

jh180009

乱流混合と内部自由度のあるマイクロ粒子巨大集団との相互作用

後藤俊幸（名古屋工業大学）

概要 雲粒子などの内部自由度をもつマイクロ粒子の巨大集団と乱流混合との相互作用を大規模数値計算により解析した。エアロゾルからの雲粒子生成過程の計算をミンガン大学の室内実験とほぼ同等の領域サイズとレイノルズ数で検証し、雲粒径分布関数は室内実験を再現することが分かった。ドイツアルプス山頂で観測された雲水混合比揺らぎのパワースペクトルと同様のスペクトルが雲マイクロ物理シミュレータで得られた。超水滴法による雲成長コードを開発し、重力カーネルによる雲質量密度関数の時間発展が得られた。微小な同径水滴の衝突・合体を気液二相系の格子ボルツマン方程式と VOF 法を組み合わせ、ウェーバー数が大きい領域で計算し、先行計算結果と一致する結果を得た。微小ではあるが有限の大きさを持つ固体粒子群と乱流の相互作用に関する大規模計算を行った。乱流スペクトルは高波数側で大きく励起され、乱流変調は粘性散逸領域だけでなくより大きな空間スケールでも起きていることが分かった。

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
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

後藤俊幸	名古屋工業大学 物理工学専攻	総括、乱流場と雲粒子コードの高速化、乱流混合および雲成長プロセスの解析
田中良夫	産業技術総合研究所 情報技術研究部門	大規模並列計算における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
渡邊威	名古屋工業大学 物理工学専攻	乱流中の有限サイズ粒子輸送モデルの開発と大規模計算、乱流混合の解析
齋藤泉	名古屋工業大学 物理工学専攻	乱流場と雲粒子コードの高速化、乱流混合および雲成長プロセスの解析
荻野正雄	名古屋大学情報基盤 センター 大規模計算 支援環境研究部門	大規模並列計算における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
三浦英昭	核融合科学研究所 ヘリカル研究部	乱流中の粒子輸送モデルおよび雲粒子衝突モデルの開発
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 μm スケールの雲粒子の衝突解析

2. 研究の目的と意義

【目的】

本研究では、雲マイクロ物理過程と乱流との相互作用の研究でこれまで培ってきた乱流と内部自由度を持つ微小粒子集団の数値計算法をさらに発展させ多様な問題に展開することを目的とする。具体的には（１）内部自由度を持った極めて多数（ $0(10^9)$ ）のマイクロ粒子と乱流との相互作用を計算する雲マイクロ物理シミュレータ（Cloud Microphysics Simulator CMS）により、エアロゾルの空間分布、雲粒子成長の速さや粒径分布、乱流による温度、水蒸気の混合輸送特性や揺らぎの効果を調べることで、（２）実際の雲中に近いパラメータ領域で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こと、（３）マイクロスケールの非球形固体粒子群と流れの相互作用を解析するためのコードを作成し、流れから受ける力やトルクの粒子形状依存性を調べることを目的とする。

【意義】

雲粒子成長とこれに関わる乱流輸送の揺らぎの特性が直接シミュレーションによって明らかにされることは、観測や実験では得られなかった雲内部のデータ（衝突確率、雲粒径分布）や知見をもたらす、さらに大きなスケールでの雲物理解明と予測のための物理モデルの高精度化に大変役に立つ。微小だが有限サイズを持つ雨粒子、微小氷晶、火

山灰、微小生物などは乱流により輸送・混合されると同時に運動量や熱の交換を通して乱流運動に影響を与えるので、これらの乱流輸送現象の解明は環境、気象、工学など多くの場面で重要となる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

複数の分野の研究者がそれぞれの問題と計算技術を持ち寄り、共同研究を通してマイクロスケール粒子の持つ自由度の動力学と乱流というマクロ自由度の動力学との相互作用を第 1 原理的に解析する計算手法が確立される。これにより、これらのマルチスケール・マルチフィジックス現象の解明に大きく貢献できるという意義がある。さらにはこれらの手法をソフトマターや粒子・流動系の挙動解析を通じて産業への応用も期待できる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

【1-1】雲粒子成長と衝突計算の検証

雲粒子から雨粒子形成にいたるまでの時間発展を第 1 原理的に計算するクラウドマイクロ物理シミュレータ (CMS) の検証を行った。鍵となる物理プロセスは、1. エアロゾルからの雲粒子生成、2. 凝結成長、3. 衝突・併合による成長である。

まず 1 と 2 の検証。最近、過飽和状態における対流乱流中にエアロゾルを注入率を変えて投入したミシガン工科大 (MTU) グループによる室内実験 (Chandrakar et al, PNAS, 2016) が報告された。それによると、エアロゾル注入率が小さいとき生成される雲粒子粒径分布のピークは大半径側にあり分布の幅は広いが、注入率の増大とともにピークは小さい半径側に移動し、粒径分布の幅が狭くなるという。この実験に対応するシミュレーションを行った。1 辺が 12.8 cm の立方体内に一定の割合で半径 $0.5 \mu\text{m}$ の微小水滴を導入した。この中には 10^{-13}g の NaCl が含まれているとし、ケーラー曲線 (雲粒子の曲率とエアロゾルの効果を取り入れたもの) に沿って成長させる。乱流・温度・水蒸気場、雲微粒子の時間発展を長時間にわたり計算した。室内実験状態の完全な再現ができていないが (CMS ではレイノルズ数と計算領

域が実験よりかなり低い)、定常状態における雲粒子粒径分布関数について室内実験結果と CMS の計算結果は定性的に一致していることがわかった。

乱流輸送とケーラー曲線のもとの雲粒子生成と凝結成長は、数学的には壁のある場合のブラウン粒子の拡散の問題とほぼ同等であることが示せる。両者についてのランジュバン方程式を考え、雲粒子半径の 2 乗 $R^2(t) (>0)$ とランダムな過飽和度 $S(t)$ に対して、 $x>0$ にのみ運動が許されるブラウン粒子の位置 $x(t)$ とランダム外力 $f(t)$ を対応させる。理論結果は、粒径分布関数は $P(R) = 2\lambda^{-1}e^{-R^2/\lambda}$ であり、CMS の結果と比べたところ、大きい半径では両者の一致が見られた。また、凝結による粒径分布の分散は乱流のラグランジュ速度相関関数の特性時間と密接に関連していることも明らかになった。これらより、エアロゾルを核とする雲粒子の凝結成長について CMS は実験と比較して妥当な結果を再現することが分かった。

第 3 の検証。質量 (粒径) 分布関数がスモルコフスキー方程式に従うとし、雲粒子の慣性が無視でき、かつ 2 粒子の衝突・併合は 2 粒子の体積比が $1/2$ 以上 2 倍以下の時のみに起こるという単純化したモデルを導入し、波動乱流や乱流統計理論にヒントを得たやり方でこの定常解を求めた。その結果、粒子スペクトルは $n(\sigma) \propto \sigma^{-2}$ (σ は体積) というべき法則に従うことが分かった。このモデルを CMS を利用して長時間積分を行った結果、分布関数は $n(\sigma) \propto \sigma^{-2}$ に比例した裾野を時間とともに広げてゆくことが分かった。この結果 Phys. Rev. E に発表された [1]。

【1-2】乱流と雲粒子の相互作用

雲乱流中ではコルモゴロフスケール以下の雲粒子は水蒸気の凝結・蒸発により乱流場と相互作用する。実際、乱流スカラーのオブコフ・コアシンスペクトル $E_\theta(k) \propto k^{-5/3}$ は慣性移流領域から拡散領域にわたって変更をうけることが本シミュレーションにより初めて明らかにされた。粒子数密度のスペクトルを詳細に解析すると、低波数側では k^1 に、高波数側では k^2 に比例するスペクトルを得

た。後者は、雲粒子の粒子性を反映したものである。このスペクトルと乱流の特性時間から、水蒸気混合比揺らぎと温度揺らぎのスペクトル ($k^{-1/3}$ と k^{-2}) を説明することができた。

【1-3】雲乱流研究コミュニティの形成

雲乱流の分野は乱流と気象の研究コミュニティの境界領域である。両分野の基礎知識の共有と研究者交流そして今後の共同研究への契機となることを目的として、名工大で NITech Lectures on Turbulence and Cloud (<http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloudlec.html>) を 2018 年 3 月 8,9 日に開催した。海外からの著名な研究者 3 名には、各々 2 時間の集中講義を依頼した。前半の 1 時間は初学者向けに基礎知識の講義、後半はそれに基づいた最新の研究内容の講義である。国内からは 6 名の研究者が各 40 分の講演を行った。学生をはじめ関東や関西の大学研究者、気象庁、地元企業からの参加者を得て大変盛況であった。

【2】雲粒子衝突ダイアグラム

雲粒子を想定した大きさの異なる 2 つの水滴が接近する現象に対して、半径比 ($\Delta = R_s/R_l$) が水滴の挙動に与える影響を調べた。雲粒子の典型的な衝突パラメータ領域、 $Re = 1.0$ 、ウェーバ数 $We = 4.28 \times 10^{-2}$ 、オフセット $B = 0.9$ に対する $\Delta = 1.0$ (同径) および $\Delta = 0.5$ (異径) の両ケースを解析した。その結果、同径の場合には水滴同士は衝突・合体したが、異径の場合には接近時に互いに避ける (それる) 挙動を示し衝突は起こらなかった。異径の場合には、水滴まわりの流れ場がオフセット方向に非対称であること、ならびに同径の場合とは異なり 2 つの水滴間の気相領域の圧力低下が生じないことが、液滴接近時のそれる挙動を示す要因になっていることが分かった。

【3】粒子の受ける力やトルクの形状依存性

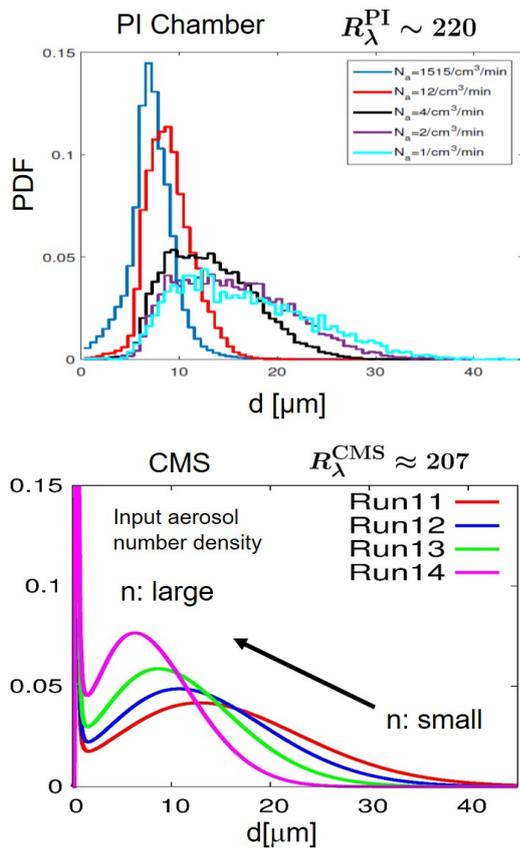
雲中の氷晶や大気中の微小汚染物質など、乱流によって輸送される様々な形状の固体粒子の振る舞いを計算するため、粒子レイノルズ数が十分小

さい非球形粒子に働く力とトルクを評価するための計算コードを作成し、その妥当性を評価した。流体と固体微粒子の相互作用の計算は、volume penalization (VP) 法を用いて実装した。有限の大きさを持つ固体粒子群と乱流の相互作用に関する解析を行うため、乱流の格子解像度を 1024^3 、1 粒子について約 20^3 格子点を用いてその周りの流れを解像した。乱流変調への影響を粒子群の体積分率と比重を変化させて解析を行い、エネルギー Spektral の変形やエネルギーカスケードに及ぼす影響について詳細を調べた。また、この方法を 34 億年前の海中に生息したと推測される微生物の微化石の流体力学的挙動解析に応用し、古微生物集団の生息域の違いを論じた[4]。

5. 今年度の研究成果の詳細

【1】雲粒子成長計算の検証の進展

今年度前半では、エアロゾルを核とした雲粒子生成過程に対する乱流強度と計算領域の大きさの影響を見るために、CMS による計算をより高いレイノルズ数で進めた。前年度は、立方体の 1 辺が 12.8cm で格子点数 = 128^3 、並列数 16 で行っていた計算を、1 辺が 102 cm、格子点数 512^3 、並列数 1024 に拡大した。この結果、乱流レイノルズ数を $R_\lambda = 52$ から $R_\lambda = 207$ に飛躍的に増大させることができた。米国ミシガン工科大 (MTU) グループによる室内実験では、半径が 1 m、高さ 1 m の円筒形内 (体積が π) での熱対流中における雲粒子生成・成長を計測しており、その乱流レイノルズ数は約 $R_\lambda = 220$ である。従って、我々の CMS の大規模計算は、ほぼ MTU の室内実験と同等の条件で行なっていることになる。図 1 は MTU での実験結果と今年度行っている CMS 計結果との比較を示したものである。図中、Run11, 12, 13, 14 のエアロゾル注入率は 1.3, 2.7, 5.5, 11 $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ であり、室内実験のそれは 1, 2, 4, 12, 1515 $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ である。1515 というエアロゾル注入率は本 CMS では計算負荷が大きすぎるため除外している。前年度の小規模計算では、エアロゾル注入率の増加とともに雲粒径分布関数のピーク位置が小半径側に移動し、分布の広がりが狭



$L_{\text{box}} = 1\text{m}$, $N = 512^3$, $T_e \approx 2.7\text{s}$, $T_{\text{res}} = 580\text{s}$

図 1 雲粒径分布のエアロゾル数密度数依存性の比較。ミシガン工科大の Pi Chamber 室内実験（上図）と CMS（下図）の乱流レイノルズ数と対象領域サイズはほぼ等しい。CMS の曲線の左端のピークはエアロゾル注入の影響による。

くなるなどの定性的性質は再現できていたが、定量的な比較、特に低注入率での分布のすそ野が実験に比べて短かった。しかし、領域サイズとレイノルズ数を実験とほぼ同程度にすることで、低注入率の場合における CMS による分布曲線の右側裾野が定量的に実験を再現することが分かった。また、CMS 曲線のピークの左側に向かう部分は実験と比べるとゆっくりと減衰している（CMS の曲線で、左端にあるピークはエアロゾル注入による影響であり除外してよい）。MTU によれば、最近導入した高精度粒径分布計測装置による実験曲線もほぼ CMS 曲線と同じくゆっくりと減衰することが分かった。これらの比較は、代表者の後藤が 9 月に 1 週間[11]、斎藤が 9 月中旬から約 1 か月半[12]、MTU の Shaw 教授に招聘されて共同研究を進める中で得られたものである。これら CMS と Pi Chamber

実験との極めてよい一致は両グループを大いに勇気づけるものである。今後のさらに密接な共同研究を進めていくことが合意され、現在、進行中である。

1 つの雲全体の成長を計算する方法として、島 (Shima et al. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **135**: 1307–1320 (2009)) らが開発した超水滴法 (SDM) と呼ばれる計算法がある。これは数千万個の雲粒子を一つの超水滴として表し、雲粒子間の衝突をモンテカルロ的に計算する方法である。一方、CMS による雲粒子の成長の詳細な計算は雲内の小さな立方体内で行われている。CMS で得られた知見を超水滴法による雲全体の成長計算に接続するため（階層接続）の準備を始めた。第 1 歩として、当研究グループで超水滴法によるコードを開発した。

これまでの計算領域は立方体であったが、鉛直方向に十分な高さを確保するために、2 次元領域分割による 3 次元 FFT を 3 軸方向に独立の格子点数で計算できるようにするコード開発を行った。

今年度後半においては、まず、雲粒径分布のエアロゾル数密度数依存性に関する論文発表に注力し、現在（5 月）論文の受理が決まった[6]。

ドイツのアルプス山頂で計測された雲水混合比（雲中の水滴成分、LWC）のパワースペクトル $E_{ql}(f)$ は高振動数側で乱流理論の予測 $f^{-5/3}$ よりもゆっくり減衰 $E_{ql}(f) \propto f^{-a}$ ($0 < a < 5/3$) することが報告されている。これが、本 CMS でも再現できるかどうか、その物理的機構を解明することを目的として研究を進めた。雲粒子の衝突・併合よりもむしろ、雲粒子の動力学、凝結成長および乱流混合が主要な要因であろうと推測を立てて、これまでの CMS 計算よりもさらに大きい 1024^3 の格子点数を用いた（これは、雲粒子成長過程の大規模シミュレーションによる全体計算に向けての予備計算を兼ねている）大規模計算を行った。乱流、温度、水蒸気混合比の場に雲粒子を注入して定常状態を維持し、この時の雲水混合比スペクトル $E_{ql}(k)$ を計算した。ただし、これまでの研究から、このスペクトルには雲粒子の離散性によるショットノイズの影響と雲粒子からの連続場の格子

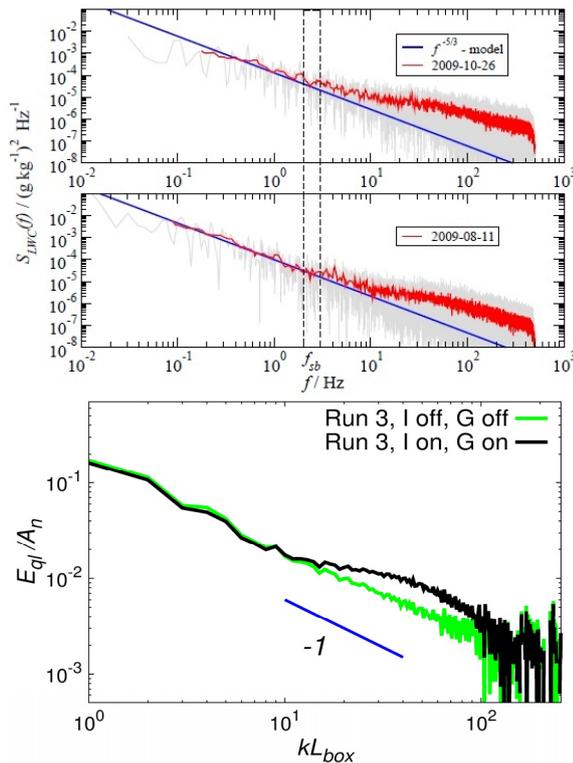


図 2 雲水混合比 (LWC) のスペクトル。
 上図：ドイツアルプス山頂で観測された LWC パワースペクトル。下図：CMS で計算された LWC スペクトル。両者とも、低波数 (振動数) 側には $E_{ql}(k) \propto k^{-5/3}$ に近い部分と高波数 (振動数) 側には $E_{ql}(k) \propto k^{-b}, b \sim 1$ のスペクトルが観察され、重力沈降を無視した場合にはさらに減衰の遅いスペクトルが観察される。

点への線形補間による数値フィルターの影響を除外する必要がある (この手法は、以下の「【3】乱流中の微小粒子群の挙動と乱流変調」でも用いられている)。図 2 はこうして得られた雲水混合比 (LWC) スペクトルである。雲粒子の重力による沈降がなければ低波数側には $E_{ql}(k) \propto k^{-5/3}$ に近い部分と

高波数側には $E_{ql}(k) \propto k^{-b}, b \sim 1$ のスペクトルが観察され、重力沈降を無視した場合にはさらに減衰の遅いスペクトルが観察される。高波数側での $k^{-5/3}$ スペクトルからのずれの生成機構についての物理的説明は未だ得られていない。

雲粒子の凝結成長と過飽和度とは密接な関係にある。雲粒子と過飽和度揺らぎの空間分布の可視化解析を行った。図 3 は LWC の空間分布をフィルターなしで (ショットノイズを含んだままで) 可視化したもの (左図)、フィルターによりショットノイズを除去したもの (中図) および過飽和度揺らぎ (右図) の可視化画像である。上図では、雲粒子の離散性が強調されているものの、空間分布の仕方に過飽和度との相関が見て取れる。

今年度前半からの超水滴法 (SDM) の開発と検証をほぼ終えた。図 4 は雲粒子が重力による沈降のみを受けて (乱流輸送を受けない) 衝突・合体する確率モデル (重力カーネル) を用いたときの、雲質量分布関数送の時間発展である。この結果は、島らの計算と同等な結果であることを確認した。

さらに、SDM と CMS との数値的接合を念頭においたシミュレーションを行った。SDM の最大領域は 1 辺が $L = 1,638\text{m}$ の立方体で、最小格子幅 $\Delta x = 12.8\text{cm}$ 、一方、CMS の最大領域は $L = 12.8\text{cm}$ 、最小格子幅 $\Delta x = 1\text{mm}$ にとる。SDM での最小スケールで計算した乱流速度ひずみテンソルを、CMS での最大スケールでの平均せん断力として導入する手法の検討を行うとともに、CMS の結果を SDM に反映する手法について検討を行った。

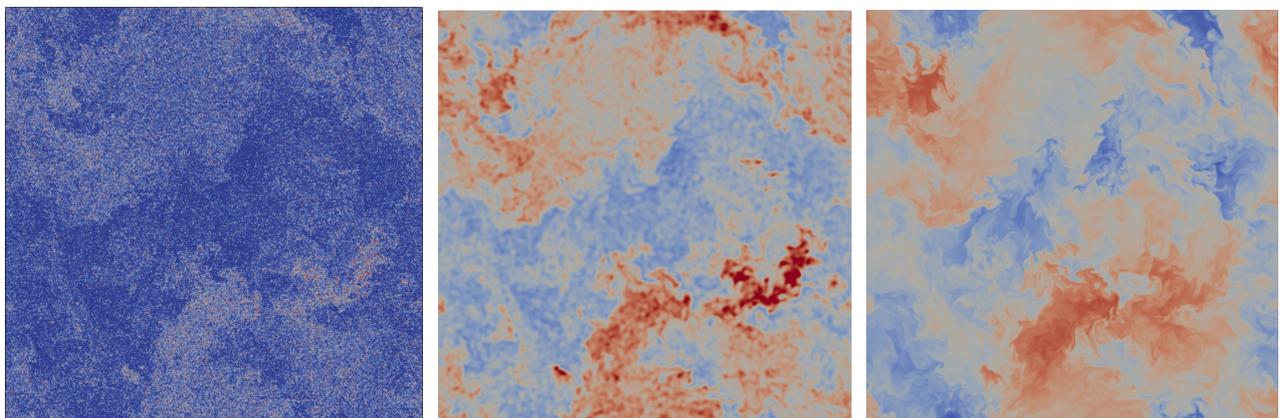


図 3 雲水混合比 (LWC) の 2 次元空間分布。左図：フィルターなし LWC，中図：フィルターにより高波数成分 (ショットノイズ) を除去した LWC，右図；過飽和度の空間分布。

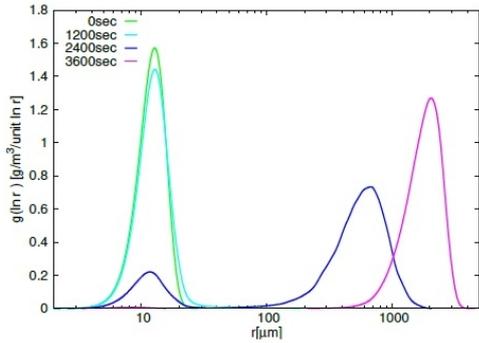


図4 超水滴法（重力カーネルを用いた計算）における雲粒子質量密度分布関数の時間発展。時間経過とともにピークが右に移動する。

鉛直方向に長い直方体領域における 3 次元 FFT の開発を行った。最も格子点数の多い方向にパタフライ演算軸をとり他の 2 方向で 2 次元領域分割した。3 次元 FFT の検証の後、回転乱流に応用した。(Nx, Ny, Nz) = (2⁸, 2⁸, 2¹⁰) の格子点数, 8x8 MPI, 4 thread R_x=250, Ro=0.4 (小さいほど回転が強い) の計算を行い、乱流スペクトルの非等方性を確認した。残念ながら、3 次元 FFT の高速化はできたものの十分ではなく、今後の改善が必要である。

【2】雲粒子間衝突の計算手法に対する検証

空気-水系を想定した高密度比の気液二相流計算は、計算負荷などの点で困難なものであった。今年度前半では、Inamuro ら [Comput. Fluids, 137, (2016), pp.55-69] によって開発された新しい改良二相系 LBM を界面張力の小さい（ウェーバー数大）条件下における液滴の二体衝突問題に対して用い、妥当性を検証した。種々のウェーバー数および衝突パラメータに対する衝突挙動について、VOF (Volume of Fluid) 法による結果を図 5 に示す。 $B = X/D$ は衝突パラメータ、 X は 2 つの液滴のオフセット量、 D は液滴直径である。液滴同士は合一する場合と伸張分離する場合に分類され、その境界線は VOF 法による既存の計算結果と良く一致する。従って、本手法は、雲粒子のような水滴直径の小さい（低ウェーバ数）領域の解析にも適用可能であることが分かった [2, 3]。

今年度後半では、粘性項を正しく評価した改良

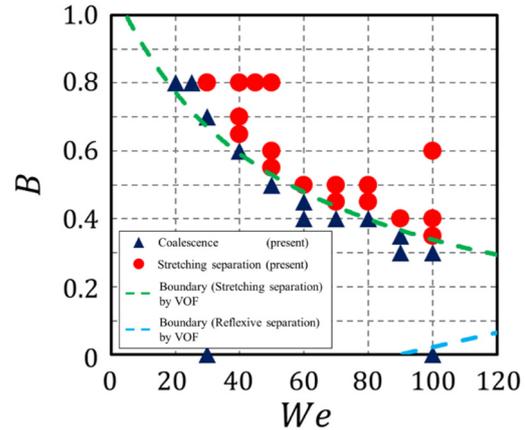


図5 各ウェーバー数および衝突パラメータに対する液滴の衝突挙動

二相系 LBM を用いて、2 つの同径 ($R_s = R_l$) および異径 ($R_s < R_l$) の雲粒子の衝突計算を行い、レイノルズ数 Re 、ウェーバー数 We および雲粒子の半径比 $\Delta = R_s/R_l$ が挙動に与える影響を調べた。衝突パラメータ $B = X/(R_s + R_l)$ (X : オフセット量) を $B = 1$ 、気相と液相の密度比を 800、粘度比を 55 とし、 $0.50 \leq Re \leq 1.25$, $8.55 \times 10^{-3} \leq We \leq 8.55$, $\Delta = 0.4, 0.5, 0.8, 1.0$ の計算を行った。その結果、本計算パラメータの範囲では、どの条件でも合体挙動を示す結果となった。以前の手法では、二相の粘性を過大評価していたため、結果的により低いレイノルズ数の計算を行っていたことに相当する。よって、本計算で雲粒子が合体せずにそれる現象が得られなかったのは、定性的には妥当な結果とも考えられる。さらに新たな試みとして、二相流体を表現する方程式を Cahn-Hilliard 方程式から保存型 Allen-Cahn 方程式に変更することにより、液滴の保存性をより高める工夫を行った。液滴の縮みは抑制され微小液滴の維持も可能となり、静止状態の液滴に関しては妥当な計算結果が得られた。一方、対称性のある液滴の衝突計算に適用した場合、対称性が崩れやすい傾向があることがわかった。

【3】乱流中の微小粒子群の挙動と乱流変調

今年度は、昨年度から開発してきた乱流中の有限サイズ粒子群に働く力とトルクを評価するため

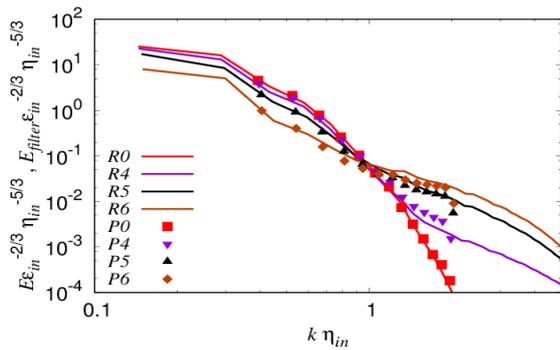


図6 粒子群による乱流のエネルギースペクトルの変化の様子. 比重 (β) の増加とともに, 全波数領域でのスペクトルの振る舞いが大きく異なる. また質点近似した粒子群による乱流変調との結果は極めてよく一致していることがわかる.

の計算コードを用いて, 微小ではあるが有限の大きさを持つ固体粒子群と乱流の相互作用に関する大規模計算を本格的に実行した. 乱流計算の格子点数は 1024^3 , 一つの粒子について約 20^3 格子点を用いてその周りの流れを解像し, 個々の粒子群の挙動と乱流変化の様子を, 長時間に渡る数値積分を実行することにより解析した [5].

今年度後半では, 上と同様の物理的条件下での質点近似した固体粒子群による乱流変調について調べ, 粒子解像計算と比較することにより質点近似粒子群と乱流の 2way カップリング計算の妥当性や正確性, 限界などを調査した. エネルギースペクトルの振る舞いについて両者を比較した結果を図 6 に示す. 質点近似した粒子群によるスペクトル (P0-P6) の変調作用は, 粒子解像した計算結果 (R0-R6) と極めて一致することがわかった.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【1】 雲粒子成長計算

エアロゾルや水蒸気および温度場の乱流混合, 雲粒子の生成, 凝結成長, 衝突・併合など基本的な雲マイクロ物理過程の検証が完了したと考えており, 研究は順調に進展している. これまでの成果は, 論文や国際会議 [8, 9, 13] だけでなく, Texas A&M [10], MTU [11, 12], SUSTech [14], École Centrale de Lyon [15], École Normale Supérieure de Lyon [16] などに招聘され特別講義で発表されている. さらに, 相互交流を深め今後の共同研究実

現にむけて双方が努力していくことを確認できたことなど, 本研究の国際的な認知の高まりと協力関係の構築に手ごたえを感じている.

今後は, 雲粒子成長とエアロゾルとの関係をさらに詳しく調べるためにより多くのエアロゾル注入率でも合理的な時間で計算できるようにさらに CMS のコード改良を行うとともに, 乱流レイノルズ数の範囲を広げ雲粒径分布関数の変化を調べる. また, 雲水混合比 (LWC) スペクトルが高波数側で乱流理論からずれる物理機構の解明を進める. 長時間にわたる雲粒子生成から雨粒子形成にいたるまでの全プロセスの長時間積分を再度実行し, 全体像を解明する.

超水滴法との接合を視野に入れ, 雲粒子の衝突確率などを乱流特性量の条件付きで計算する. さらに, 鉛直方向に長くした直方体で計算ができるように改良された 3 次元 FFT を CMS に導入して乱流混合計算ができるようにする.

【2】 雲粒子衝突計算

粘性項を正しく評価した計算を行った結果, 雲粒子衝突における衝突効率が 1 以上である可能性が示唆された. 現在, オフセット $B = 1.0$ 付近において, ウェーバー数, レイノルズ数および半径比をそれぞれ変化させた計算を行っており, それぞれの場合における衝突効率の解析を行っている. 今後は, 液滴衝突時のエネルギー推移や液滴内流れを調査し, 衝突が液滴の運動に及ぼす影響を明らかにする. また, 保存型 Allen-Cahn 方程式を導入する際の課題解決にも取り組み, 最終的には雲粒子衝突解析への適用を目指す.

【3】 有限サイズの微小粒子群と乱流との相互作用

計算は概ね順調に進んでおり, 現状では i) 質点粒子群による乱流変調の妥当性と限界の検証については, 大変興味深い成果が得られた. 現在論文に結果をまとめている. また現在 ii) 非球形粒子群と流れの相互作用, に関する研究を進めている. これまで微小生物などを念頭においた非球形粒子の集団挙動に関する計算に着手しており, 解析結果の一部が発表されている [4]. 今後は粒子形状が

乱流変調に及ぼす影響について調査することは大変興味深いテーマになると考えている。なぜなら非球形の粒子の場合、回転の運動エネルギーが並進の運動エネルギーと同程度の寄与を乱流に及ぼす可能性があり、乱流変調の詳細も変化することが予想されるからである。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- [1] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, "Size-distribution spectrum of non-inertial particles in turbulence", *Phys. Rev. E*, **97**, 053108 (10 pages) (2018). (査読有)
- [2] M. Yoshino, J. Sawada, K. Suzuki, "Numerical simulation of head-on collision dynamics of binary droplets with various diameter ratios by the two-phase lattice kinetic scheme", *Computers and Fluids*, **168**, pp.304-317 (2018). (査読有)
- [3] 澤田純平, 吉野正人, 鈴木康祐, 「改良二相系格子ボルツマンシミュレーションによる雲内における 2 つの微小水滴が接近する際の挙動解析」*日本機械学会論文集* **84**, p. 18-23 (14 pages) (2018). (査読有)
- [4] T. Kozawa, K. Sugitani, D. Z. Oehler, C. H. House, I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, "Early Archean planktonic mode of life: Implications from fluid dynamics of lenticular microfossils", *Geobiology*, in press (2018) (査読有)
- [5] 渡邊 友貴, 渡邊 威, 齋藤 泉, 後藤 俊幸, 「乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模シミュレーション」 *ながれ: 日本流体力学会誌* 37 巻, 123--128 (2018) (査読無)
- [6] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, "Broadening of cloud droplet size distributions by condensation in turbulence", Accepted in *J. Meteorol. Soc. Jpn.* (2019). (査読有)

(2) 国際会議プロシーディングス

- [7] T. Watanabe and T. Gotoh, "On the smoothing of point force in the two-way coupling simulation of polymer-laden turbulent flow", *Journal of Physics: Conference Series* **1035** (1), 012010 (2018) (査読有)

(3) 国際会議発表

- [8] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, "Turbulence-cloud droplet interaction in cloud micro-physics simulator", 15th Conference on Cloud Physics AMS, Vancouver, Canada, July, (2018)
- [9] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, "On the modification of scalar variance spectra due to cloud droplets in cloud microphysics simulator", 12th European Fluid Mechanics Conference, Vienna, Austria, Sept. (2018).
- [10] T. Gotoh "Cloud Turbulence", Perspectives on Turbulence Workshop, Texas A&M, U.S.A. Aug. (2018) (Invited)
- [11] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, T. Yasuda, "Cloud

turbulence" Physics Colloquium at Michigan Technological University, Houghton, USA. Sept. (2018) (Invited)

[12] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, T. Yasuda, "Growth of cloud droplets in turbulence in cloud microphysics simulator", Physics Colloquium at Michigan Technological University, Houghton, USA. Oct.. (2018) (Invited)

[13] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, and T. Yasuda, "Interaction between cloud droplets and turbulence", APS DFD Meeting, Atlanta, Nov. (2018).

[14] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, and T. Yasuda, "Droplets and Turbulence in Cloud", Lecture at Southern University of Science and Technology, SUSTech, Dec. (2018) (Invited)

[15] T. Gotoh, I. Saito, T. Yasuda, T. Watanabe, "Cloud Turbulence and Droplets in Cloud Microphysics Simulator", Lecture at École Centrale de Lyon, March, (2019) (Invited)

[16] T. Gotoh, "Passive scalar spectrum and intermittency effects at very high Schmidt number", Workshop on scalar mixing at École Normale Supérieure de Lyon, March (2019) (Invited)

[17] M. Yoshino, J. Sawada, K. Suzuki, "Lattice Boltzmann simulation of behavior of binary water droplets approaching each other in cloud", Abstracts of the 27th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics, Worcester Polytechnic Institute Massachusetts, USA, June (2018).

(4) 国内会議発表

- [18] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「雲乱流実験において形成される粒径分布に関する統計理論について」*日本気象学会 春季大会 つくば* 5月 (2018)
- [19] 小澤 朋樹, 渡邊 威, 齋藤 泉, 後藤 俊幸, 「小さな固体粒子群による乱流変調の大規模シミュレーション」*日本流体力学会年会 2018 大阪大学豊中キャンパス* (2018 年 9 月 6 日)
- [20] 渡邊 威, 小澤 朋樹, 齋藤 泉, 後藤 俊幸, 「等方乱流中の固体粒子群の振る舞いと乱流変調」*日本物理学会 2018 年秋季大会 同志社大学京田辺キャンパス* (2018 年 9 月 9 日)
- [21] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, 安田達哉, 「雲乱流実験チャンバー「パイチャンバー」と関連研究について」*エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究会* (2018 年 10 月 31 日)
- [22] 後藤俊幸, 齋藤泉, 渡邊威, 安田達哉, 「雲乱流の計算科学」*日本物理学会 年次大会 九州大学* (2019 年 3 月 16 日)
- [23] 藤島亘平, 吉野正人, 鈴木康祐, 「改良二相系格子ボルツマン法による固体壁面上における三次元液滴衝突挙動解析」*第 32 回数値流体力学シンポジウム 東京都港区* (2018 年 12 月 13 日).

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし