

等方/非等方性外力による 低 Re 数定常乱流の Re 数依存性と LES 解析

Re Number Dependency and LES Analysis
on the Low Re Number Steady Turbulence due to Isotropic/Anisotropic Forcing

- 鈴木 博貴, 山口大, 山口県宇部市常盤台 2-16-1, E-mail : h.suzuki@yamaguchi-u.ac.jp
 鴛瀨麻由花, 山口大, 山口県宇部市常盤台 2-16-1, E-mail : b019vd@yamaguchi-u.ac.jp
 望月 信介, 山口大, 山口県宇部市常盤台 2-16-1, E-mail : shinsuke@yamaguchi-u.ac.jp

Hiroki Suzuki, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube, 755-8611, Japan

Mayuka Oshibuchi, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube, 755-8611, Japan

Shinsuke Mochizuki, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube, 755-8611, Japan

This study approaches the Re number dependency of steady turbulence maintained by isotropic or anisotropic forcing schemes and discusses the obtained results using LES analysis. Here, anisotropic forcing schemes are given based on a previous study, and isotropic forcing schemes are obtained by combining the anisotropic forcing terms. The incompressible flow in the periodic box is simulated using the fourth-order central difference method and the fourth-order Runge-Kutta method. In the visualization results, the large-scale structure affected by the difference in the forcing scheme in the lower Reynolds number. On the other hand, in the higher Reynolds number, the difference in the large scale structure was not clearly found.

1. 結論

非圧縮性乱流の解析は、工学的に有用性を有して、SGS モデリングが施された LES 解析は、工学的な応用面で汎用的である。LES 解析の SGS モデリングは、スマゴリンスキーモデルなどの単純なモデルなど、乱流の局所等方性と密接に関係している。この局所等方性は、乱流のレイノルズ数が十分に高い場合には成り立つが、そうで無い場合には成立するとは限らない。このような流れ場を調査することは、工学的に意義あるものと認められ、これまでも研究されている。これまでの研究は、境界層などの実在する流れが対象とされてきている。また、局所等方性に関して先行研究⁽¹⁾では、一様等方性乱流を生成するためにフォーシングスキームが用いられてきており、これらの中には、物理空間においてフォーシングを行うスキームも存在し、適用されている。

大スケールに非等方性が存在し、レイノルズ数が十分に高くない場合について、大スケールの非等方性の影響を明確にするには、理想化された単純な流れが解析されるべきかもしれない。また局所非等方性が対象とされる場合には LES 解析の点からも取り組まれるべきだろう。一方、外力項を用いた定常乱流を生成するためのフォーシングスキームについては、これまでは等方性のフォーシングスキームが用いられてきており、物理空間においてフォーシングを行うリニアフォーシングがあるが、これらのフォーシングスキームについて非等方性の観点から調査されるべきかもしれない。

以上を踏まえ本研究は、レイノルズ数の低い乱流のレイノルズ数依存性について、大スケール速度場の等方性および非等方性の観点から、調査することを目的としている。ここで、大スケールの速度場の等方性および非等方性は、定常乱流を維持する外力項について、等方性外力項および非等方性外力項を用いて生成される。また、外力項フォーシングの非等方性が及ぼす影響を明確にするために、理想化された単純な乱流場が解析される。また、局所等方性の観点から、LES 解析を用いて、結果を考察する。

2. 解析方法

支配方程式は、レイノルズ数 Re でもって無次元化された連続の式および非圧縮性流れのナビエ-ストークス方程式である。一辺が 2π の周期箱が計算対象とされる。定常乱流を維持するために、外力項が設定されている。 i 成分に対して外力項のベクトル成分 F_i は、リニアフォーシングを踏まえて、 u_i と与えられる。ここで、 u_i は速度成分である。

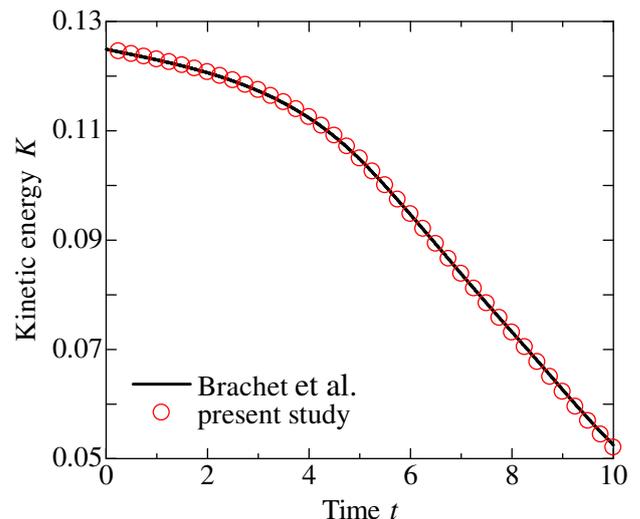


Fig. 1: Validation of the present simulation using Taylor-Green vortex flow, where the present result agrees well with that of a previous study.

非等方性乱流を維持する外力を与える u_i を次のように与える： $(u_1, u_2, u_3) = (-\cos(x_1)\sin(x_2), \sin(x_1)\cos(x_2), 0)$ 。等方性の乱流を維持する外力項については、非等方性を組み合わせることで与え、かつそのノルムが非等方性乱流に対するそれと一致するようにした。

支配方程式の空間離散化には、保存型四次精度中心差分スキームを用いている。時間積分には、六段四次精度ルンゲクッタ法を用いた。支配方程式は部分段階法により連立され、部分段階で解かれるポアソン方程式は高速フーリエ変換を用いた直接法により解かれた。

計算条件については、レイノルズ数 Re について $Re = 10 - 500$ とした。このレイノルズ数の条件について、テイラースケールにもとづく乱流レイノルズ数 Re_λ は $Re_\lambda \approx 15 - 150$ であった。

本数値解析の検証を行うため、時間的に減衰するテイラーグリーン渦を解析した。ここで $N = 128$ である。ここで、この検証においては、外力項は設定されていない。

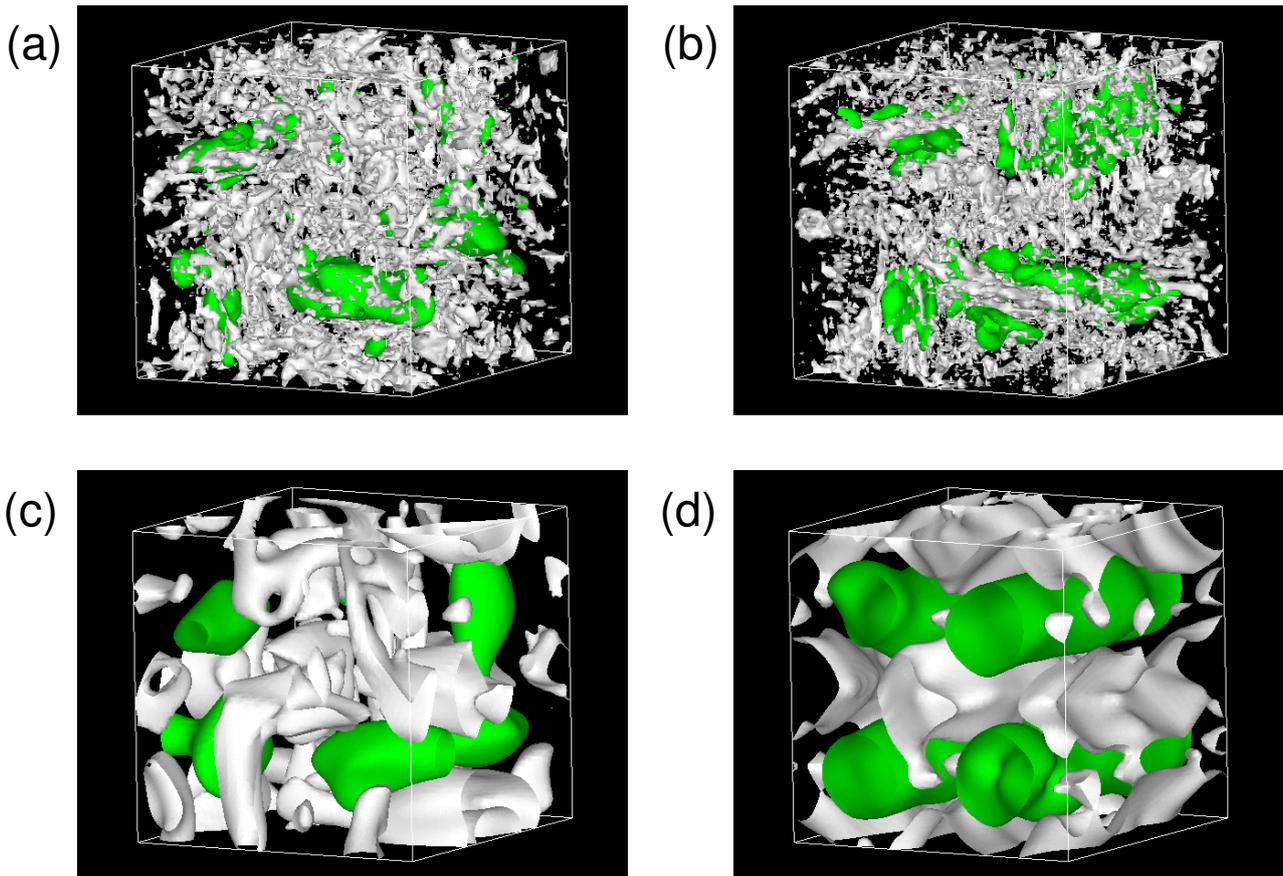


Fig. 2: Visualization results, Here (a) and (c) are for results of isotropically forced turbulence, and (b) and (d) are for results of anisotropically forced turbulence. Also, for (a) and (b), $Re = 10$, and for (c) and (d), $Re = 100$. Green surface is characterized by negative value of pressure. White surface shows isosurface of the second invariant of the velocity-gradient tensor.

大域的乱流エネルギー K を、先行研究⁽²⁾のそれと比較した。本研究の大域的エネルギーを先行研究と比較した結果を図1に示す。図1に示すように、テイラーグリーン渦の乱流エネルギーは、時間とともに減少していく。この乱流エネルギーの時間変化について、本研究の結果は先行研究のそれと良く一致しており、本解析が検証された。

3. 結果と考察

図2に、流れ場を可視化した結果を示す。ここで、緑の等値面は圧力の負値により、白の等値面は速度勾配テンソルの第二不変量により特徴づけられる。レイノルズ数が低い場合 ((c) および (d)), 等方性乱れにおいては、大スケール渦構造が確認され、その間隙に小スケール構造が存在することが確認される。非等方性乱れの場合には、等方性乱れの場合とはことなり、大スケール渦構造が二次元的であることが確認される。外力項においては x_3 方向の成分を有しないことから、図において一様な方向は x_3 方向である。この二次元的な大スケール渦構造の間には、速度勾配テンソルの第二不変量によって特徴づけられた小スケール構造が存在している。このように、レイノルズ数が低い場合には、外力項の等方性/非等方性の違いの影響を受けて、その影響が可視化結果において確認される。

レイノルズ数が高い場合には、レイノルズ数が低い場合とは流れの様子が異なっている。ここで、この高いレイノルズ数条件において、乱れは局所的に等方であった。図に示すように、等方性外力項により乱れが維持されている場合には、緑等値面によって特徴づけられる大規模

渦構造は、レイノルズ数が低い場合のそれと同様な構造を持っている。小スケール構造については、この大規模構造の間隙に存在しており、レイノルズ数が高められているため、より細かい小スケール構造が確認される。非等方性外力により乱れが維持される場合においては、低レイノルズ数の場合は、二次元的な大規模構造が確認されたのに対して、高レイノルズ数の場合はそれは明瞭には確認されず、むしろ等方性外力項により乱れが維持される場合と比較的によく似ている。非等方性外力項により乱れが維持される場合も同様に、大スケール構造の間隙に、小スケール渦構造が存在している。

4. 結論

本研究は、等方性/非等方性外力により維持される定常乱流のレイノルズ数依存性を調べ、可視化により違いを明らかにした。講演時には、LES解析でもって考察を行った結果についても示して行きたい。

謝辞

本研究の一部は科研費 (17K06160, 18H01369 および 18K03932) の援助を受けた。

参考文献

- (1) Rosales, C. and Meneveau, C., "Linear forcing in numerical simulations of isotropic turbulence," *Phys. Fluids*, 17 (2005), 095106.
- (2) Brachet, M. E., et al., "The dynamics of freely decaying two-dimensional turbulence," *J. Fluid Mech.*, 194 (1988), pp. 333-349.