Japan Society of Fluid Mechanics

日本流体力学会年会 2003 講演論文集

B-315

Re_τ=1020 までの平行平板間乱流の DNS

Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow up to Re_τ=1020

○阿部浩幸（航技研），松尾裕一（航技研），河村洋（東理大理工）

Hiroyuki ABE*, Yuichi MATSUO* and Hiroshi KAWAMURA**
*CFD Technology Center, National Aerospace Laboratory of Japan, Tokyo 182-8522, Japan
**Dept. of Mech. Eng., Tokyo University of Science, Tokyo 278-8510, Japan

Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow has been carried out at two Reynolds numbers of 180 and 1020 based on the friction velocity and the channel half width. Reynolds-number dependence and scaling issue on the turbulence statistics are investigated. The effect of large-scale structures is also examined. It is found in the power spectra and instantaneous field that the effect of large-scale in the spanwise direction is appreciable even in the near-wall region for the higher Reynolds number.

1．はじめに

壁乱流における高レイノルズ数の乱流輸送現象を解明することは，乱流摩擦，騒音，熱伝達などを伴った機器において非常に重要である．このため，様々な研究が行われてきたが，なかでも，数値計算は，近年，計算機の性能の向上とともに急速に発展し，今では乱流現象を解明するための重要なツールのひとつとなっている．特に，支配方程式をモデル化せず可能な限り高精度に解く手法である直接数値シミュレーション(DNS)により，様々な乱流現象が再現されてきた．本研究の対象となる平行平板間乱流の DNS は，1987 年に Kim ら[1] により初めて行われた．その時のレイノルズ数は，壁面摩擦速度 u_τ及びチャネル半幅δに基づくレイノルズ数で$Re_\tau = u_\tau\nu/\delta$=180 であった．以降，この 15 年間で Re_τ=800 程度までの比較的高いレイノルズ数の DNS が実行され，低レイノルズ数の範囲でのレイノルズ数依存性が報告されてきた．しかし，これらの比較的高いレイノルズ数の DNS では計算負荷を低減させるために，小さな計算領域を使用したものが多く，この場合，レイノルズ数が高くなるにつれて顕著になるといわれる外層の大規模構造の影響をとらえることは難しい．一方，この外層の影響を考慮した比較的大きな計算領域を確保した DNS のレイノルズ数は Re_τ=640 までにとどまっていた．これは，3 次元計算においては所要格子数がレイノルズ数の 9/4 乗に比例して増加することに起因している．このような状況のもと，阿部ら[2]は，極力大きな計算領域を設定し，Wei & Willmarth[3]の実験のレイノルズ数に相当する Re_τ= 1020 までの平行平板間乱流の大規模 DNS を行った．本研究では，阿部ら[2]の Re_τ= 1020 までの DNS の計算をさらに進め，Re_τ= 1020 までのレイノルズ数の範囲での各種乱流統計量に対するレイノルズ数依存性及びスケーリング則を調べることを目的とする．

2．計算手法

流れ場には十分発達した無限に長い平行平板間乱流を想定した．設定されたレイノルズ数は Re_τ=180, 1020 である．計算アルゴリズムには，フラクショナルステップ法を用いた．時間進行は，壁垂直方向の粘性項に対しては，2 次精度クランクニコルソン法を，その他の項は低メモリー型 3 次精度ルンゲクッタ法を用いた．他方，空間的離散化の手法には，有限差分法を用いた．差分精度としては，流れ方向，スパン方向には Morinishi et al.[4] が提唱する 4 次精度中心差分を用い，壁垂直方向は 2 次精度で扱った．なお，収支量については，2 次精度で離散化し，計算を行った．計算手法の詳細については Abe et al.[5] に記した．

計算領域($L_x \times L_y \times L_z$)，所要格子数($N_x \times N_y \times N_z$)，空間解像度($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)等の計算条件を表 1 に示す．

Table 1 Computational condition.

Re_τ	180	1020
$L_x \times L_y \times L_z$	$12.8\delta \times \delta \times 6.4\delta$	$12.8\delta \times \delta \times 6.4\delta$
$L_x^+ \times L_y^+ \times L_z^+$	2304 × 180 × 1152	13056 × 2040 × 6528
$N_x \times N_y \times N_z$	384 × 128 × 256	2048 × 448 × 1536
Δx^+、Δz^+	6.00, 4.50	6.38, 4.25
Δy^+	0.20 ~ 5.90	0.15 ~ 7.32

3．結果及び考察

平均流速分布を図 1 に示す．図 1 には，Wei & Willmarth[3] の実験値，Abe et al.[2] の Re_τ=640 までの DNS の結果も比較のためプロットした．Re_τ=1020 の計算結果は，Wei & Willmarth [3] の実験値と比較的良く一致した．更に，レイノルズ数が高くなるにつれて，伴流領域がより顕著に表れた．他方，対数領域は，このレイノルズ数の範囲では，$y^+ > 40$, $y/\delta < 0.2$ の領域に成立する傾向が見受けられた．

乱流強度分布を図 2, 3 に示す．Re_τ=1020 の計算結果は，u 成分のピーク値及び v 成分の壁面近傍の値を除き，Wei & Willmarth [3] の実験値と比較的良く一致した．レイノルズ数依存性は各成分の値に見受けられ，壁面近傍では，特に w 成分の値の上昇が顕著である．また，u 成分のピーク値はレイノルズ数の増加とともに僅かに上昇した．他方，スケーリング則に関しては，内層のスケーリングは，u 成分は壁面のごく近傍のみでスケーリングされ，v, w 成分はチャネル全体を通じてスケーリングされない傾向が見受けられた．一方，外層のスケーリングは，u_τをスケーリングパラメータに選ぶと，Re_τ=1020 の場合，u 成分は $0.2 < y/\delta < 0.8$ で若干大きな値を示すものの，$y/\delta > 0.8$ でスケーリングされる傾向が見受けられる (図 3)．また，ここでは示していないが，v, w 成分はそれぞれ $y/\delta > 0.5$, $y/\delta > 0.2$ でスケーリングされる傾向が見受けられた．

レイノルズ応力の再分配項の分布を図 4 に示す．各成分にレイノルズ数依存性が見受けられ，Re_τ=1020 に達しても，再分配機構は依然として活発化する傾向が見受けられる．また，圧力ひずみ相関項においては，レイノルズ数が高くなると，v 成分は $y^+ < 14$ のスプラッティングが現れる部分で主なレイノルズ数依存性見受けられるが，w 成分は $y^+ = 80$ 程度までレイノルズ数の増加とともに値が上昇している．従って，図 2 に見た壁面近傍の w 成分の乱流強度分布のレイノルズ数依存性は，再分配機構による影響が強いものと考えられる．

壁面近傍における大規模構造の影響を調べるために，図 5 に $y^+ = 10$ における流れ方向の速度変動 u のスパン方向の 1 次元パワースペクトルの分布を示す．図 5 には，Abe & Kawamura[6] による計算領域が今回の計算と同じ Re_τ=640 までの DNS の結果も比較のためプロットした．レイノルズ数が高くなるにつれて，低波数のピークが顕著になり，Re_τ=1020 の場合では，$k_z\delta < 10$ で大きなピークが現れている．ここで，Re_τ=1020 の $k_z\delta < 10$ のスペ

NII-Electronic Library Service

クトルを積分すると，全体のエネルギーの約 16%にも達する．この結果は，高いレイノルズ数の場合は，壁面近傍でも大規模なスケールがより支配的になることを示している．

図6に Re_τ= 1020 の瞬時の u' の低速，高速領域の分布を示す．なお，可視化領域は全計算領域の 1/8 の領域とした． Re_τ= 1020 の場合，壁面近傍には，スパン方向に約 100 粘性長さの平均間隔を有したストリーク構造が確かに見られるが，ストリークが密集して，大規模な構造を呈す傾向が見受けられた．

4．まとめ

Re_τ= 1020 までの平行平板間乱流の DNS を行い，各種乱流統計量に対するレイノルズ数依存性及びスケーリング則を検討した．速度変動は，Re_τ= 1020 に達しても，依然としてレイノルズ数依存性が見受けられ，再分配機構も活発化する傾向が見受けられた．また，壁面近傍のスパン方向の 1 次元パワースペクトルにおいては，低波数のピークがレイノルズ数の増加とともに顕著になり，Re_τ= 1020 の場合は，壁面近傍でも大規模なスケールが支配的であることが分かった．さらに，瞬時場においては，Re_τ= 1020 の場合，壁面近傍にも大規模なストリーク構造が存在することが，より明確に見受けられた．

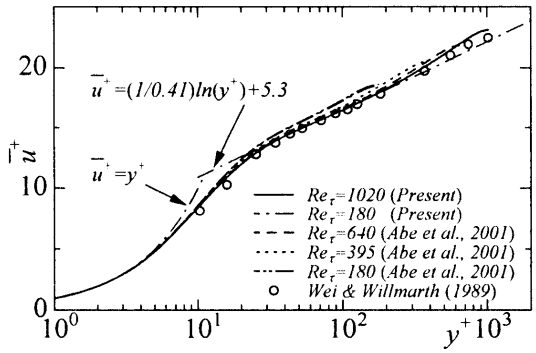

Fig.1 Mean velocity distribution.

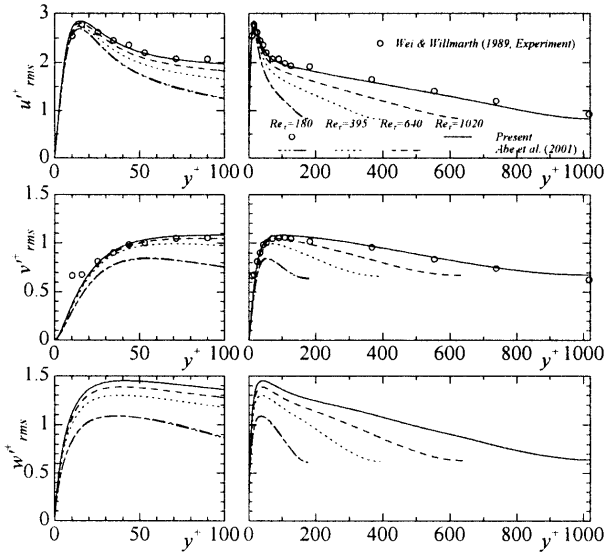

Fig.2 Rms of velocity fluctuations.

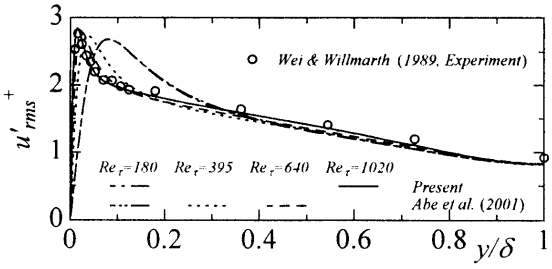

Fig.3 Rms of streamwise velocity fluctuations scaled with δ.

5．謝辞

本研究の計算は，航空宇宙技術研究所の数値シミュレータIIIを用いて行った．記して謝意を表す．

引用文献

1) J.Kim, P.Moin & R.Moser: J. Fluid Mech. **177** (1987) 133.
2) 阿部，松尾，河村: 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2003 (2003) 22.
3) T.Wei & W.W.Willmarth J. Fluid Mech. **204** (1989) 57.
4) Y.Morinishi, T.S.Lund, O.V.Vasilyev & P.Moin: J. Comp. Phys. **143** (1998) 90.
5) H.Abe, H.Kawamura & Y.Matsuo: Trans. ASME J. Fluids Eng. **123** (2001) 382.
6) H.Abe & H.Kawamura: Proc. of 9th European Turbulence Conference (2002) 399.

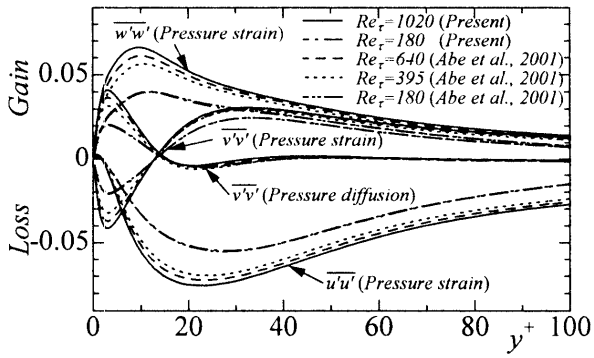

Fig.4 Redistribution terms of Reynolds normal stresses.

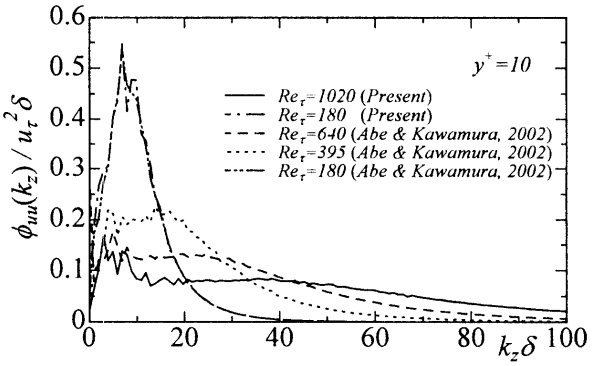

Fig.5 Spanwise wavenumber power spectra of u'^+ at y^+=10.

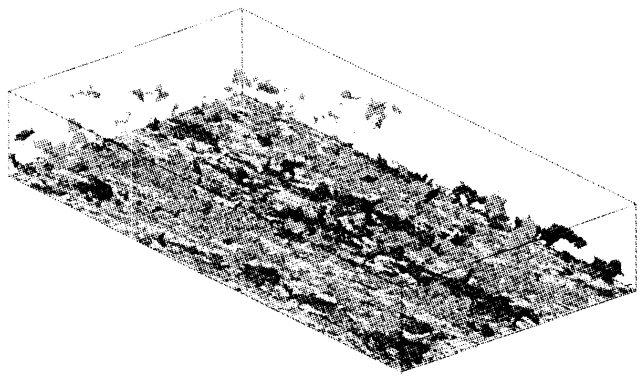

Fig.6 Iso-surfaces of the streamwise velocity fluctuations u'^+ for Re_τ=1020: $u'^+ > 3.5$; dark-gray, $u'^+ < -3.5$; light-gray. The box visualized here is $6.4\delta \times \delta \times 3.2\delta$ in the x, y and z directions, that is, $6528 \times 1020 \times 3264$ $(\nu/u_\tau)^3$. Direction of the mean flow is from top-left to bottom-right.

NII-Electronic Library Service