

壁面乱流の知的能動制御

鈴木 雄二（東大） 笠木 伸英

1. Grayのパラドックス

高速で航行する船の舳先近くをイルカが泳ぎ、ときたま空中に飛び跳ねながらついていく様子をテレビなどで見ることもある。今から90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流れが乱れた状態（乱流）で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明らかでない。

一方、サメは、速く泳ぐ種類と遅い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ミクロンと大変小さい。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も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）でも使用されたが、航空機業界もAir Bus社、Boeing社が実機テストを行って、全抵抗の2%程度が低減することを実証し、最近ではCathay Pacific、Lufthansaといった航空会社が興味を示している⁽⁵⁾。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。

イルカの皮膚やリブレットは、乱流の制御という観点からみると、空間的に一様、かつ、静的な制御方法である。1970年代のオイルショック以降、現在までに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含め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。ほとんど唯一の例外は、界面活性剤水溶液による抵抗低減⁽⁶⁾であり、地域冷暖房などで配管内の圧力損失軽減への利用が検討されている。

2. 乱流の知的能動制御

これに対して、最近、知的能動制御、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1つとなっている。図2に、壁乱流の知的能動制御の概念図を示す。壁面には、センサ、アクチュエータが多数埋め込まれ、センサで得た流れの情報に基づいて、抵抗や乱流音の低減、伝熱増進・分布制御などを目標として、流体に外力を加えるアクチュエータを動作させる。最終的には、センサ・アクチュエータだけでなく、コントローラーとしてのVLSI等のチップも同じ基板上に作り込まれることになる。

1960年代、スタンフォード大学の研究者らが、乱流はランダムに乱れた流れではなく、境界層乱流の壁面近くに、低速・高速の流体が流れの横断方向に隣りあう縞状の構造（ストリーク構造）が存在することを発表した⁽⁷⁾。この事実は、その後の多くの精力的な研究のきっかけとなり、流れ方向に軸を持つ縦渦、ストリーク構造など、時空間的に間欠的に生じる準秩序的な構造（図3）が存在し、それらが乱れエネルギーの生成や、壁面摩擦、熱輸送に深く関わっていることがしだいに明らかになっていった^(8,9)。また、噴流や混合層においても、特徴的な大規模渦構造が現れることが知られている⁽¹⁰⁾。

知的能動制御では、これらの準秩序構造をいかに操作して、全体の現象を少ない動力で望ましい

方向に制御するかが重要な観点となる。従って、図2の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。例えば、毎時20ノットで巡行する大型船舶の船底では、縦渦直径は78ミクロン、縦渦の寿命の逆数で与えられる周波数は1.5kHz程度となり、高度10000mを毎時1000kmで飛行する大型旅客機の機体表面では、それぞれ、78ミクロン、40kHzと見積もられる⁽¹¹⁾。従来、このように微細で、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、近年発展が著しいマイクロマシン技術により、実用化の展望が大きく開けてきている⁽¹²⁾。

実際、UCLAとカルフォルニア工科大学の研究グループでは、壁面上に長さ200ミクロンの加熱ヒータを多数取り付け付けた壁面剪断応力センサや⁽¹³⁾や、1辺1mmの正方形板が団扇のように上下動する、フラップ型電磁アクチュエータ⁽¹⁴⁾などのプロトタイプ製作に成功している。また、壁面せん断応力や壁面圧力の測定が可能なセンサも試作されてきている⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。筆者らの研究室でも、図4に示すような、フラップ型⁽¹⁸⁾、壁面変形型の電磁アクチュエータのプロトタイプを試作している。これらは「ミリマシン」であり、アクチュエータ周囲の流れ計測、数値シミュレーションによって性能評価を行い、より小型化するためのモデル化を行っている。また、フラップ型アクチュエータについては、軸対称噴流⁽¹⁸⁾、同軸噴流⁽¹⁹⁾の混合制御に適用し、顕著な混合促進を得ている。マイクロ・アクチュエータとしては、この他に、振動平板⁽¹⁹⁾、壁面変形⁽²¹⁻²³⁾、電磁流体力(EMHD)^(24,25)などが考えられ、プロトタイプ製作、乱流の直接数値シミュレーション(DNS)による制御成績の評価が行われている。

知的能動制御の実現には、これらハードウェアに加えて、センサからの信号を基にアクチュエータを適切に動作させるための制御アルゴリズムが重要である。例えば、Choi et al.⁽²⁶⁾は、壁面上での局所的な吹出し・吸込みによる制御を模擬した壁面乱流の直接数値シミュレーションを行った。彼らは、時々刻々の吹出し・吸込み量を、壁から離れた位置の壁垂直方向の速度と逆位相にすることにより、摩擦抵抗を30%以上低減できることを示した。また、Satake & Kasagi⁽²⁷⁾は、壁近傍のスパン方向(横断方向)速度を流れの情報として捉え、それらに比例した抑制力をスパン方向に加えることによって、最大15%程度の摩擦抵抗低減が得られることを示した(図5)。これらの数値実験では、理想的な条件を仮定しているものの、知的能動制御のポテンシャルの高さを裏付けるものである。

しかし、一般に乱流のように強い非線形性を持ち、かつ自由度が無量大の系の制御は容易ではなく、特に、計測可能な物理量を基に、演算負荷を実用レベルに保ちつつ適正な制御力を求めるアルゴリズムの開発は、制御工学の分野からみてもチャレンジングなテーマである。評価関数とそのフレッシュ微分を用いる(準)最適制御⁽²⁸⁻³¹⁾、ニューラルネットワークによる適応的制御アルゴリズム⁽³²⁻³⁴⁾、線形化システムの極配置制御^(35,36)、乱流準秩序構造のダイナミクスに基づくフィードバック則^(21,25)、などはその候補であり、現在、様々な検討が行われている⁽³⁷⁻³⁹⁾。

次章では、これらの背景のもと、著者らが(株)山武の協力の下に開発を進めている壁乱流制御用壁面せん断応力センサ群⁽⁴⁰⁻⁴²⁾について紹介する。

3. マイクロ壁面せん断応力センサ群の開発⁽⁴⁰⁻⁴²⁾

前述のように、壁乱流の制御に用いるセンサでは、時空間的に微少なスケールを有する準秩序構造を検知できることが要求される。本研究では、量産品である(株)山武製マイクロフローセンサ⁽⁴³⁾をベースにプロトタイプを製作し、制御用センサに適した設計を行うための特性評価を行っている。

本研究で試作した2種類のマイクロ熱膜センサを図6, 7に示す。Type 1は、流れ方向の壁面せん断応力のみを計測するI型センサであり、 Si_3N_4 のダイアフラム($400 \times 400 \mu\text{m}^2$)中央の長さ $200 \mu\text{m}$ 、幅約 $20 \mu\text{m}$ の領域に白金抵抗体のラインが数回折り返してパタニングされている。シリコン基板上に

は、別途温度補償用の白金抵抗体が設けられている。一方、Type 2 は、2 方向のせん断応力の測定を行う V 型センサであり、 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ のダイアフラム上に、長さ $300 \mu\text{m}$ 、幅約 $30 \mu\text{m}$ の白金抵抗体が流れ方向と 45 度をなすように設けられている。中心間距離 Δz は $530 \mu\text{m}$ 、最小距離は $320 \mu\text{m}$ である。1 つのセンサチップには、Type 1 では 1mm 間隔で 8 個、Type 2 では 2mm 間隔で 4 個のセンサがそれぞれ形成されており、これを複数用いることにより、 51mm 幅に 48 個の I 型、あるいは、24 個の V 型センサを有するセンサ群を試作した。センサの制御回路には定温度型回路を用い、作動流体の温度に対して約 60 度（加熱度 0.2 ）高く保つように設定した。

図 8 に、本研究で制御効果の評価に用いるチャンネル乱流風洞⁽⁴⁴⁾の概略図を示す。全長 7m の開放型の吸い込み式風洞であり、 $50\text{mm} \times 500\text{mm}$ の矩形断面(アスペクト比 10)をもつ。テスト部は、入口からチャンネル幅の 80 倍下流に設置されており、十分発達した乱流となっている。供試センサは、チップ表面と壁面の高さが一致するように設置した。テスト部前後のチャンネル上面には、静圧孔が設けられており、壁面せん断応力を算出するための流れ方向平均圧力勾配を測定する。計測は、バルク平均流速に基づくレイノルズ数 Re_m で $8500 \sim 30000$ の範囲で行った。壁面摩擦速度とチャンネル半幅で定義されるレイノルズ数 Re_τ は、 $250 \sim 800$ である。

センサの角度特性の較正には、修正コサイン則を用いた。修正コサイン則では、熱膜とせん断応力ベクトルとのなす角を θ 、せん断応力ベクトルの大きさを $|\tau|$ とすると、センサが検出するせん断応力の実効値 τ_{eff} を定数 κ を用いて、

$$\tau_{\text{eff}} = |\tau| \sqrt{\cos^2 \theta + \kappa^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

と仮定する。一方、センサの出力電圧 E とせん断応力 τ_{eff} の関係式は、 E_0 を無風状態での出力電圧とし、

$$\tau_{\text{eff}} = a + b(E^2 - E_0^2) + c(E^2 - E_0^2)^2 + d(E^2 - E_0^2)^3 \quad (2)$$

とした。較正実験から求められた κ の値は、 $0.6 \sim 0.7$ 程度であり、従来の熱線・熱膜プローブに比べて値が大きく、接線方向の感度が相対的に高いことがわかる。

図 9 (a) に、Type 2 センサの片方の熱膜を流れと直交させて I 型センサとして使用し、異なるレイノルズ数に対して、壁面せん断応力乱れのパワースペクトラムを求めた結果を示す。レイノルズ数が高くなるにつれて、全体のエネルギーが増大するとともに、高周波数成分の占める割合が増大する様子が捉えられていることがわかる。一方、 $Re_\tau=250$ の計測結果を、Iwamoto et al.⁽⁴⁴⁾による DNS ($Re_\tau=300$) の計算結果と比較すると、無次元周波数 $f^+ = 0.05$ ($f = 80 \text{ Hz}$) までは良く一致しており、より高い周波数ではゲインが下がっていることがわかる (図 9 (b))。従来、既知のスペクトルを有する流れ場に対して壁面せん断応力センサの動特性を定量的に評価した例はほとんどなく、本結果は、より周波数特性の高いセンサを設計する上で極めて有用な情報である。Jiang et al.⁽⁴⁵⁾は、電気的な特性評価実験を用いて、彼らのセンサのカットオフ周波数を 9kHz としたが、本研究で試作したセンサの熱容量は彼らのものとほぼ同等であることから、彼らの見積りに疑問が持たれる。

図 10 に、流れ方向、スパン方向のせん断応力乱れの rms 値 τ_{urms} 、 τ_{wrms} を平均値 τ_{umean} で無次元化して示す。これらの値は、それぞれ、およそ 0.4 、 0.2 になることが知られている^(46,47)。 τ_{urms} はレイノルズ数が増加すると低下し、高いレイノルズ数に対してはセンサの動特性が不十分であることを示唆する。一方、 τ_{wrms} はほぼ一定の値をとり、レイノルズ数が小さい領域では DNS^(45,48)の値に比べてやや大きいのに対し、高レイノルズ数では DNS と比較的近い値となっている。これは、センサの不十分な動特性による τ_{wrms} の減少、および、2 つの熱膜がスパン方向に有限の間隔を持つことによる τ_{wrms} の増大⁽⁴⁹⁾の 2 つの影響が相殺しているためと推測される。

図 11 に、Type 2 のセンサ群で計測した、流れ方向せん断応力、および、スパン方向せん断応力のスパン方向二点相関を示す。センサ間隔が大きいため、詳しい分布は得られないが、 $Re_\tau = 300$ の DNS データ⁽⁴⁴⁾と類似の傾向を示し、ストリーク構造など、壁近傍に特徴的な流れ場の構造が捉え

られていることがうかがえる。

4. まとめ

MEMS技術を用いたマイクロ熱膜センサ群を試作し、流れ方向とスパン方向の壁面せん断応力の計測を試みた。その結果、較正法、動特性など、改善すべき点が残されていることが分かった。しかし、その一方で、センサ群の時系列データから、壁近傍の乱流準秩序構造を捉えられることを示し、フィードバック制御用のセンサとしての有効性を確認できた。

従来、乱流の制御は、極めて経験的、直感的な手法に依存していた。乱流の知的能動制御は、この殻を打ち破り、(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、本稿で取り上げた乱流摩擦抵抗だけでなく、剥離、熱伝達、熱・物質の拡散、燃焼、乱流騒音等の制御を通して、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・快適性の向上に大きな貢献が可能であると期待される。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てきていると言える。我々の夢は、Grayのパラドックスを越える新たな基盤技術を育て、広く人類の福祉に貢献することである。

謝辞

本稿で紹介したマイクロアクチュエータ・センサの設計・評価実験にあたっては、東京大学大学院生鈴木宏明氏、吉野崇氏、村上正光氏、津田幹氏の協力を得た。また、マイクロ熱膜センサ群の設計・試作にあたっては、(株)山武の上運天昭司氏、函師信彦氏、中野正志氏、衣笠静一郎氏をはじめとする多くの方の協力を得た。記して感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Gray, J., *J. Exp. Biology*, **13**, (1936), 192.
- (2) Kramer, M. O., *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, **72**, (1960), 25.
- (3) Bechert, D. W., Hoppe, G., and Reif, W.-E., *AIAA Paper*, 85-0546, (1985).
- (4) Walsh, M. J., in *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, Bushnell, D. M., and Hefner, J. N., eds., *Prog. Astronautics and Aeronautics*, **123**, AIAA, (1990), 203.
- (5) *Mechanical Engineering*, **119**, (1997), 14.
- (6) Ohlendorf, D., Interthal, W., and Hoffmann, H., *Rheol. Acta*, **25**, (1986), 468.
- (7) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A., and Runstadler, P. W., *J. Fluid Mech.*, **30**, (1967), 741.
- (8) Robinson, S. K., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23**, (1991), 601.
- (9) Kasagi, N., Sumitani, Y., Suzuki, Y., and Iida, O., *Int J. Heat & Fluid Flow*, **16**, (1995), 2.
- (10) Cantwell, B. J., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **13**, (1981), 457.
- (11) Gad-el-Hak, *AIAA Paper 93-3268*, (1993).
- (12) Ho, C.-M., and Tai, Y.-C., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **30**, (1998), 579.
- (13) Jiang, F. K., Tai, Y.-C., Walsh, K., Tsao, T., Lee, G. B., and Ho, C. M., *Proc. 10th Int. Workshop MEMS*, IEEE, (1997), 465.
- (14) Miller, R., Burr, G., Tai, Y. C., and Psaltis, D., *Proc. Solid-State Sens. Actuator Workshop*, (1996), 183.
- (15) Jiang, F. K., Tai, Y.-C., Gupta, B., Goodman, R., Tung, S., Huang, J.-B., and Ho, C.-M., *Proc. 9th Int. Workshop MEMS*, IEEE, (1996), 110.
- (16) Kälvesten, E., Vieider, C., Löfdahl, L., and Stemme, G., *Sensors and Actuators A*, **52**, (1996), 51.
- (17) Rasmussen, A., and Zaghoul, M. E., *Circuits & Devices*, **14**, IEEE, (1998), 12.

- (18) 鈴木・笠木・鈴木, 日本機械学会論文集(B編), **65**, (1999), 3644.
- (19) 堀内・名兎耶・鈴木・笠木, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 神戸, (2000), 873.
- (20) Jacobson, S. A., and Reynolds, W. C., *J. Fluid Mech.*, **360**, (1998), 179.
- (21) Carlson, H. A., and Lumley, J. L., *J. Fluid Mech.*, **329**, (1996), 341.
- (22) Endo, T., Kasagi, N., and Suzuki, Y., *Int. J. Heat & Fluid Flow*, (2000), in press.
- (23) Grosjean, C., Lee, G. B., Hong, W., Tai, Y.-C., and Ho, C.-M., *Proc. 11th Int. Workshop MEMS*, IEEE, (1998), 166.
- (24) Crawford, C. H., and G. E. Karniadakis, *Phys. Fluids*, **9**, (1997), 788.
- (25) O' Sullivan, P. L., and Biringen, S., *Phys. Fluids*, **10**, (1998), 1169.
- (26) Choi, H., Moin, P., and Kim, J., *J. Fluid Mech.*, **262**, (1994), 75.
- (27) Satake, S., and Kasagi, N., *Int. J. Heat & Fluid Flow*, **17**, (1996), 343.
- (28) Choi, H., Temam, R., Moin, P., and Kim, J., *J. Fluid Mech.*, **253**, (1993), 509.
- (29) Moin, P., and Bewley, T., *Proc. 12th Australian Fluid Mech. Conf.*, (1995), 10.
- (30) Lee, C., Kim, J., and Choi, H., *J. Fluid Mech.*, **358**, (1998), 245.
- (31) Yokoo, M., Kasagi, N., and Suzuki, Y., *Proc. 3rd Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Nagoya, (2000), 949.
- (32) Lee, C., Kim, J., Babcock, D., & Goodman, R., *Phys. Fluids*, **9**, (1997), 1740.
- (33) Suzuki, Y., and Kasagi, N., *Proc. 11th Symp. Turbulent Shear Flows*, (1997), 9.18.
- (34) 鈴木, 日本機械学会第75期通常総会講演論文集, VI, (1998), 497.
- (35) Joshi, S. S., Speyer, J. L., and Kim, J., *J. Fluid Mech.*, **332**, (1997), 157.
- (36) Bewley, T., Temama, R., and Ziane, M., *Annu. Reserch Briefs*, CTR, Stanford Univ., (1997), 299.
- (37) Moin, P., and Bewley, T., *Appl. Mech. Rev.*, **47**, (1994), S3.
- (38) Gad-el-Hak, M., *Appl. Mech. Rev.*, **49**, (1996), 365.
- (39) 笠木, 日本航空宇宙学会誌, **48**, (2000), 155.
- (40) 吉野・鈴木・笠木・上運天, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 神戸, (2000), 211.
- (41) 吉野・鈴木・笠木・村上・上運天, 日本流体力学会年会'00, 日本流体力学会誌, 19巻別冊, (2000), 505.
- (42) 上運天・吉野・鈴木・笠木, 日本機械学会年次大会講演論文集, No.00-1(I), 名古屋, (2000), 723.
- (43) Nagata, M., Kamiunten, S., Honda, N., Itoh, T., and Honami, S., *Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conf.*, FEDSM99-7356, San Francisco, (1999).
- (44) 木下・鈴木・笠木, 日本流体力学会年会'99, 日本流体力学会誌, 18巻別冊, (1999), 179.
- (45) Iwamoto, K., Suzuki, Y., Kasagi, N., and Fukusima, N., *2nd Int. Symp. Turbulent & Shear Flow Phenomena*, Stockholm, (2001), submitted.
- (46) Liu, C., Huang, J.-B., Zhu, Z., Jiang, F., Tung, S., Tai, Y.-C., and Ho, C.-M., *J. Microelectromechanical Systems*, **8**, (1999), 90.
- (47) Alfredson, P. H., Johansson, A. V., Haritonidis, J. H., and Eckelmann, H., *Phys. Fluids*, **31**, (1988), 1026.
- (48) Moser, R. D., Kim, J., and Monsour, N. N., *Phys. Fluids*, **11**, (1999), 943.
- (49) Suzuki, Y., and Kasagi, N., *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **5**, (1992), 69.

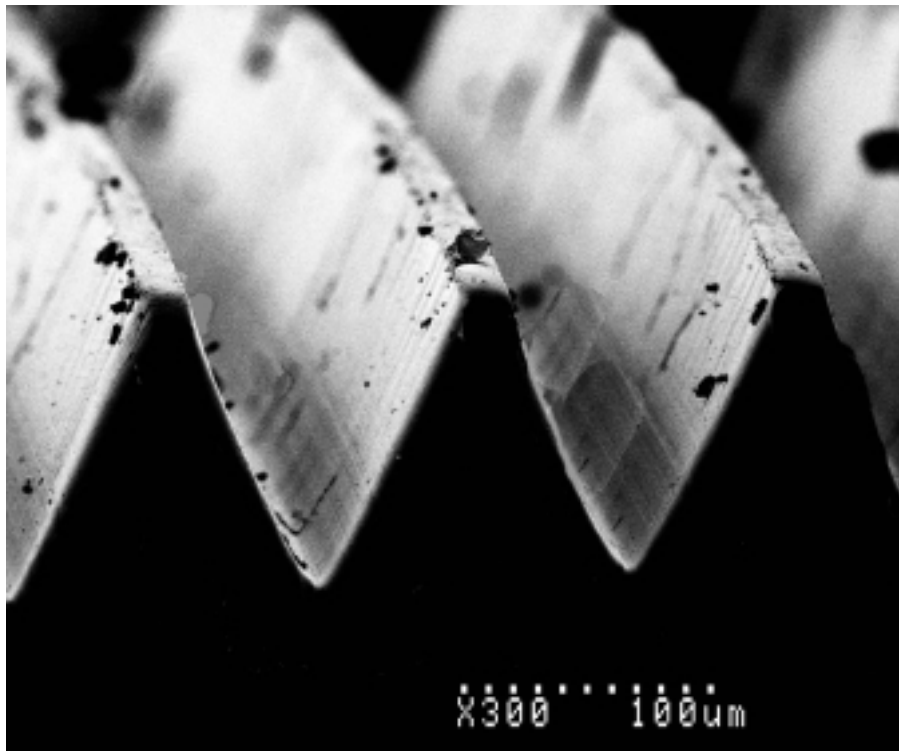


図1：3M社のリブレットフィルム（溝間隔125ミクロン）の走査電子顕微鏡写真

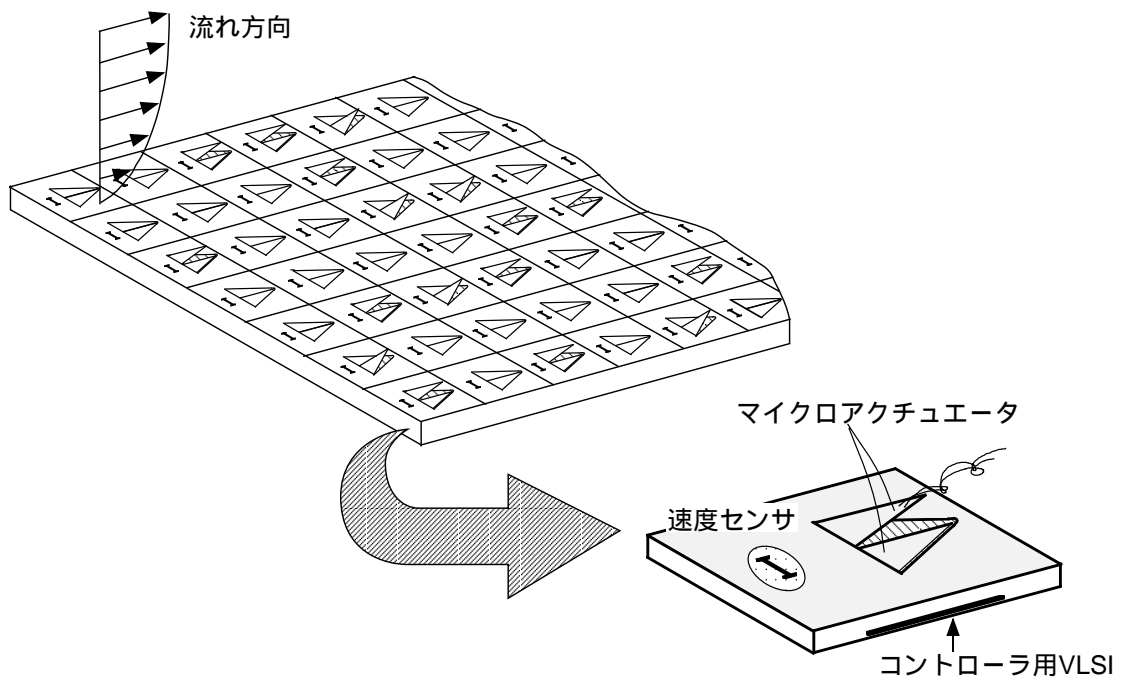


図2：壁乱流の知的能動制御システムの概念図

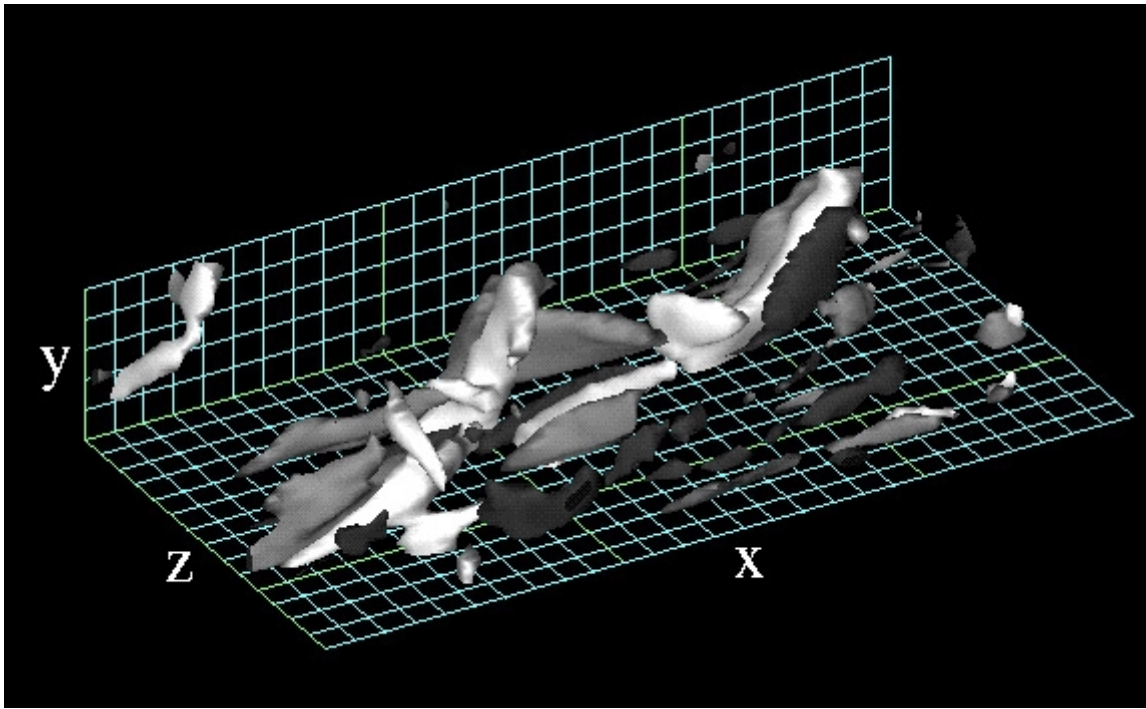
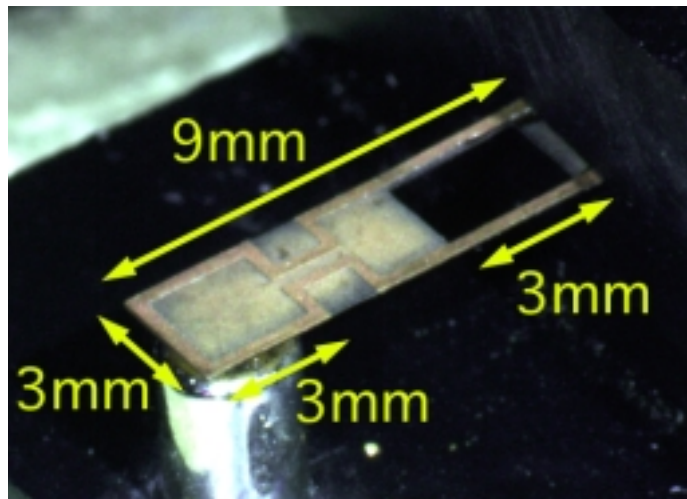


図3：DNSにより再現された壁近傍の準秩序構造の可視化例⁽⁹⁾(流れは左から右，下面が壁面．白の等値面が渦構造，灰色，黒色は，レイノルズ応力の大きな領域)．

(a)



(b)

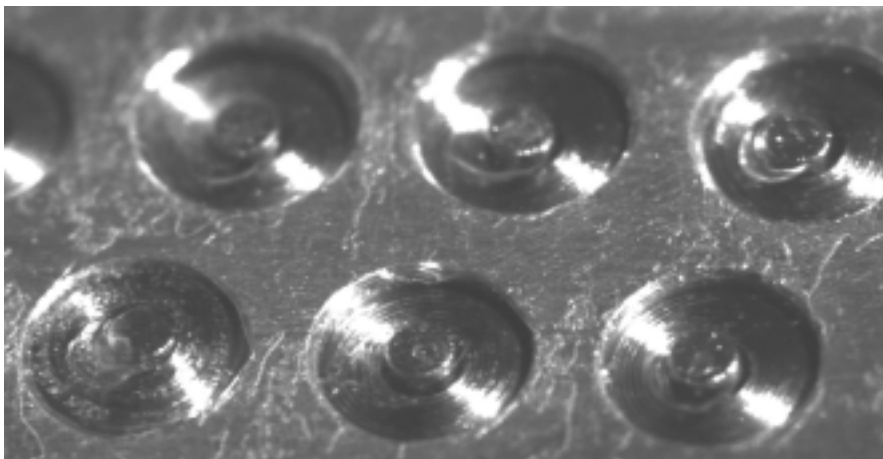


図4：電磁アクチュエータのプロトタイプ。(a)フラップ型⁽¹⁸⁾(9mm × 3mm)，(b)壁面変形型(直径3mm)．

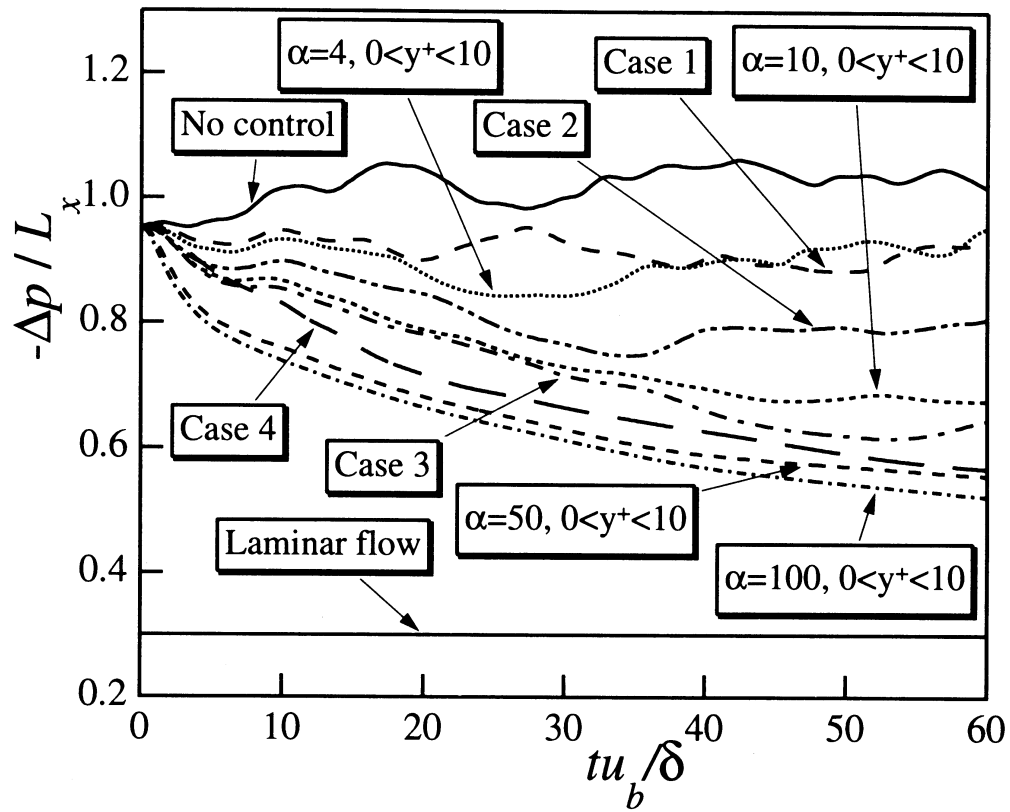


図5：スパン方向速度を選択的に減衰させた場合の摩擦抵抗低減効果⁽²⁶⁾。

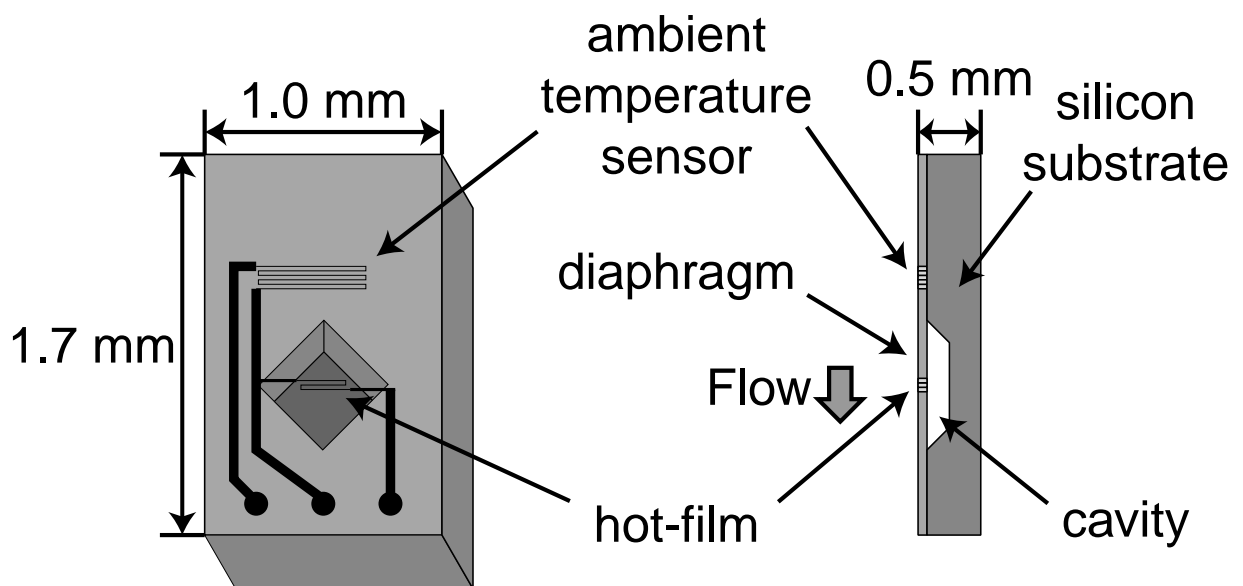


図6：壁面せん断応力センサ群⁽³⁹⁻⁴¹⁾の概念図。

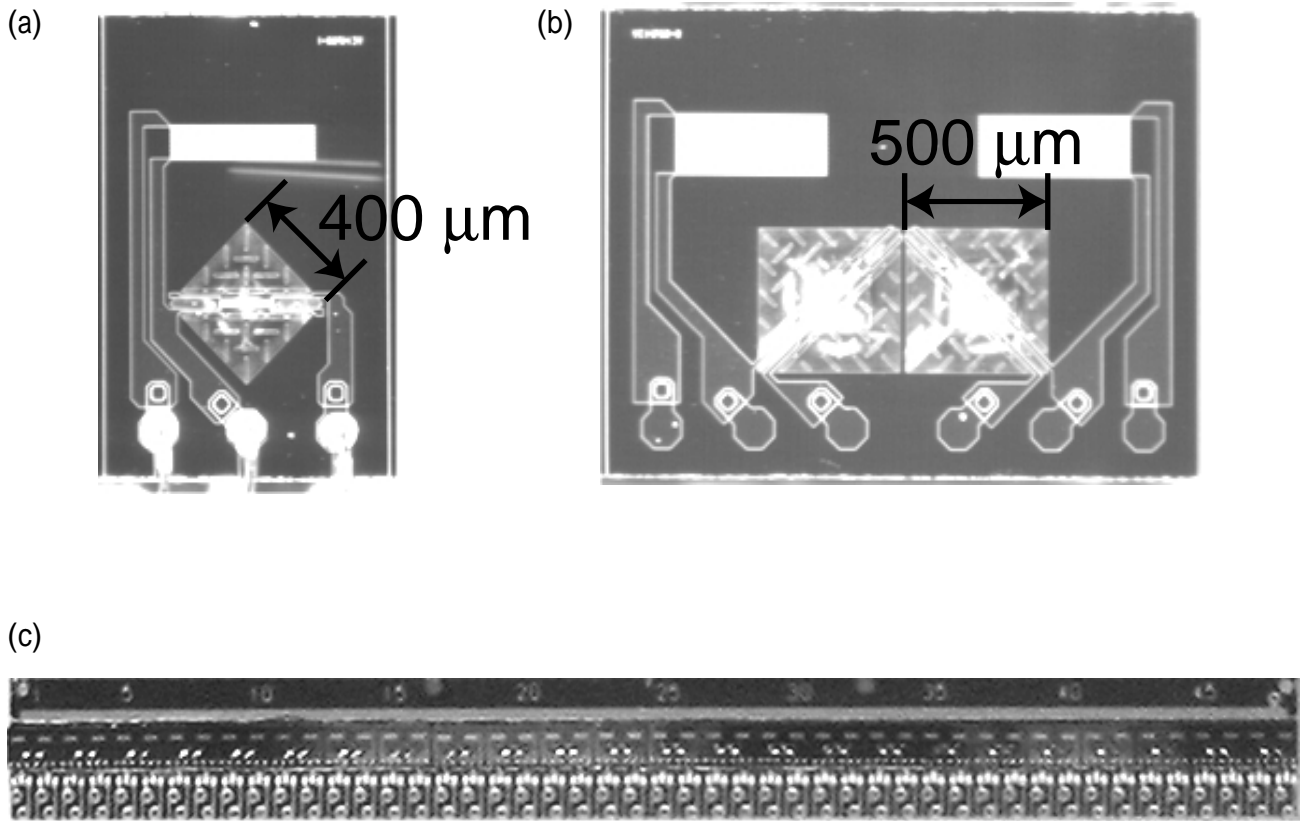


図 7 : 壁面せん断応力センサ群⁽⁴⁰⁻⁴²⁾. (a)Type 1 センサ , (b)Type 2 センサ , (c)センサ群 .

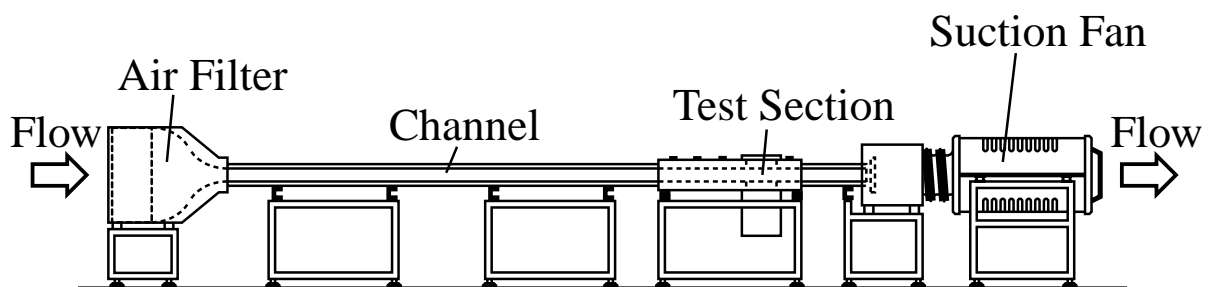


図 8 : チャネル乱流風洞実験装置⁽⁴⁴⁾.

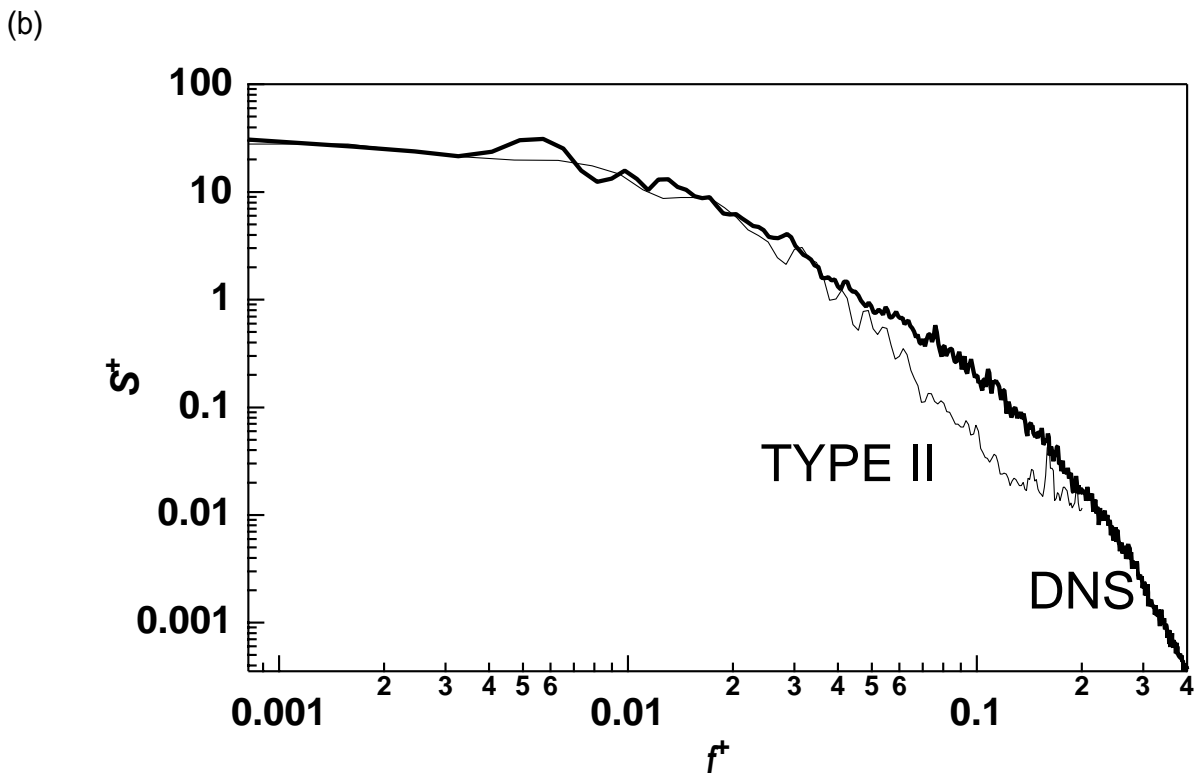
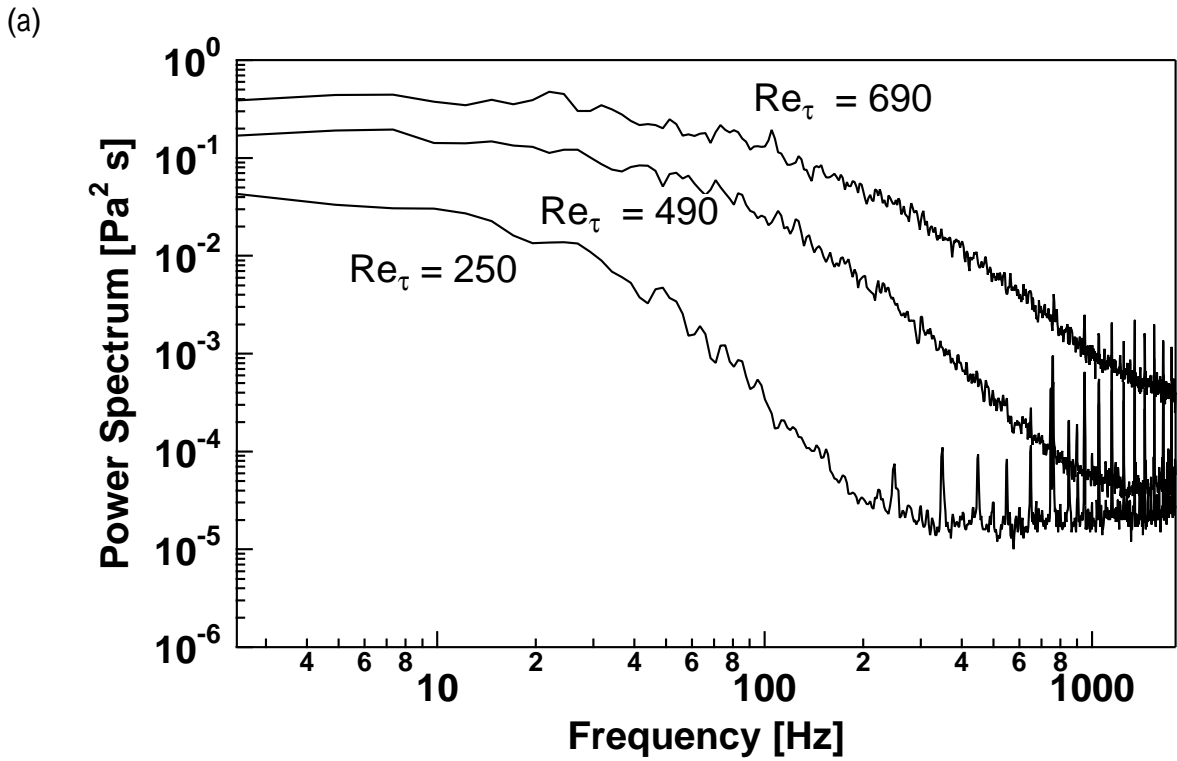


図9 : Type 2 センサの周波数特性⁽⁴¹⁾. (a)Re 数による変化, (b)DNS⁽⁴⁵⁾との比較.

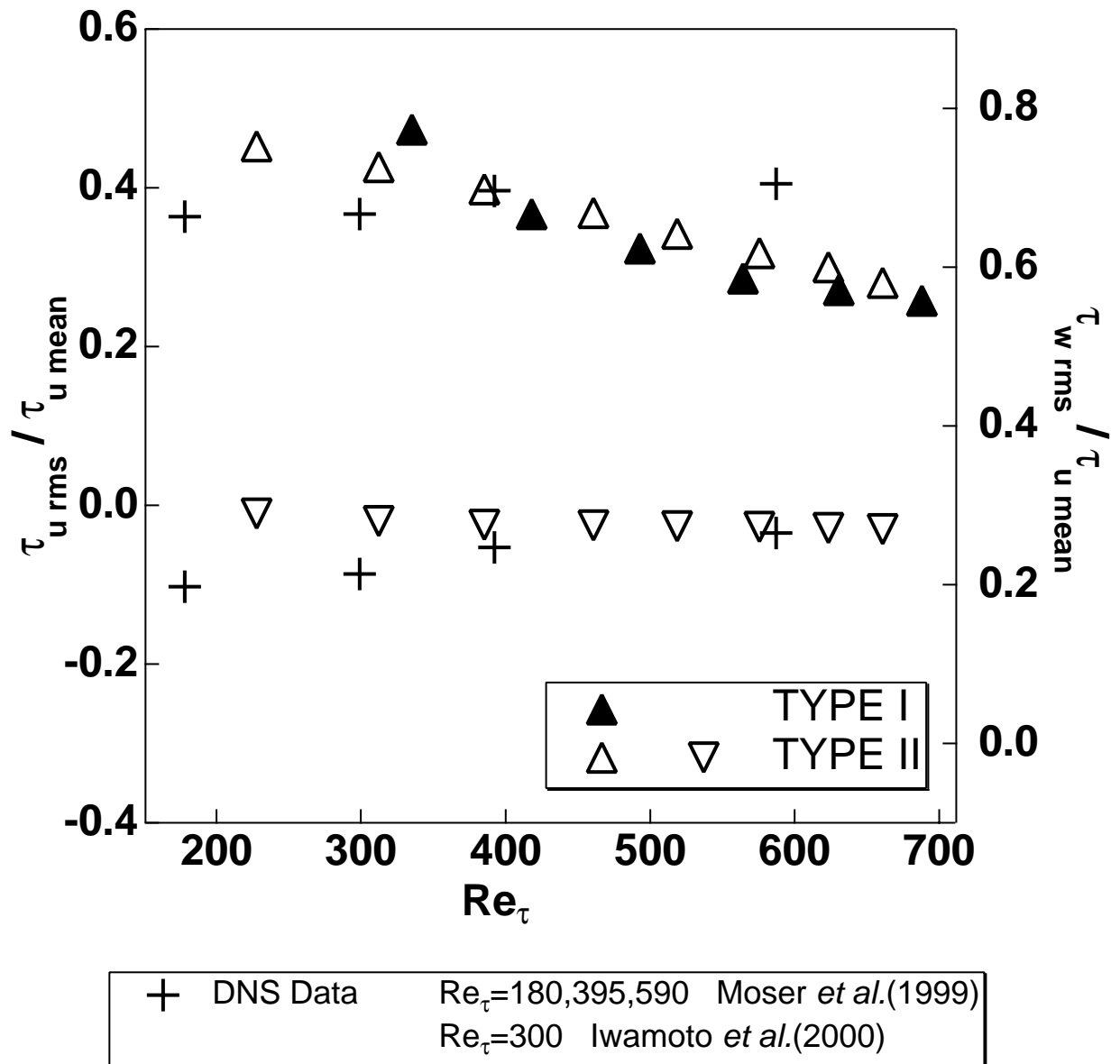
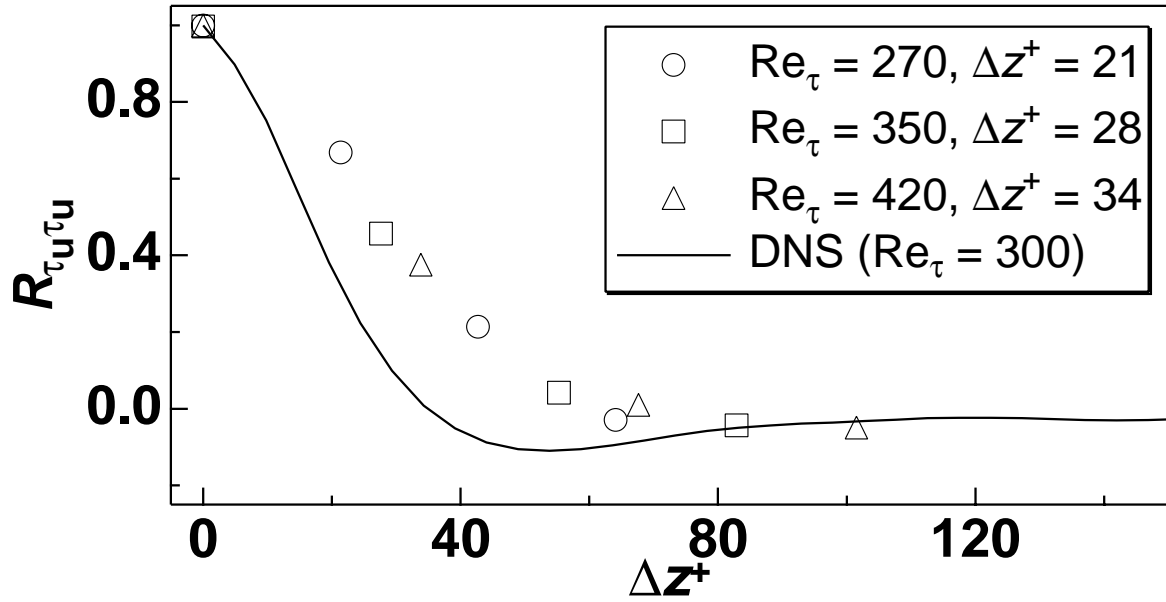


図 10 : 壁面せん断応力乱れの計測結果⁽⁴¹⁾.

(a)



(b)

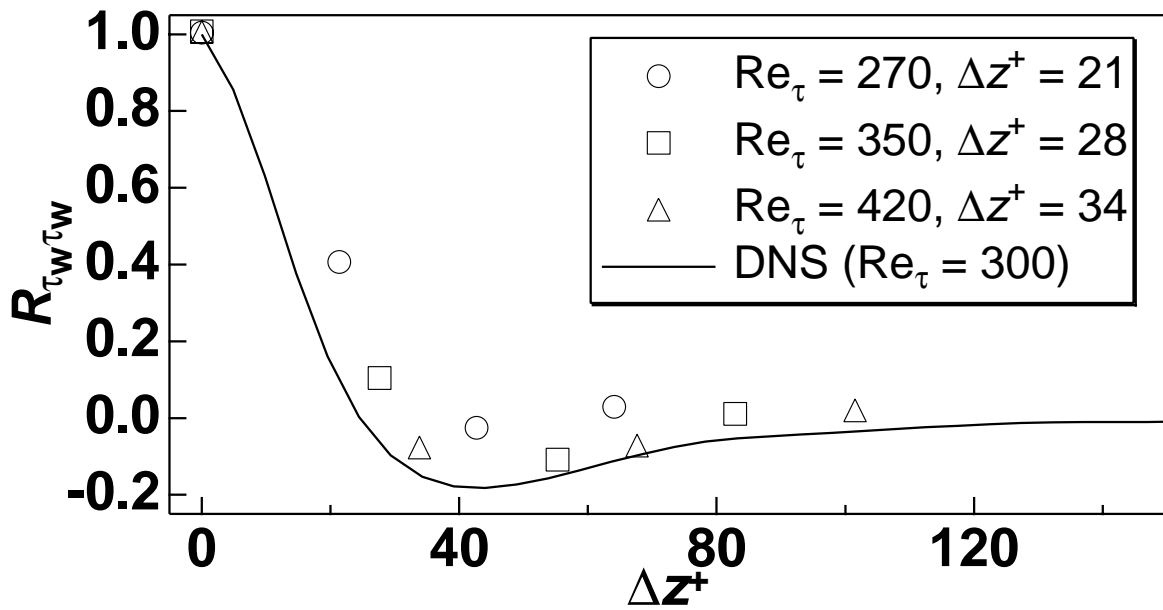


図 1 1: 壁面せん断応力乱れのスパン方向 2 点相関係数⁽⁴¹⁾. (a)流れ方向せん断応力, (b)スパン方向せん断応力.