

A-3 乱流のスマート・コントロールに向けて

笠木 伸英 (東京大学大学院工学系研究科)

Toward Smart Control of Turbulence

Nobuhide Kasagi (The University of Tokyo)

Key Words : Turbulence, Control, Direct Numerical Simulation, MEMS

Abstract

Turbulence control has been one of the central issues in modern scientific, engineering and environmental research efforts. Its potential benefits can be easily recognized if one thinks about the significance of the artificial manipulation of turbulent drag, noise, heat transfer as well as chemical reaction, to name a few. Although there is considerable empirical knowledge on passive control methods, efforts are now directed toward to active ones. The turbulent structures in real flows are very small in size, and their lifetime is also very short. In the past, direct manipulation of these structures was very difficult, but is now expected to become possible with miniature sensors and actuators of micron size fabricated by emerging micromachining technology, called microelectromechanical systems (MEMS). In addition, studies of active turbulence control will be even more accelerated by new and powerful research tools such as direct numerical simulation and advanced measurement techniques based on image processing. Thus, realistic hardware and software for smart control of turbulence will certainly be developed in the foreseeable future.

1. 緒言

乱流および付随する伝熱, 拡散, 音, 燃焼などの様々な乱流現象は, 産業分野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. 例えば, 航空機などの高速輸送機器や高効率で安全な機械やプラントの設計, 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は, 乱流を含む複雑熱流動の数値予測技術が不可欠である. また, 乱流を応用し, あるいは乱流現象を制御して新しい技術を創成することは今後さらに重要であろう.

さて, 本稿の主題である乱流制御^[1]は決して新しい問題ではない. 乱流研究の約100年の歴史の当初から描かれた夢に違いない. では, 今何故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^[2]. 第一に, 乱流制御によってもたらされる新たな技術革新への期待, 即ち剥離や流れ構造の制御, 流体力の制御, 騒音低減, 伝熱・拡散制御, 反応制御などによって可能となる, 新技術開発, 環境問題軽減への大きな期待がある. 第二に, 乱流制御を実現するために必要なソフトウェア, 即ち, 乱流物理の基礎的知見の蓄積, 最適制御理論^[3]やニューラルネットワーク理論と流体力学の融合など, 理論的基盤が近年顕著な進展を遂げたこと, そして第三に付加価値の高い乱流制御技術開発を可能とするハードウェア, 即ちマイクロマシン技術(Microelectromechanical System, MEMS)^[4]などが新

たな要素技術として急速な発展の状況にあることを挙げる事ができる。つまり、今ここの人類の永年の夢を果たすべき格好の時期を迎えたと言えるのである。

2. 乱流工学研究の新しいツール

乱流工学の分野で、近年従来とは質的に異なる、しかも強力な研究ツールが開発されており、先端的乱流制御技術の開発の機運を盛り上げている。ひとつは、乱流場の3次元画像計測技術^[5]であり、もうひとつは乱流のダイレクト・シミュレーション(DNS)^[6,7,8]である。これらが高度な実験室実験あるいは数値実験を可能にしたのである。点計測が原則であった従来の流速計や温度計に対して、近年開発研究が進んだ粒子画像流速計、レーザー誘起蛍光法などによれば、テレビカメラ映像データから流体の速度ベクトル、温度、濃度の空間分布を計算機処理によって求めることができる。最近では、遊泳する魚のような動体とその周りの乱流の同時計測も可能になりつつある。一方、ナビエ・ストークス方程式を忠実に数値的に積分するダイレクト・シミュレーション(DNS)は、レイノルズ数に制限はあるが、速度、圧力、温度等の値やその微分・積分値の空間分布の時間発展を詳細に解析することができ、現在益々複雑な乱流現象のシミュレーションが試みられている状況にある。

このような新しい研究ツールの発展とともに、剪断乱流中に時空間的に間欠生起する乱流機構を中心的に担っている準秩序構造に関する詳細な知見も飛躍的に豊富になりつつあり、このことが乱流制御研究を加速しているといえる。特に、最近のDNSを利用した剪断乱流の構造や輸送機構の解析の進展は著しい。例えば、壁面剪断乱流の基本要素である低速ストリークや縦渦構造の力学機構、再生過程、それらに伴う運動量やスカラーの輸送の素過程の詳細が明らかにされつつある^[8]。また、等方性乱流、あるいは混合層や噴流などの自由乱流の準秩序構造も解明が進んでいる。

3. 乱流のスマートコントロールの先導研究

乱流制御法には、系の外部とのエネルギーや物質の授受の有無によって、能動あるいは受動的な方法に分類される(図1)。後者の例としては、乱流抵抗低減効果のあるリブレット

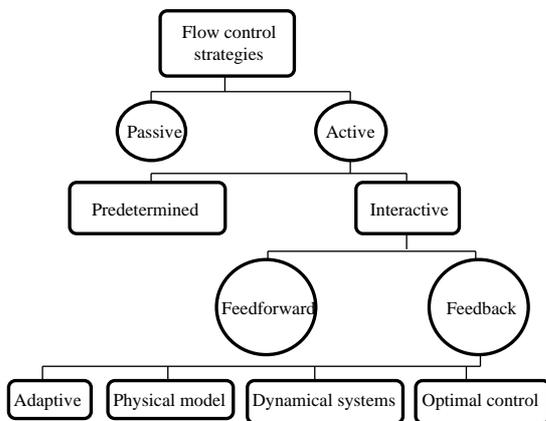


図1 乱流制御の分類図^[1,3]

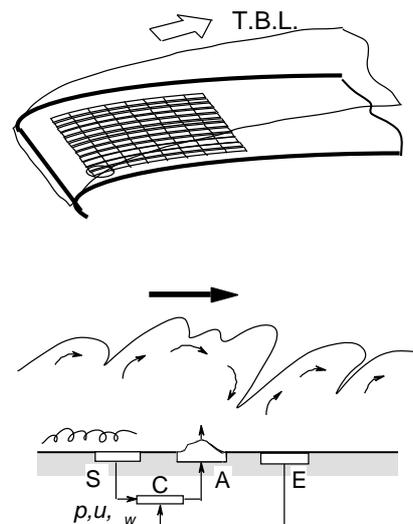


図2 インターアクティブ制御ユニット想像図

があり、付加的な動力を必要としない点で優れているが、受動制御は一般に顕著な制御効果を期待しにくいという経験的事実がある。後者は、一般に、系の運転時の付加的なコストに対して、それを上回る価値を生み出すことが出来る場合、あるいは受動制御では達成できない性能を追求する場合に成立する技術である。前述の関連研究の進展の下で、流れの挙動に応じたフィードバックを有する、“インターアクティブ制御法”が注目されている^[2,3]。即ち、センサによって乱流場の動的情報を取込み、それらを基にコントローラによって最適な制御入力を求め、アクチュエータを作動させて所定の制御を達成する手法である(このような高度に知的な制御をスマート・コントロールとよぶ、図2参照)。

図3は、壁面に配列された変形アクチュエータ群による、壁乱流の乱流摩擦抵抗低減を意図した制御のDNSの結果である^[9]。壁乱流特有の秩序構造の観察から適切なアクチュエータのスケールを求め、これを配列した。各アクチュエータの直上部の壁面垂直方向の速度成分を計測し、それらを打ち消すように壁面は変形する。これによって、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する。図に示すように、このような単純ではあるが、乱流構造の知識に基づいたアルゴリズムによって、かなりの抵抗が低減できる。制御アルゴリズムについては、最適制御理論やニューラルネットワークに基づくものなどが提案され、良好な成果が得られており、今後の研究成果に大いに期待したい。

さて、現実の機器やシステムに生起する乱流現象の時空間スケールは、多くの場合極めて小さく、数～数百マイクロン、数k～数MHzのオーダーである。そのようなサイズと動特性を有するセンサやアクチュエータは従来実現できなかったが、近年、半導体製造技術などを利用した微小加工技術(MEMS)が急速に発展しており、将来これらを利用した一体型の制御デバイスが製作できる可能性が示唆されている^[4]。熱流体制御のためのマイクロセンサやマイクロアクチュエータの開発の糸口として製作したインテリジェント・ノズル^[10]を図4に示す。軸対称ノズルの内側に18個の電磁フラップ型のアクチュエータを設置し、これらをプログラムによって自在に駆動し、様々な流動パターンを実現する。図4(b)は、このようなノズルによって形成されたバイファークティング・ジェットである。ジェットのエネルギー・フラックスに比べてアクチュエータによる投入仕事は極めて小さく、流体システムのカオス的な性質がうまく利用されている。

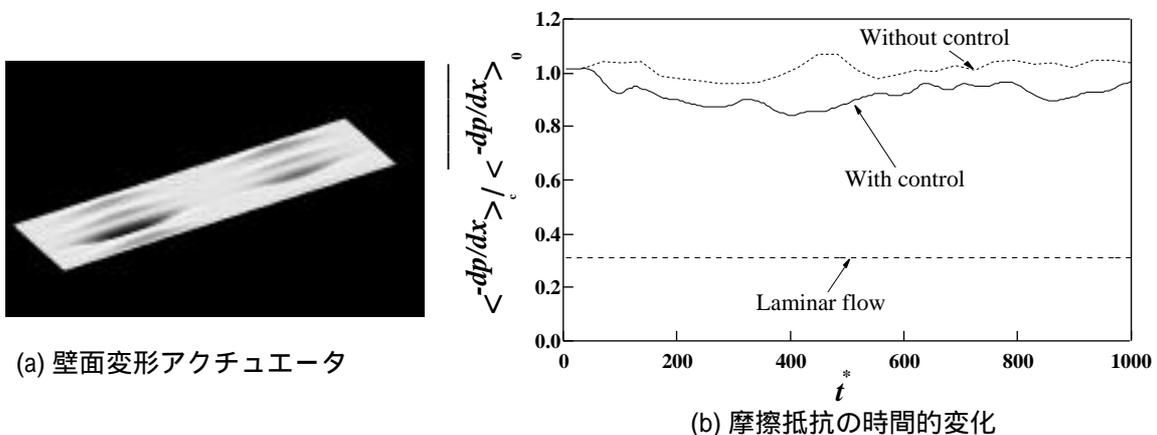
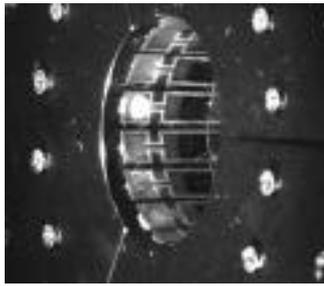
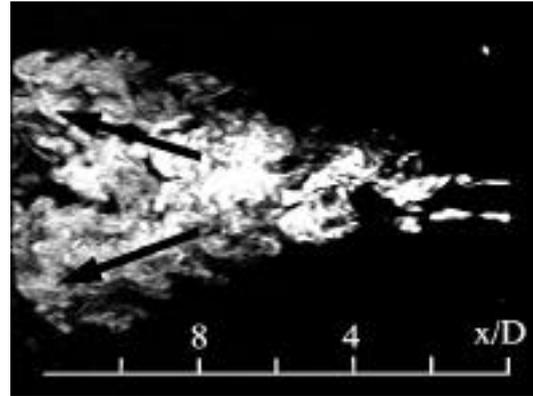


図3 変形アクチュエータ配列による乱流制御のDNS



(a) ノズル内部の構造



(b) 分岐噴流の可視化

図4 インテリジェント・ノズルによる軸対称噴流の流動制御^[10]

4. まとめ

高度に知的なスマートコントロールの実現に向かって、流体力学と最適制御理論の融合、ニューラル・ネットワークやカオス制御などの適合型制御原理応用の基礎研究が必要である。微細なセンサやアクチュエータ等のハードウェアの開発研究を進めることも重要である。さらに、特に、DNSによる制御アルゴリズムの系統的評価、プロトタイプハードウェアを用いた実証実験は緊急の課題である。加えて、先端的な画像計測技術の応用、超並列計算技術、膨大な実験・数値データのハンドリング・可視化技術、そして何よりも新鮮な発想に基づく野心的な研究戦略が必要であろう。このような基礎研究を通じて種々の制御法を提案、評価、体系化することによって、今後開発すべきスマート・コントロールシステムの先導研究としての役割を果たすべきである。

参考文献

- [1] M. Gad-el-Hak: Modern developments in flow control, *Appl. Mech. Rev.*, **49**-7 (1996), 365-379.
- [2] 笠木, 佐竹: 乱流制御と DNS, *日本流体力学会誌*, **16** (1997), 188-196.
- [3] P. Moin and T. Bewley: Feedback control of turbulence, *Appl. Mech. Rev.*, **47**-6 (1994), S3-S13.
- [4] C.-M. Ho and Y.-C. Tai: Review: MEMS and its applications for flow control, *ASME J. Fluids Eng.*, **118**(1996), 437-447.
- [5] 笠木, 西野: 画像処理を利用した速度場の計測, *日本機械学会誌*, **96**-895 (1993), 498-503.
- [6] W. C. Reynolds: The potential and limitations of direct and large eddy simulations, *Whither turbulence? - Turbulence at the crossroads*, Springer, Berlin, (1990), 313-342.
- [7] N. Kasagi: Progress in Direct Numerical Simulation of Turbulent Transport and Its Control," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, **19** (1998), 128-134.
- [8] N. Kasagi and N. Shikazono: Contribution of direct numerical simulation to understanding and modelling turbulent transport, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **451** (1995), 257-292.
- [9] N. Kasagi and O. Iida: Progress in Direct Numerical Simulation of Turbulent Heat Transfer, Keynote Lecture, 5th ASME/JSME Joint Therm. Eng. Conf. (March, 1999), San Diego, to be presented.
- [10] H. Suzuki, N. Kasagi, Y. Suzuki and H. Shima: Manipulation of a Round Jet with Electromagnetic Flap Actuators, 12th IEEE Int. MEMS Conf. (January 1999), Orlando, to be presented.