

jh170013-NAH

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)

雲粒子や鎖状高分子など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までの約 2 時間わたる過程のシミュレーションを実験結果と比較して検証した。エアロゾル粒子注入率の増加とともに平均雲粒径は減少しその分布は狭くなるという実験と一致する結果を得た。また、凝結・蒸発に伴う潜熱により温度・水蒸気混合比のスペクトルは乱流理論の $k^{-5/3}$ からずれて $k^{-1/3}$ に近いスペクトルになることが見いだされた。気液二相系の格子ボルツマン方程式により同径水滴 ($R_s = R_l$) の微小水滴の衝突・合体を計算し、ウェーバー数が増大すると両者がそれる挙動から合体挙動に遷移するレイノルズ数が大きくなることが分かった。3 次元ストークス粘性流れと鎖状高分子との相互作用のシミュレーションを行い、レイノルズ数が極端に小さくても乱流状態が出現する興味深い現象が見いだされた。有限サイズの個体粒子と乱流との相互作用を解析するコードを新たに開発した。

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	乱流中の高分子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、雲粒子生成、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、(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) 鎖状高分子と乱流との相互作用を解析し、乱流抵抗低減のメカニズム、高分子によるスケール間エネルギー輸送への影響やマイクロ流動における混合現象の解明を行うこと、(4) マイクロスケールの非球形固体粒子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)や知見をもたらし, 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。鎖状高分子と乱流との相互作用はこれまで現象論的構成方程式を用いて研究されてきたが, これを多数の粒子が 1 次元的につながった多自由度系というミクロと乱流というマクロとの相互作用という視点から計算できれば乱流抵抗低減の詳しいメカニズムが解明され, 新しい制御法を生み出す基礎となりエネルギー有効利用につながる。また, 粒子形状を解像しつつ流れ場との相互作用を計算できるプログラムの開発により, マイクロスケールの粒子あるいは生体の流体輸送現象の解明に応用することが可能になる。

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

雲粒子から雨粒子形成にいたるまでの 9 分間の時間発展がクラウドマイクロ物理シミュレータ(CMS)を用いた第 1 原理計算により世界で初めて計算された。ハワイ沖 500m 上空に置かれた 1 辺が約 50 cm の立方体が上昇気流により上空に運ばれる際の雲粒子と雲乱流の時間発展を直接数値計算により求めた。雲粒子の凝結・蒸発, 衝突・併合, 重力沈降, レイノルズ数に依存する流体抵抗, Ha_{11} 係数による粒子間の流体力学的相互作用, 乱流速度・温度・水蒸気場など雲粒子成長における重要な過程を取り込んだ大規模計算を実行した。これ

により, 雲粒子質量分布関数の時間発展が得られ, 雲粒子集団(半径約 $20 \mu\text{m}$) から雨粒子(半径約 $100 \mu\text{m}$) を生成することに世界で初めて成功した。また, 乱流強度が強くなると雲粒子同士の衝突・併合が促進され雲粒径分布の時間発展はより速く進行し, 大きい水滴が形成されるようになることが見出された。雲粒子は, 凝結・蒸発に伴う潜熱の出入りにより温度場や水蒸気場の揺らぎのスペクトルがコルモゴロフスペクトル $k^{-5/3}$ よりも緩やかに減衰するという興味深い特性が見いだされた。

【1-2】雲乱流に関する国際ワークショップ開催
雲マイクロ物理シミュレータの開発を通じて, 我々は雲粒子成長のみならず, 雲全体あるいは雲集団の生成・成長・消滅などについても興味と疑問を持つようになった。この分野の開拓, 国際的連携を目的として 2nd International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya, March 8-10, 2017, <http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloud2.html>

を名工大で開催した。海外講演者 10 名, 国内講演者 9 名を集め各講演時間を 1 時間とした。申請者によるこのワークショップの位置づけと問題意識についての説明には多く支持が得られ, また我々の成果にも十分な手ごたえを得た。

【2】空気中の水滴の衝突解析

雲中では異なる大きさの水滴の衝突が多くを占めている。2 水滴の半径比を $\Delta = R_s/R_l$ ($R_l \geq R_s$) としてより広範囲の Δ に対して衝突・合体を格子ボルツマン法(LBM)により調べた。レイノルズ数 $Re = \rho_L R V / \mu_L$ とウェーバー数 $We = \rho_L R V^2 / \sigma$ をそれぞれ $0.5 \leq Re \leq 10$, $8.55 \times 10^{-3} \leq We \leq 8.55 \times 10^{-1}$ とした。2 水滴が直線的衝突軌道にあっても, 流体力学的相互作用および界面張力により変形しつつも互いに避けるようにしてそれる挙動を示していることがわかった。大きい方の水滴は大きく変形しており, 小さい方の水滴はわずかに移動して衝突を避ける。水滴が変形する現象は, 剛体粒子による計算では見ることができない結果である。計算されたパラメータの範囲においては, 異径の場合においても合体とそれる挙動の

2 つに分類できることがわかった。さらに、合体からそれる挙動に遷移するレイノルズ数の臨界値が小さくなっており、より合体しやすくなっていることがわかった。

【3】雲乱流混合輸送

高解像度での乱流混合の長時間積分を実行した。乱流運動エネルギースペクトルとスカラー分散スペクトルには乱流の間欠性によりコルモゴロフスペクトルからのずれが確かに存在すること、スペクトルや高次モーメントのスケーリング領域がどこに存在するかを調べ、その結果 $2\lambda < r < L/4$ (λ : テイラーマイクロスケール, L : 積分長さ) を満たす領域にあることが分かった。

雲凝結核 (CCN) はその大きさが $1\mu\text{m}$ 以下の微小な固体粒子である。この空間分布を連続体近似すると高シュミット数 ($Sc=v/\kappa$ =分子粘性/分子拡散) のスカラーとみなせる。このスカラー揺らぎを解析するために、速度場は粗い空間格子上でスペクトル法により計算し、スカラー場は微細格子上で結合コンパクト差分法で計算するという Dual grid 上でのハイブリッド法を米国 Georgia 工科大学の Yeung 教授との共同研究を進めた。

【4】高分子と流れ場との相互作用

2 次元乱流の特徴の一つは運動エネルギーの逆カスケード過程にある。最近の石鹼膜を用いた実験では、高分子の影響により格子下流での大規模渦の発生抑制やエネルギー逆カスケードが抑制されることが報告されている。これまで開発してきたオイラー・ラグランジュコードを応用して 2 次元格子乱流における高分子の影響を調べた。2 次元平面内に複数の円柱列を流れに垂直に配置することで格子を実現し、格子後流における渦の成長と減衰過程を計算し、エネルギーの逆カスケードをより明瞭に再現することができた。

5. 今年度の研究成果の詳細

【1】雲マイクロ物理過程と雲乱流

今年度は、昨年度に得られた雲マイクロ物理シミュレータ (CMS) による計算結果の検証に多くの

努力を注入した。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。

1 については今年度前半から新たに CMS に実装し、1 と 2 を合わせた検証を行った。後半にはさらに検証を進めるとともに、理論解析を行い計算結果と比較して満足のいく結果を得た。3 については、年度前半に雲粒径分布関数について理論的解析が行える物理的状況で検証を行い、後半には論文にまとめ投稿した。以下、具体的結果を示す。

まず 1 と 2 の検証。前年度までの雲粒子成長の計算では、エアロゾルを核とした雲粒子生成過程が取り込まれていなかったため水蒸気の過飽和度を過剰に見積もる傾向にあった。最近、過飽和状態における対流乱流中に注入率を変えてエアロゾルを投入した室内実験 (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 12.8cm の

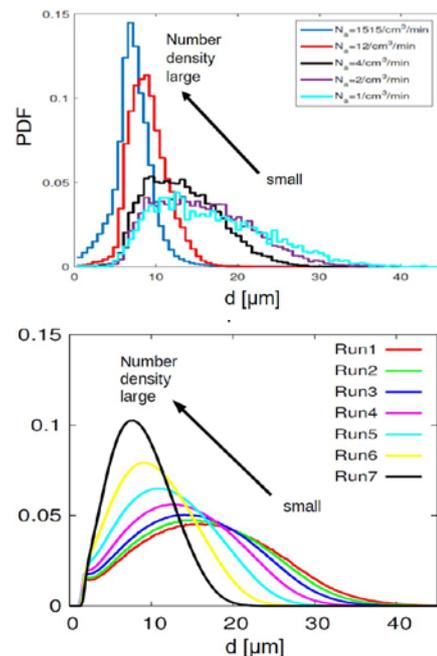


図 1 雲粒径分布関数のエアロゾル注入率依存性。上図：室内実験(Chandrakar, PNAS2016), 下図：CMS による計算。エアロゾル注入率が增大すると平均粒径は小さくなり、分布の幅は狭くなる。

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（2 時間、720 万ステップ）にわたり計算した。定常状態における室内実験結果と CMS による雲粒子粒径分布関数を図 1 に示す。室内実験状態の完全な再現ができていないわけではないが（CMS ではレイノルズ数が実験よりかなり低い）、両者の結果はよく一致していることがわかる。

今年度後半、室内実験との比較を行っていくうちに、乱流輸送とケーラー曲線のもとで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に気づいた。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 $f(t)$ を対応させるのである。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 との比較を行ったところ、図 2 に見るように R の小さいところで

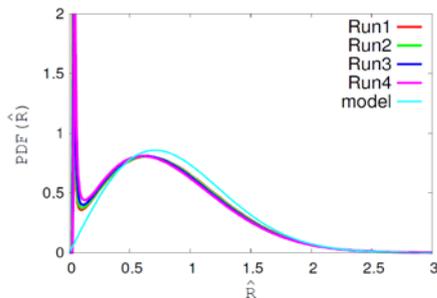


図 2 ケーラー曲線（エアロゾル効果）を考慮した雲粒径分布とランジュバン方程式によるモデル計算の比較

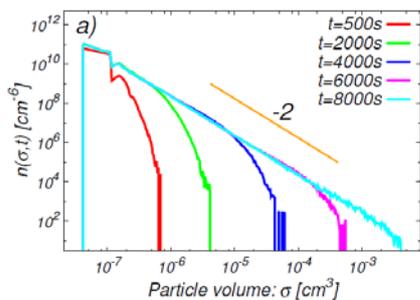


図 3 非慣性粒子の衝突・併合による粒子スペクトル。時間とともに分布関数は $n(\sigma) \propto \sigma^{-2}$ に比例した裾野を広げてゆくことがわかる。

は CMS での詳細な計算と理論モデル(model)との間にややずれがみられるものの、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。

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。このモデル系を CMS を利用して長時間積分を行った結果、図 3 に示すように分布関数は $n(\sigma) \propto \sigma^{-2}$ 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 [13]。年度後半は、いくつか追加計算を行い論文にまとめて Phys. Rev. E に投稿した（審査中 [0a]）。

これら室内実験・理論と CMS との比較検証から、微小雲粒子生成プロセスを取り込んで雲粒子から雨粒子生成までの全過程のプロセスを継ぎ目なくシミュレーションする基盤がほぼ完成したと考える [1, 7, 10, 12, 13, 14]。

さらに、今年度前半には雲中の乱流と雲粒子の相互作用に関する新たな発見があった。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・コアシンのスペクトル

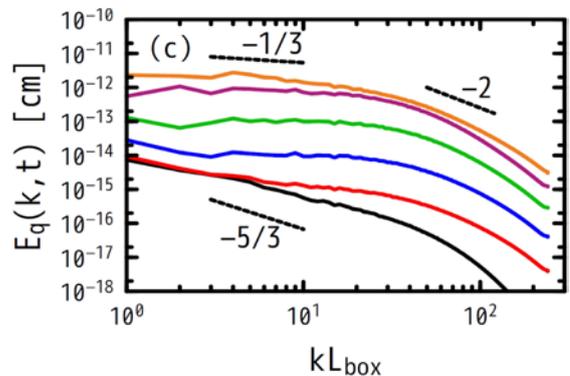


図 4 水蒸気混合比揺らぎのスペクトル。 $R_\lambda=167$ 。時刻は下から順に、 $t = 10 \text{ s}$ (black), 120 s (red), 240 s (blue), 360 s (green), 480 s (magenta), 600 s (orange)。初期には $k^{-5/3}$ に近いが、時間経過とともに低波数では $k^{-1/3}$ に拡散領域では k^{-2} に遷移する。

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 (図 4). 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, 図 4 にみる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].

今年度後半は, 雲粒子から雨粒子までの連続的成長と乱流との相互作用に関する本プロジェクトの成果を論文として投稿し, *New. J. Phys.* (2018 年 2 月) [1] に掲載された. 翌月, 本論文は *Nature Phys.* の Research Highlights (March, 2018) として掲載された. ここに至るまで時間はかかったが, 大変な励みになっている.

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り, その重要性にも関わらず両者の交流は十分ではないと感じてきている. そこで, 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, 本学で 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.

エアロゾルなど高シュミット数のスカラーは, コルモゴロフスケール以下でも大きな揺らぎを持つ. 今年度前半は, 粘性・移流領域, 遠拡散領域 (分子拡散が支配的なスケール領域) でのスカラースペクトルを理論および大規模シミュレーションにより解析した. これまでの統計理論によればスペクトルは遠拡散領域でガウスの減衰するが, 実験やシミュレーションでは指数関数的に減衰する. この不一致の原因が乱流速度場の間欠性にあ

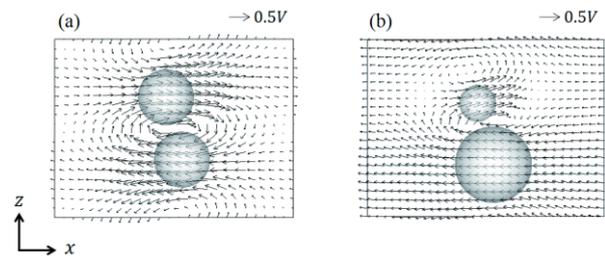


図 5 水滴接近時の流速ベクトル (a) $\Delta = 1.0$: (b) $\Delta = 0.5$.

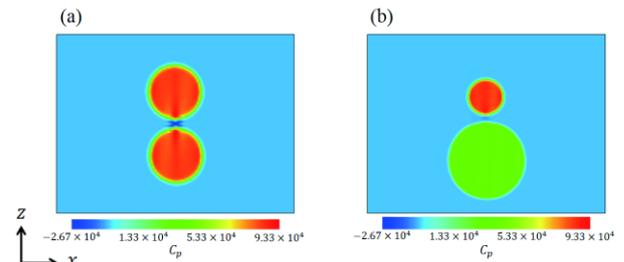


図 6 水滴接近時の圧力分布図 (a) $\Delta = 1.0$: (b) $\Delta = 0.5$.

ること, 高レイノルズ数ではスカラースペクトルは指数関数よりも緩やかに減衰することを明らかにした [8, 9]. また, この高シュミット数スカラー揺らぎを解析するための高効率な大規模数値計算手法を米国ジョージア工科大学の Yeung 教授と共同で開発した. 2 重格子上で速度場とスカラー場の計算を異なる 2 つのコミュニケーター上で行い, 速度場のデータをスカラー場の計算中に非同期的に送りつけることで通信の隠ぺいを行うやり方に深化した [2]. 年度後半は, GPU をより効率的に用いた計算手法を開発し論文として発表した [3].

【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. 一例として, $Re = 1.0$, $We = 4.28 \times 10^{-2}$, $B = 0.9$ に対する $\Delta = 1.0$ (同径) および $\Delta = 0.5$ (異径) の両ケースを比較する. 計算結果より, 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. 詳しく調べるために, まず, 両ケースの水滴まわりの速度ベクトルを図 5 に示す. 図 5 (a) より, 同径の場合には, 2 つの水滴の速度場は対称でかつ, x 方向 (両水滴の初速度方向) に平行な速度が発生

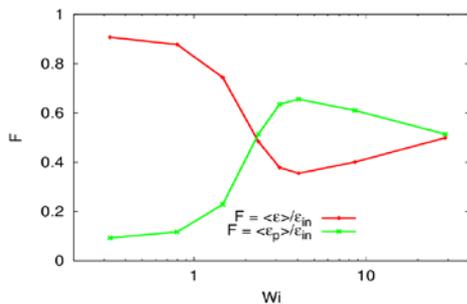


図 7 エネルギー散逸率 (赤) および高分子によるエネルギー輸送率 (緑) の Wi 数依存性. $Wi=3$ 付近で状態が変化している.

していることがわかる. 一方, 図 5 (b) より異径の場合には, 小さい方の水滴には $+z$ 方向の速度成分が発生しているが大きい方の水滴にはほとんど発生しておらず, 2 つの水滴まわりの z 方向の速度分布は対称でないことがわかる. 次に, 両ケースにおける水滴同士がすれ違う時点での圧力場を図 6 に示す. 図 6 (a) より, 水滴間の気相領域の局所的な圧力は相対的に低く, 平面内でも最小となっていることがわかる. よって, 水滴間の気相領域が低圧になることにより水滴同士は引き寄せ合い, 合体挙動を示したと考えられる. 一方, 図 6 (b) では, 水滴間の圧力は他の気相領域と同程度であり, 全領域の気相の圧力は概ね同様であることがわかる. なお, 気相領域の圧力が等しい場合, 大きい方の水滴内部の圧力が小さい方の水滴に比べて低いことは, ラプラス圧の関係から考察しても妥当な結果と言える. 以上の結果から, 異径の場合には, 水滴まわりの流れ場が z 方向 (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, 液滴接近時のその挙動を示す要因になっていると考えられる.

【3】 鎖状高分子と乱流との相互作用

これまでの研究では, 高分子が 2 次元格子乱流に及ぼす影響について調べてきた. 格子乱流は実験との対応が明確な反面, 流れ場の非等方・非一様性が強いいため, 流れと高分子の相互作用の素過程を調べるには適さない. 今年度は, 統計的に理想的な性質を持つランダム速度場によって変形す

る高分子鎖の伸長とそれに伴う流れ場の変化について調べた. 速度場はストークス近似した流体の方程式にランダム外力および高分子の弾性ストレス場を加えた系により支配され, これに高分子鎖が多数分散したオイラー・ラグランジュ計算を実行した. エネルギー散逸率および高分子鎖によるエネルギー輸送率のワイゼンベルグ数 Wi ($=$ 高分子の特性時間/流れの特性時間) 依存性を図 7 に示す. この結果より, Wi が 3 程度まではエネルギー散逸率は減少する. これは高分子によるエネルギー散逸率の低減を意味しており, いわゆる乱流抵抗低減と同様のメカニズムと解釈できる. 一方 Wi が 3 を超えると, 増加に転じることがわかる. これは高分子によって乱れが生成されることを意味しており, 低レイノルズ数の高分子溶液の流れで観測される弾性乱流と類似した状態にあることがわかる. 実際, エネルギースペクトルの振る舞いを調べてみると, 弾性乱流に特徴的なべき的減衰を示すことがわかった [20,24].

【4】 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予測し, その空間分布の性質を理解することは重要である. 今年度前半では, 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 法を用いて実装した. これは固体物質を浸透率の小さな多孔性媒質と見なし, ダルシー則に類似した強制項を流体場の基礎式に課して物体表面での粘着条件を満たす方法である. 今年度後半では, この手法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解析を行うための大規模計算を実行した. 乱流計算の格子解像度として 1024^3 を用い, 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た. 流れ場の可視化の結果の一つを図 8 に示す. ま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,

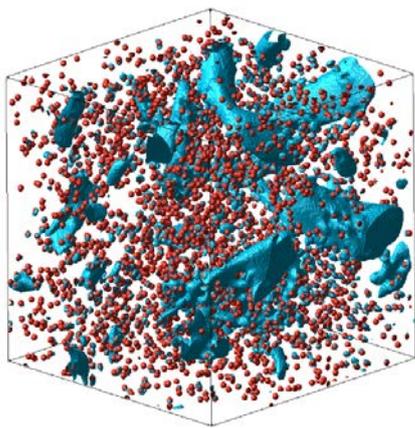


図 8 等方乱流中の渦(青)と球形粒子群(赤)の分布の様子を示す。粒子数は 3072 個、比重は 10 であり、この時のストークス数は 0.9 程度である。

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。

非球形粒子に働く力とトルクの計算については、コードの開発をほぼ終えて検証を行うなど、順調に進展している。年度前半に名古屋大学の杉谷教授から、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に関して相談を受けた。その形状のわずかな違いが流体力学的作用(抵抗や沈みにくさ)を通して古微生物集団の生息域の違いに至ったのではないかというのである。本コードを応用するのに適した興味ある問題であり、現在、論文を投稿中である[0b]。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

研究は予定通り進展しており成果が得られてきている。特に雲粒子から雨粒子形成にいたる約 10 分間の雲粒子集団の時間発展が第 1 原理的計算により得られていることが確かな基盤となっている。エアロゾルからの雲粒子生成過程を導入してほぼ期待通りの計算が実行でき、検証結果も満足のいくものであると考えている。

来年度は、雲粒子生成から雨粒子形成にいたる全過程のシームレスな計算をより大規模で行うことを考えている。まず手始めに、計算規模を空間格子点数 512^3 、雲粒子数密度約 $125/\text{cm}^3$ と今年度と同等ではあるが、エアロゾル効果をいれて約 20 分程度の計算を行う。雲粒子生成過程とその後の成長過程のそれぞれの計算には成功しているので、

全体を合わせた計算にはそれほど問題はないと考えている。その後、計算規模を空間格子点数 1024^3 に拡大する。この場合、さらにプログラムの効率化を進める。そのほかに、雲粒子衝突・併合における様々な因子(流体力学的相互作用、雲粒子核生成)や乱流駆動方法の影響、雲外部の乾燥空気の乱流混合による影響(エントレインメント)などを順次取り込んでいき、雲粒子成長の全過程や雲乱流揺らぎについて研究を進めていく予定である。また、熱帯海洋性積雲のみを考えてきたが、中緯度域での比較的低温な状況での雲粒子成長についても解析を試みてみたい。

改良二相系 LBM を用いて、半径比が水滴接近時の挙動に与える影響を調べた。特に、水滴がそれる場合の現象を詳しく調べるために、水滴まわりの流れ場および圧力場を求め、得られた結果をもとに考察した。今後は、種々の半径比に対する計算を実行し、液滴が合体からそれる挙動に遷移する臨界レイノルズ数について調べる予定である。

ランダム速度場下での高分子と流れの相互作用の計算については、これまで開発してきた計算コードを使用しており順調な進捗である。より広いパラメータ空間で相互作用の詳細と流れの遷移について調べ、弾性乱流へ遷移後の速度や圧力の時間変動の統計性の詳細を議論していく。さらに、非球形粒子の個々の形状変化が古微生物集団の空間分布に如何に影響を与えるかなども調べていく。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[0a] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, "Size-distribution spectrum of non-inertial particles in turbulence", Submitted to Phys. Rev. E. (2018)

[0b] T. Kozawa¹⁾, K. Sugitani²⁾, D. Z. Oehler, C. H. House, I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh "Survival strategy of Early Archean life: implications from fluid dynamics of lenticular microfossils", Submitted to Geobiology. (2018)

[1] I. Saito, T. Gotoh, "Growth from cloud droplets to rain drops in cumulus", New J. Phys. 20 (2018) 023001

【査読有】(Research Highlights として Nature Phys. March, 2018 に掲載)

[2] M. P. Clay, D. Buaria, T. Gotoh, P. K. Yeung, "A dual communicator and dual grid-resolution algorithm for petascale simulations of turbulent mixing at high Schmidt number", Comp. Phys. Comm. 219, pp. 313 (2017) 【査読有】

- [3] M. P. Clay, D. Buaria, P. K. Yeung, T. Gotoh, “GPU acceleration of a petascale application for turbulent mixing at high Schmidt number using OpenMP 4.5, *Comp. Phys. Comm.* (in press), (2018) 【査読有】
- [4] 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 & Fluids* (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* (2018) に注目研究 in CFD31 として掲載予定 【査読無】
- [6] 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* (2018) (掲載決定) 【査読有】

(2) 国際会議プロシーディングス

- [7] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, “Cloud turbulence and droplets” *Proc. Euromech/Ercoftac Colloquium 589 “Turbulent Cascades II”* Lyon, Dec. (under review) (2018).

(3) 国際会議発表

- [8] T. Gotoh, I. Saito “Passive Scalar Spectrum and Intermittency Effects at Very High Schmidt Number”, *Turbulence Colloquium at Mauna Kea, 98th Annual Meeting of AAAS Pacific Division, Hawaii, June*, (2017)
- [9] T. Gotoh, I. Saito, “Intermittency effects on passive scalar spectrum at very high Schmidt number” *Sixth International Conference on Turbulent Mixing and Beyond, ICTP, Trieste Aug.* (2017)
- [10] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, T. Abe, “Turbulence spectra and rain initiation in cumulus cloud”, *European Turbulence Conference 2017, Stockholm Aug.* (2017).
- [11] T. Gotoh, T. Watanabe, “On the universality of passive scalar statistics in homogeneous turbulence”, *Frontiers in Turbulence, KRS70, Denver Nov.* (2017).
- [12] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Spectra of turbulent flow in cumulus cloud”, *APS DFD Meeting, Denver Nov. 21*, (2017)
- [13] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, “Growth of cloud droplets from aerosol in turbulence”, *APS DFD Meeting, Denver Nov. 21*, (2017)
- [14] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Cloud turbulence and droplets”, *Euromech/Ercoftac Colloquium 589 “Turbulent Cascades II”* Lyon, Dec. (2017).
- [15] I. Saito, T. Gotoh, T. Watanabe, “Turbulence and cloud droplets in cloud micro-physics simulator”, *NITEch Lecture on Turbulence and Cloud, Nagoya Inst. Tech. Nagoya, March* (2018).
- [16] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Evolution of droplets and turbulence in cloud microphysics simulator”, *Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III, Nagoya Univ. Nagoya, March* (2018)

- [17] Y. Watanabe, T. Watanabe, I. Saito, and T. Gotoh, T. Watanabe, “Large-scale simulation of monodispersed small solid particles in isotropic turbulence”, *NITEch Lecture on Turbulence and Cloud, Nagoya Inst. Tech. Nagoya, March* (2018).

(4) 国内会議発表

- [18] 後藤俊幸 「高シュミット数スカラーのスペクトル理論と大規模計算」非平衡乱流ワークショップ, 名古屋工業大学 6 月, (2017)
- [19] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「乱流中の非慣性粒子の粒径分布のスペクトル」京大数理解析研究所 RIMS 共同研究 7 月 (2017)
- [20] 渡邊威, 後藤俊幸 「ランダム速度場下での弾性乱流の発生とその統計性」京大数理解析研究所 RIMS 共同研究 7 月 (2017)
- [21] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「雲マイクロ物理シミュレータによる雲乱流現象の解明」GFD セミナー, 休暇村 支笏湖, 8 月 (2017).
- [22] 澤田純平, 吉野正人, 鈴木康祐, 「改良二相系格子ボルツマン法による雲内における微小水滴の挙動解析」(口頭発表)日本混相流学会混相流シンポジウム 2017, 東京, 8 月 (2017).
- [23] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「乱流中におけるエアロゾルからの雲粒子生成」日本流体力学会年会, 東京理科大, 9 月 (2017)
- [24] 渡邊威, 後藤俊幸 「弾性乱流のエネルギースペクトルの振る舞い」日本物理学会秋季大会, 岩手大学 9 月 (2017)
- [25] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「乱流中の非慣性粒子の粒径分布のスペクトル」日本物理学会秋季大会, 岩手大学 9 月 (2017)
- [26] 齋藤泉, 後藤俊幸 「乱流中におけるエアロゾルからの雲粒子生成」日本気象学会 2017 年度秋季大会, 北大 10 月 (2017)
- [27] 後藤俊幸 「雲乱流の研究から」第 15 回日本流体力学会 中部支部講演会, 名工大 12 月 (2017)
- [28] 澤田純平, 吉野正人, 鈴木康祐 「改良二相系格子ボルツマン法による雲内における微小水滴が接近する際の挙動解析」第 15 回日本流体力学会 中部支部講演会, 名工大 12 月 (2017)
- [29] 澤田純平, 吉野正人, 鈴木康祐 「改良二相系格子ボルツマン法による雲内における異径微小水滴の挙動解析」第 31 回数値流体力学シンポジウム, 京都工繊大 12 月 (2017)
- [30] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威 「雲マイクロ物理シミュレータによる雲乱流混合現象と雲粒子成長過程の解明」エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会, 国立極地研究所 東京 2 月 (2018)
- [31] 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」第 31 回数値流体力学シンポジウム, 京都工繊大 12 月 (2017)

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)