

jh160012-NAJ

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。積雲内を上昇するパーセル内で凝結・衝突・併合・沈降・乱流混合をうける雲粒子集団の大規模直接数値計算により雨粒生成までの約 10 分間にわたる連続的計算に成功した。凝結成長過程と衝突・併合過程の共存が成長を促進し、乱流混合は雨粒子形成を促進する傾向にある。一方、雲粒子間の流体力学的相互作用はこれを抑制することが分かった。気液二相系の格子ボルツマン方程式による数値解析法を改良し、雲粒子の衝突で重要となる低ウェーバー数領域でも衝突・併合計算が可能となった。異なる粒径をもつ水滴の 2 体衝突・併合の衝突現象を解析し衝突ダイアグラムのパラメータ領域を拡大した。2 次元弾性乱流シミュレーションを行い、鎖状高分子によりエネルギーの逆カスケード現象が抑制されることが見いだされた。

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（系）と乱流との相互作用を記述する雲マイクロ物理シミュレータ（Cloud Microphysics Simulator CMS）を開発し大規模計算に向けて効率の良いものにする、（２）微小水滴同士の衝突・併合過程を実際の雲中により近い条件で解析できる数値計算法を開発し、様々なパラメータ領域で衝突・併合の相図を計算すること、（３）雲粒子と乱流の問題では雲マイクロ物理過程と乱流混合輸送の相互作用を解析し、エアロゾルの空間分布、雲粒子の成長の速さや粒径分布、衝突・合併の効果、乱流による雲粒子、温度、水蒸気の混合輸送特性や揺らぎの効果を調べる、（４）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。また, 鎖状高分子と乱流との相互作用はこれまで現象論により導かれた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。

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】雲粒子成長と衝突および雲乱流混合輸送

雲中を潜熱の開放による上昇気流で移動するパーセルを導入し, 初期平均半径 $10 \mu\text{m}$ の雲粒子集団が乱流混合と凝結・衝突・併合により約 7 分で最大粒子半径 $50 \mu\text{m}$ 超を含む平均半径約 $20 \mu\text{m}$ の雲粒子集団にまで成長する過程の連続的計算に成功した[1]。ハワイ沖上空 500m に置かれたパーセル内部温度を $293.25[\text{K}]$ とし, 平均半径 $10 \mu\text{m}$ の雲粒子を 3 種類の初期半径分布(単峰, 2 峰, そして観測による分布)に従って約 200 万個(平均雲粒子数密度 $n=125[\text{cm}^{-3}]$) 領域内に分散させ, 乱流レイノルズ数 $Re=83$ で混合輸送させた。その結果, 平均半径は約 $20 \mu\text{m}$ 弱にまで成長し, 雲粒径分布のピーク近傍の幅は時間経過とともに右に平行移動しかつ狭くなり分布の左側はより急峻にな

ること, そして分布の右側は指数関数的に減衰し時間とともに急速に裾野が広がることが分かった。また, 3 次元 FFT における通信の隠ぺいおよびセルインデックス法による衝突・併合計算等によって CMS の計算速度が改善された。

【2】空気中の水滴の衝突解析

界面張力の計算に CSF (Continuum Surface Force) モデル[Brackbill et al., J. Comput. Phys., **100** (1992) pp. 335-354]を導入した新しい気液二相系 LBM (改良二相系 LBM) [Inamuro et al., Comput. Fluids, **137** (2016) pp. 55-69]を用いて, 雲粒子を想定した微小水滴の衝突計算を行った。これにより実際の雲粒子の衝突条件に近いパラメータ領域における解析が可能となった。気相と液相の密度比を 800, 粘度比を 55, レイノルズ数 $Re = \rho_L RV / \mu_L$ を $0.38 \leq Re \leq 2.5$, ウェーバー数 $We = \rho_L RV^2 / \sigma$ を $We = 8.55 \times 10^{-3}$, 衝突パラメータ $B = X / (2R)$ (X : 衝突のオフセット量) を $0 \leq B \leq 1.2$ とした。ここで, ρ_L は水滴の密度, μ_L は水滴の粘度, σ は界面張力, R は水滴半径, V は相対衝突速度である。 $Re = 2.50$ の場合は, 実現象において直径 $\hat{D} = 5 \mu\text{m}$, 衝突速度 $\hat{V} = 0.5 \text{m/s}$ の雲粒子の衝突を想定していることに相当する。 $Re = 2.50$ においては $0 \leq B \leq 1.0$ のいずれにおいても合体することがわかった。一方, $Re \leq 2.0$ においては $B = 1.0$ の場合でも合体せずそれる挙動を示すことがわかった。これは, 低レイノルズ数では水滴の慣性力が粘性力よりも相対的に小さくなるため, 水滴はより流れ場の影響を受けそれる挙動を示したと考えられる。

【3】雲乱流混合輸送

同じ乱流により輸送されかつ異なる揺らぎの注入方法による 2 つのスカラー場(低波数で時間的にホワイトで正規分布に従うランダム揺らぎにより励起された水蒸気揺らぎ q のモーメント $S_q^n(r) = \langle |q(x+r) - q(x)|^n \rangle$ と, 鉛直方向に一様な平均温度勾配により励起された温度揺らぎ θ のモーメント $S_\theta^n(r) = \langle |\theta(x+r) - \theta(x)|^n \rangle$) のスケーリ

ング法則の探求を進めた。 $S_q^n(r)$ の局所スケーリング指数には $d \log S_q^n(r)/d \log r = \xi_n + \beta_n \ln(r/r_*)$ という対数補正が入るといふこれまでの乱流統計理論を覆す新たな発見をした。この結果は乱流混合の世界最大規模かつ長時間にわたる計算により初めて見いだされたものであり、Phys. Rev. Lett. (2015) に発表された。スケーリング指数の非普遍性はスカラー揺らぎを注入する波数領域の広さによることが分かったが、対数補正の原因は未だ明らかになっていない。雲凝結核となるエアロゾル（高シュミット数）の乱流混合計算のために、速度場は粗い空間格子上でスペクトル法により計算し、スカラー場は細かい空間格子上で結合コンパクト差分を用いるというハイブリッド法の改良を米国 Georgia 工科大の Yeung 教授との共同で始めた。Blue Waters 上での高速化が進んだ。

【4】高分子と流れ場との相互作用

高分子溶液の遅い流れにおいて観測される“弾性乱流”の統計特性の解明、およびマイクロ流路内におけるマイクロミキサーへの応用を念頭に置いて、チャンネル内に周期的に配置された角柱列周りの流れについてその高分子の影響をより現実状況に近いパラメータのもとで計算を行った。ワイゼンベルグ数 (Wi =高分子の特性時間 / 流れの特性時間) が 1~2 で流れは非定常化し、速度の時間変動は不規則な乱流的揺らぎを示すようになること、揺らぎの大きさは Wi 数の増加とともに増大することが確認できた。またこの速度揺らぎのパワースペクトルは弾性乱流に特徴的なべき則減衰を示すことがわかった。

5. 今年度の研究成果の詳細

【1-1】雲粒子成長と衝突

今年度前半では、本研究におけるシンボルともいふべき雲粒径分布関数の雨粒子形成にいたるまでの時間発展が 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ものである。昨年度まで

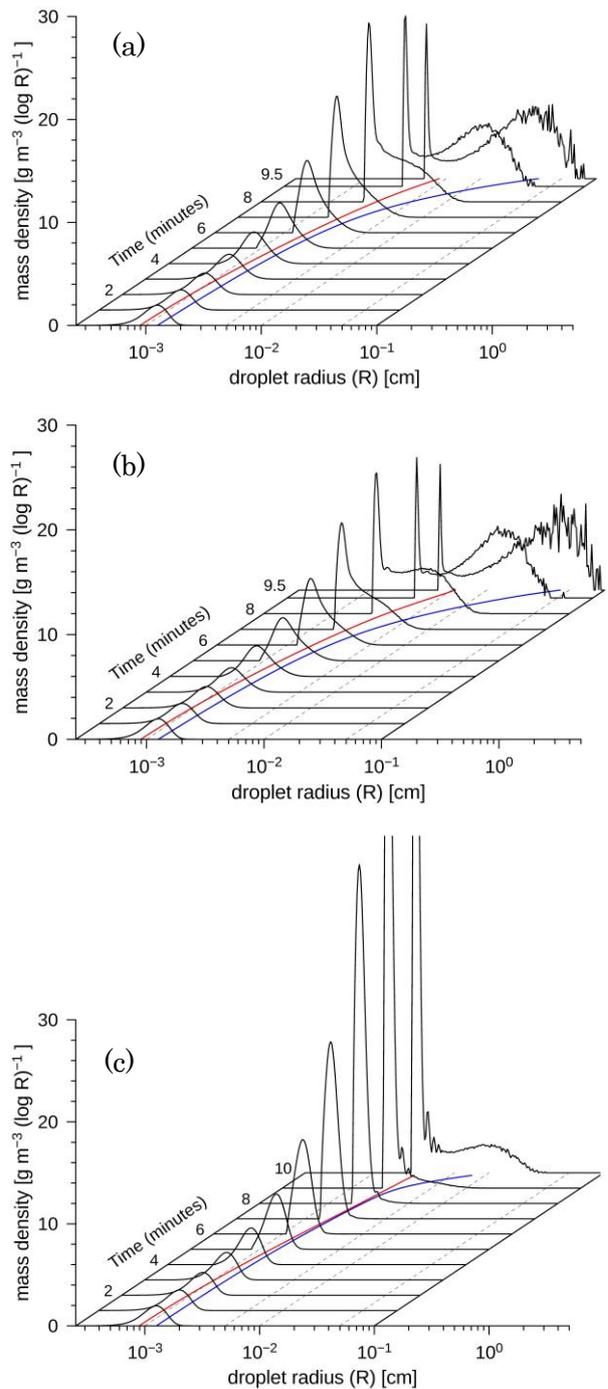


図 1 雲粒子の質量分布関数の時間発展 (a) 乱流運動エネルギー散逸率 $\varepsilon=79[\text{cm}^2/\text{s}^3]$, $R_\lambda=102$, (b) $\varepsilon=495[\text{cm}^2/\text{s}^3]$, $R_\lambda=167$, (c) $\varepsilon=81[\text{cm}^2/\text{s}^3]$, $R_\lambda=104$, 流体力学的相互作用を部分的に導入。赤：平均半径の時間変化, 青：質量の重みづけをした平均半径の時間変化

の計算に雲粒子の衝突・併合過程を導入して約 9 分間の成長の計算に成功した。この成果は、2016 年 9 月にセビリアで開催された第 11 回ヨーロッパ流体力学会議で発表され大きな反響を得た[5]。しかし、この計算では温度と水蒸気揺らぎのスペクトルの高波数部分で大きなカスプが生じていた。

今年度後半では、上記の不具合の原因の特定、レイノルズ数依存性の解析、雲粒子間の流体力学的相互作用の予備的な導入を行った。まず、スペクトルのカスプは、温度場が平均値と揺らぎを区別せずに扱ったため情報落ちが発生したためと判明し再度計算を実行した。その結果、より確かな雲粒子の各種統計量とスペクトルが得られた。図 1 には再計算された 2 つの乱流運動エネルギー散逸率 (a) $\varepsilon=79$, (b) $495 \text{ [cm}^2/\text{s}^3]$ における雲粒子質量分布関数の時間発展および、後半になって新たに計算された雲粒子間の流体力学的相互作用を取り入れた場合 (c) の時間発展を示した。各曲線と粒子半径軸との間の面積が立方体内の雲粒子の総質量を表す。図 1(a)についてみると、初期には半径 $10 \mu\text{m}$ にあった分布のピークが、時間経過とともに次第に右側に移動して行き、約 6 分後にはピーク左側は急峻になり右側の裾野は広がり始める。前者は水蒸気の凝結過程は雲粒子半径が小さい (大きい) ほど速く (遅く) なること、後者は同程度サイズを持った雲粒子同士の衝突・併合によるものである。やがて左にあった第 1 ピークは次第に狭くなる一方、第 2 のピークが成長する。これは大きな雲粒子が小さな雲粒子を併合することによるものである。約 9 分で第 2 のピークは半径 $100 \mu\text{m}$ に到達し最大半径のものは約 0.5 mm (雨粒子) にまで達する。また、図 1(a)(b)を比べると、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。上記 2 つの計算では、雲粒子が少しでも重なったら確率 1 で併合するという条件で計算を行ったものであり併合過程が過大評価されている。そこで、大小の 2 水滴が接近して軌道がそれて衝突しないなどの流体力学的相互作用を Hall Table (Hall W.D. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2486. 1980) により導入した計算を行った (図 1(c))。第 1 のピークは(a)(b)と比べて鋭くなる、一方第 2 ピークは緩やかにしか成長しない。明らかに雲粒径分布の成長は遅くなる。このことは、2 水滴の詳細な衝突・併合における相対半径やレイノルズ数の影響などに関する詳細

なデータが重要であることを如実に示している [7, 8, 9, 10].

雲粒子と乱流相互作用という視点からは、(a) 雲粒子レイノルズに依存する非線形な流体抵抗、(b) パーセル内平均温度および平均水蒸気混合比と環境の温度や水蒸気量との差による浮力、(c) 水蒸気凝結率、(d) 上昇気流による冷却が取り入れられている。(a)から (c) はコルモゴロフスケール以下の特性長さを持ち、これらの揺らぎは乱流により急速に系全体に輸送される。スペクトルが正しく計算されたことにより、水蒸気揺らぎのスペクトルは $k^{-\delta}$ ($\delta < 5/3$) となって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。これは観測とも合致する。これらの成果は国際会議で発表され大きな反響を得た [5-10]。現在、この成果を論文投稿準備中である。

【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。気象や気候予測においては乱流と雲は最大の不確定要因であるにも関わらずその基礎的研究、特に乱流と雲との相互作用に関しては多くの未開拓分野があると感じている。この分野の開拓、国際的連携と先導的役割を担うことを目的として 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。海外からの講演者 10 名、国内からの講演者 9 名を集め、十分な相互理解を計るため各講演時間を 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の指示が得られ、また我々の成果にも十分な手ごたえを得た。

【1-3】雲マイクロ物理シミュレータの高速化

今年度前半では、衝突・併合過程を導入した 9 分を超える計算に 8192 コアを用いて約 1 週間程度

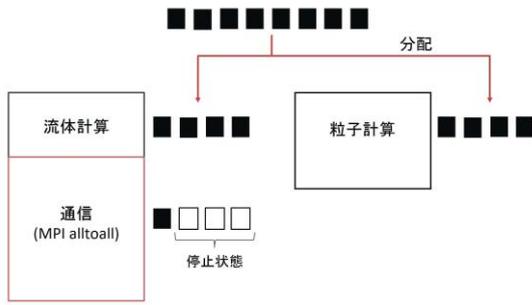


図 2 FFT 通信と粒子計算とのオーバーラップ. これまでの計算では, 流体計算と通信の後に粒子計算が行われていた.

	4スレッド	8スレッド	16スレッド
変更前	8.3899E-02	4.7899E-02	6.4452E-02
変更後	1.3674E-01	7.6988E-02	4.6052E-02

表 1 3次元FFTにおける通信と流体計算および粒子計算のオーバーラップによるCPU Timeの比較 格子数: 256^3 , MPI 並列数: 8, ノード数: 8

(146 時間)の時間を要していた.

今年度後半では, これをさらに高速化すべく以下の改良を行った. (1)各プロセスに割り当てられた空間領域をさらに小さいセルに分割し雲粒子の位置座標に応じてソーティングを行うのであるが, リストベクトルを作成して属性の入れ替えを高速化した, (2)雲粒子位置における流体物理量を線形補間により計算する際, 粒子のメモリー上の位置情報探索回数を最小限にとどめるようにした. 以上の2つの改良により計算時間を95時間にまで(53%の加速)短縮できた. さらに, (3)改良後も3次元FFTが計算時間の大部分を占めるのでFFTにおける通信とバタフライ演算だけでなく雲粒子計算部分も含めて隠ぺいすることを試みた(図5). この開発には富士通SEの支援を受けた. 残念ながら表1に見るように小さい計算サイズではそれほど大きな加速は実現されていない. これは流体計算が粒子計算より圧倒的に大きいため結局は通信に時間がとられてしまうこと, 何らかの原因でスレッド間同期に時間を取られてしまうことによる. かなりの努力にもかかわらずこの原因の特定には未だ至っていない. 将来, エアロゾルを含む大きな粒子数での計算では改善が望めるかもしれないので, 原因の特定を今後も進める.

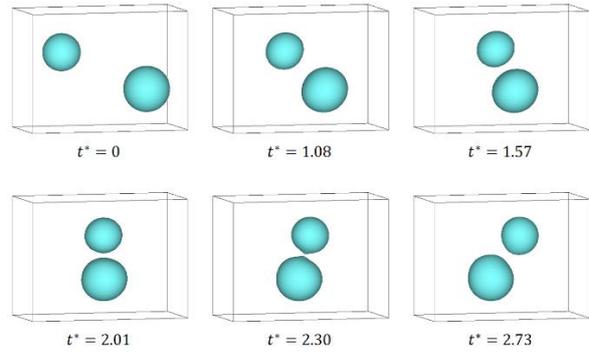


図 3 半径比 $\Delta=0.83$ における計算 ($t^* = tV/(R_s + R_l)$).

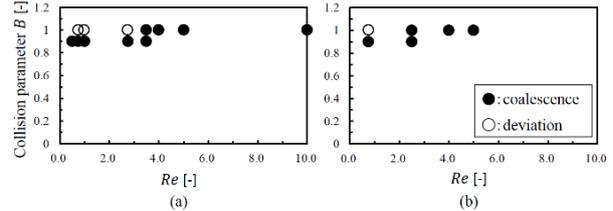


図 4 2つの水滴の接近時における挙動 (a) $\Delta=1.0$ (b) $\Delta=0.83$.

【2】空気中の水滴の衝突解析

実際の雲中の水滴の粒径分布は異なる大きさ同士(異径)の水滴の衝突が多くを占めている. 今年度前半では, 異なる半径の水滴の衝突・合体の予備的な計算を行った. ウェーバー数を 1.71×10^{-2} の場合に衝突オフセットパラメータとレイノルズ数を変化させて, 2水滴がそれる場合と合体する場合を解析した.

今年度後半では, 半径が R_l, R_s ($R_l \geq R_s$) の大小2つの水滴の半径比を $\Delta = R_s/R_l$ としてより広範囲の Δ に対して衝突・合体を調べた[0a]. レイノルズ数とウェーバー数をそれぞれ $0.5 \leq Re \leq 10$, $8.55 \times 10^{-3} \leq We \leq 8.55 \times 10^{-1}$ とした. 計算結果の一例として, $Re = 0.75$, $We = 8.55 \times 10^{-1}$, $B = 0.9$, $\Delta = 0.83$ に対する計算結果を図3に示す. この図より, 2つの水滴は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. このとき, 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上方に避けながら運動していることがわかる. さらに, $t^* = 2.30$ においては, 界面張力の影響によって2つの水滴同士が引きつけられ突起形状が生じているが, 水平方向の慣性力の方が大きいため接触することなくそれたと考えられる. この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。また、図 4 には $We = 4.28 \times 10^{-2}$ におけるレイノルズ数と衝突パラメータの関係を $\Delta = 1.0$ および $\Delta = 0.83$ の場合について示した。この図においては、代表長さには両者ともに小さい方の水滴半径 R_s を用いていることに注意されたい。この図より、本計算の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、 $We = 4.28 \times 10^{-2}$ においては $\Delta = 0.83$ の場合の方が、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。今後は、様々なウェーバー数に対して半径比が挙動に及ぼす影響を調べる必要がある。

【3】雲乱流混合輸送

昨年度に引き続き、同じ乱流により輸送されかつ異なる揺らぎの注入方法による 2 つのスカラール場の揺らぎモーメントのスケーリング指数の解析を進めている [3, 4]。今年度全体を通じて、高解像度での乱流混合の長時間積分により、統計的に十分収束したデータが得られつつある。

今年度前半では、乱流運動エネルギースペクトルとスカラール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し、理論的予測と一致する結果が得られた。また、この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 $2\lambda < r < L/4$ で (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わかった。この結果は、2016年9月モンリオールで開催された国際応用数学力学連合の会議で招待講演として発表された [4]。

今年度後半では、一様な温度勾配が存在するときの温度揺らぎスペクトルの軸対称性を解析するためにルジャンドル展開による解析を始めた。ルジャンドル多項式の数値的直交性が十分ではないので、現在その精度改良を進めている。

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 ($Sc = \nu/\kappa = \text{分子粘性}/\text{分子拡散}$) のスカラールとなる。この場合、分子拡散が支配的になる長さは分子粘性による特徴的長さよりはるかに小さいため、速度場はスカラール場に比べて滑らかと見なせる。

今年度前半では、速度場は粗い空間格子上でスペクトル法により計算し、スカラール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。

今年度後半になって、コード開発がさらに進展し、2重格子上での計算を 2 つのコミュニケータにより行い、速度場のデータをスカラール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計るやり方に深化した。この成果は現在投稿中である [0b]。

【4】高分子と流れ場との相互作用

石鹸膜を用いて擬 2 次元乱流を実現した実験的研究が近年注目されている。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が、最近の知見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など、興味深い結果が報告されている。一方でこの系の数値的研究はほとんどなされておらず、高分子の役割や流れとの相互作用の詳細を理解するためには、実験系と比較可能な条件下での数値的研究の推進が必須である。

今年度前半には、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るためのコードの作成と、いくつかのパラメータで予備的な数値計算を実施した。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について調べた。

今年度後半では、流れに垂直な方向の計算領域を 2 倍に拡大し、エネルギーの逆カスケードをより明瞭にすることを進めた [2, 11]。この時の流れ場の渦度分布と高分子ストレス場の分布を図 5 に示す。高分子が添加されていない系では、格子後

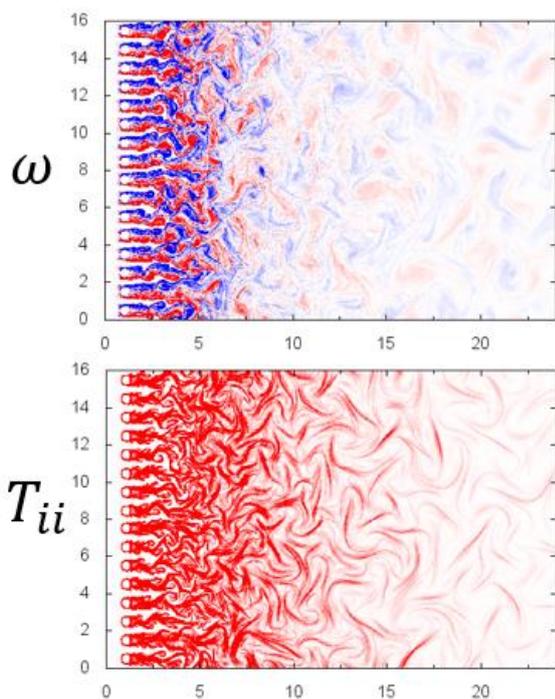


図5 2次元格子乱流における渦度分布（上）及び高分子ストレス場のトレース成分（下）の可視化結果を示す。

流で剥離した渦が下流に流されるにつれて、衝突と併合を繰り返しながら大きな渦に時間発展するのに対し、高分子が添加された系においては、この渦の成長が抑制されていること、また生成される渦度の強度が小さくなっていることがわかる。これはエネルギーの逆カスケードが抑制されたことを意味している。高分子によるストレス場の分布を調べてみると、渦と渦の間にある伸長流れが強い領域で高分子が強く伸長され、高分子によるストレス場が流れ場に強く作用していることがわかる。この時の運動エネルギースペクトルの振る舞いを調べてみると、低波数側の成長が鈍ること、高波数側の励起が顕著になり、 k^{-4} に近い特徴的なスペクトルが観測されることなどがわかった。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

雲マイクロ物理シミュレータ開発は順調に進展しておりコードの高速化も少しずつ進んでいる。衝突・合併計算が当初よりも効率化され、空間格子点数 512^3 、雲粒子数 1,600 万個以上の雲粒子集団の 10 分弱 (280 万ステップ) にわたる時間発展の計算が正しく実行できたことで、大規模計算のための確かな基盤が確立されたと考えている。今

後の研究においては、エアロゾルを核として微細な雲粒子が発生するプロセスの導入とその物理的性質の解明、実験との比較検討、そして雲粒子の衝突・併合ダイアグラムを雲マイクロ物理シミュレータに導入することが大きな課題である。さらに、より高いレイノルズ数での雲乱流状態を実現して、この環境内での雲粒子成長をシミュレートし雨粒子生成までにいたる様々な現象を解明することを目指す。計算負荷はさらに増大するので、より効率化を進めていく。

空気中の水滴の衝突解析では、新たに提案された改良二相系 LBM を用いて、異なる大きさ同士の水滴の衝突挙動を調べた。その結果、半径比が挙動に影響を及ぼし、合体からそれる挙動に遷移するレイノルズ数が同径同士の場合と異なることがわかった。今後は、様々な半径比に対する計算を行い、挙動に及ぼす影響を調べる予定である。

乱流により輸送されるスカラー場の異常な揺らぎについては、揺らぎの構造関数のスケーリング指数の(非)普遍性がどのようにして生成されるのかの物理機構の解明を目指す。さらにエアロゾルなどの高シュミット数のスカラーの揺らぎや空間構造を Yeung 教授らと新たに開発した第 2 世代ハイブリッド法を用いて解析を進める予定である。

2次元格子乱流における高分子の影響を調べるオイラー・ラグランジュ計算の並列化コードの作成に 2 年前から取り組んできたが、今年度ようやくコードが完成して本格的な計算が実施可能な状況にある。特に高分子の影響を調べた研究では、実験等の結果と直接的な比較が可能であるため今後は実験結果との整合性や結果の不一致点を詳細に議論していく必要がある。そのためには実験室と同等程度のレイノルズ数における流れを計算する必要がある。そのためには流れのレイノルズ数を数倍程度大きく設定した条件で再度計算を行う予定である。用いているコードはハイブリッド並列化されているので、計算規模を大きくすることには大きな支障はない。ただし小スケールでの流れ場の振る舞いの高精度化に向けて、離散高分子とオイラー場とのカップリング計算について見直

す必要があると考えている。具体的には用いた正則化デルタ関数の見直しと計算コストの評価を同時並行で行っていく必要がある。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[0a] M.Yoshino, J. Sawada and K. Suzuki, “Two-phase lattice Boltzmann simulation of collision dynamics of binary droplets with various diameter ratios”, Submitted to Computers & Fluids (2017) 【査読有】

[0b] M.P.Clay, D.Buarria, T.Gotoh, and P.K.Yeung, “A dual communicator and dual grid-resolution algorithm for petascale simulations of turbulent mixing at high Schmidt number”, Submitted to Computer Physics Communications (2017) 【査読有】

[1] T. Gotoh, T. Suehiro and I. Saito, “Continuous growth of cloud droplets in cumulus cloud”, New J. Phys. **18**, 043042 (19 pages), (2016). 【査読有】

[2] 渡邊威「乱流と微小粒子群の相互作用に関するシミュレーション研究」, 京都大学数理解析研究所講究録 No. 2007, pp. 28–39 (2016) 【査読無】

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 会議発表(口頭, ポスター等)

[3] T. Gotoh and T. Watanabe, “Scaling exponents of passive scalars in homogeneous turbulence” (Invited, Oral), International Workshop on Theoretical Aspects of Near-Wall Turbulence Studies Kyoto, June. (2016)

[4] T. Gotoh and T. Watanabe, “Inertial and inertial convective ranges and crossover length” (Invited, Oral), 24th ICTAM, Montreal, Canada, Aug. (2016).

[5] I. Saito and T. Gotoh, “Evolution from cloud droplets to rain drops inside cumulus cloud” (Oral) 11th European Fluid Mechanics Conference, Sevilla, Spain, Sept. (2016)

[6] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, and K. Nagai, “Seamless computation of continuous growth of cloud droplets” (Key Note Lecture, Invited, Oral), 2nd International Workshop on Numerical Simulations of Particle/ Droplet/Bubble-laden Multiphase Flows JAMSTEC Yokohama, Oct. (2016)

[7] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, Continuous evolution of cloud droplet spectrum in cumulus cloud, (Oral) APS DFD, Portland, USA, Nov. (2016)

[8] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Development of cloud microphysics simulator” (Invited, Oral),

Workshop on cloud microphysics-turbulence interactions, Leipzig, Germany, Feb. (2017)

[9] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Droplets and turbulence in cloud microphysics simulator” (Invited, Oral), 2nd International workshop on cloud turbulence, Nagoya, March (2017)

[10] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Droplet evolution in cloud turbulence” (Invited, Oral), Workshop on nonequilibrium thermodynamics and statistical physics, Hakata, Nagoya, March (2017)

[11] T. Watanabe, “Eulerian-Lagrangian simulations for viscoelastic turbulence” (Invited, Oral), Workshop on Nonequilibrium thermodynamics and statistical physics: From rational modeling to its applications, Hakata, March (2017)

[12] 吉野正人, 「二相系格子ボルツマン法による混相流シミュレーション」(口頭発表), 第25回格子ボルツマン法の基礎と応用に関する研究会, 富山大学, 6月(2016).

[13] 澤田純平, 吉野正人, 鈴木康祐, 「二相系格子ボルツマン法を用いた異径液滴衝突の数値解析」(口頭発表) 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2016, 京都, 8月 (2016).

[14] 後藤俊幸, 「スカラー乱流の大規模計算による異常スケーリングの解析」(ポスター発表), プラズマシミュレータシンポジウム, 核融合科学研究所, 土岐, 9月 (2016).

[15] 齋藤泉, 後藤俊幸, 永井一輝, 「積雲内における雲粒から雨粒への成長」(口頭発表), 日本流体力学会年会, 名古屋, 9月(2016).

[16] 野村優介, 渡邊威, 後藤俊幸, 「2次元格子乱流における高分子の影響」(口頭発表), 日本流体力学会年, 名古屋, 9月(2016).

[17] 齋藤泉, 「積雲内における雲粒子の成長」(口頭発表), 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 名古屋, 10月 (2016)

[18] 後藤俊幸, 「雲粒子と雲乱流」(招待講演, 口頭発表), 伝熱学会東海支部講演会, 名古屋, 12月 (2016).

(4) その他(特許, プレス発表, 著書等)

[19] T. Gotoh, Lecture on “Statistical properties of passive scalar in homogeneous turbulence”, (Invited, Oral) Ilmenau Institute of Technology, Ilmenau, Germany, Sept. (2016).

[20] 2nd International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya, March (2017).

<http://comphys.web.nitech.ac.jp/cloud2.html>