

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロセンサ・アクチュエータ群を用いた
壁乱流フィードバック制御システムの構築と評価に関する研究

氏 名 吉野 崇

1. 背景

自然界における流体现象の大半は乱流状態にあり、様々な波及効果を及ぼしている。実現象において、乱流状態は、長所にも短所にもなりうる。例えば、乱流熱伝達や乱流による物質拡散、乱流燃焼などは、乱流であることがプラスの要因として作用する。一方、壁面摩擦抵抗の増大や剥離、乱流騒音などは、マイナス要因といえる。理想的な流動場を作るため、このような乱流を制御によって促進、抑制させることは、当然の欲求である。とりわけ、近年のエネルギー問題、環境問題に対する関心の高まりから、問題の解決策の一つとして、乱流制御に対する期待も大きい。

乱流制御手法の中でも、フィードバック制御は、センサ情報をもとにして、制御入力を決める手法である。そのため、効率的に乱流構造を変化することができ、少ない投入エネルギーで大きな制御効果が得られると期待されている。そこで、本研究では、様々な乱流制御手法のうち、フィードバック制御に焦点を当て、研究を行う。

本研究では、まず、乱流制御用センサとして用いるマイクロ熱膜せん断応力センサの動特性改善のための最適設計を行う。そして、得られた知見をもとにセンサの試作、特性評価を行う。さらに、マイクロセンサ、アクチュエータ群を用いた壁乱流フィードバック制御システムを構築し、チャンネル乱流風洞へ導入、評価することで、実験室実験での乱流制御を実現することを目的とする。

2. マイクロ熱膜せん断応力センサの最適設計

本研究で製作した Type 1 センサの構造を図 1 に示す。フィードバック回路により一定温度(過熱温度約 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)に保たれる熱膜は、長さ $200\text{ }\mu\text{m}$ の白金薄膜の抵抗体であり、厚さ $1\text{ }\mu\text{m}$ の窒化ケイ素(SiN_x)のダイアフラム上にパタニングされている。ダイアフラムの下部には対角線長さ $W = 560\text{ }\mu\text{m}$ 、深さ $200\text{ }\mu\text{m}$ のキャビティが形成され、ダイアフラムには膜内の熱伝導を抑制するためにスリット状の切り欠きが設けられている。なお、動特性の評価には、ダイアフラムの長さが $W = 700\text{ }\mu\text{m}$ の Type 2 センサも用いた。 $\text{Re}_\tau = 300$ における流れ方向せん断応力乱れのパワースペクトルを、同じ

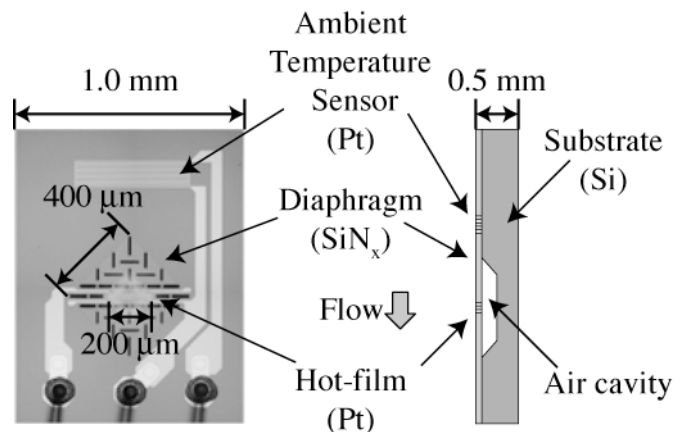


Fig. 1 Schematic diagram of a sensor Type 1.

レイノルズ数の DNS データと比較すると、特に、Type 2 センサにおいて、低周波数では良く一致しているものの、40 Hz から急激に値が低下し、動特性が十分でないことが明らかとなった。

そこで、壁面せん断応力センサの最適な構造を提案するため、センサの伝熱解析を行った。まず、理想状態を仮定して基板側への熱伝導を無視し、空気側のみを考慮した場合の評価を行ったところ、熱膜の流れ方向長さの小さな範囲では長さによらず、粘性長さで無次元化される周波数に対しほぼ一定のゲイン特性を持つことが明らかとなった。

次に、基板側の熱伝導を考慮し、試作センサを模擬した解析を行った。Type 2 センサの構造を模擬したセンサモデルでは、ダイアフラム上からフィン効果により間接的に流体中へ奪われる熱量が大きいため、動特性が大きく劣化することが明らかとなった。そこで、ダイアフラム長さ W を短くしたところ、動特性が向上し、 $W = 200 \mu\text{m}$ では、壁面断熱のセンサよりも高応答であることがわかり、動特性の面と総発熱量の面から最適であることを示した。

センサモデルの熱解析の結果に基づき、ダイアフラムの流れ方向長さを、 $W = 200 \mu\text{m}$ とした、Type 3 センサの設計、製作を行った。基本構造は Type 1 センサ、Type 2 センサと同じであるが、ダイアフラム上のスリットは膜内の熱伝導をさらに抑制するため、白金薄膜との間隔を $10 \mu\text{m}$ に縮めた。また、Type 1 センサ、Type 2 センサは、センサ表面に高さおよそ $300 \mu\text{m}$ の金配線が突き出し、センサ後方への影響が懸念されるため、Type 3 センサは、シリコン基板の表側パターンから裏側に電気的接続をとるための貫通電極を有している(図 2)。

レイノルズ数 Re_τ が約 650 でのパワースペクトルを DNS データと比較し、DNS のパワースペクトルの 50% の値を示す値をカットオフ周波数として定義すると、Type 2 センサでは 83 Hz であったところが、Type 3 センサでは 520 Hz となり、数値解析をもとにセンサ構造を最適化することにより動特性を大幅に改善することができた(図 3)。

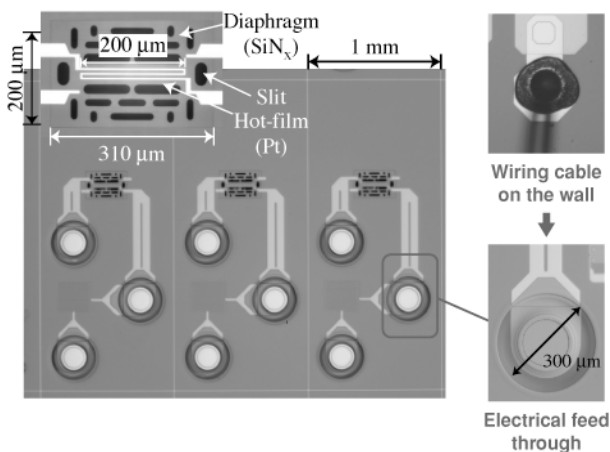


Fig. 2 Prototype of wall shear stress sensor having the backside electric contact.

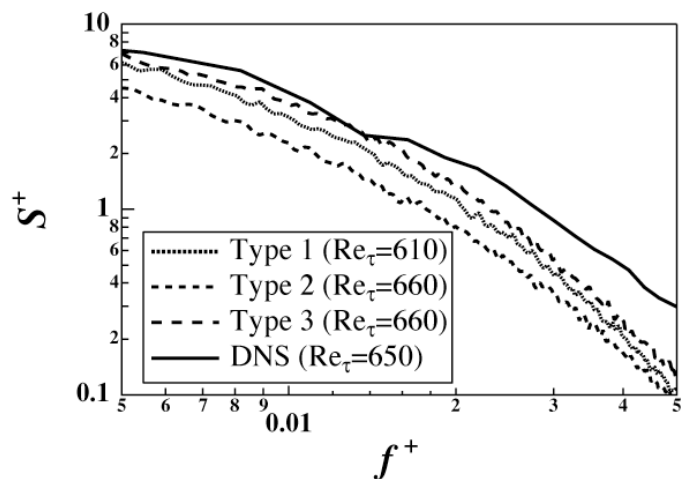


Fig. 3 Comparison of the power spectra of wall shear stress between the DNS data and the measurement data.

3. フィードバック制御システムの構築と評価

本研究で構築した制御システムを図4に示す. センサ群には, Type 1 センサを用い, 1列48個が約1 mm 間隔に並ぶ. このセンサの動特性は前述のように十分ではないが, $Re_\tau = 292$ における, 流れ方向せん断応力のスパン方向2点相関は, DNS データとよく一致しており, 乱流構造を十分とらえることができる. アクチュエータ群には, 電磁型の壁面変形アクチュエータを用い, スパン方向間隔約3.2 mm で1列に16個配置した. 電磁型壁面変形アクチュエータ(図5)は, 流れ方向長さ14 mm, スパン方向長さ2.4 mm であり, 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0.5 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. 共振周波数は約750 Hz で, 変位は約50 μm である. また, システムの時間遅れは, 0.1 ms 程度である.

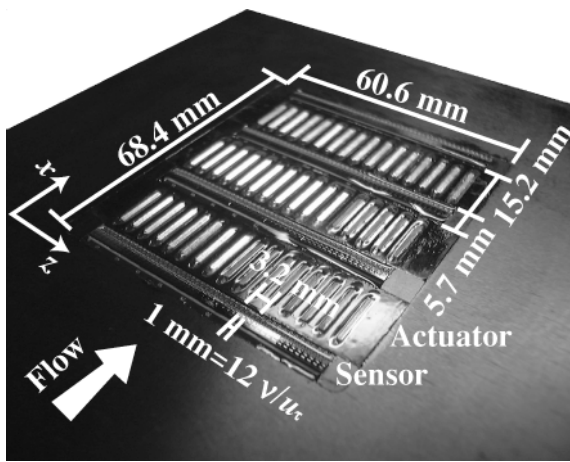


Fig. 4 Feedback control system with arrayed sensors and actuators.

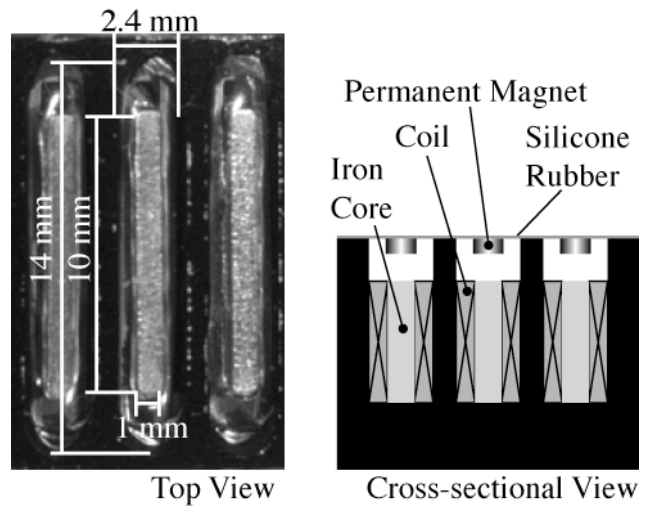


Fig. 5 Magnified view of wall-deformation magnetic actuator.

アクチュエータの印可電圧 E_A は, スパン方向位置が $\Delta z^+ = -39, 0, 39$ にある, アクチュエータ上流の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_i' に重み係数 W_i をかけた和で与えられる. 重み係数 W_i は, 評価関数 J が最大となるように遺伝的アルゴリズム(GA)により決定される. GA を用いた制御の各世代に対する J の推移を見たところ, 約8%の平均せん断応力の減少が見られた(図6).

GA によって得られた係数を用いて, 単一のアクチュエータを動作させたときの, アクチュエータ直上での流れ場を

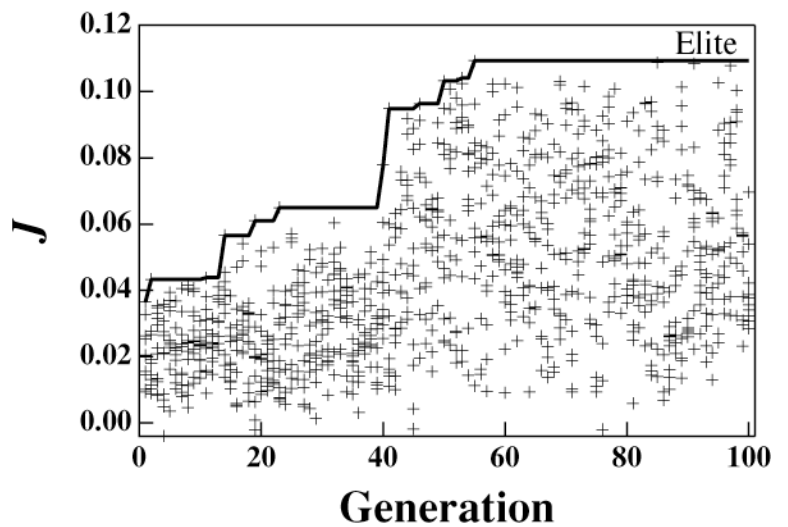


Fig. 6 Result of cost function set to be reduction of streamwise mean shear stress.

2成分ファイバーLDV(Dantec Dynamics Inc.)で測定した。平均速度分布，変動速度分布を見ると，いずれも，制御を加えない状態と加えない状態に変化が見られなかったが，壁面近傍において，レイノルズ応力がわずかに減少しているのが見られた(図 7)。完全発達した 2次元チャンネル乱流において，摩擦係数 C_f は，レイノルズ応力の壁垂直方向の積分で表記できるため，本実験においても，壁面近傍のレイノルズ応力の減少により，摩擦係数 C_f が減少し，結果として，流れ方向のせん断応力が減少したと考えられる。

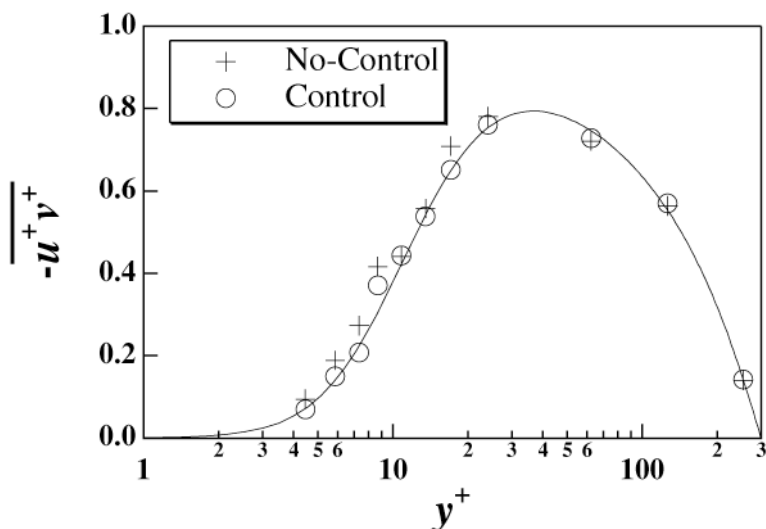


Fig. 7 Reynolds shear stress distributions above the single actuator normalized by friction velocity of no-control state.

4. 結論

マイクロ熱膜せん断応力センサにおいて，基板側の熱伝導とともに空気中の熱伝導がセンサの特性に大きな影響を与えることを示した。また，ダイアフラム上にスリットを設置することにより動特性の改善が期待できることを示した。そして，この結果に基づき，センサを試作して動特性の評価を行い，従来のセンサに対して，顕著な動特性の向上が得られることを明らかにした。

マイクロセンサ，アクチュエータ群を用いた壁乱流フィードバック制御システムを構築し，レイノルズ数 $Re_\tau = 300$ のチャンネル乱流風洞において評価を行い，平均せん断応力を約 8% 低減した。

(以上)