

## オブザーバを用いた乱流場のフィードバック制御 Feedback Control of Turbulent Flow Field with State Observer

○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), 分布定数系(Distributed Parameter System), 非線形系 (Nonlinear Dynamic System)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区片平 東北大学流体科学研究所 流動場制御研究部門  
Tel: (022) 217-5253, Fax: (022) 217-5253, E-mail: hayase@ifs.tohoku.ac.jp

### 1. 緒 言

航空機・自動車等における抵抗の低減は、環境問題、省エネルギー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を、計算機上に構成した流れ場の数学モデルにフィードバックし、その結果得られる流れ場の状態量の推定値を用いて制御を行う。

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。

本報告では、実際の系への適用を考慮して、実時間の数値計算が可能な粗い格子系を用いたオブザーバを用いて、より高精度の数値解の状態量を推定する問題と、このオブザーバを乱流場のフィードバック制御系に適用した場合の抵抗低減の効果について、数値実験により検討する。

## 2. 正方形管路内乱流のフィードバック制御

### 2.1 制御系の構成

正方形断面管路内の乱流場の制御を考える。制御系の基本的な構成を 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（図の上面）、および、マイクロアクチュエータによる弾性壁の局所的な上下動（図の下面）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、あるいはその周囲に設置した圧力センサーからの信号をオブザーバーに入力することによって、流れ場全体の情報を推定する。

### 2.2 オブザーバーの数値実験

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} = -\text{grad } p + \frac{1}{R_{\nu 0}} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

および連続の式

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

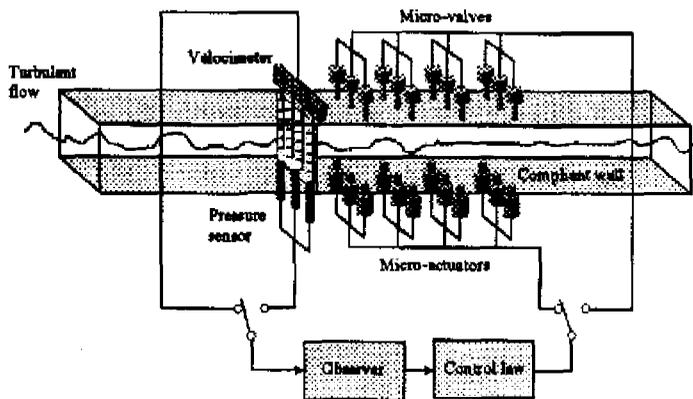


Fig. 1 Feedback control system of turbulent flow

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、下流断面には周期境界条件を与えた。また、上流、下流断面の対応する点間には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。

著者の一人は、既報<sup>(3)</sup>において、正方形管路内の発達乱流の数値シミュレーションを行った。Table 1 に示す 2 種類の格子系における数値解より得られた平均速度ベクトル場を Fig. 3 に示す。十分な解像度を持つ格子(B)の解は 2 次流れの存在を明瞭に示している。一方、格子(A)の解にも定性的には 2 次流れが認められるものの、流れ場を定量的に表しているとは言い難い。格子(B)では良好な精度をもつ解が得られるが、Table 2 に示したように 1 計算ステップあたり 100s の計算時間を要するため、実時間計算を必要とするオブザーバに格子(B)を用いることは適当でない。オブザーバでは、フィードバックの効果により、解の精度が改善されることが期待できるので、格子(A)を用いてオブザーバを構成することとし、格子(B)の解を基準解として、 $x_1 = l_{out}$  の断面における  $10 \times 10$  点の  $u_1$  速度成分の誤差をオブザーバの圧力境界条件にフィードバックした。非定常数値計算の一例を Fig. 4 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

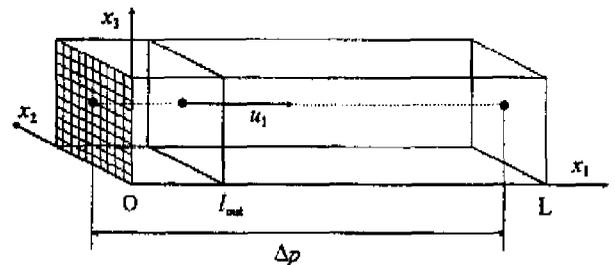


Fig. 2 Geometry and coordinate system.

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 increment	0.05	0.025
Total residual at convergence	0.01	0.015
CPU time for one time step [s]	2	100
Pipe length $L$	4	
Output measurement plane $l_{out}$	0.3	
Pressure difference $\Delta p$	0.0649	
Standard Reynolds number $Re_0$	9000	

る。オブザーバは粗い格子(A)を用いているにもかかわらず、格子(B)の解に速やかに収束していることが分かる。

オブザーバの基準解への収束は下流方向に徐々に劣化する傾向がある<sup>(2)</sup>。Fig. 5は、流路中央断面 ( $x_1=2$ ) における誤差ノルム

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

の時間平均値の分布である。ここで、 $u, u^*$ はそれぞれオブザーバおよび基準解の速度ベクトル場である。Fig. 5(a)の結果を同図(b)と比較すると、フィードバックの効果で、誤差がおよそ1/6に減少していることが分かる。

### 2.3 フィードバック制御の数値実験

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. 6に示す。フィードバック制御則としては、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

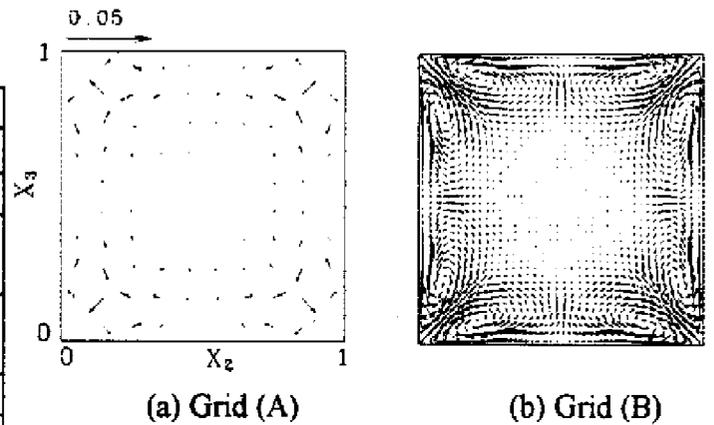


Fig. 3 Mean velocity vector field.

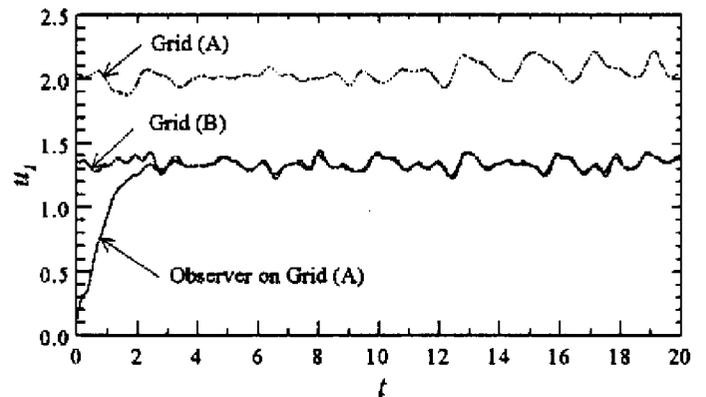


Fig. 4 Convergence of the observer to the standard solution. ( $K_P=4$ )

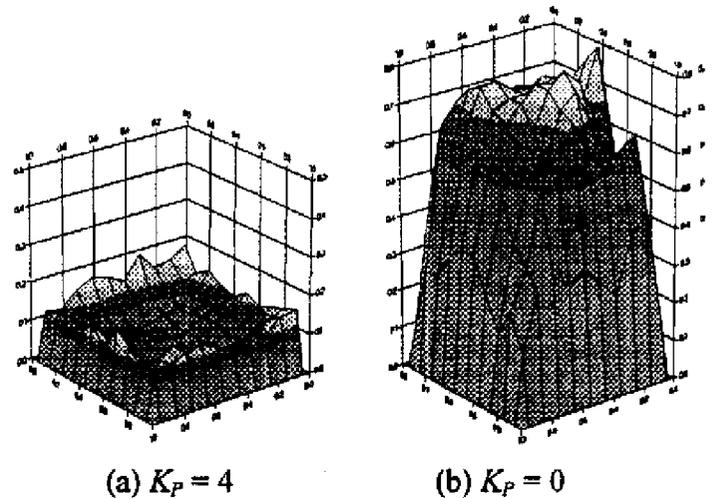


Fig. 5 Distribution of the mean error norm ( $x_1=2.0$ )

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。

$$u_{blow} = K_f u_{ap} \quad (4)$$

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。

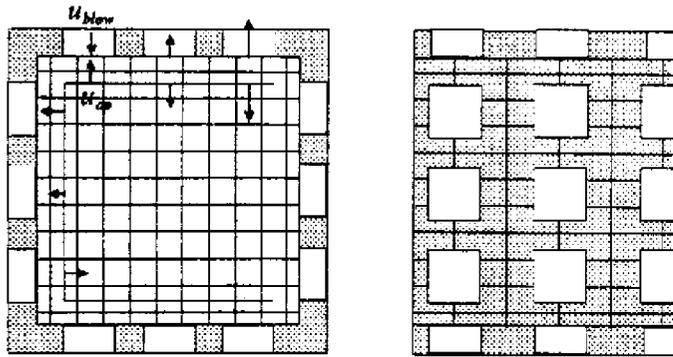


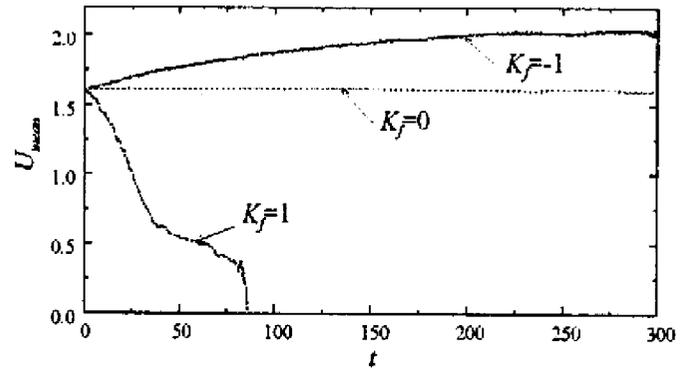
Fig. 6 Square duct with control holes.

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. 7 に示す。  $K_f=1$  の場合に、平均軸速度が増加しているが (Fig. 7(a))、これは乱流の変動速度の減少 (Fig. 7(b)) にともなって摩擦抵抗が低減することによる。

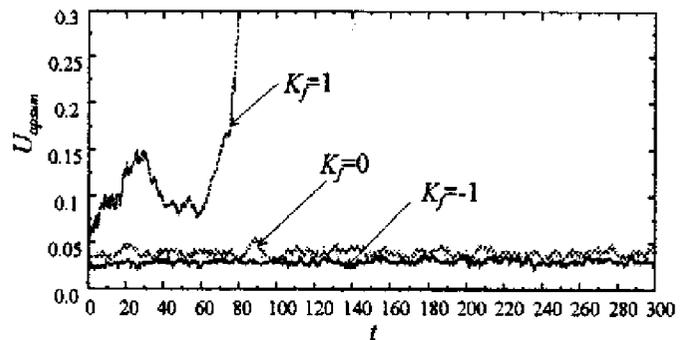
上の結果は、壁面に向かう速度成分が全て測定できるとしてフィードバックを行った場合の結果であるが、次に、オブザーバを用いて推定した速度を用いて制御を行った結果を Fig. 8 に示す。図より、オブザーバを用いることにより、抵抗低減の効果が 40% 程度に減少することが分かる。

### 3. 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。実際の系への適用を考慮して、オブザーバに実時間計算が可能な比較的粗い格子系を用いた場合でも、制御対象からのフィードバックの効果により数値解の推定誤差がフィードバックを施さない場合の 1/6 程度に減少し、十分な状態推定が可能なことを示すとともに、壁面近傍の変動速度を打ち消すような制御入力を与えることにより、摩擦抵抗が減少することを示した。今後は、実験によ



(a) Variation of axial velocity component



(b) Variation of approaching velocity

Fig. 7 Computational result for feedback control of turbulent flow.

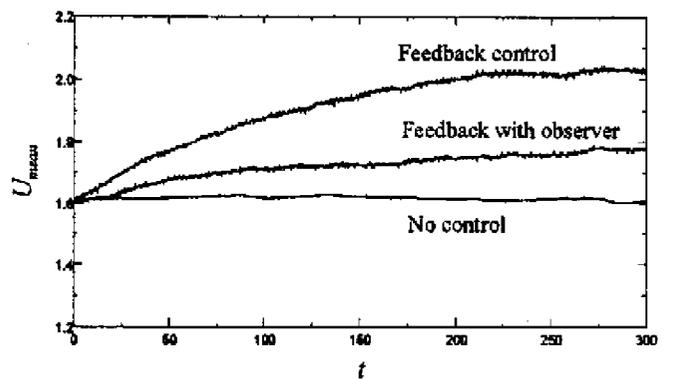


Fig. 8 Comparison between feedback control systems with and without observer

る検証を行う予定である。

### 参考文献

- (1) Choi, H, Moin, P. and Kim, J., *J. Fluid Mech.*, 262, 75 (1994).
- (2) 早瀬, 林, 機械学会論文集 62-598, B 2261 (1996).
- (3) 早瀬, 機械学会論文集 61-591, B 3967 (1995).