

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03923

研究課題名(和文)世界最大Re数DNSデータベースを用いた乱流輸送現象解明と乱流モデリングへの応用

研究課題名(英文)The world's largest Direct Numerical Simulation of turbulent channel flows and its application of modeling

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：壁面乱流場における高レイノルズ数効果の解明を目的として、チャンネル乱流場を対象として、スペクトル法に基づく高精度直接数値計算(DNS)を実施した。十分に長い時間積分を行うことにより、摩擦レイノルズ数(Re<sub>tau</sub>)8000までの平均速度、レイノルズ応力、乱流エネルギー及びその散逸率の輸送方程式に関するデータベースを構築した。

本レイノルズ数の範囲では、対数領域における局所平衡は確認できず、乱流エネルギー生成が乱流散逸率を上回っていることを確認した。しかし乱流散逸率自体は顕著な等方化傾向が存在することが確認できた。

さらにスーパーコンピュータ富岳上における百万並列規模のDNSコードを開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工学的に重要な壁面に沿って流れる乱流場(壁面乱流場)における高レイノルズ数効果の解明において重要となる直接数値計算(DNS)データベースの構築に成功した。対象とするレイノルズ数条件は摩擦速度に基づくレイノルズ数(Re<sub>tau</sub>)で8000に達し、現時点で世界最大レイノルズ数条件に相当する。本DNSデータベースを解析することにより乱流モデリングや乱流制御に必要な高レイノルズ数乱流理論の検証が促進されることが期待できる。

さらに理化学研究所の富岳上における数百万並列規模のDNSコード開発に成功し、世界最速の演算速度を確認し、Re<sub>tau</sub>=16000規模への拡張を可能とした。

研究成果の概要(英文)：The high-resolution Direct Numerical Simulation (DNS) database of a fully-developed channel flow up to the friction Reynolds number 8000 are established by means of a hybrid Fourier-spectral method in the wall-parallel directions and a second-order accurate finite-difference method in the wall-normal direction. Turbulent kinetic energy production rate is exceeded to the turbulent dissipation rate at the logarithmic regions in the mean velocity profiles in all Reynolds number range. However, remarkable isotropic tendency of the turbulent dissipation rate is confirmed.

Furthermore, we succeeded to the develop the world's fastest DNS (Direct Numerical Simulation) code for the world's largest friction Reynolds number 16000 on Super Computer Fugaku at RIKEN.

研究分野：流体工学

キーワード：高レイノルズ数効果 壁面乱流場 直接数値計算 DNSデータベース 乱流理論 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 $O(10^3)$ 以上の高レイノルズ数 (ここに、 $Re_\tau = u_\tau h/\nu$ , 摩擦速度: $u_\tau$ と境界層厚: $h$ に基づくレイノルズ数,  $\nu$ は動粘性係数)の乱流状態であり, 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, エネルギー効率の高効率化, 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、 $Re_\tau > 10^3$ から出現する壁面乱流場の高レイノルズ数特性とその理論的解釈が注目を集めている. 一方乱流モデリングにおいて重要となる高レイノルズ数乱流理論においては $Re_\tau \rightarrow \infty$ の極限状態を仮定しており、 $O(10^3-10^4)$ 規模のレイノルズ数域で観察されるレイノルズ数効果との差異の解釈が重要となっている.

2. 研究の目的

本研究では、壁面乱流場における  $Re$  数極限の特性として考慮されてきた高レイノルズ数効果を  $Re_\tau = O(10^4)$ 規模の DNS データにより検証可能か?あるいは  $Re$  数極限への漸近挙動を見出すことが可能か?という観点により考察を行い、その高レイノルズ数効果の解明に寄与することを主目的とする。また得られた知見に基づき、乱流モデルの評価及び高精度化を実施する。

3. 研究の方法

高レイノルズ数効果を検討するためにチャンネル流 (壁面乱流場のカノニカル流) における世界最大  $Re_\tau$ 条件(=8000)における高精度 DNS データベースを構築しこれを使用する。DNS データにおいては乱流理論及びモデリング検証において不可欠となる高次微分項に関する十分な精度を有する必要があり、スペクトル法をベースとした DNS コードを開発する。

高レイノルズ数特性としては、乱流モデリングでも前提となる平均速度分布の対数則分布 [1]、乱流エネルギー生成率とその散逸率の局所平衡効果 [2]を検討する。また  $Re$  数極限の特性としては線形応答理論 [3]を壁面乱流場へ拡張しその状態を推測する。

4. 研究成果

(1)世界最大  $Re$  条件での DNS データベースの構築

表 1 DNS データベース

CASE	$Re_\tau$	$N_x$	$N_y$	$N_z$	$\Delta x^+$	$\Delta y^+$	$\Delta z^+$	$T^+ / Re_\tau$
YT125	125	128	128	128	15.6	0.3-4.0	6.3	20.0
YT250	250	256	256	192	15.6	0.3-4.0	6.3	18.1
YT500	500	500	384	384	16.0	0.4-5.3	8.3	13.1
YT1000	1000	1000	512	768	16.0	0.6-8.0	8.3	12.0
YT2000	2000	2000	1024	1536	16.0	0.6-8.0	8.3	10.0
YT4000	4000	4000	2048	3072	16.0	0.6-8.0	8.3	14.5
YTC8000	8000	6912	4096	5760	18.5	0.6-8.0	8.9	7.5

Here,  $Re_\tau = u_\tau h/\nu$ : friction Reynolds number.  $u_\tau$ : friction velocity,  $h$ : channel half width,  $\nu$ : kinematic viscosity,  $N_x (\Delta x)$ ,  $N_y (\Delta y)$ ,  $N_z (\Delta z)$ : grid number (resolution) for stream ( $x$ ), vertical ( $y$ ), and spanwise ( $z$ ) directions, and  $T$  is the simulation time interval after the initial transient period respectively.

対象とする流動場は図 1 に示す十分に発達したチャンネル流であり、高レイノルズ数条件により顕著となる大規模構造を包括するために、主流方向( $x$ )に  $16h$ ( $h$ :チャンネル半値幅)、スパン方向( $z$ )に  $6.4h$ の大規模計算領域を確保する。数値計算手法としては、非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式を主流( $x$ )及びスパン方向( $z$ )にフーリエスペクトル法、壁垂直方向( $y$ )に 2 次精度中心差分法を適用し、その数値解を求める (直接数値計算, Direct Numerical Simulation, DNS)。主流及びスパン方向のエイリアシング誤差については 3/2 則によりこれを除去した。

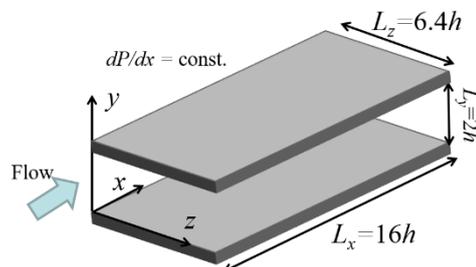


図 1 チャンネル流とその座標系

本流動場のレイノルズ数効果を検討するために表 1 に示す 7 ケースを実行した。主として使用した計算機は東北大学サイバーサイエンスセンター及び海洋研究開発機構のベクトル並列計算 NEC・SX-ACE であり  $Re_\tau=8000$  のケースでは、メモリ量 60TB が必要となり、1024 ノード(4096 並列)を使用した。ベクトル並列計算機用の高速化及びノード配置の最適化を行った結果、理論性能の約 8%に相当する 21Tflop/s の実行演算速度が得られている。

DNS コードにおいては、平均速度及びレイノルズ応力に関する基礎統計量に加え、乱流モデリングにおいて重要となる、次式(1)-(6)で示す乱流エネルギー  $k$ 、散逸率  $\epsilon$ 及びレイノルズ応力の輸

送方式に関する統計処理コードを開発し、これを組み込んでいる。

- Turbulent kinetic energy ( $k$ ) and turbulent dissipation rate ( $\varepsilon$ ):

$$k \Rightarrow \overline{u_i u_i} / 2, \quad \varepsilon = \nu \overline{(u_{i,j})^2}$$

- transport equations of  $k$  an  $\varepsilon$ :

$$\frac{Duu}{Dt} = \underbrace{-2uv \frac{\partial U}{\partial y}}_{P_{11}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(-uuu)}_{T_{11}} + 2 \underbrace{\frac{p}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x}}_{\Phi_{11}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial uu}{\partial y} \right)}_{V_{11}} - 2\nu \underbrace{\left( \frac{\partial u}{\partial x_j} \right)^2}_{\varepsilon_{11}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Dvv}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(-vvv)}_{T_{22}} + 2 \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( -\frac{pv}{\rho} \right)}_{\Pi_{22}} + 2 \underbrace{\frac{p}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y}}_{\Phi_{22}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial vv}{\partial y} \right)}_{V_{22}} - 2\nu \underbrace{\left( \frac{\partial v}{\partial x_j} \right)^2}_{\varepsilon_{22}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{Dww}{Dt} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}(-www)}_{T_{33}} + 2 \underbrace{\frac{p}{\rho} \frac{\partial w}{\partial z}}_{\Phi_{33}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial ww}{\partial y} \right)}_{V_{33}} - 2\nu \underbrace{\left( \frac{\partial w}{\partial x_j} \right)^2}_{\varepsilon_{33}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \underbrace{\frac{P_{11}}{k}}_{\frac{2}{k}} + \underbrace{\frac{T_{11} + T_{22} + T_{33}}{k}}_{\frac{2}{T_k}} + \underbrace{\frac{\Pi_{22}}{k}}_{\frac{2}{\Pi_k}} + \underbrace{\frac{V_{11} + V_{22} + V_{33}}{k}}_{\frac{2}{V_k}} - \underbrace{\frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{k}}_{\frac{2}{\varepsilon}} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} = & -2\nu \underbrace{\frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial v}{\partial x_i} \frac{\partial U}{\partial y}}_{p_\varepsilon^1} - 2\nu \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_i}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial y}}_{p_\varepsilon^2} - 2\nu \underbrace{\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}}_{p_\varepsilon^3} - 2\nu \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j}}_{p_\varepsilon^4} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( -\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)}_{r_\varepsilon} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( -2\nu \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial v}{\partial x_i} \right)}_{n_\varepsilon} \\ & + \nu \underbrace{\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2}}_D - 2\nu^2 \underbrace{\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_i}}_D = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに  $U$  は  $x$  方向の平均速度、 $u_1(=u)$ ,  $u_2(=v)$ ,  $u_3(=w)$  は  $x_1(=x)$ ,  $x_2(=y)$ ,  $x_3(=z)$  方向への乱流成分、 $P$  は平均圧力、 $p$  は圧力の乱流成分、 $\rho$  及び  $\nu$  は密度及び動粘性係数(一定)を示し上付きバーは時空間平均を施した値であることを示す。図2に  $Re_\tau=8000$  における乱流エネルギー  $k$ 、散逸率  $\varepsilon$  の各項を評価した結果を示す(図中の上付き添え字+は摩擦速度と動粘性係数による無次元値であることを示す)。

## (2)高レイノルズ数乱流理論の検証

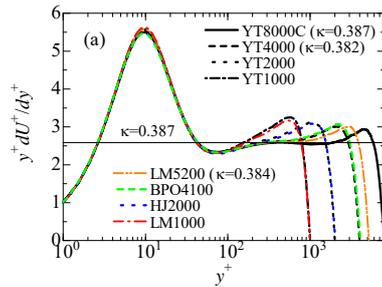
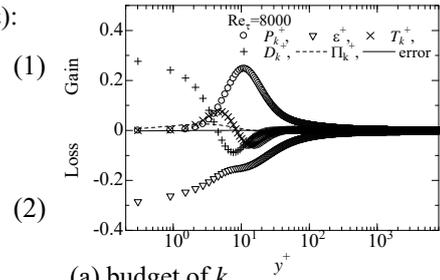


図3 平均速度の対数則分布の確認  
(色線は他グループにおける DNS データ)

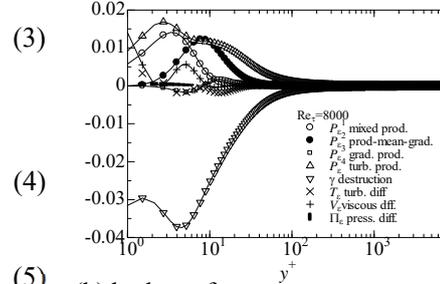
壁面乱流場における高レイノルズ数効果として内層と外層のオーバーラップにより主流方向平均速度が式(3)の対数則分布を示すことが指摘されている [1].

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \Rightarrow \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = \frac{1}{\kappa y^+} \quad (7)$$

ここに、 $U$  は主流方向平均速度、 $y$  は壁からの距離、 $\kappa$  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(7)を  $y$  方向に微分し、 $y$  をかけた値( $\beta=1/\kappa$ )を図3に示す。図3には既存の高レイノルズ数 DNS データベースの値 [4], [5], [6] を併記している。式(7)より  $\beta$  が一定値を示す壁面高が対数領域となる。 $Re_\tau=8000$  においては理論通りに、一定領域の存在が確認できるとともにそのカルマン定数( $\kappa$ )は 0.39 程度であることがわかる。また本対数則領域ではレイノルズ応力が卓越し( $-\overline{u^+ v^+} \approx 1$ )、高レイノルズ数の極限における乱流エネルギーの生成項( $P_k$ )とその散逸率( $\varepsilon$ )が釣りあう局所平衡( $P_k = \varepsilon$ ) [2]を適用すると、この関係は式



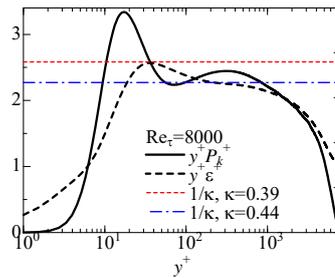
(a) budget of  $k$



(b) budget of  $\varepsilon$

図2 DNS データベース例  
: 式(5), (6)  $Re_\tau=8000$

図4 対数領域における局所平衡の確認



(8)で表される。

$$P_k^+ = -\overline{u^+v^+} \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = \varepsilon^+ \approx \frac{1}{\kappa y^+} \quad \therefore y^+ P_k^+ = y^+ \varepsilon^+ = \frac{1}{\kappa} \quad (8)$$

$Re_\tau=8000$ において式(9)を評価したものを図4に示す。図3に示す対数領域  $300 < y^+ < 1600$  においては  $y^+ P_k^+$  は理論値( $1/\kappa$ )を若干過少評価し、 $y^+ \varepsilon^+$  はさらに過小評価し、 $P_k > \varepsilon$  となり局所平衡は成立していないことが確認できる。以上により本レイノルズ数領域： $O(10^4)$ 程度では、平均速度分布の対数則は明確に確認できるものの、局所平衡は成立しないことがわかる。これは想定される高レイノルズ数極限状態に対し散逸率のレイノルズ数効果が遅れていることを示唆しているように思われる。

### (2)高レイノルズ数極限状態への漸近挙動予測

そこで本レイノルズ数領域： $O(10^4)$ の DNS データベースを用いて、高レイノルズ数極限状態への漸近挙動を予測することを試みる。本研究では壁乱流における線形応答理論 [7]を散逸率に適用する。[1]本理論では慣性小領域(inertial sublayer):  $-\overline{u^+v^+} = \text{const.}$ (レイノルズ応力一定領域) では  $Re_\tau \rightarrow \infty$  の極限で、適当な条件(=locality)を満たす任意の物理量の平均は摩擦速度： $u_\tau$  と壁面からの距離： $y$ のみであらわされると仮定する(0次近似)。

[2] [1]の仮定の下、 $\varepsilon$ は次元解析から  $Re_\tau \rightarrow \infty$  の極限で、

$$\varepsilon \left[ \text{m}^2 / \text{s}^3 \right] = C_e \frac{u_\tau^3}{y} \Rightarrow \frac{y \varepsilon}{u_\tau^3} = C_e, \quad (9)$$

と表される、ここに  $C_e$ は無次元の普遍定数。

[3] 有限の  $Re$  の影響 (すなわち  $y/h$  と  $l_\tau/y, l_\tau = \nu/u_\tau$ ) を線形応答理論 [3]の考えで取り入れ、さらに両辺を  $u_\tau^4/\nu$ で割ると、

$$\varepsilon^+ = \frac{1}{y^+} \left( C_e + C_1 \frac{y^+}{Re_\tau} + C_2 \frac{1}{y^+} \right) \Rightarrow y^+ \varepsilon^+ = C_e + C_1 \frac{y^+}{Re_\tau} + C_2 \frac{1}{y^+}. \quad (10)$$

と予測できる。式(10)において  $Re_\tau \rightarrow \infty$  の極限及び  $y^+ \gg 1$  を想定すると、 $y^+ \varepsilon^+ = C_e$  となり  $C_e$  が  $Re_\tau \rightarrow \infty$ での極限值と考えられる。これを定量的に評価するために、式(10)の定数を  $Re_\tau=8000$  の DNS データにより最小二乗フィッティングにより式(11)のように求めた

$$C_e = 2.27, C_1 = -1.14, C_2 = 11.6. \quad (11)$$

式(10), (11)により線形応答理論の予測値と DNS データの比較を図5に示す。 $Re_\tau > 1000$  以上においては本理論予測と DNS データが良好に一致することがわかる。一方  $C_e = 2.27 (=1/\kappa)$ に予測されるカルマン定数の極限值は  $0.44$  となり、DNS の速度分布による値： $0.39$  とはズレが生じている(図3参照)。ここで問題となるのは、 $C_e = 2.27 (=1/\kappa)$ による極限值予測が妥当であるか?ということである。本理論予測が妥当であれば、図3に示すように散逸率の方が高レイノルズ数極限状態に早く漸近しており、乱流生成項は過大評価となっており極限值への遅れが目立っている状況と判断できる。高レイノルズ数極限状態において散逸率は等方化( $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ )することが予測され、もし散逸率が高レイノルズ数極限状態に早く漸近している場合、明確な等方化傾向が確認できるはずである。そこで散逸率の等方化を検討したものを図6に示す。確かに対数領域では( $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$ )に近い挙動を示しており、本理論の妥当性を示唆するものである。

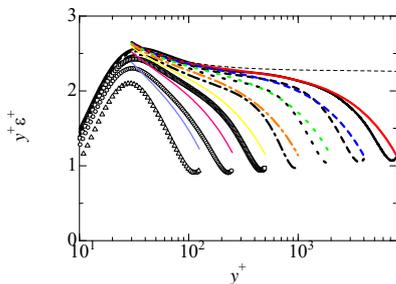


図5 線形応答理論による高レイノルズ数極限状態への漸近挙動の予測 (色線が線形応答理論による予測値)

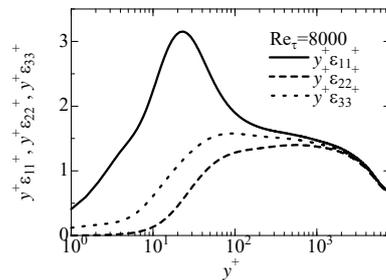


図6 散逸率の等方化傾向： $Re_\tau=8000$

### (3) 乱流モデルの評価

平均速度の対数則分布及び高レイノルズ数の極限における乱流エネルギーの生成項( $P_k$ )とその散逸率( $\varepsilon$ )が釣り合う局所平衡( $P_k = \varepsilon$ )は  $k$ - $\varepsilon$ 乱流モデル(RANS)における基本仮定となっている。そこで  $k$ - $\varepsilon$ 乱流モデルにおける高精度モデルである Nagano-Shimada モデル [8]と DNS データとの比較を図7に示す。 $Re_\tau=400$ においてはモデルと DNS データは完全に一致する。

しかし DNS におけるレイノルズ数による高レイノルズ数効果 (乱流エネルギーの上昇) を乱

流モデルは全く反映できていないことがわかる。

これは DNS においては、 $P_k > \varepsilon$  となり乱流エネルギー生成が過剰となるが、モデルにおいては局所平衡( $P_k = \varepsilon$ )を仮定しているため、乱流エネルギーの増加が予測できないためである。従って乱流モデルの高精度化においては、 $P_k > \varepsilon$  効果を反映させることが重要であり、 $\varepsilon$ の挙動については、本理論予測式(10)により高精度化が図れる可能性が高い。

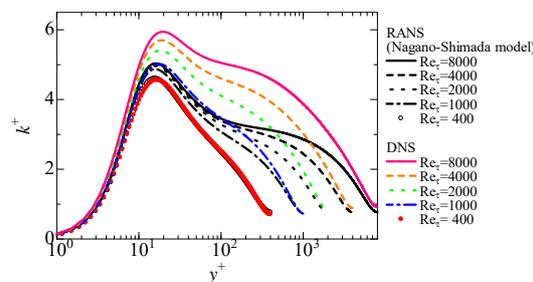


図7 乱流モデルによる乱流エネルギーの予測精度

#### (4)富岳を対象とした次世代 DNS コードの開発

本研究では、 $Re_\tau=8000$  までの DNS データベースを用いて壁乱流における高レイノルズ数極限状態への漸近挙動予測手法を提案した。本理論は DNS データベースにおける高レイノルズ数効果をよく説明できる (図 5, 6)。しかしその妥当性を評価するには、本 DNS 条件を越える  $Re$  域での DNS データを取得し、その漸近挙動の妥当性を評価することが必要と考えられる。そこで現時点で世界最高性能を有する理化学研究所・富岳を対象とした次世代 DNS コード開発を行った。 $Re_\tau=8000$ (メモリ量 60TB)の 2 倍規模:  $Re_\tau=16000$  を計算する場合、そのメモリ量は約 280TB に達し、富岳においては 1 万ノード (ノード内 28GB  $\times$  11,520 = 315TB) を用いる必要がある。ノード内に 48 コアを有するため、並列数は最低約 55 万並列 (48  $\times$  11,520 = 552,960) 規模となる。

これに対応するためにスパン方向及び壁垂直方向への 2 次元領域分割を適用し、通信量を低減させた DNS コードを開発した。さらに高効率演算を可能とするために超並列時の通信コストの低減化を促進するために、富岳インタコネクタ(TofuD)のノード配置を最適化するとともに、スペクトル法における高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform, FFT) 演算とその並列化で必要となる all-to-all 通信を同時実行 (オーバーラップ) させる手法を導入した。結果として、富岳 11520 ノードにおいて、326Tflop/s の実行演算速度を得ることができた。この実行演算速度はチャンネル流における最速コード 274 Tflop/s [9]を上回るものであり、世界最速と考えられる。

#### 参考文献

- [1] C. B. Millikan, "A critical discussion of turbulent flow in channels and circular tubes," in *Proc. 5th Int. Congress on Applied Mechanics (Cambridge, MA)*, 1938.
- [2] A. Townsend, "Equilibrium layers and wall turbulence," *J. Fluid Mech.*, vol. 11, no. 1, pp. 97-120, 1961.
- [3] R. Kubo, "The fluctuation-dissipation theorem," *Reports on progress in physics*, vol. 29, no. 1, pp. 255-284, 1966.
- [4] M. Lee and R. D. Moser, "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_\tau = 5200$ ," *J. Fluid Mech.*, vol. 774, pp. 395-415, 2015.
- [5] S. Hoyas and J. Jiménez, "Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to  $Re_\tau = 2003$ ," *Phys. Fluids*, vol. 18, no. 1, p. 011702, 2006.
- [6] M. Bernardini, S. Pirozzoli and P. Orlandi, "Velocity statistics in turbulent channel flow up to  $Re_\tau = 4000$ ," *J. Fluid Mech.*, vol. 742, pp. 171-191, 2014.
- [7] Y. Kaneda, Y. Yamamoto and Y. Tsuji, "Linear Response Theory for One-Point Statistics in the Inertial Sublayer of Wall-Bounded Turbulence," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122, no. 19, p. 194502, 2019.
- [8] Y. Nagano and M. Shimada, "Rigorous modeling of dissipation-rate equation using direct simulations," *JSME Int. J. Ser. B Fluids and Thermal Eng.*, vol. 38, no. 1, pp. 51-59, 1995.
- [9] M. Lee, N. Malaya and R. D. Moser, "Petascale direct numerical simulation of turbulent channel flow on up to 786k cores," in *Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Kaneda, Y. Yamamoto, Y. Tsuji	4. 巻 122
2. 論文標題 Linear Response Theory for One-Point Statistics in the Inertial Sublayer of Wall-Bounded Turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 194502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.194502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. Mehrez, J. Philip, Y. Yamamoto, and Y. Tsuji	4. 巻 4
2. 論文標題 Pressure and spanwise velocity fluctuations in turbulent channel flows: Logarithmic behavior of moments and coherent structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 44601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.044601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Yamamoto and Y. Tsuji
2. 発表標題 Discussion on High-Reynolds Number Limit in a Fully-Developed Channel Flow
3. 学会等名 Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Yamamoto and Y. Tsuji
2. 発表標題 REYNOLDS NUMBER EFFECT OF TURBULENT DISSIPATION RATE IN A FULLY-DEVELOPED CHANNEL FLOW
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

DNS database of turbulent channel flow  
<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/yamamoto/DNS2>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	The University of Melbourne			