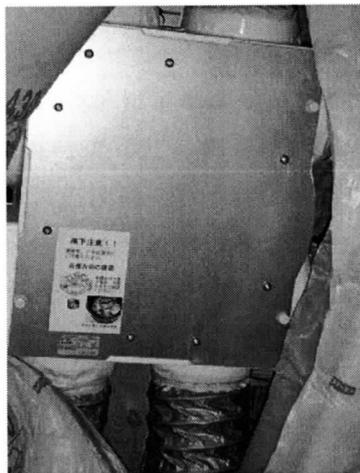


写真 3.6.2 換気ユニット（洗面所）



写真 3.6.3 コントローラー

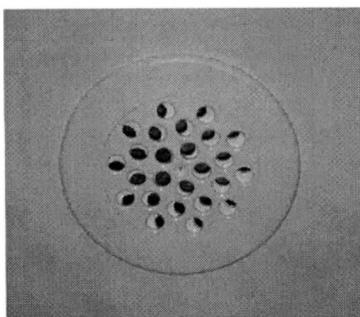


写真 3.6.4 排気口（kファクター対応型）

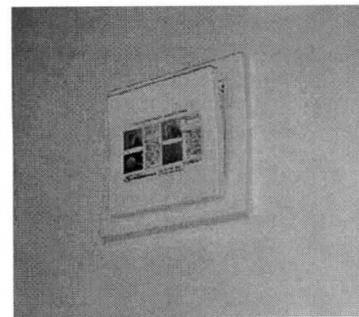


写真 3.6.5 自然給気口

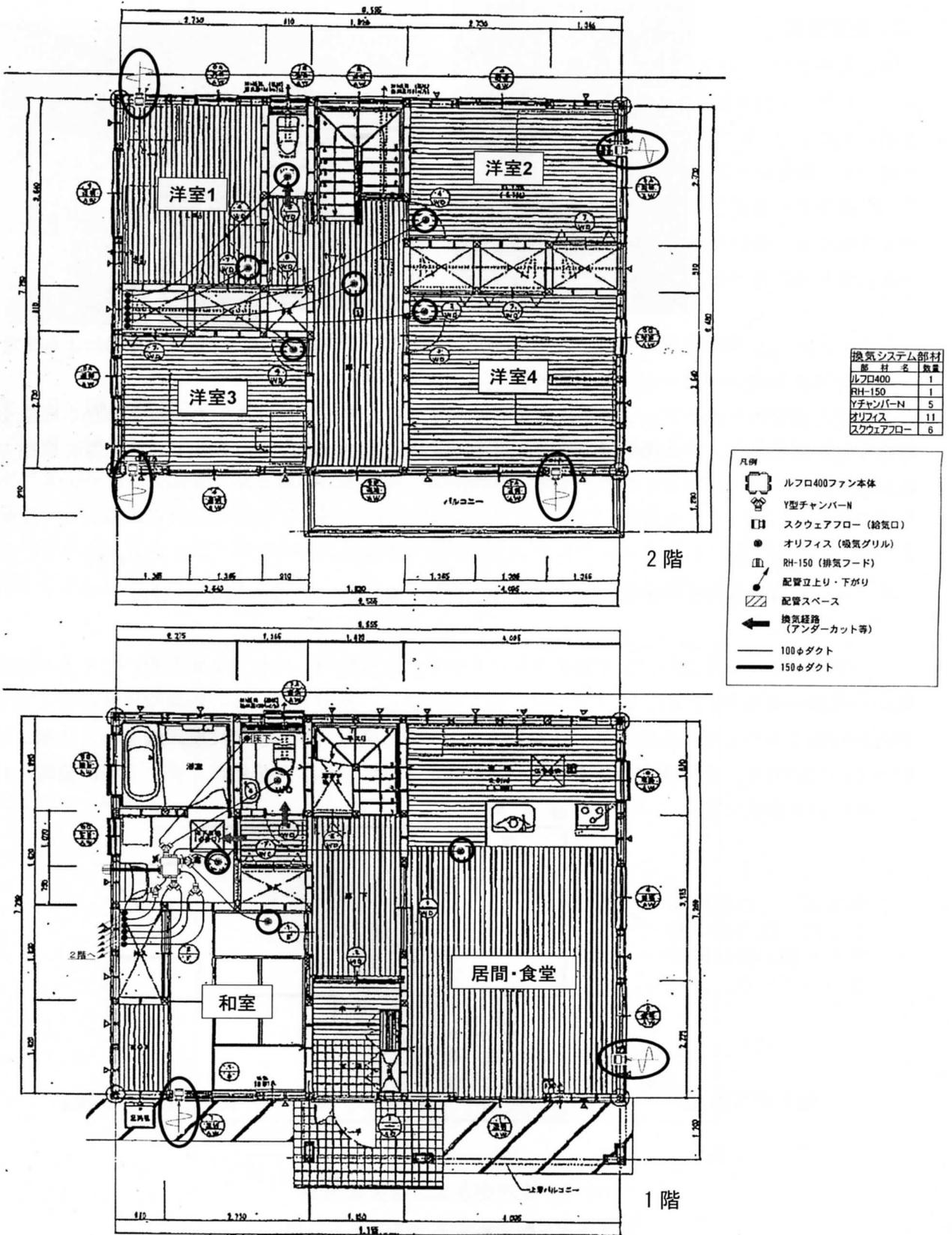


図 3.6.1 対象住宅の平面図と換気システム配置

(2) 測定方法

同じ条件下で、これまでに換気システムの性能検証で実施してきたフード付き風量測定器（コーナー札幌製、写真6）を用いた測定と、kファクター法による測定を行い、結果を比較する。換気システムの風量は、ダイヤル式のコントローラーで変更できるが、今回は、通常の設定時（コントローラーを目盛り4に合わせた場合）と最大風量時（コントローラーを目盛り9に合わせた場合）の2条件の測定を行った。



写真 3.6.6 風量測定器による測定

<kファクター法>

換気システムのメーカーが、給気口や排気口、ダクト内などに圧力測定のためのタップを予め設定しておき、そのタップにおける圧力の測定値から風量を算定する。図3.6.1に、この測定法に対応した給気口の仕組みの例、式(3-6-1)に、風量の算出方法を示す。

$$q = k\sqrt{\Delta P} \quad (3-6-1)$$

k : 1.0Paの圧力差における流量 [L/s] q : 風量[L/s] ΔP : 圧力差 [Pa]

この測定法は、スウェーデンで開発されたもので、式(3-6-1)にある k 値を用いて圧力の測定値から風量を計算するため、 k ファクター法と呼ばれる。測定者に一定の知識や経験がなくても測定が可能であると考えられるが、日本では、施工後に換気システムの性能評価を行う体制にはなっていないので、圧力測定のためのタップが設定された給気口や排気口、ダクト等は整備されていないのが現状である。

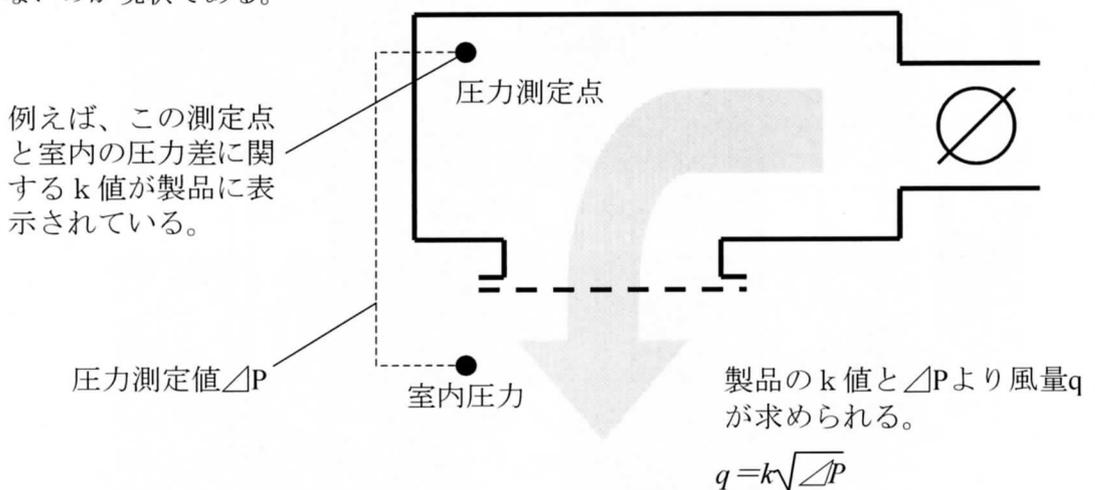


図 3.6.2 Kファクター法の測定原理

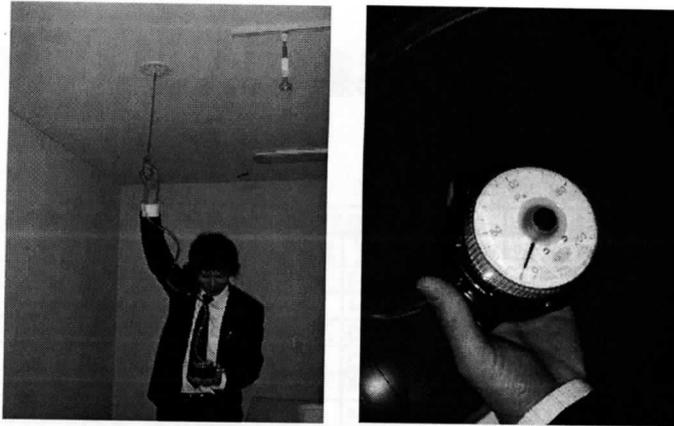


写真 3.6.7 kファクター法（日本住環境）による測定風景

3.6.3 測定結果

両者の値は概ね一致したものの、kファクター法による測定結果の方が、風量測定器による測定結果よりもやや大きくなる傾向にあった。最も両者の差が大きかったのは、最大風量の時の2階ホールに設置された排気口で、約32%のずれがあった。また、風量が大きいく程、各換気口のばらつきが大きくなった。両者の値に差が生じる原因として考えられるのは、kファクター法で使用した差圧計がアナログ表示であったこと、差圧計の測定精度、排気端末の開度のずれである。

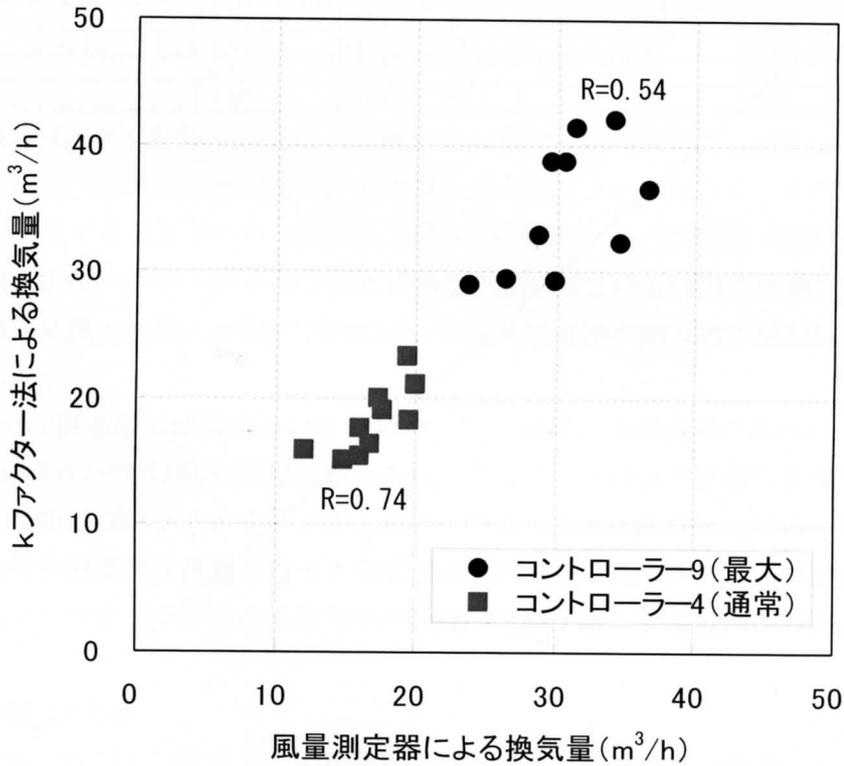


図 3.6.3 換気量の測定結果と比較

表 3.6.1 換気量の測定結果と比較

コントローラー4 (通常)

		フード付風量測定器による測定			Kファクター法による測定			風量差(m ³ /h)
		1回目	2回目	平均(m ³ /h)	排気口の開度	差圧(Pa)	風量(m ³ /h)	(Kファクター法)-(風量測定器)
1F	居間	14.6	15.1	14.9	3	9.3	15.1	0.3
	和室	19.6	19.1	19.4	4	9.6	23.3	4.0
	洗面所	12.0	12.1	12.1	3	10.2	15.9	3.9
	トイレ	16.3	15.8	16.1	3	9.6	15.4	-0.7
2F	洋室1	17.6	17.7	17.7	4	6.4	19.0	1.4
	洋室2	17.4	17.3	17.4	4	7.2	20.0	2.7
	洋室3	16.0	16.0	16.0	4	5.6	17.6	1.6
	洋室4(寝室)	16.7	16.9	16.8	4	4.8	16.3	-0.5
	ホール	20.5	19.4	20.0	4.5	6.4	21.0	1.1
	トイレ	19.7	19.5	19.6	5	4.8	18.3	-1.3

コントローラー9 (最大)

		フード付風量測定器による測定			Kファクター法による測定			風量差(m ³ /h)
		1回目	2回目	平均(m ³ /h)	排気口の開度	差圧(Pa)	風量(m ³ /h)	(Kファクター法)-(風量測定器)
1F	居間	26.0	26.8	26.4	3	32.8	29.4	3.0
	和室	34.4	33.7	34.1	4	30.8	42.0	8.0
	洗面所	23.4	24.1	23.8	3	32.0	29.0	5.3
	トイレ	30.4	29.5	30.0	3	32.8	29.3	-0.6
2F	洋室1	29.9	27.6	28.8	4	18.4	32.8	4.1
	洋室2	32.1	29.1	30.6	4	25.2	38.7	8.1
	洋室3	36.6	36.6	36.6	4	22.6	36.5	-0.1
	洋室4(寝室)	34.9	34.3	34.6	4	17.8	32.3	-2.3
	ホール	31.5	31.2	31.4	4.5	21.8	41.3	10.0
	トイレ	29.3	29.8	29.6	5	15.8	38.7	9.2

3.6.4 まとめ

換気システムの性能検証手法の1つとして海外で導入されている「kファクター法」について、日本住環境株式会社で開発された国内産 k ファクター法対応型換気システムの換気量測定を実施した。

これまでに換気システムの性能検証で実施してきたフード付き風量測定器を用いた測定と、kファクター法による測定の結果を比較したところ、両者の値は概ね一致したものの、kファクター法による測定結果の方が、風量測定器による測定結果よりもやや大きくなる傾向にあった。両者の値に差が生じる原因として考えられるのは、kファクター法で使用した差圧計がアナログ表示であったこと、差圧計の測定精度、排気端末の開度のずれである。

3.7 居住者の呼気を用いた換気量測定

3.7.1 はじめに

現在、設置が簡便で、居住者にも負担の少なく、安価に換気量を測定できる方法である居住者の呼気を用いた多数室換気量測定法（以下、呼気測定法）の実用化が進められているが、新しい技術のため、実測結果・測定精度に関するデータが不十分である。呼気測定法における問題点として、①単室での測定事例は多いが、多数室での検討事例は少ないこと、②明確な測定方法が確立されていないこと、③測定精度の詳細な検証が行われていないこと、④居住状態での実用的な検討がなされていないこと、等が挙げられる。そこで実在住宅において、在室者が少数である場合にどれだけ各室のCO₂濃度が変化するかを検証することを目的に実測調査を行う。

3.7.2 測定法の概要

呼気測定法は、居住者の在室により断続的に供給される呼気CO₂の濃度変化を作り出し、これらのCO₂供給流量変化とCO₂濃度変化の測定値から、最小二乗法を原理としたシステム同定計算を行うことで、多数室換気量を推定する方法である。多数室モデルの方程式は式(3-7-1)のように表される。

$$v_i \cdot \dot{c}_i = \sum_{k=1}^{n+no} q_{i,k} \cdot (c_k - c_i) + \sum_{l=1}^{ng} g_{i,l} \quad (3-7-1)$$

(v : 室容積, c : CO₂濃度, q : 風量, g : 呼気CO₂発生量)

換気量は式(3-7-1)を解くことにより推定する。実務的には汎用プログラムを用いて最小二乗法に基づくシステム同定計算を行う。その際、入力パラメータとして、室内外のCO₂濃度とCO₂発生量を把握する必要がある。同時に、呼気の発生箇所とその期間の把握も重要である。即ち、各室の居住者の在室状況（在・不在）である。その他には、建物内の換気量を変動させ、室内のCO₂濃度分布に大きな影響を及ぼすと考えられる窓の開閉状況を詳細に把握する必要があると考えられる。

(1) 入力パラメータの測定法

(a) 室内外CO₂濃度

設置場所の制限が少なくなる上、測定対象住宅の電力を消費せずに済むため、電池駆動式の携帯型センサロガーが望ましいと考えられる。

(b) 呼気CO₂排出量

運動生理学関係の知見を基に心拍数から推定する方法が考えられる。心拍数の測定は携帯型心拍計の使用が考えられ、CO₂排出量への換算は式(3-7-2)、式(3-7-3)により行う。

$$Y=1.57X-105 \quad \dots \text{男子} \quad (3-7-2)$$

$$Y=2.06X-216 \quad \dots \text{女子} \quad (3-7-3)$$

(Y : CO₂ 排出量[l/h], X : 心拍数[bpm], Y の最小値:11.22[l/h])

(c) 在室状況

赤外線型人感センサロガーの使用が考えられる。ただし、赤外線の変動を検知するため、居住者が長時間安静にしている場合には不在と評価しかねない点に注意が必要である。

(d) 窓開巾

窓開巾計³⁻²⁶⁾と呼ばれる窓の開放巾を連続的に記録する計測器の使用が考えられる。この計測器は、窓を開けると糸がバネに連結されたプーリーに巻き取られ、プーリーに連結されたポテンシャルメーターが回転し数値が出力される機構となっている。

(2) 換気量の推定方法

換気量の計算はシステム同定計算プログラム SPID-C³⁻³⁴⁾ を用いて行う。このプログラムに室内外の CO₂ 濃度と各室での CO₂ 発生量を、測定時間ごとに代入して換気量の推定を行う。

3.7.3 実在住宅における換気量測定法の試行

(1) 実測対象

実測対象であるA邸の外観を写真3.7.1に示す。A邸は2005年11月、仙台市青葉区に建設された全電化仕様の高気密高断熱木造住宅(C値: $0.6\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、Q値: $1.8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)で、延床面積は $164.78[\text{m}^2]$ (1F $66.91[\text{m}^2]$ 、2F $97.87[\text{m}^2]$)、住宅全体の容積は $316.12[\text{m}^3]$ である。居住者の構成は、夫婦(夫:44歳、妻:40歳)、子供2人(長男:15歳、次男:14歳)の4人である。換気システムは熱交換型24時間換気システム(第1種)である。居間や居室に給気口、洗面所に排気口が設置されている。台所、トイレ、浴室には局所排気ファンが設置してある。A邸の平面図と各種測定装置の設置位置を図3.7.1に、システム同定計算における建物内のゾーン分割を図3.7.2にそれぞれ示す。今回は2008年1月8日から1月10日に測定した結果について報告する。



写真3.7.1 A邸外観

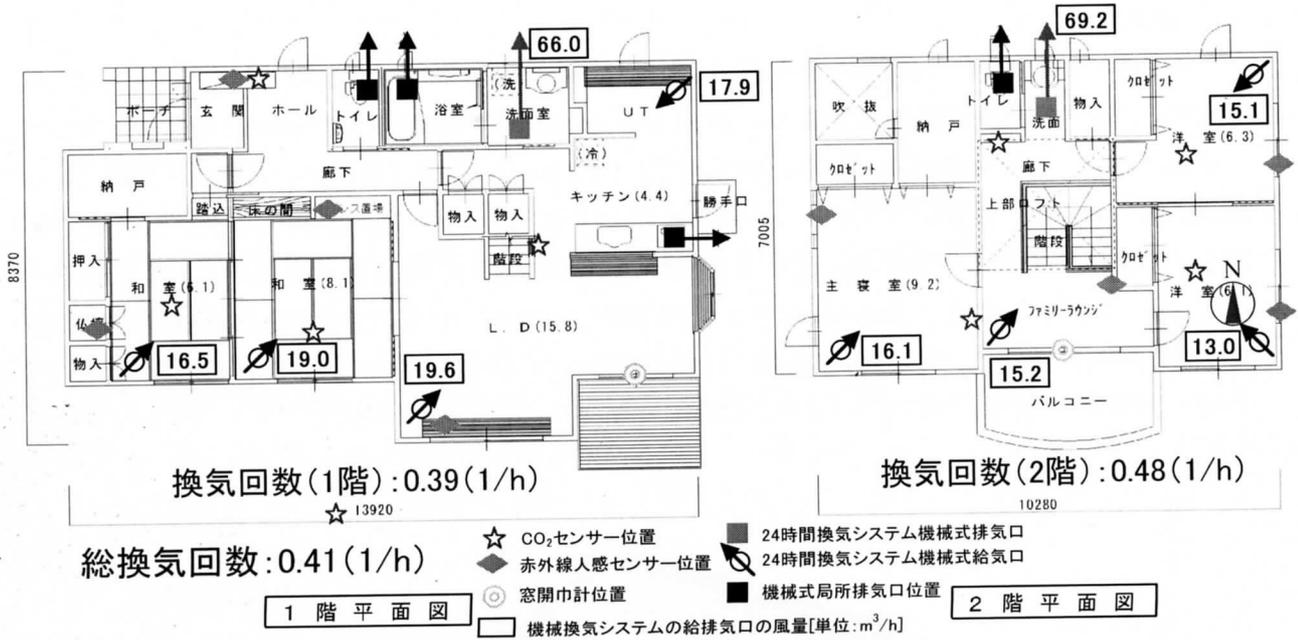


図 3.7.1 A邸平面図と各種測定装置の設置位置と各給排気口風量

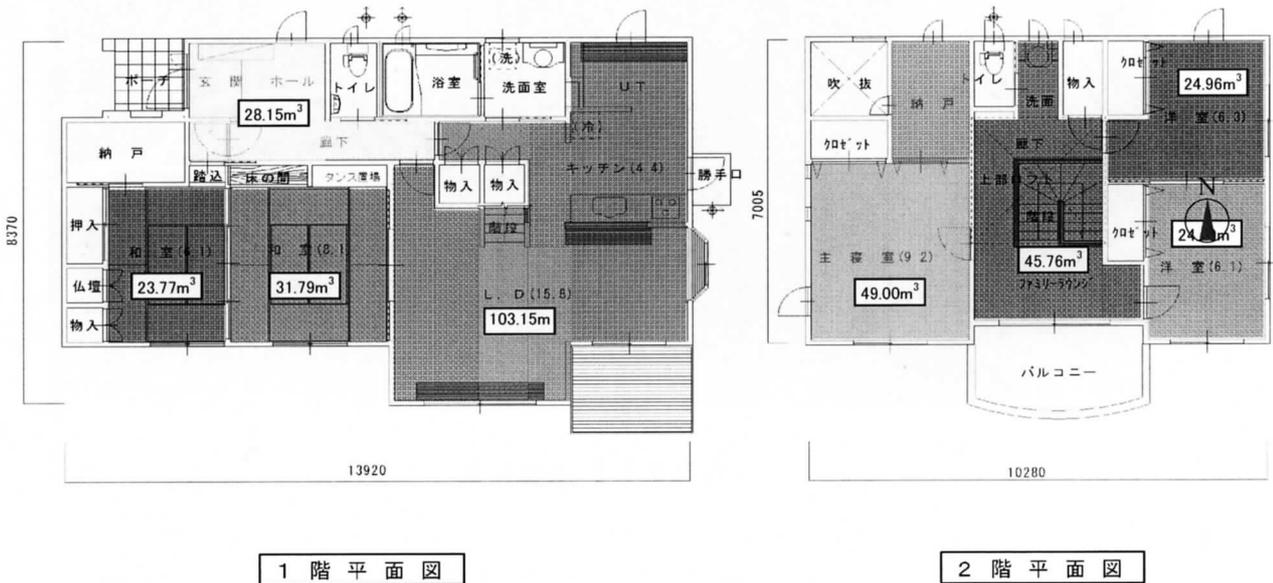


図 3.7.2 A邸のゾーン分割

(2) 実測期間

2008年1月8日13:00～1月10日10:00の45時間。寝室でCO₂濃度変化の山が最低2つは生じるように2日間に渡って行った³⁻²⁵⁾。設置と風量測定は1月8日10:30～12:30、撤収は1月10日10:30～11:30にそれぞれ行った。

(3) 実測条件

建物内は8ゾーンに分割する。図3.7.2にA邸のゾーン分割の詳細を示す。所有する測定器の数による制限のため、トイレ・浴室・洗面室・収納スペース(2階主寝室の納戸は除く)は測定対象から外す。また、各ゾーン間のCO₂濃度変化に明確な差を生じさせるため測定中は異なるゾーン間の間仕切扉をできるだけ閉め、同一ゾーン内の間仕切りをできるだけ開けてもらうようお願いする。居住者への負担を考慮し、室内空気攪拌用のファンは使用しない。機械換気システムは普段使用しているモード一定で常時運転してもらう。窓・サッシに関しては、開閉をよく行う窓やサッシを住人に予め指定してもらい、その箇所に窓開巾計³⁻²⁶⁾を設置する。その他の箇所は常時、閉めた状態にする。また、窓開放により測定精度が大幅に落ちてしまうことが実験により確認されているため^{3-27)～3-30)}、玄関を含め、指定した箇所であっても測定中は開け放しを過度に行わないようにお願いする。

(4) 測定項目と測定方法

本実測における各種測定装置の設置位置を図3.7.1に示す。測定する項目を以下に示す。

(a) 機械換気システムの給排気口における風量

給排気口の風量は熱線式風量測定器(コーナー札幌、Swema Flow 65)を用いて測定する。給排気口の風量が安定した後、10秒間の平均値を1回の測定結果とする。測定は全体の実測を行う前に各給排気口で2回ずつ行った。

(b) CO₂濃度

電池駆動式の非分散型赤外線式(NDIR)携帯型CO₂センサロガー(測定精度:表示値の±50ppmまたは±5%の大きい方)を用いて、屋内8ゾーンの各代表点と外気1点において1分間隔で測定する。測定の様子を写真3.7.2、写真3.7.3に示す。CO₂センサーを三脚に取り付け、なるべく各ゾーンの中央、床上高さ約1.0mに設置する³⁻³¹⁾。しかし、生活を送る上で居住者への負担を考え、三脚での測定スペースを確保できないゾーンでは、テーブルや家具などを利用して設置する。外気の測定は、センサーが排気ガス・雨風・温冷風・直射日光の影響を受けないように工夫する。

(c) 温湿度

上述の携帯型CO₂センサロガーの温湿度測定機能(測定精度 温度:±1℃、相対湿度:±3.0%RH)を用いて、屋内8ゾーンの各代表点と外気1点において1分間隔で測定する。測定位置としては、温冷風・直射日光の影響を受けない箇所を選定する。

(d) 在室状況

赤外線型人感センサロガー³⁻²⁷⁾⁻³⁻³⁰⁾を用いて、屋内8ゾーンの各代表点において1分間隔で測定する。測定の様子を写真3.7.4に示す。測定位置としては、なるべく各ゾーンが見渡せる位置、床上1.8m(最も広範囲の感知エリアとなる高さ³⁻³²⁾)に設置する。

(e) 窓開巾

林³⁻²⁷⁾が開発した窓開巾計を用いて、予め指定した窓やサッシの開閉巾の経時変化を1分間隔で記録する。測定の様子を写真3.7.5に示す。

(f) アンケート

居住者の行動を記録する補助的な手段として、アンケート調査を行う。用いたアンケート用紙を図6.3.3に示す。調査する項目を以下に示す。

1) 居住者の身長・体重

被験者実験では被験者に心拍計(最大8時間の測定が可能)を装着させて、理論式により経時的なCO₂排出量を推定させていたが、装置の一つである胸に装着するバンドが予想以上に負担であったことから、45時間という測定期間と居住者の負担を考慮し、一定値を用いる。同実験において、測定期間中のCO₂排出量の平均値を一定値としてシステム同定計算を行った結果、時系列データを用いた計算結果と比べて差がごく僅かだったことを考慮した。一定値としては、K. Naydenov や P. Stavova らの文献^{3-27), 3-33)}中で紹介されていた、Met 値(活動量)による換算式(3-7-4)から算出されるCO₂排出量を用いる。Met 値は1.2とし、身長と体重はアンケートにより把握する。

$$F = RQ \frac{0.00056028 * H^{0.725} * W^{0.425} * M}{(0.23 * RQ + 0.77)} \quad (3-7-4)$$

(排出量：(F, m³/s)、活動量：(M, met)、身長：(H, m)、体重：(W, kg)、呼吸商：(RQ, 0.83))

2) 複数人の在室期間

本実測で用いる赤外線型人感センサロガーは人の在・不在は感知できるが、在室人数までは把握できないため、あるゾーンに複数人在室した場合はアンケート用紙に該当するゾーンと期間を記入してもらう。

3) 人体以外からのCO₂発生

人体以外からのCO₂発生を区別するために、アンケート用紙を用いて、「調理」、「燃焼系の暖房」、「喫煙」、などを行った時間帯を居住者に記録してもらう。今回の実測では居住者の中に喫煙者がいなかったため、調査する項目は「調理」と「燃焼系の暖房」とした。

4) エアコンの使用期間

燃焼系の暖房以外にも、エアコン等、室内空気の攪拌作用を有する暖房器具の使用期間も居住者に記録してもらう。



写真 3.7.2 屋内の CO₂ 測定 (2 階南側洋室)



写真 3.7.3 屋外の CO₂ 測定



写真 3.7.4 在室状況の測定 (1 階 LDK)



写真 3.7.5 窓開巾の測定 (2 階バルコニー)

居住者の呼吸を用いた換気量測定

日付 年 月 日 ()

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1Fホール	複数人の在室																									
	暖房																									
1F和室(奥)	複数人の在室																									
	暖房																									
1F和室(手前)	複数人の在室																									
	暖房																									
1Fリビングダイニングキッチン	複数人の在室																									
	火を使う調理																									
	暖房																									
2F廊下	複数人の在室																									
	暖房																									
2F主寝室	複数人の在室																									
	暖房																									
2F洋室 (バルコニー側)	複数人の在室																									
	暖房																									
2F洋室 (洗面台・トイレ側)	複数人の在室																									
	暖房																									

※複数人の在室は長時間(20~30分以上)のもののみ記して頂ければ結構です。
 ※暖房や調理は、種類まで記入して頂けると幸いです。

図 3.7.3 居住者の行動を記録するためのアンケート用紙

(5) 実測結果

(a) 給排気口風量の測定結果

給排気口の風量測定結果を図 3.7.1 と表 3.7.1 に示す。A 邸は熱交換型 24 時間換気システム（第 1 種）によるセントラル換気を行っている。強・弱の 2 種類ある運転モードを普段は弱運転に設定しており、熱交換器も稼働させている。風量より住宅全体の換気回数（総換気回数）を算出すると約 0.41[1/h]であった。階別では、1 階が 0.39[1/h]、2 階が 0.48[1/h]であった。なお、換気回数を算出するために用いた建物容積（1 階：186.86m³、2 階：143.91m³、全体：330.77m³）には、トイレ・浴室・洗面室・収納スペース（2 階主寝室の納戸は除く）は含めていない。

表 3.7.1 給排気口の風量測定結果

室名	給排気	風量(m ³ /h)		
		換気システムの運転モード		
		弱		
1階	ダイニング	給	気	19.6
	和室(玄関側)	給	気	16.5
	和室(LDK側)	給	気	19.0
	ユーティリティー	給	気	17.9
	洗面室	排	気	66.0
	1階給気合計			73.00
	1階排気合計			66.0
1階(186.86m ³)の換気回数(h ⁻¹)*1				0.39
2階	2階廊下	給	気	15.2
	主寝室	給	気	16.1
	洋室(南側)	給	気	13.0
	洋室(北側)	給	気	15.1
	洗面所	排	気	69.2
	2階給気合計			59.40
	2階排気合計			69.2
2階(143.91m ³)の換気回数(h ⁻¹)*2				0.48
家全体給気合計				132.4
家全体排気合計				135.2
家全体(330.77m ³)の換気回数(h ⁻¹)*2				0.41

*1給気量より算出

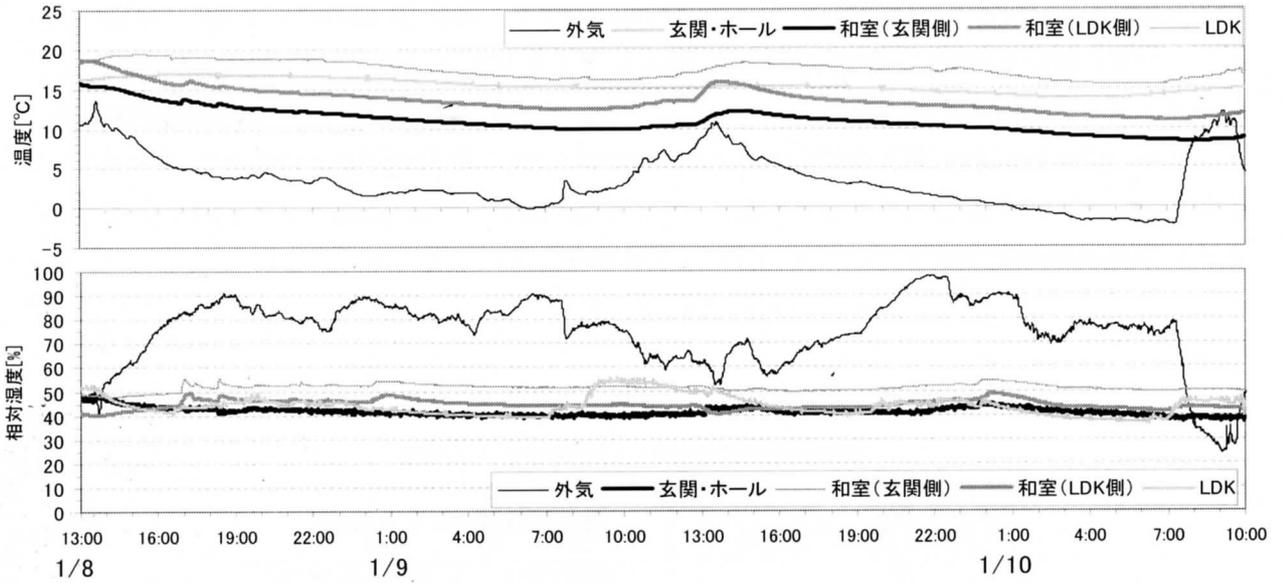
*2排気量より算出

(b) 温湿度の測定結果

表 3.7.2 に測定期間中 (1/8 13:00 ~ 1/10 10:00) の室温・外気温の平均値を示す。図 3.7.4、図 3.7.5 に測定期間内の室温・外気温の経時変化を示す。併せてアンケートの回答結果も併記した。1階と2階での平均温度差はほとんどなかった。アンケートの結果を見ると、1階では玄関・ホールとLDKにおいて、2階では主寝室において蓄熱暖房を24時間稼働させていたことが確認され、これらの居室では他室と比べて温度が高く、相対湿度が低めである。温湿度の経時変化を見ると、屋内の温湿度は外気と比べ、それほど変動せずに推移していることが分かる。

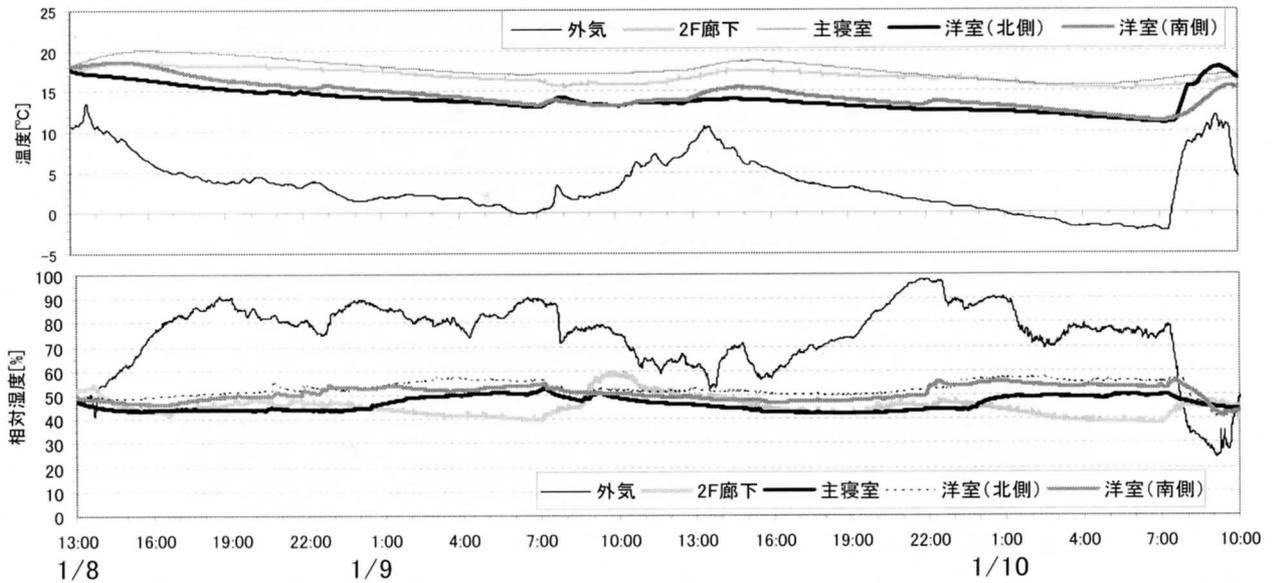
表 3.7.2 温湿度測定結果
測定期間 (1/8 13:00~1/10 10:00) の平均値

室名		測定期間中の平均値	
		温度[°C]	相対湿度[%]
1階	玄関・ホール	15.3	41.4
	和室(玄関側)	10.9	51.4
	和室(LDK側)	13.5	44.4
	LDK	17.3	43.8
	1階全体	14.3	45.2
2階	2階廊下	16.8	45.2
	主寝室	17.7	46.2
	洋室(北側)	13.9	52.3
	洋室(南側)	14.5	50.6
	2階全体	15.7	48.6
家全体		15.0	46.9
外気		3.3	74.7



※玄関・ホールとLDKにおいては蓄熱暖房が24時間稼動。

図 3.7.4 1階の温湿度の経時変化



※主寝室においては蓄熱暖房が24時間稼動。

※洋室(北側)において、1/10 7:30~8:15の期間、セラミックヒーターにより暖房。

図 3.7.5 2階の温湿度の経時変化

(c) 窓開巾・CO₂濃度・各ゾーン在室状況の測定結果

図 3.7.6、図 3.7.7 に窓開巾、CO₂濃度、各ゾーン在室状況の経時変化を示す。併せてアンケートの回答結果も併記した。

窓開巾計を設置したのは1階リビングのデッキ部分のサッシと2階バルコニー部分のサッシの2ヶ所である。窓開巾の経時変化を見ると、測定期間中、1階リビングでは一度も開閉がなされていないことが分かる。2階バルコニーでは測定期間中に数回、開閉がなされているがいずれもごく短時間であった。

CO₂濃度変化と各ゾーン在室状況を見ると、各室の滞在時間とCO₂の濃度変化がよく対応していることが分かる。2名以上の在室はアンケートの回答結果より判断し、継続的な在室か否かはCO₂濃度変動を参照にして判断した。例えば、2階の主寝室・両洋室において、深夜時、人感センサーの反応は疎らであったが、大きな濃度上昇が生じており、就寝時であると判断した。用いた人感センサーは赤外線の変動を検知するため、在室者が長時間安静にしている場合には反応が得られないためである。

ゾーン別に見ると、1階の廊下・ホールや2階の廊下では、ほとんどが瞬間的な滞在であり、出入りが激しいことが分かる。1階の両和室では実測初日の8日のみ、数回の滞在があっただけである。リビングダイニングキッチン(LDK)を見ると、総滞在時間が全ゾーンで最も多いことが分かる。アンケートの結果をみると、在室人数が頻繁に変化していたことが分かる。火を使う調理は一度も行われなかった。A邸は全電化仕様であり、調理は主に電磁調理器を用いて行っていたものと推察される。また、測定期間中の後半に数回、蓄熱暖房器の強制放熱用のファンを稼動しており、この時間帯は他の時間帯と比べて室内空気がよく攪拌されていたと思われる。2階の主寝室を見ると、大きな濃度変化が計2回、深夜の時間帯に生じていることが分かる。主寝室には主に夫婦用であり、二名分のCO₂が就寝時に長時間排出されたためである。2階の両洋室は子供部屋として使用されており、北側が長男、南側が次男の部屋である。就寝時にはやはり大きな濃度変化が生じているが、それぞれ一名分のCO₂排出量であるため、主寝室とくらべてその変動幅は小さい。

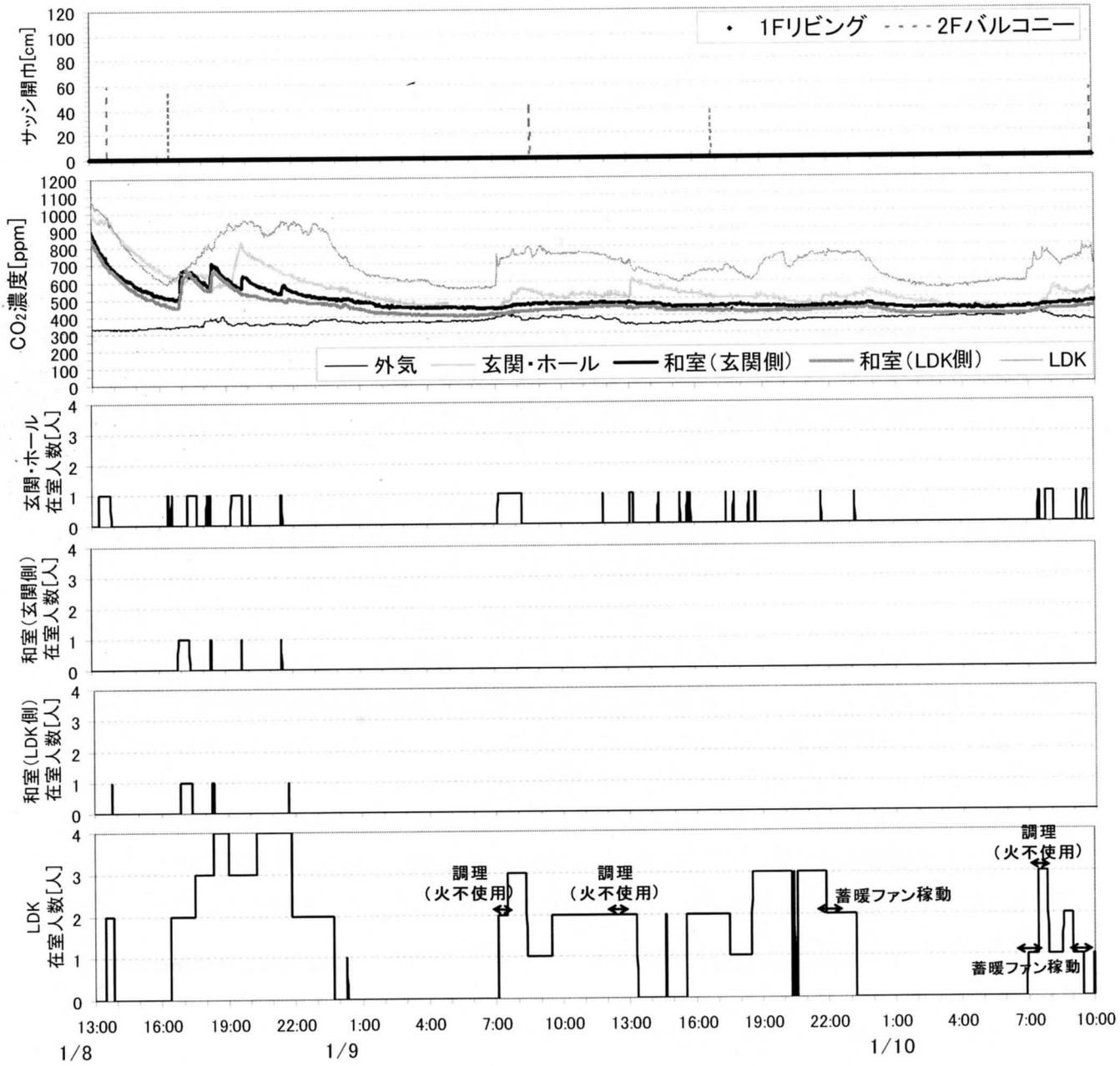


図 3.7.6 1階の窓開巾・CO₂濃度・各ゾーン在室状況の経時変化

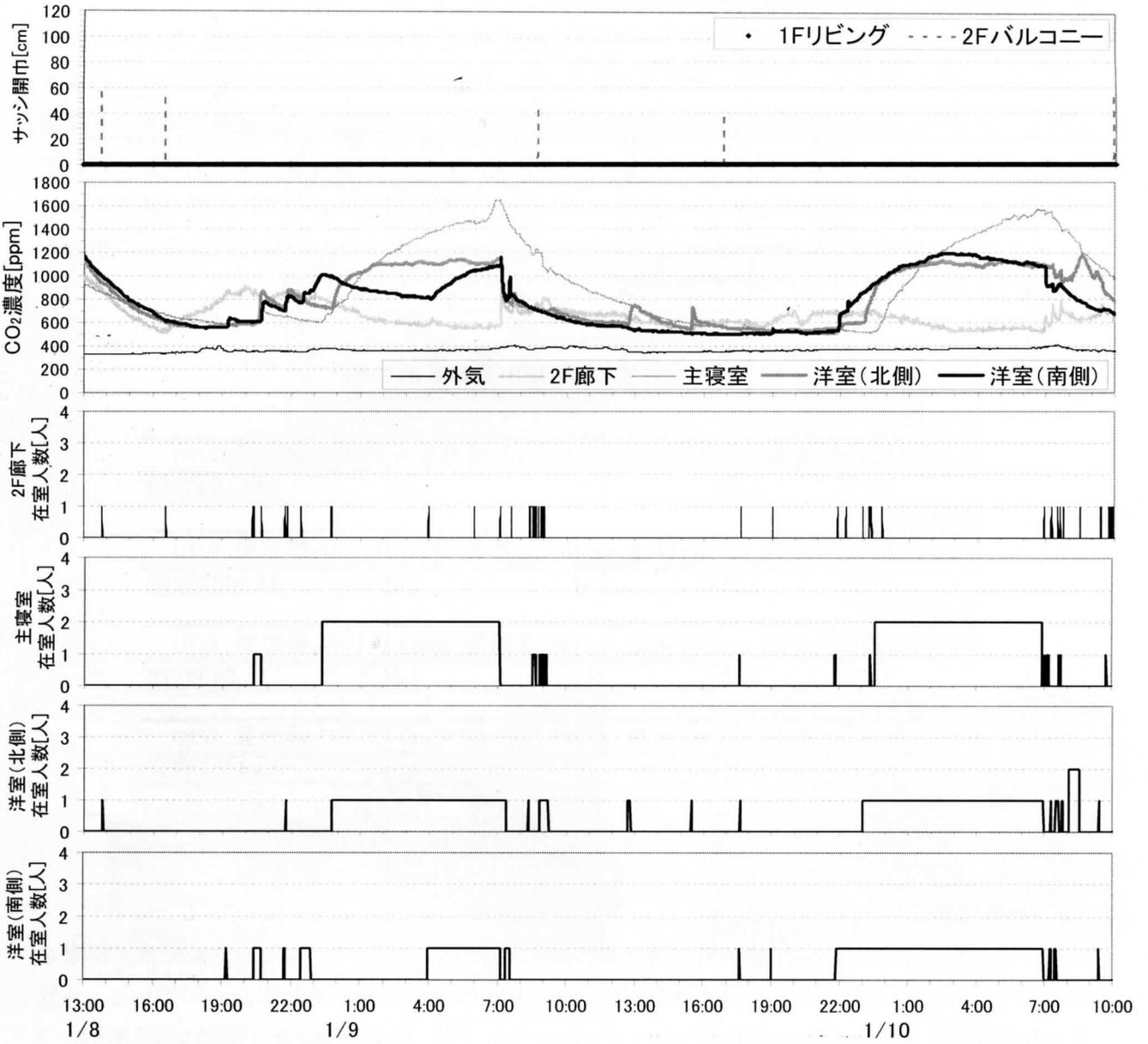


図 3.7.7 2階の窓開巾・CO₂濃度・各ゾーン在室状況の経時変化

(6) システム同定計算

(a) 計算プログラムにおける測定データの入力

システム同定計算プログラム SPID-C⁽⁶⁻¹²⁾ に CO₂ 濃度、在室者からの CO₂ 排出量、各ゾーンの在室状況をパラメータとして入力し、換気量を算出する。建物モデルのゾーン分割は図 3.7.2 の通りである。在室者からの CO₂ 排出量はアンケートにより調査した居住者全員の身長・体重より算出した。居住者全員の CO₂ 排出量を表 3.7.3 に示す。各ゾーンからの CO₂ 排出量は主寝室においては夫婦二人の平均値、北側の洋室においては長男の値、南側の洋室においては次男の値を入力した。その他の居室では家族全員の平均値を入力し、複数人の在室があった場合は家族平均値を人数分掛け合わせた値を入力した。

表 3.7.3 居住者の CO₂ 排出量の見積もり

夫(44歳)				
RQ(呼吸商)	H(身長, m)	W(体重, kg)	M(活動量, Met)	F(CO ₂ 排出量, l/h)
0.83	1.72	68	1.2	18.61500588
妻(40歳)				
RQ(呼吸商)	H(身長, m)	W(体重, kg)	M(活動量, Met)	F(CO ₂ 排出量, l/h)
0.83	1.59	54	1.2	15.94296266
長男(15歳)				
RQ(呼吸商)	H(身長, m)	W(体重, kg)	M(活動量, Met)	F(CO ₂ 排出量, l/h)
0.83	1.65	50	1.2	15.8499128
次男(14歳)				
RQ(呼吸商)	H(身長, m)	W(体重, kg)	M(活動量, Met)	F(CO ₂ 排出量, l/h)
0.83	1.50	40	1.2	13.45334951

(b) 計算結果

システム同定計算による A 邸の外気導入量の推定結果を表 3.7.4 に、室間換気量の推定結果を図 3.7.8 にそれぞれ示す。表中に示す換気回数は各室の外気導入量から算出したものである。外気導入量を見ると、建物全体の総換気回数は 0.43[1/h]であった。階別に見ると、1 階で 0.33[1/h]、2 階で 0.56[1/h]であり、2 階のほうが多いのは屋内外温度差に起因する浮力が影響しているためだと考えられる。各ゾーンごとに見ると、1 階和室と 2 階廊下において換気回数が 1[1/h]を越え、建物内で最も多かった。これに対して 1 階リビングダイニングキッチン (LDK) では換気回数が 0.19[1/h]と、建物内で最も少なかった。室間換気量を見ると、階段を通じた 1 階リビングダイニングキッチン (LDK) と 2 階廊下間の風量が大きいが、これは互いのゾーンを間仕切るものが無く、空間的に繋がっていたためであると考えられる。

表 3.7.4 システム同定計算による外気導入量の推定結果

室名	システム同定計算による推定値	
	外気導入量(m ³ /h)	換気回数(h ⁻¹)
1階		
玄関・ホール	16.3	0.58
和室(玄関側)	4.61	0.19
和室(LDK側)	31.7	1.00
LDK	8.61	0.08
1階(186.86m ³)合計	61.2	0.33
2階		
2階廊下	50.7	1.11
主寝室	14.7	0.30
洋室(南側)	7.36	0.30
洋室(北側)	8.19	0.33
2階(143.91m ³)合計	80.9	0.56
家全体(330.77m ³)	142.2	0.43

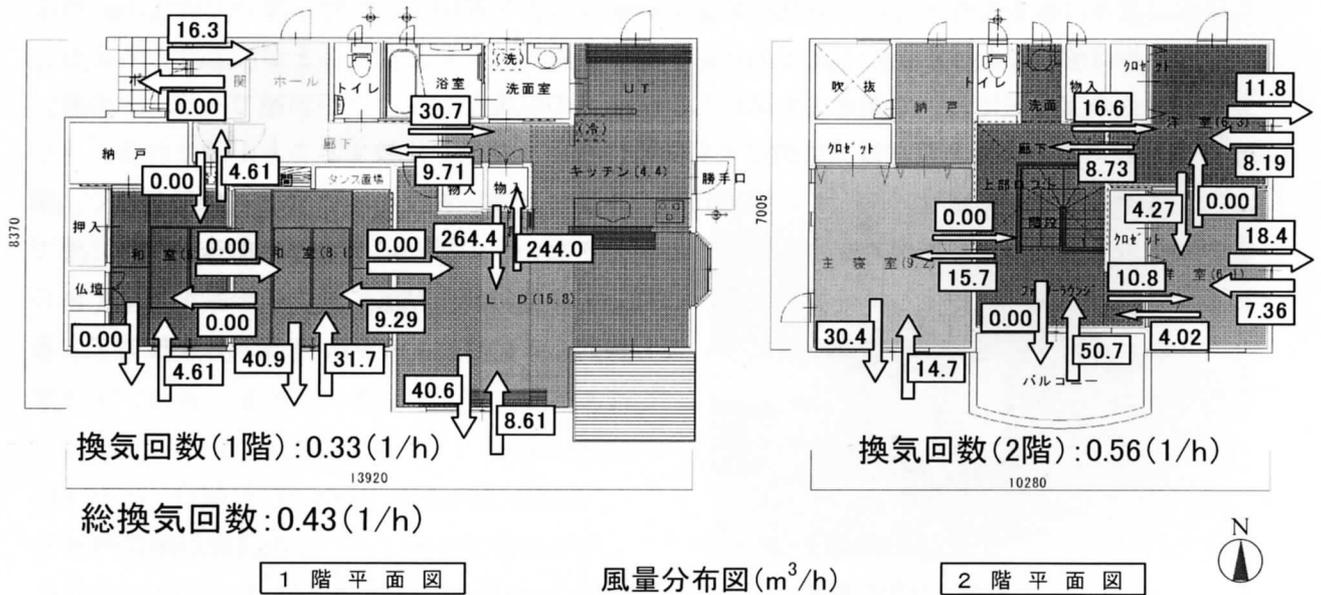


図 3.7.8 システム同定計算による室間換気量

(7) 風量測定の結果とシステム同定計算の結果の比較

風量測定とシステム同定計算の総換気回数を比較すると、それぞれ 0.41[1/h]、0.43[1/h]であり、よく対応していた。システム同定計算値のほうが僅かに多いのは、計算値には隙間風による換気量が含まれているからだと考えられる。A 邸は高気密住宅である上に測定期間中は窓開けをほとんど行っていなかったことから隙間風は少ないと考えられ、妥当な結果であると推察される。階別に見ると、風量測定とシステム同定計算の総換気回数が 1 階においてそれぞれ 0.39[1/h]、0.33[1/h]であり、2 階においてそれぞれ 0.48[1/h]、0.56[1/h]であり、概ね対応していた。対応していた要因として、CO₂ 排出量の見積もりが妥当であったこと、アンケートの返答が正確だったこと、人体以外からの CO₂ 発生が無かったこと、窓開けをほとんど行わなかったこと、暖房を 24 時間稼動していたこと、などが考えられる。

3.7.4 まとめ

仙台市青葉区に建設された A 邸を対象とした呼気を用いた換気量測定について報告した。機械換気システムの給排気口において風量測定を行い、その結果との比較を行った結果、両者はよく対応していた。今回の実測においては、測定装置の設置は 3 人で約 2 時間、撤収は 2 人で約 1 時間と比較的短時間で行うことが出来た。また、ポール等を用いずとも適切に測定装置を設置できる場所が意外に数多く存在した。実測の最後に居住者に実測期間中の感想を聞いたところ、特に大きな負担は感じなかったとのことであり、本測定法の長所を享受することができたと考える。今後は多くの実住宅において測定法を試行し、データの収集を行うことが課題である。その際、PFT 法などの他の簡易多数室換気量測定法も同時に行い、結果を比較することが望まれる。さらに、システム同定計算過程において、押入れや天井裏などの不明瞭な容積（ガス発生が無く、測定器の個数上の制限より濃度の測定も行うことができない）の扱いに関する更なる検討が必要である。今回の計算では無視して計算したが、これらの部位は測定精度に多少の影響を及ぼすものと考えられる。その他、測定器の改良についても検討していきたい（例：在室人数が把握できる人感センサーなど）。

3.8 特殊な換気システムに対応した性能検証の検討

3.8.1 床下等をダクトスペースとして利用する換気システムの性能検証

本章では、床下・壁体内・小屋裏等の空間をダクトスペースとして利用する換気システムの性能評価について取り上げる。対象システムは、取り入れた外気を室内だけでなく床下等の建物の内部空間にも循環させ、構造体の劣化を防止し建物の耐久性を高めることができるという特徴を有する。対象システムが設置された住宅4件で実験を行い、室内の換気性状や温熱環境、また、住宅内に導入された外気が床下等の内部空間内を計画された通りに移動しているかについて明らかにする。対象住宅に採用されているシステムの換気方式や換気経路などは様々であり、実験の目的も異なる。

(1) 内装の隙間を給気経路とした床下給気型第1種換気システム

内装隙間を給気経路とした床下給気型第1種換気システムを備えた実験住宅を対象に、夏期の換気性能の測定を行った。本システムは、給気ファンを用いて床下に導入した外気を壁体内や小屋裏など建物全体に循環させ、壁体内通気層と室内空間との間の内装の隙間や給気ガラリを通して室内へ供給する。本実験の目的は換気量を明らかにし、実験住宅における空気の流れが意図された通りに各室に行き渡るかどうか、また、壁体内通気層と室内空間との間に設けた給気ガラリによってどのように変化するかを、空気齢や空気交換効率の換気効率指標を用いて評価することにある。

(a) 対象住宅と換気システムの概要

1) 対象住宅の概要

写真3-8-1に対象住宅の外観、図3-8-1に平面図を示す。対象住宅は、中部地方に建設された実験住宅であり、モデルハウスとしても利用されている。2001年2月21日に竣工し、延床面積は 241.91 m^2 （1階は 138.29 m^2 、2階は 103.62 m^2 ）、外被内気積は 911.24 m^3 、竣工時の気密性能は、単位床面積当たり相当隙間面積で $0.6\text{ cm}^2/\text{m}^2$ である。実験用の点検口が設けられており、小屋



写真 3-8-1 対象住宅の外観

裏は、断熱気密層が屋根部分にある東側ブロックと2階天井裏にある西側ブロックに分かれている。また、実験的に調湿建材が設置されている。対象住宅はモデルハウスを兼ねているため、通常では見ることのできないダクトスペース、床下、壁体内等が部分的に見学できるようになっている。また、2階にはオフィススペースとして用いられている事務室があり、一般的な戸建住宅よりも規模が大きい。1階の西側にある倉庫は、断熱気密層の外側に位置している。

2) 換気システムの概要

図3-8-2に、換気システムの設置概念図を示す。以下に、換気経路について述べる。

- ① 外気取り入れ口から導入された外気は、空気循環ユニット内のフィルターで浄化され、ファンにより床下空間へ送られる。冬期はボイラーで温水を作り、ユニット内で外気を暖めることによって建物全体を暖房する。夏期の冷房は各室毎にエアコンを用いて行う。
- ② 床下へ導入された空気は、壁体内を通過して小屋裏へ移動すると共に、内装の隙間や給気ガラリを經由して室内へ供給される。
- ③ 小屋裏に集められた空気は、リターンダクトを通過して空気循環ユニットへ戻される。
- ④ 室内空気は、各室の排気口から①②③とは別系統の集中排気システム（1階と2階は別系統）を經由して、屋外へ排出される。

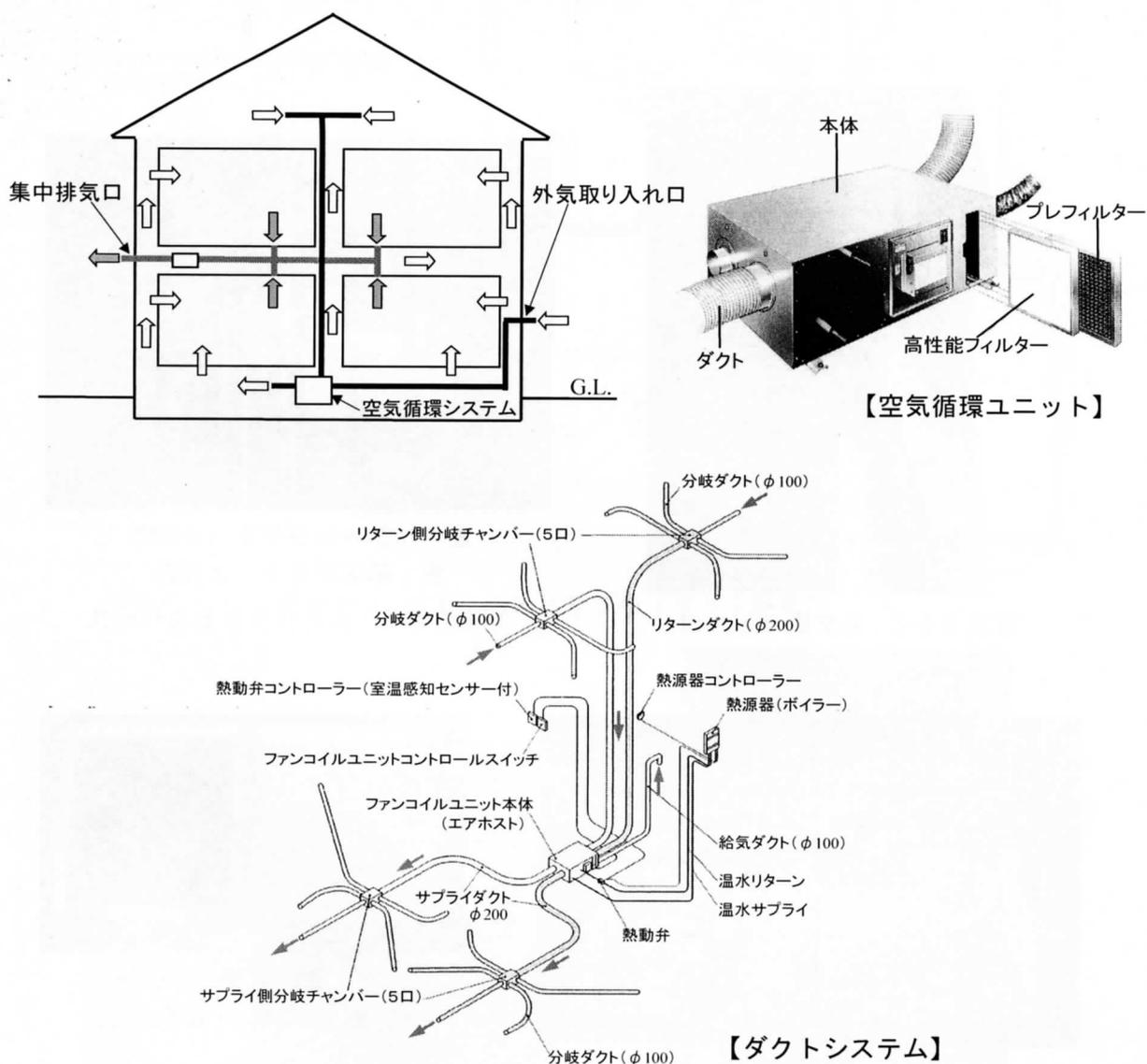


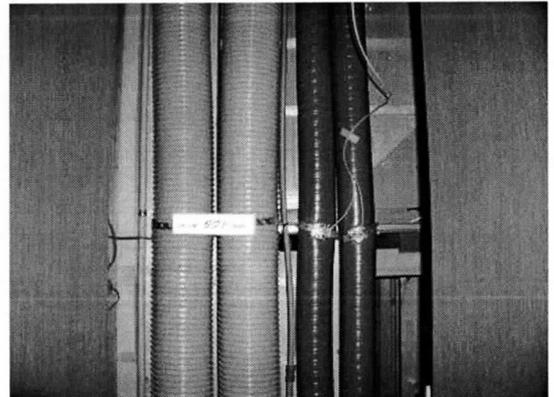
図3-8-2 換気システムの設置概念図

【外気取り入れ口と空気循環ユニット】

外気取り入れ口は、対象住宅の北外壁面（勝手口の向かって右上、設置高さは1階天井裏と同レベル、写真3-8-2・図3-8-3参照）に2つ設置されている。外気取り入れ口から取り入れられた外気は、空気循環ユニットに内蔵されている給気ファン（風量は弱・中・強の3段階に制御可能）により、2本の給気ダクトを通して空気循環ユニットまで送られる。台所のダクトスペースは中に入ることが可能で、1階天井裏から床下へ下りていく給気ダクトを見ることができる。写真3-8-3にダクトスペースの様子を示す。右側の2本が給気ダクト、左側の2本が小屋裏の空気を空気循環ユニットまで送るリターンダクトである。空気循環ユニット（写真3-8-4）では、プレフィルターと高性能フィルターで外気中の汚れを取り除き、冬期はボイラーで作った温水で空気を暖める。その後、新鮮空気は、空気循環ユニット内に内蔵された給気ファンによって床下空間へ送り出される。空気循環ユニットのフィルターは、実測前に新しいものと交換した。



写真3-8-2 外気取り入れ口

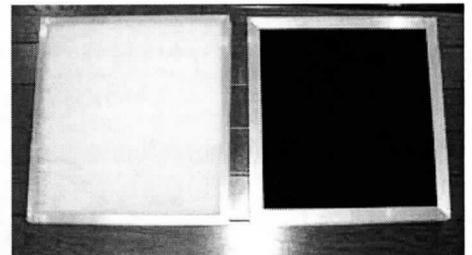


左：リターンダクト（φ200）
右：給気ダクト（φ100）

写真3-8-3 台所のダクトスペース



写真3-8-4 空気循環ユニットの設置状況とフィルター



左：高性能フィルター
右：プレフィルター

【床下のサプライダクトと壁体内通気層】

図3-8-3に、床下におけるサプライダクトの配管図を示す。チャンバーは和室と食堂の床下の2ヶ所に設置されており(写真3-8-5)、空気循環ユニットとチャンバーの間は $\phi 200$ のダクトで接続されている。チャンバーからは $\phi 100$ のダクトが5本ずつ伸びており、空気循環ユニットから送られてきた空気は、その先端から床下空間へ送り出される。床下空間に送り出された空気は、壁体内通気層(写真3-8-6)や2階床下空間を移動し、小屋裏に到達する。和室床下チャンバーから西側へ向かう2本のダクトは、2階寝室の床下まで伸びている。

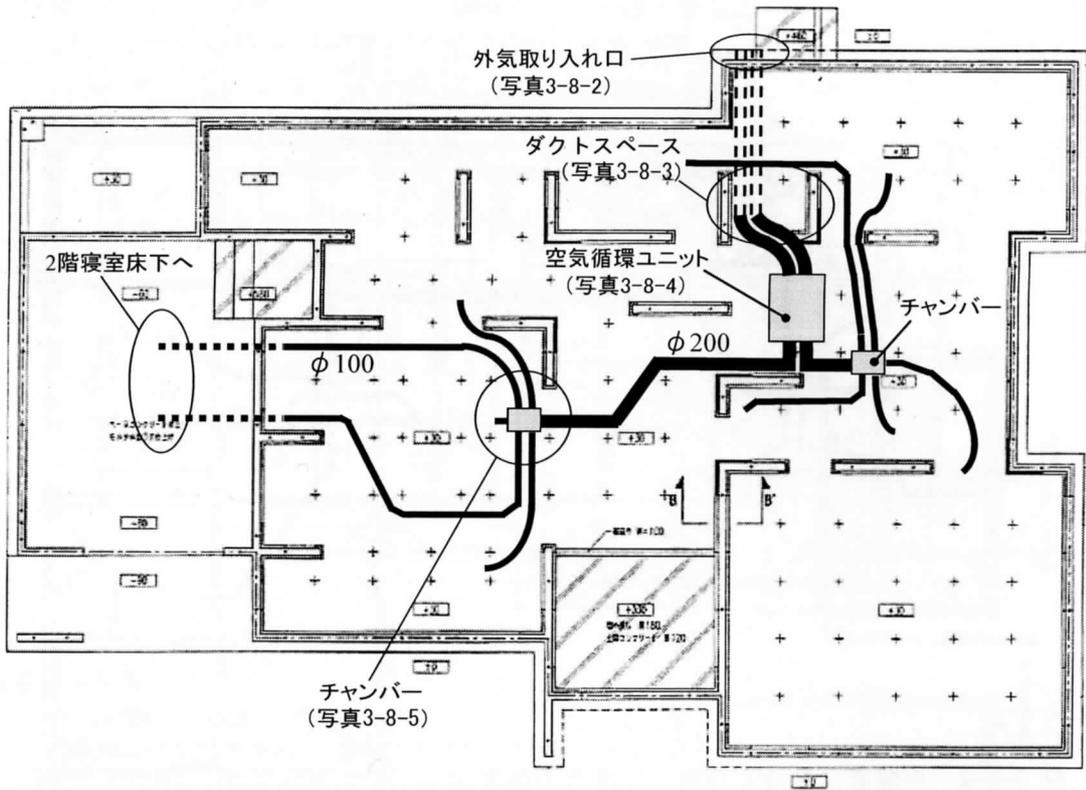


図3-8-3 床下におけるサプライダクト配管図

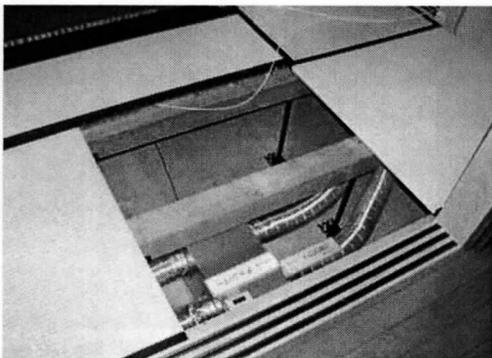


写真3-8-5 和室床下のチャンバーとダクト



写真3-8-6 居間壁体内の様子

【小屋裏のリターンダクト】

小屋裏に到達した空気は、小屋裏に設置されたφ100ダクトの先端から回収され、チャンバーとφ200のリターンダクトを経由して、床下の空気循環ユニットへ戻る。図3-8-4に、小屋裏におけるリターンダクトの配管図を示す。小屋裏は、前述したように、断熱気密層が屋根部分にある東側ブロック（写真3-8-7）と2階天井裏にある西側ブロックに分かれており、各ブロックに1系統ずつチャンバーとダクトが設置されている。東側ブロックへは2階ホールからはしご（写真3-8-8）を使って上がることができる。西側ブロックは2階天井裏にあり、2階天井に設けられている点検口から部分的に見ることができる。また、東側ブロックから西側ブロックの断熱気密層の外側に位置する空間（写真3-8-9）に入ることができる。

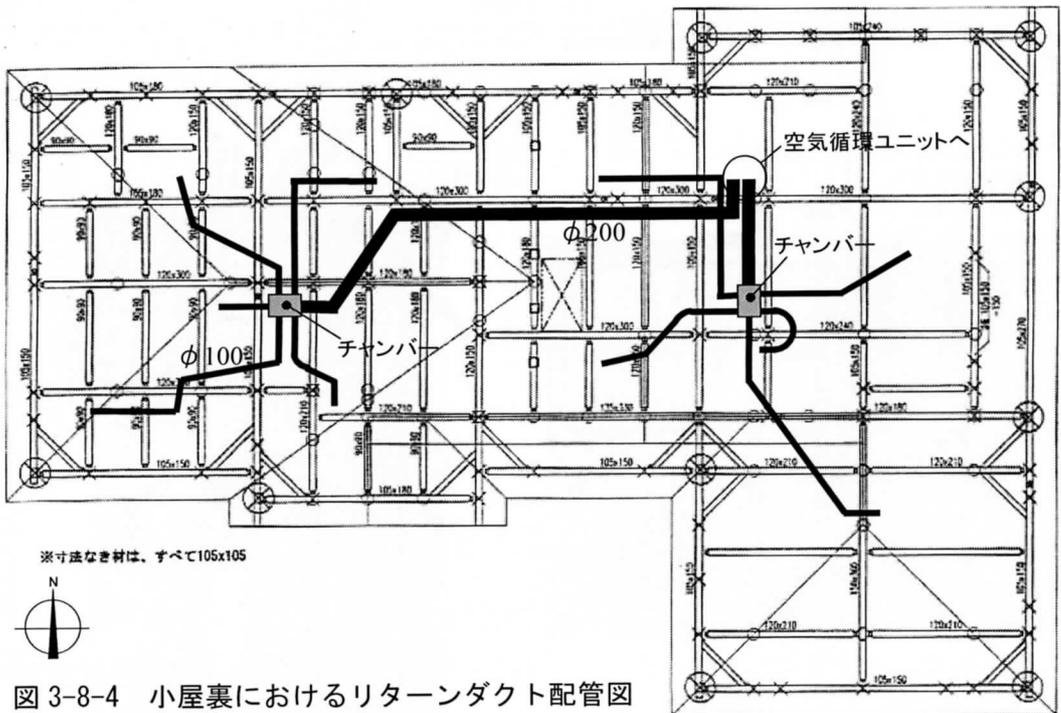


図3-8-4 小屋裏におけるリターンダクト配管図

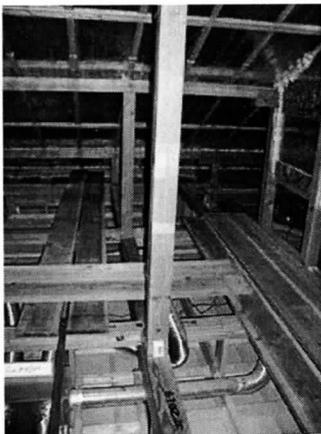


写真3-8-7 小屋裏（東側）



写真3-8-8 小屋裏へのはしご



写真3-8-9 断熱気密層の外側の様子（西側）

【給気ガラーと排気システム】

屋外から取り入れた空気は、前述したように、床下→壁体内通気層→小屋裏→床下という順番で循環しており、室内には、内装の隙間や給気ガラーを通して供給される。内装の隙間は意図的に設けられているが、その隙間の全体量は不明である。室内の汚染された空気は集中排気システムや局所排気ファンによって屋外へ排気される。図3-8-5に、給気ガラーと排気口の位置、集中排気システムのダクト配管を示す。

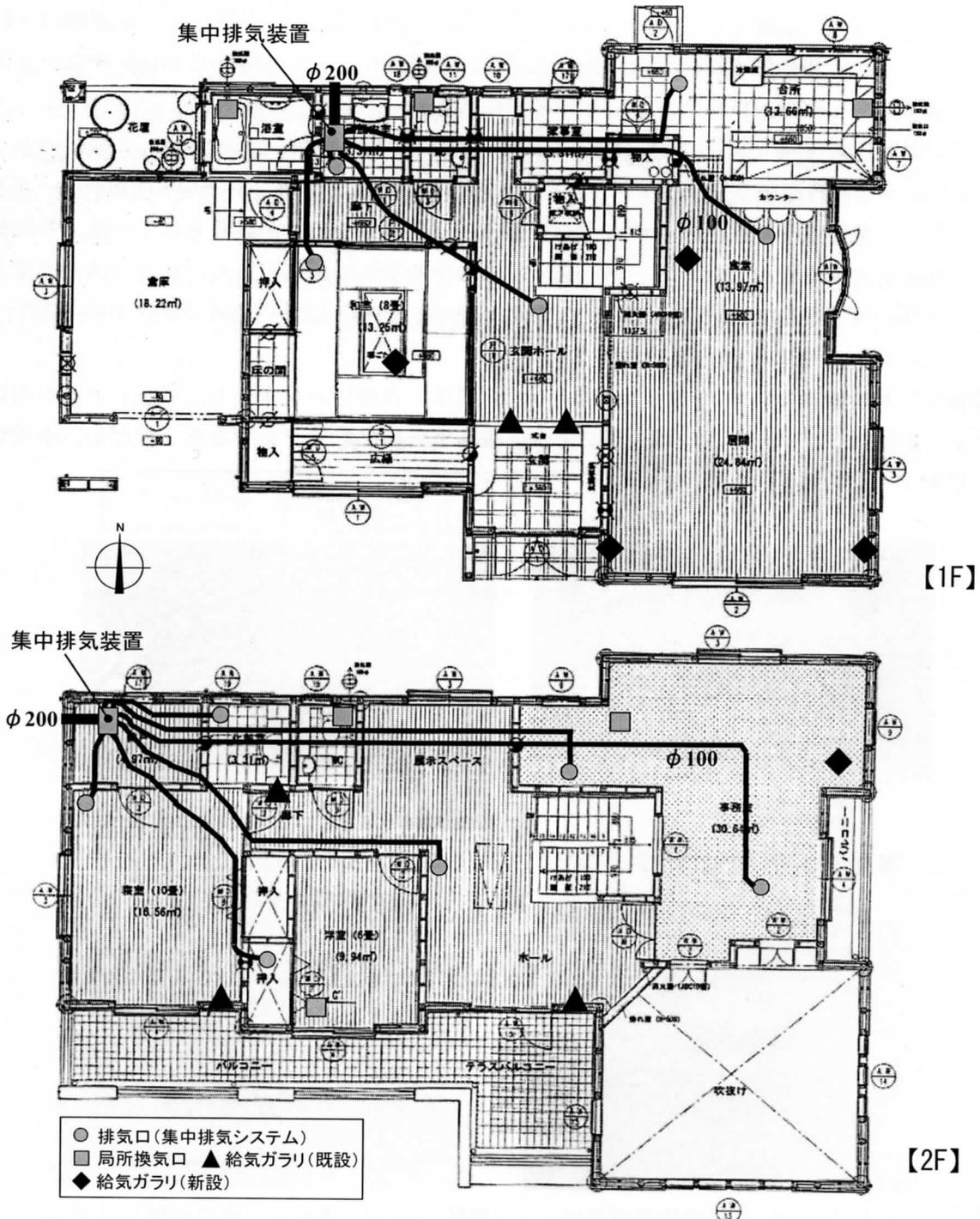


図3-8-5 給気ガラーと排気口の位置と集中排気システムのダクト配管図

給気ガラルの設置場所について説明する。1階は、玄関2ヶ所と和室、2階は、ホール2ヶ所と寝室1ヶ所である。玄関の給気ガラルは、1段高くなっている部分の側面に設けられており、床下空間に直接通じている(写真3-8-10)。和室は、掘ごたつと床下展示用にガラスがはめ込まれている部分以外では、畳の下の際間面積が大きくなるように設計されている(写真3-8-11)。2階に設置されたガラルを写真3-8-12に示す。壁面の165cm²の開口部に、縦方向の羽根の付いた木製の枠が設置されたものである。この給気ガラルは、事務室の南壁面にも1つ設置されているが、オフィス家具の裏側に隠れているので、今回の実測では考慮していない。また、この建物は実験住宅であるため、普通の住宅には見られない点検口が多数あり、その部分からも新鮮空気が壁体内等の内部空間から室内へ供給されていると考えられる。

次に、集中排気システムについて説明する。1階と2階で別系統になっており、1階は食堂・台所・玄関ホール・洗面脱衣室・和室の5ヶ所、2階は事務室に2ヶ所、ホール・洋室押入・寝室・寝室付属の化粧室に1ヶ所ずつの計6ヶ所に排気口(写真3-8-13)が設置されている。各排気口からφ100ダクトを通してチャンバーに集められた汚染空気は、集中排気ファン(風量は微弱・弱・中・強の4段階に制御可能)によって屋外へ排出される。屋外への排気ダクトはφ200である。

最後に、局所換気ファンについて説明する。1階は、台所レンジフード、浴室とトイレの排気ファン、2階は、洋室とトイレの排気ファン、事務室の給排気ファンである。ただし、本実験では、局所ファンを運転していない。



写真 3-8-10 玄関の給気ガラル

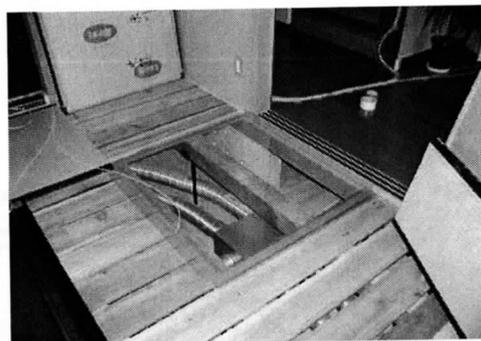


写真 3-8-11 和室の給気ガラル

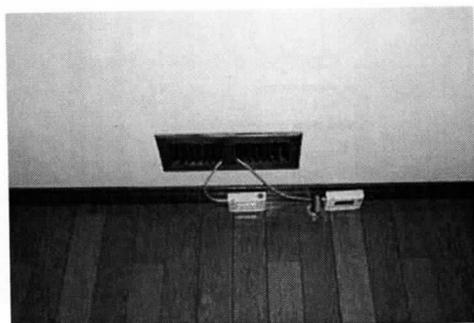


写真 3-8-12 2階の給気ガラル

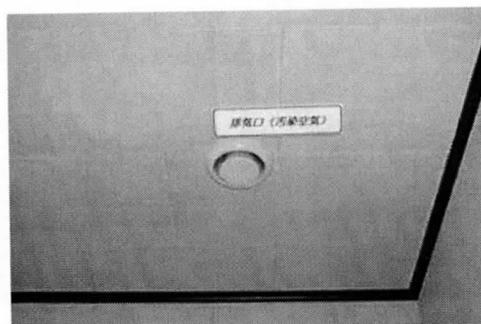


写真 3-8-13 排気口 (集中排気システム)

(b) 測定項目と測定方法

測定項目は、建物の気密性能、給排気口の風量、各室・外気および床下・壁体内・小屋裏の温湿度、各室および床下・壁体内・小屋裏の空気齢である。測定日は、建物の気密性能は2002年8月10日、給排気口の風量は8月15日、温湿度と空気齢は8月11日～15日である。

1) 建物の気密性能

居間の東側窓にポリエチレンシートを用いて気密測定器（コーナー札幌製、KNS-400）を設置し、減圧法で測定する。写真3-8-14に気密測定器の設置状況、表3-8-1に測定ケースを示す。対象住宅には、調査対象の換気システム（給気システムと集中排気システム）と、実験中は使用しない局所換気ファンが設置されているので、それらを考慮した測定ケースを設定した（case1～5）。外気取り入れ口と1階の集中排気口は屋外からシールした。2階の集中排気口は屋外からシールすることが難しかったので、納戸の点検口で集中排気ダクトをチャンバーから外してシールすることにした（写真3-8-15）。局所換気口については、屋外からシールできる換気口は屋外からシールし、屋外からシールできない換気口は屋内からシールした。

表3-8-1 気密測定の場合

ケース番号	セントラル換気システム		局所換気口
	外気取り入れ口	集中排気口	
case1	シール	シール	シール
case2	シール	開	シール
case3	開	シール	シール
case4	開	開	シール
case5	開	開	開

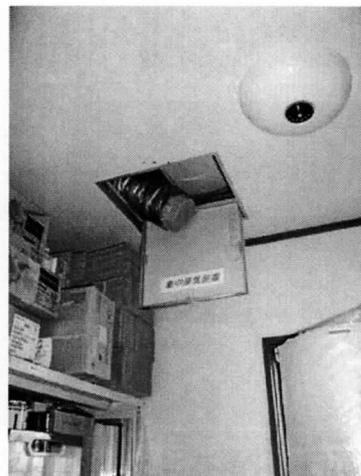
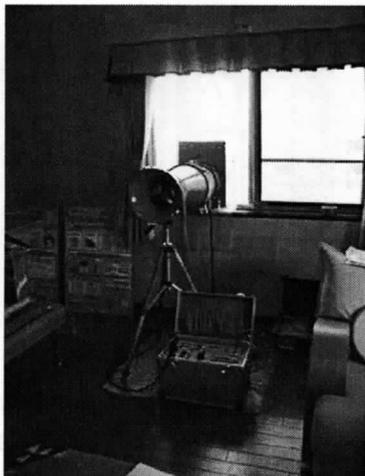


写真3-8-14 気密測定器の設置状況

写真3-8-15 2階集中排気口のシールの様子

2) 給排気口の風量

写真 3-8-16 に示す風量測定器（コーナー札幌製、Swema Flow 65）を使用し、換気システムの外気取り入れ口・給気ガラリ・集中排気口、局所換気口の風量を測定する。測定値は 10 秒間の平均値である。換気システムの給排気口の風量は、空気齢の測定条件（後述の表 3-8-2 参照）によって変化することが予想されるので、全条件において測定を行う。風量測定時の給排気ファンの設定は実験と同様で、給気が強運転、排気が微弱運転である。局所換気口については、換気システムのファンを運転した状態で、それぞれの局所ファンを個別に運転した場合の測定を行う。

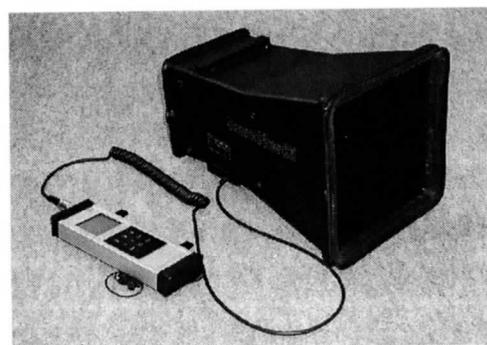
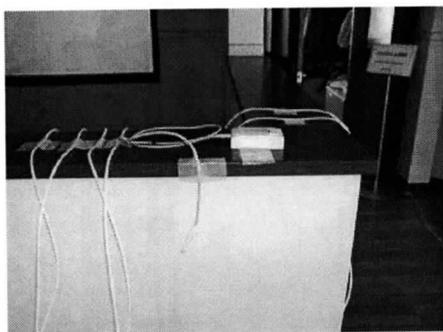


写真 3-8-16 風量測定器

3) 各室、外気および床下・壁体内・小屋裏の温湿度

温湿度センサー付き小型データロガーを用いて、10 分間隔で測定し記録する。和室の床下に 1ヶ所、1階は、居間、食堂、台所、玄関ホール、和室、洗面脱衣室、倉庫の 7ヶ所、2階は、事務室、ホール、洋室、寝室、納戸の 5ヶ所、壁体内は、1階北外壁（台所の点検口から）、1階南外壁（居間の点検口から、写真 3-8-6 参照）、1階間仕切（居間の点検口から）、2階間仕切（事務室の点検口から）、2階給気ガラリ付近（各給気ガラリから）が 3ヶ所で計 7ヶ所、小屋裏は、東側ブロックに 1ヶ所、西側の断熱気密層の外側に 1ヶ所、倉庫に 1ヶ所、外気に 1ヶ所の合計 23ヶ所で測定。図 3-8-6 (a)、図 3-8-6 (b) に、温湿度計付き小型データロガーの設置位置、写真 3-8-17 に設置状況を示す。



(a) 室内の設置状況

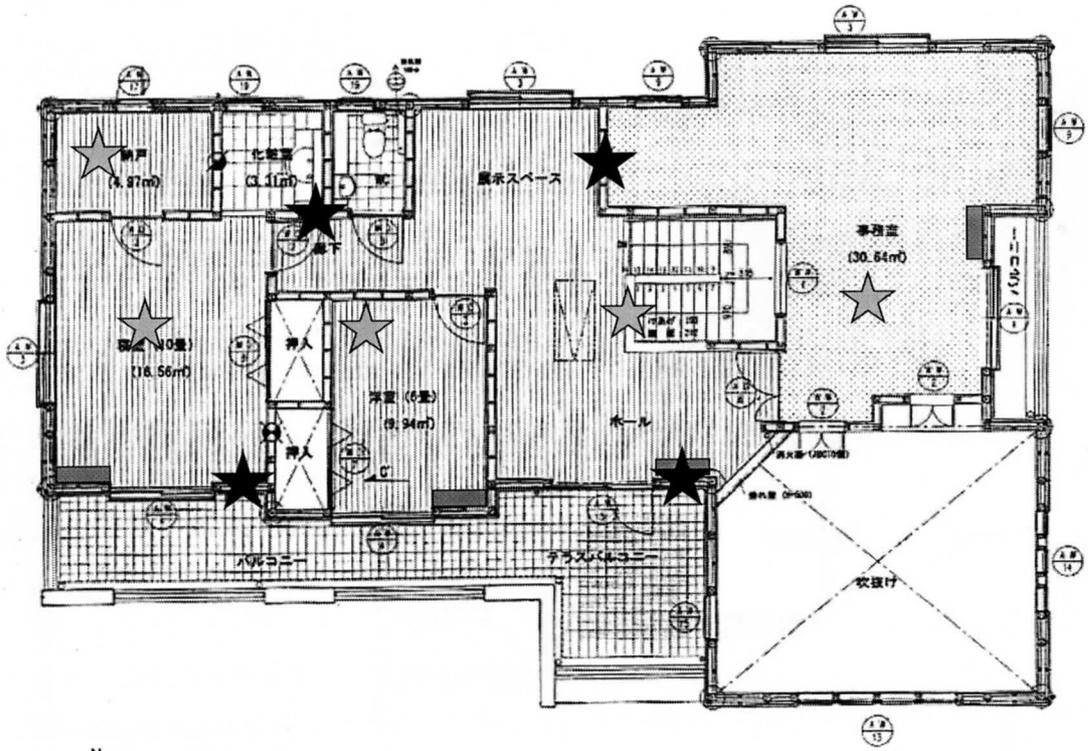


(b) 壁体内の設置状況

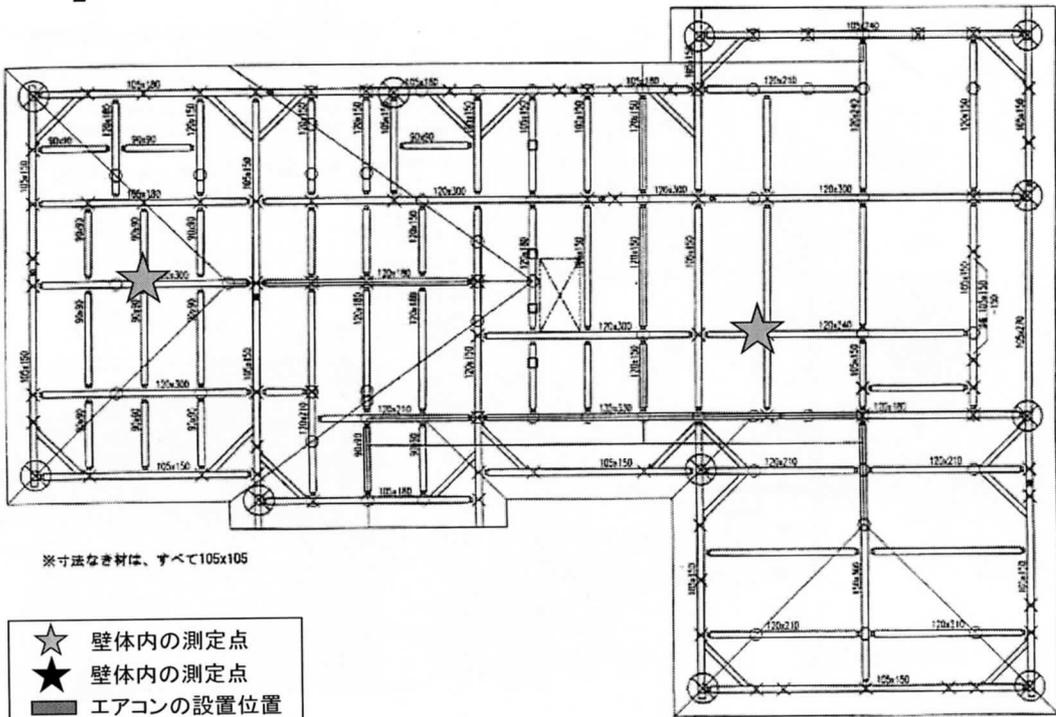


(c) 外気の設置状況

写真 3-8-17 温湿度計付き小型データロガーの設置状況



【2F】



【小屋裏】

図 3-8-6 (b) 温湿度センサー付き小型データロガーの設置場所 (2階・小屋裏)

4) 各室および床下・壁体内・小屋裏の空気齢

壁体内通気層の新鮮空気が、内装の隙間を経由して室内に供給されるか、給気ガラリの設置により新鮮空気の供給状況がどのように変化するかを調べるために、給気ガラリの利用状況をパラメータとした3条件の下で、ステップアップ法 (SU法) とステップダウン法 (SD法) に用いて各室および床下・壁体内・小屋裏の空気齢を測定する。SU法では、外気が給気ダクトを経て給気ガラリ、内装の隙間から室内に供給されるまでの時間について評価され、SD法では、給気と建物隙間からの漏気を合わせた空気齢について評価される。

【実験条件】

表3-8-2に測定条件について示す。実験1と4では給気ガラリを全てシールしており、内装の隙間からの外気導入について明らかにする。通常の住宅には設置されていないダクトスペースの扉や点検口は、目張りしている。実験2と5では給気ガラリを開放し、内装の隙間に給気ガラリを加えた場合の測定を行う。実験3と6では更に給気ガラリを追加する。追加したガラリ (写真3-8-18) は、居間の壁に設置されている点検口に2ヶ所、食堂の床下点検口に1ヶ所、和室の掘ごたつに1ヶ所、事務室の床下点検口に1ヶ所の計5ヶ所である。設置場所は図3-8-7に示す。和室のガラリは、掘ごたつの枠を取り外し床下空間と室内空間の仕切りをなくした上で、2階の給気ガラリと同じ大きさの穴 (開口面積165cm²) を開けたスタイロフォームをはめ込み、シールで固定して作成した。食堂と事務室のガラリは、床下点検口の蓋を外し、和室と同様に穴の開いたスタイロをはめ込んで作成した。居間の点検口は面積が小さいので、開口面積が2階の給気ガラリと同じになるようにシールした。給気ファンは強 (強・中・弱に制御可能)、排気ファンは微弱 (強・中・弱・微弱に制御可能) のモードで運転した。エアコンは、1階が、居間・食堂 (5kW)、台所 (2.2kW)、和室 (2.8kW) の3ヶ所 (図3-8-6 (a) 参照)、2階は、事務室 (3.2kW)、ホール (2.2kW)、洋室 (2.2kW)、寝室 (2.8kW) の4ヶ所 (図3-8-6 (b) 参照) に設置されており、冷房温度を28℃とした。実験中は、住宅内への立ち入りを禁止し、局所換気ファンは運転していない。

表3-8-2 空気齢の測定条件

実験	測定方法	既設の給気ガラリ	新設の給気ガラリ	冷房温度	給排気ファン
1	ステップアップ法	×	×	28℃	給気: 強運転 排気: 微弱運転
2		○	×		
3		○	○		
4	ステップダウン法	×	×		
5		○	×		
6		○	○		

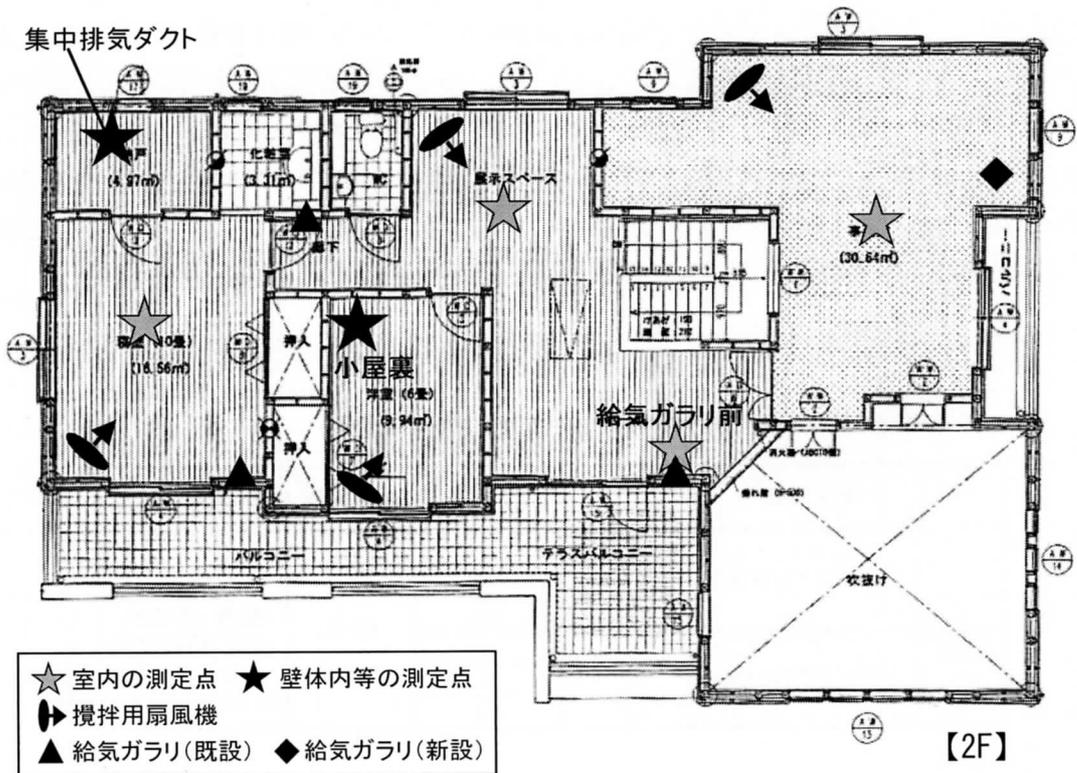
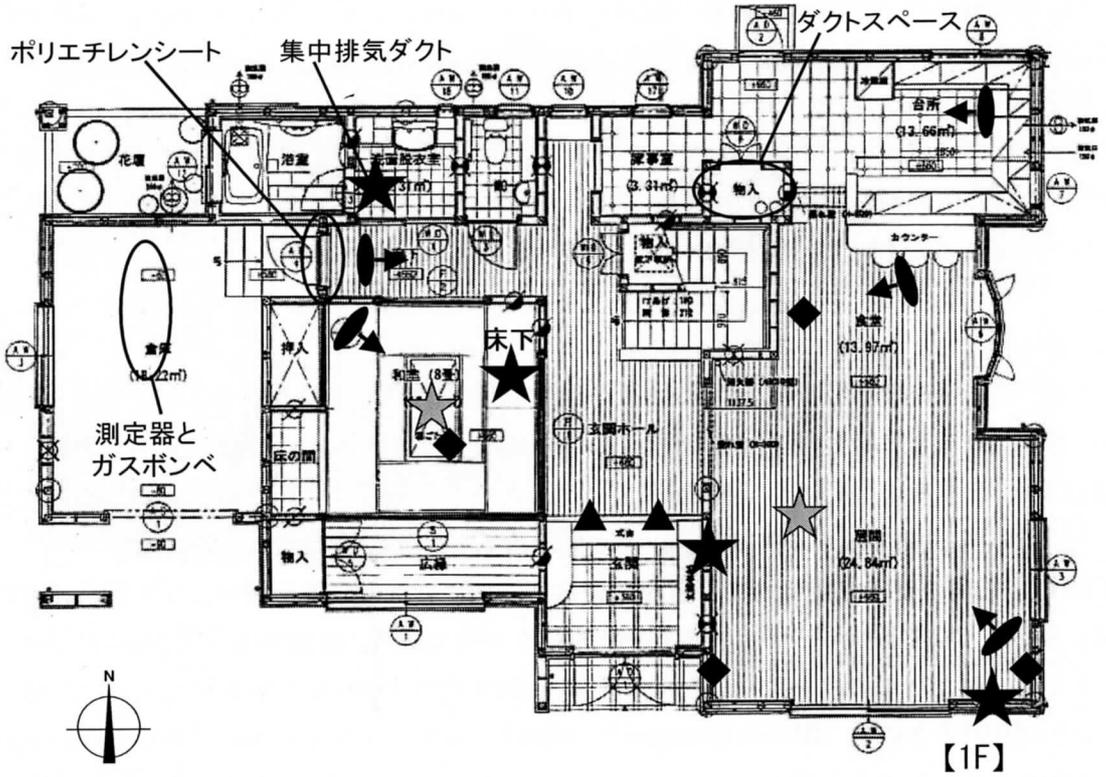
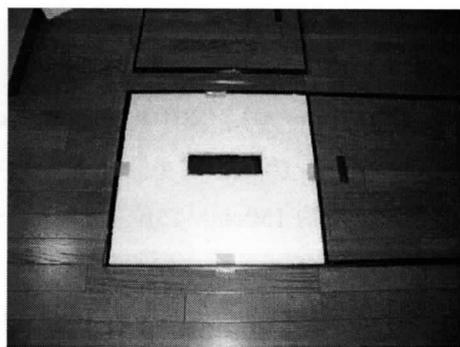


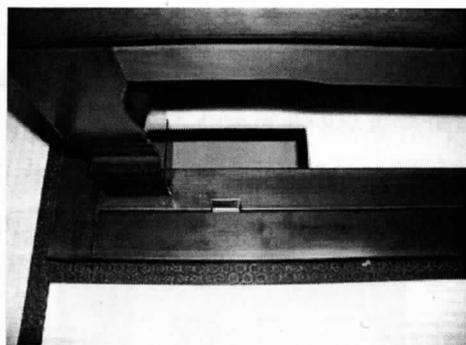
図 3-8-7 給気ガラリーと空気齢の測定点の設置位置



(a) 居間（西側）



(b) 食堂



(c) 和室



(d) 事務室

写真 3-8-18 実験 3 で新設した給気ガラリ

【ステップアップ法 (SU 法)】

SU 法は、給気口から室内へ導入される外気に一定の割合でトレーサーガスを注入することで、導入外気の色付けする方法である。ガス濃度上昇を測定し、各測定点の濃度が定常になるまで測定を行う。

外気取り入れ口から約 3m 入った給気ダクト内で SF_6 ガスを一定量発生させ、マルチガスモニター (B&K 社製、1302 型、写真 3-8-19) とマルチポイントサンプラー (B&K 社製、1303 型、写真 3-8-19) を用いてガス濃度履歴を測定する。ガス注入は、ガスボンベ (写真 3-8-19) に接続したテフロンチューブを、台所のダクトスペース (図 3-8-7、写真 3-8-3 参照) からチューブを挿入して行った。ガスの発生量は、マスフローコントローラー (エステック社製) を用いて 30cc/min に制御している (写真 3-8-19)。ガス濃度測定器、ガスボンベ等のガス発生装置は、実験中に対象住宅への出入りができなくなることを考慮して、断熱気密層の外側に位置する倉庫に設置した。

空気齢の測定点の位置を図3-8-7に示す。1階は、居間、和室、壁体内（居間南側）、壁体内（居間西側）、床下（和室）、集中排気ダクトの6ヶ所、2階は、ホール、寝室、事務所、小屋裏（洋室）、給気ガラリ前（ホール）、集中排気ダクトの6ヶ所である。測定点には、サンプラードーザーに接続されたテフロンチューブを設置する。室内ではポールを立て、チューブの先端が立位姿勢での呼吸高さ（床上約150cm）に位置するように固定した（写真3-8-20）。集中排気ダクトと小屋裏（洋室）のチューブは点検口から挿入し、チューブが折れないように点検口の蓋を少し開けた状態で目張りした（写真3-8-21）。ポールは蓋を支えるためのものである。壁体内（居間）のチューブは点検口より挿入した。床下（和室）のチューブは、畳の下に設けられた内装の隙間を通して挿入し（写真3-8-11参照）、チャンバーから伸びている給気ダクトの出口付近に設置した。給気ガラリ前（2階ホール）のチューブはガラリの室内側に設置した。倉庫と廊下の上に設置されたドアを開放して、その部分にポリエチレンシートを張りチューブを通した（写真3-8-22）。設置したチューブを通して、サンプラードーザーにより各測定点の空気を1点ずつ吸引し、マルチガスモニターでガス濃度を測定する。測定データは、随時パソコンに収録されていく。

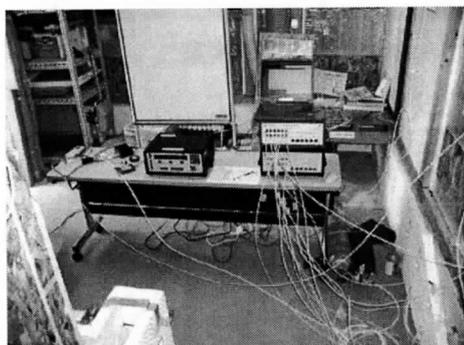


写真3-8-19 ガス濃度測定機器



写真3-8-20 チューブ設置状況（寝室）



写真3-8-21 チューブ設置状況
（1F 排気ダクト）



写真3-8-22 倉庫ドアのシール

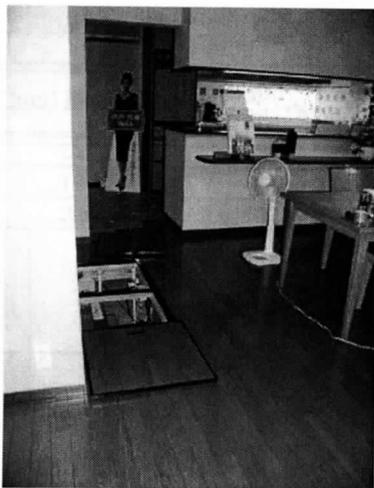
各室の間仕切扉は全て閉めた状態で測定を行う。そのため、各室へのチューブはドアのアンダーカットを通して設置した。アンダーカットがない場合は、スタイロフォームを噛ませて完全にドアが閉まらないようにした。

【ステップダウン法 (SD法)】

SD法は、ガスを室内空気と混合することで室内空気を色付けする方法である。室内ガス濃度を均一にしてから換気システムを稼働させ、各測定点での濃度減衰を測定する。今回は、SU法の終了後、室内空気を攪拌しガス濃度を均一にしてからSD法を行う。

室内空気の攪拌は、扇風機と気密測定器のファンを用いて行った(写真3-8-23)。図3-8-7に攪拌用扇風機の位置を示す。通常、攪拌時には換気システムを停止し換気によってガス濃度が減少しないようにするが、今回は、床下・壁体内・小屋裏のガス濃度も室内と均一にしなければならぬため、集中排気システムの排気ファンのみを停止し、空気循環ユニット内の給気ファンは運転していた。このとき、外気取り入れ口はシールしている。ガス濃度の均一化を促進させるため、攪拌時には和室の畳を外し、床下の点検口を開け、小屋裏へ通じるはしごを下ろした。

各測定点のガス濃度が均一になった時点で攪拌を止め、間仕切扉や点検口を閉め、畳やはしごを元に戻す。そして、排気ファンの運転を開始し、外気取り入れ口のシールを外した時点で測定スタートとなる。ガス濃度がほぼ0になった時点で測定終了である。



(a) 食堂の攪拌



(b) 居間の攪拌

写真 3-8-23 室内空気の攪拌状況

(c) 実測結果

1) 建物の気密性能

表3-8-3に、実験住宅の気密性能の測定結果について示す。測定は、ガス濃度測定器やチューブ等の設置日である8月10日に行った。測定中は少し風があり失敗したケースもあったが、何回か測定を行って風の条件が良いデータを使用することにした。建物の床面積(241.91 m²)当たりの相当隙間面積(case1)は0.8cm²/m²で、次世代省エネルギー基準値(5 cm²/m²)を十分満たしており、2 cm²/m²以下であることから高気密住宅と言える。

気密性能の測定結果から算出した換気口の隙間面積を表3-8-4と図3-8-8に示す。集中排気システムの排気口の値が最も大きく、約13cm角の隙間があることが分かる。2番目に大きい外気取り入れ口では約10cm角、最も小さい局所換気口では約8cm角の隙間がある。

表 3-8-3 気密測定の場合と結果

ケース番号	セントラル換気システム		局所換気口	床面積当たりの相当隙間面積(cm ² /m ²)
	外気取り入れ口	集中排気口		
case1	シール	シール	シール	0.798
case2	シール	開	シール	1.463
case3	開	シール	シール	1.265
case4	開	開	シール	1.670
case5	開	開	開	1.947

表 3-8-4 換気口の隙間面積

換気口	算出方法	床面積当たりの相当隙間面積(cm ² /m ²)	隙間面積(cm ²)
外気取り入れ口	case3-case1	0.467	113
集中排気口	case2-case1	0.666	161
局所換気口	case5-case4	0.277	67

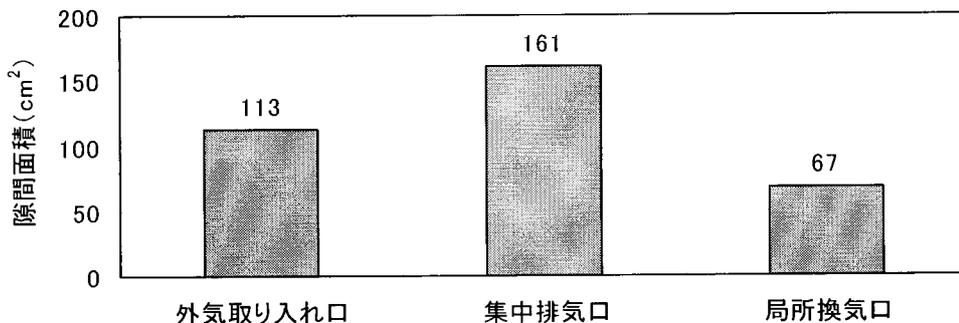


図 3-8-8 換気口の隙間面積

2) 給排気口の風量

表 3-8-5 と図 3-8-9 にセントラル換気システムの給排気口風量測定結果、表 3-8-4 と図 3-8-3 に局所換気口の風量測定結果を示す。測定は、実験の撤去日である 8 月 15 日に行った。

表 3-8-5 風量測定結果 (セントラル換気システム、単位は[m³/h])

	測定位置	給気ガラリシール (実験1・4)	既設ガラリ開 (実験2・5)	既設ガラリ開+新設ガラリ開 (実験3・6)
外気取り入れ口	西	118.2	118.1	116.3
	東	115.0	111.3	113.4
給気ガラリ	2階ホール(南)		18.1	13.0
	2階ホール(北)		13.4	14.4
	2階寝室		15.5	11.8
	事務室			28.8
	居間(西)			18.7
	居間(東)			18.0
	食堂			21.3
	和室			23.4
1階排気口	食堂	25.4	25.4	25.1
	台所	25.2	27.5	29.3
	ホール	27.3	28.8	27.9
	和室	22.8	24.1	24.5
	洗面所	24.7	26.0	25.9
2階排気口	事務室(南)	18.0	19.0	20.1
	事務室(北)	19.6	19.3	18.7
	ホール	23.5	22.4	22.3
	洋室押入	24.2	24.2	25.0
	化粧室	21.1	20.7	20.5
	寝室	26.0	26.3	24.9

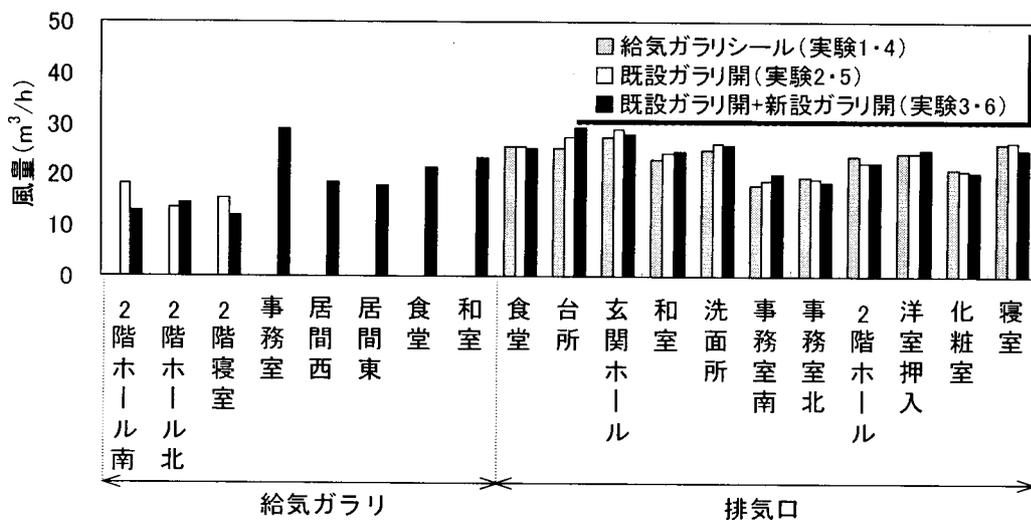


図 3-8-9 風量測定結果 (セントラル換気システム)

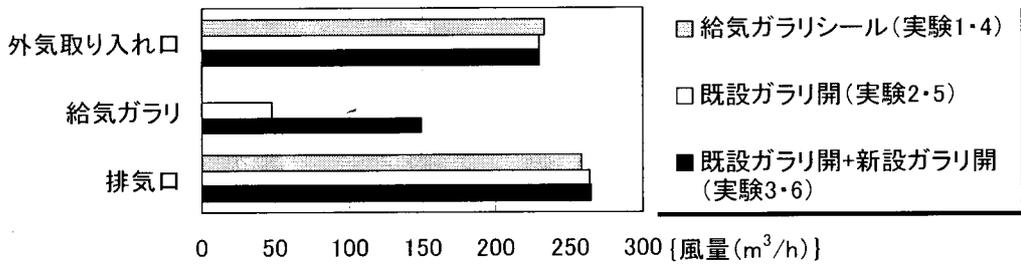


図 3-8-10 給排気バランス (セントラル換気システム)

表 3-8-6 風量測定結果 (局所換気口)

測定位置	風量 [m³/h]
1階トイレ	38.1
1階浴室	52.0
2階事務室	弱: 検知域以下 強: 9.8
2階トイレ	40.9
2階洋室	138.7

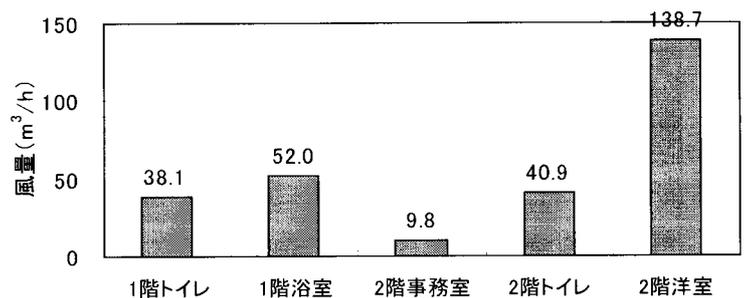


図 3-8-11 風量測定結果 (局所換気口)

図 3-8-9 に、集中排気システムの排気口と給気ガラリの風量測定結果を示す。空気齢の測定条件毎のデータを取った。給気ガラリの風量は 10~30m³/h で、既設ガラリのみの場合よりも新設ガラリを追加した方が全体的に風量が多い。排気口は 18~30m³/h で、ファンにより風量が制御されているので、測定条件による変化は少ない。

次に、給排気量のバランスについて考察する。図 3-8-10 に給排気量の合計値を示す。排気口の合計風量は約 260m³/h で、外気取り入れ口の風量約 230m³/h より大きくなっており、建物隙間からの外気の漏入があると推察される。給気ガラリの合計風量は、新設ガラリを追加すると 3 倍に増加する。外気取り入れ口の風量と給気ガラリ風量の差は、内装の隙間を通した給気量である。

次に、局所換気口の結果について考察する。表 3-8-6、図 3-8-11 に給排気量の合計値を示す。事務室の局所ファンは、強・弱の 2 段階運転が可能である。給排気一体型のため、風量計による測定値は、給気量と排気量の差ということになる。洋室の風量が非常に大きいのは、洋室が喫煙室として使用されており、たばこの煙を排気するために風量の大きいファンが設置されているためである。トイレや浴室のファンの風量は 40~50m³/h であった。

3) 外気・各室・床下・壁体内・小屋裏の温湿度

温度と相対湿度の測定結果を図3-8-12～3-8-16に示す。温湿度計を設置したのは11日の午前中で、それまでは和室の机の上に置いてあった。

【外気の温湿度】

図3-8-12の外気について見ると、日中の最高気温は30～35℃、夜間の最低気温は25～26℃で、実測中は真夏日と熱帯夜が続いていた。相対湿度は、50～100%弱の間で変動している。

【1階各室の温湿度】

図3-8-12に、1階各室の温度と相対湿度を示す。冷房室の温度は27～29℃で、外気温の影響を受けて多少変動しているが、設定温度である28℃前後に維持されている。非冷房室の洗面所は冷房室より1～3℃高くなっているが、玄関ホールは、冷房室の影響を受けて27～28℃である。玄関ホールと冷房室である居間・食堂の間には間仕切がなく空間的に繋がっており、エアコンの冷風の吹き出し方向に玄関ホールが位置していること、居間の他にも和室や2階ホールといった冷房室に接していることが影響していると推察される。倉庫は建物の断熱気密層の外側にあり、倉庫内の日中の温度は30℃を越え、夜間は非暖房室の洗面所と同じ程度まで温度が低下する。また、屋外の影響を受けやすいため、他室の測定点と比較して変動が大きい。相対湿度について見ると、和室の湿度が約70%と他の測定点よりも高くなっているのが分かる。図3-8-16に示した床下の湿度変動と類似していることから、畳の下に設けられた内装の隙間から床下空間の空気が和室へ供給されたと考えられる。12日の日中は、床下と関係なく和室の湿度が低下しているが、これは、空気齢の測定の影響と思われる。

【2階各室の温湿度】

図3-8-13に、2階各室の温度と相対湿度を示す。冷房室の温度は26～29℃で、1階よりも変動の大きい部屋があるが、28℃前後に維持されているのが分かる。非冷房室の納戸は冷房室よりも2～3℃高くなっている。相対湿度は、事務室で50%付近まで下がることがあったが、それ以外の室では60～70%の間で変動していた。寝室には調湿建材が壁と天井の全面に設置されており、相対湿度が70%前後に維持されている。

【壁体内通気層（給気ガラリ付近）の温湿度】

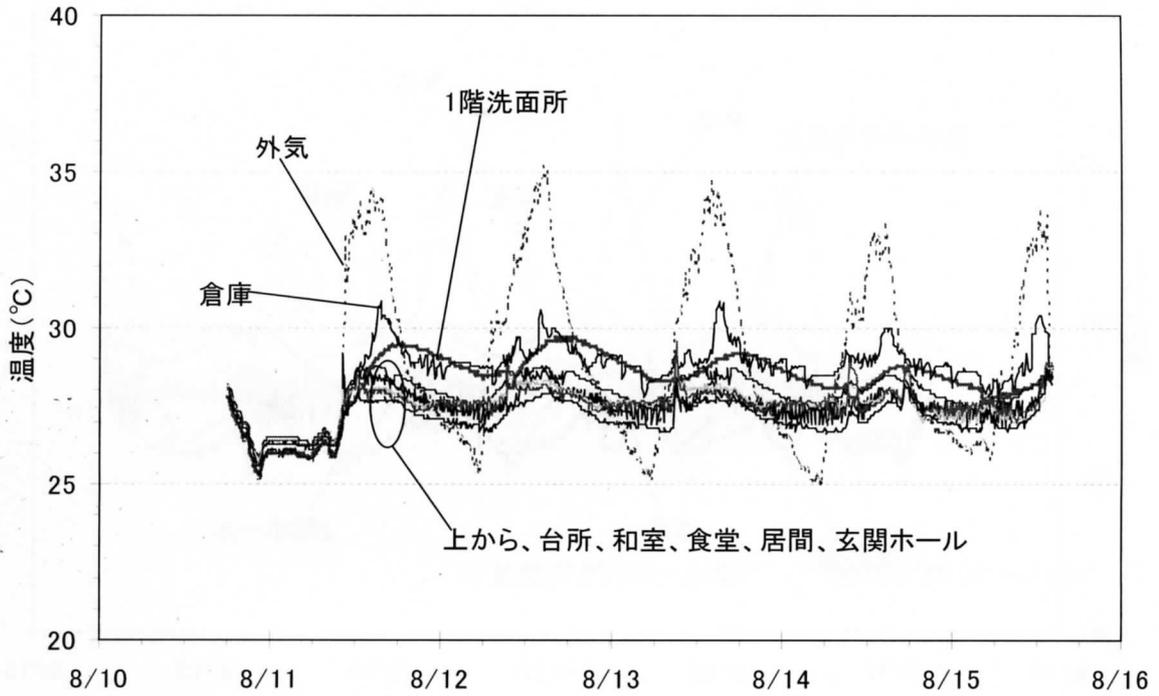
図 3-8-14 に、壁体内通気層（給気ガラリ付近）の温度と相対湿度を示す。温度は 28.5～30.5℃の間で変動しており、午後 3～4 時に最高、午前 5～6 時に最低となる。給気ガラリは全て 2 階に設置されているが、ガラリによって温度が異なる。寝室とホール南の測定点は南外壁内に位置しているため、北側の間仕切壁内にあるホール北の測定点よりも日射の影響を強く受け、温度の変動が大きく日中の温度が 1～2℃高くなっている。相対湿度は 70%前後に維持されている。

【壁体内通気層の温湿度】

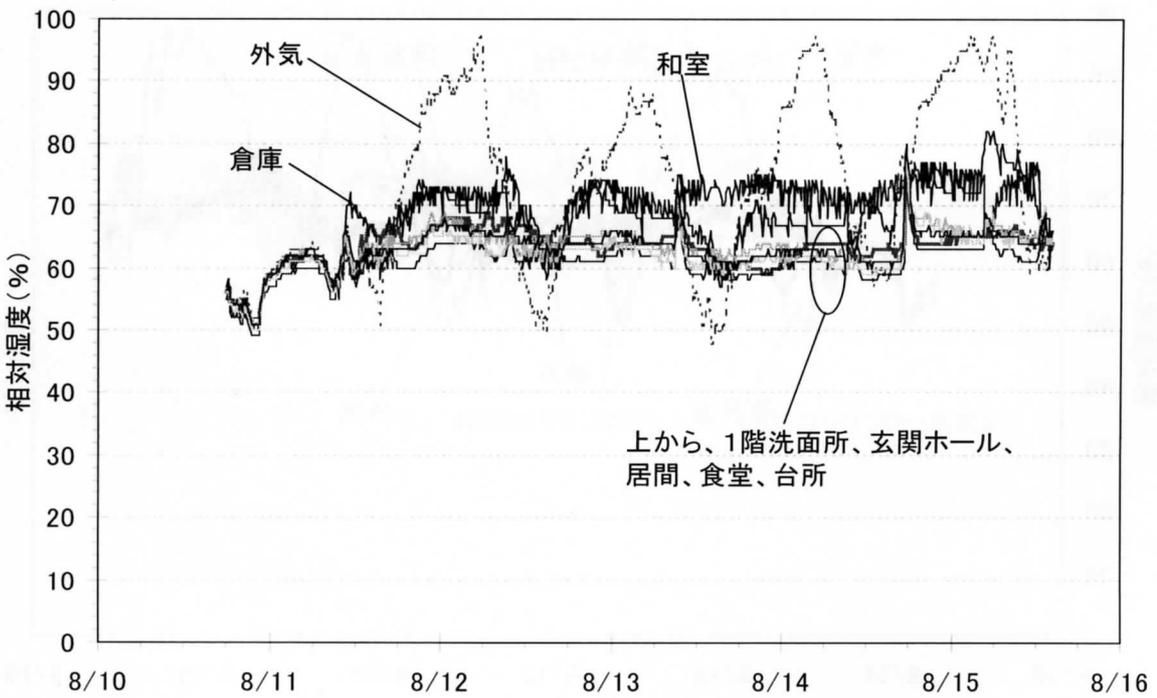
図 3-8-15 に、壁体内通気層の温度と相対湿度を示す。温度は 27.5～30.5℃の間で変動しており、午後 3～4 時に最高、午前 5～6 時に最低となる。2 階の測定点の温度は 1 階よりも高くなっている。1 階の温度を比較すると、南外壁内と北外壁内は同じくらいの温度で、日射の影響を受けやすい南外壁内の方が早くピークを迎え減少を始める。間仕切壁内の温度は南北外壁内より 1℃程度低い。相対湿度は 70%前後でほぼ一定に維持されていると言える。2 階間仕切（事務室）の湿度は、他の測定点より約 5～7%低くなっている。10 日の夜から 11 日の午前中にかけて和室の机の上に置いておいたときの値にも同じような傾向が見られることから、湿度センサーに問題があったのではないかと考えられる。

【床下と小屋裏の温湿度】

図 3-8-16 に、床下と小屋裏の温度と相対湿度を示す。床下空間は、温度が 28～29℃、相対湿度は 70%前後に維持されている。東側ブロックの断熱気密層の内側にある小屋裏では、温度は 28～30℃、相対湿度は 50～70%の間で変動している。一方、西側ブロックの断熱気密層の外側の温度は、毎日 45℃以上まで上昇しており、50℃を越える日もあった。温度が上昇した結果、相対湿度は 30%以下まで低下していた。

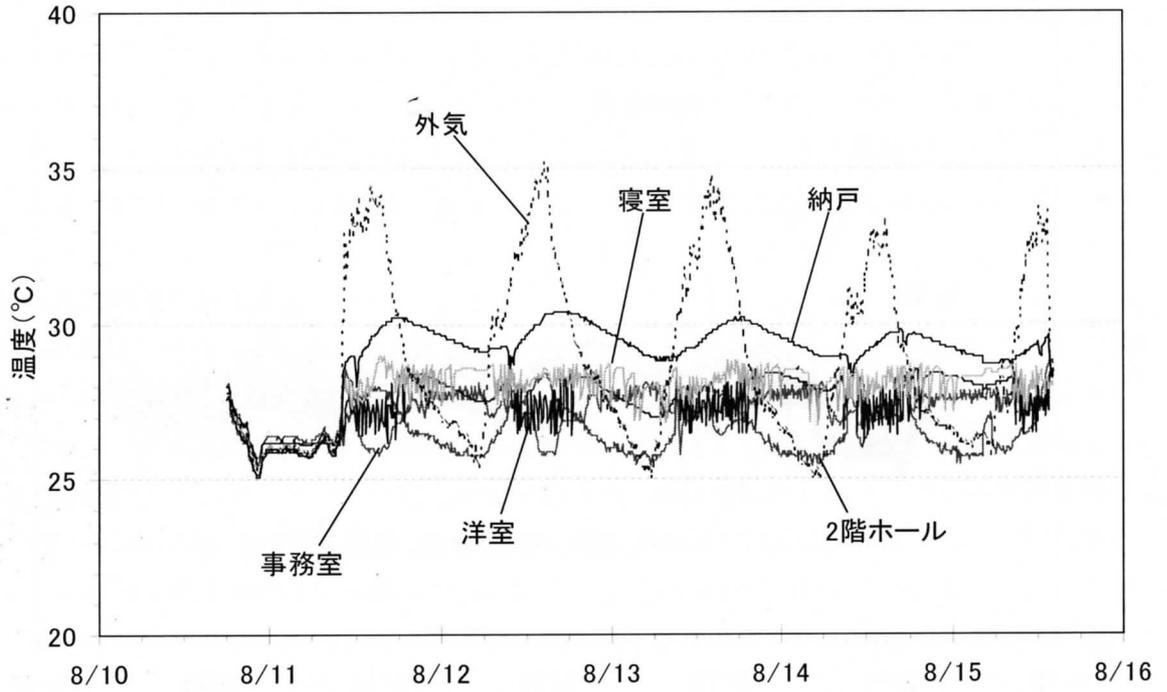


(a) 温度

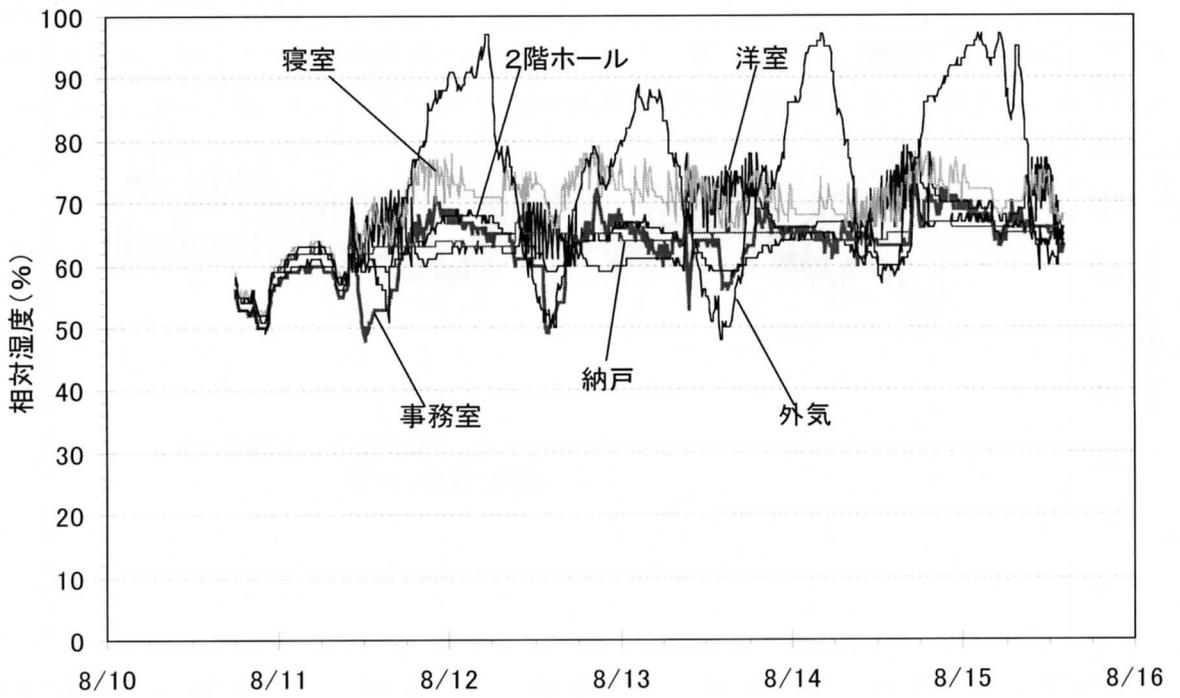


(b) 相対湿度

図 3-8-12 温度と相対湿度 (1階)

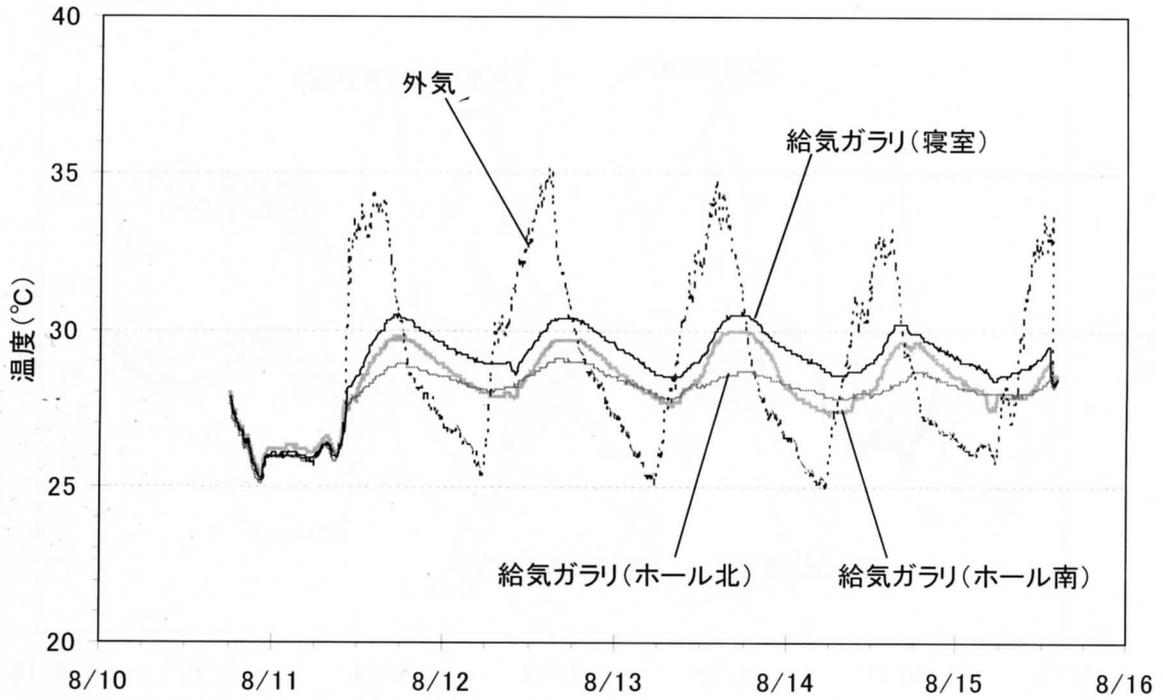


(a) 温度

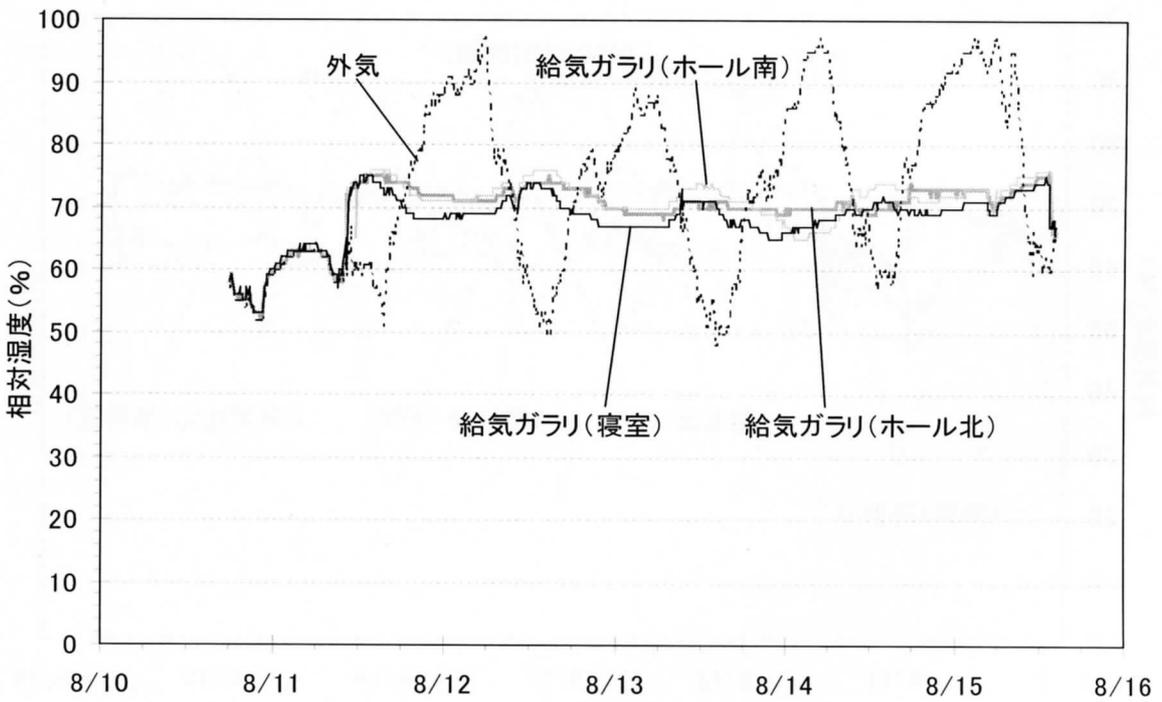


(b) 相対湿度

図 3-8-13 温度と相対湿度 (2階)

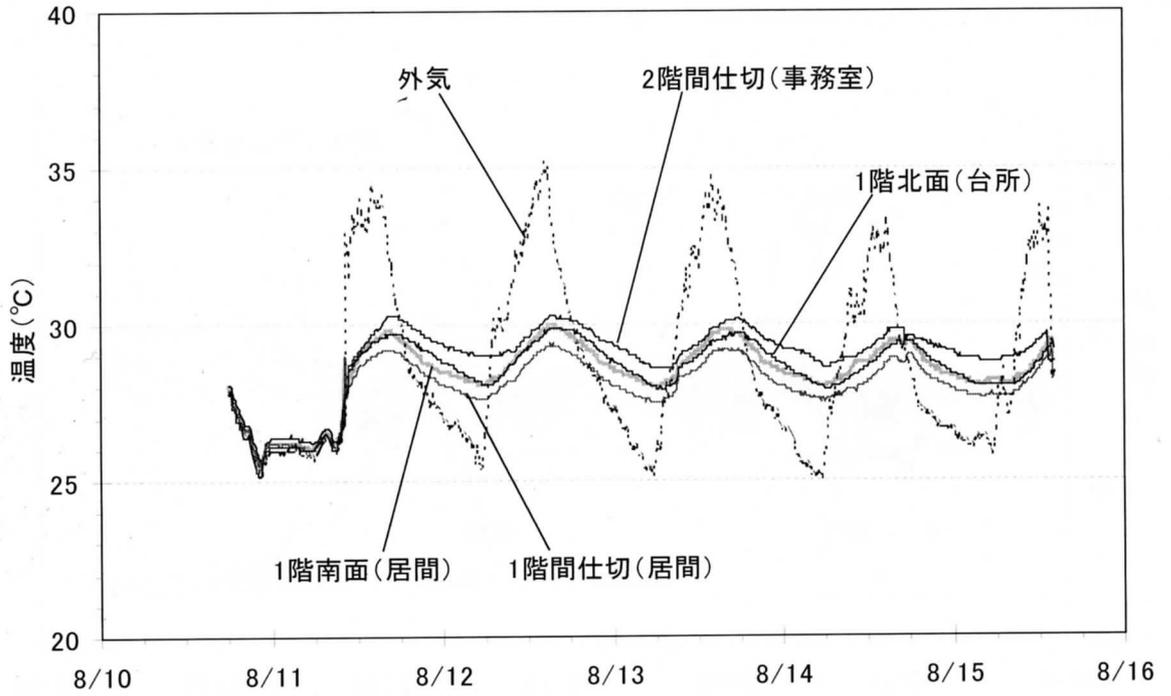


(a) 温度

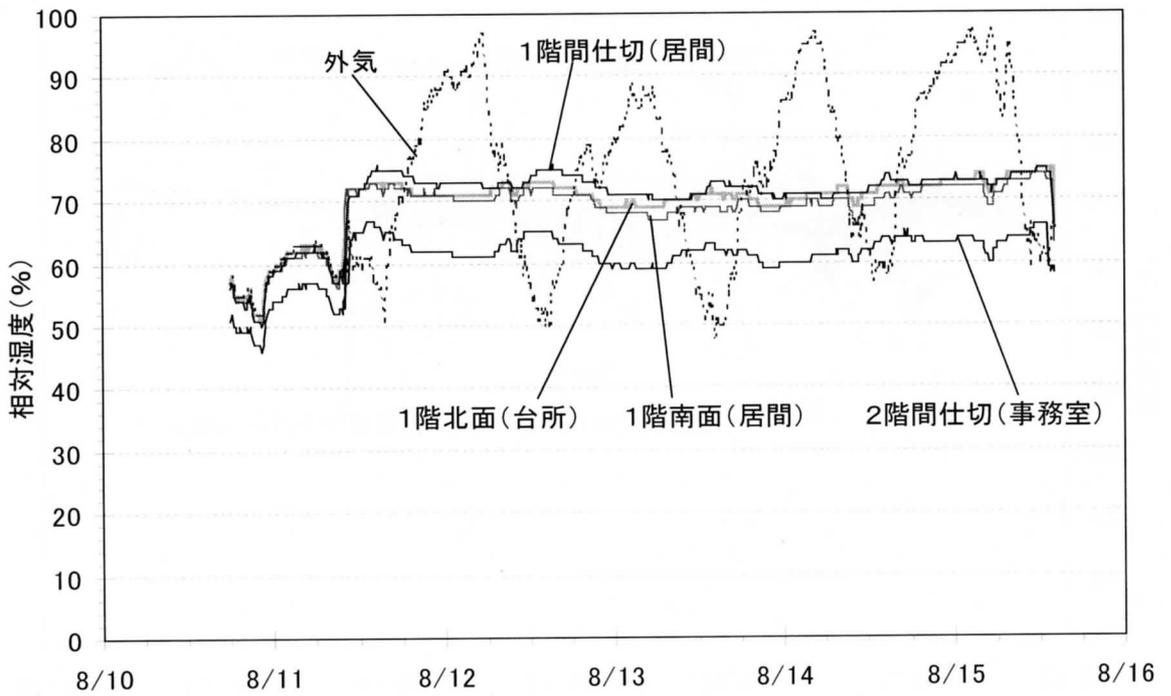


(b) 相対湿度

図 3-8-14 温度と相対湿度 (壁体内：給気ガラー付近)

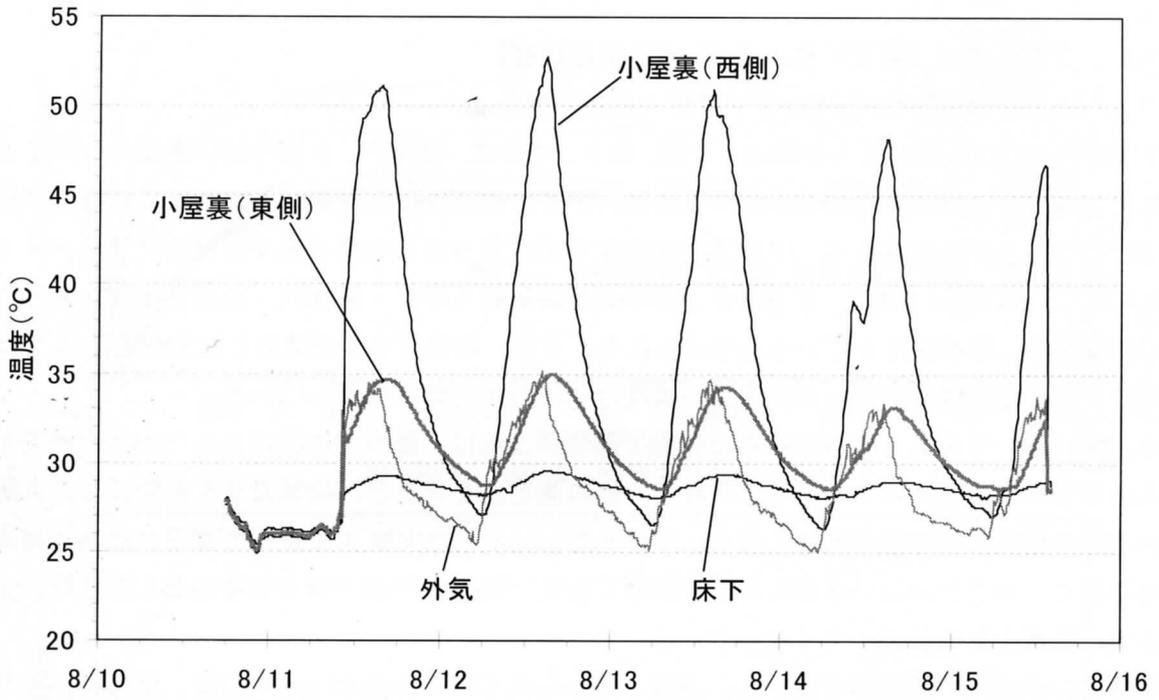


(a) 温度

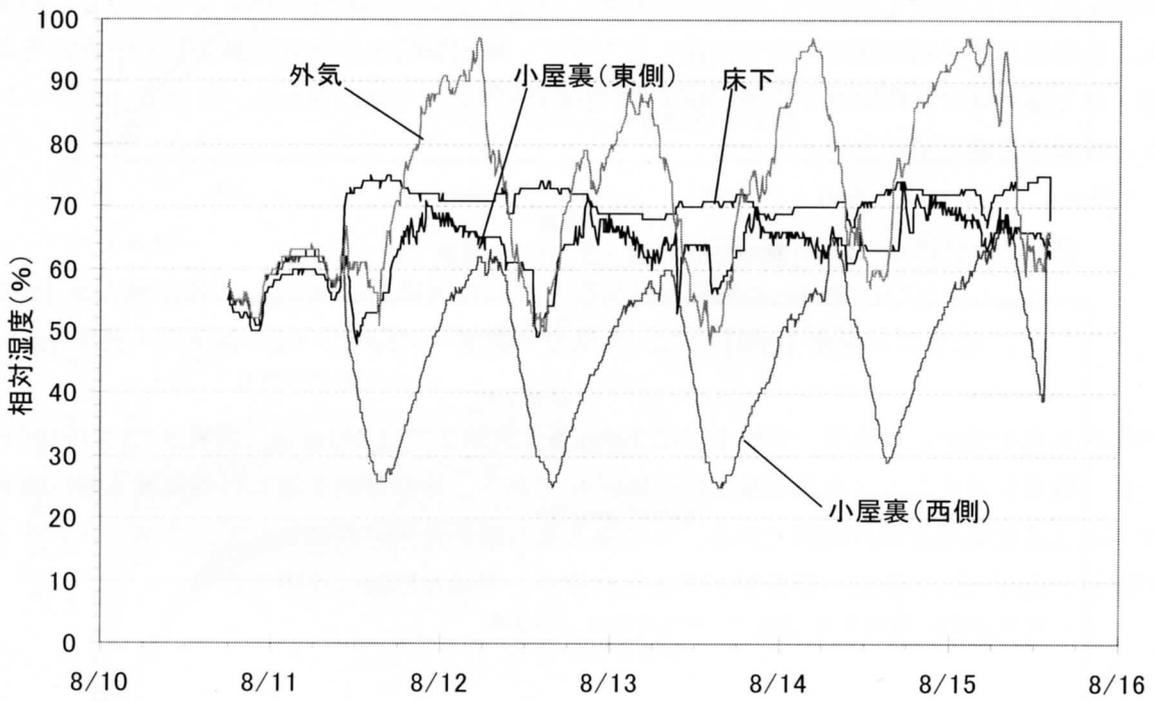


(b) 相対湿度

図 3-8-15 温度と相対湿度 (壁体内)



(a) 温度



(b) 相对湿度

図 3-8-16 温度と相对湿度 (床下・小屋裏)

4) ステップアップ法とステップダウン法による空気齢と空気交換効率

【ステップアップ法 (SU法) による SF₆ ガス濃度履歴】

図 3-8-17 に、SU 法による SF₆ ガス濃度の測定結果を示す。

全実験において、ガス注入を開始した後、床下、小屋裏、壁体内、各室の順に濃度が上昇する。小屋裏の濃度が壁体内より早く上昇するのは、床下に供給された外気が小屋裏まで短時間で移動するためであると推察される。1F 壁体内の測定点が設定された居間の床下にはサプライダクトが 1 本もなく (図 3-8-3 参照)、サプライダクトの設置位置も床下・壁体内・小屋裏空間における空気の移動経路に影響を与えていると考えられる。また、給気ガラリを開放した実験 2 と 3 では、給気ガラリの室内側に設定した測定点の濃度は壁体内と同様に推移している。

全実験において最も上昇が早いのは和室である。これは、畳の下に設けられた内装の隙間から床下の空気が供給されるためと考えられる。他の測定点を見ると、給気ガラリを開放した実験 2 では各室の濃度上昇の差が大きくなり、ガラリをシールした実験 1 と比べてガラリのある寝室の上昇が早く、ガラリのない事務室の上昇が遅くなる。実験 3 では、ガラリを追加したことによって各室の濃度上昇の差が小さくなっている。

壁体内の測定点の濃度が定常状態に到達してから緩やかに変動しているのは、壁体内への外気の漏入量の変動しているためと考えられる。

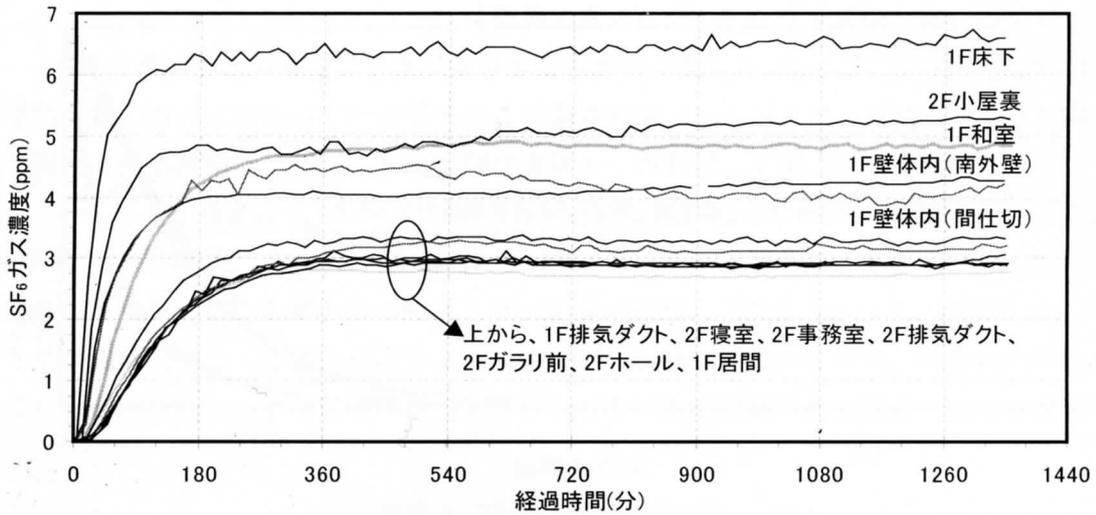
各測定点の定常濃度を見ると、床下から各室に到達するまでに濃度が減少していることが推察され、給排気口の風量の測定結果で前述したように、建物隙間から外気が漏入していると考えられる。外気漏入量は室内における物質収支式 (3-8-1) によって算出される。ただし、リターンダクトの風量は考慮していない。

$$Q_{Sup}C_{Cr} + Q_{In}C_{In} = (Q_{Sup} + Q_{In})C_{In} \quad (3-8-1)$$

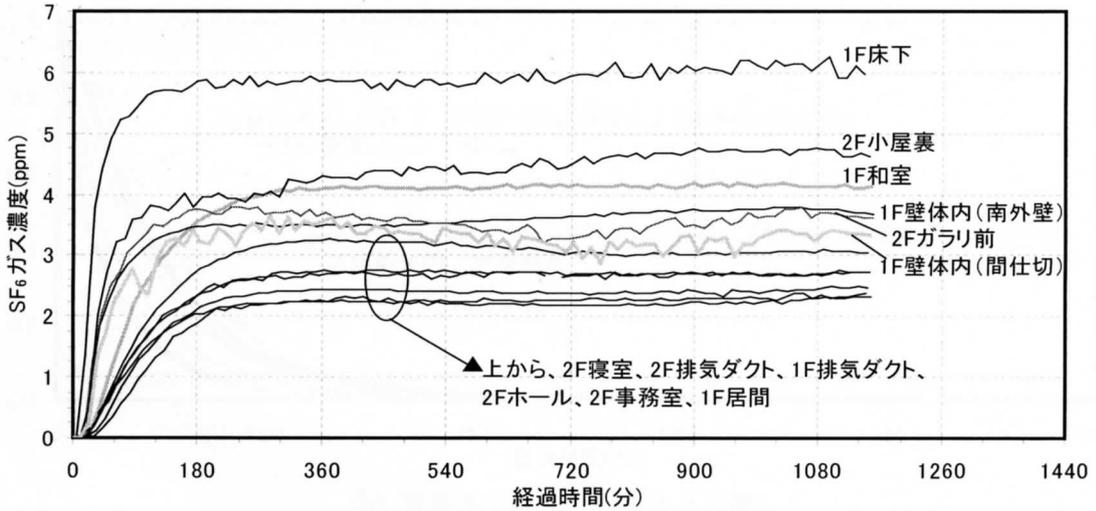
Q_{Sup} : 床下から室内への風量 = 外気取り入れ口風量 [m³/h] Q_{In} : 外気漏入量 [m³/h]

C_{Cr} : 床下ガス濃度 [ppm] C_{In} : 外気ガス濃度 = 0 [ppm] C_{In} : 各室ガス濃度 [ppm]

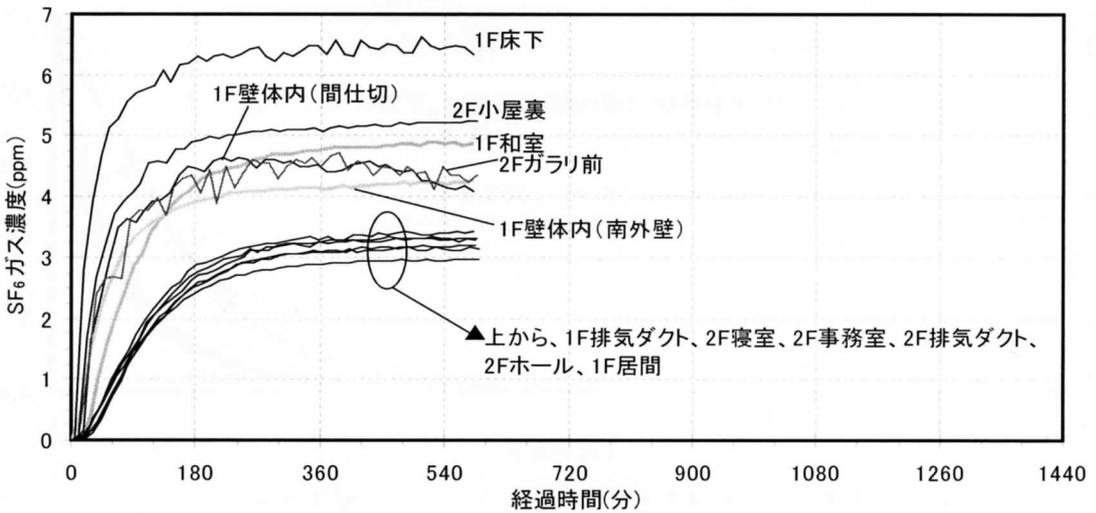
外気漏入量を算出した結果、実験 1 では 209m³/h、実験 2 では 241m³/h、実験 3 では 194m³/h であった。換気システムによる給気量は約 230m³/h であり、建物隙間を通した外気漏入量は換気システムによる給気量とほぼ同様である。外気漏入量の値が大きい理由として、リターンダクト風量の影響、給排気口の隙間の影響等が考えられるが、明確な原因は不明である。



(a) 実験1 (SU法・給気ガラリシール)



(b) 実験2 (SU法・既設ガラリ開)



(c) 実験3 (SU法・既設ガラリ開+新設ガラリ開)

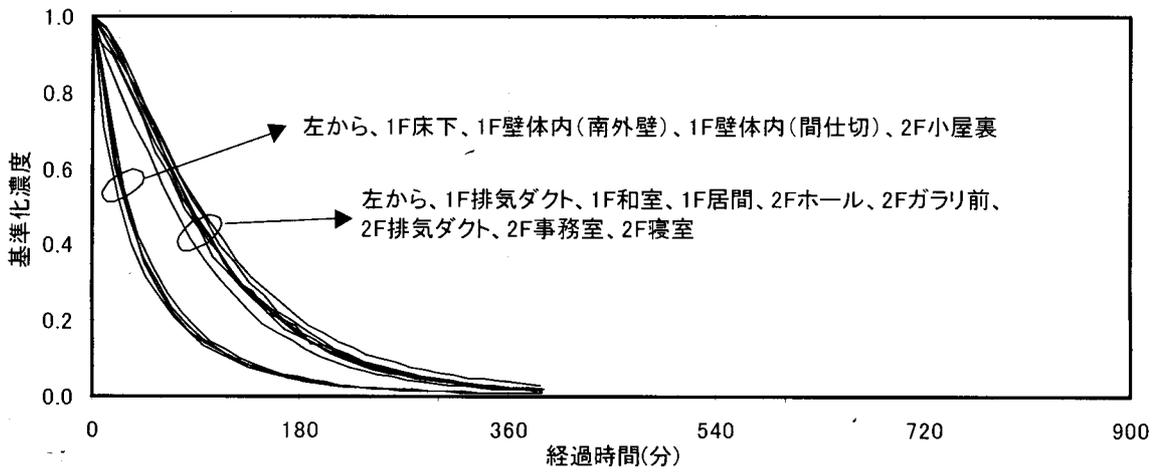
図3-8-17 SF₆ガス濃度履歴の測定結果 (SU法)

【ステップダウン法（SD法）によるSF₆ガス濃度履歴】

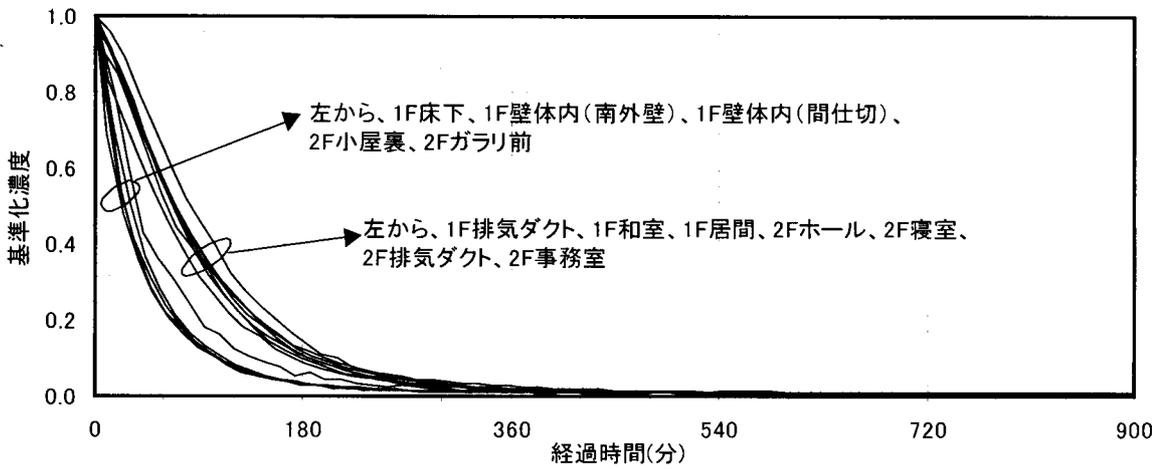
図3-8-18に、SD法によるSF₆ガス濃度の測定結果を初期濃度で基準化した結果を示す。

全実験において、減衰の早さによって減衰曲線は2つのグループに分けられる。減衰が早いグループは室以外の測定点で、床下、壁体内、小屋裏の順に減衰している。給気ガラリを開けている実験5と実験6では、2Fガラリ前の測定点も減衰の早いグループに含まれる。

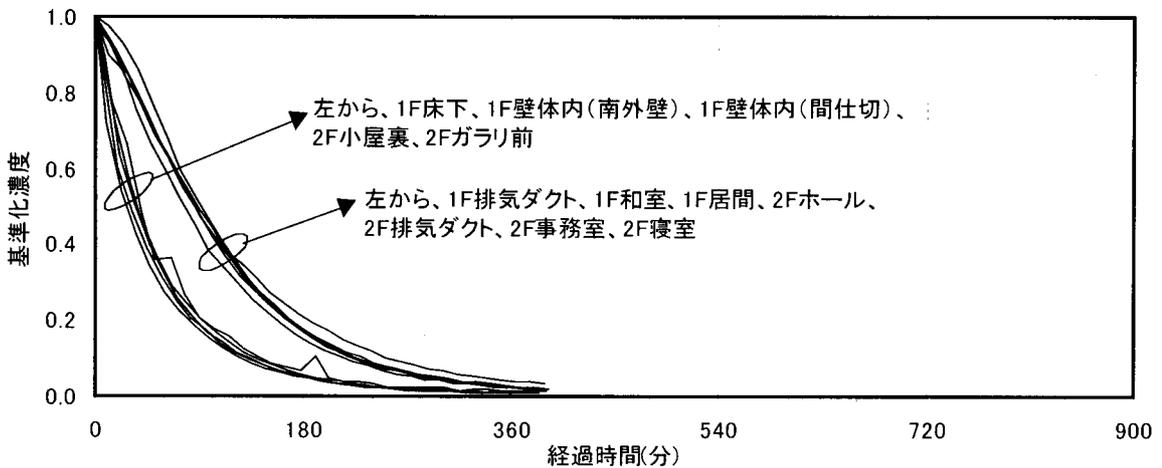
減衰が遅いグループは各室の測定点で、基本的には1F和室、1F居間、2Fホール、2F事務室、2F寝室の順で減衰している。ただし、既設の給気ガラリを開けた実験5では、ガラリの設置されている寝室の減衰が、ガラリの設置されていない事務室よりも早くなる。また、新設ガラリを追加した実験6では、各測定点の減衰の差が小さくなっているのが分かる。



(a) 実験4 (SD法・給気ガラリシール)



(b) 実験5 (SD法・既設ガラリ開)



(c) 実験6 (SD法・既設ガラリ開+新設ガラリ開)

図3-8-18 SF₆ガス濃度履歴の測定結果 (SD法)

【空気齢と空気交換効率の算出方法】

SF₆濃度の測定結果から局所空気齢を算出する（空気齢の算出方法は第2章を参照）。

SU法では、18時間以上の測定を行った実験もあるが、前述したように外気の漏入等によって定常状態に入ってから濃度変動が見られるため、全測定点で定常状態に到達したと考えられる測定開始から540分までのデータを使用することにした。また、定常状態に入ってから濃度振動の影響を少なくするため、移動平均を取った上で最高濃度を記録した時点の濃度を定常濃度とした。

SD法では、3ppm前後から測定を開始し、全測定点の濃度が約0.1ppmになるまで測定を続けたが、更に精度を高めるため、測定開始時点からの経過時間を無限大にした場合までの空気齢を算出する。濃度の減衰曲線は一定の時間が経過すると指数関数的に変動ことから、減衰曲線を指数関数で近似し、経過時間を無限大にした場合までその関数を積分することによって、局所空気齢を求めた。

屋外から外気が各測定点にどのように到達するかについて、局所空気齢から局所空気交換効率を算出して検討する。局所空気交換効率とは、局所空気齢を換気回数の逆数である名目換気時間によって基準化したものである。一般的な名目換気時間の算出方法としては、排気ダクトでの局所空気齢を用いる方法と、外気導入量と建物の気積を測定し、それらの値を用いて算出する方法がある。今回は後者の算出法を用いることにした。以下に、外気導入量と建物の気積を用いた名目換気時間 τ_n の算出式を示す。

$$\tau_n = V/Q \quad (3-8-2)$$

τ_n : 名目換気時間 [h] V : 建物の気積 [m³] Q : 外気導入量 [m³/h]

建物の気積は、室内の家具等を見捨てし床下空間や小屋裏も含めた値911.24 m³を用いる。外気導入量は、風量計により測定を行った外気取り入れ口の風量を用いる。外気取り入れ口は2つあり、それぞれ3回の測定を行った。3回の測定の平均値（右：117.5 m³/h、左113.2 m³/h）を算出し、それぞれの平均値を合計した値（230.8 m³/h）を外気導入量とした。従って、名目換気時間 τ_n は236.9分となる。

算出した名目換気時間 τ_n と局所空気齢を式(3-8-3)に代入することで、局所空気交換効率 ε を算出する。

$$\varepsilon = \tau_n / \tau_p \quad (3-8-3)$$

ε : 局所空気交換効率 [-] τ_n : 名目換気時間 [分] τ_p : 局所空気齢 [分]

【ステップアップ法（SU法）による空気齢】

図3-8-19 (a) に、SU法（実験1～3）による局所空気齢の算出結果、図3-8-20 に、給気ガラリをシールした場合とガラリを開けた場合の空気齢の差を示す。

空気齢は床下が約30分、壁体内40～60分、小屋裏40～70分、各室90～130分、各排気ダクト90～120分と換気経路順に大きくなっている。既設の給気ガラリを開けた場合、ガラリをシールした場合と比較して、給気ガラリ前の値が約半分となり、ガラリのある寝室と2階ホールの値が小さくなっている。このことより、給気ガラリを通して外気がより早く室内の測定点へ到達することが分かる。居間の空気齢は2階ホールと同じくらいまで減少しており、ホールに供給された外気が吹抜けを通過して居間へ移動したものと考えられる。既設のガラリと新設のガラリを両方も開けた場合、ガラリをシールした場合と比べて、新たにガラリを設けた事務室と和室では空気齢が小さくなっている。居間と食堂にも新設のガラリを開放したが、この条件では空気齢が大きくなっている。

以上より、給気ガラリの設置により外気をより早く室内へ取り入れることが可能であることが分かった。今回の実験結果のみでは、給気ガラリの最適な設置位置や個数については明確にできないが、今回の実験条件下では、ガラリの個数を追加した場合でも建物全体の空気齢はほとんど変化せず（図3-8-11の1番右側に、ガラリをシールした場合と比べてガラリを開けた場合の建物全体の空気齢の変動状況を示す）、各室への外気の分配のみが変わることが分かった。

【ステップアップ法（SU法）による空気交換効率】

図3-8-19 (b) に、SU法による局所空気交換効率の算出結果を示す。空気交換効率が高いほど、外気がより早く到達する。建物の気積が大きいことから名目換気時間も大きくなっているため、空気交換効率は全体的に高くなっている。換気経路順に空気交換効率は下がり、床下3.75～4.0、壁体内2.25～3.25、小屋裏1.75～3.25、各室と排気ダクトは1.0～1.5である。

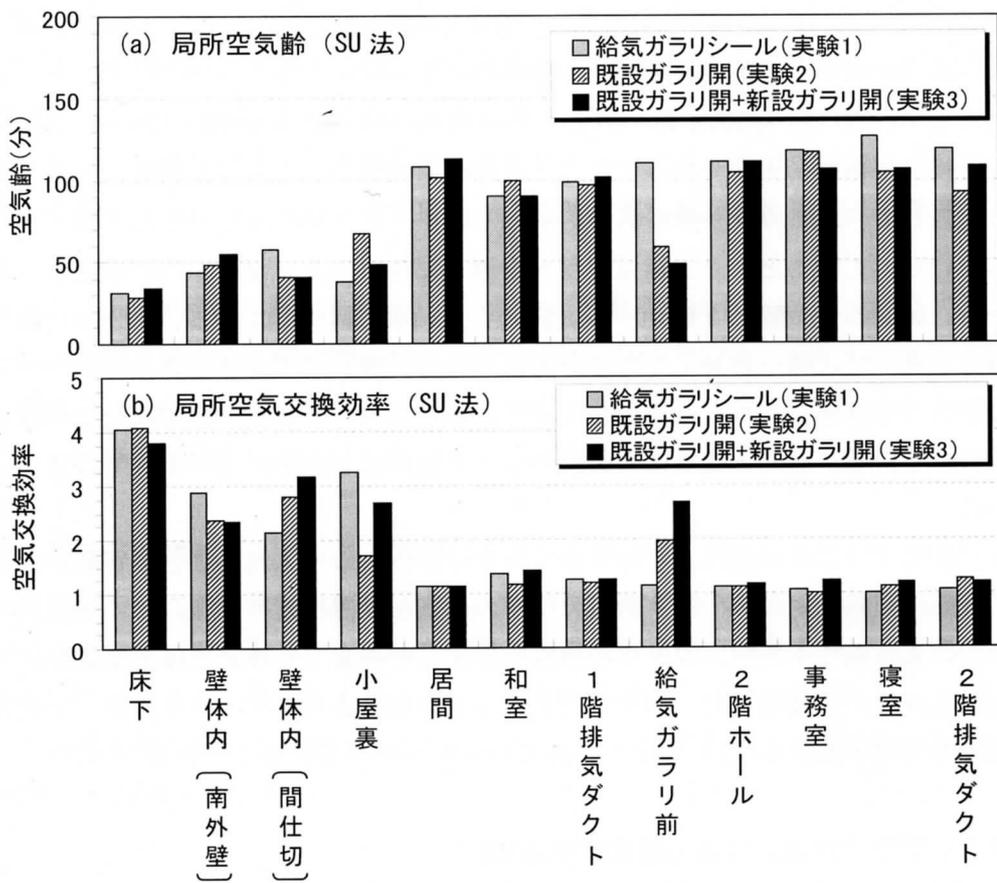


図 3-8-19 局所空気齢と局所空気交換効率の算出結果 (SU 法)

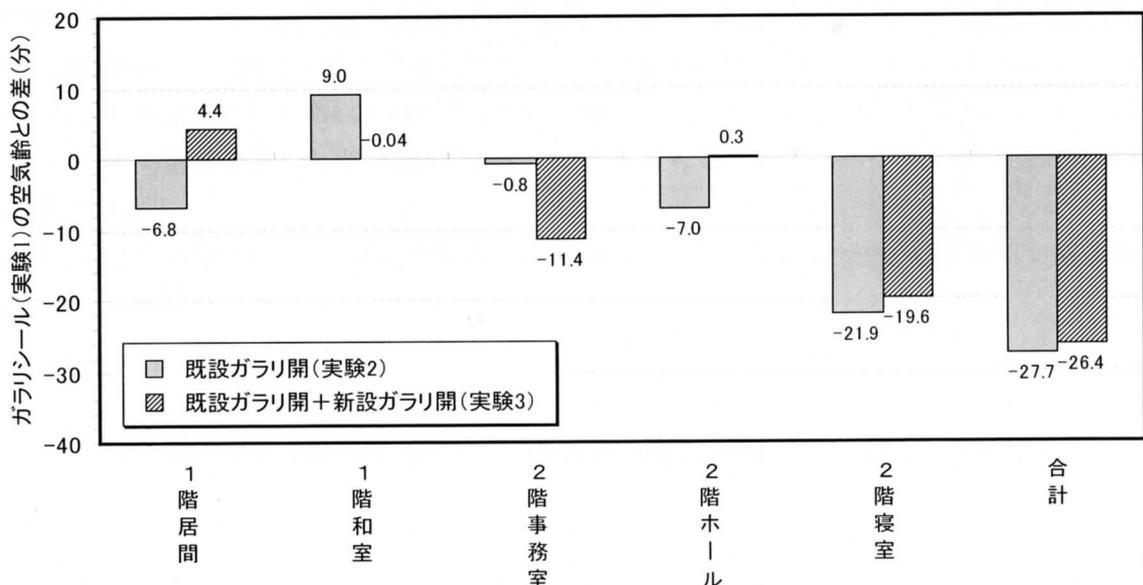


図 3-8-20 給気ガラリシールとガラリ開における局所空気齢の比較 (SU 法)

【ステップダウン法 (SD 法) による空気齢】

図 3-8-21 に各測定点の初期濃度を示す。SD 法では、各測定点の初期濃度を一定にすることが前提条件となる。ガラリを閉じた場合は約 3ppm、既設ガラリを開けた場合は約 2.5ppm、新設のガラリを追加した場合は約 3.5ppm でほぼ一定になっている。

図 3-8-22 (a) に、SD 法 (実験 4~6) による局所空気齢の算出結果、図 3-8-23 に、給気ガラリをシールした場合とガラリを開けた場合の空気齢の差を示す。SU 法と同様、換気経路順に空気齢が大きくなっており、床下は約 50 分、壁体内 50~60 分、小屋裏は約 60 分、各室 90~120 分、排気ダクトは、1 階 75~90 分、2 階 100~110 分である。SU 法との相違点は、床下・壁体内・小屋裏の値が 50~60 分で均一になっていること、1 階排気ダクトの値が小さくなっていることである。

次に、各室の空気齢について考察する。既設のガラリを開けた場合、ガラリをシールした場合と比べて、ガラリのある寝室と 2 階ホールの値が小さくなり、外気がより早く到達することが分かる。既設のガラリと新設のガラリを両方とも開けた場合、ガラリをシールした場合と比べて、寝室を除いた各室での空気齢が大きくなっている。この原因については、SD 法では、給気口からの外気だけでなく建物隙間からの外気についても評価することから、実験毎に外部風速等の気象条件が異なり、建物隙間を通した換気量に違いが生じたためではないかと推察される。

【ステップダウン法 (SD 法) による空気交換効率】

図 3-8-22 (b) に、SD 法による局所空気交換効率の算出結果を示す。各室と排気ダクトの値は、1 階排気ダクトが若干高くなっている以外は SU 法とほぼ同じ値で 1.0~1.5 である。床下・壁体内・小屋裏は 2.0~2.5 で SU 法よりも低い。また、SD 法では給気口からの外気だけでなく建物隙間を通した外気についても評価することから、各室の差が相対的に小さくなっている。

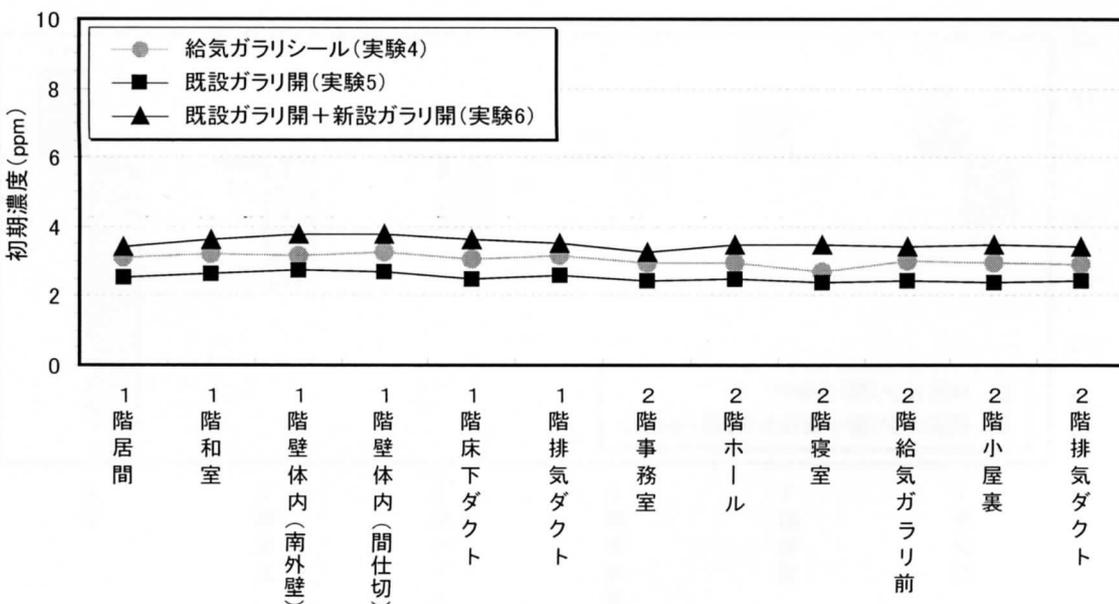


図 3-8-21 初期濃度 (SD 法)

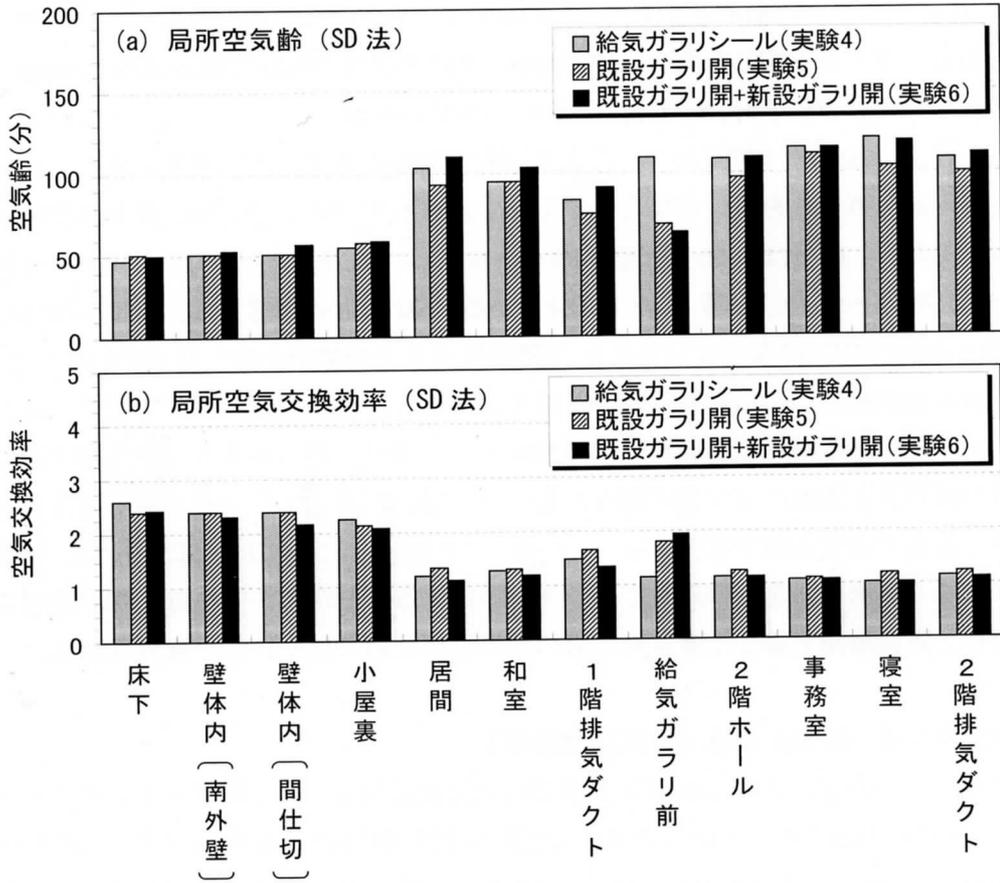


図 3-8-22 局所空気齢と局所空気交換効率の算出結果 (SD法)

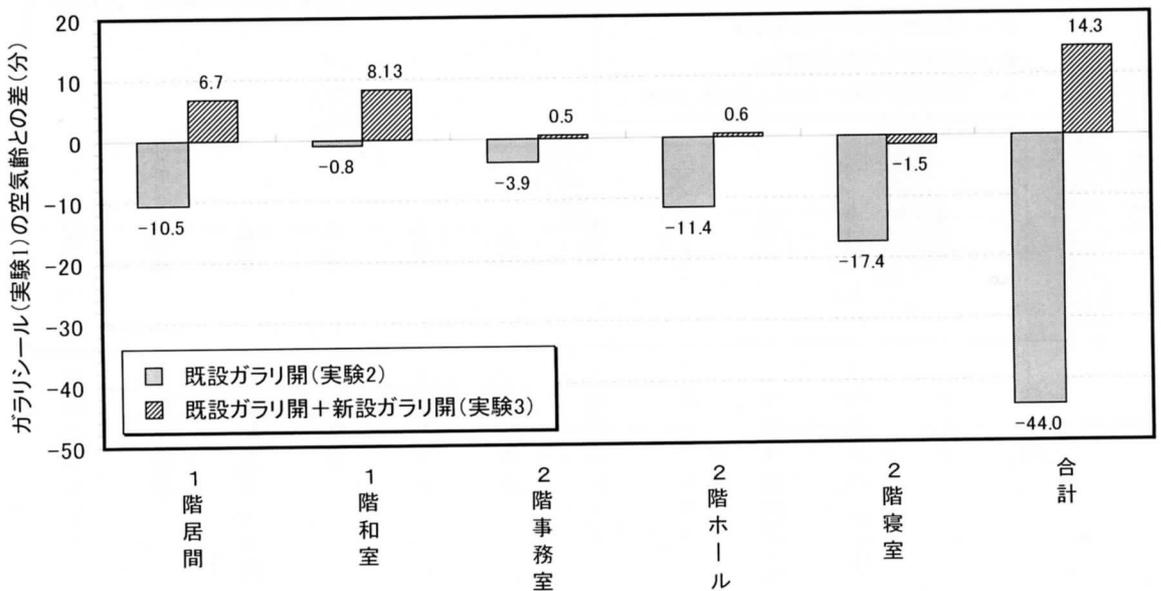


図 3-8-23 給気ガラリシールとガラリ開における局所空気齢の比較 (SD法)

(d) まとめ

- ① 局所空気齢および局所空気交換効率の結果より、給気ガラリの設置により外気をより早く室内へ取り入れることが可能であることが分かった。
- ② 今回の実験結果のみでは、給気ガラリの最適な設置位置や個数については明確にできないが、今回の実験条件下では、ガラリの個数を増やした場合でも建物全体の空気齢はほとんど変化せず、各室への外気の分配のみが変わる傾向にあると推察される。
- ③ SU法の定常濃度の結果を見ると、床下から各室に到達するまでに濃度が減少しており、建物隙間からの外気漏入があると推察された。建物隙間を通した外気漏入量を算出した結果、換気システムによる給気量とほぼ同様であることが分かった。外気漏入量の値が大きい理由として、リターンダクト風量の影響、給排気口の隙間の影響等が考えられるが、明確な原因は不明である。

(2) 床下給気型第2種換気システム

床下給気型第2種換気システムを備えた実在住宅を対象に、換気性能の測定を行った。本システムは、給気ファンを用いて床下に導入した外気を壁体内や小屋裏など建物全体に循環させ、壁体内通気層と室内空間との間の給気ガラリを通して室内へ供給する。本実験の目的は、一定濃度法を用いて各室の外気導入量を明らかにし、実在住宅における空気の流れが意図された通りに各室に行き渡るか、また、ファンの運転条件によってどのように変化するかを、空気齢を用いて評価することにある。

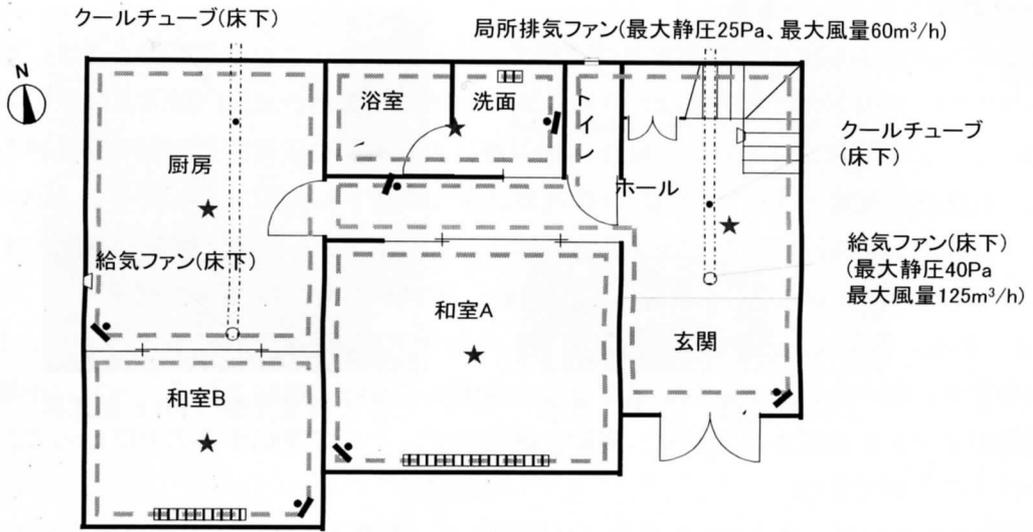
(a) 対象住宅と換気システムの概要

1) 対象住宅の概要

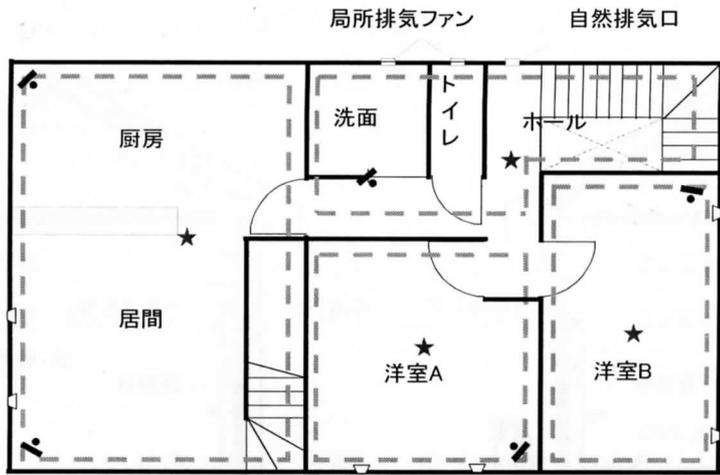
写真3-8-24に対象住宅の外観、図3-8-24に平面図を示す。対象住宅は、関東地方に建設された3階建ての木造戸建住宅で、2002年8月に竣工し、延床面積は140m²、建物容積は403m³である。



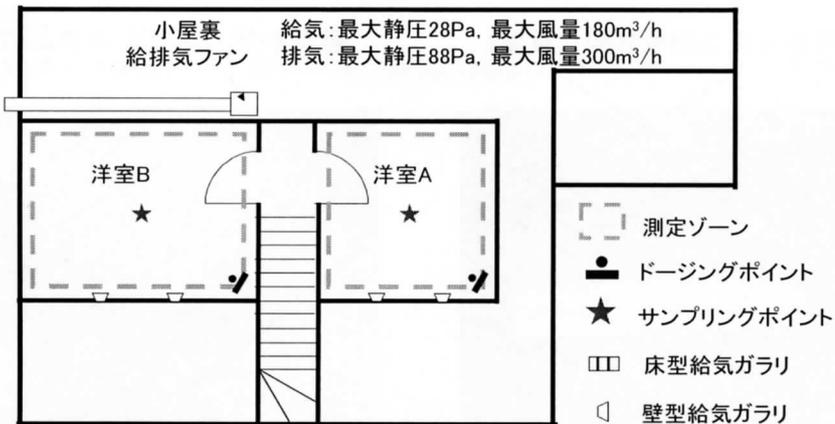
写真3-8-24 対象住宅の外観（左：南東側、右：南西側）



【1階】



【2階】



【3階】

図 3-8-24 対象住宅の平面図

2) 換気システムの概要

図3-8-25と図3-8-26に、夏期および冬期における換気システムの概念図を示す。地中クールチューブを通して導入された外気は、クールチューブの床下側の先端に設置された給気ファン（写真3-8-25）により床下へ送られ、壁体内通気層、天井裏、小屋裏等の内部空間へ移動する。床下空間や壁体内通気層と室内との間には給気ガラリ（写真3-8-26・3-8-27）が設けられており、そのガラリを経由して新鮮空気が室内に供給される。クールチューブは、東側と西側に1本ずつ設置されており（図3-8-24参照）、全長は東側が6m、西側が7m、設置深さは地下2m、チューブ径は150φである。冬期は、給気ファンを運転する代わりに、床下を蓄熱暖房することにより煙突効果を増加させ、暖められた空気が給気ガラリを経由して室内へ供給される。一方、小屋裏には給排気兼用のファンが設置されており、夏期に排気ファンとして運転することによって、小屋裏の排熱を行うことができる。

2階のホールには、床上2mの高さに自然排気口（写真3-8-28）が1つ設置されている。また、1階の台所（レンジフード）、トイレ、浴室、2階の洗面所、トイレには、局所排気ファンが設置されている。

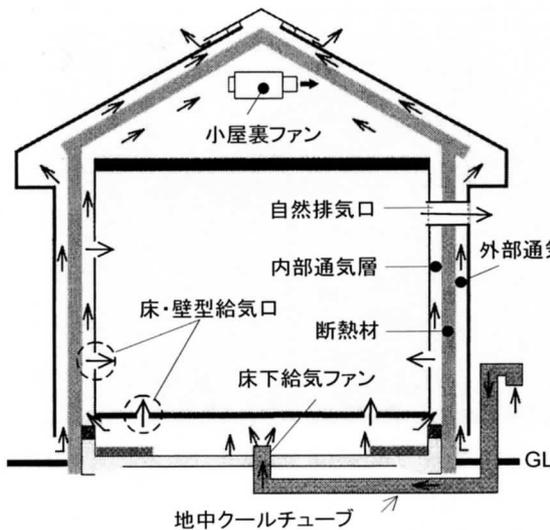


図3-8-25 換気システムの概念図（夏期）

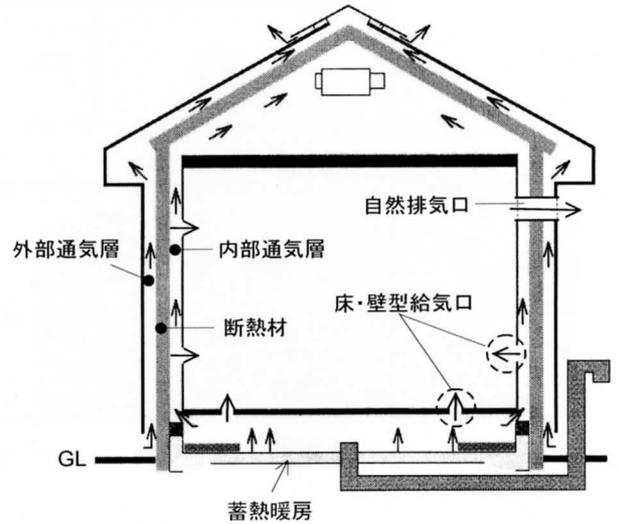


図4-8-26 換気システムの概念図（冬期）



写真3-8-25 床下給気ファン

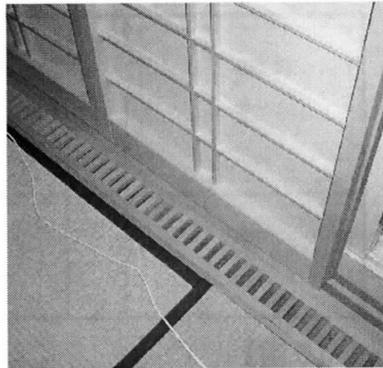


写真3-8-26 床型給気ガラリ

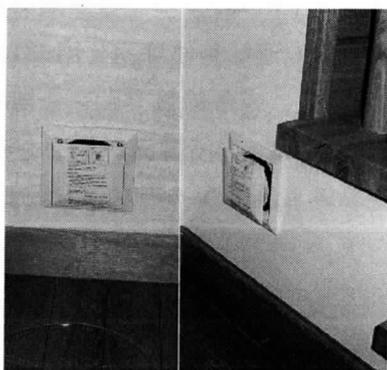


写真 3-8-27 壁型給気ガラリ

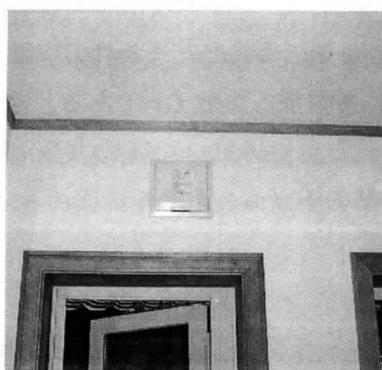


写真 3-8-27 自然排気口

(b) 測定項目と測定方法

測定項目は、建物の気密性能、給排気口の風量、各室・外気・床下の温湿度、室内外差圧、各室の外気導入量、各室・床下の空気齢である。測定は、2002年9月20日～26日に行った。居住者は外泊しており、測定期間中は非居住状態である。

1) 建物の気密性能

床下の給気口（クールチューブ）、自然排気口、小屋裏の給排気口をシールした状態で、気密測定器（コーナー札幌製、KNS-400）を用いて減圧法により測定する。

2) 温湿度

温湿度センサー付き小型データロガーを用い、10分間隔で測定する。測定点は、各室、外気、床下に1点ずつ設ける。測定時には、冷暖房を行っていない。

3) 室内外差圧

差圧計とサーモダックを用いて1階ホールの床面（地面からの高さ0.5m）と1階ホールの東側にある窓面（地面からの高さ1.7m）における室内外差圧を測定し、1階ホールの床面の高さに合わせて補正する。

4) 外気導入量

マルチガスモニター（B&K社製1302型）、マルチポイントサンプラードーザー2台（B&K社製1303型）を用いて、一定濃度法により測定を行う。トレーサーガスはSF₆、設定濃度は5ppmである。ガスの注入と濃度測定を行い、外気導入量の経時変化を測定する。

表 3-8-7、図 3-8-27 に、一定濃度法の実験条件を示す。床下給気ファン、小屋裏ファン、局所排気ファンの運転条件を組み合わせた 5 条件の実験を行う。通常の運転条件は、床下に設置された 2 つの給気ファンのみを運転する実験 C1 である。全実験において、床下給気ファンを常時運転し、2 階ホールに設けられた自然排気口を開放する。実験 C4・C5 では、局所排気ファンを運転させるが、使用するのは 1 階のトイレ、2 階の洗面所とトイレに設置された 3 つのファンである。

表 3-8-7 一定濃度法の実験条件

ケース	換気方式	換気システムの運転条件		
		床下給気ファン	小屋裏ファン	局所排気ファン
C1	第2種換気	運転	停止	停止
C2			給気運転	
C3			排気運転	
C4	第1種換気		停止	運転
C5			排気運転	

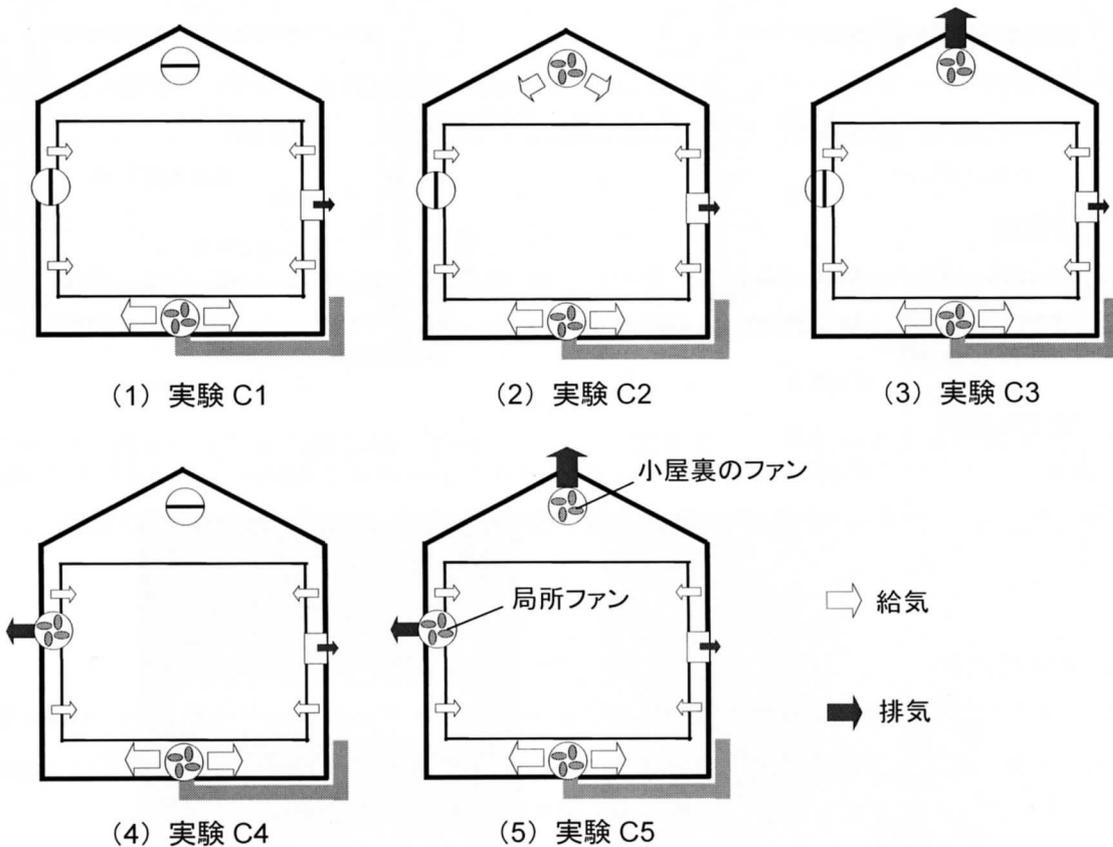


図 3-8-27 各実験ケースの概念図

5) 給排気口の風量

各室の給気ガラリ、局所排気ファン、小屋裏ファンの風量は、風量測定器（コーナー札幌製、Swema Flow 65）を用いて測定する。

床下給気ファンの風量は、クールチューブの外気取り入れ口から約 0.3m 入った地点で一定量のトレーサーガスを発生させ、ガスの発生量と、クールチューブ吹出口（給気ファン通過直後の地点）におけるガス濃度を式（3-8-1）に代入して算出する。図 3-8-28 に、クールチューブ内の風量測定概念図を示す。

$$Q=m/C \quad (3-8-1)$$

Q : クールチューブ内の風量 m : ガス発生量

C : ガス濃度（測定濃度と外気濃度の差）

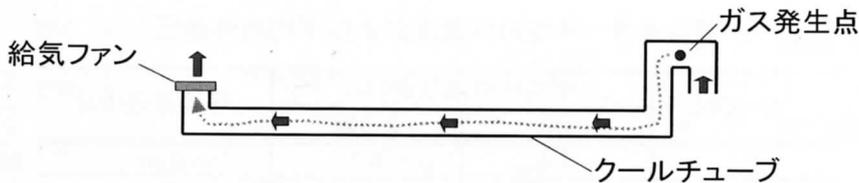


図 3-8-28 クールチューブ内の風量測定概念図

6) 局所空気齢

各室における局所空気齢を測定し空気の移動経路を把握するため、ステップアップ法（SU法）とステップダウン法（SD法）を行う。表 3-8-8 に実験条件を示す。換気システムの運転条件は一定濃度法の実験 C1 と同じで、床下給気ファンのみの運転である。

床下給気ファンの風量は、クールチューブの外気取り入れ口から約 0.3m 入った地点で一定量のトレーサーガスを発生させ（図 3-8-28 参照）、各室の中央におけるガスの濃度を測定する。ガスの発生量は、マスフローコントローラー（エステック社製）を用いて 30cc/min に制御する。トレーサーガスは SF₆ である。SD法を開始する前には、ガスの初期濃度を一定にするため各室で空気の攪拌を行う。その結果、トレーサーガスの初期濃度は 11.5[ppm]であった。

表 4-8-8 ステップアップ法（SU法）・ステップダウン法（SD法）の実験条件

ケース	測定法	備考
UW	ステップアップ法	西側のクールチューブにガス注入
UE	ステップアップ法	東側のクールチューブにガス注入
D	ステップダウン法	攪拌して各室の初期ガス濃度:11.5ppm

(c) 実測結果

1) 建物の気密性能

床下給気口や自然排気口、また小屋裏にある排気ダクトをシールした状態で、単位床面積当たりの相当隙間面積は $0.78\text{cm}^2/\text{m}^2$ であった。

2) 内外温度差と内外差圧

表 3-8-9 に、外気温度に対する 1 階および 2・3 階の室内平均温度との差(室内温度 - 外気温度)、内外差圧 (室内圧 - 外気圧) を示す。平均温度は 1 階が 2・3 階より約 1.5°C 低く、特に、床下の温度が他室より低くなっている。

表 3-8-9 平均内外温度および平均内外差圧

ケース	平均内外温度差($^\circ\text{C}$)		平均差圧(Pa)
	1階	2・3階	
C1	4.4	6.1	—
C2	4.9	6.5	8.6
C3	4.8	6.8	—
C4	2.7	4.3	2.0
C5	0.9	3.1	-3.5
UW	3.5	4.8	3.9
UE	6.9	8.6	5.6
D	4	5.4	4.9

3) 一定濃度法による各室の外気導入量

図 3-8-29 に、各実験ケースにおける層別の外気導入量および建物全体の平均換気回数を示す。通常の換気システムの運転条件である実験 C1 の場合、換気回数は 0.29[回/h]と小さかった。第 1 種換気システムの条件としたケース C3~C5 においても、換気回数 0.5[回/h]を上回ったのは実験 C4 のみであった。

図 3-8-30 に、各室における外気導入量の割合を示す。2 階と 3 階の換気量が 1 階に比べて小さく、特に、居住者の滞在時間が長いと思われる 2 階居間と 2 階洋室 A の換気量が非常に少ないことが分かる。この結果に対して、給気経路として設けた壁型・床型給気口の配置などについて検討が必要であると考えられる。また、床下の温度が他室より低いことによって、給気ファンによる外気供給に影響を与える可能性も考えられる。

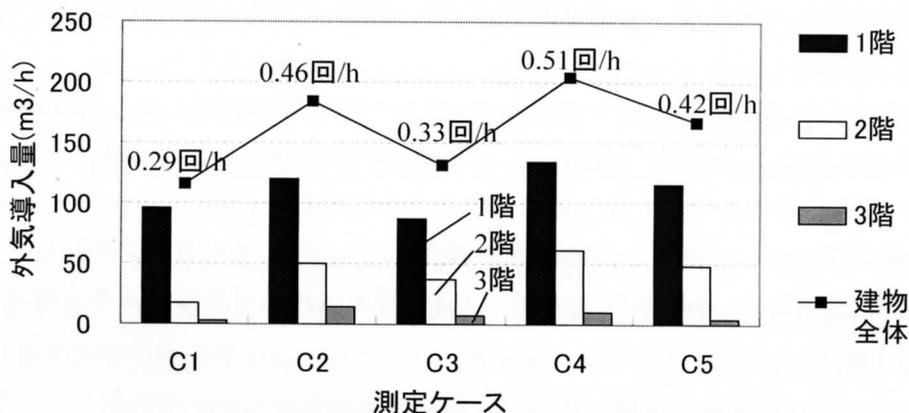


図 3-8-29 層別外気導入量および建物全体の換気回数

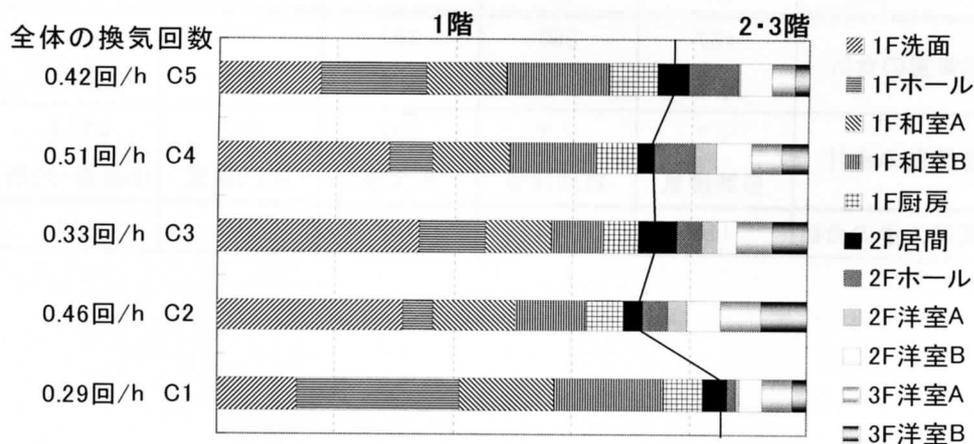


図 3-8-30 各室における外気導入量の割合

4) 外気導入量と給排気口風量の比較

表 3-8-10 に、各ゾーンにおける外気導入量の合計値、並びに、給排気口における風量の合計値を示す。なお、表 3-8-4 の C2～C5 における床下給気ファンの風量は、C1 で測定した風量を用いている。

- ① C1 では、給気ファンによる風量より各ゾーンの外気導入量の合計が約 50[m³/h]少ないことが分かる。その理由として、床下から供給された外気の一部が内外通気層の隙間から屋外へ排出された可能性が考えられる。また、第2種換気である C1 と C2 での自然排気口の風量が非常に小さい（検知域以下）ことから、排気は隙間を通して行われると推察される。
- ② C2 では、小屋裏ファンを給気用として運転したため、給気量が増加している。
- ③ C3 の場合、小屋裏ファンの排気運転によって床下の給気抵抗が小さくなり、各室への外気導入量が C1 より増加したと見られるが、排気ファンの風量に比べると換気量があまり増加していない。これに対して、床下給気によって供給された外気が、内部通気層と外部通気層の間の隙間、あるいは、小屋裏排気ファンを通して屋外へ強制排出された可能性があると考えられる。
- ④ C4 の結果から、局所排気ファンの運転で C3 より換気量が増加したことが分かる。これは、小屋裏ファンによる排気と比較して、室内側から直接排気が行われることで、通気層内の空気が室内へ流入しやすくなったためであると思われる。
- ⑤ C5 の換気量について見ると、C3 よりは増加しているが、C4 よりは減少している。給気された外気の一部が、小屋裏排気ファンにより排出される可能性があると考えられる。

表 3-8-10 外気導入量と給排気風量の比較

	C1	C2	C3	C4	C5
給気量の合計	167 床下	260 床下+小屋裏	167 床下	167 床下	167 床下
排気量の合計	< 7 自然排気	< 7 自然排気	232 小屋裏	17.5 局所排気	254.4 小屋裏+局所
外気導入量の合計	116	184	132	205	168

5) ステップアップ法とステップダウン法による空気交換効率

【ステップアップ法 (SU 法) (実験 UW・UE)】

図 3-8-31 に、西側のクールチューブにガスを注入した場合 (UW)、図 3-8-32 に、東側にガスを注入した場合 (UE) の SF₆ ガスの濃度変化を示す。両方を比較すると、東西のクールチューブによる給気経路の違いにより、各ゾーンにおけるガスの濃度が定常に到達するまでの時間がそれぞれ異なることが分かる。

【ステップダウン法 (SD 法) (実験 D)】

床下給気システムにより供給される外気だけでなく、建物の隙間から流入される外気の影響についても把握するため、SD 法による測定を行った。図 3-8-33 に、実験 D の結果を示す。ガス濃度の減衰が早いほど空気齢が短くなる。一定濃度法、SU 法による結果と同様の傾向が見られた。

表 3-8-11 に、SD 法による実験 D の各室の局所空気交換効率、東西の給気ファンを同時に運転する場合について、SU 法による実験 UW と UE の空気齢の結果を重み付け平均して求めた各室の局所空気交換効率を示す。表 3-8-11 より、床下空間を通して供給された外気が、はじめに 1 階和室 A まで到達し、最終的に 3 階洋室 B まで至ることが分かる。即ち、空気交換効率の比較により換気経路を把握することができる。

図 3-8-34 に SU 法と SD 法による局所空気交換効率の相関について示したが、2・3 階において、SD 法の結果より SU 法の方が大きい測定点がある。隙間による外気導入量の影響が含まれている SD 法より SU 法の空気交換効率が高くなることは通常ありえないが、これは、実験 UW と UE において、2・3 階のガス濃度が完全に定常状態に到達していない時点で測定を終了したため、実際より空気齢が短く評価されたためであると考えられる。

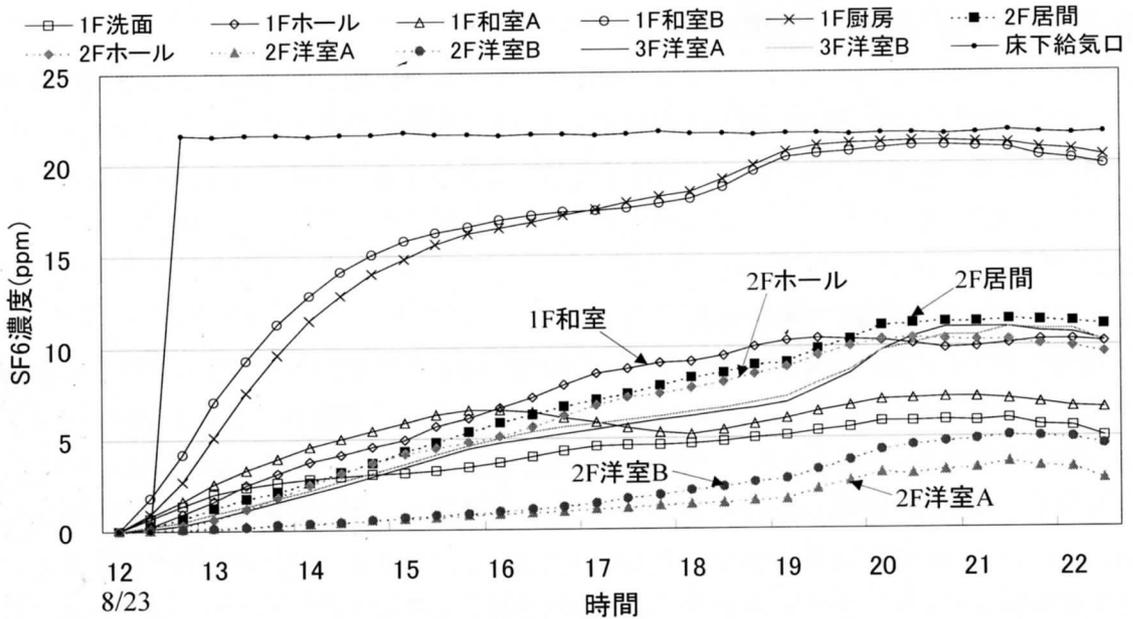


図 3-8-31 実験 UW における SF₆ の濃度変化

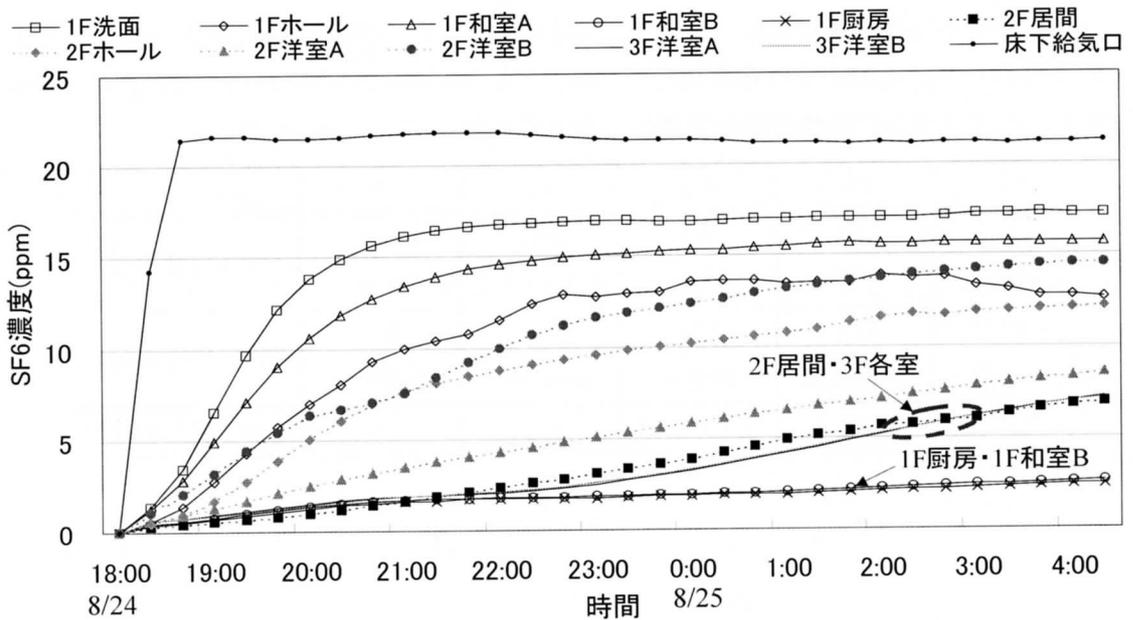


図 3-8-32 実験 UE における SF₆ の濃度変化

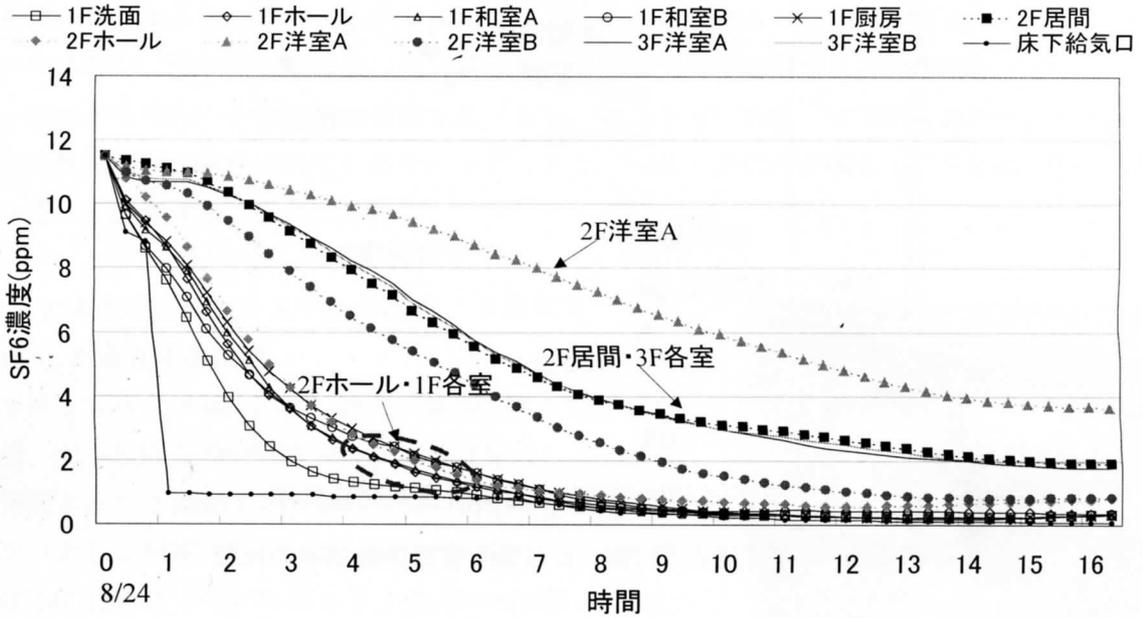


図 3-8-33 実験 D における SF₆ の濃度変化

表 3-8-11 SU 法・SD 法による局所空気交換効率の比較

順番	ステップアップ		ステップダウン法	
	ゾーン名	局所空気交換効率	ゾーン名	局所空気交換効率
1	1F和室A	1.89	1F洗面	1.80
2	1F洗面	1.71	1Fホール	1.47
3	1Fホール	1.39	1F和室B	1.45
4	1F和室B	1.35	1F和室A	1.40
5	1F厨房	1.29	1F厨房	1.31
6	2F洋室B	1.13	2Fホール	1.05
7	2Fホール	1.08	2F洋室B	0.63
8	3F洋室A	0.55	3F洋室B	0.47
9	2F洋室A	0.54	3F洋室A	0.46
10	2F居間	0.48	2F居間	0.44
11	3F洋室B	0.48	2F洋室A	0.30

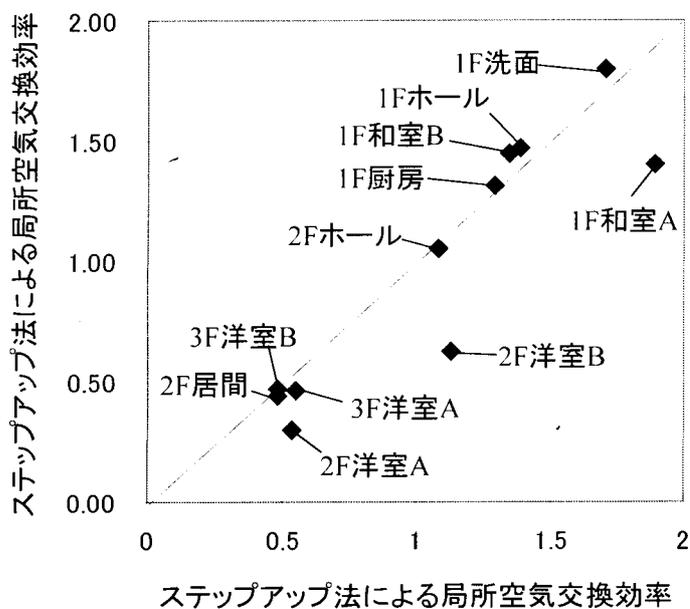


図 3-8-34 SU 法と SD 法による局所空気交換効率の比較

(d) まとめ

- ① 一定濃度法による測定結果から、第2種換気だけでなく、第1種換気を行う際にも全体的に換気量が不足していることが分かった。特に、通常の換気システム運用時と同じ条件の実験 C1 では、建物全体の換気回数が 0.29[回/h]であり、他の4条件と比べて低い値となった。換気回数 0.51[回/h]と最も多くの換気量が得られたのは実験 C4 で、床下給気と局所排気ファンを運転した場合である。
- ② 層間の給気バランスについてみると、1階と比べて2・3階の外気導入量が非常に不足していることが分かった。これに対し、床下および通気層内の空気を室内へ供給する経路として、壁型の給気ガラリより床型給気ガラリの方が通気が良いためであると考えられる。それゆえ、壁体内の通気層を給気経路として用いる場合には、給気ガラリの配置や形について注意する必要があると考えられる。
- ③ ステップアップ法とステップダウン法により、各室の空気齢と空気交換効率を求め、換気経路について検討を行った。その結果、一定濃度法の結果と同様に、3階、2階居間、2階洋室 A の空気交換効率が非常に小さいことが分かった。
- ④ 2階ホールに設けられている自然排気口については、実験 C5 (逆に、屋外からの流入があった) 以外では全ての測定ケースにおいて風量が非常に小さかった (検知域以下) ことから、自然排気口の設置場所が建物の中性帯に位置している可能性があると考えられる。

(3) 壁体内通気層を排気経路とする第1種換気システム

壁体内通気層を排気経路とする第1種換気システムを備えた実在住宅を対象に、換気性能の測定を行った。本システムは、室内空気汚染の原因として壁体からの化学物質放散の割合が大きいことに着目し、壁と床の間に設けたスリットから壁体内部の通気層を排気経路とすることによって、壁体から室内への化学物の放散を防ぐ新しい換気方式である。本実験の目的は、意図された通りの換気経路が確保されているか、また、各室に新鮮空気は行き渡っているかについて、空気齢を用いて評価することにある。

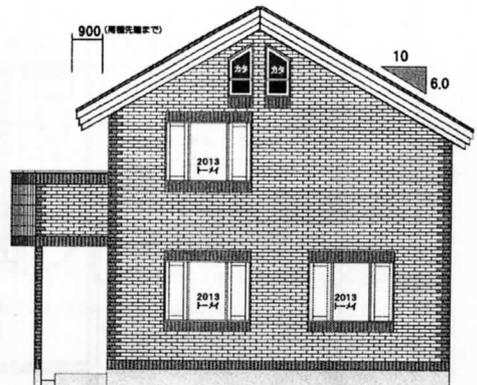
(a) 対象住宅と換気システムの概要

1) 対象住宅の概要

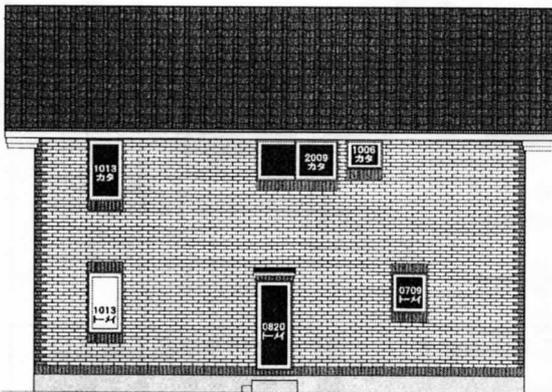
写真 3-8-28 に外観、図 3-8-35 に立面図、図 3-8-36 に平面図、図 3-8-37 に金計図を示す。対象住宅は、東北地方に建設された2階建ての戸建住宅で、宿泊可能なモデルハウスとして利用されている。2004年に竣工し、延床面積は142.125 m² (1階73.75 m²、2階68.375 m²) である。



南立面図



東立面図



北立面図



西立面図

図 3-8-35 対象住宅の立面図

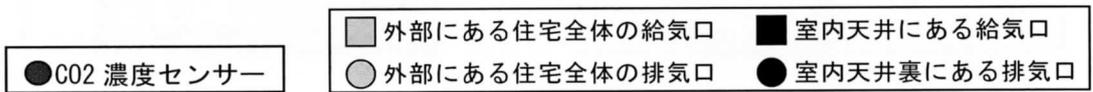
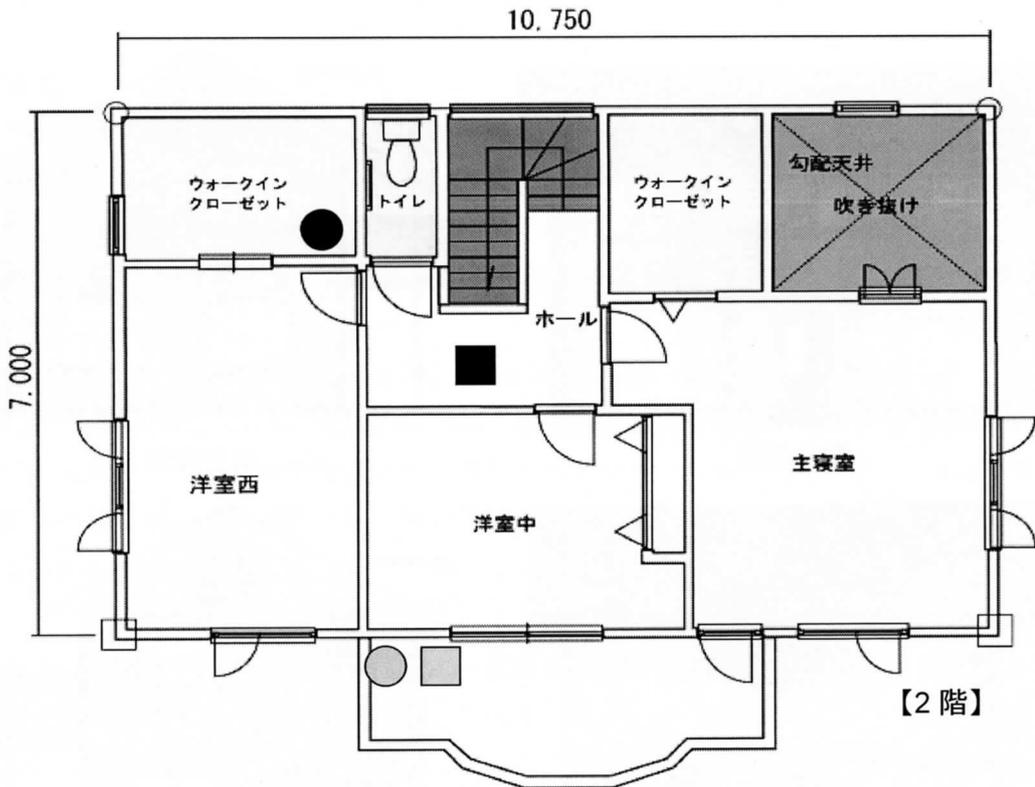
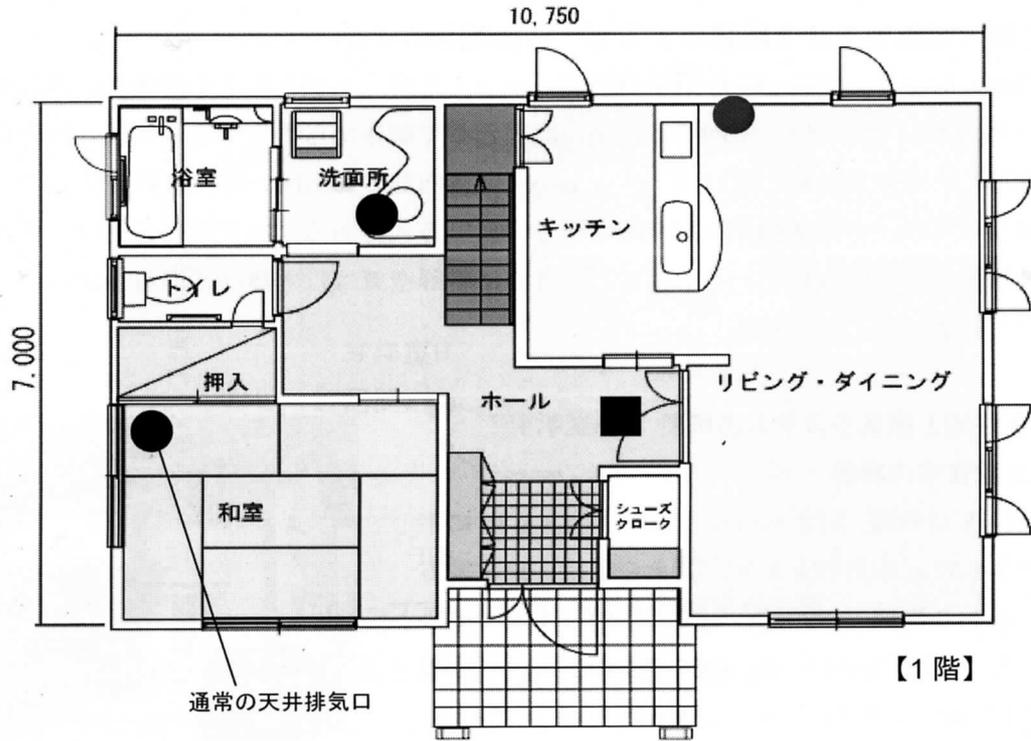
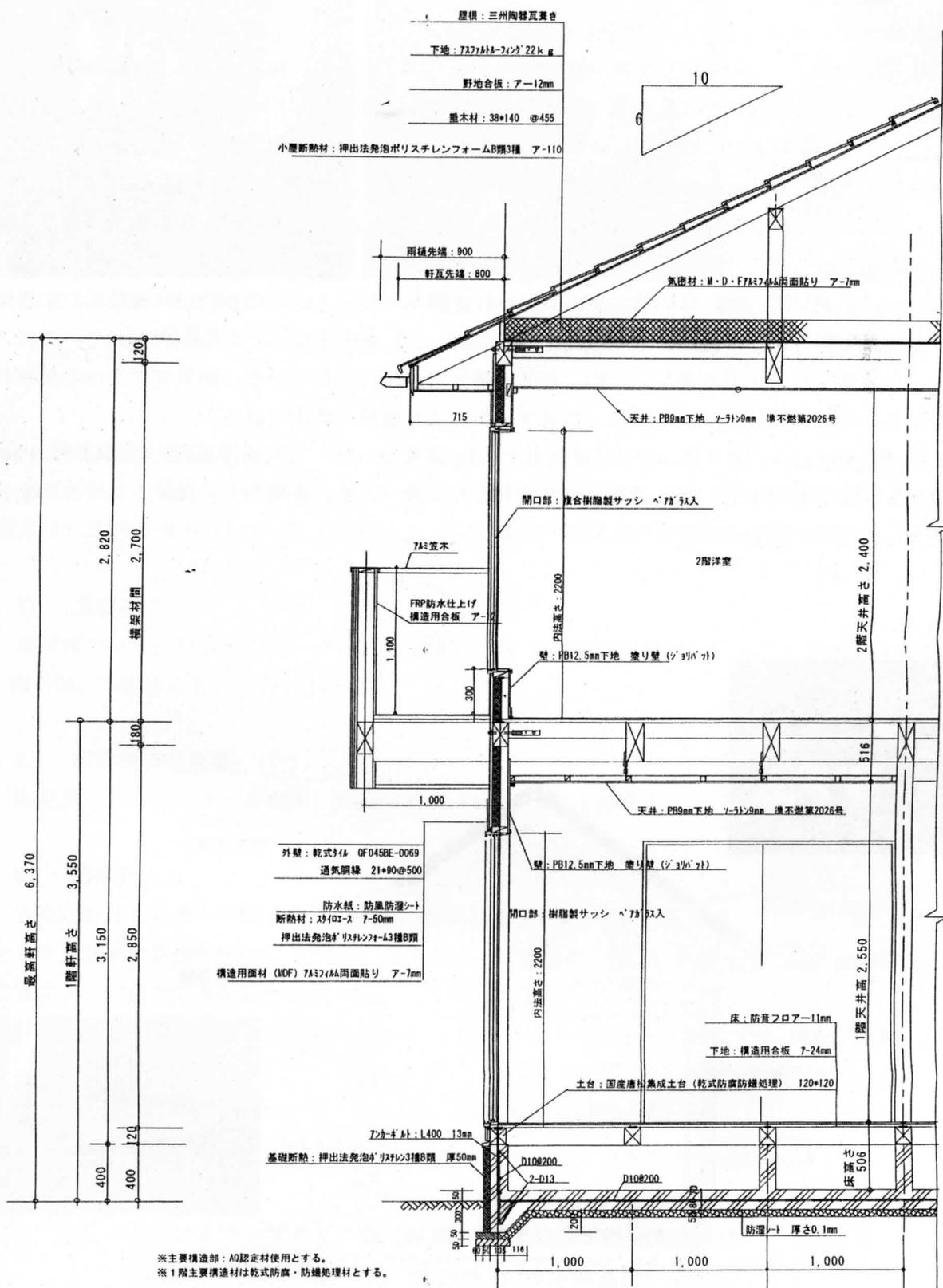


図 3-8-36 対象住宅の平面図



※主要構造部：A0認定材使用とする。
 ※1階主要構造材は乾式防蟻・防蝕処理材とする。

図 3-8-37 対象住宅の金計図

2) 換気システムの概要

図3-8-38に、換気システムの設置概念図を示す。

対象システムは、小屋裏の熱交換型集中換気システム（写真3-8-29）により、住宅全体の給排気を制御する。集中換気システムは、通常では自動運転に設定されており、室内のCO₂濃度を感知して給排気量を制御しているが、任意で給気量や排気量を調節することも可能である。

外気取り入れ口から導入された新鮮空気は集中換気システムを経て、1階玄関・2階ロビーの2ヶ所に設けられている給気口から室内へと放出される。1階玄関・2階ロビーから放出された新鮮空気は各室へ行き渡る。

室内の汚染空気は、壁と床の取合部に設けられた排気スリットから壁体内通気層に入り、各階の天井裏に設置された排気ダクトへ移動する。ただし、1階和室には畳が敷かれており、排気スリットを設置することができないため、通常の排気口が設けられている。排気ダクトは小屋裏の集中換気システムに接続されており、排気ファンにより屋外へ排出される。

自動運転時には、1階リビングに設置されたCO₂濃度センサー（写真3-8-31）を用いて室内の空気環境状況を監視する。CO₂濃度が上昇するとセンサーがそれを感知し、換気システムの給排気風量を自動的に制御する。

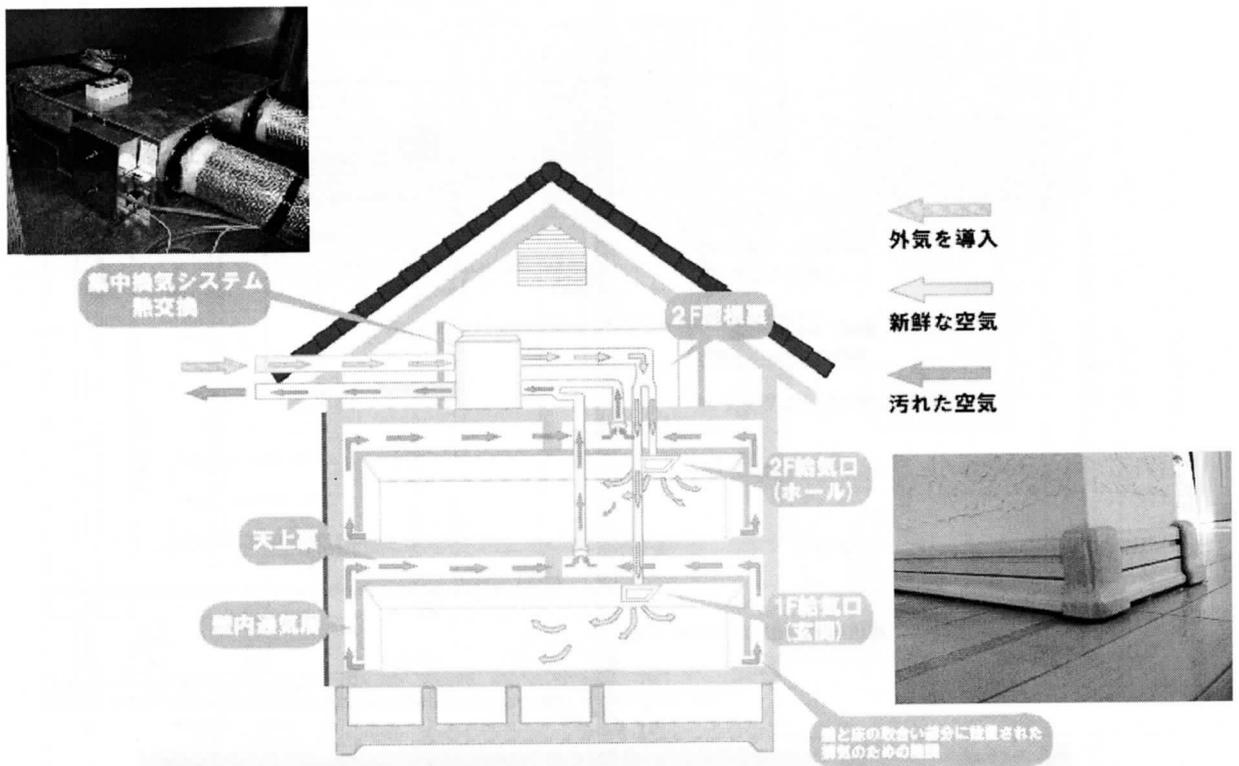


図3-8-38 換気システムの設置概念図



写真 3-8-29 熱交換ユニット
(小屋裏)

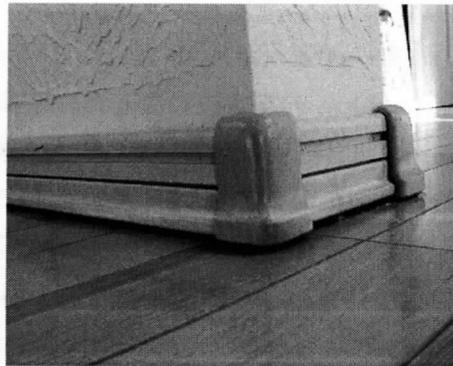


写真 3-8-30 排気口
(壁と床の取合部)



写真 3-8-31 CO₂センサー
(居間)

(b) 測定項目と測定方法

測定項目は、給排気口の風量、各室・外気・壁体内の温湿度、各室・壁体内の空気齢である。測定は、2004年8月25日～27日に行った。測定期間中は非居住状態である。

1) 温湿度

温湿度センサー付き小型データロガーを用い、10分間隔で測定する。エアコンの設定温度は、1階居間、2階寝室ともに26℃である。

2) 給排気口の風量

風量測定器（コーナー札幌製、Swema Flow 65）を用いて測定する。

3) 局所空気齢

各室における局所空気齢を測定し空気の移動経路を把握するため、ステップアップ法（SU法）とステップダウン法（SD法）を行う。表3-8-12に実験条件を示す。換気システムの運転条件は、給気ファン、排気ファンともに最大運転とした。

SF₆ガスを外部給気口から一定量40cc/min発生させ、マルチガスモニター（B&K社製、1302型）とマルチポイントサンプラー（B&K社製、1303型）を用いてガス濃度を測定する。ガスの発生量は、マスフローコントローラー（エステック社製）で制御する。SU法を行った後、室内空気を攪拌しガス濃度を均一にしてからSD法を行う。測定中、各室のドアは閉めた状態とする。

表 3-8-12 ステップアップ法（SU法）・ステップダウン法（SD法）の実験条件

実験	測定方法	開始時刻	冷房温度	給排気ファン
1	ステップアップ法	8/25 21:00～	26℃	給気:最大運転
2	ステップダウン法	8/26 11:22～		排気:最大運転

図 3-8-39 に、ガス濃度の測定点を示す。1 階は、リビング・ダイニング、台所、玄関ホール、和室の 4 ヶ所、2 階は、主寝室、洋室（西）、洋室（中）、ホールの 4 ヶ所である。各室では、テフロンチューブの先端を床から 120cm の高さに設置した。壁体内通気層内には、2 階寝室の東外壁面に 1 ヶ所、1 階居間・食堂の東外壁面に 1 ヶ所の計 2 ヶ所の測定点を設け、排気スリットを通して、ガス濃度を測定するためのテフロンチューブを挿入する。また、1 階洗面所と 2 階ウォークインクローゼットの天井裏にある排気ダクト入り口付近に 1 ヶ所ずつの測定点を設定した。テフロンチューブは、天井の点検口を通して挿入する。以上の計 12 点で測定を行う。

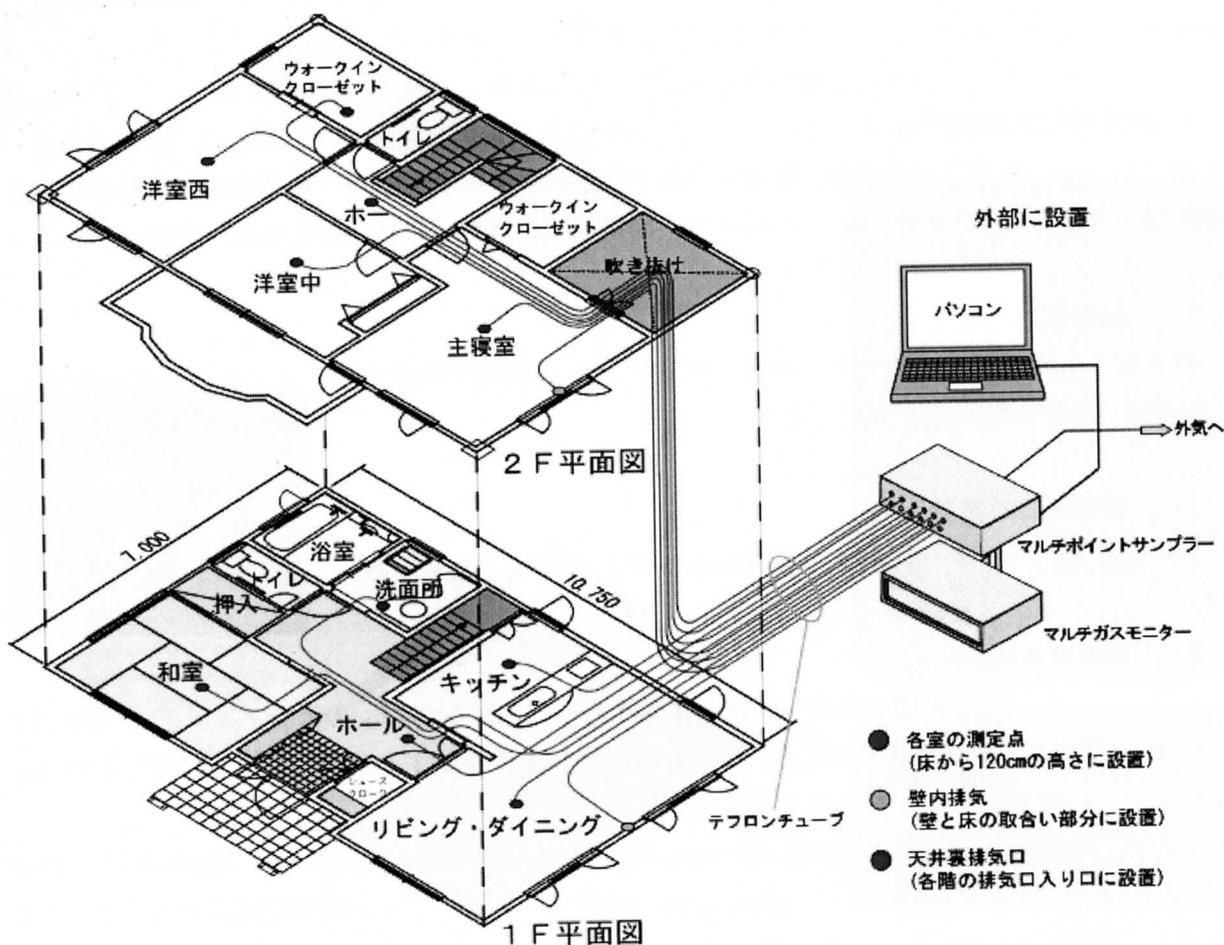


図 3-8-39 空気齢の測定点

(c) 実測結果

1) 各室・壁体内の温湿度

図3-8-40、3-8-41に、実験中の温湿度の測定結果を示す。測定中、日中の最高気温は27℃前後、夜間の最低気温は15℃前後であった。1階リビング、2階主寝室にあるエアコンの設定温度を26℃とした結果、室内温度が26℃以上になることは殆どなかった。また湿度について見ると、外部湿度は上下が激しいのに対して、室内は24時間を通してほぼ変化が見られず、安定した室内温熱環境が保たれていることを確認できた。

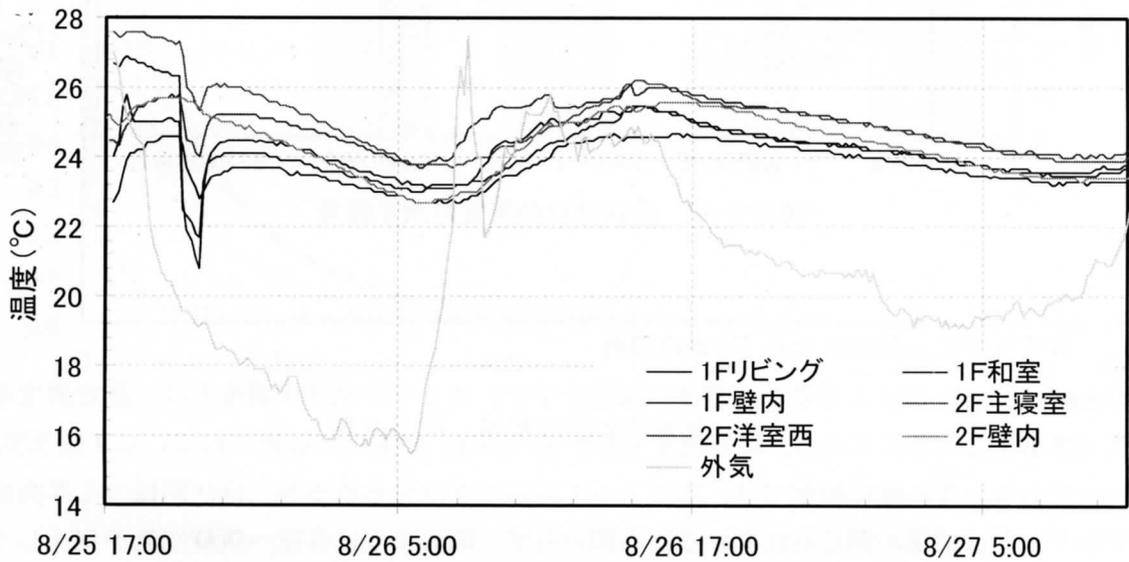


図3-8-40 温度の測定結果

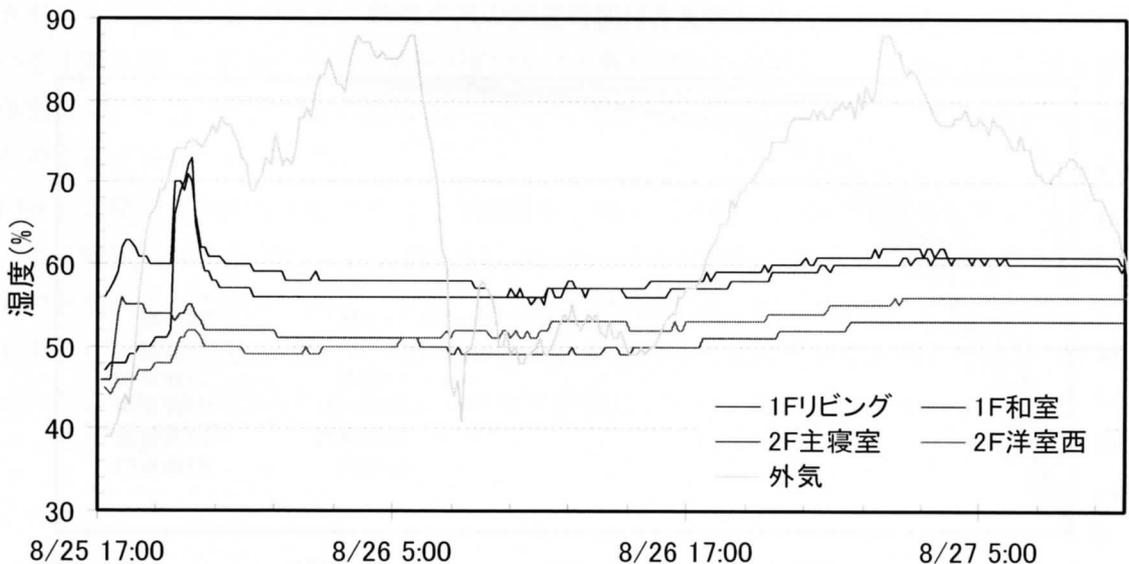


図3-8-41 相対湿度の測定結果

2) 給排気口の風量

図 3-8-42 に、給排気口の風量の測定結果を示す。全体の給気量と排気量を比べると、排気の方が高い数値を示し、建物隙間からの外気漏入があると推察される。その他の箇所について見ると、給気ダクトに近い順に風量も大きく妥当な結果である。風量測定結果から、住宅全体の換気回数は約 0.6 回/h と推定され、必要換気回数を目安である 0.5 回/h 以上の換気量が確保されていることを確認した。

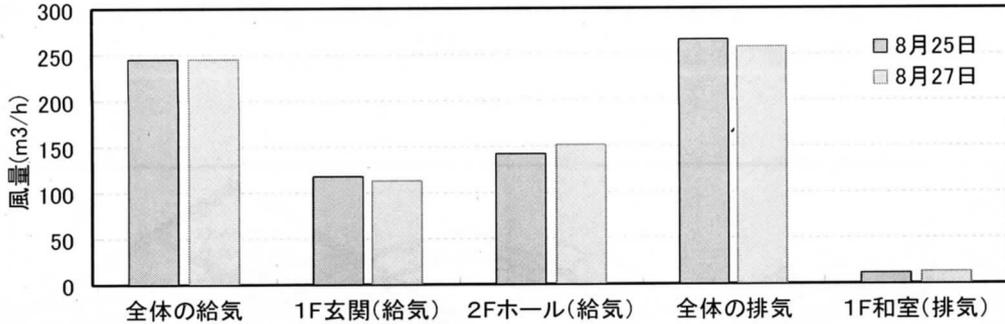


図 3-8-42 給排気口の風量の測定結果

3) ステップアップ法による SF₆ 濃度履歴

図 3-8-43 に、SU 法による基準化濃度の履歴を示す。ここでの基準化濃度とは、測定濃度を定常濃度で基準化したものである。最も濃度上昇が早いのは、給気口が設置されている 1 階玄関、2 階ホールである。その他の居室では、室によってばらつきは見られるが、ほぼ同様の上昇曲線を示しており、間仕切扉が閉じられているにも関わらず、同じように各室へ新鮮空気が到達していることが推察される。また、2 階洋室 (西) の濃度上昇が僅かに早いのは、建物内の換気経路から考察すると、小屋裏の集中換気システムに近く、なおかつ集中換気システムへとつながる排気ダクトに 1 番近い位置にあるためと考えられる。

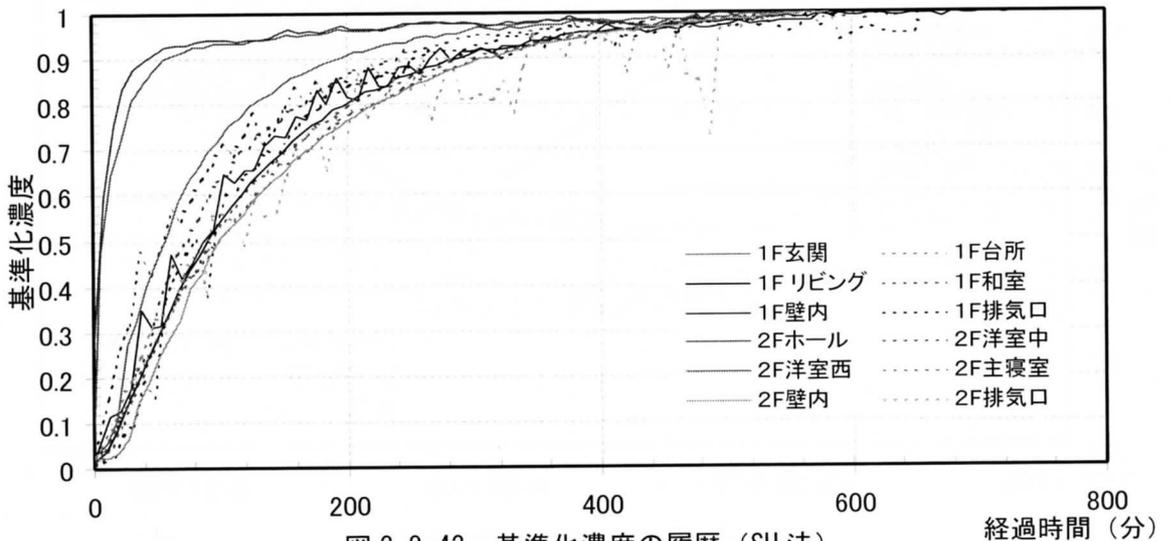


図 3-8-43 基準化濃度の履歴 (SU 法)

4) ステップダウン法による SF₆ 濃度履歴

図 3-8-44 に、SD 法による基準化濃度の履歴を示す。SU 法と同様に、濃度減衰が早いのは 1 階玄関、2 階ホールである。次は、排気口および 2 階居室、最後に、壁内および 1 階居室と、減衰の早さによって、3 つのグループに分けることができる。即ち、SD 法によれば、各室の新鮮空気の到達速度は、排気口の新鮮空気の到達速度より遅いということになる。

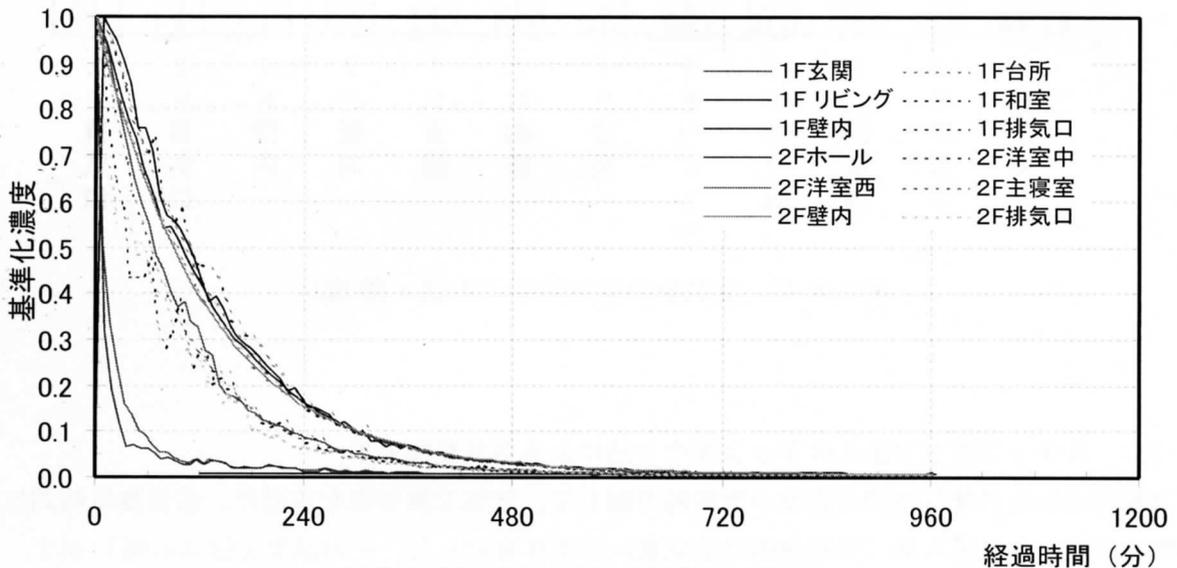


図 3-8-44 基準化濃度の履歴 (SU 法)

5) ステップアップ法とステップダウン法による空気齢

ガス濃度の上昇曲線、減衰曲線から、SU 法、SD 法による空気齢を算出した。その結果を図 3-8-45 に示す。空気齢が小さいほど、新鮮空気の到達時間は早いということになる。給気口の設置されている 1 階玄関、2 階ホールの空気齢が約 25 分と最も早いのに対して、居室では、2 階洋室 (西) と洋室 (中) が約 100 分、その他は 120~150 分であった。これは、換気回数が 0.6 回/h であることを考えると妥当な値である。

1 階と 2 階の空気齢を比較すると、予想通り 2 階の空気齢が全体的に小さくなっている。これは、集中換気システムが小屋裏に設置されているため、物理的に換気システムに近い 2 階の換気効率の方が高くなるからである。また、ほとんどの居室において、SD 法による空気齢が SU 法よりも大きくなっている。これは、SU 法が給気口からのみの新鮮空気を評価しているのに対して、SD 法では建物の隙間からの新鮮空気も併せて評価しているためと思われる。

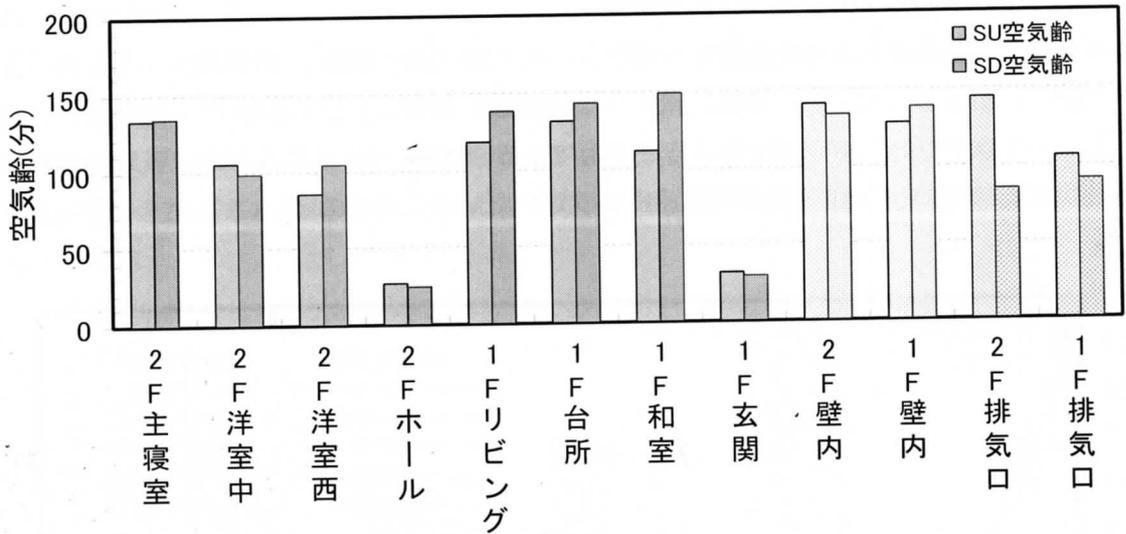


図 3-8-45 空気齢の算出結果 (SU法・SD法)

6) ステップアップ法とステップダウン法による空気交換効率

対象住宅の名目換気時間を各室の空気齢で除して、空気交換効率を求めた。名目換気時間は、建物の気積と外気導入量（建物全体の給気量）により算出した。その結果を図 4-4-56 に示す。空気齢が小さい箇所ほど空気交換効率は大きくなり、1階玄関、2階ホールは3.2～4.2、2階洋室（西）と洋室（中）は1.0～1.3、その他の居室は0.9前後となった。この結果より、本換気システムでは、集中換気システムから離れている居室への新鮮空気の導入方法について、さらに検討の余地が残されていると考えられる。

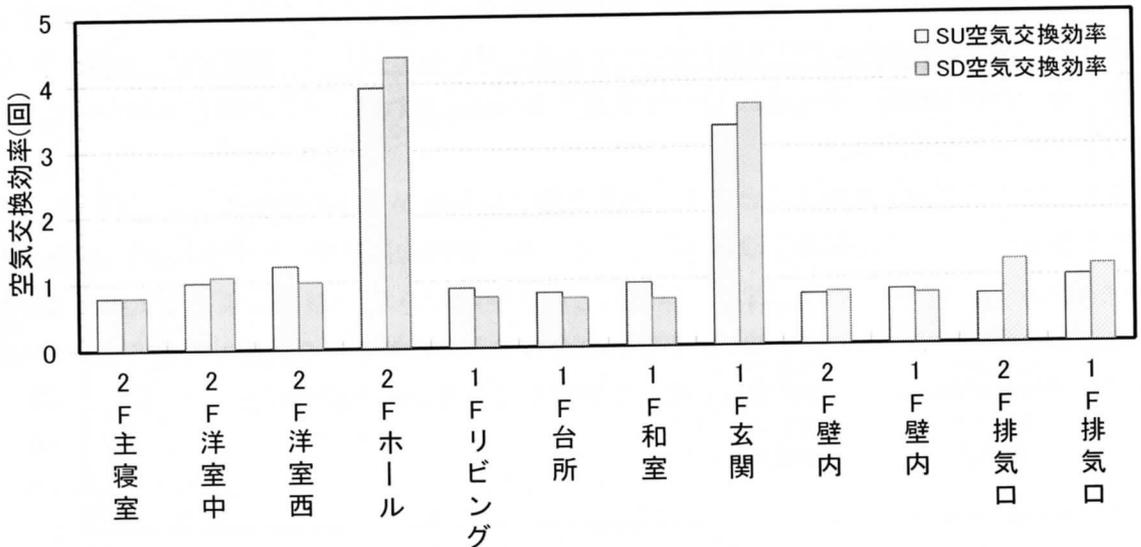


図 3-8-46 空気交換効率の算出結果 (SU法・SD法)

(d) まとめ

実際の住宅を用いて、壁体内通気層を排気経路とする第1種換気システムの性能評価を行い、ドアが閉じられているのにも関わらず、各室には100～150分の空気齢で新鮮空気が供給され、壁と床の取合部に設けられたスリットを通しての排気は概ねその機能を果たしていることが明らかとなった。しかし、空気交換効率が1以下の部屋もあり、そのような部屋への給気方法については更に検討が必要であると考えられる。

(4) 壁体内通気層を利用した換気・空調併設型第一種換気システム

壁体内通気層を利用した換気・空調併設型第1種換気システムを備えた住宅を対象に、夏期・冬期・中間期の換気性能の測定を行った。本システムは、居室専用と躯体専用の2系統の換気システムにより導入した新鮮空気と、冷暖房システムで温度を調節した空気を室内に供給すると共に、床下・壁体内通気層・小屋裏など建物全体に循環させ、冷暖房負荷を低減、建物の耐久性の向上を図る。本実測の目的は、各室の外気導入量や住宅内の空気の流れについて把握し、夏期・中間期・冬期の換気および冷暖房システムの性能を評価することである。夏期には、冷暖房システムで冷やされた空気を床下に導入し、壁体内通気層を上昇するかについて確認する。

(a) 対象住宅と換気システムの概要

1) 対象住宅の概要

写真 3-8-32 に対象住宅の外観、図 3-8-47 に平面図を示す。対象住宅は、総合住宅展示場内に建設されたモデルハウスである。2004年4月に竣工し、延床面積は225.2m²（1階114.41m²、2階97.34m²、3階（小屋裏）10.56m²）、建設時（換気システムや冷暖房システムの設置前）の単位床面積当たりの相当隙間面積は0.8cm²/m²である。また、高性能断熱材を用いて外断熱を行い、アルミに比べ約1000分の1の熱伝導率である国産樹脂のサッシを採用し、高断熱を実現している。日本最高級木材である木曽檜を柱や梁、扉、仕上げ材等に用いており、木のぬくもりが感じられる住宅である。展示のため、床下への階段と小屋裏への階段が設置されている。



写真 3-8-32 対象住宅の外観



図 3-8-47 モデルハウスの平面図

2) 換気システムの概要

居室専用と躯体専用の2系統の換気システムが設置されている。両者ともに、24時間第1種熱交換型換気方式であり、運転モードは、強、弱の2段階である。熱交換換気ユニットは、いずれも事務室の天井裏にある。

図3-8-48に、換気システムの設置概念図を示す。給排気口の位置は、後述する図3-8-8に示す。室内には、1階に1ヶ所（居間）、2階に4ヶ所（寝室、子供室、洋室、事務室）の給気口があり、2階ホールに2ヶ所の排気口が設置されている。1階の換気量を補うため、食堂と和室には個別のシステムが備わっている。一方、床下・壁体内通気層・小屋裏では、給気ファンで床下に新鮮空気を送り込み、小屋裏から機械排気を行う。

この建物はモデルハウスであるため、台所、洗面所、浴室、トイレには局所排気ファンは設置されていない。

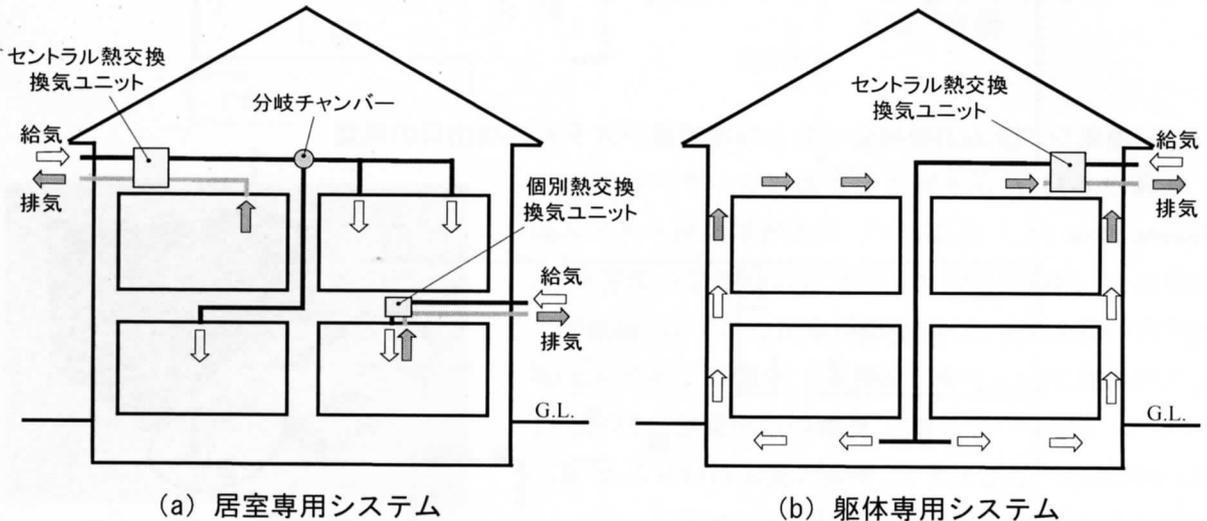


図3-8-48 換気システムの設置概念図

3) 冷暖房システムの概要

図3-8-49に、冷暖房システムの設置概念図を示す。吹出口の位置は、後述する図3-8-50に示す。セントラルシステムを用いて、室内と床下等の内部空間の冷暖房を行い、食堂と和室に設置されたルームエアコンにより、1階の冷暖房を補助する。対象住宅には、小屋裏への階段が設けられているため、通常、2階ホールに設置される吸込口は設けず、小屋裏への階段を通して空調ユニットへ空気を循環させる。

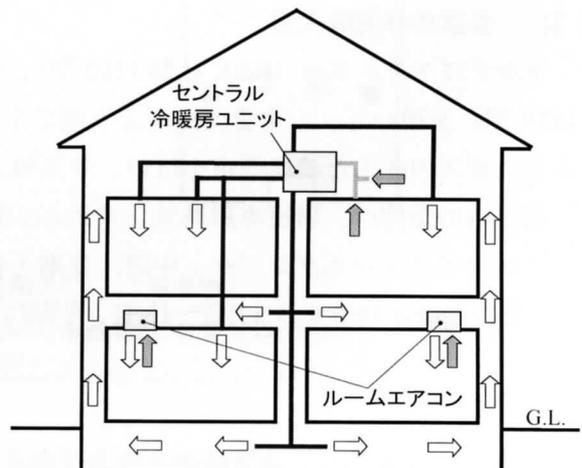


図3-8-49 冷暖房システムの設置概念図

空調ユニットにはボリュームダンパーが内蔵され、その角度を変更することにより、室内側 {2階各室・2階ホール (子供室側)} と床下側 {床下・居間・2階ホール (寝室側)} の風量バランスを変えることができ、居住者の生活スタイルに合わせた空調を行うことが可能である。ボリュームダンパーの構造上、ダンパーの角度を室内側もしくは床下側に最大にした場合でも、最小側の吹出風量は0ではない (最大時で2:8の割合)。

(b) 測定項目と測定方法

1) 気密性能

写真 2-4-2 に示す気密測定器 (コーナー札幌製、KNS-400) を用いて、建物の測定を行う。建物の測定では、和室の東面の窓に測定器を設置し、減圧法で測定する。夏期の測定日は、9月2日、冬期は1月24日、春期は、5月24日である。

2) 換気システムの給排気口および冷暖房システムの吹出口の風量

写真 3-8-33 に示す風量測定器 (コーナー札幌製、Swema Flow 65,) を用いて、居室専用換気システムの給排気口、冷暖房システムの吹出口の風量を測定する。測定時の基本条件は、居室専用換気システム: 強運転、躯体専用換気システム: 強運転、冷暖房システムのボリュームダンパー: 中間、夏期の冷房温度: 25℃、冬期の暖房温度: 20℃とする。夏期の測定日は9月15日、冬期は2月15日、春期は5月17日である。

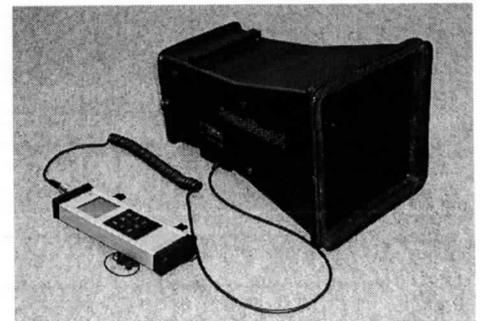


写真 3-8-33 風量測定器

3) 各室の外気導入量

マルチガスモニター (B&K 社製 1302 型)、マルチポイントサンプラードーザー2台 (B&K 社製 1303 型) を用いて、一定濃度法により測定を行う。トレーサーガスは SF₆、設定濃度は 5ppm である。ガスの注入と濃度測定を行い、外気導入量の経時変化を測定する。

測定時の条件は、居室専用換気システム: 強運転、躯体専用換気システム: 強運転、冷暖房システムのボリュームダンパー: 中間、夏期・春期の冷房温度: 25℃、冬期の暖房温度: 20℃とする。夏期の測定日は9月13日~15日、冬期は2月8日~10日、春期は5月16日~19日である。

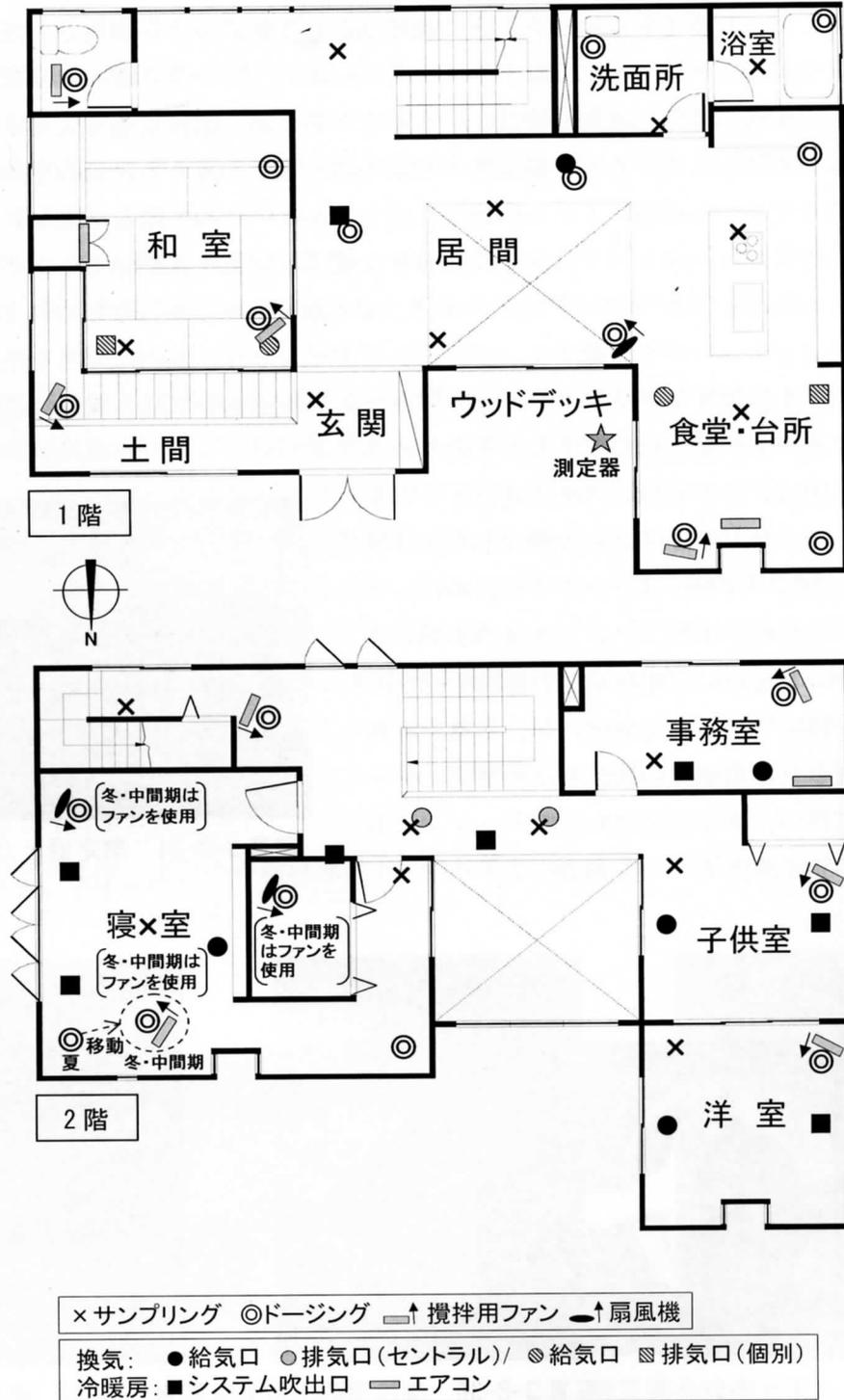


図 3-8-50 一定濃度法による換気量測定の測定点

図 3-8-50 に、一定濃度法による換気量測定のための測定点を示す。1階を6ゾーン（居間、食堂・台所、和室、洗面所・浴室、玄関・土間、階段ホール）、2階を5ゾーン（寝室、洋室、子供室、事務室、ホール）に分割して、各ゾーンの外気導入量の測定を行う。測定器やガスボンベ等は、実験中は実験棟への出入りができなくなることや測定器から微量のガスが漏れる可能性があることを考慮して、屋外のウッドデッキに設置する（写真 3-8-34）。ゾーン間の間仕切扉は、できる限り閉じておくようにする。また、対象建物はモデルハウスのため、階段を通過して床下や小屋裏へ行くことができるようになっているが、換気量の測定中は、床下へ降りる階段の手前にあるドアを閉じた上で目張りする。小屋裏へ上がる階段室にはドアがないため、階段の直前にビニールシートを張る。この際、ビニールシートは完全に目張りをせず、空気や人が通ることができるように設置する（写真 4-5-35）。サンプリングポイントは、ガス濃度の測定を行うために室内空気を捕集する点で、テフロンチューブを設置する。ドーピングポイントは、室内にガスを注入する点で、ビニールチューブを設置する。テフロンチューブとビニールチューブは、屋外に設置したマルチポイントサンプラードーザーに接続する。そのため、食堂の窓を少し開け、その部分にスタイロフォームをはめて固定し、チューブを通すための開口部を設けている。また、室内にガスを一様分布させるために、ビニールチューブの分岐、小型ファン（写真 3-8-36）や扇風機（写真 3-8-37）を用いた室内空気の攪拌を行う。夏期は、居間と寝室で扇風機を用いたが、冬期と春期は、寝室に設置された扇風機の代わりに小型ファンを用いた。それに伴い、北東に設けられたドーピングポイントを図 3-8-50 に示したように移動した。

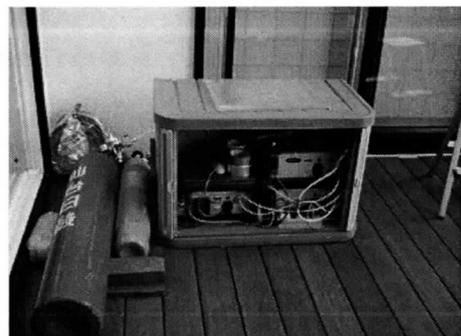


写真 3-8-34 測定器とガスボンベ
(ウッドデッキ)

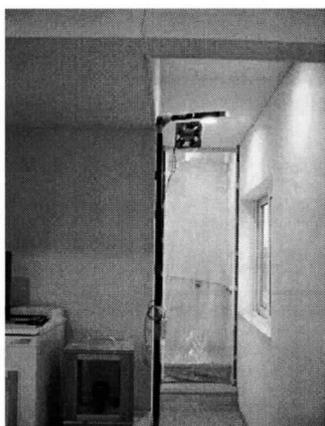


写真 3-8-35 ビニールシート
(小屋裏への階段)



写真 3-8-36 攪拌用の小型
ファン (子供室)

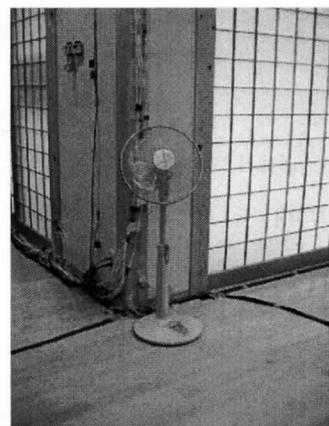


写真 3-8-37 攪拌用の扇風機
(居間)

4) 換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状

換気システムおよび冷暖房システムによる空気移動性状を調査するために、トレーサーガス法である定常発生法を用いて、各室および床下・壁体内通気層・小屋裏のガス濃度を測定する。また、空調ユニットで冷やされた空気が床下へ供給された場合に、その空気が壁体内通気層を通過して小屋裏へ上昇するかどうかを確認する。

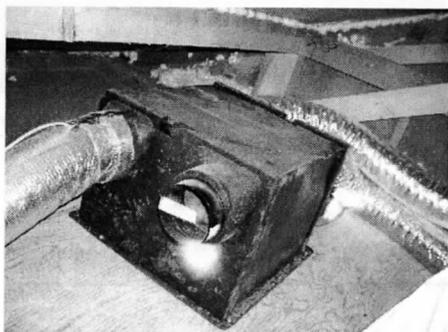
定常発生法は、トレーサーガスを一定発生することで給気される空気に色付けし、各測定点のガス濃度の変動曲線から空気齢を算出する方法である。上昇していくガス濃度を測定し、各測定点の濃度が定常になるまで測定を行う。

マルチガスモニター (B&K 社製 1302 型)、マルチポイントサンプラードーザー (B&K 社製 1303 型) を用いて、ガス濃度の測定を行う。SF₆ と CO₂ の 2 種類のガスをトレーサーガスとして使用する。

夏期と冬期には、2 系統の換気システムと冷暖房システムを同時に運転させた場合の測定を行う。SF₆ は躯体専用換気システムの給気ダクト内 (写真 3-8-38 (a)、熱交換ユニット直後)、CO₂ は空調ユニット内 (リターン空気がユニット内に入った直後) で発生させる。定常発生法におけるガスの発生量はマスフローダンパーで制御し、SF₆ は 40cc/min、CO₂ は 1.5L/min である。躯体専用換気システムは事務室の天井裏にあるため、点検口からチューブを挿入する (写真 3-8-39 (a))。

春期には、換気システムのみを運転させた場合の測定を行う。SF₆ は居室専用換気システムの給気ダクト内 (熱交換ユニット直後)、CO₂ は躯体専用換気システムの給気ダクト内 (写真 3-8-38 (a)、熱交換ユニット直後) で発生させる。ガスの発生量は、SF₆ が 40cc/min、CO₂ が 1.5L/min である。躯体専用換気システムと居室専用換気システムは事務室の天井裏にあるため、点検口からチューブを挿入する (写真 3-8-39)。

間仕切扉の開閉状況、床下への階段室のドアの目張り、小屋裏への階段室のビニールシートの設置は、換気量測定と同様である。



(a) 給気ダクトのチューブ



(b) 排気側入口のチューブ

写真 3-8-38 躯体専用換気システムの熱交換ユニット (事務室の天井裏)

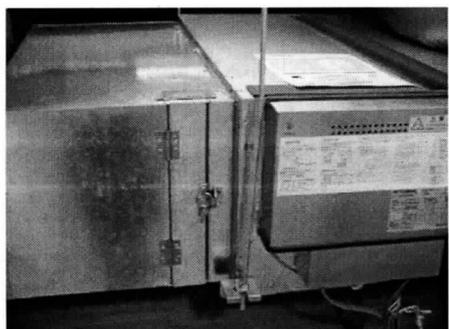


(a) 躯体専用換気システム

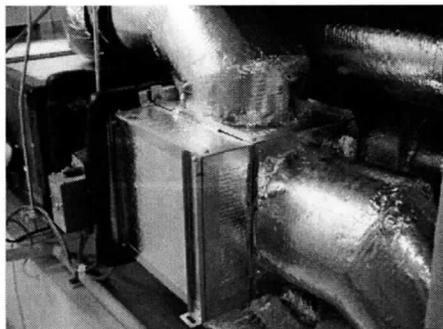


(b) 居室専用換気システム

写真 3-8-39 チューブの設置状況（事務室の天井点検口）



(a) 吸込口と本体部分



(b) ダンパー部分

写真 3-8-40 空調ユニット（小屋裏）

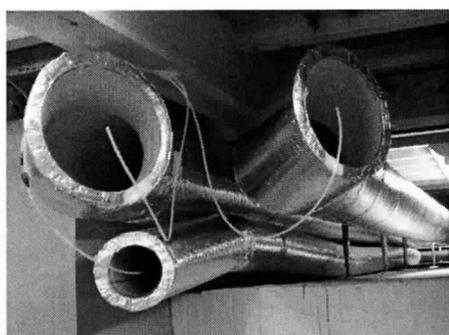


写真 3-8-41 床下のチューブ（冬期）
換気システムの給気口（細いダクト）
冷暖房システムの吹出口（太い2本のダクト）

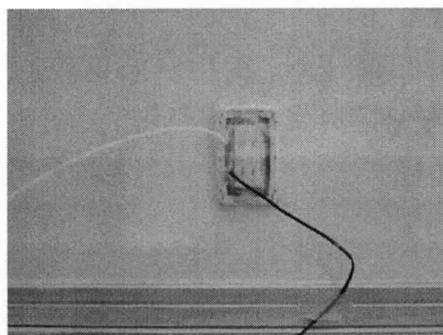


写真 3-8-42 コンセントボックスの
チューブと熱電対

図3-8-51に、空気齢の測定点を示す。測定点では、室内空気を捕集しガス濃度の測定を行うので、マルチポイントサンプラードーザーから導かれたテフロンチューブを設置する。1階は、居間、和室、壁体内（玄関・北側外壁）の2ヶ所、2階は、寝室、子供室、壁体内（寝室・東側外壁）、壁体内（子供室・西側外壁）の4ヶ所、換気システムの給気ダクト内（写真3-8-38（a））、熱交換ユニット排気側入口（写真3-8-38（b））に1ヶ所ずつ（夏期と冬期には躯体専用換気システムのみ、春期には床下・壁体内・小屋裏と居室専用換気システムの両方に測定点を設ける）、空調ユニットの内部、吸込口に1ヶ所ずつ（写真3-8-40、春期は設置しない）、床下（換気システムの給気口および冷暖房システムの吹出口付近）に1~2ヶ所（写真3-8-41、夏期には、給気口および吸込口から吹出し方向に1m弱離れた地点に1ヶ所、冬期には、写真3-8-のように、給気ダクトおよび吹出しダクトの出口に1ヶ所ずつ、春期には、換気システムの給気ダクト内の出口から約30cm奥に1ヶ所）である。壁体内通気層内には、コンセントボックスから測定用チューブを挿入する（写真3-8-42）。

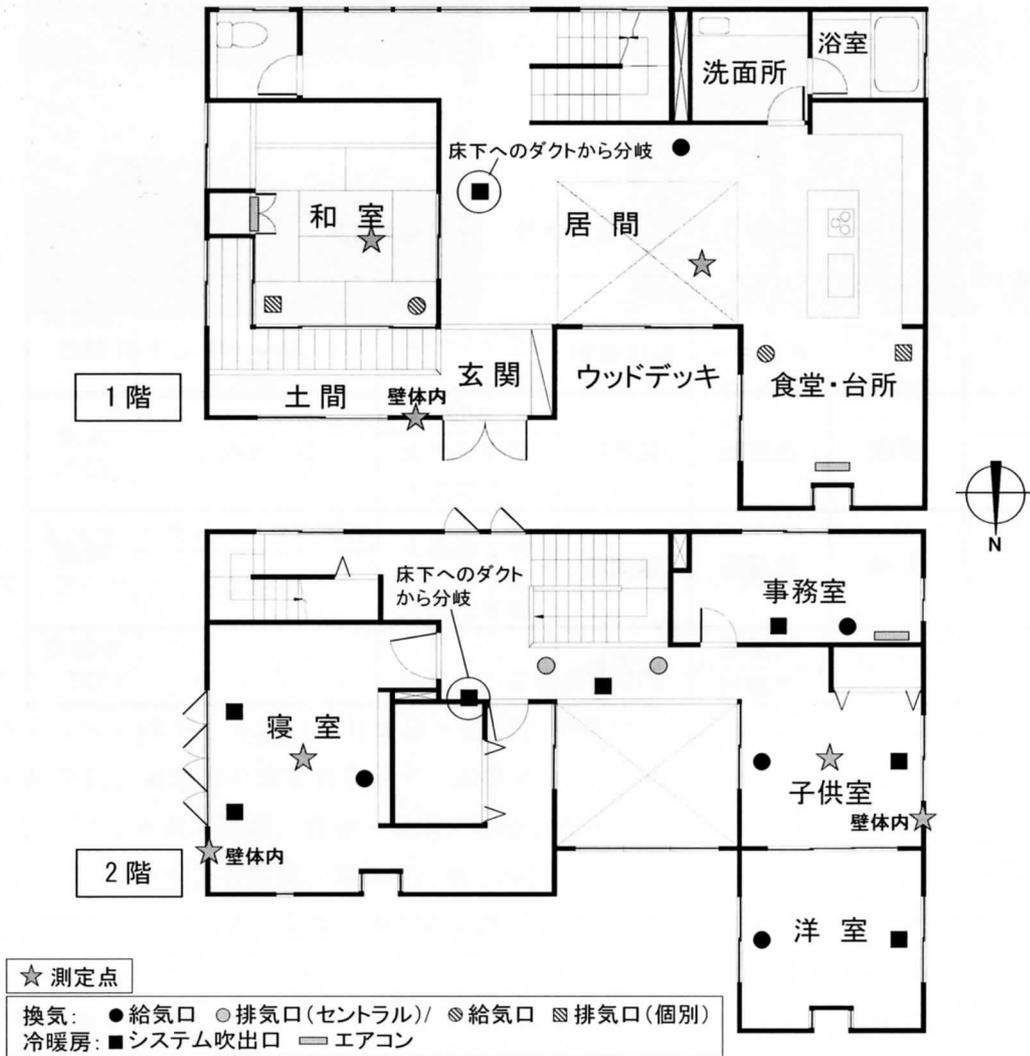


図3-8-51 空気齢の測定点

定常発生法の測定条件を表3.8.13に示す。夏期の測定日は9月9日～11日、冬期は2月13日～15日、春期は5月22日～24日である。1つの条件が終了する度に、ガス濃度が通常のレベルに下がるまで窓開け換気を行う。

夏期と冬期には、2系統の換気システムと冷暖房システムを同時に運転させた場合の測定を行う。冷暖房システムのボリュームダンパーをパラメータとし、夏期には、中間（CaseA-1）、居室側に最大（CaseA-2、2階各室への吹出風量が最大になる状態）、床下側に最大（CaseA-3、床下・2階ホール（東）・1階居間への吹出風量が最大になる状態）の3条件を行う。冬期には、床下・壁体内通気層・小屋裏にできる限り多くの暖気を送って行われる輻射暖房時の空気の移動性状を確認するため、床下側最大・居間以外の吹出口シールあり（CaseB-1）、床下側最大・吹出口シールなし（CaseB-2）、居室側最大・吹出口シールなし（CaseB-3）の3条件を行う。共通条件は、室内専用換気システム：強運転、床下・壁体内・小屋裏専用換気システム：強運転、夏期の冷房温度：25℃、冬期の暖房温度：20℃である。

春期には、2系統の換気システムのみを運転させた場合の測定を行う。室内専用換気システムを強運転（CaseC-1）と弱運転（CaseC-2）にした場合の2条件について測定する。冷暖房システムを運転していないので、自然室温である。

表 3-8-13 測定条件（定常発生法）

Case	測定期間	換気システム		冷暖房システム		冷暖房温度
		居室専用	躯体専用	ボリュームコントローラー	吹出口	
A-1	夏期	強運転	強運転	中間	シールなし	冷房 25℃
A-2				居室側最大		
A-3				床下側最大		
B-1	冬期	強運転	強運転	床下側最大	居間以外シールあり	暖房 20℃
B-2				居室側最大	シールなし	
B-3						
C-1	中間期	強運転	強運転	-	-	冷暖房 なし
C-2		弱運転				

5) 室内外差圧

差圧計を用いて、1階床レベルと2階床レベルの室内外差圧を測定する。差圧計の設置位置は、1階食堂（写真 3-8-43）と2階寝室（写真 3-8-44）である。差圧計の低压側のビニールチューブを、屋外の風圧板（写真 3-8-45）に接続する。風圧板は、食堂の窓に固定したスタイロフォームに設置する。差圧計の測定データはリード線でサーモダックへ送り、パソコンに自動収録する。測定間隔は5分、夏期の測定日は9月5日～15日、冬期は2月8日～16日、中間期は5月16日～24日である。

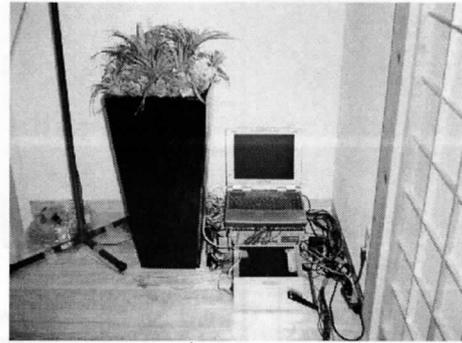


写真 4-5-43 1階の差圧計
(食堂)

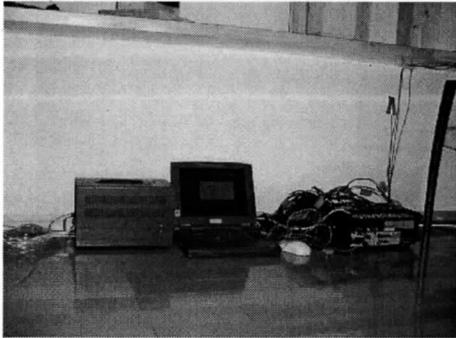


写真 4-5-44 2階の差圧計
(寝室)



写真 4-5-45 風圧板
(ウッドデッキ・食堂側の窓)

6) 温湿度

温湿度センサー付き小型データロガー（写真 3-8-46）または熱電対を用いて、夏期は、冷暖房システムおよびルームエアコンの冷房温度を 25℃にした場合、冬期は暖房温度を 20℃にした場合の各室および床下・壁体内通気層・小屋裏の温湿度を測定する。測定間隔は5分で、夏期の測定日は9月5日～15日、冬期は2月8日～16日、中間期は5月16日～24日である。

図 3-8-52 に、温湿度の測定点を示す。温湿度センサー付き小型データロガーでは気中温湿度を測定し、1階に6点（居間、食堂・台所、和室、洗面所・浴室、玄関・土間、階段ホール）、2階に5点（寝室、洋室、子供室、事務室、ホール）、床下、小屋裏、外気に1点ずつである。設置高さは床上 110cm で、日射の影響を受けない場所に設置する。外気のセンサーはフレキシブルダクトの中に入れ、日射や雨の影響を受けにくいウッドデッキに設置する（写真 4-5-47）。熱電対では、壁体内通気層の気中温度、居間と寝室の上下温度差（写真 4-5-48・49）、グローブ温度（写真 4-5-48・49）、床面・壁面・天井面の表面温度（写真 4-5-50・51・52）の測定を行う。設置高さは、上下温度差が壁体内通気層内には、コンセントボックスから熱電対を挿入する（写真 4-5-42）。

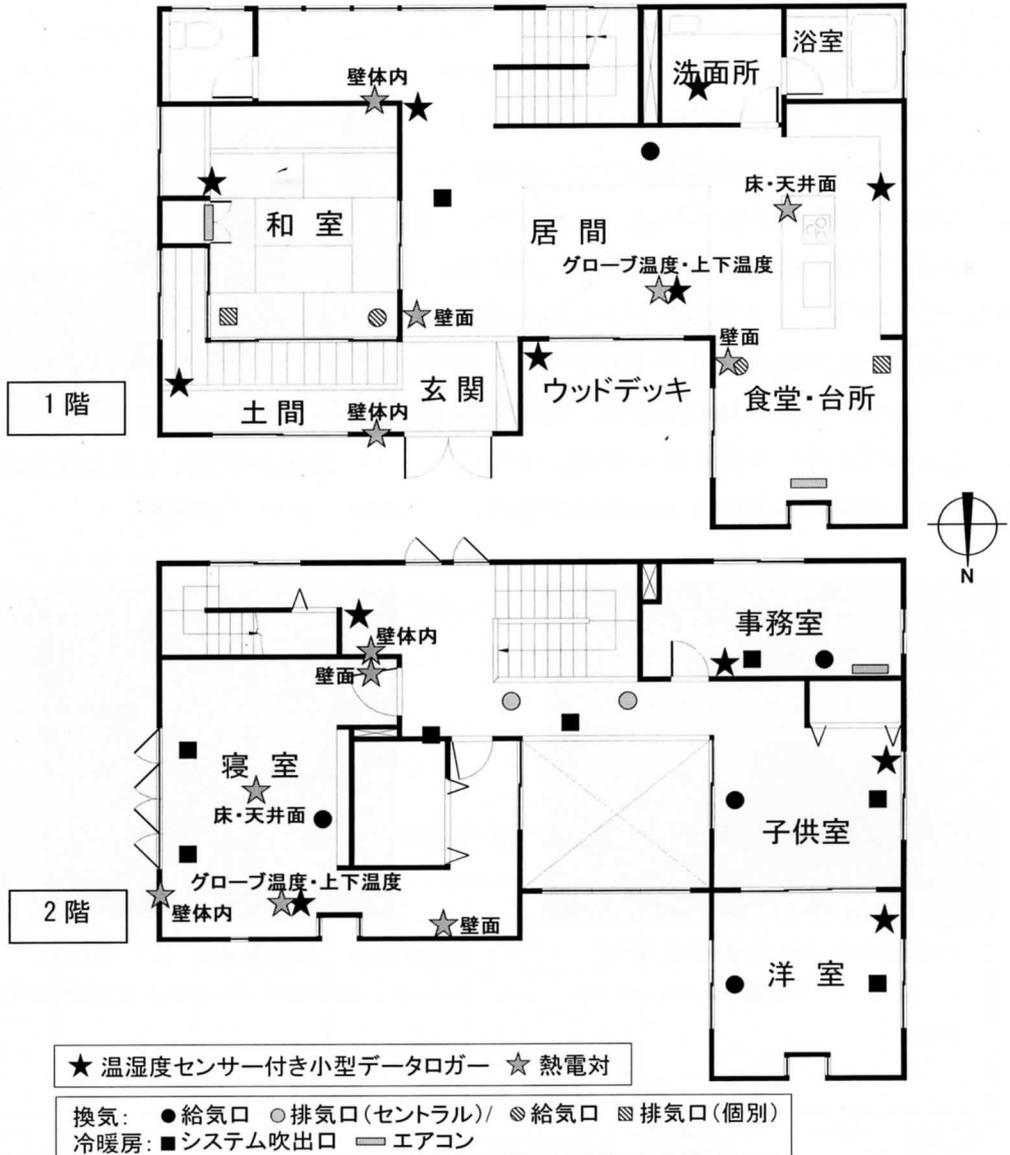


図 3-8-52 温湿度の測定点

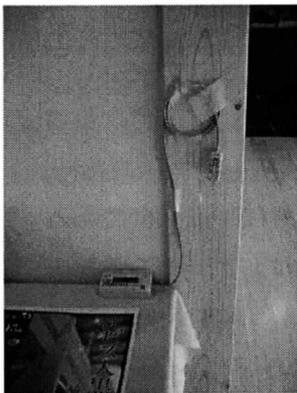


写真 3-8-46 温湿度センサー付き小型データロガー (1階ホール)



写真 3-8-47 温湿度センサー付き小型データロガー (外気・ウッドデッキ)

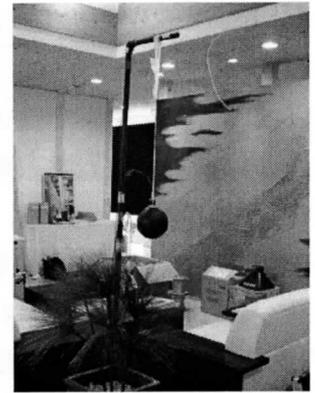


写真 3-8-48 上下温度とグローブ温度の測定の様子(居間)



写真 3-8-49 上下温度とグローブ温度の測定の様子（寝室）

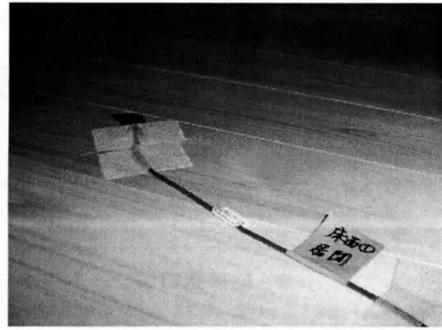


写真 3-8-50 床面の表面温度（居間）

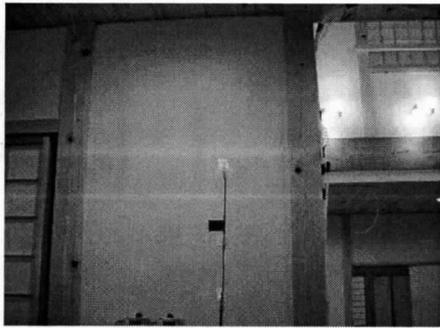


写真 3-8-51 壁面の表面温度（居間）



写真 3-8-52 天井面の表面温度（居間）

(c) 実測結果

1) 建物の気密性能

表 3-8-14 に、住宅全体の気密性能の測定ケースと測定結果を示す。換気システムの給排気口をシールした case1 の相当隙間面積を図 3-8-53 に示したが、夏期は $1.13\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、冬期は $1.34\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、春期は $1.49\text{cm}^2/\text{m}^2$ で、いずれも次世代省エネルギー基準値 ($5\text{cm}^2/\text{m}^2$) を十分満たしており、 $2\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下であることから高気密住宅と言える。隙間面積が早いペースで大きくなっている点に気になるが、今回は乾燥時期である冬期から春期にかけての測定であり、多湿時期に入ると隙間面積が小さくなる可能性も十分あると考えられる。

表 3-8-15 に、測定結果から算出した給排気口の隙間面積を示す。夏期と春期は、給気口、排気口ともに $5.5\sim 6.0\text{cm}$ 角の隙間面積であるが、冬期は排気口の隙間面積が非常に小さい。これは、夏期と春期には、個別換気ユニット（和室、食堂）のシールを屋外から行ったのに対して、冬期には、室内側でシールしたことが原因ではないかと推察される。ここで、給排気口の隙間面積が 65.5cm^2 （夏期と春期の平均値）と仮定すると、冬期の住宅全体の気密性能は $1.17\text{cm}^2/\text{m}^2$ となる。

表 3-8-14 住宅全体の気密性能

ケース 番号	給気口	排気口	床面積当たりの相当隙間 面積(cm ² /m ²)		
			夏期	冬期	春期
			case1	シール	シール
case2	開	シール	1.28	1.46	1.63
case3	開	開	1.44	1.48	1.80

表 3-8-15 給排気口の隙間面積

	算出方法	隙間面積(cm ²)		
		夏期	冬期	春期
給気口	case2-case1	32	26	30
排気口	case3-case2	33	4	36

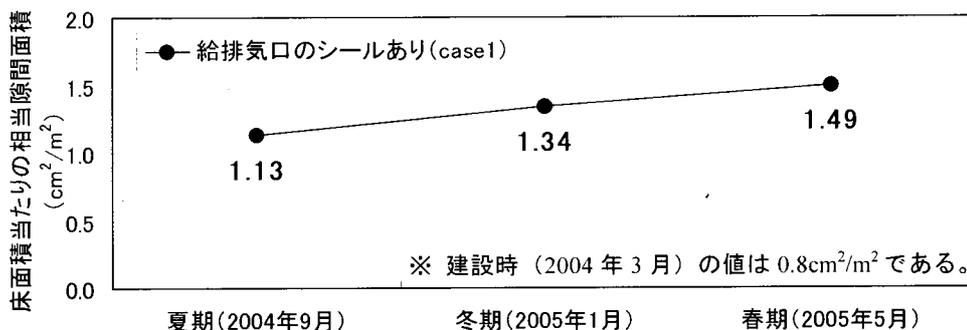


図 3-8-53 住宅全体の気密性能

2) 換気システムの給排気口風量および冷暖房システムの吹出口風量

【換気システムの給排気口風量】

図 3-8-54 に、居室専用換気システムの給排気口風量の測定結果と、各室の気積から算出した換気回数 0.5 回/h に相当する風量 (2 階ホールには排気口が 2 ヶ所あるため、1 ヶ所当たり 0.5 回/h の半分の風量) を示す。この建物は、建築基準法改正後に建設されたものであり、居室で 0.5 回/h の換気回数が確保されるように換気システムの設計が行われている。実測値と換気回数 0.5 回/h の値を比較すると、和室と食堂に設置された局所システムでは、必要風量が十分確保されていることが分かる。一方、セントラルシステムでは、子供室・洋室・事務室に設置された給気口の強運転時の実測値がほぼ換気回数 0.5 回/h、居間の実測値は若干少なく、寝室の値は約 3 分の 1 である。給気口の風量が小さいのに対して、2 階ホールに設置された排気口では風量が大きく、建物の隙間を通じた給気が期待できる。しかし、計画的な換気を行い居室での室内空気汚染を防ぐためには、寝室の給気口風量を増やす必要があると思われる。また、省エネルギーを達成するためには、個別制御が可能な和室・食堂の局所システムは弱運転にして、過大換気を防止した方がよいと考えられる。居間の給気口の実測値をみると、強運転時よりも弱運転時の風量の方が大きくなっている。確認のため何回か測定を行ったが、いずれの場合でも弱運転時の風量の方が 3~4m³/h 大きくなった。この原因は解明されていないが、分岐チャンパー内での圧力変化が影響して、強運転時に 1 階の居間への風量が小さくなっているのではないかと考えられる。

図 3-8-54 には、躯体専用換気システムの床下の給気口風量の測定結果も示したが (夏期は測定していない)、強運転時は、冬期、春期ともに約 40m³/h、弱運転時は、冬期が 30m³/h 弱、春期が約 35m³/h であった。

図 3-8-55 に、居室専用換気システムの給排気バランスを示す。強運転、弱運転ともに、排気風量が給気風量を上回っており、両者の差（夏期：強運転 75.4m³/h・弱運転：29.8m³/h、冬期：強運転 75.4m³/h・弱運転：29.8m³/h、春期：強運転 63.9m³/h・弱運転：31.4m³/h）は、建物の隙間を通じた給気量であると考えられる。室内外差圧の測定結果（平均値）は、夏期では、1 階床レベルが+1.4mmAq、2 階床レベルが-11.9mmAq、冬期では、1 階床レベルが-44.9mmAq、2 階床レベルが-52.0mmAq であり、室内側が室外側に対してほぼ負圧になっている。この結果からも、建物隙間を通して外気が導入されていることが分かる。強運転の場合でも、住宅全体の換気回数が 0.5 回/h には達していない（排気口風量の場合で約 4.4～4.7 回/h）。

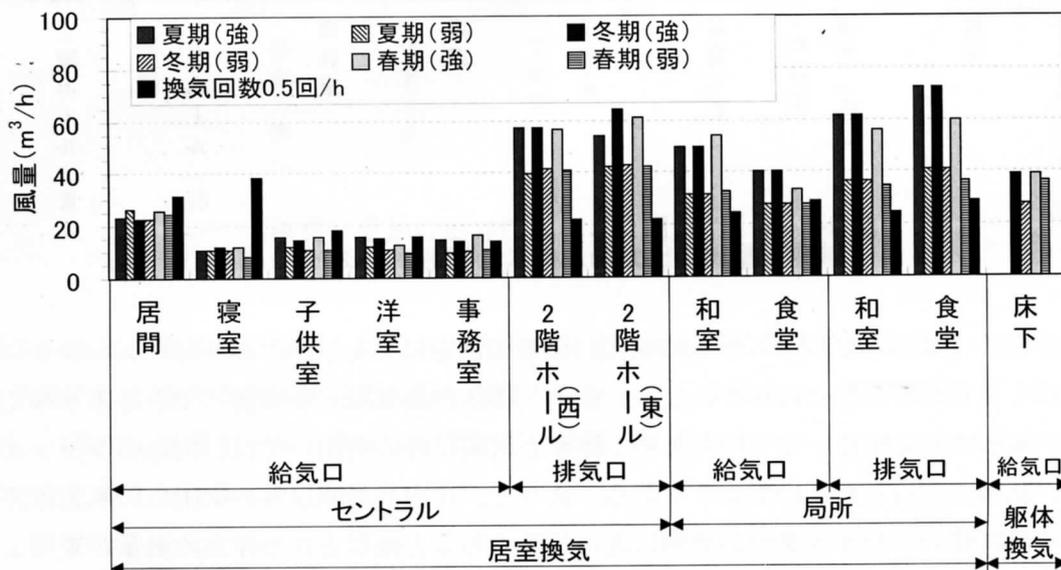


図 3-8-54 居室専用換気システムの給排気口風量

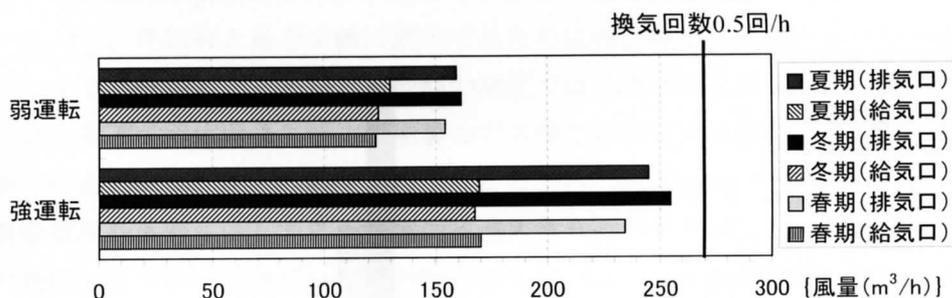


図 3-8-55 居室専用換気システムの給排気バランス

【冷暖房システムの吹出口風量】

図 3-8-56 に、夏期の冷暖房システムの吹出口風量の測定結果を示す。ボリュームコントローラを中間から居室側へ最大にした場合、居間以外の風量がわずかに増加するが、大きな変化は見られない。一方、床下側へ最大にした場合、床下へのダクトから分岐している居間と 2 階ホール（東）の吹出口の風量は、居間で 31m³/h、2 階ホールで 68m³/h 大きくなっており、それ以外では、40～60m³/h 小さくなっている。

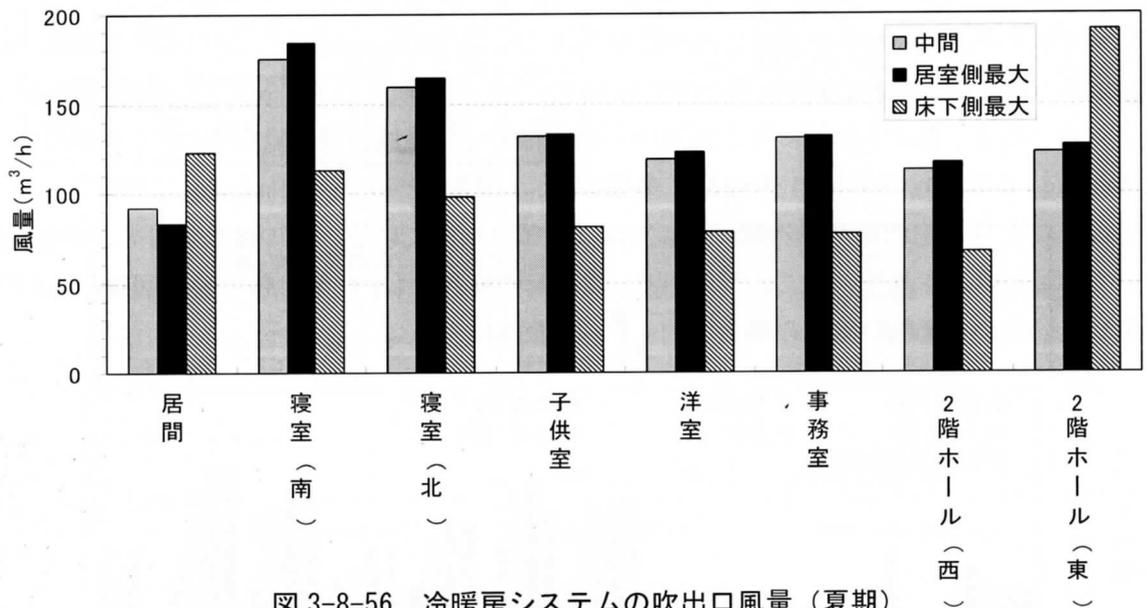


図 3-8-56 冷暖房システムの吹出口風量 (夏期)

図 3-8-57 に、冬期の冷暖房システムの吹出口風量の測定結果を示す。ボリュームコントローラーを中間にした場合の測定は行っていない。床下・壁体内通気層・小屋裏にできる限り多くの暖気を送り、輻射暖房を主体としていたため、洋室と居間以外の吹出口では、内部のシャッターが全閉に近い状態まで絞られていたようである。従って、洋室と居間以外の吹出口の風量は非常に少なく、それに伴い、シャッターが全開に近い状態であると推察される洋室の風量が夏期よりも大きくなっている。居間のシャッターはある程度絞られていたようで、夏期と比べて風量が約半分である。

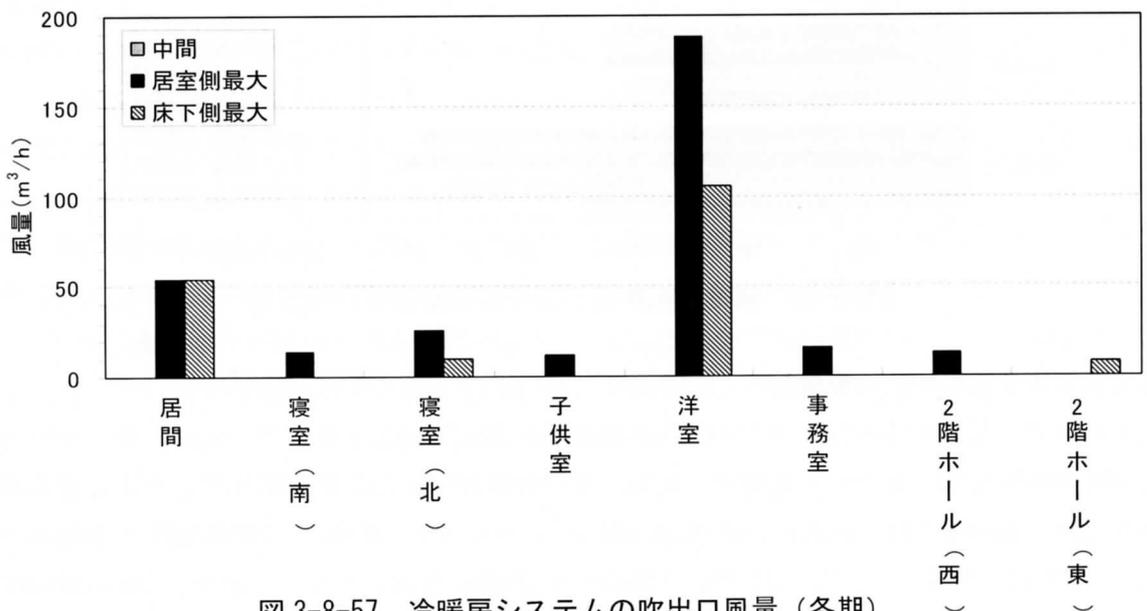


図 3-8-57 冷暖房システムの吹出口風量 (冬期)

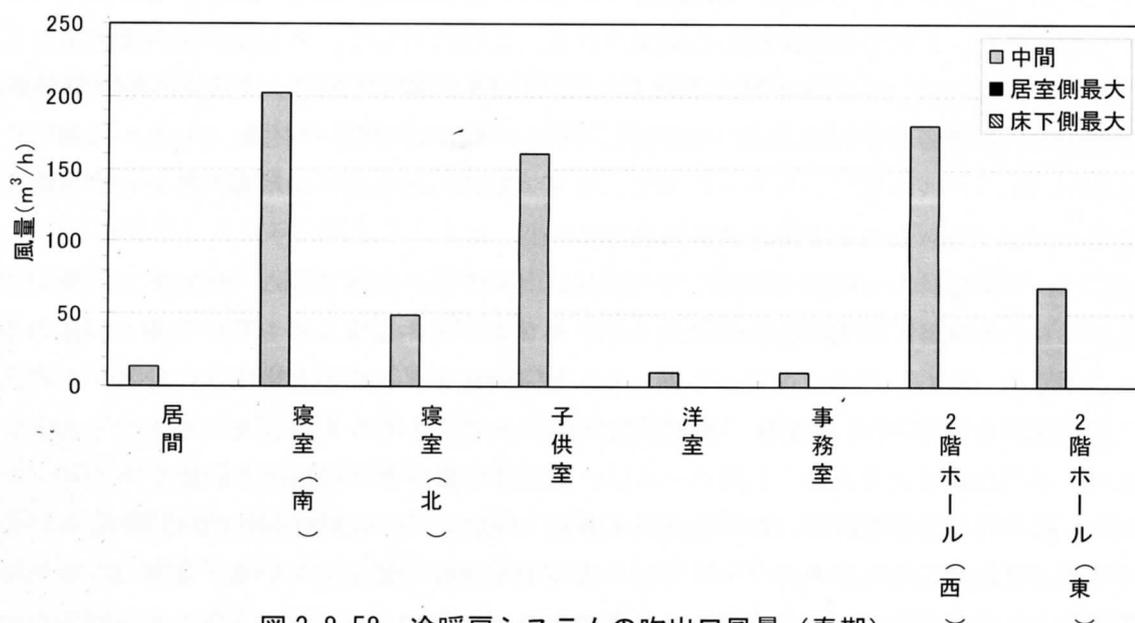


図 3-8-58 冷暖房システムの吹出口風量 (春期)

図 3-8-58 に、春期の冷暖房システムの吹出口風量の測定結果を示す。ボリュームコントローラーを中間にした場合のみの測定である。内部のシャッターは現状のまま測定を行ったが、寝室 (南)、子供室、2階ホール (西) は全開に近い状態、それ以外では、シャッターがある程度絞られていたと考えられる。

3) 各室の外気導入量

対象建物では、躯体専用換気システムにより、床下・壁体内通気層・小屋裏の換気が積極的に行われているので、外気導入量を正確に測定するためには、床下・壁体内通気層・小屋裏のガス濃度も一定にする必要がある。しかし、今回の測定では、ガスの供給を室内のみでしか行っていなかったため、床下・壁体内通気層・小屋裏のガス濃度が設定ガス濃度よりも低くなっていると考えられる (冬期・春期に床下の濃度を測定したところ、約 1.0ppm であった)。従って、本来ならば、気密化された外壁を通して外気が室内へ導入されるわけだが、この測定では、壁体内通気層と室内の間にある気密化されていない内壁を通して外気 (ガス濃度の低い空気) が導入されることになり、今回の結果は本来よりも大きな値であると推察される。

表 3-8-16 に、各ゾーンの換気回数の平均値を示す。夏期には、洗面所・浴室、2階ホールの換気回数が 0.2 回/h 未満と非常に小さくなっている。これは、これらのゾーンに給気口が設置されていないためである。この 2 つのゾーンに 1階ホール (同様に、給気口が設置されていない) を加えた 3 つのゾーン以外の換気回数はほぼ 0.5 回/h を満たしており、住宅全体の換気回数は 0.7 回/h となっている。

一方、冬期になると、住宅全体の換気回数は夏期とほぼ同じであるが、1階では、玄関・土間以外のゾーンで換気回数が増加し、2階では、洋室以外のゾーンで換気回数が減少している。こ

これは温度差換気の影響で、外気温が室内温度よりも高い夏期には、温度の高い外気が2階の建物隙間から導入され、1階の建物隙間から排気される。これに対して、外気温が室内温度よりも低い冬期には、温度の低い外気が1階から導入され、2階から排気される。冬期の洋室の換気回数が多いのは、2階の洋室以外の室の冷暖房システムの吹出口がシールされていたのに対して、洋室の吹出口はシールされていなかったため、床下・壁体内通気層・小屋裏の外気（ガス濃度の低い空気）が多く導入されたためと考えられる。

春期には、照明器具から発生する熱により室温が上昇するのを防ぐため、冷房を25℃設定で運転させており、外気温が約18℃だったことから、外気温が室内温度よりも低い冬期と同様の空気の流れが生じる（但し、内外温度差が冬期よりも小さいため、その流量は小さくなる）と考えられる。測定結果を見ると、1階全体の換気回数は0.65/hで、2階の0.57回/hよりも少し大きくなっており、妥当な結果と言える。1階ホールは、測定器の都合上、居間と合わせて1つのゾーンとみなす。給気口の設置されていない洗面所・浴室、2階ホールの換気回数は0.13回/h、0.25回/hと小さくなっており、それ以外のゾーンでは、ほぼ0.5回/hを満たしている。春期は、自然換気の駆動力となる内外温度差が減少するため、夏期・冬期と比較して、住宅全体の換気回数が小さくなっている。

表 3-8-16 各ゾーンの換気回数

	室名	室容積 (m ³)	換気回数(回/h)		
			夏期	冬期	春期
2階	事務室	27.2	1.20	0.18	0.59
	子供室	36.0	0.48	0.31	1.00
	洋室	30.9	1.29	2.05	0.42
	ホール	89.2	0.09	0.01	0.25
	寝室	76.2	0.88	0.18	0.57
	合計・平均	259.5	0.79	0.54	0.57
1階	洗面所・浴室	22.7	0.06	0.19	0.13
	玄関・土間	36.5	0.45	0.39	0.58
	和室	49.3	1.33	1.39	1.26
	食堂・台所	57.7	0.79	0.93	0.76
	ホール	49.2	0.29	1.08	0.49
	居間	62.5	0.68	0.84	
合計・平均	278.0	0.60	0.80	0.65	
合計・平均	537.5	0.70	0.67	0.61	

※ 室内のみでガスを発生。

※ 春期は、1階ホールと居間を1つのゾーンとみなす。

4) 換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状

【躯体専用換気システムの空気移動性状（夏期・SF₆濃度の測定結果）】

図 3-8-59～61 に、躯体専用換気システムの給気ダクト内で SF₆ ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果（夏期）を示す。

躯体専用換気システムの給気ダクトは、小屋裏に設置された熱交換ユニットから床下空間まで伸びている。すなわち、給気ダクトに隙間がほとんどないと仮定すれば、ダクト内で発生した SF₆ のほとんどが床下空間へ送られるということになり、各測定点の濃度履歴から、床下へ供給された空気がどのように移動しているかを確認できる。

CaseA-1～A-3 とともに、濃度上昇の順番はほぼ同じであった。濃度に振動が見られるが、これは、測定点における空気の流れの影響と思われる。

床下の濃度は最も早く濃度が上昇するはずであるが、実際は、他の測定点よりも遅くなっている。これは、床下の測定点の設置位置に問題があり、給気ダクトから給気される空気を捕らえることができなかったのではないかと考えられる。また、本来ならば、床下から壁体内通気層を通過して小屋裏へ到達した空気は、冷暖房ユニットの吸込口からユニット内へ送られていくが、測定結果では、ユニット内の濃度上昇が吸込口よりも早くなっている。このことも同様に測定点の設置位置の問題であると思われる。

次に、壁体内通気層と小屋裏の測定点に注目すると、壁体内（玄関）、壁体内（子供室）、壁体内（寝室）、小屋裏に設置された冷暖房ユニット（吸込口・ユニット内）の濃度が上昇していることから、冷暖房ユニットで冷やされた空気が床下へ供給された場合に、その空気が壁体内通気層を通過して小屋裏へ上昇していることが確認された。2 階の測定点の子供室と寝室の濃度上昇に差が見られるのは、空気の移動経路の影響ではないかと推察される。躯体専用換気システムの給気口が設置されているのは居間の中央付近の床下であり、その地点から子供室の測定点が設けられている西側外壁までは、間仕切壁が 1 つもない。一方、寝室のある東外壁の手前には和室と居間の間仕切壁がある。その部分の壁体内通気層を移動経路とする空気の量が多かったため、寝室の壁体内の濃度上昇が遅かったと考えられる。

ここで、土間コンクリートが打ってあり床下からの躯体換気ができない位置にある壁体内（玄関）の濃度が、床下よりも早く定常濃度に達することが疑問となる。後述する冬期・春期では、測定点の位置や設置方法は夏期と同様であるにも関わらず、壁体内（玄関）の濃度の上昇が他の測定点よりも遅いという結果であった。夏期（冷房していた）には室温が外気温よりも低く、冬期（暖房していた）と春期（冷暖房はしていないが、照明からの発熱で室温が高い状態だった）は室温の方が高くなるため、温度差換気の影響を強く受けて、圧力バランスが冬期・春期とは異なり、1 階の床レベル付近では、コンセントボックス等の内装の隙間を通して室内側（居間）から壁体内通気層へ流入する空気量が増加したため、壁体内（玄関）のガス濃度上昇が早くなったと推察される。居間の濃度上昇が最も早い原因は定かではないが、ウッドデッキに設置した測定機器から漏れるガスがウッドデッキ付近に滞留し、建物隙間を通過して室内に侵入した可能性も考

えられる。

床下・小屋裏・壁体内通気層の SF₆ は、それらの空間と各室との間に存在する内装の隙間を通過して室内へ移動する。居間・子供室・寝室の濃度履歴は、それぞれに隣接する壁体内（玄関・子供室・寝室）とだいたい同じであることから、内装の隙間面積が大きいのではないかと推察される。

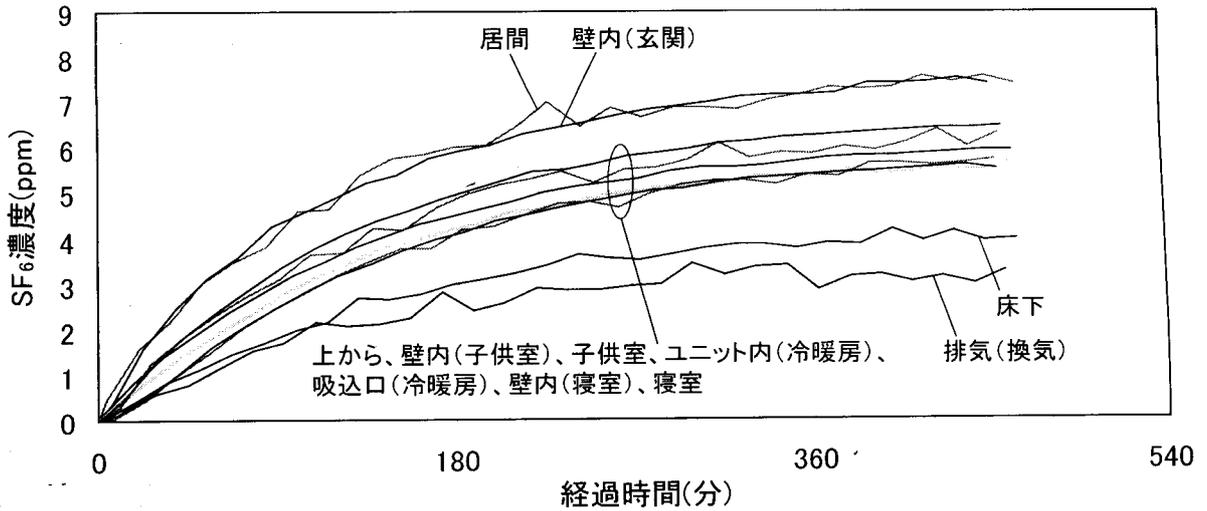


図 3-8-59 SF₆ ガス濃度 (Case A-1 : 夏期・ホリムコントローラ中間・給気ダクト (換気) でガス発生)

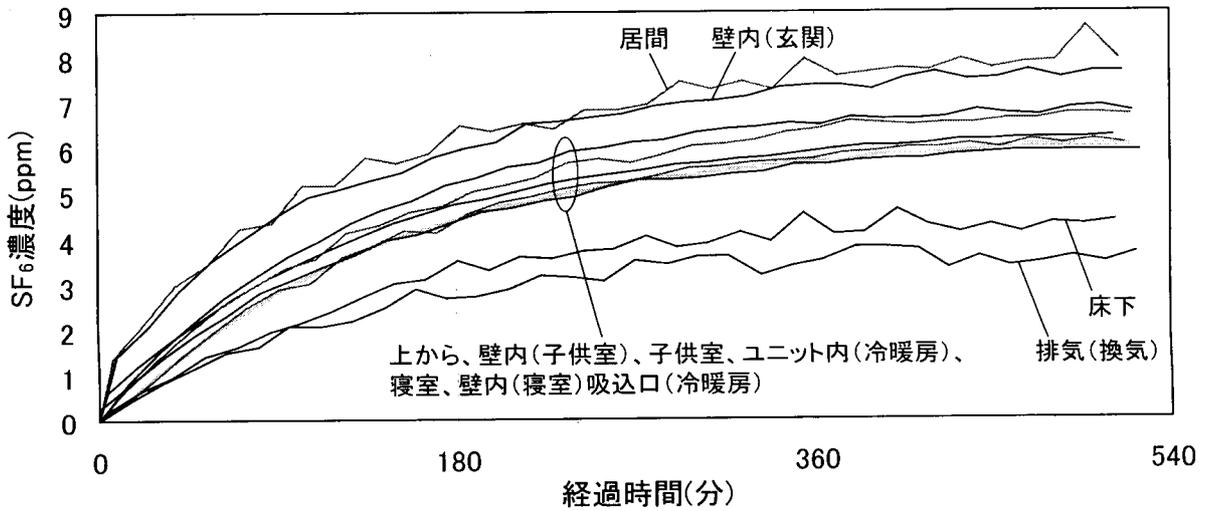


図 3-8-60 SF₆ ガス濃度 (Case A-2 : 夏期・ホリムコントローラ居室側最大・給気ダクト (換気) でガス発生)

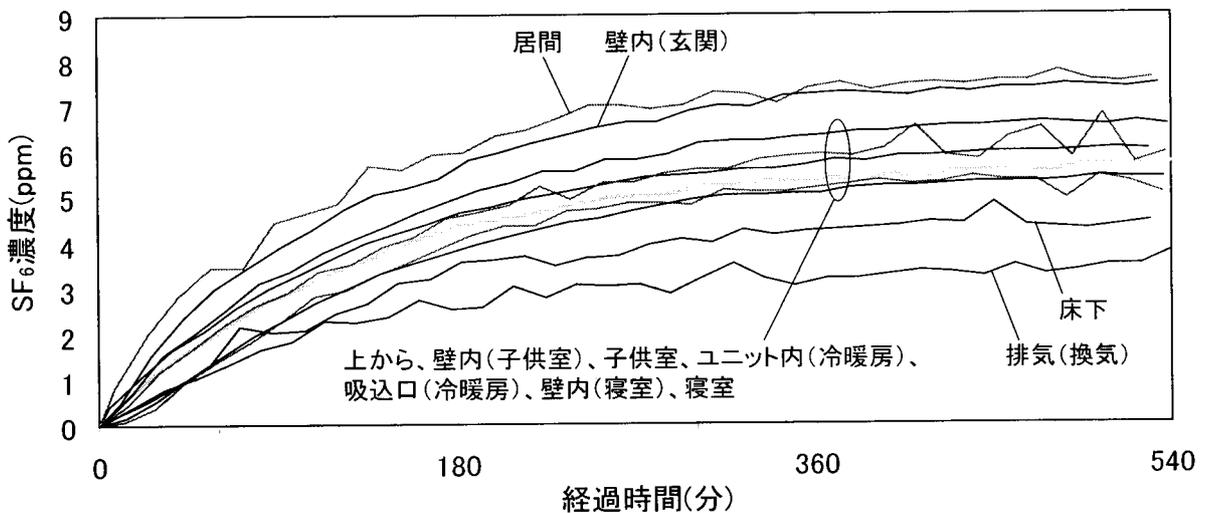


図 3-8-61 SF₆ ガス濃度 (Case A-3 : 夏期・ホリムコントローラ床下側最大・給気ダクト (換気) でガス発生)

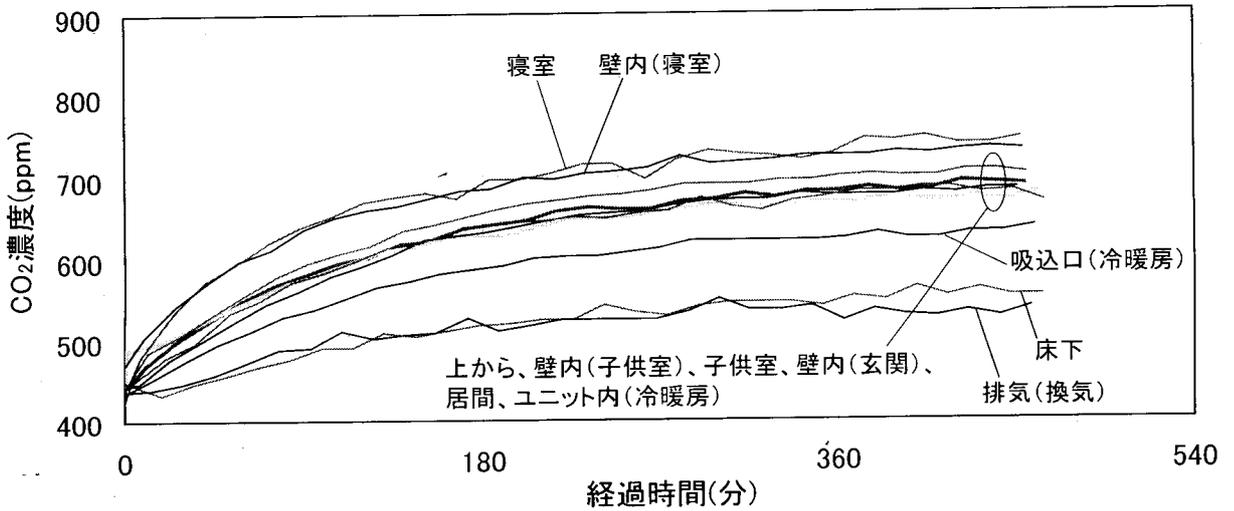


図 3-8-62 CO₂ ガス濃度 (Case A-1: 夏期・ホリユ-ムコントローラ-中間・ユニット (冷暖房) でガス発生)

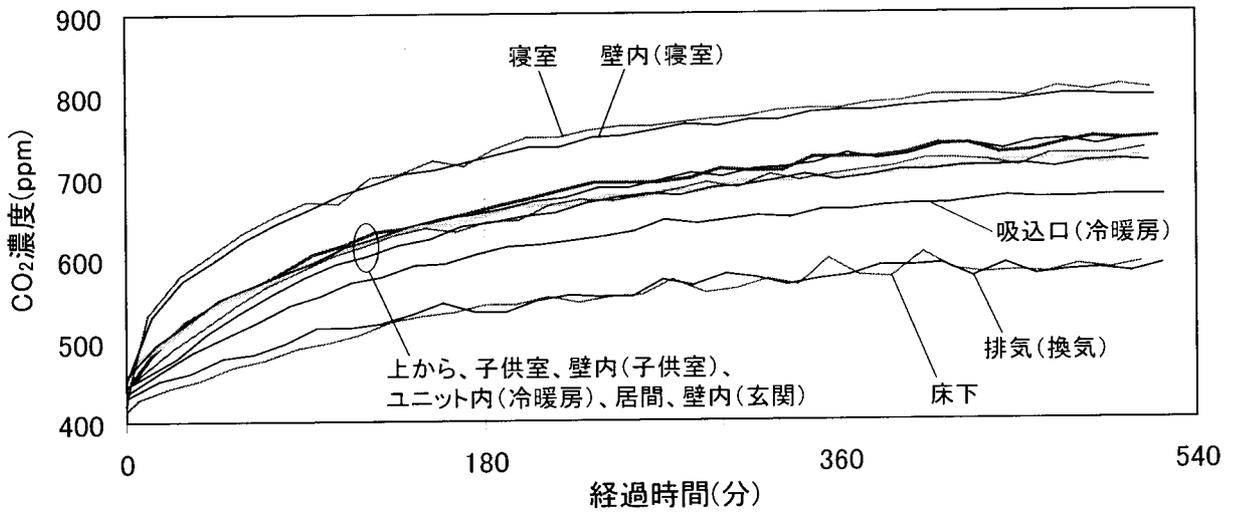


図 3-8-63 CO₂ ガス濃度 (Case A-2: 夏期・ホリユ-ムコントローラ-居室側最大・ユニット (冷暖房) でガス発生)

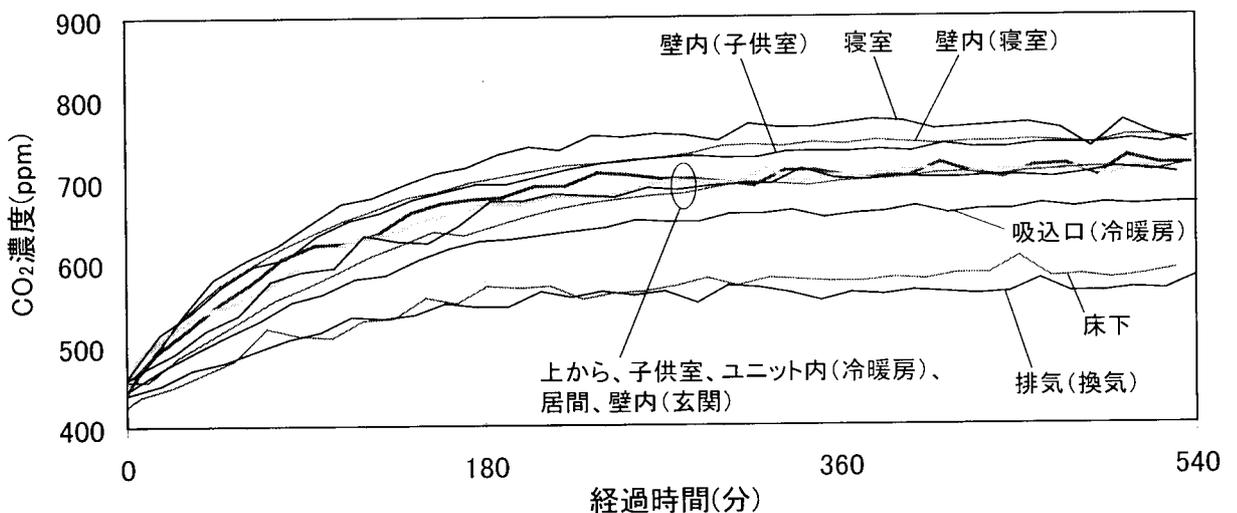


図 3-8-64 CO₂ ガス濃度 (Case A-3: 夏期・ホリユ-ムコントローラ-床下側最大・ユニット (冷暖房) でガス発生)

【冷暖房システムの空気移動性状（夏期・CO₂濃度の測定結果）】

図3-8-62～64に、冷暖房システムのユニット内でCO₂ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果（夏期）を示す。

Case1～3ともに、濃度上昇の順番はほぼ同じであった。しかし、冷暖房システムのボリュームコントローラーを床下側に最大にしたCase3では、ボリュームコントローラーを中間にしたCase1、居室側に最大にしたCase2と比較して、寝室と壁体内（寝室）の濃度が低く、壁体内（子供室）の濃度が高く、床下の濃度も若干高くなっている。また、Case2（居室側に最大）では、寝室と壁体内（寝室）の濃度がCase1（中間）よりも高くなっている。これは、ボリュームコントローラーを切り替えることによって、冷暖房システムの吹出風量に変動するためである。

表3-8-17に、冷暖房システムの吹出口の風量を示す。吹出風量の室容積に対する割合（回/h）を見ると、寝室では、中間の場合（Case1）に4.4回/h、居室側最大の場合（Case2）に4.6回/h、床下側最大の場合（Case3）に2.8回/hで、前述したCaseの違いによる濃度履歴の変化に対応していることが分かる。Case3（床下側最大）では、壁体内（子供室）の濃度が高くなっていたが、これは、床下への吹出風量が増加したためであると考えられる。

表3-8-17 冷暖房システムの吹出口風量

測定位置	風量(m ³ /h)			室容積	風量の室容積に対する割合(回/h)			
	中間	居室側最大	床下側最大		中間	居室側最大	床下側最大	
セントラル 吹出口	居間	91.8	83.2	122.8	62.5	1.5	1.3	2.0
	寝室(南)	175.4	184.0	112.8		76.2	4.4	4.6
	寝室(北)	159.0	164.2	97.7	36.0		3.7	3.7
	子供室	132.1	132.4	81.2		30.9	3.9	4.0
	洋室	119.0	123.2	77.9	27.2		4.8	4.8
	事務室	130.8	131.9	77.0		89.2	2.6	2.7
	2階ホール(西)	112.4	116.9	67.4	89.2		2.6	2.7
	2階ホール(東)	122.9	126.4	191.3		2.6	2.7	2.9

【空気齢の算出結果（夏期）】

図3-8-65に、躯体専用換気システムの給気ダクト内でSF₆ガスを発生させた場合の算出結果を示す。前述したように、ガス濃度の振動が見られたので、移動平均をとった後に空気齢の算出を行った。

空気齢の値は90～150分であり、濃度履歴の測定結果で、濃度上昇が早かった測定点では空気齢が小さく、濃度上昇が遅かった測定点では空気齢が大きくなっている。冷暖房システムのボリュームコントローラーを床下側に最大にした場合のCase3では、Case1（中間）、Case2（居室側に最大）と比較して、床下の空気齢が小さくなっている。

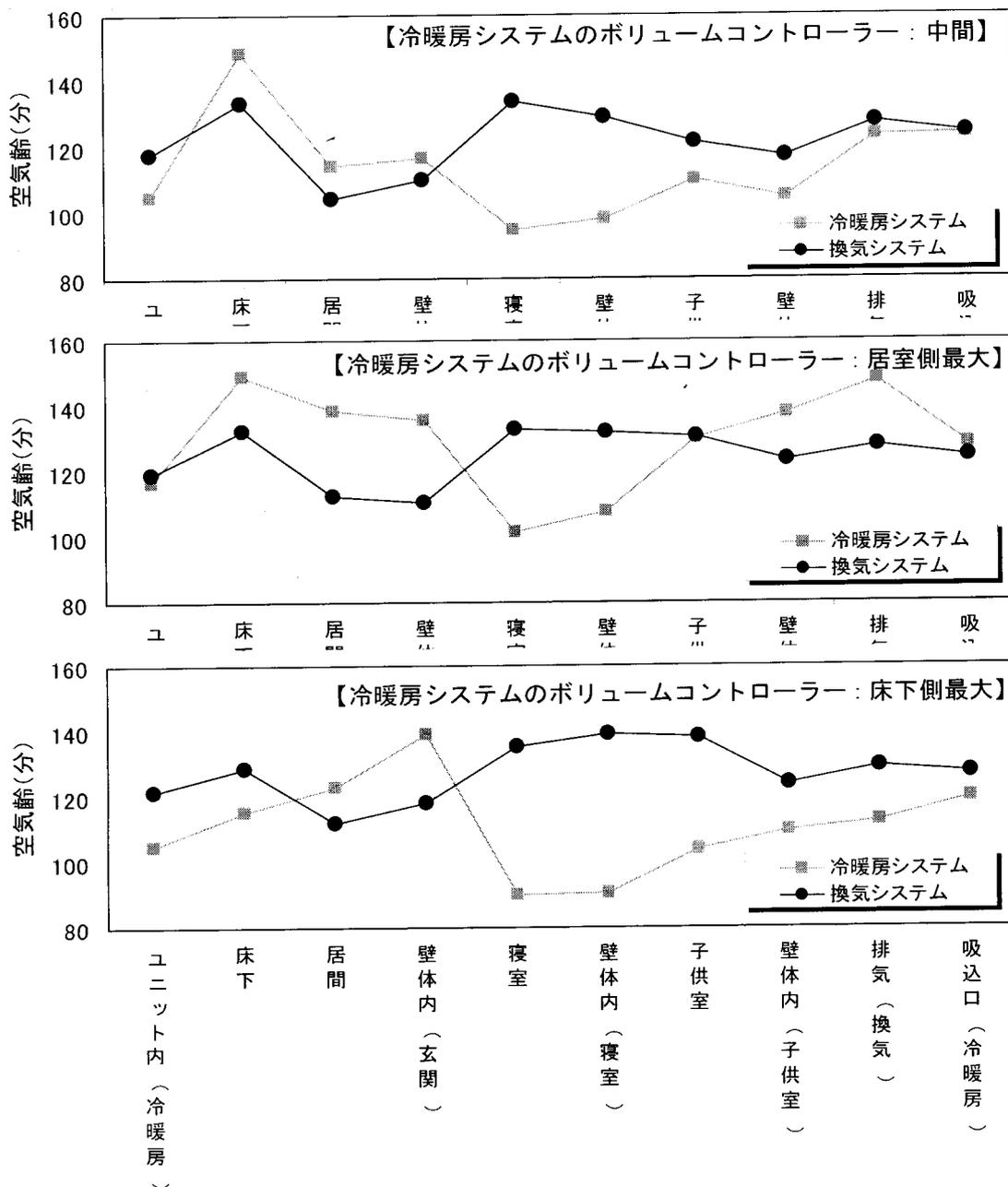


図 3-8-65 空気齢の算出結果 (夏期)

【躯体専用換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状 (冬期)】

図 3-8-66～68 に、躯体専用換気システムの給気ダクト内で SF₆ ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果 (冬期) を示す。CaseB-1～B-3 とともに、濃度上昇の順番はほぼ同じであったが、居室側に最大にした場合 (CaseB-3)、床下側に最大にした場合 (CaseB-1、CaseB-2) と比べて、居間以外の濃度のばらつきが小さくなる。濃度に振動が見られるが、これは、測定点における空気の流れの影響と思われる。

床下の濃度は最も早く濃度が上昇するはずであるが、実際は、他の測定点よりも遅くなっている。夏期の結果を受けて測定点を給気ダクトの出口に移動したが、給気ダクトから給気される空気を捕らえることができなかつたようである。チューブを給気ダクト内に数 10cm 挿入し、チューブ内に空気が流れ込みやすい向きにチューブを設置する必要がある。

夏期と大きく異なる点は、壁体内（玄関）の濃度がほとんど上昇していないことである。壁体内（玄関）の測定点は、直接床下からの躯体換気ができない位置にあるので、妥当な結果と言える。おそらく、夏期とは空気の流れる方向が逆転して、1 階部分では、内装の隙間を通して壁体内通気層から室内側へ空気が流入し、2 階部分では、室内側から壁体内へ空気が移動すると考えられる。従って、2 階の寝室では、壁体内と比べて後から室内側の濃度が上昇している。

居間の濃度上昇は夏期よりも一段と早い。前述したように、測定機器から漏れるガスがウッドデッキ付近に滞留し、建物隙間を通過して室内に侵入していると仮定すると、温度差換気の影響で夏期よりも漏入量が増加したことが、居間の濃度上昇を促進させていると説明できる。また、子供室の濃度が壁体内（子供室）よりも早く上昇するのも、居間の濃度上昇が原因であると考えられる。寝室の間仕切扉や建具は完全に閉じられていたのに対して、子供室では、2 階ホールとの間仕切扉が設置されておらず、吹き抜けに面した障子がチューブを通すために少し開いていた。

図 3-8-69～71 に、冷暖房システムのユニット内で CO_2 ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果（冬期）を示す。CaseB-1～B-3 とともに、濃度上昇の順番はほぼ同じであったが、居室側に最大にした場合（CaseB-3）、床下側に最大した場合（CaseB-1、CaseB-2）と比べて、居間以外の濃度のばらつきが小さくなる。

夏期と比較して大きく異なるのは、床下の吹出しダクトの出口に設置した測定点の濃度が、最も早く上昇し始めたことである。続いて、壁体内（寝室）と壁体内（子供室）が上昇し、冷房時よりも暖房時の方が、壁体内通気層における空気の上昇がより短い時間で行われることが伺える。

【居室専用換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状（春期）】

図 3-8-72～73 に、居室換気システムの給気ダクト内で SF_6 ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果（春期）を示す。この場合、 SF_6 で色付けされた空気は、給気口の設置された居間・子供室・寝室に供給され、その後、2 階ホールへと移動し排気されるので、室内側の濃度が先行して上昇すると考えられるが、室内側の空気は、内装の隙間を通して室内側と壁体内の間を移動しているため、壁体内の濃度も早い段階で上昇しているのが分かる。

図 3-8-74～75 に、居室換気システムの給気ダクト内で CO_2 ガスを発生させた場合のガス濃度の測定結果（春期）を示す。

基本的には、冬期の SF_6 濃度の結果と同じだが、異なっているのは、寝室と壁体内（寝室）の濃度の立ち上がりがほぼ同じであることである。これは、内外温度差が冬期よりも小さくなった影響で、2 階の床レベル近辺では、壁体内から室内側へ空気が流入したためと推察される。また、冬期の結果を受けて、床下のチューブの設置位置をダクトの内部に変更したが、濃度の上昇の仕方は変わらなかった。この原因については明らかになっていない。

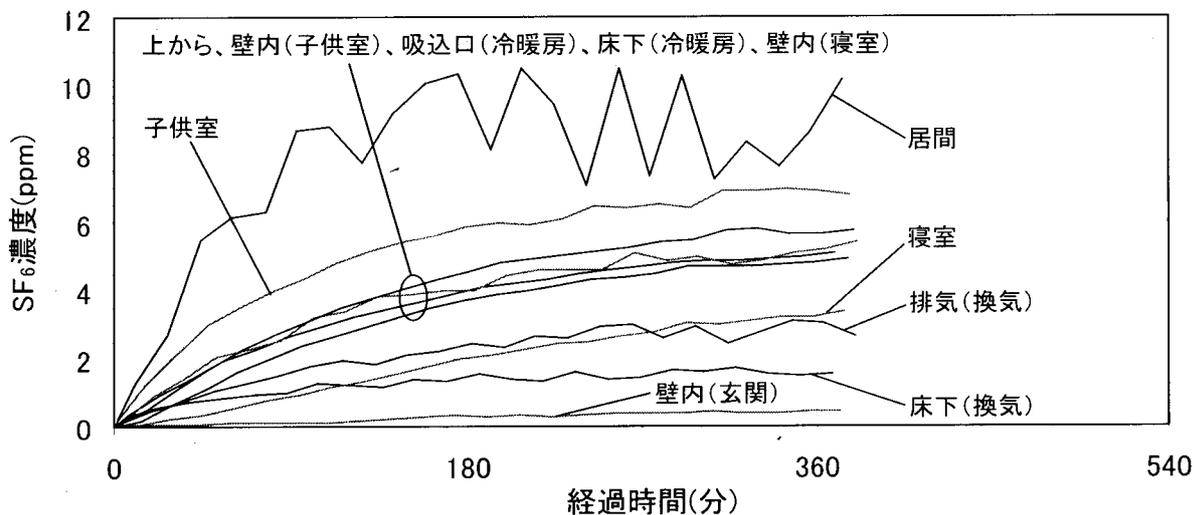


図 3-8-66 SF₆ガス濃度 (CaseB-1 : 冬期・床下側最大・居間以外シールあり・給気ダクト (換気) でガス発生)

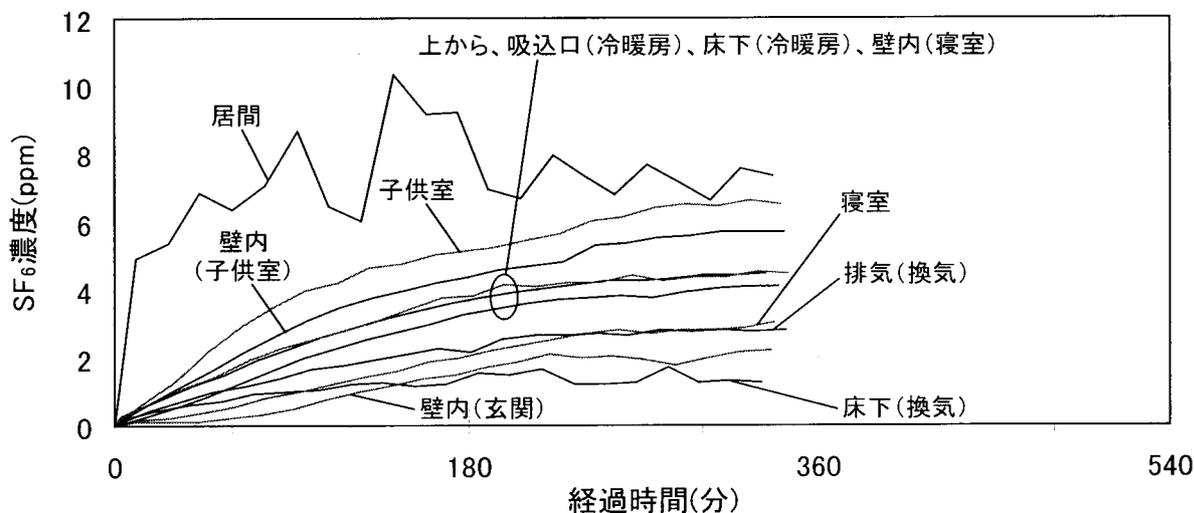


図 3-8-67 SF₆ガス濃度 (Case B-2 : 冬期・床下側最大・給気ダクト (換気) でガス発生)

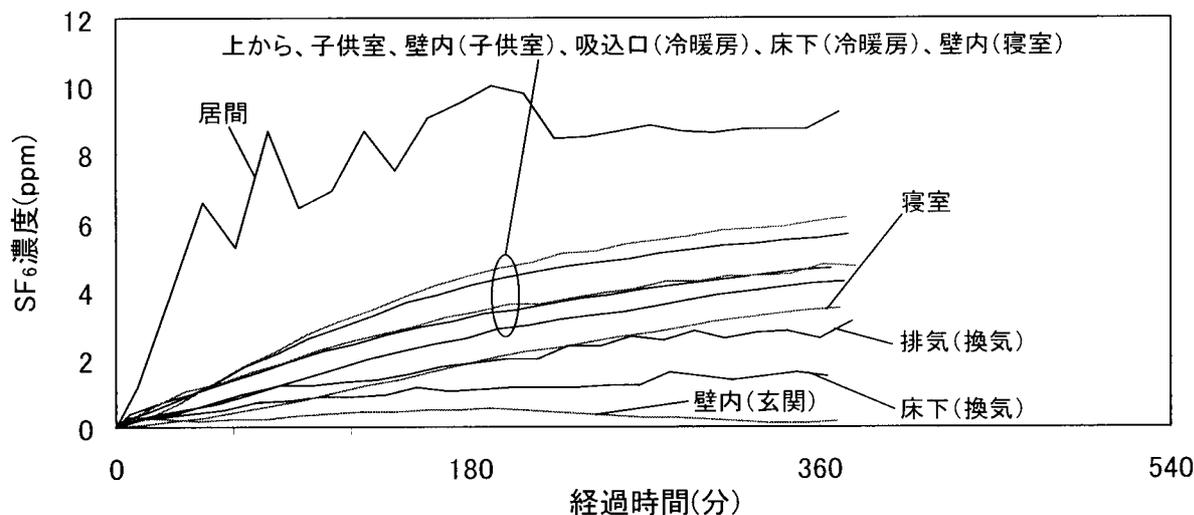


図 3-8-68 SF₆ガス濃度 (Case B-3 : 冬期・居室側最大・給気ダクト (換気) でガス発生)

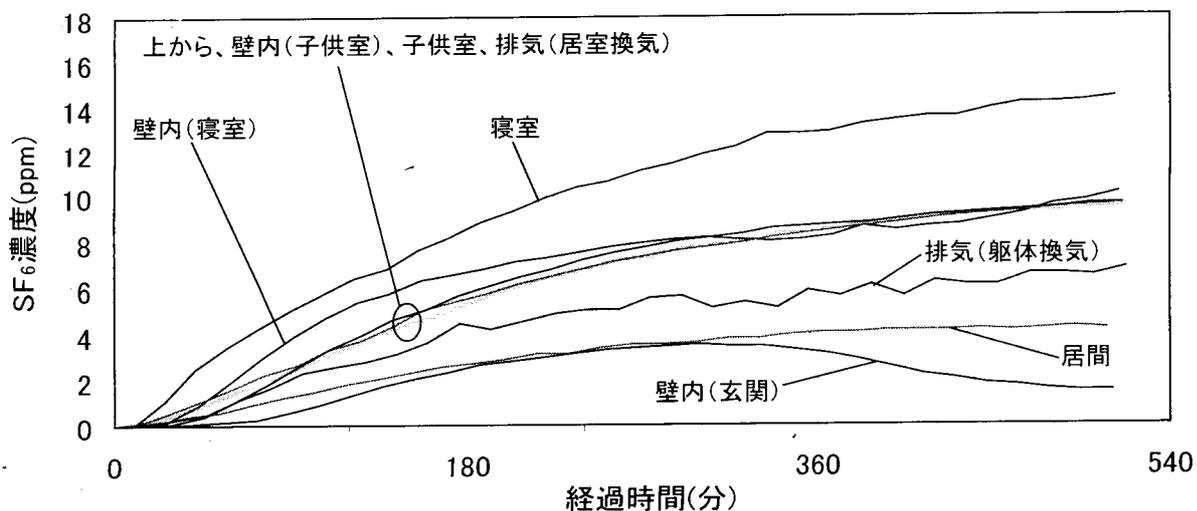


図 3-8-72 SF₆ ガス濃度 (CaseC-1 : 春期・居室換気強運転・給気ダクト (居室換気) でガス発生)

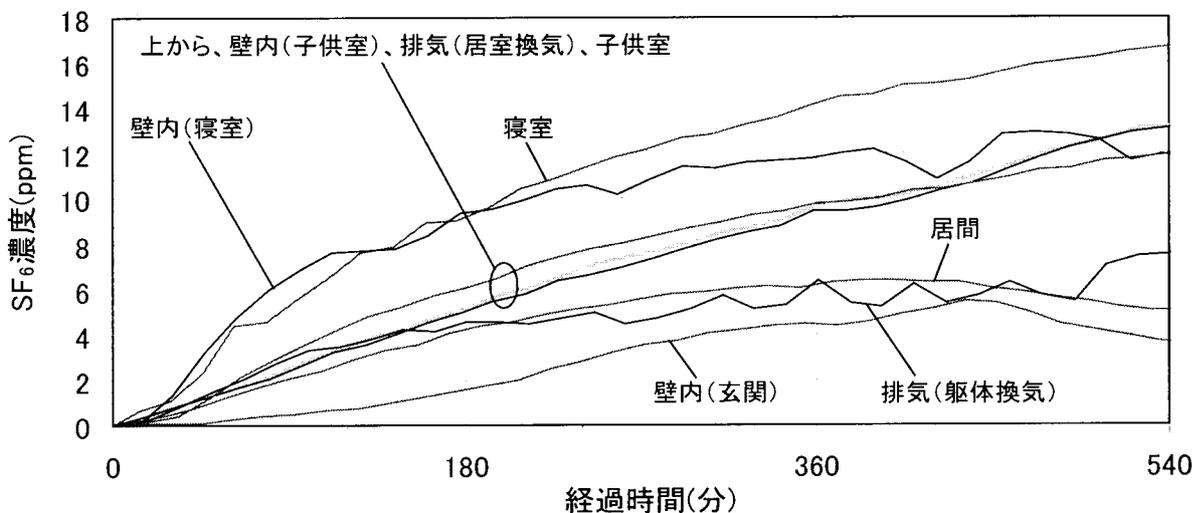


図 3-8-73 SF₆ ガス濃度 (Case C-2 : 春期・居室換気弱運転・給気ダクト (居室換気) でガス発生)

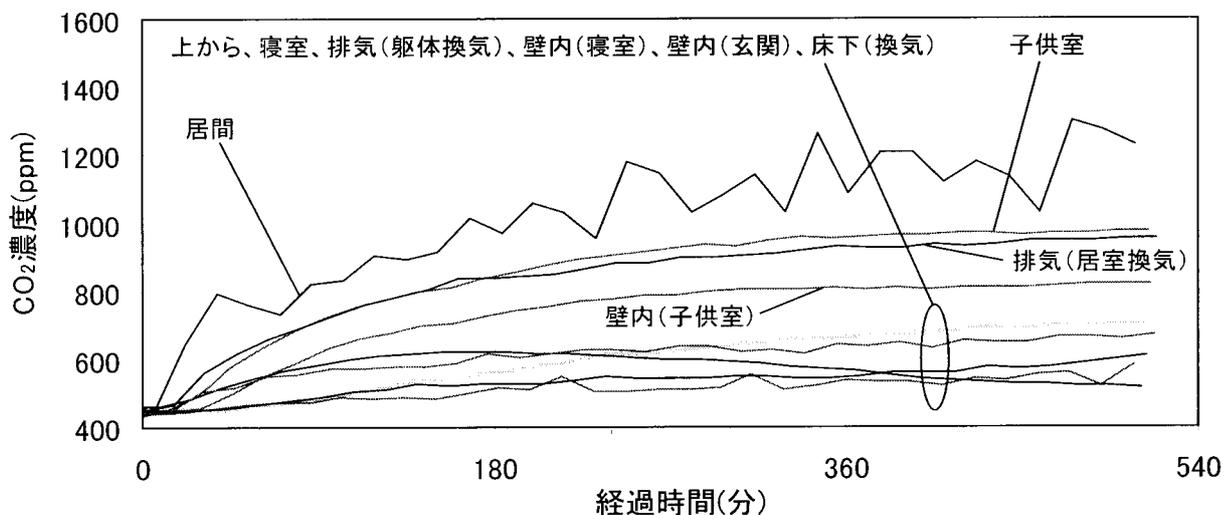


図 3-8-74 CO₂ ガス濃度 (CaseC-1 : 春期・居室換気強運転・給気ダクト (居室換気) でガス発生)

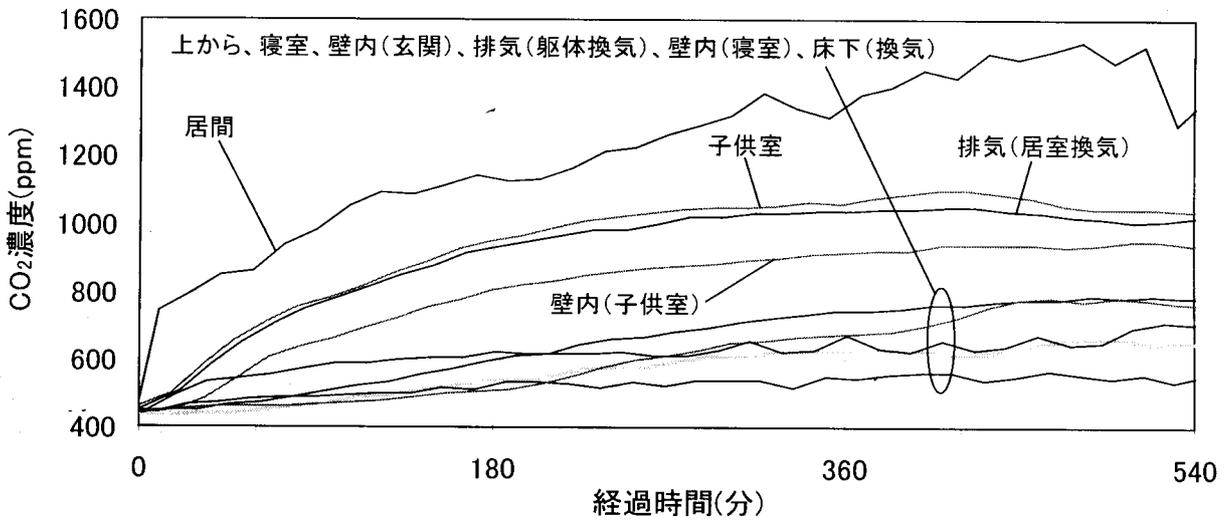


図 3-8-75 CO₂ ガス濃度 (Case C-2 : 春期・居室換気弱運転・給気ダクト (居室換気) でガス発生)

5) 外気・室内・床下・壁体内・小屋裏の温湿度

【夏期の測定結果】

来客の多い土曜日、日曜日に当たる9月4日・5日・11日・12日は玄関の出入りが多い。また、躯体換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状について測定した9月9日～11日・12日～13日には、室内のガス濃度を下げるために窓開け換気を行っている時間帯がある。

図 3-8-76・78・80 に、各室・床下・壁体内通気層・小屋裏の温度の測定結果を示す。図 3-8-76・図 3-8-78 を見ると、各室の温度は、冷房の設定温度である 25℃より若干低めに維持されているのが分かる。子供室と洋室の温度は、他室よりも低い。洗面所・浴室の温度が 25℃より高いのは、冷暖房システムの吹出口が設置されていないためである。図 3-8-80 を見ると、冷暖房システムの運転により、床下・壁体内通気層・小屋裏の温度が 23～27℃に維持されていることが分かる。壁体内 (寝室) の温度は、測定期間の後半に 22℃付近まで低下している。日射の影響を受ける日中には、床下と比べて小屋裏の温度が上昇する。

図 3-8-77・79・81 に、各室・床下・壁体内通気層・小屋裏の相対湿度の測定結果を示す。各室の相対湿度は 50～60%である。1階について見ると、温度が他室より低い和室では、相対湿度が他室よりも高く 70%まで上昇するときもある。一方、温度が他室より高い洗面所・浴室では、相対湿度が他室よりも低くなる。2階でも同様に、各室の相対湿度に多少のばらつきが見られる。

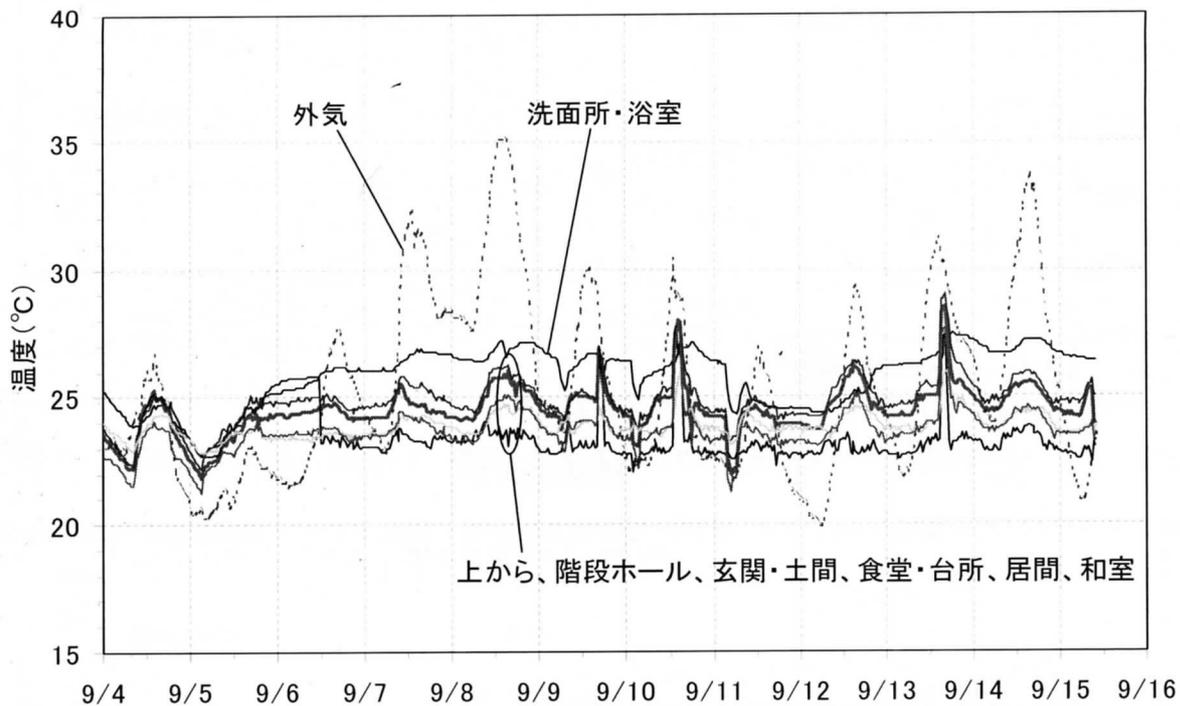


図 3-8-76 温度の測定結果 (夏期 : 1階)

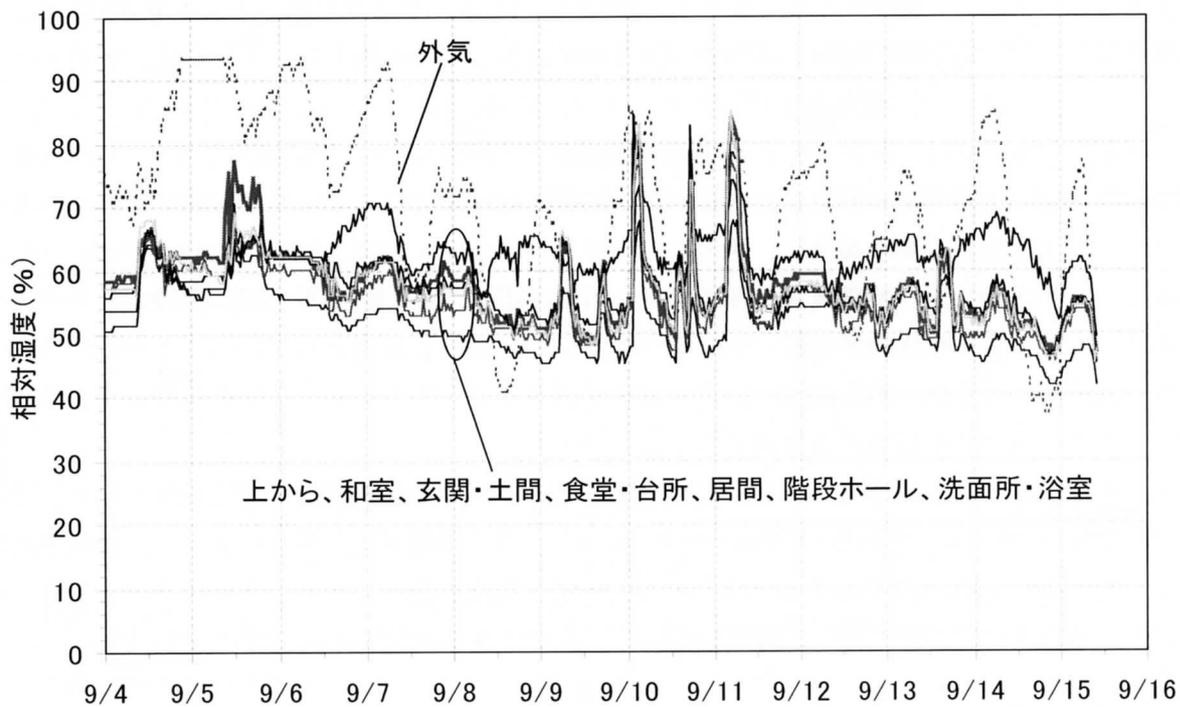


図 3-8-77 相対湿度の測定結果 (夏期 : 1階)

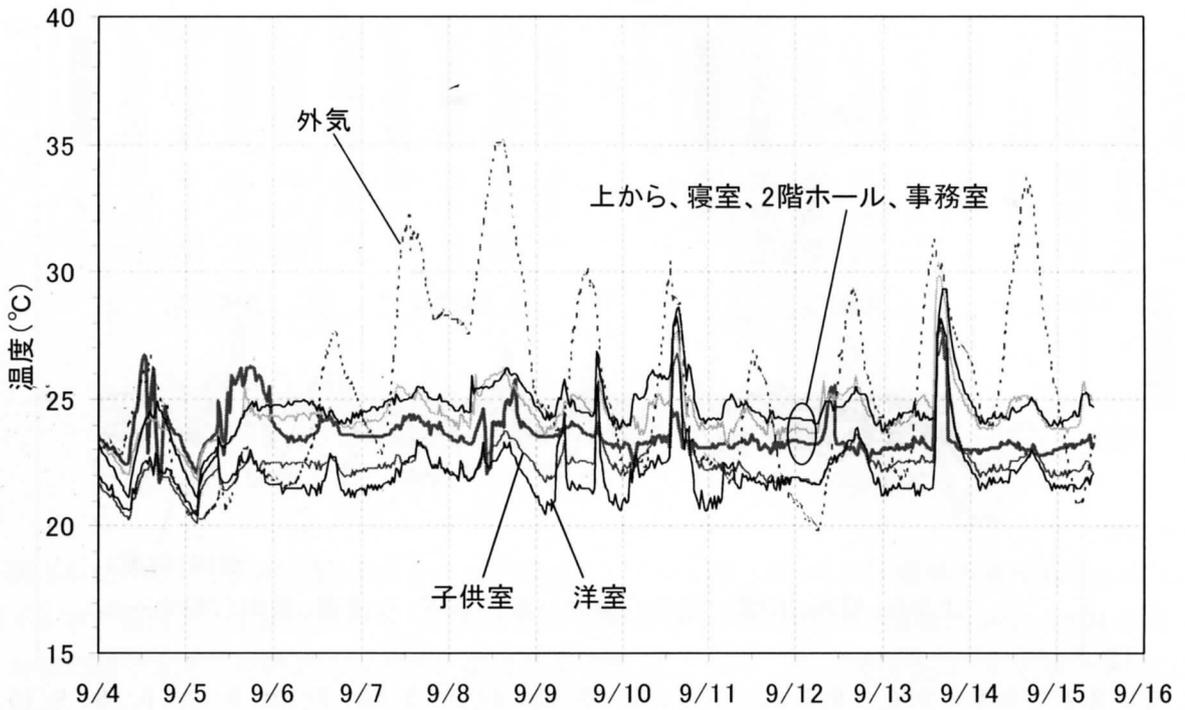


図 3-8-78 温度の測定結果 (夏期：2階)

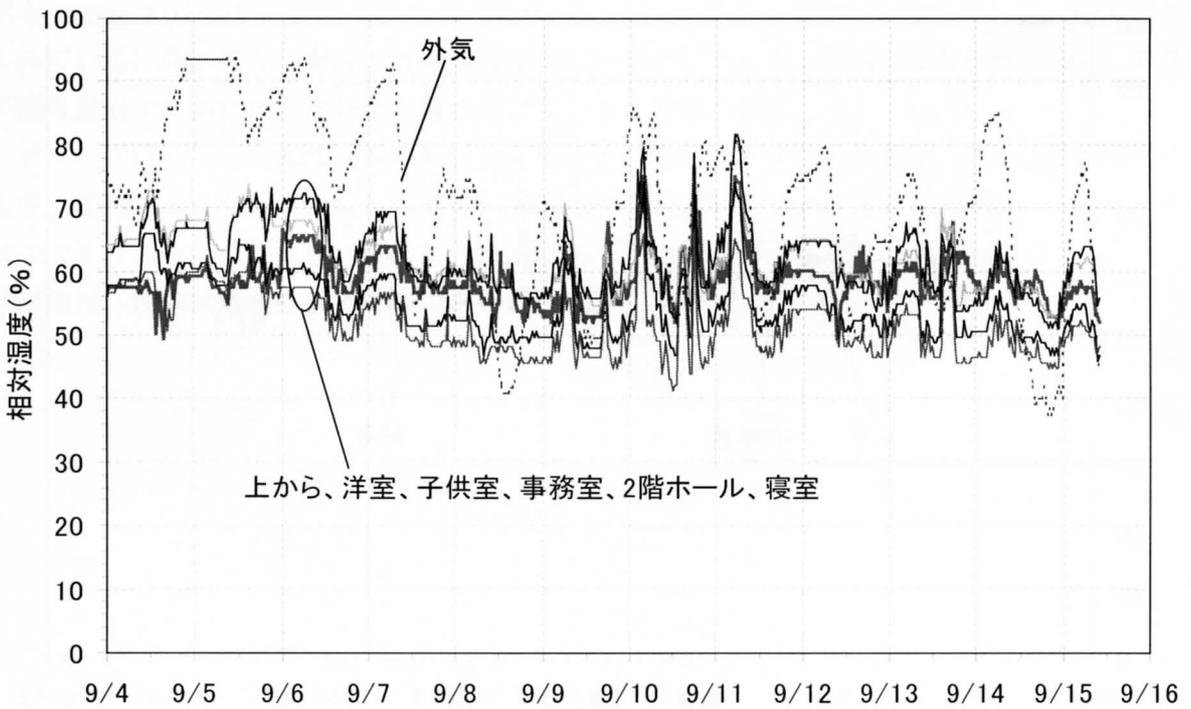


図 3-8-79 相対湿度の測定結果 (夏期：2階)

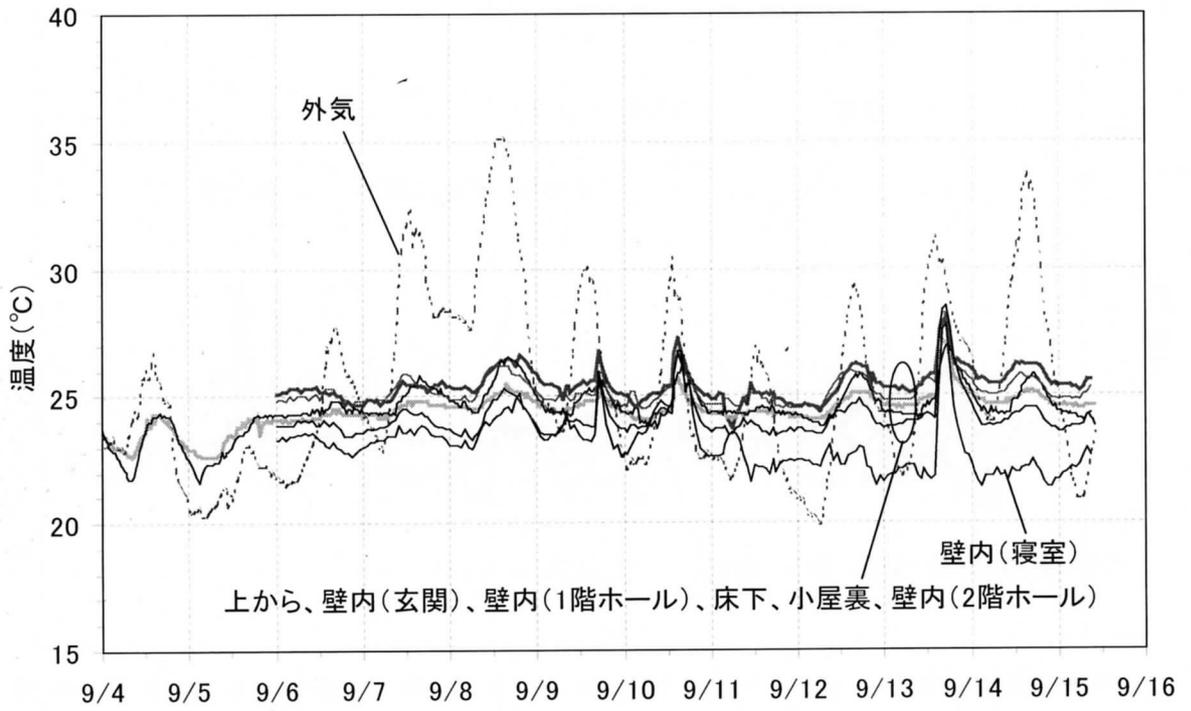


図 3-8-80 温度の測定結果 (夏期：床下・壁体内通気層・小屋裏)

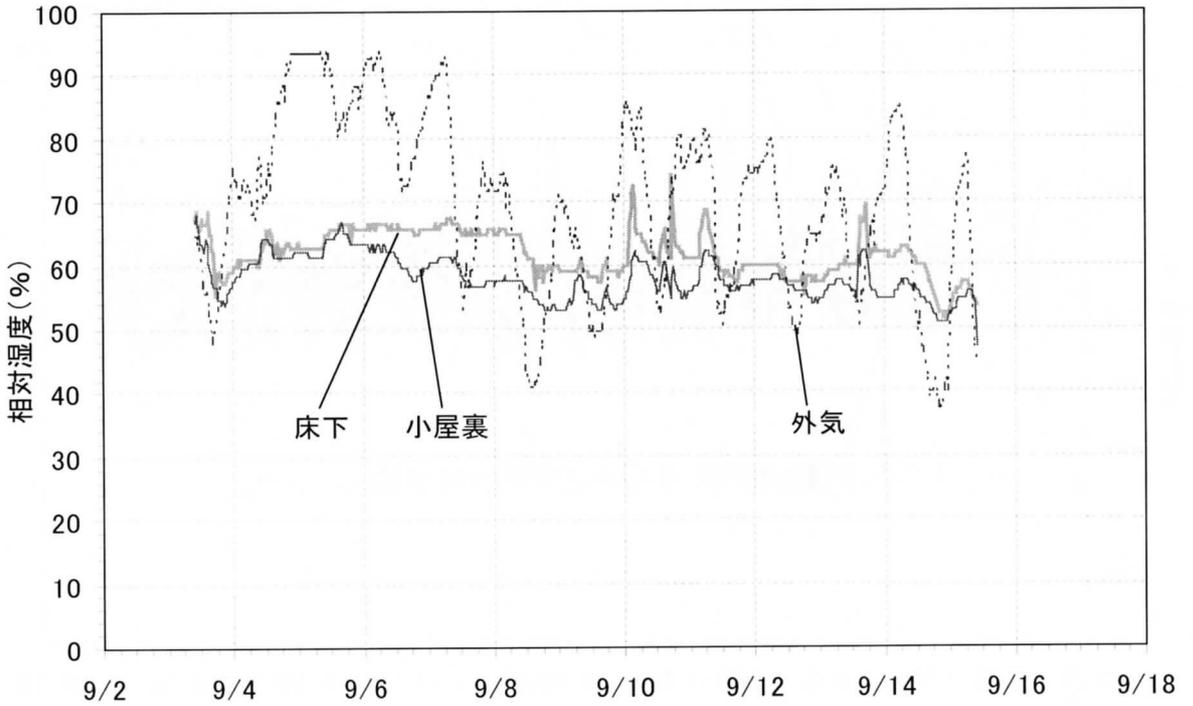


図 3-8-81 相対湿度の測定結果 (夏期：床下・壁体内通気層・小屋裏)

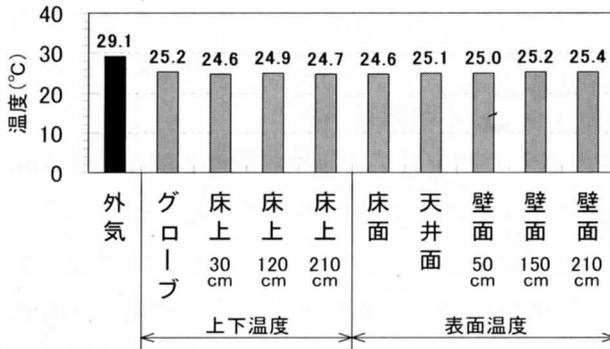


図 3-8-82 上下温度と表面温度の平均値 (夏期 (9月7日・8日): 居間)

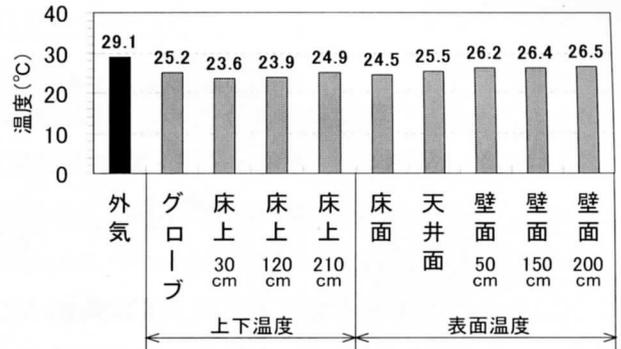


図 3-8-83 上下温度と表面温度の平均値 (夏期 (9月7日・8日): 寝室)

図 3-8-82・83 に、居間と寝室のグローブ温度、上下温度差、床・天井・壁面の表面温度を示す。図 4-5-中の値は、一定濃度法を行っていたため玄関の出入りや窓開けの回数が少ない 9月7日・8日の平均値である。居間の温度の平均値は 24.6~25.4°Cであり、その温度差は 1°C未満である。上下温度は、床上 30cm が 24.6°C、床上 120cm が 24.9°C、床上 210cm が 24.7°Cで、上下温度差は 0.3°Cと非常に小さい。これは、居間が大きな吹き抜け空間になっており、床上 210cm の測定点でも温度があまり上昇しないためと考えられる。一方、天井高の低い寝室では、床上 30cm が 23.6°C、床上 120cm が 23.9°C、床上 200cm が 24.9°Cで、上下温度差は居間よりも大きい、1.3°Cに抑えられている。床・天井・壁面の表面温度は 24.5~26.5°Cである。壁面の温度が高いのは、測定点が南外壁面であるため、日射の影響を受けていると考えられる。

グローブ球内の平均温度と温湿度センサー付き小型データロガーで測定した相対湿度の平均値より、温熱環境の快適指標である SET* (標準新有効温度) を求めたところ、居間は 25.4°C、寝室は 25.2°Cとなった。これらの値は夏の快適範囲内 (SET* : 23~26°C) に含まれており、室内の温熱環境は、快適に維持されていることが分かる。

【冬期の測定結果】

来客の多い土曜日、日曜日、祝日に当たる2月11日・12日・13日は玄関の出入りが多い。また、躯体換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状について測定した9月14日～16日には、室内のガス濃度を下げするために窓開け換気を行っている時間帯がある。

図3-8-84・86・88に、各室・床下・壁体内通気層の温度の測定結果を示す。図3-8-84・図3-8-86を見ると、各室の温度は、暖房の設定温度である20℃より少し高めに維持されているのが分かる。この原因として、対象住宅はモデルハウスのため、照明設備からの発熱が大きいからではないかと思われる。玄関・上間の温度は、玄関の出入り時に冷たい外気が流れ込むため、他室よりも低くなっている。2階ホールの温度は30℃弱まで上昇しているが、これは、センサーの設置場所がフリーザーの近くであったためである。2階の寝室、事務室の温度は1階よりも高く、25℃を越える場合もある。2階の温度が上昇する原因として、1階で暖められた空気が吹き抜けや階段室を通して2階へ移動し、場所によっては、温度が高い状態に維持されてしまうことが挙げられる。図3-8-88の床下・壁体内通気層の温度を見ると、床下と1階部分の壁体内の温度は19～22℃、2階部分の壁体内の温度は22～26℃であり、床下・壁体内通気層の空間においても、上下温度差が生じていることが分かる。

図3-8-85・87・89に、各室・床下・壁体内通気層の相対湿度の測定結果を示す。各室の相対湿度は15～35%と非常に乾燥している。子供室の湿度が0%まで低下しているのは、湿度センサーの調子が悪かったためである。

図3-8-90・91に、居間と寝室のグローブ温度、上下温度差、床・天井・壁面の表面温度を示す。図4-5-中の値は、一定濃度法を行っていたため玄関の出入りや窓開けの回数が少ない2月9日・10日の平均値である。居間の温度の平均値は22.3～24.2℃であり、その温度差は約2℃である。上下温度は、床上30cmが23.2℃、床上120cmが23.7℃、床上210cmが24.1℃で、上下温度差は0.9℃と小さくなっている。寝室の上下温度は、床上30cmが24.3℃、床上120cmが24.5℃、床上200cmが24.9℃で、その差は0.6℃と居間よりも小さい。床・天井・壁面の表面温度も24.3～24.6℃であり、夏期と比較して全体的に室の温度差が小さく、1℃未満に抑えられている。

グローブ球内の平均温度と温湿度センサー付き小型データロガーで測定した相対湿度の平均値より、温熱環境の快適指標であるSET*（標準新有効温度）を求めたところ、居間は23.4℃、寝室は24.7℃となった。これらの値は冬の快適範囲内（SET*：20～23.5）よりもやや高い。

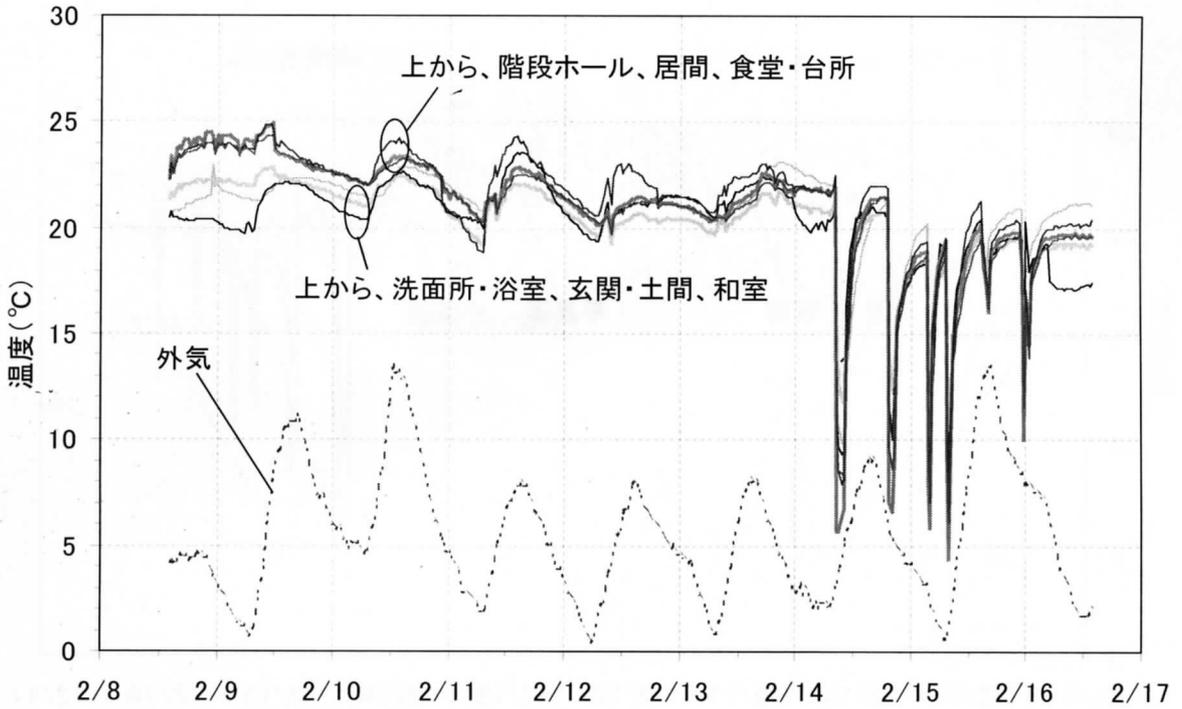


図 3-8-84 温度の測定結果 (冬期 : 1階)

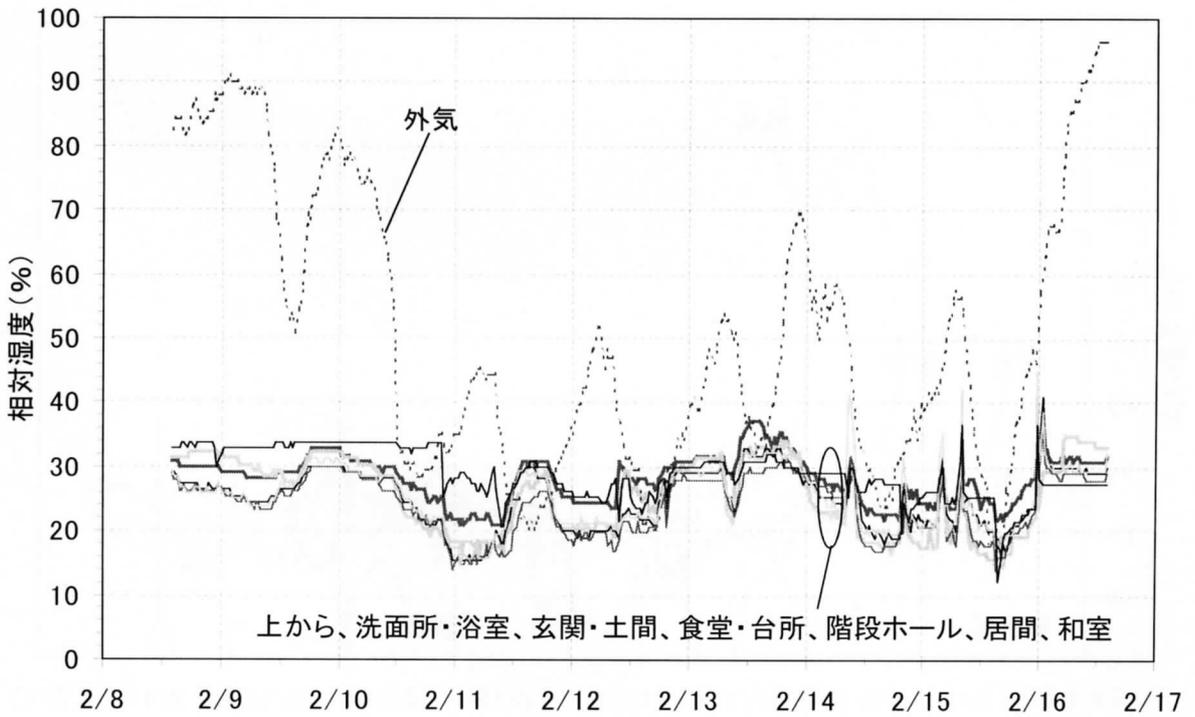


図 3-8-85 相対湿度の測定結果 (冬期 : 1階)

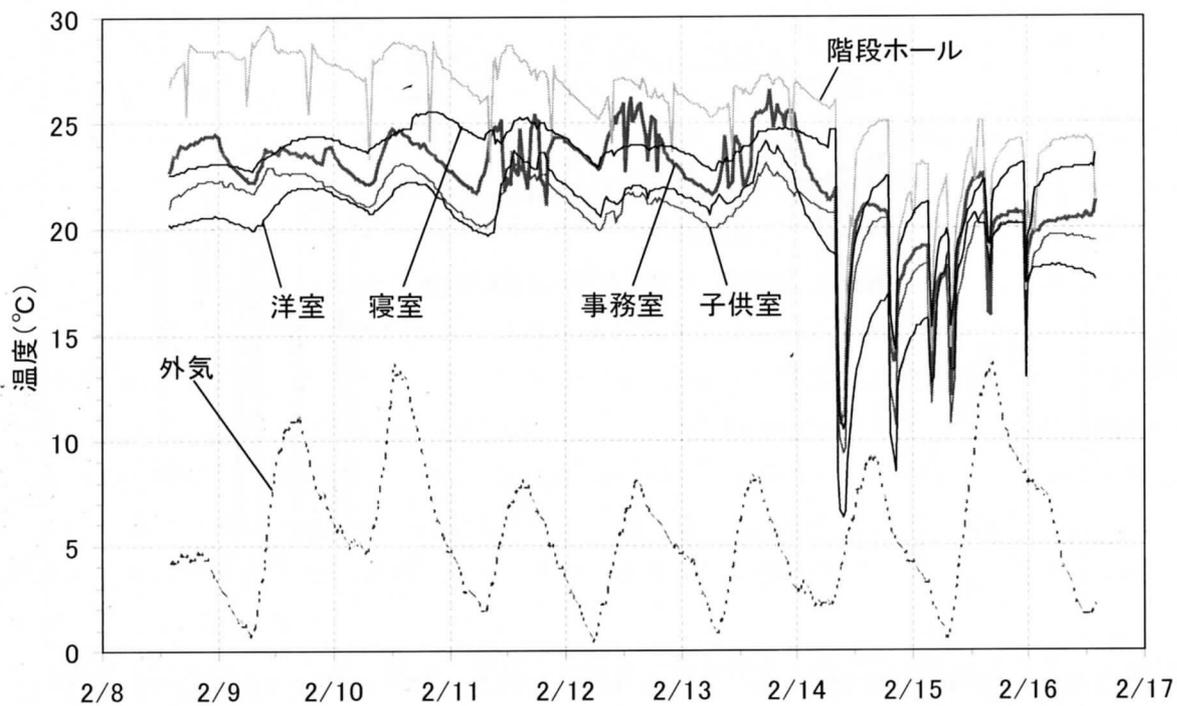


図 3-8-86 温度の測定結果 (冬期 : 2 階)

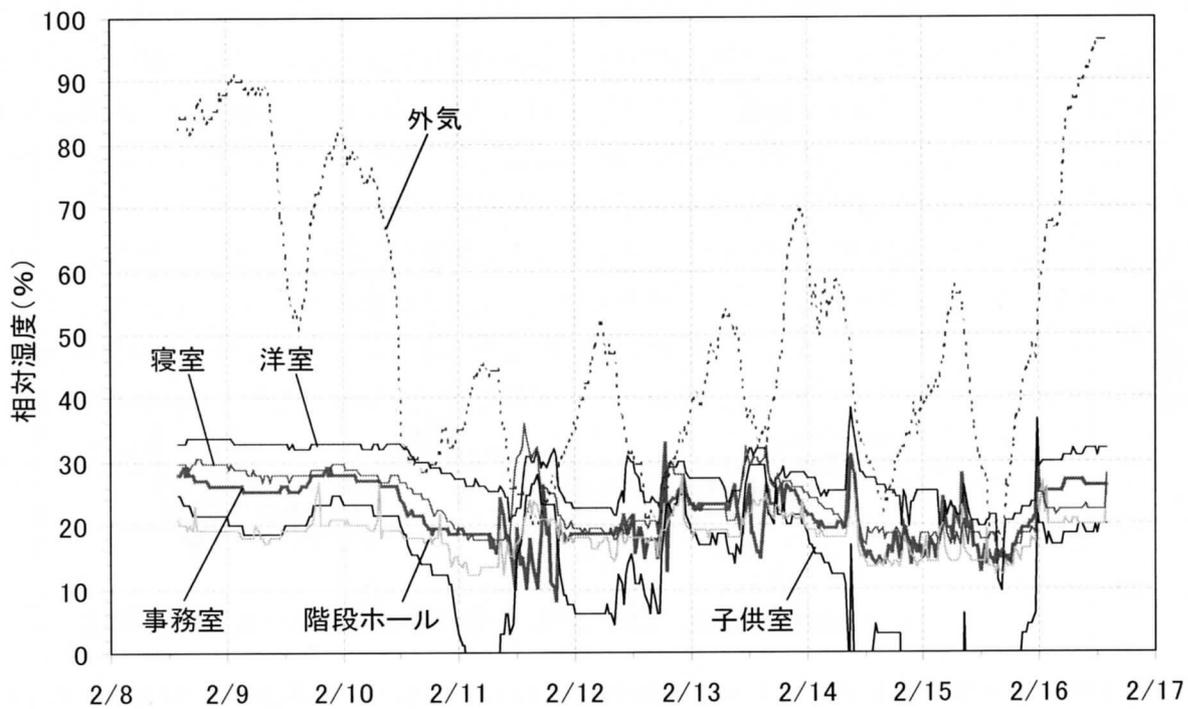


図 3-8-87 相対湿度の測定結果 (冬期 : 2 階)

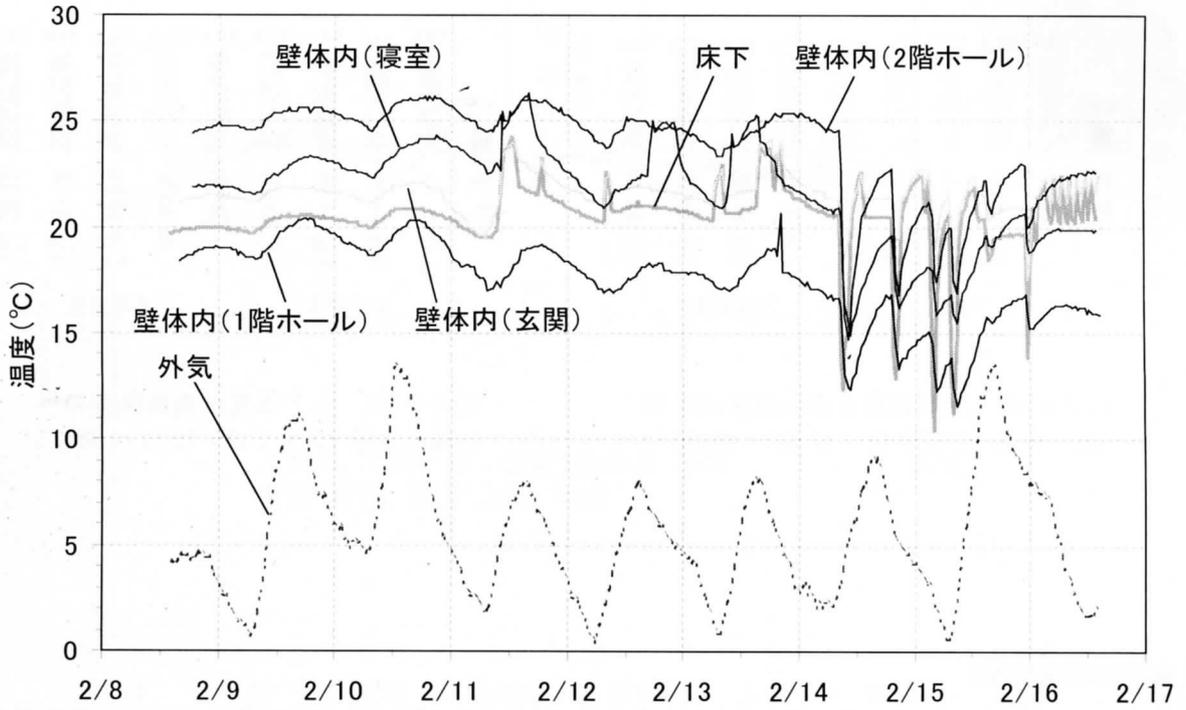


図 3-8-88 温度の測定結果 (冬期：床下・壁体内通気層・小屋裏)

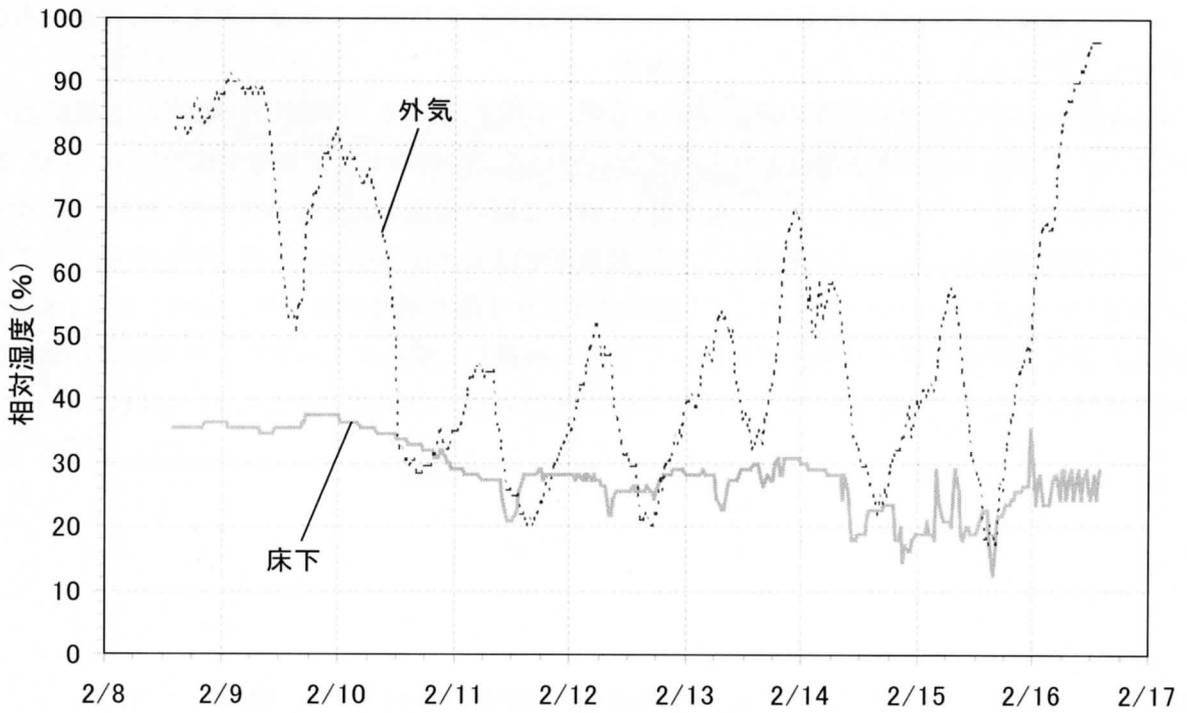


図 3-8-89 相対湿度の測定結果 (冬期・床下・壁体内通気層・小屋裏)

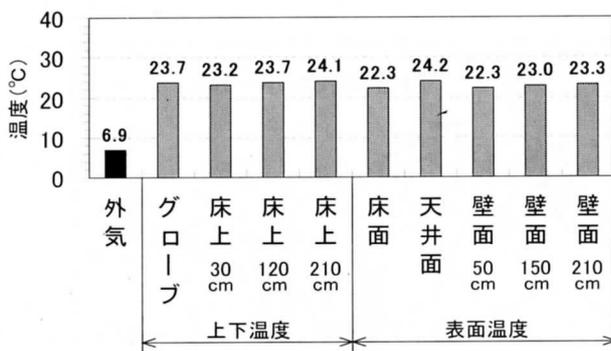


図 3-8-90 上下温度と表面温度の平均値 (冬期 (2月9日・10日): 居間)

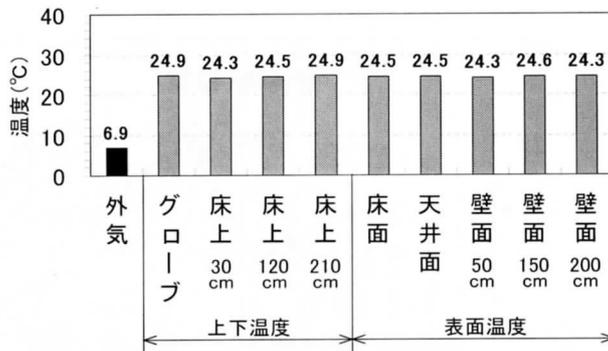


図 3-8-91 上下温度と表面温度の平均値 (冬期 (2月9日・10日): 寝室)

【春期の測定結果】

来客の多い土曜日、日曜日に当たる5月21日・22日は玄関の出入りが多い。また、躯体換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状について測定した5月22日～24日には、室内のガス濃度を下げるために窓開け換気を行っている時間帯がある。基本的に冷暖房なしの自然室温だが、一定濃度法を行った17日～19日には、照明器具の発熱による室温上昇を防ぐため、冷房を運転していた。

図3-8-92・93に、各室の温度の測定結果を示す。各室の温度は、1階が22～26℃、2階が22～28℃であり、事務室の温度が他室よりも高くなっている。冷房なしで定常発生法を行っていた22日～24日には、測定中に温度がどんどん上昇し、特に2階の温度が高くなっている(寝室では30℃を超える時間帯もあった)。この原因として、対象住宅はモデルハウスのため、照明設備からの発熱が大きいからではないかと思われる。1階の温度より2階の温度が高くなる原因として、1階で暖められた空気が吹き抜けや階段室を通して2階へ移動し、場所によっては、温度が高い状態に維持されてしまうことが挙げられる。床下・壁体内通気層・小屋裏の温度は21～24℃であった。

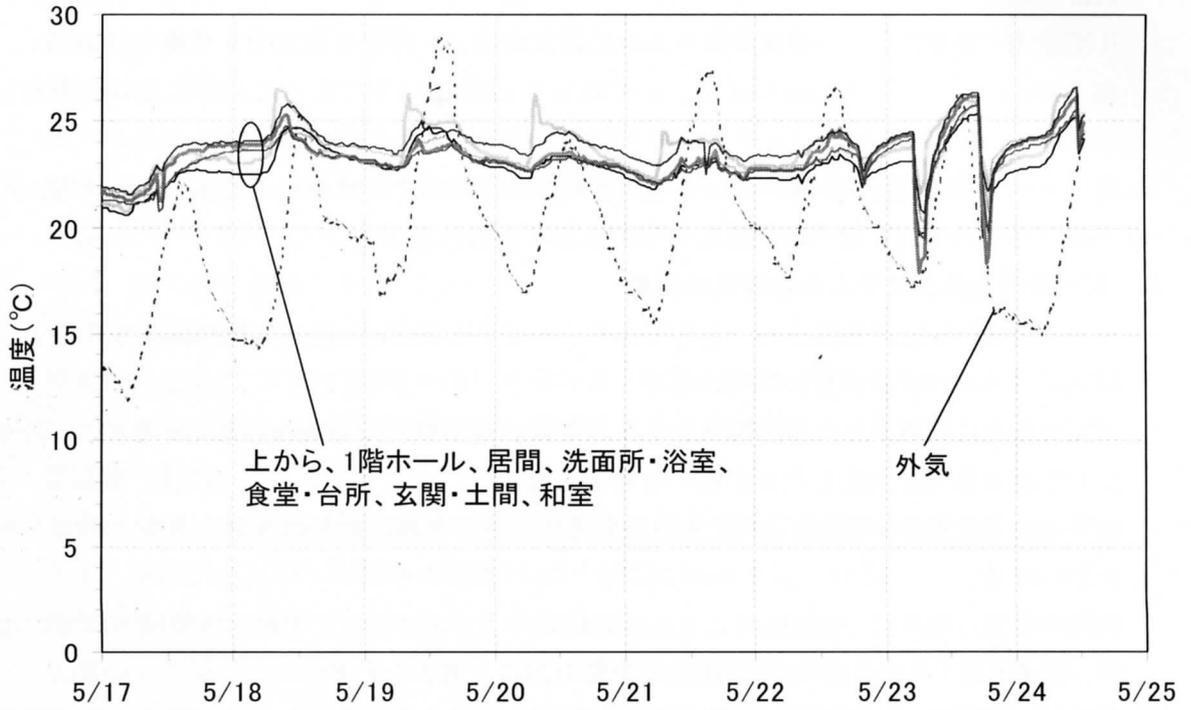


図 3-8-92 温度の測定結果 (春期 : 1 階)

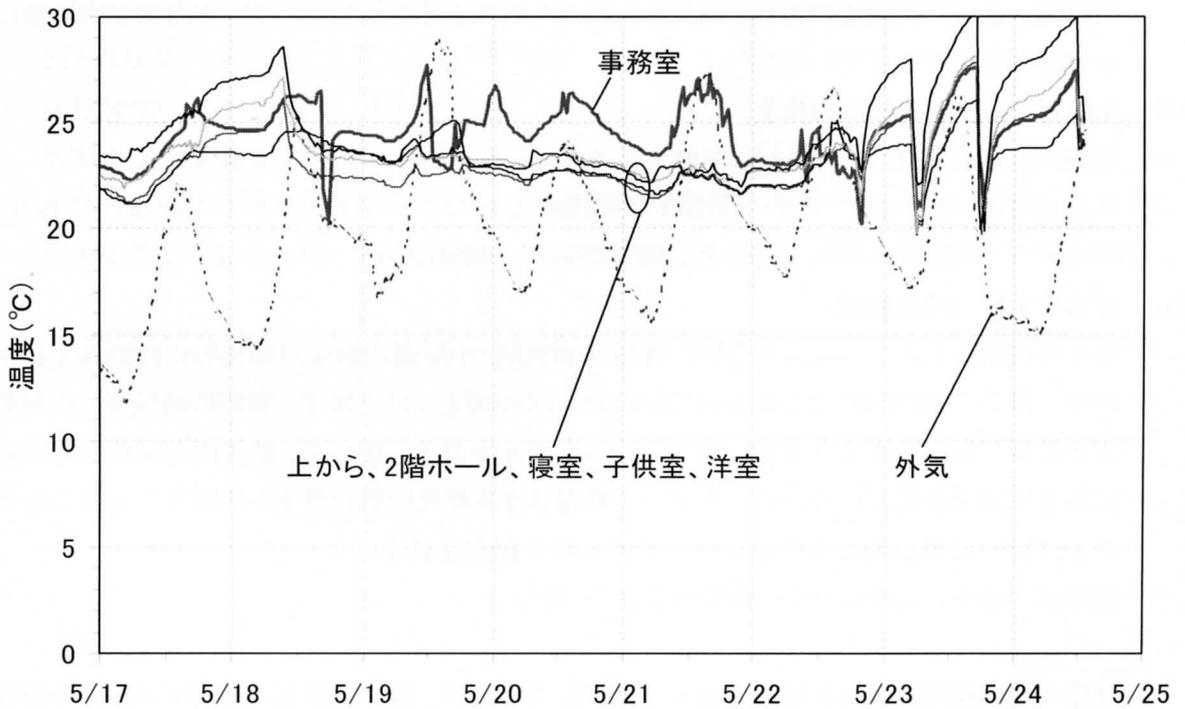


図 3-8-93 温度の測定結果 (春期 : 2 階)

(d) まとめ

(1) 気密性能

- ・ 住宅全体の気密性能は、換気システムの給排気口をシールした状態で、夏期 $1.13\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、冬期 $1.34\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、春期 $1.49\text{cm}^2/\text{m}^2$ で、いずれも $2\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以下であることから高気密住宅と言える。
- ・ 住宅全体の隙間面積が、速いペースで大きくなっていることが気になるが、多湿時期に入ると隙間面積が小さくなる可能性も十分あると考えられる。

(2) 居室専用換気システムの給排気口風量

- ・ 建築基準法改正後に建設されたものであり、居室で 0.5 回/h の換気回数が確保されるように換気システムの設計が行われている。
- ・ 和室と食堂に設置された局所換気システムでは必要風量が十分確保されているので、弱運転にして過大換気を防止した方が良いと考えられる。
- ・ 寝室の給気口風量が小さいので、室内空気汚染を防ぐために給気口風量を増やす必要があると思われる。
- ・ 居間の給気口風量は、強運転時よりも弱運転時の方が大きい。この原因は解明されていないが、分岐チャンパー内での圧力変化が影響であると考えられる。
- ・ 強運転の場合でも、住宅全体の換気回数が 0.5 回/h には達していない（排気口風量の場合で約 $4.4\sim 4.7$ 回/h）。
- ・ 強運転、弱運転ともに、排気風量の合計値が給気風量の合計値を上回り、両者の差は、建物の隙間を通した給気量であると考えられる（室内外差圧の測定結果も、室内側が室外側に対してほぼ負圧になっていた）。

(3) 冷暖房システムの吹出口風量

- ・ 夏期の測定結果は $70\sim 190\text{m}^3/\text{h}$ 。ボリュームコントローラーにより変動する。
- ・ 冬期・春期の測定では、一部の吹出口で、内部のシャッターが絞られていた可能性がある（冬期は床下・壁体内通気層・小屋裏に暖気を送り、輻射暖房を主体としていたため）。

(4) 外気導入量（換気回数）

- ・ 躯体専用換気システムにより、床下・壁体内通気層・小屋裏の換気が積極的に行われており、ガスの供給を室内のみでしか行っていない今回の測定では、床下・壁体内通気層・小屋裏のガス濃度が設定濃度よりも低くなっていると考えられる。従って、壁体内通気層と室内の間にある気密化されていない内壁を通して外気（ガス濃度の低い空気）が導入されることになり、今回の結果は本来よりも大きな値であると推察される。
- ・ 洗面所・浴室、2階ホールの換気回数は小さい。

- ・ 住宅全体の換気回数は夏期と冬期でほぼ同じであるが、温度差換気の影響により、冬期は夏期と比べて、1階の換気回数が増加し、2階の換気回数が減少する。

(5) 換気システムおよび冷暖房システムの空気移動性状

- ・ 夏期に換気システム内で SF₆ を発生させた場合、壁体内と小屋裏の空調ユニット（吸込口）の濃度が上昇していることから、空調ユニットで冷やされた空気が床下へ供給された後、壁体内通気層を上昇して小屋裏まで到達していることが確認できる。夏期よりも冬期の方が上昇するのが早い。
- ・ 床下の濃度上昇が遅いのは、測定点の位置が不適切であったためと考えられる。
- ・ 壁体内では、空気の通りやすいところと通りにくいところがある。
- ・ 空調ユニット内で CO₂ を発生させた場合、ボリュームダンパーによる吹出口風量の変化に伴い、空気齢も変動する。
- ・ 夏期の空気齢は 90～150 分である。
- ・ 建物内の空気は、内装の隙間を通して室内側と壁体内の間を移動しており、その移動の仕方は、内外温度差による圧力バランスの影響を大きく受ける。

(6) 温湿度（夏期）

- ・ 各室の温度は、冷房の設定温度である 25℃より若干低めに維持されている。
- ・ 床下・壁体内通気層・小屋裏の温度は 23～27℃に維持されている。
- ・ 相対湿度は 50～60%である。
- ・ 居間の上下温度差は 0.3℃、寝室は 1.3℃であり、温度差は小さく抑えられている。
- ・ グローブ温度と相対湿度より、SET*（標準新有効温度）を求めたところ、居間は 25.4℃、寝室は 25.2℃となった。これらの値は夏の快適範囲内（SET*：23～26℃）に含まれている。

(7) 温湿度（冬期）

- ・ 各室の温度は、暖房の設定温度である 20℃より少し高めに維持されている。
- ・ 2階の温度が1階よりも高くなっている。
- ・ 相対湿度は 15～35%で、非常に乾燥している。
- ・ 居間の上下温度差は 0.9℃、寝室は 0.6℃であり、温度差は小さく抑えられている。
- ・ グローブ温度と相対湿度より、SET*（標準新有効温度）を求めたところ、居間は 23.4℃、寝室は 24.7℃となった。これらの値は冬の快適範囲内（SET*：20～23.5℃）よりもやや高い。

3.8.2 熱交換器付き換気システムの性能検証

(1) はじめに

本章では、熱交換器付き換気システムの性能評価について取り上げる。対象は、ハイブリッド換気システムに熱交換器を組み込み、熱回収によって冷暖房負荷を低減することを試みた新しい省エネ型システムである。対象システムを東北大学構内にある換気実験家屋に設置し、実験と数値計算を用いて、システム内の熱交換ユニットに内蔵されている給排気ファンの運転状況やダンパーの開閉によって、換気量および熱交換による省エネルギー効果がどのように変化するかを明らかにする。数値計算では、建物の相当隙間面積、熱交換効率をパラメータとした検討も行う。本システムの実用化に向けた適用可能性について検討することが目的である。

(2) 実験家屋の概要

実験と数値計算の対象となる実験家屋は、東北大学構内に設置された2階建ての木造建物で、延べ床面積 78.9m^2 、室容積 163.9m^3 である。写真3-8-53に実験家屋の外観、図3-8-94に平面図、図3-8-95に立面図、図3-8-96に断面図を示す。各階は、廊下（ホール）とその両脇に位置する2つの部屋によって構成されており、2階両室の天井裏は小屋裏スペースとなっている。階段は建物の外に設置してあるが、1階の南側部分には階段室を想定した吹き抜けがある。



写真3-8-53 実験家屋の外観

断熱仕様については、妻側の外壁に厚さ20cmの発泡ポリスチレン板、それ以外の外壁、天井、床に10cmの発泡ポリスチレン板が施されている。窓には複層ガラスがはめ込まれており、1階の窓は5+A6+5-2階の窓は3+A12+3である。窓は北側と南側に設置されているが、南側の窓には日射遮蔽のための覆いを取り付けてある。2階廊下の北側の屋根には電動で開閉可能な天窓が2つ設けられている。内装は、物質の吸着を防止し気密性能を高めるため、1階廊下の天井を除く全面をアルミシートで覆っている。

廊下を除く各部屋にはルームエアコンが設置され、室温調節が可能である。また、各部屋には間仕切扉が2つずつ設置され、それぞれの扉には10cm角の通気口（写真3-8-54）が2つずつ設けられている。

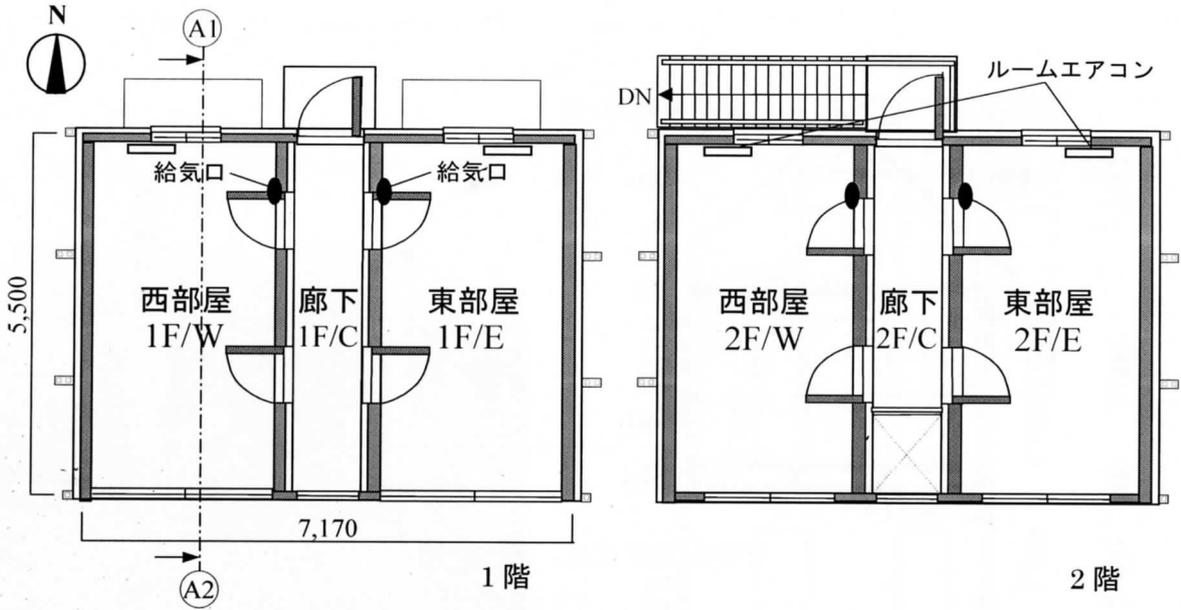
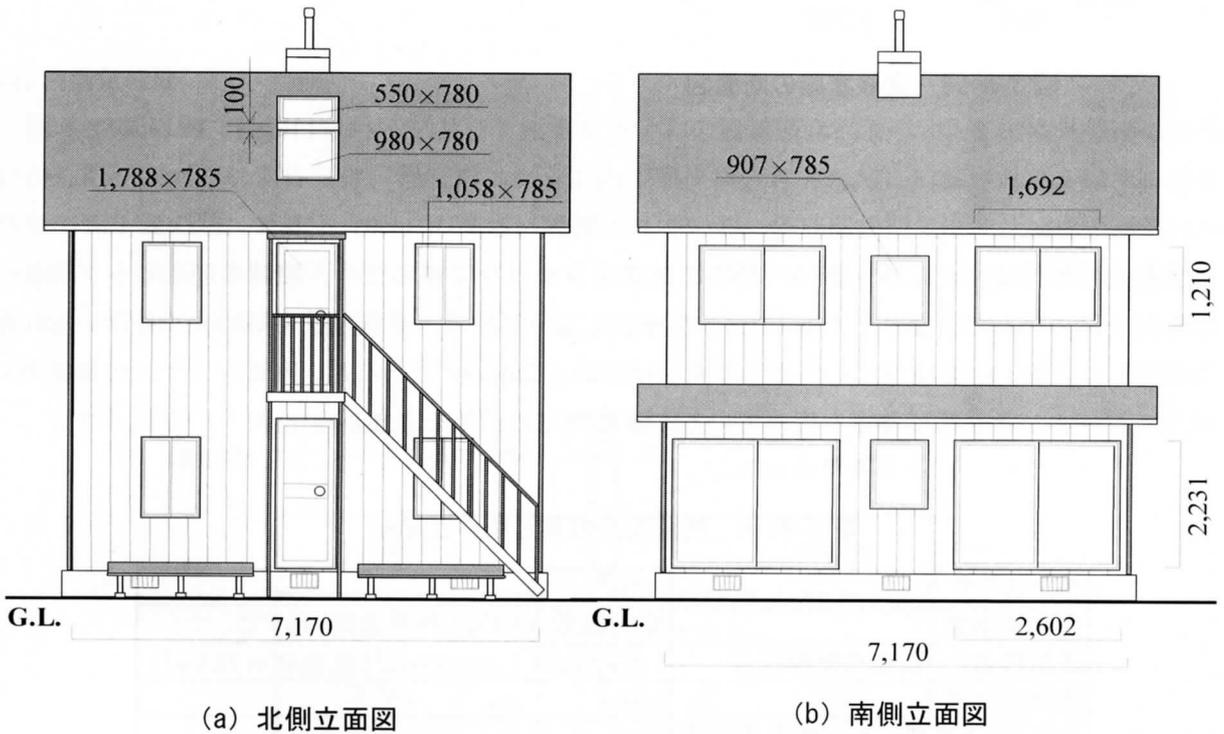


図 3-8-94 実験家屋の平面図



(a) 北側立面図

(b) 南側立面図

図 3-8-95 実験家屋の立面図

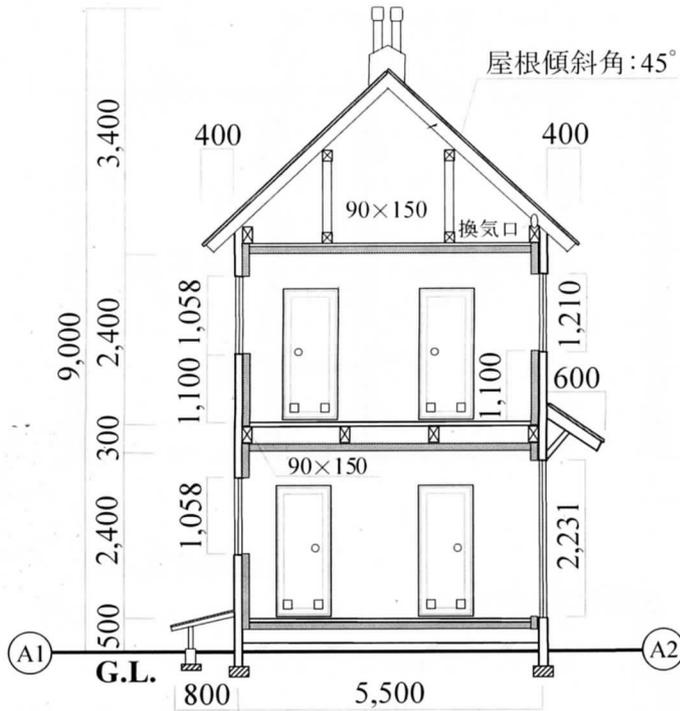


図 3-8-96 実験家屋の断面図

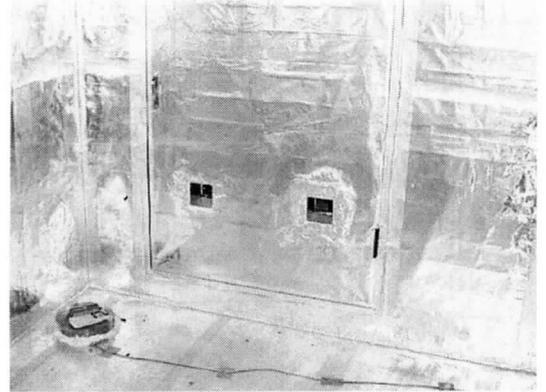


写真 3-8-54 間仕切扉の通気口

実験前に再度気密化工事を行い（建物の隙間をシリコンで埋めたり、屋外へ通じるドア部分に断熱材をはめ込んで目張りしたりした）、気密測定器（コーナー札幌製、KNS-400）を用い加圧法で測定した結果、床面積当たりの相当隙間面積は約 $1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ であった。換気システムの給排気口は全てシールした状態で測定を行っている。気密測定の結果を表 3-8-18 と図 3-8-97 に示す。

表 3-8-18 気密測定の測定条件と結果

測定日	2001/11/26
室内外温度	室内温度：16.7°C、外気温度：10.1°C
床面積当たりの相当隙間面積	$1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ ($\alpha A=77\text{cm}^2$ 、床面積= 78.9m^2)
隙間特性値	1.32
通気率(圧力差=1Pa時の通気量)	19.8
圧力差=9.8Pa時の通気量	$111.3\text{m}^3/\text{h}$

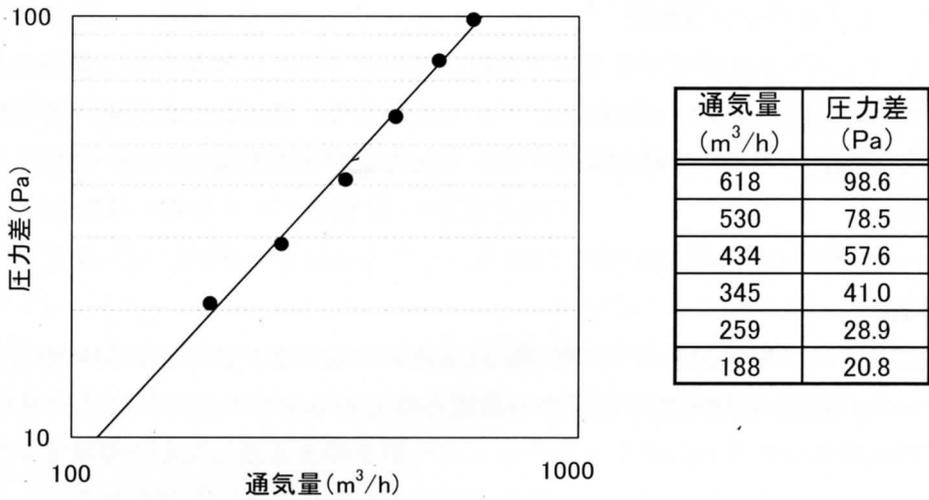


図 3-8-97 気密測定の結果

(3) 熱交換器付きハイブリッド換気システムの概要

(a) 換気経路

図 3-8-98 に熱交換器付きハイブリッド換気システムの設置概念図を示す。2 階南外壁面の給気口から取り入れられた外気は、熱交換ユニット内で熱交換され各部屋に給気される。給気口は各部屋の廊下側の壁、天井下 20cm の高さに設置されている。各部屋の空気は間仕切扉の通気口から廊下へと流れ、2 階廊下の熱交換ユニットを介して 2 本のパッシブダクトにより屋外へ排出される。この際、1 階の空気は廊下の南側部分にある吹き抜けを通して 2 階へ上がる。

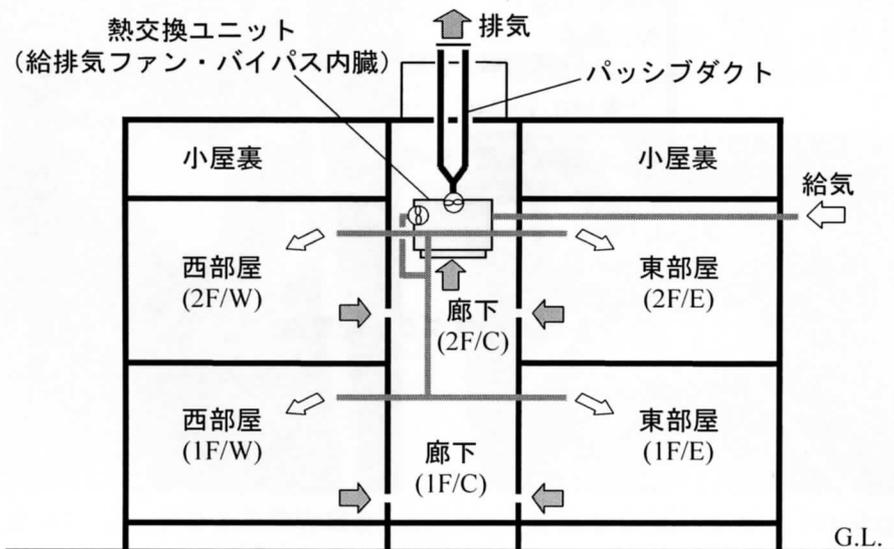


図 3-8-98 換気システムの設置概念図

(b) ダクトシステムとパッシブ煙突³⁻³⁵⁾

ここでは、換気システムを構成するダクトと給排気口について、給気系統と排気系統に分けて説明を行う。全体図には、ダクトの直径 ϕ 、ダクトの長さ L、曲げ部におけるダクト中心線までの半径 R、空気の流れる方向などの情報を示す。複雑な曲げ部や分岐部については、写真や図を使って説明する。

1) 給気系統

図 3-8-99 に給気ダクト配管図を示す。ダクトは基本的に塩ビ管で、まれに分岐部で金属管を使用しているケースがある。実験家屋に以前から設置されているダクトを部分的に利用していたり、以前使用していた換気システムのダクトやチャンバーがそのまま残っていたりするので、ダクト配管は複雑なものになっている。従って、給気の抵抗がかなり大きいと思われる。

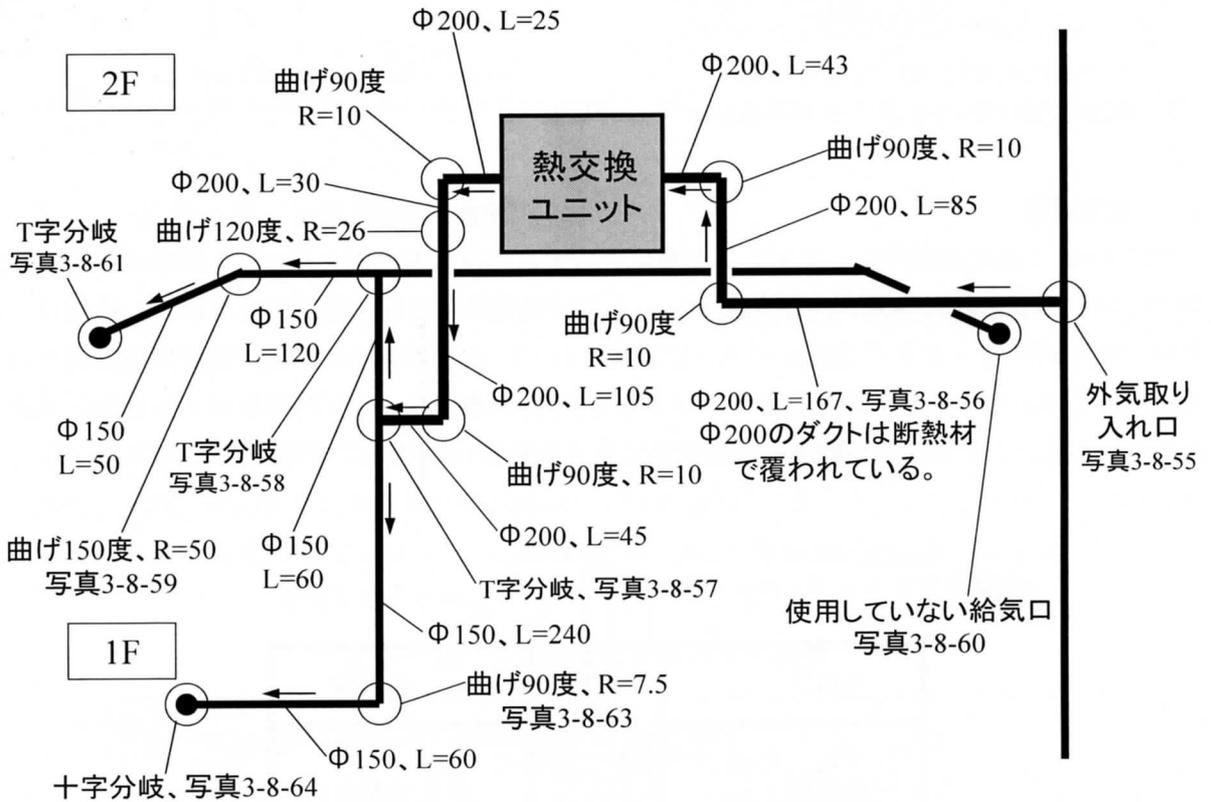


図 3-8-99 給気ダクト配管図

【外気取り入れ口】…写真 3-8-55

2階の南外壁面、窓の上部分に設置されている。ベントフード付き。

【ダクト直管部（外気取り入れ口→熱交換ユニット）】…写真 3-8-56

奥から手前に伸びている断熱材で覆われているのが、熱交換ユニットへ向かう給気ダクト。

【ダクトT字分岐部（本ダクト→各階）】…写真 3-8-57

縦に伸びているのが分岐後の $\phi 150$ ダクト。断熱材で覆われているのが熱交換ユニットからの給気ダクト。

【ダクトT字分岐部（2階の1回目の分岐）】…写真 3-8-58

写真は下から撮っている。中央に写っているのがT字分岐部分。分岐部は $\phi 150$ よりもひとまわり小さく金属管である。



写真 3-8-55 外気取り入れ口

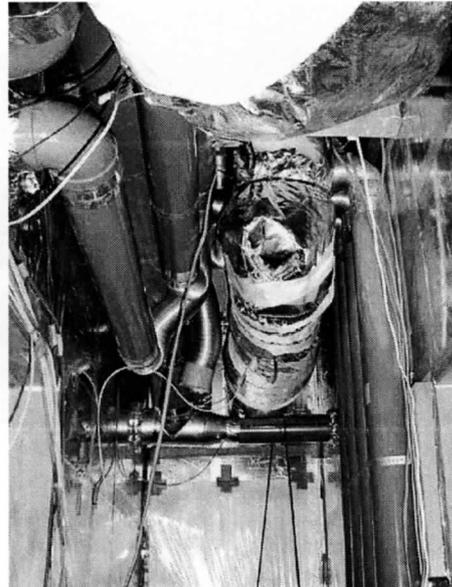


写真 3-8-56 ダクト直線部
(外気取り入れ口→熱交換ユニット)

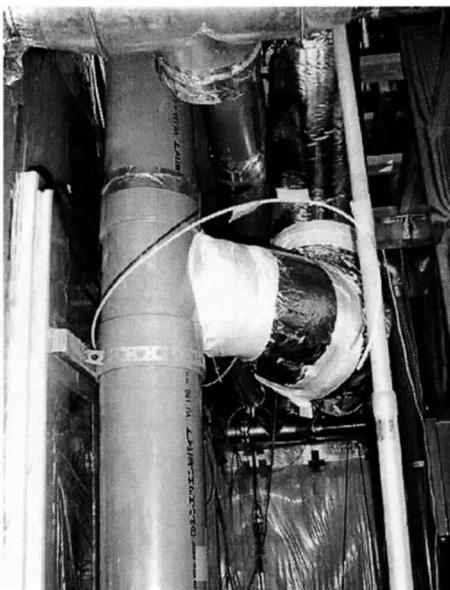


写真 3-8-57 ダクトT字分岐部
(本ダクト→各階)

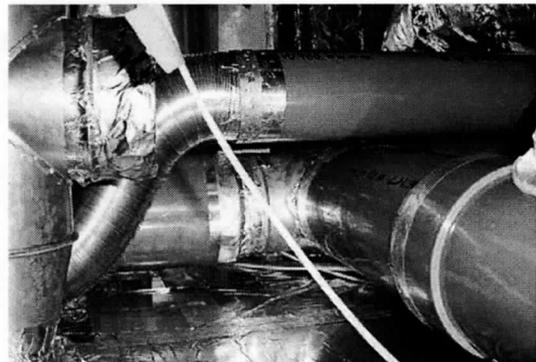


写真 3-8-58 ダクトT字分岐部
(2階の1回目の分岐)

【ダクト曲げ部（2階ダクト）】…写真3-8-59

150度の曲げ部。

【2階両室の南側給気口（使用していないもの）】…写真3-8-60

2階両室の給気口は、各室で北側と南側に2個設置されているが、南側の給気口は今回使用していないので塞いである。

【ダクトT字分岐部（2階ダクト→2階両室）】…写真3-8-61

縦に写っているのが写真3-8-61のダクト。T字分岐部は $\phi 150$ よりもひとまわり小さく、金属でできている。右の部屋（2F/E）へのダクトは壁の中で $\phi 100$ まで縮小されているため、詳細は分からない。左の部屋（2F/W）へのダクトは写真のような継手（金属）で $\phi 100$ まで縮小されている。寸法等は図3-8-100参照。

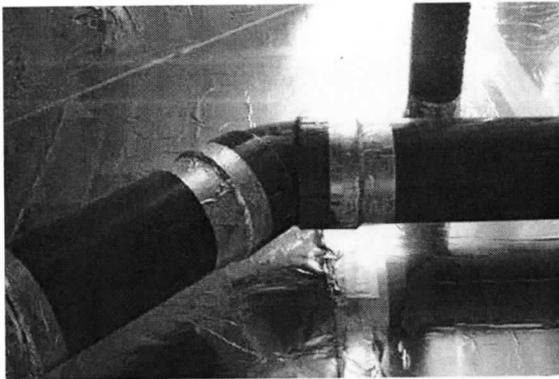


写真3-8-59 ダクト曲げ部
(2階給気ダクト)



写真3-8-60 2階両室の南側給気口
(使用していないもの)

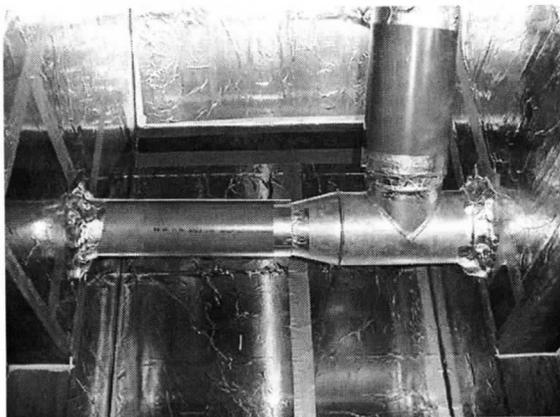


写真3-8-61 ダクトT字分岐部
(2階ダクト→2階両室)

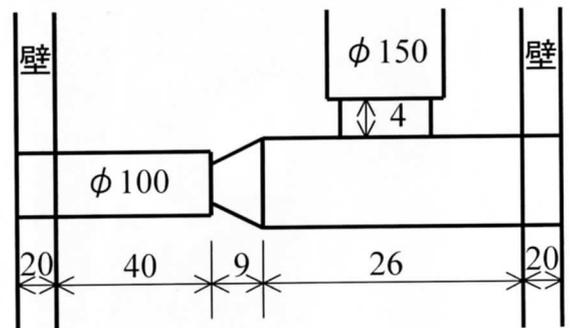


図3-8-100 ダクトT字分岐部
(2階ダクト→2階両室)

【2階両室の南側給気口】…写真 3-8-62

ガムテープで抵抗をつけて、各室への給気量が $20\sim 25\text{m}^3/\text{h}$ になるように調整している。給気口の位置は、図 3-8-94 の平面図を参照。

【ダクト曲げ部 (1階ダクト)】…写真 3-8-63

1階天井部分。90度に曲がっているダクトが2階から降りてきたダクト。

【ダクトT字分岐部 (1階ダクト→1階両室)】…写真 3-8-64

写真の左寄り奥から手前に伸びて途中で途切れて塞がれているのが写真 3-8-65 のダクト (図 3-8-101 参照)。十字分岐部 ($\phi 150$ より小さいダクト 2種) は金属でできている。写真の中央を横に走る右の部屋 (1F/E) へのダクトには曲げ部が2ヶ所あり、左の部屋 (1F/W) へのダクトはまっすぐ伸びている (図 3-8-102 参照)。



写真 3-8-62 2階両室の南側給気口



写真 3-8-63 ダクトT字分岐部
(2階ダクト→2階両室)

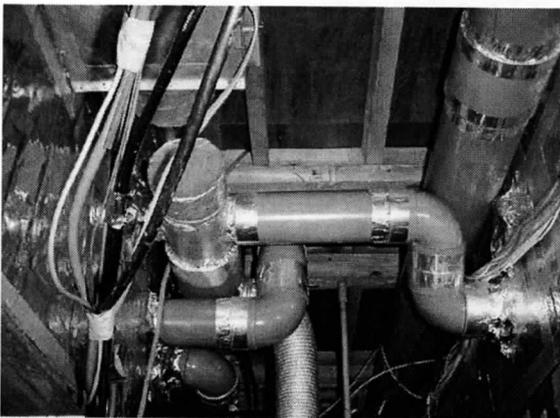


写真 3-8-64 ダクトT字分岐部
(1階ダクト→1階両室)

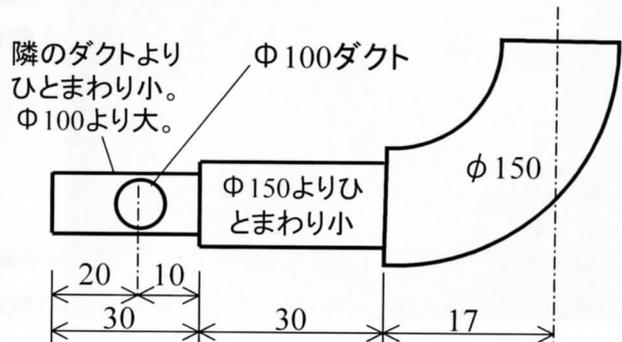


図 3-8-101 ダクト曲げ部・直管部
(1階ダクト)

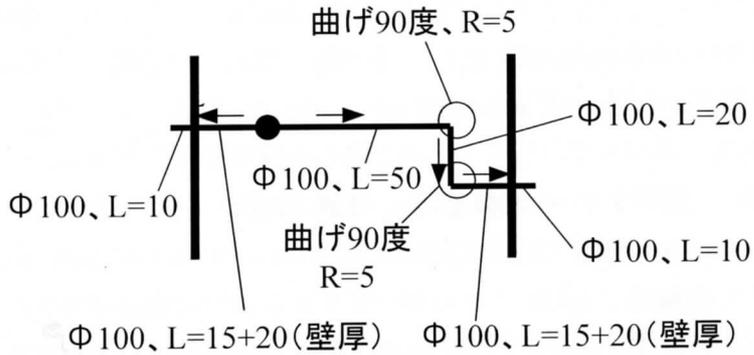


図 3-8-102 ダクト曲げ部・直管部 (1階ダクト)

【1階両室の給気口】…写真 3-8-65

2階両室の給気口と同様に、ガムテープで抵抗をつけて、各室への給気量が $20 \sim 25 \text{m}^3/\text{h}$ になるように調整している。2階の給気口と異なるのは、ダクトが壁から 10cm 突き出ていることである。給気口の位置は、図 3-8-94 の平面図を参照。

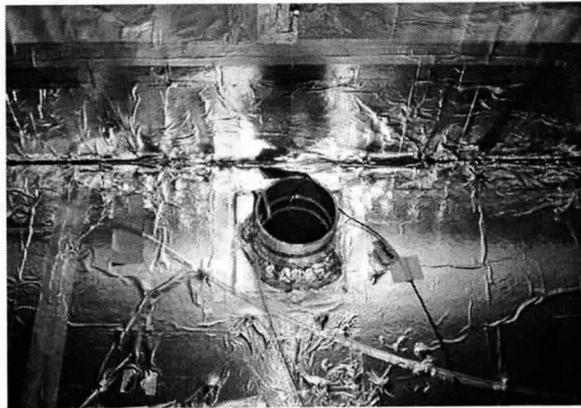


写真 3-8-65 1階両室の給気口

2) 排気系統

図 3-8-103 に排気ダクト配管図を示す。排気系統は給気系統に比べて単純な造りになっている。2階廊下の空気は熱交換ユニットの排気側へ直接取り込まれる。熱交換ユニットとパッシブダクトの間には分岐用チャンバー (写真 3-8-66) があり、2本のパッシブダクト (写真 3-8-67) への分岐が行われる。室内にあるパッシブダクトは断熱材で覆われており、パッシブ煙突にはスウェーデン製の排気トップ (写真 3-8-68) が取り付けられている。

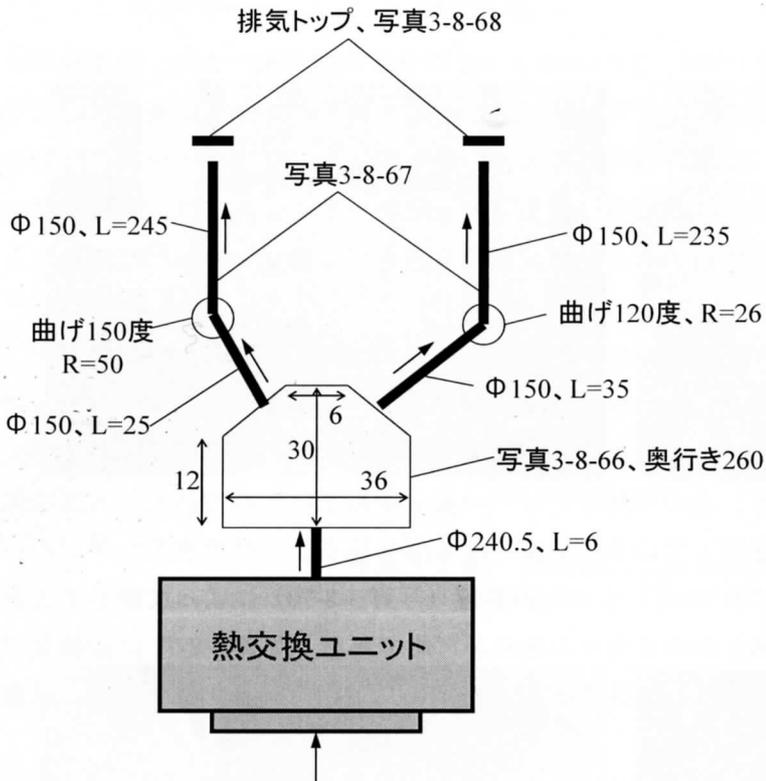


図 3-8-103 排気ダクト配管図

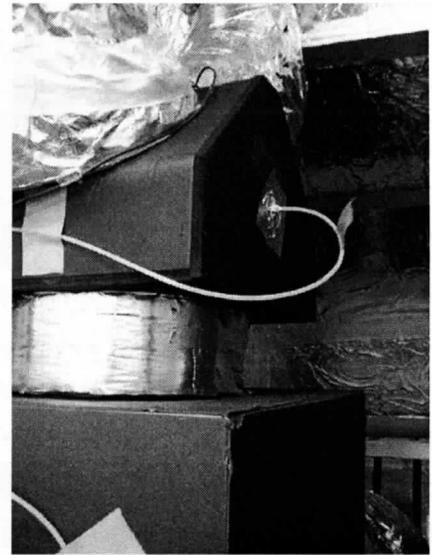


写真 3-8-66 分岐用チャンパー
(熱交換ユニット→パッシブダクト)



写真 3-8-67 パッシブダクト

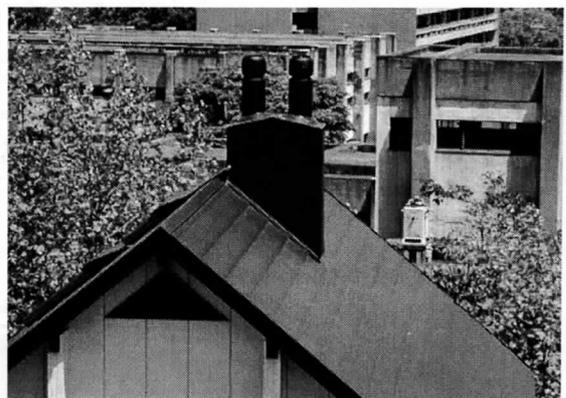


写真 3-8-68 排気トップ

(c) 熱交換ユニット

1) 熱交換ユニットの構造

図 3-8-104 に熱交換ユニットの構造を示す。このユニットは開発中の試作機である。熱交換ユニットには給排気ファンとダンパーにより開閉するバイパスが内蔵されており、気候条件に応じて運転条件の変更が可能となっている。室内外温度差の大きい厳寒期には、ダンパーを閉じ浮力のみで熱交換換気が行われ、中間期のように温度差による浮力効果が小さい場合には、給排気ファンを運転させたり、ダンパーを開けて抵抗の大きい熱交換部を通さずに換気を行ったりすることができる。

2階ホールの上部に設置されている熱交換ユニットを下から撮った写真を写真 3-8-69 に示す。実際は、この排気側入口部分にフィルターを取り付けて使用するが、フィルターの抵抗が大きいので、取り付けずに実験を行う。給気側のフィルターも同様である。右側の黄緑色の部分は熱交換部で、左側部分はバイパス部である。上の写真はダンパーが全閉しているのでバイパス部は見えないが、下の写真ではダンパーが開いているのでバイパス部を見ることができる。ダンパーは水平（傾斜角 0 度）から垂直（傾斜角 90 度）まで制御装置（写真 3-8-70）によって動かすことができる。給排気ファンは両方とも強と弱の 2 通りの運転が可能である。写真 3-8-71 に給排気ファンの制御スイッチを示す。スライダック（写真 3-8-72）を用いて電圧を制御することで、風量を微調節することができる。

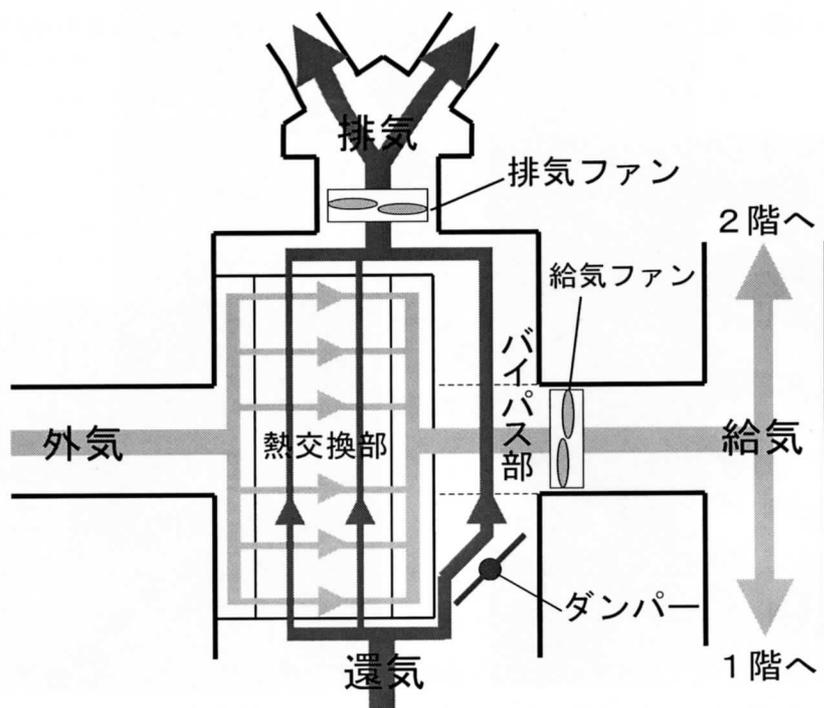
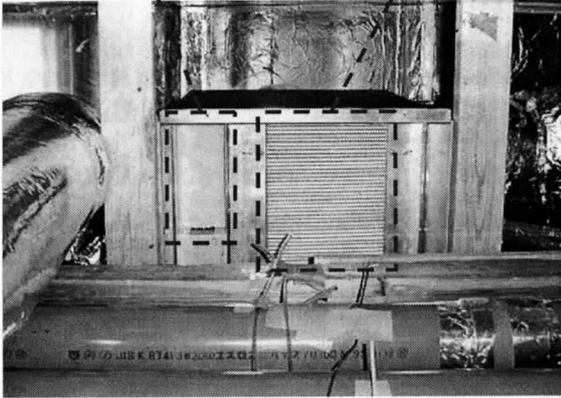
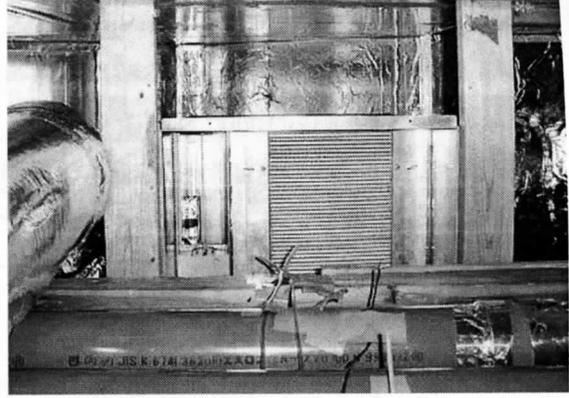


図 3-8-104 熱交換ユニットの構造

ダンパー 熱交換部



(a) ダンパー閉の状態



(b) ダンパー開の状態

写真 3-8-69 熱交換ユニットの排気側入口

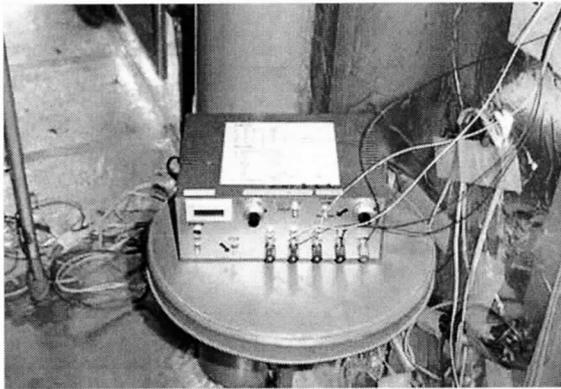


写真 3-8-70 ダンパーの制御装置

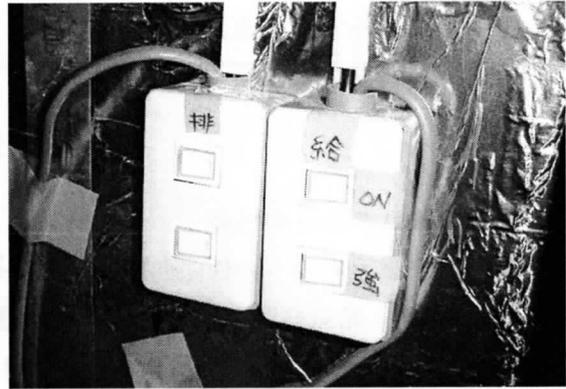


写真 3-8-71 ファンの制御スイッチ

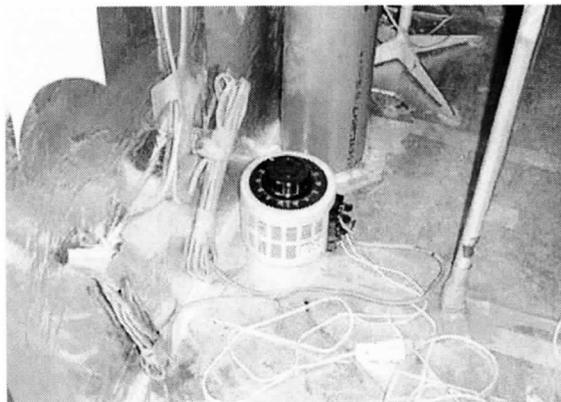


写真 3-8-72 スライダック

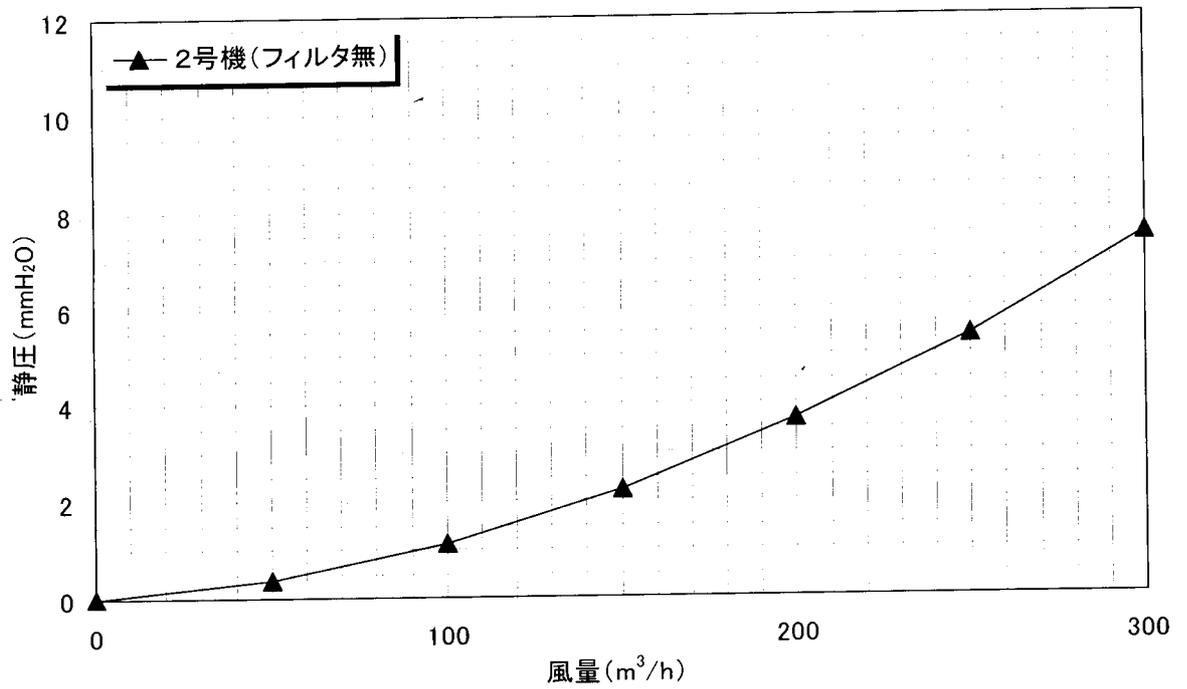
今回、実験棟に設置して性能実験を行う熱交換ユニットは2号機で、以前開発された1号機に改良を加えたものである。図3-8-105に、2号機の熱交換ユニットの図面（立面図、平面図）を示すが、基本的な構造や外形は1号機もこれと同じである。1号機から2号機への改良点は以下に示す通りである。

- ① 給気と排気を分割している特種加工紙（熱交換素子）の紙質を変更し、透気度（通気度）を100秒以下から10000秒に改善した。
→透気度とは、紙の表面から裏面へ空気が流れる度合のことで、この値が大きい程、高圧力下でも空気が通りにくくなる。すなわち、給気・排気間の空気の漏れを減少させることができる。
- ② 給気経路において熱交換部の前後に空間を取った（外気OA側では30mm→59mm、給気SA側では30mm→60.5mm）。
→熱交換部の隅まで均等に空気が流れるようにし、給気風速を落とし抵抗を減少させるため。
- ③ 熱交換部の給気流路を短くした（316mm→266mm）。
→給気経路における抵抗（圧力損失）を減少させるため。同一管路を空気が流れる場合、距離が短いほど抵抗が小さくなる。
- ④ 排気ファンを3点で支持した。1号機は2点支持。
→強度アップのため。

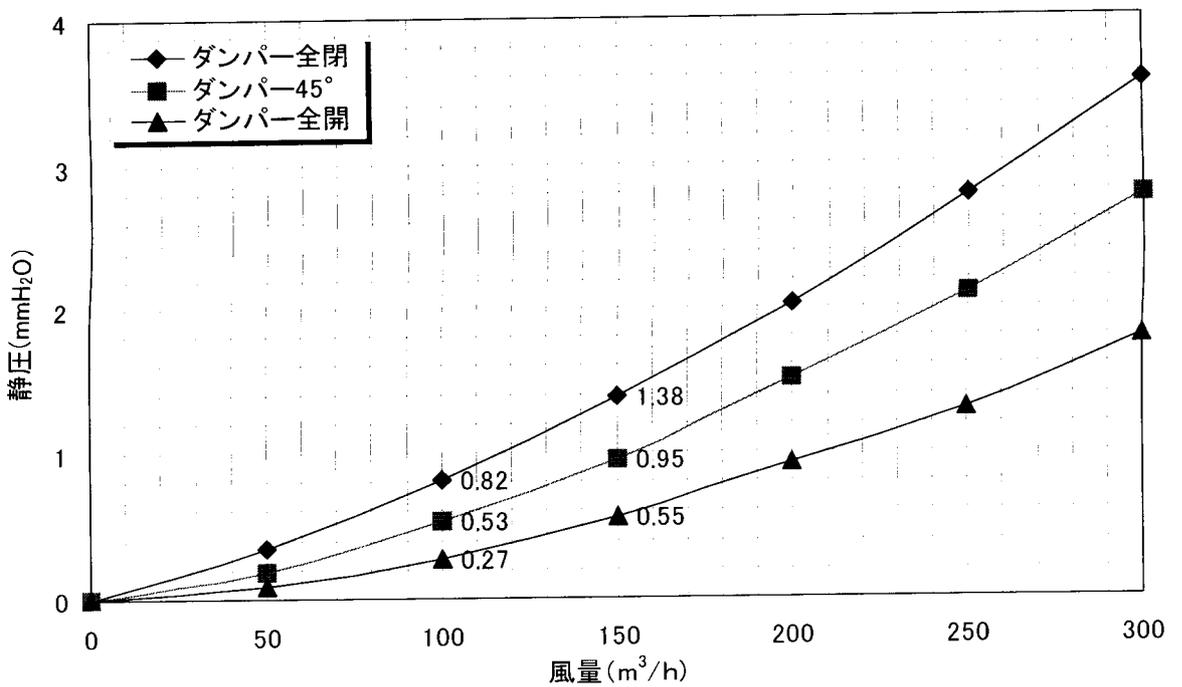
2) 熱交換ユニットの性能

以下に、熱交換ユニットの性能曲線について示す。

- ① 図3-8-106：給気経路と排気経路の圧力損失曲線
- ② 図3-8-107：ユニット内の給気ファンの性能曲線
- ③ 図3-8-108：ユニット内の排気ファンの性能曲線
- ④ 図3-8-109：排気風量と温度交換効率の関係
- ⑤ 図3-8-110：ユニット内の給気ファンと排気ファンの消費電力と電圧の関係



(a) 給気経路



(b) 排気経路

図 3-8-106 熱交換ユニットの圧力損失

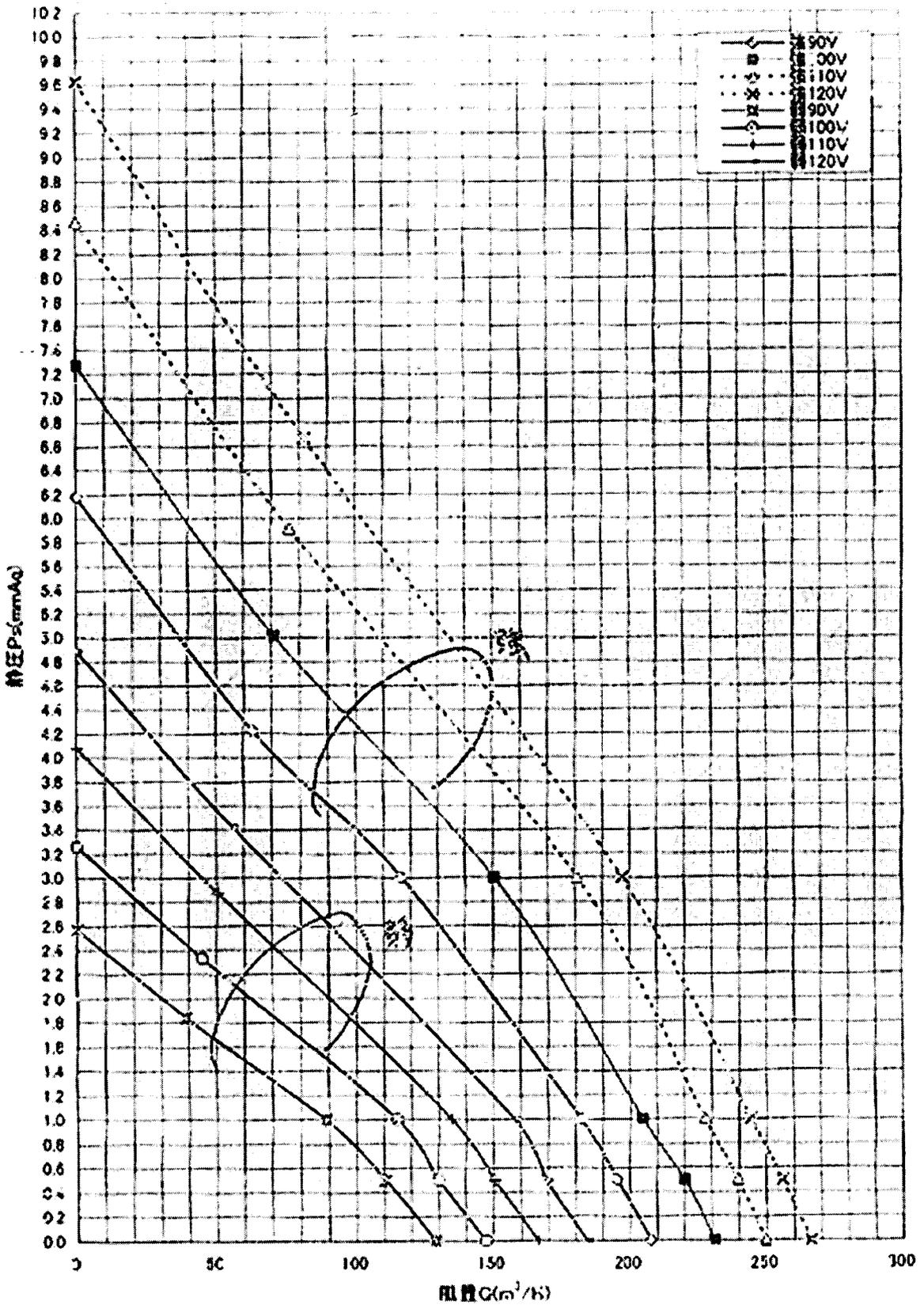


図 3-8-107 熱交換ユニットの給気ファン性能曲線

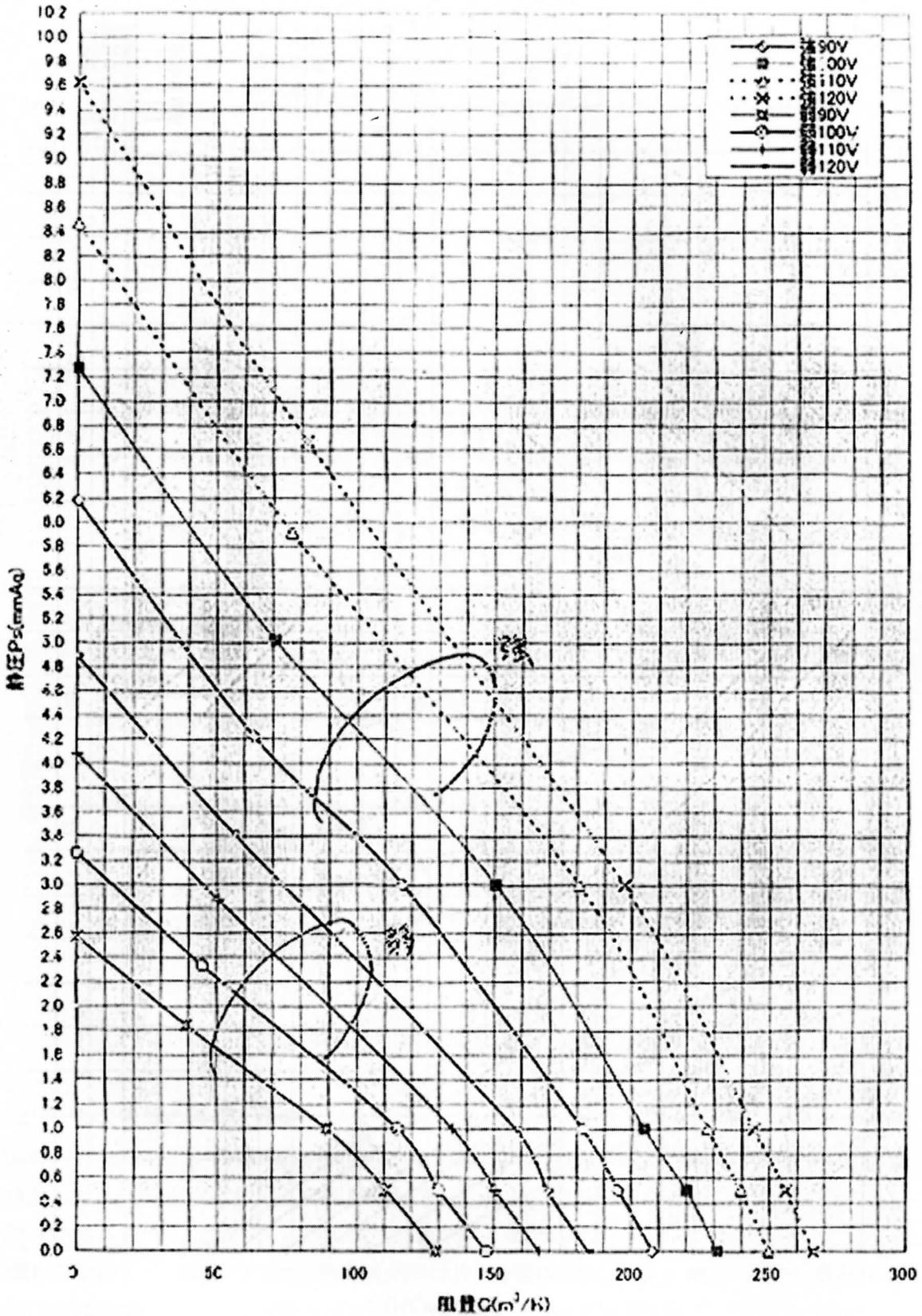


図 3-8-107 熱交換ユニットの給気ファン性能曲線

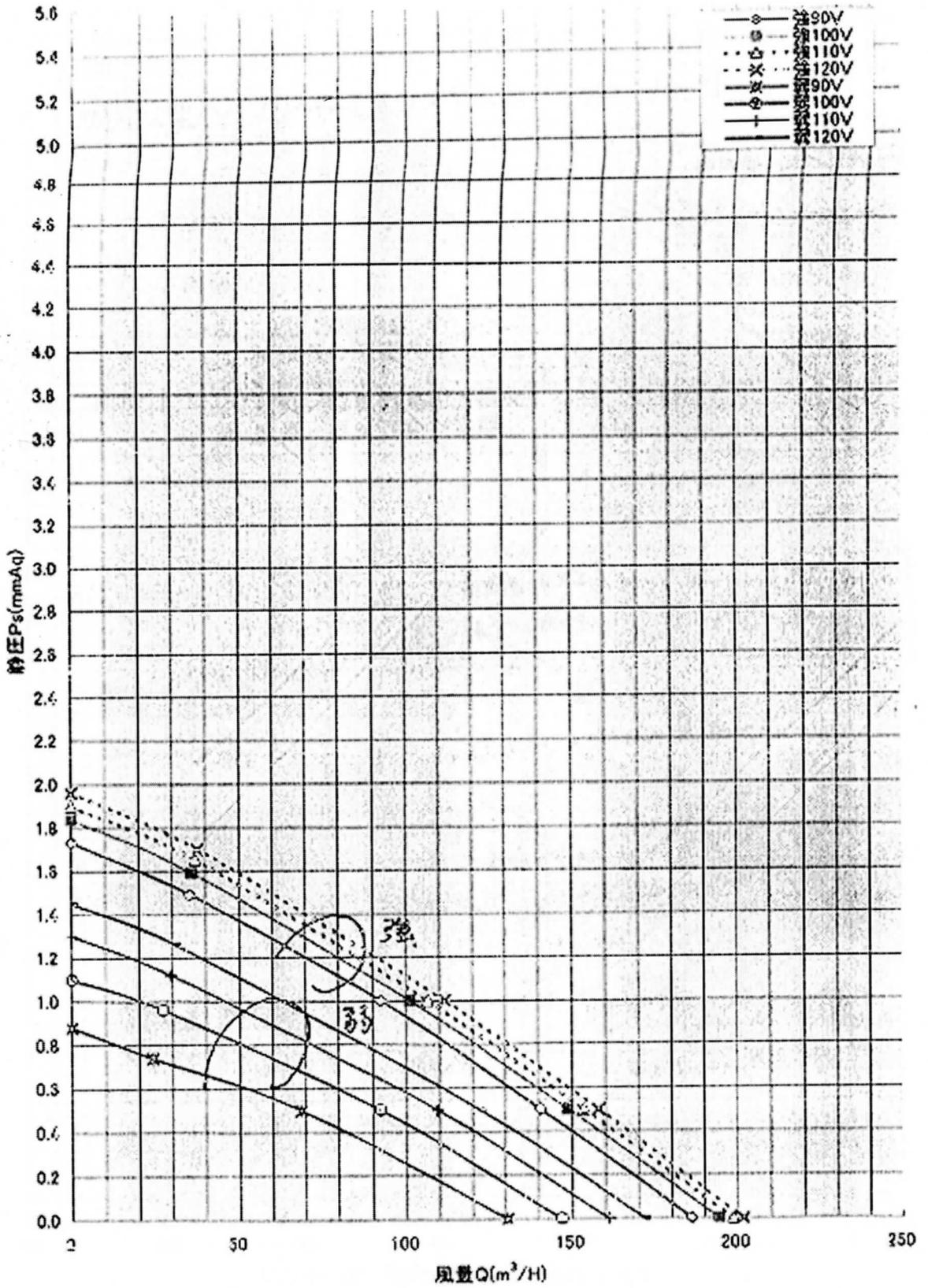


図 3-8-108 熱交換ユニットの排気ファン性能曲線

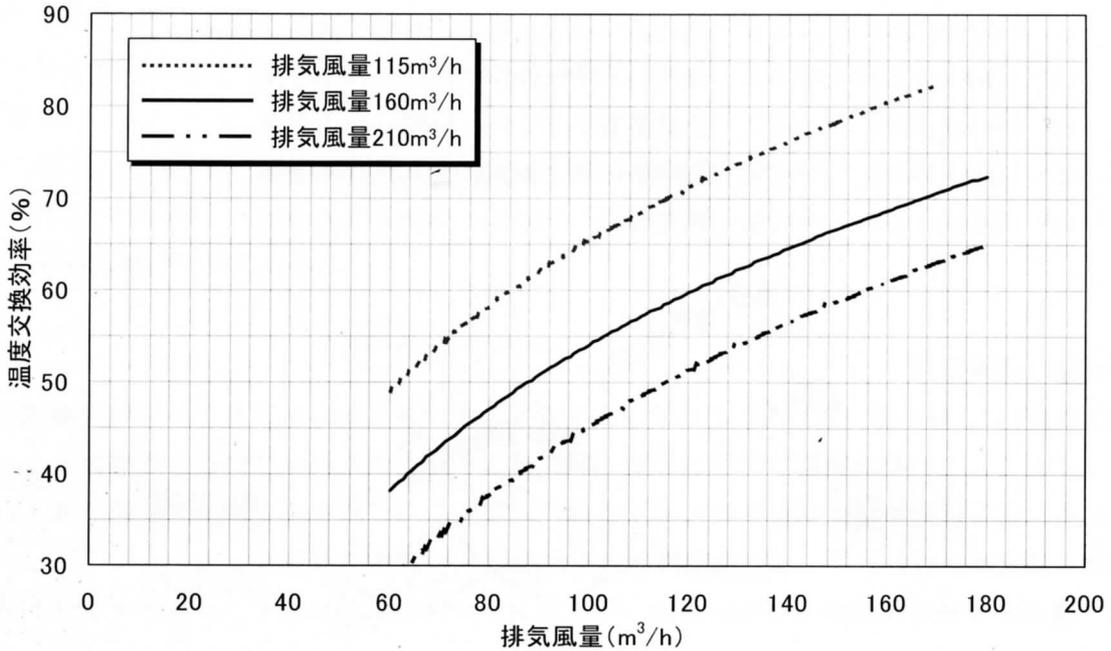


図 3-8-109 熱交換ユニットの温度交換効率と排気風量の関係

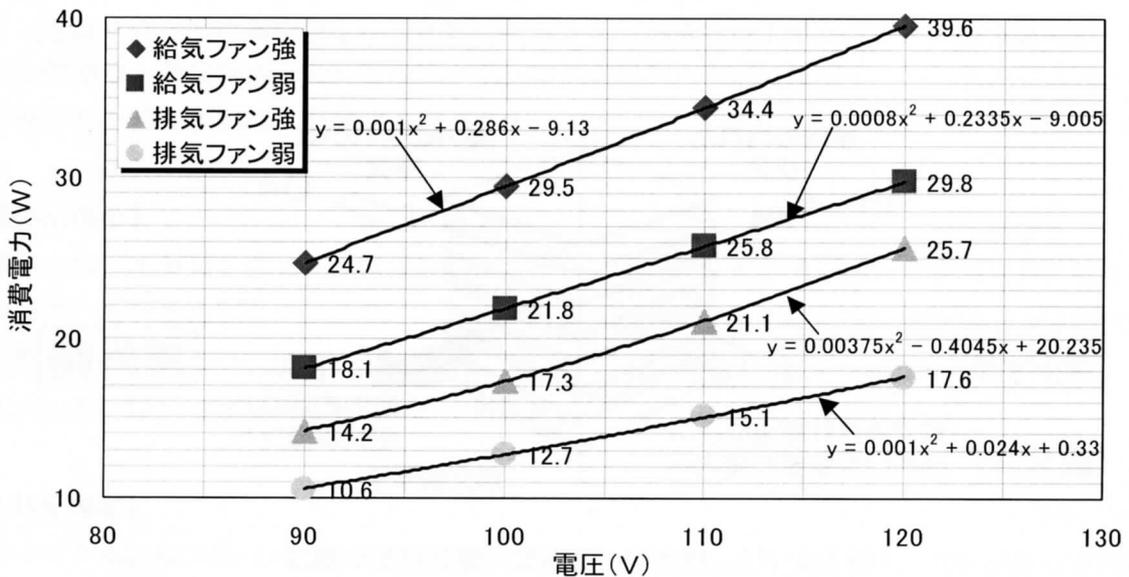


図 3-8-110 ファンの消費電力と電圧の関係

3) 熱交換器の種類と特徴

温度の異なる空気が直接あるいは間接的に隣接する場合、熱は温度の高い空気から低い換気へと移動し平衡状態を目指す。この原理を利用したのが熱交換器である。

熱交換器は、構造の違いから静止型（透過型）と蓄熱回転型の2つに大別できる。住宅換気システムでは静止型が主流であり、熱交換効率は良いが駆動部によるコストがかかる蓄熱回転型は、大型の空調設備でエアハンドリングユニットと組み合わせて使用される。本研究で使用した熱交換器は静止型である。

以下に、図中の空気の流れを表す用語について、換気経路順に説明する。

- ① OA (Outdoor Air) →外気：室外から熱交換器に導入される空気
- ② SA (Supply Air) →給気：熱交換器から室内に供給される空気
- ③ RA (Return Air) →還気：室内から熱交換器に導入される空気
- ④ EA (Exhaust Air) →排気：熱交換器から室外に排出される空気

【静止型（透過型）】

図3-8-111に、静止型（透過型）の構造を示す。本システムに組み込まれている熱交換器はこのタイプである。この熱交換器は特種加工紙（熱交換素子）で作られた仕切板と間隔板によって構成される。給気と排気は仕切板を挟んで互い違いに直交し（これを直交流または斜交流という）、その間に熱交換が行われる。この熱交換器の特徴は以下の通りである。

- ① 構造が単純で駆動部分がないため、ランニングコストがかからず、メンテナンスが有利である。
- ② 給気経路と排気経路が分離されており、清浄度の高い換気ができる。
- ③ 仕切板を構成する特殊加工紙の素材により顕熱交換型にも全熱交換型にもなり得る。

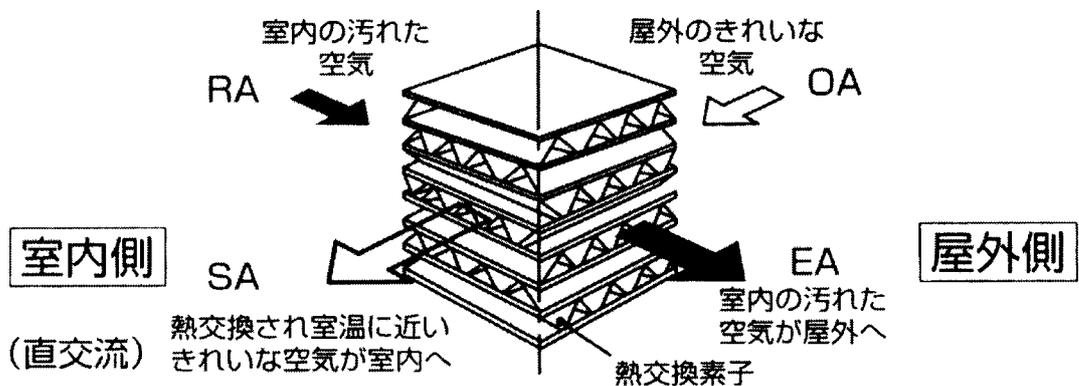


図3-8-111 静止型（透過型）熱交換器の構造

【蓄熱回転型】

図3-8-112に、蓄熱回転型熱交換器の構造を示す。積層ハニカム構造になったローターが毎分約8回転ほどのスピードで回転する間に、排気部分でローターへの蓄熱蓄湿を行い、給気部分でローターに蓄積された熱や湿気を給気へ受け渡すという形で熱交換が行われる。給気と排気は対向流である。この熱交換器の特徴は以下の通りである。

- ① 静止型に比べて熱交換効率が高い。
- ② 熱交換器のローターを回転させるための駆動部があり、その定期的なメンテナンスが必要となる。
- ③ 給気と排気が同一通路を往復するため、排気中の汚染物質がローターに附着し給気中に混入することがある。
- ④ 全熱交換型のみである。

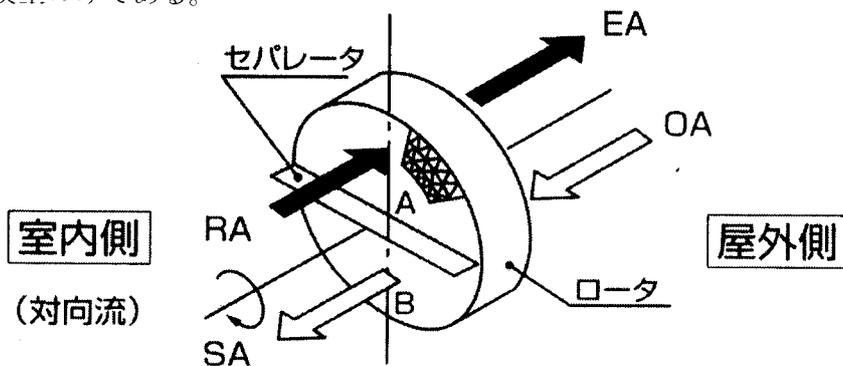


図 3-8-112 蓄熱回転型熱交換器の構造

熱交換器は、熱交換素子の性質の違いから顕熱交換型と全熱交換型の2つに大別できる。本研究で使用した熱交換器は、全熱交換型である。

【顕熱交換型】

顕熱とは、水蒸気を含まず、常温近くでは液化・蒸発をしない分子のみで構成された乾き空気が持っている熱量のことで、温度計によって知ることができる。温度 0°C 、相対湿度 0% の空気が持つ熱量は 0kcal/kg で、空気の温度が 10°C 上昇する毎に約 10kJ/kg ずつ増加する。

すなわち、顕熱交換器では熱のみの交換が行われ、湿気の交換は行われない。

【全熱交換型】

本システムに組み込まれている熱交換器はこのタイプである。全熱とは、空気が持っている顕熱と潜熱を合わせた熱量のことである。顕熱については前述した通りである。潜熱とは、水蒸気を含む湿り空気が持っている熱量のことで、温度計で把握することはできない。図 3-8-113 に湿り空気線図を示す。これは、湿り空気における乾球温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)、湿球温度 θ' ($^{\circ}\text{C}$)、露点温度 θ'' ($^{\circ}\text{C}$)、絶対湿度 x (g/kg)、相対湿度 ϕ_R ($\%$)、エンタルピー h (kcal/kg)などの状態値間の関係を示すもので、状態値を2つ与えれば他の状態値を知ることができる。例えば、温度 25°C 、相対湿度 0% の空気が持つ熱量(エンタルピー)は約 6kcal/kg だが、温度 25°C 、相対湿度 75% の空気が持つ熱量は約 15kcal/kg で、同じ温度の空気でも湿度が異なることによって熱量が変化することが分かる。

すなわち、全熱交換器では熱と湿気の両方の交換が行われる。

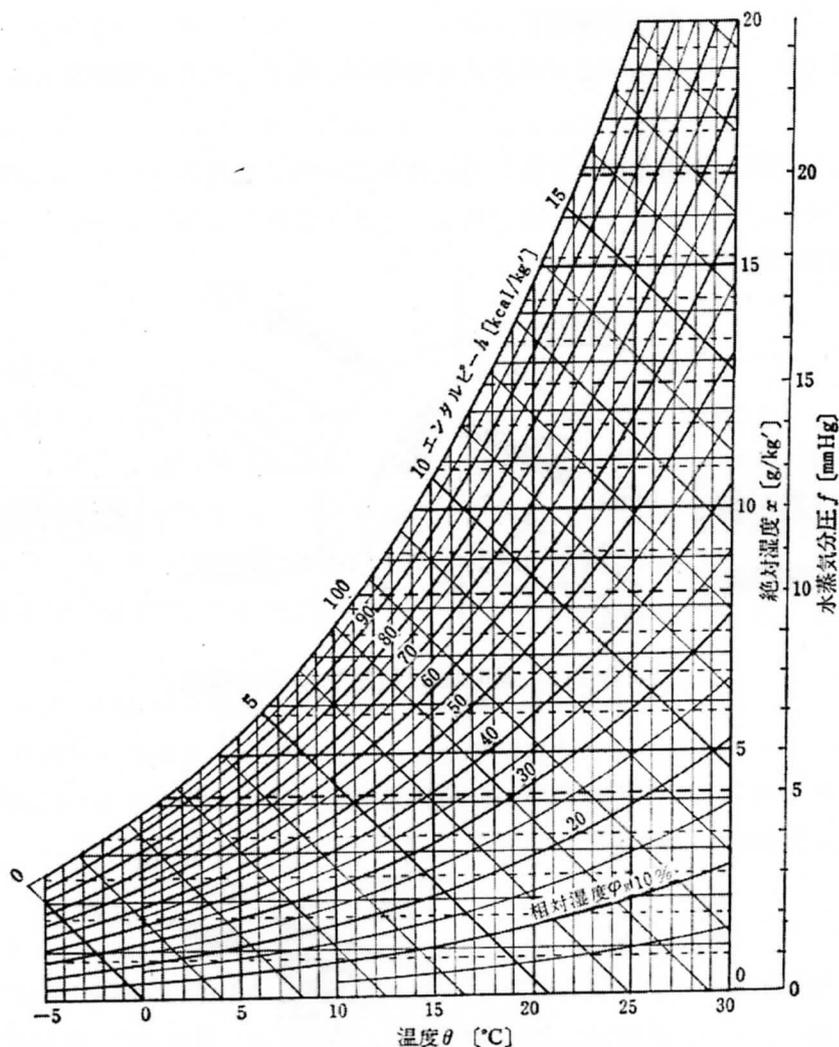


図 3-8-113 湿り空気線図

(4) 実験による性能評価

(a) 実験条件

実験条件と期間を表 3-8-19 に示す。実験は冬期（12 月末～1 月末）から中間期（5 月下旬～6 月下旬）にかけて行う。冬期は、給気ファンと排気ファンの ON・OFF を組み合わせた 4 条件、中間期は、ファンの ON・OFF にダンパーの開閉を組み合わせた 6 条件である。冬期は温度差換気の促進によって十分な換気量が得られると予想されるので、ダンパーを閉じ熱交換換気を行う。中間期は室内外温度差が小さく換気量が少なくなることが予想されるので、ファンを両方とも運転しない実験は省略する。また、ダンパーを開けた状態での実験も行い、換気量がどのくらい増加するかを調べる。ダンパーは 0～90 度の範囲で開けることができるが、今回の実験では全開（90 度）にした。

表 3-8-19 実験の条件と期間

実験	給気ファン	排気ファン	室内暖房	ダンパー	実験期間	
1	OFF	OFF	25°C設定	閉	冬期	2001/12/30~12/31
2	ON	ON				2002/1/6~1/9
3	ON	OFF				2002/1/17~1/20
4	OFF	ON				2002/1/29~1/31
5	ON	ON	25°C設定	閉	中間期	2002/5/24~5/27
6	ON	OFF				2002/5/29~5/31
7	OFF	ON				2002/5/31~6/3
8	ON	ON	25°C設定	開	中間期	2002/6/14~6/17
9	ON	OFF				2002/6/17~6/20
10	OFF	ON				2002/6/20~6/22

給排気ファンはいずれも強運転とする。その上で、各室の給気口における給気量が20~25m³/h(実験家屋全体で約80~100m³/h、換気回数では約0.5~0.6回/h)になるように、給気ファンにかかる電圧をスライダックで微調節した(75V)。排気ファンは、給気ファンと同じ電圧に設定している。全実験が終了するまで、ファンの電圧の設定は変更していない。設定電圧時(75V)における給気ファンと排気ファンの性能曲線を図3-8-114に示す。また、図3-8-115には、実験前(2001年12月21日)に風量測定器(コーナー札幌製、Swema Flow 65)を用いて測定した各室の給気口風量の結果を示す。

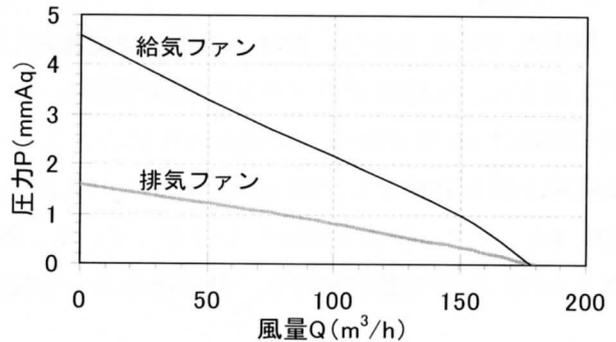


図 3-8-114 ファンの性能曲線(設定電力:75V)

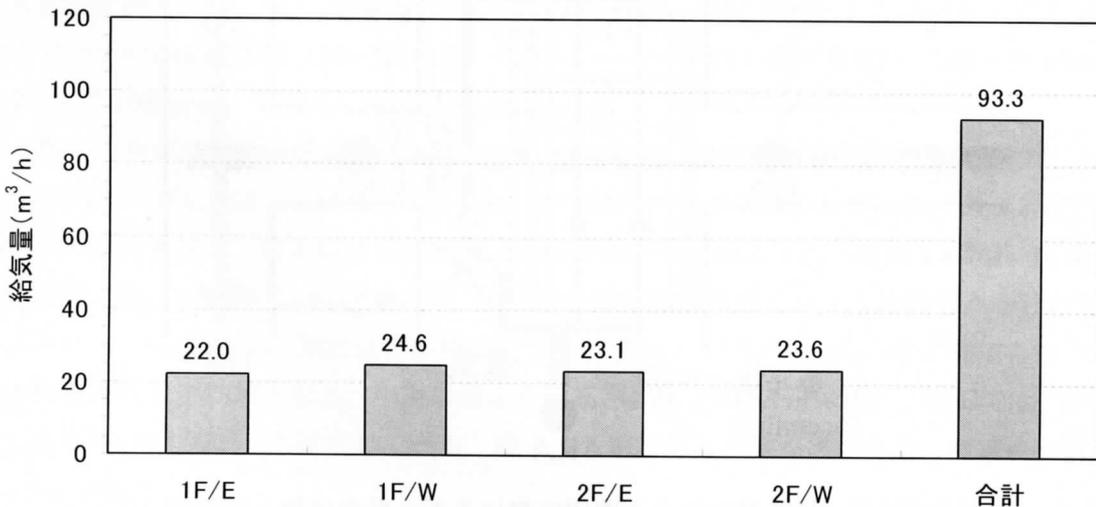


図 3-8-115 各室の給気口における風量

1階と2階の部屋に設置されたルームエアコンの暖房設定温度は25°C、廊下は自然室温である。

(b) 測定項目と測定方法

測定項目は、外部風向風速、温度、外気導入量、排気ダクトにおける排気量、室内外差圧である。以下に、それぞれの測定項目の測定方法を示す。

1) 外部風向風速

印字式多測点風向風速計を用いて10分間隔で測定する。測定場所は、実験家屋の西側空地の地上8m地点である。

2) 温度

熱電対（写真3-8-73）をサーモダックに接続し電圧を測定する。測定データは温度データとして変換され、自動的にパソコンに記録される（写真3-8-74、左がサーモダック、右がパソコン）。測定間隔は10分である。測定点は各室に1点ずつ（床上110cm）、熱交換ユニット周辺には、給気経路と排気経路ともに熱交換ユニットの入口と出口の各2点、計4点（換気経路順にOA、SA、RA、EA、ダクト中心で測定）を設定している。外気温は、実験家屋の西側に位置する百葉箱（写真3-8-75）の中で測定を行う。熱交換ユニット周辺における測定点の位置を図3-8-116に示す。

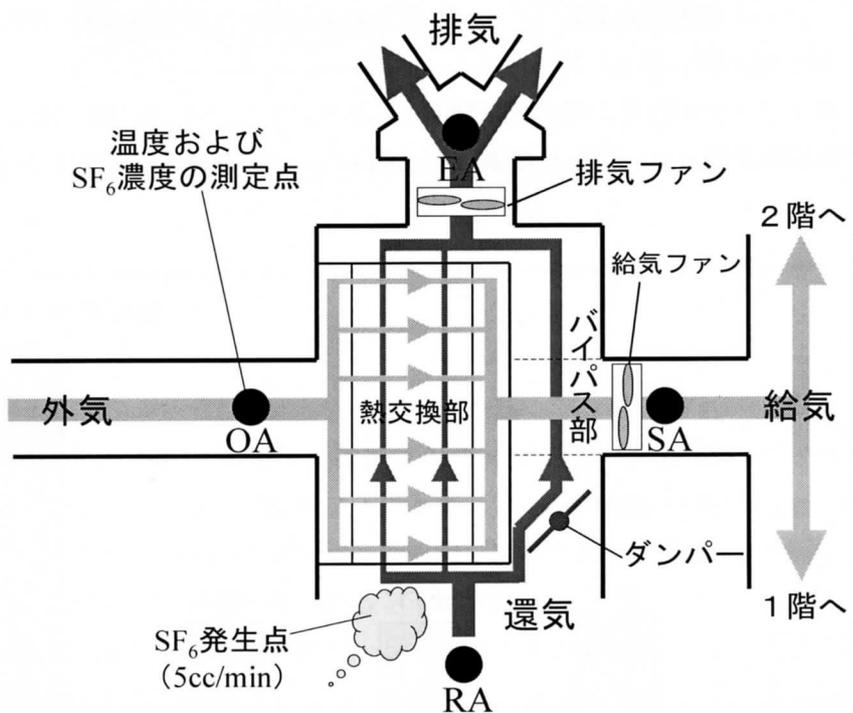


図3-8-116 熱交換ユニット周辺におけるガス発生位置と測定点

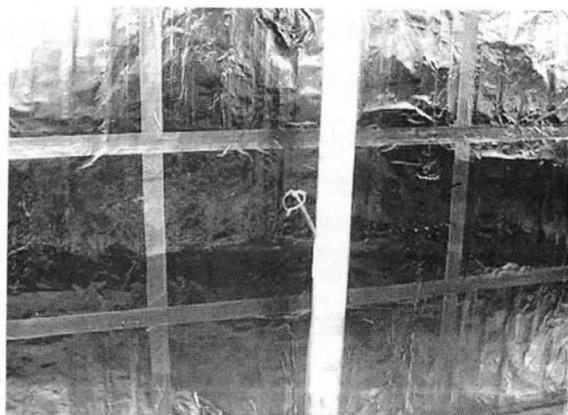


写真 3-8-73 熱電対の設置状況



写真 3-8-74 サーモダックとパソコン



写真 3-8-75 百葉箱

3) 一定濃度法による外気導入量

外気導入量の測定は一定濃度法で行う。本実験では、トレーサーガスとして CO_2 を用い、ガスの注入と濃度測定には、マルチガスモニター (B&K 社製、1302 型) と 2 台のマルチポイントサンプラー (B&K 社製、1303 型) を用いる。トレーサーガスの設定濃度は、実験 1 が 1500ppm、実験 2~7 は 1000ppm、実験 8~10 は 900ppm である。

ガス濃度の測定点 (サンプリングポイント) は、外気に 1 点、熱交換ユニット周辺に、温度の測定点と同様の OA、SA、RA、EA (図 3-8-117 参照) の 4 点を設定している。図 3-8-117 に各室の測定点の位置を示す。廊下以外の部屋では、部屋の中央付近に 1 点 (写真 3-8-76)、南側の間仕切扉に設置されている通気口にそれぞれ 1 点ずつ (写真 3-8-77)、計 3 点の測定点を設けている。このように 1 つのゾーンに測定点を多数設ける場合は、チューブを分岐させて測定を行うため、測定される濃度は平均値となる。中央の測定点の高さは床上約 1.1m である。廊下では、中央よりも少し北寄りの地点に 1 点設定している。廊下は各室よりも天井が高いため、測定点の高さは床上約 1.5m である。

各室のガス注入点 (ドージングポイント) の位置を図 3-8-117 に示す。廊下以外の部屋では、

給気口に1点（写真3-8-62・写真3-8-65参照）、小型ファンに1点（写真3-8-78）、エアコンの吹出口に1点（写真3-8-79）、計3点のガス注入点を設けている。小型ファンは室内空気を攪拌するためのものである。トレーサーガスとして用いる SF₆ ガスは空気よりも密度が大きいので、ガス注入点は全て高い位置にある。廊下の注入点は、ガス測定点と反対側の南側に1点設定している。

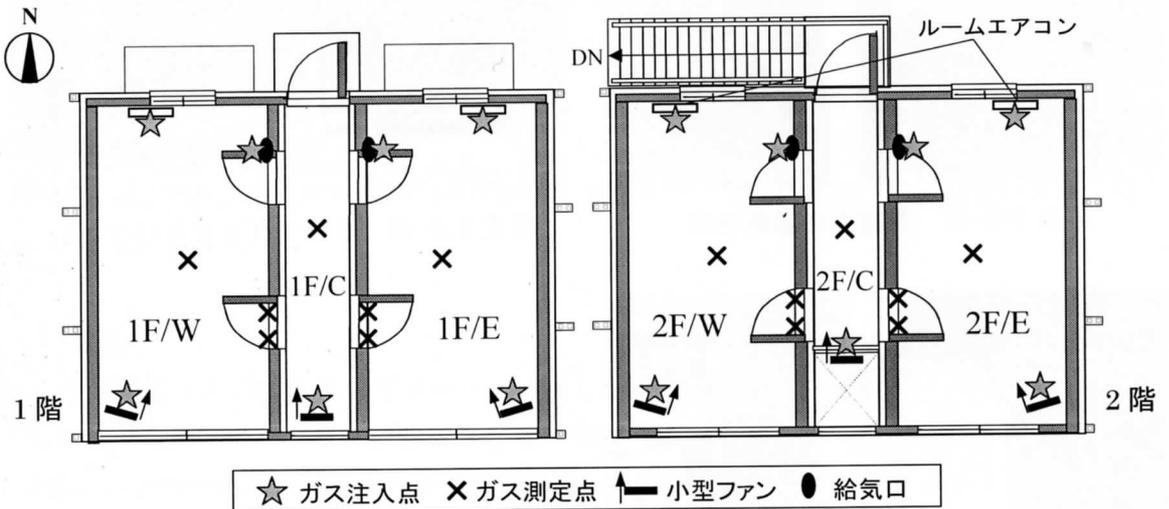


図3-8-117 各室におけるガス濃度測定点およびガス注入点

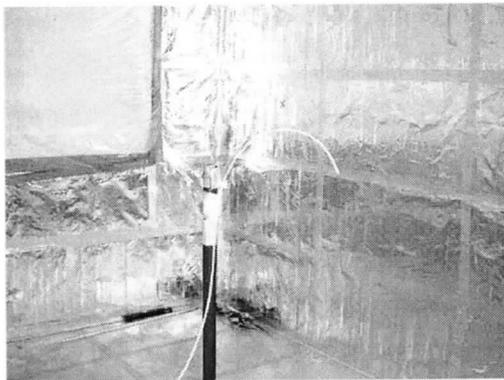


写真3-8-76 室内中央のガス濃度測定点



写真3-8-77 通気口のガス濃度測定点



写真3-8-78 小型ファンのガス注入点

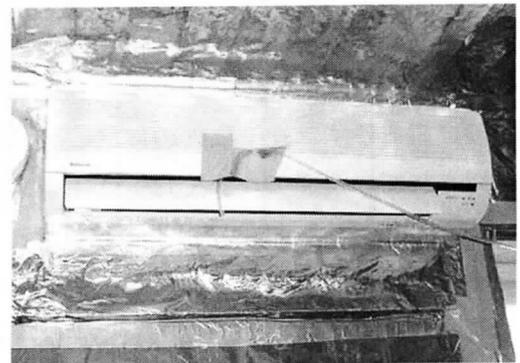


写真3-8-79 エアコン吹出口のガス注入点

4) 排気ダクトにおける排気量

熱交換ユニットの排気側入口で SF₆ ガスを 5cc/min 発生させ、熱交換ユニットの排気側出口（測定点 EA）の濃度を測定することにより算出した。ガス発生点とガス濃度測定点の位置を図 3-8-118 に示す。発生点は、熱交換ユニットの排気側入口の直下、測定点 RA より約 20cm 上に設定した（写真 3-8-69 参照、写真中央の透明なチューブがガス発生点、写真下側の白いチューブが測定点 RA）。ガスの注入はガスポンペに接続したテフロンチューブで行い、マスフローコントローラー（エステック製）によってガスの流量を一定に保つ。排気量の計算方法を式（3-8-4）に示す。

$$Q=m/C \quad (3-8-4)$$

Q：排気ダクトにおける排気量 m：ガス発生量

C：ガス濃度（EA の濃度と RA の濃度の差）

5) 室内外差圧

1 階床レベルと 2 階床レベルに差圧計を設置し、10 分間隔で測定を行う。温度測定と同様に、差圧計をサーモダックに接続して、測定データを自動的にパソコンに記録する。1 階の差圧計（写真 3-8-80）は 1F/E の中央、2 階の差圧計（写真 3-8-81）は 2F/E の中央に設置している。差圧計の高圧側チューブは室内へ、低圧側チューブは屋外へ導いている。屋外のチューブは 1 階床レベルと同じ高さに設置し、風の影響を直接受けないようにするため、多数の小さな穴を開けた小さなダンボール箱の中心にチューブの先端がくるようにした（写真 3-8-82）。

通常、室内外差圧を測定するときは、室内の測定点と屋外の測定点の高さが同じでなければならない。しかし、2 階の床レベルと同じ高さにチューブを設置するのは難しいため、今回は、1 階の低圧側チューブと 2 階の低圧側チューブを建物内で 1 本にしてから屋外へ導いている。そこで、2 階の差圧は式（3-8-8）を用いて補正を行う。



写真 3-8-80 差圧計 (2F/E)

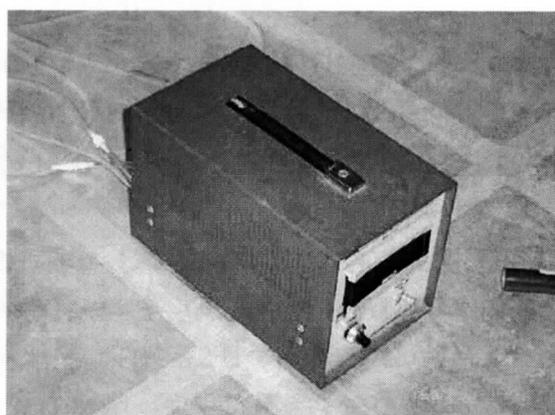


写真 3-8-81 差圧計 (1F/E)



写真 3-8-82 外気側チューブの設置状況

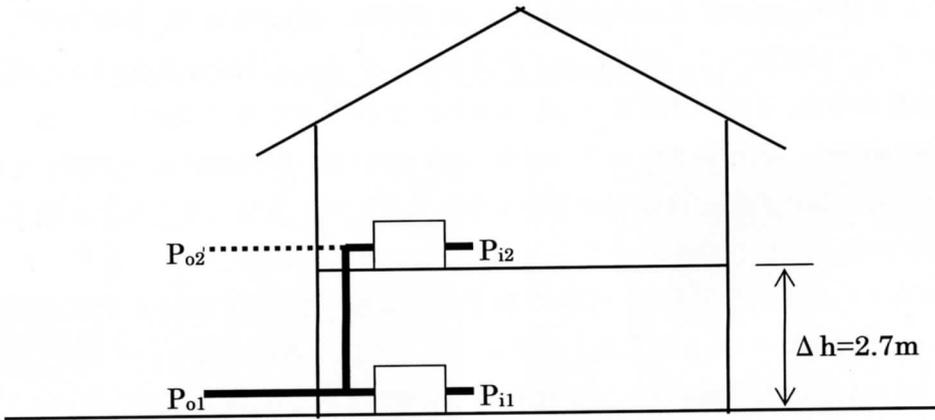


図 3-8-118 室内外差圧の測定位置

○定義：2階の差圧 $\Delta P_2 = 2$ 階床レベル室内圧力 P_{i2} —2階床レベル室外圧力 P_{o2}

$$= P_{i2} - (P_{o1} - \gamma_o \Delta h) \quad (3-8-6)$$

○測定：2階の差圧の測定値 $\Delta P'_2 = P_{i2} - (P_{o1} - \gamma_i \Delta h) \Leftrightarrow P_{i2} = \Delta P'_2 + P_{o1} - \gamma_i \Delta h \quad (3-8-7)$

2階の差圧は、式 4-2 に式 4-3 を代入して求める。

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \Delta P'_2 + P_{o1} - \gamma_i \Delta h - (P_{o1} - \gamma_o \Delta h) \\ &= \Delta P'_2 - (\gamma_i - \gamma_o) \Delta h = \Delta P'_2 - (\gamma_i - \gamma_o) \times 2.7 \quad (3-8-8) \end{aligned}$$

ここで、 γ_o ：外気密度 $= 1.293 / \{1 + (\theta_o / 273.16)\}$ θ_o ：外気温(°C)

γ_i ：室内空気密度 $= 1.293 / \{1 + (\theta_i / 273.16)\}$ θ_i ：室内温度(°C)

(c) 実験結果

1) 外部風向風速・温度・CO₂濃度・室内外差圧

各実験における外部風向風速・温度・CO₂濃度・室内外差圧の測定結果を図3-8-119～図3-8-128に示す。

(a) 給気ファン OFF・排気ファン OFF (実験1)

風は全体的に強く、主風向は西寄りである。30日の昼過ぎと31日の午後はときおり10m/sを越える風を記録している。30日16:00から31日1:00にかけて風向風速計に雪が積もり、測定データが得られなかったため、仙台管区気象台のデータを代用した。暖房室の温度は25°C前後に維持されており、非暖房室である廊下の温度は15～20°Cで、外気温の影響を受けている。各室のCO₂濃度は、一定濃度法の設定濃度である1500ppm前後に維持されている。

熱交換ユニット周辺の温度、CO₂濃度の測定結果から、給気ダクト内での逆流が確認された。他の実験では外気温に近い値を示しているOAの温度が2F/Cの温度まで上昇し、SAの温度がRAよりも上昇している。これより、暖房で暖められた室内空気が給気ダクトを逆流していることが分かる。また、OAとSAのCO₂濃度が室内濃度の1500ppmまで上昇していることから、給気ダクト内の逆流が確認できる。パッシブ換気を行うためには、給気ダクトの抵抗と建物の隙間面積を小さくし、給気ダクト内の逆流を防止する必要があると考えられる。

2階床レベルの室内外差圧はほぼ0で、この部分に中性帯があることを示している。1階床レベルでは室内側がわずかに負圧になっているので、1階では建物隙間から外気が流入し、2階では室内空気が流出していると考えられる。

(b) 給気ファン ON・排気ファン ON (実験2・5・8)

実験2では前半は微風だが、後半に入ると風が強くなり10m/sを越える時間帯もある。実験5・8では1～10m/sの間で変動している。主風向は、実験2では西寄り、実験5では北寄りおよび南寄り、実験8では南東である。暖房室の温度が25°C前後に維持されているのに対し、廊下の温度は、冬期(実験2)では15～20°C、中間期(実験5・8)では21～25°Cである。各室のCO₂濃度は、実験2・5では1000ppm、実験8では900ppmに維持されている。

熱交換ユニット周辺の温度を見ると、ダンパーを閉めて行った実験2・5では、ユニットの排気側入口のRAより出口のEAの方が低く、給気側入口のOAより出口のSAの方が高いことから、熱交換が行われていることを確認できる。ダンパーを開けて行った実験8では、ダンパー閉の場合にはSAよりも低かったEAの温度がSAより高くなっている。これは、ダンパーを開けることでバイパス部の排気量が増加し、熱交換部の排気量が減少したためである。また、OAの温度が外気より1～3°C高いのは、屋外から取り入れられた空気が給気ダクトを移動する間に暖められたものと考えられる。

ダンパーを閉めた場合（実験2・5）は1階2階ともに室内側が正圧で、建物隙間を通して室内空気が流出していると考えられる。一方、ダンパーを開けた場合（実験8）は、2階床レベルの室内外差圧はほぼ0で、1階床レベルでは室内側が負圧になっているので、1階では建物隙間から外気が流入し、2階では室内空気が流出していると考えられる。実験2・5・8を比較すると、冬期に測定した実験2と比べて内外温度差の小さい中間期に測定した実験5では、室内側の正圧の程度が小さくなる。実験8は実験5と同じ中間期に測定を行っているが、ダンパーを開けて排気量が増加することにより、室内側の正圧の程度が更に小さくなることが分かる。

(c) 給気ファンON・排気ファンOFF（実験3・6・9）

実験3・9の風速は1~10m/sの間で変動している。実験6では1~8m/sの間で変動し、日中に風が強い。主風向は、実験3では北西寄り、実験6では北西寄りおよび南東寄り、実験9では北西寄りである。各室のCO₂濃度は、実験3・6では1000ppm前後、実験9では900ppm前後に維持されている。

各室と熱交換ユニット周辺の温度変動は実験2と類似しており、熱交換が行われていることを確認できる。排気ファンを運転していないため、給気ファン・排気ファンを運転した場合と比べて、RAとEAの温度差よりOAとSAの温度差の方が小さい。

ダンパーを閉めた場合（実験3・6）は1階2階ともに室内側が正圧で、建物隙間を通して室内空気が流出していると考えられる。一方、ダンパーを開けた場合（実験9）は、1階床レベルで室内側が負圧、2階床レベルでは室内側が正圧になっていることから、中性帯は1階にあり、1階の低位置にある建物隙間から僅かに外気が流入し、それ以外では室内空気が流出していると考えられる。給気ファンのみを運転しているため、給気ファンと排気ファンを運転していた実験2・5・8と比較して、全体的に室内側の正圧の程度が大きくなっている。また、実験2・5・8と同様に、冬期に測定した実験3、内外温度差の小さい中間期に測定した実験6、中間期にダンパーを開けた実験9の順に、室内側の正圧の程度が小さくなっている。

(d) 給気ファンOFF・排気ファンON（実験4・7・10）

実験4・10の風速は1~8m/sの間で変動している。実験7では1~10m/sの間で変動し、日中に風が強い。主風向は、実験4では西寄り、実験7では南寄り、実験10では南東寄りである。各室の温度変動は、給気ファン・排気ファンを運転した場合、給気ファンのみを運転した場合と類似している。各室のCO₂濃度は、実験4・7では1000ppm前後、実験10では900ppm前後に維持されている。

熱交換ユニット周辺の温度を見ると、SA の温度が RA 付近まで上昇し、実験 4・7 では、RA よりも高くなっている時間帯がある。また、SA の CO₂ 濃度は、実験 4 では室内濃度の 1000ppm、実験 7 では 700ppm、実験 10 では約 500ppm まで上昇している。図 3-8-129 には実験 4 における SF₆ 濃度を示したが、熱交換ユニットの排気側入口で発生させていた SF₆ が SA でも検出されていることが分かる。以上の測定結果より、何らかの経路（例えば、熱交換ユニットや給気ダクトの隙間等）を介して SF₆ が SA へ到達していたと推察される。なお、実験 4 において見られた温度および CO₂ 濃度の急激な上昇は、給気ダクト内の逆流が原因であると考えられる。

冬期に測定した実験 4 では、1 階床レベルでは室内側の方が負圧、2 階床レベルでは室内側の方が正圧になっていることから、中性帯は 1 階にあり、1 階の低位置にある建物隙間から外気が流入し、それ以外では室内空気が流出していると考えられる。中間期に測定した実験 7 では、2 階床レベルの室内外差圧がほぼ 0 で、この部分に中性帯があることを示している。1 階床レベルでは室内側が負圧になっているので、1 階では建物隙間から外気が流入し、2 階では室内空気が流出していると考えられる。実験 10 では、内外温度差の小さい中間期に排気ファンを運転しダンパーを開けることによって、1 階 2 階ともに室内側が負圧となり、建物隙間から外気が流入していると考えられる。

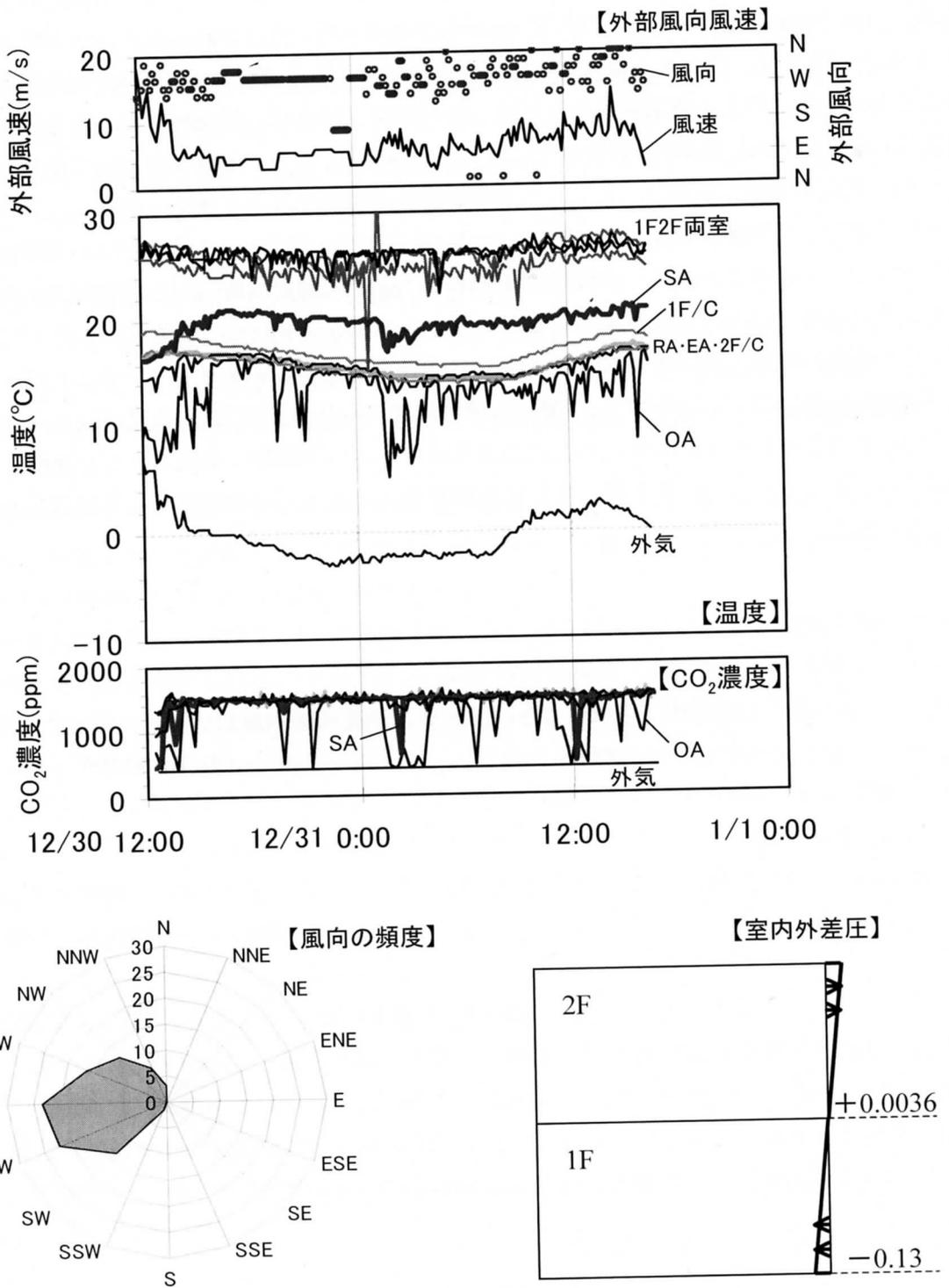


図 3-8-119 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験1: 給気ファンOFF・排気ファンOFF・ダンパー閉・冬期)

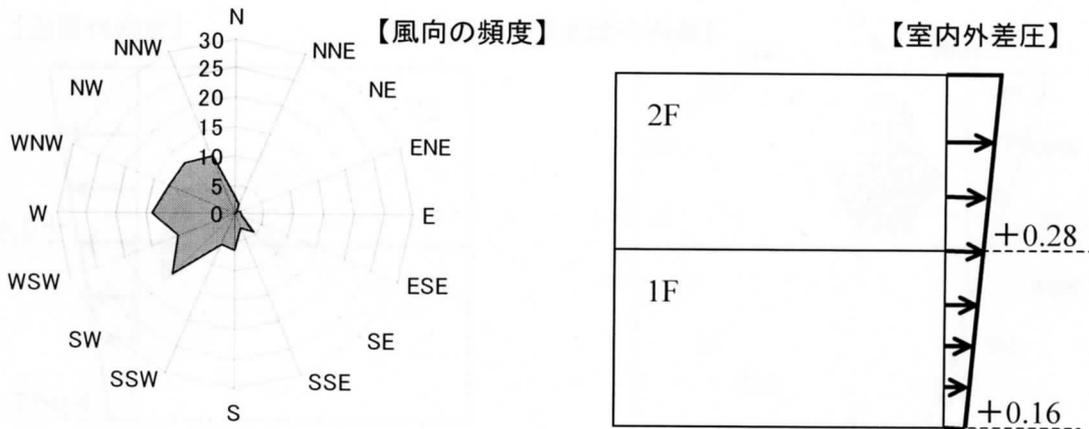
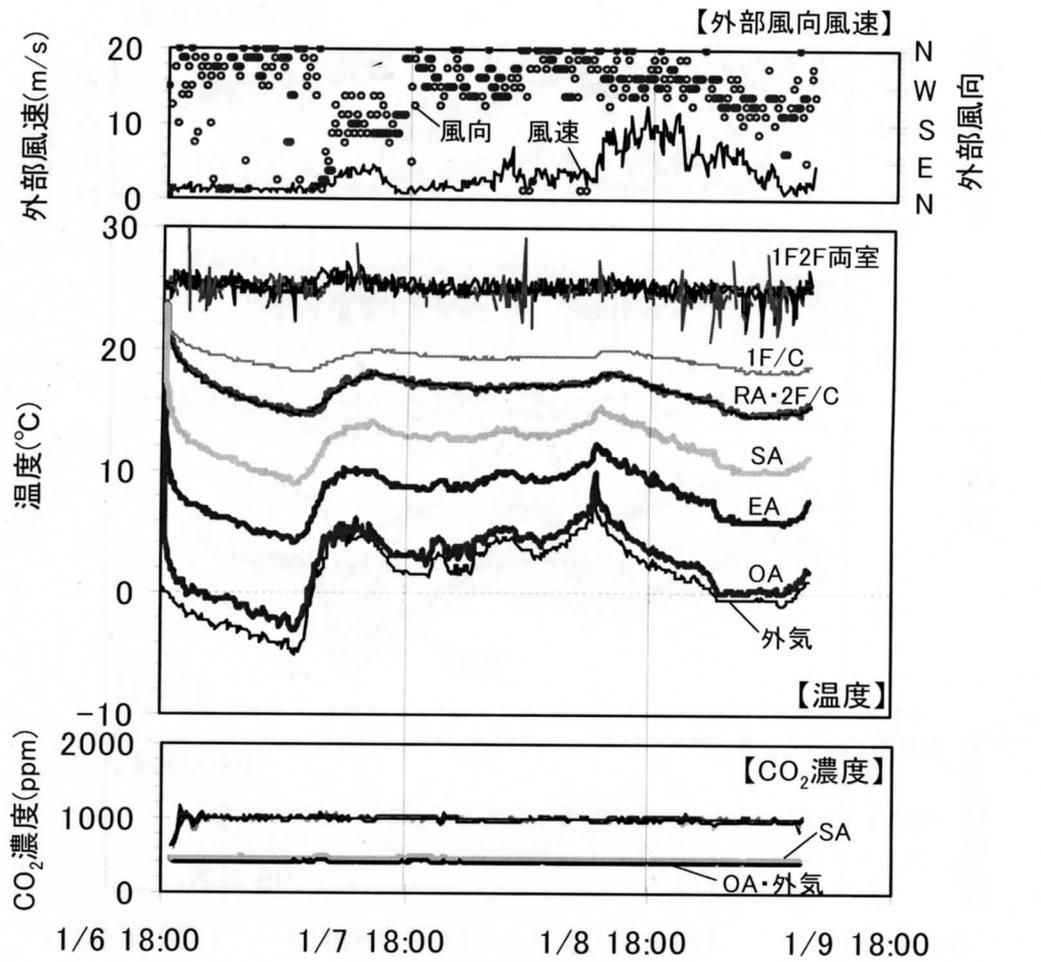


図 3-8-120 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験 2 : 給気ファン ON・排気ファン ON・ダンパー閉・冬期)

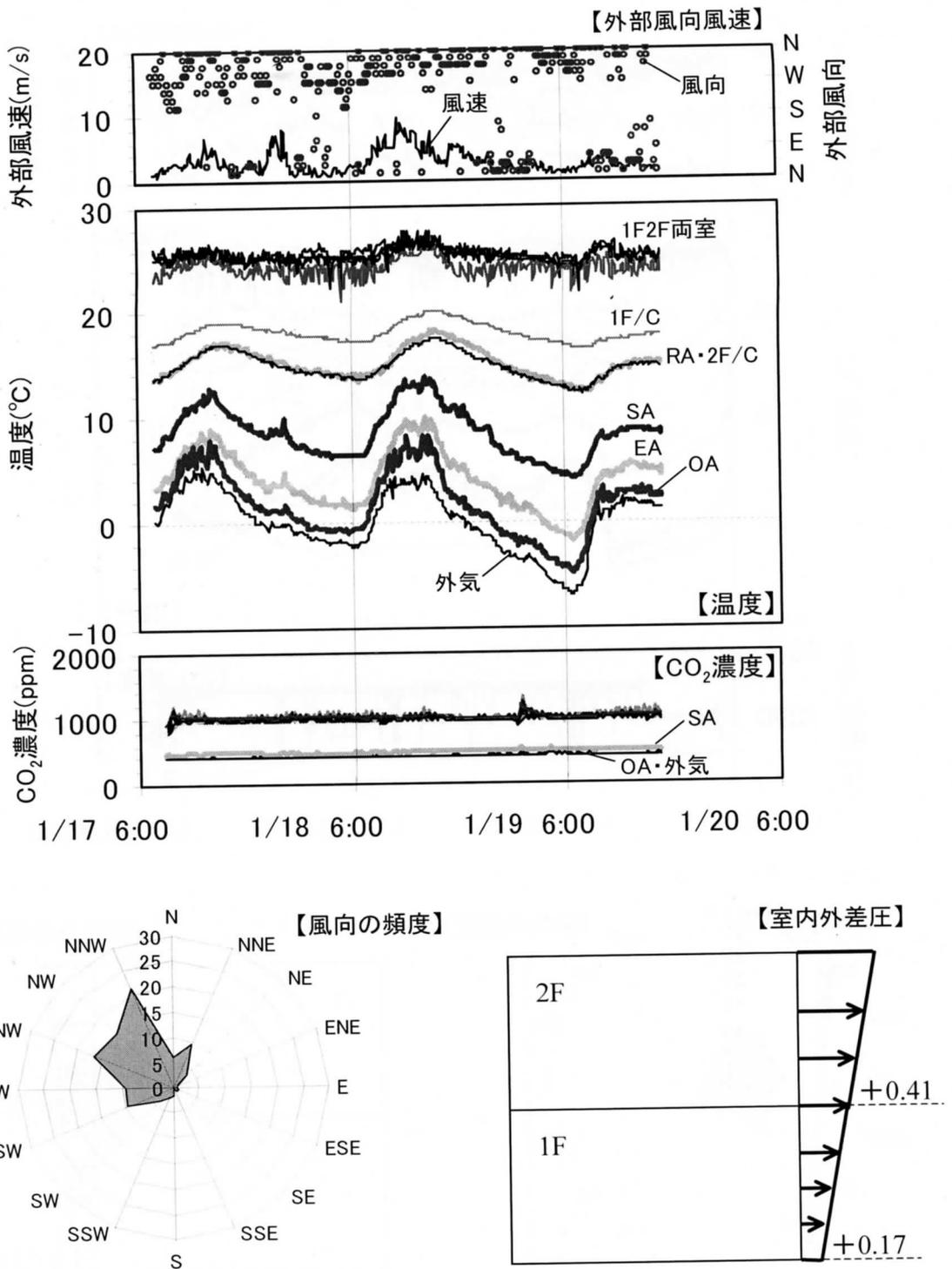


図 3-8-121 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験3: 給気ファンON・排気ファンOFF・ダンパー閉・冬期)

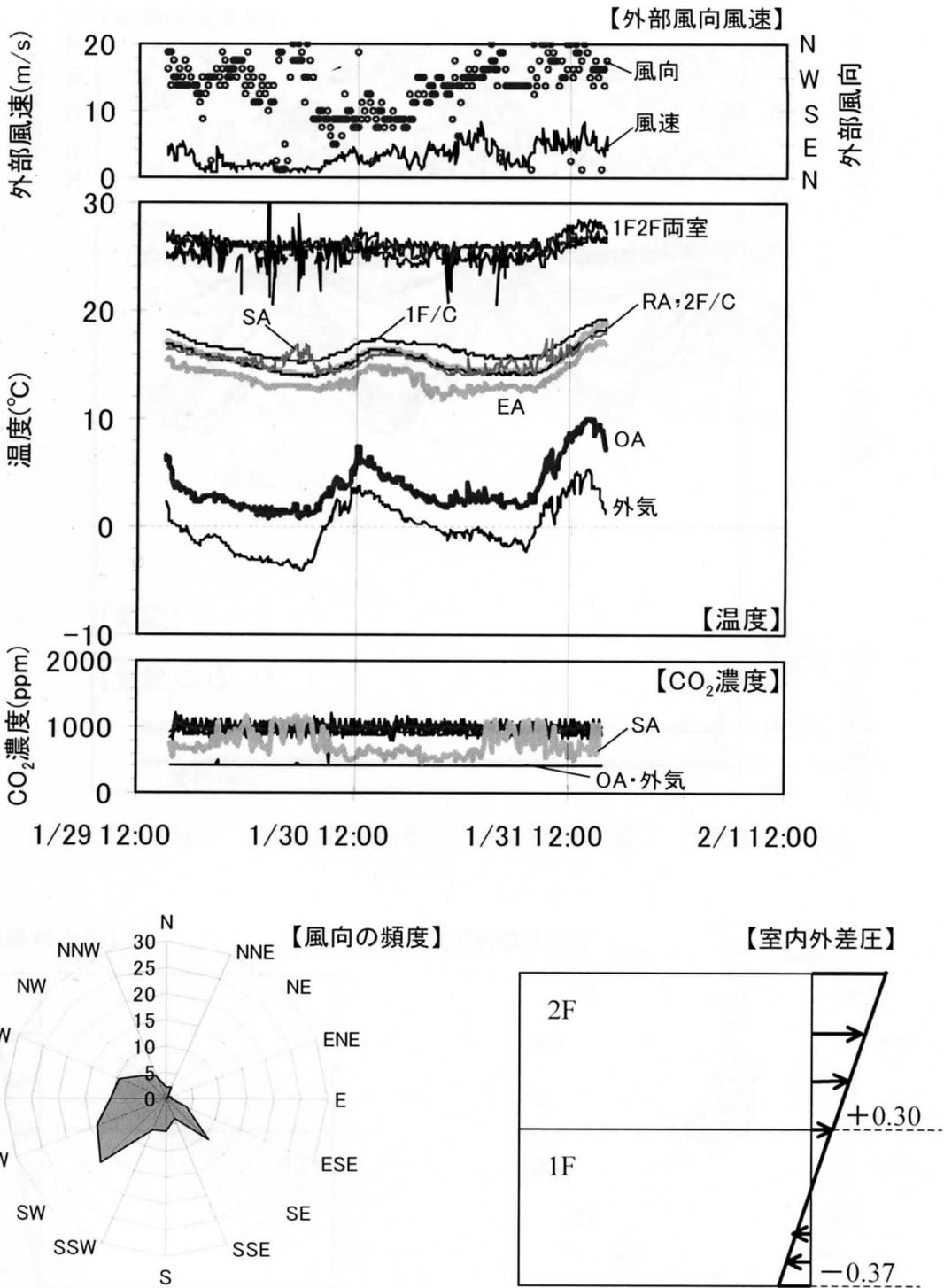


図 3-8-122 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験 4 : 給気ファン OFF・排気ファン ON・ダンパー閉・冬期)

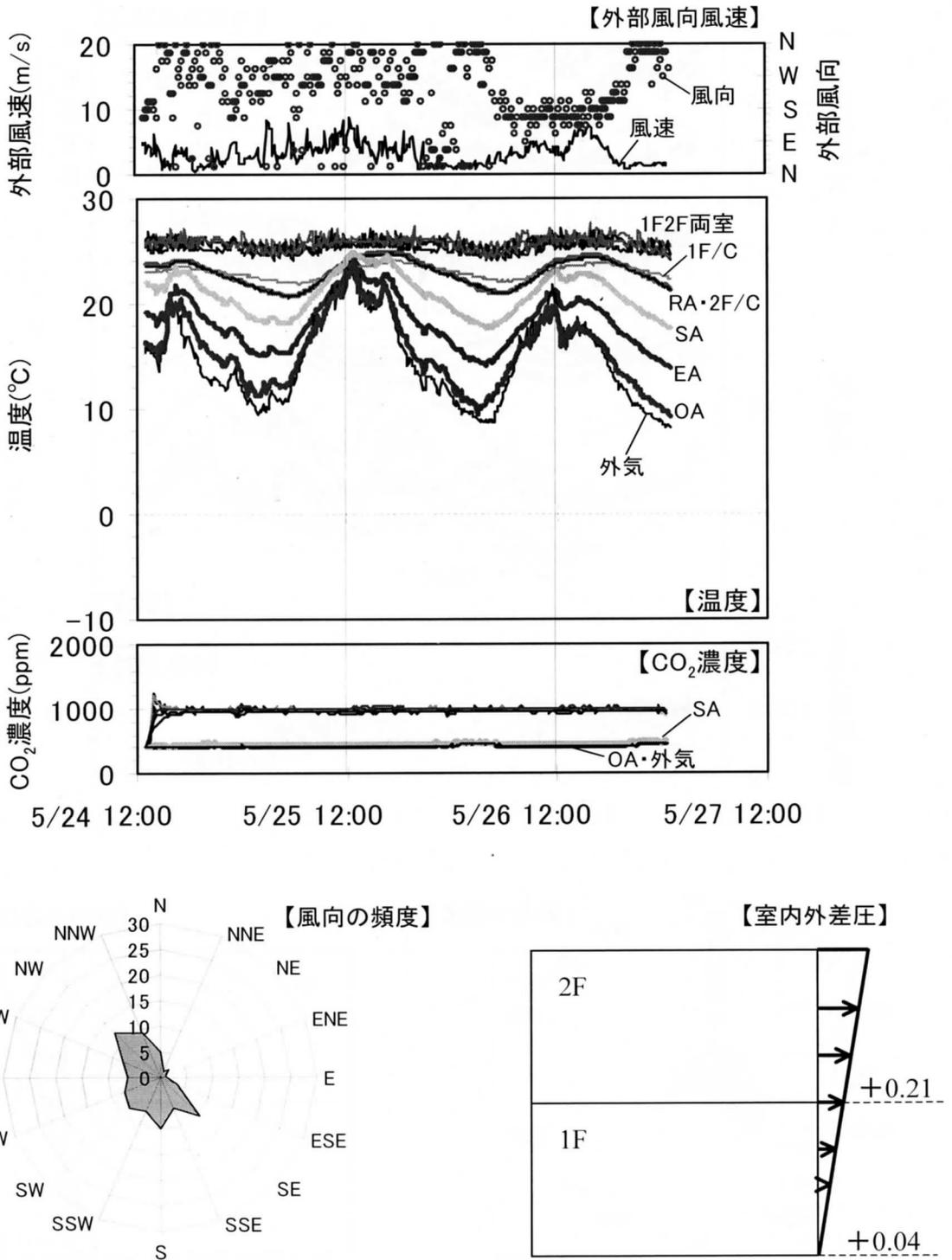


図 3-8-123 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験5: 給気ファン ON・排気ファン ON・ダンパー閉・中間期)

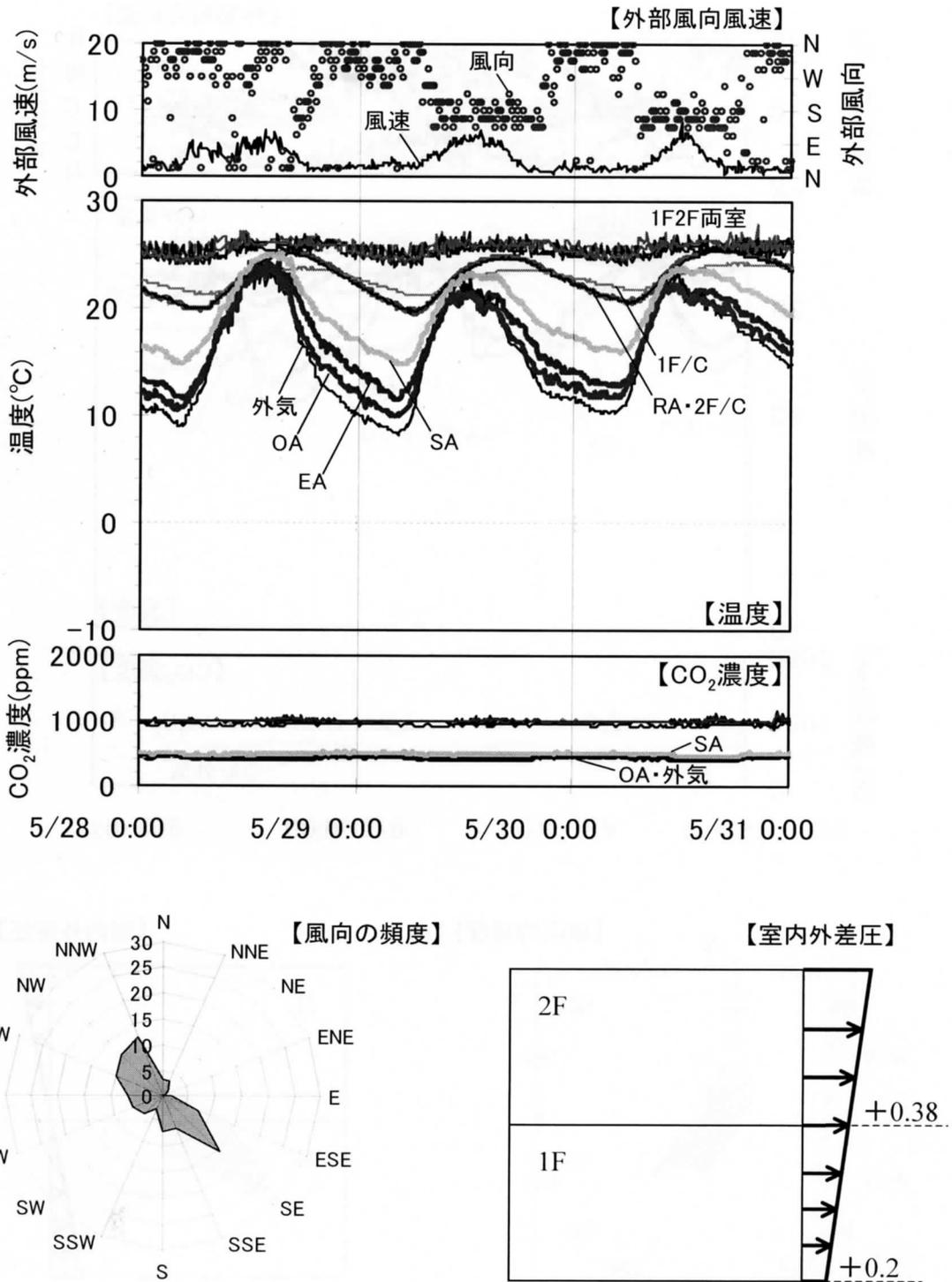


図 3-8-124 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験 6 : 給気ファン ON・排気ファン OFF・ダンパー閉・中間期)

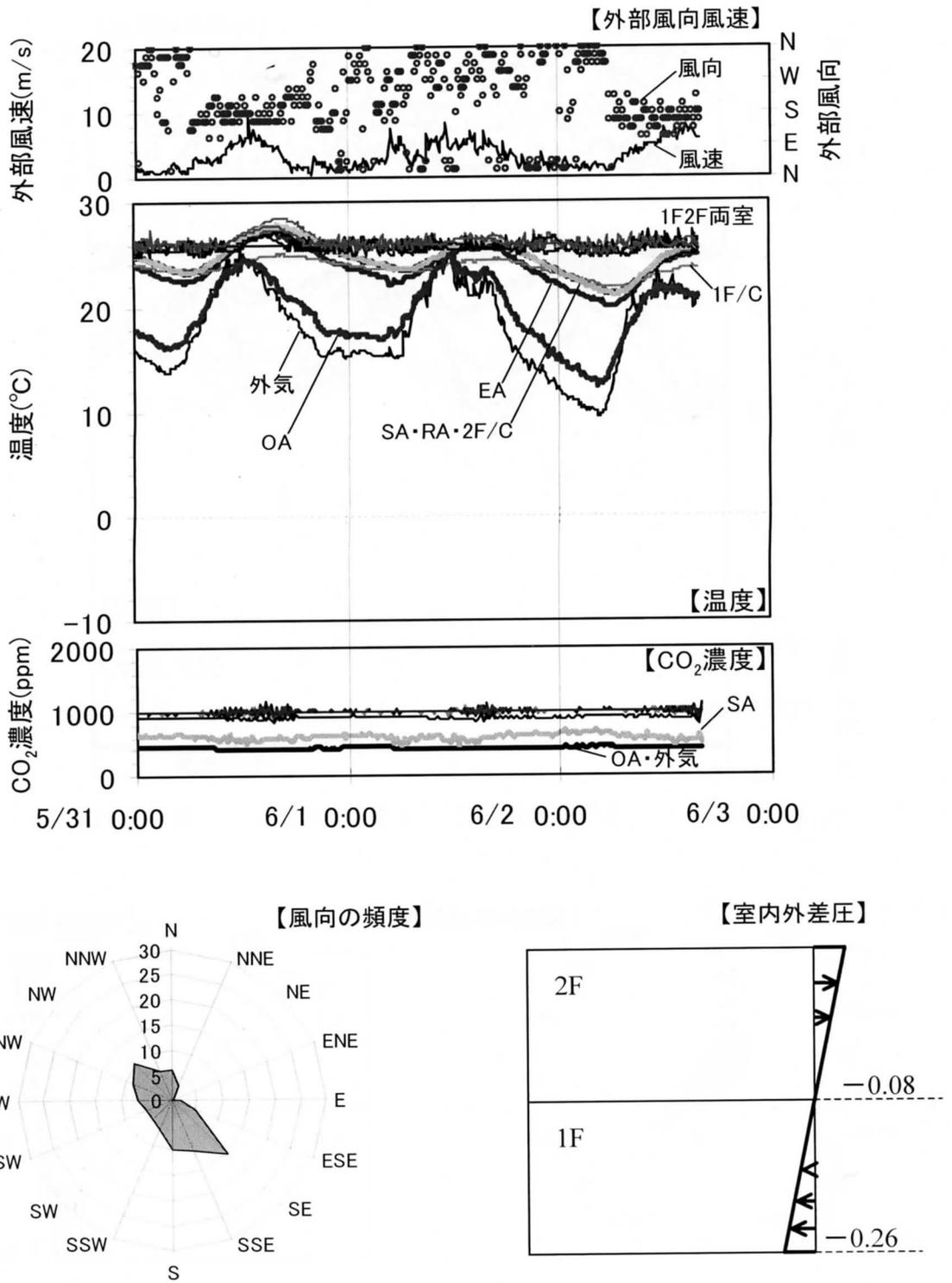


図 3-8-125 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験7: 給気ファン OFF・排気ファン ON・ダンパー閉・中間期)

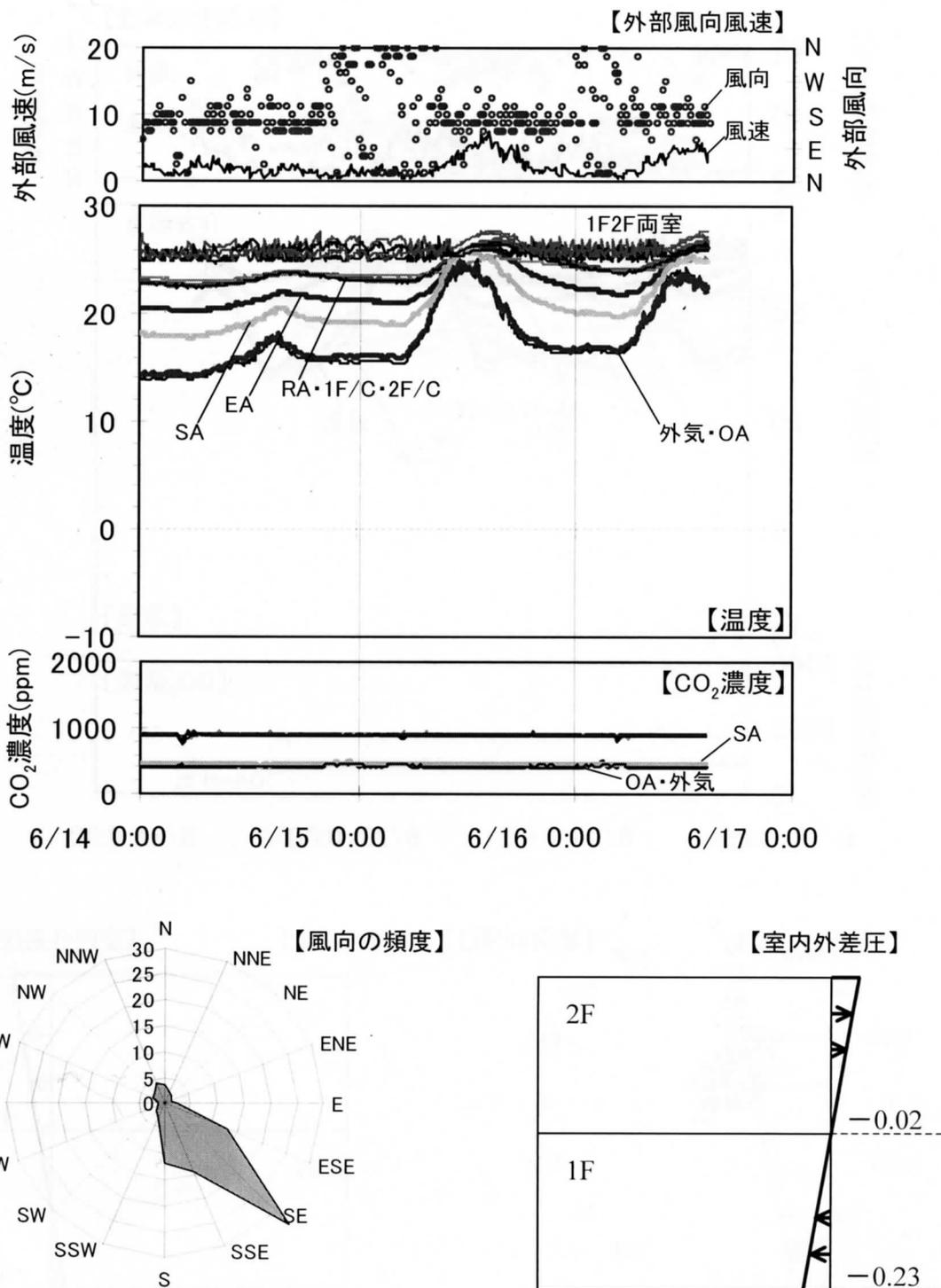


図 3-8-126 外部風向風速・温度・CO₂濃度
 (実験 8 : 給気ファン ON・排気ファン ON・ダンパー開・中間期)

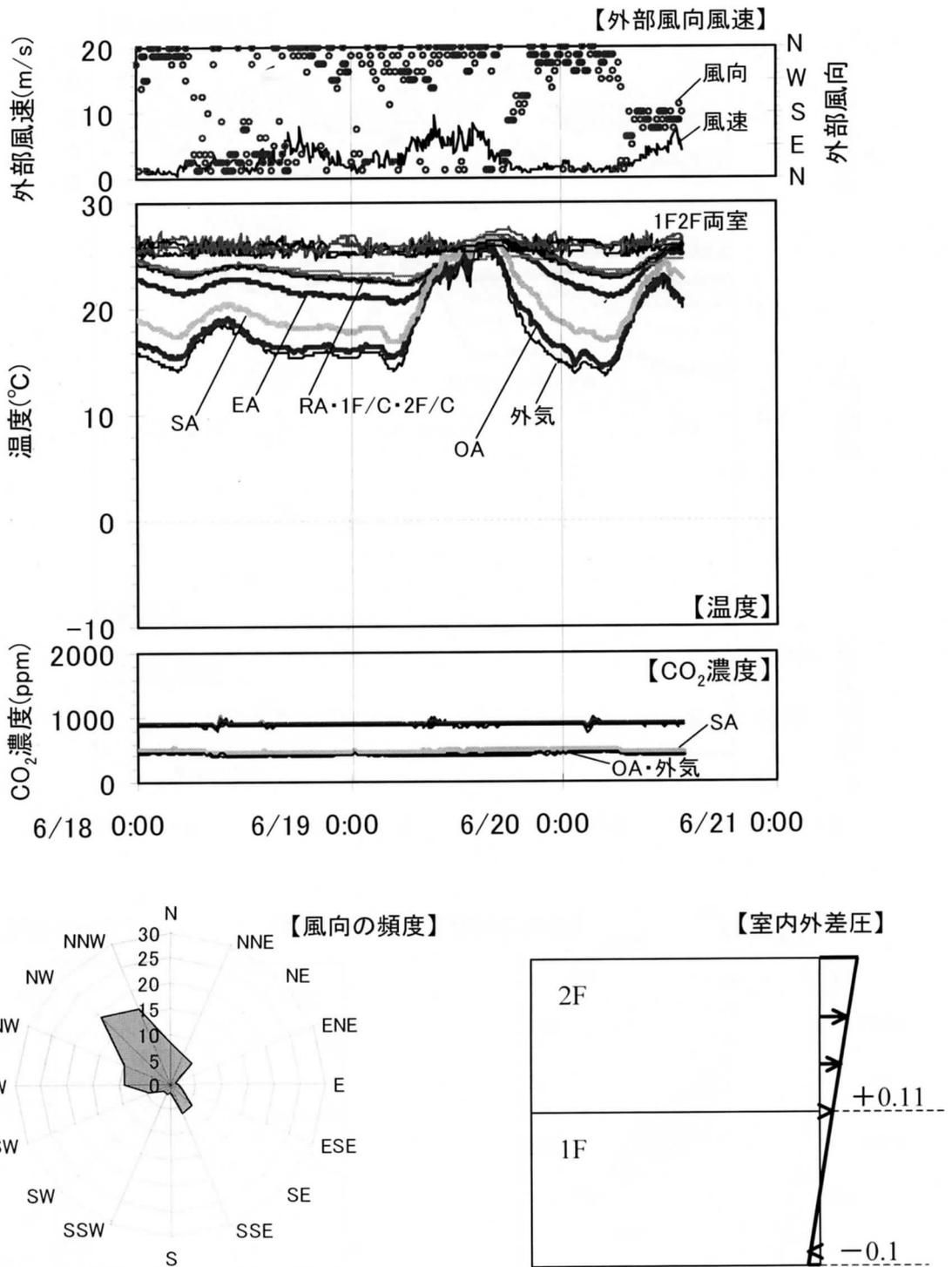


図 3-8-127 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験9: 給気ファンON・排気ファンOFF・ダンパー開・中間期)

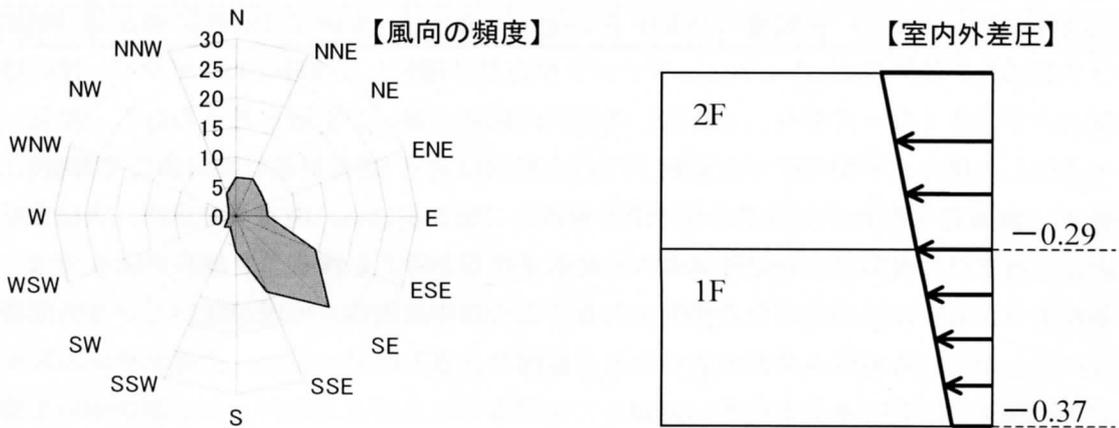
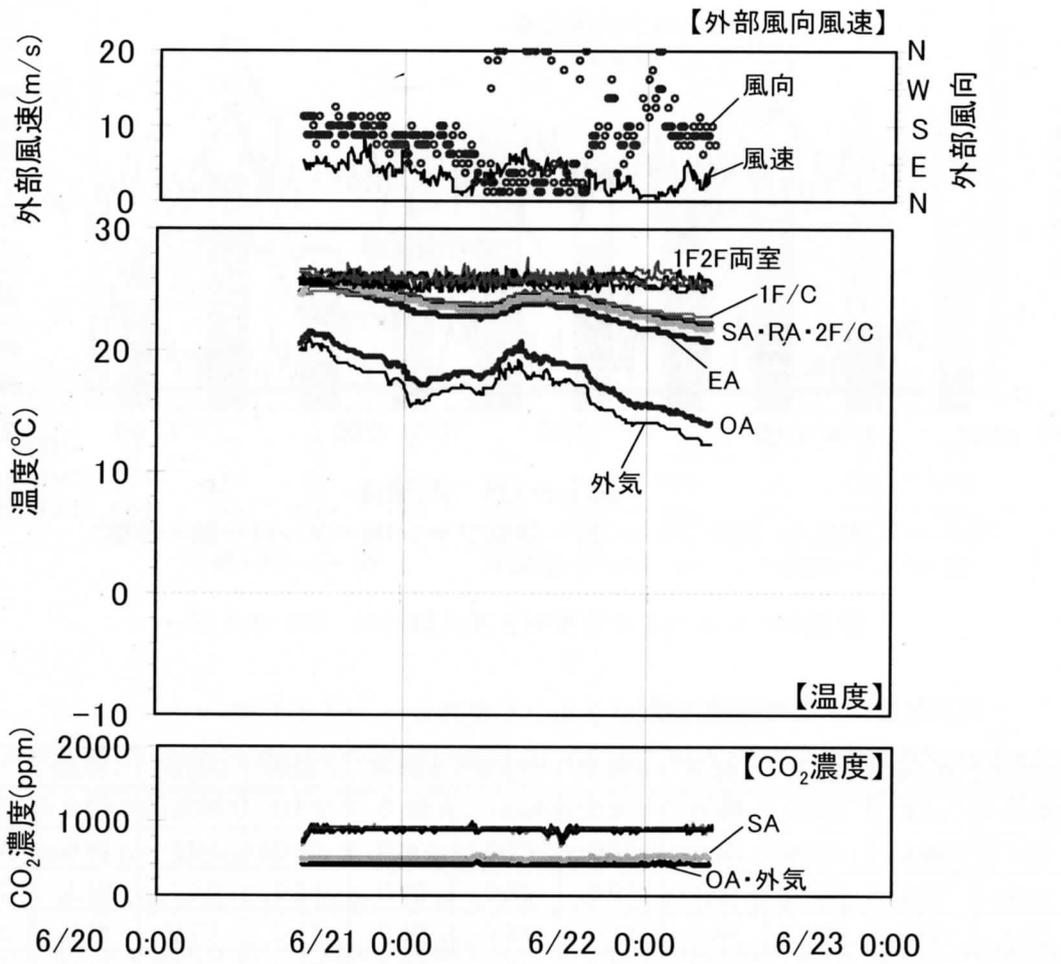
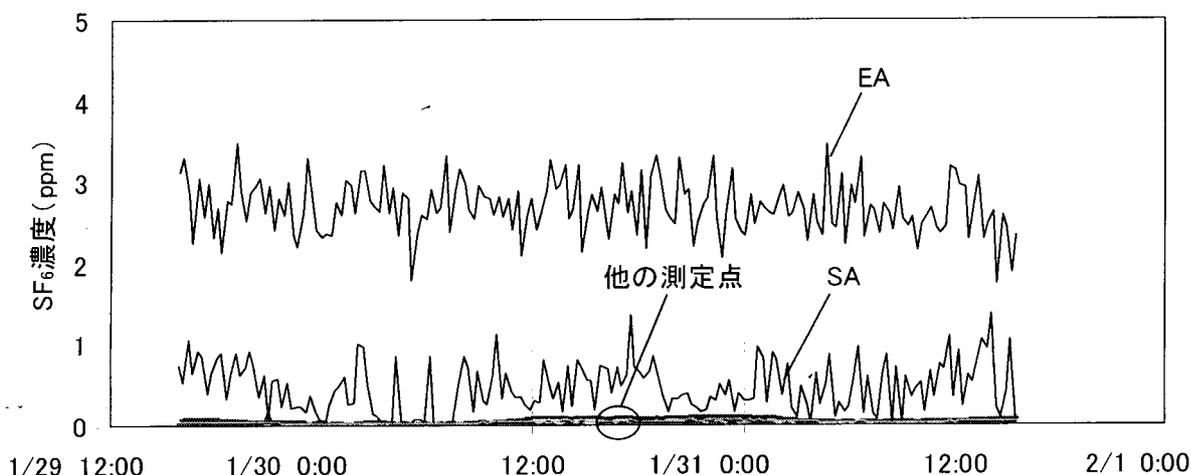


図 3-8-128 外部風向風速・温度・CO₂濃度
(実験 10 : 給気ファン OFF・排気ファン ON・ダンパー開・中間期)

図 3-8-129 SF₆濃度

(実験 4 : 給気ファン OFF・排気ファン ON・ダンパー閉・冬期)

2) 一定濃度法による外気導入量

図 3-8-130 に外気導入量の平均値、表 3-8-19 に換気回数¹⁾の平均値を示す。冬期の外気導入量について見ると、給気ファン・排気ファンを運転した実験 2 では十分な換気量が得られている。給気ファンを運転しない実験 1・4 では 2 階両室の換気量が小さく、換気回数で 0.17~0.27 回/h である。これは、煙突効果の影響を受けるためと考えられる。建物全体の外気導入量は、ファンを片方だけ運転した実験 3・4 では約 0.5 回/h、パッシブ換気の実験 1 では 0.5 回/h を下回っている。

次に、ファンを両方とも運転した実験 2・5・8 の外気導入量に注目すると、ダンパーを閉めた場合、内外温度差の小さい中間期の方が小さくなり、ダンパーを開けると外気導入量が増加するという予想通りの結果である。しかし、ファンを片方だけ運転した実験では、ダンパー閉の場合、中間期の方が大きくなっており、これは、外部風向風速の違いの影響と考えられる。給気ファンのみを運転した場合、冬期に行った実験 3 での主風向は北寄りだが (図 3-8-121)、中間期に行った実験 6 では南寄りの風が吹いている時間帯も多い (図 3-8-124)。南寄りの風は、実験家屋の南外壁面に設置された給気口からの外気導入を促進させると考えられる。また、実験 6 では、内外温度差の小さい日中に風が強くなる傾向にあり、この日中に南寄りの風が吹いていた時間帯が集中していたことが、外気導入量が大きくなった原因であると推察される。排気ファンのみを運転していた実験 4・7 (図 3-8-122・図 3-8-125) でも同様のことが言える。また、ダンパーを開けることによって、どの実験でも 0.8 回/h 以上の換気回数¹⁾が得られることが分かった。

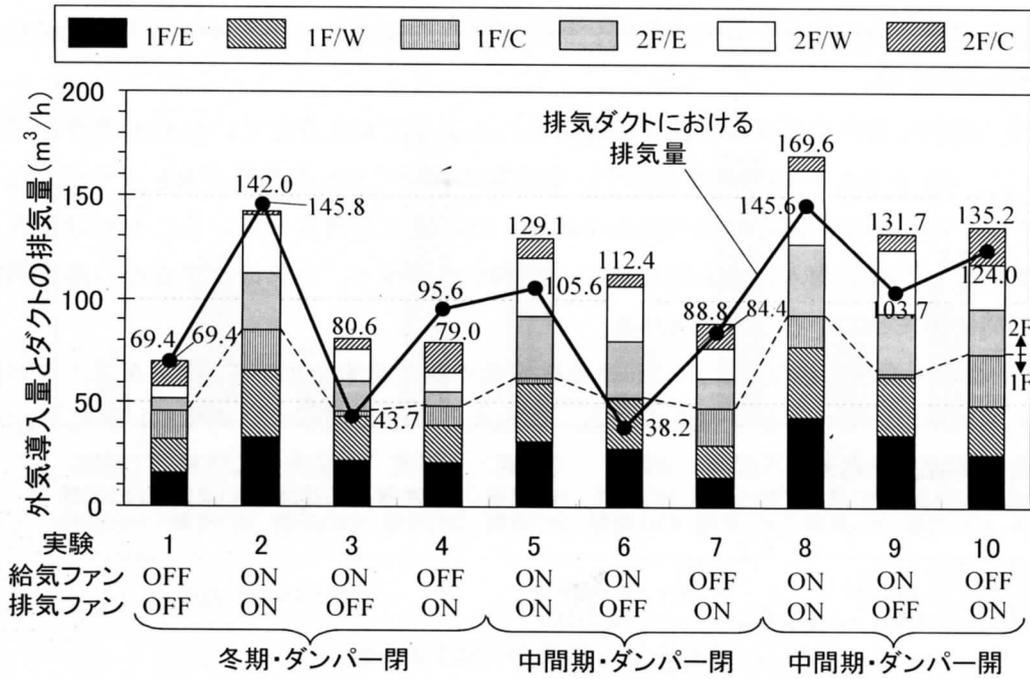


図 3-8-130 外気導入量と排気ダクトにおける排気量

表 3-8-19 一定濃度法による平均換気回数

	実験1	実験2	実験3	実験4	実験5	実験6	実験7	実験8	実験9	実験10
1F/E	0.53	1.08	0.72	0.68	1.01	0.90	0.46	1.40	1.13	0.83
1F/W	0.51	1.04	0.69	0.60	0.90	0.78	0.49	1.10	0.91	0.75
1F/C	1.19	1.73	0.24	0.76	0.28	0.07	1.54	1.30	0.13	2.20
2F/E	0.18	0.79	0.41	0.20	0.84	0.79	0.44	1.00	0.85	0.63
2F/W	0.17	0.80	0.45	0.27	0.83	0.77	0.40	1.04	0.88	0.64
2F/C	0.76	0.12	0.30	0.94	0.60	0.39	0.81	0.47	0.50	1.12
全体	0.42	0.87	0.49	0.48	0.79	0.69	0.54	1.03	0.80	0.82

3) 排気ダクトにおける排気量

図 3-8-130 に排気ダクトにおける排気量の平均値を示す。冬期に行ったパッシブ換気の実験 1、ファンを両方とも運転した実験 2、中間期に排気ファンのみを運転した実験 7 では外気導入量とほぼ同じであり、建物隙間からの排気がほとんどないと考えられる。排気ファンのみを運転した実験 4 では外気導入量を上回っているが、これは、トレーサーガスの一部が熱交換ユニットの排気経路とは別の経路へと流出し、排気ダクトにおける排気量が実際よりも大きく算出されたためと推察される。同じ理由により、実験 7・10 の値も大きく算出されている可能性があると考えられる。それ以外の実験では外気導入量を下回っている。特に、給気ファンのみを運転した実験 3・6 では外気導入量を大きく下回っているが、これは、給気ファンの運転により室内側が正圧となり、建物隙間からの排気量が他の実験より増加したためである。

なお、排気ダクトの排気量を算出する際、排気ダクト内で生じている外気漏入を考慮して、以下の補正を行っている。

補正には、実験中、室内濃度が設定濃度に維持されるように発生させていた CO₂ 濃度を用いる。図 3-8-131 に、EA と RA の CO₂ 濃度を示す。全実験において EA の濃度が RA より低くなっており、排気ダクト内で濃度の薄い外気の漏入があり、CO₂ 濃度が薄まっていることが分かる。従って、熱交換ユニット排気側入口で発生させていた SF₆ の濃度も、ガスの発生点から濃度測定点まで到達する間に薄まっていると考えられる。

EA と RA の CO₂ 濃度と排気ダクトにおける排気量の測定結果を用いて、排気ダクトにおける外気漏入量と漏入がない場合の排気量を求める。算出式は以下の通りで、式 3-8-9 と式 3-8-10 を連立させて両者を算出する。

$$Q_{EA} = Q_{RA} + Q_{mf} \quad (3-8-9)$$

$$Q_{EA} C_{EA} = Q_{RA} C_{RA} + Q_{mf} C_{mf} \quad (3-8-10)$$

C_{EA} : 測定点 EA での CO₂ 濃度 (ppm)

C_{RA} : 測定点 RA での CO₂ 濃度 (ppm)

C_{mf} : 漏入空気 (外気) の CO₂ 濃度 (ppm)

Q_{EA} : 排気ダクトにおける排気量 (m³/h)

Q_{RA} : 外気漏入がない場合の排気ダクトにおける排気量 (m³/h)

Q_{mf} : 外気漏入量 (m³/h)

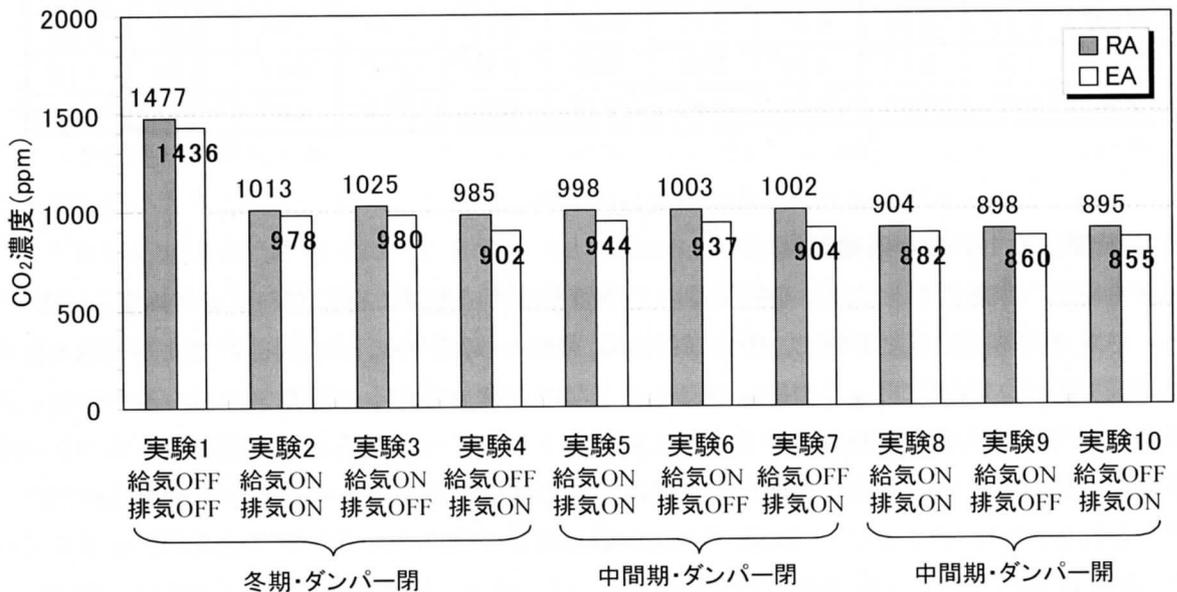


図 3-8-131 EA と RA の CO₂ 濃度の比較

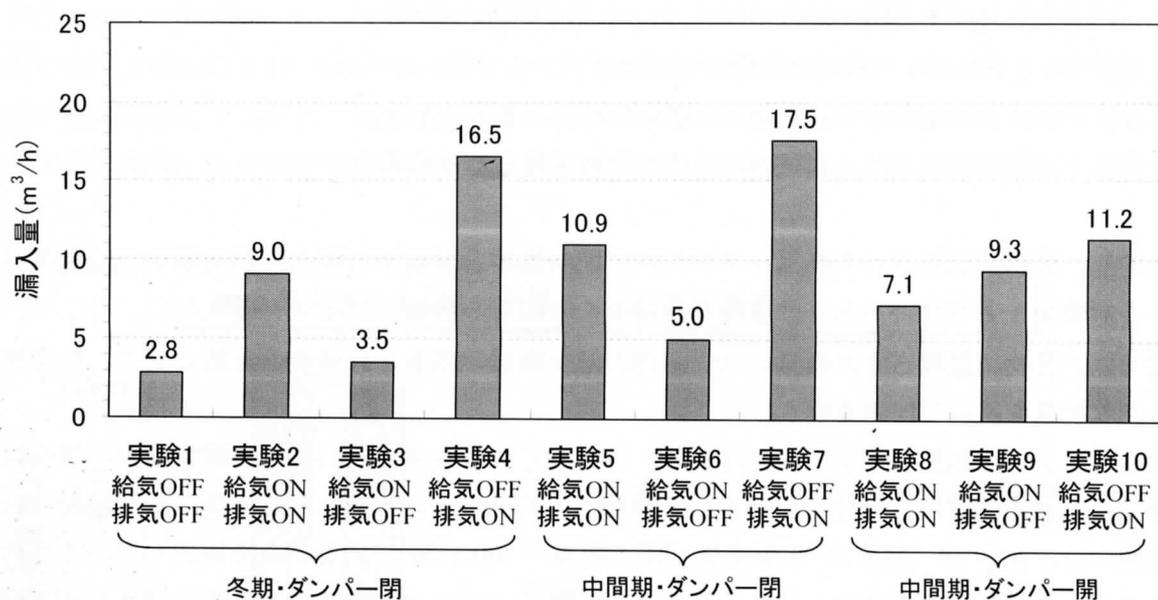


図 3-8-132 外気漏入量の比較

図 3-8-132 に、外気漏入量の算出結果を示す。ダンパーを閉じ排気ファンのみを運転した場合の実験 4・7 の外気漏入量が、他の実験よりも大きくなっている。熱交換換気を行う場合、熱交換ユニット内に生じる圧力差の関係で、特に、排気ファンのみを運転した場合に、外気側から排気側への空気の漏入が起きることが確認された。

4) 熱交換による回収熱量と暖房負荷

熱交換特性を評価する際には、JIS 規格で定められた熱交換効率を用いるのが一般的である。熱交換効率には、温度交換効率と全熱交換効率の 2 種類の考え方があり、温度交換効率は式 (3-8-11) で定義される。外気 OA、給気 SA、還気 RA の温度を測定することによって求められる。熱交換効率は式 (3-8-12) で定義される。外気 OA、給気 SA、還気 RA の温度と湿度を測定し、図 3-8-113 の湿り空気線図からエンタルピーを求めることによって計算することができる。

$$\text{温度交換効率 } \eta_t = \frac{T_{OA} - T_{SA}}{T_{OA} - T_{RA}} \times 100 \quad (3-8-11)$$

ここで、 T_{OA} : 外気温度 (°C) T_{SA} : 給気温度 (°C) T_{RA} : 還気温度 (°C)

$$\text{全熱交換効率 } \eta_i = \frac{i_{OA} - i_{SA}}{i_{OA} - i_{RA}} \times 100 \quad (3-8-12)$$

ここで、 i_{OA} : 外気エンタルピー (kcal/kg') i_{SA} : 給気エンタルピー (kcal/kg')
 i_{RA} : 還気エンタルピー (kcal/kg')

熱交換効率を測定する際の留意事項について、以下にまとめる。

- ① 給気 SA と還気 RA の風量は原則としてほぼ同一とする。
- ② 温度・湿度の測定点までの管路は、必要に応じて断熱を施す。
- ③ 温度・湿度の測定点は、管路内の平均的な値が得られる位置とする。

しかし、建物に設置された換気システム内の熱交換器を評価する場合、熱交換部の給排気バランスの影響が生じる場合があり、温度交換効率のみによる評価では十分と言えない。そこで、本研究では、建物に設置された換気システム内の熱交換器の効率を評価する方法として、熱交換による回収熱を用いて検討を行う。

熱交換による回収熱量 q は、式 (3-8-13) (3-8-14) により求められる。実験期間中の熱交換部を通る給気量の測定は行っていないが、実験前に、給気ファンを運転した場合、各部屋での給気口風量の合計値が 20~25m³/h (実験家屋全体で約 80~100m³/h) であることを確認しているため、給気ファン運転時の熱交換部を通る給気量を 90m³/h と仮定して算出した。なお、ファンの運転による消費熱量とは、ファンの消費電力を熱量として考えたものである。給気ファンと排気ファンはいずれも強運転、電圧 75V に設定していた。前出のファンの消費電力と電圧の関係 (図 3-8-110) より算出したファンの運転による消費電力と消費熱量を表 3-8-20 に示す。

暖房負荷 H は、式 (3-8-15) により求められる。

表 3-8-20 ファンの消費電力と熱量 (電圧 75V の場合)

	給気ファン(強)	排気ファン(強)	給気ファン(強)・排気ファン(強)
	実験3	実験4	実験2
消費電力 (W=J/s)	17.945	10.99125	28.93625
消費熱量 (kJ/h)	64.602	39.5685	104.1705

$$q = q_{\text{recovery}} - q_{\text{fan}} \quad (3-8-13)$$

$$q_{\text{recovery}} = Q \times \gamma_{\text{OA}} \times c_{\text{OA}} \times (\theta_{\text{SA}} - \theta_{\text{OA}}) \quad (3-8-14)$$

q : 熱交換による回収熱量 [kJ/h]

q_{fan} : ファンの運転による消費熱量 [kJ/h] Q : 熱交換部を通る給気量 [m³/h]

γ_{OA} : OA の空気密度 [kg/m³] c_{OA} : OA の空気比熱 [kJ/kg・°C]

θ_{SA} : SA の温度 [°C] θ_{OA} : OA の温度 [°C]

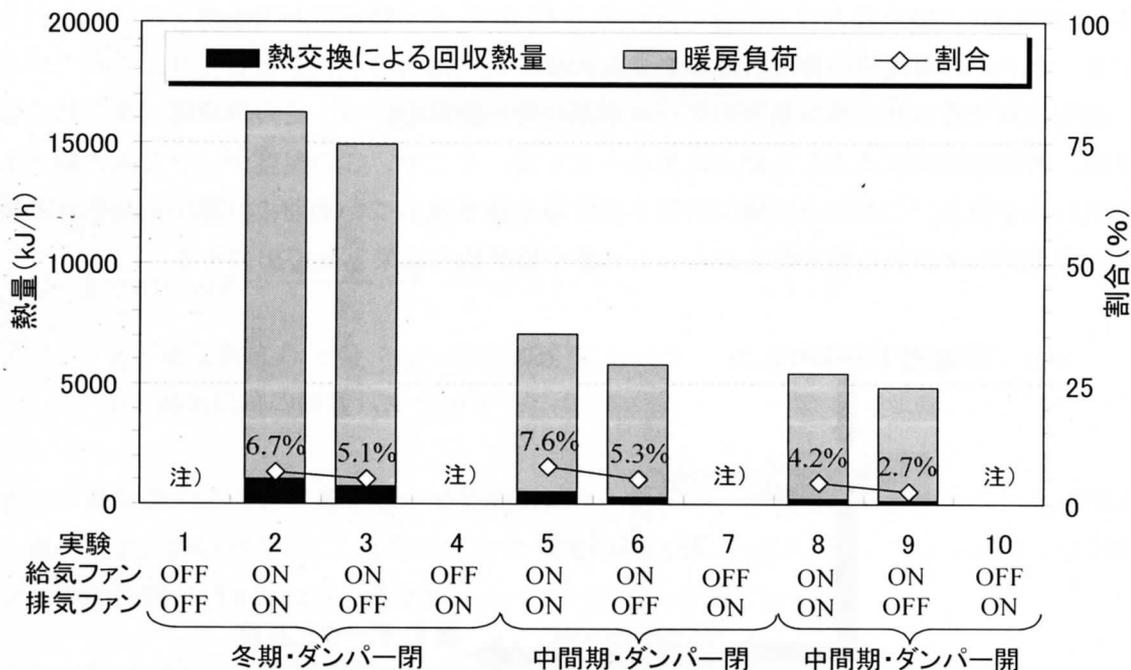
$$H = KS(\theta_i - \theta_o) + nV \times \gamma_o \times c_o(\theta_i - \theta_o) \quad (3-8-15)$$

H : 暖房負荷 [kJ/m²h]

KS : 熱貫流率 [kJ/m²h°C] θ_i : 室内温度 [°C] θ_o : 外気温 [°C]

nV : 外気導入量 [m³/h] γ_o : 外気の密度 [kg/m³] c_o : 外気の比熱 [kJ/kg・°C]

図3-8-133に熱交換による回収熱量と暖房負荷を示す。ダンパーを閉じた場合、回収熱量の暖房負荷に対する割合は5.1～7.6%である。冬期より中間期の回収熱量の割合の方が大きいのは、熱交換部の性能が同じであれば、気象条件によって回収熱量が大きく変化しないためである。ダンパーを開けた場合、熱交換部を通る排気量が減少するため、回収熱量が2.7～4.2%と小さくなっている。



注) 実験期間中の熱交換部を通る給気量の測定は行っていないため、給気ファンを停止している条件での回収熱量は算出していません。

図3-8-133 熱交換による回収熱量と暖房負荷

(5) 数値計算による性能評価

(a) 数値計算の目的

前節では、実際に換気システムを設置した実験家屋を用いて実験を行い、システムの性能について検討した。しかし、実験では、建物の気密性能や熱交換器の性能等の条件を変更することは容易ではない。そこで、熱換気汚染シミュレーションプログラム Fresh2000 を用いて、実験家屋を対象とした数値計算による検討を行う。第1に、性能評価実験のデータを用いて計算し、外気導入量や排気ダクトにおける排気量の比較を行うことで、計算プログラムの再現性について検討する。第2に、夏期と冬期の標準気象データを用いて、建物の相当隙間面積、熱交換効率、給気ファンと排気ファンの ON・OFF をパラメータとした計算を行い、本システムの適用可能性について検討する。

(b) 計算プログラムの概要 ^{3-36) 3-37) 3-38)}

Fresh2000 は、熱負荷計算、換気計算、汚染計算の3つの計算を同時に行うことができるプログラムであり、Visual basic を用いて編集・計算を行う。

1) 計算の基本原則

図3-8-134にFresh2000における計算の流れを示す。まず、ある時刻における換気の計算を行う。このとき、ゾーンの温度等の換気計算に必要な温度データは入力データとして与えられている。次に、換気計算で得られた換気量等のデータを基に熱の計算を行う。この熱計算で得られる温度データは、換気計算時に入力した値とは異なってくる。そこで、この温度データを入力値として再び換気計算を行う。このように換気計算と熱計算を繰り返していくと、計算から得られる換気データと温度データがある値に収束する。この値を最終的な結果として出力する。

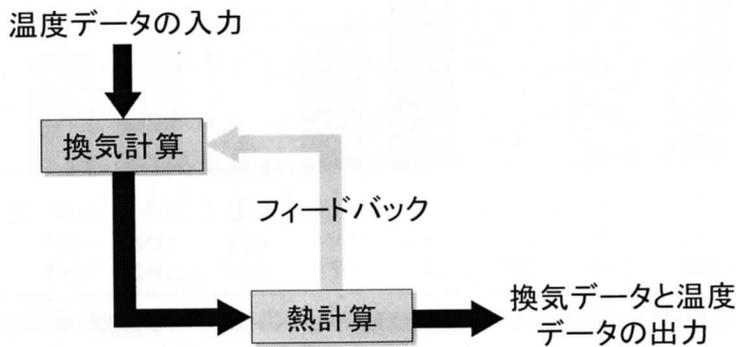


図3-8-134 Fresh2002における計算の流れ

【熱計算】 ³⁻³⁹⁾

逐次積分法により計算を行う。この非定常熱負荷計算プログラムは1971年に北海道大学のグループ（荒谷登、佐々木紀一、絵内正道）によって開発されたものである。

【換気計算】

換気経路の空気に作用する力のバランスをマトリクス（連立方程式）を用いて表し、数値計算法（New Mark β 法 ³⁻⁴⁰⁾）でその方程式を解くことによって、空間相互間の通気量を求める。

空気が建物隙間・開口・ダクト・ファン等の通気経路を流れる場合、そこに発生する力として通気動力と通気抵抗力を考える。通気抵抗力とは、空気が通気経路を流れる際に発生する流れとは反対方向に作用する力である。通気抵抗力は次のように求める。

通気経路の通気風量 Q と通気経路の両側に位置する空間の圧力差 ΔP の関係は式（3-8-17）によって示される。

$$Q = a \Delta P^{1/n} \quad (3-8-17)$$

Q : 流量 (m³/h) a : 通気率 (m³/h・mmAq^{1/n}) ΔP : 差圧 (mmAq)
 n : 隙間特性値 (N 値、1~2)

式 3-8-17 を ΔP について解き、流量 Q を風速 v を用いて表すと、式 (3-8-18) で示される。

$$\Delta P = v^n \cdot \frac{3600^n \cdot s^n}{a^n} \quad (3-8-18)$$

v : 流速 (m/s) s : 通気経路の断面積 (m²)

通気抵抗力 f_c は式 (3-8-19) で示される。

$$f_c = g \cdot s \cdot \Delta P = \frac{3600^n \cdot s^{n+1} \cdot g}{a^n} \cdot \frac{|v|}{v} \cdot v^n = c \cdot \frac{|v|}{v} \cdot v^n \quad (3-8-19)$$

f_c : 通気抵抗力 (N) g : 重力加速度 (m/s²) s : 通気経路の断面積 (m²)
 c : 通気抵抗の係数 (N・sⁿ/mⁿ)

次に、通気動力について考える。通気動力には、風圧力、温度差圧力、ファンによる圧力がある。風圧力 P_w は式 (3-8-20)、温度差圧力 P_t は式 (3-8-21) で示される。ファンによる圧力は、ファンの性能曲線 (「3.8.2(3)(c) 熱交換ユニット」参照) で表される。

$$P_w = C \frac{\gamma_o}{2g} v^2 \quad (3-8-20)$$

P_w : 風圧力 (mmAq) C : 風圧係数 γ_o : 外気の密度 (kgf/m³)
 g : 重力加速度 (m/s²) v : 風速 (m/s)

$$P_t = (\gamma_o - \gamma_i) (h - H) \quad (3-8-21)$$

P_t : 温度差圧力 (mmAq) γ_i : 室内空気の密度 (kgf/m³) h : 床面からの高さ (m)
 H : 中性帯の高さ (m)

建物全体の通気動力と通気抵抗力の力のバランスは式 (3-8-22)、式 (3-8-23) で示される。

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & & \\ & \ddots & \\ & & c_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1^{n_1} \\ \vdots \\ v_i^{n_i} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s_1 \cdot \Delta P_1 \\ \vdots \\ s_i \cdot \Delta P_i \end{Bmatrix} \quad (3-8-22)$$

f_i : 通気経路 i に加わる通気動力 (N) c_i : 通気抵抗の係数 (N・s/m)
 v_i : 流速 (m/s) n_i : 隙間特性値 (N 値、1~2) s : 通気経路の断面積 (m²)
 ΔP : 通気経路 i 両側の空間の圧力差 (mmAq)

$$\begin{Bmatrix} s_1 \cdot \Delta P_1 \\ \vdots \\ s_i \cdot \Delta P_i \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \int v_1 dt \\ \vdots \\ \int v_i dt \end{Bmatrix} \quad (3-8-23)$$

例えば、容積 V で4つの開口を持つ空間を考えると、 $[K]$ は式(3-8-24)で示される。

$$[K] = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_1 s_2 & s_1 s_3 & s_1 s_4 \\ s_1 s_2 & s_2^2 & s_2 s_3 & s_2 s_4 \\ s_1 s_3 & s_2 s_3 & s_3^2 & s_3 s_4 \\ s_1 s_4 & s_2 s_4 & s_3 s_4 & s_4^2 \end{bmatrix} \quad (3-8-24)$$

k : 定常比熱と定圧比熱の比 (-) P_0 : 大気圧 (N·s/m) V : 室容積 (m³)

式(3-8-22)をNew Mark β 法³⁻⁴⁰⁾を用いて解を導く。

図3-8-135に、実験家屋における換気計算のネットワークを示す。各抵抗における有効開口面積(通気率 a の0.67倍)と隙間特性値(N値)を入力することによって通気抵抗力を計算し、通気動力とのバランスから連立方程式を立て、それを解くことで換気量が求まる。

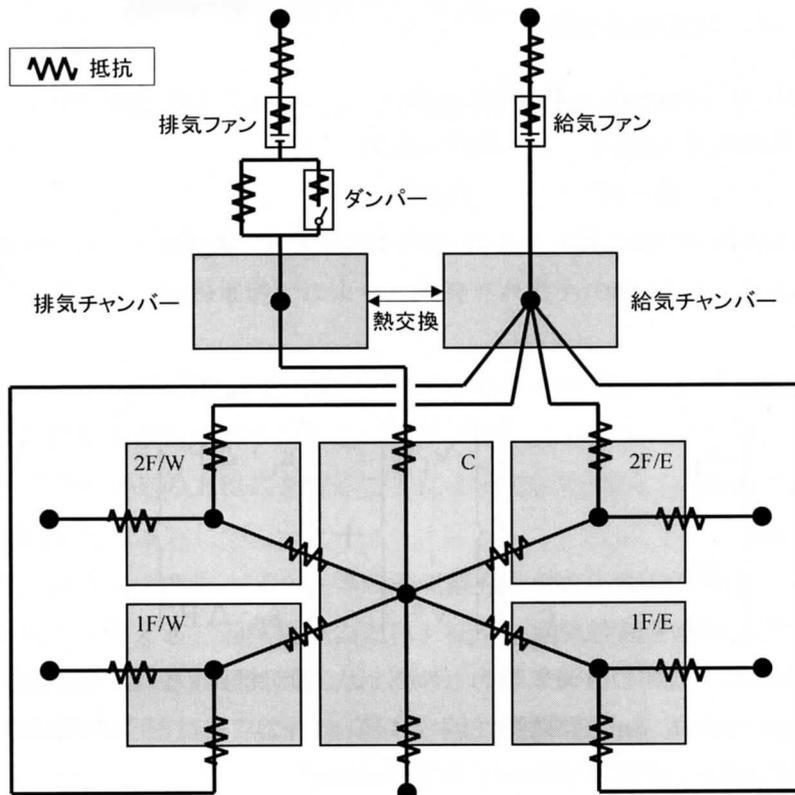


図3-8-135 換気計算のネットワーク

【汚染計算】

部屋毎の汚染発生量と外気との換気および室相互換気量から、部屋の汚染濃度推移を差分を用いて計算する。式 3-8-25 に部屋 1 の汚染物質の質量収支式、図 3-8-136 に汚染計算の概念図を示す。

$$M_1 + C_0 Q_{0 \rightarrow 1} + C_2 Q_{2 \rightarrow 1} - C_1 Q_{1 \rightarrow 0} = C'_1 V_1 \quad (3-8-25)$$

C : 汚染質の濃度 (—) V : 部屋の容積 (m^3) M : 部屋での汚染質発生量 (m^3)

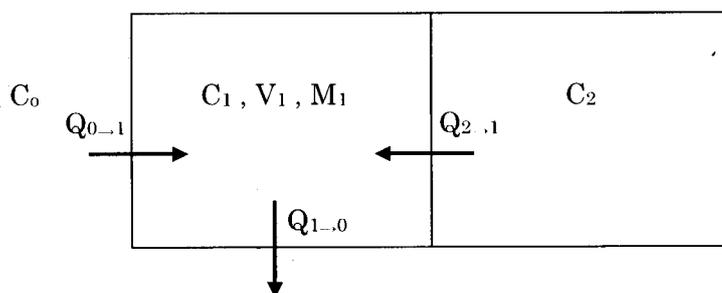


図 3-8-136 汚染計算の概念図

2) 計算プログラムの構成

計算に必要なプログラムとデータファイルは、Fresh2002 を構成する各フォルダの中にある。フォルダの名称と内容を以下に示す。

- **Polute** : 計算プログラム (visual basic で編集や確認をすることができる)
→図 3-8-137 参照
- **Bd_Matri** : 建物の形状や気密性能に関するデータ
(CSV ファイル : Excel カンマ区切り) →図 3-8-138 参照
- **Haspdata** : HASP 標準気象データ (テキストファイル)
- **ライブラリー** : 計算に必要なデータ
 - ・ **Insulati** : 建物の断熱仕様のデータ (テキストファイル)
 - ・ **Sol_filt** : 建物の日除けのデータ (テキストファイル)
 - ・ **Leakage** : 換気計算用のデータ (テキストファイル)
 - ・ **Building** : 熱負荷計算用のデータ (テキストファイル)
- **計算結果** : 計算結果を書き込むためのファイル
(CSV ファイル : Excel カンマ区切り)

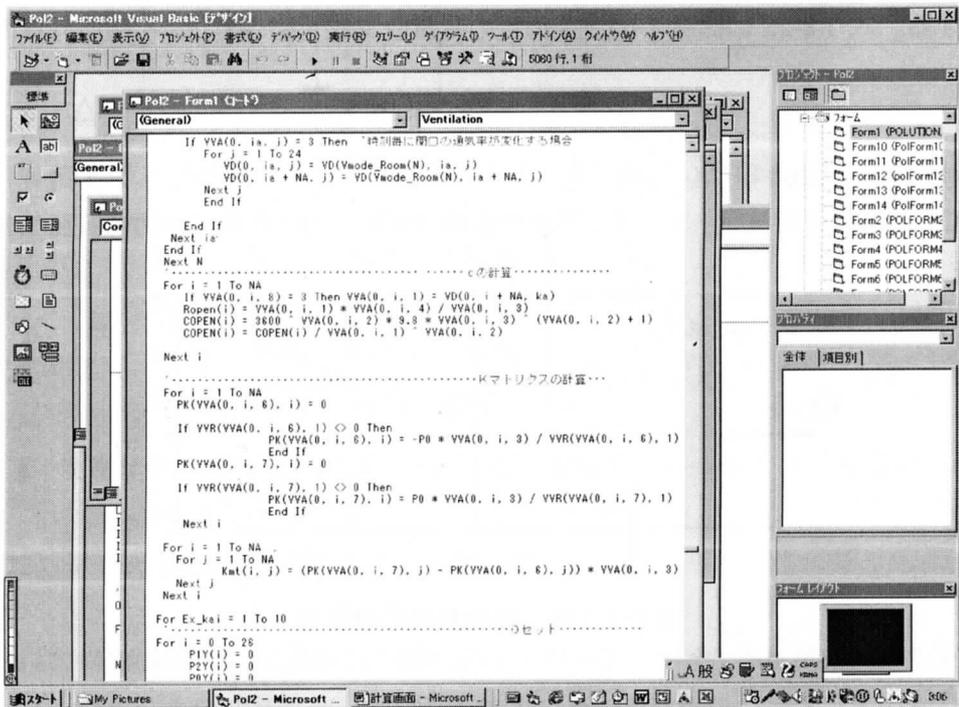


図 3-8-137 計算プログラムの編集画面 (Visual basic)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		階数	2F	0-24	0-24	27-51	27-51	0-51	階	外皮		開口データ					
2		αA'	b	b	b	b	b	中	室種	開口切取							
3		住宅街	1FW	1FE	2FW	2FE	C	Outside	窓種類	窓高	窓幅	窓面積	日射付数	名称(仮)			
4	1FW	間仕切	0	0	0	0	132	228547	外壁	N	C	1.058	0.785	0.83053	0	0	0
5		床	0	0	14.85	0	0	14.9058	外床	E		0	0	0	0	0	0
6		建具	0	0	0	0	4	662853	窓	S	A	2.231	2.602	5.80562	0	0	0
7		透気口	0	0	0	0	40	0	屋根	W		0	0	0	0	0	0
8	1FE	床面積	14.85	0	0	0	132	228547	外壁	N	C	1.058	0.785	0.83053	0	0	0
9		間仕切	0	0	0	0	0	0	外床	E		0	0	0	0	0	0
10		床	0	0	0	14.85	0	14.9058	外床	E		0	0	0	0	0	0
11	1F	建具	0	0	0	0	4	662853	窓	S	A	2.231	2.602	5.80562	0	0	0
12		透気口	0	0	0	0	40	0	屋根	W		0	0	0	0	0	0
13	2FW	床面積	14.85	0	0	0	132	2550747	外壁	N	C	1.058	0.785	0.83053	0	0	0
14		間仕切	0	0	0	0	0	0	外床	E		0	0	0	0	0	0
15		床	0	0	0	0	0	0	外床	E		0	0	0	0	0	0
16		建具	0	0	0	0	4	397853	窓	S	C	1.21	1.692	2.04732	0	0	0
17		透気口	0	0	0	0	40	14.9058	屋根	W	C	0	0	0	0	0	0
18	2FE	床面積	14.85	0	0	0	132	2550747	外壁	N	C	1.058	0.785	0.83053	0	0	0
19		間仕切	0	0	0	0	0	0	外床	E	C	0	0	0	0	0	0
20		床	0	0	0	0	0	0	外床	E	C	0	0	0	0	0	0
21		建具	0	0	0	0	4	397853	窓	S	C	1.21	1.692	2.04732	0	0	0
22		透気口	0	0	0	0	40	14.9058	屋根	W		0	0	0	0	0	0
23	C	床面積	14.85	0	0	0	0	0	101	外壁	N	C	1.788	0.785	2.80716	0	0
24		間仕切	0	0	0	0	0	0	4.9686	外床	E		0	0	0	0	0
25		床	0	0	0	0	0	0	4.23115	窓	S	C	0.907	0.785	1.42399	0	0
26		建具	0	0	0	0	0	0	7.4529	屋根	W		0	0	0	0	0
27		透気口	0	0	0	0	0	0	0	H		0	0	0	0	0	0
28		床面積	44	63.0										合計	23.25803	23.51072	
29									煙突高さ	東中経路	DP上隈風圧補助ファン11値						
30																	
31		パッシブ集	常時排気	cm ²	33	33	33	33	0	4.6	49		1.7				
32		パッシブ集	常時排気	cm ²	0	0	0	0	10000	85	79		1.3				
33		換気口	給気口	cm ²	0	0	0	0	0	0	0						
34		換気口	排気口	cm ²	0	0	0	0	0	0	0						
35		個別ファン	常時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
36		個別ファン	常時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
37		個別ファン	使用時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
38		個別ファン	使用時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
39		集中ファン	常時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
40		集中ファン	常時排気	m ³ /h	0	0	0	0	0	0	0						
41		換気量/人		115	70												
42		家族構成	居室南に記入														
43																	
44		家族構成	居室南に記入														
45																	
46		家族構成	居室南に記入														
47																	
48		家族構成	居室南に記入														
49																	
50		家族構成	居室南に記入														

図 3-8-138 建物データファイルの画面 (Excel)

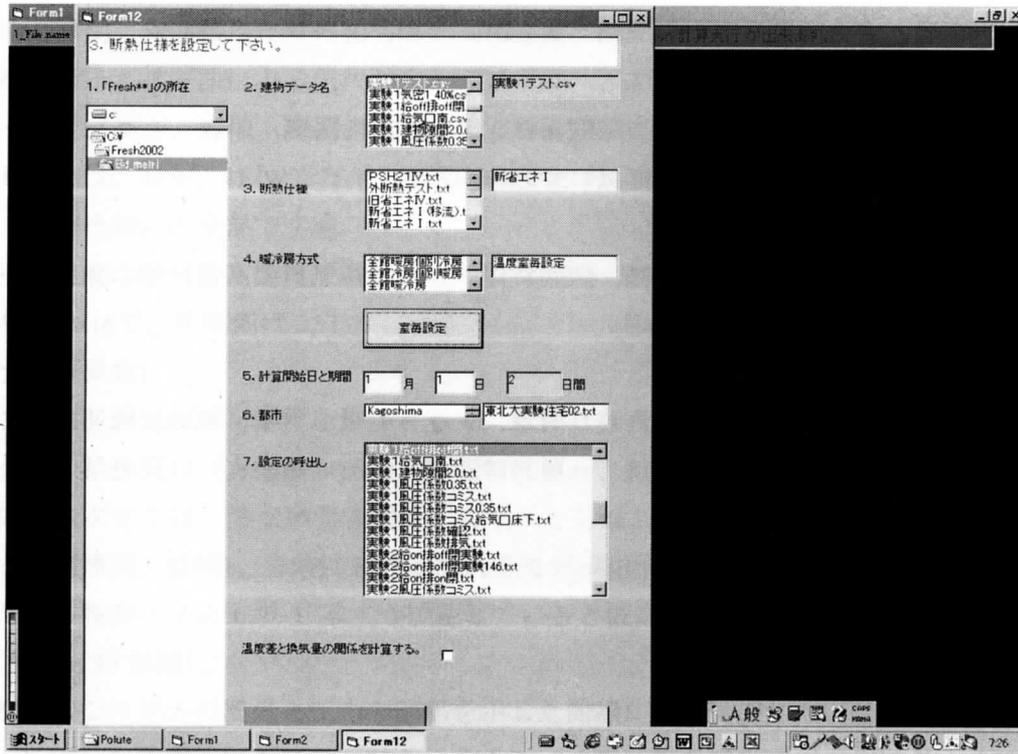


図 3-8-139 計算開始前の設定画面

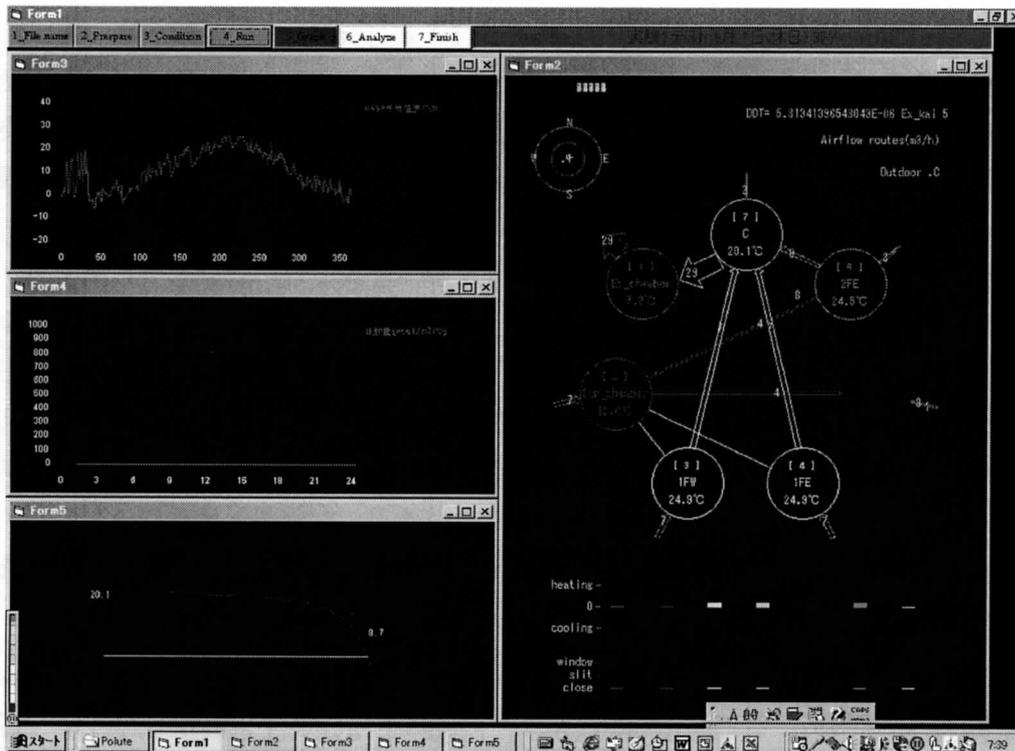


図 3-8-140 計算の画面

3) 入力項目と出力項目

【入力項目】

- ① 建物の隙間（床面積当たりの相当隙間面積 $\alpha A'$ 、隙間特性値 n ）
- ② 室（温度、高さ、容積、配置、通気口や窓の面積）
- ③ ファン（風量）
- ④ ダクト、給排気口（有効開口面積、隙間特性値 n 、給排気口の高さ）
- ⑤ 熱交換器（換気量—温度交換効率）
- ⑥ 風圧係数
- ⑦ 気象データ（温度、絶対湿度、直達日射量、天空日射量、曇量、風向、風速）

【出力項目】

- ① 給排気量（ダクトと隙間の両方）
- ② 室間の風量
- ③ 熱交換後の給排気温度
- ④ 室内外温度差
- ⑤ 外気温、外部風向風速（気象データとして入力した値）
- ⑥ 室内温度

4) 計算の手順

- ① 計算に必要なデータをファイルに入力する。
- ② 計算プログラムを起動し、使用する入力ファイル、室温、断熱仕様等を指定する。
→図 3-8-139 参照
- ③ Run で計算を開始する。→図 3-8-139 参照

(c) プログラムの再現性に関する検証

本計算に入る前に、前述した性能評価実験と同じ条件で計算を行い、実験値と計算値を比較して、計算プログラムの再現性について検証した。

1) 計算条件

計算の条件について説明する。主な入力条件について、「5.5.2 計算プログラムの概要 (3) 入力項目と出力項目」で述べた入力項目順に示す。今回の計算では換気量と熱交換効率を指標とし

て検討を行うので、汚染計算に関するデータはデフォルト値を使用している。

① 建物の隙間（床面積当たりの相当隙間面積 $\alpha A'$ 、隙間特性値 n ）

・実験前に行った加圧法による気密測定の結果より、 $\alpha A'=1.0$ 、 $n=1.3$ に設定。

② 室（温度、高さ、容積、配置、通気口や窓の面積）

・設定した室は、1F/E、1F/W、2F/E、2F/W、C（廊下）、給気チャンバー（熱交換器）、排気チャンバー（熱交換器）の全部で7室。

・暖房室の温度は暖房設定温度である 25°C 、非暖房室の廊下の温度は、実験結果より算出した平均値（冬期は 16°C 、中間期は 22°C ）に設定。

③ ファン（風量）

・給気ファン、排気ファンの性能特性として、それぞれのPQ特性を入力。

④ ダクト、給排気口（有効開口面積、隙間特性値 n 、給排気口の高さ）

・実際の給気ダクトは、熱交換器通過後に各室へと分岐していくが（「3.8.2(3)(b) ダクトシステムとパッシブ煙突」参照）、分岐における抵抗をモデル化するのは難しいため、計算では、給気チャンバーから各室へダクトが1本ずつ接続していると仮定する（「3.8.2(5)(b) 計算プログラムの概要」図3-8-135参照）。

・圧力損失（システムの風量と圧力の関係を示した曲線）より算出した有効開口面積 A と隙間特性値 n （ N 値）を入力。以下に入力値を示す。

○給気（分岐前）： $A=49\text{cm}^2$ 、 $n=1.7$

○給気（分岐後、1本当たり）： $A=33\text{cm}^2$ 、 $n=1.7$

○排気（ダンパー閉）： $A=78\text{cm}^2$ 、 $n=1.4$

○排気（ダンパー開）： $A=134\text{cm}^2$ 、 $n=1.65$

⑤ 熱交換器（換気量—温度交換効率）

・換気量と温度交換効率の関係を示した曲線（「5.3.3 熱交換ユニット」参照）より、換気量 $115\text{m}^3/\text{h}$ のとき、温度交換効率70%に設定。

・ダンパーを開けた場合は、ほとんどの空気が抵抗の小さいバイパス部を通るものとして、温度交換効率の設定を0とする。

⑥ 風圧係数

・AIVCで整備されたデータを風向毎に入力。このデータは、建物形状が平面的に正方形で、周辺には対象建物と同等の高さの建物が存在する場合のものである。

・排気トップにおける風圧係数は、以前行われた風洞実験の結果（表3-8-21）を使用する³⁻⁴¹⁾。

表 3-8-21 排気トップの風圧係数

風向	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180
風圧係数	-0.135	-0.1975	-0.26	-0.265	-0.27	-0.265	-0.26	-0.1975	-0.135

⑦ 気象データ（温度、絶対湿度、直達日射量、天空日射量、雲量、風向、風速）

・実験時の気象データ（温度、風向、風速）をHASP標準気象データ³⁻⁴²⁾のフォーマット形式で入力する。以下に入力方法を示す。

- 温度：測定値×10+500
- 風向：1=NNE、2=NE、…… 16=N
- 風速：測定値×10

・実験1を行っていた2001年12月30日16:00~31日0:00の風向風速のデータが取れていなかったため、その部分は仙台管区気象台のデータを使用した。

2) 計算結果

図3-8-141に、外気導入量と排気ダクトにおける排気量の計算値と実験値を示す。両者を比較すると、ファンとダンパーの運転条件を変更した場合の変動傾向は類似しており、実験3・6以外の実験では、外気導入量、排気ダクトの排気量ともに、計算値と実験値の差は25m³/h以内である。給気ファンのみを運転した実験3・6では、計算値が実験値を大きく上回っており、この原因として、計算では給気ダクトの分岐を簡略化する等、ダクトシステムの抵抗に仮定・近似部分が多いことが考えられる。

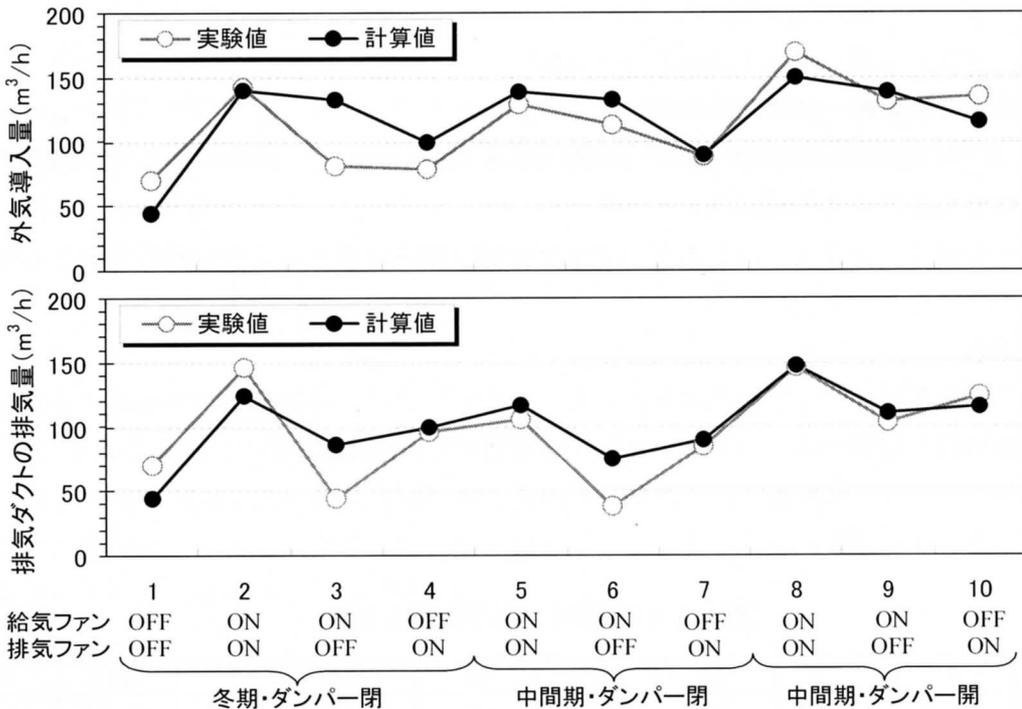


図3-8-141 計算による給排気量

(d) 計算条件

表 3-8-22 に計算の共通条件を示す。今回は、ダンパーを閉め熱交換換気を行う場合について検討を行う。計算には、仙台の HASP 標準気象データ（冬期：1月14日～16日、夏期：8月29日～31日）を使用し、暖房室の温度は 25℃一定とする。風圧係数は AIVC で整備されたデータを用い、排気トップの係数には実験値を使用する。給排気ファンについては、それぞれ PQ 特性を与えており、風量を 80m³/h を制御している。実験家屋および換気システムをモデル化する際に、吹き抜けでつながっている 1F/C と 2F/C を 1つの空間 (C) として扱っている。また、熱交換ユニットと各室をつなぐダクトは実際には途中で分岐しているが、計算では分岐を簡略化し、ユニットから各室へ 1本ずつダクトが通じていることにした。

表 3-8-23 に計算ケースを示す。計算は、2つのパラメータ（建物の相当隙間面積、熱交換効率）とファンの ON・OFF を組み合わせた 24 条件を、冬期と夏期の気象データを用いてそれぞれ行う。Case3・7・11・15 は性能評価実験時の条件と対応しており、基本条件とする。

① 建物の相当隙間面積

実験家屋の実際の相当隙間面積である 1.0cm²/m² に対して、隙間が全くない極限状態を仮定した 0.0cm²/m²、現状より隙間面積が小さい 0.5cm²/m²、大きい 2.0cm²/m² の計 4 条件で計算を行う。

② 熱交換効率

現在使用している熱交換器は、熱交換部の給排気量 115m³/h とき熱交換効率 70% という性能である。これに対して、同給排気量るとき熱交換効率 40%、熱交換なしの条件として熱交換効率 0% の計 3 条件で計算を行う。

表 3-8-22 計算の共通条件

気象条件	・仙台の HASP 標準気象データ(冬期:1月14日～16日、夏期:8月29日～31日)
室内温度	・暖冷房室25℃一定
風圧係数	・AIVCで整備されたデータ(建物形状は平面的に正方形で、周辺には対象建物の高さと同等の建物が存在する場合の風圧係数) ・排気トップの風圧係数は風洞実験値 ^{注2)}
ファン	・実際のファンのPQ特性を入力 ・給気ファン・排気ファンともに80m ³ /h一定になるように制御

表 3-8-23 計算ケース

Case	ファン運転状況		パラメータ	建物の相当隙間 面積 (cm ² /m ²)	熱交換効率
	給気	排気			
1	OFF	OFF	建物の相当 隙間面積	0	給排気量 115m ³ /hのとき 70%
2				0.5	
3(基本条件)				1	
4				2	
5	ON	ON		0	
6				0.5	
7(基本条件)				1	
8				2	
9	ON	OFF		0	
10				0.5	
11(基本条件)				1	
12				2	
13	OFF	ON	0		
14			0.5		
15(基本条件)			1		
16			2		
17	OFF	OFF	熱交換 効率	1	40%
18					0%
19	ON	ON			40%
20					0%
21	ON	OFF			40%
22					0%
23	OFF	ON			40%
24					0%

(e) 計算結果

1) 冬期の換気量および回収熱量

図3-8-142に、冬期における外気導入量、排気ダクトにおける排気量、熱交換による回収熱量の計算結果を示す。

【ファンを運転しない場合（パッシブ換気）】

全条件で、換気回数が0.5回/h（約80m³/h）に達しておらず、2階両室への外気導入量が非常に小さい。熱交換効率を40%から70%に上昇させた場合、換気量、回収熱量ともに小さくなる。これは、熱交換効率の上昇により排気温度が低下し、浮力効果が小さくなることが原因と考えられる。建物の相当隙間面積をパラメータとした場合、0.0cm²/m²・0.5cm²/m²・1.0cm²/m²の条件下では、給気ダクト内での逆流は見られなかった。一方、2.0cm²/m²では、計算期間の全時間帯で給気ダクト内での逆流が起きており、回収熱量が0kJ/hになっている。

【ファンを両方とも運転した場合】

外気導入量は80～110m³/hであり、全条件で換気回数0.5回/hを満たしている。建物の気密性能をパラメータにした場合、回収熱量は約1580kJ/h（暖房負荷の約12.3%）でほとんど変化していない。これは、給気ファンと排気ファンを両方とも運転しているため、熱交換部を通る給排気量が建物の気密性能によってほとんど変化せず、安定して得られているためと考えられる。

【給気ファンのみを運転した場合】

外気導入量は80～110m³/hであり、全条件で換気回数0.5回/hを満たしている。建物の相当隙間面積が大きくなると、ファンにより熱交換部を通る給気量が80m³/hに維持されているのに対して、熱交換部を通る排気量が小さくなるため回収熱量は減少する。その減少率は、排気ファンのみを運転した場合と比べて僅かであり、回収熱量は、0.0cm²/m²の場合1520kJ/h（暖房負荷の約13.5%）、2.0cm²/m²の場合1360kJ/h（暖房負荷の約11.6%）である。

【排気ファンのみを運転した場合】

外気導入量は80～90m³/hであり、全条件で換気回数0.5回/hを満たしている。2階両室への外気導入量が小さいが、建物の相当隙間面積を小さくすることにより増加する。また、熱交換効率が低下すると2階両室への外気導入量は小さくなり、熱交換を行わない場合、3～5m³/h（換気回数約0.1回/h）まで減少する。建物の気密性能が低下すると回収熱量は急激に減少し、0.0cm²/m²の場合の1520kJ/h（暖房負荷の約12.8%）に対して、1.0cm²/m²の場合は480kJ/h（暖房負荷の約4.0%）となる。建物の相当隙間面積が2.0cm²/m²の場合の回収熱量は非常に小さい。この原因は給気ダクト内での逆流である。

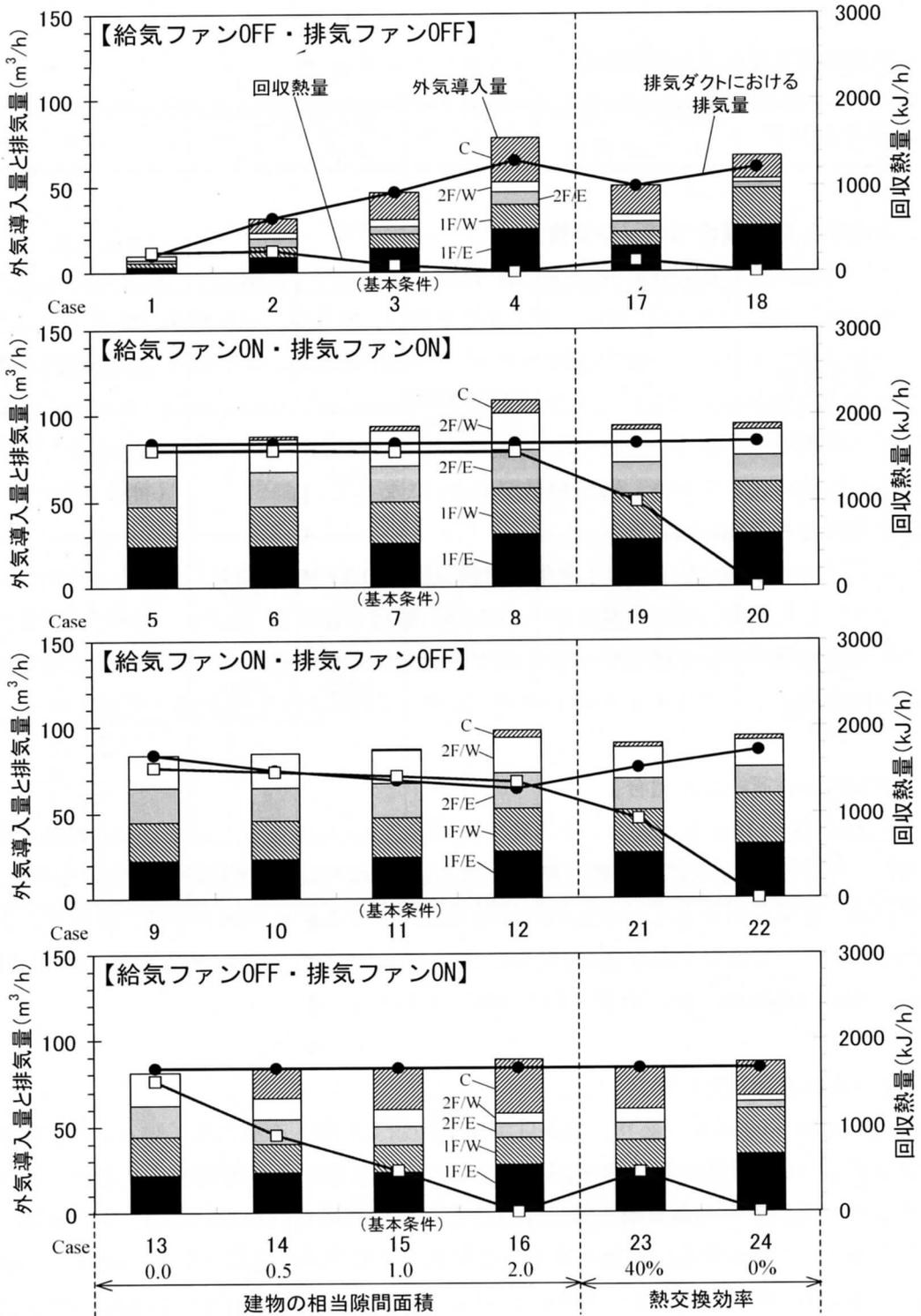


図 3-8-142 換気量と熱交換による回収熱量 (冬期)

2) 夏期の換気量および回収熱量・排出熱量

窓を締め切り、エアコンの設置された部屋で冷房を行った場合の検討を行う。夏期には、夜間に室内温度（25℃に制御）より外気温が低くなるため、温度の高い排気側から低い給気側へと熱交換が行われる。一方、日中には室内温度より外気温が高くなり、温度の高い給気側から低い排気側へと熱交換が行われる。そこで、前者では熱交換により排気の熱を回収し、後者では熱交換により外気の熱を屋外へ排出し冷房負荷を低減させると考え、それぞれ回収熱量と排出熱量を算出した。以下に、熱交換による排気熱量の算出式を示す。

$$Q_2 = Q_{\text{exhaust}} - Q_{\text{fan}} \quad (3-8-26)$$

$$Q_{\text{exhaust}} = Q_{\text{exhaust}} \times \gamma_{\text{RA}} \times C_{\text{RA}} \times (\theta_{\text{EA}} - \theta_{\text{RA}}) \quad (3-8-27)$$

Q_{fan} : ファンの運転による消費熱量[kJ/h=W・3600/1000]、

Q_{exhaust} : 熱交換部の排気量[m³/h]、 γ_{RA} : RAの空気密度[kg/m³]、

C_{RA} : RAの空気比熱[kJ/kg・℃]、 θ_{EA} : EAの温度[℃]、 θ_{RA} : RAの温度[℃]

【ファンを運転しない場合（パッシブ換気）】

全条件において、給気ダクトおよび排気ダクト内での逆流が見られた。例として、図 3-8-143 に、Case3（建物の相当隙間面積 1.0cm²/m²、熱交換効率 70%）内外温度差（室内温度－外気温）、給気ダクトおよび排気ダクトにおける給排気量の変動を示す。ダクトの給排気量の値が正であれば正規の方向に空気が流れており、負であれば空気が逆流していることを示している。外気温が室内温度の 25℃を下回る夜間から明け方の時間帯（内外温度差は正）には、給気ダクトを通して外気が供給され、排気ダクトを通して室内空気が排気されており、逆流は見られない。一方、外気温が室内温度を上回ると（内外温度差は負）、排気ダクト、給気ダクトともに逆流が起きていることが確認できる。図 3-8-144 には、逆流が起きていない場合の外気導入量と排気ダクトにおける排気量の平均値を示したが、いずれも非常に小さくなっている。

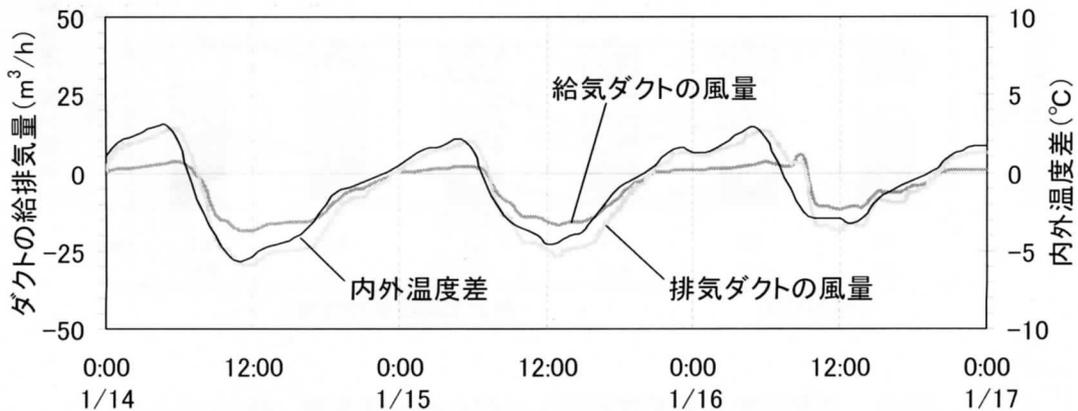


図 3-8-143 給気ダクトと排気ダクトの風量の変動
（パッシブ換気、建物の相当隙間面積 1.0cm²/m²、熱交換効率 70%）

【ファンを両方とも運転した場合】

図3-8-144に外気導入量、排気ダクトにおける排気量、熱交換による回収熱量および排出熱量を示す。換気量は $80\sim 90\text{m}^3/\text{h}$ であり、全条件で換気回数 $0.5\text{回}/\text{h}$ （換気量が約 $80\text{m}^3/\text{h}$ ）を満たしている。回収熱量と排出熱量の合計値は $60\sim 140\text{kJ}/\text{h}$ であり、冬期と比べて非常に小さいが、ファンの電力消費に伴う消費熱量を賄うことは可能である。回収熱量は約 $15\text{kJ}/\text{h}$ と非常に少なく、排出熱量の方が上回っていることが分かる。

【給気ファンのみを運転した場合】

図3-8-144に計算結果を示す。換気量は約 $85\text{m}^3/\text{h}$ であり、全条件で換気回数 $0.5\text{回}/\text{h}$ を満たしている。廊下への外気導入量は冬期も非常に少なかったが、夏期は全条件において $0\text{m}^3/\text{h}$ になっている。回収熱量と排出熱量の合計値は $70\sim 210\text{kJ}/\text{h}$ であり、排出熱量が回収熱量を上回った。

【排気ファンのみを運転した場合】

図3-8-144に計算結果を示す。換気量は約 $85\text{m}^3/\text{h}$ であり、全条件で換気回数 $0.5\text{回}/\text{h}$ を満たしている。回収熱量と排出熱量の合計値は $60\sim 250\text{kJ}/\text{h}$ であり、排出熱量が回収熱量を上回っている。建物の相当隙間面積が小さくなるにつれて、回収熱量、排出熱量はともに減少し、建物の相当隙間面積が $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ の場合、回収熱量はファンの電力消費に伴う消費熱量をわずかに下回る。

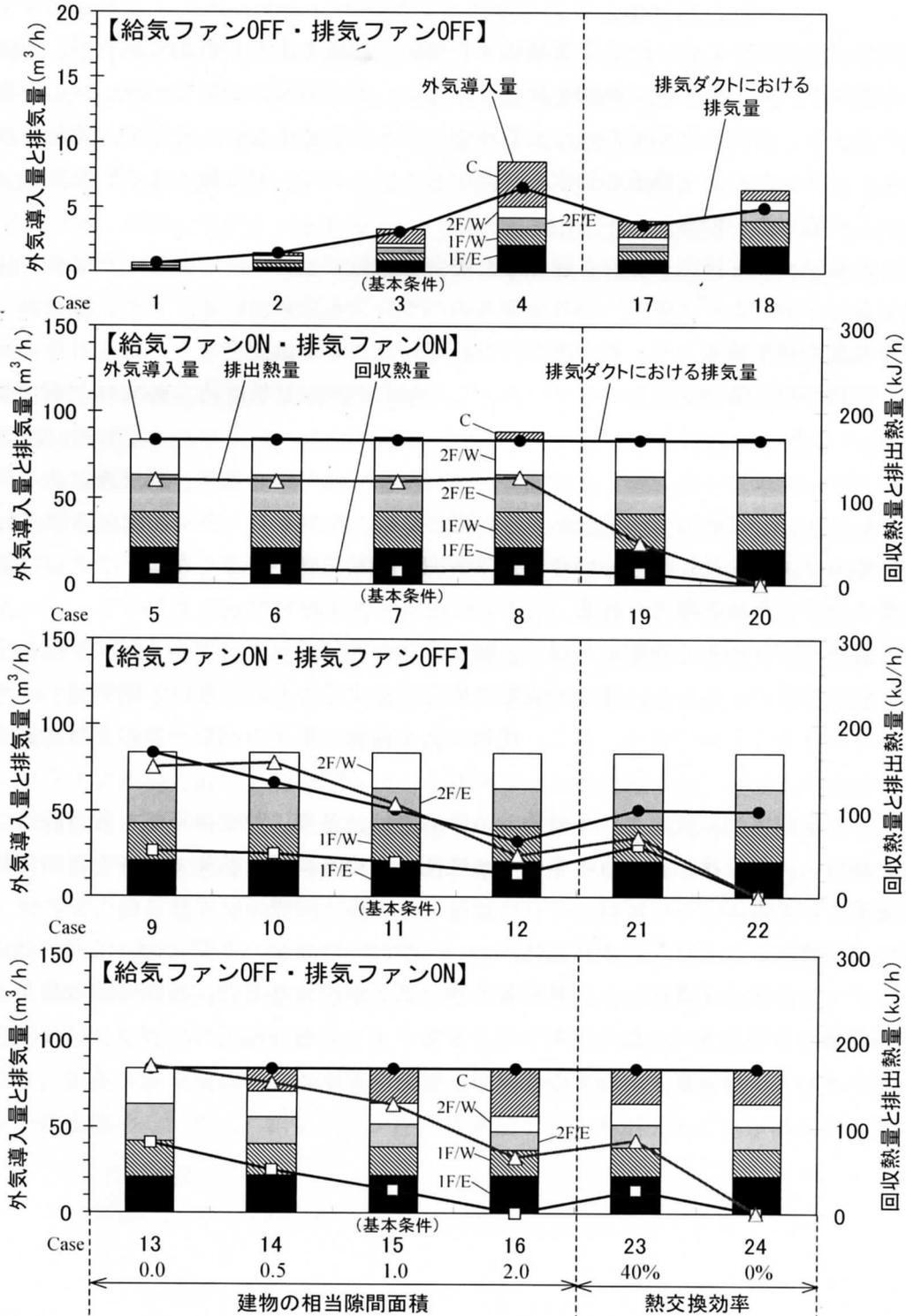


図 3-8-144 換気量と熱交換による回収熱量と排出熱量 (夏期)

(f) まとめ

- ① 熱交換効率を評価する際には温度交換効率を用いた評価方法が一般的であるが、建物に設置された換気システム内の熱交換器を評価する場合、熱交換部の給排気バランスの影響が生じる場合があり、温度交換効率のみによる評価では十分と言えない。そこで、建物に設置された換気システム内の熱交換器の効率を評価する方法として、熱交換による回収熱量、排気熱量による評価方法を提案した。
- ② 冬期に給気ファン・排気ファンを運転した場合と給気ファンのみを運転した場合、建物全体の換気量は十分であり、各室への外気導入のバランスも取れている。また、熱交換ユニット周辺の温度の測定結果より、熱交換が行われていたことが確認できた。数値計算の結果によると、建物の相当隙間面積をパラメータとした場合の回収熱量は約 1500kJ/h（暖房負荷の約 12.5%）である。
- ③ 冬期にファンを両方とも運転しない場合、十分な換気量が得られず、熱交換による回収熱量も小さい。また、建物の気密性能が大きい場合には、給気ダクト内で逆流が確認された。
- ④ 冬期に給気ファンを運転しない場合、2 階両室への給気量が小さくなる。これは、煙突効果の影響を受けるためと考えられる。
- ⑤ 冬期に排気ファンのみを運転した場合、建物全体の換気量は十分であるが、2 階両室への外気導入量が小さい。しかし、建物の気密性能を高くすることにより、2 階両室への外気導入量を大きくすることができる。また、建物の気密性能の低下が回収熱量の急激な減少につながる。
- ⑥ 以上より、実験家屋に設置された対象システムでは、冬期に熱交換換気を行う際に、必要換気量を確保し、熱交換による省エネルギー性能を高めるには、給気ファンを常時運転する必要があると言える。
- ⑦ 夏期の冷房時における熱交換の可能性について検討した結果、冬期に比べてその効果は小さいが、ファンの電力消費に伴う消費熱量を賄うことができること、夜間の回収熱量より日中の排出熱量の方が大きいことが判明した。また、ファンを運転しないパッシブ換気の場合、給気ダクトおよび排気ダクト内での逆流が、全条件で確認された。

3.9 まとめ

(1) 床下等をダクトスペースとして利用する換気システムの性能検証

床下等をダクトスペースとして利用する換気システムは、内部空間を空気の通り道にすることで、室内空気の清浄性、省エネルギー性を高めることを目標としており、換気量以外に、室内だけでなく内部空間を含めた換気経路についても評価する必要がある。そこで、空気齢（給気口や建物隙間から導入された外気が室内のある点に到達するまでの時間）を測定することが可能なステップアップ法、ステップダウン法を選定し、4件の非居住状態の住宅を対象として測定を行い、今まで室内の換気経路を把握するために用いられてきた測定法により、内部空間を含めた換気経路について把握できることを確認した。

(2) 熱交換器付き換気システムの性能検証

熱交換器付き換気システムは、熱交換換気を行うことにより冷暖房負荷を削減することで、省エネルギー性を高めることを目標としており、換気量以外に、熱交換による省エネルギー量についても評価する必要がある。従来の熱交換特性の評価法では、熱交換部の給排気量が同等であることが前提となっており、給排気量が同等とは限らない施工後の換気システムに内蔵された熱交換器の省エネルギー性を正確に評価することができない。そこで、熱交換による回収熱量、排出熱量という評価指標、その指標を用いた評価法を提案し、2階建ての実験家屋に設置された熱交換器付きハイブリッド換気システムを対象として、実測と数値解析により冬期と夏期における換気量と熱交換による省エネルギー量の評価を行った。

換気システムに内蔵されている給気ファンと排気ファンの運転状況、建物の気密性能、熱交換器の熱交換性能をパラメータとした実験と数値解析の結果から、室内外温度差が大きく熱交換による省エネルギー量が大きくなる冬期において、給気ファンを運転しない場合、給気ダクト内の逆流、2階各室の換気量不足の問題が発生し、給気ファンと排気ファンを両方とも運転しない場合には、換気量及び熱交換による回収熱量が非常に小さく、排気ファンのみを運転した場合には、建物の気密性能の低下が回収熱量の急激な減少につながるということが明らかになった。また、ファンを両方とも運転した場合は、過大換気により省エネルギー性が損なわれることが判明した。

以上より、対象実験家屋に本システムを設置した場合、必要換気量を確保し、熱交換による省エネルギー性を高めるために、給気ファンを常時運転する必要があることが明らかになった。

第3章 注釈

1) 空間の空気交換量は以下のようにして求めた。

4ゾーンの理論式を式(1)～(20)に示す。ゾーンごとに各トレーサーガスについての連立方程式を立てる。

Zone1

$$A : Q_{2,1}C_{A2} + Q_{3,1}C_{A3} + Q_{4,1}C_{A4} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + Q_{1,4})C_{A1} = -M_A \quad \dots (1)$$

$$B : Q_{2,1}C_{B2} + Q_{3,1}C_{B3} + Q_{4,1}C_{B4} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + Q_{1,4})C_{B1} = 0 \quad \dots (2)$$

$$C : Q_{2,1}C_{C2} + Q_{3,1}C_{C3} + Q_{4,1}C_{C4} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + Q_{1,4})C_{C1} = 0 \quad \dots (3)$$

$$D : Q_{2,1}C_{D2} + Q_{3,1}C_{D3} + Q_{4,1}C_{D4} - (Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + Q_{1,4})C_{D1} = 0 \quad \dots (4)$$

Zone2

$$A : Q_{4,2}C_{A4} + Q_{3,2}C_{A3} + Q_{1,2}C_{A1} - (Q_{2,0} + Q_{2,4} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{A2} = 0 \quad \dots (5)$$

$$B : Q_{4,2}C_{B4} + Q_{3,2}C_{B3} + Q_{1,2}C_{B1} - (Q_{2,0} + Q_{2,4} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{B2} = -M_B \quad \dots (6)$$

$$C : Q_{4,2}C_{C4} + Q_{3,2}C_{C3} + Q_{1,2}C_{C1} - (Q_{2,0} + Q_{2,4} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{C2} = 0 \quad \dots (7)$$

$$D : Q_{4,2}C_{D4} + Q_{3,2}C_{D3} + Q_{1,2}C_{D1} - (Q_{2,0} + Q_{2,4} + Q_{2,3} + Q_{2,1})C_{D2} = 0 \quad \dots (8)$$

Zone3

$$A : Q_{1,3}C_{A1} + Q_{2,3}C_{A2} + Q_{4,3}C_{A4} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,4})C_{A3} = 0 \quad \dots (9)$$

$$B : Q_{1,3}C_{B1} + Q_{2,3}C_{B2} + Q_{4,3}C_{B4} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,4})C_{B3} = 0 \quad \dots (10)$$

$$C : Q_{1,3}C_{C1} + Q_{2,3}C_{C2} + Q_{4,3}C_{C4} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,4})C_{C3} = -M_C \quad \dots (11)$$

$$D : Q_{1,3}C_{D1} + Q_{2,3}C_{D2} + Q_{4,3}C_{D4} - (Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,4})C_{D3} = 0 \quad \dots (12)$$

Zone4

$$A : Q_{1,4}C_{A1} + Q_{2,4}C_{A2} + Q_{3,4}C_{A3} - (Q_{4,0} + Q_{4,1} + Q_{4,2} + Q_{4,3})C_{A4} = 0 \quad \dots (13)$$

$$B : Q_{1,4}C_{B1} + Q_{2,4}C_{B2} + Q_{3,4}C_{B3} - (Q_{4,0} + Q_{4,1} + Q_{4,2} + Q_{4,3})C_{B4} = 0 \quad \dots (14)$$

$$C : Q_{1,4}C_{C1} + Q_{2,4}C_{C2} + Q_{3,4}C_{C3} - (Q_{4,0} + Q_{4,1} + Q_{4,2} + Q_{4,3})C_{C4} = 0 \quad \dots (15)$$

$$D : Q_{1,4}C_{D1} + Q_{2,4}C_{D2} + Q_{3,4}C_{D3} - (Q_{4,0} + Q_{4,1} + Q_{4,2} + Q_{4,3})C_{D4} = -M_D \quad \dots (16)$$

換気量のバランス式

$$Q_{0,1} + Q_{2,1} + Q_{3,1} + Q_{4,1} = Q_{1,0} + Q_{1,2} + Q_{1,3} + Q_{1,4} \quad \dots (17)$$

$$Q_{0,2} + Q_{1,2} + Q_{3,2} + Q_{4,2} = Q_{2,0} + Q_{2,1} + Q_{2,3} + Q_{2,4} \quad \dots (18)$$

$$Q_{0,3} + Q_{1,3} + Q_{2,3} + Q_{4,3} = Q_{3,0} + Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,4} \quad \dots (19)$$

$$Q_{0,4} + Q_{1,4} + Q_{2,4} + Q_{3,4} = Q_{4,0} + Q_{4,1} + Q_{4,2} + Q_{4,3} \quad \dots (20)$$

A、B、C、D：トレーサーガスの種類

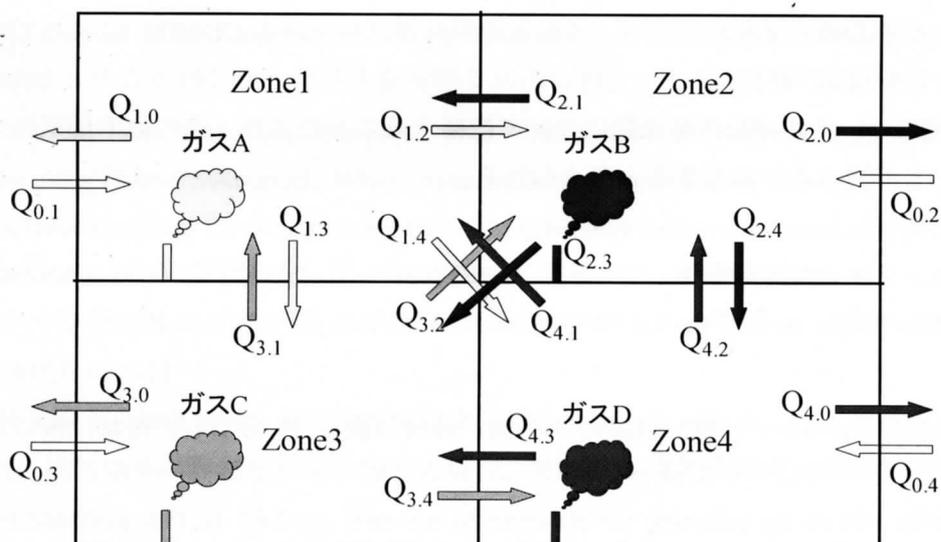
$Q_{n,m}$: Zone n から m への空気移動量[m³/h]

$Q_{1,0}$ 、 $Q_{2,0}$ 、 $Q_{3,0}$ 、 $Q_{4,0}$: 各 Zone から外への空気移動量[m³/h]

$Q_{0,1}$ 、 $Q_{0,2}$ 、 $Q_{0,3}$ 、 $Q_{0,4}$: 外から各 Zone への空気移動量[m³/h]

$C_{A,n}$ 、 $C_{B,n}$ 、 $C_{C,n}$ 、 $C_{D,n}$: 各 Zone における物質の気中濃度[μg/m³]

M_A 、 M_B 、 M_C 、 M_D : A、B、C、D の放散量[μg/h]



- 2) 上記の連立方程式は、ガウス・ジョルダン法というアルゴリズムを組み込んだ計算ツールを使用して解いた。
- 3) ゾーンの空気齢はサンプラーに捕集されたそれぞれのガスについて空気齢を算出して、足しあわせた。
- 4) 表 a の室内濃度の結果を使って、アクティブサンプリングで引く流量を決定する。まず、濃度の値[mg/m³]を[μg/l]に変換する。それぞれのゾーンについて流量を決定するから、ゾーン毎の濃度の合計値を算出する。サンプリング限界が 1[μg]であるから、(サンプリング限界 : 1[μg]) ÷ (ゾーン毎の濃度の合計値) = (流量) となる。以上より、1 階東部屋では 2.0[l]、1 階西部屋では 2.5[l]、2 階東部屋では 2.5[l]、2 階西部屋では 3.5[l]と決定した。

表 a 再実験で想定される室内濃度

No.	測定位置	室内濃度平均値 (mg/m ³)				SUM
		PMCH	HFE-7200	HFB	OFT	
1	1F/E+C	0.24	0.10	0.07	0.02	0.43
2	1F/W	0.12	0.20	0.03	0.01	0.37
3	2F/E+C	0.12	0.05	0.15	0.05	0.36
4	2F/W	0.06	0.02	0.07	0.10	0.25

- 5) CFD 解析では詳細な 3 次元分布が得られるため、住戸全体を解析することが望ましいが、計算負荷が膨大となるため、マクロモデル（多数室換気計算プログラム COMIS）によって住戸全体を、マイクロモデル（CFD 解析）によって住戸内の 2 階居室を対象として行うこととした。また、ある居室 1 室について詳細な空気流動について把握することにより、その他の居室についても同様のものとして扱うことができると考えられる。
- 6) 「JIS A4706」サッシの気密性能 A-4 等級 (C=0.5[cm²/m²])、A-3 等級 (C=2.0[cm²/m²])、A-2 等級 (C=7.5[cm²/m²])、A-1 等級 (C=30.0[cm²/m²]) である。
- 7) 隙間風は、建具（室内ドア、窓）は縦に 5 分割、外壁は縦に 10 分割し、帯状に設けた開口から一様に流出するものとして与えた。
- 8) 室の平均換気量は室の平均濃度を測定することにより得られる。

第3章 参考文献

- 3-1) 高木理恵 石川善美 吉野博 内海康雄 小林仁 佐々木陸史：人工気象室を用いた室内換気性能評価に関する研究 その3 ステップダウン法とステップアップ法による第一種換気方式の性能実験 日本建築学会大会学術梗概集 2001.9
- 3-2) 李 重勳：居住条件下における換気量の測定と改良型換気システムの性能評価、東北大学大学院 工学研究科 博士論文、2003.1
- 3-3) A Guide to Energy Efficient Ventilation: Martin W Liddament, Air Infiltration Ventilation Center, 1996.3
- 3-4) H.E.Feustel et al.:Fundamentals of the Multizone Air Flow Model-COMIS, AIVC TN29, May 1990
- 3-5) Shinsuke Kato, Tomoyuki Chikamoto, Shuzo Murakami et al.: Improvements of Indoor Air Quality by using Hybrid Sustainable HVAC Systems, International Forum of Indoor Air Quality Problems in Developed and Developing Countries for Sustainable Indoor Environment, 1991.1, pp93-100
- 3-6) 吉野博、持田灯、掛川敏正、三田村輝章、佐々木澄：実測と数値シミュレーションに基づく大空間の換気性状と結露発生メカニズムの解析、空気調和・衛生工学会論文集、88, 2003.1, pp 1-11
- 3-7) 村上周三、加藤信介：新たな換気効率指標と3次元乱流数値シミュレーションによる算出法、換気効率の評価モデルに関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、32, 1986, pp 91-102
- 3-8) M.Sandberg and M. Sjoberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, *Building and Environment*, 18,181-197
- 3-9) 日本建築学会環境工学委員会、熱分科会第15回シンポジウム、「伝熱解析の現状と課題」、1985.9
- 3-10) 住宅・都市整備公団（現：都市再生機構） 高気密住宅における換気手法の開発報告書、1994年
- 3-11) 財団法人 日本建築センター：総合技術開発プロジェクト「シックハウス対策技術の開発」 「住宅の室内化学物質汚染実態の解明に関する研究」、平成13年度報告書、2002.3
- 3-12) 吉野博、大澤元毅、桑沢保夫、池田耕一、渡辺俊行、尾崎明仁、三田村輝章：シックハウスに関連した室内空気質と換気量の調査研究 その1 調査の概要と宮城県内の住宅12件における換気量の測定結果、空気調和・衛生工学会論文集、2002.9
- 3-13) 鈴木憲高、吉野博、大澤元毅、桑沢保夫、三田村輝章、天野健太郎、李重勳：シックハウスに関連した室内空気質と換気量の調査研究 その3 3つの方法による換気量の調査結果に関する事例的分析、空気調和・衛生工学会論文集、2002.9
- 3-14) Yoshino H, Ikeda K, Nozaki A, Amano K, Wada J, Iida N, Suzuki N, Matsumoto M, Study of Ventilation Performance and Indoor Air Quality in Eight Sick Houses, Proceeding of 7th International Conference on Healthy Buildings 2003, Singapore, Vol.3, pp.42-47, 2003

- 3-15) Sakaguchi J, Akabayashi S, Field survey of indoor air quality in detached houses in Niigata Prefecture, *Indoor Air*, 13, 42-49, 2003
- 3-16) Okuizumi Y, Kumagai K, Fujii M, Yoshino H, Shinohara N, Mizukoshi A, Yanagisawa Y, Passive parallel VOCs and Ventilation Rate Sampler, *Proceeding of 7th International Conference on Healthy Buildings 2003*, Singapore, Vol.2, pp.475-479, 2003
- 3-17) Yoshino H, Amano K, Matsumoto M, Netsu K, Ikeda K, Nozaki A, Kakuta K, Hojo S, Ishikawa S, Long-Termed Field Survey of Indoor Air Quality and Health Hazards in Sick House, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 3, 297-303, 2004
- 3-18) Yoshino H, Yanagisawa Y, Kumagai K, Osawa H, Mihamura T, Suzuki N, Mihara K, Okuizumi Y, Evaluation of The Ventilation Rate via Four Different Measuring Methods, *Proceedings of Roomvent 2004*, Vol.2, pp.366-367, 2004
- 3-19) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅の気密性能試験マニュアル、2003
- 3-20) ISO: Thermal insulation – Determination of building airtightness – Fan pressurization method, International Organization for Standard (ISO 9972-1996), 1996
- 3-21) IBEC: Energy Conservation Standard for Next Generation Residence in Japan, Institute for Building Environment and Energy Conservation, 1999
- 3-22) Yoshino H, Murakami S, Akabayashi S, Kurabuchi T, Kato S, Tanabe S, Ikeda K, Osawa H, Sawachi T, Fukushima A, Adachi M: Survey on Minimum Ventilation Rate of Residential Buildings in Fifteen Countries, *Proceedings of 25th AIVC Conference, Ventilation and retrofitting*, pp.227-238, 2004
- 3-23) ASTM. ASTM Standard D6245-98/02, Using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation. ASTM International 2002.
- 3-24) ASTM. ASTM Standard E741-00, Standard test method for determining Air Change in a single zone by means of a tracer gas dilution. ASTM International 2000.
- 3-25) 太田勇、奥山博康、鈴木大隆、月館司、村田さやか、大西由哲：居住者の呼気を使った換気量測定を試行（その1）－換気量測定法の概要－、日本建築学会大会学術梗概集 D-2、pp.751-752、2004.8
- 3-26) 林基哉：住宅の窓開閉状況に関する計測法と年間計測結果、日本建築学会東北支部研究報告集、第67号 計画系、pp.129-132、2004.6
- 3-27) 藤川光利、吉野博、高木理恵、奥山博康、林基哉、菅原正則：居住者の呼気を用いた多数室換気量の測定－換気実験棟を対象とした測定精度の検証－、日本建築学会大会（九州）学術講演梗概集 D-2 pp665-666、2007.8
- 3-28) 藤川光利、吉野博、高木理恵、奥山博康、林基哉、菅原正則：居住者の呼気を利用した換気量推定方法の提案－換気実験棟を対象とした測定精度の検証－、平成19年度空気調和・衛生工学会大会（仙台）論文集、pp1071-1074、2007.9

- 3-29) Hiroshi Yoshino, Mitsutoshi Fujikawa, Rie Takaki, Hiroyasu Okuyama, Motoya Hayashi, Masanori Sugawara: Measurement method of multi-zone airflow rate using human expiration, 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century (Crete island, Greece), BOOK OF PROCEEDINGS Volume , pp1152-1156, 2007.9
- 3-30) Mitsutoshi Fujikawa, Hiroshi Yoshino, Rie Takaki, Hiroyasu Okuyama, Motoya Hayashi and Masanori Sugawara: Development of Ventilation Measurement Method Using Human Expiration -Experimental Study for Estimation Accuracy-, The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (Sendai, Japan) Proceedings , pp177-184, 2007.10
- 3-31) K. Naydenov, P. Barankova, J. Sundell, A. K. Melikov : Distribution of Carbon Dioxide Produced by People in a Room: Part 2: Field study, Book of Abstracts, ROOMVENT2004, Coimbra, Portugal, 5-8 September, pp.356-357, 2004
- 3-32) FreeCon 社 : F301HN 赤外線人感センサー設置マニュアル
- 3-33) P. Stavova, A. K. Melikov, J. Sundell, K. G. Naydenov: A New Approach for Ventilation Measurement in Homes Based on CO₂ Produced by People, 17th Air-conditioning and Ventilation Conference2006, May 17-19, 2006, Prague, Czech Republic, pp.291-296
- 3-34) 奥山博康 : 一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論、日本建築学会論文報告集、Vol.344、pp.103-115、1984.10
- 3-35) 井上宇市 : ダクト設計施工便覧、丸善株式会社、1980
- 3-36) Motoya Hayashi, Takashi Sasaki, Masamichi Enai and Yoshiko Hirosawa, Performance of Passive Stack Ventilation with Heat Recovery System, The International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1999.
- 3-37) 林基哉ほか : 四面に隙間を持つ住宅の風圧変動を考慮した換気量計算法の検証 寒地住宅の換気に関する研究 その4 : 日本建築学会北海道支部研究報告集、No.60、1987.3
- 3-38) 林基哉ほか : 風圧変動スペクトラムを用いた脈動換気量推定法、生活科学研究所研究報告、第32巻、2000.3
- 3-39) 荒谷登、鈴木憲三 : 建築家のための熱環境解析入門、1993
- 3-40) 柴田明徳 : 最新 耐震構造解析、最新建築学シリーズ9、森北出版株式会社、1981
- 3-41) 和田淳 : 住宅のパッシブ換気システムの適用に関する研究 ー基礎的実験と数値計算による検討ー、卒業論文、1999
- 3-42) 松尾陽ほか : 空調設備の動的熱負荷計算入門、日本空調衛生設備士協会、1980

第4章

実在住宅におけるコミッションング
の適用と総合的なコミッションング
手法の検討

4.1 はじめに

本章では、実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行する。設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施する。そして、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施し、性能検証を行う。また、第3章で明らかになった実在住宅の換気量不足の解決、熱交換器付き換気システムや床下等をダクトスペースとして利用する換気システムのように、特殊な換気システムに対応した性能検証法の確立のため、2000年に制定された住宅性能表示制度をベースとした住宅換気システムの設計・竣工・運用段階における性能検証法を提案する。第2章・第3章で収集したデータ、検討した数値解析ツールや換気量等の測定法の適用方法について検討し、換気システムに関する評価項目、評価手順、使用する評価法などの基本事項について考察し整理する。

4.2 実在住宅を対象とした設計段階・施工後におけるコミッショニングの適用

4.2.1 はじめに

実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行する。設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施する。そして、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施し、性能検証を行う。

4.2.2 対象住宅の概要

(1) 対象住宅（写真4.2.1）

- ・宮城県仙台市内の新築の住宅（引き渡し前）
- ・延床面積：133.19m²
- ・測定日：2008年2月27日
- ・換気方式：第1種熱交換型

(2) 換気システム

対象住宅には、第1種熱交換型換気システムが設置されている。1階と2階にそれぞれ熱交換換気ユニットがあり、各居室へ給気し、ホール及びトイレから排気する。

写真4.2.2に排気口、写真4.2.3・4.2.4に給気口、図4.2.1に住宅の平面図及び換気システム配置図、図4.2.2～4.2.6に換気システムの仕様、表4.3.1に申請時における換気量計算表を示す。



写真4.2.1 住宅外観

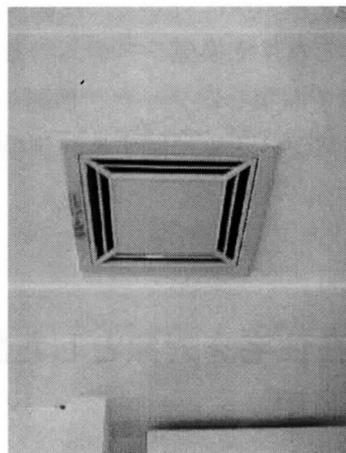


写真4.2.2 排気口（ホール）

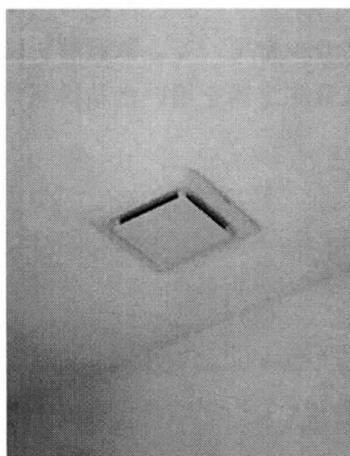


写真4.2.3 給気口（寝室）

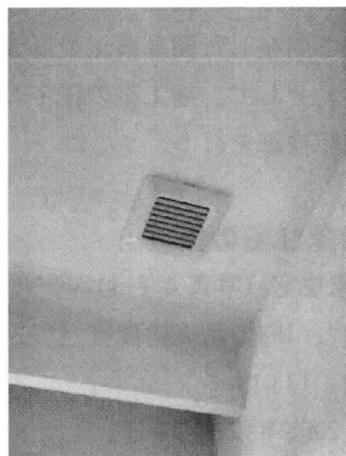
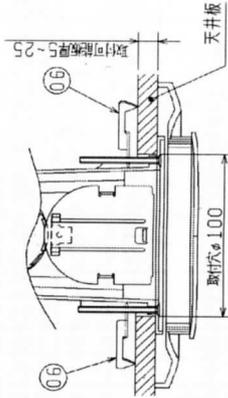


写真4.2.4 給気口（寝室以外）

品番	品名	材質	色調(マンセル・近)
01	グリル	合成樹脂	白(6.28Y8.63/0.65)
02	フレーム	合成樹脂	黒(N1)
03	ジョイントダクト	合成樹脂	黒(N1)
04	風量調整板	銅板	0.8t 黒(N1)
05	固定パネ	ステンレス鋼板 SUS 304	0.5t 黒(N1)
06	本体取付金具	溶融亜鉛メッキ鋼板	1.6t
07	取付ネジ	ネジ M4×50	
08	逆ハイベ	PP板	0.75t 白
09	フィルター	PP樹脂(ネットフィルター)	

■ 取付詳細図



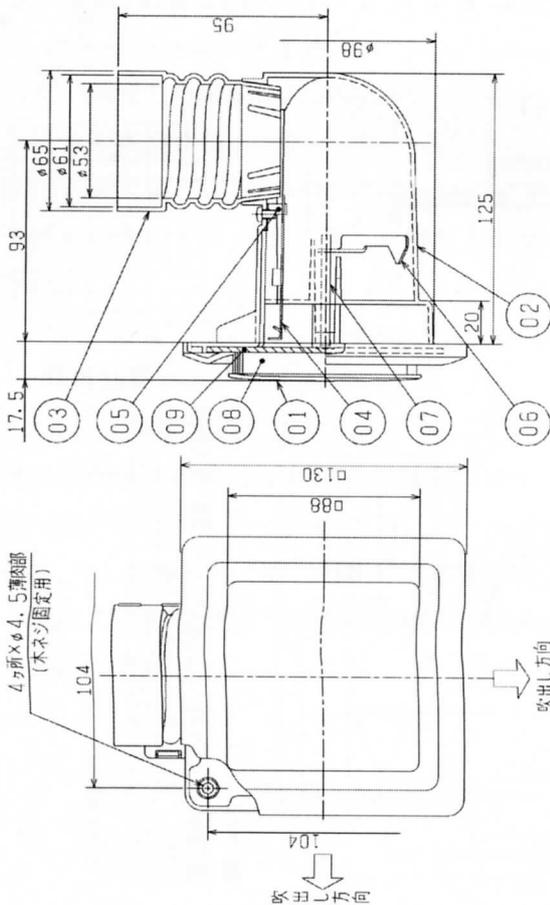
■ 設計・施工・設置場所に関するご注意

- この製品は三菱小口径ダクトシステムの給排気口として、住宅内の天井・壁に取付けて使用してください。それ以外の用途・場所には使用(取付け)しないでください。
- 施工は安全上必ず同梱の取付工事要領書に準拠してください。
- グリルの取付方向は90°または180°反転可能です。
- 下記条件下で使用しますとシャッターおろしグリル表面から結露水滴が落下することがあります。(屋外湿度が-5℃を下回りかつ室内湿度20℃、室内湿度が50%RH以上)
- 温度(40℃以上)になる場所・浴室などの湿度が高い場所では使用できません。
- 直接給気がある場所では使用できません。
- 付属の取付金具(天井板を強化する方法)で取付けをする場合、天井板の厚みは5~25mmとしてください。
- フィルターのメンテナンスの出来る場所に取付けてください。
- 火災警報器がある場合は、窓知照から1.5m以上は離れた場所に取付けてください。
- 外気(冷気)が入り雨水侵入、設置入の経路のない場所を避けてください。
- 外気の吸入には断熱材を吹き込まない、積雪等で埋もれたりしない場所を選んでください。
- 屋外(外気)の環境によっては、壁(天井)を巧むことがあります。また、小さな虫は侵入する場合がありますので、屋外側においては外壁などから離れた場所を選んで取付けてください。

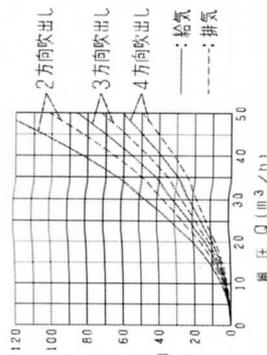
※仕様は場合により変更することがあります。

第3角図法	作成日付	P-05GLD 2方向吹き出しグリル
	07.05.01	

図4.2.5 給気端末(寝室)の仕様



■ 圧力損失特性



■ 特性表

質量 (kg)	吹出し開口数	圧力損失係数		直管相当長 (m)		開口面積 (cm²)	
		給気	排気	給気	排気	給気	排気
0.2	2方向	3.40	4.82	7.0	9.0	12	
	3方向	2.39	2.85	5.0	6.0	18	
	4方向	1.66	2.02	3.5	4.0	24	

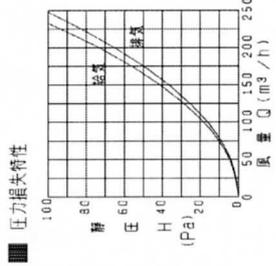
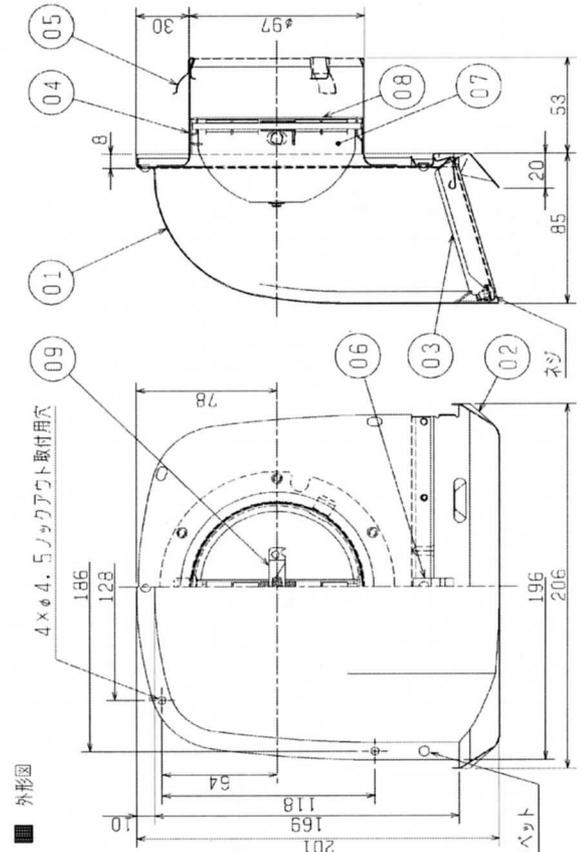
適用ダクト: P-05D, P-05DS (φ50mm口径ダクト)
VU50, VP50

※圧力損失係数と直管相当長は30m³/h時(シャッター開)の時

■ 部品表

※色調は参考色です

品番	品名	材	質	塗装仕様・色調(マンセル)
01	フード	ｽｽﾞ304	SUS304 0.5t	粉体焼付塗装・N5.5
02	ワイド水切板	ｽｽﾞ304	SUS304 0.5t	粉体焼付塗装・N5.5
03	ギャリ	ｽｽﾞ304	SUS304 0.5t	粉体焼付塗装・N5.5
04	パイプガイド	ｽｽﾞ304	SUS304 0.4t	ｽﾌﾟﾙ7地色
05	ｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	ｽｽﾞ304	SUS304 0.4t	
06	ｽﾌﾟﾘﾝｸﾞ	ｽｽﾞ304	SUS304 0.4t	
07	ﾀﾝﾊﾟｰ	ｽｽﾞ304	SUS304 0.8t	ｽﾌﾟﾙ7地色
08	ﾌﾗﾝｼﾞ	ｽｽﾞ304	SUS304 0.8t	ｽﾌﾟﾙ7地色
09	温度ヒューズ	銅板	低温ﾊﾝﾀﾞﾝ(72℃)	



- <設計・施工に関するご注意>
1. 防火ダンパーの使用については、地区により異なる規制を受ける場合がありますので、あらかじめ所轄の官公庁（特に消防署）にご相談ください。
 2. 施工は安全上必ず同梱の取付工事説明書に従ってください。
 3. 点検・清掃が容易にできるところへ取付けてください。
 4. 下記条件に該当する場合は、必ずネジによる取付けを行ってください。
 - ・スプリングによる固定が困難な場合
 - ・外風が強い場所に取付ける場合
 5. タブは雨水の浸入を防ぐため、屋外へ向けて下り勾配をつけてください。
 (排気ダクト：1/100以上、給気ダクト：1/30以上)
 6. 安全にご使用いただくために、必ず定期的な点検・清掃・修理・交換を行ってください。
 - (1) 点検項目
 - ・製品の取付状態は正常であるか？
 - ・シール材、コーキング材に亀裂など、劣化していないか？
 - ・ネジ類に緩みなどないか？
 - ・製品各部にサビや塗装の剥きなどがでないか？
 - ・温度ヒューズに著しい腐食が発生していないか？
 - (2) 清掃
 - ・塩害地区用、重塩害地区用の設置環境では、付着した塩分などを除去するため定期的に水洗いを行ってください。塩分や塵埃などの汚れをそのままにしておきますと、サビの発生原因となります。
- <設置場所に関するご注意>
1. 使用環境が、-30℃～50℃の範囲になる場所で使用してください。
 2. 火気使用室（厨房・合所等）の排気ダクトには使用できません。
 3. 防火ダンパーが誤動作するおそれがあります。
 4. 重塩害地区には必ず重塩害地区用（受注対応品）をご使用ください。
 この製品は汚染ガス耐力（酸、薬品、温泉等）を付したものではありません。
 下記のような場所での使用は腐食が急速に進み、寿命が著しく低下する恐れがありますので、特にこまめな点検・清掃及び早期のお手入れが必要です。
 - ・化学工場、バルブ工場等の構内、及びその周辺地域
 - ・工場、学校等の実験室などで化学薬品を使用する場所
 - ・温泉地域やプール、下水の排気などの用途
- ※仕様は場合により変更することがあります。

第3角図法

作成日付	形名	整理番号
05.04.01	P-13VSD3 防火ダンパー付 深形フード (ステンレス製・ギャリ付)	NB305218

1/1

図4.2.6 屋外フードの仕様

表 4.2.1 申請時における換気量計算表

室名		床面積 [m ²]	平均 天井高 [m]	気積 [m ³]	換気種別	給気機に よる給気量 [m ³ /h]	排気機に よる排気量 [m ³ /h]	換気回数 [回/h]	備考
1階	脱衣室	3.11	2.40	7.5	第1種		85.7		
1階	キッチン	9.11	2.40	21.9					
1階	リビング	16.56	2.40	39.8		39.4			
1階	玄関	3.11	2.40	7.5					
1階	シューズクローク	1.86	2.40	4.5		19.6			
1階	ホール	3.11	2.40	7.5					
1階	階段	1.24	2.40	3.0					
1階	和室	11.47	2.40	27.6		19.6			
1階	トイレ	1.47	2.40	3.6			21.5		
1階	廊下	5.97	2.40	14.4					
1階	ダイニング	11.18	2.40	26.9		19.7			
2階	主寝室	13.04	2.40	31.3		13.9			
2階	WIC	4.97	2.40	12.0		13.9			
2階	洋室-2	16.56	2.40	39.8		27.7			
2階	洋室-1	9.94	2.40	23.9		13.8			
2階	階段	4.55	2.40	11.0					
2階	ファミリールーム	14.28	2.40	34.3		13.9	69.6		
2階	トイレ	1.66	2.40	4.0			17.5		
小計		133.19		320.5		181.5	194.3	0.60	
合計		133.19		320.5					

4.2.3 設計段階におけるコミッショニング

(1) コミッショニング手法

本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツール(2.2節参照)を用いて、数値解析による事前評価を実施する。

対象住宅を図4.2.7に示す12のゾーンに分割し、各ゾーンの位置関係や室容積、換気経路、換気システムの性能と圧力損失等の情報を入力する。なお、今回の計算では、建物の隙間は考慮していない。

(2) 解析結果

図4.2.8に、数値解析により求めた各給排気口及びゾーン間の流量、図4.2.9に、数値解析による給排気口風量と申請時における給排気口風量の比較結果を示す。

両者の値がほぼ等しかったのは、シューズクロークとリビングの給気口である。トイレの排気口風量は、1、2階ともに数値解析による値が非常に小さいことが分かる。一方、ファミリーラウンジと様式2の給気口は数値解析の値の方が大きく、それ以外の給排気口では、数値解析の値の方がやや高めであった。

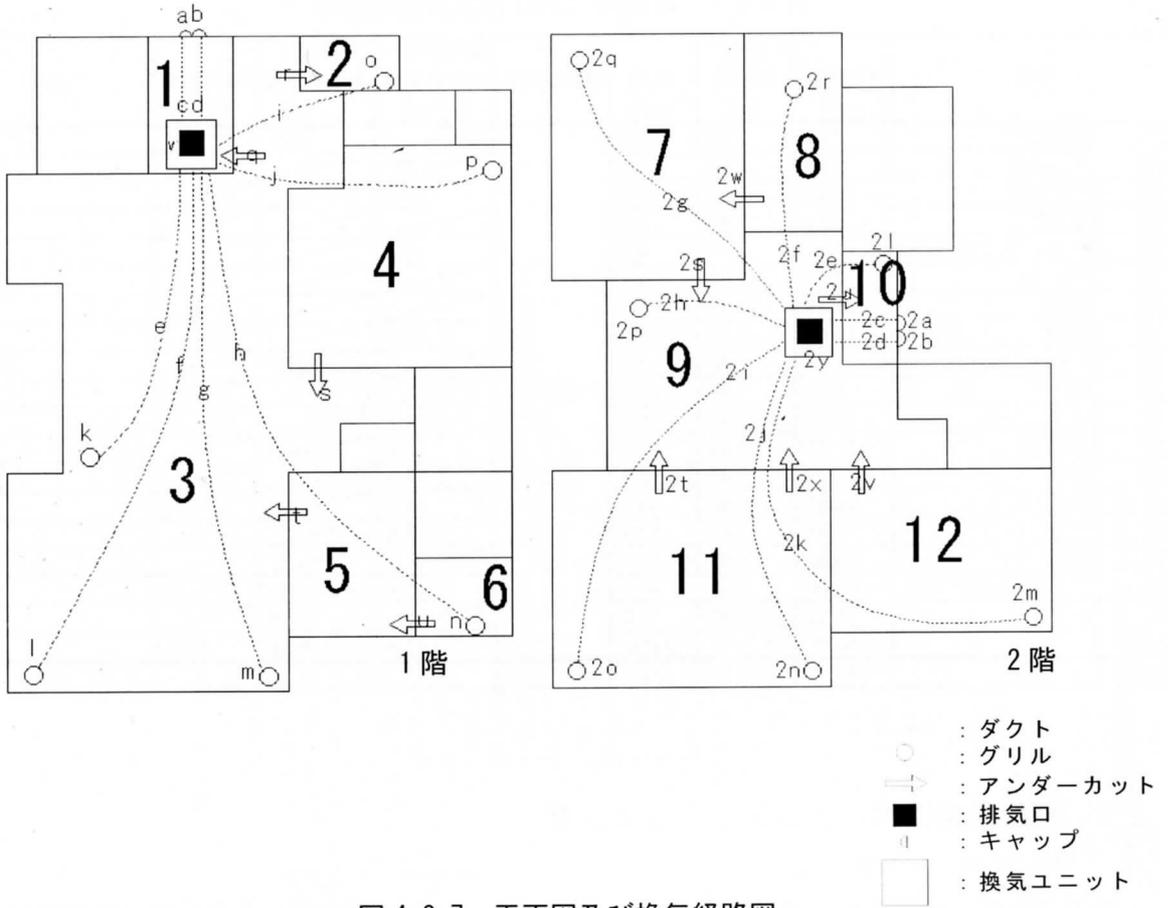


図 4.2.7 平面図及び換気経路図

表 4.2.2 各部の差圧と流量の関係式

1F		2F	
開口	関係式	開口	関係式
1a	$Q=74.1 \Delta P^{0.5}$ 式6-1	2a	$Q=78.9 \Delta P^{0.5}$ 式6-16
1b	$Q=78.9 \Delta P^{0.5}$ 式6-2	2b	$Q=74.1 \Delta P^{0.5}$ 式6-17
1c	$Q=196.6 \Delta P^{0.5}$ 式6-3	2c	$Q=189.3 \Delta P^{0.4}$ 式6-17
1d	$Q=189.3 \Delta P^{0.5}$ 式6-4	2d	$Q=196.6 \Delta P^{0.5}$ 式6-19
1e	$Q=16.5 \Delta P^{0.5}$ 式6-5	2e	$Q=189.3 \Delta P^{0.4}$ 式6-20
1f	$Q=12.8 \Delta P^{0.5}$ 式6-6	2f	$Q=18.3 \Delta P^{0.5}$ 式6-21
1g	$Q=12.5 \Delta P^{0.5}$ 式6-7	2g	$Q=15.9 \Delta P^{0.5}$ 式6-22
1h	$Q=12.7 \Delta P^{0.5}$ 式6-8	2h	$Q=24.8 \Delta P^{0.5}$ 式6-23
1i	$Q=21.2 \Delta P^{0.5}$ 式6-9	2i	$Q=16.4 \Delta P^{0.5}$ 式6-24
1j	$Q=17.0 \Delta P^{0.5}$ 式6-10	2j	$Q=15.0 \Delta P^{0.5}$ 式6-25
1k~1n	$Q=33.2 \Delta P^{0.5}$ 式6-11	2k	$Q=15.1 \Delta P^{0.5}$ 式6-26
1o	$Q=31.3 \Delta P^{0.5}$ 式6-12	2l	$Q=31.3 \Delta P^{0.5}$ 式6-27
1p	$Q=33.2 \Delta P^{0.5}$ 式6-13	2m~2n	$Q=33.2 \Delta P^{0.5}$ 式6-28
1q~1u	$Q=183 \Delta P^{0.56}$ 式6-14	2o~2r	$Q=31.3 \Delta P^{0.5}$ 式6-29
1v	$Q=400 \Delta P^{0.50}$ 式6-15	2s~2x	$Q=183 \Delta P^{0.56}$ 式6-30
		2y	$Q=610 \Delta P^{0.5}$ 式6-31

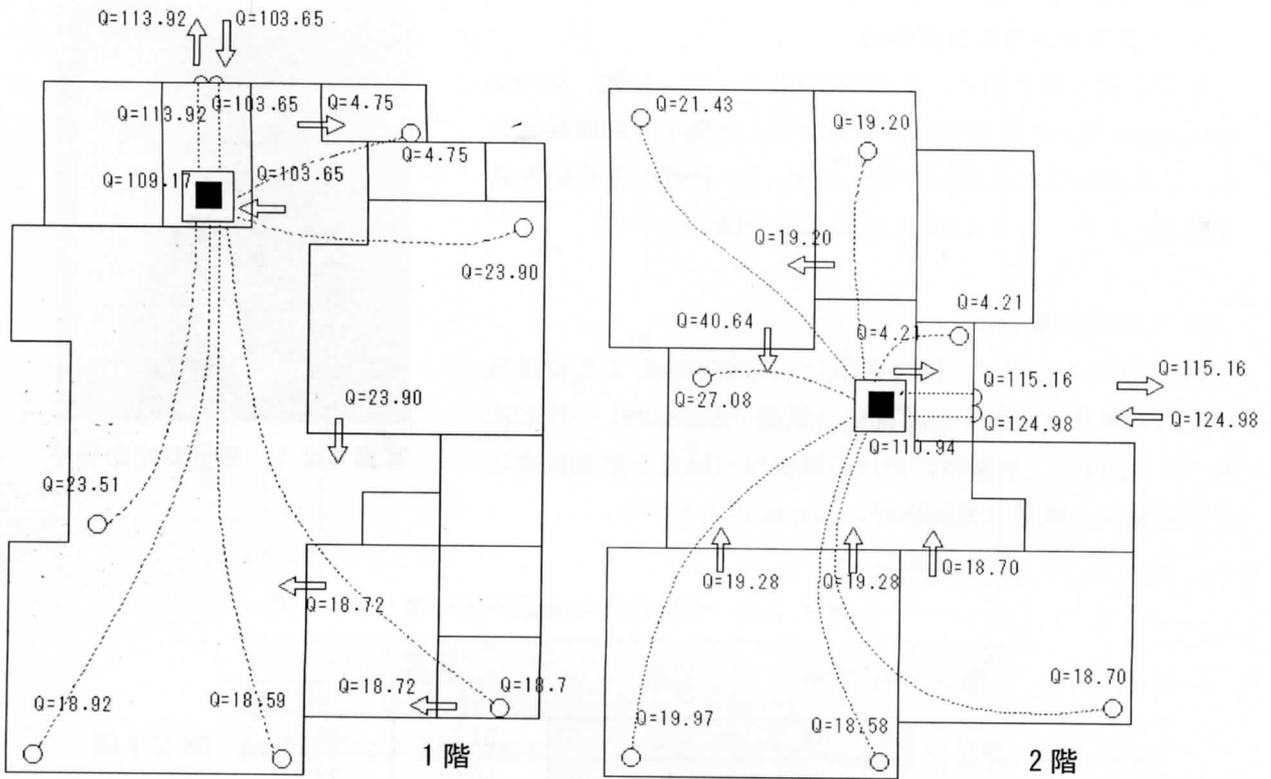


図 4.2.8 置換後の各部の流量

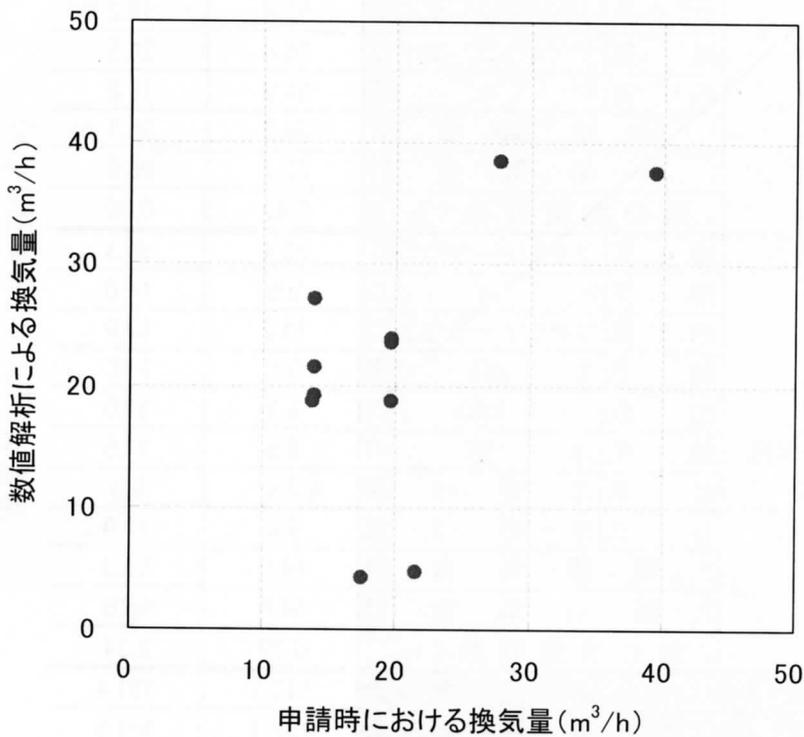


図 4.2.9 数值解析による給排気口風量と申請時における給排気口風量の比較結果

4.2.4 施工後におけるコミッショニング

(1) コミッショニング手法

住宅の引き渡し前に、風量測定器(コーナー札幌、Swema Flow 65)を用いた給排気口の風量測定を実施し、性能検証を行う。給排気口の風量が安定した後、10秒間の平均値を測定結果とした。写真4.2.5に風量測定の様子を示す。



写真 4.2.5 風量測定の様子

(2) 測定結果

表4.2.3に測定結果、図4.2.10に、数値解析による給排気口風量と風量測定による給排気口風量(強運転時)の比較結果、図4.2.11に、申請時における給排気口風量と風量測定による給排気口風量(強運転時)の比較結果を示す。

表 4.2.3 給排気口の風量測定結果

階数	給/排気		部屋	風量(m ³ /h)	
				弱	強
1階	排	気	脱衣室	57.7	85.2
	排	気	トイレ	10.5	12.9
	給	気	シューズクローク	13.9	18.0
	給	気	リビング西	13.7	18.2
	給	気	リビング東	13.8	18.2
	給	気	ダイニング	16.6	21.5
	給	気	和室	14.9	19.2
	1階排気合計			68.2	98.1
	1階給気合計			72.7	95.0
	1階の換気回数(h ⁻¹)			0.42	0.60
2階	排	気	ファミリーラウンジ	35.4	39.3
	排	気	トイレ	9.5	14.0
	給	気	ファミリーラウンジ	11.2	12.9
	給	気	主寝室	9.1	11.0
	給	気	WIC	9.1	11.0
	給	気	洋室-1	8.6	11.5
	給	気	洋室-2西	7.6	9.3
	給	気	洋室-2東	9.0	11.0
	2階排気合計			44.9	53.3
	2階給気合計			54.6	66.6
2階の換気回数(h ⁻¹)			0.29	0.34	
家全体排気合計			113.1	151.4	
家全体給気合計			127.3	161.5	
家全体の換気回数(h ⁻¹)*			0.35	0.47	

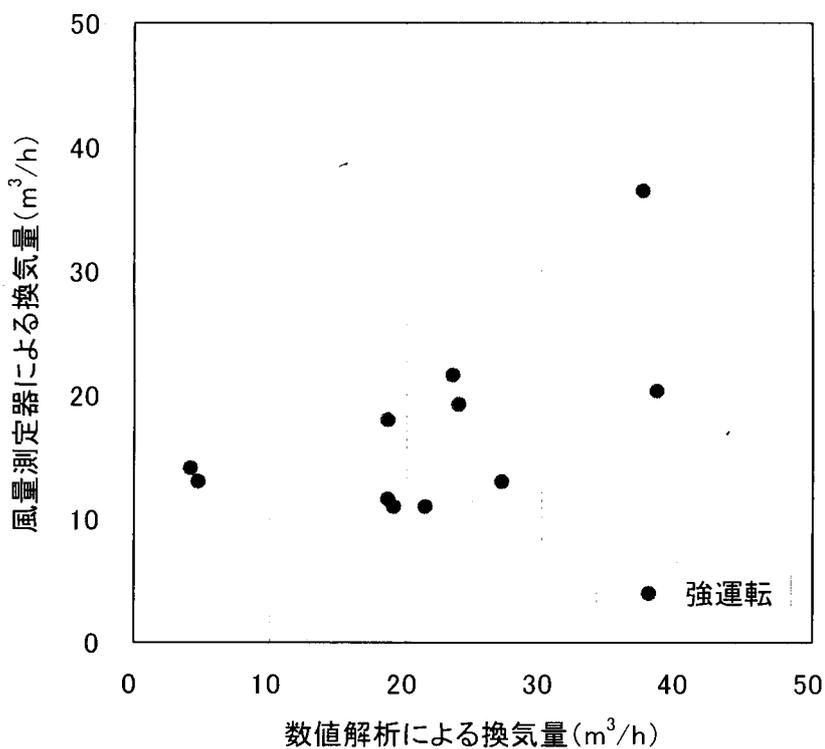


図 4.2.10 数值解析による給排気口風量と風量測定による給排気口風量の比較結果

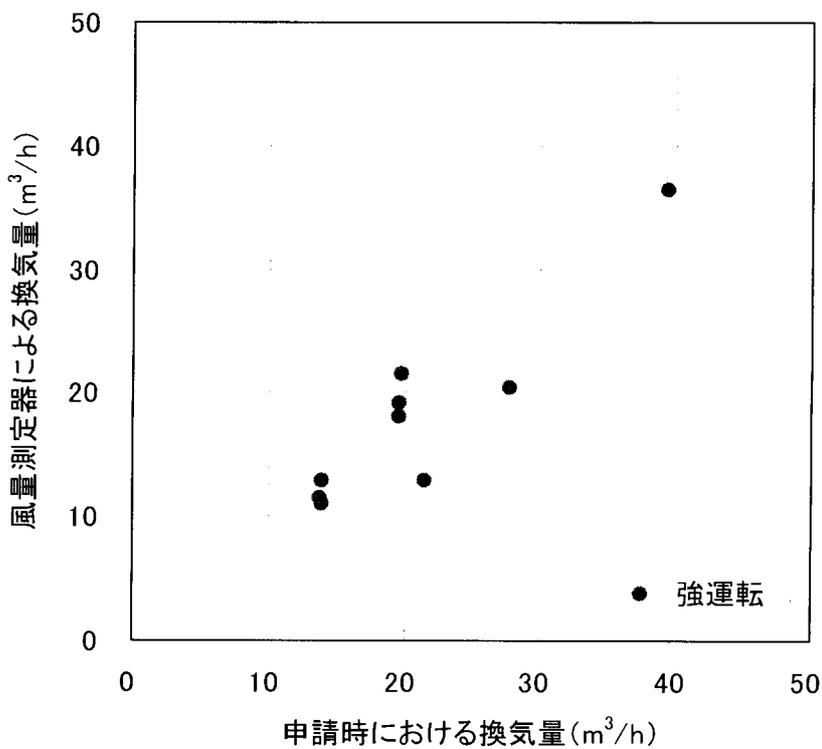


図 4.2.11 申請時における給排気口風量と風量測定による給排気口風量の比較結果

図 4.2.10 より、トイレの排気口（1・2 階）を除いて、風量測定値は数値解析値よりも小さいことが分かる。また、図 4.2.11 を見ると、風量測定値は申請時の値に対しても小さくなる傾向にあった。

4.2.5 まとめ

実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行した。第一に、設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施した。その結果、数値解析で求めたトイレの排気口風量が、1、2 階ともに非常に小さかった。それ以外の給排気口では、申請時の値と比較してほぼ同じか、少し大きめの値であった。

第二に、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施した。その結果、風量測定値は、数値解析による値や申請時の値に対して小さくなる傾向にあった。

4.3 各種の換気システムに対応した各段階における性能評価の検討

4.3.1 性能評価の必要性

第3章で実在住宅の換気性能について実測を行った結果、換気システムに関して様々な問題があり、改正建築基準法で定められている換気回数 0.5 回/h の換気量が確保されていない住宅が多数あることが明らかになった。以下に、換気量不足の原因となっている問題点を示す。

- ・ 換気システムのメンテナンス不足（フィルター等の埃による目詰まり）による換気風量の低下、居住者のメンテナンスに対する認識不足
- ・ 給気口と排気口の位置が非常に近い（ショートカットの可能性）
- ・ ダクトの圧力損失に対してファンの風量が小さすぎる
- ・ 自然給気口の設置方向が間違っている（冬期のコールドドラフト防止のため、導入外気の吹出し方向は通常下向きではない）
- ・ ダクトの破損（写真 4-3-1）、熱交換ユニットやチャンバーからの抜け落ち（写真 4-3-2）
- ・ 給排気口の風量調節つまみの設定による風量低下（写真 4-3-3）



写真 4-3-1 ダクトの破損



写真 4-3-2 ダクトの抜け落ち

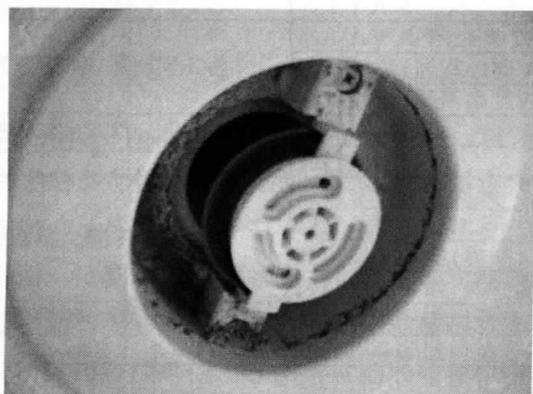


写真 4-3-3 排気口の風量調節つまみ

現状では、機械換気システムの換気風量は仕様規定であり、換気ファンのPQ特性やダクト長さなどから換気回数が0.5回/hの換気量が確保されていることを確認している。そのため、前述した換気量不足が生じてしまうのである。この問題を解決するためには、設計・竣工・運用の各段階において、換気システムの性能が適切であるかを評価する必要がある。①設計段階で、必要換気量を確保できるように綿密な換気設計を行う。②竣工段階で、設計通りの換気量が確保されているかについて確認を行う。③運用段階で、換気システムの初期性能が確保されているかを確認する。①②③が全て実施された場合にのみ、換気システムの性能が確保・維持が可能となる。

そこで、本章では、住宅換気システムの性能を設計・竣工・運用の各段階で評価する一連の性能評価システム(図4-3-1)を提案し、実用化に向けて検討を行う。

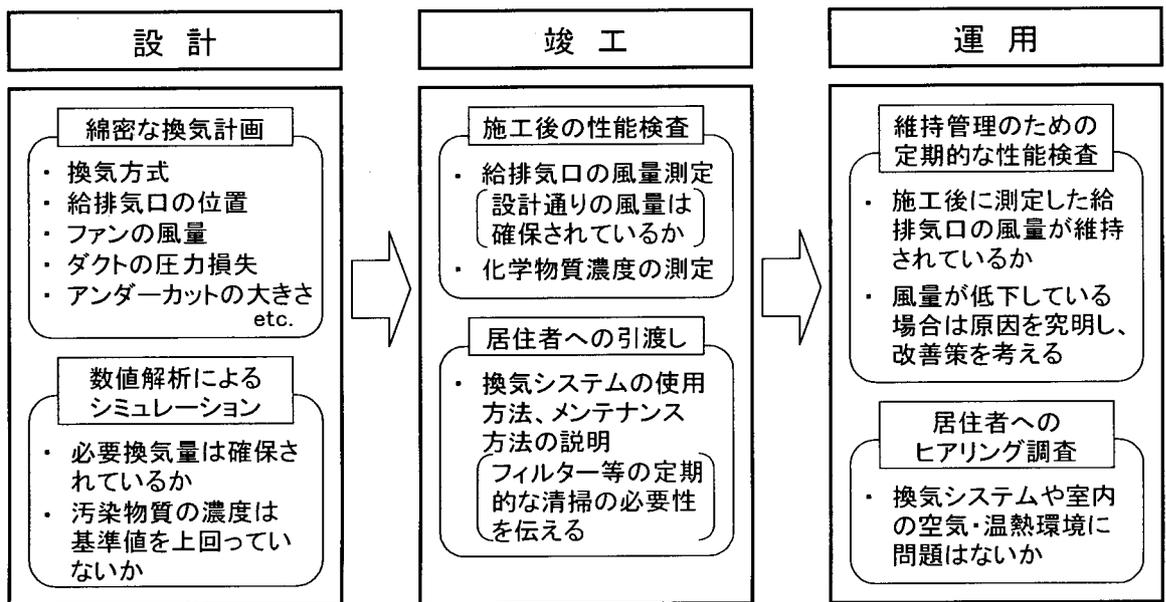


図 4-3-1 住宅換気システムの設計・竣工・運用段階における性能評価システムの概念図

4.3.2 住宅性能表示制度の現状^{4-1) 1-3)}

住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)では、住宅の品質確保の促進、住宅購入者等の利益の保護、住宅に係る紛争の迅速かつ適正な解決を目的として、新築住宅に対する住宅性能表示制度を2000年10月から実施している。2002年12月からは、既存住宅を対象とした性能評価も行われている。住宅性能表示制度とは、第三者機関である指定住宅性能評価機関が、法律で定められた基準に沿って住宅性能を評価し、住宅性能評価書を交付する制度であり、性能評価を受けた住宅に関わるトラブルに対しては、裁判外の紛争処理体制を整備し、紛争処理の円滑化、迅速化を図っている。申請者は特に限定していないため、住宅取得者、施工業者や売主、設計者等、誰にでも申請を行う権利がある。

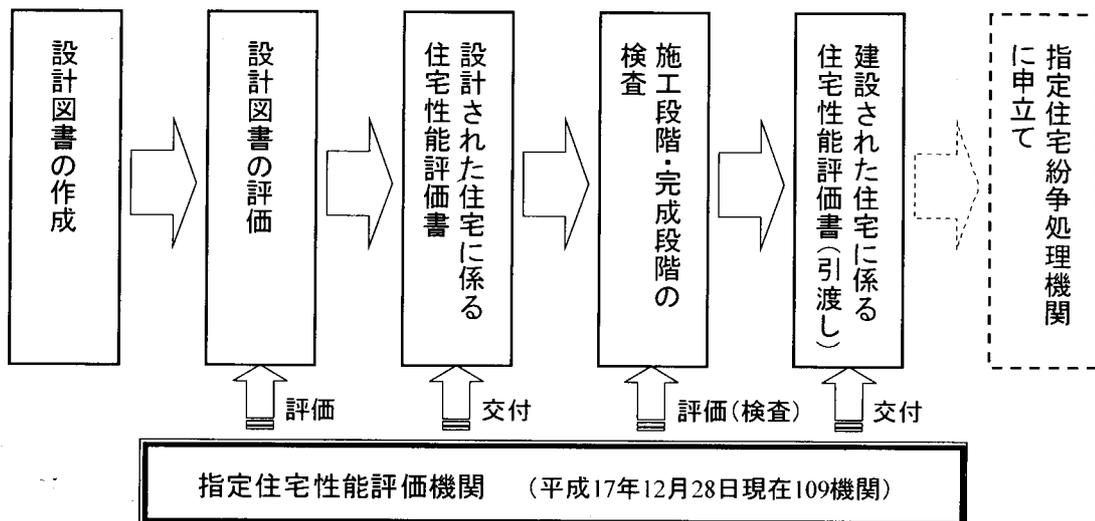


図 4-3-2 住宅性能表示制度における住宅性能評価のフロー（新築住宅）

表 4-3-1 住宅性能表示制度の評価項目

性能表示事項		新築住宅	既存住宅
構造の安定に関すること	耐震等級(構造躯体の倒壊等防止)	●	●
	耐震等級(構造躯体の破損防止)	●	●
	耐風等級(構造躯体の倒壊等防止及び破損防止)	●	●
	耐雪等級(構造躯体の倒壊等防止及び破損防止)	●	●
	地盤又は杭の許容支持力等及びその設定方法	●	●
	基礎の構造方法及び形式等	●	●
火災時の安全に関すること	感知警報装置設置等級(自住戸火災時)	●	●
	感知警報装置設置等級(他住戸火災時) ※	●	●
	避難安全対策(他住戸火災時、共用廊下) ※	●	●
	脱出対策(火災時)	●	●
劣化の軽減に関すること	耐火等級(延焼のおそれのある部分(開口部))	●	●
	耐火等級(延焼のおそれのある部分(開口部以外))	●	●
	耐火等級(界壁及び界床) ※	●	●
維持管理への配慮に関すること	劣化対策等級(構造躯体等)	●	—
	維持管理対策等級(専用配管)	●	●
温熱環境に関すること	維持管理対策等級(共用配管) ※	●	●
	省エネルギー対策等級	●	—
空気環境に関すること	ホルムアルデヒド対策(内装及び天井裏)	●	—
	換気対策(居室の換気対策)	●	—
	換気対策(局所換気対策)	●	●
光・視環境に関すること	単純開口率	●	●
	方位別開口比	●	●
音環境に関すること	重量床衝撃音対策 ※	●	●
	軽量床衝撃音対策 ※	●	—
	透過損失等級(界壁) ※	●	—
	透過損失等級(外壁開口部)	●	—
高齢者等への配慮に関すること	高齢者等配慮対策等級(専用部分)	●	—
	高齢者等配慮対策等級(共用部分) ※	●	●
防犯に関すること	開口部の侵入防止対策 ☆	●	●
現況検査により認められる劣化等の状況に関すること	現況検査により認められる劣化等の状況 ★	—	●
	特定現況検査により認められる劣化等の状況(腐朽等・蟻害) ★	—	●

※:共同住宅等のみが対象 ★:既存住宅のみが対象 ☆平成18年4月以降に住宅性能評価が申請される住宅に適用

図 4-3-2 に、住宅性能表示制度における住宅性能評価のフロー（新築住宅）、表 4-3-1 に、住宅性能表示制度の評価項目（9分野 29項目）を示す。

新築住宅では、①設計段階での評価、②現場における施工段階での評価・検査が実施される。設計段階では、設計図書と評価基準を照合することにより評価を行う。住宅表示制度で規定されている評価基準には建築基準法による事項が含まれており、換気性能に関しては、改正建築基準法の内容が盛り込まれている。施工段階では、設計図書に従って施工が行われていることを確認することが基本となる。但し、「室内空気中の化学物質の濃度等」は、居室の内装仕上げ工事の完了後に測定機器を用いて実測し、その結果を記録することとされている。検査時期は、1) 基礎配筋工事の完了時、2) 躯体工事の完了時、3) 下地張りの直前の工事の完了時、4) 竣工時である。

既存住宅では、①劣化事象や不具合事象の状況に関する評価、②個別性能に関する評価が実施される。個別性能に関しては、経年による劣化事象等の有無を評価結果に反映させる必要がある。

評価書には「等級」を用いて性能の水準を表示することが基本であるが、換気性能に関しては、換気方法等を選択する形式が取られている。

制度実施後から平成 17 年 6 月までの性能評価実績は、新築住宅の設計住宅性能評価書の交付が 50 万件余り、建設住宅性能評価書が約 27 万件、既存住宅の建設住宅性能評価書は 500 件弱で、実績が少ないのが現状である。特に、設計段階に設計図書の評価を行う設計住宅性能評価と比較して、実際の施工状況等を評価する建設住宅性能評価の実施件数は少なく、本研究で明らかになった問題の解決のために、竣工段階（新築住宅の建設住宅性能評価）、運用段階（既存住宅の建設住宅性能評価）の評価の推進が望まれる。

4.3.3 住宅換気システムの要求性能と評価項目

第 1 章で述べた住宅換気の現状から、住宅換気システムの要求性能として、①室内空気環境の清浄性、②省エネルギー性、③室内温熱環境の快適性が考えられる。図 4-3-3 に、要求性能とそれに関連する評価項目を示す。

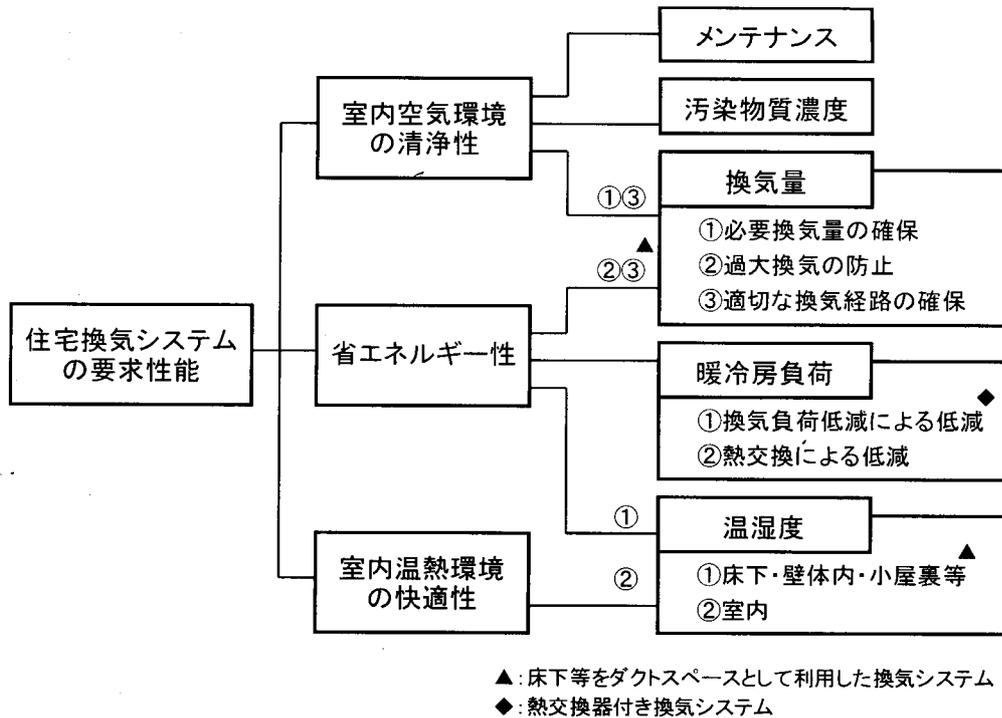


図 4-3-3 住宅換気システムの要求性能と関連する評価項目

1 つ目の要求性能である「室内空気環境の清浄性」に対応するためには、必要な換気量を確保し、新鮮空気を室内に取り入れ、室内の汚染物質濃度を低減させる必要がある。従って、全ての住宅換気システムに共通する評価項目として、「換気量」と「汚染物質濃度」が挙げられる。室内で問題となる汚染物質としては、シックハウス問題の原因となっている様々な化学物質、居住者の呼気中に存在する二酸化炭素、燃焼器具から発生する窒素炭化物、湿気のある環境で繁殖するカビやダニ、調理時に発生する煙や臭いなどが挙げられる。また、必要換気量を確保するためには、「メンテナンス」のしやすい換気システムを選定することも必要である。

2 つ目の要求性能である「省エネルギー性」に対応するためには、第一に、過大換気を防止し換気ファンによる消費電力、冷暖房エネルギーの増加につながる換気負荷を抑える必要がある。従って、換気システムによる「換気量」が評価項目となる。また、省エネ型換気システムの性能評価を行う場合は、対象とするシステムに応じた評価項目を別途に設定する必要がある。本論文の第4章で取り上げる床下・壁体内・小屋裏等をダクトスペースとして利用する換気システムは、取り入れた外気を室内だけでなく床下等の建物の内部空間にも循環させ、構造体の劣化を防止し建物の耐久性を高めることをコンセプトとしている。従って、取り入れた外気が床下等の内部空間を設計された通りに移動しているのか、すなわち「換気経路」を評価する必要がある。また、本論文の3.8.1節で取り上げたような換気・空調一体型システムでは、暖冷房負荷の低減効果を確認するために「床下・壁体内・小屋裏等の温湿度」を評価する必要がある。次に、3.8.2節で取り上げる熱交換器付き換気システムに関しては、「熱交換による省エネルギー量」を定量的に評価することが求められる。

3 つ目の要求性能である「室内温熱環境の快適性」に対応するためには、特に、室内外温度差が大きくなる冷暖房時に、換気を行うことによって居住者が温熱的な不快感を感じることはないようにしなければならない。従って、室内の「温湿度」を評価する必要がある。

4.3.4 住宅性能表示制度への適用のための評価項目と測定法の検討

表 4-3-2 に、各種の換気システムに対応した設計・竣工・運用の各段階における性能評価項目を示す。機械換気システムの欄に基本となる評価項目を示し、床下等をダクトスペースとして利用したシステムや熱交換器付きシステムに関しては、機械換気システムで提示した項目以外について示している。設計段階では、現状の設計図書による評価を行い、竣工段階では、設計図書との照合と併せて目視・実測による施工状況を確認し、運用段階では、目視・実測による性能の確認を行う。

【換気対策】

- ・ 設計段階では、設計図書による評価と併せて、簡易換気設計シミュレーションツールによる解析結果も評価対象とする。また、より詳細な解析が必要になった場合には、COMIS と CFD による連成計算を行い、ゾーン間の換気量を計算するためのマクロ解析と、対象ゾーンにおける空気の流れを計算するためのミクロ解析を同時に行う。なお、この数値解析による手法は、竣工・運用段階において問題が発生した場合の解決方法を探る際に用いても良い。
- ・ 竣工・運用段階では、風量測定器を用いて給排気口の風量測定を行い、換気システム自体の性能を評価し、PFT 法を用いて建物隙間を含めた換気量を測定する（第3章参照）。なお、換気量の現場測定法に関しては、第3章で取り上げた k ファクター法や居住者の呼気を用いた測定法が実用化されれば、風量測定器による測定の代わりに k ファクター法、PFT 法の代わりに呼気による測定法を用いても良い。k ファクター法には、風量測定器と同様に誰でも簡単に測定できるというメリットがあり、呼気を用いた測定法には、高価なトレーサーガスを使わずに測定できるというメリットがある。
- ・ 必要換気量が確保されていない場合は、ダクトの破損や抜け落ち等の換気システムの施工状況（竣工段階）、給排気口の風量調節つまみ等のシステムの設定状況（竣工段階、運用段階）、換気システムのメンテナンス状況（フィルター、防虫網等の汚れなど）（運用段階）を確認する。
- ・ 換気システムのメンテナンス状況に問題がある場合は、必要に応じて居住者へのアドバイスを行う。
- ・ シックハウス等の問題が生じている住宅に関しては、一定濃度法、PFT 法を用いた換気量測定により日常生活上の換気量を把握し、化学物質濃度や温湿度などの室内環境の測定結果と併せて分析を行い、原因を究明する。

【ホルムアルデヒド対策】

- ・ 現状と同様、内装仕上げ、天井裏の使用建材について評価する。

【室内空気中の化学物質等の濃度】

- ・ 現状と同様、竣工段階での測定を実施し、運用段階での測定も行う。

表 4-3-2 各種の換気システムに対応した設計・竣工・運用の各段階における性能評価項目

	設計段階 新築住宅の設計性能評価	竣工段階 新築住宅の建設性能評価	運用段階 既存住宅の建設性能評価
	設計図書の評価 数値解析による評価	目視、実測による施工状況の確認 (設計図書との照合)	①目視、実測による性能の確認 (設計図書との照合) ②劣化等の状況の確認
機械換気システム	換気対策 システムの仕様(ファン風量、ダクト圧力損失等)による換気量計算書 簡易換気設計ツールによる解析【2.2節】、COMIS/CFDの連成による解析【2.3節】	換気対策 ①システムの施工状況の確認 ②設計図書に対する変更点の記録(給排気口の位置、ダクト配管等) ③給排気口の風量測定(風量測定器【3.2～3.5節】) ④建物隙間による自然換気を含めた換気量の測定(PFT法【3.2～3.4節】)	換気対策 ①給排気口の風量測定(風量測定器【3.2～3.5節】) ②建物隙間による自然換気を含めた換気量、日常生活における換気量の測定(PFT法、一定濃度法【3.2～3.4節】)
	維持管理対策 メンテナンスのしやすいシステムの選定	維持管理対策 メンテナンスのしやすいシステムの設置	
	省エネルギー対策 建物の気密性能	省エネルギー対策 建物の気密性能	
	ホルムアルデヒド対策 内装仕上げ、天井裏の使用建材	ホルムアルデヒド対策 内装仕上げ、天井裏の使用建材	ホルムアルデヒド対策 内装仕上げ、天井裏の使用建材
		室内空気中の化学物質の濃度等	室内空気中の化学物質の濃度等 劣化等の状況 ①システム(ファン、フィルター、ダクト等)の劣化等の状況 ②建物の気密性能
床下・壁体内・小屋裏等をダクトスペースとした換気システム(※)	劣化対策 システムの選定(ステップダウン法により壁体内等の換気状況を確認し【3.8.1節】、事前に型式の認定を受けておく)	劣化対策 システムの設置	
熱交換器付き機械換気システム(※)	省エネルギー対策 熱交換器の性能(温度交換効率、熱交換効率)	省エネルギー対策 熱交換による省エネルギー性能(回収熱量、排出熱量による評価【3.8.2節】)	
			劣化等の状況 システム(熱交換素子)の劣化等の状況

□ : 住宅性能表示制度に追加・改正した評価項目である。

※ : 機械換気システムでの評価項目以外を示す。

【維持管理対策】

- ・ 換気システムのメンテナンスのしやすさについて評価する。

【劣化対策】

- ・ 床下・壁体内・小屋裏等の内部空間をダクトスペースとして利用した機械換気システムは、構造躯体の劣化を低減することが可能であるので、その設置を劣化対策と見なす。システムの型式認定の際に、第4章で検証したステップアップ法による床下等の内部空間を含めた換気性能について評価を行う。

【省エネルギー対策】

- ・ 現状と同様に、建物の気密性能について評価する。
- ・ 熱交換器付き機械換気システムは、冷暖房負荷を低減させることが可能であるので、その設置を省エネルギー対策と見なす。第5章で提案した熱交換による回収熱量、排出熱量の指標を用いて評価を行う。
- ・ 温熱快適性は、省エネルギー対策に含まれる。

【劣化等の状況】

- ・ 換気システムの劣化等の状況、建物の気密性能の劣化状況について確認する。

4.4 まとめ

実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行した。第一に、設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施した。その結果、数値解析で求めたトイレの排気口風量が、1、2階ともに非常に小さかった。それ以外の給排気口では、申請時の値と比較してほぼ同じか、少し大きめの値であった。第二に、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施した。その結果、風量測定値は、数値解析による値や申請時の値に対して小さくなる傾向にあった。

また、第3章で明らかになった住宅換気の課題解決、第4章で取り上げた新しい換気システムに対応した性能評価法の確立のために、2000年に制定された住宅性能表示制度をベースとした住宅換気システムの設計・竣工・運用段階における性能評価法を提案し、基本事項について検討した。住宅性能表示制度とは、劣化の軽減、維持管理への配慮、温熱環境、空気環境などの9分野29項目について、指定住宅性能評価機関が住宅の性能を評価し、住宅性能評価書として表示する制度であり、新築住宅における設計性能評価（設計段階）及び建設性能評価（施工・竣工段階）、既存住宅における性能評価（運用段階）の3段階で評価が行われる。第3章～第5章の成果に基づき、換気システムに関する評価項目、評価手順、使用する測定法などについて考察し、住宅性能表示制度における追加・改正すべき点として整理した。

第4章 参考文献

- 4-1) <http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/torikumi/hinkaku/hinkaku.htm>

第5章 結論

5.1 研究の成果

地球規模の温暖化への対応を図るため、1999年に改正されたいわゆる次世代省エネルギー基準により住宅の断熱・気密性能が規定されるようになり、住宅の断熱化・気密化が更に進みつつある。住宅の気密化は、漏気による熱負荷の低減、結露の防止、計画的な換気の実現などのために有効であるが、気密住宅において換気が不十分な場合、建材や什器に多用される化学物質などにより室内空気が汚染されやすくなり、居住者の健康被害を引き起こすシックハウスの原因となる可能性が高い。

従来の住宅と比較して自然換気量の少ない気密住宅では、室内空気環境を清浄に維持しシックハウスを防止するために、機械換気システムが導入され始めるようになった。この動きは、2003年7月の建築基準法の改正へと繋がり、シックハウス防止対策として、有害な化学物質を含有する建材の使用量を制限するとともに、住宅への機械換気設備の義務付けなどにより、居室において換気回数 0.5 回/h 以上の換気量を確保することが規定された。以上のような動向の中で、実在住宅における換気性能の実態を把握することは重要であり、問題が見つかった場合は解決策を模索することが不可欠である。

換気量の測定法に関しては、これまでに数多くの研究が行われており、その手法は多岐に渡る。実在住宅において換気性能の実態を把握するためには、各測定法の測定項目、測定機器、測定期間、適用条件、適用範囲、居住者や測定者への負担などを考慮し、適切な測定法を選定し適用しなければならない。特に、居住状態において換気量を測定する場合、居住者への負担を最小限に抑えた手法が望まれる。

2005年2月に京都議定書が発効されたことにより、地球温暖化防止への動きは更に活発になり、京都議定書の中で掲げられたCO₂の削減目標を達成するために、民生部門でもエネルギー消費量の大幅な削減が要求されている。このような動きの中で、近年、シックハウス防止および省エネルギー促進を目的とした新しい機械換気システムが登場し始めている。建物全体の換気を行うことにより建物の耐久性を高め、床下・壁体内・小屋裏等の内部空間で発生する有害な化学物質の濃度を低減させる、内部空間をダクトスペースとして利用した換気システム、熱交換換気を行うことにより冷暖房負荷を削減する熱交換器付き換気システムが、その例として挙げられる。このような新しい換気システムの測定事例は数少なく、換気性能の評価手法も確立されていないのが現状である。

以上のような背景を受けて、本研究では、シックハウス防止と省エネルギーを目的とした住宅換気システムの総合的コミッショニングのための新たな手法を提案するとともに、コミッショニングに必要な設計支援・評価ツールを開発することを目的として、実在住宅や実験家屋を対象に実測調査並びに数値解析を実施し、多岐に渡る換気量の測定法に関して、測定項目、測定機器、測定期間、適用条件、適用範囲、居住者や測定者への負担などを考慮し、対象住宅や換気システム、居住状態等の測定条件に合わせた選定方法、適用方法の検討を行った。実在住宅の実測

調査では、居住状態で適用可能な換気量測定法を用いて換気性能の実態を把握し、換気量不足の原因を探るための追加調査を実施した。機械換気設備を備えた住宅における換気量不足の解決、最近増加する傾向にある特殊な換気システムに対応した性能評価法の確立のために、設計・竣工・運用段階における住宅換気システムの性能評価法を提案、実在住宅での試行を実施し、実用化に向けた検討を行った。

第1章では、住宅の気密化の進行、シックハウス問題の顕在化、機械換気設備の設置の義務付けという住宅換気分野における近年の動向について述べ、シックハウス防止、省エネルギー推進の観点から多種多様な機械換気システムが導入されるようになった現状において、各種の換気システムに対応した性能評価法を提案するために、多岐に渡る換気量の測定法に関して、対象住宅や換気システム、居住状態等の測定条件に合わせた選定方法、適用方法の検討を行う本研究の必要性を示した。

第2章では、設計段階で事前評価を行うための数値解析ツールとして、簡易的に換気量を推定することが可能な換気設計シミュレーションツールを開発し、実大住宅モデルでの試計算を行った。その結果、以下の知見が得られ、開発したツールを用いて換気量計算ができることを確認した。

- ・ 開口の置換に伴う差圧や流量の差異は概ね1割以内となっており、置換による精度が確認された。
- ・ 置換を基にした実大住宅モデルでの換気量は、流量の収支がとれており、提案した方法で換気量が計算できると考える。

また、より詳細な解析が必要になった場合に用いる手法として、多数室質点系換気計算プログラム COMIS と数値流体解析プログラム CFD という2つの既存のツールを連成し、質点間の換気量を計算するためのマクロ解析と、対象ゾーンにおける空気の流れを計算するためのマイクロ解析を同時に行う解析手法の開発を行った。プログラムの改良後、人工気象室を3つのゾーンに分割して、ゾーン間の開口の大きさをパラメータとした実験を行い、その実験条件における計算値と比較した結果、概ね両者が一致することが確認された。また、開口の大小によらず、連成計算が可能であることが確認された。

更に、数値解析の精度を高めるために必要な建物の隙間特性と汚染質の放散特性について、測定法の検討とデータ収集を実施した。

第一に、モデルハウスを対象として、建物の隙間の大部分を占める開口部の窓サッシや建具の隙間特性を測定し、気密測定器を用いた測定法の検証と窓サッシや建具の隙間特性の実態把握を行った。以下に、得られた知見を示す。

- ・ 襖や障子、開き戸の隙間長さ当たりの相当隙間面積は $2\sim 14\text{cm}^2/\text{m}$ である。
- ・ 窓サッシの隙間長さ当たりの相当隙間面積は約 $2\text{cm}^2/\text{m}$ で、襖や障子、開き戸よりも小さい。
- ・ 頻繁な建具の開閉やドアの通行、木材の調湿作用等により、建具と建具が取り付けられてい

る枠の間にできる隙間面積やアンダーカットの面積が季節毎に変化すると考えられる。

第二に、スライスモデル及び実在住宅を対象として、内部空間相互の相当隙間面積を把握するとともに、得られた結果を基に建物の隙間ネットワークを設定し、熱負荷換気濃度に関するシミュレーションを行うことで、天井裏、床下、外壁及び間仕切等の内部空間で発生した汚染物質の室内への侵入経路を明らかにすることを試みた。

スライスモデルは、断熱気密仕様の在来木造、2×4 構法の 2 種類を作成して、内部空間相互の相当隙間面積の測定を行い、内部空間の連結状態に関するデータを取得した。非気密仕様の在来木造に比べて、断熱気密仕様の在来木造の内部空間相互の連結性が弱くなっていた。また、断熱気密仕様の在来木造に比べて、2×4 構法部では、さらに内部空間相互の連結が弱かった。今後、実際の建物形状における侵入性状を、本測定による基礎データを用いた換気回路網計算によって示す予定である。

実在住宅を対象とした測定では、構造、換気設備の種別を考慮した侵入対策のための基礎データを得るため、構法（在来木造、2×4 構法、工業化構法）の異なる 9 件の戸建住宅を対象に、内部空間から室内への汚染物質の侵入率等の測定を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ 室内が外気に対して負圧になるほど、侵入率 κ が 100% に近づく傾向があった。
- ・ 構法による差は顕著ではなかったが、内部空間の違いによる差が顕著であった。
- ・ 天井裏（階間）からの侵入率 κ は、内外差圧が正の値の場合（室内が正圧の場合）を除いて、約 70% 以上の高い値を示した。
- ・ 床下換気口が設置されている床下からの侵入率 κ は場合に 20% 以下であり、他の部位よりも低かった。
- ・ 基礎断熱の住宅ばかりではなく基礎パッキンを用いた住宅でも、侵入率 κ が 30% 以上と高くなった。基礎パッキンを用いた場合に基礎外面に仕上げのモルタルを施工しており、水切り下の基礎と土台の間の通気経路がふさがれ、換気性能が低下していることが考えられる。
- ・ 侵入率の問題に限らず、基礎パッキン仕様における床下換気確保の設計施工の徹底が必要である。

第三に、数値解析の精度を高めるために必要な汚染物質の放散特性について、測定法の検討とデータ収集を実施した。また、換気による汚染質制御について、数値解析を用いた検討を行った。

家電製品・生活用品からの化学物質放散量の測定に関する知見を以下に示す。

- ・ 数多くの生活用品について、実験的に求められた VOC、ホルムアルデヒド発生量を整理した。
- ・ 電気式暖房器具や家電製品など機器使用により発生量が増大する製品もある。
- ・ 各種生活用品のホルムアルデヒド発生量を整理し、生活用品による室内空気汚染に関する総括的資料を作成した。
- ・ 各製品の平均ホルムアルデヒド発生量を用いて、室内ホルムアルデヒド濃度予測値を求めた。室内化学物質濃度の予測と換気による汚染質制御に関する知見を以下に示す。
- ・ 化学物質の発生源発生量と除去機構の化学物質除去性能を筆者らの予測式に代入することで、建築物の設計段階における室内化学物質濃度の予測が実現した。

- ・ LDK 室と寝室に室内化学物質濃度の汚染対策を施すことにより、室内濃度が有効に低減することが示された。
- ・ 吸着建材と家庭用空気清浄機における化学物質除去性能の持続性の解明が、今後の検討課題である。
- ・ 空気清浄ユニット付き換気システムについて、定常法除去性能試験とワンパス試験法による相当換気量を同時に求める事ができる新しい試験法を提案した。

第3章では、居住状態で使用可能な換気量測定法を用いて実在住宅を対象とした実測を行い、実在住宅における換気量の実態、換気量不足の原因を把握するとともに、各測定法の適用方法や測定精度について検討した。

実測調査の結果から、実在住宅における換気性能の実態として以下の結果が得られた。建物の気密性能に関しては、約7割の住宅で、次世代省エネルギー基準値である単位床面積当たりの相当隙間面積 $5\text{cm}^2/\text{m}^2$ を満たしていた。2005年に実施した追加調査の対象住宅の中には、2004年以降に建設された比較的新しい住宅が含まれているが、それらの住宅の気密性能は $0.5\sim 0.6\text{cm}^2/\text{m}^2$ であり、建築技術の向上とともに住宅の気密化が更に進行している現状が明らかになった。

次に、換気量測定の結果について説明する。調査対象住宅の約6割には機械換気システムが設置されており、風量測定器を用いてシステムの給排気口風量の測定を行った。機械換気システムが設置されているのにも関わらず、必要換気量の目標値 0.5 回/h を満たしていない住宅が多く見られた。換気量不足の原因を探るため、2005年に実施した追加調査の結果より、換気システム内に設けられたフィルターや防虫網の埃や虫による目詰まりが主要な原因の1つであることが判明した。同様に、追加調査内で実施されたヒアリング調査では、換気システムのメンテナンス不足の実態が明らかになり、換気システムの設計や施工だけでなく、運用や維持管理の在り方にも課題を示す結果となった。

換気量測定は3種類の測定法を用いて実施し、得られたデータを分析することで、それぞれの測定項目、測定機器、測定期間、適用条件、適用範囲、居住者や測定者への負担などについて検討した。ポータブルの風量測定器による給排気口の風量測定は、短時間で機械換気システム自体の性能を測定でき、システムにおける風量低下の原因箇所を探る上で重要な測定法である。一定濃度法はトレーサーガス法の1つで、大掛かりな測定機器を用いて室内にガスを注入し、室内空気の攪拌、室内ガス濃度の測定を行いながら室内のガス濃度を一定に維持することによって、ガスの注入時点の瞬時換気量を連続測定する。従って、換気量の経時変化が得られ、居住者の生活行為（窓開け、玄関の出入り、台所や浴室に設置された局所ファンの運転等）の影響の少ない測定データを選出し、建物隙間と換気システムの両方を通した換気量を評価することが可能である。PFT法は、測定機器によりアクティブな方法で室内のガス濃度の測定やガス注入を行う一定濃度法とは異なり、パッシブな方法でガスの発生と捕集を行い、約1週間の測定期間内における平均換気量、すなわち、窓開け換気等を含めた日常の換気量を測定する。測定装置は小型であり、設置・撤去作業も簡単で居住者への負担も少ない。

簡易的な測定法として注目されている PFT 法（東大柳澤研究室製）に関しては、実験棟を対象に実験と数値解析を行い、トレーサーガスの発生位置及び捕集位置、4 種類のトレーサーガスをを用いた場合の測定精度について検討した。以下に、得られた知見・成果を示す。

- ・ トレーサーガスが 1 種類の場合、換気経路が明確な空間で、気象条件が制御可能な人工気象室において、詳細な測定が可能で研究実績があるステップアップ法と PFT 法の測定結果の比較を行った。
- ・ 測定結果を比較した結果、PFT 法は測定誤差 10%程度で既往の測定法の結果と一致することが確認できた。
- ・ トレーサーガスが 4 種類の場合、換気経路が明確な空間で、室内温度を制御した換気実験棟において小型ファンを用いて室間の換気量を制御した状態を作り、PFT 法の室間換気量を測定する実験を行った。
- ・ 測定結果を比較した結果、小型ファン風量と PFT 法によって測定した室間の換気量の結果は比較的良好な対応を示した。今後はガス放散量の見直しや分析補正係数の見直しなどさらに改善することで測定精度が向上すると考えられる。
- ・ 以上より実大実験棟における PFT 法の測定精度を確認し、さらに今後に関わる発展的な内容として、トレーサーガスを数種類使用した測定法について問題点を明らかにし、実用化に向けた改善点を示した。
- ・ 戸建標準住宅を対象にして、換気方式・気密性能・窓の開閉等の条件を変更して、居室の換気経路について明らかにするため、数値解析を行った。
- ・ マクロモデルの計算結果より、機械換気システムについては、窓を閉じた場合は気密性能の変化による換気経路の変化がみられた。一方、窓を開放した場合は気密性能が変化による換気経路の変化はみられなかった。また、窓を閉じた状態から開放した状態にすることによって換気経路が大きく変化していた。
- ・ 自然換気システムについては、窓を閉じた場合も開放した場合も、気密性能の変化による主な換気経路の変化はみられなかった。一方、窓を閉じた状態から開放した状態にした場合は換気経路が大きく変化していた。
- ・ ミクロモデルの計算結果より、機械換気システムについては、第 1 種、第 2 種など機械で給気を行う換気システムについては、窓の開閉に関わらず給気位置付近でガスを発生させ、空気が流出する付近の高さ 1.5m 付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。これは窓の開閉に関わらず給気位置が変化しないためであると考えられる。第 3 種の場合、窓を閉じた場合では、給気位置付近でガスを発生させ、空気が流出する付近の高さ 1.5m 付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。一方、窓を閉じた状態から開放した状態にした場合、換気経路の変化により、窓を閉じた場合の最適なガス捕集位置においては濃度の分布が大きく、このような状態では測定を行うことが困難であると考えられる。
- ・ 自然換気システムについては、窓の開閉に関わらず給気位置付近でガスを発生させ、空気が

流出する付近の高さ 1.5m 付近の領域にサンプラーを設置することが最適であると言える。これは窓の開閉に関わらず給気位置が変化しないためであると考えられる。

- ・ 以上より、マクロモデル及びマイクロモデルの解析により、戸建標準住宅の居室を対象にして、居室の換気経路について明らかにし、測定器の最適な設置位置についても示すことができた。

また、換気システムの性能検証手法の 1 つとして海外で導入されている「k ファクター法」について、日本住環境株式会社で開発された国内産 k ファクター法対応型換気システムの換気量測定を実施したり、居住者の呼気を用いた換気量測定法を実在住宅で試行したりと、実用化し始めた、もしくは、実用化を目指している新しい換気量測定法について検証した。

更に、近年、導入され始めている熱交換器付きシステムや床下等をダクトスペースとして利用するシステムといった特殊な換気システムの性能検証方法について検討した。

床下等をダクトスペースとして利用する換気システムは、内部空間を空気の通り道にすることで、室内空気の清浄性、省エネルギー性を高めることを目標としており、換気量以外に、室内だけでなく内部空間を含めた換気経路についても評価する必要がある。そこで、空気齢（給気口や建物隙間から導入された外気が室内のある点に到達するまでの時間）を測定することが可能なステップアップ法、ステップダウン法を選定し、4 件の非居住状態の住宅を対象として測定を行い、今まで室内の換気経路を把握するために用いられてきた測定法により、内部空間を含めた換気経路について把握できることを確認した。

熱交換器付き換気システムは、熱交換換気を行うことにより冷暖房負荷を削減することで、省エネルギー性を高めることを目標としており、換気量以外に、熱交換による省エネルギー量についても評価する必要がある。従来の熱交換特性の評価法では、熱交換部の給排気量が同等であることが前提となっており、給排気量が同等とは限らない施工後の換気システムに内蔵された熱交換器の省エネルギー性を正確に評価することができない。そこで、熱交換による回収熱量、排出熱量という評価指標、その指標を用いた評価法を提案し、2 階建ての実験家屋に設置された熱交換器付きハイブリッド換気システムを対象として、実測と数値解析により冬期と夏期における換気量と熱交換による省エネルギー量の評価を行った。

換気システムに内蔵されている給気ファンと排気ファンの運転状況、建物の気密性能、熱交換器の熱交換性能をパラメータとした実験と数値解析の結果から、室内外温度差が大きく熱交換による省エネルギー量が大きくなる冬期において、給気ファンを運転しない場合、給気ダクト内の逆流、2 階各室の換気量不足の問題が発生し、給気ファンと排気ファンを両方とも運転しない場合には、換気量及び熱交換による回収熱量が非常に小さく、排気ファンのみを運転した場合には、建物の気密性能の低下が回収熱量の急激な減少につながるということが明らかになった。また、ファンを両方とも運転した場合は、過大換気により省エネルギー性が損なわれることが判明した。

以上より、対象実験家屋に本システムを設置した場合、必要換気量を確保し、熱交換による省エネルギー性を高めるために、給気ファンを常時運転する必要があることが明らかになった。

第4章では、実在住宅を対象に、住宅の換気システムの総合的なコミッショニングを試行した。

第一に、設計段階では、本研究で開発した簡易換気設計シミュレーションツールを用いて、数値解析による事前評価を実施した。その結果、数値解析で求めたトイレの排気口風量が、1、2階ともに非常に小さかった。それ以外の給排気口では、申請時の値と比較してほぼ同じか、少し大きめの値であった。

第二に、施工後の住宅の引き渡し前に、風量測定器を用いた給排気口の風量測定を実施した。その結果、風量測定の値は、数値解析による値や申請時の値に対して小さくなる傾向にあった。

また、第3章で明らかになった住宅換気の課題解決、最近増加傾向にある換気システムに対応した性能評価法の確立のために、2000年に制定された住宅性能表示制度をベースとした住宅換気システムの設計・竣工・運用段階における性能評価法を提案し、基本事項について検討した。住宅性能表示制度とは、劣化の軽減、維持管理への配慮、温熱環境、空気環境などの9分野29項目について、指定住宅性能評価機関が住宅の性能を評価し、住宅性能評価書として表示する制度であり、新築住宅における設計性能評価（設計段階）及び建設性能評価（施工・竣工段階）、既存住宅における性能評価（運用段階）の3段階で評価が行われる。第3章～第5章の成果に基づき、換気システムに関する評価項目、評価手順、使用する測定法などについて考察し、住宅性能表示制度における追加・改正すべき点として整理した。

第5章では、本研究における研究成果を総括するとともに、住宅換気システムの性能評価法に関する今後の課題と展望について言及し、結論とした。

5.2 今後の課題と展望 ～コミッショニングの重要性と課題～

5.2.1 コミッショニングとは

10年ほど前より、空調の熱源システムなどのエネルギー効率を評価する方法の一つとしてコミッショニングという考え方がわが国に導入され、検討され始めている。コミッショニングの正式な訳語は、現在までのところ確立されているかどうかは微妙なところであるが、「性能検証」と訳されることが多いようである。すなわち、設計どおりの性能が出ているかどうかをチェックすることと考えればあたりはずとも遠からずと言える。

しかしながら、そのようなことであれば、在来から竣工検査と言う形で行われていたのではないかとの意見もあるところである*。しかしながら、竣工検査は、文字通り竣工引渡し時というある1時点でのみ行われるもので、設計どおりの性能が出ているかをそのような1時点だけで十分チェックできないことは、設計・施工に携わっている技術者はもちろん、一度でも建築物の建設を依頼した経験のある施主であれば、かなり困難であると言うことに異議をさしはさむ人はないであろう。わが国の在来からの竣工引渡しは、儀式性が高く、真の意味での性能検証と言うよりは、単なるセレモニーでしかないことが多い。

さらに、設計・施工者に比べれば、施主（居住者を含む）は建築物に関する技術的な知識は比較にならないほど低いのが通常であり、施主が、本当の意味での性能チェックができない場合が多く、設計・施工者によりいわば手前味噌的な竣工検査が行われるだけのことが殆どで、仮に設計・施工の不備により設計どおりの性能が出ていない建築物であっても、それを竣工引渡し時に施主が指摘し修正させるなどと言うことは不可能に近く、事実上何の性能検証もなされず建物が引き渡され、ひどい場合には、施主の建設技術に対する知識の不十分さゆえに、建物性能の不備に最後まで気づかずに使い続け、そのまま解体されてしまう建築物も少なくないものと考えられる。

このように本当の意味での性能検証が全くなされていたかった点を改めるには、次の2つの点の実現する必要がある。

- ① 設計・施工者から完全に独立し、なおかつ、かれらと十分に交渉できるだけの技術的能力を備えた者が、施主に代わり、設計・施工の仕事をチェックするシステムを確立すること。
- ② そのチェックは、竣工引渡し時などという限られた1時点だけでなく、建物の計画段階から、設計・施工を経て、竣工、引き渡し、使用、維持・管理、さらに解体に至る建築物のすべての段階にコミッショニングエンジニアが加わり、設計者・施工者とともに実施され、設計どおりの性能がどの段階においても担保されていることを継続的に確認されること。

上記のような施主の立場に立って建設技術者と交渉するコンサルタントをコミッショニングエンジニアと言う。いわば技術的な意味での弁護士のような存在である。

コミッショニングには設計段階から参加するもの (Design Commissioning)、竣工段階で性能検証するもの (狭義 Commissioning)、居住するようになってからの性能を検証するもの (Re-Commissioning)、建物を壊す段階で関与するもの (De-Commissioning) もの 4 つのコミッショニングがある。

5.2.2 日本での現状

上述のようなシステムは、20世紀末の欧米で始まったものであり、わが国においてはそのようなシステムは全くなかったと言ってよい。そのような欧米の状況を受けわが国においても、本章の冒頭で紹介したような大規模建築物における建物の蓄熱槽のような熱源設備システムの省エネルギー性能の検証などに関するコミッショニングは、空衛学会で委員会が組織され、報告も出されている。しかしながら、そこで対象とされているものは、当然のことであるが、建物の空調の熱源システムに関するもののみで、換気、空気質に関する提案はほとんどない。しかしながら、設計どおりの性能が出ているかをチェックすることの大切さは、熱源システムだけでないことは明らかであり、換気、空気質を言うまでもなく、音・熱・光・水などの環境工学的なものは基より、建物全体の構造強度、平面計画の使いやすさなど、建築物すべてに関し総合的な建築学的検証が行われなければならないことは誰の目にも明らかである。特に、昨今の耐震偽装問題などに関連してもっと広く普及すべきシステムであると言える。

にもかかわらず、わが国では、上述のような建物の熱源システムに関するコミッショニング規程の提案がなされているにとどまっている。これとても、提案されただけであり、それが普及するにはかなりとおり道のみであることは否定できない。

5.2.3 コミッショニング普及上の問題点

問題点の第一は、エンジニアの必要性の社会的認知が得られるかどうかである。コミッショニング実施のためには費用が必要であり、その負担を施主がすることを認めるかどうかの問題である。さらにその前に、そのためにはエンジニアの養成がなされえていなければならない。コミッショニングエンジニアは建設サイド (設計事務所、施工会社など) からの独立が必須であり、在来のような設計者が自らの設計をお手盛りのようにチェックしているのでは、真のコミッショニングとはいえない。

費用負担に関しては、わが国においてはコンサルタントのような知的作業というのは対価を払うものではなく、「設計料」でさえ、施工者が、施主から、「施工料」をもらう際の一種のサービスとして提供されるものであるとの考え方が根強く、「全建設費に対する10%の設計料」を確保できる建築家は限られた数しかないことに鑑みると、仮にコミッション料を設計料と同じとした場合、さらに10%増の支出を施工者が認めるかどうかはかなり難しい状況であり、この点を解決しないと普及は困難であると考えられる。

しかしながら、前述の耐震偽装問題のようなことは、このシステムが完全に確立し、機能していたら、かなりの確率で防げたことは疑問の余地ないところであり、その点を梃子にしてこのシステムを建築物のあらゆる面に広めていくことができる可能性があると言えなくはない。

※ : さらに極端な意見としては、国交省の建築基準法でチェックされているはずだと言うものもあるかもしれない。しかしながら、建築基準法では、設計図書のみによる審査であり、ここで問題としているような本当の意味でのチェックができているとは言いがたいものであり、事実上何もチェックしていないに等しいものであることは、言をまたないが、念のため言及しておく。その意味で言えば、厚労省の建築物衛生法においては、特定建築物と呼ばれるオフィスビル事務室などのような限られた建築物ではあるが建物の環境衛生監視が実施されており、これなどはコミッションと近いシステムと言えなくもない。しかしながら、これにおいても、監視項目は、温熱・空気環境、水質、廃棄物、清掃、衛生害虫などの環境衛生的な側面のみであり、建物の構造強度、設備の省エネルギー性などと言った点は殆どチェックされないし、「事前協議制度」などという居住が始まる前の設計段階でのチェックシステムがないではないが、これも設計図書のみによる審査であり、事実上の監視がなされるのは、竣工引渡し後の建物の維持管理が始まった段階以後である。

付 録

付録-1 換気計算プログラム COMIS の概要

1.1 概要

多数室換気計算モデル COMIS¹⁾ (Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists) は建物各室の圧力を未知数として換気量を求める汎用性の高いプログラムであり、換気量の他に汚染質濃度を計算することができる。COMIS は瞬時一様拡散を仮定している。IEA (国際エネルギー機関) のプロジェクトである ECB&CS (建築物及びコミュニティーの省エネルギー研究開発計画) の ANNEX23 (The Multizone Air Flow modeling) において開発され、知的なユーザインターフェイスである IISiBat と結合された。COMIS は COMVEN (COMIS の計算部分) 及び入力、出力部分 (それぞれ COMIN、COMOUT) を持ち、FORTRAN で書かれている。

特徴としては、

大開口や単一開口の計算ができる

20 以上の実測結果との比較により国際的に検証されている

換気量に対する入力データの感度解析ができること

等が挙げられる。

(1) 入力項目および出力項目

1) 入力項目

COMIS の入力部分である COMIN には、モデルを作成するために必要な入力項目が設けられている。主な入力項目を以下に示す。

- ① 必要な出力項目の設定
- ② 隙間 (流量係数、隙間特性値等)
- ③ ファン (内外圧力差・流量等)
- ④ ダクト (直径、ダクト壁面の粗さ、長さ、局部圧力損失係数等)
- ⑤ 開口 (流量係数、高さ、幅等)
- ⑥ 室 (温度、基準高さ、容積等)
- ⑦ 汚染質 (発生量、物質量等)
- ⑧ 結合部分 (ネットワーク)
- ⑨ 風圧係数

また、COMIS にはスケジュールという項目があり、ファンの運転時間、開口部の開閉時間、汚染質の発生時間等をコントロールすることが可能である。更に、気象データ (気温、風速、風向、絶対湿度、気圧) を入力することにより外乱の影響を捉えることも可能である。

2) 出力項目

COMIS の出力部分である COMOUT に設けられている主な出力項目を以下に示す。

- ① 各室換気量

- ② 各室漏気量
- ③ 建物全体の新鮮空気流入量
- ④ 各室汚染質濃度
- ⑤ 各室内外圧力差
- ⑥ 各室空気齢

(2) 計算方法の概要²⁾

壁前後の圧力差は風圧、温度差、機械力で決まり、これらは気候と HVAC システムにより起こる。また空気の性質は密度と粘性が関連し、空気を理論ガスと考えれば、これらは温度と圧力のみにより決まる。

隙間の温度は隙間に流入する空気温度や流出する空気温度ではなく、隙間内の空気温度と等しくなる。つまり、隙間の温度は流入する空気温、流量、隙間内の熱移動、隙間の形状による。隙間の形状は、主に建物の部材とその施工、そして温度、湿度、経年変化による変形により決まる。

隙間を通じての流れは層流、乱流、遷移域の流れの部分からなり、それぞれの割合は隙間の形状と圧力差により決まる。

隙間を通じての流れは下のようなべき乗の形で広く表されている。

$$Q = C_Q (\Delta P)^n \quad (1-1)$$

<記号> Q : 換気量 [m^3/s]、 C_Q : 流量係数 (volume flow coefficient) [m^3/sPa^n]、 ΔP : 圧力差 [Pa]

この式は単純であり流量 Q が圧力差 ΔP によることを明らかにしているが、空気の性質と流量による影響を無視しているという点で完全ではない。べき乗が成り立つ範囲外の隙間の温度や湿度では大きな誤差が与えられる可能性がある。実験室などで制御された条件の下で、新しい窓、ドア、壁などの部材の隙間についての流量曲線が多く測定されているが、部材の両側の温度が 20°C になっていることもある。

隙間の性質を詳細に知ることは、隙間が多種多様でそれぞれに違う性質を持つことと隙間の記述に複雑な関係式が必要になるだろうということから不可能である。隙間の記述はシミュレーションプログラムの要求を満たさなければならないし、実験結果と良い一致を示さなければならない。

1.2 空気流量の計算法

① ダクト

ダクトの流れには層流域、遷移域、乱流域の 3 つの領域がある。圧力損失は流れの領域に係わらず次元で示される。

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (1-2)$$

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4} \quad (1-3)$$

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (1-4)$$

$$\lambda = \frac{A}{Re^M} \quad (1-5)$$

<記号> λ : 摩擦抵抗係数[-]、 L : 管長 [m]、 ρ : 空気密度[kg/m³]、 ν : 風速[m/s]

d : 管径[m]、 Re : レイノルズ数[-]、 ν : 動粘性係数[m²/s]

定数 A 、 M は流れの領域により値が異なる。 M は領域を分ける指数となり、1 は層流、1/4 は遷移域、0 は乱流である。式(1-3)、(1-4)、(1-5)を式(1-2)に代入すると、

$$Q = \left[\frac{\pi}{4} d^2 \left(2 \frac{d^{M+1}}{AL} \right)^{\frac{1}{2-M}} \right] \left[v^{-\frac{M}{2-M}} \rho^{-\frac{1}{2-M}} \right] \left[\Delta P^{\frac{1}{2-M}} \right] \quad (1-6)$$

3つの項の値は流れの領域により異なる。第1項はダクトの形状 (C_s) により、第2項は流体の性質により、第3項は圧力差による。流れの特性値 n は次のように定義される。

$$n = \frac{1}{2-M} \quad (1-7)$$

この項は M と同じ物理的な性質を示す。

記号 n 、 C_s 、 C_Q を用いて式(6)を書き換えると、

$$Q = C_s v^{1-2n} \rho^{-n} (\Delta P)^n = C_Q (\Delta P)^n \quad (1-8)$$

3つの領域における式(1-5)、(1-8)は表 1-1 にまとめられる。

<記号> n : 隙間特性値[-]、 C_s : 流量係数(duct space coefficient) [kgⁿ(m³)¹⁻ⁿ/Paⁿ(m²)¹⁻²ⁿs²ⁿ]

C_Q : 流量係数(volume flow coefficient)[m³/sPaⁿ]

表 1-1 3領域における摩擦係数および空気流量

	層流域	遷移域	乱流域
λ	$\frac{64}{Re}$	$\frac{0.3164}{Re^{0.25}}$	定
Q	$C_s \frac{1}{\nu \rho} (\Delta P)$	$C_s \frac{1}{\nu^{0.14} \rho^{0.57}} (\Delta P)^{0.57}$	$C_s \frac{1}{\rho^{0.5}} (\Delta P)^{0.5}$

② 隙間

隙間の流れはダクトの流れよりも実際の建物外周の流れに近くなる。個別の隙間での差圧と流量の関係を測定すれば、ある温度と差圧のものとべき乗則として表現できる。隙間の流れが式(1-1)で表されるとすると、

$$Q = C_s f(\rho, \nu, n)(\Delta P^n) \quad (1-9)$$

C_s と n は測定条件内の差圧のもとで定数であり、 n は測定がどの領域で行われたかを示す。空気を理想ガスとして圧力の影響が小さいと仮定すると、上式は、

$$Q = C_s f(t, n)(\Delta P^n) \quad (1-10)$$

式(5)、(7)より、摩擦係数 λ は、

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}^{\frac{2n-1}{n}}} \quad (1-11)$$

ある一つの隙間の物理的パラメータは定数となるので、

$$\lambda = D \left(\frac{\nu}{v} \right)^{\frac{2n-1}{n}} \quad (1-12)$$

隙間の流れを式(1-1)の形で表すと、次式となる。

$$Q = C_s \nu^{1-2n} \rho^{-n} (\Delta P)^n \quad (1-13)$$

係数 C_s は隙間の形状によるが、ここでは変形を無視して一定として扱う。なお、ある圧力範囲では当然一定となる。

式(1-1)を使いやすくするために、温度補正係数 K_Q を次のように考える。

$$K_Q = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-n} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{1-2n} \quad (1-14)$$

添え字 0 は基準の状態を示す。式(1-10)で述べたように $\nu^{1-2n} \rho^{-n}$ は温度のみで決まるので、この補正係数を温度係数と呼び、次式で表す。

$$K_Q = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \left(\frac{T_0 - 136}{T - 136} \right)^{2n-1} \quad (1-15)$$

K_Q の値は、流れの特性値 n と実際の温度と基準温度 293.15(K)との温度差により定まる。温度補正係数を図示するとその値は 1.18~0.88 となり、流れの特性値 n の影響が明確である。 n の値が 0.65 からはずれる場合には、温度補正係数が必要となる。 n が 0.65 以上の時はその逆となる。

式(1-13)を書き換えると、

$$Q = K_Q C_Q (\Delta P)^n \quad (1-16)$$

この式はべき乗則であり分かりやすく使いやすい。実測値をもとにした回帰直線上に良く乗り、測定時の温度が分かっていたら既存のデータを使える。

③ 窓（ドア）

大開口に関する解法を提案する場合の主題は、ネットワークの定義の中に容易にこの解法をあてはめることであり、大開口の挙動に影響する様々な現象のモデル化を可能にすることである。

このモデルの主な仮定は、

- 1) 定常流、非粘性、非圧縮性
- 2) 開口両端における線形な密度成層
- 3) 等価圧力差分布によって示される乱れの効果
- 4) 簡単な係数によって示される開口の有効面積の縮小効果

図 1-1 は、鉛直開口の重力流れを解く場合の問題に関する一般的な表現を示す。

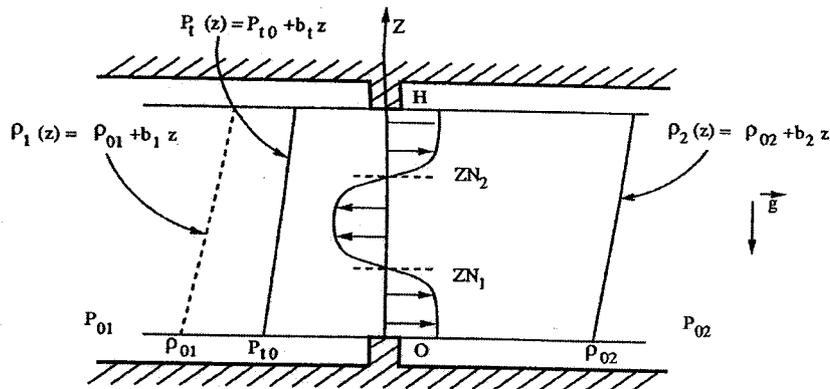


図 1-1 鉛直開口部の重力流れの一般問題

開口のそれぞれの側で線形的な密度成層を考える。

$$\rho_i(z) = \rho_{oi} + b_i z \quad (1-17)$$

そして乱れの影響をシミュレートして線型な圧力差を導く。

$$\Delta P_i = P_{io} + b_i z \quad (1-18)$$

それぞれの両側で Bernoulli の仮設を考えて次式のようにいかなる高さ z においても圧力差を定義できる。

$$P_1(z) - P_2(z) = (P_{01} - P_{02}) - g \left[(\rho_{01} z + b_1 \frac{z^2}{2}) - (\rho_{02} z + b_2 \frac{z^2}{2}) \right] + (P_{i0} + b_i z) \quad (1-19)$$

いかなる高さ z においても速度は次式で与えられる。

$$v(z) = \left[2 \left(\frac{P_1(z) - P_2(z)}{\rho} \right) \right]^{1/2} \quad (1-20)$$

ここで、 ρ は速度によって移送される密度を示す。

二つの可能な中性帯の位置は速度ゼロの点を導く圧力平行によって与えられる。一般的な場合は次式となる。

$$g(b_1 - b_2) \frac{z^2}{2} + [g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_l]z + (-P_{01} + P_{02} - P_{l0}) = 0 \quad (1-21)$$

式(1-21)は二つ、一つあるいはゼロの実解を持つ。

開口部を通して両方向に流れている流量を計算するためには、次のステップで中性帯の位置によって決められる間隔で (1-20) 式を積分することである。

$$m_{0,1} = Cd\theta \int_{z=0}^{z=-1} \rho v(z) W dz \quad (1-2)$$

$$m_{-1,2} = Cd\theta \int_{z=-1}^{z=-2} \rho v(z) W dz \quad (1-23)$$

$$m_{-2,H} = Cd\theta \int_{z=-2}^{z=H} \rho v(z) W dz \quad (1-24)$$

<記号> \dot{m} : 流量(mass flow)の平均値 [kg/s]、 C_d : 流量係数 [-]

θ : 面積縮小係数 [-]、 W : 開口部の水平方向の幅 [m]

開口の流れは実験的な流出係数 C_d に直接比例することが前式からわかる。事実、これは開口部が存在することによる流れの収縮を考慮した現象的な係数である。理論的に、それは流体や開口の形状によって生じる局所的な流れの性状による物である。その値は、鋭い端のあるオリフィスの 0.61 から、トランペット型のノズルの 0.98 にいたる。これらの値は 0.25 程度と値が低く、開口部では 0.75 よりも値が高いということが簡単な報告書に示されている。 θ は面積縮小係数といわれている。これによって開口の有効開口面積を決定することが可能である。最近、Lane-Serff 他の実験を再度行っている Van der Mass 他は、Bernoulli モデルによる縮小係数は理論的に 0.6～0.75 になると断定している。しかし、厳密な決定は難しいままである。

もっと一般的な場合には、これらの積分は解析解を持たないし、それらは数値的平均値によって計算されなければならない。COMIS では、古典的な Simpson 積分が用いられている。この数値解法は一般的であるが時間がかかる。そして、より一般的な場合に使われる。式(1-21)が線型な(密度勾配が存在しない場合に解析的な解法が使われる)ときに限り、計算時間を節約するためにそれを使用することができる。

④ ファン

ファンの性能はファンの入口と出口とでの圧力差と送風量によって表される。空気密度と送風機回転速度の変化が送風量と圧力に大きく影響する。COMIS では、送風量と圧力差をペアとした 3 組以上のデータから、最小 2 乗法を用いた多項式近似によって送風機性能曲線を表す。圧力差が通常の運転レンジからはずれる場合には、送風機性能は通常の運転レンジにおける最大と最小の 2 点の圧力差を直線で結んで求める。この直線近似は主に、換気回路網計算のソルバー内で計

算エラーが生じることを防止する目的で行われている。

空気密度と送風機回転速度の影響は補正パラメータで考慮されている。これらの補正パラメータを計算するモジュールはFANCONVである。換気回路網の計算過程で、補正パラメータは空気密度による補正を行っている。このようにして、FANのルーチンで体積流量が決定される。

1.3 汚染物質濃度の計算法

COMISでは、マルチゾーンの気流モデルの開発と並行して、建築物の各ゾーンにおける各汚染物質の質量平衡を定義するマルチゾーンの移送モデルの開発を行った。

ゾーン*i*における汚染質*p*のある濃度時の質量変化は、何らかの効果によって増加した制御量の境界における汚染質の流れの発散に基づく。ここでの重要な仮説は、濃度はひとつのゾーンで十分に混合され、気流によってゾーンからゾーンへ移送されるということである。この質量平衡は、方程式(1-25)によって以下のように表される。

$$\frac{d(\rho_{ai}V_iC_{ip})}{dt} = \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} nia_{ijk}(t)(1-\eta_{jik})C_{jp}(t) - \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} \left(ma_{ijk}(t) + kr_{,ip} \right) C_{ip}(t) + S_{ip}(t) \quad (1-25)$$

方程式(1-25)において、 η_{jik} は、2つのゾーン*j*及び*i*間の接合部*k*のフィルター効果を示す。このフィルターは、移送された濃度に影響を及ぼし、あるゾーンから他のゾーンへの流出時における汚染質と固体成分との接触から生じるあらゆる種類の反応(化学変化、相変化等)、あるいは、進路に沿った固体吸着と解釈できる。 $kr_{,ip}$ は反応率と称するもので、考察対象のゾーンそのものにおける固体成分での化学変化、吸着、あるいは脱着の効果や放射性汚染質の相変化、あるいは核反応を考慮に入れた一般用語である。

η_{jik} 及び $kr_{,ip}$ は、一定値または濃度以外の状態変化の関数として定義付けすることができる。 $S_{ip}(t)$ は、ゾーン*i*における屋内汚染質*p*の発生源を示す。

方程式(1-25)の最初の項は、以下のように展開することができる。

$$\frac{d(\rho_{ai}V_iC_{ip})}{dt} = C_{ip} \frac{d(\rho_{ai}V_i)}{dt} + \rho_{ai}V_i \frac{dC_{ip}}{dt} \quad (1-26)$$

ただし、方程式(1-26)において、 $d(\rho_{ai}V_i)/dt$ はゾーン*i*における乾燥空気の質量平衡を定義しているにすぎない。

この質量平衡は、さらに方程式(1-27)に書き換えられる。

$$\frac{d(\rho_{ai}V_i)}{dt} = \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} ma_{jik}(t) - \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} mai_{jk}(t) \quad (1-27)$$

式(1-25)、(1-27)の定義を導入すれば、ゾーン*i*における汚染質*p*の濃度の流入にのみ関する一般的な定義付けが以下の通り得られる。

$$\rho_{ai}V_i \frac{dC_{ip}}{dt} = \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} ma_{jik}(t)(1-\eta_{jik})C_{jp}(t) - \sum_{j=0}^{j=NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} \left(ma_{jik}(t) + k_{r,ip} \right) C_{ip}(t) + S_{ip}(t) \quad (1-28)$$

方程式(1-28)を時間積分する場合は、完全陰関数有限差分法を用いる。この方法によって、各時間段階の濃度場を定義するための線形方程式の定義付けが可能になる。行列表記を用いれば以下の式が得られる。

$$[A] = \{Cp^{t+\Delta t}\} = \{B\} \quad (1-29)$$

ここで、

$$A(i, j) = \sum_{k=1}^{k=NK} -ma_{jik}^{t+\Delta t} (1 - \eta_{jik}) \quad i \neq j \quad (1-30)$$

$$A(i, i) = \frac{\rho_{ai} V_i}{\Delta t} + \sum_{j=0}^{NZ} \sum_{k=1}^{k=NK} ma_{jik}^{t+\Delta t} + k_{r,ip}^{t+\Delta t} \quad (1-31)$$

$$B(i) = \frac{\rho_{ai} V_i}{\Delta t} C_{ip}^t + S_{ip}^{t+\Delta t} + \sum_{k=1}^{k=NK} ma_{0ik}^{t+\Delta t} (1 - \eta_{0ik}) C_{0p}^{t+\Delta t} \quad (1-32)$$

発生源の項 $B(i)$ において、サブスクリプト 0 は外気を示す。ここでは、各時間段階における汚染質移送モデルの境界条件としてこれらの項を導入する。

このモデルと COMIS 気流モデルとの組み合わせは、以下のレベルに分かれる。

- ・方程式(1-28)は、同じ時間段階において、濃度は乾燥空気のマルチゾーン質量流の関数であることを示す。
- ・濃度の変化は、異なったゾーンの空気密度を調節し、スタック効果に影響を及ぼし、さらに、マルチゾーン質量流の分布に重要な変化をきたす。

NP 個の汚染質を含有する湿り空気の空気密度は以下のように示される。

$$\rho = \frac{P \left(1 + XH + \sum_{i=1}^{i=NP} C_i \right)}{287.055T \left(1 + XH \frac{28.9645}{18.01534} + \sum_{i=1}^{i=NP} C_i \frac{28.9645}{MM_i} \right)} \quad (1-33)$$

異なった移動現象を結合する場合は、シミュレーションの時間段階に応じて妥当な選択肢を定義することが重要な問題となる。

時間ステップの選択について、最初の近似法として、方程式(1-28)の主要な現象はゾーン内気流による濃度の推移であるという仮説を立てる。ゾーン I の濃度の概算値を得るために、フィルター効果、反応率及び発生源の存在は無視する。これらのすべての仮定を与えることにより、方程式(1-28)は解析解を持つ。ゾーン I における汚染質 p の濃度の適切な概算値は、指数関数の法則によって以下の通り得られる。

$$C_{ip} = \left[\left(\frac{\sum_{j=0}^{j=NZ} ma_{ij}}{-\rho_{ai} V_i} \right) t \right] \quad (1-34)$$

ここで、 ma_{ji} はゾーン j からゾーン i へ流入する乾燥空気流全体を示し、 A は問題の境界条件が決定する定数を示す。

この特定の問題の時定数は、以下の式によって得られる。

$$\tau_i = \frac{V_i \rho_{ai}}{\sum_{j=0}^{j=NZ} ma_{ji}} \quad (1-35)$$

最初の近似として、時間ステップに対して満たすべき条件は以下のようになる。

$$\Delta t \ll \min_{i=1}^{i=NZ} \tau_i \quad (1-36)$$

付録-1 参考文献

- 1) H.E. Feustel et al.: Fundamentals of the Multizone Air Flow Model-COMIS, AIVC TN29, May 1990
- 2) Technical Note AIVC 29(Related Project) Fundamental on the Multizone Air Flow Model-COMIS, Air Infiltration and Ventilation Centre, May 1990

付録-2 CFD を用いた乱流数値シミュレーション手法

2.1 はじめに

本節では、本解析で気流解析に用いる都市・建築工学や風工学の分野における数値流体力学CFD (Computational Fluid Dynamics) に基づく乱流モデルの概要についてまとめる^{1,2)}。

2.2 流れの基礎方程式

都市・建築分野で扱う流体の多くは、非圧縮・乱流・粘性のある流れであり、かつしばしば非等温である。このような非圧縮・非等温流れ場の基礎方程式系を以下に示す。

1) 連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

2) ナビエ・ストークス方程式 (以降 N-S 方程式)

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - g_i \beta \Delta \theta \quad (2-2)$$

3) 温度輸送方程式

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (2-3)$$

4) 水蒸気 (絶対湿度) 輸送方程式

$$\frac{Dq_w}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial q_w}{\partial x_j} \right) \quad (2-4)$$

ここで、

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}, \quad \Delta \theta = \theta - \theta_0$$

(記号) u_i : 瞬時速度の3成分 [m/s], x_i : 空間座標の3成分 [m], t : 時間 [s], ρ : 空気密度 [kg/m³], p : 瞬時圧力 [Pa (=N/m²)], ν : 分子動粘性係数 [m²/s], β : 体積膨張率 (=1/(273+ θ_0)) [1/°C], θ : 瞬時温度 [°C], θ_0 : 代表温度 [°C], α : 分子温度拡散係数 [m²/s], q_w : 絶対湿度 [kg/kg], D : 水蒸気に関する分子拡散係数 [m²/s]

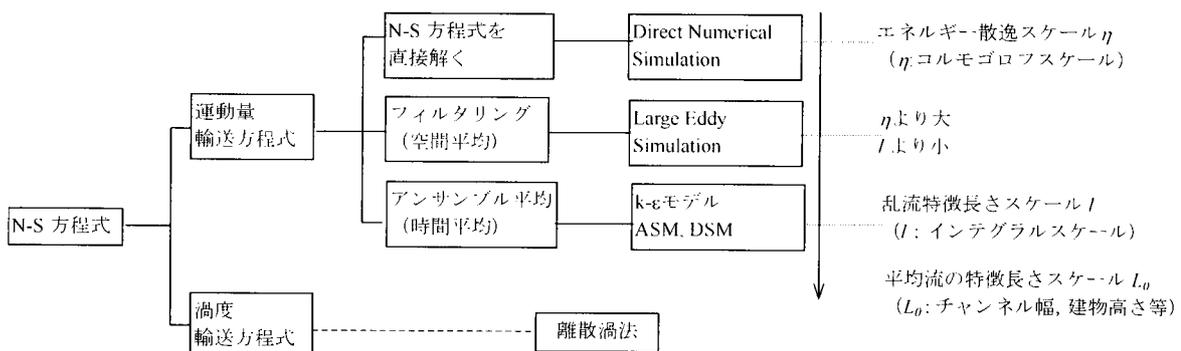
(2-1) ~ (2-4) 式はテンソルの表記法に従っており、繰り返し添字については総和をとるものとする。本研究では、流れ場は原則として非等温として取り扱う。居住空間では空気・水を問わず、一般に流れ場の温度差は比較的小さいので、(2-2) 式に示すように、温度差に伴う密度変化の影響はブジネスク近似により浮力項として表現される。ただし、火災や煙流動の問題を取り扱う際にはこの近似は必ずしも適切ではない^{3,4)}。

2.3 乱流モデルの必要性

乱流には微細な変動から大きな変動まで、様々のスケールの乱れが含まれている。乱流を数値的に解析する際に、(2-1) 式、(2-2) 式に示す流れの基礎方程式をそのまま解き、流れに含まれる全てのスケールの渦をシミュレートするという方法を直接数値シミュレーション (DNS) と呼ぶ。この方法ではモデル化に伴う誤差が介在しないので、もしこれを行うことが可能であれば最も理想的な方法である。しかしDNSの場合、全てのスケールの渦を解像できるように十分細かい計算格子を施す必要があるため、必然的に要求される計算量は膨大なものとなり、実用上は適用困難な場合が多い。特に建物周辺気流のような高 Re 数の流れにおいては、最小渦のスケールと流れの特徴的長さスケールとの隔たりが非常に大きくなるので、DNSを適用することは計算機能力の制約上現在はもちろん将来においても不可能であると予想される。

これを克服するための取り扱いとして、平均操作を施した方程式系から出発し、乱流渦の作用はモデル化するという手法が用いられる。これには大別して次の二つの手法がある。1つは、流れの基礎方程式に対してアンサンブル平均や時間平均という平均化操作を施して平均流のみを解析対象として、平均値からのずれの変動成分についてはモデルにより与える方法である。もう1つは、同じ基礎方程式に適切な空間フィルタを施して粗視化を行い、フィルタ幅に対応するスケールよりも大きなスケールの流れのみを解析対象として、フィルタ幅以下のスケールの変動成分についてはモデルにより表現する方法である。前者の方法によるものがRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) モデルと呼ばれるものであり、後者の方がLES (Large Eddy Simulation) モデルである。また、これらの方法で用いられるモデルの総称を乱流モデルと呼ぶ。建物周辺気流や室内気流を対象とするLESの解析は過去15年程の間に種々試みられ、非常に高精度の予測が可能であることが確認されている⁵⁻⁹⁾。しかし、計算時間の関係から実務への応用は主としてRANS系のモデルにより進められてきた。以下では、都市・建築分野で利用されているRANS系のモデルについて説明する。

図2-1はどの程度のスケール渦までをシミュレーションで捕捉するかという観点から各種乱流モデルを分類したものである。図2-1の縦軸において、一般に下に位置するほどモデル化・近似化の程度が強くなり、逆に計算量は少なくなる。次節以降では各種乱流モデルの概要を示す。



図

2-1 乱流モデルの分類と関連する長さスケール¹⁾

2.4 乱流のクロージャープロブレム

アンサンブル平均（定常流れであれば，時間平均と考えることもできる）を (2-1) ~ (2-4) 式に示す流れの基礎方程式に施すことを考える。このとき (2-1) ~ (2-4) 式に現れる各変数を以下のように分離する。

$$f = \langle f \rangle + f' \quad (2-5)$$

(記号) f : 変数 f の瞬時値, $\langle f \rangle$: 変数 f のアンサンブル平均値,

f' : 変数 f の変動値 ($=f - \langle f \rangle$, アンサンブル平均値からのずれに対応)

(2-5) 式に示す関係はレイノルズ分解と呼ばれる。(2-5) 式の関係を用いて (2-1) ~ (2-4) 式に代入し，これらに対してアンサンブル平均を取れば次式が得られる。

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2-6)$$

$$\frac{D \langle u_i \rangle}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \langle u'_i u'_j \rangle \right) - g_i \beta (\langle \theta \rangle - \theta_0) \quad (2-7)$$

$$\frac{D \langle \theta \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} - \langle u'_i \theta' \rangle \right) \quad (2-8)$$

$$\frac{D \langle q_w \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial x_i} - \langle u'_i q'_w \rangle \right) \quad (2-9)$$

ここで (2-7) 式は平均流に対する運動方程式であり，Reynolds 方程式と呼ばれる。(2-7) ~ (2-9) 式には各々 $-\langle u'_i u'_j \rangle$, $-\langle u'_i \theta' \rangle$, $-\langle u'_i q'_w \rangle$ といった項が加わっている。これらの項は，各々の方程式の移流項をレイノルズ分解する過程で生じたものである。これら新たに生じた項は各々，レイノルズ応力 $-\langle u'_i u'_j \rangle$ ，乱流熱フラックス $-\langle u'_i \theta' \rangle$ ，乱流水蒸気フラックス $-\langle u'_i q'_w \rangle$ と呼ばれる。3次元解析の場合，上記の新たな項は， $-\langle u'_i u'_j \rangle$ は9成分(対称性を考えると6成分)， $-\langle u'_i \theta' \rangle$ ， $-\langle u'_i q'_w \rangle$ は各々3成分ずつの変数(未知数)を示しているが，平均操作により新たにこれらの未知変数が現れるために，上記の (2-6) ~ (2-9) 式のみでは方程式系がクローズしなくなる。このため，これら新たに生じた未知数を何らかの方法で， $\langle u_i \rangle$ ， $\langle p \rangle$ ， $\langle \theta \rangle$ ， $\langle q_w \rangle$ といった物理量で表現(モデル化)することにより，クローズした方程式系を作成する必要がある。このような問題をクロージャープロブレム(完結問題)と呼ぶ。また，この際の工夫がRANSモデルにおける乱流のモデリングに対応する。また， $-\langle u'_i u'_j \rangle$ ， $-\langle u'_i \theta' \rangle$ ， $-\langle u'_i q'_w \rangle$ に関する輸送方程式を導出し，これらと (2-6) ~ (2-9) 式を直接連立させて方程式をクローズさせるモデリング手法もあり，これを応力方程式モデル DSM (Differential Stress Model) と呼ぶが，都市・建築分野の問題に適用した時の精度はモデルの精密さ複雑さを考えると，現状では必ずしも満足すべきものではない^{10,11)}。 $-\langle u'_i u'_j \rangle$ 等の輸送方程式を解かずに，渦粘性係数 ν_t 等を用いてモデル化することによりクローズさせる方法には0方程式モデル，1方程式モデル，2方程式モデルなどがあり，これらは全て Reynolds 方程式 (2-7) 式に基づくモデルであるので，総称して RANS モデル (Reynolds 平均モデ

ル) と呼ばれる^{1, 12)}。

2.5 種々のRANSモデル

レイノルズ応力 $-\langle u'_i u'_j \rangle$ のモデルとして、最も簡易で基本的なモデルは(2-10)式に示すような渦粘性近似モデル(Eddy Viscosity Model: EVM)と呼ばれるモデルである。渦粘性近似では分子粘性係数 ν によって生じるせん断応力と速度勾配の関係式とのアナロジーから、渦動粘性係数 ν_t を導入し、レイノルズ応力 $-\langle u'_i u'_j \rangle$ を平均速度勾配(すなわち変形速度テンソル)と ν_t を関連付けて以下のように表す。

$$-\langle u'_i u'_j \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2-10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (2-11)$$

ここで S_{ij} は変形速度テンソルを示す。

(2-10)式の右辺第3項中の k は乱流エネルギー $[m^2/s^2]$ であり、この項 $(-\frac{2}{3}k\delta_{ij})$ は $i=j$ の両辺の縮約を取った時の恒等関係から導かれる項である。

また、乱流熱フラックス $-\langle u'_i \theta' \rangle$ 、乱流水蒸気フラックス $-\langle u'_i q'_w \rangle$ も同様のアナロジーから次式のようにモデル化することができる。

$$-\langle u'_i \theta' \rangle = \alpha_t \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_i} \quad \left(\alpha_t = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \right) \quad (2-12)$$

$$-\langle u'_i q'_w \rangle = D_t \frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial x_i} \quad \left(D_t = \frac{\nu_t}{\sigma_w} \right) \quad (2-13)$$

(2-10)式の右辺第1項、第2項にかかる渦動粘性係数 ν_t と乱流エネルギー k は新たな未知数であり、何らかの方法でモデル化する必要がある。また、 ν_t は(2-12)、(2-13)式においても乱流温度拡散係数 α_t や、乱流水蒸気拡散係数 D_t を与える際にも利用する重要な変数である。この ν_t をモデル化する方法の中に0方程式モデル、1方程式モデル、2方程式モデルといったモデル化が存在する。0方程式、2方程式等の各モデルの名称は ν_t を評価するのに用いられる物理量のうち、直接その輸送方程式を解く物理量の数を表しているが、工学の各分野で、現在、最も広く使われているのは、 ν_t を乱流エネルギー k とその散逸率 ε (粘性によって単位時間あたりに熱エネルギーに変換される割合)により評価する k - ε 型2方程式モデルである。以下0方程式、1方程式、2方程式の各モデルについてその内容を示す。

(1) 0方程式モデル (代数モデル)

0方程式モデルは(2-10)式において新たな未知数となる ν_t を代数的に与える方法を用いたモデルである。0方程式モデルという名前は、 ν_t の評価に対して新たに何らかの物理量の微分方程式を

必要としないことに由来している。0方程式モデルの代表的なものとして、壁乱流を対象に開発されたPrandtlの混合距離モデル¹³⁾を利用したものがある。以下にこのモデル化の概要を示す。

まず v_t を乱流の特徴的な速度スケール U とその特徴的な長さスケール l を用いて次元解析により次式で表せるものとする。

$$v_t = l \cdot U \quad (2-14)$$

但し、 l : 特徴的な長さスケール[m], U : 特徴的な速度スケール[m/s]

次に特徴的な速度スケール U は乱流の特徴的な時間スケール t_0 を用いて $U = l/t_0$ と定義し(2-14)式を以下のように表現する。

$$v_t = \frac{l^2}{t_0} \quad (2-15)$$

さらに、壁乱流の性状を考慮して、 t_0 が $1/|\partial\langle u \rangle/\partial x_n|$ ($\langle u \rangle$: 壁面接線方向速度, x_n : 壁面鉛直方向座標)に比例するものとする(2-15)式は次式となる。

$$v_t = l_m^2 \left| \frac{\partial\langle u \rangle}{\partial x_n} \right| \quad (2-16)$$

(2-16)式中の l_m は混合距離と呼ばれ、一般に次式で与えられる。

$$l_m = \kappa \cdot x_n \quad (2-17)$$

ここで、 κ はカルマン定数であり、0.37~0.42の値をとる。

(2-16)式と(2-17)式を用いて v_t を評価するモデルがPrandtlの混合距離モデルである。

(2) 1方程式モデル

1方程式モデルの代表的なものには、 v_t を k と乱流の特徴的な長さスケール l を用いて

$$v_t = k^{1/2} \cdot l \quad (2-18)$$

と表し¹⁶⁾、 l は0方程式と同様に代数的に与え、 k はその輸送方程式から求めるものが挙げられる。このタイプのモデルでは、 v_t の評価に対して1つの物理量の輸送方程式が必要となるので1方程式モデルと呼ばれる^{15,16)}。

1方程式モデルで用いられる k の輸送方程式は(2-2)式のNavier-Stokes方程式から(2-7)式のReynolds方程式を差し引いて残差 u'_j の方程式を求め、これに u'_j を乗じ、アンサンブル平均を施すことにより導かれる。これを以下に示す。

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k + G_k + D_k - \varepsilon \quad (2-19)$$

右辺第1項は k の全微分を示しており、

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2-20)$$

である。また、 P_k 、 G_k はそれぞれ k のReynolds応力による生産項、浮力による生産項であり、 D_k 、 ε 、拡散項、散逸項である。これらを具体的に示すと以下のようなになる。

$$P_k = -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad (2-21)$$

$$G_k = -g_i \beta \langle u'_i \theta' \rangle \quad (2-22)$$

$$D_k = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle + \frac{1}{\rho} \langle p' u'_j \rangle \right) + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} \quad (2-23)$$

$$\varepsilon = \nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle \quad (2-24)$$

このように、1方程式モデルでは(2-19)式を解くことにより得られる k の空間分布をもとに ν_t を評価する。(2-6)～(2-13)が閉じた方程式系となるためには(2-19)式中の拡散項 D_k ((2-23)式)を構成する乱流拡散成分(右辺第1項)と圧力拡散成分(右辺第2項)をモデル化する必要がある。また、(2-24)式に示した散逸項 ε もモデル化しなければならない。このうち、拡散項を構成する2つの項は、一般に両方をまとめて勾配拡散近似により次式のようにモデル化する。

$$D_k = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \langle u'_i u'_i u'_j \rangle + \frac{1}{\rho} \langle p' u'_j \rangle \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (2-25)$$

σ_k : モデル定数[-] (一般に1.0)

また、散逸項 ε は次元解析により C^* を定数として

$$\varepsilon = C^* \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2-26)$$

でモデル化する。以上を(2-19)式に代入することにより、1方程式モデルで用いられているモデル化された k の輸送方程式が導かれる。

一方、長さスケール l は前述の通り代数式で与える。一般にはこの l を(2-17)式に示す l_m で与えることが多い。しかし、一般には適切な l を推定することは難しい。特に工学で対象とする複雑乱流場の解析では困難を極める。この困難は0方程式モデルにおけるPrandtlの混合距離モデルの l_m に関しても同様である。そのため、長さスケール l を事前に予測しがたい複雑乱流場の解析に0方程式モデルや1方程式モデルが用いられることは少ない。

(3) 2方程式モデル

2方程式モデルは、 ν_t の評価のために2つの物理量の輸送方程式を導入するモデルである。現在、実用問題で用いられている2方程式モデルの多くでは k と ε がこの物理量として選ばれている。以下ではこの k - ε 型2方程式モデルについて概説する。

k - ε モデルでは ν_t を次式のように表現する。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-27)$$

これは(2-18)式に示す ν_t の評価式内の長さスケール l の評価に(2-26)式に示す関係式を利用

することにより導かれる。 C_μ はモデル定数で $C_\mu=0.09$ と与えられる。また、 k と ε はそれぞれ輸送方程式から求められる。 k の輸送方程式は (2-19) 式に示す方程式に (2-25) 式に示す拡散項に関するモデル化を組み込んだものを使用する。なお、散逸項 ε は輸送方程式を用いて陽に求めるので、(2-26) 式の様なモデル化は必要としない。

ε の輸送方程式は (2-19) 式に示す k の輸送方程式の導出と同様に速度変動量 u'_i に関する輸送方程式を基に導出され、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & -2\nu \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \right\rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} - 2\nu \left\langle \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right\rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \\ & - 2\nu \left\langle u'_k \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right\rangle \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_k \partial x_j} - 2\nu \left\langle \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \frac{\partial u'_k}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle - 2\nu^2 \left\langle \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_k} \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_k} \right\rangle \\ & - 2\nu g_i \beta \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial \theta'}{\partial x_k} \right\rangle \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(-\nu \left\langle u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle - \frac{2\nu}{\rho} \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial p'}{\partial x_j} \right\rangle + \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) \quad (2-28) \end{aligned}$$

(2-28) 式に示す ε の輸送方程式も k の輸送方程式と同様に、そのままでは解くことができない幾つかの項についてモデル化が必要となる。しかし、(2-28) 式に含まれる各項はいずれも渦粘性係数 ν が主要な役割を果たす極めて小さなスケールで生じる現象により記述されているため、①平均流の勾配などの比較的大きなスケールで変化する諸量で近似することは適切でないと考えられること、②それぞれの項自体の物理的意味が明確でないと考えられることからそのモデル化は極めて難しい。そのため一般には各項の詳細な輸送方程式のモデル化の検討を行わず、マクロな見地から k の輸送方程式に準じて ε の輸送方程式のモデル化を考え、以下のように表している¹⁷⁾。

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = D_\varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (2-29)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (2-30)$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_l}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (2-31)$$

σ_ε : モデル定数 (一般に1.3)

(2-29) 式に現れるモデル定数 $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ に関しては Launder-Spalding が各種流れ場の解析結果より最適化しており、各々を $C_{\varepsilon 1}=1.41$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$ と与えることが多い¹⁷⁾。

一方、浮力による ε の生産に係わる定数 $C_{\varepsilon 3}$ は、他の定数に比べてまだ確定されておらず、検討の余地が残されている。Viollet 等は、(2-2) 式で定義される浮力による k の生産項 G_k の正負から

$C_{\varepsilon 3}$ を決定する方法を採用している。彼らは $G_k > 0$ の場合は $C_{\varepsilon 3} = C_I = 1.41$, $G_k < 0$ の場合 $C_{\varepsilon 3} = 0$ として計算を行っている。ここで G_k の正負は (2-12) 式と (2-2) 式の表現から明らかなように、流れ場の安定度に対応する。

即ち, $G_k > 0$ は $\frac{\partial(\theta)}{\partial x_3} < 0$ $\left(\frac{\partial \rho}{\partial x_3} > 0 \right)$ の不安定状態 (下層の空気が高温 (密度が小さい)) を,

$G_k < 0$ は $\frac{\partial(\theta)}{\partial x_3} > 0$ $\left(\frac{\partial \rho}{\partial x_3} < 0 \right)$ の安定状態 (下層の空気が低温 (密度が大きい)) を意味する。

以上のようにして与えられるの方程式 k や ε の輸送方程式を用いて (2-27) 式を用いて v_i を評価するモデルが k - ε モデルである。表 2-1 に標準 k - ε モデルの基礎方程式¹⁸⁾をまとめて示す。

表 2-1 標準 k - ε モデル (Viollet 型¹⁸⁾) の基礎方程式

①連続式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{2-6} \text{ 再}$$

②運動方程式 (Reynolds 方程式)

$$\frac{D \langle u_i \rangle}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \langle u'_i u'_j \rangle \right) - g_i \beta (\langle \theta \rangle - \theta_0) \tag{2-7} \text{ 再}$$

③温度の輸送方程式

$$\frac{D \langle \theta \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} - \langle u'_j \theta' \rangle \right) \tag{2-8} \text{ 再}$$

④水蒸気 (絶対湿度) の輸送方程式

$$\frac{D \langle q_w \rangle}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial x_j} - \langle u'_j q'_w \rangle \right) \tag{2-9} \text{ 再}$$

⑤乱流エネルギーの輸送方程式

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k + G_k + D_k - \varepsilon \tag{2-19} \text{ 再}$$

⑥粘性消散率 ε の輸送方程式

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = D_\varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} G_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \tag{2-29} \text{ 再}$$

$$-\langle u'_i u'_j \rangle = \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{2-10} \text{ 再}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2-27} \text{ 再}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \tag{2-11} \text{ 再}$$

$$-\langle u'_j \theta' \rangle = \alpha_t \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial x_j} \quad (\alpha_t = \frac{\nu_t}{\sigma_\theta}) \tag{2-12} \text{ 再}$$

$$-\langle u'_j q'_w \rangle = D_t \frac{\partial \langle q_w \rangle}{\partial x_j} \quad (D_t = \frac{\nu_t}{\sigma_w}) \tag{2-13} \text{ 再}$$

$$P_k = -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \tag{2-21} \text{ 再}$$

$$G_k = -g_i \beta \langle u'_i \theta' \rangle \tag{2-22} \text{ 再}$$

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \tag{2-25} \text{ 再}$$

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \tag{2-31} \text{ 再}$$

(記号) $\langle \rangle$: 変数 f の時間平均またはアンサンブル平均, f' : f の変動成分, x_i : 空間座標 ($i=1$ (主流方向), 2 (主流直交方向), 3 (鉛直方向)), u_i : 風速の瞬時値 [m/s], θ : 温度 [°C], α : 分子温度拡散係数 [m²/s], θ_0 : 基準温度 [°C], q_w : 絶対湿度 [kg/kg], D : 水蒸気に関する拡散係数 [m²/s], ν_t : 乱流拡散係数 [m²/s], α_t : 乱流温度拡散係数 [m²/s], D_t : 乱流水蒸気拡散係数 [m²/s], $\sigma_k=1.0[-]$, $\sigma_\varepsilon=1.3[-]$, $\sigma_\theta=0.5[-]$, $\sigma_w=0.5[-]$, g_i : 重力加速度 ($g_1=g_2=0.0, g_3=-9.8$) [m/s²], β : 空気の体膨張率 [1/°C], p : 圧力 [Pa], ρ : 空気密度 [kg/m³], $C_{\varepsilon 1}=1.44[-]$, $C_{\varepsilon 2}=1.92[-]$, $C_{\varepsilon 3}=1.44[-]$, $C_\mu=0.09[-]$

2.6 渦粘性近似モデルの問題点

前項で示してきた k - ε モデルをはじめとした渦粘性近似モデル (EVM) は、その取り扱いの簡便さ故に様々な流れ場に広く応用され、かなりの成功を収めるに至った。しかし、一方でいくつかの問題点も確認されている。その中で代表的な問題点を整理すると次に示す2つとなる。

- ① 等方的な渦粘性係数 ν_t を用いてレイノルズ応力 ($-\langle u'_i u'_j \rangle$) や乱流熱フラックス ($-\langle u'_i \theta' \rangle$) 等をモデル化しているため、複雑乱流場で見られるようなレイノルズ応力の非等方性に対応することが出来ない。
- ② 十分に乱れた流れ場を対象に開発されてきた乱流モデルであるため、壁面近傍の乱れの減衰効果 (あるいはエコー効果) や粘性効果のある流れ場、強い安定成層が生じ乱れが減衰し層流化する流れ場に対しては一般に高精度な解を導くことが出来ない。

浮力の影響を強く受け非等方性の強い都市空間内の乱流輸送現象を等方的な渦粘性近似でモデル化すれば、多くの誤差が介在し、高精度の予測を行うのは困難な場合が多い。特に、市街地の温熱環境等を予測する場合、上記の①の問題が大きな誤差の要因となる場合がある。また、次項で述べるが、一般的に標準型 k - ε モデルを建物周辺気流に適用した解析を行うと、建物風上側コーナー付近で乱流エネルギー k の値を著しく過大評価する。これも、Reynolds 応力の非等方性を無視した渦粘性近似モデルの適用が原因である。

2.7 建物風上側の乱流エネルギーの過大生産に対する改良モデル

前項で述べた問題点に対し本項では、建物風上側の乱流エネルギー k の過大生産を抑制するために組み込んだモデル改良の内容を示す。

(1) 標準 k - ε モデルにおける乱流エネルギーの過大生産のメカニズム

図2-2は正方形断面の2次元建物モデル (surface-mounted square rib) 周辺の k の分布について風洞実験結果と比較したものである²¹⁾。標準 k - ε モデルの結果は建物風上側コーナー部で極めて大きな値を示し、風洞実験値との大きな差が生じている。これは標準 k - ε モデルにおける Reynolds 応力の非等方性の考慮がないモデル化の欠陥に起因している。以下、そのメカニズムを示す²⁰⁾。

先ず、2.5で示した乱流エネルギー k の輸送方程式を再掲する。

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k + G_k + D_k - \varepsilon \quad (2-19) \text{ 再}$$

ここで、乱流エネルギー k の生産項 P_k は次式で定義される。

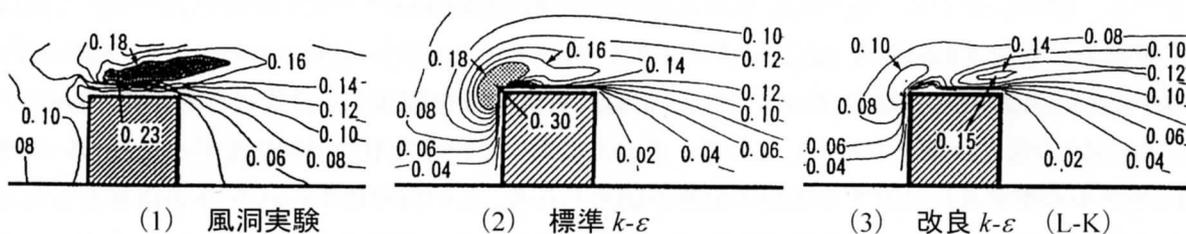


図 2-2 乱流エネルギー k の分布

$$P_k = -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \quad (2-21) \text{ 再}$$

建物中心断面では $\langle u_2 \rangle \approx 0$, $\partial/\partial x_2 \approx 0$ とみなして, かつ連続式を考慮すれば P_k は近似的に次式のように表すことが出来る。ただし, ここでは x_1 : 主流方向, x_2 : 主流に直交方向, x_3 : 鉛直方向と定義している。

$$P_k = -\left\{ \langle u_1'^2 \rangle - \langle u_3'^2 \rangle \right\} \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} - \langle u'_1 u'_3 \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_3} - \langle u'_1 u'_3 \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_1} \quad (2-32)$$

$$P_k = -\langle u_1'^2 \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} - \langle u_3'^2 \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} - \langle u'_1 u'_3 \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_3} - \langle u'_1 u'_3 \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_1}$$

$$\frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} + \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} \equiv 0 \quad \left(\frac{\partial \langle u_2 \rangle}{\partial x_2} \equiv 0 \right) \quad \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} = -\frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1}$$

ここで, 建物前面の衝突域から風上コーナー周辺領域において, 上式の右边第3項, 第4項に含まれている $\langle u'_1 u'_3 \rangle$ をLESにより調べるとほぼその値は0になっている。つまりこの領域では上式の右边第3項, 第4項の寄与が小さく, P_k の値は上式のノルマルストレスに関連する右边第1項, 第2項に大きく影響されることになる。

上式右边第1項, 第2項のノルマルストレス $\langle u_1'^2 \rangle$, $\langle u_3'^2 \rangle$ は等方型の渦粘性近似に基づいて以下のようにモデル化される。

$$\langle u_1'^2 \rangle = \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} \quad (2-33)$$

$$\langle u_3'^2 \rangle = \frac{2}{3} k - 2\nu_t \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} \quad (2-34)$$

ここで, 連続式および $\partial \langle u_2 \rangle / \partial x_2 \approx 0$ (中心断面において) を考慮すれば $\langle u_3'^2 \rangle$ は次式のように変形される。

$$\langle u_3'^2 \rangle = \frac{2}{3} k + 2\nu_t \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} \quad (2-35)$$

これと前出の $\langle u_1'^2 \rangle$ の表現式 (2-33式) を P_k の評価式 (2-32) 式に代入すると, P_k のノルマルストレスに関連する成分の和 (以下 P_{kn} と記す) は,

$$P_{kn} \equiv 4 \left(\frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} \right)^2 \quad (2-36)$$

となる。標準 k - ε モデルで最終的に求められる生産項の主要部分は上式に示すとおりで, これは常に正值であり大きな値となる。しかし (2-32) 式に示すように, 本来の表現では P_{kn} は $\langle u_1'^2 \rangle$, $\langle u_3'^2 \rangle$ が互いに差し引く形となっており, 正值, 負値両方を取りうる。このことが標準 k - ε モデルにおける k の過大評価をもたらしている。この点において, 等方型の渦粘性モデルに基づいた標準 k - ε モデルの衝突流れに対する適用の限界が認められる。この様な標準 k - ε モデルの限界をもたらしたのは, 衝突流れにおける変形速度テンソル S_{ij} の対角成分の存在である。チャンネル流れなどに

においてはこの対角成分は存在せず、標準 k - ε モデルをこの種の流れ場に適用している限りにおいて、この欠陥は顕在化しなかった。標準 k - ε モデルのこの問題が顕在化したのはこのモデルを建物の様なbluff bodyに適用したのがきっかけであり、現在は広く認識されている²²⁾。

(2) LK モデルの導入とその問題点

上述したように、数値解析において標準 k - ε モデルを適用する場合、建物風上側コーナー付近における乱流エネルギーの過大生産は大きな欠点の1つである。この問題を改善するためにいくつかの改良 k - ε モデルが提案されている。

Launder-Kato^{21,22)}は標準 k - ε モデルの k の過大評価する問題に対し、 k の輸送方程式中の生産項 P_k の評価に渦度のスケール Ω を導入した改良モデルを提案した(以下LKモデルと記す)。

(標準 k - ε モデル)

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (2-37)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-27) \text{ 再}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2-38)$$

(LKモデル)

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (2-39)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2-40)$$

このモデルでは、渦度 Ω が淀み点付近で小さくなることに着目し、前述の k の過大生産を抑制している。このLKモデルを用いることにより風が正面からあたる場合に非常に大きな改善の効果が見られる。また、計算負荷の面でも改良による影響も非常に小さく優れたモデルである。しかし、LKモデルには以下の2つの問題がある²³⁾。

- ① Reynolds 応力 $\langle u_i' u_j' \rangle$ は通例の渦粘性近似に基づきモデル化し、 P_k のみ修正しているため、モデル化の一貫性に欠ける。すなわち、乱流エネルギー k の輸送方程式中の P_k が平均運動エネルギー K ($=\langle u_i \rangle \langle u_i \rangle / 2$)の輸送方程式中の平均流から乱れ成分へのエネルギー輸送項 $-P_k$ と釣り合わないという数学的矛盾が生じる。
- ② 渦度のスケール Ω が変形速度のスケール S よりも大きい場合、標準 k - ε モデルに比べ P_k を過大評価する。実際、図2-3に示すように建物周辺ではしばしば $\Omega/S > 1$ となる場所が現れる。

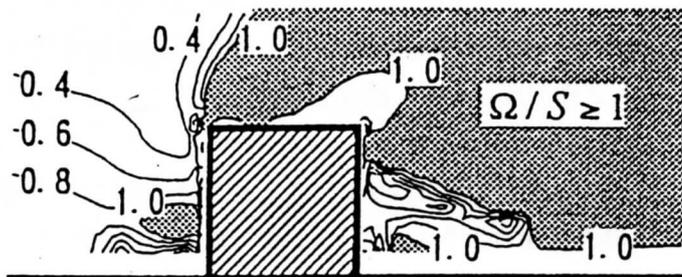


図 2-3 建物周辺における Ω/S の分布 (2次元建物 (リブ) モデル)

(3) LK モデルの改良と MMK モデル

LK モデルの欠点を修正するため、 $\langle -u'_i u'_j \rangle$ を渦粘性近似で表現した場合に現れる渦動粘性係数 $\nu_t (=C_\mu \cdot (k^2/\varepsilon))$ の中の C_μ を Ω/S の関数とするモデル (MMK モデル) が提案された²³⁾。

$$\nu_t = C_\mu^* \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu^* = C_\mu \frac{\Omega}{S} \quad (\Omega/S \leq 1 \text{ の場合}) \quad (2-41)$$

$$\nu_t = C_\mu^* \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu^* = C_\mu \quad (\Omega/S > 1 \text{ の場合}) \quad (2-42)$$

ここで P_k の算定式には標準 $k-\varepsilon$ モデルと同じ (2-37) 式を用いる。このモデルでは、 $\Omega/S \leq 1$ の場合においては ν_t を (2-41) 式のように与えるため、 P_k の評価は LK モデルによる (2-38) 式と同じになる。しかし、このモデルの場合、 P_k を直接修正するのではなく ν_t を介して修正し、 P_k の算定式には通常形 ((2-37) 式) を用いるため、前述した LK モデルの問題点①の数学的矛盾が回避される。一方、 $\Omega/S > 1$ の場合には (2-42) 式に示されるように標準 $k-\varepsilon$ モデルと同じ通例の ν_t の算定式を用いることにより②の問題点を回避している。

但し、このモデルは計算不安定を起こしやすいという問題があるので、LK モデルを改良し、LK モデルの適用範囲を $\Omega/S \leq 1$ に限定したモデルを利用することも多い (改良 LK モデル)^{23, 24)}。このモデルでは P_k を次式で評価する。

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (\Omega/S \leq 1 \text{ の場合}) \quad (2-39) \text{ 再}$$

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (\Omega/S > 1 \text{ の場合}) \quad (2-37) \text{ 再}$$

このモデルでは $\Omega/S > 1$ の場合、MMK モデルと同様に通常形 P_k の算定式を用いるので LK モデルの②の問題は回避される。しかし LK モデルと同様に P_k のみを修正しているため①の数学的矛盾は依然として残る。ただしこれは $\Omega/S \leq 1$ の範囲内のみ限定される。また、MMK に比べて計算が安定して行える場合が多く、取り扱いやすい。この改良 LK モデルの適用により建物風上側の乱流エネルギーの過大評価は大幅に改良される。

(4) Durbin 型 $k-\varepsilon$ モデル²⁵⁾

レイノルズストレスは、渦粘性近似により以下のように表現できる。

$$\langle u_i u_j \rangle = -2\nu_t S_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2-43)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2-44)$$

さらに渦粘性係数 ν_t は次のようにモデル化される。

$$\nu_t = C_\mu \langle v^2 \rangle T \quad (2-45)$$

(記号) $\langle v^2 \rangle$: 速度変動スケール, T : 時間スケール

(2-45) 式において速度変動スケールとして k を, 時間スケールとして k/ε を用いれば通常の $k-\varepsilon$ モデルの ν_t の算出式である次式となる。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-46)$$

Durbin は “realizability” (実現性) の制約 $2k \geq \langle u_\alpha^2 \rangle \geq 0$ を用いて, 時間スケール T に対して次のようなモデル上の制限を示している。(ただし, α は縮約をとらない)

$$T = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{2k}{3\langle v^2 \rangle C_\mu} \sqrt{\frac{3}{4S^2}} \right) \quad (2-47)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (2-48)$$

(2-45) 式及び (2-47) 式の速度変動スケール $\langle v^2 \rangle$ として k を採用すれば, 次式の様なモデルが導出される。

$$\nu_t = C_\mu k T \quad (2-49)$$

$$T = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{1}{C_\mu \sqrt{3} S} \right) \quad (2-50)$$

表 2-2 に建物風上側の k の過大生産の抑制を意図した各改良モデルをまとめて示す。

表 2-2 建物風上側の乱流エネルギーの過大生産を抑制するための改良モデル

	P_k	ν_t
標準 $k-\varepsilon$	$\nu_t S^2$	$C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
LK	$\nu_t S \Omega$	
改良 LK	$\nu_t S \Omega$ [$\Omega/S \leq 1$] $\nu_t S^2$ [$\Omega/S > 1$]	
MMK	$\nu_t S^2$	$C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \times \frac{\Omega}{S}$ [$\Omega/S \leq 1$] $C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ [$\Omega/S > 1$]
Durbin	$\nu_t S^2$	$C_\mu k T$
$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}, \quad T = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{1}{C_\mu \sqrt{3S}} \right)$		

2.8 混合タイムスケールを用いた新たな改良 $k-\varepsilon$ モデルの検討

前々項で述べた問題点に対し、前項と同様、建物風上側の乱流エネルギー k の過大生産を抑制するために、長野・服部らが提案する、標準 $k-\varepsilon$ モデルにおける渦粘性係数 ν_t を定義する時間スケール T の評価に対して改良を加えた乱流モデル^{26,27)}の解説をする。

長野・服部らは、前項で述べた (2-45) 式における時間スケール T を、エネルギー保有渦の時間スケール τ_u と平均流の速度こう配による時間スケール τ_s を調和平均した混合時間スケール τ_m を次式のように定義している。

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_u} + \frac{C_s}{\tau_s} \right) \tag{2-51}$$

$$\tau_u = \frac{k}{\varepsilon} \tag{2-52}$$

$$C_s = 0.4 \tag{2-53}$$

の定義により、長野らは以下の3種類のモデルを提案している。

(1) Sモデル

τ_s として、せん断歪や伸縮歪など変形の時間スケールを用いる。

$$\tau_s = \frac{1}{S} = \frac{1}{\sqrt{S_{ij}S_{ij}}} \quad (2-54)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (2-55)$$

(2) Ω モデル

τ_s として、渦運動（回転）の時間スケールを用いる。

$$\tau_s = \frac{1}{\Omega} = \frac{1}{\sqrt{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}} \quad (2-56)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (2-57)$$

(3) S- Ω モデル

τ_s として、 $1/S$ と $1/\Omega$ の時間スケールを調和平均した混合タイムスケールを用いる。

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{\Omega} \right) \quad (2-58)$$

整理すると

$$\tau_s = \left(\frac{2}{S + \Omega} \right) \quad (2-59)$$

(2-51)式より、

$$\tau_m = \frac{2}{1/\tau_u + C_s/\tau_s} = \frac{k}{\varepsilon} \left\{ \frac{2R_u}{R_u + C_s} \right\} \quad (2-60)$$

$$R_u = \tau_s/\tau_u \quad (2-61)$$

この τ_m より ν_t を評価すると、

$$\nu_t = C_\mu k \tau_m \quad (2-62)$$

長野、服部らの S モデルと Durbin モデルはともに(2-52)式から与えられる時間スケール τ_u と(2-54)式から与えられる時間スケール τ_s から乱流場の時間スケールを算出している点では同様である。S モデルは τ_u と τ_s の調和平均をとり((2-51)式)、Durbin モデルでは単純に両者の大小関係で時間スケールが切り替わる((2-50)式)。

2.9 室内拡散場と換気効率

建物の換気の性能は換気回数という指標を用いて示されてきた。これは室内の汚染質の完全混合（あるいは瞬時一様拡散）という状態を前提にした概念である。しかし、一般の室内気流に対して常に完全混合の仮定を用いることに無理があることは自明のことである。近年、実験技術や CFD (Computational Fluid Dynamics) 技術の発達で室内の速度分布の構造が解明されるようになり、それに伴って汚染質濃度分布の構造も詳細に把握することが可能になってきた。その結果、室内空気清浄度の評価のためには完全混合仮定ではなく、濃度分布を組み込んだ指標が必要であることが強く認識されるようになり、換気効率の概念や指標の開発とこれを実際の設計に反映させようとする機運が生まれてきた。

2.10 完全混合の仮定が適用しにくい流れ場と濃度場

(1) 室形状・換気方式が同じで汚染質発生位置が異なる場合

完全混合の仮定が適用しにくい流れ場・濃度場の例として図 2-4 に室形状・換気方式が同じで汚染質の発生位置が異なる場合を示す。

汚染質が点 A で発生した場合、汚染質は室下部に滞留し、汚染質の室内平均濃度はもっとも高くなる。汚染質が点 B で発生した場合、汚染質は室内に広く拡散すると共に排出も行われ、室内平均濃度は瞬時一様拡散濃度に近い。汚染質が点 C で発生した場合、発生汚染質は直後に吸入口より排出され、汚染質は室内に拡散せず、室内平均濃度は瞬時一様拡散濃度よりはるかに低くなる。

このように換気方式が同一でも汚染源の位置により室内濃度はまったく異なる。これが室内における汚染質の拡散予測と防除対策を困難にしている大きな理由の 1 つである。

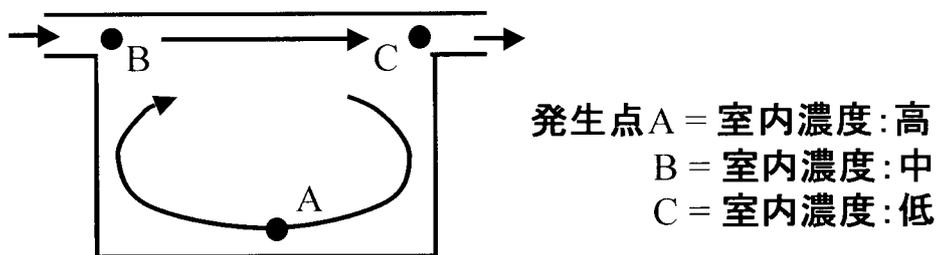


図 2-4 室形状・換気方式が同じで汚染質発生位置が異なる場合

(2) 汚染質発生位置が同じで換気方式が異なる場合

完全混合の仮定しにくい流れ場・濃度場の別の例として汚染質発生位置が同じで換気方式が異なる場合の例を図 2-5 に示す。同図に示すように汚染質発生位置が同じでも換気方式により室内濃度分布はまったく異なる。完全混合の仮定を適用することの不合理が容易に理解される。図 2-4 と図 2-5 の 2 つの例が示すように汚染質の輸送はもっぱら室内気流によってなされるので、室内空気汚染の解析を行うためには同時に室内気流の研究を進めることが不可欠である。

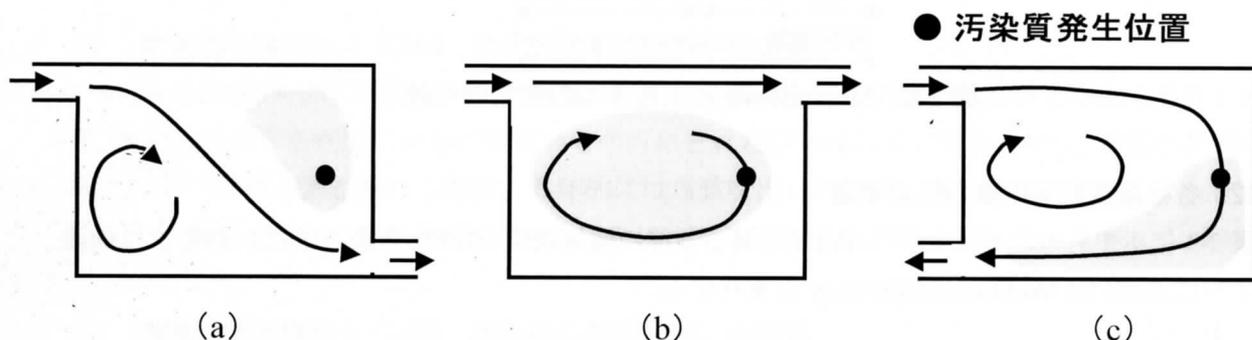


図 2-5 汚染質発生位置が同じで換気方式が異なる場合

- (a) 汚染質は部屋の右上半分に滞留する。
- (b) 汚染質は室全体に拡散され、上部のみが換気される。
- (c) 汚染質は比較的速やかに室外に排出される。

2.11 空気齢の概念

換気効率の有効性を説明するための出発点となった概念の 1 つに空気齢 (age of air) がある。空気齢とはスウェーデンの M.Sandberg らにより室内の換気性状を表す指標として導入された概念で、新鮮空気が吹出口から供給され、ある点に到達するまでの時間を示している。図 2-6 に示すように、吹出口から室内に流入した空気塊はさまざまな経路を辿って P 点に至る。空気齢とは各空気塊が点 P に到達する時間と到達確率密度関数の 1 次モーメント、すなわち平均到達時間を示す。

空気齢の概念の背景には「空気は一般に下流に行くほど汚れていくので、古い空気ほど汚染されている」という直感的発想を指摘することができる。

図 2-6 に示すように M.Sandberg は空気齢の概念のほかに、(1) 空間のある点を通過してから排出されるまでの空気の時間を示す空気余命 (residual life time of air)、(2) 吹出口から供給され、排出されるまでの時間を示す滞在時間 (residence time of air) などの重要な概念を提案している。

空気齢は換気性状、あるいは換気効率を評価する指標として、現在広く用いられている。

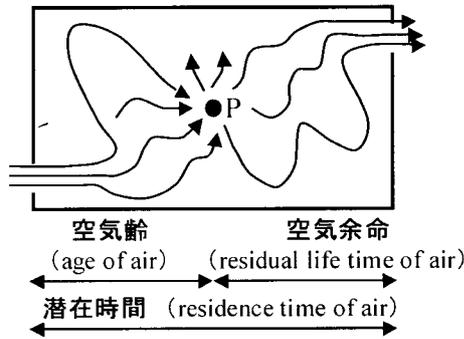


図 2-6 M.Sandberg による 3 つの空気の種類

2.12 各種換気効率指標 SVE_s の定義

表 2-3 に示すものは $SVE1$ から $SVE6$ に至る各種の換気効率の指標 SVE_s である。 SVE とは前述のように Scale for Ventilation Efficiency を意味する。

(1) 換気効率指標第 1 ($SVE1$; 汚染質の平均濃度) の定義

$SVE1$ は汚染質の平均濃度であり、その部屋に存在する汚染質の総量 (無次元) に対応する。その定義は、閉鎖空間内のある点 x_s で汚染質が q (kg/s) の速度で定常発生している状態を想定し、そのときの濃度分布の 0 次モーメント C_0 (室内の汚染質の総量 : kg) を、換気性状が瞬時一様拡散である場合の 0 次のモーメント C_s で基準化して示すものである。定義式を (2-63) 式に示す。定常状態では汚染質の発生量と排出量は等しい。したがって、汚染質の平均濃度の高低は発生汚染質が室内に滞在する平均的な時間の長短に対応する。この対応関係を以下で説明する。対象室の容積を V 、室内のある点 P での汚染質発生量を q 、その際の室平均濃度を C 、瞬時一様拡散濃度を C_s 、換気量を Q 、名目換気時間 (=換気回数の逆数) を τ とした場合、 $SVE1$ の定義に基づいて (2-63) 式 ($SVE1=T/\tau$) を導くことができる。

$$SVE1 = \frac{C \cdot V}{C_s \cdot V} = \frac{C \cdot V}{(q/Q) \cdot V} = \left(\frac{C \cdot V}{q} \right) \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{T}{\tau} \quad (2-63)$$

ここで、 τ ($=V/Q$) は名目換気時間、 T ($=C \cdot V/q$) は汚染源 P で発生した汚染質拡散場の特性時間を示している。すなわち汚染質の平均濃度 (汚染質の総量に対応) はその点で発生した汚染質の室内滞在時間 (無次元) にも対応する。

(2) 換気効率指標第 2 ($SVE2$; 汚染質の拡散半径) の定義

$SVE2$ は、(2-64) 式に示すように、閉鎖空間内のある点 x_s で発生した汚染質の拡散半径 [単位 m] を評価する。その定義は、汚染源 (点発生) に対応する濃度分布の 2 次モーメントを 0 次モーメントで基準化したものである。

(3) 換気効率指標第 3 (SVE3 ; 空気齢) の定義

SVE3 は室内の空気齢の分布を評価する。CFD 手法を用いる場合、汚染質の定常一様な発生を仮定し (室内に至る所で汚染質が同量で発生している状況)、その条件下で得られる濃度分布をそのまま空気齢に読み換えることにより得られる。定義式を (2-65) 式に示す。同式は点 x における SVE3 の値を示す。CFD によるこの算出方法は吹出空気が室内のある点に到達する時間が長いほど、その空気塊の汚染濃度が上昇するという直感的発想に基づいている。

(4) 換気効率指標第 4 (SVE4 ; 吹出口の勢力範囲) の定義

SVE4 は吹出口の勢力範囲を示す。複数の吹出口を備えた室においてある特定の点に着目したとき、検討対象とする吹出口からの気流がその点にどれだけ到達しているかを示す。定義式を (2-66) 式に示す。CFD 手法を用いる場合、具体的には当該吹出口において吹出気流にトレーサーを混入し、その条件下で室内濃度分布を求めることにより算出することができる。

(5) 換気効率指標第 5 (SVE5 ; 吸込口の勢力範囲) の定義

SVE5 は吸込口の勢力範囲を示し、SVE4 と対をなす指標である。複数の吸込口を備えた室において、検討対象とする吸込口を通して排出される空気の室内各点での分布状態を示す。定義式を (2-67) 式に示す。CFD 手法を利用する場合、まず流れ場を通常の方法で解き、次にこの流れ場の時間進行を逆転させ (流れ場のベクトルの方向を逆転させ、点対象の値にする)、吸込口から吹出口に向かう仮想的な流れ場を作成し、このベクトルを逆転させた流れ場の下で SVE4 を考えることにより SVE5 を得ることができる。

(f) 換気効率指標第 6 (SVE6 ; 空気余命) の定義

SVE6 は図 2-6 に示したように空気余命の分布を評価するもので、SVE3 と対をなす指標である。SVE3 が汚染質の室内一様な発生を仮定し、その条件下で得られる濃度分布をそのまま空気齢に読み換えるものであるのに対し、SVE6 は SVE4 に対する SVE5 の場合と同様に、時間進行を逆転させた仮想的な流れ場の下で、汚染質の室内一様な発生を仮定して求めた濃度分布に対応する。定義式を (2-68) 式に示す。同式は点 x における SVE6 の値を示す。

表 2-3 各種換気効率指標 SVE_s (Scale for Ventilation Efficiency)SVE1: 汚染質の室内平均濃度 (または滞在時間) (汚染源位置は x_s)

$$SVE1(x_s) = \frac{C_0(x_s)}{C_s \cdot V} \quad (2-63)$$

SVE2: 汚染質の拡散半径 (汚染源位置は x_s)

$$(SVE2(x_s))^2 = \frac{\int_{(x)} \{x - x_{G_i}(x_s)\}^2 \cdot C_x(x_s, x) dx}{C_0(x_s)} \quad (2-64)$$

SVE3: 室内の空気齢

$$SVE3(x) = \frac{C'_x(x)}{C_s} \quad (2-65)$$

SVE4: 吹出口の勢力範囲

$$SVE4(x) = \frac{C_x(x, n)}{C_0(n)} \quad (2-66)$$

SVE5: 吸込口の勢力範囲 (=時間進行を逆転した仮想的な流れ場の下でのSVE4に相当)

$$SVE5(x) = \frac{C'_x(x, n)}{C_0(n)} \quad (2-67)$$

SVE6: 空気余命 (=時間進行を逆転した仮想的な流れ場の下でのSVE3に相当)

$$SVE6(x) = \frac{C''_x(x)}{C_s} \quad (2-68)$$

ただし、

$$C_0(x_s) = \int_{(x)} C_x(x_s, x) dx \quad (2-69)$$

$$x_{G_i}(x_s) = \frac{\int_{(x)} x \cdot C_x(x_s, x) dx}{C_0(x_s)} \quad (2-70)$$

$$C_s = \frac{q}{Q} \quad (2-71)$$

$$C_0(n) = \frac{q}{Q(n)} \quad (2-72)$$

(記号 x_s : 汚染源位置、 V : 室容積[m³]、 q : 汚染質発生量[kg/s]、 Q : 換気量[m³/s]、 C_s : 瞬時一様拡散濃度[kg/m³]、 Q_n : n 番目の吹出口の吹出風量[m³/s]、 $C_0(x_s)$: 汚染源位置を x_s とした場合の濃度の室内積分値[kg]、 $C_x(x_s, x)$: x_s を汚染源位置とし、汚染質発生量を q 、換気量を Q とした場合の位置 x での濃度[kg/m³]、 $x_{G_i}(x_s)$: 汚染質濃度の室内分布の重心、 $C'_x(x)$: 室内一様に単位時間あたり総量 q の汚染質発生がある場合の位置 x での濃度[kg/m³]、 $C'_x(x, n)$: n 番の吹出口より q の汚染質発生がある場合の位置 x での濃度[kg/m³]、 $C_0(n)$: n 番の吹出口より q の汚染質発生がある場合の吹出気流の濃度[kg/m³]、 $C'_x(x, n)$: n 番吸込口濃度を $C_0(n)$ とした条件の下で、濃度輸送方程式を時間に関して逆方向に解いて得られる位置 x での濃度[kg/m³]、 $C''_x(x)$: 室内一様に単位時間あたり総量 q の汚染質発生がある場合の、濃度輸送方程式を時間に関して逆方向に解いて得られる位置 x での濃度[kg/m]、 n : 吹出口または吸込口番号。

2.13 粉塵拡散における粒径の影響

沈降を含む粉塵拡散に関する CFD 解析を行う場合に用いる、重力沈降の影響を考慮した浮遊微粒子の平均濃度に関する輸送方程式を (2-73) 式に示す。重力沈降は輸送方程式中 $-\partial(w_p \cdot C)/\partial z$ の形でモデル化されている。これはパッシブコンタミナントに比較して鉛直方向に重力沈降速度 w_p 分だけ速度が付加された流れ場における汚染質の拡散方程式を解くのに等しい。数値解析では $k-\varepsilon$ モデルと連成させてこの拡散方程式を解いている。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot C)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot C)}{\partial y} + \frac{\partial(w \cdot C)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_E \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_E \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_E \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ & \quad - \frac{\partial(w_p \cdot C)}{\partial z} + C_m \end{aligned} \quad (2-73)$$

(記号) C : 浮遊微粒子濃度 (平均値) [kg/m^3]、 u, v, w : x, y, z 方向の平均風速 [m/s]、 w_p : 浮遊微粒子の重力沈降速度 [m/s]、 v_E : 浮遊微粒子の渦拡散係数 (乱流場の渦動粘性係数 ν_t に同じと仮定) [m^2/s]、 C_m : 浮遊微粒子の発生速度 [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]

【付録 2 で使用した主な記号】

f	: 変数 f の瞬時値
$\langle f \rangle$: 変数 f のアンサンブル平均値
f'	: 変数 f の変動値 ($=f-\langle f \rangle$, アンサンブル平均値からのずれに対応)
$C_{p,1}$: モデル係数 [-]
C_{e1}	: モデル定数(=1.44)
C_{e2}	: モデル定数(=1.92)
C_{μ}	: モデル定数(=0.09)
D	: 水蒸気に関する分子拡散係数 [m^2/s]
D_k	: 乱流エネルギー k の輸送方程式中の拡散項 [m^2/s^3]
D_t	: 乱流水蒸気拡散係数 [m^2/s]
G_k	: 乱流エネルギー k の輸送方程式中の浮力生産項 [m^2/s^3]
k	: 乱流エネルギー [m^2/s^2]
l	: 乱流の特徴的な長さスケール [m]
l_m	: 混合距離 [m]
p	: 瞬時圧力 [Pa ($=\text{N}/\text{m}^2$)]
P_k	: 乱流エネルギー k の輸送方程式中の Reynolds 応力による生産項 [m^2/s^3]
q_w	: 絶対湿度 [kg/kg]
S_{ij}	: 変形速度テンソル [$1/\text{s}$]
t	: 時間 [s]
u_i	: 瞬時速度の 3 成分 [m/s]
U	: 乱流の特徴的な速度スケール [m/s]
x_i	: 空間座標の 3 成分 [m]
α	: 分子温度拡散係数 [m^2/s]
α_t	: 乱流温度拡散係数 [m^2/s]
β	: 体積膨張率 ($=1/(273+\theta_0)$) [$1/^\circ\text{C}$]
ε	: 粘性消散率 (乱流エネルギー k の輸送方程式中の散逸項) [m^2/s^3]
θ	: 瞬時温度 [$^\circ\text{C}$]
θ_0	: 代表温度 [$^\circ\text{C}$]
κ	: カルマン定数であり (0.40~0.45) [-]
ν	: 分子動粘性係数 [m^2/s]
ν_t	: 渦動粘性係数 [m^2/s]
ρ	: 空気密度 [kg/m^3]
σ_k	: モデル定数[-] (一般に1.0)
σ_ε	: モデル定数(=1.3)
Ω	: 渦度のスケール [$1/\text{s}$]

- C : 汚染質濃度 [kg/m^3]
 C_m : 浮遊微粒子の発生混入速度 [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]
 C_s : 瞬時一様拡散濃度 [kg/m^3]
 C_0 : 濃度の積分値 (室内の汚染質の総量) [kg]
 $C_0(n)$: n 番吹出口より q の汚染質発生がある場合の吹出気流濃度 [kg/m^3]
 $C_s(x_s, x)$: x_s を汚染源位置とし、汚染質発生量を q 、換気量を Q とした場合の位置 x での濃度 [kg/m^3]
 $C'_s(x, n)$: n 番の吹出口より q の汚染質発生がある場合の位置 x での濃度 [kg/m^3]
 $C''_s(x)$: 室内一様に単位時間当たり総量 q の汚染質発生がある場合の位置 x での濃度 [kg/m^3]
 $C''_s(x, n)$: n 番の吸込口濃度 $C_0(n)$ の条件で、濃度輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置 x での濃度 [kg/m^3]
 $C''_s(x)$: 室内一様に単位時間当たり総量 q の汚染質発生がある場合の、濃度輸送方程式を逆時間方向に解いて得られる位置 x での濃度 [kg/m^3]
 n : 吹出口もしくは吸込口番号
 q : 汚染質発生量 [kg/s]
 Q : 換気量 [m^3/s]
 Q_n : n 番目の吹出口の吹出風量 [m^3/s]
 SVE : 換気効率指標 (Scale for Ventilation Efficiency)
 u, v, w : 平均風速の3成分 (u : 主流方向、 v : 主流直角方向、 w : 鉛直方向) [m/s]
 V : 室容積 [m^3]
 w_p : 浮遊微粒子の重力沈降速度 [m/s]
 x, y, z : 空間座標の3成分 [m]
 x_s : 汚染源位置
 $x_c(x_s)$: 汚染質濃度の空間分布の重心
 τ : 名目換気時間 (=換気回数の逆数) [h]
 ν_E : 浮遊微粒子の渦拡散係数 (気流の渦動粘性係数 ν_l と同じと仮定) [m^2/s]
 ν_l : 渦動粘性係数 [m^2/s]

付録-2 参考文献

- 1) 村上周三、CFDによる建築・都市の環境設計工学、東京大学出版会、2000
- 2) 持田灯、建築・都市環境工学分野におけるCWE研究の最近の動向、日本風工学会誌、第86号、11-20、2001.1
- 3) Y. Hasemi、Numerical calculation of natural convection in fire compartment、BRI Research Paper、69、1977
- 4) 加藤信介、村上周三、義江龍一郎、鉛直加熱壁近傍の2次元層流解析－密度変化を伴う高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究(第1報)、日本建築学会計画系論文報告集、第419号、1993
- 5) 村上周三、持田灯、日比一喜、Large Eddy Simulationによる建物周辺気流の3次元解析(その1)－立方体まわりの流れの数値予測と風洞実験の比較－、日本建築学会論文報告集、第360号、1-11、1986. 2
- 6) 持田灯、村上周三、富永禎秀、小林光、Smagorinsky SGSモデルにおける標準型とDynamic型の比較－Dynamic LESによる2次元角柱まわりの乱流渦放出流れの解析(第1報)－、日本建築学会計画系論文集、第479号、41-47、1996. 1
- 7) 富永禎秀、持田灯、村上周三、飯塚悟、Dynamic Mixed SGSモデルの適用－Dynamic LESによる2次元角柱周辺流れの解析(第2報)－、日本建築学会計画系論文集、第492号、57-62、1997. 2
- 8) 富永禎秀、村上周三、持田灯、複合グリッドを用いたDynamic Mixed SGSモデルによる建物周辺のガス拡散のLES、日本建築学会計画系論文集、第496号、53-58、1997. 6
- 9) 飯塚悟、村上周三、持田灯、富永禎秀、小林光、K. D. Squires、Dynamic SmagorinskyモデルへのLagrangian型安定化手法の導入とその効果－Dynamic LESによる2次元角柱周辺流れの解析(第3報)－、日本建築学会計画系論文集、第511号、39-43、1998. 9
- 10) 大岡龍三、村上周三、持田灯、林吉彦、風洞実験及びLES、DSMとの比較によるASMの精度・問題点の検討－ASMによる立方体周辺の非等方乱流場の数値解析－、日本建築学会計画系論文集、第495号、61-68、1997.5
- 11) 大岡龍三、村上周三、持田灯、 $\langle u_i' u_j' \rangle$ 輸送方程式中の圧力歪相関項、wall reflection項、乱流拡散項に関する各種モデルの評価－応力方程式モデルによる立方体周辺気流の解析－、日本建築学会計画系論文集、第504号、55-61、1998.2
- 12) 村上周三、乱流解析、数値流体力学シリーズ3、乱流モデル(1)レイノルズ平均モデル(その1)：渦粘性型モデル(第2章)、乱流モデル(2)応力型方程式モデル(第3章)、東京大学出版会、1995
- 13) L. Prandtl、Uber die ausgebildete Turbulenz、ZAMM、4835839、1925
- 14) A. N. Kolomogorov、The equations of turbulent motion in an incompressible fluid、Izv. Acad. Sci. USSR、Phys.、6、53-55、1939

- 15) B. E. Launder and D. B. Spalding, *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, 1972
- 16) W. Rodi, *Turbulence models for environmental problems*, Prediction Methods of Turbulent Flows, Acon Karman Institute Book, 259-320, 1980
- 17) B. E. Launder and D. B. Spalding, *The numerical computation of turbulent flows*, *Comp. Method in Applied Mech. and Eng.*, 3, 269-289, 1974
- 18) P. Viollet, *The modeling turbulent recirculating flow for the purpose of reactor thermal-hydraulic analysis*, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 99, 365-377, 1987
- 19) 近藤宏二、村上周三、持田灯、改良 k - ϵ モデルによる 2 次元建物モデル周辺気流の数値計算、第 13 回風工学シンポジウム論文集、515 - 520、1994
- 20) 持田灯、村上周三、林吉彦、立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する k - ϵ モデルと LES の比較—乱流エネルギーの生産の構造とノルマルストレスの非等方性の再現に関して、日本建築学会計画系論文報告集、40-31、1991
- 21) B. E. Launder and M. Kato, *Modeling flow-induced oscillations in turbulent flow around a square cylinder*, *ASME Fluid Eng. Conf.*, 157, *Unsteady Flows*, 189-200, 1993
- 22) M. Kato and B. E. Launder, *The modeling of the turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders*, *Prep. of 9th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Kyoto 10-4, Japan, 1-58993
- 23) 近藤宏二、村上周三、持田灯、改良 k - ϵ モデルによる建物モデル周辺気流の数値計算、第 8 回数値流体力学シンポジウム講演論文集、333-3358994
- 24) 吉田伸治、村上周三、持田灯、大岡龍三、富永禎秀、Sangjin KIM、対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析、日本建築学会計画系論文集、第 529 号、77-83、2000.3
- 25) P.A.Durbin : *On the k-3 stagnation point anomaly*, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.17, No.1, 89-90、1996-2
- 26) 長野、服部、入門:乱流モデルによる複雑地形上の風況予測、日本機械学会熱工学講演会講演論文集、pp.75-76、2001
- 27) 宮沢、佐藤、服部、長野、乱流モデルによる衝突はく離・再付着を伴う流れの予測、第 15 回数値流体力学シンポジウム、C08-2、2001
- 28) 村上、加藤、B.E. Launder、鈴木、層流型クリーンルーム内の気流形状・汚染物質拡散性状に関する研究(その 6)床グレーチングの通風抵抗を考慮した新しい k - ϵ 型乱流モデルの提案、生産研究、vol.40、No.1、67-70、1988.1
- 29) 平岡、丸山、中村、桂、植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究(その 1)乱流モデルの作成、日本建築学会計画系論文報告集、第 416 号、1-8、1989.12
- 30) 平岡、丸山、中村、桂、植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究(その 2)実験データとの比較によるモデルの検証、日本建築学会計画系論文報告集、第 416 号、1-8、1990.10

- 31) 大橋、住宅地における樹木の風環境調節効果に関する研究、1992.11
- 32) 神山、成田、大橋、樹木の抵抗係数に関する風洞実験(その 1)樹種および気流の違いによる比較、日本建築学会大会学術講演集、521-522、1999.9
- 33) 大橋、神山、成田、樹木の抵抗係数に関する風洞実験(その 2)抵抗係数の算出と数値シミュレーション日本建築学会大会学術梗概集、523-524、1999.9
- 34) Wilson,N.R.、Shaw,R.H.、A higher order closure model for canopy flow、Journal of Applied Meteorology、vol.16、1197-1025、1977
- 35) 丸山、粗度要素の抵抗及び体積変化を考慮した $k-\epsilon$ モデルによる乱流境界層の数値計算、日本建築学会構造系論文集、第 404 号、75-82、1989.10
- 36) 丸山、乱流境界層風洞の数値シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第 437 号、135-141、1992.7
- 37) T.Yamada、A Numerical Model Study of Turbulent Airflow In and Above a Forest Canopy、Journal of Applied Meteorology、vol.60、No.1、439-454、1982.2
- 38) 吉田、村上、持田、大岡、富永、金、対流・放射・湿気輸送連成解析による屋外環境共生空間の研究(その 4)環境緩和効果を総合的に組み込んだ新しい 3 次元樹木モデルの開発、空気調和・衛生工学学術講演会講演論文集、1-4、1998.8
- 39) Uno,I 他、Numerical Modeling of the Urban Boundary Layers、Boundary-Layer Meteorol.49、pp77-98
- 40) 大橋、樹木模型周辺の気流分布に関する風洞実験、建築学会大会、1996.6
- 41) 加藤、持田、吉野、村上、樹木 Canopy 内外の気流分布の数値予測、日本流体力学会 年会 2002
- 42) 村上周三、加藤信介、新たな換気効率指標と 3 次元乱流数値シミュレーションによる算出法、換気効率の評価モデルに関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、1986
- 43) 村上周三、室内化学物質空気汚染の対策—特に室内環境のモデリングとシミュレーション、室内環境学会、1998
- 44) HASS102-1997、換気規準・同解説、空気調和・衛生工学、1997
- 45) S.Kato and S.Murakami、New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation、ASHRAE Transaction 1988
- 46) M.Sandberg and M.Sjoberg、The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms、Building and Environment、1983
- 47) 小林光、村上周三、加藤信介、不完全混合室内における局所領域の換気効率の同定に関する研究(その 1)、室内における空調吹出口と排気口の勢力範囲の同定、建築学会年次大会、1992
- 48) 村上周三、加藤信介、小林光、不完全混合室内における局所領域の換気効率の同定に関する研究(その 2)、吹出、吸込口の環境形成影響度と空気余命に関する新たな換気効率指標の提案、空気調和・衛生工学会講演会論文集、1992

- 49) 村上周三、加藤信介、須山喜美、コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流形状に関する研究、第 1 報、数値シミュレーションと模型実験の対応および基本的な室形状における流れ場・拡散場の解析、空気調和・衛生工学会論文集、37、1988
- 50) 村上周三、加藤信介、須山喜美、コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流形状に関する研究、第 2 報、数値シミュレーションによる室内拡散場の詳細な検討、空気調和・衛生工学会論文集、37、1988
- 51) 伊東一秀、加藤信介、村上周三、平均拡散場解析による Visitation Frequency、Purging Flow Rate の解析、不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究、日本建築学会計画系論文集、529、2000
- 52) 吉野博、持田灯、掛川敏正、三田村輝章、佐々木澄、実測と数値シミュレーションに基づく大空間の換気性状と結露メカニズムの解析、空気調和・衛生工学会論文集、88、2003
- 53) M. Sandberg、Ventilation effectiveness and purging flow rate—A Review、ASHRAE、Room Air Convection and Ventilation Effectiveness、1992
- 54) 伊東一秀、村上周三、加藤信介、小林光、不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究（その 2）、流れ場・濃度場の予備 CFD 解析と居住域 PFR の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996
- 55) 伊東一秀、村上周三、加藤信介、小林光、不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究（その 4）、CFD 解析による居住域平均濃度・PFR の検討、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、1996
- 56) 伊東一秀、村上周三、加藤信介、小林光、不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究（その 9）、Visitation Frequency、Purging Flow Rate による局所領域換気効率の評価、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、1997
- 57) 伊東一秀、村上周三、加藤信介、小林光、富永禎秀、不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究（その 8）、Particle Tracing による Visitation Frequency、PFR の解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1997

謝 辞

本成果報告書をまとめるにあたり、誠に多くの方々の御協力、御指導を賜りました。ここに、謹んで感謝の意を表します。

平成 20 年 5 月
研究代表者 吉野 博

本研究に携わった主要な関係者は以下の通りである。(敬称略)

東北大学

吉野 博	持田 灯	佐藤 洋	佐々木 耕一
高木 理恵	李 重勲	尹 星勲	Jacques Ndione
和田 淳	江戸 千恵子	鈴木 憲高	足立 真弓
三原 邦彰	藤川 光利	吉田 真理子	中村 安季
安藤 直也	天野 健太郎	飯田 望	松本 麻里
瀧原 直也	和田 浩行		

宮城工業高等専門学校

内海 康雄 小林 仁

国立保健医療科学院

池田 耕一

東北文化学園大学

野崎 淳夫 橋本 康弘

足利工業大学

三田村 輝章

清水建設株式会社

奥山 博康

宮城学院女子大学

林 基哉

岩手県立大学

本間 義規

宮城教育大学

菅原 正則

アトム建築環境工学研究所

岩岡 重樹 山崎 尚