

jh210014-NAH

## 多粒子分散系の乱流輸送に関する大規模シミュレーション

渡邊 威 (名古屋工業大学)

### 概要

本研究課題の目的は、固体粒子群や液滴群を含有する混相乱流の問題に関して、大規模数値シミュレーションを駆使して第一原理計算を実施するための計算基盤の構築と、計算の妥当性や精度の検証を行うことにある。特に粒子輸送のモデリング等に役立つ基礎データの収集と分析を行うために、1. 固体粒子群による乱流変調の素過程の解明、2. 雲乱流における粒径成長とスカラー場の揺らぎ、3. 微小液滴の衝突・併合過程の解析と雲マイクロ物理への応用、の3テーマに着目している。乱流変調の解析では、有限サイズ粒子と質点近似粒子による乱流変調の差異について解析を行い、質点近似粒子による扱いの妥当性を吟味した。また雲乱流におけるスカラー場の非等方性やその統計性のダムケラ数依存性を理論および数値シミュレーションにより明らかにし、液滴の衝突形式が液滴内部の流動状態に及ぼす影響について調査を行った。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

名古屋大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

渡邊威	名古屋工業大学・工学専攻	総括、有限サイズ粒子による乱流変調の解析
田中良夫	産業技術総合研究所・セキュリティ・情報化推進部	高精度並列化コード開発および高効率通信への助言
後藤俊幸	名古屋工業大学・ながれ領域	乱流混合・雲成長プロセスの解析
吉野正人	信州大学工学部・機械システム工学科	格子ボルツマン法による微小液滴間衝突の解析
大島聡史	名古屋大学・情報基盤センター	並列化コード開発および高効率通信への助言
三浦英昭	核融合科学研究所・ヘリカル研究部	結合コンパクト法による差分計算法への助言
齋藤泉	名古屋工業大学・工学専攻	粒子間衝突による粒径成長および乱流変調の解析

### 2. 研究の目的と意義

#### 研究計画全体の目的

本研究課題は、粒子懸濁液や大気中の液滴の振る舞いなどに代表される混相乱流の問題について取り扱う。課題の主目的は、高精度計算を実施するための計算基盤を構築し、計算の妥当性や精度の検証を通して、効果的な大規模シミュレーションを行うことにある。さらに乱流統計量やそれと関連付けられた粒子基礎データの収集と分析を行い、粒子輸送モデリングに役立つ知見を得ることにある。2020年度の採択課題で得られた結果をさらに発展させて、2021年度は以下の課題に取り組んで研究を行った。

#### 2021年度の目的

##### 課題① 有限サイズ粒子群による乱流変調の大規模計算

個々の粒子の周りの流れを解像した、有限サイズの固体粒子群による乱流変調の解析を加速させるために、時間刻み幅の影響を受けない、陰的解法による時間発展スキームの採用を検討する。まず流れ場に設置された単一の物体周りの流れの解析を行い、解析を通して妥当性や問題点を詳らかにする。また固体粒子群の計算への応用展開を試みる。

## 課題② 雲乱流における粒径成長とスカラー場の揺らぎ

雲乱流中の温度や雲水混合率など、相変化の特性時間を持つスカラー揺らぎについて、その揺らぎの分散スペクトルの振る舞いを明らかにする。特にスカラー分散スペクトルのダムケラ数への依存性について、乱流統計理論を用いた解析を行い、数値シミュレーションによる結果との比較を行う。また、これらスカラー揺らぎ振幅や散逸率の確率密度関数がレイノルズ数とともに如何に変化するかを大規模計算により調べる。

## 課題③ 微小液滴同士の衝突・併合過程の解明

雲マイクロ物理過程を念頭に置いて、微小液滴の衝突過程に関する数値解析を行う。水滴の衝突・合体成長における重力沈降と乱流揺らぎの影響を調べ、乱流強度が粒径成長に与える影響を理論・数値解析により評価する。また改良二相系格子ボルツマン法を用いて、微小水滴同士の衝突・併合過程の詳細を調査する。液滴が周囲の気相から受けるせん断応力および圧力について解析を行い、衝突・併合のための条件について詳細を理解することを目指す。

## 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

乱流中に分散した粒子群について、その粒子周りの流れを十分な精度で解像しつつ、乱流場自体も十分な解像度条件を満たすように数値計算を実施するためには、スペクトル法やコンパクト差分法に基づく高解像度直接数値計算を実施することが必須である。計算は高精度で実施できる反面、計算コストも高くなるため、スパコンを活用したシミュレーション解析は欠かすことはできない。計算は膨大であるが、解析から得られる基礎データや可視化結果は、LES など実用的な混相流れのモデリングを目指す研究コミュニティに重要な知見をもたらすと考えられる。また流体・粒子間の相互作用の計算には、計算ノードを跨いだ場と点の情報交換が伴うため、データ通信にかかるコス

トは考慮すべきものがある。精錬されたオイラー・ラグランジュコードを開発していくためには、共同研究として実施することが必要であると考え。

## 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

### 研究成果①

固体粒子を多数内包した乱流の直接数値計算を行い、乱流変調に粒子が及ぼす影響を調べた。これまでの質点粒子を用いた研究において、ダムケラ数と呼ばれる、粒子群の無次元緩和時間によって乱流運動エネルギーの減衰が特徴づけられることがわかっている。そこで粒子が有限の大きさを有する場合について、VP法を用いた粒子解像計算を行い、乱流変調に粒子が及ぼす影響、特に質点近似による結果の妥当性検証を行った。その結果、粒径が小さい場合には、乱流変調は質点近似によるものと矛盾しない結果が得られることがわかった。

### 研究成果②

雲乱流シミュレーションコードを用いて、相変化を伴うスカラーを付随した粒子を分散させた乱流の大規模直接数値シミュレーション(DNS)を行った。スカラー分散スペクトルは相変化の特性時間を考慮した乱流理論によるものと一致し、スペクトルのべき指数はダムケラ数の減少とともに小さくなることがわかった。また、平均スカラー勾配下の乱流スカラー輸送の大規模シミュレーションを実施し、分散スペクトルをルジャンドル展開することで、0次(等方成分)に対する2次(非等方成分)の相対的強度がシュミット数の減少とともに増大することを明らかにした。

### 研究成果③

改良二相系格子ボルツマン法を用いて、微小水滴同士の衝突解析を行った。同径水滴の場合、レイノルズ数が減少すると、衝突せずにそれる場合が増えるが、半径の異なる場合には、合体挙動とそれる挙動が見られ、ある半径比で最も合体しや

すいことがわかった。また、終端速度の差によって衝突・合体成長する質点粒子群の直接数値シミュレーションを行った。その結果、粒径分布スペクトルの傾きが乱流理論から予測されるものと良く一致することを確認した。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### 課題① 有限サイズ粒子群による乱流変調の大規模計算

乱流中を浮遊する多数の微小粒子群の挙動は、乱流中の秩序渦の影響によりその分布は大きく偏ることがあり、またそれは乱流場そのものの性質を大きく変化させることが知られている。この乱流変調の基本的性質を理解することは、複雑な混相乱流のモデリングに関わる学問分野にとって重要な課題の一つである。本研究課題の一つの目的は、個々の粒子周りの流れを十分な精度で解像した、乱流中の固体粒子の挙動とその乱流変調を解明するための計算コードの開発を主眼に置き、質点近似モデルの妥当性や限界の解明、あるいは非球形粒子群への問題の拡張などを指すものである。

今年度は、昨年度に引き続き乱流変調に及ぼす粒子の有限サイズ効果について検討し、その解明

を目指した解析を行った。流れ場に固体粒子を周期的に多数固定配置し、乱流場がこれらの“障害物”によって変形する様子を解析した。個々の粒子の周りの流れを解像して、流体と固体の連成問題を解く方法として、Volume Penalization 法を採用している。この手法では、固体領域を小さな浸透率を有する多孔性物体とみなしている。一方、これらの固体粒子を質点近似した粒子に置き換え、質点近似粒子による反作用力を考慮した計算を行い、両者を比較することで有限サイズの影響を検証した。固体粒子の粒径を固定したまま、粒子数密度を変化させたときの乱流運動エネルギーの減衰則について、ダムケラ数（流れの緩和時間 $\tau_f = (6\pi\eta r_p)^{-1}$ を乱流の大渦回転時間で無次元化して定義される）の関数として解析を行った（図1）。昨年度の結果では、Stokes 抵抗則を仮定した質点近似粒子による乱流エネルギーの減衰は、有限サイズ粒子群によるものと比較するとその減衰の程度を過小評価していることが分かった。この差異を詳細に検討するために、質点近似粒子による抗力の評価式について、Schiller-Naumann 則を用いた場合の乱流場の減衰と比較することを試みた。これは経験則に基づく非線形抗力のモデルであり、線形抗力である Stokes の抵抗則よりは流れ場への影響が大きくなることが予想される。実際、図

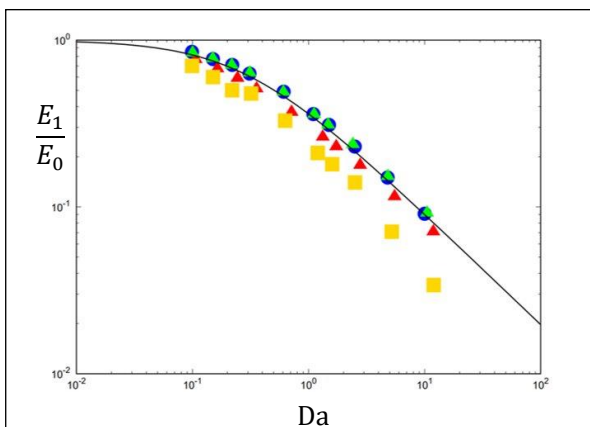


図1 流体の運動エネルギー（粒子の存在を考慮しない場合の値で規格化）をダムケラ数 $Da = T/\tau_f$ の関数としてプロットしたもの。黄色四角は有限サイズ粒子による結果を示している。青丸と緑三角はそれぞれ Stokes 則を用いた場合、赤三角は Schiller-Naumann 則を用いた場合の質点近似粒子による結果を、それぞれ示している。

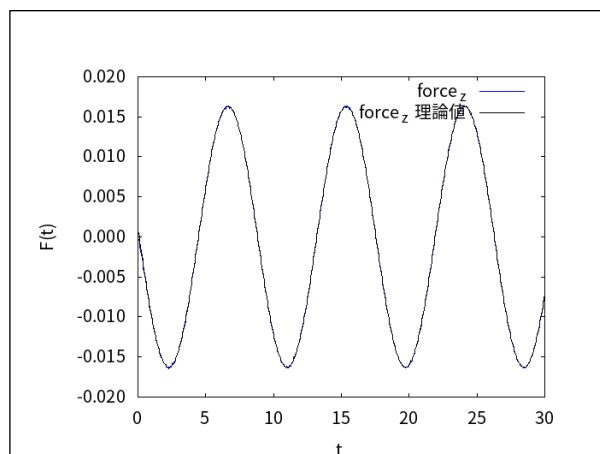


図2 静止流体中を単振動する球に働く抗力の時間変化の様子を示す。理論解とほぼ一致した振る舞いを示すことがわかる。計算領域 $(2\pi)^3$ 、格子点数 $512^3$ 、球の半径0.125、粒子レイノルズ数0.5、VP 項の浸透率は $\eta = 10^{-5}$ 、時間刻み幅は $10^{-3}$ である。

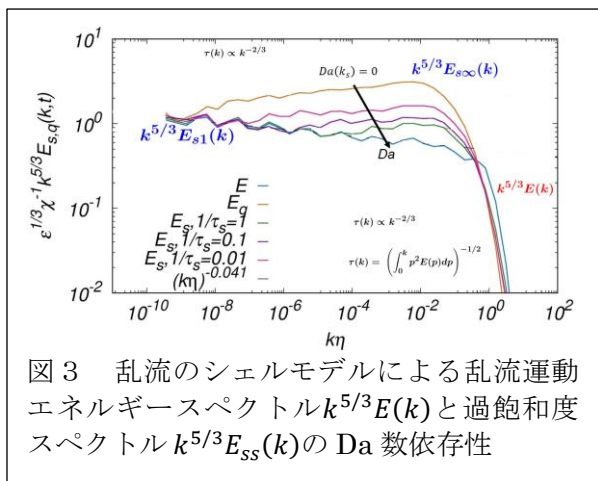


図3 乱流のシェルモデルによる乱流運動エネルギー Spektral  $k^{5/3}E(k)$  と過飽和度 Spektral  $k^{5/3}E_{ss}(k)$  の  $Da$  数依存性

1に示すように、非線形抗力を用いた場合、乱流運動エネルギーの減衰は線形抗力を用いた場合よりも、より大きく乱流場を変調させることがわかった。しかしながら、非線形抗力を用いた場合でも、有限サイズ粒子を用いた場合の結果との差異は、ダムケラ数が大きな領域では無視できるものではない。この結果の解釈の可能性として、1. 質点近似粒子による抗力評価式に問題があり、流れ場への影響が正確に評価されていない、2. 有限サイズ粒子群の計算時間が短いため、統計的に十分収束した結果になっていない、の2点が推察される。

Volume Penalization 法は固体領域を浸透率が非常に小さい多孔性物体とみなし、流体方程式に強制項  $\mathbf{F}_{vp} = -\chi(\mathbf{x})(\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{v}_p(t))/\eta$  ( $\eta \rightarrow 0$ ) を印加することで、物体表面における粘着条件を近似的に満足させて流体と剛体の連成問題を解析する方法である。時間発展に陽的な計算スキームを用いた場合、その時間刻み幅の値は浸透率  $\eta$  ( $\rightarrow 0$ ) の値により制約を受け、十分な時間ステップを確保した計算を実施するには膨大な計算コストがかかる。これを解決するために、強制項  $\mathbf{F}_{vp}$  について、陰的な時間発展法を導入することを昨年度から検討してきた。陰解法を用いる場合、時間刻み幅は浸透率  $\eta$  よりも大きくとれるため、同じ精度でもより計算コストが低くなることが期待できる。本年度は、スペクトル法の直接数値計算コードに陰解法を実装し、静止流体中を単振動する球に働

く抗力を計算により求めた。得られた結果を理論解と比較することで陰解法による計算の実装の妥当性とそのパフォーマンスの検証を行った。図2に振動球に働く抗力の時間変化の様子を示す。この計算では浸透率  $\eta$  に対して時間刻み幅を 100 倍大きくとっている。この結果より、陰的解法で得られた抗力の値は、時間刻み幅を大きくとっても理論解と遜色ない振る舞いを示していることがわかる。

課題② 雲乱流における粒径成長とスカラー場の揺らぎ

雲乱流中の過飽和度揺らぎのスペクトルは、過飽和度の相変化の特性時間 (ダムケラ数  $Da = \tau_f/\tau_s$ ,  $\tau_f$ :乱流の波数に依存する特性時間,  $\tau_s$ :相変化の特性時間) によって2つの  $k^{-5/3}$  スペクトル領域と  $k^{-\alpha}$  ( $\alpha \sim 1$ ) 領域が存在することが、乱流時計理論により予測されている[3]。これらのうち最初の部分について、高レイノルズ数乱流の力学モデルであるシェルモデル (フーリエ変換された流体方程式について、波数空間を2のべき乗のシェルに分割し波数間の相互作用を最近接の3バンドのみに限定したもの) を用いて、非常に幅広い波数領域 ( $0(10^{11})$ ) にわたる計算を行った。図3は、 $k^{5/3}E_{ss}(k)$  を各  $Da$  数についてプロットしたものである。スペクトル  $k^{5/3}E_{ss}(k)$  は、 $Da = 0$  ( $1/\tau_s = 0$ ) の時にはやや右上がりの傾きを示すが、 $Da$  の増加とともに低波数側から運動エネルギー Spektral

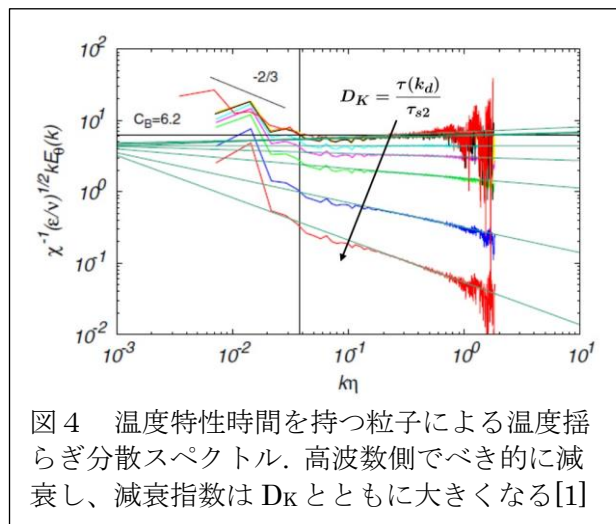


図4 温度特性時間を持つ粒子による温度揺らぎ分散 Spektral. 高波数側でべき的に減衰し、減衰指数は  $D_K$  とともに大きくなる [1]

$k^{5/3}E(k)$ をなぞるようになり、ある波数以上では  $Da = 0$ の時の  $k^{5/3}E_{ss}(k)$ とほぼ平行になることがわかる。乱流の間欠性により慣性移流領域では  $k^{5/3}E(k)$ 、および  $k^{5/3}E_{ss}(k)$ のいずれも水平からわずかに傾斜している。この傾斜を無視すれば、上の特徴は  $Da$ 数によって、 $E_{ss}(k)$ には2つの  $k^{-5/3}$  スペクトル領域が存在することを示している。この結果は、2022年3月に開催した 4th International workshop on Cloud Turbulence (NITech)において発表された[10]。

雲粒子は相変化を伴う高シュミット数のスカラーとみなせる。高波数側での乱流特性時間と相変化の特性時間の大小関係によっては、過飽和度揺らぎスペクトルは第3の冪法則  $k^{-\alpha}$  ( $\alpha > 1$ )を示す可能性が理論的に示されている[3]。これを数値的に検証するため、これまで開発を進めてきた新しい数値計算法をこの問題に用いた。まず、過飽和度が粒子の位置における流体の過飽和度との差に応じて特性時間  $\tau_p$  で変化する仮想粒子を乱流中に分散させる。これをラグランジュ的に追跡し（無限大シュミット数の）、過飽和度揺らぎの分散スペクトルをオイラー座標で計算する。次に得られたスペクトルからショットノイズを除去し、さらにオイラー座標に変換する際のフィルター効果を取り去ることで、目的のスペクトルを得る。昨年度の計算規模  $512^3$  を  $1024^3$  に拡大し、扱う粒子数も格子点当たり1個にまで増大した。図4はこのようにして得られた  $kE_{ss}(k)$  を各  $Da$  数についてプロットしたものである。乱流理論は低波数側で  $kE_{ss}(k) \propto k^{2/3}$ 、高波数側で  $kE_{ss}(k) \propto k^{-2C_B Dk}$  の振る舞いを予想する。得られた結果はまさしくこれらの冪法則の存在を示している。この成果は計算規模の拡大によるところが大きい。図5はこの計算で得られた雲粒子分布の2次元プロットである。シャープな界面（強い濃淡差）は高シュミット数スカラーの特徴を示していることが見て取れる。

雲粒子成長と空間分布は乱流中の温度場と過飽

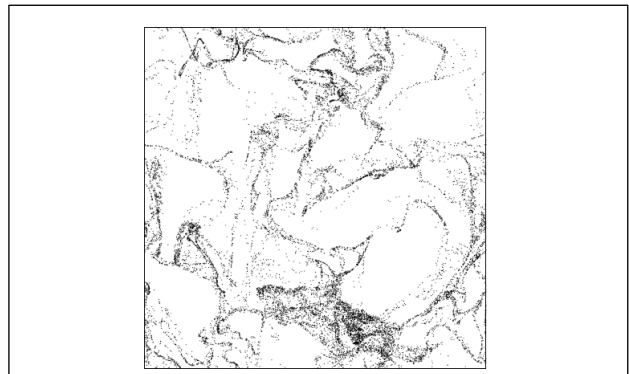


図5 温度特性時間を持つ雲粒子の空間分

和度揺らぎに大きく影響を受ける。スカラー揺らぎの乱流的挙動（分布関数の広がり）は乱流レイノルズ  $R_\lambda$  が約4程度から始まり、速度場より早く始まることを見出された[4, 9, 10]。また、スカラー・乱流エネルギー散逸率の弱い揺らぎの確率分布は冪分布に従い普遍的であることが分かった[4]。この成果は、ICTAM[8]およびBIRS[11]での招待講演として発表されるとともに、論文としても発表された[4]。

以上の大規模計算においては、3次元FFTの計算がその大部分を占める。今年度、この高速化をいくつか試みた。MPI\_ALLtoALLからMPI\_PUTへの変更や、速度場3成分の同時的変換などを行ったが、残念ながら目立った改善は得られていない。通信時間に占める、IDLE Timeがかなりの部分を占めているが、現在この改善方法にめどは立っていない。

## 課題② 微小液滴同士の衝突・併合過程の解明

昨年度に引き続き、液滴内部の流動状態におけるレイノルズ数による影響について解析を行なった。その結果、レイノルズ数が高いほど液滴内部が混合することがわかった。また、液滴内部の混合に対する考察として、液滴間の重心速度による影響について調べた。その結果、液滴間の重心速度が大きいほど液滴内部が混合していることがわかり、液滴内部の流動状態は、対向衝突や追突といった衝突の形式ではなく、液滴間の重心速度に依存して変化することがわかった[5]。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

### 進捗状況

#### 課題①

昨年度からの課題の一つであった、有限サイズ固体粒子群の計算に陰的解法を導入する目途をつけることができた。結果は満足のいくものであるが、結果は単一球の場合であった。今後は複数個の球および非球形の物体に関して長時間積分を実行し、乱流変調の統計性質を明らかにしていく。

また、質点近似粒子の計算では、非線形抗力をを用いた場合の乱流変調の解析を実施した。結果は概ね予想されるものであったが、線形抗力をを用いた場合との定量的な差異を明らかにすることができた。

#### 課題②

研究は順調に進展している。過飽和度揺らぎのスペクトルの数値計算においては、シェルモデルと DNS により 2 つの  $E_{ss}(k) \propto k^{-5/3}$ , オイラー・ラグランジュ的手法により  $E_{ss}(k) \propto k^{-1-2C_B Da k}$  を検証することができた[4]。これらの成果は国内外の学会などで報告されている。また、温度・過飽和度揺らぎの確率密度関数のレイノルズ数依存性についても理論および DNS による検証が進み、その成果が国内外の学会で発表された。また、2022 年 3 月 9, 10, 11 日に 4th International Workshop on Cloud Turbulence (<http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloud4.html>) をオンラインで開催した。講演者 30 名 (海外 22 名)、参加者延べ 203 名の盛会で、上の成果を発表するとともに意見交換できたことは大きな収穫であった。

#### 課題③

研究は概ね順調に進んでいる。昨年度からの課題となっていた液滴内部の流動状態におけるレイノルズ数による影響について明らかにすることができた。特にレイノルズ数と液滴内部の混合についての関係を明らかにすることができた。また、

液滴内部の混合に対して、液滴間の重心速度が大きいほど液滴内部が混合していることが明らかになった。これは液滴内部の流動状態は、対向衝突や追突といった衝突の形式ではなく、液滴間の重心速度に依存して変化することを示しており、他のパラメータが液滴衝突に及ぼす影響を考察する上で重要な結果である。

全体をまとめると、上記課題 1 から 3 について、今年度は当初目標としていた研究を順調に進める事が出来た。7-8 割程度は当初の目標を達成できたと考えている。

### 今後の展望

#### 課題①

有限サイズ粒子群を分散した乱流変調の解析を進展させる。積分時間を十分ながくとり、統計的な収束性のよいデータを収集し、結果の精度を高めたい。また球形から拡張子、回転楕円体の場合についても解析を進める。質点近似粒子による乱流変調については、非線形抗力を考慮した解析を引き続きすすめる。特にある粒子に働く抗力を評価する際に用いる流体速度場は、その粒子自身により乱された速度場を用いると抗力を正しく評価できない。非擾乱速度場を求め、これを非線形抗力の評価式に組み込むことが、質点近似計算における考える最も信頼性の高い手法となる。このための解析について進めていきたいと考えている。

#### 課題②

雲粒子成長に重要な役割を果たす過飽和度の揺らぎ特性 (スペクトル, 確率密度関数や場の構造, ダムケラ数依存性, レイノルズ数依存性) を大規模計算 (格子点数を  $4096^3$  に拡大) により解析を行う予定である。また、これらの数値計算と理論解析を論文にまとめて公開していく。また、3 次元 FFT の改良を引き続き進めていく。

#### 課題③

液滴衝突において重要なパラメータである半径

比やウェーバー数などが、液滴の挙動や液滴内部の混合に与える影響をさらに詳しく調べる予定である。

## 7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

### (1) 学術論文 (査読あり)

[1] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, “Statistical properties of a stochastic model of eddy hopping”, *Atmos. Chem. Phys.*, 21 13119–13130 (2021).

[2] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, “Modulation of fluid temperature fluctuations by particles in turbulence”, *J. Fluid Mech* 931, A6 (2022).

[3] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Spectra of supersaturation and liquid water content in cloud turbulence”, *Phys. Rev. Fluids*, **6**, 110512 (1–26) (2021).

[4] T. Gotoh and J. Yang, “Transition of fluctuations from Gaussian state to turbulent state”, *Phil. Trans. A* 380, 20210097(1–18) (2021).

[5] M. Yoshino, K. Sasaki, S. Saito, and K. Suzuki, “Lattice Boltzmann simulation of behaviors of binary cloud droplets approaching each other”, accepted in *Multiphase Sci. Technol.* (2022).

### (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

### (3) 国際会議発表 (査読なし)

[6] T. Watanabe, I. Saito and T. Gotoh, “Turbulence modulation by small particles in isotropic turbulence”, *RIMS Workshop on “Mathematical Analysis in Fluid and Gas Dynamics”*, July 7–9 (2021) (Invited, online).

[7] T. Gotoh and J. Yang “Variation of fluctuation statistics from Gaussian state to turbulent state”, *Workshop - Fundamentals of compressible turbulence: Recent advances and open questions*, Texas A&M and New York Univ. May, 2021 【Web開催】 (Invited)

[8] T. Gotoh, J. Yang, H. Miura, T. Watanabe, “Transition of gradient moments of passive vector in randomly stirred fluid”, *ICTAM, Milano*. Aug. 2021 【Web開催】 (Invited)

[9] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Spectra of Supersaturation and Liquid Water Content in Cloud Turbulence”, *18th International Conference on Flow Dynamics, Sendai*, Sept. 2021 【Web開催】

[10] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Statistical properties of supersaturation fluctuations in cloud turbulence”, *4th International Workshop on Cloud Turbulence* (Invited), Nagoya, March, 2022 【Web開催】

[11] T. Gotoh, J. Yang, ``Effects of Reynolds number and spatial dimensions on fluctuations from Gaussian state to turbulent state”, BIRS Workshop (Invited), Banff, March, 2022 【Web 開催】

[12] H. Hamazaki, T. Watanabe, I. Saito and T. Gotoh, ``On the Behavior of microbubbles in isotropic turbulence ” , 4th International Workshop on Cloud Turbulence (Invited), Nagoya, March, 2022 【Web 開催】

#### (4) 国内会議発表 (査読なし)

[13] 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸, 「乱流中における熱慣性粒子群による流体温度ゆらぎ場の変調」, 日本流体力学会年会 (東京大学), 9 月 2021 【Web 開催】.

[14] 後藤俊幸, 齋藤泉, 渡邊威, 「雲乱流における過飽和度と雲水混合比のスペクトル」, 日本流体力学会年会 (東京大学), 9 月 2021 【Web 開催】

[15] 長瀬幸太郎, 吉野正人, 鈴木康祐, 「液滴衝突形式の違いによる液滴内部の流動状態の比較」, 混相流シンポジウム 2021 (関西大学), 8 月 2021 【Web 開催】.

[16] 濱崎博也, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸, 「乱流中のマイクロバブルの挙動の可視化」, 日本流体力学会年会 (東京大学), 9 月 2021 【Web 開催】.

[17] 長瀬幸太郎, 吉野正人, 鈴木康祐, 「液滴衝突形式が液滴内部の流動状

態に及ぼす影響の定量的な評価と比較」, 第 19 回日本流体力学会中部支部講演会 (三重大学), 11 月 2021 【Web 開催】 【中部支部講演会優秀賞受賞】.

[18] 長瀬幸太郎, 吉野正人, 鈴木康祐, 「液滴衝突形式の違いによる液滴内部における流動状態の定量的な評価と比較」, 第 35 回数値流体力学シンポジウム (東北大学), 12 月 2021 【Web 開催】.

(5) 公開したライブラリなど

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)