

jh220003

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

本課題は、固体粒子群や液滴群を内包する混相乱流に関して、第一原理的な大規模数値シミュレーションを実施するための計算基盤の構築を行うことを目標としている。特に、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、に関するテーマを軸として、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。乱流変調の解析では、非球形の有限サイズ粒子による乱流変調の解析を行い、乱流構造とその統計性の形状依存性を検証した。また雲乱流におけるスカラー場の統計性について、粒子に付随したスカラー量を場に写像して得られる高シュミット数のスカラー輸送の統計性質について解析を進めた。さらに雲乱流中で強い間欠性を示すエネルギー散逸場や渦度場の確率密度関数の振る舞いを説明する理論的枠組みを提示し、これを数値的に検証した。

1. 共同研究に関する情報

- (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名
名古屋大学 情報基盤センター

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) 課題分野

大規模計算科学課題分野

- (3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

- (4) 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	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

2. 研究の目的と意義

研究計画全体の目的

エアロゾルや大気中の液滴、粒子懸濁液の振る舞い、マイクロバブル流に代表される混相乱流の問題について、高精度・高効率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ための技術と経験を積み上げる。また、乱流による粒子輸送のモデリング計算等に役立つ基礎データの収集と分析を行う。本研究課題は 2020、2021 年度採択課題の継続研究の位置づけとなり、詳細は 3 つの研究テーマから構成される。2022 年度は以下の課題に取り組み、研究をさらに発展させた。

2022 年度の目的

1. 微小固体粒子による乱流変調の解析

昨年度まで研究課題で、Volume Penalization

(VP) 法を用いた乱流中の有限サイズ粒子群の挙動解析の計算効率化を進めてきた。陰的解法による時間発展スキームを導入することで、精度を保ったままで時間積分を高速化できる事を示し、有限サイズ固体粒子群による乱流変調解析の基盤が整った。2022年度はこれを用いて、非球形粒子群による乱流変調の粒子形状依存性や粒子数密度依存性を調査する。

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の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のダムケラ数（無次元化された相変化の特性時間）依存性を明らかにする。相変化を有する質点粒子群の乱流輸送シミュレーションを実施し、ラグランジュ的に得られた雲粒子温度の離散データを適切に場の量に写像することで、三つのスケール領域の遷移波数の存在や粘性移流領域の普遍定数の詳細を解析する。

3. 微小液滴同士の衝突・併合過程の解明

乱流強度や重力沈降が微小水滴の衝突や併合に与える影響について評価を行う。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。特に液滴衝突において重要なパラメータである半径比やレイノルズ数による影響について調査し、液滴内部の混合を定量的に評価する方法の確立を目指す。

学術的・社会的意義について

本研究課題は、混相乱流と呼ばれる分野の数値的研究で扱われる問題と密接に関連する。第一の意義は、粒子群と場の相互作用に関する第一原理計算を高速・高効率に実施するための計算手法の開発とその検証にある。粒子周りの流れを解像した計算は必然的に高コストの大規模計算になるが、そこから得られる計算技術と知見はより単純化されたモデル計算手法の開発（質点近似系での代用）

など、様々な工学的流れへの応用展開を見据えたものである。第二の意義は、本課題は雲乱流中で生じている複雑な物理過程の基本原理の理解に貢献できることにある。特に微小液滴のエアロゾルからの発生、衝突・合体による成長、蒸発による消滅などの全容解明は、マクロスケールでの雲物理現象の理解を進展させ、気象予報モデルの高精度化へ貢献できる。第三の意義は、雲乱流中のスカラー・粒子輸送は、混相乱流の問題のプロトタイプといえるものであり、本研究で開発された計算手法や解析手法はポリマー混入流や気泡流、室内環境におけるエアロゾル輸送など粒子群の輸送を伴う様々な問題へと展開可能であることが挙げられる。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

点（粒子）と場（流体）が相互作用する問題に関する並列計算では、粒子情報をプロセス間で通信する際の配列の allocate と deallocate や、場の配列と粒子座標を格納する配列との情報の授受に起因するランダムなメモリアクセスなど、計算負荷を増大させる因子が数多く存在する。このような問題を解決するためには、計算機の構造やアルゴリズムに熟知した研究者の協力が不可欠であり、拠点の公募型研究として実施することは研究を推進する上で大きな意義がある。また、雲乱流中の微小液滴のエアロゾルからの発生や、衝突合体による成長、蒸発による消滅などを解明する事は、マクロスケールでの雲物理現象の理解を進展させ、気象予報モデルの高精度化へ貢献が期待できる。さらに、場と粒子の相互作用に関する計算手法や解析手法は、気泡流やポリマー混入流、室内環境での湿潤対流など、乱流輸送を伴う様々な問題への応用展開が可能であり、拠点の公募研究として学際性を備えている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

成果① 有限サイズ固体粒子群による乱流変調

粒子周りの流れを解像した固体粒子群を多数内

包した乱流の直接数値計算を行い、粒子群による乱流変調の詳細について調べた。流体と固体の連成問題を解く方法として、Volume Penalization (VP) 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質点近似の妥当性や限界を検証した。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 $\tau_f = (6\pi\nu r n_p)^{-1}$ を乱流の大渦回転時間で無次元化して定義される）の関数として解析を行った。その結果、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。

成果② 計算手法の見直しと計算コストの改善

VP 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 η の値により制約を受け、長時間積分の実施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検討した。陰解法を用いる場合、時間刻み幅は浸透率 η 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。実際に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。その結果、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

った。

成果③ 質点粒子に働く流体力の改善

成果①における結果について、質点近似粒子に働く抗力の評価式の妥当性の問題があった。粒子レイノルズ数が1よりも十分小さい場合、ストークス抵抗を用いることが可能であるが、これが1より大きくなると非線形効果を考慮する必要がある。そこで、有限サイズ粒子による結果と質点近似粒子による結果の差異を検討するために、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。その結果、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とがわかった。

成果④ 雲乱流中のスカラー分散スペクトル

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 $Da = \tau_f/\tau_s$, τ_f :乱流の波数に依存する特性時間, τ_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を、乱流統計理論を用いて予測した。また、このスケーリング則の存在を数値シミュレーションによって確認するために、高レイノルズ数乱流の力学モデルであるシェルモデルを用いて、非常に幅広い波数領域 ($0(10^{11})$) にわたる計算を行った。その結果、 Da 数によって、スペクトルには2つの $k^{-5/3}$ スペクトル領域が存在することが明らかになった。

成果⑤ 高シュミットスカラー乱流の統計則

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。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 τ_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 $E_{ss}(k)$ を得る。計算規模を 1024^3 の格子点数まで拡大し、扱う粒子数も格子点当たり1個にまで増大した。このようにして得られた $kE_{ss}(k)$ を各Da数について解析した結果、乱流理論で予測される低波数側で $kE_{ss}(k) \propto k^{2/3}$ 、高波数側で $kE_{ss}(k) \propto k^{-2C_B D_K}$ の振る舞いと矛盾しない結果が得られた。実際にスカラー場を可視化して観測すると、この計算で得られた雲粒子分布はシャープな界面（強い濃淡差）を有しており、高シュミット数スカラーの特徴を示していることがわかった。

成果⑥ 微小液滴同士の衝突併合

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に関する解析を進めてきた。同径水滴同士の衝突の場合、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。一方で半径が両者で異なる場合には、合体挙動とそれる挙動が観測され、ある半径比で最も合体しやすいことがわかった。

一方で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てきた。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

成果① 非球形粒子群による乱流変調

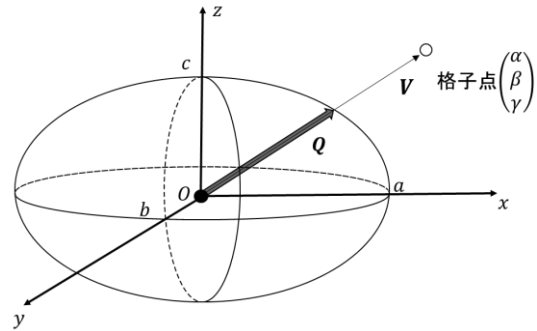


図1 回転楕円体粒子の設定の模式図

昨年度に引き続き、有限サイズ粒子群による乱流変調の解析を進めた。今年度は回転楕円体形状の粒子を乱流中に多数配置した場合に、乱流の運動エネルギーがどの程度減少するかについて、粒子数密度および粒子形状を変化させて解析を行った。粒子群は計算領域に一定間隔で周期的に固定配置し、形状のみを変化させる。粒子系状は回転楕円体とし、長軸方向を回転楕円体の回転軸（図1）としてこれを各粒子についてランダムな方向に分布させた。長径と短径の比を変化させて形状を変化させるが、粒子の体積は一定となるようにした。球体粒子、扁球粒子、長球粒子の場合のそれぞれのパラメータ値を表1に示す。流体場の時

	球体粒子	扁球粒子	長球粒子
a	0.06	2.88×10^{-2}	1.25×10^{-1}
b (= c)	0.06	8.65×10^{-2}	4.16×10^{-2}
a/b	1	1/3	3
体積V	9.05×10^{-4}	9.05×10^{-4}	9.05×10^{-4}
表面積S	4.52×10^{-2}	5.71×10^{-2}	5.34×10^{-2}

表1 粒子形状に関するパラメータ値

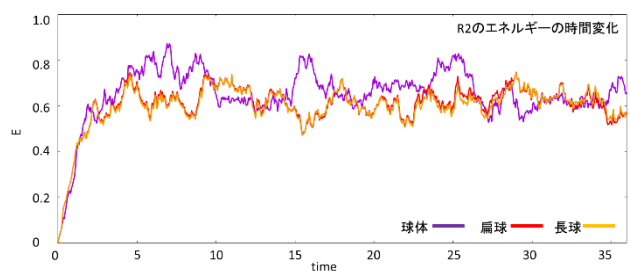


図2 乱流運動エネルギーの時間変化の様子

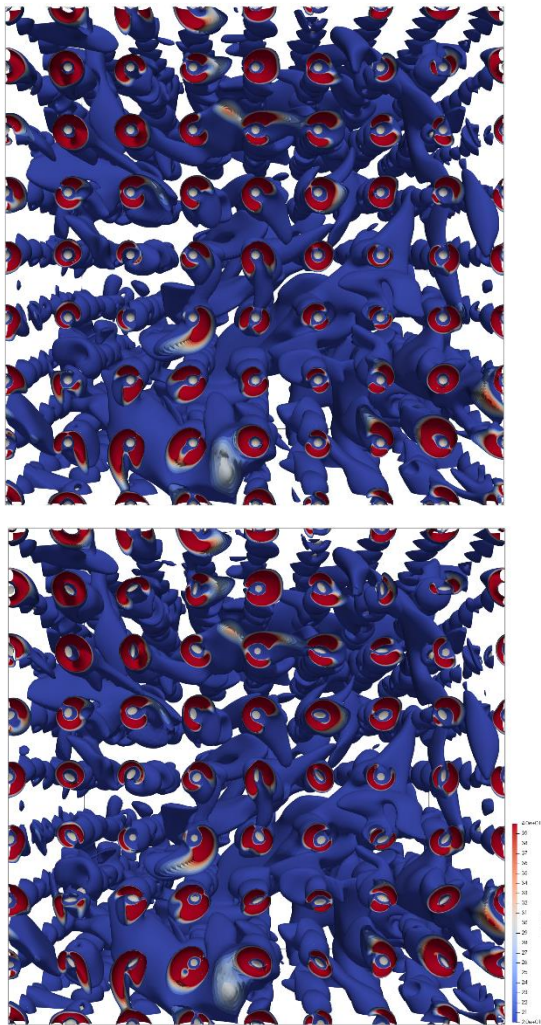


図 3 渦度場の等値面の可視化結果. 上: 球体粒子, 下: 扁球粒子

間発展式はフーリエ・スペクトル法を用い, 2 次精度アダムズバッシュフォース法で時間積分を行った. 計算領域は 2 次元領域分割とし, x 軸方向に 8 分割, z 軸方向に 8 分割の 64 プロセスを用いて計算を行った. 図 2 に乱流運動エネルギーの時間変化の様子を示す. 流体場の計算格子点数は 1024^3 , 粒子数 $729 (=9^3)$ を等間隔に配置している. このとき体積分率は 0.266% であった. 図 2 より, 粒子群が占める体積分率が同一でも, 粒子形状の違いは乱流変調に一定の影響を及ぼすことがわかる. また図 3 に乱流中の渦度場の大きさの等値面を可視化したスナップショット図を示す. 乱流場の生成機構 (外力) が同一であるので, 全体的な流れ場の様子に差異は見られない. しかし, 各粒子の周りに生じる渦構造に違いがみられることがわかる.

成果② 粒子群による雲乱流変調機構の解明

乱流理論では雲乱流中の温度揺らぎと水蒸気揺らぎのスペクトルは Kolmogorov スペクトル $k^{-5/3}$ に近いと考えられている. しかし, 雲乱流シミュレータ (CTS) によると雲乱流中では雲粒子による変調が高波数側から低波数側へと次第に伝搬することが明らかになっている. また, 過飽和度の揺らぎに関する乱流理論においては, 2 つの Kolmogorov スペクトル領域ともう一つのべき領域 k^{-1} がある事が示された. この k^{-1} スペクトルは分子拡散係数が 0 の乱流混合に相当するため, 連続場の数値計算による検証は難しい. この問題の解決に向けて, スカラー粒子のオイラー・ラグランジュ的計算法を新たに開発してきた. これはある特性時間を持つスカラー量を流体粒子に付随させ, これを多数導入して Lagrange 的に追跡し, そのスカラー量の空間スペクトルを流体格子点上で計算する方法である. 図 4 に得られたスカラー分散スペクトルを示す. k^{-1} から $k^{-5/3}$ の遷移が明瞭にかつ, 乱流理論で予想される遷移波数 $k\eta \gg 1$ よりも極めて低波数 $k\eta = 0.038$ で生じる事を確認できる [8, 10]. この成果は現在, Phys. Rev. Fluids 誌に投稿中である.

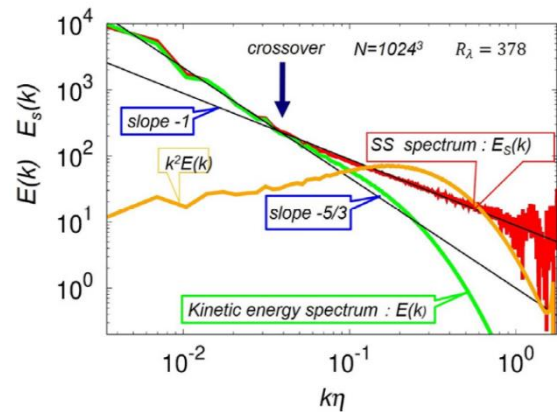


図 4 CTS により得られた運動エネルギースペクトル $E(k)$ (緑) と雲水揺らぎ分散スペクトル $E_\theta(k)$ (赤). $E_\theta(k)$ はスロープ $-5/3$ と -1 の領域が存在し, $k\eta = 0.038 \ll 1$ で遷移している.

成果③ 乱流の速度勾配揺らぎの統計則の解明

温度場と過飽和度揺らぎ，雲粒子成長と空間分布揺らぎは乱流場に大きく影響を受ける．雲乱流を特徴づける乱流の運動エネルギー散逸率 ϵ と渦度の2乗（エンストロフィー $\Omega = \omega^2$ ）は，雲乱流のモデリングに欠かせない物理量である．乱流のエネルギー散逸率 ϵ は，巨視的スケールから散逸スケールまでの運動エネルギー輸送を反映しており，一方でエンストロフィーは乱流中の渦構造などを特徴づける特性量である．両者は速度勾配テンソルの歪みと回転成分にそれぞれ対応するが，この両者の統計法則は乱流研究の初期の頃から注目を集めてきた．特に， Ω の確率密度関数（PDF）のすそ野は常に ϵ のPDFのすそ野よりも長いことが知られており（図5 (a)），この相違は長い間，謎とされてきた．PDFの長い裾野は極めて強い揺らぎの存在を意味し，乱流の間欠性と密接に結びついている．この謎を解くために，乱流統計理論と大規模数値シミュレーションによる解析を行った．レイノルズ数の増大につれ，両PDFの左右のすそ野（弱い揺らぎと強い揺らぎ）は引き延ばされたガンマ分布

$$P(x) = x^{N/2-1} \exp(-Bx^\beta) / Z$$

（ $x = \epsilon/\bar{\epsilon}$ または $\Omega/\bar{\Omega}$ ， N は ϵ または Ω の定義に含まれる独立な項の数， ϵ では $N_\epsilon = 5$ ， Ω では $N_\Omega = 3$ ， Z は規格化定数）で与えられ，指数は常に $\beta_\epsilon = \beta_\Omega < 1$ であり，レイノルズ数の増大とともにゆっくりと減少することが見出された（図5 (b)） [3, 9]．そして，減衰率 B がすそ野の長さを決定づけ，常に $B_\Omega < B_\epsilon$ であり，レイノルズ数が無限大の時 B_ϵ/B_Ω は 1.51 に漸近することが理論とDNSにより示された（図5 (c)）．この比は， N_ϵ と N_Ω から決まることから，PDFのすそ野の長さの違いは運動学的なものであり，乱流の動力学は β を決定づけることが分かった [1, 6]．この成果は現在論文を Phys. Rev. Lett. 誌に投稿中である．

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

1. 非球形粒子群による乱流変調の調査

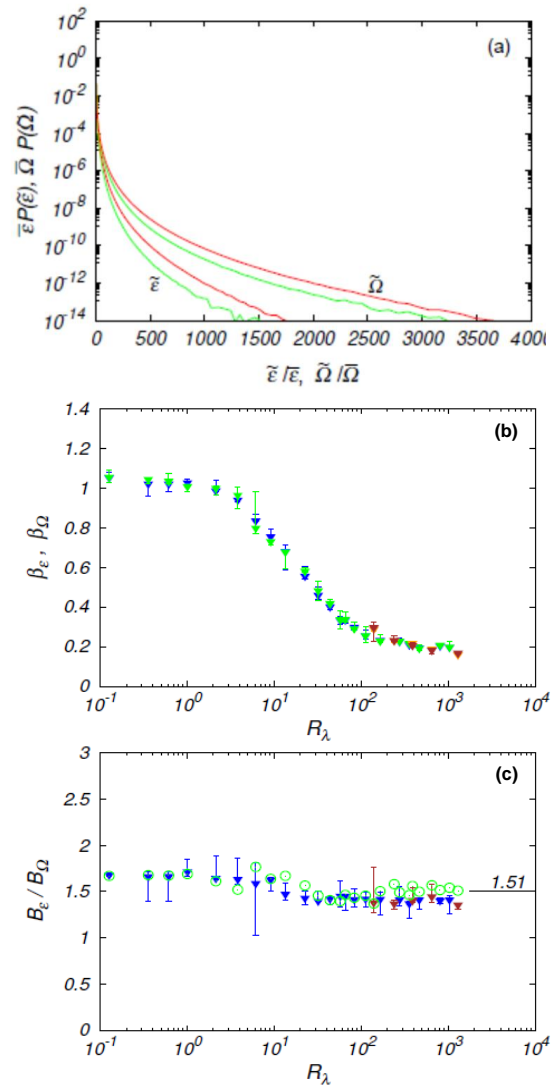


図5 PDF と指数，減衰係数の比の R_λ 依存性．(a): $P(\epsilon)$ (緑) と $P(\Omega)$ (赤)． $R_\lambda = 392$ (下2本)， $R_\lambda = 1016$ (上2本)．(b): β_ϵ (緑)， β_Ω (青)，(c) B_ϵ/B_Ω ．緑：漸近理論，青：DNS

当初計画：粒子形状が回転楕円体である場合について解析し，楕円体の扁平率の差異が乱流変調に及ぼす影響について調査する．

達成度：上記に記載した解析について，計画通りに解析を進めることができた．自己評価としては90%満足 of いくものである．

今後の展望：計算と解析を計画通り進めたが，得られた結果についてはさらに掘り下げる必要がある．特に現象論的に粒子形状の乱流への影響を説明するために，理論的な解析も併せて進めていくことが必要であると考えている．また結果を学会

で発表し、学術論文にまとめることを検討する必要がある。

2. 雲乱流中のスカラー揺らぎのダムケラ数依存性

当初計画： 雲乱流中の過飽和度の揺らぎスペクトルには過飽和度の特性時間と乱流特性時間との比（ダムケラ数）に応じて3つのべき的スケーリング領域（2つの $k^{-5/3}$ 領域と k^{-1} 領域）が存在する。この検証のために相変化を伴うスカラー量を付随した粒子群が多数分散した乱流の大規模シミュレーションを実施し、三つのスケーリング領域の遷移波数の存在や粘性移流領域の普遍定数の詳細を解析する。また、本課題に関連して、雲乱流中の散逸率と渦度の揺らぎの統計性の違いを理論的、数値的に明らかにする解析を実施し、その差異の起源を明らかにした。

達成度： 三つのスケーリング領域が存在するような大規模な解析を実施することは出来なかった。しかし、最も高波数領域である k^{-1} 領域について、その普遍定数の値を求めることができた[8]。この値は乱流モデル等では重要なパラメータとなるため、本研究の成果として重要なものの一つに挙げられる。また、乱流中の速度勾配の揺らぎの性質を基本原理に基づいて理解することができた。自己評価としては80%程度の達成度であると評価する。

今後の展望： 二つのスケーリング領域を持つ計算の実施は可能であるが、三つの領域を同時に計算するには、かなりの計算機資源を必要とする。今後はスカラー付随粒子の計算に要するコードの改良と計算の効率化を図りつつ、大規模解析にチャレンジしていきたいと考えている。さらに、粒子の数密度揺らぎと乱流の散逸場やエンストロフィーの揺らぎの相関性を明らかにする解析を行うことで、雲乱流のパラメタリゼーション等に役立つ知見を積み上げたい。

3. 微小液滴同士の衝突・併合過程の解明

当初計画： 2つの微小水滴の衝突条件とレイノルズ数や液滴半径との関連性を、改良二相系格子ボルツマン法を用いて解析してきた。衝突において特に重要なパラメータである半径比やレイノルズ数による影響についてさらに詳しく調べ、液滴内部の混合を定量的に評価する方法を確立する。

達成度： 今年度は計算機資源の割り当て状況から、テーマ1とテーマ2を優先して実施したのでテーマ3については計画通り進めることが難しかった。大きな進展がなかったため、本テーマについての達成度は評価不能とする。

今後の展望： 昨年度までの成果で当初の目的をある程度達成できている部分もある。本テーマに関する解析は、他のテーマの進捗や展開を見据えて進めていきたいと考えている。

以上より、総合自己評価は、概ね75%程度の達成度であると考えられる。

7. 研究業績

- (1) 学術論文（査読あり）
- (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）

[1] Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Izumi Saito, “Probability density functions of dissipation rate and enstrophy in turbulence” 75th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, (Indiana Convention Center, Indianapolis, Indiana.) 2022年11月21日

[2] Takeshi Watanabe, Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, “Turbulence modulation by small particles in isotropic turbulence”, RIMS Kokyuroku 2215, 20-30, 2022年04月

[3] Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Izumi Saito, “Asymptotic probability density functions of dissipation rate and enstrophy in turbulence”, International Symposium on Turbulence (IST2022) in Memory of Chou Pei-Yuan’s 120th anniversary of Birth 2022 年 08 月

レーション”, 京大数理解析研究所 RIMS 共同研究 (公開型)「乱流の予測可能性と可制御性」, 2022 年 7 月 20 日

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[4] 佐藤友哉, 後藤俊幸, 渡邊威, 高橋一郎, “室内における人体回りの湿潤対流と熱輸送”, 日本物理学会 2023 春季大会 (online), 2023 年 3 月

[5] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, “雲乱流環境における過飽和度揺らぎのラグランジュ的自己相関時間”, エアロゾル・雲・降水に関する研究集会 (online), 2023 年 3 月

[6] 後藤俊幸, 渡邊威, 齋藤泉, “エネルギー散逸率とエンストロフィーの漸近的確率密度関数”, 日本流体力学会年会 2022 (京都大学), 2022 年 9 月 28 日

[7] 佐藤友哉, 後藤俊幸, 渡邊威, “室内における人体回りの湿潤空気の流動解析”, 日本流体力学会年会 2022 (京都大学), 2022 年 9 月 29 日

[8] 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸, “ラグランジュ描像に基づく高シュミット数スカラー乱流の直接数値シミュレーション手法”, 日本流体力学会年会 2022 (京都大学), 2022 年 9 月 29 日

[9] 後藤俊幸, 齋藤泉, 渡邊威, “雲乱流中の過飽和度揺らぎの統計特性”, 日本物理学会 2022 年秋季大会 (東京工業大学) 2022 年 9 月 13 日

[10] 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸, “粒子法を用いた高シュミット数スカラー乱流の直接数値シミュ

(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)