

数値計算と実験計測を融合した 流れの解析手法の創成

(研究課題番号 10650157)

平成10年度～平成11年度科学研究費補助金
(基盤研究C)の研究成果報告書

平成12年3月

研究代表者 早瀬敏幸
(東北大学流体科学研究所助教授)

数値計算と実験計測を融合した 流れの解析手法の創成

(研究課題番号 10650157)

平成10年度～平成11年度科学研究費補助金
(基盤研究C) 研究成果報告書

平成12年3月

研究代表者 早瀬敏幸
(東北大学流体科学研究所助教授)

東北大学図書



00010177024

附属図書館

目 次

はしがき	1
研究組織	1
研究経費	1
研究の目的と経緯	2
研究発表	4
学会誌等	4
口頭発表	6
研究成果	9
オブザーバを応用した流れ場の仮想計測	10
Feedback Control of Turbulent Flow Field Using State Observer	18
Monotonic Convergence Property of Turbulent Flow Solution with Central Difference and QUICK Schemes	22
Numerical Analysis for Stability and Self-Excited Oscillation in Collapsible Tube Flow	30
Dynamic Characteristics of Collapsible Tube Flow	38
むすび	46

はしがき

本研究報告書は文部省科学研究費補助金基盤研究（C）(2)「数値計算と実験計測を融合した流れの解析手法の創成」（平成10、11年度）の研究成果をまとめたものである。流れの解析手法としては、数値計算と実験計測が代表的であるが、数値計算では、流れ場全体の構造が理解できる利点を持つものの、計算結果が数学モデルに依存するため、解の精度の評価が困難で、また、工学的に重要な複雑な流れ場の解析には、現在の最高性能の計算機を用いても、十分とは言えないなどの欠点がある。一方、実験計測では、解の精度の評価は比較的容易であるが、流れ場全体の情報を得ることは困難である。このため、数値計算と実験計測を融合した新しい流れ場の解析手法を創生し、これまで解析が困難であった複雑な流れ場の解析を可能とするための研究を行った。

制御工学においてシステムの数学モデルと測定データから制御対象の状態量をリアルタイムに求めるオブザーバの概念を、流れの数値解析に応用することにより、流れ場のオブザーバを構成した。すなわち、実験により得られた測定データと数値計算結果の差異を数値計算の境界条件あるいは外力項にフィードバックすることにより、数値計算結果を実際の流れ場に漸近的に収束させる。この流れ場のオブザーバの有効性を数値解析により検証するとともに、乱流場のフィードバック制御への応用について検討した。また、基礎となる数値解析手法の格子収束性の検討や、弾性管路と流れ場が相互干渉する複雑な流れ場への応用のための基礎的検討も行った。

最後に、本研究についてご理解とご協力を賜った関係各位に深甚なる謝意を表す。

平成12年3月
研究代表者

研究組織

研究代表者 : 早瀬敏幸 (東北大学流体科学研究所・助教授)
研究分担者 : 林 颯 (東北大学流体科学研究所・教授)

研究経費

平成10年度	1,800千円
平成11年度	1,200千円
計	3,000千円

研究の目的と経緯

流れに関わる諸現象を解明する手段として、数値計算と実験は基本的な役割を果たしている。しかし、工学的に重要な複雑な流れ場に関しては、現在の最高性能の計算機を用いても、計算時間とメモリ容量の制約から、流れを正確に再現することは困難であり、一方、実験的手法によっても、測定点数などの制約から、非定常、3次元の流れ場を正確に把握することは困難である。本研究は、数値計算と実験を融合した流れ場の解析手法を創成し、従来、数値計算と実験を独立に行った場合には解析が困難であった複雑な流れ場に対する問題解決の手段を与えることを目的とする。

本研究の目的である、数値計算と実験とを融合した流れ場の解析手法は、実験によって測定された流れ場の各時刻のデータを、非定常数値計算の境界条件または外力項へフィードバックすることにより、数値計算結果を実際の流れ場に漸近的に収束させるものである。本解析手法の特徴としては、実測データのフィードバックをもたない従来の数値計算では原理的に不可能であった、乱流場の速度変動等の正確な再現が可能となること、また、実測データのフィードバックによる、数値計算精度の大幅な向上が期待できることなどがあげられる。なお、類似の解析手法として、系の線形近似モデルによるカルマンフィルタによる推定手法があるが、本解析手法はナビエ・ストークス式を数学モデルとし、境界条件・外力項を入力としているため、前者のように厳密な理論的取り扱いはできないものの、物理的考察に基づくフィードバックを実現することが可能である。

近年、流体力学的な最適形状の決定に関する問題を、流れの数値計算と最適化手法との組みあわせにより解決する試みがなされているが、原理的に膨大な数値計算を必要とするため、単純な問題にしか適用できないのが現状である。工学的に重要な、複雑な流れの最適化問題に関して、数値計算と実験を有機的に結び付けることによる解決の可能性は従来から指摘されており、その具体的な手法の確立が望まれていた。本研究で対象とする解析手法は、この問題に対する1つの解決手段を与えるものである。

乱流の能動制御による、移動物体の抵抗低減に関する研究が国内外で盛んに行われている。制御の効果の点から見ると、流れ場の状態に応じた制御入力を加えるフィードバック制御が最も優れていることが知られているが、そのためには、物体周りの乱流場の各時刻での情報が必要となる。本研究の手法を用いることにより、物体表面に多数のセンサを設置する必要がなく、またセンサの設置が困難な位置での流れ場の情報をフィードバックすることも可能となるため、流れ場の制御系における仮想的なセンサとして用いられることが期待される。

本研究で対象とする解析手法は、制御理論における「オブザーバ」の概念を、流体力学の問題に拡張したものである。制御理論の分野では、流れ場のような無限次元の非線形系におけるオブザーバ理論構築に関する研究が盛んに行われているが、現状で

は実現されていない。本研究は、流れの数値解析手法を数学モデルとして用い、流れのもつ物理的性質に基づいたフィードバック則を与えることにより、オブザーバを構成しようとするものであるが、これは、流れ場のオブザーバの一般理論を構築するための基礎的知見を与えるものである。

研究発表

学会誌等

早瀬敏幸

1. 早瀬敏幸, 林 叡, 小嶋和法, 油圧サーボ系に発生するマイクロスティックスリップ振動の非線形制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻, 619 号, 1998, pp. 772-779.
2. 早瀬敏幸, 夏 統鵬, 林 叡, スプール弁内の非定常流に関する数値解析 (高レイノルズ数域での動特性のモデル化), 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 619 号, 1998, pp. 724-731.
3. 早瀬敏幸, 石澤一裕, 林叡, 飯村彥郎, 可変コンプライアンス特性を有する油圧サーボ系に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻, 621 号, 1998, pp. 1588-1595.
4. 夏統鵬, 早瀬敏幸, 林叡, 濱谷剛, コラプシブルチューブ変形の 3 次元数値解析に基づいた 1 次元モデルの妥当性, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻, 630 号, 1999, pp. 497-504.
5. Toshiyuki Hayase, Monotonic Convergence Property of Turbulent Flow Solution with Central Difference and QUICK Schemes, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 121, No. 2, 1999, pp. 351-358.
6. 夏統鵬, 早瀬敏幸, 林叡, 濱谷剛, コラプシブルチューブの自励振動におけるチューブの軸方向初期ひずみの影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻, 638 号, 1999, pp. 3352-3358.

林 叡

1. 林 叡, 早瀬敏幸, 三浦雄司, 飯村彥郎, コラプシブルチューブ内流れの動特性に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 620 号, 1998, pp. 1055-1062.
2. Satoru Hayashi, Toshiyuki Hayase and Hiroshi Kawamura, Numerical Analysis for Stability and Self-Excited Oscillation in Collapsible Tube Flow, Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 120, No. , 1998, pp. 468-475.
3. Weimin Wang, Satoru Hayashi, Toshiyuki Hayase and Atsushi Shirai, Local Stability of a Direct-Acting Poppet Valve Circuit with a Long Pipeline, 日本油空圧学会論文集, 30 巻, 3 号, 1999, pp. 67-74.
4. 白井 敦, 林 叡, 早瀬敏幸, 王 偉民, 直動型ポペット弁回路の固有値解析, 日本油空圧学会論文集, 30 巻, 3 号, 1999, pp. 75-80.

5. 王 偉民, 林 叡, 早瀬敏幸, 白井 敦, 直動型ポペット弁回路に発生するカオス振動(長い管路の場合), 日本油空圧学会論文集, 30 巻, 5 号, 1999, pp. 119-127.
6. Satoru Hayashi, Toshiyuki Hayase, Yuji Miura and Ikuro Iimura, Dynamic Characteristics of Collapsible Tube Flow, JSME International Journal, Ser. C, Vol. 42, No. 3, 1999, pp. 689-696.

口頭発表

早瀬敏幸

1. 夏毓鵬, 早瀬敏幸, 林叡, コラプシブルチューブのモデル化に関する研究, 日本機械学会東北支部第 33 期総会・講演会講演論文集, No. 981-1 巻, 1998, pp. 81-82.
2. 夏 毓鵬, 早瀬敏幸, 林 叡, 1 次元ベンディングモデルによるコラプシブルチューブ自励振動の数値解析, 日本機械学会第 9 回バイオエンジニアリング学術講演会・夏季セミナー講演論文集, 1998, pp. 81-82.
3. Toshiyuki Hayase and Satoru Hayashi, Feedback Control of Turbulent Flow Field Using State Observer, Proceedings of 2nd Japan-France Seminar on Intelligent Materials and Structures, 1998, pp. 24-27.
4. 早瀬敏幸, オブザーバを用いた管内乱流のフィードバック制御の数値実験, 第 30 回乱流シンポジウム講演論文集, 1998, pp. 231-232.
5. Yupeng Xia, Toshiyuki Hayase and Satoru Hayashi, Verification of One-Dimensional Collapsible Tube Models Based on Three-Dimensional Calculation of Tube Deformation, Proceedings of the Fifth Japan-USA-Singapore-China Conference on Biomechanics, 1998, pp. 82-83.
6. Hideo Nirasawa, Toshiyuki Hayase and Satoru Hayashi, Numerical Analysis of Stochastic Red Blood Cell Motion in Capillaries, Proceedings of the Fifth Japan-USA-Singapore-China Conference on Biomechanics, 1998, pp. 40-41.
7. 早瀬敏幸, 林 叡, オブザーバを用いた管内乱流のフィードバック制御 (サンプリングタイムの影響), 日本機械学会全国大会講演論文集, 3 巻, 1998, pp. 293-294.
8. 早瀬 敏幸, オブザーバを応用した流れ場の仮想計測, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会シンポジウム「計測とシミュレーション技術」講演論文集, 1998, pp. 33-40.
9. 葦澤英夫, 早瀬敏幸, 林 叡, 赤血球の確率的な流れに関する数値解析, 日本機械学会全国大会講演論文集, 2 巻, 1998, pp. 201-202.
10. 早瀬敏幸, 林 叡, オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御, 計測自動制御学会第 13 回流体制御シンポジウム講演論文集, 1998, pp. 12-16.
11. 早瀬敏幸, 仁杉圭延, オブザーバを用いた乱流のフィードバック制御の数値実験における制御対象のモデル化の影響, 第 12 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1998, pp. 459-460.
12. 葦澤英夫, 早瀬敏幸, 林叡, 白井敦, 微小循環における赤血球の確率的な流れに関する数値解析(確率密度の影響), 日本機械学会第 11 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 1999, pp. 398-399.

13. 早瀬敏幸, 夏 毓鵬, 林 叡, スプール弁内流れの数値解析における差分精度の影響, 日本油空圧学会春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, 1999, pp. 115-117.
14. 仁杉圭延, 早瀬敏幸, 白井 敦、林 叡, フィードバック制御による車両空力抵抗の低減に関する数値解析, 計測自動制御学会第 38 回学術講演会予稿集, 2 巻, 1999, pp. 543-544.
15. 早瀬敏幸, 中川忠, 林叡, 山口隆平, 直角分岐管内流れの数値解析 (枝管部における 2 次流れ構造), 日本機械学会年次大会講演論文集, 2 巻, 1999, pp. 265-266.
16. 早瀬敏幸, 中川忠, 林叡, 山口隆平, 直角分岐管内流れの数値解析 (枝管部における 2 次流れ構造), 日本機械学会第 10 回バイオエンジニアリング学術講演会・秋季セミナー講演論文集, 1999, pp. 49-50.
17. 早瀬 敏幸, 仁杉 圭延, 牧野芳和, 白井 敦, 林 叡, スーパーコンピュータと実験計測を統合したハイブリッド風洞に関する基礎的研究 (基本構造の検討), 計測自動制御学会東北支部 35 周年記念学術講演会予稿集, 1999, pp. 29-30.
18. 早瀬敏幸, 夏 毓鵬, J. A. C. Humphrey, 乱流場のフィードバック制御, 流体科学シンポジウム講演論文集, 1999, pp. 57-60.
19. 夏 毓鵬, 早瀬敏幸, 林 叡, スプール弁内流れの数値解析に基づく動特性のモデル化, 計測自動制御学会流体計測・流体制御合同シンポジウム講演論文集, 1999, pp. 59-62.
20. 仁杉圭延, 早瀬敏幸, 白井敦, 林叡, 車両まわりの流れ場のフィードバック制御に関する数値解析, 第 13 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集, 1999, p. 57.
21. 夏毓鵬, 早瀬敏幸, 林叡, 濱谷剛, 白井敦, コラプシブルチューブの自励振動におけるチューブの軸方向初期ひずみの影響 (数値シミュレーション), 日本機械学会第 12 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 99-37, 2000, pp. 187-188.

林 叡

1. Weimin Wang, Satoru Hayashi, Toshiyuki Hayase and Ikuro Iimura, VARIOUS BIFURCATION PHENOMENA IN A DIRECT-ACTING POPPET VALVE CIRCUIT, 日本油空圧学会 春期油空圧講演会講演論文集, 1998, pp. 28-30.
2. 佐藤直人, 林 叡, 早瀬敏幸, 飯村彥郎, 油圧弁式セミアクティブダンパによる車両の振動制御 (1/4 車両モデルによる検討), 日本油空圧学会 春期油空圧講演会講演論文集, 1998, pp. 25-27.
3. 白井 敦, 林 叡, 早瀬敏幸, 王 偉民, 直動型ポペット弁回路の集中定数近似モデルについて, 日本油空圧学会 春期油空圧講演会講演論文集, 1998, pp. 31-33.
4. 林 叡, 早瀬敏幸, 丸山 勝, 夏 毓鵬, コロトコフ音の発生機構, 日本機械学

- 会第9回バイオエンジニアリング学術講演会・夏季セミナー講演論文集, 1998, pp. 85-86.
5. 林 叡, 早瀬敏幸, 丸山 勝, 部分加圧したコラプシブルチューブの安定性, 日本機械学会全国大会講演論文集, 2 巻, 1998, pp. 189-190.
 6. Satoru Hayashi, Toshiyuki Hayase and Masaru Maruyama, Numerical Analysis for Flow in Partly Pressurized Collapsible Tube, Advances in Bioengineering, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, ASME, BED-Vol. 39, 1998, pp. 55-56.
 7. 林 叡, 中西貴之, 早瀬敏幸, 上達政夫, 川本英樹, 水圧用リリーフ弁動特性の数値シミュレーション, 日本油空圧学会 秋期油空圧講演会講演論文集, 1998, pp. 16-18.
 8. 王 偉民, 林 叡, 早瀬敏幸, 白井 敦, 直動型ポペット弁回路に発生するカオス振動 (長い給油管路の場合), 計測自動制御学会第 13 回流体制御シンポジウム講演論文集, 1998, pp. 29-32.
 9. 王 偉民, 林 叡, 早瀬敏幸, 白井 敦, 直動型ポペット弁回路に発生するカオス振動 (管路長をパラメータとする場合), 日本油空圧学会春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, 1999, pp. 67-69.
 10. 白井 敦, 林 叡, 早瀬敏幸, 王 偉民, 直動型ポペット弁回路の安定性について (アキュムレータによる制振効果に関する一考察), 日本油空圧学会春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, 1999, pp. 70-72.
 11. 中西貴之, 林 叡, 早瀬敏幸, 上達政夫, 川本英樹, 水圧用リリーフ弁の数値シミュレーション, 計測自動制御学会第 38 回学術講演会予稿集, 2 巻, 1999, pp. 545-546.
 12. 林叡, 丸山勝, 早瀬敏幸, 間接的血圧測定条件下での血管内流れの数値解析, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2 巻, 1999, pp. 277-278.
 13. 白井 敦, 林 叡, 早瀬敏幸, 郭 南楠, 圧力補償型流量制御弁の数値シミュレーション, 計測自動制御学会流体計測・流体制御合同シンポジウム講演論文集, 1999, pp. 63-66.

研究成果

スーパーコンピュータを用いた数値実験により、数値計算と実験を融合した解析手法の有効性を検証するとともに、種々のパラメータが解析結果に与える影響を検討した。解析手法の妥当性を評価するためには、対象となる流れ場全体の正確な状態を知る必要があるが、これを実験によって求めることは困難なので、十分な精度を有する数値解を実際の流れ場のモデルとした。そのため、本研究で対象とするのは、比較的単純な流れ場である必要がある。単純な幾何学形状をもつ流路内の流れの例として、正方形断面管路内の発達乱流と、実際の現象は複雑であるが、1次元的な取り扱いが可能な流れの例として、大きく変形する弾性管路（コラプシブルチューブ）内の非定常流の2つを対象として検討を行った。以下に、本研究で得られた成果を要約し、その後、各項目についてより詳細な結果を示す。

正方形管路内の乱流については、流れ場からのフィードバック則の条件設定を理論的に導くことが困難なので、数値計算を行って、試行錯誤的に最適条件を見出すことを試みた。ある管路断面における格子点上の軸速度を抽出し、数値計算結果との差を求めてこれに比例する圧力差を境界条件として与えることにより、数値解析結果を基準解に収束させることができた。比例ゲインの影響や、計算格子系の影響などを明らかにした。また、この流れ場のオブザーバを用いて、乱流場のフィードバック制御に対するシミュレーションを行い、乱流制御への適用の可能性を示した。

流れ場のオブザーバに関する検討結果より、比較的粗い計算格子を用いた数値解析に、実験からのフィードバックを行うことにより、より精度の高い解を得られる可能性が示された。比較的粗い計算格子に対する数値解の格子収束性について中心差分と3次の風上差分であるQUICKスキームで比較を行い、後者が、数値計算上望ましい単調な格子収束性を示すことが明らかとなった。

コラプシブルチューブ内の流れ場については、オブザーバによる状態量の推定に先立ち、数値解析と実験を行って、系の諸元が流れ場の非定常特性に与える影響を明らかにした。

オブザーバを応用した流れ場の仮想計測

Virtual Measurement of Flow Field with State Observer

東北大学 流体科学研究所 早瀬 敏幸

1. 緒 言

本研究で対象とする流れ場の仮想計測とは、流れ場に対するオブザーバを構成して、実際にセンサを設置していない位置における流れ場の状態を数値計算から得ようとするものである。すなわち、ナビエ・ストークス方程式の差分近似モデルに、流れ場の有限個の測定値をフィードバックすることにより、数値計算による流れ場の状態量を、実際の流れ場の状態量に収束させる。流れ場のオブザーバの構成を Fig. 1 に示す。通常の流れのシミュレーションでは、乱流場のような不安定な流れ場に対しては、同一の初期条件を用いても、実際の流れ場の変動成分を精確に再現することは本質的に困難である。一方、オブザーバでは、実際の流れ場の観測出力とシミュレーションの計算値との偏差を求め、この信号を適切に数学モデルにフィードバックすれば、不安定な流れ場のシミュレーション結果を実際の流れ場に収束させることが可能となる。

有限次元の線形システムにおいては、任意の収束性をもつオブザーバを設計することができるが⁽¹⁾、無限次元の非線形系に対しては、オブザーバの一般的な理論は現状では得られていない⁽²⁾。従って本研究では、有限体積法に基づく流れ場の数値解析手法を系の数学モデルとし、数値計算における境界条件と体積力を入力とする。またオブザーバのフィードバック則は、対象とする流れ場に関する物理的考察に基づいて決定する。

2. 正方形管路内の乱流に関するオブザーバの数値実験

以下では、基本的な流れ場として正方形管路内の発達乱流を取り上げ、オブザーバの有効性を数値実験によって検討する。

対象領域と座標系を Fig. 2 に示す。基礎方程式として、無次元化されたナビエ・ストークス式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} = -\text{grad } p + \frac{1}{Re_0} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

および連続の式

$$\text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

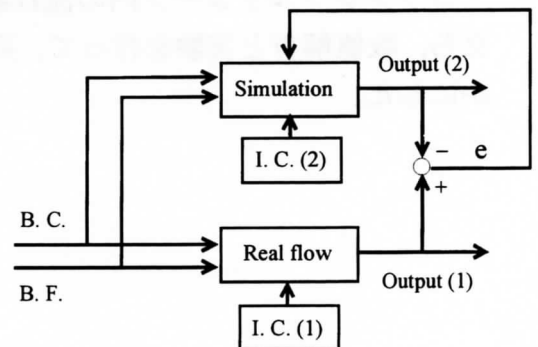


Fig. 1 Structure of flow observer

をとる。速度場の境界条件としては、壁面上では滑り無しの条件、上流、下流断面には、速度の周期境界条件と、一定の圧力差を与えた。なお、Fig. 2 中の l_{out} はオブザーバにおける出力信号 (u_1 速度成分) の測定位置を表す (Fig. 4 参照)。

著者らは既報で、正方形管内の発達乱流に関する数値シミュレーションを行った⁽³⁾。以下では、実際の流れ場の代わりに、前もって計算した発達乱流の数値解 (以下「基準解」と呼ぶ) を用いてオブザーバの有効性を検討する。

数値解析手法については、既報⁽³⁾で詳しく述べているので、ここでは計算の概略を述べるにとどめる。等間隔の矩形スタガード格子系を用い、有限体積法に基づいて離散化された基礎方程式群を、SIMPLER 法に類似の手法により解いた。対流項の離散化には、物理的考察に基づき再定式化された QUICK スキームを用いた⁽⁴⁾。また時間微分項の離散化には、2次精度の陰解法を用いた。

主な計算条件を Table 1 に示す。諸量は正方形管の1辺の長さ b 、平均軸速度 u_m および流体の密度 ρ を用いて無次元化されている。基準解として、レイノルズ数 $Re_0 (= u_m b / \nu) = 9000$ の発達乱流解が得られるように圧力差 Δp (ρu_m^2 で無次元化) を設定した。計算には格子点数の異なる2種類の格子系を用いた。オブザーバは粗い計算格子系(A)を用いて構成し、実際の流れ場のモデルである基準解は、(A), (B)の2種類の格子系で計算した。2つの基

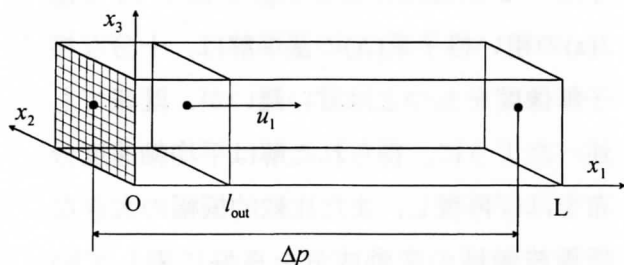
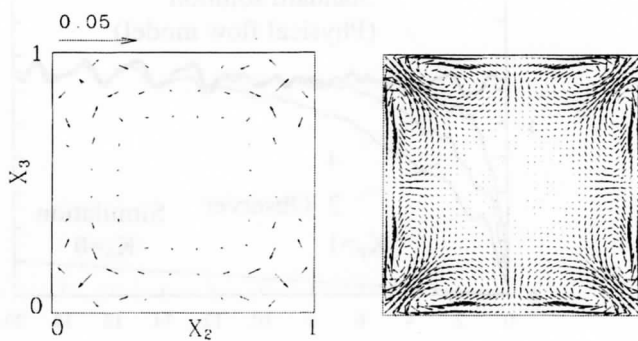


Fig. 2 Geometry and coordinate system

Table 1 Computational condition

Grid system	Grid (A)	Grid (B)
Grid points $N_1 \times N_2 \times N_3$	$20 \times 10 \times 10$	$80 \times 40 \times 40$
Time step	0.05	0.025
Total residual at convergence	0.01	0.015
CPU time for one time step [s]	2	100
Duct length L	4	
Output measurement plane l_{out}	0.3	
Pressure difference Δp	0.0649	
Standard Reynolds number Re_0	9000	



(a) Grid (A)

(b) Grid (B)

Fig. 3 Mean velocity vector field

準解の2次流れ分布を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)の粗い格子系(A)の基準解は、十分な格子解像度をもつとは言い難いが、既報でも述べたように、得られた解は平均軸速度分布をほぼ再現し、また比較的振幅の大きな低周波領域の変動成分を良好に表している⁽³⁾。以下では、オブザーバと同一の格子系(A)での基準解への収束性を検討した後、より実際に近い格子系(B)の基準解(Fig. 3(b))への収束性を検討する。

オブザーバの構成を Fig. 4 に示す。本稿では、出力として断面 $x_l=l_{out}$ 上での軸方向速度成分を取り、入力として上流と下流断面の圧力差をとった。出力の測定面上の各位置において、軸速度成分の基準解に対する誤差 e_{jk} を求め、それに適当なフィードバック係数 K_p を掛けて圧力境界条件に加える。その結果、断面上の各点で、軸方向の速度誤差を減少させる方向に流体は加速あるいは減速される。

フィードバックゲイン K_p (Fig. 4 参照) を種々に変化させた場合の計算結果を Fig. 5 (a), (b) に示す。図は、 $x_l=l_{out}$ の断面中心における軸速度成分の時間変化を示したものである。図中の太線は、基準解の発達乱流を示している。他の結果は、時刻 $t=0$ において全ての速度成分を0として非定常数値計算を開始したオブザーバの出力である。Fig. 5 (a)の破線はゲイン $K_p=0$

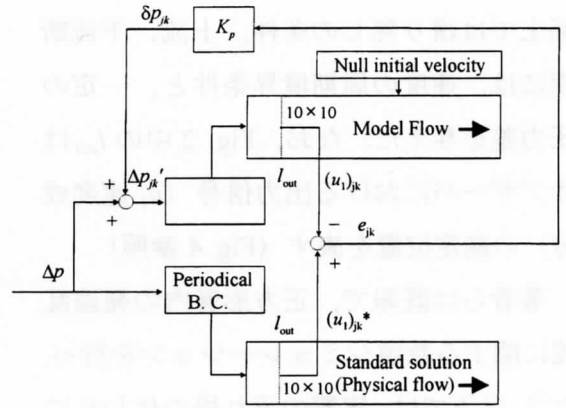
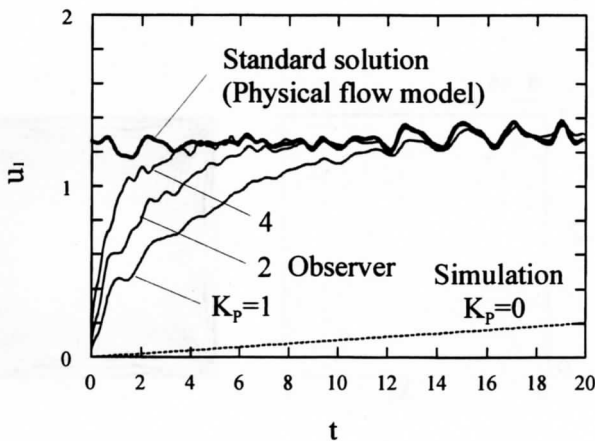
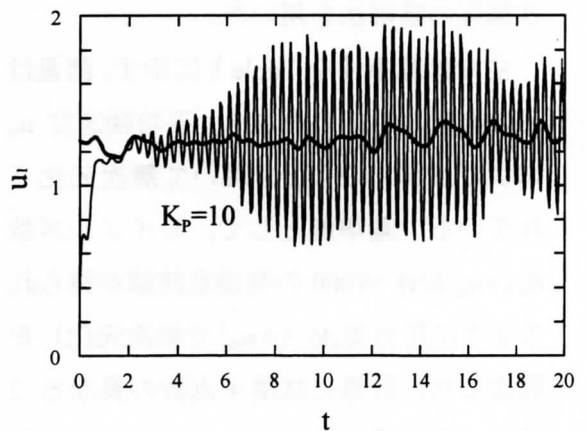


Fig. 4 Schematic of flow observer for square duct flow



(a) Convergent results



(b) Unstable result for large feedback gain

Fig. 5 Variation of the axial velocity at the center of the measurement plane (Comparison for the feedback gain)

の場合で、フィードバックを行わない通常の数値シミュレーションに対応する。この場合、与えられた一定の圧力差 Δp による流れ場の加速は非常に緩やかであり、フィードバックを行わない場合には、発達乱流解に達するのに非常に長い時間を要する。

一方、適当なゲインを用いてフィードバックを行った場合には、速やかに基準解に収束している。変動成分についても、オブザーバの結果は基準解によく追従している。Fig. 5 (a)では、フィードバックゲインの増加とともに、収束性と追従性が向上しているが、更にゲインを増すと、やがて系は不安定となる。Fig. 5 (b)は、過大なフィードバックゲインによりオブザーバが不安定化した例である。

定常状態における推定誤差の測定断面上の平均値と、誤差収束の時定数のフィードバックゲインによる変化をFig. 6に示す。図より、推定誤差の最小値は、 $K_p=6$ の付近で得られ、フィードバックを施さない場合の、約1/7に減少していることが分かる。またこの場合、時定数も約1/100に減少している。

次に、フィードバックゲイン $K_p=2$ の場合に、上流端断面中心における u_2, u_3 速度成分と圧力 p の収束状況をFig. 7に示す。Fig. 7(a),(b)より、速度成分に関してオブザーバの結果は $t>10$ の範囲で基準解の変動成分によく追従している。ただし、 u_3 速度成分については、本計算条件の範囲内でみられる基準解のバイアス成分が十分再現されていない。また圧力に関しては、 $t<10$ の範囲で、オブザー

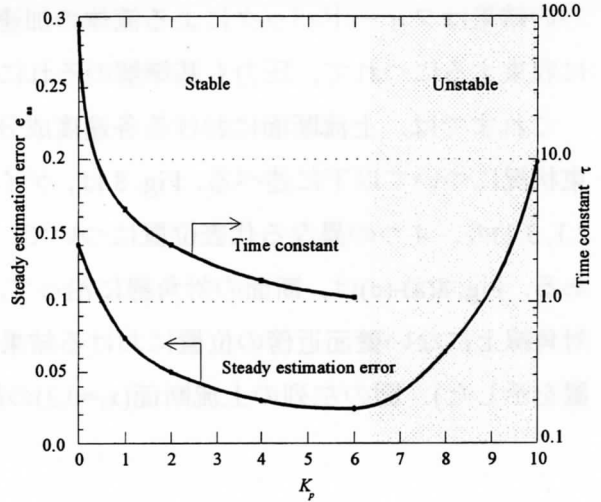
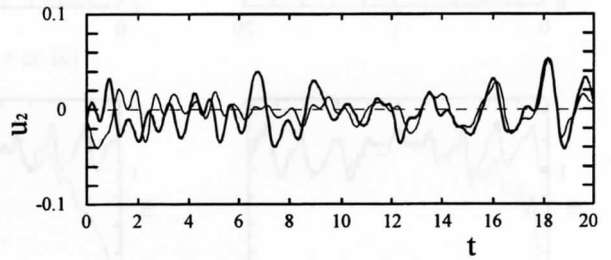
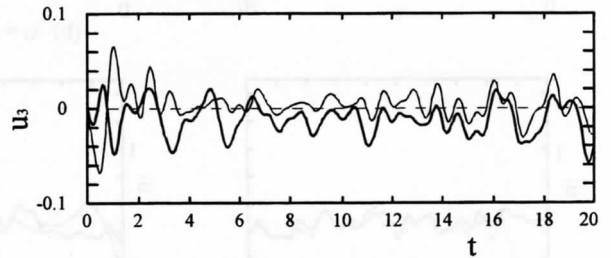


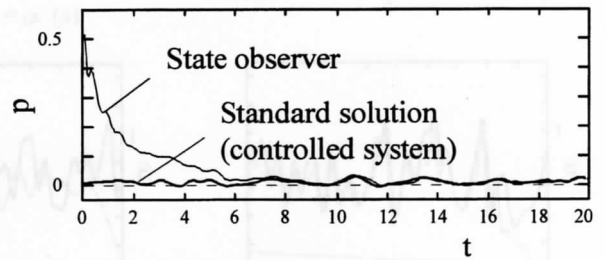
Fig. 6 Steady estimation error and time constant with feedback gain



(a) u_2 -velocity component



(b) u_3 -velocity component



(c) Pressure

Fig. 7 Convergence of state observer at the center of the upstream boundary ($K_p=2$)

バの結果はフィードバックによる流体の加速に対応して大きな値をとるが、流れ場が基準解に収束するにつれて、圧力も基準解のそれに追従している。

これまでは、上流断面における各速度成分と圧力の収束状況を調べたが、流れ場全体の収束状況について以下に述べる。Fig. 8は、ゲイン $K_p=2$ の場合に、3つの異なる断面上 ($x_1=0.3, 2.1, 3.1$)の、4つの異なる代表位置について、それぞれ軸速度成分の収束状況を示したものである。Fig. 8(a)-(c)は、断面の対角線に沿って、中心からコーナーに向かう位置、Fig. 8(d)は、対角線上にない壁面近傍の位置における結果である（中央列の図中にそれぞれの断面内の位置を示した）。図の左列の上流断面($x_1=0.3$)の結果では、軸速度の誤差が圧力境界条件に直接

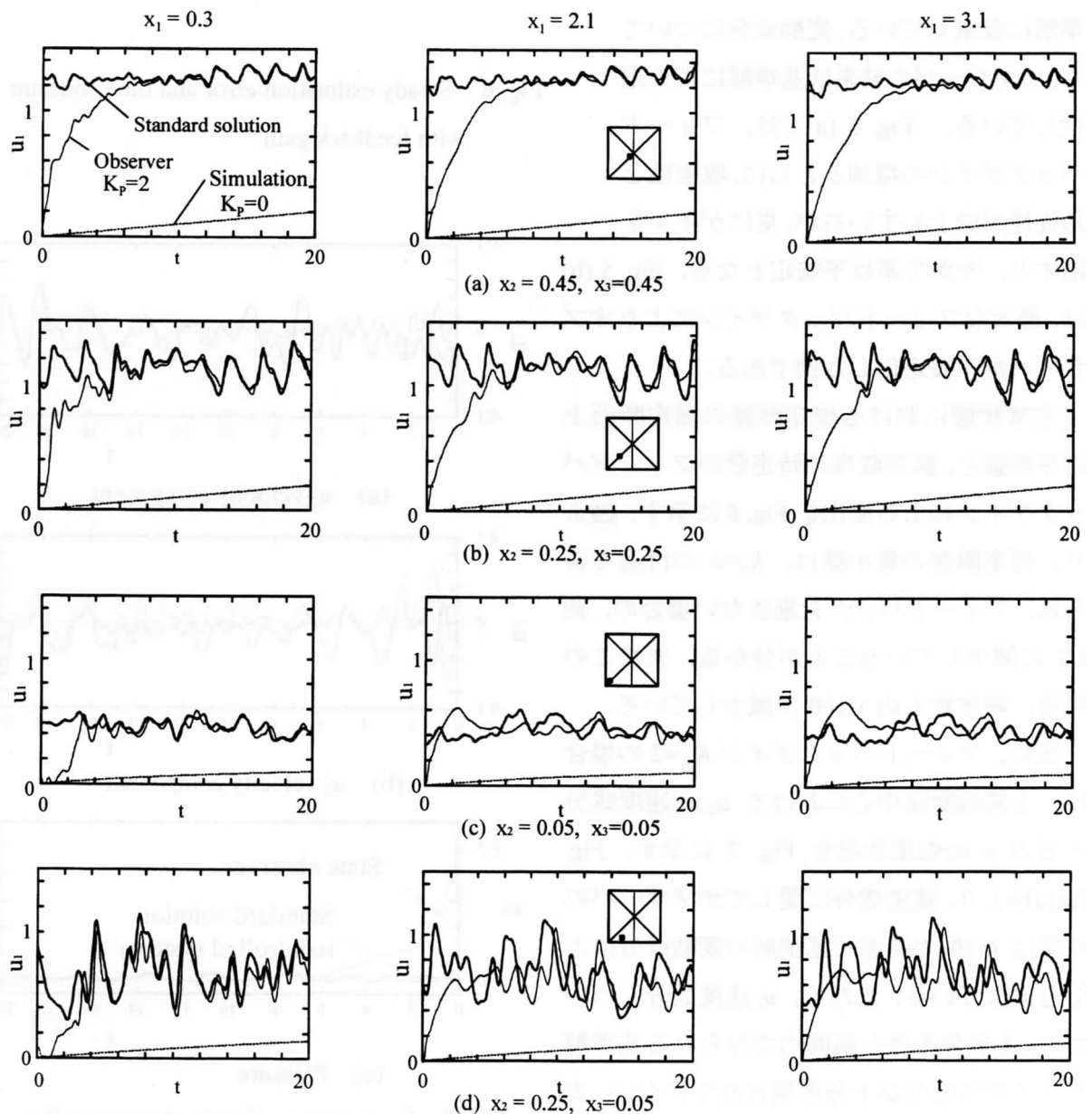


Fig. 8 Variation of the axial velocity component at several locations of the domain ($K_p=2$)

フィードバックされるため、何れの位置においてもオブザーバの結果は基準解に良く追従している。図の中列、右列と下流断面に向かうに従って、オブザーバの結果の追従性は劣化しているが、その程度は断面内の位置によって異なる。すなわち、Fig. 8(a), (b)のように、断面中心に近い対角線上の位置では、下流方向への劣化の程度は小さく、一方、Fig. 8(c), (d)に見るように、位置が管壁に近づき、かつ対角線から離れるほど劣化の程度は大きくなる。

上で述べたように、オブザーバにより得られる結果の基準解に対する追従性は、領域内の位置によってかなり異なる。そこで、ある領域全体におけるオブザーバの平均的な追従性を定量的に評価するために、オブザーバにより得られた速度場 $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ の基準解 $\mathbf{u}^*(t, \mathbf{x})$ に関する誤差ノルムを次式で定義する。

$$\|\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) - \mathbf{u}^*(t, \mathbf{x})\|_V = \left[\int_V \{ (u_1 - u_1^*)^2 + (u_2 - u_2^*)^2 + (u_3 - u_3^*)^2 \} dV / V \right]^{1/2} \quad (3)$$

式(3)で与えられる誤差ノルムの時間変化を、ゲイン $K_p = 2$ および $K_p = 4$ の場合について示したものが Fig. 9 である。図より、初期時刻 $t=0$ においては、オブザーバの初期値として全ての速度成分を 0 としたため、誤差ノルムの値はほぼ 1 となっている。その後 $t=10$ 程度までは、基準解への収束に伴って誤差ノルムは単調に減少し、それ以降はほぼ一定値となる。2種類のゲインに対する結果を比較すると、収束性は、ゲインの大きな場合のほうが優っているが、誤差ノルムの定常値についてはほとんど差は見られない。

また Fig. 9 中の実線は、初期条件の異なる 2 つの発達乱流解の間の誤差ノルムを、式(3)中の $\mathbf{u}(t, \mathbf{x})$ を $\mathbf{u}^*(t+T, \mathbf{x})$ で置き換えた $\|\mathbf{u}^*(t+T, \mathbf{x}) - \mathbf{u}^*(t, \mathbf{x})\|_V$ で評価したものである。2つの解の時間差 T が 0 の場合には、この値は当然 0 となるが、 T の増加とともに、2つの解の間の差異は増大し、 $T > 2$ ではほぼ一定値(0.2)となる。このことは、先に述べたように、フィード

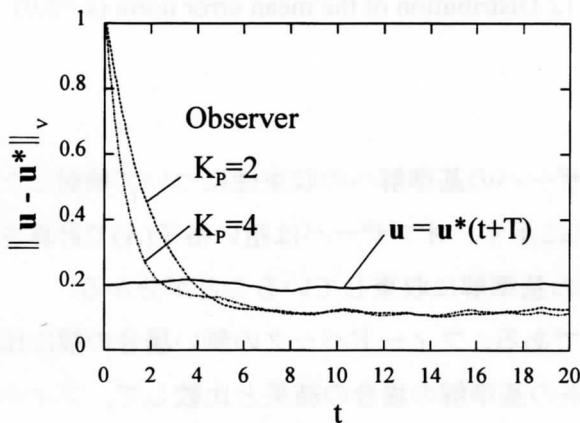


Fig. 9 Norm of the estimation error in the whole domain with time ($T=4$)

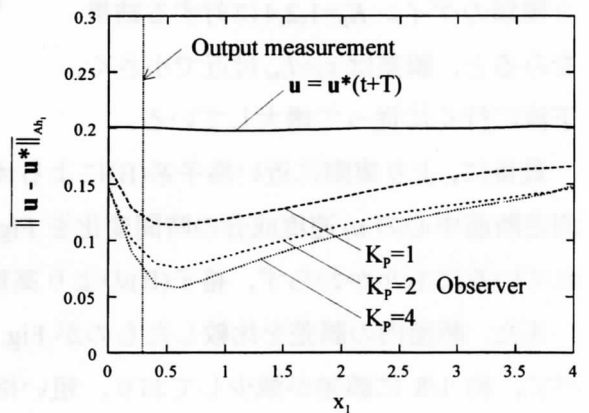


Fig. 10 Distribution of steady error

バックを行わない数値シミュレーションにより発達乱流解が得られたとしても、基準解との間には、常に 0.2 程度の誤差ノルムが存在することを示している。一方、先に得られたフィードバックを施した場合の定常誤差ノルムの平均値は 0.12 で、フィードバックにより速度場全体の誤差ノルムが半分程度にまで減少することを意味している。

式(3)の積分領域 V を、 x_1 軸に垂直な断面を含む領域 $A(x_1) \times h_1$ とし、軸方向の各位置における誤差ノルムを求めた。これが十分収束した時間範囲 ($10 < t < 20$) で平均したものを Fig. 10 に示す。なお、図中の実線は、初期条件の異なる 2 つの発達乱流解の間の誤差ノルムを、式(3)中の $u(t, x)$ を $u^*(t+T, x)$ で置き換えた $\|u^*(t+T, x) - u^*(t, x)\|_V$ で評価したものであり、独立な 2 つの発達乱流解に対する誤差ノルムを与えている。図中の 3 種類のゲイン $K_p=1, 2, 4$ に対する結果をみると、誤差は $x_1=l_{out}$ 付近で小さく、下流に行くに従って増大している。

最後に、より実際に近い格子系(B)によるオブザーバの基準解への収束性について検討した。測定断面中心の u_1 速度成分の時間変化を Fig. 11 に示す。オブザーバは粗い格子(A)で計算されているにもかかわらず、格子(B)のより高精度の基準解に収束していることが分かる。

また、断面内の誤差を比較したものが Fig. 12 である。フィードバックの無い場合の解に比べて、約 1/8 に誤差が減少しており、粗い格子系の基準解の場合の結果と比較して、フィードバックの効果が大きいことが分かる。

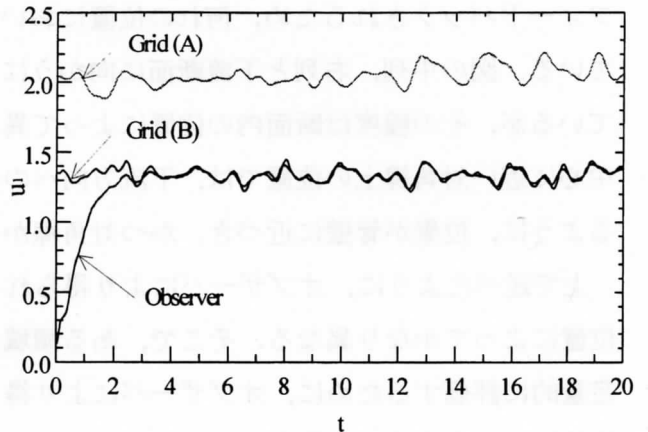
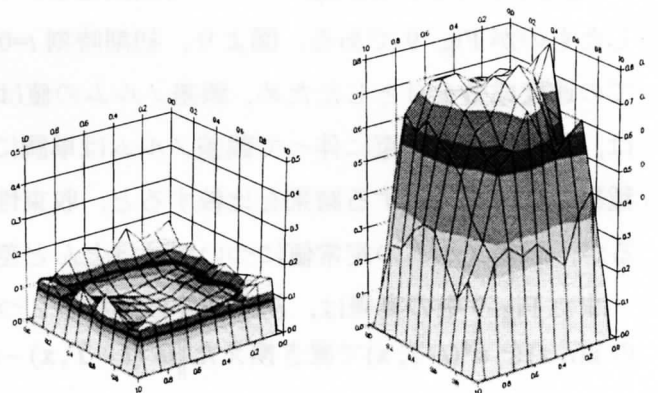


Fig.11 Convergence of the observer to the standard solution with fine grid ($K_p=4$)



(a) $K_p = 4$

(b) $K_p = 0$ (without feedback)

Fig. 12 Distribution of the mean error norm ($x_1=2.0$)

3. 結 言

オブザーバを用いた流れ場の仮想計測を実現するための基礎的検討を行った。基本的な正方形管路内の発達乱流を対象として、実際の流れ場を、前もって計算した発達乱流の数値解でモデル化し、断面上の軸速度の誤差を数値計算の圧力境界条件にフィードバックした。適当なゲインを選択することにより、フィードバックを行わない場合に比べて、発達乱流解への収束性が 100 倍程度加速され、定常乱流状態の誤差ノルムも流れ場全体では 1/2, 上流端近傍では 1/7 程度に減少させることが出来た。

今後の課題としては、比例ゲインの増加に伴う系の不安定性に関して理論的検討を行うとともに、実験による検証を行いたい。

参考文献

- (1) Skelton, R. E.: *Dynamic Systems Control*, John Wiley & sons, (1988).
- (2) Misawa, E. A. and Hedrick, J. K.: Nonlinear Observers: A State-of-the-art Survey, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans ASME*, Vol. 111, No. 3, 344-352, (1989).
- (3) 早瀬, 他 2 名: 正方形管内乱流の直接数値シミュレーション, 日本機械学会論文集 (B 編), 58 巻 546 号, 364-370, (1992).
- (4) Hayase, T., et al.: A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedures, *Journal of Computational Physics*, Vol. 98, No. 1, 108-118, (1992).

(計測自動制御学会 流体計測・流体制御合同シンポジウム (1997.12.4) より一部転載)



FEEDBACK CONTROL OF TURBULENT FLOW FIELD USING STATE OBSERVER

T. Hayase and S. Hayashi
Institute of Fluid Science
Tohoku University, Sendai, Japan

The present report deals with a fundamental study on the feedback control of turbulent flow fields using the state observer in estimating the flow field. A numerical experiment was performed for the feedback control of the turbulent flow through a duct of square cross-section to suppress the velocity fluctuation and reduce the frictional loss. As a feedback control strategy, suction and blowing to counteract the fluctuating flow velocity was applied through nozzles on the duct wall. The fluctuation velocity component was estimated through the state observer by using a limited number of measurement data of the controlled flow. The computational result revealed that the present control system with the state observer achieved up to 33% frictional loss reduction in comparison with that of the full state feedback

INTRODUCTION

Turbulent flow control in engineering field is important in both enhancement of the turbulent transport and reduction of the turbulent shear stress. Many studies have been performed on the passive control of turbulent flows, such as riblets or other boundary layer control¹. Recently the research on the more effective feedback control is appearing based on development of the computer capability and availability of distributed-actuators and sensors. Choi et al.² performed a numerical experiment for the feedback control of the wall velocity of a turbulent channel

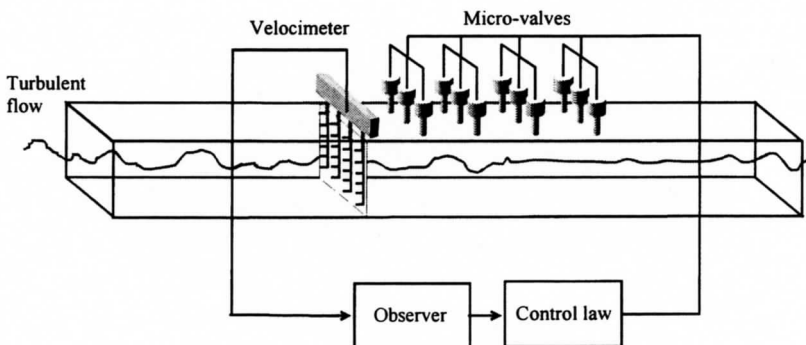


Fig. 1 Feedback control of turbulent flow with state observer

flow showing a significant reduction of the wall friction. On the feedback control of turbulent flows, the real time information of the local flow structure is essential. Instead of mounting a lot of sensors in the flow field, the present study deals with an application of the observer to estimate the required information of the turbulent flow field³.

Figure 1 shows a schematic of the control system treated here. The controlled system is a turbulent flow through a square duct and the turbulent shear stress is to be reduced through appropriate suction or blowing through nozzles on the wall. The control signal for each micro-valve is determined on the local flow condition, which is estimated by the observer based on the velocity measurement on the upstream plane. This paper deals with a numerical experiment on the effectiveness of the present feedback control system with the observer to reduce the turbulent shear stress and the resultant flow resistance.

STATE OBSERVER OF TURBULENT FLOW

In this section validity of the state observer is discussed numerically. A fully developed turbulent flow solution in a square duct is used as the standard solution, which simulates the controlled real flow. For the standard solution, the periodical velocity condition and the constant pressure difference Δp are assumed between the upstream and the downstream boundaries.

Brief explanation of the numerical procedure is given here. The Navier-Stokes equation and the equation of continuity for incompressible and viscous fluid flow are discretized through the finite volume method on the three-dimensional equidistant staggered grid system. The resultant set of finite difference equations is solved through the SIMPLER-based iterative procedure⁴.

The computational condition is summarized in Table 1. In the following all the values are expressed in dimensionless form using the side length of the square cross section, the mean axial velocity and the density of the fluid. The constant

Table 1 Computational condition

Pipe length l	4
Pressure difference Δp	0.0649
Reynolds number Re_s	9000
Grid points $N_1 \times N_2 \times N_3$	$20 \times 10 \times 10$
Grid spacing $h_1 \times h_2 \times h_3$	$0.2 \times 0.1 \times 0.1$
Time step h_t	0.05
Total residual at convergence	0.01
CPU time for one time step [s]	2

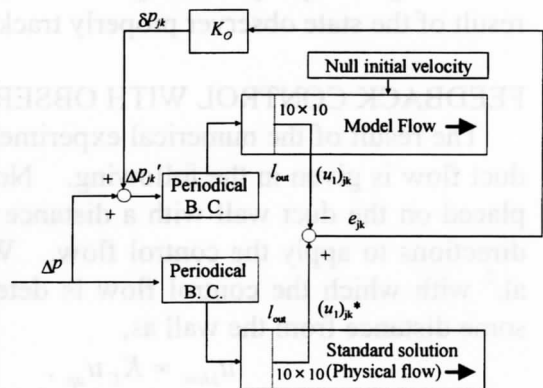


Fig. 2 Structure of the state observer

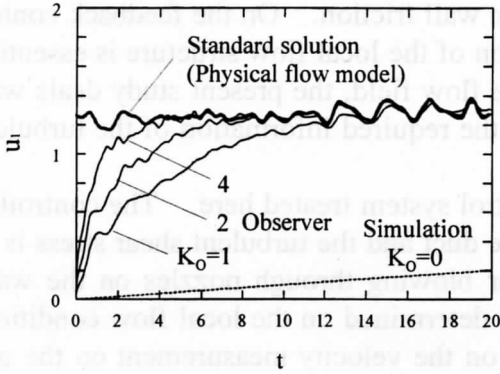


Fig. 3 Convergence of observer

velocity field. The output signal is defined as the axial velocity component on the cross section at the upstream boundary. At each time step, the output error of the simulation from the standard solution is computed and fed back to the pressure boundary condition. The pressure difference δp_{jk} proportional to the estimation error is added to the input pressure difference Δp at each point on the boundary in order to accelerate or decelerate the fluid to reduce the estimation error as,

$$\begin{aligned} \delta p_{jk} &= K_O e_{jk}, \\ \Delta p'_{jk} &= \Delta p + \delta p_{jk} \quad (j, k = 1, \dots, 10) \end{aligned} \quad (1)$$

For several values of the observer gain K_O , variations of the axial velocity component at the center of the upstream boundary plane are plotted in Figs. 3. The bold line in the figure shows the result of the standard solution, i. e. the model of the controlled flow. The others are the results of the state observer where computations are started from the initial condition of null velocity field at $t=0$. The broken line in Fig. 3 for the observer gain $K_O=0$ corresponds to the ordinary flow simulation without the feedback. Simulation results for appropriate values of the observer gain rapidly converge to the standard solution. After the transition, the result of the state observer properly tracks the perturbation of the standard solution.

FEEDBACK CONTROL WITH OBSERVER

The result of the numerical experiment for the feedback control of the turbulent duct flow is given in the following. Nozzles of 0.2×0.2 square cross-section were placed on the duct wall with a distance of 0.2 in x_1 -direction and 0.1 in the other directions to apply the control flow. We adopted the control law due to Choi et al.² with which the control flow is determined to counteract the flow velocity at some distance from the wall as,

$$u_{blow} = K_C u_{ap}, \quad (2)$$

where u_{blow} denotes the control flow velocity, K_C the feedback control gain, and u_{ap} the approaching flow velocity.

pressure difference Δp corresponding to the Reynolds number of 9000 is assumed between the upstream and the downstream boundaries of the duct with the length of 4.

The block diagram of the state observer for the numerical confirmation is shown in Fig. 2. It is noted that the real flow to be controlled is modeled by the standard numerical solution. In this setup, the time-dependent flow simulation is started from the initial condition of null ve-

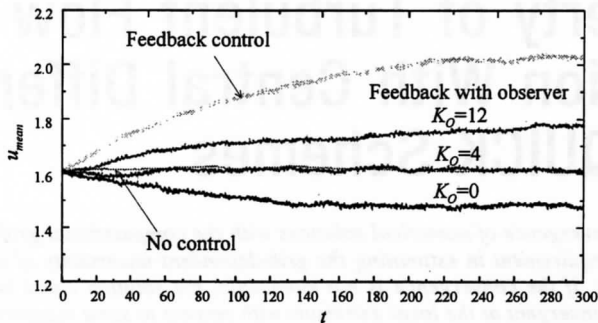


Fig. 4 Variation of mean velocity ($K_C=1$)

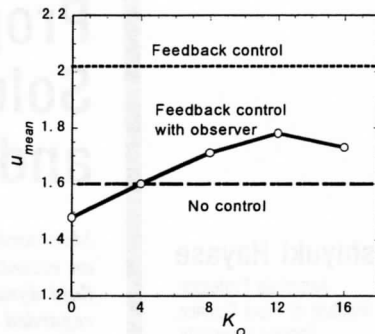


Fig. 5 Mean velocity with observer gain ($K_C=1$)

Variation of the mean flow velocity is shown in Fig. 4. The mean flow does not change in the case of no-control, since the initial condition is assumed as a developed turbulent flow solution. The upper most result of the feedback control based on the accurate flow information shows almost 25% increase in the flow rate, while the other results in which the flow state is estimated with the observer reveal less significant improvement.

The settled mean axial velocity is plotted with the observer gain in Fig. 5, showing the optimum observer gain of 12 gives the increase of the flow rate up to 40% of that of the feedback control without the estimation error.

CONCLUSIONS

This study performed a numerical experiment on the feedback control of the turbulent flow through a square duct with a state observer. With the control flow through nozzles on the duct wall to counteract the approaching flow, the mean axial velocity is increased in 25 % for the ideal case of no estimation error, or in 10% for the case of the optimum observer gain.

REFERENCES

1. Gad-el-Hak, M. Interactive Control of Turbulent Boundary Layers: A Futuristic Overview, *ALAA Journal*, **32-9**, 1753-1765 (1994).
2. Choi, H., Moin, P. and Kim, J. Active Turbulence Control for Drag Reduction in Wall-Bounded Flows, *Journal of Fluid Mechanics.*, **262**, 75-110 (1994).
3. Hayase, T. and Hayashi, S. State Estimator of Flow as an Integrated Computational Method With the Feedback of Online Experimental Measurement, *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, **119**, 814-822 (1997).
4. Hayase, T., Humphrey, J. A. C. and Greif, R. Mini Manual for ROTFLO2, *Dept. Mech. Eng. Rep., #FM-90-1, Univ. Calif. Berkeley*, (1990).

むすび

本研究報告書は文部省科学研究費補助金基盤研究（C）（2）「数値計算と実験計測を融合した流れの解析手法の創成」（平成 10、11 年度）の研究成果をまとめたものである。従来の、数値計算と実験計測に加えて、これらを融合した新しい流れ場の解析手法を創生することを目的として検討を行った。

実測データをシステムの数学モデルにフィードバックすることによりシステムの状態量を推定するオブザーバの概念を流れの数値解析に応用し、流れのオブザーバの基本構成を示すとともに、基本的な正方形管路内の乱流場についてその有効性を明らかにした。また、乱流のフィードバック制御や、弾性管路内の流れ場への応用の可能性について検討するとともに、数値解の格子収束性に関する基礎的検討も行った。

これらの検討の結果得られた知見は、生体内や化学反応を伴う流れなど、正確な数学モデルが存在せず実験も困難な流れ場に対して、新たな解析手法を構築する際の設計指針を与えるものと期待される。

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録していません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。