

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04271

研究課題名(和文)乱流中での球形および非球形大粒子の衝突機構に対する数値研究

研究課題名(英文) Numerical simulations of turbulent collisions of spherical and non-spherical large particles

研究代表者

大西 領 (ONISHI, Ryo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(地球情報基盤センター)・グループリーダー

研究者番号：30414361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：頻発する局所集中豪雨の予測を高精度化することを目的として、雲内乱流の影響を考慮した降雨・降雪粒子(球形および非球形大粒子)の急成長モデルの構築に資する知見を得た。具体的には、Lagrangian Cloud Simulator(LCS)と呼ばれる大規模混相DNS法に、最新の埋め込み境界法を統合した大規模粒子解像DNS法を新規開発した。さらに、様々な条件における詳細衝突統計量を取得することにより、球形および非球形大粒子の乱流衝突機構を解明した。さらに、有限サイズ格子で潤滑層反発力を精度良く評価できるモデルを開発し、乱流の影響を考慮できる降雨・降雪粒子の衝突因子モデルの開発に資する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流の影響を考慮できる降雨・降雪粒子の衝突因子モデルの開発に資する知見を得たことにより、頻発する局所集中豪雨の予測を高精度化に貢献した。また、本研究は混相乱流現象という工学が得意とする分野と、雲という気象分野とが密接に関係する分野横断的研究である点も大きな特色と言え、豪雨予測精度向上という安心・安全な社会の構築への貢献を見据えた基礎研究である。さらに付け加えれば、気象分野だけでなく、宇宙物理分野では微惑星形成過程(ダスト併合過程)の解明、また、噴霧燃焼や微粉炭燃焼の最適設計などの別分野への応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：In order for contributing to improve the prediction of frequent localized heavy rainfall, we aim to construct a rapid growth model of rainfall and snow particles (spherical and non-spherical large particles) considering the effects of turbulence in clouds. Focusing on the collision growth process, we have established a large-scale parallel numerical simulation method that calculates collision statistics while resolving particles moving in turbulence and the flow around them. We have obtained detailed collision statistics under various conditions, on which the turbulent collision model of spherical and non-spherical large particles will be based. Furthermore, we have developed a reliable lubrication model that can estimate the lubrication layer force with finite grids. This model can contribute to develop a reliable collision model for rainfall and snow particles that can consider the effects of turbulence.

研究分野：環境流体工学

キーワード：混相流 粒子解像計算 粒子衝突 乱流

## 1. 研究開始当初の背景

豪雨による人的・経済的被害を最小限に抑えるために、豪雨予測の高精度化が急務の課題である。近年の目覚ましいスーパーコンピュータの進歩に伴い、気象予測モデルの時空間解像度は着実に向上してきた。しかし、現在の気象モデルは、降雨・降雪粒子の成長を計算する際に流れ場の状態を考慮しないため、激しく乱れた状態にある雲（積雲、積乱雲など。乱流雲とも呼ばれる）と比較的穏やかな状態にある雲（層雲など）の違いを表現できないという問題を抱える。雲内乱流が雲粒の衝突成長を促進するという説があるが、現在の気象モデルではその促進効果を考慮できないため、豪雨をもたらすような積乱雲中での粒子成長を過小評価する可能性が考えられる。本研究はこの点に着目し、粒子の衝突成長プロセスの予測信頼性の向上を通じて豪雨予測の高精度化に資することを目標とする。

実際、近年の直接数値計算 (DNS; Direct Numerical Simulation) を用いた研究により、小さな雲粒子の成長過程に関しては、乱流が微小水滴の衝突成長を大きく促進することが証明された (例えば、Shaw 2003; Grabowski & Wang 2013; Onishi & Seifert 2016 など)。さらに、その乱流による成長促進効果までを考慮した雲粒子成長モデルが提案され始めている状況である (Seifert et al. 2010)。ここで言う“小さな粒子”とは、乱流の最小スケールであるコルモゴロフスケール  $\eta$  に比して微小 (つまり、粒子半径  $r \ll \eta$ ) な慣性粒子を指す。このように理想的な微小粒子の場合には、粒子を質点として扱う方法 (質点近似) やストークス抗力モデルを用いることができるため、粒子計算の負荷は比較的小さい。一方、豪雨・豪雪時に見られるような大きな降雨粒子 (球形粒子) や降雪粒子 (非球形粒子) に関しては、乱流の影響の解明が遅々として進んでいない状況である。なお、本研究で“大きな粒子”という場合、 $r \geq \eta$  と  $Re_p > 1$  の二つをほぼ同意で使用する。厳密には分けて議論する必要があるが、大気中の雲粒子を想定した場合にはおおよそ同意と考えて問題ない。現実降雨・降雪粒子の場合、ストークス流れを仮定するような解析的アプローチが難しく、必然的に、計算負荷が甚大となる。現状では、静止流体中の場合であっても、わずかなデータしかなく、しかも既存データは2桁のばらつきをもっており、定量的予測という目的に対しては、その信頼性は乏しい (Pruppacher and Klett 1997; Khain et al. 2000)。乱流中の場合に関しては、当然より厳しい状況であり、数値手法が未発達なために、現実降雨・降雪粒子に関する信頼できる乱流衝突統計量は皆無である。そのため、現状では、理想微小球形粒子の衝突モデルとわずかな既存データを組み合わせ、なんとか外挿・経験モデルを構築している状況であり、乱流による衝突成長促進効果は考慮されていない。この状況を打破し、信頼性の高い豪雨予測を実現するためには、大規模並列計算により、球形および非球形大粒子の乱流衝突統計量に関する信頼性の高いデータセットを構築した上で、乱流の影響を考慮した衝突成長モデルを構築する必要がある。

## 2. 研究の目的

頻発する局所集中豪雨の予測を高精度化することを目的として、雲内乱流の影響を考慮した降雨・降雪粒子 (球形および非球形大粒子) の急成長モデルの構築を目標とする。特に、衝突成長過程に着目し、乱流中を運動する粒子およびその周りの流れを解像しながら衝突統計量を算出する大規模並列数値シミュレーション法を確立した上で、様々な条件下における詳細衝突統計量データを取得することにより、球形および非球形大粒子の乱流衝突機構を解明する。さらに、衝突に重要な因子である潤滑層反発力を考慮した上で、降雨・降雪粒子の乱流衝突因子モデルの開発に資する知見を得る。

### 3. 研究の方法

研究代表者の大規模混相 DNS 法に関する知見・経験と、研究分担者の有する埋め込み境界法 (Immersed Boundary, IB) 法に関する知見と経験を元に、将来の超並列計算を見据えた大規模並列粒子解像 DNS コードを新規開発する。その中で、潤滑層反発力モデルの開発と実装法の検討も行う。並行して、球形大粒子シミュレーションに関して、コード検証の上、球形大粒子の衝突統計量の取得および解析を行う。衝突統計量の取得および解析を開始した後は、乱流衝突統計量のレイノルズ数依存性を明らかにするための大規模並列計算の最適化を行った上で乱流衝突統計量を取得する。

### 4. 研究成果

#### (1) 開発した粒子解像混相乱流計算法の概説

対象とする非圧縮流体の支配方程式は連続の式と Navier-Stokes 方程式である。対流項の差分には保存型 4 次中心差分スキーム、粘性項の差分には 4 次中心差分法を用いる。時間進行の計算には 2 次の Runge-Kutta 法を用い、時間発展後の速度が連続の式を満たすように、速度と圧力を同時緩和させながら反復計算する HSMAC 法を用いる。

固体が存在する計算格子において、流体と固体の界面での運動量交換を体積力型埋込境界法 (ISM<sup>3,4,5</sup>) で表現する。ある計算格子の代表速度  $u$  (太字はベクトルを表す) は以下のように定義される。

$$\mathbf{u} = (1 - \alpha_s)\mathbf{u}_f + \alpha_s\mathbf{u}_s \quad (1)$$

$u_f$  は流体の速度、 $u_s$  は固体の速度である。 $\alpha_s$  は計算格子における物体の体積率であり、物体 (固体) を含まない格子では 0、界面を含む格子では 0~1、物体内部では 1 と定義される。各時間ステップにおいて、 $u$  に対する流体方程式を解いた後、得られた  $u$  と物体 (本研究の場合、粒子) の運動方程式から得られる  $u_s$  から、式(1)を使って  $u_f$  を求める。さらに、流体と物体の速度差  $u_f - u_s$  に基づく流体-物体間の体積力を算出し、流体と物体の運動方程式に反映させる。これにより、流体と物体の相互作用を考慮した流体と物体の運動計算を行う。

#### (2) 粒子解像混相乱流計算法による乱流衝突統計量の算出

開発した埋め込み境界法に基づく粒子解像直接数値計算 (DNS) 法を用いて、粒子レイノルズ数  $Re_p$  が 1 よりも大きい大粒子間の衝突統計量の取得を継続した。具体的には、始めに、層流の中の多数粒子系を対象として、衝突頻度、クラスタリング効果を定量的に明らかにした。さらに、乱流の中の多数粒子系を対象として同様の解析を行った。512<sup>3</sup> 格子を用いた流体計算領域中に 4,096 粒子を混入した計算 (図 1 参照) から、質点近似に基づき近接粒子間の流体力学的相互作用力 (Hydrodynamic Interaction) を考慮する計算法では再現されない粒子クラスタリングを、粒子解像計算によって再現することができた。計算コードの最適化により、最大規模の計算として 2000<sup>3</sup> 格子を用いた流体計算領域中に 51.2 万粒子を混入した計算にも成功している。

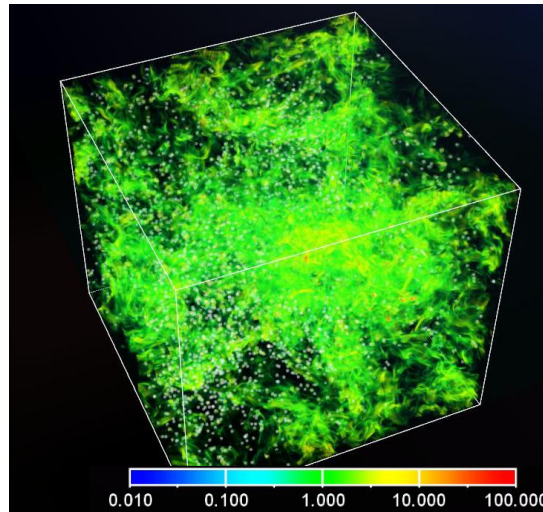


図 1:  $512^3$  計算格子による粒子径解像結果の可視化図 .計算格子の 5 倍の直径を持つ粒子 4,096 個の運動が追跡された . $Re = 220$  ,粒子の質量分率は 4% ,粒子ストークス数  $St=80$  であった . カラーカウンターは流れ場のエネルギー散逸率 (log スケール) .

そして、乱流クラスタリング統計量を得ることができた。粒子慣性、粒子サイズを様々に変化させて得られた統計量を解析することにより、粒子間衝突や粒子クラスタリング機構に及ぼす有限サイズ効果や粒子周り流れを介した粒子間反発力の影響も明らかにした。以上により、これまでに得られたことのない乱流衝突統計量を取得することができ、球形・大粒子間の乱流衝突機構を解明することができた。

### (3) 潤滑層反発力

変形する粒子や非球形粒子を含む流れでは、粒子間における潤滑力は Reynolds 潤滑方程式に基づいて算出される。しかしこの潤滑方程式が仮定する幾何学的・力学的な条件を満たす領域は極めて狭く、非球形粒子に対する潤滑層反発力の正確な算出は困難な場合が多い。そこで本課題では、非球形粒子が接近する際に作用する潤滑力を（従来の潤滑モデルと比して）精度よく求めるモデルの開発を目指した。

提案したモデルは、物体形状の曲率が十分小さいという仮定の下で粘性流れの基礎方程式を解いて得られるもので、従来の潤滑解には含まれない新奇な圧力成分を有する。その特徴は、間隙に発達する Poiseuille 速度成分の長手方向変化率に比例する形を取ることである。球形および非球形物体が相対運動する問題設定において、新しい潤滑モデルによって予想される速度・圧力分布を厳密解や高精度数値解と比較したところ、理論の仮定の範囲で良好な一致を得た。図 2 に比較の一例を示した。ここでは潤滑の効果が卓越する問題設定として平板と相対運動する物体を採り上げ、提案した潤滑モデルで圧力分布を計算したところ、厳密解に見られる特徴的な分布を再現することができた。これは従来の Reynolds 潤滑方程式に基づく圧力分布には見られない特長である。さらに、非球形の物体形状を含む潤滑の問題に対しても潤滑モデルの有効性を確認した。これらにより、従来の潤滑モデルが立脚する仮定に加えた修正が本質的であることが明らかになり、乱流中における非球形大粒子の衝突にみられる潤滑問題へ拡張する道を拓いた。今後、埋め込み手法と併用することでより効率のよい数値解法への展開が期待できる。

また、この潤滑モデルについて様々な場に適用範囲をひろげて詳細に調べた結果、提案した潤滑モデルが熱や物質の輸送現象へも適用可能であることを示す結果を得ており、本課題が対

象とする雨滴成長の素過程を詳細にモデル化する基礎的な手法を構築することができた。

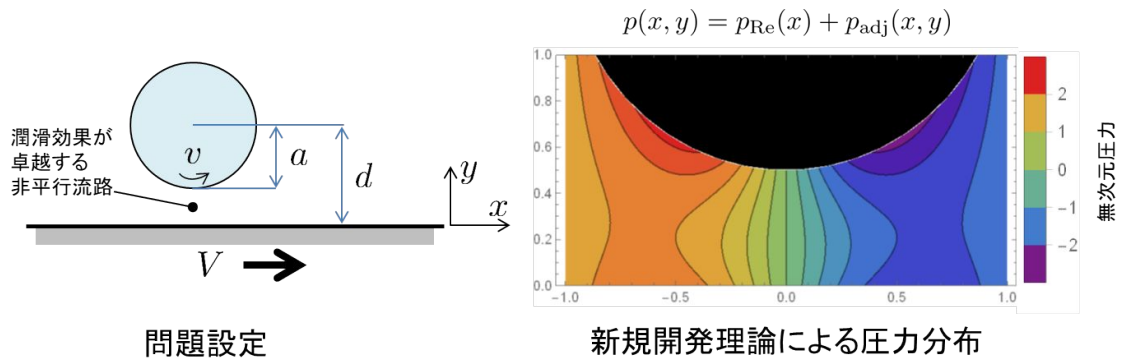


図 2: 新規提案の潤滑モデルに対する検証問題 (左図) と主要な結果の例。一定速度  $V$  で移動する平板から距離  $d$  だけ離れたところに設定された円柱の下側における圧力分布を計算したところ (右図) 理論解をとって知られている圧力分布の特徴を再現することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大西 領, 松田 景吾, 高橋 桂子	4. 巻 39
2. 論文標題 大気および雲乱流に対する大規模数値計算とその可視化 ヒト目線の可視化とその応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 可視化情報学会特集	6. 最初と最後の頁 21-25
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 無
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 Takeuchi Shintaro, Tazaki Asahi, Miyauchi Suguru, Kajishima Takeo	4. 巻 582
2. 論文標題 A relation between membrane permeability and flow rate at low Reynolds number in circular pipe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Membrane Science	6. 最初と最後の頁 91 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.memsci.2019.03.018	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 Takeuchi Shintaro, Fukuoka Hiroki, Gu Jingchen, Kajishima Takeo	4. 巻 371
2. 論文標題 Interaction problem between fluid and membrane by a consistent direct discretisation approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.05.033	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 大西 領	4. 巻 37
2. 論文標題 直接数値計算による雲乱流研究 ~ 直接ラグランジアン雲モデル研究の進展と展望 ~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 460-466
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 無
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 Miyachi Suguru, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 345
2. 論文標題 A numerical method for interaction problems between fluid and membranes with arbitrary permeability for fluid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 33 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2017.05.006	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 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima	4. 巻 85
2. 論文標題 Interaction force and residual stress models for volume-averaged momentum equation for flow laden with particles of comparable diameter to computational grid width	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 298-313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.06.018	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30件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Ryo Onishi
2. 発表標題 Dynamics and Growth of Droplets in Cloud Turbulence
3. 学会等名 International Workshop on Multiphase Turbulence and Statistical modeling (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi, Jingchen Gu and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Vortical structures in natural convection of particle-dispersed two-phase flow
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Mechanics (ICM 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Onishi
2. 発表標題 Direct Lagrangian tracking simulations of droplet growth in clouds
3. 学会等名 International Workshop on Cloud Dynamics, Micro physics, and Small-Scale Simulation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Onishi, Yuichi Kunishima
2. 発表標題 Direct Lagrangian tracking simulations of particles in vertically-developing atmospheric clouds
3. 学会等名 APS-DFD (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Mechanisms of oscillation and reversal in particle-dispersed Rayleigh-Benard cells of laminar regime,
3. 学会等名 the US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L.-P. Wang, C. Peng, B. Rosa, R. Onishi
2. 発表標題 Interface-Resolving Simulation of Collision Efficiency of Cloud Droplets
3. 学会等名 APS-DFD (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Shintaro Takeuchi
2. 発表標題 Numerical simulation of heat transfer in solid-dispersed two-phase media
3. 学会等名 2nd International Workshop on Numerical Simulations of Particle/Droplet/Bubble-laden Flow (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ryo Onishi
2. 発表標題 Bulk, Bin and Lagrangian cloud microphysics simulations
3. 学会等名 International workshop on cloud microphysics and turbulence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Lian-Ping Wang, Cheng Peng, Nick Geneva, Bogdan Rosa, and Ryo Onishi
2. 発表標題 Interface-Resolving Simulation of Collision Efficiency of Cloud Droplets
3. 学会等名 2nd International Workshop on Cloud Turbulence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>2nd International Workshop  <a href="http://www.jamstec.go.jp/ceist/e/research/seminar/2016/ws/index.html">http://www.jamstec.go.jp/ceist/e/research/seminar/2016/ws/index.html</a>            Visualisation in multiphase turbulent flow  <a href="http://vis.cmc.osaka-u.ac.jp/cat_gallery/hpc_sympto2016/">http://vis.cmc.osaka-u.ac.jp/cat_gallery/hpc_sympto2016/</a></p>
---

## 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	K o l o m e n s k D m i t r y  (Kolomenskiy Dmitry)  (00813924)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報基盤センター)・特任研究員    (82706)	
研究分担者	竹内 伸太郎  (Shintaro Takeuchi)  (50372628)	大阪大学・工学研究科 ・准教授    (14401)	
研究分担者	松田 景吾  (Keigo Matsuda)  (50633880)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・研究員    (82706)	
連携研究者	梶島 岳夫  (Kajishima Takeo)  (30185772)	大阪大学・工学研究科・教授    (14401)	