

	こばやし	ひろし		
氏名	小林	仁		
授与学位	博士	(工学)		
学位授与年月日	平成9年	3月	25日	
学位授与の根拠法規	学位規則	第4条	第1項	
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科	(博士課程)	建築学専攻	
学位論文題目	空気齢による換気システムの性能評価法に関する研究			
指導教官	東北大学教授	吉野	博	
論文審査員	主査	東北大学教授	吉野	博
		東北大学教授	伊藤	邦明
		東北大学教授	菅野	實
		東北大学助教授	松本	真一

## 論文内容要旨

近年、少ないエネルギーで快適な住環境性を実現するため、寒冷地を中心に事務所建築や住宅の気密化が進んでいる。しかし、気密化された建物では、隙間からの自然換気(漏気)量が少なく、室内空気汚染の問題が顕在化している。この問題に対処するため、各種の換気システムが提案され実用化に移されているが、設置された換気システムが計画通り機能し、外気が各室へ適切に分配されているかどうかは不明である。この点を明らかにするためには、従来のような各部の風量測定やトレーサーガスを用いた多数室の換気量測定だけでは不十分であり、気流分布を考慮に入れた空気齢の概念に基づく測定を行う必要がある。なお、空気齢とは外気が吹出口より室内へ導入されてから各測定点まで到達するのに要する時間の平均値として定義され、空気齢が若い(小さい)点ほど外気の到達は速く、その点での空気は清浄に維持されやすいといえる。

空気齢に関する研究は1940年代より北欧や北米を中心に各国で行われてきており、実在建物の換気性能評価も試みられている。しかし、これらの研究で用いられている測定法や評価法は、換気システムを備えた単室を対象としており、隙間が小さく漏気の影響が無視できる空間を前提としている。そのため、換気システムまで含めた実在建築物の換気性能評価に空気齢を拡張して用いる場合には、この方法が適切かどうか検討する必要がある。

本研究では、①測定法に関する基礎事項について検討した上で、②実在建物の換気性能に影響を及ぼす要因と空気交換効率(各点での空気齢を排気口の値で基準化)との関係について明らかにするとともに、③実在建物を対象とした換気性能の測定法及び評価法を提案する上で必要となる基礎資料の蓄積を行う。さらに、これらの結果を基に、④実在建物を念頭においた現場での測定法と評価法に関する基本的な事項をまとめる。測定は、トレーサーガスとしてCO<sub>2</sub>とSF<sub>6</sub>を用い、導入外気をガスで色づけするステップアップ法(SU法)

や、屋内空気を色づけするステップダウン法(SU法の終了後に濃度分布がある状態で行うSD法と、濃度分布がない状態で行うMD法)で行う。測定対象は、①3室模型、②試験住宅、③実在住宅6戸、④実在大空間オフィスである。

## 1章 序論

上に述べた研究の背景、研究の目的について述べている。また、1章では、本研究に関連する既往の研究について概説するとともに、空気齢に関する従来の評価指標について整理した。さらに、多数室を対象とした評価指標及び漏気(漏入や漏出)に対する評価指標を新たに提案し、研究方法を示してこの章を締めくくっている。

## 2章 3室模型による空気交換効率の測定法に関する基礎的検討

2章では、縮尺1/3の3室模型を用い、外乱の影響がない状態で単純な換気経路での実験を行った。実験の目的は、①測定法に関する基礎事項の検討、②換気量や再循環空気量が空気交換効率に与える影響の検討、③各室完全混合を仮定した層列モデルでの計算結果と実験結果の比較による短絡の検討である。本章で得られた主な知見は次の通りである。

- 1)空気循環がない場合では測定の再現性がほぼ確認された。一方、空気循環がある場合でも再現性は認められたが、空気循環がない場合に比べて結果にばらつきが認められた。
- 2)SU法とMD法で同様の測定結果が得られ、2つの方法での差はないといえる。
- 3)空気循環がない場合には換気量の増加に伴い空気交換効率は低下し、換気量が30[l/h]を超えると一定の値に近づいた。この原因として室内での給気口と排気口の間での短絡があげられる。
- 4)模型内での空気交換効率は、空気循環量の増加に伴って、全体として完全混合の場合に近い値へと変化した。
- 5)空気循環のない場合、換気量の増加にともない、短絡が生じている可能性は高まった。また、空気循環量の少ない条件では短絡の生じている可能性は高いが、空気循環量の増加にともないその可能性は減少した。

## 3章 試験住宅における換気システムに関する空気交換効率の検討

4室から構成される実大試験住宅を用い、外乱の影響がある状態で単純な換気経路での測定を行った。

測定の目的は、①測定に関する基礎事項の検討、②換気システムや換気量が空気交換効率に与える影響の検討、③漏気が空気齢の測定に与える影響を明らかにすることである。

なお、換気システムとしては、① 1 種方式、② 1 種 R 方式(再循環空気有)、③ 3 種方式を対象としている。本章で得られた主な知見は、次の通りである。

- 1)SD 法(給気のみ評価)と MD 法(給気と漏気を併せて評価)では測定の再現性がみられた。しかし、SU 法(給気のみ評価)では、機械換気量が小さくなるにつれて再現性が乏しくなった。これは、機械換気量が小さい場合には外部風の影響が大きく、定常時の濃度に変化したことが原因と考えられる。
- 2)SU 法と SD 法の間では、±20%程度の差はあるが、全体としてはほぼ同一の値を示した。また、SD 法と MD 法を比べると、MD 法の方が空気齢は小さく、その傾向は機械換気量が小さい場合に強かった。これは、機械換気量が小さい場合には隙間からの漏入外気の影響が大きくなるからである。
- 3)3 種類の換気システムを用いて、また 3 通りの換気経路を設定して空気齢を測定した結果、外気の各室への分配状況は予想されたような状況となり、換気システムの性能を評価する上で空気齢を測定することは有用であるといえる。
- 4)1 種方式を対象に、SU 法と MD 法の同時測定を行った結果、外部風が大きい場合には漏気に対する空気齢は相対的に小さくなり、漏気の空気齢を実験的に求めることができた。
- 5)1 種方式では、屋内空気のうちで排気口から排出される割合(排出負担率)は約 93%であり、漏出空気が空気交換効率に与える影響は小さかった。

#### 4 章 各種換気システムを備えた実在住宅 6 戸における換気性能評価

本章では実在住宅を対象とした空気齢に関する測定を行っている。測定の目的は、①測定の再現性や間仕切扉の状態が空気交換効率に与える影響の検討、②実在住宅を対象とした空気齢に基づく換気性能の評価法を提案する上で必要となる資料の蓄積である。測定対象は、各種換気システムを備えた気密化住宅 6 戸(1 種 R 方式の 2 戸、2 階から 1 階への換気経路を持つ 1 戸、3 種方式の 2 戸、1 種と 3 種換気の切替可能な住戸 1 戸)である。本章で得られた主な知見は、次の通りである。

- 1)住宅 2 戸での SU 法と SD 法の結果に差が認められた。この原因として、外部環境の影響により SU 法と SD 法の測定期間で漏気量が異なることがあげられる。
- 2)間仕切扉を開とした条件での空気齢は、閉の場合よりばらつきは小さく、外気は各室へ均一に分配されると推定された。
- 3)1 種 R 方式の 2 戸での空気交換効率にばらつきは小さく、外気は各室へ均一に分配されると推定された。また 2 階から 1 階への換気経路を持つ 1 戸での空気交換効率は、2 階の方が、1 階より大きく、2 階から 1 階へ空気が流れている様子が窺えた。一方、3 種方式の 3 戸での空気交換効率にばらつきは大きかった。特に、給気口で逆流が認められた室での空気交換効率は大きく、各点での平均空気齢(濃度曲線の一次モーメント)は空気

齡より小さいこと(風上側の空気が押流されてくる)から、外気は他室に行渡った後、この室へ流れ込むと推定された。以上より、室内への外気分配状況が空気齡の測定により捉えられている。

## 5章 大空間オフィスにおける水平方向ディスプレイメント換気方式の性能評価

建物は東西に細長く、東より給気し西より排気する水平方向のディスプレイメント換気を意図している。本章の目的は、①測定に関する基礎事項の検討、②換気性能の評価、③換気システムの使用状況、暖房の使用状況及び漏出空気が空気交換効率に与える影響の検討、④実在大空間建物を対象とした空気齡に基づく換気性能の評価法を提案する上で必要となる資料の蓄積である。本章で得られた主な知見は次の通りである。

- 1)2回のCO<sub>2</sub>を用いたMD法での空気齡は、測定時の室内外温度差が小さい条件の間では1.1倍と小さく、再現性は認められた。
- 2)連続的に測定したSF<sub>6</sub>を用いたSU法とSD法での空気齡の間に違いは殆どなく、測定方法による結果の差異は小さかった。
- 3)同時に測定したCO<sub>2</sub>を用いたMD法とSF<sub>6</sub>を用いたSU法での空気齡の間に最大57%の差が生じた。この原因として、MD法では測定開始時に濃度分布が認められること等があげられる。
- 4)空気齡は、全体的に給気口のある東側壁面から排気口のある西側に向かうにつれて大きくなり、給排気ダクトによって東側から西側へ空気が流れている様子が確認できた。これより、設計時に意図した通りの換気が実現できているといえる。
- 5)給排気ダクト内のダンパー全開の場合と比較して、半開の場合の各点での濃度減衰は緩やかであり、空気齡は全体的に5min程度大きい。
- 6)CO<sub>2</sub>を用いたMD法での空気齡は、測定時に室内外温度差が25℃と大きい条件の間で平均1.2倍の差が認められた。
- 7)各部ダクトの排出負担率と各ダクトの風量を給気総量で除した値とはほぼ等しく、給気口と排気口の間での短絡はないと推定された。但し、ダンパー半開の条件では隙間からの排出負担率が相対的に大きかった(44%)。

## 6章 空気齡による実在建物の換気システムの性能評価

本章では、2～5章での測定結果を基に、実在住宅やオフィスを念頭においた現場での空気齡に基づく測定法と評価法に関する基本的な事項を解説した。その結果をまとめる。

- 1)空気齡を測定する際に予め必要な情報は、①建物の容積、②建物の気密性能、③換気システムの風量である。

- 2)空気齢を測定するときに環境条件として必要な情報は、①室内外温度、②外部風向・風速、③室内外差圧である。
- 3)トレーサーガスによる空気齢の測定法には、SU法、SD法、MD法、パルス法等がある。SU法、SD法及びパルス法では、給気口より導入された外気の室内への供給状態が評価できるのに対し、MD法では、給気ダクト以外の建物の隙間から漏入する外気も含めた、全ての外気の室内への供給状態が評価できる。
- 4)測定を行う際に留意する点は、①測定位置、②測定間隔、③測定条件、④再現性や測定機器である。
- 5)各点での空気齢の大小から室内への外気の供給され方を明らかにし、計画された換気経路と照合することにより、換気性能の評価を行うことができた。また、複数の住宅の換気性能を比較する場合には、空気交換効率や室空気交換効率(空気交換効率の室内での平均)を用いて比較する。
- 6)排気口での空気齢や名目換気時間(換気回数の逆数)が正確に求められない場合には、各点での平均空気齢による評価が有効である。
- 7)隙間からの漏気が無視できない場合には、外気漏入率や排出負担率等を用いて給排気量と漏気量の割合を検討する必要がある。また、SU法とMD法の測定を同時に行い、漏気に対する空気齢をそれぞれ求め評価することが望ましい。

## 7章 結 論

以上を総括し、今後の展望を述べている。

## 審査結果の要旨

気密化された建物では、隙間からの自然換気は少なく、室内空気が汚染されやすいため、換気システムを設け適正な換気を行うことが重要となる。設置された換気システムが計画通り機能し、適切に換気されているか評価するには、従来のような給排気量測定や多数室換気測定だけでは不十分であり、気流分布を考慮した空気齢の概念に基づく測定を行う必要がある。本論文では、実在建物を対象とした空気齢に基づく測定を行い、測定法や評価法に関する基本的な事項について纏めたものであり、7章から成る。

1章は序論である。ここでは、空気齢を実在住宅の評価に拡張して用いる際に問題となる、多数室としての評価法や測定への漏気の影響について検討するとともに、新たな評価指標を提案している。

2章では、縮尺1/3の3室模型を用い、外乱の影響がない状態で単純な換気経路での実験を行っている。換気量の増加にともない空気交換効率低下し、換気量が30[1/h]を超えると一定の値に近づくことや、空気循環量の増加にともない、空気交換効率は全体として完全混合の場合に近い値となることを示している。

3章では、4室から構成される実大試験住宅を用い、外乱の影響がある状態で単純な換気経路での測定を行っている。3種類の換気システム、3通りの換気経路を設定して空気齢を測定した結果、外気の各室への分配状況は予想された通りとなり、換気性能を評価する上で空気齢の有用性を示している。また、ステップアップ法とステップダウン法の同時測定を行った結果、外部風が大きい条件での漏気空気齢は相対的に小さくなることが求められた。これは、測定に対する漏入外気の影響を検討する上で興味ある知見である。

4章では、実在住宅を対象に空気齢に関する測定を行っている。空気齢に基づく測定より、各種換気方式の特徴を捉えているとともに、空気齢が特に大きく換気の問題がある室を明らかにしている。これは、空気齢による評価の有用性を示す上で重要な成果である。

5章では、東側から西側へと換気する水平方向のディスプレイメント換気方式を持つ大空間オフィスを対象に測定を行っている。空気齢は、全体的に給気口のある東側壁面から排気口のある西側に向かうにつれて大きくなり、給排気ダクトによって東側から西側へ空気が流れる様子が確認されている。又、日常の使用状態での隙間の排出負担率は相対的に大きい(44%)ことを捉えている。

6章では、2～5章での測定結果を基に、実在住宅やオフィスを念頭においた現場での空気齢に基づく測定法と評価法に関する基本的な事項について解説した。これらの項目は、空気齢により換気性能を評価する上で有用な成果である。

7章は結論である。

以上要するに本論文は、多数室における空気齢に基づく換気性能の評価法及び、空気齢の測定法に対する漏気の影響について考慮した上で、実在建物を対象とした現場での測定法と評価法に関する基本事項を纏めたもので、建築環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。