

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05790

研究課題名(和文) エクサスケールを視野に入れた超大規模DNSに基づく高レイノルズ数組織乱流構造解析

研究課題名(英文) Study on high-Reynolds number effects on wall-turbulence by means of the world's largest Direct Numerical Simulation

研究代表者

山本 義暢 (YAMAMOTO, Yoshinobu)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：40377809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：各種工学分野で重要となる乱流輸送現象の解明を目的として、壁面乱流場の直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)コード開発を実施した。開発コードはスーパーコンピュータ上で70Tflop/sの実行演算速度を実現した。本DNSコードを用いて、摩擦レイノルズ数とチャンネル半値幅に基づくレイノルズ数8000(世界最大レイノルズ数)におけるDNSデータベースの構築に成功するとともにそのデータベースをWeb上に公開した。得られたデータベースは、レイノルズ応力の対数則分布を数値的に初めて再現できており、高レイノルズ数乱流輸送現象の解明に大きく寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Direct numerical simulations of turbulent channel flows up to $Re_{\tau} = 8000$ were carried out by means of the high-order accuracy finite difference method. Our DNS code achieved the high-effective computational performance corresponded to 70 TFlop/s at 2048 nodes on the Earth Simulator. It is notable that the logarithmic variations both in the mean velocity, and the streamwise Reynolds stress, are firstly confirmed for $Re_{\tau} = 8000$. Present DNS database were published on the Web to analysis high-Reynolds number effects on wall-turbulence.

研究分野：数値流体力学

キーワード：高レイノルズ数 乱流輸送現象 直接数値計算 乱流モデリング

1. 研究開始当初の背景

工学及び自然界の流れの大半は乱流であり、乱流による抵抗や輸送現象の解明及び高精度予測は各種工学機器の設計・高度化、エネルギー効率の効率化、さらには大気境界層スケールにおける物質拡散予測に至るまで、極めて重要となっている。この乱流輸送現象において特に近年、工学実規模及び大気境界層規模の非常に高いレイノルズ数 (Re: レイノルズ数= Uh/ν , U : 代表速度, h : 境界層厚, ν : 流体の動粘性係数) 領域で出現する、壁面乱流場の大規模構造 [1] に注目が集まっている。この大規模構造の影響により境界層中の平均速度分布のみならず、運動量やエネルギー輸送にも大きな影響を与えることが指摘されており [2], [3], 大規模構造の特性こそが、壁面乱流場における高レイノルズ数効果の主因と考えられている。従って工学実規模の乱流輸送現象の解明・制御においては大規模構造の定量的把握が不可欠である。つまり大規模構造に由来する高レイノルズ数効果の解明が極めて重要であることを示している。

2. 研究の目的

乱流による抵抗や輸送効果の解明及び高精度化は、機械工学流体工学上はもちろん、熱工学・乱流熱伝達さらには環境工学といった広範囲な工学分野において重要な課題である。この工学実規模の高レイノルズ数領域においては、組織乱流構造に基づく大規模構造の存在が指摘されており、高精度予測(乱流モデリング)及び乱流制御における key issue となっている。本研究課題においては、高レイノルズ数乱流場における大規模構造の理解を目的とし、その最有力手法である直接数値計算手法によるデータベース化及び定量化を試みる。得られた基礎知見は乱流モデリングに集約させ、応用上の効果も十分に担保する。

3. 研究の方法

非常数 3 次元の組織乱流構造の解明においては、流体運動を支配する Navier-Stokes 式をコンピュータ上で数値的に解く直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)が最も有力な手法である。しかし DNS においては計算負荷が高く、本研究で対象とする工学実規模の高レイノルズ数領域を対象とすることが問題となる。そこで本研究では、世界最大レイノルズ数を対象とした壁面乱流場の DNS データベース構築を目的とした DNS コード開発と開発コードを用いたデータベース構築及び乱流統計解析を実施した。

4. 研究成果

(1) DNS コード開発

・計算対象と支配方程式

対象とする流れ場は、図 1 に示す圧力勾配一定により駆動される十分に発達した 2 次元チャンネル乱流場である。流れ場の基礎方程式は非圧縮性流体の Navier-Stokes 式及び連続式とする。

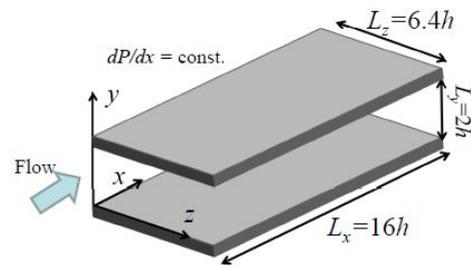


図 1 チャンネル流の計算領域と座標系

・計算手法及びアルゴリズム

今回主に使用した DNS コードは差分法に基づくものであり、空間離散化手法は主流(x)及びスパン方向(z)に 10 次精度中心差分法 [4], 壁垂直方向(y)に 2 次精度の中心差分法を適用した。圧力場のポアソン方程式は、主流(x)及びスパン方向(z)への 2 次元高速フーリエ変換(2D-FFT)と壁垂直方向(y)への 3 重対角行列解法(Tri-Diagonal Matrix Algorithm, TDMA)による直接解法を使用した。時間積分は Fractional Step 法に基づき、圧力勾配項に Euler 陰解法、その他の項に 2 次精度の Adams-Bashforth 法を用いた。境界条件は主流及びスパン方向に周期境界条件、壁面で no-slip 条件を課した。

・DNS コードの並列化

本 DNS コードにおいては、MPI(Message Passing Interface)を用いた壁垂直方向への 1 次元領域分割を適用した。この場合、壁垂直方向の TDMA 演算時には、並列性を確保するために領域分割軸の変更を行うのが一般的である。しかしこの分割軸の変更は all-to-all 通信となるため通信負荷が高く、実行効率の低下をもたらす。そこで本研究では TDMA 演算時の all-to-all 通信の代替を検討した。具体的には、TDMA における前進代入計算及び後方消去計算を逐次演算に代替した。しかしこの場合は並列性がゼロとなるが、TDMA は図 2 に示すように水平方向には独立であることから、図 3 のようにオーバーラップさせることにより、並列性を確保した。

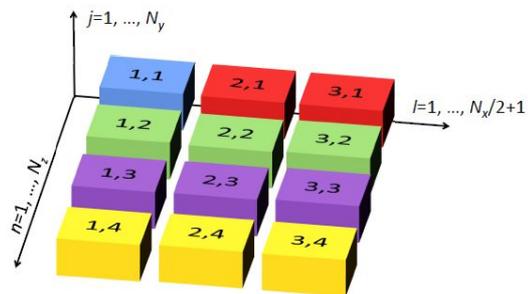


図 2 j 方向への TDMA (3 x 4 x N_y 格子の場合)

開発コードを用いて、摩擦速度(u_τ)とチャンネル半値幅(h)に基づくレイノルズ数: $Re_\tau=4000$ (5760×2048×3072 格子)を対象とした性能評価を実施した。使用した計算機システムは東北大学サイバーサイエンスセンタ

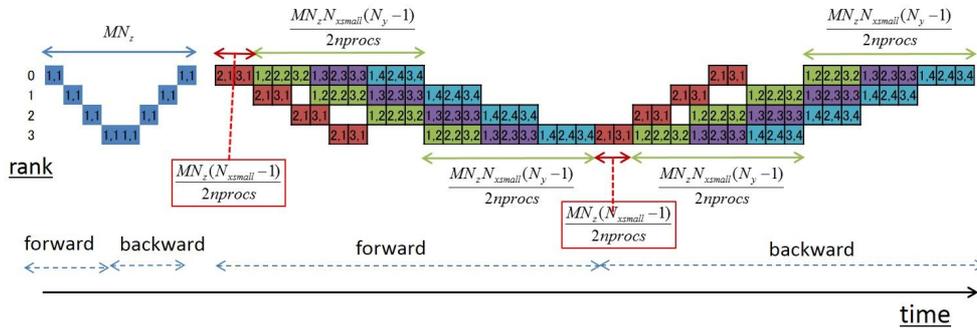


図3 TDMA のオーバーラップ化 (4 並列の場合)

におけるベクトル並列計算機 NEC SX-ACE である．実行演算速度の比較を図 4 に示す．ここで， shift で示した結果が all-to-all を用いた場合であり， all-to-all で示した結果が，shift 通信に基づく新手法の場合である．all-to-all 通信を shift 通信（及びオーバーラップ化）に代替することにより，全ての条件で，実行効率の向上が確認できており，SX-ACE/512 ノードにおいて実行演算速度：19.3[Tflop/s]，実行効率：14.8%の高速演算を可能としている．また表 1 に世界最大レイノルズ数条件である $Re_\tau=8000$ (8640×4096×6144 格子)における SX-ACE/1024 ノード時の比較を示す(メモリ量の制約により，本条件では 1024 ノードが最低実行条件)．本条件においても shift 通信に代替することにより高速化が図れており，実行演算速度：36[Tflop/s]，実行効率:14%の結果が得られている．さらに海洋研究開発機構の地球シミュレータ(SX-ACE/2048 ノード)を利用した場合，実行演算速度:70[Tflop/s]，実行効率:13.4%を達成し，高速・高効率 DNS コード開発に成功した．

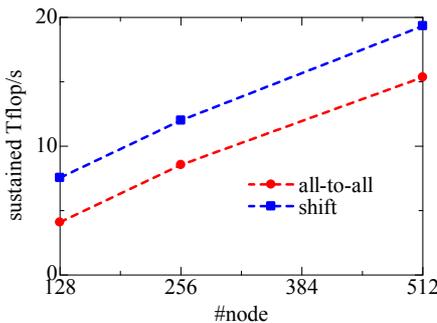


図 4 all-to-all 通信手法と新手法(shift+overlapped 手法)における実行演算速度の比較(SX-ACE/128, 256, 512 ノードを使用)

表 1 8640x4096x6144 格子(100 ステップの時間積分)における計測結果

	#nodes	Elapse [s]	R_{\max} [Tflop/s]	R_{\max}/R_{peak}
alltoall	1024	972.62	24.36	9.3%
shift	1024	659.55	36.33	13.9%

R_{\max} : effective performance,
 R_{peak} : theatrical performance

(2) 世界最大レイノルズ数 DNS データベース

の構築

表 2 構築した DNS データベース

Re_τ	L_x /h	L_y /h	L_z /h	Δx^+	Δy^+	Δz^+	T^+ / Re_τ
1000	16	2	6.4	11.1	0.3-8.0	8.3	12.0
2000	16	2	6.4	11.1	0.3-8.0	8.3	10.0
4000	16	2	6.4	11.1	0.3-8.0	8.3	9.0
8000	16	2	6.4	14.8	0.3-8.0	8.3	6.3

開発コードを用いて，世界最大レイノルズ数： $Re_\tau=8000$ を対象とした DNS データベース構築を行った．またレイノルズ数効果を検討するために， $Re_\tau=1000, 2000, 4000$ のケースも併せて実施した．本計算条件を表 2 に示す．ここに， $L_x(\Delta x^+)$, $L_y(\Delta y^+)$, $L_z(\Delta z^+)$ は主流，壁垂直，スパン方向への計算領域(格子分解能)， T は統計量を得るために行った時間積分長である．なお上付き添え字 + は動粘性係数と摩擦速度により無次元化された値であることを示す

対象とする発達チャンネル乱流場においては，全せん断応力は式(1)の左辺の通りの直線分布を示す．

$$1 - \frac{y^+}{Re_\tau} = -\overline{u^+v^+} + \frac{dU^+}{dy^+} \quad (1)$$

ここに $-\overline{u^+v^+}$ はレイノルズ応力， dU^+/dy^+ は粘性応力を示す．図 5 上部に $Re_\tau=8000$ における全せん断応力の分布を示す．これにより，理論通りの直線分布を示していることがわかる．さらにこの DNS の収束性を詳細に評価する方法として，理論式(1)の左辺からの誤差を式(2)により評価する方法が提案されている [5]．

$$E_R(y^+) = 1 - \frac{y^+}{Re_\tau} + \overline{u^+v^+} - \frac{dU^+}{dy^+} \quad (2)$$

全ケースにおける式(2)の値を図 5 に示す．また参考のため， $Re_\tau=5200$ の Lee & Moser の結果 [6]を併記している． Re_τ の増加により，誤差はやや大きくなるものの，Lee & Moser の結果 [6]と同程度の誤差に収束していることが確認できる．以上により DNS データベースの収束性を確認するとともに，DNS データ

ベースの構築に成功したと判断した。

また図6に本DNSデータベースにおける主流方向乱流強度分布と実験値 [7]との比較を示す。両者は定量的に一致し、本データベースが十分な精度を有することを確認できた。なおこれらのDNSデータベースはWeb上 ([http://www.me.yamashi.ac.jp/lab/yamamoto/DNS2](http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/yamamoto/DNS2)) にて公開を行っている。

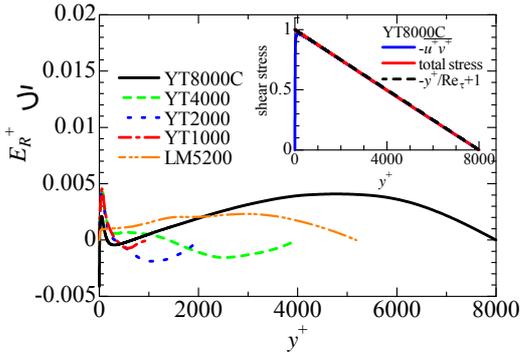


図5 せん断応力収支の誤差

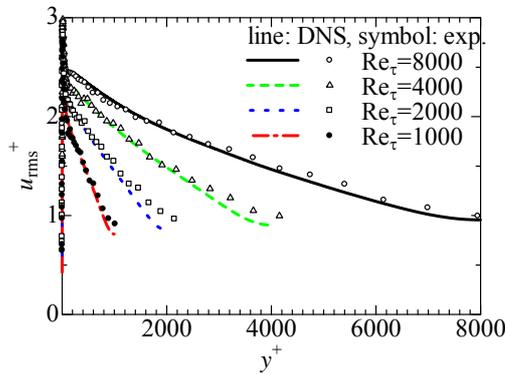


図6 主流方向乱流強度分布の比較 (DNS 及び実験値 [7])

(3)DNS データベースを用いた乱流統計解析
壁面乱流場における高レイノルズ数効果として内層と外層のオーバーラップにより主流方向平均速度が式(3)の対数則分布を示すことが指摘されている [8]。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (3)$$

ここに、 U は主流方向平均速度、 y は壁からの距離、 κ はカルマン定数、 B は定数である。本DNSデータベースにおいて、対数領域を確認するために、式(3)を y 方向に微分し、 y をかけた値 ($\beta=1/\kappa$) を図7に示す。式(3)より β が一定値を示す壁面高が対数領域となる。 $Re_\tau=4000$ 以上において、一定領域の存在が確認できるとともに、レイノルズ数が増加するとともにその領域は大きくなることわかる。またカルマン定数(κ)は尾及び 0.38 程度の値を示しているが、レイノルズ数の増加に伴い微増している。

さらに Townsend [9] 及び Perry et al. [10] は乱流の自己相似性及び Attached Eddy 仮説に基づき、十分に高いレイノルズ数領域では、

主流方向レイノルズ応力: $\overline{u^+u^+}$ が式(4)の対数分布を示すことを予測している。

$$\overline{u^+u^+} = B_1 - A_1 \ln(y/h) \quad (4)$$

ここに A_1 及び B_1 は定数、 h は境界層厚(チャンネル半値幅)を示す。

同様に式(4)を y 方向に微分し、 y をかけた値 ($=1/A_1$) を図8に示す。これまでの $Re_\tau=5200$ [6] 以下のDNS結果においては、 $1/A_1$ が一定値を示す領域(対数領域)が存在しないのに対し、 $Re_\tau=8000$ のケースでは対数領域の存在を確認することができる。このときの A_1 の値は 1.65 となる。以上のように、本研究では現時点において世界最大レイノルズ数である $Re_\tau=8000$ のDNSを行うことにより、理論的に予測されていた主流方向レイノルズ応力の対数則分布を数値的に初めて確認することに成功した。

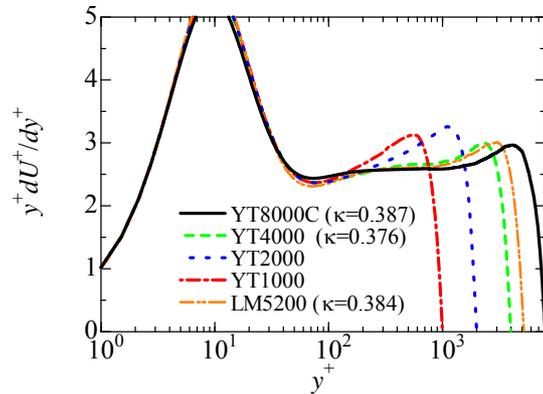


図7 主流方向平均速度分布における対数領域の検証

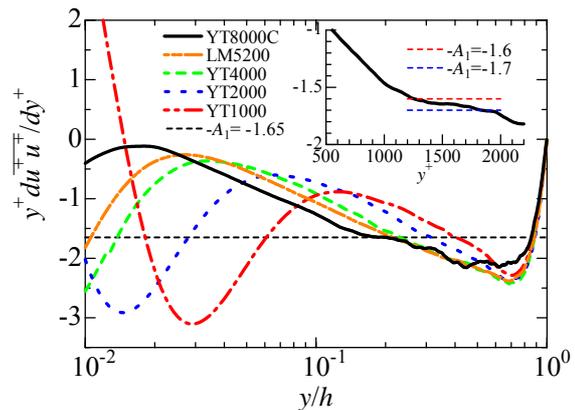


図8 主流方向レイノルズ応力における対数領域の検証

一方、実験的手法においては、 $Re_\tau > 20000$ において、円管流の場合 $A_1=1.25$ [11]、境界層流においては $A_1=1.26$ [12] が報告されており、本研究における $A_1=1.65$ との差異が生じている。また実験的手法においては、平均速度分布と主流方向レイノルズ応力の対数則分布はほぼ同一の壁面高(y)において出現することが指摘されているが、本DNS結果においては、

平均速度分布の対数領域： $300 < y^+ < 1100$ ，レイノルズ応力の対数領域： $1,200 < y^+ < 2,000$ となっており，両者の壁面高は一致しない．この原因としては，本 DNS と実験におけるレイノルズ数の違いが要因の一つと考えられる．但し，レイノルズ応力の対数則分布の理論背景となっているスペクトル分布における k_x^{-1} 乗則 [10]は図9に示すように確認できていない．ここに k_x は主流方向への波数を示す．さらにレイノルズ応力分布における Attached Eddy 仮説においては，壁面近傍における修正モデル [13]が提案されており，本 DNS 結果はこの修正モデルとの整合性が高いように思われる．本特性は壁面乱流場における高レイノルズ数効果の代表例であるとともに，工学的に重要となる壁面せん断応力（壁面摩擦抵抗）への影響も極めて大きいことより，今後詳細な検討が必要と思われる．

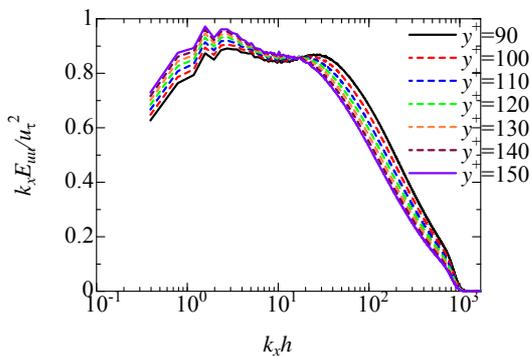


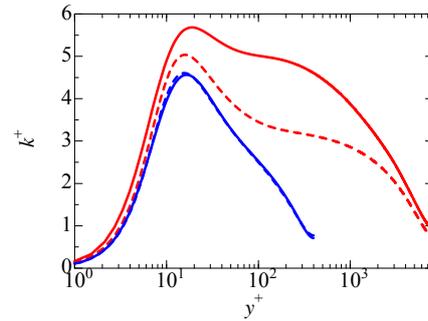
図9 主流方向乱流成分のスペクトル分布（波数を掛けたスペクトル分布：一定値部分が k_x^{-1} 乗則成立部分に相当）

(4) 乱流モデリングへの応用

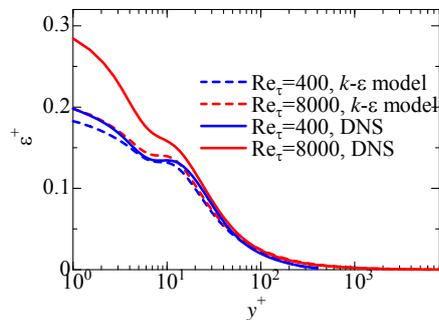
工学的な乱流解析においては，直接数値計算(DNS)の適用は困難であり，RANS あるいは LES といった乱流モデルが適用される．本研究ではRANSにおいて重要となる乱流エネルギー及び乱流散逸率のデータ解析を実施した．本 DNS データベースと低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデル [14]との比較を図10に示す．従来の低いレイノルズ数($Re_{\tau}=400$)程度の DNS データベースにより開発及び最適化された乱流モデルは， $Re_{\tau}=400$ の場合は，ほぼ完全に一致するのに対し， $Re_{\tau}=8000$ の場合は，定性的にも一致せず，高レイノルズ数効果を適切に反映できていないことがわかる．

一方，LES(Smagorinsky モデル)においても，低レイノルズ数の DNS データにより最適化されたモデルパラメータ(C_s : Smagorinsky 定数=0.1 [15])を高レイノルズ数条件($Re_{\tau}=1000$)に適用した場合は，平均速度分布の過小評価となるだけでなく，乱流構造(スペクトル分布)においても予測精度劣化をもたらすことが確認された(図11参照)．本 DNS データベースを用いた Smagorinsky 定数の最適値は， $Re_{\tau}=1000$ において 0.155 となり，本最適値を用いることにより，平均速度及びスペクトル分布の定量的予測が可能となる(図12参照)．

しかし，Smagorinsky 定数の最適値はレイノルズ数及び格子分解能の違いにより変化することが判明しており，この要因解明とレイノルズ数極限の高レイノルズ数条件での最適値予測が今後重要になると考えられる．

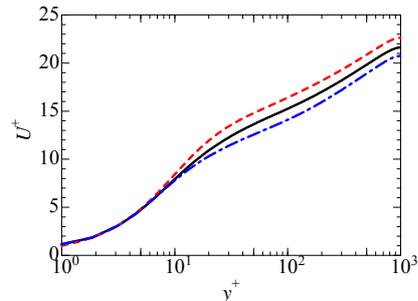


(1) 乱流エネルギー



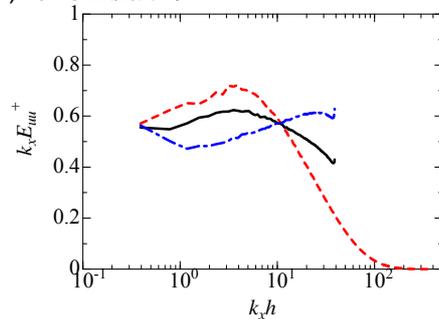
(2) 乱流散逸率

図10 低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデル [14]の予測精度(DNS との比較， $Re_{\tau}=400, 8000$)



$Re_{\tau}=1000$
 — LES (SM) $\Delta x^+=80, \Delta y^+=1.6-16.0, \Delta z^+=20$
 - - noSGS $\Delta x^+=80, \Delta y^+=1.6-16.0, \Delta z^+=20$
 - - DNS $\Delta x^+=12, \Delta y^+=0.6-8.0, \Delta z^+=6.7$

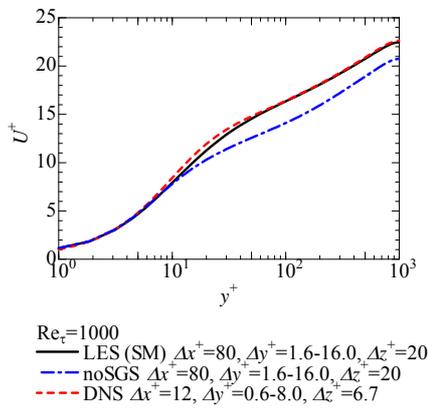
(1) 平均速度分布



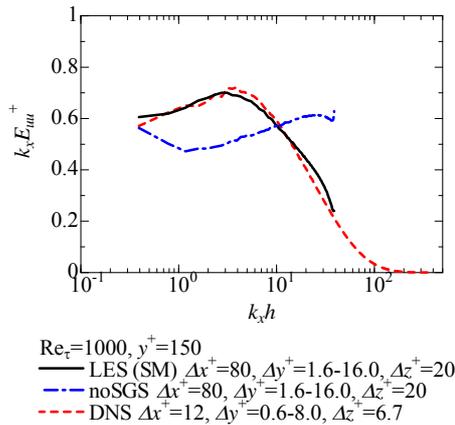
$Re_{\tau}=1000, y^+=150$
 — LES (SM) $\Delta x^+=80, \Delta y^+=1.6-16.0, \Delta z^+=20$
 - - noSGS $\Delta x^+=80, \Delta y^+=1.6-16.0, \Delta z^+=20$
 - - DNS $\Delta x^+=12, \Delta y^+=0.6-8.0, \Delta z^+=6.7$

(2) スペクトル分布

図11 LESの予測精度： $C_s=0.1$ [15]の場合



(1) 平均速度分布



(2) スペクトル分布

図 12 LES の予測精度: $C_s=0.155$ (本研究による最適値)の場合

引用文献 [1] Kim & Adrian, Phys Fluids, vol. 11, no. 2, pp. 417-422, 1999. [2] DeGraaff & Eaton, J. Fluid Mech., 422,319-346, 2000. [3] Metzger & Klewicki, Phys. Fluid, 13(3), 692-701, 2001. [4] Morinishi, et al., J. Comput. Phys, 143(1), 90-124, 1998. [5] Thompson, et al., Comput. Fluids, 130, 1-7, 2016. [6] Lee & Moser, J. Fluid Mech., 774, pp. 395-415, 2015. [7] Furuichi, et al., Phys. Fluids, 27(9), 095108, 2015. [8] Millikan, Proc. 5th Int. Congress on Applied Mechanics (Cambridge, MA), 1938. [9] Townsend, The Structure of Turbulent Shear Flow, (Cambridge University Press, Cambridge), 1980. [10] Perry, et al., J. Fluid Mech., 165, 163-199, 1986. [11] Hultmark, et al., Phys. Rev. Lett., 108(9), 094501, 2012. [12] Marusic, et al. J. Fluid Mech., 716, R3, 2013. [13] Agostini & Leschziner, Phys. Rev. Fluids, 2(1), 014603, 2017. [14] Nagano & Shimada, JSME Int. J. Ser.B, 38(1), no. 1, 51-59, 1995. [15] Deardorff, J. Fluid Mech., 41(2), 453-480, 1970.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件) 全件査読有

A. Mehrez, Y. Yamamoto, and Y. Tsuji, Reynolds number dependency of turbulent

structures associated with amplitude wall pressure peaks in channel flow, *Fluid Dynamic Research* (2018), in press, DOI: 10.1088/1873-7005/aabfa9.

Y. Yamamoto and T. Kunugi, Direct numerical simulation of liquid metal free-surface turbulent flows imposed on wall-normal magnetic field, *Fusion Engineering and Design* (2018), in press, DOI:10.1016/j.fusengdes.2018.04.041

Y. Yamamoto and Y. Tsuji, Numerical evidence of logarithmic regions in channel flow at $Re_\tau=8000$, *Physical Review Fluids* (2018), Vol.3, 012602(R), DOI: 10.1103/PhysRevFluids.3.012602.

Y. Yamamoto, N. Osawa, and T. Kunugi, A new RANS model for turbulent channel flow imposed wall-normal magnetic field with heat transfer, *Fusion Science and Technology* (2017), Vol.72, pp.601-608, DOI:10.1080/15361055.2017.1350475.

Y. Yamamoto and T. Kunugi, MHD effects on turbulent dissipation process in channel flows with an imposed wall-normal magnetic field, *Fusion Engineering and Design* (2016), Vol.109-110, pp.1137-1142, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.01.003.

Y. Yamamoto and T. Kunugi, Modeling of MHD turbulent heat transfer in channel flows imposed wall-normal magnetic fields under the various Prandtl number fluids, *Fusion Engineering and Design* (2016), Vol. 109-111, pp.1130-1136, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.01.004

〔学会発表〕(計 13 件)

— Y. Yamamoto, R. Egawa, Y. Isobe, and Y. Tsuji, The world's largest direct numerical simulation of turbulent channel flow, 27th Workshop on Sustained Simulation Performance, Sendai, Japan, 2018.3.23.(招待講演)

— 山本義暢, 辻義之, 高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模構造の内層への寄与, 京都大学数理解析研究所共同研究非一様乱流の数値, 2017.7.28(招待講演).

他査読付国際会議 2 件, 口頭発表 9 件

〔その他〕

DNS database:

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/yamamoto/DNS2>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 義暢 (YAMAMOTO, Yoshinobu)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号: 40377809

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし