〔特集〕ミクロからマクロまでのながれ

壁乱流のフィードバック制御

*東京大学　大学院工学系研究科　笠　木　伸　英†

乱流研究の主要な目的のひとつとして，乱流現象および付随する輸送現象の自在な制御がある．乱流に伴う抵抗，騒音，伝熱，混合，そして化学反応の制御がもたらすメリットは極めて大きい．我が国では，昨年度まで 5 年間続いた文部科学省開放的融合研究制度プロジェクトで，せん断乱流および乱流燃焼に対する先進的乱流制御手法の確立へ向けて共同研究が推進された．本稿では，壁乱流の摩擦抵抗低減のための知的乱流制御システムの開発研究の進展概要と今後の課題について述べる．

Feedback Control of Turbulent Wall Shear Flow

Nobuhide KASAGI, School of Engineering, The University of Tokyo

(Received 10 January, 2006)

One of the major aims of turbulence research is to flexibly control turbulence and associated transport phenomena under prescribed conditions. The potential merit of controlling turbulent drag, noise, heat transfer, mixing and chemical reaction is enormous. During the last five years, an extensive research and development study on advanced control methods of turbulent flow and combustion was carried out through the course of the Project for Organized Research Combination System by the Ministry of Education, Culture, Sports and Technology of Japan. The present article briefly overviews progress in the development of active feedback control system for reducing wall turbulence friction drag and some remaining issues.

(**KEY WORDS**): turbulence, control, MEMS, drag reduction, feedback control, micro sensor, micro actuator

1　はじめに

近代的な乱流研究は１９世紀末のオズボーン・レイノルズの実験 [1] に始まり，既に１００余年の歴史を有する．近代乱流研究の目的は，乱流の有する非線形力学機構や輸送機構の解明，乱流現象の定量的予測手法の確立，そしてそれらの自在な制御手法の開発の三つであったといえる．このうち三番目の目的として挙げた，乱流現象および付随する様々な現象の制御は，省エネルギー，エネルギープラントのクリーン高効率化，製造プロセスの改善と製品の高品質化，気象・気候予測，地球規模の環境問題の解決などといった様々な場面において鍵となるものである．したがって，乱流現象に由来する抵抗，騒音，伝熱，混合，および化学反応を目的に応じて制御することができれば，それらが将来の技術開発，そして人々の生活にもたらすメリットは極めて大きなものとなるであろう．

2000 年度から５年間続いた文部科学省開放的融合研究制度「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」プロジェクトでは，三つの国立研究所および複数の大学の研究グループが参加し，せん断乱流および乱流燃焼に対する先進的乱流制御手法の確立へ向けて共同研究が推進され，多大な成果を挙げると共に，当該分野で我が国が世界的リーダーシップを握ることとなった [2]．筆者のグループでは，マイクロマシン（MEMS）技術を応用したマイクロセンサとマイクロアクチュエータを応用した壁面に沿う乱流（壁乱流）や噴流火炎の制御システムの実証研究を担当した．特に壁乱流の制御では，マイクロデバイスとコントローラを統合したフィードバック摩擦抵抗低減制御システムの構築のために，ハード，ソフトの両面から研究を進め，知的乱流制御（スマートコントロール）システムによる抵抗低減を初めて実験的に実証した．

本稿では，壁乱流の摩擦抵抗低減のためのフィードバック制御システムの開発研究の進展概要と今後の展望について述べたい．

*〒113-8656　文京区本郷 7-3-1
† E-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

2 壁乱流の構造と制御

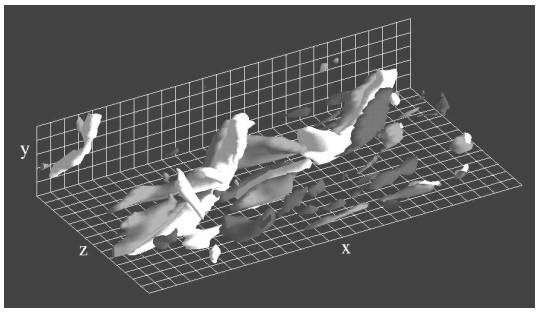
〉壁乱流における摩擦抵抗は，同じレイノルズ数を仮定した場合の層流に比して格段に大きい．この要因は，壁乱流では壁面近傍に主流方向に伸長された組織渦（縦渦）が自律的に再生成され，これらによって壁面垂直方向の運動量交換が活発になり，従って顕著なレイノルズせん断応力が発生するためであることが，近年の実験的・数値的研究により明らかになっている[3,4]．また，摩擦抵抗とレイノルズせん断応力の間に成り立つ積分関係式（FIK 恒等式）[5]：

$$C_f = \frac{12}{\mathrm{Re}_b} + 12\int_0^1 2(1-y)(-\overline{u'v'})\,dy \qquad (1)$$

が導かれ，レイノルズせん断応力の摩擦抵抗に対する寄与が定量的に示されている．式(1)は完全発達２次元チャネル流に対する恒等式であり，左辺は壁面摩擦抵抗係数，右辺第一項は層流摩擦抵抗，第二項がレイノルズせん断応力の寄与分である．通常，右辺第一項に比べて第二項が卓越し，その重み付き積分が示すように，壁に近い場所でのレイノルズ応力の発生が壁面摩擦に対してより寄与が大きい．

〉壁面近傍の縦渦と，瞬時のレイノルズせん断応力の生成・消滅・拡散の，流れに垂直な断面内の空間的位置関係[6]を**図 1** に示す．図中で局所的に低圧の領域は縦渦の核の部分に対応する．渦の右側の領域（スウィープ側）では，壁面に流体が衝突するために局所的に高圧となる．逆に渦の左側（イジェクション側）では低速の流体が持ち上げられ，これが壁面から離れた位置で上流から対流によって供給される高速流体体と衝突することによって高圧のよどみ領域が形成される．レイノルズせん断応力の生成は渦の両側で活発に行われる．局所の低圧および高圧領域では圧力・歪相関が高く，レイノルズせん断応力の消滅が起こる．また，レイノルズせん断応力は乱流拡散・圧力拡散によって生成領域から高圧・低圧領域へ輸送される．

〉このように，壁乱流において摩擦抵抗の成因となる構造は空間的にも時間的にも間欠的なものである．従って，これら壁面近傍の縦渦を選択的に操作することにより，効果的にレイノルズ応力，ひいては乱流運動エネルギーの生成を抑制し，壁面摩擦抵抗を低減できるはずである．**図 2** に様々な応用場面における縦渦の時空間スケール[7]を示すが，その長さスケールは 10 から 100 μm 程度，時間スケールは 0.01 から 100ms 程度であることが分かる．このように多くの乱流は,従来のシステム技術が扱う系に比べて，



(White, vortex core; dark gray, ejection; light gray, sweep.)

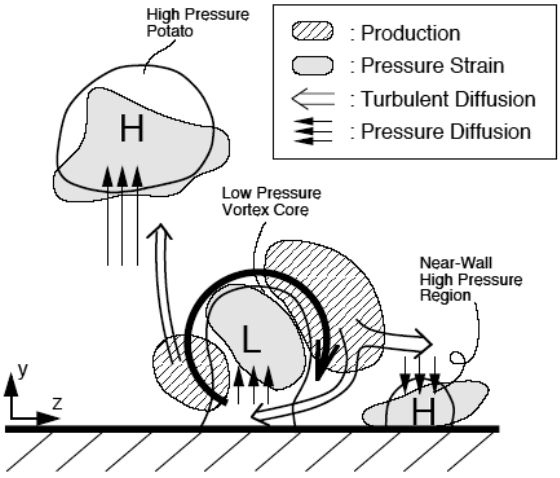


図 1 Near-wall quasi-streamwise vortex and its relationship with the production, pressure-strain, and diffusion of $-u'v'$ [6].

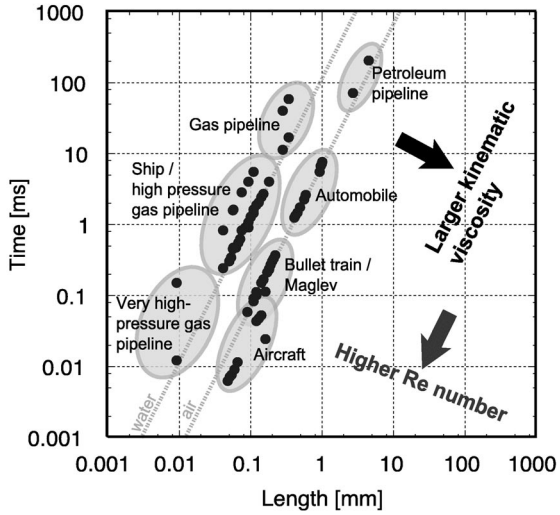


図 2 Spatio-temporal scales of coherent structure in real applications [7].

極めて小さな長さスケールと時間スケールの固有の縦渦を有するものであるが，近年急速に発達したマイクロマシン技術（MEMS）によって，その操作の可能性が見えてきた．また，そのような微小機械によって，マクロな力学系に顕著な制御効果が達成で

きるかどうかは，非線形散逸系の物理の観点から興味深い設問となっている．

3 乱流制御アルゴリズム

図 3 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．乱流は極めて自由度が大きい力学系なので，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 4** 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出し・吸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レイノルズ数が 5000 程度において 25% の抵抗低減を得た．抵抗低減によるエネルギー利得率（投入エネルギー量に対するエネルギー消費削減量の比）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，**図 5** に示すように分類される．中でも近年関心が持たれているフィードバック制御は，(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 [9-11]．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[12] による非線形系の最適制御を拡張し，ナヴィエ・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，ナヴィエ・ストークス方程式が状態方程式，その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ェ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．

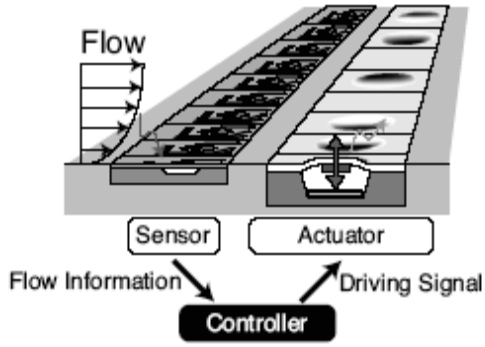


図 3 Feedback control system for wall turbulence.

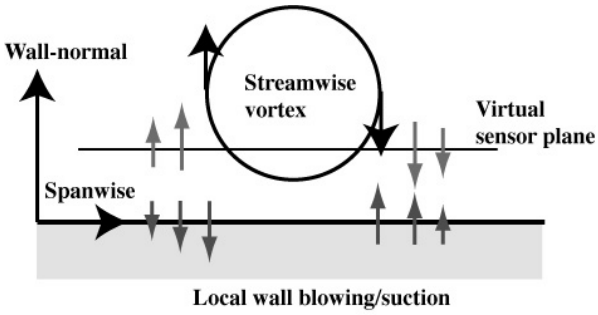


図 4 Opposition control algorithm [8].

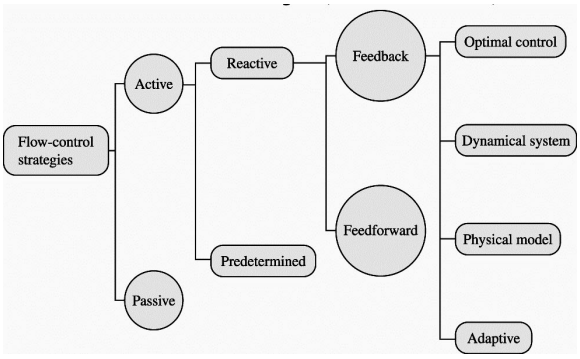


図 5 Classification of turbulence control schemes[10].

》Bewley ら[13]は，チャ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)の運動エネルギーの時空間積分と制御目標である終端時間 T における壁面摩擦の和として，以下のように定義した．

$$J(\phi)=\frac{\ell}{2AT}\int_w\int_0^T\phi^2 dtdS+\frac{1}{AT}\int_w\left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_w(t=T)dS \qquad (2)$$

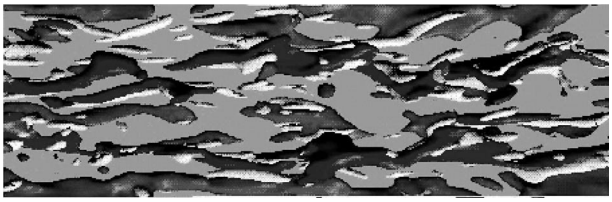
ここで，A，T はそれぞれ積分面積，積分時間である．また，ℓは制御効果に対して制御入力の相対コストの比を表すパラメータであり，制御に関わるコストが高いほどは大きな値となる．彼らは，ナヴィエ・ストークス方程式とその随伴方程式を DNS により数値的に解くことによって，最小の吹き出し・吸い込みエネルギーで最大の抵抗低減率を達成するϕの時空間分布を求めた．その結果，3000 程度の低いレイノルズ数での評価ではあるが，50%を超える抵抗低減率が得られ，乱流状態を乱れのない層流に変え得ることを示した．

》筆者らも，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[14]．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ごく僅かなものであったが，準秩序構造のスケールに応じて異なる吹出し・吸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．

》上記の制御手法とシミュレーションは，乱流制御の理論的限界の評価，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～数千万点を超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 程度の低いレイノルズ数でもこれらのデータ量は数十 GB，数万程度のレイノルズ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[15]は，式(2)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．ナヴィエ・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[16]．これらの準最適制御アルゴリズムは，低いレイノルズ数において 22% 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．しかし，準秩序構造はレイノルズ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，レイノルズ数が増加するに従って減少する[17]．高レイノルズ数においても効果の高い準最適制御アルゴリズムの構築は，今後の乱流制御の主要な課題のひとつである．》

(a)



(b)

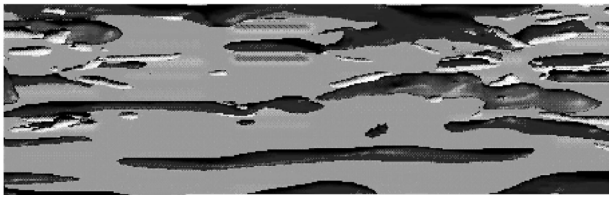


図 6 Modification of near-wall turbulence structures [18]. Dark gray low-speed region; light gray, high-speed region; white, vortex. (a) uncontrolled; (b) controlled.

》

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，流れの情報は壁面上で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 DNS[18]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，学習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[19]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･吸込み制御[8]の制御入力を学習させ，チャネル乱流に対して 20% の摩擦抵抗低減を得ている．また，筆者らは，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[20]．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[21]．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生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 壁乱流の知的制御システムの構築と評価

筆者らの研究開発の目的は，MEMS 技術を応用した乱流のアクティブ・フィードバック制御システム（スマートスキン）を構築し摩擦抵抗低減を図ることであり，そのために以下に挙げる個別研究を行った．

(1) 直接数値シミュレーション(DNS)を用いた乱流物理の解明，及び粒子画像計測法などの先進的計測技術の研究開発
(2) MEMS 技術を用いたマイクロセンサ，マイクロアクチュエータの設計開発
(3) 現代制御理論や適応型アルゴリズムに基づく乱流制御アルゴリズムの構築

これらの研究開発によって得られた成果を統合し，風洞実験用の制御システムを構築した．**図 7** にその一例[22]を示すが，このシステムは 4 列の熱膜式壁面せん断応力センサ群および 3 列の電磁式変形膜型アクチュエータ群から成り立っている．一列のセンサ群には 48 個のセンサ（**図 8**）が 1 mm ピッチで，また一列のアクチュエータ群には 16 個のアクチュエータ（**図 9**）が 3 mm ピッチで並べてあり，それぞれ独立に動作させることができる．これらセンサ及びアクチュエータの時間応答は約 0.1 ms のオーダーであり，またアクチュエータの膜の変位量は約 50 μm である．これらの特性値が風洞実験において壁面近傍の縦渦構造を検知し操作するのに十分なものであること，また制御領域全体の長さが摩擦抵抗低減効果を確認するために妥当であることが DNS データ[18, 23]との比較によって検証されている．

前節で述べた制御アルゴリズムを実用に用いることを考えると，共通する二つの困難な問題点がある．まず，従来提案された多くの制御アルゴリズムでは，制御入力として壁面上に連続的に分布する吹出し吸込みが仮定されていることである．実際のアクチュエータは有限の寸法を有し，離散的に配列配置せざるを得ない．また，吹出し吸込み型アクチュエータでは吸吹孔が塵埃などで目詰まりし効果が持続できないため，むしろ弾性膜などの変形によって壁面垂直速度を与えることが望ましい．そこで，筆者らは，３．２節で述べたように，有限の面積を有する変形アクチュエータを微細センサと共に壁面上にマトリ

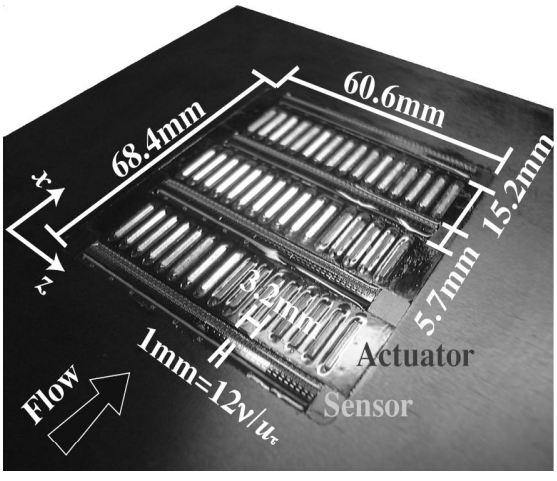


図 7 Feedback control system for wall turbulence with 192 wall shear stress sensors and 48 shell-deformation actuators[22].

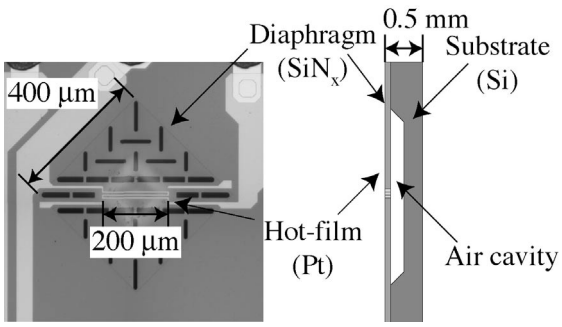


図 8　Micro hot-film wall shear stress sensor [22].

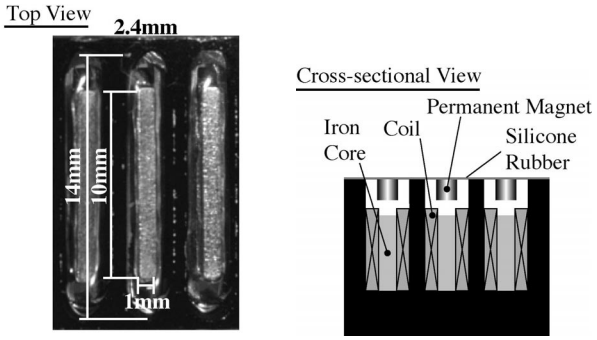


図 9　Miniature deformable membrane-type magnetic actuator [22].

クス状に配置したチャネル乱流のDNSを行い，制御効果の検証を行った[18]．制御アルゴリズムとして低速ストリークの遥動を抑制する乱流構造規範型アルゴリズムを採用した結果, **図6**に示すようにストリークの安定化が起こり，約12%の抵抗低減効果が得られている．

〉 従来の制御アルゴリズムのもう一つの問題点は，必要とする被制御対象（プラント）の状態情報が実際には測定困難であることである．現状の比較的簡易な計測技術によって十分な時空間分解能で測定できる乱流の物理量は，壁面せん断応力，しかも主流方向成分のみといえる．そのため，主流方向壁面せん断応力のみをフィードバック情報とする効果的な制御アルゴリズムが必要となる．この条件を満たすために，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた制御則の自動構築 [20] や, 壁面近傍レイノルズせん断応力の抑制を評価関数に取り入れた準最適制御 [24]が試みられ, 約 12%の抵抗低減効果が DNS によって確認されている．特に GA は，多様な乱流に対して，実用の場面で学習を通じて制御効果を向上できる可能性を有する有利さがある．

〉 以上から，開発したプロトタイプの制御システムの作動には，GA を用いた制御アルゴリズム自動構築を採用した．この場合，電磁式変形膜型アクチュエータの駆動電圧をアクチュエータの直上流のスパン方向に隣接した３つの壁面せん断応力センサ信号 $\tau'_{w,i}$ の重み付き和：

$$E_A = \sum_{i=1}^{3} W_i \tau'_{w,i} \tag{3}$$

として表し，制御面の最下流で測定された壁面せん断応力を用いて定義される評価関数 J：

$$J = 1 - \sum_{j=1}^{3}\left(\int_0^T \tau_{w,j} dt\right) \Big/ \sum_{j=1}^{3}\left(\int_0^T \tau^u_{w,j} dt\right) \tag{4}$$

が最大となるよう，GA を用いて重み係数 W_i を最適化した．この J は壁面せん断応力の低減率と対応している. 各センサ信号に対する重み係数 W_i はそれぞれ数ビットの遺伝子で表現し，試行結果をもとに選択，交叉，突然変異といった遺伝的操作を通じて，最大の抵抗低減効果が得られる遺伝子（重み係数）の組を生成した. なお, 各センサから信号を取得し，アクチュエータへの駆動電圧を出力するまでの一連の信号処理には高速ディジタル・シグナル・プロセッサを用いている．

〉 吸い込み風洞内に形成される２次元チャネル乱流中で，**図 7** に示した乱流制御システムの評価を行った．テストセクションは乱流が完全発達した領域に設け，その壁面に制御システムを設置した．バルク平均流速は 3 m/s で，摩擦レイノルズ数は 300 である．この流動条件下での粘性長さ及び粘性時間はそれぞれ 0.09 mm, 0.5 s であり, 壁面近傍の縦渦の平均直径及びその時間スケールはそれぞれ 2.7 mm，7.5 ms と推算される．

図 10 に GA による最適化過程での評価関数値の推

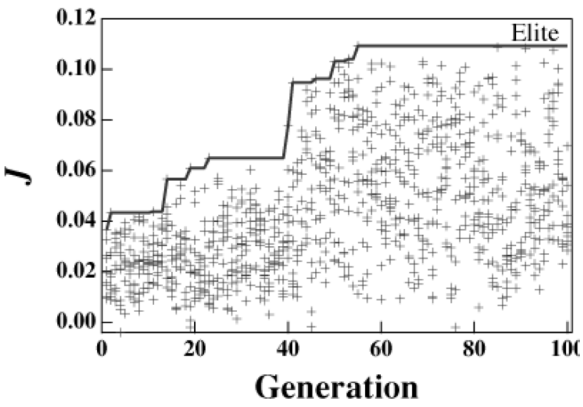


図 10　Cost function versus generation of GA[22].

移を示す．横軸は GA の世代を表す．各世代に対し複数の遺伝子（重み係数）の組を用いて試行を行っているが，その中で最も成績の良い（J の値が大きい）遺伝子をエリートとして残す操作を施している．本実験では約 60 世代の GA 操作を行うことにより，11%の壁面せん断応力減少を達成する遺伝子の組が生成されている．ただし，様々な誤差を考慮すると，実際の低減率は 6%程度と見積もられている [22]．

5　実用化に向けた取り組み

上述の風洞実験による実証と並行して，センサ，アクチュエータ，コントローラといった各要素の高性能化，システムのコンパクト化にも取り組んでいる．センサについては数値解析を用いた形状最適化により周波数応答の改善が確認され [25]，裏面配線技術によるセンサ表面の平坦化が図られている．また，MEMS 技術を用いて製作される幅 1 mm の電磁型アクチュエータ群（**図 11**）を開発した [26]．コントローラについては，乱流制御システム専用アナログ VLSI を開発して，コンパクト化と共に高速信号処理を達成している [26]．今後これらのハードウェア要素を統合した，次世代乱流制御システムの構築を行う予定である．

応用機器（**図2**）におけるレイノルズ数は，従来の基礎研究で仮定されたDNSや上述の風洞実験でのそれに比して数オーダー高い．例えば，ボーイング747型旅客機における摩擦レイノルズ数を見積もると $Re_\tau \sim 10^5$のオーダーである．しかし，そのような高レイノルズ数流れで，これまで確認されたような顕著な制御効果が期待できるかどうかは，未知である．近年の数値シミュレーションやPIV実験計測によって，高レイノルズ数壁乱流の構造の詳細について新たな知見が得られてきた．それらによると，内層の自律的な準秩序構造と共に，外層にはせん断層厚さ

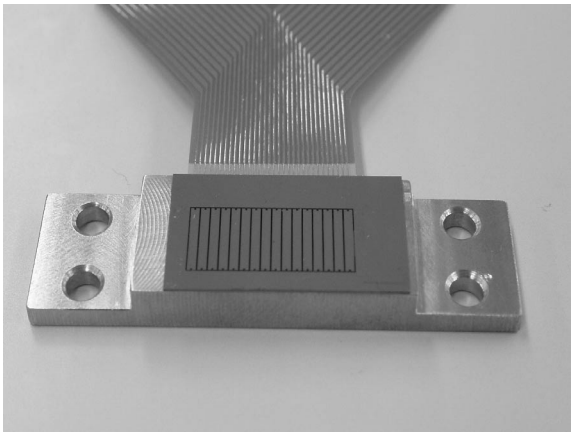


図 11　MEMS-fabricated seesaw type magnetic actuator array [26]. One actuator size is 1mm × 7 mm.

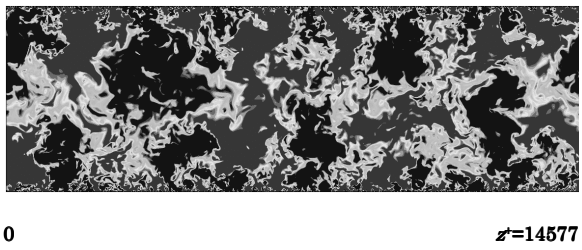


図 12　Large scale motions in the cross-stream plane of turbulent channel flow at Re_τ = 2320 (Black: low speed, gray: high speed) [27].

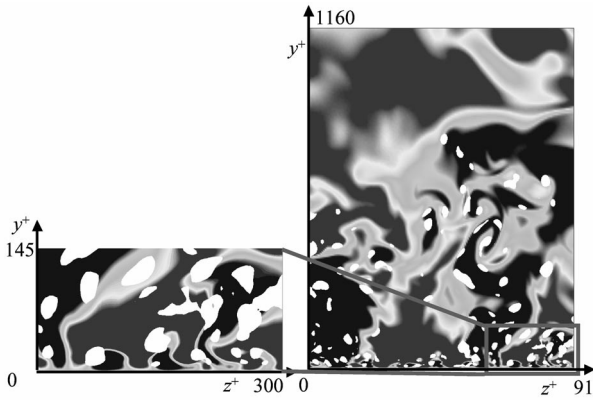


図 13　Cross-stream sectional view of instantaneous velocity field at Re_τ= 1160 (Contours of streamwise velocity fluctuation, black to gray, u'^+ = -1 to u'^+ = 1; white, $Q^+ < 0.005$) [28].

オーダーの長さスケールを有する特有の構造が存在し，それらの構造間には活発な力学的な相互干渉が生じている．**図12**は，地球シミュレータで初めて可能となったRe_τ = 2320のチャネル乱流のDNS[27] で可視化された，流れと直交する断面内の瞬時構造である．チャネル高さオーダーのスパン方向に準周期的な低高速領域が形成されている．これは，大スケールの縦渦運動によって形成されるものであり，外層のレイノルズ応力の形成を担っている．

図13は，Re_τ = 1160の同様断面での可視化[28] であるが，壁近傍領域のクローズアップと共に示している．壁近くで生起した流れ方向の縦渦は，大スケール渦によって外層低速領域に運ばれる．レイノルズ数が大きくなっても，壁近傍のストリークや縦渦に代表される乱流構造は依然として強い自立性を有しているようであるが，外層との力学干渉は強まっていく．**図14**は，以上の関係を模式的に示したものである．

さて，レイノルズ数の増加に伴って，壁面摩擦力生成への外層領域の寄与が徐々に増加することは，

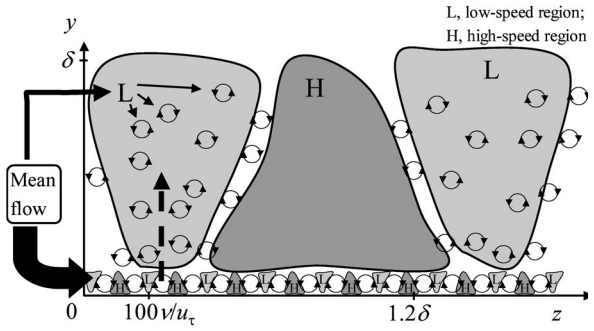


図 14 Conceptual diagram of energy flow between the near-wall vortices and the large-scale outer-layer structures [28].

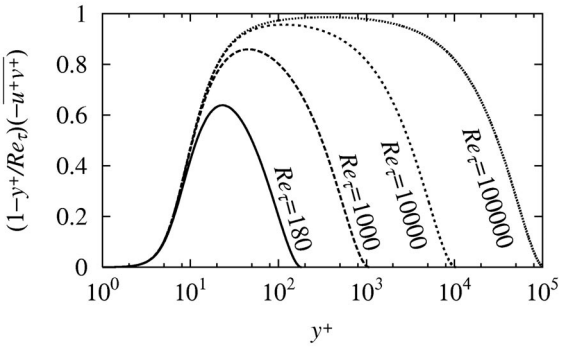


図 15 Weighted Reynolds shear stress at different Reynolds numbers in uncontrolled turbulent channel flow (model calculation).

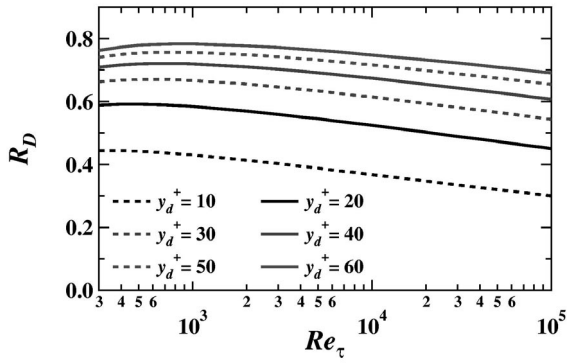


図 16 Dependency of drag reduction rate, R_D, on Reynolds number, Re_τ, with constant thickness damping layer, y_d; in idealized near-wall manipulation [29].

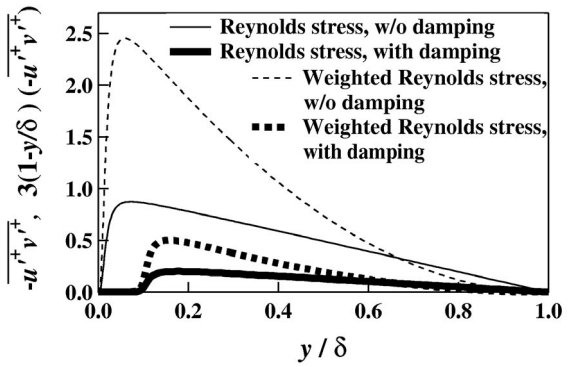


図 17 Reynolds shear stress in channel flow at Re_τ = 650 with damping in the near-wall layer [28].

FIK恒等式(式(1))の示唆するところであり, 乱流寄与項の被積分項である重み付きレイノルズせん断応力の分布（**図15**）からも，このことは明らかである．また活発な外層構造の様相を示すDNS(**図12**，**図13**)からは，高レイノルズ数の制御効果に悲観的な考察が導かれる．この点を明らかにすべく，チャネル乱流の壁面近傍のみに乱れを抑制する体積力を仮定した場合の，抵抗低減率のレイノルズ数依存性を与える理論式を導出した[28]．結果を**図16**に示すが，少なくとも，こうした壁面近傍構造を対象とした制御による効果のレイノルズ数依存性は穏やかといえる．図中, 仮にy^+=10までの壁近傍の薄い層の中の乱れを十分減衰させることができれば，抵抗低減率は高レイノルズ数条件でも有意な程度になり，実用上のエネルギー削減効果は顕著となる．この理想的な壁面近傍制御に対応するDNS（Re_τ = 650）によって得られたレイノルズせん断応力分布を**図17**に示す．FIK恒等式の乱流寄与項の被積分項である重み付きせん断応力の減少は，乱れ抑制を施した領域(y/δ< 0.1)のみならず，外層領域でも顕著である．また瞬時場の構造を**図18**に示すが，壁面近傍の乱れの抑制に起因する間接的効果のために，外層領域における構造が大きく，即ち実効的なレイノルズ数が下がっていることが分かる．これらのことから，高レイノルズ数においても有意な抵抗低減効果が得られるのは，間接的効果[23]によって壁面から離れた領域のレイノルズせん断応力が大幅に減少するためであると分かる．

上述のレイノルズ数依存性に関する考察はあくまで壁面近傍領域の乱れを十分に減衰させられるとした場合のものである．また，実際上は乱流渦のスケールが小さくなることにより，表面粗さの相対的な重要性も増してくる．理想的でない場合の高レイノルズ数乱流における制御効果の予想には，さらなる考察が必要である．また，高レイノルズ数乱流の力学は, その統計量についてさえ未解明の部分が多く，今後の基礎研究の主要な課題のひとつであろう．

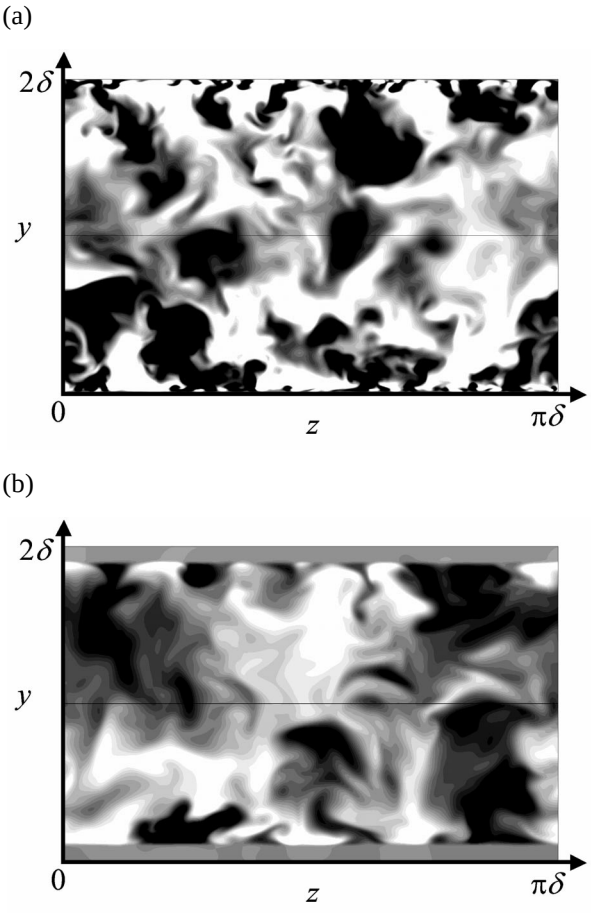


図 18 Cross-sectional view of an instantaneous streamwise velocity in channel flow at Re_τ = 650 [29]: (a) uncontrolled; (b) with damping in the near-wall layer.

6 残された課題と今後の展開

新世紀を迎え，理論，計測技術，シミュレーション技術の継続的な進歩によって，乱流研究は新たな時代を形成しつつある．様々な乱流現象の解明，予測，制御に関わる基礎・応用研究をさらに推進する必要がある,中でも乱流制御技術の実現は人を支え，人間社会の持続性を担保するために，少なからず貢献が期待される重要な課題である．

本稿では，筆者らの進めてきた，壁乱流の摩擦抵抗低減を達成する知的制御システムの開発基礎研究の成果の一部を紹介した．マイクロセンサ群，ミニチュアアクチュエータ群およびコントローラから成るアクティブ・フィードバック制御システムを試作し，風洞実験によって約 6%の抵抗低減効果を確認した．リブレットフィルム等，既存の摩擦抵抗低減デバイスと比して未だ抵抗低減効果は大きいと言えるものではないが，このようなフィードバックシステムを構築して壁面摩擦抵抗の低減を実証したのは世界で初めてである．また，次世代の制御システム開発のために，各ハードウェア要素の高性能化にも取り組んでいる．

乱流の制御はまだ基礎研究の段階であり，実用化へ向けての課題は山積している．ハードウェア側では特にセンサ・アクチュエータ，コントローラのさらなる微小化，高精度化，省エネルギー化，低コスト化が求められる．そのためには微細加工技術のさらなる進展と共に，高度な印刷技術の応用などにも期待が大きい．また，ソフトウェア側では，データ処理量の軽減，飛躍的に大きな効果を生み出す優れた制御アルゴリズムの開発が臨まれる．また，高レイノルズ数乱流，非定常乱流，気泡や粒子を含む混相乱流，相変化や化学反応を伴う乱流などの制御を果たすため，これらの複雑乱流現象の基本的な機構に関してさらなる解明と制御理論の体系化が望まれる．

謝辞

本研究は文部科学省開放的融合研究推進制度「乱流制御による新機能熱流体システムの創出」および 21 世紀 COE プログラム「機械システム・イノベーション」の援助を受けた．この間，本研究には，東京大学鈴木雄二博士，深潟康二博士，岩本薫博士，吉野崇博士，森本賢一博士他，多くの共同研究者および元学生諸氏の協力があった．記して謝意を表する．

引用文献

1) Reynolds, O.: An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, Philos. Trans., 174 (1883) 935-982.
2) Kasagi, N., Kawaguchi, Y., Yoshida, H., Kodama, Y. & Ogawa, S.: Progress in smart control of turbulece, *Proc. 6th Symp. Smart Control of Turbulence* (2005) 1-16.
3) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. & Runstadler, P. W.: The structure of turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., 30 (1967) 741-773.
4) Robinson S. K.: Coherent motions in the turbulent boundary layer, Annu. Rev. Fluid Mech., 23 (1991) 601-639.
5) Fukagata, K., Iwamoto, K. & Kasagi, N.: Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows, Phys. Fluids, 14

(2002) L73-L76.
6) Kasagi, N., Sumitani, Y., Suzuki, Y. & Iida, O.: Kinematics of the quasi-coherent vortical structure in near-wall turbulence, Int. J. Heat Fluid Flow, 16 (1995) 2-10.
7) 笠木伸英，鈴木雄二，深潟康二: 乱流の制御，パリティ, 18:2 (2003) 20-26.
8) Choi, H., Moin, P. & Kim, J.: Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows, J. Fluid Mech., 262 (1994) 75-110.
9) Moin, P. & Bewley, T.: Feedback control of turbulence, Appl. Mech. Rev., 47 (1994) S3-S13.
10) Gad-el-Hak, M.: Modern developments in flow control, Appl. Mech. Rev., 49 (1996) 365-379.
11) Kasagi, N.: Progress in direct numerical simulation of turbulent transport and its control, Int. J. Heat Fluid Flow, 19 (1998) 125-134.
12) Lions, J. L.: *Optimal Control of Sysmtems Governed by Partial Differential Equations* (Springer-Verlag, 1968).
13) Bewley, T. R., Moin, P. & Temam, R.: DNS-based predictive control of turbulence: an optimal benchmark for feedback algorithms,〉 J. Fluid Mech., 447 (2001) 179-225.
14) Yokoo, M., Kasagi, N. & Suzuki, Y.: Optimal control of heat transfer and skin friction in wall turbulence, *3rd Int. Symp. On Turbulence, Heat and Mass Transfer, Nagoya* (2000) 949-956.
15) Choi, H., Temam, R., Moin. P. & Kim, J.: Feedback control for unsteady flow and its application to the stochastic Burgers equation,〉 J. Fluid Mech., 253 (1993) 509-543.
16) Lee, C., Kim, J. & Choi, H.: Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction,〉 J. Fluid Mech., 358 (1998) 245-258.
17) Iwamoto, K., Suzuki, Y. & Kasagi, N.: Reynolds number effect on wall turbulence: toward effective feedback control, Int. J. Heat Fluid Flow, 23 (2002) 678-689.
18) Endo, T., Kasagi, N. & Suzuki, Y.: Feedback control of wall turbulence with wall deformation,〉 Int. J. Heat Fluid Flow, 21 (2000) 568-575.
19) Lee, C., Kim, J., Babcock, D. & Goodman, R.: Application of neural networks to turbulence control for drag reduction,〉 Phys. Fluids, 9 (1997) 1740-1747.
20) Morimoto, K., Iwamoto, K., Suzuki, Y. & Kasagi, N.: Genetic algorithm-based optimization of feedback control scheme for wall turbulence, *Proc. 3rd Symp. Smart Control of Turbulence*, (2002) 107-113.
21) Suzuki, Y. & Kasagi, N.: Active flow control with neural network and its application to vortex shedding, *Proc. 11th Turbulent Shear Flows, Grenoble* (1997) 9.18-9.23.
22) Suzuki, Y., Yoshino, T., Yamagami, T. & Kasagi, N.: GA-based feedback control system for drag reduction in turbulent channel flow, *Proc. 4th Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena* (2005) 301-306.
23) Fukagata, K. & Kasagi, N.: Drag reduction in turbulent pipe flow with feedback control applied partially to wall, Int. J. Heat Fluid Flow, 24 (2003) 480-490.
24) Fukagata, K. & Kasagi, N.: Suboptimal control for drag reduction via suppression of near-wall Reynolds shear stress, Int. J. Heat Fluid Flow, 25 (2004) 341-350.
25) 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, 70B:689 (2004) 38-45.
26) Yamagami, T., Suzuki, Y. & Kasagi, N.: Development of feedback control system of wall turbulence using MEMS devices, *Proc. 6th Symp. Smart Control of Turbulence*, (2005) 135-141.
27) Iwamoto K., Kasagi, N. & Suzuki, Y.: Direct numerical simulation of turbulent channel flow at Re_τ = 2320, *Proc. 6th Symp. Smart Control of Turbulence* (2005) 327-333.
28) Iwamoto, K., Kasagi, N. & Suzuki, Y.: Dynamical Roles of Large-Scale Structures in Turbulent Channel Flow, *Proc. Computational Mechanics, WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Sept. 5-10, 2004, Beijing, China* (2004) MS022-174.
29) Iwamoto K., Fukagata, K., Kasagi, N. & Suzuki Y.: Friction drag reduction achievable by near-wall turbulence manipulation at high Reynolds number, Phys. Fluids, 17 (2005) 011702.