

乱流の知的制御

Smart Control of Turbulence

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻

笠木伸英, 鈴木雄二

Nobuhide Kasagi and Yuji Suzuki

Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo

1. 知的乱流制御とは

乱流は、レイノルズ数が大きな流れ、すなわち、流体の速度が大きく、スケールの大きな流れで現れる一種のカオス的流体現象であり、不規則性、3次元渦運動、散逸性などで特徴付けられる。我々の身の回りの流れのほとんどは乱流であるといつて過言でない。乱流状態では伝熱や混合が増加する一方で、流れの抵抗や流体騒音も増大するため、乱流および付随する様々な輸送現象は産業あるいは環境に関わる諸問題において重要な因子である。従って、乱流を含む複雑な熱流動を予測する技術は、航空機などの高速輸送機器や、高効率で安全な機械・プラントの設計、製造プロセスにおける高品質の安定確保、住・都市環境のアセスメントにとって不可欠である。乱流の研究は一世紀以上に渡って行われているが、解析解が存在しないため、実験データや数値シミュレーション結果を用いた物理モデルの構築が続けられている。一方、自然現象である乱流を人為的に自在に操作し、流体抵抗や乱流音の低減、伝熱増進・抑制・分布制御、混合・拡散・化学反応の促進、低環境負荷燃焼を達成することは、乱流研究の当初からの夢であったが、従来実現不可能と考えられてきた。しかし、最近の制御理論、制御ハードウェアの発達によって、実現性の高い近未来技術に変貌しつつある。

今から70年ほど前、Gray⁽¹⁾は、イルカの運動特性について評価を行った。彼は、大胆な仮定の下にイルカ(white-belly dolphin)の最大遊泳速度から筋肉の必要重量を推定し、実際にイルカが持っている筋肉が必要量の7分の1程度しかないことを見つけた。これは、Grayのパラドックスとして知られ、イルカの皮膚が柔らかいことによって乱流の摩擦抵抗が減るのではないかと考えられたが⁽²⁾、現在でもその真偽のほどは定かではない。

一方、サメは、速く泳ぐ種類と遅く泳ぐ種類では鱗の表面性状が異なり、速く泳ぐサメでは鱗の1つ1つの表面に微小な縦溝があることが知られている⁽³⁾。溝の間隔は体の位置によって異なるが、35~100 μm と大変小さい。このサメの鱗の溝はリブレットと呼ばれ、最大8%程度の乱流摩擦抵抗低減を引き起こすことが実験室実験によって明らかにされている⁽⁴⁾。その後、3M社の技術者がリブレットに関心を持ち、1983年にビニールシートの表面に微細な縦溝を形成したリブレットフィルム(図1)を開

発した。オリンピック競技やアメリカズ・カップ(ヨットレース)でも使用され、航空機業界でも実機テストで全抵抗の2%程度が低減することが実証されている。しかし、メンテナンスのコストを考えると経済的な効果は小さく、実用には至っていない。

これらの抵抗低減効果は、流れが穏やかな状態(層流)では起こらず、乱流状態で生じることが知られている。乱流では流体の抵抗が著しく増大するので、イルカの皮膚やサメの鱗は生物の進化の過程で現れた絶妙な乱流制御装置と言える。1970年代のオイルショック以降、NASA Langley研究所などを中心に様々な乱流摩擦抵抗の低減に関する研究が行われきたが、それらの多くは生物からヒントを得たもの、あるいは直感的・経験的な手法であり、効果が小さい、あるいは、制御に必要なエネルギーまで考慮すると実質的な利益が小さい、などの理由で実用化された例はない。

これに対して、最近、乱流現象の知的制御、すなわち、時々刻々の流れの状態に応じて乱流現象をフィードバック的に制御しようとする試みが、乱流工学の分野で最もホットな話題の一つとなっている。今なぜ乱流制御が改めて取り沙汰されるのか。おそらく三つの側面を指摘できよう。第一に、環境負荷軽減への要請から、乱流現象の制御によってもたらされる様々な高効率システムの開発への大きな期待がある。第二に、数値風洞ともいうべき乱流の直接数値シミュレーション(DNS)技術の発達による乱流物理の基礎的知見の蓄積、最適制御理論や情報理論と流体力学の融合による理論的基盤の進展など、乱流制御を実現するために必要なソフトウェア面での著

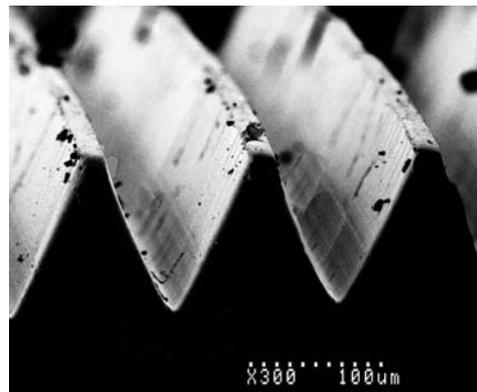


図1 リブレットフィルム(溝間隔125 μm)のSEM写真

しい発展が挙げられる．そして第三に，マイクロマシン (MEMS) 技術の急速な発達により，付加価値の高い乱流制御を可能とするハードウェアが製作可能となりつつあることが挙げられる．

このような認識のもと，文部科学省開放的融合研究により，2000年に知的乱流制御センター (<http://www.turbulence-control.gr.jp/>) が設置され，産業技術総合研究所 (AIST)，宇宙航空研究開発機構 (JAXA)，海上技術安全研究所 (NMRI)，および，複数の大学グループからなる5年間の乱流制御に関する研究開発プロジェクトが進められている．ここでいう「知的」は，「Intelligence」というよりは「Smart」であり，上述のような乱流物理現象の理解に基づいた理論的裏づけのある制御を意味し，従来の経験的，直感的な乱流制御に対比する言葉として用いられている．

本稿では，まず，乱流の特徴，制御理論の現状について概説し，最後に著者らが進めてきた知的乱流制御の試みの1つとして，壁乱流のフィードバック制御システムの開発状況と展望について解説する．

2. 乱流の特徴

乱流の特徴として，以下を挙げるができる．1) 非線形性の強い偏微分方程式 (ナビエ・ストークス方程式) で支配される連続体の現象である．2) 流れは局所的なメカニズムだけでは定まらず，圧力場を通して非局所的な影響を受ける．3) 本質的に自由度が大きい現象である．4) カオス的な様相を呈する散逸現象である．

図2は，乱流現象のダイナミクス解明を目指して，平行平板間を流れる乱流 (チャンネル乱流) をDNSによる計算で忠実に再現し，その結果をコンピュータグラフィックスにより可視化したものである⁽⁵⁾．乱流中に存在する最も大きな渦と小さな渦のスケール比は，レイノルズ数 Re の3/4乗に比例することが知られ，例えば Re 数が24000の図中の乱流を精密に数値計算するために，実に2800万点もの格子点が用いられている．ここで，注目すべきは，複雑な渦運動のなかで，壁のごく近傍に流れ方向に軸を持つ縦渦と，流れを横断する方向に高速・低速の縞状の領域が並ぶ流れパターン (ストリーク構造) が観察されることである．これらの流れパターンは乱流の準秩序構造と呼ばれ，1960年代後半にスタンフォード大学で初めて実験的に調べられた．特に縦渦は乱流の生成，維持，消滅に中心的な役割を果たしている^(6,7)．

このような乱流の特徴を考えると，効率の良い制御を達成するには，乱流の準秩序構造を如何に選択的に操作して，少ない動力で全体の現象を望ましい方向に操作するかが重要な観点となる．従ってセンサやアクチュエータは，これらの準秩序構造と干渉できるような時空間スケールを持たなければならない．図3に，実際の応用分野における縦渦の時空間スケール，即ちセンサ及びアクチュエータに要求される寸法・動作周波数を示す．例と

して，大型航空機やリニア新幹線では寸法は0.1mm，動作周波数は10kHzのオーダーとなる．従来，このように微細かつ高い応答性を有するデバイスは実現不可能と考えられてきたが，MEMS技術の著しい発展により可能性が見えてきた．

3. 乱流の制御アルゴリズム

図4は，壁面上にセンサ，アクチュエータを配列し，コントローラと組み合わせた，壁乱流のフィードバック制

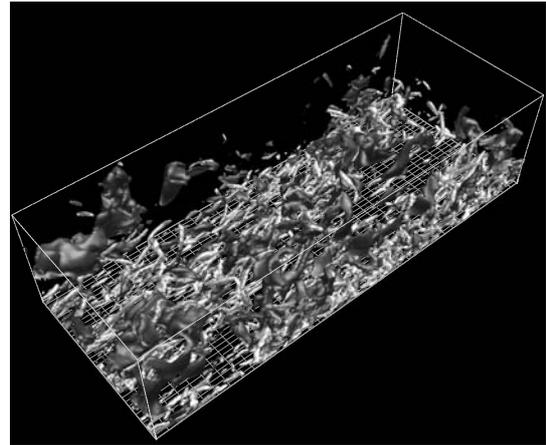


図2 平行平板間の乱流のDNS計算結果 ($Re=24000$)⁽⁵⁾．白：渦構造，黒：乱流応力の分布．

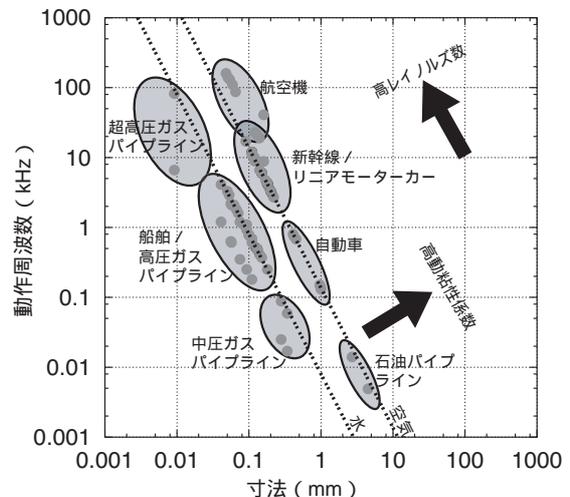


図3 壁乱流の知的制御のためのセンサおよびアクチュエータに求められる仕様．

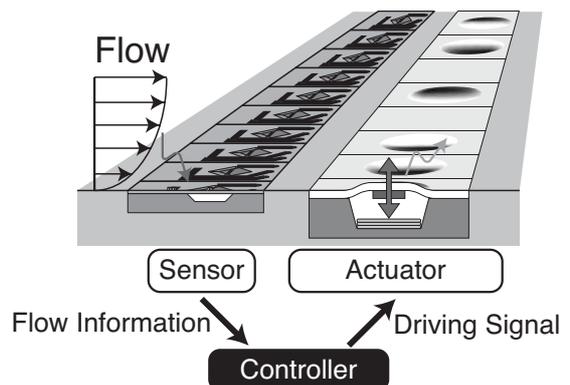


図4 壁乱流のフィードバック制御システムの概念図．

御システム概念図である。一組のセンサ、アクチュエータのみを考えると、図の構成はフィード・フォワードであるが、これが流れ方向に多数列並んだデバイスを想定すると、全体としてはフィードバックシステムとして作用する。実用上、センサ、アクチュエータを流体中に設置することは困難であるので、流れ場の情報は壁面上で検知する必要があり、制御入力を与える位置も壁面上に限られる。前述のように、乱流では極めて自由度が多いので、このような制約は、制御系を不可観測・不可制御にしていると考えられる。しかし、我々の目的は、制御対象をある目標軌道に沿って遷移させるのではなく、摩擦抵抗や伝熱量などの物理量を時空間積分した値を操作することであるから、その意味では、不可観測、不可制御であっても目的を達成する制御が可能と予想される。

スーパーコンピュータ能力の向上に伴って、1980年代後半にDNSが可能となると、数値シミュレーションによって乱流制御アルゴリズムの開発と検証が行われるようになった。Choiら⁽⁸⁾は、壁乱流のDNSにおいて図5に示すような仮想的なセンサ面を流体の内部に設け、この面における壁垂直方向の流速と逆向きの局所的な吹き出し・吸い込み速度を壁面で与えた。彼らは、このシミュレーションでRe数が5000程度において30%の抵抗低減を得た。抵抗低減によるエネルギー利得率は100%以上であり、仮想的な制御とはいえフィードバック制御の有効性が明らかとなった。

乱流の制御アルゴリズムは、(準)最適制御、乱流構造規範型制御、適応制御などに分類される^(9,10)。以下では、それぞれについて概説する。

3.1 随伴系を用いた最適制御・準最適制御

周知のように、最適制御は一般に制御対象(プラント)の定式化と制御則(コントローラ)の構築によって成立する。例えば、線形2次形式問題では、プラントのモデルは時不変係数の状態方程式、コントローラはリカッチ方程式の解である。有限時間の最適制御では、状態方程式を初期時刻から順方向に、リカッチ方程式を最終時刻から逆向きに解いて、最適解が求まる。一方、スタンフォード大学のグループが、Lions⁽¹¹⁾による非線形系の最適制御を拡張し、ナビエ・ストークス方程式で記述される乱流の最適制御手法を提案している⁽⁹⁾。彼らの手法では、ナビエ・ストークス方程式が状態方程式、その

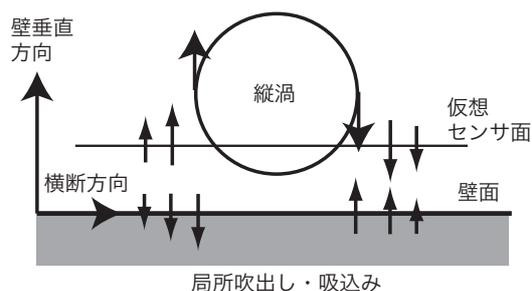


図5 Choiら⁽⁸⁾による仮想センサを用いた壁乱流のフィードバック制御の概念図。流れは紙面に垂直方向。

随伴方程式がリカッチ方程式に対応し、汎関数の微分であるフレッシュ微分を用いることによって、流れの全領域の流速、圧力とその随伴変数から評価関数を停留化させる最適な制御分布を算出する。

Bewleyら⁽¹²⁾は、チャンネル乱流の抵抗低減をねらいとして、壁面上での流体の吹き出し・吸い込みを制御入力として用いる最適制御をDNSにより評価した。評価関数 J を、吹き出し・吸い込み(速度 ϕ)の運動エネルギーと制御目標である壁面摩擦の和の、壁面上および時間に対する二重積分として、以下のように定義した。

$$J(\phi) = \frac{\ell}{2AT} \int_0^T \int_w \phi^2 dt dS + \frac{1}{AT} \int_0^T \int_w \frac{\partial u_1}{\partial x_2} dt dS \quad (1)$$

ここで、 A 、 T はそれぞれ積分面積、積分時間である。また、 ℓ は制御効果に対して制御入力の相対コストの比を表すパラメータであり、制御に関わるコストが高いほどは大きな値となる。彼らは、ナビエ・ストークス方程式とその随伴方程式をDNSにより数値的に解くことによって、最小の吹き出し・吸い込みエネルギーで最大の抵抗低減率を達成する ϕ の時空間分布を求めた。その結果、3000程度の低いRe数での評価ではあるが、50%を超える抵抗低減率が得られ、乱流状態を乱れない層流に変え得ることを示した。

著者らのグループでも、壁面摩擦、伝熱量、および、制御に必要なエネルギーの和を評価関数とし、壁面摩擦を変化させずに熱伝達を増やす目的で最適制御を試みた。一般に乱流の摩擦と熱伝達は相似性が強く、結果的に得られた伝熱量の増加率は数%程度とわずかであったが、準秩序構造のスケールに応じて異なる吹き出し・吸い込みパターンを加えることが熱伝達の選択的な増進に繋がることを明らかにしている。

上記の制御手法は、乱流制御の理論的境界の評価、あるいは、制御下における乱流物理現象の解明に極めて有用であるが、その計算には、膨大なコアメモリ、CPU時間が必要である。特に、随伴方程式の計算にはその時刻での速度、圧力など物理量の値が必要であり、制御時間の各時刻における数百万~千万点を越える格子点の物理量データを全て保存しておく必要がある。3000程度の低いRe数でもこれらのデータ量は数10GB、数万程度のRe数では少なく見積もっても数TBを超え、乱流制御の基礎研究としても計算リソース上の困難が大きい。従って、実用的には、より計算負荷の小さい制御方法の開発が必要である。

計算負荷の小さい実用的方法として提案された準最適制御⁽¹³⁾は、式(1)の時間積分を省略したものであり、現時刻での流れ場の状態から評価関数を最小化へ向かわせるための制御入力の最適な空間分布を時々刻々決定する。ナビエ・ストークス方程式の線形化と数値アルゴリズムの工夫により、壁面上の物理量のみから制御入力を算出できるアルゴリズムも提案されている⁽¹⁴⁾。これ

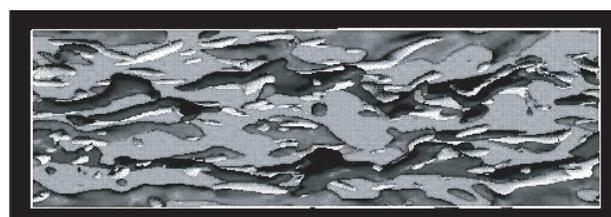
らの準最適制御アルゴリズムは、低いRe数において30%程度の抵抗低減をもたらすことがDNSによって明らかにされている。また、線形化したナビエ・ストークス方程式にLQR制御を用いる試みも報告されている。しかし、準秩序構造はRe数の増大に伴って複雑化し、非線形性もさらに強まると考えられ、準最適化と線形化による制御効果の劣化も予想される。実際、準最適制御による抵抗低減率、制御利得は、Re数が増加するに従って減少することが報告されている⁽⁵⁾。

3.2 乱流構造規範型制御

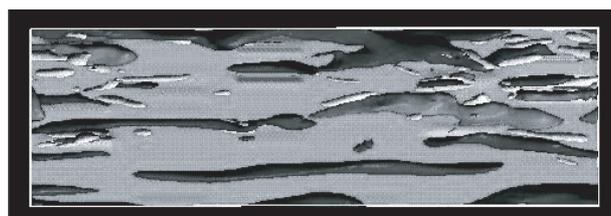
制御に用いるデバイスの物理的な大きさを考慮し、また、流れの壁面上での情報しか得られない実際の条件を想定して、壁面に配列されたセンサ群、変形アクチュエータ群による制御のDNS⁽¹⁷⁾が行われている。センサによって壁面せん断応力の空間勾配を算出し、ストリーク構造の横方向の変形を同定し、縦渦の平均的な位置を壁面の情報から推測した。自由に変形する壁面による乱流制御のDNSから、壁乱流特有の渦構造に作用させるためのアクチュエータの適切なスケールを求めた。そして、渦構造の回転運動を打ち消すようにアクチュエータを変形させることにより、壁近傍の縦渦運動が弱められ、その結果乱れによる運動量輸送が減少した(図6)。このような乱流構造の知識に基づいたアルゴリズムは、優れた制御成績が期待できると共に計算負荷も小さいので、実際のハードウェアの開発研究にとって有用性は高い。

3.3 適応型制御

適応型制御とは、ニューラルネットワーク(NN)、遺伝的アルゴリズム(GA)などを用いて、訓練を通じて成績の良いコントローラを自動構築しようとする方法である。Leeら⁽¹⁶⁾は、壁面の速度勾配を入力とするNNコントローラに前述の仮想センサ面を用いた吹出し・吸込



制御なし



制御あり

図6 チャンネル乱流制御のDNSで見られる壁面近傍準秩序構造の変化⁽¹⁵⁾(白:渦構造,黒:低速ストリーク,灰:高速ストリーク)。流れは左から右。

み制御⁽⁸⁾の制御入力を学習させ、チャンネル乱流に対して20%の摩擦抵抗低減を得ている。また、著者らのグループでは、実験的に計測しやすい流れ方向の壁面せん断応力分布を用い、せん断応力の時空間積分を最小にするようなGA規範の最適制御アルゴリズムを試みて、極めて単純な制御ルールで抵抗低減を実現している⁽¹⁷⁾。適応型制御では、プラントの特性をブラックボックスとして扱うので、システム、コントローラの双方に関して、学習時に経験した範囲外の入力に対しても適切な応答が得られるという保証はないが、例えば、ニューラルネットワークの内部構造に工夫をすることで汎化能力を向上させる手法も提案されている⁽¹⁸⁾。適応型制御は、必ずしも特性が明らかでない複雑な流れに対しても適用できることから、実用性の高い手法として期待されている。

以上のように、乱流の制御アルゴリズムは、DNSを開発のツールとして行われてきた。制御対象そのものが複雑すぎるため線形化、低次元モデル化が困難であり、制御工学分野で培われてきた制御理論の知識が現時点で必ずしも十分に活かされているとは言えない。しかし、今後、乱流物理と制御理論、情報理論との接点から、より効果の高い、計算負荷の小さいアルゴリズムが開発されていくことが期待される。

4 乱流フィードバック制御システム開発の現状

4.1 センサ

流体計測用のマイクロセンサは、MEMS技術の重要な応用分野の一つとして、比較的早くから開発が進められてきた。壁乱流では、壁面上で流れの情報を検知する必要があり、測定可能な物理量としては、壁面圧力、壁面せん断応力、壁面温度などに限られる。今までに、薄膜の変形量から圧力を測定するダイアフラム型センサ、流れにより壁面に加わるせん断応力を直接機械的に計測するフローティングエレメント型センサ、壁面にヒーターを埋め込み、流体中に奪われる熱量がせん断応力により変化することを用いた熱膜センサなどが開発されている⁽¹⁹⁾。例えば、UCLAとカルフォルニア工科大学の研究グループでは、長さ200 μm のポリシリコン薄膜をヒーターとする壁面せん断応力センサ群の試作を行った⁽¹⁹⁾。彼らは、厚さ2 μm の真空キャビティを下部に持つ窒化ケイ素ダイアフラム上にヒーターを蒸着することによって、基板への熱伝導の影響を抑えて応答周波数を向上させている。また、彼らは、ポリイミド基板上に島状のシリコンチップを形成することにより、曲率を持つ壁面に設置できるせん断応力センサ群の試作も行っている。

著者らは、同様のマイクロ熱膜せん断応力センサを試作した⁽²⁰⁾。図7は、1mm間隔で36-48個のセンサが並ぶセンサ群の一部であり、シリコンウェーハ上に形成した厚さ1 μm の窒化ケイ素のダイアフラム上に、長さ250 μm の白金ヒーターが蒸着される。ヒーター周囲の詳細な熱

解析を用いてダイアフラムの寸法，ダイアフラム上の断熱スリットの配置を最適化することにより，従来70Hzに留まっていた応答周波数を400Hzまで向上させた．また，このセンサは，実装の容易性を考慮し，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．

4.2 アクチュエータ

乱流制御に用いるアクチュエータとしては，前述の寸法，動作周波数に加え，動作量が大きいこと，使用環境において耐久性のあること，消費エネルギーが小さいことなどが必要である．マイクロマシンの分野で最も多く用いられるアクチュエータは静電気力を用いたものであるが，変位が小さく，清浄な動作環境が必要なことから，必ずしも乱流制御には適しているとは言えない．またマイクロマシン技術で製作されたデバイスは本質的にシリコン基板内の2次元構造であるので，流体に対して制御

量を加えるために，基板垂直方向に動作する構造として何らかの工夫が必要となる．

アクチュエータの動作原理としては，大きな変位や高い動特性が得られる電磁式，発生応力および動特性に優れた圧電素子式，生体の筋肉に近い特性を持つ電歪式などが検討されている．ジョージア工科大学のグループでは，圧電素子を用いた人工ジェットアクチュエータを開発した⁽²¹⁾．これは，太鼓状の空洞下部のダイアフラムに圧電素子を貼り付け，これを振動させることで空洞上部の小孔を通じて流体の吹出し・吸込みが繰り返され，結果的に小孔から流体を噴出するのと同様のジェットを発生させるものである．筆者らのグループでも，圧電素子に比べて極めて大きな変位が得られる電歪型マイクロダイアフラムアクチュエータ⁽²²⁾(図8)をMEMS技術により試作した．ダイアフラム直径に対し，垂直方向に約2%の変位が得られ，ピエゾ素子よりも一桁以上大きな変形量が達成されている．また，このアクチュエータを用いて，直径0.5mmのオリフィスから噴出するジェットを形成している．

4.3 制御システム

壁乱流の制御について，アルゴリズム，センサ，アクチュエータなど，要素技術の研究は多いが，それらをシステムとして構築した研究例は極めて少ない．ブラウン大学のグループでは，3組の熱膜せん断応力センサ，圧電素子を用いた片持ち梁型アクチュエータ，DSPコントローラを組み合わせた制御システムを構築した⁽²³⁾．Tsaoら⁽²⁴⁾は，熱膜せん断応力センサ，フラップ型電磁アクチュエータ，駆動回路を統合した高度な制御チップを試作したが，保護マスクも含めて22のマスクが必要であり，歩留まりをあげることが極めて難しかった．現在までに，実験室レベルにおいても抵抗低減を実現するシステムの構築には至っていない．

著者らは，分散配置されるマイクロ・センサ/アクチュエータを駆動する乱流制御パネルを設計・開発し，初めて実験室実験における抵抗低減達成の確証を得ている^(17,25)．プロトタイプ制御システムは，図9に示すよう

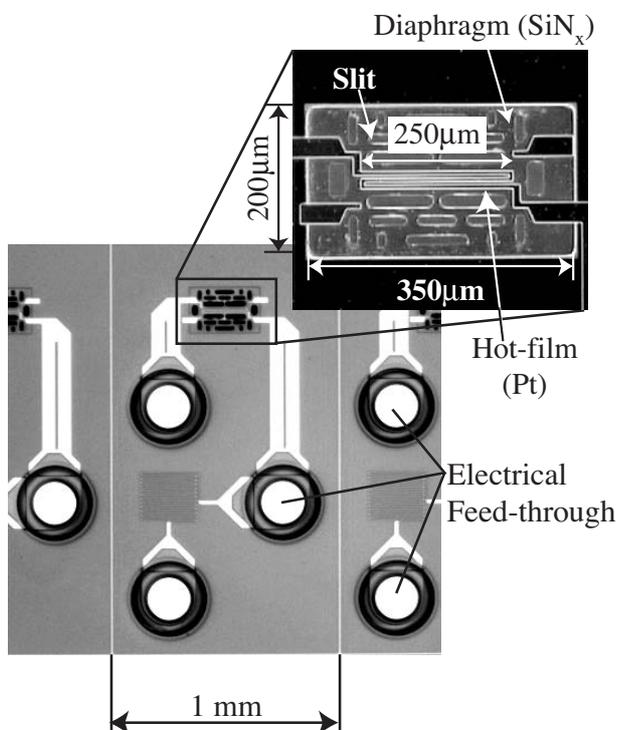


図7 裏側配線用貫通電極を有するマイクロ・熱膜せん断応力センサ^(17,20)．

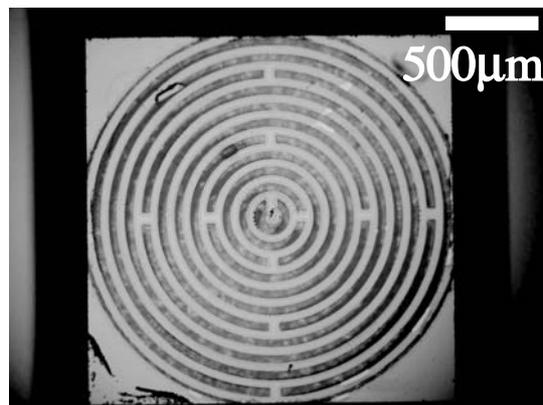


図8 電歪型ダイアフラムアクチュエータ⁽²²⁾．

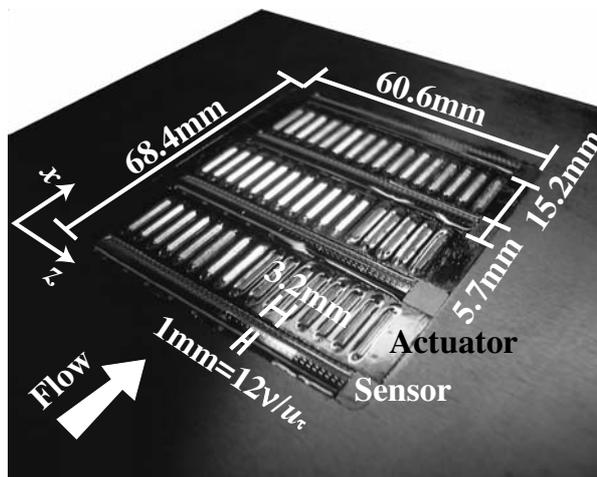


図9 壁乱流のフィードバック制御ユニット⁽²²⁾．

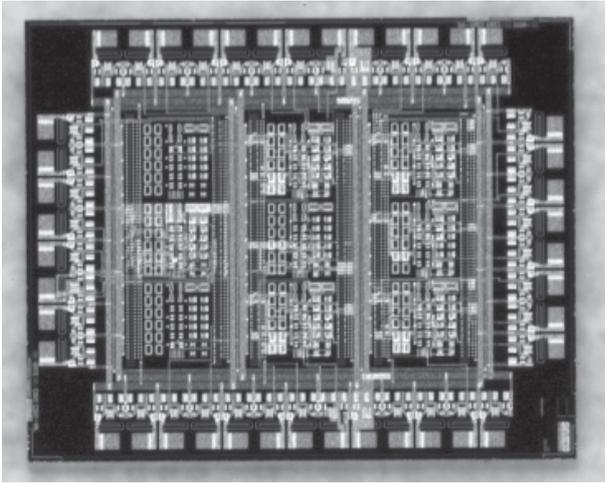


図 10 MICS/MCS によるアナログ VLSI コントローラ⁽²⁵⁾ . チップサイズ 3.1mmx3.8mm .

に, 192 個のマイクロせん断センサと 48 個の電磁式アクチュエータ, DSP コントローラからなる . アクチュエータは, シリコンゴム膜を電磁力によって壁垂直方向に変形させる壁面変形型であり, 寸法は 2.5mm × 14mm である . 変形量は 0.1mm であり, 300Hz まで動作させることができる . フィードバック制御には, 遺伝的アルゴリズム (GA) を用い, 摩擦抵抗が最小となるように制御パラメータが最適化される . 1 つのアクチュエータは, 上流側の 3 つのセンサからのせん断応力の情報をもとに DSP でリアルタイムで演算が行われ, DA 出力により駆動される . センサ出力電圧のデジタル化, 制御量の算出, アクチュエータ駆動電圧の出力, 壁面の変形, という一連の制御ループの繰り返し周波数は約 4 kHz であり, 風洞実験によってシステム応答の時間遅れは 2ms と評価されている . 風洞中に形成した乱流場でプロトタイプを用いて実験を行い, 壁近傍の乱れを最大 9% 低減させることに成功している .

現在, より高性能なマイクロセンサ, アクチュエータ, および, 256Ch 入出力, 繰返し周波数 10kHz, 時間遅れ 0.1ms の高速コントローラを組み合わせた第 2 世代の制御システムを構築中であり, より大きな制御効果の実現を目指して取り組んでいる . また, MICS/MCS のマルチユーザーサービスを用いた, アナログ VLSI コントローラ (図 10) の試作⁽²⁵⁾も進めている . この VLSI コントローラには, GA の学習機能は搭載されていないが, センサの駆動回路, 信号前処理アンプ, 線形化器, 制御量演算器, アクチュエータ用パワーアンプが組み込まれている . 最終的には, MEMS 技術により製作されたセンサ, アクチュエータとそれらを駆動する大規模アナログ VLSI を組み合わせたシステムの構築を目標にしている .

世界的に見ても乱流の知的制御のためのシステム評価はまだ始まったばかりであり, 摩擦抵抗減少などの制御効果について本格的な実験による実証が待たれる .

5 まとめ

従来, 乱流の制御は, 主として経験的, 直感的な手法に依存していた . 乱流の知的制御は, この殻をうち破り, (半) 理論的なアプローチによって高効率の制御を目標とするものであり, 本稿で取り上げた壁乱流の摩擦抵抗低減以外にも, 剥離, 噴流混合, 燃焼制御, 熱伝達, 熱・物質の拡散, 乱流騒音等の自在な制御を通して, 将来的には極めて広い技術分野において機器の性能, 信頼性, 安全性, 快適性の向上に寄与しうる . その実現には, 多くの越えるべきハードルがあるが, MEMS 技術, 制御理論, 乱流物理現象の理解など, ハードウェア, ソフトウェアの両面で少しずつ視界が開けつつある . 夢の実現へ向けての今後の研究に注目して頂きたい .

マイクロセンサの試作にあたっては, (株) 山武 上運 天昭司氏, 函師信彦氏のご協力を得た . また, VLSI コントローラの設計にあたっては, 姫路工業大学前中一介助教授に貴重なご助言を頂いた . 本研究は, 文部科学省開放的融合研究「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」の援助を受けた . 記して感謝の意を表する .

参考文献

- (1) Gray, J., "Studies in animal locomotion IV. The propulsive powers of the dolphin," *J. Exp. Biology*, 13, (1936), pp. 192.
- (2) Kramer, M. O., "Boundary layer stabilization by distributed damping," *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, 72, (1960), pp. 25-34.
- (3) Bechert, D. W., Hoppe, G., and Reif, W.-E., "On the drag reduction of the shark skin," *AIAA Paper*, 85-0546, (1985).
- (4) Walsh, M. J., "Riblets," in *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, Bushnell, D. M., and Hefner, J. N., eds., *Prog. Astronautics Aeronautics*, 123, AIAA, (1990), pp. 203-261.
- (5) Iwamoto, K., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Reynolds number effect on wall turbulence: toward effective feedback control," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 23, (2002), 678-689.
- (6) Robinson, S. K., "Coherent motions in the turbulent boundary layer," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, (1991), pp. 601-639.
- (7) Kasagi, N., Sumitani, Y., Suzuki, Y., and Iida, O., "Kinematics of the quasi-coherent vortical structure in near-wall turbulence," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 16, (1995), pp. 2-10.
- (8) Choi, H., Moin, P., and Kim, J., "Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows," *J. Fluid Mech.* 262, (1994), pp. 75-110.
- (9) Moin, P., and Bewley, T., "Feedback control of turbulence," *Appl. Mech. Rev.*, 47, (1994), S3-S13.

- (10) Kasagi, N., "Progress in direct numerical simulation of turbulent transport and its control," *Int. J. Heat & Fluid flow* 19, (1998), pp. 125-134.
- (11) Lions, J. L., *Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential Equations*, Springer-Verlag, (1968).
- (12) Bewley, T. R., Moin, P., and Temam, R., "DNS-based predictive control of turbulence: an optimal benchmark for feedback algorithms," *J. Fluid Mech.*, 447, (2001), pp. 179-225.
- (13) Choi, H., Temam, R., Moin, P., and Kim, J., "Feedback control for unsteady flow and its application to the stochastic Burgers equation," *J. Fluid Mech.* 253, (1993), pp. 509-543.
- (14) Lee, C., Kim, J., and Choi, H., "Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction," *J. Fluid. Mech.* 358, (1998), pp. 245-258.
- (15) Endo, T., Kasagi, N., and Suzuki, Y., "Feedback control of wall turbulence with wall deformation," *Int. J. Heat & Fluid flow* 21, (2000), pp. 568-575.
- (16) Lee, C., Kim, J., Babcock, D., and Goodman, R., "Application of neural networks to turbulence control for drag reduction," *Phys. Fluids*, 9, (1997), pp. 1740-1747.
- (17) Suzuki, Y., Yoshino, T. and Kasagi, N., "Evaluation of a GA-based feedback control system with arrayed micro sensors and actuators in a turbulent channel flow," *Proc. 4th Symp. Smart Control of Turbulence*, (2003), Tokyo, pp. 115-122.
- (18) Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Active flow control with neural network and its application to vortex shedding," *Proc. 11th Turbulent Shear Flows*, Grenoble, (1997), pp. 9.18-9.23.
- (19) Ho, C.-M., and Tai, Y.-C., "Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 30, (1998), pp. 579-612.
- (20) 吉野 崇, 鈴木 雄二, 笠木 伸英, 上運天 昭司, "マイクロ熱膜せん断応力センサの熱的最適設計", *日本機械学会論文集*, Vol. 70B, No. 689 (2004), pp. 38-45.
- (21) Glezer, A., and Amitay, M., "Synthetic jets," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 35, (2002), pp. 503-529.
- (22) Pimpin, A., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Micro electrostrictive actuator with metal compliant electrodes for flow control applications," *17th Int. Conf. MEMS, IEEE*, (2004), Maastricht, pp. 478-481.
- (23) Rathnasingham, R., and Breuer, K. S., "System modification and control of a turbulent boundary layer," *Phys. Fluids*, 9, (1997), pp. 1867-1869.
- (24) Tsao, T., Jiang, F., Miller, R. A., Tai, Y. C., Gupta, B., Goodman, R., Tung, S., and Ho, C. -M., "An integrated MEMS system for turbulent boundary layer control," *Tech. Digest, Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97)*, Chicago, Vol. 1, (1997), pp. 315-317.
- (25) Park, J., Yoshino, T., Yamagami, T., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Development of GA-based evolved system for feedback control of turbulence," *Proc. 5th Symp. Smart Control of Turbulence*, (2004), Tokyo, pp. 111-118.