日本流体力学会年会 2003 講演論文集

B-343 GA 規範フィードバック制御システムによる乱流摩擦抵抗低減に関する研究

Turbulent Skin Friction Reduction with GA-based Feedback Control System

○吉野 崇(東大工), 鈴木 雄二 (東大工), 笠木 伸英 (東大工), 今北 暁夫 (東大工)

Takashi YOSHINO^{*}, Yuji SUZUKI^{*}, Nobuhide KASAGI^{*} and Akio Imakita^{*}

^{*}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 1 mm are employed for the measurement of streamwise wall shear stress fluctuations, while arrayed magnetic actuators with 3.2 mm 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. A digital signal processor with a time delay of 1.6 ms is employed to drive output voltage for the actuators. 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 root-mean-square value of the wall shear stress fluctuations is decreased by up to 9 % among 100 trials in 10 generations.

1. 序

乱流およびそれに伴う輸送現象は自然界,産業界に多くみ られ,これら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

Endoら⁽³⁾は実際の流れ場における乱流制御を考慮し,有限 な大きさを持つ壁面せん断応力センサ群,および,壁面変形 アクチュエータ群を模擬したチャネル乱流のDNSを行い,壁 面近傍の縦渦構造を弱めることで,約12%の壁面摩擦抵抗低 減効果が得られることを示した.また,Morimotoら⁽⁴⁾は,壁 面の局所的な吹出し吸込み量を流れ方向せん断応力の線型和 によって決定する単純なアルゴリズムにより抵抗低減が得ら れることを示し,実験室実験での検証が待たれている.

本研究では、これらの DNS を通じて得られた知見を元に、 熱膜せん断応力センサ群、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制御システムのプロトタイプを試作し、 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法により、実際の流れ 場へ適用する際の指針を得ることを目的とする.

2. 乱流制御システム

Fig.1に著者らの試作したプロトタイプ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.実験は断面50×500mm²の チャネル乱流風洞で行い、十分発達した乱流状態が形成され る流路入口からチャネル幅の80倍の位置にテスト部を設け



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

た. バルク平均流速 U_{m} は 3.0 m/s であり, チャネル半幅 δ と 摩擦速度 u_{t} よりなるレイノルズ数 Re_{t} は 300 である. このと き, 1粘性長さtは 0.083 mm であるため, 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 12t, 39tに対応する.

Fig. 2にせん断応力センサ⁽⁵⁾の構造を示す.センサ部は,厚 さ1µmの窒化ケイ素のダイアフラム(400×400µm²)上に形成 される長さ200µm(2.4 l^{*})の白金抵抗体である.抵抗体の温度 は、ブリッジ回路により一定温度(過熱温度約60°C)に保た れる.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⁽⁶⁾と比較すると、50 Hzでゲイ ンが約50%に低下することが示されているが,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⁽⁶⁾と比較する 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(図省略).

Fig. 3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14 mm(169 l⁺),スパン 方向長さ2.4 mm(29 l⁺),厚さ0.1 mmのシリコンゴム膜の下部 に長さ10 mm,幅1 mm,厚さ1 mm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.12 Vの印可電圧に対する静変位は約200 µm(2.4 l⁺)である(図省略).Fig.4に12 Vp-pの正弦波の電圧 に対するアクチュエータの動特性を示す.個体差にばらつき







Fig. 3 Magnified view of wall-deformation magnetic actuator.



Fig. 4 Dynamic response of wall-deformation magnetic actuator.



Fig. 5 RMS value of the wall shear stress fluctuations versus generation of the GA-based control algorithm.



Fig. 6 Correlation coefficients of the streamwise shear stress fluctuations at the evaluation sensor. a) Streamwise two-point correlation with the fluctuations at $\Delta x^*=252$ upstream of the evaluation sensor, b) Auto correlation coefficient.

があるものの,いずれも共振周波数は約600 Hz,変位約200 µm(2.4 h)を示し,DNS⁽³⁾より推定されるアクチュエータの要 求仕様を満たしている.

制御コントローラには、32 chのアナログ入出力を備えた DSPボード(Sundance Inc., SMT-326)を用いた.制御ループの 繰り返し周波数は、制御アルゴリズムの計算負荷に依存する が、4 kHz程度である. アナログ入力と出力の間には1.6 msの 時間遅れがあり、また、センサ、アクチュエータの動特性を 含めたシステム全体の時間遅れは、2.2 ms である.

3. 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(GA)に基づく最適化手法をプロトタイ プ制御システムに用いた.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の変 動成分 τ_a , を用い,次式のように決定した.

$$E_{A} = \sum_{i=1}^{3} C_{i} \cdot \tau_{w'i}$$
(1)

全てのアクチュエータは、同じ重み係数*C*,を用い駆動される.ここで、重み係数*C*,は5ビットの遺伝子で表され、評価 関数が最小となるように決定される.

評価関数は,システム最下流でスパン方向に並ぶ5つのセ ンサによって測定される τ,, を用い,

$$J = \sum_{j=1}^{5} \int_{t}^{t+\Delta T} \tau_{w'j}^{2} dt$$
 (2)

とした. 個体数10で10世代,計100回の試行回数を行った. 積分時間 ΔTは40秒であり,粘性時間でt=10⁵に相当する.

Fig. 5 に GA を用いた制御の各世代に対するせん断応力の rms値 τ_{wrms} を示す.各試行は異なる遺伝子を持つためばらつ いているが,第4世代において rms値の減少が約9%となっ た.以後,このときのせん断応力乱れの特性を制御を加えな い状態と比較する.Fig. 6a に,上流から3列目のセンサと $\Delta x^*=252$ 下流にある評価用のセンサによって測定される流れ 方向せん断応力の流れ方向2点相関を示す.縦渦の平均的な 対流速度 $U^*\sim10$ と 2 つのセンサ間隔 $\Delta x^*=252$ から算出される 遅れ時間近傍($\tau^*\sim22$)で相関が正のピークを持つことがわか る.また,制御下では $\tau^*>22$ で2点相関が上昇している.流れ 方向せん断応力の自己相関 (Fig. 6b)も τ が大きくなると,制 御を加えない場合に比べ増加している.このことから,この 状態においては,ストリーク構造がより安定になっていると 推測される.

4. 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,壁乱流のアクティブ制御 システムを構築した.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,せん断応力乱れが9%減少した.

本研究は,文部科学省開放的融合研究推進制度,および,科 学研究費補助金特別研究員奨励費(13-6100)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.記して謝意を表する.

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. Endo, N. Kasagi, and Y. Suzuki: Int. J. Heat & Fluid Flow, 21, (2000), 568.

4) K. Morimoto, K. Iwamoto, Y. Suzuki, and N. Kasagi: Proc. 3rd Symp. Smart Control of Turbulence, (2002), 107.

5) T. Yoshino, Y. Suzuki, N. Kasagi, and S. Kamiunten: Proc. 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2, (2001), 153.

6) K. Iwamoto, Y. Suzuki, and N. Kasagi: Int. J. Heat & Fluid Flow, 23, (2002), 678.