平行平板間乱流の大規模 DNS 進展と今後の展開*

河村 洋^{*1}, 阿部 浩幸^{*2}

Progress of Large-scale Direct Numerical Simulation in a Turbulent Channel Flow and its Future Perspective

Hiroshi KAWAMURA^{*3} and Hiroyuki ABE^{*3} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science,
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba, 278-8510 Japan**Key Words:** Direct Numerical Simulation, Turbulent Channel Flow, High Reynolds Number

1. 緒 言

壁乱流における乱流輸送現象を解明することは、乱流熱伝達や乱流抵抗、さらには流体機械、熱機関、輸送機器等の設計において非常に重要である。しかし、乱流は時間と空間に不規則な挙動を呈する非線形散逸系の現象であり、その力学的機構を解明することは容易ではない。このため、1883年に発表された Osborne Reynolds の先駆的な実験以来、100年以上の時を経た現在でも、実験、理論、数値計算による解析を通じ、引き続き数多くの研究が行われている。このうち数値計算を用いた研究は、近年の計算機におけるハード・ソフト両面の急速な性能向上の恩恵を受け、ここ数十年で急速に発展し、いまでは乱流現象を測定し、かつ予測・解明するために必要不可欠な研究手段となっている。数値計算手法は、(1)直接数値シミュレーション(DNS: Direct Numerical Simulation)、(2)ラージ・エディ・シミュレーション(LES: Large Eddy Simulation)、(3)レイノルズ平均乱流モデル(RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)の三つに大別され、それぞれの手法が対象とする課題に応じて選択され、重要な役割を果たしている。本報ではこのうち、DNSを用いた研究について、壁乱流の代表的な流れの一つである平行平板間乱流のDNSの進展を、著者らのグループが行ってきた大規模DNSの結果を中心に解説する。なお、以下では特

に断らない場合は、流れは平均圧力こう配によって駆動されるポアズイユ乱流である。一部、壁面の相対移動によって駆動されるクエット乱流についても述べる。

2. 乱流研究における DNS の位置付け

DNSとは、支配方程式をモデル化せず、可能な限り高精度に解く三次元時間進行形の数値計算手法である。時空間に高精度な離散化手法を用いることはもとより、計算実行の際における各種パラメータの設定にも、特別な配慮がされる。特に乱流のDNSにおいては、平均流による大きな渦を捕らえうる大きな計算領域を確保すると同時に、乱れの最小スケール(コルモゴロフ・スケール)に匹敵するほど、細かい格子を設定することが必要となる。一方、この手法では任意の時間・位置における速度、圧力、温度、さらには実験では収集困難な高次相関量などの情報を、高精度に求めることが可能であり、実験に代わる研究手法として注目されてきた。最初のDNSが行われた1970年代前半から現在までに、単純形状・境界条件を有したカノニカルな系に対して、DNSが数多く実行された。例えば、一様等方性乱流(Orszag-Patterson⁽¹⁾)、一様せん断乱流(Rogallo⁽²⁾)、境界層流(Spalart⁽³⁾)、平行平板間流(Kimら⁽⁴⁾)、円管内流(Eggelsら⁽⁵⁾)などの壁乱流のDNSは、当初は計算機の性能上、低自由度な系(低レイノルズ数)に限られたが、現在ではさまざまなパラメータのもとで実行可能となっている。一方、複雑形状の流れ(例えば、Choiら⁽⁶⁾によるリブレット上の流れ)や空間的に発展する流れ(例えば、Leら⁽⁷⁾によるバックステップ流れ)などのDNSも、低レイノルズ数の範囲に限られるが、すでに実行されてい

* 原稿受付 2006年6月23日。

^{*1} 正員、東京理科大学機械工学科(☎278-8510 野田市山崎2641)。^{*2} 正員、宇宙航空研究開発機構(☎182-8522 調布市深大寺東町7-44-1)。

E-mail: kawa@rs.noda.tus.ac.jp

る。

以上の結果, DNS は乱流現象の数値実験手段としての位置を築き, その適用対象は, (1) 乱流現象の予測・解明(例えば, Kim ら⁽⁴⁾), (2) 乱流モデルの開発(例えば, Rodi-Mansour⁽⁸⁾, Nagano-Shimada⁽⁹⁾), (3) 乱流構造の解析(例えば, Robinson⁽¹⁰⁾), (4) 乱流制御技術の開発(例えば, Choi ら⁽¹¹⁾), (5) 乱流計測技術のキャリブレーション(例えば, Nishino-Kasagi⁽¹²⁾, Antonia ら⁽¹³⁾) など, 多岐にわたっている。また, 最近では IT 化の流れを受けて, 乱流統計諸量の DNS データが各大学の研究室または研究機関の Web サイト上で公開され^{(14)~(18)}, 世界中の研究者が最新の研究情報を共有することが可能となっている。現在は, 低レイノルズ数における DNS は成熟期に達しているが, 高レイノルズ数については, 3 章に述べるようなカノニカルな系を除いては, 今後の発展に待たれることが多い。なお, 近年の DNS による乱流研究に対する寄与の詳細に関しては, Moin-Mahesh⁽¹⁹⁾ の Review を参照されたい。

3. 平行平板間乱流の大規模 DNS の進展

平行平板間乱流の DNS は, 1987 年に Kim ら⁽⁴⁾ により初めて行われた。そのときのレイノルズ数は, 壁面摩擦速度 u_τ およびチャネル半幅 δ に基づくレイノルズ数で, $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 180$ であった。このレイノルズ数は, 断面平均流速 u_m およびチャネル全幅 2δ に基づくレイノルズ数で, $Re_m = u_m 2\delta / \nu = 5600$ であり, 工学的実用乱流のレイノルズ数の上限が 10^5 程度のオ

ーダであることを考慮すると, オーダが 2 けた小さいものであった。以降, 平行平板間乱流の研究では, その時代における計算機資源を可能な限り用いて, より高いレイノルズ数の DNS を達成しようとする試みが行われてきた。図 1 は, この系における大規模 DNS のレイノルズ数の変遷をまとめたものである。Kim ら⁽⁴⁾ の DNS から現在に至るまでの約 20 年間に於いて, 計算機におけるハード性能はムーアの法則を超える勢いで向上しているものの⁽²⁰⁾, DNS におけるレイノルズ数の上昇は, 約 10 倍程度にとどまっている。これは, 乱れの最大・最小スケール比が, 壁乱流ではレイノルズ数にほぼ比例するため, 三次元計算では格子数がレイノルズ数の三乗に比例することに起因している。実際, 図 1 における直線は三乗に比例する直線であり, これまでの大規模 DNS の変遷も, おおむねこのラインに沿って進んでいる。現在の乱流における世界最大の大規模 DNS は, Kaneda ら⁽²¹⁾ が実行した総格子点数(総フーリエモード数)約 687 億点の一樣等方性乱流の DNS である。一方, 平行平板間乱流における世界最大の DNS は, Hoyas-Jiménez⁽²²⁾ の約 179 億点の総格子点数(総フーリエモード数)を有した計算で, 前者の計算の約 1/4 の規模にとどまっている。この差異は, 一樣等方性乱流の DNS では 3 方向に周期境界条件が適用できるが, 平行平板間乱流の DNS では, 一樣性が仮定できる方向は流れ方向とスパン方向の 2 方向に限定され, さらに, 壁垂直方向においては, 壁面のノンスリップ境界条件による制限, 壁際の最小格子間隔に起因する時間刻みに対する制限が生じることが, 主たる原因である。したがって, 平行平板間乱流において, 一樣等方性乱流の大規模 DNS と同等の規模の DNS を実行することは, 計算的な側面から見ても非常に挑戦的な試みである。

この 20 年間の平行平板間乱流における大規模 DNS の変遷を概説する。Kim ら⁽⁴⁾ の最初の DNS から 1990 年代後半にかけては, 世界的に計算機性能が低く, 計算機のメモリ容量が少ない傾向にあったことから, 計算領域を極力小さく制限し, 総格子点数を最大で約 4000 万点程度に抑えて, レイノルズ数を上げる試みが行われた。代表的な研究として, Moser ら⁽²³⁾ の $Re_\tau = 180, 395, 590$ の DNS, Abe ら⁽²⁴⁾ の $Re_\tau = 180, 395, 640$ の DNS がある。これらの研究では, 低レイノルズ数効果(Antonia-Kim⁽²⁵⁾)について, 各種乱流統計量, 乱流構造のレイノルズ数依存性が詳しく議論された。一方, 壁乱流の実験結果から, 高レイノルズ数における外層の大規模構造の重要性が指摘された。この点について, Jiménez⁽²⁶⁾ は, 上記の

Fig. 1 Development of DNS in a turbulent channel flow

Table 1 Recent large-scale DNSs in a turbulent channel flow at high Reynolds numbers

Authors	Re_τ	Number of grid points $N_x \times N_y \times N_z$	Domain size $L_x \times L_y \times L_z$	Spatial resolution $\Delta x^+ \times \Delta y^+ \times \Delta z^+$
del Álamo et al. ⁽²⁹⁾	934	3072 × 385 × 2304	$8\pi\delta \times 2\delta \times 3\pi\delta$	$7.64 \times (0.03 \sim 7.64) \times 3.82$
Abe, Kawamura & Matsuo ⁽³⁰⁾	1020	2048 × 448 × 1536	$12.8\delta \times 2\delta \times 6.4\delta$	$6.38 \times (0.15 \sim 7.32) \times 4.25$
Satake et al. ⁽³¹⁾	1100	1024 × 768 × 1024	$5\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$	$16.8 \times (0.18 \sim 4.50) \times 8.59$
Iwamoto et al. ⁽³²⁾	1176	1152 × 513 × 1024	$6\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$	$19.2 \times (0.02 \sim 7.21) \times 7.32$
Kang, Tanahashi & Miyauchi ⁽³³⁾	1270	864 × 1239 × 648	$2\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$	$9.24 \times (0.45 \sim 5.18) \times 6.16$
Ishihara, Osada, Kaneda ⁽³⁴⁾	1299	1024 × 512 × 1024	$2\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$	$8.00 \times (0.006 \sim 8.00) \times 4.00$
Hoyas & Jiménez ⁽²²⁾	2003	6144 × 633 × 4608	$8\pi\delta \times 2\delta \times 3\pi\delta$	$8.19 \times (0.15 \sim 8.89) \times 4.10$
Iwamoto, Kasagi & Suzuki ⁽³⁵⁾	2320	2304 × 1025 × 2048	$6\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$	$18.9 \times (0.01 \sim 7.11) \times 7.11$

Moser ら⁽²³⁾ の小さな計算領域を用いた DNS に対して計算領域の影響を調べ、Moser ら⁽²³⁾ の DNS は、外層の大規模構造を収容するには狭すぎることを指摘している。

2000 年を越えたあたりから、計算機メモリーが数百ギガバイトから数テラバイトと、大容量化された計算機システムが現れた。これに伴い、総格子点数が 10^8 のオーダーの計算が可能になり、外層の大規模構造の挙動を調べることを意図した、大きな計算領域を有した DNS が行われるようになった。代表的な研究として、del Álamo-Jiménez⁽²⁷⁾ の $Re_\tau=180, 550$ の DNS、Abe ら⁽²⁸⁾ の $Re_\tau=180, 395, 640$ の DNS がある。これらの研究においては、大規模構造の大きさやその内層への影響が議論された。del Álamo-Jiménez⁽²⁷⁾ は、外層の $y/\delta=0.5$ の位置に、流れ方向、スパン方向にそれぞれ約 $5\delta, 2\delta$ のスケールを有した流れ方向の速度変動 u' の大規模構造が存在することを示し、その構造の影響がバッファ層まで及んでいることを指摘している。Abe ら⁽²⁸⁾ は、大規模構造のスパン方向の挙動を詳細に調べ、そのスパン方向の間隔が約 $1.3 \sim 1.6\delta$ であることを報告し、外層の大規模構造が壁面せん断応力まで影響を与えていることを指摘している。

その後、大規模計算機環境の整備がさらに進み、 $Re_\tau=1000$ を超える大規模 DNS が、数多く行われるようになった^{(22)(29)~(35)}。表 1 は、これらの大規模 DNS の計算パラメータをまとめたものであるが、どれも総格子点数(またはフーリエモード数)が 10^8 のオーダーの非常に大きな計算となっている。これらの研究により、既存の実験結果と直接比較できるレイノルズ数域に突入したことから、乱流統計量や乱流構造に対して、実際に実験結果との比較・検討が行われている。ここで、著者らのグループの DNS⁽³⁰⁾⁽³⁷⁾⁽³⁹⁾⁽⁴²⁾ の結果を、既存の実験結果と比較したものをいくつか紹介する。図 2 は平均流速分布、図 3 は乱流強度分布に

 Fig. 2 Mean velocity distributions up to $Re_\tau=1020$

ついて、DNS と実験結果を比較したものである(上付き+は、壁面量による無次元化を示す)。図 2, 3 において、壁面近傍を除き、DNS の結果(Abe ら⁽³⁰⁾)と実験結果(Wei-Willmarth⁽³⁶⁾)が非常によく一致していることがわかる。一方、壁面近傍の計測が難しい部分においては、DNS がより精度の高いデータを与える傾向が見受けられる。図 4 は、DNS により得られた壁面圧力変動の周波数スペクトルの結果(Abe ら⁽³⁷⁾)を、乱流境界層の実験結果(Tsuji ら⁽³⁸⁾)と比較したものである。流れの形態が違うことや、実験装置のバックグラウンドノイズに起因して、低周波数域で若干差異が見られるものの、その他の周波数域では両者は非常によく一致している。図 5 は、 $Re_\tau=1020$ における壁面近傍のストリーク構造と、渦構造(変形速度テンソルの第二不変量)の可視化結果である⁽³⁹⁾。壁面近傍には、従来の実験でよく知られたストリーク構造が確かに見受けられるものの、低速・高速の大規模構造がそれよりも卓越して存在している。また、この低速・高速領域はそれぞれ、Q2(イジェクション)、Q4(スウィープ)の運動に対応し、これらの大規模構造が存在する位置では、大きなレイノルズせん断応力が生じている。一方、渦構造は、壁面近傍では縦渦が

Fig. 3 Root-mean-square values of the velocity fluctuations up to $Re_\tau=1020$ Fig. 4 Frequency wall pressure spectra at $Re_\tau=1020$

支配的であるが、壁面から離れた部分では、Adrianら⁽⁴⁰⁾が指摘するようなヘアピン形の渦も見受けられる。なお、大規模構造と微細渦構造との関係については、Tanahashiら⁽⁴¹⁾が詳細に調べ、低速の大規模構造と微細渦構造の密接な関係を指摘しており、図5でもその傾向が確かに確認できる。図6は、 $Re_\tau=1020$ における低速・高速の大規模構造の三次元可視化結果である⁽⁴²⁾。Abeら⁽²⁸⁾が低レイノルズ数のDNSにおいて指摘しているように、スパン方向に約 $1.3\sim 1.6\delta$ の間隔で低速の大規模構造が存在しており、大規模構造のスパン方向の間隔は、 δ でスケールされる傾

Fig. 5 Iso-surfaces of high- and low-speed regions of u' and the second invariant of deformation tensor $u'_i u'_j u'_k$ at $Re_\tau=1020$: $u'^+ > 3.5$, dark-gray; $u'^+ < -3.5$, light-gray; $u'_i u'_j u'_k < -0.03$, white. The box visualized here is $2550 \times 1020 \times 1275$ $(\nu/u_\tau)^3$ in the x , y and z directions, respectively. Direction of the mean flow is from bottom-left to top-right.

向が見受けられる。このように、大規模DNSを通じ、高レイノルズ数の乱流現象に対し、着実に新たな知見が蓄積されつつある。最近では、 $Re_\tau=2000$ を超えたDNSが³、Hoyas-Jiménez⁽²²⁾ ($Re_\tau=2003$),

Iwamoto ら⁽³⁵⁾ ($Re_\tau = 2320$) により実行されており、さらに高レイノルズ数の壁乱流の現象解析が進められている。

一方、レイノルズ数が低いうちから大規模構造が顕著に現れる流れに、クエット乱流がある。上記のポアズイユ乱流と同様に平行平板間の乱流であるが、他のカノニカルな系の乱流と比べて、主流方向に非常に長い大規模構造が存在することが報告されている^{(43)~(45)}。図7に流れ方向・スパン方向ともに、大規模構造をとらえるほど大きな計算領域を設定したDNSの瞬時場を示す⁽⁴⁶⁾。レイノルズ数は $Re_m = 4300$ ($Re_\tau = 126$)、計算領域は $L_x \times L_y \times L_z = 192\delta \times 2\delta \times 25.6\delta$ 、格子点数は $N_x \times N_y \times N_z = 2048 \times 96 \times 512$ である。クエット乱流ではポアズイユ乱流と異なり、チャンネル中心でも平均速度こう配が存在するため、大規模構造はチャンネル全幅 (2δ) にわたり、スパン方向

Fig. 6 Visualization of large-scale motions at $Re_\tau = 1020$. Light- and dark-gray are the iso-surfaces of high and low speed regions, respectively, normalized by rms of the velocity fluctuation at each height. Direction of the mean flow is from top-left to bottom-right.

Fig. 7 Iso-surfaces of high- and low-speed regions of u' in turbulent Couette flow at $Re_\tau = 126$: $u'^+ > 2.0$, light-gray; $u'^+ < -2.0$, dark-gray. Direction of the mean flow is from bottom-left to top-right.

に約 $4.2 \sim 5.0\delta$ の間隔で、低速・高速領域が交互に現れている。一方、主流方向の大規模構造の挙動については、ポアズイユ乱流においては十分に長いとみなせる計算領域でも、クエット乱流においては短すぎて、周期境界条件により構造が固定されてしまう(図7)。この点について、Tsukahara ら⁽⁴⁷⁾ は、主流方向に大規模構造の1波長をとらえるには、約 64δ 以上の計算領域を要することを指摘している。図7の瞬時場では、主流方向に3波長分の大規模構造をとらえており、大規模構造が空間的にランダムに存在しているようすが見てとれる。他方、クエット乱流の大規模な低速・高速領域の発生は、大規模な縦渦に関係していることが報告されている。最近では、Kitoh ら⁽⁴⁸⁾ の実験により、クエット乱流特有の大規模な渦構造の存在と、その自立的な維持機構が指摘されている。このようなクエット乱流特有の力学的機構の解明に対して、周期境界条件の影響が極めて小さくなるような、さらに大きな計算領域を用いたDNSが重要な解析手段となるものと考えている。

4. 今後の展開

平行平板間乱流では、現在までのところ、 $Re_\tau = 2000$ 程度 ($Re_m = 10^5$) までの大規模DNSが実行されており、各種乱流統計量、乱流構造に対して、レイノルズ数依存性やスケーリング則が議論されている。また、高レイノルズ数のDNSデータを用いた乱流モデルの開発(Yoshizawa ら⁽⁴⁹⁾)や、乱流制御に関する研究(Iwamoto ら⁽⁵⁰⁾)も行われており、大規模DNSは

Fig. 8 Instantaneous flow field of a channel flow obstructed by a rectangular rib at $Re_\tau = 80$. Iso-surfaces of low-speed regions of u' and the negative regions of the second invariant of deformation tensor are illustrated: $u'^+ < -2.0$, gray; $u'^+_2 u'^+_3 < -0.01$, white. The box visualized here is $51.2\delta \times 2\delta \times 12.8\delta$ in the x , y and z directions, respectively. Direction of the mean flow is from bottom-left to top-right.

高レイノルズ数の乱流研究において、重要なツールの一つとなりつつある。

他方、より複雑な形状の流れに対する DNS も実施されつつある。図 8 は、平行平板間ポアズイユ乱流内に、チャンネル全幅に達する高さの矩形形状リブが挿入されている場合の DNS の瞬時場である⁽⁵¹⁾。リブの前縁には、いわゆる馬蹄渦が見られ、後流には多くの渦構造がとらえられている。今後も、より複雑で、実際の要求に応じた流路形状の DNS が可能になってくることは間違いない。

一方、現在までに実行された DNS のレイノルズ数の範囲では、依然として結論付けられない問題も残されている。例えば、平均速度分布における対数則のカルマン定数である。著者らの DNS では、レイノルズ数が $Re_\tau = 1000$ に達しても、明確に一定値をとる領域は存在せず、引き続き変化し続けている。この点について、Österlund ら⁽⁵²⁾の乱流境界層の実験結果では、対数則が現れるには、 $Re_\tau \approx 3000$ 以上のレイノルズ数が必要であることを指摘している。したがって、平行平板間乱流における大規模 DNS の今後については、引き続きレイノルズ数を上げる傾向が続くものと考えられる。

また、高レイノルズ数における乱流構造の解析については、外層の大規模構造の大きさやその内層への影響が、大規模 DNS により報告されてきたものの、いまだその力学的機構に関する知見は乏しい状況である。低レイノルズ数の壁乱流の DNS では、壁面近傍のストリーク構造と縦渦構造の自己再生機構 (Hamilton ら⁽⁵³⁾) や、それに関連する周期解が見出されている (Kawahara-Kida⁽⁵⁴⁾, Toh-Itano⁽⁵⁵⁾) ことを考慮すると、高レイノルズ数においても、準秩序的な力学的機構が外層に存在しているか否かは、非常に興味深いところである。また、レイノルズ数が高くなるにつれて、内・外層がはっきりと分離されることから、対数領域に相当する中間層にどのような構造が存在するか、また、その際の内・外層の関係はどのようになっているかも興味深い。これらの課題に対し近い将来、高レイノルズ数の大規模 DNS を通じて、新たな知見が与えられることが期待される。

本報で紹介した著者らのグループの DNS の多くは、宇宙航空研究開発機構の数値シミュレータ III によった。また、東北大学情報シナジーセンター、九州大学情報基盤センターにおいても計算を実行した。本報の執筆に当たり、東京理科大学大学院の塚原隆裕君、川村英雄君にご協力をいただいた。

文 献

- (1) Orszag, S. A. and Patterson, G. S., *Physical Review Letters*, Vol. 28 (1972), pp. 76-79.
- (2) Rogallo, R. S., NASA TM-81315, (1981).
- (3) Spalart, P. R., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 187 (1988), pp. 61-98.
- (4) Kim, J. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177 (1987), pp. 133-166.
- (5) Eggels, J. G. M. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 268 (1994), pp. 175-209.
- (6) Choi, H. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255 (1993), pp. 503-539.
- (7) Le, H. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 330 (1997), pp. 349-374.
- (8) Rodi, W. and Mansour, N. N., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 250 (1993), pp. 509-529.
- (9) Nagano, Y. and Shimada, M., *Physics of Fluids*, Vol. 8 (1996), pp. 3379-3402.
- (10) Robinson, S. K., *Physics of Fluids*, Vol. 23 (1991), pp. 601-639.
- (11) Choi, H. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 262 (1994), pp. 75-110.
- (12) Nishino, K. and Kasagi, N., *Proceedings of the 7th Turbulent Shear Flows*, Vol. 2 (1989-8), pp. 22. 1. 1-22. 1. 6.
- (13) Antonia, R. A. et al., *Experimental Fluids*, Vol. 15 (1993), pp. 65-69.
- (14) DNS database website at the University of Tokyo, <http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/>
- (15) DNS database website at Tokyo University of Science, <http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/>
- (16) DNS database website at University of Illinois, <http://www.tam.uiuc.edu/Faculty/Moser/channel>
- (17) DNS database website at Universidad Politécnica de Madrid, <http://torroja.dmt.upm.es/ftp/channels>
- (18) DNS database website at ERCOFTAC, <http://ercoftac.mech.surrey.ac.uk/>
- (19) Moin, P. and Mahesh, K., *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30 (1998), pp. 539-578.
- (20) Top 500 supercomputer website, <http://www.top500.org/>
- (21) Kaneda, Y. et al., *Physics of Fluids*, Vol. 15 (2003), pp. L 21-L 24.
- (22) Hoyas, S. and Jiménez, J., *Physics of Fluids*, Vol. 18 (2006), 011702.
- (23) Moser, R. D. et al., *Physics of Fluids*, Vol. 11 (1999), pp. 943-945.
- (24) Abe, H. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 123 (2001), pp. 382-393.
- (25) Antonia, R. A. and Kim, J., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 276 (1994), pp. 61-80.
- (26) Jiménez, J., *Center for turbulence Research Annual Research Briefs*, (1998), pp. 137-154.
- (27) del Álamo, J. C. and Jiménez, J., *Physics of Fluids*, Vol. 15 (2003), pp. L 41-L 44.
- (28) Abe, H. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 126 (2004), pp. 835-843.
- (29) del Álamo, J. C. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 500 (2004), pp. 135-144.
- (30) Abe, H. et al., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25 (2004), pp. 404-419.
- (31) Satake, S. et al. (Veidenbaum, A. et al. eds.), In: *Lecture Notes in Computer Science 2858, High Perfor-*

- mance Computing, (2003), pp. 468-475, Springer-Verlag.
- (32) Iwamoto, K. et al., *Proceedings of the 5th Symposium on Smart Control of Turbulence*, (2004), pp. 119-125, Tokyo.
- (33) Kang, S.-J. et al., *Proceedings of the 4th Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1 (2005-6), pp. 183-188.
- (34) Ishihara, T. et al., *Kyoto Daigaku Suri Kaiseki Kenkyusho Kokyuroku* 1434, (2005), pp. 188-194 (in Japanese).
- (35) Iwamoto, K. et al., *Proceedings of the 6th Symposium on Smart Control of Turbulence*, (2005-3), pp. 327-333, Tokyo.
- (36) Wei, T. and Willmarth, W. W., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 204 (1989), pp. 57-95.
- (37) Abe, H. et al., *Proceedings of the 4th Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1 (2005-6), pp. 189-194.
- (38) Tsuji, T. et al., *Proceedings of the 4th Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1 (2005-6), pp. 27-32.
- (39) Abe, H. et al., *Proceedings of the 17th Symposium on Computational Fluid Dynamics*, (2003-12), A 3-2 (in Japanese).
- (40) Adrian, R. J. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 422 (2000), pp. 1-54.
- (41) Tanahashi, M. et al., *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25 (2004), pp. 331-340.
- (42) Abe, H. et al., *Proceedings of 2004 Annual Meeting, Japan Society of Fluid Mechanics*, (2004-8), pp. 398-399 (in Japanese).
- (43) Lee, M. J. and Kim, J., *Proceedings of the 8th Turbulent Shear Flows*, Vol. 1 (1991-9), pp. 5. 3. 1-5. 3. 6.
- (44) Tillmark, N., *Ph. D. Thesis, Department of Mechanics, Royal Institute of Technology*, (1995), Stockholm.
- (45) Komminaho, J. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 320 (1996), pp. 259-285.
- (46) Hane, S. et al., *Proceedings of 2005 Annual Meeting, Japan Society of Fluid Mechanics*, (2005-9), p. 147 (in Japanese).
- (47) Tsukahara, T., *Physics of Fluids*, Vol. 7 (2006), p. 019.
- (48) Kitoh, O. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 539 (2005), pp. 199-227.
- (49) Yoshizawa, A. et al., *Physics of Fluids*, Vol. 18 (2006), 035109.
- (50) Iwamoto, K. et al., *Physics of Fluids*, Vol. 17 (2005), 011702.
- (51) Kawamura, F. et al., *Proceedings of the Turbulence, Heat and Mass Transfer 5*, (2006-9), pp. 197-206.
- (52) Österlund, J. M. et al., *Physics of Fluids*, Vol. 12 (2000), pp. 1-4.
- (53) Hamilton, J. M. et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 287 (1995), pp. 317-348.
- (54) Kawahara, G. and Kida, S., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 449 (2001), pp. 291-300.
- (55) Toh, S. and Itano, T., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 481 (2003), pp. 67-76.