

# 知的乱流制御の展望

笠木 伸英

東京大学大学院工学系研究科

## An Outlook on Intelligent Turbulence Control

by

Nobuhide Kasagi

The University of Tokyo

### 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. Among various efforts, many intensive investigations have been undertaken focusing on possible drag reducing techniques over the decades. Although there is considerable empirical knowledge on passive control methods such as polymers, riblets and LEBU, efforts are now directed toward to interactive ones, particularly those exploiting emerging micromachining technology, called microelectromechanical (MEMS) systems. 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 MEMS. A MEMS controller unit, with its integrated mechanical parts and IC, will be able to sense the physical world, process the information, and then manipulate the physical phenomena through actuators. From this viewpoint, studies of active turbulence control will be even more accelerated by exploiting new and powerful research tools such as direct numerical simulation and advanced measurement techniques based on image processing for developing both hardware and software of smart control of turbulence.

Key Words: turbulence, control, direct numerical simulation, image processing, microelectromechanical system.

## 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。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、技術・環境問題解決への大きな期待があろう。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や最適制御理論な

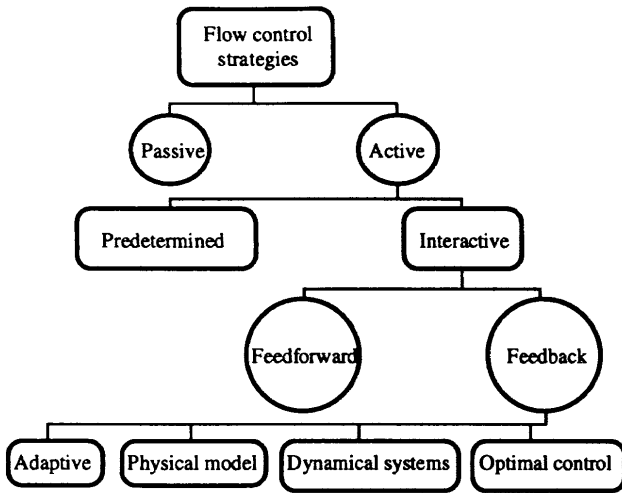


図1 乱流制御の分類図<sup>[6,7]</sup>

どの流体力学への導入など、理論的基盤整備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)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ができる。つまり、今こそ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<sup>[1]</sup>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)<sup>[2,3]</sup>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物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に担っている準秩序構造に関する詳細な知見も飛

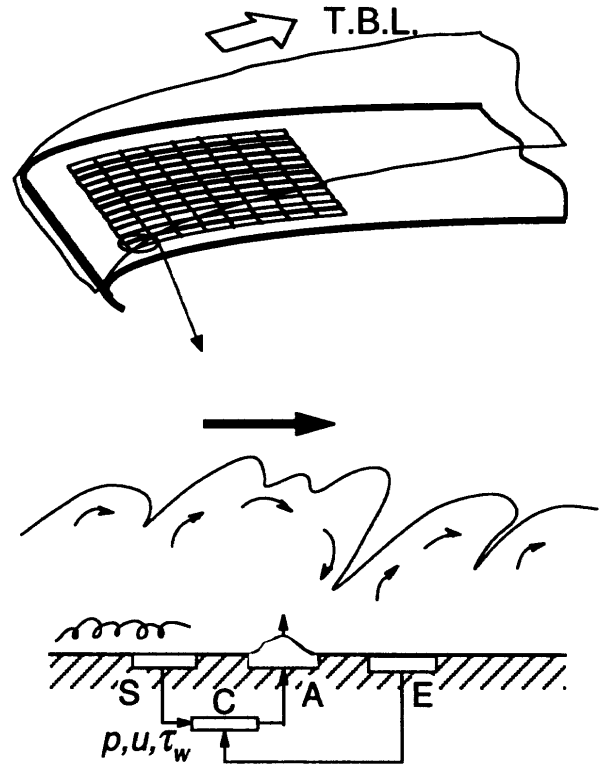


図2 インターアクティブ制御ユニット想像図

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。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. 知的乱流制御技術の先導研究への期待

現在知られている乱流制御法の多くは、乱流抵抗低減効果のあるリブレットに代表されるように付加的な動力を必要としない。この点は基本的には望ましいことではあるが、顕著な制御効果を期待しにくいという経験も事実である。一方、付加的なエネルギーを消費しても、高価値を生み出す能動制御が望まれる場合もあり得よう。特に、流れの挙動に応じた“インターアクティブ制御法”を開発する必要がある<sup>[4]</sup>。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求め、アクチュエータを作動させて所定の制御目標を達成する手法である。近年、半導体製造技術などを利用した微小なセンサやアクチュエー

タの開発研究が精力的に行われており、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<sup>15)</sup>。従って、そのような目標に向かって、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が是非必要であろう。さらに、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是非必要である<sup>16,17)</sup>。特に、プロトタイプハードウェアを用いた実証実験、あるいはDNSによる制御アルゴリズムの系統的評価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、今後開発すべき知的乱流制御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] 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.
- [2] W. C. Reynolds: The potential and limitations of direct and large eddy simulations, *Whither turbulence? - Turbulence at the crossroads* (Springer-Verlag, Berlin, 1990) 313-342.
- [3] N. Kasagi and N. Shikazono: Contribution of direct numerical simulation to understanding and modeling turbulent transport, *Proc. R. Soc. Lond. A* 451 (1995) 257-292.
- [4] 笠木, 佐竹: 乱流制御とDNS, 日本流体力学会誌 (1996) 印刷中.
- [5] C.-M. Ho and Y.-C. Tai: Review: MEMS and its applications for flow control, *ASME J. Fluids Eng.* 118 (1996) 437-447.
- [6] P. Moin and T. Bewley: Feedback control of turbulence, *Appl. Mech. Rev.* 47-6 (1994) S3-S13.
- [7] M. Gad-el-Hak: Modern developments in flow control, *Appl. Mech. Rev.* 49-7 (1996) 365-379.

