

jh200006-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

本研究課題では、固体粒子群や液滴を含有するような混相乱流の問題に対して、大規模数値シミュレーションを駆使してなるべく第一原理に沿った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。解析を通して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ことを主目的とする。具体的に取り組む課題は大別すると2点あり、1. 固体粒子群による乱流変調の素過程の解明、2. 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、となっている。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や限界について調査した。また雲乱流におけるスカラー場の非等方性や、粒径の衝突成長過程について解析をおこなった。

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・情報セキュリティ部 | 高精度差分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 | 乱流混合および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の高速化 |
| 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

(1) 研究の目的

沸騰する液体中の気泡や血管内の血球、河川の流れにおける流砂、或いは雲中の氷晶や大陸から偏西風によって飛来する黄砂など、我々の身の回りの流れの多くは複雑で且つ様々な状態の物質を含有している。これらは混相流と呼ばれ、複雑で多様な物理を内包する一方で、その詳細に関する理解はいまだ不十分である。近年の計算機の飛躍的な発展は、例えば乱流中の微小物質の複雑な振る舞いを第一原理になるべく忠実に、精度よく計算することを可能にしつつあり、混相乱流の研究における大規模計算の役割は非常に重要になっている。

本研究課題の目的は、上記例にあげられるような混相乱流の問題に対して、大規模数値シミュレーションを駆使してなるべく第一原理に沿った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で、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ことにある。取り組む具体的な課題は、大別すると二点あげられる。一つは、固体粒子群による乱流変調の素過程の解明である。

微小な固体粒子群による乱流変調について、有限サイズ粒子による解析を実施し、質点近似の妥当性や限界を調査する。また非球形の粒子群と乱流の相互作用を適切なコストと計算精度で解析可能なバランスの良い計算コードの開発を行い、乱流変調効果や粒子群の凝集・衝突過程へのパラメータ（形状、比重、数密度）依存性を明らかにすることを旨とする。

二点目の課題として、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を挙げる。雲マイクロ物理過程の第一原理シミュレーションとモデリングにおいて重要な素過程である、微小液滴の衝突過程に関する数値解析を行う。相対粒径・相対速度・重力の影響などをパラメータとして、粒径分布や平均半径の成長の程度を調査する。さらに雲乱流によって輸送される各種スカラー量の揺らぎは、非常に特異な性質を有することが知られ、これを解明することは乱流輸送に関する基礎物理の重要なテーマである。本研究では大規模計算を駆使して、この問題に取り組む。また二相系格子ボルツマン法を用いて微小水滴同士の衝突・併合の衝突ダイアグラムを構築するために必要な計算手法の確立を目指す。

(2) 研究の意義

代表者の研究グループは、乱流により輸送されるスカラー場の揺らぎの特異性や普遍性の解明、あるいは微小粒子群や鎖状高分子の乱流による輸送とその乱流への影響について、乱流物質輸送のシミュレーション研究を推進してきた。本研究課題の主要テーマである有限の大きさを持つ粒子群と乱流の相互作用を扱ったシミュレーション解析は、近年の計算機能力の飛躍的發展に伴って大変注目される研究課題となっている。本研究の進展は、例えば質点近似粒子群による乱流変調の妥当性の検証につながり、粒子群や混相乱流のモデリングへの指針に対して重要な知見をもたらすことが予想される。また粒子周りの流れを解像した計算は、粒子形状が複

雑な一般的な問題への応用展開が容易である。例えば粒子形状の詳細が乱流による粒子輸送にどのような影響を及ぼすのか、その詳細についてはほとんど未解明のままであり、非球形粒子群と流れの相互作用を扱った高効率なコードの開発が必須のテーマである。さらにこれは雲中での氷晶の成長過程の解析などへの応用展開が可能である。

雲マイクロ物理過程における微小液滴成長の全容解明は、実験や観測による測定解析と併せてマクロスケールでの雲物理現象の解明、および気象予報のためのモデルの高精度化に重要な貢献を果たすことが期待される。また、雲マイクロ物理過程は、その主となる物理は乱流輸送・混合過程である。各種スカラー量の特異な揺らぎの性質を解明することは、乱流の基礎研究の進展という観点からも重要な知見をもたらすことが期待できる。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

高レイノルズ数乱流中に分散した多数の粒子群の高精度計算には、粒子周りの流れの状態を十分に解像しつつ十分な解像度条件を満たす数値計算を実施する必要がある。そのためには、スペクトル法やコンパクト差分法に基づく高解像度の直接数値計算を実施することが必須であり、名古屋大学のスパコンを利用することで研究課題を推進することができた。

また粒子群の拡散や凝集過程の動力学、あるいは粒子間の衝突過程の詳細を解析・検討するためには、大渦回転時間で数十回転に相当する時間積分を実行する必要がある。長時間積分を適切な実時間で実施できるのはスパコンを用いた大規模並列計算のみであり、研究課題を推進するうえで拠点の計算機資源が大いに役に立った。

さらに粒子間相互作用の計算、流体と粒子間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

コストは無視できない。また流れ場の並列計算との相性が問題となる。スケーラブルで高効率のオイラー・ラグランジュコードを段階的に開発していく上で、センターからの助言が大いに役に立った。

以上より、本研究課題を拠点公募型研究として実施した意義が十分にあったと考えている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題は 2020 年度新規採択課題である。

5. 今年度の研究成果の詳細

(1) 有限サイズ粒子群による乱流変調

乱流中に微小な粒子群が浮遊する場合、流れ場は粒子群の挙動によって変形を生じ、乱流の性質は大きく変化する。この現象の詳細について理解・把握し、基本的性質についての知見を得ることは、混相乱流とそ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。本研究課題では、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目指すものである。

今年度は、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。具体的には、流れ場に有限の大きさを持った固体粒子を周期的に固定配置し、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。また、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。図 1 に粒子配置の様子とその時の乱流場についての可視化結果の一例を示す。固体粒子群によって乱流渦の生成が大きく影響を受けていることがわかる。次に、固体粒子の粒径を固定したまま、

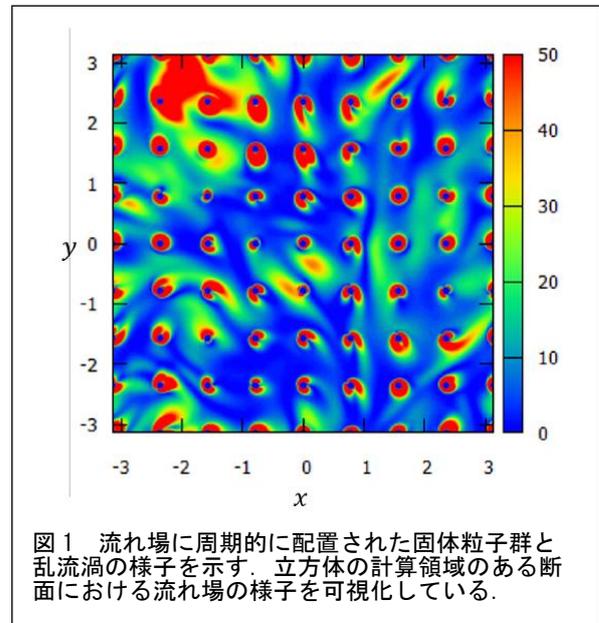


図 1 流れ場に周期的に配置された固体粒子群と乱流渦の様子を示す。立方体の計算領域のある断面における流れ場の様子を可視化している。

粒子数密度を変化させたときに乱流の運動エネルギーがどのような変化をするか調査した。運動エネルギーの減衰をダムケラ数（流れの緩和時間 $\tau_f = (6\pi\nu r n_p)^{-1}$ を乱流の大渦回転時間で無次元化して定義される）の関数としてプロットした結果を図 2 に示す。この結果より、同じ物理的条件下であったとしても、質点近似粒子による結果に比べて、有限サイズの粒子群の方がより大きく乱流の運動エネルギーが減衰することがわかった。これは粒子周辺におけるエネルギー散逸の増大が大きく寄与していることが考えられるが、詳細については今後解析を進めていく予定である。

本研究では、流体と固体の連成問題を Volume Penalization 法を用いて解析を行っている。こ

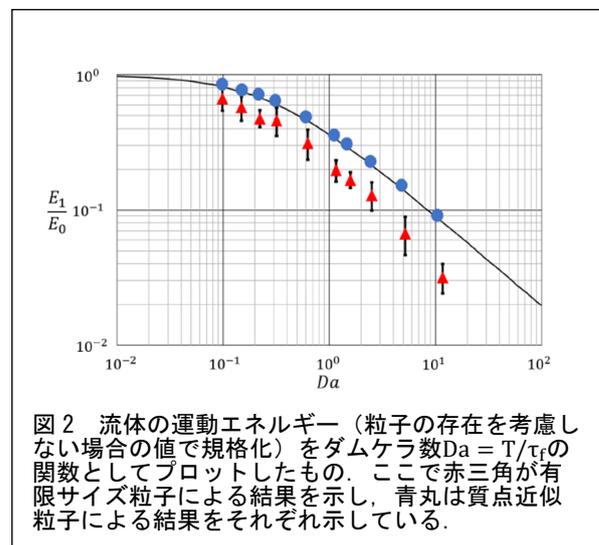


図 2 流体の運動エネルギー（粒子の存在を考慮しない場合の値で規格化）をダムケラ数 $Da = T/\tau_f$ の関数としてプロットしたもの。ここで赤三角が有限サイズ粒子による結果を示し、青丸は質点近似粒子による結果をそれぞれ示している。

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。陽的な計算スキームを用いた場合、時間刻み幅の値は用いる浸透率の値により制約を受け、精度が高い計算を実現するためには非常に小さな時間刻み幅を設定しなくてはならない。これは計算コストがかかるため、将来的な大規模計算を見据えたときにネックとなる問題である。これを解決するために、流体と物体との相互作用を表す項について、陰的な時間発展法を本手法に導入することを検討した。その結果、静止した球の周りの流れを陰的な解法で計算を試みた結果、時間刻み幅を小さくして実施した陽的な解法による結果と遜色ない結果を得ることができた。

(2) 雲乱流における粒径成長と温度揺らぎ

雲粒子の重力沈降による除去が雲粒子粒径分布関数に及ぼす影響を、フォッカープランク方程式による理論解析および質点粒子群の直接数値シミュレーションにより調べた。粒子半径に比例する終端速度で落下する場合、シミュレーションにより得られた粒径分布関数は理論解析結果およびミシガン大における室内実験の結果と一致することが分かった [6, 7]。

終端速度の差によって衝突・合体成長する質点粒子群の粒径スペクトルに関する理論解析と直接数値シミュレーションによる検証を行った。乱流理論を応用した解析からは、粒径の増大とともに粒子数がべき的に減少する ($n \propto \sigma^{-2}$, σ は粒子体積) ことが得られ、シミュレーション結果においても -2 のべき指数を得た。この粒径スペクトルの形成には同程度の大きさの粒子間衝突と空間的混合 (乱流効果) が重要であることを示している。

雲乱流中の温度や雲水混合率 (Liquid Water Content; LWC) などのスカラー揺らぎは分子拡散がほぼ無視できる高シュミット数のスカラーである。航空機及び山頂での観測から、この揺らぎの分散スペクトルは乱流理論が前提とする波数領域よりもはるかに低波数側で観測されてい

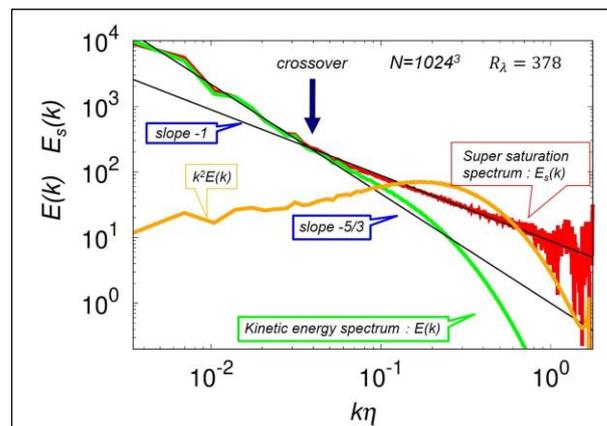


図3 多数の粒子による乱流混合の大規模計算による過飽和度分散スペクトル (赤)。高波数側ではショットノイズを除去しても、粒子数の有限性によるノイズが残る。 $k\eta = 0.045$ 付近で $E_s(k)$ には $k^{-5/3}$ から k^{-1} への遷移が明瞭に観察される。

る。この解明を目指して、まず、相変化を伴うスカラー (温度揺らぎや雲水量) を付随した粒子を分散させた乱流の大規模シミュレーションを行った。多数の粒子をラグランジュ的に追跡し、(無限大シュミット数の) スカラー揺らぎの分散スペクトルをオイラー座標で計算する。粒子の離散性によるショットノイズの除去、粒子点から流体格子への写像時に発生するフィルター効果の補正などを取り込んだ本手法は世界的にも例を見ない全く新しい試みである。その結果、Obkhov-Corrsinスペクトル $k^{-5/3}$ からBatchelorスペクトル k^{-1} への遷移が明瞭に見いだされ (図3)、かつその遷移波数は乱流理論のものよりもはるかに低波数側にあることを見出した。図3の $E_s(k)$ は高波数側でまだノイズが目立つ。これは、粒子数が1格子点当たり約16個程度と少ないことによる。試験的に、粒子数を増やすことによりこの振動ノイズは低減されることを確認している。

一方、水蒸気過飽和度と雲粒子の相変化の特性時間を考慮したLWC分散スペクトルに対する乱流理論を構築した。理論によれば k^{-1} のべき指数 -1 はダムケラ数 (Da =乱流のコルモゴロフ時間/スカラーの相変化の特性時間) の減少とともに小さくなるが、これはシミュレーション結果とも一致する。また、理論は遷移波数がダムケラ数の増大とともに低波数側に移動することを予

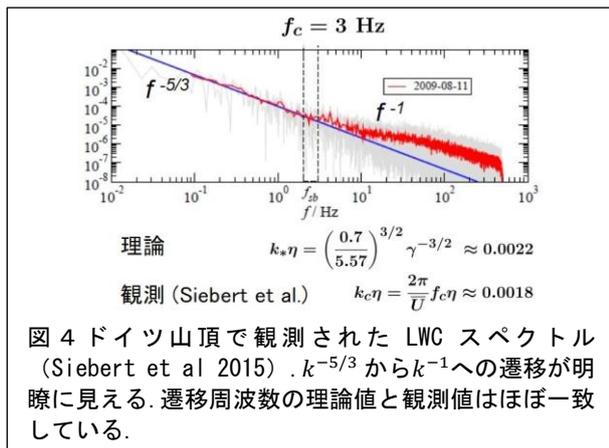


図 4 ドイツ山頂で観測された LWC スペクトル (Siebert et al 2015) . $k^{-5/3}$ から k^{-1} への遷移が明瞭に見える. 遷移周波数の理論値と観測値はほぼ一致している.

言する. ドイツ山頂での観測データをもとに遷移波数を求めるとほぼ観測と一致する結果を得た. この結果は, 米国物理学会流体部門でのミニシンポジウムでの招待講演の中で発表された [3].

(3) 雲流中のスカラー揺らぎの非等方性

微細スケールでのスカラー揺らぎの特性を知ることは化学反応, 相変化を伴う粒子輸送特性の理解と定量的評価において極めて重要である. 雲中や工学でみられるような一様平均スカラー勾配下の乱流スカラー輸送を大規模シミュレーションにより解析した. 乱流混合により巨視的には非等方であっても微視的には等方的な状態が実現されると期待されるからである.

スカラー場の微細スケールでの非等方性および揺らぎの強度をシュミット数とレイノルズ数の広い範囲にわたって解析した. その結果, スカラーの微細スケールの統計的特性は, スカラーのテイラーマイクロスケール λ_θ を用いたペクレ数 $P_\lambda = u' \lambda_\theta / \kappa$ (u' : 乱流揺らぎ速度, κ : 分子拡散係数) によって特徴づけられることが分かった. 特に, 高ペクレ数ではスカラー場は等方的な状態に向かうが, 低ペクレ数では非等方性がいつまでも残る [1].

一方, レイノルズ数を固定し, シュミット数を変化させた場合のスペクトルの非等方性を最大格子点数 2048^3 の大規模計算により解析した. 分散スペクトルをルジャンドル展開し, 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 ($Sc = \text{分子粘性} / \text{分子拡散}$) の減少とともに増大することが分かった [5, 8].

雲中での雲粒子の生成・成長・消滅は乱流速度場と過飽和度や温度などスカラー場の間欠性の影響を強く受ける. そこで, 乱流エネルギー散逸率と渦度の 2 乗 (エンストロフィー), およびスカラー散逸率の間欠性が, 流体場が Gauss 的な揺らぎから激しく変動する乱流状態へと遷移する時 (レイノルズ数が増加する) にどのように変化するかを長時間にわたる大規模計算により調べた. 統計的に十分に収束したデータによると, スカラー分散の散逸率は $R_\lambda \sim 4$ から乱流状態へと遷移し, 30 以上では散逸率の高次モーメントは R_λ のべき乗で増大することが分かった.

(4) 液滴同士の衝突過程の解明

低ウェーバー数領域における微小水滴の挙動について, 改良二相系格子ボルツマン法を用いた解析を行った. 本年度は 2 個の水滴が正面から対向衝突する場合について解析を行った. その結果同一方向に移動しながら追突する場合と比較すると, 水滴周りの流れ場や界面に差異が見られることが見いだされた [10].

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【申請時の計画】

① 固体粒子群による乱流変調の素過程の解明

球形固体粒子群を内包した乱流の直接数値計算を実施するために, Volume Penalization 法を用いたコードの改良とその応用を試みる. 特に, 時間刻み幅の制約を受けない, 陰的解法を用いた計算手法へのコードの改良, 及び任意形状の固体微粒子の計算が実行可能なコードの開発・評価を行う. 陰的解法の導入テストのためのテスト問題として, 周期的に空間に配置された粒子群による乱流変調の解析を行う. また簡単な回転楕円体の幾何形状の固体微粒子を数万個程度乱流中に分散した問題を解析し, 乱流統

計量の変化や粒子群の動径分布関数の粒子形状依存性について調査する。

② 微小液滴の衝突・併合過程の解析およびその雲マイクロ物理への応用

乱流による粒子群の衝突併合に関する調査を行う。過去に理論的に予測可能な非慣性粒子の衝突併合問題を扱ってきたが、本年度は慣性が重要になる場合や重力の影響を加味したケースを調査し、粒径分布や衝突成長の素過程を明らかにする。また、二相系 LBM を用いて微小液滴に対する補正や拡散項の検討などにより過去の課題解決を進め、低ウェーバー数領域の雲粒子衝突解析への適用を目指す。

【今年度の進捗状況】

(1) 有限サイズ粒子群による乱流変調

粒子周りの流れを解像した粒子群と乱流の相互作用に関する大規模計算を進めた。粒子群を空間に周期的に固定した場合、乱流変調が粒子数密度にどのように依存するか調べた。また、物理的な条件を等しくして、質点近似粒子群による乱流変調の様子も合わせて解析を行い、粒子の有限サイズ性が乱流変調に及ぼす影響について検証した。当初の研究計画にあった非球形粒子群の場合の検証は次年度以降の課題として行うことを考えている。また、計算の高速化に向けて、粒子群の計算に陰解法を適用したコードの開発とその妥当性の検証を併せて行ってきた。陰解法の適用についてはある程度の目的がたったので、非球形粒子群への適用と合わせて次年度に課題を推進していきたい。

(2) 雲乱流における粒径成長と温度揺らぎ

雲粒子の重力沈降による除去が雲粒子粒径分布関数に及ぼす影響を理論および質点粒子群の直接数値シミュレーションにより調べた。粒子半径に比例する終端速度で落下する場合、得られた粒径分布関数は理論およびミシガン大にお

ける室内実験の結果と一致することが分かった。この成果は APS (DFD) [4] や国内会議 [6, 7] で発表されており、研究は順調に進展している。

雲水混合比などのような高シュミット数のスカラーを多数の粒子に付属させたスカラー量の乱流輸送としてシミュレーションする手法は新たに開発されたものであり、理論との比較においても妥当な結果をもたらしている。また、この数値計算は、相変化を伴う場合のスカラー揺らぎ分散のスペクトル理論構築の大きなよりどころとなっている。これらの成果は APS (DFD) などの国際会議で発表されるとともに、論文として発表準備中であり、研究は順調に進展している。

(3) 雲流中のスカラー揺らぎの非等方性

平均一様スカラー勾配のもとでのスカラー乱流輸送の高解像度計算を実行した。スカラー場の勾配の高次モーメントにおける非等方性のペクレ数依存性、分散スペクトルのルジャンドル展開による解析により波数ごとの非等方性を調べるなど研究は順調に進展した。

また、雲乱流中の運動エネルギー、渦度、スカラー散逸率の揺らぎにおける間欠性を、高次モーメント、確率密度関数を中心に大規模シミュレーションを長時間行い解析した。乱流状態への遷移のレイノルズの見積もり、散逸率の確率密度関数のレイノルズ数依存性について興味深い知見が得られており、これらは発表準備中で、順調に進展している。

(4) 液滴同士の衝突過程の解明

改良二相系格子ボルツマン法により低ウェーバー数領域における 2 つの微小水滴の挙動解析を行った。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。半径の異なる場合には、合体挙動とそれる挙動が見られたが、半径比 $\Delta=0.85$ において最も合体しやすいことがわかった [9]。また、本計算では水滴が正面から衝突する対向衝突につい

て挙動解析しているが、同一方向に移動しながら追突する場合と比較すると、水滴周りの流れ場や界面に差異が見られることが報告されており[10]、衝突方法の違いによる影響も考慮に入れる必要があることがわかった。

【自己評価】

計画①については、陰的解法の導入にある程度目途が立つ状況になった。しかし今年度の解析では非球形粒子の解析が実施できず、自己評価としては 10 点満点中の 7 点程度であると考えている。計画②については、おおむね順調に研究が進んでおり、またいくつかの成果については、論文としてまとめられている。よって評価としては 10 点満点中で 9 点程度であろうかと考える。研究課題全体では、評価としては 8 点としたい。

【今後の展望】

(1) 有限サイズ粒子群による乱流変調

研究課題の目的の一つである、粒子形状の差異が乱流変調に及ぼす影響について検証するために、2020 年度に引き続き有限サイズ粒子群による解析を進める。粒子計算には陰解法を用いる方法を乱流コードに実装し、その妥当性と計算精度、パフォーマンスについて検証を行う。次に粒子群の数密度や体積分率を固定したまま、粒子形状を回転楕円体にした場合に、乱流変調にどのような差異が生じるか、解析を行いたいと考えている。

(2) 雲乱流における粒径成長と温度揺らぎ

計算規模を拡大して、スカラー分散スペクトルの挙動をより広範囲の波数領域で解析する。スカラー揺らぎの変調は高波数側に留まるのかそれとも低波数側にまで及ぶのかをより広範なダムケラ数にわたって調べる。さらに、水滴の衝突・合体成長における重力沈降と乱流揺らぎ

の影響を調べる。図 3 に見るように、過飽和度分散スペクトル $E_s(k)$ の高波数側での振動を除去するには、水滴数密度を増やすことが欠かせない。現時点では流体計算の負荷が高いが、より多くの水滴を導入して粒子計算の負荷が高くなると、両者のバランスが取れてくる。このような乱流混合計算では、名古屋大の FX1000 のようなノード当たりのコア数が多いマシンのより有効な利用が期待できるので、計算効率を改善しつつさらなる大規模計算を進める。また、乱流場の各散逸率のレイノルズ数依存性の解析を進め、成果を国内外の会議や論文として発表する。

(3) 雲乱流中のスカラー揺らぎの非等方性

得られた成果を論文にすることを第 1 とする。また、シュミット数が 1 より大きい場合における非等方性の減衰について詳しく調べる。

(4) 液滴同士の衝突過程の解明

雲粒子が接近する際の挙動を解明するため、運動エネルギーや水滴が周囲の気相から受けるせん断応力および圧力の観点から調べる。また、水滴の衝突方法の違いによって生じる影響の一つである水滴内部の流動状態について解析し、差異を比較する。

7. 研究業績一覧

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] T. Yasuda, T. Gotoh, T. Watanabe, I. Saito, "Péclet-number dependence of small-scale anisotropy of passive scalar fluctuations under a uniform mean gradient in isotropic turbulence", J. Fluid Mech. 898, A4 (2020)

[2] D. Vincenzi(+), T. Watanabe, S. S. Ray(+), J. R. Picardo(+), "Polymer scission

in turbulent flows”, J. Fluid Mech. 912, A18 (2021).

(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)

[3] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, T. Yasuda, “Numerical simulation of cloud droplets and turbulence”. APS DFD, Nov. Chicago, 2020. (招待講演)

[4] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, T. Yasuda, “Modulation of fluid temperature fluctuations by particles in turbulence”, APS DFD, Nov. Chicago, 2020.

[5] T. Yasuda, T. Gotoh, T. Watanabe, I. Saito, “Schmidt-number dependence of scalar fluxes and spectra in isotropic turbulence with a mean scalar gradient”, APS DFD, Nov. Chicago, 2020.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[6] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, 安田達哉, 「雲粒粒径分布の雲乱流統計理論とチャンバー実験との直接比較」, 日本気象学会 2020 年度春季大会, 5 月カルッツかわさき.

[7] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, 安田達哉, 「雲乱流環境内において形成される雲粒粒径分布の理論予測の実験による検証」, 日本流体力学会年会 (山口大学), 9 月 2020 【Web 開催】

[8] 安田達哉, 後藤俊幸, 渡邊威, 齋藤泉 「等方乱流に輸送される一様平均スカラー勾配下の大規模スカラー変動」日本流体力学会年会 (山口大学), 9 月 2020 【Web 開催】.

[9] 佐々木康平, 吉野正人, 鈴木康祐, 「二相系格子ボルツマン法による雲内における二つの異径微小水滴が接近する際の挙動解析」, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, 0108, 2 page, 静岡大学. 8 月 2020 【Web 開催】.

[10] 長瀬幸太郎, 吉野正人, 鈴木康祐, 「二相系格子ボルツマン法を用いた二つの液滴が追突する際の挙動解析」, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, 0099, 2 page, 静岡大学. 8 月 2020 【Web 開催】.

[11] 後藤俊幸, 齋藤泉, 渡邊威, 「雲乱流中の凝結・蒸発によるスカラースペクトルの変調」日本物理学会 第 76 回年次大会, 3 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)