

jh230019

内部自由度を持つ粒子群と乱流の相互作用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

乱流による粒子輸送現象は、自然界から工学的流れに至るまで広く観測される。各分野での着眼点や研究目的に相違があっても、粒子に働く流体力のモデル化や計算手法、データ解析手法など共通する部分が多い。また、これらの問題に横たわる特徴の一つに、流れ場と無関係に決まる系固有の特性時間を伴うことが挙げられる。多くの複雑混相乱流の問題は、内部自由度に対応した特性時間を有する粒子系と、特異構造で特徴づけられる乱流場の相互作用の問題に帰着できる。そこで本研究課題では、粒子集団による輸送問題の高効率計算、乱流場の特異構造と粒子輸送の相関、粒子群と乱流の相互作用に関する高精度計算、に関する研究を包括的に実施し、乱流粒子輸送のシミュレーション基盤を整備することを目指す。

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

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

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・工学研究科	研究総括, 粒子と流れの相互作用の解析
後藤 俊幸	名古屋工業大学・先端医用物理・情報工学研究センター	乱流場の特異構造の解析
齋藤 泉	名古屋工業大学・工学研究科	粒子輸送計算の高速化
片桐 孝洋	名古屋大学・情報基盤センター	最適化に関する助言
横嶋 哲	静岡大学・大学院工学領域	粒子と流れの相互作用の解析

2. 研究の目的と意義

2.1 目的

粒子懸濁液の流れやポリマー混入流、金属微粒子の精製過程、微小気泡や液滴を伴った流体機器内の流れ、河川流中の掃流砂輸送などの複雑混相流れは、扱う対象や目的は互いに異なっているが、粒子に働く流体力のモデル化や計算手法、データ解析手法など共通する部分が多い。また、これらの問題に横たわる特徴の一つに、流れ場とは無関係に決まる系固有の特性時間（相変化に伴う反応時間や高分子鎖の緩和時間など）を含有することが挙げられる。

粒子に固有の特性時間と乱流の特性時間との大小関係によって、粒子群の振る舞いや乱流への影響は複雑な様相を示し、乱流場の構造や統計性、輸送場の揺らぎに大きな影響を与える。さらに乱流が有する強い非線形性は、速度勾配場に特異構造を誘起し、それは乱流の間欠的揺らぎの起源となる。

よって多くの複雑混相乱流の問題は、内部自由度に対応した特性時間を有する粒子系と、特異構造で特徴づけられる乱流場の相互作用の問題に帰

着することができ、問題の本質を捉えることが容易になると考えられる。本研究課題では特に、1. 粒子集団表現によるスカラー輸送問題の高効率計算手法の開発、2. 乱流場の特異構造と粒子輸送の相関解明、3. 粒子群と乱流の相互作用に関する高精度計算の検討、を研究課題の柱とする。

2.2 意義

✓基礎研究としての意義

特性時間を伴う仮想粒子集団の乱流輸送現象は、特性時間が無限大の極限をとると高シュミット数のスカラー乱流における古典的問題と関連する。本課題で実施する解析は、スカラー分散スペクトルの普遍定数の決定など、乱流輸送に関する未解決問題を解明するための有力な解析手法になる。また、乱流場における粒子群の局在化や乱流変動への影響に関する解析は、混相乱流研究の基本的な問題の一つである。本課題を通して基本性質の解明に寄与することは、学術的な意義が高いと考える。

✓応用展開への意義

工学の諸問題で扱う混相乱流は、その物理過程が非常に複雑で多岐にわたるプロセスで構成されており、問題の本質をとらえることが大変難しい。本課題のアプローチは、問題の主要素を抽出して単純化し、物理過程の基礎原理を理解することにある。このような方法論は、応用展開の上で、より複雑な現象を適切にモデル化する指針を得るために重要であると考えられる。

✓計算科学としての意義

流れと粒子群の相互作用の計算には、粒子(点)と流体(場)の情報の授受が伴う。これは、計算機の中では局所的小および大域的なデータのやり取りが同時多発的に生じる事を意味する。効率的な計算の実現には物理現象の理解のみならず、アルゴリズムや計算機の構造などについて理解を深める必要がある。研究の過程で得られる知見や経験を計算科学のコミュニティで共有することは、分野

全体の発展に大きく寄与する。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

3.1 課題の学際性

複雑混相流れにおける主要な物理過程を、内部自由度を有する粒子の集団と乱流の相互作用の問題として簡易的表現でモデル化することにより、現象を抽象化し、問題の本質を切り取ることが可能になる。それ故、得られる結果は上記の様々な分野に還元することが出来る。また、乱流場の特異構造の性質を理解することは、応用数学の基本問題の一つであり、本研究は数学、物理、化学、環境、機械、情報等に跨った分野横断的な課題である。さらに質点粒子群に働く抗力の正確な評価は、例えば砂粒や液滴の輸送のモデル計算を適切な計算コストで実施することが可能になるなど、応用可能な分野が広い。

3.2 拠点資源利用の必要性

乱流中に分散した粒子群の解析は、場の情報(オイラー)と点の情報(ラグランジュ)の交換が必然的に生じる。粒子数や流れ場の格子点数が大きくなるとその計算コスト・通信コストは膨大なものになるため、スパコンを用いた高効率計算は必須となる。また効率的なコードへの改良・発展には、乱流・粒子輸送現象に精通した研究者と、アルゴリズムやスパコンの構造を熟知した研究者が協力することが重要である。よって研究課題の推進には、拠点資源の利用が重要である。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

2023 年度より開始した課題である。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1. 粒子集団表現によるスカラー輸送問題の高効率計算手法の開発

雲乱流における微小液滴の輸送・混合現象にお

いて、雲粒子集団は相変化を伴う高シュミット数のスカラーであり、通常のオイラー的な手法による直接数値計算は著しく困難である。同様の問題は化学変化を伴う混相乱流全般に当てはまる。そこで我々は内部特性時間を有する仮想粒子を用いた新奇なオイラー・ラグランジュ計算法を開発して問題に適用し、スカラー場の分散スペクトル等の統計則の解明を進めてきた[1]。非圧縮流体の速度場 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ における、スカラー θ_{pj} を付随した非慣性粒子の時間発展方程式は、

$$\frac{d\mathbf{x}_{pj}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_{pj}, t),$$

$$\frac{d\theta_{pj}}{dt} = -\frac{\theta_{pj}}{\tau_\theta} + f_\theta(\mathbf{x}_{pj}, t)$$

で与えられる。この時スカラー場 $\theta(\mathbf{x}, t)$ は

$$\theta(\mathbf{x}, t) = \frac{V}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} \theta_{pj}(t) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{pj}(t))$$

で評価できる。古典的な乱流輸送の理論では、スカラー分散スペクトルは

$$E_\theta(k) = \begin{cases} C_{oc} \bar{\chi}_{in} \epsilon^{-\frac{1}{3}} k^{-\frac{5}{3}} & (k\eta \ll 1) \\ C_B \bar{\chi}_{in} \left(\frac{\epsilon}{\nu}\right)^{-\frac{1}{2}} k^{-1} & (k\eta \gg 1) \end{cases}$$

のスケーリング則に従うことが予測されている。我々はレイノルズ数=550, 流体格子点数=2048³, 粒子数=236/単位格子セル, の大規模解析を実施した。結果の一例を図1に示す。この結果より、明瞭な慣性移流領域($k^{-5/3}$)と粘性移流領域(k^{-1})の存在を確認した。また、各領域の遷移は $k\eta \approx 0.04$ で生じていることを計算結果は示しており、これは乱流理論の予測するもの ($k\eta \gg 1$) とは大きく異なる

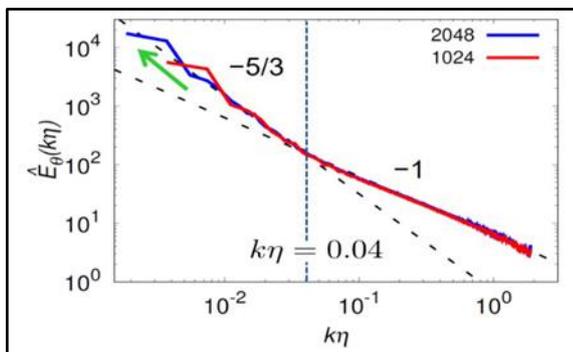


図1：雲水混合比のスペクトルの振る舞い。スペクトルは $k\eta = 0.04$ で明瞭な遷移が観測される。

格子点当たり 粒子数	1ステップ当 りの時間[s]	allocate,deallo cateが占める 割合[%]
16	0.67213	21.17
32	1.2851	21.75
48	2.0906	30.06
64	2.7967	30.45
80	3.4767	30.58
128	5.5575	29.68

表2：オイラー・ラグランジュ計算における1ステップあたりの計算時間と、計算時間に占める粒子情報通信の前処理（配列のallocate等）の割合。

ことを見出した。さらに、普遍定数であるバッチャー一定数 C_B の値として、 $C_B = 5.7 \pm 0.3$ が得られ、これは過去に実施された連続場の計算結果によるものと一致することが明らかとなった[1]。

オイラー・ラグランジュ計算で得られた結果は、粘性移流領域から慣性移流領域にかけて従来の結果と遷移波数を除いて一致することがわかった。一方で乱流統計理論は、低波数側の慣性移流領域は同じ $k^{-5/3}$ に従うが、係数の値が異なる二つのスケーリング領域からなることを示している(Gotoh et al. Phys. Rev. Fluids 6, 110512(2021))。しかし数値計算はこの遷移波数の存在を確認するには至っていない。この課題克服のブレークスルーには、計算の大規模化が必須の課題となる。我々の計算では扱う粒子数が増加すると、それに伴って計算時間が膨大に増えて現状のコードでは実施の目途が立たない。原因の一つは、分割した領域を跨ぐ粒子情報のプロセス間通信について、最適化が十分考慮されていないところにある。そこで本課題では計算の効率化に向けて、粒子個数・位置・速度情報のプロセス間通信と再ラベリングに伴って発生する配列のallocationとdeallocationに要する時間の計測とそのプログラム構造の見直しを行った。

表2は、周期境界条件に従う立方体領域におけ

る乱流とそれによって輸送される流体粒子の時間発展における計算時間を示したものである。計算領域は 2 次元領域分割を用いており、計算格子点数は 128^3 、プロセス数 4×4 、粒子数を 1 流体格子点あたり 16 から 128 まで増加させて、1 ステップの計算に要する時間を測定した。また、粒子情報の通信の前処理で扱う配列の allocate-deallocate に要する時間の割合も示している。この結果より、粒子数にほぼ比例して計算時間が増加すること、配列の allocate 等にかかる時間が全体の 3 割ほどを占めることがわかった。配列の allocation にかかる時間を削減するためには、予め必要な配列の大きさを見積もっておき、事前に必要とする配列をすべて定義しておくのが一番シンプルな変更である。実際にそのような方針でコードを書き換えたところ、例えば粒子数 80 の場合では計算時間が 2.312s まで削減されることがわかった。これは allocate-deallocate に係る時間がほぼ無視できる寄与になったことを意味する。他の粒子数の場合についても解析を進めており、結果は後日報告する予定である。

5.2. 乱流の特異構造の普遍統計則とその粒子群の振る舞いへの影響

乱流中に偏在する階層的渦構造に伴う強い揺らぎは、それにより輸送される粒子やスカラーの輸送混合特性に大きな影響を及ぼすことが知られている。特に粒子系が化学反応や相変化を伴う場合、乱流の間欠的揺らぎが引き起こす粒子群の空間的局在化は、反応・混合促進の鍵となる素過程であり、その役割を理解することは極めて重要である。本研究では、乱流中の特異構造を特徴づける速度勾配場の揺らぎの空間構造や統計法則をシミュレーション解析により明らかにする[2]。とくに乱流中の微粒子群のオイラー・ラグランジュの大規模シミュレーションを実行し、散逸場や渦度場の揺らぎによって条件づけられた粒子数密度分布等のデータを収集し、特異構造の粒子・スカラー輸送の諸特性に及ぼす影響を解析した。

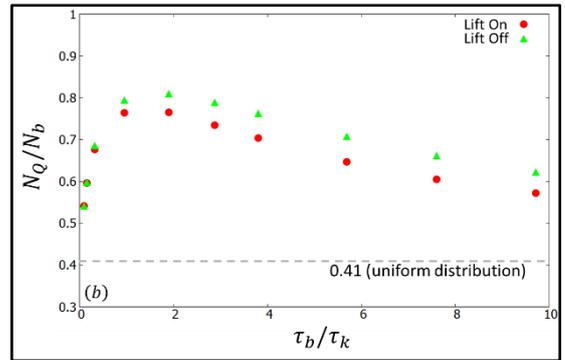


図 3：乱流中のマイクロバブルの渦領域への集積度合とストークス数の関係。

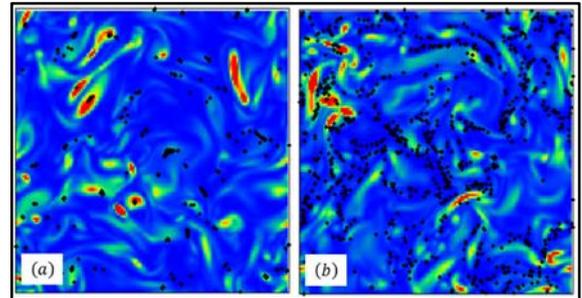


図 4：計算領域内の 2 次元断面内における粒子分布（黒点）を示す。(a) マイクロバブル (b) 慣性粒子の場合で、それぞれ $\tau_b/\tau_k = 1$ とした。背景の色は渦度の 2 乗値を示す（赤から青にむけて値は減少する）。

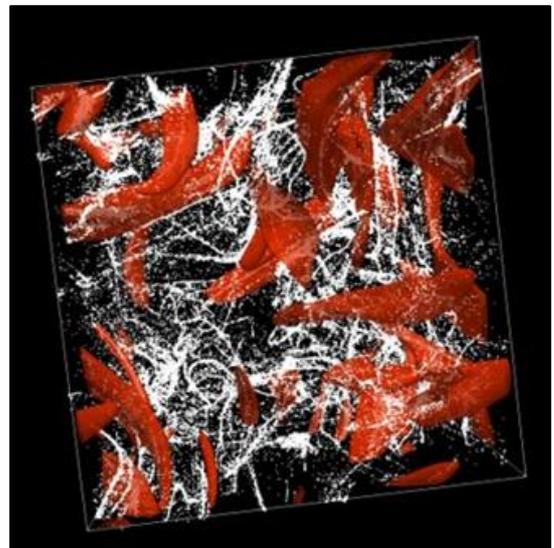


図 5：数密度変化率 J の等値面（赤）とマイクロバブルの集積（白）の可視化図。 J の大小とは無関係にバブルは局在化する。

本年度はマイクロバブルの運動について解析を行った[3]。変形を考慮しない、単一の微小なバブルの運動方程式は

$$\frac{d\mathbf{V}(t)}{dt} = 3 \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \Big|_{\mathbf{Y}(t)} - \frac{1}{\tau_b} [\mathbf{V}(t) - \mathbf{u}(\mathbf{Y}(t), t)] - 2\mathbf{g} - [\mathbf{V}(t) - \mathbf{u}(\mathbf{Y}(t), t)] \times \boldsymbol{\omega}(\mathbf{Y}(t))$$

で与えられる。 $\mathbf{Y}(t)$ はマイクロバブルの位置座標、 $\mathbf{V}(t)$ はマイクロバブルの速度をそれぞれ表す。乱流中に分散したマイクロバブルのような軽い粒子群は、渦や散逸場の強い揺らぎと関連するような紐状の領域に集積する。紐状構造が乱流場のどのような特性によって生じるのかを明らかにするために、速度勾配テンソルの第2不変量 Q が粒子分布とどのような相関を示すか解析を行った。図3は Q が負の領域に存在するマイクロバブルの割合が、無次元化された緩和時間 τ_b/τ_K （ストークス数、 τ_K はKolmogorov時間）にどのように依存するかを示した結果である。この結果より、ストークス数が1近傍で全体の8割程度が渦領域に集積していることが確認できる。図4は $\frac{\tau_b}{\tau_K} = 1$ のときのマイクロバブルおよび慣性粒子の空間分布の様子を示した断面可視化図である。マイクロバブルは赤い渦領域の内部に集中していることがわかり、これは慣性粒子の場合とは真逆の傾向にあることがわかった[3]。

マイクロバブルの空間分布の可視化結果を注意深く観察すると、高渦度領域の外においてもマイクロバブルは強い局在化を示すことが確認できる。この高渦度領域外に局在化する現象を理解するために、乱流場の物理量で表現される粒子数密度増加率

$$J = \frac{1}{n} \frac{Dn}{Dt}$$

に着目した。上式の右辺は、マイクロバブルの緩和時間 τ_b の2次のオーダーまで展開して調べると、

$$J = 4\tau_b Q + 2\tau_b [6\tau_b R - 3\tau_b \text{tr}(HA)]$$

と表される。ここで A は速度勾配テンソル、 Q は A の第2不変量、 H は圧力ヘシアン、 $R = -\det(A)$ である。バブルが集積している領域では $J > 0$ となるため、右辺が大きな正の値をとる箇所で数密度が増大すると考えられる。もし右辺第2項が無視できる場合、 $J > 0$ は $Q > 0$ を意味するため、これは

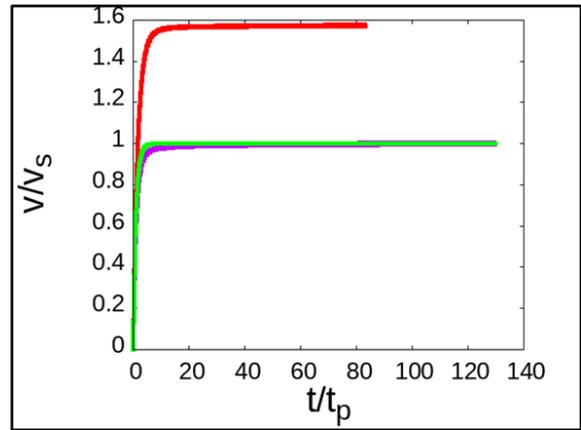


図6：静止流体中を落下する質点粒子の速度の時間変化の様子。緑の線は解析解を示し、紫線が非擾乱速度を用いて得られる数値解である。赤線は擾乱速度を含む場合であり、理論解から大きくずれる。

高渦度領域内にバブルが分布することと矛盾しない。第2項の寄与とマイクロバブルの集積の関連性を統計的に、あるいは可視化解析により調べた結果を図5に示す。この解析からはマイクロバブルの集積と数密度増大率を表す乱流場の構造について、明確な関係性を見出すには至らなかった。今後はより簡潔な渦流れにおける性質に立ち返って理論的な考察を行う必要がある。

5.3. 粒子群と乱流の相互作用に関する高精度計算の検討

固体微粒子やマイクロバブル、鎖状高分子の集団が分散した乱流場においては、乱流摩擦抵抗低減に代表されるようにマクロ流動特性が劇的に変化する事が知られている。この問題は微小粒子群による乱流変調として捉える事ができるが、その素過程は極めて複雑であり、第一原理に基づく解析が実施可能な問題は限られている。故に、粒子群は質点粒子の集団として扱うことが現実的なモデル化の第一歩となる。

質点粒子に働く流体抵抗とその流体への反作用力は、ストークス抵抗を点に集中させた単位体積辺りの力 $\mathbf{F}_{pi} = 6\pi\mu a(\mathbf{u}(t, \mathbf{r}_i) - \mathbf{V}_i(t))\delta(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)$ として計算される。この時、粒子位置 \mathbf{r}_i での流体速度 $\mathbf{u}(t, \mathbf{r}_i)$ については、粒子自身による速度擾乱を取り除いた非擾乱速度 $\tilde{\mathbf{u}}(t, \mathbf{r}_i)$ を用いなければ、抵抗

は過小評価されることになる．しかし $\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{t}, \mathbf{r}_i)$ は一般的な流れ場では決まらないため，いくつかの近似評価手法が提案されている (Horwitz & Mani, JCP 318 (2016) 85; Ireland & Desjardins, JCP 338 (2017) 405; Yoshida et al., Chem. Phys. Lett. 737 (2019) 136809)．本研究では，先行研究における質点粒子に働く抗力評価を再考察し，本研究課題に沿う形で高精度・高効率計算を実現することを目指す．

本年度はストークスレットの解を用いた非擾乱速度の評価方法 (Yoshida et al., Chem. Phys. Lett. 737 (2019) 136809) に着目し，単一粒子の沈降問題についてこの方法の妥当性を検証した．この論文では， x 方向の一様流中の原点に $6\pi\mu a U^\infty$ の力が集中して加わっている場合に生じる流れの解 (ストークスレット)

$$\mathbf{u}^A = U^\infty \left[\left(1 - \frac{3a}{4r}\right) \mathbf{e}_x - \frac{3ax}{4r^3} \mathbf{x} \right]$$

を用い， $\sum_{p=1}^3 |\mathbf{u}^N - \mathbf{V} - \mathbf{u}^A(\mathbf{x}_p)|^2$ が最小をとる U^∞ の値を非擾乱速度と評価し，抗力 $F_{pi} = 6\pi\mu a (U_\infty - V_i(t))\delta(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)$ を求めている．我々は射影法を用いた有限差分法の計算コードにこの方法を実装し，計算の妥当性について検討した． x 軸方向に一様な重力場 $\mathbf{g} = (g, 0, 0)$ の中で，静止した流体中を質量 m の質点が流体抵抗を受けながら自由落下する問題を解析した．計算領域は一辺の長さが 4π の立方体とし，計算格子点数は 128^3 とした．粒子レイノルズ数は0.1, 粒径と計算格子幅の比を1とし，終端速度が非擾乱速度を用いた場合とそうでない場合にどのように違うかについて解析した．結果を図6に示す．この結果より，非擾乱速度が提案された方法で精度よく求まることがわかった．

乱流中では，粒子は様々な方向にランダムに運動する．上述した方法は，粒子位置とその周りの計算格子点との相対位置関係によって多少変化が生じることが予想される．そこで，落下方向を $\mathbf{g} = (\frac{g}{\sqrt{6}}, \frac{g}{\sqrt{6}}, \frac{2g}{\sqrt{6}})$ とし，格子セルを斜めに横切る場合と同様の解析を行った．結果を図7に示す．先ほどの x 軸方向の落下とは異なり，理論解との一致はあま

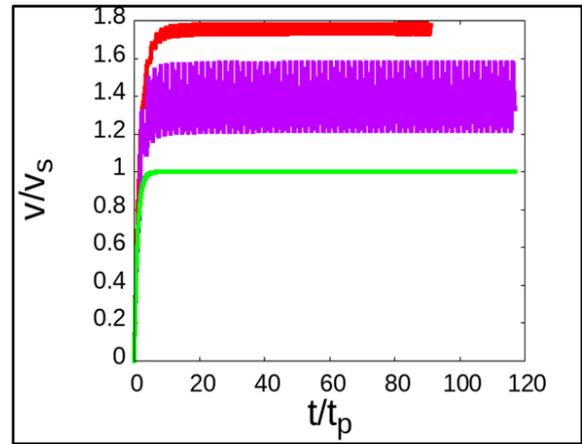


図7：図6と計算条件は同じであるが，重力場の向きが各座標軸から見て斜め方向にとった場合の計算結果を示している．

りよくなく，かつ周期的に値が振動していることが確認された．なお，結果は示さないが粒径が格子間隔に比べて十分小さい場合には，理論解と一致する傾向にあることが確認された．

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

6.1 粒子集団表現によるスカラー輸送問題の高効率計算手法の開発

✓当初計画：オイラー・ラグランジュ計算によるスカラー輸送の大規模計算を実施し，スカラー分散スペクトルの統計構造を明らかにする．また，計算のさらなる大規模化に向けて，粒子情報のプロセス間転送にかかるコストの削減を行う．

✓自己評価：慣性移流領域から粘性移流領域への遷移を明確に捉えたのは大きな収穫であったと考える．また，allocationに係る処理の無駄をなくすことで，30%ほど計算時間が削減できる可能性が明らかになった．達成度としては80%と考える．

✓今後の展望：計算の高速化の目途がたったので，具体的なコード改善に取り組む．高速化することで，さらに大規模な計算が実施可能となるので，情報収集しながら次の計算に関するプランを練る．

6.2 乱流の特異構造の普遍統計則とその粒子群の振る舞いへの影響

✓当初計画：散逸場や渦度場の揺らぎによって条件づけられた粒子数密度分布等のデータを収集し、特異構造の粒子輸送の諸特性に及ぼす影響を解析する。

✓自己評価：本年度はマイクロバブルのモデルに関して、その特性を解析した。高渦度領域への集中はよく知られているが、それ以外の領域でも特異な局在化を示すことを明らかにしたのは意義がある。しかし、メカニズムの解明には至らなかったため、達成度は60%だと考える。

✓今後の展望：乱流渦は階層的な構造を有し、非定常で複雑であるため、乱流の素過程とマイクロバブルの分布の構造を明確にすることが難しいと感じている。流れ場についてももう少し素性が良く知れた問題を扱うことで、解決につながるのではないかと考えている。

6.3 粒子群と乱流の相互作用に関する高精度計算の検討

✓当初計画：先行研究で検討された非擾乱速度の評価に基づく質点粒子に働く抗力の計算方法を再考察し、本研究課題に沿う形で高精度・高効率計算を実現することを目指す。

✓自己評価：先行研究で得られている結果と同様な結果を得ることができた。また、粒子と流体場の計算格子点の相対位置関係によっては、必ずしも良好な評価方法とはならないことがわかったため、全体的には70%の達成率だと考える。

✓今後の展望：先行研究で提案された手法について、改良の余地があることが分かった。ストークスレット解は原点で値が発散するので、粒子と計算格子点が非常に近い場合には必ずしもよい近似

とはならないと考えられる。この問題についてさらに解析をすすめ、手法の改良に取り組む。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, “Spectrum of passive scalar carried by particles in isotropic turbulence”, *Phys. Rev. Fluids*, 9, 054601 (2024). 2024年5月3日

[2] T. Gotoh, T. Watanabe, I. Saito, “Kinematic effects on probability density functions of energy dissipation rate and enstrophy in turbulence”, *Phys. Rev. Lett.* 130, 254001 (2023) 2023年4月21日

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[3] T. Watanabe, H. Suzuki, I. Saito, and T. Gotoh, “Numerical simulations of microbubble dispersion in isotropic turbulence”, accepted for publication in *Proceedings of 34th IUPAP Conference on Computational Physics* (2024)

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[4] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, “Turbulent mixing of scalar field of particle properties”, 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe International Conference Center, 2023年8月7日

[5] T. Watanabe, H. Suzuki, I. Saito, and T. Gotoh, “Numerical simulations of microbubbles dispersion in isotropic turbulence”, 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe International Conference

Center, 2023 年 8 月 7 日

[6] T. Gotoh, T. Watanabe, I. Saito, “Reynolds number dependence of moments of kinetic energy dissipation rate and enstrophy”, 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, Washington, 2023 年 11 月 21 日

[7] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Spectrum of passive scalar variance with inherent time scale in turbulence”, Interfaces and Mixing in Fluids, Plasmas, and Materials, Kavli Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara, 2023 年 10 月 25 日

[8] I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh, “Lagrangian statistics of droplets in cloud turbulence”, 5th International Workshop of Cloud Turbulence, Nagoya, 2024 年 3 月 14 日

[9] T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, “Spectrum of supersaturation fluctuations and Lagrangian-Eulerian computation”, AMS 104th Ann. Meeting, Baltimore, USA, 2024 年 1 月 29 日

(4) 国内会議発表（査読なし）

[10] 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大規模シミュレーション”日本流体力学会年会 2023(東京農工大学 小金井キャンパス)2023 年 9 月 20 日.

[11] 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大規模直接数値シミュレーション”, RIMS 共同研究(公開型)「乱流の予測可能性と可制御性」, 京都大学数理解析研究所 2023 年 7 月 20 日

[12] 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸, “乱流場の特異

構造の形成とそのスカラー・粒子輸送への影響”, プラズマシミュレータシンポジウム, オンライン 2023 年 9 月

[13] 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, “高シュミット数パッシブスカラー乱流の粒子法シミュレーション”, 第 37 回数値流体力学シンポジウム (名古屋大学), 2023 年 12 月 15 日

[14] 壽松木輝, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸, “等方乱流中のマイクロバブルの局在化” 第 37 回数値流体力学シンポジウム (名古屋大学), 2023 年 12 月 17 日

(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）

・国際ワークショップ (5th IWCT2024) の主催
<https://sites.google.com/view/cloudturb5>

・Satellite Workshop (Hybrid) on High Reynolds Number Turbulence の主催
<https://sites.google.com/view/satellite-workshop-turbulence>