

jh240062

石原 卓 (岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域)

Supported by

高レイノルズ数乱流のデータ駆動科学プラットフォームの構築



研究の目的：「京」、「富岳」の性能を最大限に活用して構築してきたフーリエ・スペクトル法に基づく非圧縮性乱流、および8次精度コンパクト差分法に基づく圧縮性乱流の大規模直接数値計算 (DNS) のデータベースを維持・管理し、共有することにより日本の乱流の計算科学とデータ駆動科学の発展に貢献するためのプラットフォームをmdxを用いて構築することが本研究の目的である。

京、富岳を活用した非圧縮性乱流および圧縮性乱流の大規模乱流直接数値計算 (DNS)



京 一般課題 2012~2019
「カノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション」
「富岳」試行的利用課題 2020
「大規模乱流直接数値シミュレーションに向けた富岳用並列化コードの開発と性能評価」
「富岳」一般課題 2021~2024(継続中)
「高レイノルズ数乱流の大規模直接数値シミュレーション」

乱流DNSデータベース

非圧縮性乱流

TABLE I. DNS conditions and turbulence characteristics at the final time step $t = t_F$.

| Run | Initial field | Re/ 10^4 | R_λ | $k_{max}\eta$ | $10^4\Delta t$ | $10^5\nu$ | $10^2(\epsilon)$ | L | $10^2\lambda$ | $10^4\eta$ | T | $10^2\tau_\eta$ | t_F | |
|---------|---------------|------------|-------------|---------------|----------------|-----------|------------------|------|---------------|------------|------|-----------------|-------|-------------|
| 2048-1* | 1024-1* | 1.61 | 732 | 965 | 1.0 | 4.0 | 4.40 | 7.07 | 1.23 | 5.58 | 10.5 | 2.13 | 2.5 | 10(4.7T) |
| 4096-2* | 2048-2* | 1.37 | 675 | 1930 | 1.9 | 2.5 | 4.40 | 8.31 | 1.05 | 5.15 | 10.1 | 1.82 | 2.3 | 3.80(2.1T) |
| 4096-1* | 2048-1* | 3.65 | 1131 | 1930 | 1.0 | 2.5 | 1.73 | 7.52 | 1.09 | 3.39 | 5.12 | 1.89 | 1.52 | 4.525(2.4T) |
| 6144-1 | 4096-1* | 6.35 | 1423 | 2896 | 1.0 | 1.66 | 1.02 | 8.06 | 1.12 | 2.51 | 3.39 | 1.94 | 1.17 | 3.25(1.7T) |
| 8192-1 | 4096-1* | 8.97 | 1747 | 3862 | 1.0 | 1.25 | 0.70 | 7.97 | 1.10 | 2.10 | 2.56 | 1.91 | 0.94 | 2.375(1.2T) |
| 12288-1 | 8192-1† | 15.4 | 2297 | 5793 | 1.0 | 0.833 | 0.41 | 7.92 | 1.10 | 1.62 | 1.72 | 1.90 | 0.72 | 1.14(0.6T) |

Ishihara et al. Phys. Rev. Fluids 1 082403(R) (2016)

Ishihara et al. Phys. Rev. Fluids 5 104608 (2020)

| Run | N_{grid} | Re_λ | $k_{max}\eta$ | $10^4\nu$ | $\langle\epsilon\rangle$ | L | λ_T | $10^3\eta$ | T | t_F/T | (t_F/T) |
|--------|------------|--------------|---------------|-----------|--------------------------|------|-------------|------------|------|---------|-----------|
| 8192-2 | 8192 | 1101 | 2 | 0.173 | 0.0794 | 1.10 | 0.0330 | 0.505 | 1.91 | 6.3 | (1.0) |
| 2048-4 | 2048 | 272 | 4 | 2.8 | 0.0804 | 1.11 | 0.132 | 4.06 | 1.92 | 5.7 | (0.5) |
| 8192-4 | 8192 | 739 | 4 | 0.44 | 0.0693 | 1.23 | 0.0564 | 1.05 | 2.13 | 5.3 | (0.6) |

Kaneda et al. J. Fluid Mech. 929 A1 (2021)

計算手法

空間微分：フーリエ・スペクトル法
エイリアシング・エラー：位相シフトと $k > k_{max} = (\sqrt{2}N)/3$ の波数カット
時間積分：4次精度ルンゲクッタ法
演算精度：倍精度

等温圧縮性乱流

| Run | N^3 | $k_{max}\eta$ | $10^3\Delta t$ | $10^{-3}Re$ | R_λ | M_t | δ | ϵ_r | $10^2\epsilon$ | L | λ | $10^3\eta$ | u |
|---------|-------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|-------|----------|--------------|----------------|------|-----------|------------|-------|
| C1024-2 | 1024 ³ | 1.99 | 0.5 | 2.84 | 326 | 0.33 | 0.39 | 0.098 | 8.02 | 1.26 | 0.145 | 4.07 | 0.632 |
| C2048-2 | 2048 ³ | 2.01 | 0.1 | 7.09 | 520 | 0.32 | 0.40 | 0.094 | 7.46 | 1.26 | 0.0923 | 2.06 | 0.620 |
| C4096-2 | 4096 ³ | 2.06 | 0.1 | 17.2 | 840 | 0.32 | 0.41 | 0.092 | 6.96 | 1.23 | 0.0600 | 1.05 | 0.616 |
| C2048-4 | 2048 ³ | 4.05 | 0.1 | 2.89 | 337 | 0.33 | 0.40 | 0.120 | 7.48 | 1.28 | 0.150 | 4.14 | 0.631 |
| C4096-8 | 4096 ³ | 8.08 | 0.1 | 2.89 | 336 | 0.33 | 0.40 | 0.126 | 7.55 | 1.28 | 0.149 | 4.13 | 0.631 |

Sakurai & Ishihara Phys. Rev. Fluids 8 084606 (2023)

計算手法

空間微分：8次精度コンパクト差分 (非線形項) 8次精度中心差分 (粘性項)
フィルタ：8次精度ローパスフィルタ
時間積分：3次精度TVDルンゲクッタ法
演算精度：倍精度

DNSデータ(2軸分割)の構造

N: 格子点数, np1: 第1軸分割数, np2: 第2軸分割数

ファイルID: me1+np2*me2, me1=[0,np1-1], me2=[0,np2-1]

波数空間 $\hat{u}(2, k_x, k_y, k_z), \hat{v}(2, k_x, k_y, k_z), \hat{w}(2, k_x, k_y, k_z)$

kx=[1,n]

ky=[1+A,n/np1+A], A=me1*n/np1

kz=[1+B,nh/np2+B], B=me2*nh/np2 (nh=n/2)

保存用実空間 $u(i_z, i_x, i_y), v(i_z, i_x, i_y), w(i_z, i_x, i_y)$ *

iz=[1,n]

ix=[1+A,n/np1+A], A=me1*n/np1

iy=[1+B,n/np2+B], B=me2*n/np2

公開用実空間 $V(I_X, I_Y, I_Z), W(I_X, I_Y, I_Z), U(I_X, I_Y, I_Z)$

IX=[1,n]

IY=[1+A,n/np1+A], A=me1*n/np1

IZ=[1+B,n/np2+B], B=me2*n/np2

* DNS用の3DFFTでは軸の転置回数を減らす目的で実空間の書き出しがこのような形となっている。実空間データの解析や可視化では $u(i_z, i_x, i_y) \rightarrow u(i_x, i_y, i_z)$ のような転置が必要しかし $U = w, V = u, W = v, I_X = i_z, I_Y = i_x, I_Z = i_y$

とみなせば転置を省略できる

mdxを用いたDNSデータ公開プラットフォームの構築

仕様 (予定) 参考: Johns Hopkins Turbulence Database

プロジェクト名: jh240062 Turbulence Database

仮想マシン 1: Turbulence Database

仮想マシン 1: Webserver (Next.jsを使用)

大容量ストレージ: 現在200GBで試行中 (拡大予定)

Webserver上で乱流DNSデータの乱流特徴量を表示

実空間データ (2軸分割) をmdxの大容量ストレージに保存

非圧縮性乱流「速度、圧力、(渦度の大きさなど)」

 $U(I_X, I_Y, I_Z), V(I_X, I_Y, I_Z), W(I_X, I_Y, I_Z), p(I_X, I_Y, I_Z), \omega(I_X, I_Y, I_Z)$

等温圧縮性乱流「速度、密度、(速度の発散など)」

 $U(I_X, I_Y, I_Z), V(I_X, I_Y, I_Z), W(I_X, I_Y, I_Z), \rho(I_X, I_Y, I_Z), \theta(I_X, I_Y, I_Z),$

標準機能

Step1: ファイルIDと成分を指定→downloadできるようにする

Step2: 場所と成分を指定→そこを含む立法体領域を切り出す
→downloadできるようにする

応用拡張機能

Step3: Step2で切り出した領域の可視化

StepP1: FFTを用いた演算とデータ処理

特徴

倍精度計算による信頼性の高い非圧縮乱流DNSデータ
世界最大規模の等温圧縮性乱流DNSデータ