

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01948

研究課題名（和文）乱流の大規模直接数値計算から探る原始惑星系円盤のダスト成長の新シナリオ

研究課題名（英文）A new scenario of dust growth in protoplanetary disks explored through large-scale direct numerical simulations of turbulence

研究代表者

石原 卓（Ishihara, Takashi）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：10262495

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：原始惑星系円盤のダスト成長の新シナリオ構築のため、乱流の大規模直接数値計算を活用した、高レイノルズ数乱流中のダスト粒子の運動追跡と衝突付着成長のシミュレーションコードの開発を行い、富岳を用いた大規模な数値実験とデータ解析を実施した。その結果、高レイノルズ数乱流中には限界速度以下で衝突付着成長を繰り返すことが可能なエンストロフィーが小さく、ダスト粒子が集中するような領域が存在し、質量の大きい粒子が実際に加速的に形成されることが確認できた。この結果は従来、乱流中のダスト粒子成長の障壁となっていた衝突破壊問題が実際の高レイノルズ数乱流において回避可能であるという新しいシナリオを示唆するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始惑星系円盤中の微惑星形成は成長したダスト粒子の衝突破壊問題や中心星落下問題等の障壁により完全なシナリオが得られていなかった。従来のシナリオは乱流中のダスト粒子の平均衝突速度の理論式に基づいたものであった。本研究は数値流体力学分野で実施されていた乱流の大規模な直接数値計算を活用し、経験則によらない乱流の役割の定量的理解に基づき、ダスト成長の新シナリオを構築することを目的としたものであった。得られた成果はダスト成長における乱流の役割のより具体的で定量的な理解を天文物理分野にもたらしたものと、その学術的意義が高い。また、数値流体力学分野と天文物理分野の融合研究の成功例として社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：To construct a new scenario for dust growth in protoplanetary disk turbulence, we developed simulation codes for tracking the motion of dust particles in high Reynolds number (Re) turbulence and collision and accretion growth using large-scale direct numerical simulations (DNS) of turbulence. We carried out large-scale numerical experiments and data analysis using Fugaku. The DNS shows that in high Re turbulence, low-entropy regions that may allow repeated collision and stick growth of dust particles below the critical velocity exist, and that dust particles with large masses can be formed at an accelerated rate. This result suggests such a new scenario that the bouncing or fragmentation barrier that has been a problem to dust particle growth in protoplanetary disks may be circumvented even in realistic high Re turbulence.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 ダスト成長 大規模直接数値計算 原始惑星系円盤 微惑星形成

## 1. 研究開始当初の背景

惑星形成の標準的シナリオでは、原始惑星円盤中のガスの乱流によって駆動されるダスト粒子が衝突・合体を繰り返し、km以上のサイズの微惑星を形成し、その後重力相互作用による合体で成長し惑星のサイズに至ると考えられている。しかし、乱流のエネルギー Spektrum から粒子の平均衝突速度を理論評価したものをを用いる従来の研究では、乱流中のダストの平均的な衝突相対速度が限界付着速度を超え、ダストが成長できないという衝突破壊問題は未解決であり、ダスト成長の完全なシナリオは得られていない。また、最近の観測では 10au より外側にサイズが  $100\mu\text{m}$  程度のダストがかなり多いことから、乱流によって極めて高濃度領域ができれば重力不安定を起こして微惑星が形成される可能性も考えられる。いずれの場合も原始惑星円盤中のガス乱流中のダスト粒子の振る舞い(集中と衝突過程)を正しく理解することが重要となる。

近年、乱流の大規模な直接数値計算(DNS)により、高レイノルズ数乱流の統計的性質や渦構造の理解が進んでいる。乱流中の慣性粒子の振る舞いについても乱流 DNS を活用した数値実験により、粒子の慣性の大きさに応じたクラスタリングが起き、粒子の平均衝突速度が従来の理論的評価の 1/2 程度になることや粒子の衝突速度に分布があるため成長して慣性の大きくなった粒子も低速衝突しうるため付着率が従来の理論予測よりも大きくなりうるということがわかっていた。そこで、より大規模な乱流 DNS を用いて、高レイノルズ数乱流中で粒子の衝突過程の理解を深め、粒子の付着成長シミュレーション実験を実現させることで、ダスト粒子成長のシナリオ構築のために必要な「乱流の役割」の理解が飛躍的に高まるはずであるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、乱流の大規模 DNS による恣意性のない結果によって、天文分野の未解決問題「原始惑星系円盤中の微惑星形成過程」を解明するためのブレークスルーをもたらすこと、そして、原始惑星系円盤乱流中のダスト成長の新たなシナリオを提案することである。具体的には、従来の理解が「渦がダスト粒子を排出する(ダスト粒子は成長するほど大きい渦の影響で高速度となる)ため大きい粒子ほど衝突破壊しやすい」に対し、新しい考え方「高 Re 乱流の階層的な渦構造による粒子クラスタリングが、慣性の大きいダスト同士の低速接触の繰り返しによる成長、すなわち衝突破壊回避を可能にする」シナリオを検証する。また、従来の理解が「乱流中の渦により粒子集中は起きるが重力不安定を起こすに至らない」に対し、新しい考え方「高レイノルズ数乱流中の階層的な渦構造は、慣性の小さい粒子の階層的なクラスタリング、そして重力不安定を起こす高密度を可能にする」シナリオを検証する。

以上のシナリオを検証するためには、高レイノルズ数乱流中のダストの衝突付着についての信頼性の高い統計データを得るため、膨大な数の粒子追跡が必要となる。そこで本研究では、大規模な乱流 DNS で膨大な数の粒子追跡や粒子の衝突付着シミュレーションを可能にするコードの開発も行い、それをを用いた大規模な数値実験も実施する。また、高レイノルズ数の非圧縮性乱流や圧縮性乱流の流れ構造やその中のダスト粒子の運動についての一般的な理解を深め、現実的な乱流中の微粒子の運動が関係する現象の解明に役立つ知見を得ることも本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

(1) 「ダスト粒子の階層的な集中による重力不安定」について、粒子集中による重力不安定の可能性を明らかにするため乱流の大規模 DNS を用いた膨大な数の粒子追跡を可能とするコードを開発し、大規模なシミュレーションを実施する。得られた結果を解析し、重力不安定シナリオの構築と評価を行う。

(2) 「衝突破壊問題回避の可能性」について、乱流中で実際に付着成長し続ける粒子(Lucky Particle)の存在を確実なものとして実証し、その統計的な裏付けを与えるため、高レイノルズ数乱流の大規模 DNS を用いたダスト粒子の衝突付着シミュレーションのコードを開発し、大規模な数値実験を実施する。高レイノルズ数乱流中の乱流クラスタリングの新しい理解に基づき、衝突破壊問題回避の可能性を評価しダスト成長のシナリオを構築する。

## 4. 研究成果

(1) 乱流の直接数値計算で慣性粒子を追跡するコードは粒子の通し番号に 8Byte 整数を用いることで格子点数  $4096^3$  の乱流 DNS 中で 8 種類の慣性粒子を各々  $2048^3$  個ずつ追跡可能にした。これにより高 Re 乱流場中で粒子衝突の信頼性の高い統計量が解析可能となった。

- ① 構築した慣性粒子データの解析により、乱流中で考えるスケールが大きいほど慣性の大きい粒子が局所的に最も高濃度になり得て、慣性の大きさを表すストークス数  $St$  が  $St=5, 10$  と大きい粒子が平均の数十倍の濃度になり得ることが分かった。
- ② 計算領域を  $8 \times 8 \times 8$  や  $16 \times 16 \times 16$  の小領域に分け、各小領域における粒子数、衝突粒子数、付着率、エンストロフィー ( $\Omega$ ) 等の相関を調べた (各小領域の大きさは各々  $0.72L$  と  $0.36L$ , ここで  $L$  は積分長)。その結果、高  $\Omega$  の領域では衝突が促進されるが付着率は下がること、低  $\Omega$  で粒子数が多い領域で粒子の衝突付着数が多いこと等の知見が得られた。
- ③ 高  $Re$  乱流には強い渦の組織構造があることが知られているが慣性の大きい  $St=5, 10$  の粒子等はそれらの組織構造から排出されて分布することが確認できた (図 1)。

以上により、高  $Re$  乱流中で慣性の大きい粒子の最大数密度は平均の数十倍であり重力不安定を起こす程には大きくないことが分かった。一方、近年ある程度成長した固体粒子が中心星に落ちる際にストリーミング不安定を起こして、微惑星成長が起こるといモデルが注目されているが、得られた粒子数密度はストリーミング不安定を起こしうる大きさであることが分かった。

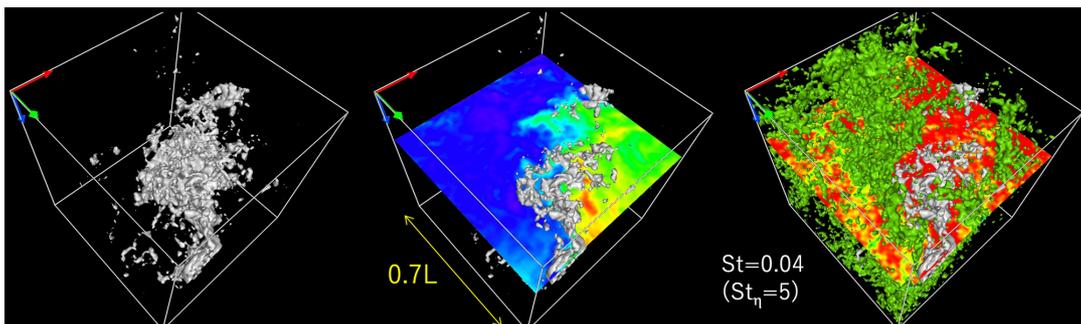


図 1. 計算領域の  $1/8$  の小領域で平均エンストロフィーの最も高い領域における (左) 高渦度領域、(中) 高渦度領域周りの速度分布 (右) 慣性の大きい粒子の高濃度領域

- (2) 乱流の直接数値計算を用いた粒子の衝突付着シミュレーションは粒子の衝突判定を行う必要があるが、従来コードは衝突判定を 1 プロセスで行っていたため扱える粒子数に限界があったがターゲットセルと周囲のセルにおける粒子の衝突判定を同時に行うことにより並列処理が可能となり、格子点数  $2048^3$  の乱流 DNS 中で  $1024^3$  個、格子点数  $4096^3$  の乱流 DNS 中で  $2048^3$  個の粒子の衝突判定を行う粒子の衝突付着シミュレーションが可能となった。

- ① 開発したコードを活用した数値実験 (乱流強度  $110\text{m/s}$  中で限界付着速度を  $6\text{m/s}$  とした Fluffy 粒子もしくは限界付着速度を  $1\text{m/s}$  とした Compact 粒子の衝突付着成長シミュレーション) により、Fluffy 粒子と Compact 粒子のどちらの場合も成長して大きくなった粒子ほど成長率が大きく、加速的に成長する結果を得ることができた (図 2)。

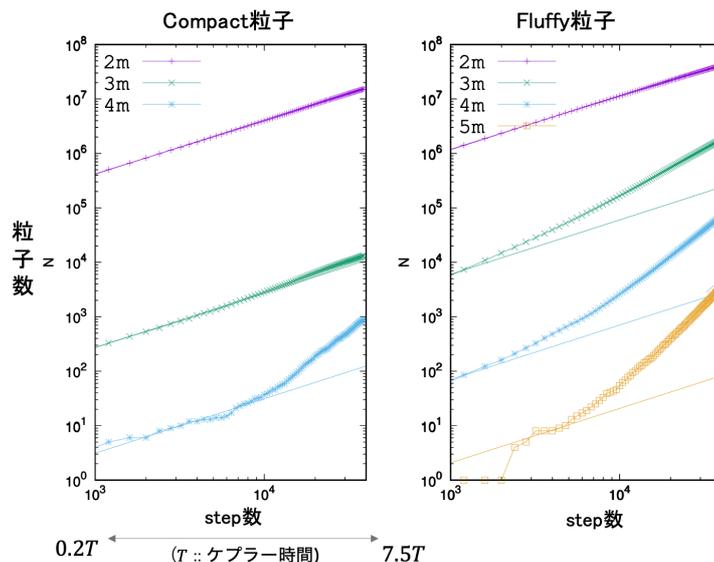


図 2. 乱流強度  $110\text{m/s}$  中で限界付着速度を  $6\text{m/s}$  とした Fluffy 粒子もしくは限界付着速度を  $1\text{m/s}$  とした Compact 粒子の衝突付着成長シミュレーションによって得られた粒子数の時間変化. ここで  $2m, 3m, \dots$  は 2 粒子, 3 粒子,  $\dots$  の衝突併合によってできた粒子を表す。

- ② ①の衝突付着シミュレーションで低速で衝突付着成長できた粒子同士の衝突位置におけるエンストロフィー $\Omega$ と $Q$ 値 ( $Q=\Omega-S$  で $S$ はストレイン)を解析した結果、 $\Omega$ の平均値が900の乱流場中で付着成長した位置における $\Omega$ の中央値は300程度以下と小さく、 $Q$ 値の平均が200程度であることを考慮するとエンストロフィーが小さくエンストロフィよりストレインが少し卓越する領域で付着成長を繰り返して大きな粒子が形成されていることが分かった。
- ③ 付着成長シミュレーションで得られたデータから粒子の付着率を評価すると(1)の粒子追跡シミュレーションで得られた付着率より若干大きいことが分かった。これは衝突付着成長した粒子は低速衝突しやすい領域に集まる傾向があることを示唆している。

以上により、高レイノルズ数乱流中で粒子の平均衝突速度が粒子の限界付着速度を超えてしまうような状況においても、エンストロフィーが小さく、エンストロフィよりストレインが少し卓越する領域でダスト粒子の加速的な付着成長が可能であること、および、衝突付着成長した粒子は低速衝突しやすい領域に集まる傾向があることが分かった。

- (3) 乱流中の慣性粒子の運動が重要となる現象として、原始惑星系円盤中のダスト成長のみならず、積乱雲中の雨粒の成長や火山灰の拡散なども考えられる。これらの現象の理解の難しさは乱流そのものの難しさと慣性の大きさに応じて流体運動への追従性が異なる粒子の運動の理解の難しさにある。本研究と関連して行った乱流 DNS および乱流 DNS を用いた粒子追跡で得られた結果や知見を以下に簡単にまとめる。

- ① [流体の圧縮性について] 原始惑星系円盤のガスは弱圧縮性であることが知られている。従って、原始惑星系円盤ガスの乱流によって駆動されるダストの衝突付着成長を議論するにあたって、ガスの圧縮性がどの程度ダストの衝突付着成長に影響を及ぼすかについて理解しておく必要がある。我々は弱圧縮性乱流および非圧縮性乱流の双方の直接数値計算を用いてその中で運動するダスト粒子の衝突に関する統計量の比較を行なった。その結果、弱圧縮性乱流中のダストの運動は主に流れの非圧縮成分によって駆動され非圧縮性乱流によるダストの運動と大差ないことが確認できた。これにより原始惑星系円盤ガス乱流中のダストの運動は理論的にも扱いが比較的容易な非圧縮性乱流を仮定して議論して問題ないことが保証された。
- ② [重力の影響について] 積乱雲中で雲粒から雨粒が急激に成長することが知られているがその正確なメカニズムはよく分かっていない。我々は乱流中の慣性粒子が重力の影響を受ける場合を想定した数値実験を行い、雲粒の成長の初期の段階では乱流駆動による衝突が重要であるが、その後は一旦成長した大きい粒子の速い沈降による小さい粒子との衝突併合が重要であることが確認できた。これと関連して、慣性の大きい粒子と小さい粒子は相関する渦のスケールが異なるため乱流中の運動も異なり濃集の仕方も異なる。慣性の小さい粒子の高濃度領域に慣性の大きい粒子が突入することにより衝突併合が高効率に起きることが期待できるが慣性の異なる粒子対の衝突は一般に高速となり限界付着速度を超えやすい。従って、低速衝突が必要なダスト成長はほぼ同一サイズの粒子同士の衝突が重要になると考えられる。
- ③ [渦組織構造と慣性粒子の分布について] 乱流によって駆動される慣性の大きい粒子の分布を可視化するとしばしば大きな空隙が観察される。渦度の大きさの可視化により慣性の大きい粒子の空隙には強い渦の組織構造があることが観察される。そこで、慣性の大きい粒子群に対して位相的データ解析を実施したところ、しばしばスケールの大きいリングが抽出された。そのリングに近い閉曲線に沿って計算した速度の循環は無作為に置いたリングで計算した循環より優位に大きいことが確認できた。これは渦の組織構造としての渦管が強い循環をもち慣性の大きい粒子を排除して管状の空隙ができたことによると考えることができる。
- ④ [レイノルズ数依存性について] 乱流中にはエネルギー散逸率やエンストロフィーが極端に大きい値となる場合があり、extreme events と呼ばれている。Extreme events はレイノルズ数が高いほど顕著となり、エネルギー散逸率やエンストロフィーの確率密度関数のテールが高 Re ほど大きいこと(間欠性が強いこと)が観察されている。我々はエネルギー散逸率やエンストロフィーのテール形状に関係する高次モーメントや最大値の代理となる物理量のレイノルズ数依存性を説明する(高 Re 乱流 DNS における渦の組織構造の観察に基づく)現象論的なモデルを提案することに成功した。なお、高 Re ほど間欠性が強いことと関連して高 Re ほどエンストロフィーが平均以下となる非アクティブ領域の割合も増える。これは高 Re ほど慣性の大きい粒子が低速衝突できるような領域の体積が増加することを意味している。

- ⑤ [乱流による粒子拡散について]乱流によって促進される物質拡散は乱流の顕著な役割のひとつであり、リチャードソンの相対粒子拡散の検証は古典的な乱流の研究テーマの一つである。近年、高 Re 乱流中にはエンストロフィーやエネルギー散逸率の大きいアクティブな領域とそれらの値が小さい非アクティブな領域が強いコントラストを持って存在することが観察され、強い渦の組織構造をもつアクティブ領域における粒子拡散は古典的な理論の枠組みでは説明できないことが指摘されていた。我々は最もアクティブな領域 (top) , 中間値領域 (middle) , 最も比較アクティブな領域 (bottom) に初期位置のある流体粒子と慣性粒子の相対拡散 (粒子間距離の二乗平均)  $\langle \delta x^2 \rangle$  の時間変化について調べ、それらが各領域の初期の局所的なエネルギー散逸率で比較的良好に説明できることを見出した。また、慣性粒子の相対拡散は流体粒子と類似しているが相対拡散を決定する Lagrange 的な速度相関の振る舞いが流体粒子と慣性粒子で異なることを見出した。
- ⑥ [乱流による慣性粒子の集中と拡散について]乱流中の慣性粒子は乱流によってエンストロフィーの弱い領域に濃集される傾向がある一方、乱流による相対拡散によって濃度が薄められる傾向もある。我々は乱流 DNS によって得られた慣性粒子の運動のデータベースを用いて、乱流中に高濃度に濃集した慣性粒子の相対拡散について調べた。その結果、乱流によって高濃度に濃集した慣性粒子も⑤の bottom の領域の粒子のように比較的ゆっくりではあるがエネルギー保有渦の時間スケールでは再び拡散することが確認できている。

以上のように、乱流の大規模 DNS に基づいた数値実験やデータ解析により、乱流中の粒子運動が重要となる現象の理解が深まっている。いずれも従来、経験的にしか議論できなかった乱流の役割について、信頼性の高い結果に基づき非経験的な議論を可能にしておき、天文物理分野のみならず気象分野や環境や工学の諸分野にも応用の効く新しい知見を提供していると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sakurai Yoshiki、Ishihara Takashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Direct numerical simulations of compressible isothermal turbulence in a periodic box: Reynolds number and resolution-level dependence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 084606-1,24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.8.084606	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 Elsinga G.E.、Ishihara T.、Hunt J.C.R.	4. 巻 974
2. 論文標題 Intermittency across Reynolds numbers -- the influence of large-scale shear layers on the scaling of the enstrophy and dissipation in homogenous isotropic turbulence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A17-1,32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2023.799	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
1. 著者名 Sakurai Yoshiki、Ishihara Takashi、Furuya Hitomi、Umemura Masayuki、Shiraishi Kenji	4. 巻 911
2. 論文標題 Effects of the Compressibility of Turbulence on the Dust Coagulation Process in Protoplanetary Disks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 140(1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe9ba	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 Kaneda Yukio、Ishihara Takashi、Morishita Koji、Yokokawa Mitsuo、Uno Atsuya	4. 巻 929
2. 論文標題 Statistics of local Reynolds number in box turbulence: ratio of inertial to viscous forces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A1(1-19)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.806	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 Elsinga G.E., Ishihara T., Hunt J.C.R.	4. 巻 932
2. 論文標題 Non-local dispersion and the reassessment of Richardson's t3-scaling law	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A17(1-32)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.989	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

1. 著者名 Ishihara Takashi, Kaneda Yukio, Morishita Koji, Yokokawa Mitsuo, Uno Atsuya	4. 巻 5
2. 論文標題 Second-order velocity structure functions in direct numerical simulations of turbulence with R up to 2250	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 104608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.5.104608	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 Elsinga Gerrit E., Ishihara Takashi, Hunt Julian C. R.	4. 巻 476
2. 論文標題 Extreme dissipation and intermittency in turbulence at very high Reynolds numbers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20200591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspa.2020.0591	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 梅村雅之、石原 卓	4. 巻 39(2)
2. 論文標題 宇宙物理におけるナビエ・ストークス方程式の直接数値計算 原始惑星系円盤乱流中のダスト成長	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 シミュレーション	6. 最初と最後の頁 101-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Ida Shigeru, Guillot Tristan, Hyodo Ryuki, Okuzumi Satoshi, Youdin Andrew N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A13 ~ A13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039705	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 Hyodo Ryuki, Guillot Tristan, Ida Shigeru, Okuzumi Satoshi, Youdin Andrew N.	4. 巻 646
2. 論文標題 Planetesimal formation around the snow line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A14 ~ A14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202039894	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35件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Takashi Ishihara
2. 発表標題 Domain dependence of relative diffusion of fluid and inertial particles in high Reynolds number turbulence
3. 学会等名 Current Advances in Turbulence and multiphase flowS - 24CATS, OIST Seaside House (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takashi Ishihara
2. 発表標題 Large-scale direct numerical simulations of high Reynolds number turbulence
3. 学会等名 Satellite Workshop on High Reynolds Number Turbulence, Nagoya Institute of Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takashi Ishihara
2. 発表標題 DNS studies on the processes of particle growth in high Reynolds number turbulence
3. 学会等名 5th International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya Institute of Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 原始惑星系円盤の乱流中でのダスト成長
3. 学会等名 「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム, 筑波大学・東京キャンパス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徳増 晃平, 浦 覚斗, 石原 卓, 金田 行雄
2. 発表標題 乱流の慣性小領域における相対粒子拡散のLagrange的速度相関
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻井 幹記, 石原 卓, 竹上 諒, 松本 泰生, 横川 三津夫
2. 発表標題 一様等方性圧縮等温乱流の高解像度直接数値シミュレーション
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Ishihara, Naoya Okamoto, Mitsuo Yokokawa, Yukio Kaneda
2. 発表標題 Effects of arithmetic precision in large-scale direct numerical simulation of incompressible turbulence in a periodic box
3. 学会等名 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, Washington, DC (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本直也, 石原卓, 横川三津夫, 金田行雄
2. 発表標題 3次元非圧縮一様等方性乱流大規模DNSにおける丸め誤差の影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023, 東京農工大学小金井キャンパス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石原卓, 河原昌平, 梅村雅之
2. 発表標題 原始惑星系円盤乱流におけるダスト成長のシミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2023, 東京農工大学小金井キャンパス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Ishihara
2. 発表標題 Large-Scale Direct Numerical Simulations of Canonical Turbulence
3. 学会等名 CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe International Conference Center (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Ishihara, Hiroki Morinaka, Masaru Inatsu
2. 発表標題 Vortical structures in high Reynolds number turbulence - clues from DNS results
3. 学会等名 ERCOfTAC Symposium "Multiphysics critical flow dynamics involving moving/deformable structures with design applications," Toulouse (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石原卓, 森中宏樹
2. 発表標題 On the role of high Reynolds number turbulence in the dust coagulation process in a protoplanetary disk
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原昌平, 梅村雅之, 石原卓
2. 発表標題 原始惑星系円盤における乱流とダスト成長
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮本 理史, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の速度勾配テンソルのレイノルズ数依存性についてのDNSデータ解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 元塚 博貴, 櫻井 幹記, 石原 卓
2. 発表標題 一様等方性圧縮等温乱流の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦 寛斗, 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流中の2粒子拡散 のLagrange速度相関のデータ解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳増晃平, 浦 寛斗, 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の集中と拡散
3. 学会等名 日本流体力学会 中四国・九州支部 第30回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原昌平, 梅村雅之, 石原卓
2. 発表標題 原始惑星系円盤における乱流中のダスト成長
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 元塚 博貴, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の微細渦構造周りの慣性粒子の運動の数値 解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森中 宏樹, 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の運動の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本 理史, 石原 卓, 金田行雄
2. 発表標題 乱流の慣性小領域の渦構造についてのDNSデータ解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浦 覚斗, 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流中の流体粒子と慣性粒子の拡散過程のDNSデータ解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井 幹記, 石原 卓, 横川 三津夫
2. 発表標題 一様等方性圧縮性乱流の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井 瑞貴, 櫻井 幹記, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中で鉛直重力の働く慣性粒子の衝突過程のDNSデータ解析
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Ishihara
2. 発表標題 DNS data analysis of the collision processes of inertial particles in high Reynolds number turbulence
3. 学会等名 4th International Workshop on Cloud Turbulence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 宇宙物理における乱流現象解明のための計算科学 —原始惑星系円盤乱流中のダスト成長—
3. 学会等名 2021 GFD オンラインセミナー (第 6 回) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 省吾, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の慣性粒子の分布の位相的データ解析
3. 学会等名 日本応用数理学会 2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白石 啓貴, 櫻井 幹記, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の慣性粒子の衝突・付着現象理解のための数値解析2
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 森中宏樹, 石原 卓, 稲津 將
2. 発表標題 台風に伴う気象現象と流れ構造の関係のデータ解析
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 櫻井 幹記, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の多重スケール流れ構造と粒子衝突統計の関係についての数値解析
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 浅井 瑞貴, 石原 卓
2. 発表標題 乱流中の慣性粒子の衝突過程に対する重力の影響のDNSデータ解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流中の微粒子運動のデータ科学
3. 学会等名 工学と数学の接点を求めて 大阪大学MMDSモデリング部門主催 流体工学・データサイエンスセッション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 高レイノルズ数乱流のデータ科学プラットフォームの構築
3. 学会等名 JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第12回シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 カノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原 卓
2. 発表標題 乱流の大規模DNSを用いた大気汚染物質拡散データベースの構築
3. 学会等名 第7回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

石原研究室(Ishihara Laboratory) <a href="http://www.mtds.okayama-u.ac.jp/faculty_members/ishihara/">http://www.mtds.okayama-u.ac.jp/faculty_members/ishihara/</a>
---

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	奥住 聡  (Okuzumi Satoshi)  (60704533)	東京工業大学・理学院・准教授   (12608)	
研究分担者	梅村 雅之  (Uemura Masayuki)  (70183754)	筑波大学・計算科学研究センター・教授   (12102)	
研究分担者	木村 芳文  (Kimura Yoshifumi)  (70169944)	名古屋大学・多元数理科学研究科・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			
オランダ	Delft University of Technology			
英国	University College London			