

〔特集〕

MEMS デバイスを用いた壁乱流フィードバック制御

*東京大学大学院工学系研究科・機械工学専攻

鈴木 雄 二†
笠木 伸 英

Feedback Control of Wall Turbulence Using MEMS Devices

Yuji SUZUKI, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

Nobuhide KASAGI, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

(Received 10 March, 2006)

1 はじめに

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. 1970年代のオイルショック以降, NASA Langley 研究所などを中心に, リブレット, 弾性皮膜, ポリマー溶液など様々な乱流摩擦抵抗の低減に関する研究が行われてきたが, 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, 1990年代後半から, 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, が注目されている. 今なぜ乱流制御が改めてスポットライトを浴びているのか. おそらく三つの側面を指摘できよう. 第一に, 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, あるいは安心安全快適を提供するシステムへの大きな期待がある. 第二に, 数値風洞ともい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.

*〒113-8656 文京区本郷7-3-1

† E-mail: ysuzuki@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

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た. ここでいう「知的」は, 「Intelligence」というよりは「Smart」であり, 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, 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, 著者らの試みも紹介しながら解説する.

2 壁乱流のフィードバック制御

図1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御システムの概念図である. 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

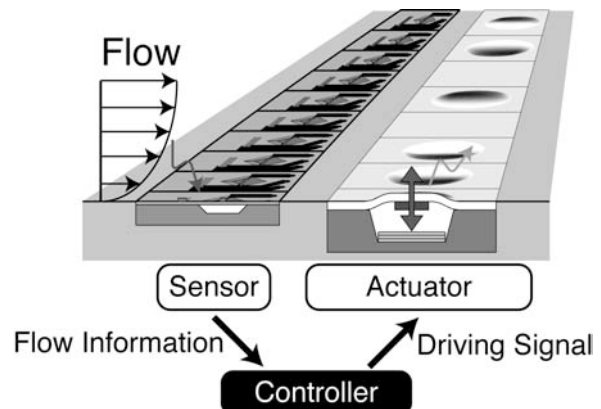


図1 壁乱流フィードバック制御の概念図

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。

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¹⁾は、壁乱流のDNSにおいて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^{2,3)}。スタンフォード大学のグループは、Lions⁴⁾による非線形系の最適制御を拡張し、乱流の(準)最適制御手法を提案している^{5,6)}。彼らの手法では、ナビエ・ストークス方程式の随伴方程式を用い、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、摩擦抵抗と制御エネルギーの和で定義される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⁶⁾は、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、3000程度の低いRe数ではあるが、50%を超える抵抗低減率が得られ、乱流状態を乱れのない層流に変

え得ることを示した。

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時間が必要であり、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⁵⁾は、評価関数中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⁷⁾。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、壁近傍に存在する準秩序構造^{8,9)}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している¹⁰⁾。

著者らのグループでは、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的な条件を想定して、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DNS¹¹⁾を行った。センサによって壁面せん断応力の空間勾配を算出し、ストリーク構造のスパン方向の揺動を同定して、縦渦の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(図2)、12%の抵抗低減を得た。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だけでなく、計算負荷も小さいので、実際のハードウェア開発にとって有用性は高い。

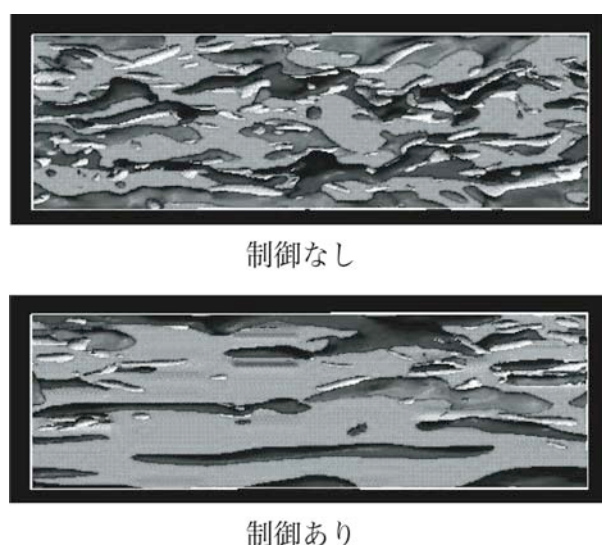


図2：壁面変形アクチュエータ群による壁近傍の縦渦の制御¹¹⁾

3 マイクロセンサ・アクチュエータ

3.1 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^{12,13)}。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。例えば、UCLA とカリ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¹⁴⁾。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¹⁵⁾。

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¹⁶⁻¹⁸⁾。図 3 は、1 mm 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 70 Hz に留まっていた応答周波数を 400 Hz まで向上させた。また、このセンサは、シリコン基板の表側パターンから裏側に電氣的接続をとるための貫通電極を有し、流れ場を乱す可能性のある電気配線が表面に突出しない構造となっている。

3.2 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る圧電素子式、生体の筋肉に近い特性を持ち消費電力の少ない電歪式などが検討されている。

また、流体に制御力を加える方法としては、フラップ、壁面変形、流体吹出し・吸込み、EMHD、プラズマなどが考えられている。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¹⁹⁾。これは、キャビティ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オリフィスを通じて流体の吹出し・吸込みが繰り返され、結果的にオリフィス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は、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²⁰⁾ (図 4) を試作した。電歪アクチュエータでは、シリコン樹脂の両側を柔軟な電極で挟む必要があり、従来はカーボングリースなどの

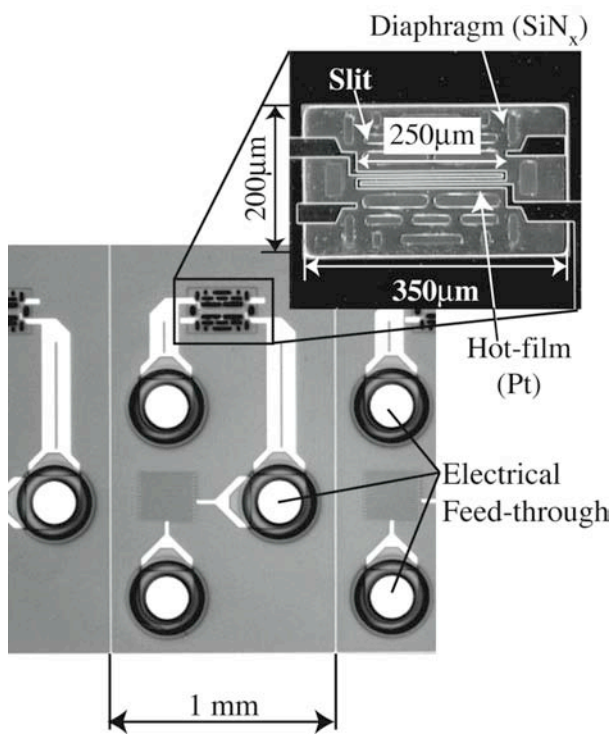


図 3 : 裏側配線を持つマイクロせん断応力センサ¹⁸⁾



図 4 : マイクロ電歪アクチュエータ²⁰⁾

材料が使われ、MEMS 技術との整合性がなかった。本アクチュエータでは、シリコンの両面に微細にパターン化した金属電極を形成することによって、柔軟性と静電力を両立させ、ダイアフラム直径に対し、垂直方向に最大約 6%の変位を得た。これは、ピエゾ素子よりも 2 桁程度大きな変形量に相当している。本アクチュエータは、数 kHz の周波数でも駆動可能であり、これを用いて直径 0.5 mm のオリフィスから噴出する人工ジェットを形成した²⁰⁾。

4 制御システムの開発

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²¹⁾。Tsao ら²²⁾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。結果的に、これらの研究では、抵抗低減を実現するシステムの構築には至らなかった。

著者らは、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、プロトタイプ制御システムを開発した(図 5)²³⁾。センサは、図 3 と同様の構造であるが、裏側配線を持たない形式の熱膜センサを用い、1 mm 間隔で 48 個並んだセンサ群を 4 列用いた。アクチュエータは、壁垂直方向に膜を変形させる壁面変形型である。シリコンゴム膜に厚さ 0.5 mm の希土類永久磁石を貼り付け、下部のコイルとの間に発生する電磁力によって、壁垂直方向に最大 50 μm の変形が可能である(図 6)。変形壁面の寸法は DNS の結果¹¹⁾に基づき決定され、壁近傍の縦渦の大きさとほぼ同程度となる、2.5 mm \times 14 mm である。共振周波数は 750 Hz であり、乱れの特徴的時間スケールに比べて十分速い。アクチュエータは、3 mm 間隔で 16 個配列したアクチュエータ群を 3 列用いた。

制御コントローラには、224Ch の 14bitAD 入力、および 96Ch の 14bitDA 出力を備えた高速 DSP を用いた。

フィードバック制御のアルゴリズムには、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を最適化した。1つのアクチュエータは、上流側の 3つのセンサのせん断応力の情報をもとに DSP でリアルタイムに演算が行われ、DA 出力により駆動される。すなわち、アクチュエータの駆動電圧は、アクチュエータ中心の直上流、およびスパン方向に ± 40 粘性長さ離れた位置のセンサで測定されるせん断応力乱れを用い、それらの重み付き線形和として定義する。そして、3つの重み係数をそれぞれ 5 bit のグレイコードで遺伝子表現する。評価関数としては、システム最下流の 3つのセンサによって測定されるせん断応力の長時間平均値とし、せん断応力が最小となるように重み係数を GA の手続きにより最適化する。

なお、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 5 kHz であり、システム応答の時間遅れは 0.2 ms 以下と評価され、乱れの特徴的時間スケール、対流時間スケールに比べて十分に速い。

制御システムは、断面 50 mm \times 500 mm の十分発達したチャネル乱流風洞のテスト部分に設置した。流れ条件は、バルク平均流速 3.0 m/s、壁面摩擦速度

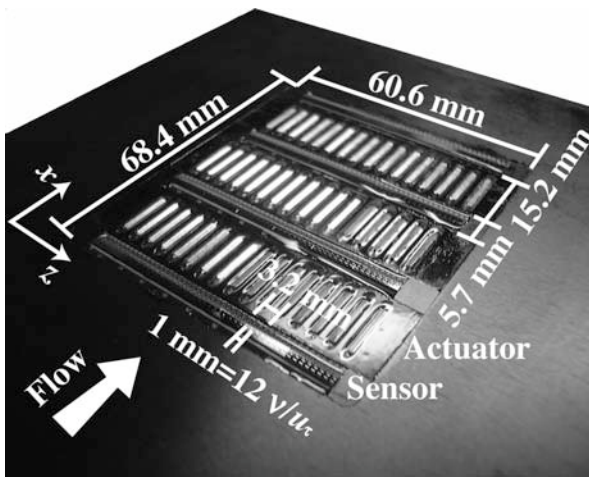


図 5 : 壁乱流の制御システムプロトタイプ²³⁾

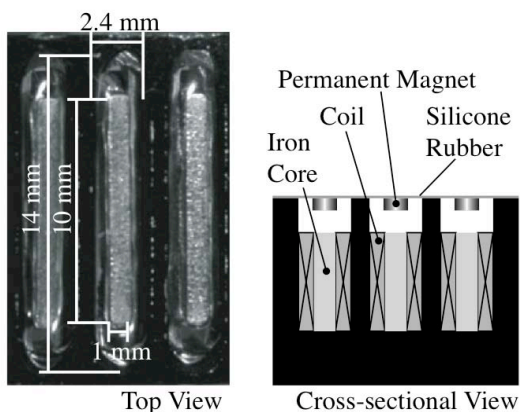


図 6 : 壁面変形型電磁アクチュエータ²³⁾

を用いたレイノルズ数で $Re_{\tau}=319$ である.

させるメカニズムと同様の機構によって、抵抗低減が引き起こされると考えられる.

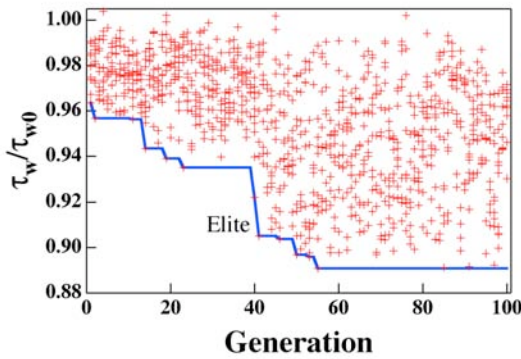


図 7 : GA 規範最適制御の結果²³⁾

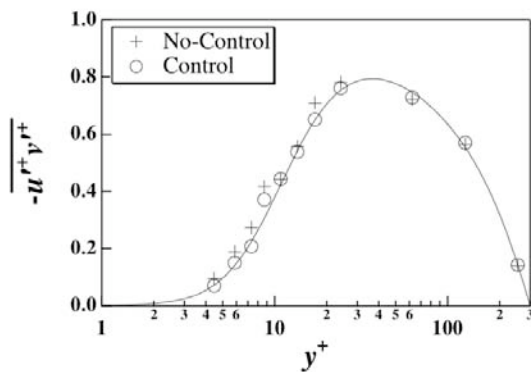


図 8 : LDV によるレイノルズ応力の計測結果²³⁾

図 7 に, GA による最適制御の結果を示す. GA の世代を重ねることによって, 摩擦抵抗が減少し, 最大 11% の低減率を得た. せん断応力計測の不確かさを考慮すると, 6% の抵抗低減が得られたことに相当する. 比較的近い条件での DNS¹¹⁾ では, 抵抗低減率が 12% 程度であるから, 6% という小さな値ではあるが, 実験室実験で初めて抵抗低減が実現できたことの意味は大きい.

図 8 に, 3 ビーム 2 成分 LDV により測定した, レイノルズ応力分布を示す. 壁ごく近傍でわずかにレイノルズ応力が減少していることがわかる. レイノルズ応力の減少量から推定した, 摩擦抵抗の低減率は 0.65% であり, 計測の不確かさを考慮しても, 熱膜センサでの評価量に比べてかなり小さいが, 定性的には抵抗低減が裏付けられた.

また, 本研究で GA によって学習した制御則では, 内部せん断層を検知し, 下流側の高速ストリークが存在する領域で壁垂直方向に正の壁面速度を与えることが明らかとなった²³⁾. このとき, 縦渦構造により誘起されるスイープと対向する方向に制御入力加わり, Fukagata ら²⁴⁾ の提案したレイノルズ応力を減少

5 制御システムの展望

上述の制御システムでは初めて摩擦抵抗低減を実現することができたが, センサ, アクチュエータの電氣的接続に非常に多くの配線を必要とし, また, 大型の DSP コントローラを必要とするので, 実用化につながるシステムとは言えない. そこで, 現時点で得られる技術を駆使して, どこまで集積化が可能かを示すためのプロトタイプを試作した.

図 9 はその全体像のスケッチであり, センサ, アクチュエータは, 大規模アナログ VLSI により駆動される. 外部とのインターフェースは最小限に抑えられ, 通常の制御時には外部機器との接続は不要である. アクチュエータも後述のように MEMS 技術により製作され, 低消費電力化されている. 図 10 に, MICS/MCS のマルチユーザーサービス²⁵⁾ を用いて試作した, アナログ VLSI コントローラを示す²⁶⁾. この VLSI コントローラは, GA の学習機能は搭載されて

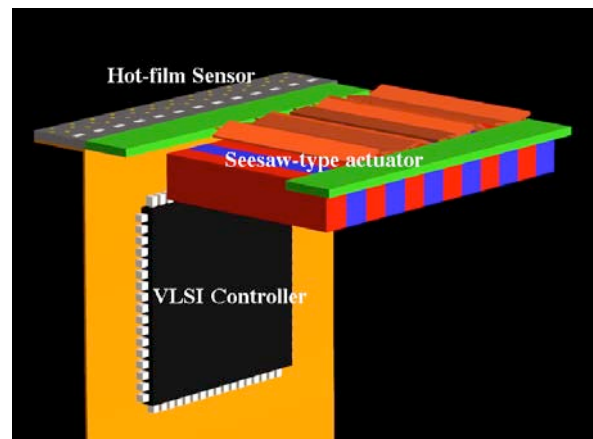


図 9 : 高集積化制御システムの概念図

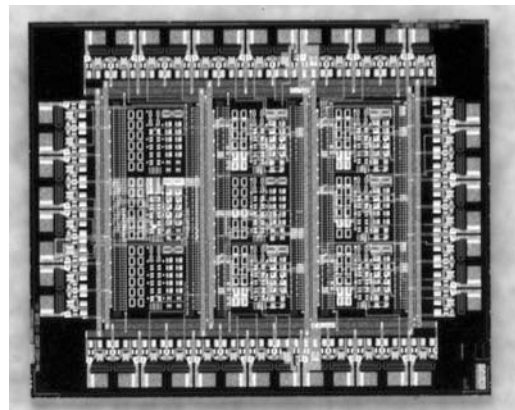


図 10 : アナログ VLSI コントローラ²⁶⁾

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。9.2 mm × 9.4 mmのチップ1つで4つのセンサ、4つのアクチュエータの駆動が可能である。

図11は、シーソー型の電磁アクチュエータである。1 mm × 7 mmのシリコン板の裏面には1対のコイルが形成され、下部に配列させた永久磁石により生ずる磁界との作用によって、流れ方向に軸をもったヒンジを中心に回転する。前述の電磁アクチュエータの消費電力が大きいのは、大変形時にはコイルと永久磁石の距離が離れてしまうためだったが、シーソー型のアクチュエータでは、大変形時でもコイルと永久磁石の距離はどちらか一方で逆に接近するので、有利である。実際、試作したMEMSアクチュエータは、50 mWの消費電力において、傾き角12度、板の端の変位90 μmが実現でき、消費電力が1/20程度に減少できたことになる。また、低消費電力化は、回路構成からみた場合にも重要であり、このMEMSアクチュエータは、アナログVLSIで直接駆動できる。

図12に、静止流体中で動作するシーソー型アクチュエータ周りの流れを、PIVで計測した結果を示す。板の回転に伴って、壁近傍に板に沿った強い横方向の流れが生じており、スパン方向の流体吹出し¹⁾に相当する制御効果が期待できる。

これらのデバイスを用いた制御実験はまだ行われていないが、集積度としては大幅に向上したと言える。このようなシステムにより乱流摩擦抵抗を大幅に減少させることができれば、高付加価値のアプリケーションには実用可能かもしれない。しかしながら、航空機や高速列車など、大面積を覆う必要がある場合には、半導体製造技術を用いたこれらのデバイスはコスト面でとても釣り合わないと予想され、まだ実用化にはほど遠い。従って、そのようなアプリケーションに対応できるハードウェアとしては、今後、型押し、印刷、インクジェットなど、安価なプロセスによるセンサ、アクチュエータ製作技術の開発が望まれる。現在、プラズマディスプレイなどの大面積の微細加工を行う技術、フレキシブル・ディスプレイなどのポリマー微細構造を作り込む技術、リール・トゥ・リールで微細加工を行う技術などが発達してきており、近い将来、我々が必要とする製作技術が手に入る可能性も十分にあると考えられる。

また、これらセンサ、アクチュエータの性能を十分に活かすためにも、制御アルゴリズムのさらなる向上が望まれる。センサ情報として、壁面上で比較的測定の容易な流れ方向のせん断応力を用いた場合、DNSによる制御評価によっても抵抗低減率は15%程度にとどまっており、より効果の高いアルゴリズムの開発が必要である。また、前述のように、Re数の増大に伴って乱流構造が複雑化するため、従来の制御アルゴリズムの制御効率が低下することがわかってきており、高レイノルズ数で効率の高い制御アル

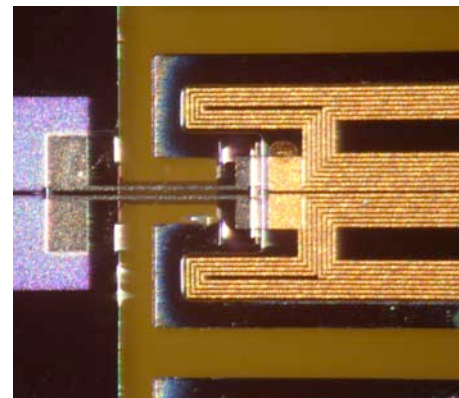
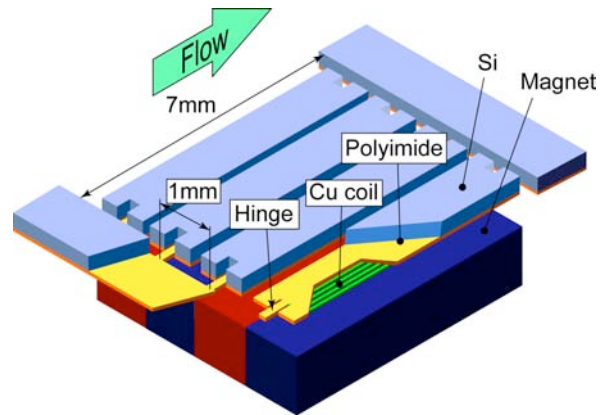


図11 : シーソー型 MEMS アクチュエータ ²⁶⁾

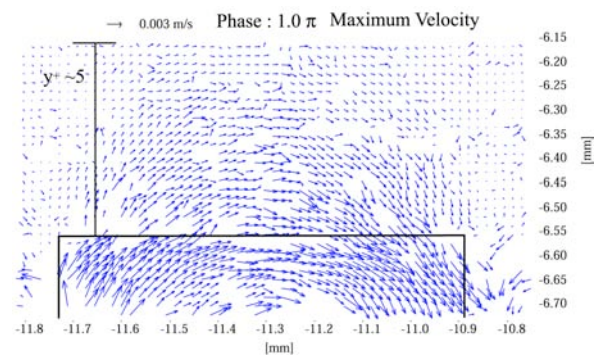


図12 : PIV を用いたシーソー型 MEMS アクチュエータ周りの流れ計測結果 ²⁶⁾

ゴリズムの開発も、実用面からは極めて重要な課題として残されている。

6 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。

本研究にあたっては、元東京大学大学院生吉野崇氏、山上毅氏の協力を得た。マイクロセンサの試作には、(株)山武 上運天昭司氏、函師信彦氏のご協力を得た。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。

引用文献

- 1) 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.
- 2) Moin, P., and Bewley, T.: Feedback control of turbulence, *Appl. Mech. Rev.*, 47 (1994) S3-S13.
- 3) Kasagi, N.: Progress in direct numerical simulation of turbulent transport and its control, *Int. J. Heat & Fluid Flow* 19 (1998) 125-134.
- 4) Lions, J. L., *Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential Equations*, Springer-Verlag, (1968).
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Lee, C., Kim, J., and Choi, H., "Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction," *J. Fluid Mech.* 358, (1998), pp. 245-258.
- 8) Robinson, S. K., "Coherent motions in the turbulent boundary layer," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, (1991), pp. 601-639.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Udell, K. S., Pisano, A. P., Howe, R. T., Muller, R. S., and White, R. M., "Microsensors for heat transfer and fluid flow measurements," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 3, (1990), pp. 52-59.
- 13) Ho, C.-M., and Tai, Y.-C., "Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 30, (1998), pp. 579-612.
- 14) Liu, C., Huang, J.-B., Zhu, Z. A., Jiang, F., Tung, S., Tai, Y.-C., and Ho, C.-M., "A micromachined flow shear-stress sensor based on thermal transfer principles," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 8, (1999), pp. 90-99.
- 15) Jiang, F., Lee, G.-B., Tai, Y.-C., and Ho, C.-M., "A flexible micromachine-based shear-stress sensor array and its application to separation-point detection," *Sensors Actuators*, 79, (2000), pp. 194-203.
- 16) Yoshino, T., Suzuki, Y., Kasagi, N. and Kamiunten, S., "Optimum Design of Micro Thermal Flow Sensor and Its Evaluation in Wall Shear Stress Measurement," *Proc. 16th IEEE Int. Conf. MEMS2003*, (2003), Kyoto, pp. 193-196.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Glezer, A., and Amitay, M., "Synthetic jets," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 35, (2002), pp. 503-529.
- 20) 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.
- 20) Rathnasingham, R., and Breuer, K. S., "System modification and control of a turbulent boundary layer," *Phys. Fluids*, 9, (1997), pp. 1867-1869.
- 22) 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.

23) 吉野・鈴木・笠木,” 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開発と評価”, 日本機械学会論文集, Vol. 72B, No. 715, (2006), 掲載予定.

24) Fukagata, K. and Kasagi, N., "Suboptimal control for drag reduction via suppression of near-wall Reynolds shear stress," Int. J. Heat Fluid Flow, 25, (2004), pp. 341-350.

25) 足森・前田・前中・松田, “MICS による高速 OpAmp ライブラリの設計とその応用,” 電学会研資 MSS-00-18, (2000).

26) Yamagami, T., Yoshino, T., Y. Suzuki, and Kasagi, N., "Development of MEMS-based integrated feedback control system of wall turbulence," Proc. 6th Symp. on Smart Control of Turbulence, (2005), Tokyo, pp. 135-141.