

アクティブフィードバック制御下のチャネル乱流のLDV計測

LDV measurement of turbulent channel flow controlled by an active feedback system

吉野 崇 (東大工), 鈴木 雄二 (東大工), 笠木 伸英 (東大工)

Takashi YOSHINO*, Yuji SUZUKI* and Nobuhide KASAGI*

*Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

A prototype feedback control system for wall turbulence is developed and evaluated in a turbulent channel flow. Arrayed micro hot-film sensors with a spanwise spacing of 1mm are employed for the measurement of streamwise wall shear stress fluctuations, while arrayed magnetic actuators with 3.2mm in spanwise width are used to introduce control input through wall deformation. The frequency response of the sensors and actuators is found to be reasonably high for the flow conditions presently considered. Feedback control experiments are made in a turbulent air channel flow with the aid of a genetic algorithm-based optimal control scheme. It is found that the streamwise mean shear stress is decreased by up to 4% among 200 trials in 20 generations.

1. 序

自然界, 産業界に多くみられる乱流, および, それに伴う輸送現象を効率良く制御することは工学上極めて重要である. 近年, フィードバック制御が高い制御効果の得られる手法として注目され, 壁乱流の直接数値計算(DNS)により制御成績が評価される⁽¹⁾とともに, 乱流制御への適用を目的としたマイクロセンサ, アクチュエータの試作が行われている⁽²⁾.

本研究では, 壁面に多数のマイクロセンサ, アクチュエータを埋め込んだフィードバック制御システム⁽³⁾において, GA規範の最適制御を行い, 制御下における流動構造の変化とせん断応力の変化の関係を流れ場のLDV計測により考察することを目的とする.

2. 乱流制御システム

Fig. 1にYoshinoら⁽³⁾の試作したフィードバック制御システムの概略を示す. 制御システムは, スパン方向に1mm間隔で配置される4列192個のマイクロ熱膜せん断応力センサと, スパン方向に3.2mm間隔で並ぶ3列48個の電磁型壁面変形アクチュエータ群からなる. 制御システムは, 断面50×500mm²のチャネル乱流風洞の流路入口からチャネル幅の80倍下流に設置した. テスト部において十分発達した乱流状態が形成されていることが確認されている. バルク平均流速 U_m は3.0m/sであり, チャネル半幅 δ と摩擦速度 u_τ で定義されるレイノルズ数 Re_τ は300である. このとき, 1粘性長さ l^+ は0.083mmであり, 試作した制御システムのセンサ間隔, および, アクチュエータ間隔は, それぞれ12 l^+ , 39 l^+ に対応する.

Fig. 2に電磁型壁面変形アクチュエータの構造を示す. 壁面変形アクチュエータは, 流れ方向長さ14mm(169 l^+), スパン方向長さ2.4mm(29 l^+)であり, 厚さ0.1mmのシリコンゴム膜の下部に長さ10mm, 幅1mm, 厚さ0.5mmの希土類永久磁石を接着し, 壁面に埋め込んだコイルによって発生する磁界によって, 壁面を上下させる. なお, コイルの中心には発生する磁界を強めるための鉄心が入っている. 12Vの印可電圧に対する静変位は約100 μ m(1.2 l^+)であり, 12Vp-pの正弦波の電

圧に対するアクチュエータの共振周波数は約500Hz, 変位約60 μ m(0.7 l^+)を示し, DNS⁽⁴⁾より推定されるアクチュエータの要求仕様とほぼ一致している(図省略).

Fig. 3に熱膜せん断応力センサ⁽³⁾の構造と定温度型回路を示す. 熱膜部は, 長さ200 μ m(2.4 l^+)の白金抵抗体であり, 厚さ1 μ mの窒化ケイ素のダイアフラム(400×400 μ m²)上に形成される. 定温度型回路は, 作動流体の温度 T_a と熱膜の温度 T_h との差 ΔT を一定に保つため, シリコン基板上に形成された周囲温度センサ R_t をブリッジ回路に含んでいる. 本研究では, ΔT を約60°C(過熱度約0.2)に設定した. 流れ方向せん断応力乱れのパワースペクトルの測定値を, 同じレイノルズ数のDNS⁽⁵⁾と比較すると, 50Hzでゲインが約50%に低下することが示されている(図省略)が, Fig. 4に示す流れ方向せん断応力のスパン方向2点相関の計測値は, DNS⁽⁵⁾とよい一致を示しており, チャネル乱流中の特徴的な流動構造を捉えていることがわかる.

制御コントローラには, 224chのAD入力, および, 96chのDA出力を備えたDSP制御システム((株)エムティティ, DSP5111)を用いた. 制御ループの繰返し周波数は, 制御アルゴリズムの計算負荷に依存するが, 5kHz程度である. アナログ入力と出力の間の時間遅れは0.1msと非常に小さい.

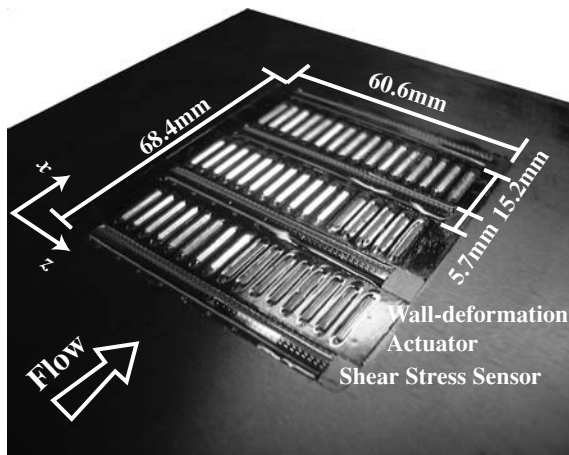


Fig. 1 Prototype of the feedback control system with arrayed sensors and actuators.

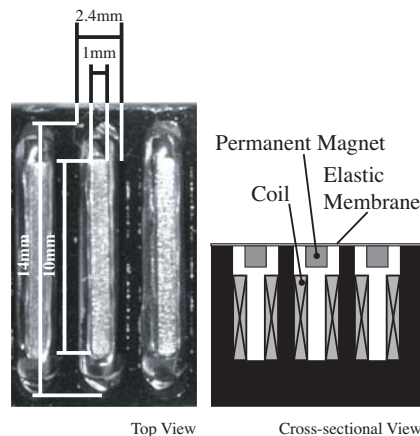


Fig. 2 Magnified view of wall-deformation magnetic actuator.

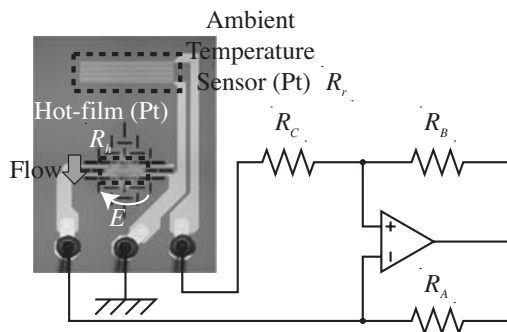


Fig. 3 Constant temperature circuit of micro hot-film shear stress sensor with ambient temperature sensor.

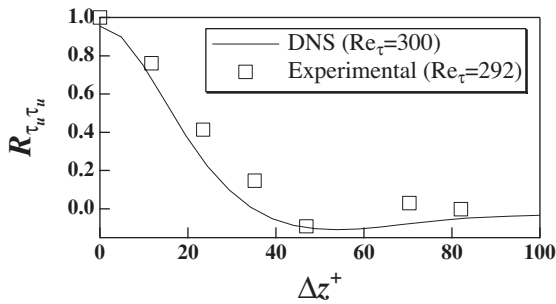


Fig. 4 Spanwise two-point correlation of the streamwise shear stress fluctuations.

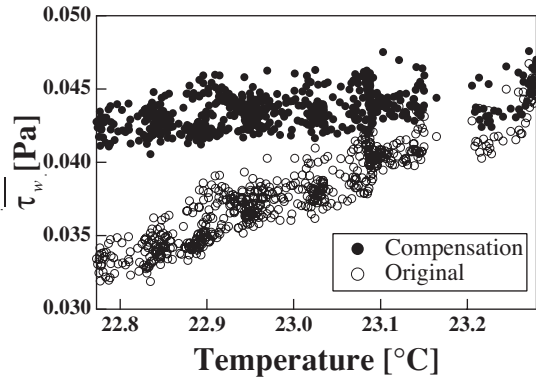


Fig. 5 Streamwise mean shear stress dependency on ambient temperature at $Re_{\tau}=300$.

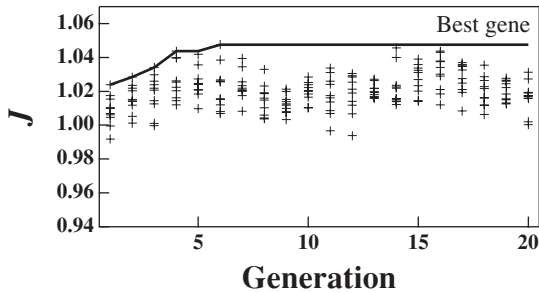


Fig. 6 Cost function based on streamwise mean shear stress versus generation of the GA-based control algorithm.

3. 温度補正によるせん断応力測定の高精度化

本研究の制御実験では、GAにより多くの試行を繰り返すため、一連の実験は数時間に及び、その間 T_a を一定に保つことは困難である。また、マイクロせん断応力センサでは、強制対流分比べて基板等への熱伝導による熱損失が大きく、感度が低いために空気温度の影響を受けやすく、温度補正を行う必要がある。

せん断応力 τ_w の算出には、強制対流による伝熱量 ΔQ とセンサの出力電圧 E を対応させる。 ΔQ は出力電圧 E と無風状態での出力電圧 E_0 、熱膜の抵抗値 R_h を用いて、

$$\Delta Q = E^2/R_h - E_0^2/R_{h0} \quad (1)$$

と表し、通常は R_h を一定とみなす。 τ_w が $E^2 - E_0^2$ の3次式で表せると仮定すると、 a, b, c, d を定数として、

$$\tau_w = a + b(E^2 - E_0^2) + c(E^2 - E_0^2)^2 + d(E^2 - E_0^2)^3 \quad (2)$$

である。しかし、 R_h は温度の関数であり、

$$R_h = R_{h20} \{1 + \alpha(T_h - 20^\circ\text{C})\} = R_{h20} \{1 + \alpha(\Delta T + T_a - 20^\circ\text{C})\} \quad (3)$$

と書ける。ここで、 R_{h20} は T_a が 20°C での熱膜の抵抗値、 a は温度係数である。従って、 ΔT をほぼ一定に保っていても、 T_a の変化が著しい場合 R_h も変化し、式2で R_h を一定とすると τ_w が正しく求まらないことがわかる。そこで、 τ_w の空気温度の依存性を低減するため、実際の動作時における R_h を用いて熱伝達量 ΔQ を算出することとした。ここで、式1を用いることもできるが、配線抵抗等の影響により、ブリッジのバランスが変わり ΔT が正確に求まらないため、 R_h は以下のように T_a

の1次式で推定する。

$$R_h = A + BT_a \quad (4)$$

係数 A, B は風速一定のもと T と E の関係より求める。 T_a に対する平均せん断応力の測定値の変化を Fig. 4 に示す。温度補正を行わない場合、温度がわずか 0.5°C 増加するのに対して、平均せん断応力は約30%増加しているが、温度補正を行うことで、温度変化による影響を約10%に減少させることができた。

4. 遺伝的アルゴリズム

アクチュエータの印可電圧 E_A は、アクチュエータ上流のスパン方向位置が $\Delta z^+ = -39, 0, 39$ にある3つのセンサによって測定される流れ方向せん断応力 τ_i の変動成分を用い、次式のように与えた。

$$E_A = C \sum_{i=1}^3 W_i (\tau_i - \bar{\tau}_i) \quad (2)$$

ここで $\bar{\tau}_i$ は平均せん断応力である。全てのアクチュエータは、同一の定数 C と重み係数 W_i を用いて駆動される。ここで、重み係数 W_i は5ビットの遺伝子で表され、評価関数が最大となるようにGAにより決定される。

評価関数 J は、システム最下流の3つのセンサによって測定される τ_j と直前に測定される無制御下のせん断応力値 $\tau_{j\text{no-control}}$ を用い、

$$J = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t \tau_{j\text{no-control}} dt / \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t \tau_j dt \right) \quad (3)$$

とした。 J の増加は、制御による平均せん断応力の減少を意味する。個体数を10とし、20世代、計200回の試行回数を行った。積分時間 Δt は20秒であり、粘性時間で $t^+ = 4 \times 10^4$ に相当し、この間のサンプル数は100000点である。

Fig. 4にGAを用いた制御の各世代に対する J の推移を示す。第1世代において、各個体はランダムに決定されるため、 J は小さい値を持つが、世代が進むにつれ、 J の大きな遺伝子が継承され値は徐々に大きくなり、第14世代において J が1.048、せん断応力の平均値で約4%の減少が得られた。しかし、現状では、同じ重み係数を用いた場合でも評価関数の変化と同程度のばらつきが生じており、今後、誤差低減とともに評価関数にランダムノイズを含む場合でも最適化を効率良く行う手法の開発が必要と考えられる。

5. 結論

マイクロ熱膜せん断応力センサ群および、電磁型壁面変形アクチュエータ群を組み合わせた、壁乱流のフィードバック制御システムを構築した。熱式のせん断応力センサの出力電圧に温度補正を加え、せん断応力計測における温度依存性を低減した。また、遺伝的アルゴリズムを用いた最適制御システムを構築し、プロトタイプ制御システムに適用した。その結果、与えた評価関数に対し有効な制御入力を与えることが可能であり、せん断応力の平均値を約4%減少させることができた。今後、LDVによる流動構造の測定を行い、せん断応力の平均値の減少のメカニズムを解明する予定である。

本研究は、文部科学省開放的融合研究推進制度の援助を受けた。また、本研究で用いたセンサの製作にあたっては、(株)山武の上運天昭司氏らのご協力を得た。記して謝意を表す。

引用文献

- 1) N. Kasagi: Int. J. Heat & Fluid Flow, 19, (1998), 128.
- 2) C.-M. Ho & Y.-C. Tai: Annu. Rev. Fluid Mech., 30, (1998), 579.
- 3) T. Yoshino, Y. Suzuki, and N. Kasagi: Proc. 3rd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, (2003), 179.
- 4) T. Endo, N. Kasagi, and Y. Suzuki: Int. J. Heat & Fluid Flow, 21, (2000), 568.
- 5) K. Iwamoto, Y. Suzuki, and N. Kasagi: Int. J. Heat & Fluid Flow, 23, (2002), 678.