

オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御  
(第2報: オブザーバゲインによる抵抗低減効果の変化)

Feedback Control of Turbulent Flow Field with State Observer  
(2nd Report: Effect of Observer Gain on Drag Reduction)

○早瀬 敏幸\*, 林 叡\*

○ Toshiyuki HAYASE\* and Satoru HAYASHI\*

\*東北大学 流体科学研究所

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

キーワード: 乱流のフィードバック制御 (Feedback Control of Turbulent Flow), 計算機援用流動場制御 (Computer-Aided Flow Field Control), 数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics), オブザーバ (Observer)

連絡先: 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学流体科学研究所 知能流システム研究部門  
Tel: (022) 217-5253, Fax: (022) 217-5253, E-mail: hayase@ifs.tohoku.ac.jp

## 1. 緒 言

航空機・自動車等の輸送機器における抵抗の低減は、環境問題、省エネルギー化等に関連して重要な問題である。壁面に分布したアクチュエータを用いて、壁面近傍の流れ状態に応じた局所的な入力を与えることにより、

乱流変動の抑制と、大幅な抵抗低減が可能となることが数値実験で明らかにされている<sup>1)</sup>。乱流のフィードバック制御を実現するためには、乱流場の空間的な構造を実時間で計測する必要があるが、本研究では、制御理論におけるオブザーバの概念を、乱流場の制御に応

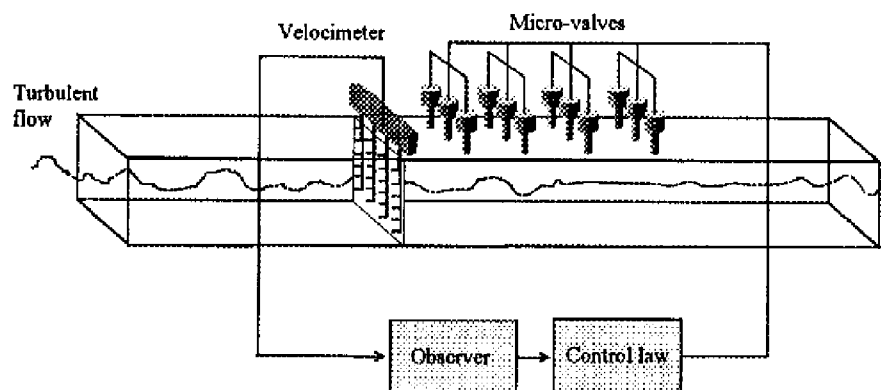


Fig. 1 Feedback control system of turbulent flow

用する。すなわち、制御対象の流れ場の局所的な計測データと、計算機上に構成した流れ場の数学モデルによる対応する変数との差異を数学モデルにフィードバックすることにより得られる流れ場の状態量の推定値を用いてフィードバック制御を行う (Fig. 1 参照)。

著者らは、既報<sup>2)</sup>において、有限体積法を用いた流れの数値解析アルゴリズムに基づくオブザーバの基本的な構成を示すとともに、正方形管内の乱流場について数値シミュレーションによる検討を行い、制御対象のモデルとして予め計算した数値解(「基準解」)を用い、管内の一断面における各時刻の軸速度の推定誤差をオブザーバの圧力境界条件へフィードバックすることによって、オブザーバが速やかに基準解に収束することを明らかにした。また、オブザーバで推定した壁面近傍の垂直速度成分を用いて、これを打ち消すような制御流を壁面に設けた複数のノズルより与えることによって流動抵抗を低減できることを数値実験により示した<sup>3)</sup>。

本研究で対象とする制御系の構成を Fig. 1 に示す。アクチュエータとしては、壁面に分布して設置されたマイクロバルブからの局所

的な吹き出しと吸い込みを考える。制御則により、アクチュエータ近傍の速度場の関数としてアクチュエータへの入力決定される。本研究では、アクチュエータ近傍の速度場を得るため、多数のセンサーを壁面上に設置するかわりに、流路内の一断面に設けた速度センサーからの信号をオブザーバに入力することによって、流れ場全体の情報を推定する。本報告では、特にオブザーバゲインが抵抗低減効果に与える影響を数値実験により検討した結果について述べる。

## 2. 流れ場のオブザーバ

乱流場のフィードバック制御について述べる前に、流れ場のオブザーバについて簡単に記す。制御系から、流れ場のオブザーバの部分を取り出したものを Fig. 2 に示す。本報告では数値実験による検討を行うため、制御対象である流れ場は、数値解(基準解)に置きかえられている。ある断面 ( $x_1=l_{out}$ ) 内の  $10 \times 10$  の格子点上の軸方向速度成分について、基準解とオブザーバの結果を比較し、その誤差にオブザーバゲイン  $K_0$  を乗じたものを、圧力の境界条件にフィードバックする。

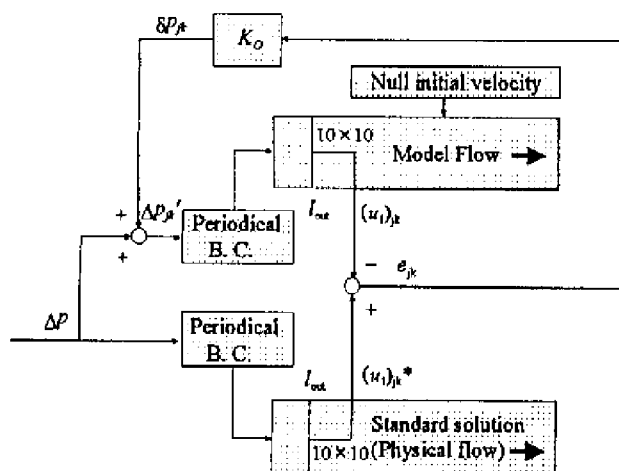


Fig. 2 Structure of the state observer

Table 1 Computational condition.

Pipe length $l$	4
Pressure difference $\Delta p$	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

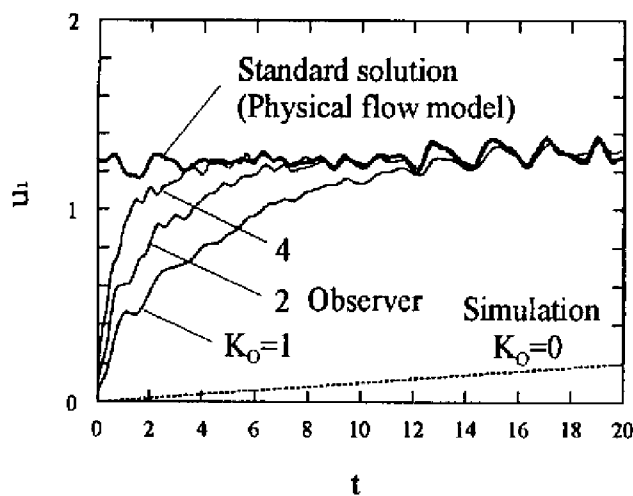


Fig. 3 Convergence of the observer

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

このフィードバックの効果により、モデルの流れ場が基準解のそれに収束する。数値実験に用いたパラメータを Table 1 に示す。20×10×10 の比較的粗い計算格子を用い、流れ場のレイノルズ数は十分発達した乱流場が得られるように  $R_o = 9000$  に設定した。

オブザーバの収束性に関する数値計算の一例を Fig. 3 に示す。図は、 $x_1 = l_{out}$  の断面中心における  $u_1$  速度成分の時間変化である。オブザーバゲイン  $K_o$  を増すに従って、基準解への収束性が改善されるのがわかる。ただし、過大

なゲインを用いるとオブザーバは不安定となり基準解へ収束しなくなるので、適当なオブザーバゲインを選択する必要がある。

### 3. オブザーバを用いた流れ場のフィードバック制御系

オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御の数値実験の結果を以下に示す。流体の吹き出しと吸い込みを行うためのノズルを設けた正方形断面管路を Fig. 4 に示す。フィードバック制御系としては、Choi ら<sup>1)</sup>により物理的考察に基づき提案されたものを採用し、壁面から一定距離離れた点における、壁に向かう速度成分に比例した吹き出しあるいは吸い込みを行う。

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

ここで、 $K_f = 1$  の場合に、乱流変動の抑制と摩擦抵抗の低減が期待できる。

乱流場のフィードバック制御に関する数値実験の結果を Fig. 5 に示す。図で、平均軸速度が増加している結果は、乱流の変動速度の減少にともなって摩擦抵抗が低減していることを意味する。

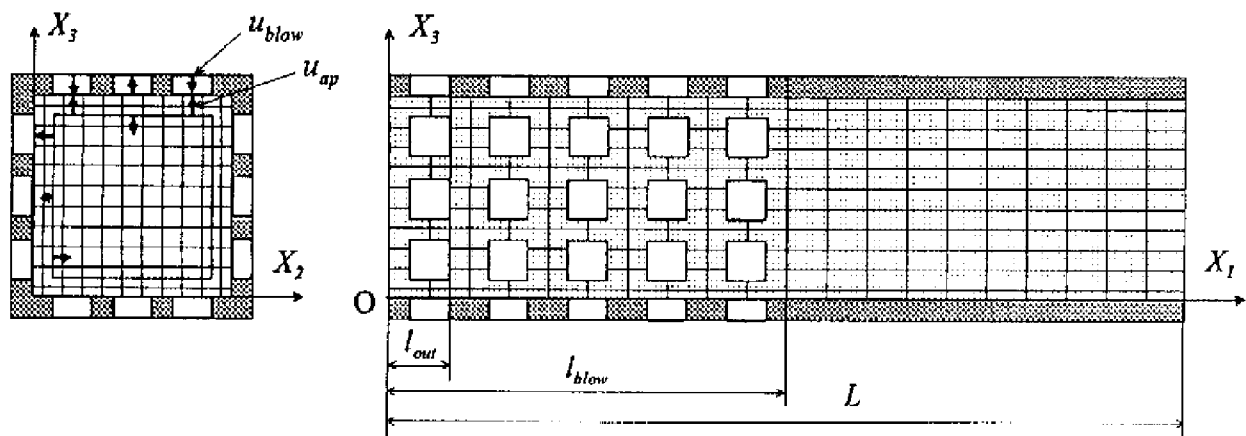


Fig. 4 Square duct with control holes

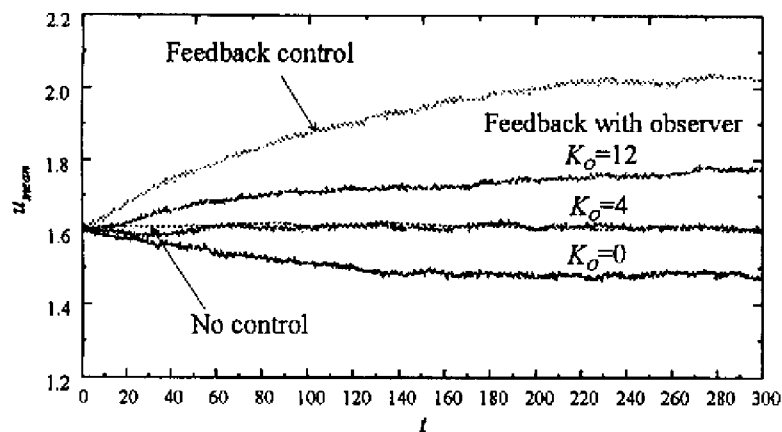


Fig. 5 Variation of mean velocity ( $K_C=1$ )

平均軸速度の増加がもっとも大きく、抵抗低減効果の大きな結果は、壁面に向かう速度成分が全て測定できるとしてフィードバックを行った場合の結果である。オブザーバを用いて推定した速度を用いて制御を行った結果では、オブザーバゲイン  $K_o$  の大きさにより抵抗低減効果に差がある。オブザーバゲイン  $K_o$  が 0 の場合には、乱流の速度場を正しく推定できないので、制御流により逆に速度変動が増大し、流動抵抗は増加している。オブザーバゲインの増加とともに、平均軸速度は次第に増加して行くのがわかる。

オブザーバゲインと、十分時間が経過した  $t=300$  における平均軸速度との関係を Fig. 6 に示す。図より、オブザーバゲイン  $K_o=12$  の場合に、平均軸速度が最大値をとり、最良の抵抗低減の効果が得られこと、この場合の抵抗低減の効果は、速度変動が直接測定可能とした場合の 40%程度であることが分かる。

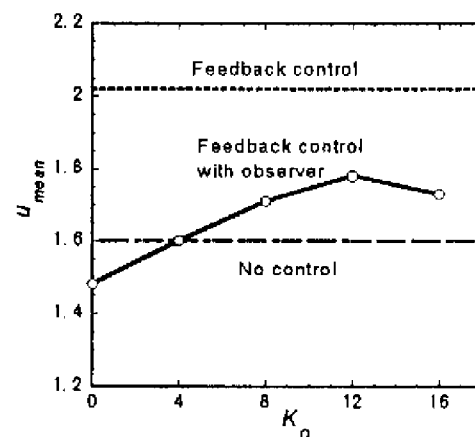


Fig. 6 Mean velocity with observer gain ( $K_C=1$ )

#### 4. 結 言

オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御を実現するための基礎的研究として、正方形管路内の乱流場を対象として数値実験を行った。壁面近傍の変動速度を打ち消すような制御入力による制御系を考えた場合、オブザーバゲインを最適化することにより、速度変動が直接測定可能とした場合の 40%程度の摩擦抵抗の低減が可能であることを示した。今後は、実験による検証を行う予定である。

#### 参考文献

- (1) H. Choi, P. Moin and J. Kim: Active Turbulence Control for Drag Reduction in Wall-Bounded Flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 262, 75/110 (1994).
- (2) 早瀬, 林: 計算機を援用した流動場の制御に関する基礎的研究 (流動場に対するオブザーバの構成), 日本機械学会論文集 62-598, B 2261/2268 (1996).
- (3) 早瀬, 林: オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御, SICE 東北支部第 172 回研究集会 資料番号 172-7 (1997).