

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01367

研究課題名(和文) 非定常・非平衡乱流の高マッハ数・高レイノルズ数領域への新展開と応用

研究課題名(英文) Unsteady, nonequilibrium turbulence in high Reynolds and high Mach number regime and its applications

研究代表者

長田 孝二 (Nagata, Koji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50274501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：乱流のエネルギーフラックスと散逸が均衡状態にない非平衡乱流(非コルモゴロフ乱流)の存在が近年明らかとなったが、高レイノルズ数やその対極にある極低レイノルズ数流れ、高マッハ数を有する流れでもそのような非平衡性が現れるのか否かについて明らかにされていない。また、これまでに検討されてこなかった様々な乱流場における非平衡性も明らかにされていない。本研究では、様々な乱流場における乱流エネルギー生成と散逸機構を詳細に調べ、乱流の非平衡特性を明らかにすることを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流の生成と散逸機構を明らかにすることは流体力学に関する基礎研究として重要であるのみならず、市販の数値計算コードで用いられている乱流モデルの評価と改良という観点から実用上も重要な課題である。本研究では、新たに開発した動的格子を用いた風洞実験を始め、乱流の直接数値計算とラージエディシミュレーションも併用することで、高レイノルズ数・高マッハ数域を含む様々な乱流場における非平衡性を明らかにしたものであり、特に当該分野の学術的進展に大きく寄与するものである。

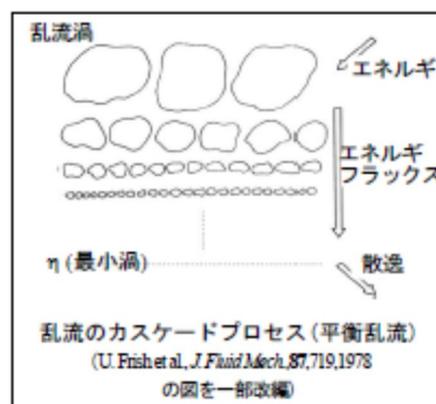
研究成果の概要(英文)：In recent years, the existence of nonequilibrium turbulence (or non-Kolmogorov turbulence) is unveiled, in which the energy flux and dissipation of turbulent kinetic energy are not balanced. However, it is not yet clear whether or not such kind of unsteady turbulence appears even at high or extremely low Reynolds numbers or high Mach number regime. In addition, it is not clear whether nonequilibrium phenomena are observed in various types of turbulent flows. The purpose of this study is to investigate in detail the turbulent energy generation and dissipation mechanism in various types of turbulent flows, including high Reynolds and extremely low Reynolds numbers and high Mach number regimes, and to clarify the nonequilibrium characteristics of such turbulent flows.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 風洞実験 数値計算

1. 研究開始当初の背景

英国 Imperial College London の研究グループによる 2010 年の“非コルモゴロフ乱流”の発見[1]は世界中の乱流研究者に多大なインパクトを与えた。さらに、同グループは乱流のエネルギーフラックスと散逸(右図)が均衡状態にない“非平衡乱流”の存在をマルチスケール格子によって励起された乱流場の中に発見し[2],そのような非平衡な乱流が通常の正方格子乱流や物体後流中にも存在することを発見した[3, 4]。これらの発見は、長年信じられてきた乱流の常識を覆すものであり、以降、世界中で関連研究が行われるようになった。しかし、当該研究開始以前の研究ではレイノルズ数が中程度の格子乱流場の計測や数値計算のみが扱われており、流体の圧縮性が重要となる高マッハ数流れや工学的に重要となる高レイノルズ数流れでもそのような非平衡性が現れるのか否か、また、現れる場合、非平衡性に及ぼすマッハ数やレイノルズ数の依存性はどのようなものか、に関しては全く検討が行われていなかった。また、既往研究が格子乱流や物体後流に限定されていたため、様々な種類の乱流場での調査も必要とされていた。



2. 研究の目的

上述した背景のもと、本研究では、高マッハ数流れや高レイノルズ数流れにおいて、低マッハ数・低～中レイノルズ数で発見された乱流の非平衡性(コルモゴロフの仮説を覆す可能性のある極めて重要な特性)が現れるのか否かを明らかにすることを主目的とした。関連して、高レイノルズ数と対極にある極低レイノルズ数域でのエネルギー輸送現象も十分明らかにされていないため、極低レイノルズ数域での格子乱流中におけるエンストロフィの生成と破壊、粘性散逸現象を明らかにすることも目的とした。さらに、格子乱流のみならず、乱流/非乱流界面近傍の乱流場や複数の噴流や後流が干渉する乱流中など、既往研究で検討されていない乱流場においても非平衡乱流が現れるのか否かを明らかにし、その普遍性を探求することも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 格子乱流の風洞実験

・動的格子(本研究で新規作成)により生成される乱流の発達および減衰特性、散逸特性を風洞(テストセクション長さ 12.5 m, 断面 0.6×0.6 m², 最大風速約 30 m/s)実験により明らかにする。動的格子の動作モードを変化させて実験を行い、乱流生成と散逸が動作モードによってどのように変化するかを明らかにする。本装置により静的格子実験では達成できない高レイノルズ数格子乱流が生成可能である。計測には時空間分解能に優れた熱線流速計を用いる。
 ・静的格子の遠方場(格子幅の数百倍下流)で計測を行い、エンストロフィの生成項、粘性破壊項、および粘性散逸率を評価する。これにより、極低レイノルズ数域における粘性散逸現象を明らかにする。

(2) 格子乱流の数値計算

・高マッハ数の場合については実験のセットアップと計測が困難であるため、直接数値計算によりその特性を調査する。
 ・一様等方性乱流場における乱流の減衰則は大スケールの特性で決定されることが既往研究により示されている。乱流格子によってどのような大スケール特性をもつ乱流が生成されるのかを直接数値計算により調査する。特に、サフマンあるいはバチェラー不変量の存在の有無を明らかにする。

(3) 圧縮性(高マッハ数)噴流の数値計算

乱流噴流における圧縮性の影響を調査するため、平面噴流のラージエディシミュレーションを実行する。サブグリッドスケールモデルにはローパスフィルタリングを用いる陰的モデルを用いる。

(4) 乱流/非乱流界面における非平衡乱流現象解明

直接数値計算により乱流/非乱流界面における非平衡現象を調査する。既往研究に従い、界面の検出には渦度の大きさを用いる。界面近傍におけるスケール間エネルギー収支や粘性散逸率を評価する。

(5) 噴流干渉・後流干渉における非平衡乱流現象解明

様々な乱流場における乱流の非平衡性を明らかにするため、二つの平面噴流が干渉する乱流場、および二つの角柱後流が干渉する乱流場の直接数値計算を実行する。構造関数、スペクトル、スケール間エネルギー収支などを計算し、非平衡・非コルモゴロフ性を明らかにする。

4. 研究成果

紙面の都合上、ここでは得られた主な結果のみを示す。詳細は発表論文リストにある論文を参照されたい。

- (1) 高レイノルズ数格子乱流を生成するための装置として動的格子の設計製作を行った(図1)。縦8軸、横8軸、計16軸の攪拌翼列を有し、それぞれの軸はステッピングモータにより独立稼働が可能である。この装置を用いて、高レイノルズ数域で渦度の生成(S)と破壊(G)に関する収支を評価した結果、攪拌翼の動作モードに関わらずこれらが均衡し、乱流レイノルズに逆比例することが明らかとなった(図2)[5]。さらに、粘性散逸率が高レイノルズ数域で一定値をとるが、この値は大スケールと小スケールの両方の特性によって変化することを明らかにした[5]。

静的格子の遠方場で同様の実験を行い、極低レイノルズ数域での渦度の生成と破壊に関する収支を評価した(図2で引用されている Zheng et al. (2021)のデータ)[6]。この二つの実験により、極低レイノルズ数域から高レイノルズ数域にわたって $S + 2G/Re_\lambda^{-1} \sim Re_\lambda^{-1}$ の関係が成立することがわかった。また、無次元化された粘性散逸率は低レイノルズ数域で急激に増加した[6]。

動的格子と静的格子を用いたこれらの実験により、既往研究でカバーされていなかった極低レイノルズ数から高レイノルズ数域における無次元粘性散逸率の実測値を得ることができた。

- (2) 高マッハ数格子乱流の直接数値計算コードを開発し計算を行った(図3)。乱流格子近傍では複数の衝撃波と流れの干渉が起こること、非圧縮の場合に比べて乱流の発達が遅くなることなどがわかった。また、高マッハ数を有する平面噴流のラージエディシミュレーションコードを開発し、噴流の発達に及ぼす圧縮性の影響を調査した[7]。直接数値計算結果との比較から、サブグリッドスケール以下の粘性散逸がローパスフィルタリ

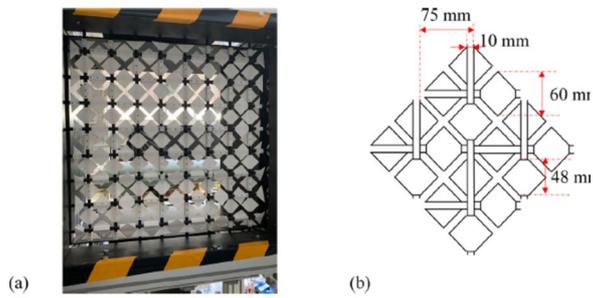


図1 (a) 製作した動的格子の写真 (b) 攪拌翼の詳細 [5]

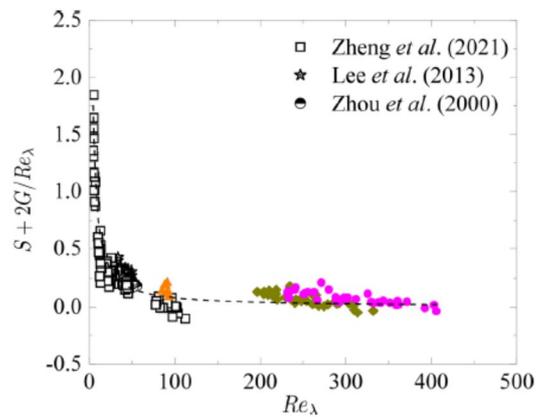


図2 エンストロフィ収支式における生成と破壊のバランスの乱流レイノルズ数依存性 [5]

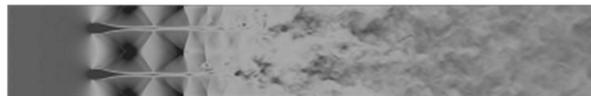


図3 流入マッハ数 0.5 の圧縮性格子乱流

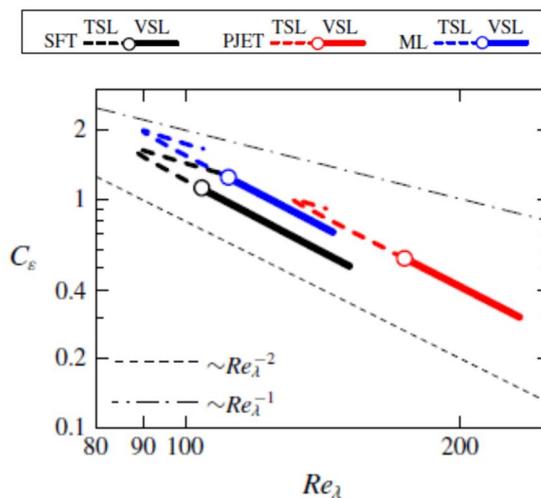


図4 無剪断乱流 (SFT), 平面噴流 (PJET), 混合層 (ML) の乱流/非乱流界面近傍における無次元散逸率の乱流レイノルズ数に対する分布 [9] (紙面の都合上 turbulent core の分布は省略)

ングにより適切にモデル化できることを示した。また、圧縮性平面噴流の直接数値計算結果から、高マッハになるほど乱流/非乱流界面の面積が減少し、それに伴い流体のエントレインメントが減少することがわかった[8]。

- (3) 乱流/非乱流界面からの距離で条件付けされた粘性散逸率を評価した結果、viscous superlayer (VSL)と turbulent sublayer (TSL)の一部 (VSL側)では Re_λ^{-2} 、TSLの一部 (turbulent core側)と turbulent coreでは Re_λ^{-1} のスケールリング則が見られた(図4)[9]。この結果は、乱流/非乱流界面近傍では乱流が非平衡であることを示すものである。さらに、紙面の都合上図を省略するが、乱流/非乱流界面近傍におけるエネルギー輸送について考察するため、スケール間エネルギー輸送方程式の各項を評価した[10]。その結果、乱流/非乱流界面近傍ではエネルギーの逆カスケードが起こっていること等が明らかとなった。

- (4) 二つの平面噴流が干渉する乱流場(図5)の直接数値計算結果[11, 12]から、非コルモゴロフ乱流が噴流吹出口近傍の低周波数域で見られ、この場合もスペクトルに $-5/3$ 乗の領域がみられることがわかった[11]。これらの傾向は格子乱流と同様であり、 $-5/3$ 乗のスペクトルがコルモゴロフの仮定が成立しないような乱流場においてもより普遍的にみられることを示唆している。平面噴流干渉場における非コルモゴロフ乱流は大きな負の歪度をもつ乱れにより発生し、噴流干渉により生じる大スケールの逆回転渦がその乱れの生成に寄与していることがわかった。さらに、スケール間エネルギー輸送を評価した結果、乱流が発達した位置で非線形エネルギー輸送項と散逸項がほぼバランスしていることが確認された[12]。

二つの角柱後流が干渉する乱流場(図7)の直接数値計算結果[13, 14]から、非コルモゴロフ乱流が高周波数域でみられ、スペクトルに $-5/3$ 乗の領域がみられることがわかった[13]。速度信号にフィルター操作を施すことにより、この高周波数域での非コルモゴロフスペクトルは、間欠的に発生する小スケールのバースト状の乱れ("extreme events")によるものであることがわかった[13]。さらに、Kármán-Howarth 方程式の各項を評価することにより、この乱流場におけるスケール間エネルギー輸送機構を明らかにした[14]。

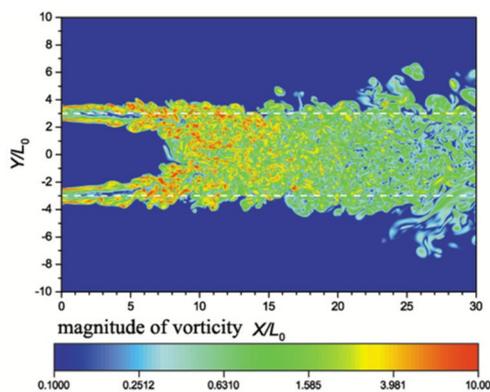


図5 平面噴流干渉の直接数値計算[11, 12]

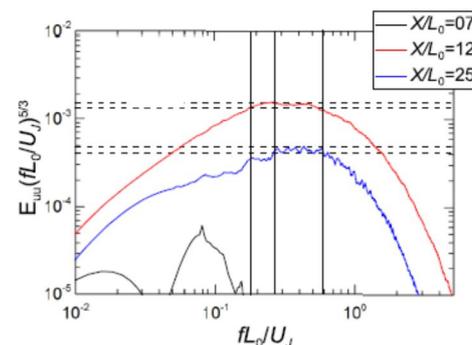


図6 平面噴流干渉場における主流方向速度変動のスペクトル。縦軸に $f^{3/5}$ を乗じているので縦軸一定の領域がスペクトルの $-5/3$ 領域を示す。Xはノズルからの距離、 L_0 は噴流出口幅、 U_j は噴流出口速度[11]

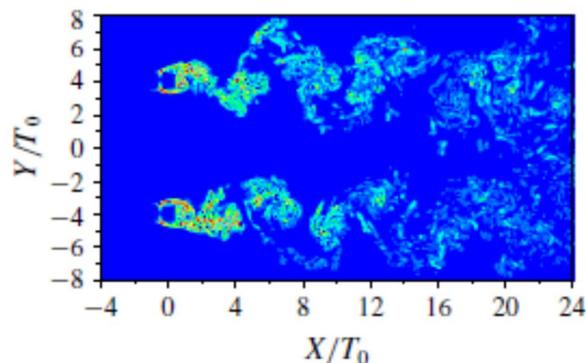


図7 角柱後流干渉の直接数値計算[13, 14]

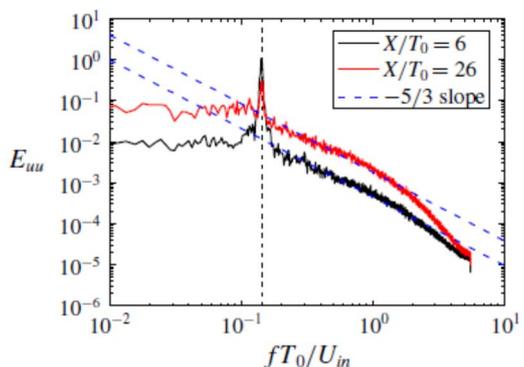


図8 角柱後流干渉場における主流方向速度変動のスペクトル。Xは角柱からの距離、 L_0 は角柱間距離、 U_{in} は流入速度[13]

まとめと今後の展望

従来の研究よりもより広範囲のレイノルズ数やマッハ数領域において、また、従来の研究では検討されてこなかった様々な乱流場において乱流の非平衡・非コルモゴロフ性が確認された。格子乱流については既往研究ではカバーされていなかった極低レイノルズ数域から高レイノルズ数域に渡る無次元散逸率の実測値を得ることができ、それらが従来の近似式でよく表されることを明らかにした。動的格子乱流場では無次元散逸率が従来報告されている格子乱流や減衰乱流の値よりもわずかに小さい値をとることがわかった。その理由を乱れの大スケールと小スケールの特性から説明した。さらに、動的格子乱流場においては、十分な一様等方性が満足されているにも関わらず、積分長が下流方向に一定値を取るという一様等方性乱流や静的格子乱流とは異なる結果が得られた。この傾向は、動的格子の近傍場での報告例[15]と一致し、本研究において初めて遠方場でも確認された。これはフラクタル格子下流の非平衡領域における結果と定性的に一致するものであるが、動的格子乱流場では散逸定数が一定値をとる平衡乱流の特性を示しているため、今後の研究が必要である。非平衡乱流場における無次元散逸率の非定常スケールリングとして $C_\varepsilon \sim Re_\lambda^{-1}$ が明らかにされていたが[16]、乱流/非乱流界面で明らかになった $C_\varepsilon \sim Re_\lambda^{-2}$ のスケールリングに対する理論的考察も今後必要である。

<引用文献>

- [1] N. Mazellier and J. C. Vassilicos, Turbulence without Richardson- Kolmogorov cascade, *Phys. Fluids*, **22**, 075101, 2010.
- [2] P. Valente and J. C. Vassilicos, The decay of turbulence generated by a class of multiscale grids, *J. Fluid Mech.*, **687**, 300-340, 2011.
- [3] P. Valente and J. C. Vassilicos, Universal dissipation scaling for non-equilibrium turbulence, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 214503, 2012.
- [4] J. Nedić, J. C. Vassilicos, and B. Ganapathisubramani, Axisymmetric turbulent wakes with new nonequilibrium similarity scalings *Phys. Rev. Lett.* **111**, 144503, 2013.
- [5] Y. Zheng, K. Nagata, and T. Watanabe, Turbulent characteristics and energy transfer in the far field of active-grid turbulence, *Phys. Fluids*, **33**, 115119, 2021.
- [6] Y. Zheng, K. Nagata, and T. Watanabe, Energy dissipation and enstrophy production/destruction at very low Reynolds numbers in the final stage of the transition period of decay in grid turbulence, *Phys. Fluids*, **33**, 035147, 2021.
- [7] Y. Tai, T. Watanabe, and K. Nagata, Implicit large eddy simulation of passive scalar transfer in compressible planar jet, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **93**, 1183– 1198, 2021.
- [8] R. Nagata, T. Watanabe, and K. Nagata, Turbulent/non-turbulent interfaces in temporally evolving compressible planar jets, *Phys. Fluids*, **30**, 105109, 2018.
- [9] T. Watanabe, C. B. da Silva, and K. Nagata, Non-dimensional energy dissipation rate near the turbulent/non-turbulent interfacial layer in free shear flows and shear free turbulence, *J. Fluid Mech.*, **875**, 321-344, 2019.
- [10] T. Watanabe, C. B. da Silva, and K. Nagata, Scale-by-scale kinetic energy budget near the turbulent/nonturbulent interface, *Phys. Rev. Fluids*, **5**, 124610, 2020.
- [11] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, and T. Watanabe, Dual-plane turbulent jets and their non-Gaussian velocity fluctuations, *Phys. Rev. Fluids*, **3**, 124604, 2018.
- [12] K. Hao, K. Nagata, and Y. Zhou, Scale-by-scale energy transfer in a dual-plane jet flow, *Phys. Fluids* **32**, 105107, 2020.
- [13] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, and T. Watanabe, Extreme events and non-Kolmogorov -5/3 spectra in turbulent flows behind two side-by-side square cylinders, *J. Fluid Mech.*, **874**, 677-698, 2019.
- [14] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, T. Watanabe, Y. Ito, and T. Hayase, Energy transfer in turbulent flows behind two side-by-side square cylinders, *J. Fluid Mech.*, **903**, A4, 2020.
- [15] D. O. Mora, E. M. Pladellorens, P. R. Turró, M. Lagauzere, and M. Obligado, Energy cascades in active-grid-generated turbulent flows, *Phys. Rev. Fluids* **4**, 104601, 2019.
- [16] J. C. Vassilicos, Dissipation in turbulent flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **47**, 95-114, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, T. Watanabe, Y. Ito, T. Hayase	4. 巻 903
2. 論文標題 Energy Transfer in Turbulent Flows behind two Side-by-Side Square Cylinders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Fluid Mech.	6. 最初と最後の頁 A4:1-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2020.611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Hao, K. Nagata, Y. Zhou	4. 巻 32
2. 論文標題 Scale-by-Scale Energy Transfer in a Dual-Plane Jet Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0022103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Tai, T. Watanabe, K. Nagata	4. 巻 93
2. 論文標題 Implicit Large Eddy Simulation of Passive Scalar Transfer in Compressible Planar Jet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Fluids	6. 最初と最後の頁 1183-1198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/flid.4924	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Watanabe, C. B. da Silva, K. Nagata	4. 巻 5
2. 論文標題 Scale-by-Scale Kinetic Energy Budget near the Turbulent/Non-Turbulent Interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 124610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.5.124610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Matsushima, K. Nagata, T. Watanabe	4. 巻 33
2. 論文標題 Wavelet Analysis of Shearless Turbulent Mixing Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 25109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Tai, T. Watanabe, K. Nagata	4. 巻 221
2. 論文標題 Multi-Particle Models of Molecular Diffusion for Lagrangian Simulation Coupled with LES for Passive Scalar Mixing in Compressible Turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers and Fluids	6. 最初と最後の頁 104886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2021.104886	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zheng, K. Nagata, T. Watanabe	4. 巻 22
2. 論文標題 Energy Dissipation and Enstrophy Production/Destruction at very Low Reynolds Numbers in the Final Stage of the Transition Period of Decay in Grid Turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 35147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041929	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Watanabe, C. B.da Silva, K. Nagata	4. 巻 875
2. 論文標題 Non-Dimensional Energy Dissipation Rate near the Turbulent/Non-Turbulent Interfacial Layer in Free Shear Flows and Shear Free Turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 321-344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.462	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, T. Watanabe	4. 巻 874
2. 論文標題 Extreme Events and Non-Kolmogorov -5/3 Spectra in Turbulent Flows behind two Side-by-Side Square Cylinders	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 677-698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Nagata, T. Watanabe and K. Nagata	4. 巻 30
2. 論文標題 Turbulent/Non-Turbulent Interfaces in Temporally-Evolving Compressible Planar Jets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5047395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai and T. Watanabe	4. 巻 3
2. 論文標題 Dual-Plane Turbulent Jets and their Non-Gaussian Velocity Fluctuations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 124604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.3.124604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Zhang, T. Watanabe and K. Nagata	4. 巻 94
2. 論文標題 Passive Scalar Mixing near Turbulent/Non-Turbulent Interface in Compressible Turbulent Boundary Layers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 44002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1402-4896/aafbfd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Zheng, K. Nagata, and T. Watanabe	4. 巻 33
2. 論文標題 Turbulent Characteristics and Energy Transfer in the Far Field of Active-Grid Turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 115119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0070912	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Y. Zhou, K. Nagata, Y. Ito, Y. Sakai, and Y. Hattori
2. 発表標題 On the Appearance of the $-5/3$ Scaling Law in Highly Spatially Intermittent Flows
3. 学会等名 JSPS Bilateral Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zheng, K. Nagata, and T. Watanabe
2. 発表標題 Turbulent Characteristics and Energy Transfer in the Far-Field of Active-Grid Turbulence
3. 学会等名 JSPS Bilateral Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zheng, T. Watanabe, and K. Nagata
2. 発表標題 Characteristics of Grid Turbulence in the Far Downstream Region
3. 学会等名 The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Zhou, Y. Ito, K. Nagata, T. Watanabe, K. Iwano, Y. Sakai, and Y. Hattori
2. 発表標題 Turbulent Energy Transport in Wakes behind Bars and Grids
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Nagata
2. 発表標題 On Non-Equilibrium, Non-Kolmogorov Turbulence
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鄭玉霖, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 格子乱流の発達と減衰過程
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松島哲也, 渡邊智昭, 長田孝二
2. 発表標題 Wavelet変換による無せん断乱流混合層の解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内優果, 渡邊智昭, 長田孝二, 佐宗章弘
2. 発表標題 圧縮性格子乱流の直接数値計算
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nagata, T. Watanabe
2. 発表標題 Energy Spectrum and Decay of Grid Turbulence
3. 学会等名 LMFL Seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagata, T. Watanabe, C. B. da Silva
2. 発表標題 Dissipation Rate near Turbulent/Non-Turbulent Interfaces
3. 学会等名 Workshop on Non-Equilibrium Turbulence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagata, T. Watanabe
2. 発表標題 Development and Decay of Grid Turbulence
3. 学会等名 Seminar in Nanjing University of Science and Technology (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長田孝二, 渡邊智昭
2. 発表標題 格子乱流のエネルギースペクトルとエネルギー減衰率について
3. 学会等名 日本機械学会流体工学部門 第9回せん断流の多様な機能の探究と先端科学技術への応用に関する研究分科会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Nagata, T. Watanabe and K. Nagata
2. 発表標題 Influence of Compressibility on Turbulent/Non-Turbulent Interface in Supersonic Planar Jet
3. 学会等名 15th International Conference on Flow 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
研究 分 担 者	渡邊 智昭 (Watanabe Tomoaki) (70772292)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	

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