

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05573

研究課題名(和文) 3次元一様非等方性乱流における大スケール及び小スケールの普遍的構造の計算物理学

研究課題名(英文) Computational physics on universality of three-dimensional homogeneous anisotropic turbulence at large and small scales

研究代表者

芳松 克則 (Yoshimatsu, Katsunori)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：70377802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：直接数値計算を用いて、3次元非圧縮一様乱流の普遍構造、特に、乱流の大スケールのある種の時間不変性に起因する自由減衰乱流の減衰則、およびスカラー源の無いパッシブスカラー乱流の拡散則について調べた。大スケールにおいて、速度異成分間の相関を含んだ非等方性や鏡面非対称性が初期にあれば、十分に発達した乱流においても、大スケールの非等方性や鏡面非対称性が永続することを示した。さらに、ある種の時間不変性があるスカラー場の大スケールにおいては、その非等方性が、速度場の非等方に隷属しないことも発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外力の無い乱流の減衰やパッシブスカラー乱流の拡散は、基本的な乱流現象のひとつである。ある種の時間不変性がある場合に対して、非等方鏡面非対称性の一様乱流に減衰則や拡散則が一般化できたことの学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Using direct numerical simulation (DNS), we studied universality of three-dimensional incompressible homogenous turbulence and passive scalar turbulence; in particular, the free decay of a certain kind of homogenous turbulence and the mixing of a certain kind of a passive scalar in homogeneous turbulent flow with and without anisotropic external force. The DNSs showed no return to reflection symmetry and isotropy at large scales including energy-containing-range scales. Moreover, it was found that even though the large-scale anisotropy of the velocity field grows with time owing to the external force, its scalar field counterpart remains almost unchanged.

研究分野：数物系科学

キーワード：流体物理学 計算物理学 応用数学 乱流 大規模直接数値計算 自己相似性 不変性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の身の周りにおける大半の流れは乱流である。その解明は、解明は異常気象、汚染物質の拡散など社会の諸問題の解決に重要である。乱流は巨大自由度、多階層、強非線形性を有しており、粘性効果に対する非線形性の強さを表す指標であるレイノルズ数が十分に高い。この乱流には、大スケールの外力や境界条件の詳細に依らない統計的普遍性が、自由度の大半を占める十分小さなスケールに存在すると考えられている。その考えは、乱流の統計理論、及び、乱流モデルの中核となっている。一方、ある時間不変量に起因した大スケールの速度場と流れに影響を与えない濃度などのスカラー場の普遍的構造が、それぞれ乱流の減衰、スカラー場の拡散の鍵を握っていると考えられている。このスカラー場は、パッシブスカラー場と呼ばれる。

乱流の解明には、よく制御された条件下、実験では測定困難な物理量も得られる大規模直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) が強力な手段である。その DNS は十分な大きな計算領域を持ち、乱流の多階層性を捉える大規模なものでなくてはならない。「京」など Peta Flops の演算性能をもつスーパーコンピュータの出現以降、様々な条件下、様々な初期場に対して、乱流の大規模 DNS を数多く実行できるようになった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模 DNS により (1) 乱流の大スケールのある種の時間不変性に起因する乱流の減衰則、ならびに、(2) 典型的な非等方外力の乱流の小スケールへの影響に関する統計則、を解明することである。

3. 研究の方法

最も規範的な乱流の一つである 3 次元一様非圧縮乱流を対象とした。スーパーコンピュータを用いて、周期境界条件下の乱流場の大規模 DNS を実施した。その DNS は、エリアスエラーを除去したフーリエスペクトル法と 4 次精度ルンゲクッタ法を用いた高精度高解像度のものである。格子点数は、 512^3 あるいは 1024^3 である。

乱流の減衰則の研究では、初期速度場として、低波数側で波数 k の自乗によく従うエネルギースペクトルを持つランダムな非圧縮ベクトル場を用いた。パッシブスカラー場の拡散の初期場として、低波数側で波数 k の自乗によく従うスカラースペクトルを持つランダムなスカラー場を用いた。これらの初期スペクトルが最大となる波数 (以下、便宜上ピーク波数と呼ぶ) は、大スケール側を十分に解像できるように、40 から 80 の値に設定した。パッシブスカラー場と速度場の初期ピーク波数は同じである。また、スカラー拡散係数と動粘性係数との比は 1 とした。

4. 研究成果

得られた成果の概要を以下に示す。

(1) エネルギースペクトルおよびスカラースペクトルが、ピーク波数よりも十分に小さい波数領域において、波数の自乗に比例する乱流を対象とした。

1. 任意の非等方性、非対称性をもつ自由減衰乱流の減衰則、ならびに、スカラー源の無いパッシブスカラー乱流の拡散則を次元解析により導出した [1]。さらに、文献 [1] では、大スケールでの自己相似性と大スケールの時間不変性を用いた理論解析により、十分発達した乱流では、速度場やパッシブスカラー場の大スケールにおける非等方性が持続することを示されている。これらは、乱流の小スケールにおける等方化と矛盾しない理論である。なお、理論解析を行う際に、多くの予備的な DNS を実施した。
2. ヘリシティの減衰則も求めた。ヘリシティの存在のため鏡面非対称性をもたない乱流では、十分に乱流が発達しても、鏡面对称な場に戻らないことも理論解析により示した。DNS により、エネルギースペクトル、ヘリシティスペクトルが低波数側では、時間に依存しないこと (図 1 参照) つまり、大スケールで不変であることを示した。また、各時刻で、適当に規格化されたエネルギースペクトル、ヘリシティスペクトルが良く重なること、つまり、自己相似的であることも示した。理論解析によるエネルギーやヘリシティの減衰則、鏡面非対称性の保持もよく再現した [2]。図 2 に示すように、乱流が十分に発達した t/T が 60 程度より大きい時刻で、鏡面非対称性を特徴づける無次元量がほぼ一定となっている。また、調べた範囲 (40 から 80 の範囲) では、初期のピーク波数によらず、理論とよく整合することを確認した。
3. 十分に発達した乱流では、速度異成分間の相関が時間的に一定になることも理論解析と DNS により示した。
4. DNS により、非等方な外力を受けた乱流中のパッシブスカラー乱流の拡散則が文献 [1] の理論とよく一致することを示した。さらに、速度場の大スケール (エネルギー保有領域) における非等方性が、外力の影響により、時間とともに増大するにもかかわらず、十分発達したパッシブスカラー場の大スケールの非等方性の程度は時間にほとんど依存しないことを DNS により示した。この結果は、理論解析と整合する。ここで、非等方性は各方向の積分長さの比で特徴づけており、速度の積分長とスカラー場の積分長は同程度である。さらに、外力の影響により小スケールの速度場の非等方性が強くなるほど、パ

ツシブスカラー場での小スケールにおける自己相似性の欠如が顕著になることも DNS により示した [3]。図 3 は、十分発達している状態での、流体の速さとスカラーの大きさの等値面の可視化図である。速度は縦方向に伸びている構造であることが見てとれる。一方、スカラー場は速度で見られるような非等方性を示していない。

- 鉛直方向に強い密度成層をもつ乱流の水平方向速度成分のエネルギー減衰を DNS により調べた。とくに、その減衰の成層の強さ依存性、レイノルズ数依存性、大スケールの解像度依存性に着目した。初期エネルギースペクトルのピーク波数が 40、80 の DNS を比較したところ、ピーク波数 80 の DNS 結果は、ピーク波数 40 の DNS 結果に比べ減衰がやや早いことが見て取れた。この傾向は、調べた範囲では、成層の強さ、レイノルズ数に依らなかった。このことは、さらに大規模な DNS の必要性を示唆している。

(2) 3次元一様成層乱流の小スケールにおいて、内部重力波に対する乱流による振動数変動について研究した。DNS を実行し、そのデータを解析した。この DNS では、 $k < 2.5$ の領域に外力を加えており、エネルギースペクトルのピークもその領域にその領域にある。また乱流の小スケールを十分に解像している。大スケールの局所平均せん断流による振動数変動に関する DNS データ解析の結果と、次元解析による結果とがよく一致することが分かった。

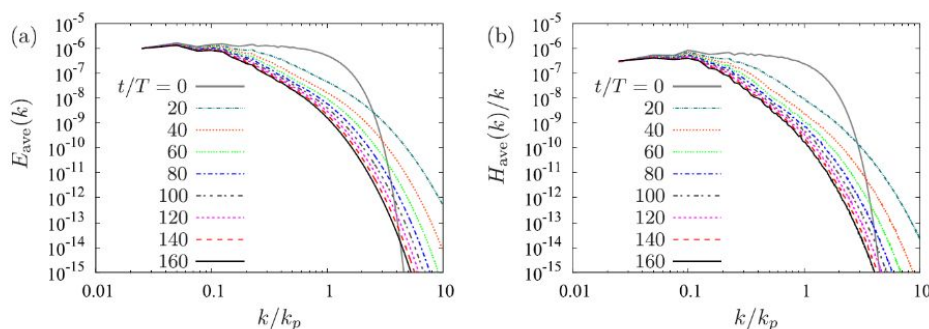


図 1 (a) 球面平均エネルギースペクトルと、(b) 波数 k で規格化した球面平均ヘリシティスペクトル。 k_p は初期ピーク波数、 t は時間、 T は初期の大きいウズの回転時間である。

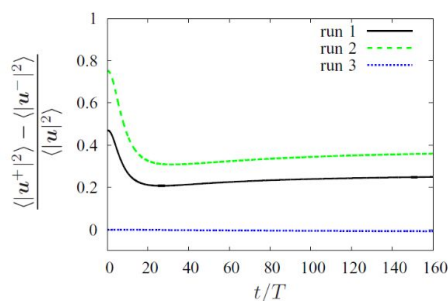


図 2 鏡面非対称性の程度を特徴づける無次元量の時間発展。Run 1, run 2 は初期時刻に鏡面非対称性がある場合の DNS 結果。Run 3 は鏡面非対称性がない場合の DNS 結果。

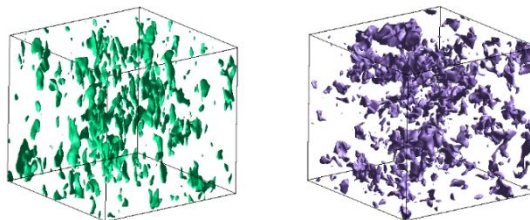


図 3 十分発達している状態での、(左) 流体の速さの等値面と(右) スカラーの大きさの等値面の可視化図。

参考文献

- [1] Yoshimatsu and Kaneda, Phys. Rev. Fluids **3**, 104601 (2018).
- [2] Yoshimatsu and Kaneda, Phys. Rev. Fluids **4**, 024611 (2019).
- [3] Yoshimatsu and Kaneda, Phys. Rev. Fluids **5**, 014604 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda	4. 巻 5
2. 論文標題 Anisotropy freezing of passive scalar fields in anisotropy growing homogeneous turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 14604
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.5.014604	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 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda	4. 巻 3
2. 論文標題 Large-scale structure of velocity and passive scalar fields in freely decaying homogeneous anisotropic turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 104601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.3.104601	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 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda	4. 巻 4
2. 論文標題 No return to reflection symmetry in freely decaying homogeneous turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 24611
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.024611	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda
2. 発表標題 Dynamical invariance and large-scale self-similarity of velocity and passive scalar fields in homogeneous turbulence
3. 学会等名 International workshop on multiphase turbulence and statistical modeling（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芳松克則、金田行雄
2. 発表標題 パッシブスカラー乱流の大スケールの不変性と自己相似性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda
2. 発表標題 Large-scale structure of a passive scalar field in homogeneous turbulence
3. 学会等名 The 72nd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yoshimatsu
2. 発表標題 Large-scale structure of homogeneous turbulence
3. 学会等名 Turbulence Colloquium Mitte TCM 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芳松克則、金田行雄
2. 発表標題 自由減衰一様乱流の大スケールにおける反転非対称性の永続性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda
2. 発表標題 Dynamical invariance of freely-decaying homogeneous turbulence with helicity
3. 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yoshimatsu and Y. Kaneda
2. 発表標題 Persistence of reflectional non-symmetry in freely-decaying homogeneous turbulence
3. 学会等名 The 71st Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kaneda and K. Yoshimatsu
2. 発表標題 The large scale structure of decaying stratified Saffman turbulence
3. 学会等名 The 71st Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------