

jh220003

渡邊 威 (名古屋工業大学)

研究課題名

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



2022年7月8日@オンライン

## 研究背景

- ・混相乱流は、自然現象や工学的な流れの多くで観測される、複雑で解析が困難な物理現象の一つである。
- ・混相乱流は極めて複雑で多様な物理を内包する一方で、その詳細に関する理解はいまだ不十分。
- ・近年の計算機の飛躍的な発展により、混相流れについて第一原理に忠実で、かつ精度の高い計算が実現可能な状況にあり、今後益々その重要性は高くなると考えられる。

## 研究目的

- ・粒子懸濁液や大気中の液滴の振る舞いなどに代表される混相乱流の問題について、高精度計算を実施するための計算基盤を構築。
- ・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知見の積み上げる。
- ・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。
- ・2022年度は2021年度の結果を発展させる。取り組む内容は以下のようである。
  1. 有限サイズ粒子群による乱流変調の大規模計算
  2. 雲乱流における粒径成長とスカラー場の揺らぎ
  3. 微小同士の衝突・併合過程の解明

## 2022年度 研究計画

### 1. 有限サイズ粒子群による乱流変調の大規模計算

- ・計算手法 (VP法) に起因する時間刻み幅の制限を緩和。
- ・時間積分に陰的解法を適用したコードを開発・検証 (図1)。
- ・2021年度は、単一球周りの流れで物体に働く抗力等が時間刻み幅にどのように依存するか、陰的解法の妥当性や限界を調べた。
- ・抗力等の計算精度を変えずに計算を高速化する事に成功。

→粒子形状が回転楕円体である場合について解析し (図2)、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。

### 2. 雲乱流における粒径成長とスカラー場の揺らぎ

- ・雲乱流における温度や雲水混合率などの、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(図3)。
- ・2021年度前半では、スカラー揺らぎの乱流的挙動はレイノルズ $R_\lambda = 4$ 程度から始まり、速度場より早く始まることを見出した。
- ・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つのべきのスケール領域が存在することを理論的に示した (図4)。

→3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明らかにするため、大規模計算を実施する。

### 3. 液滴同士の衝突過程の解明

- ・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。
- ・2021年度は、衝突形式が液滴内部の流動状態に及ぼす影響について調べ、追突の方が対向衝突に比べて液滴内部の混合が促進されること、液滴の初期位置や液滴の速さによっても混合の様子が異なることを見出した。

→衝突において特に重要なパラメータ (半径比, 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。

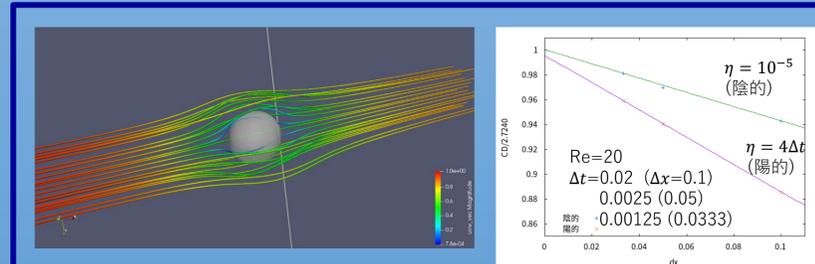


図1 陰的解法の導入による単一球周りの流れの計算精度と計算速度の検証。左：単一球を過ぎる低レイノルズ数の流れ (Re=20) の流線を示したもの。右：理論的予測値で規格化された抗力係数の空間解像度依存性を示す。

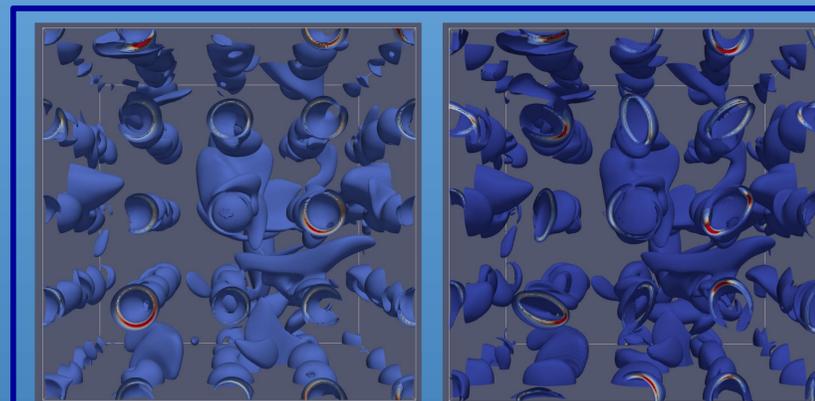


図2 等方乱流中に固定配置された粒子群のまわりに発生する渦構造の可視化結果を示す。左：球形粒子。右：楕円体粒子。粒子の体積率は同程度であり、換算半径は $r = 0.25$ 、計算解像度は $256^3$ である。

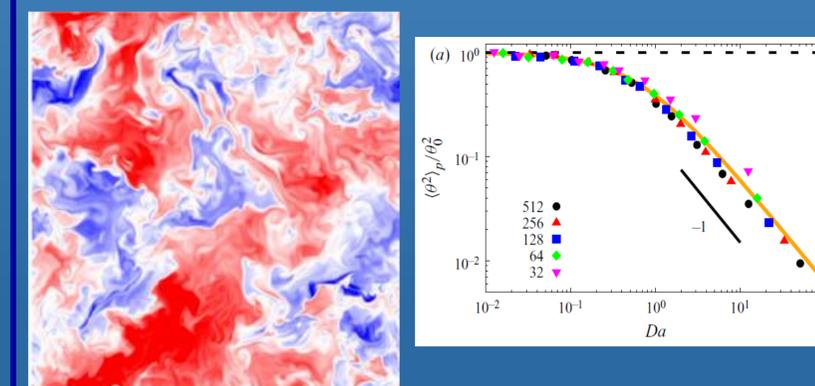


図3 左：熱的に相互作用する粒子群と乱流温度場の2wayカップリング計算により得られた、流体温度場の2次元等高線図を示している。右：流体温度場の揺らぎの分散は (粒子がない時と比べて)、ダムケラ数の増加とともに減衰する (I.Saito, T. Watanabe and T.Gotoh, J. Fluid Mech. **931**, A6 (23 pages) (2022)より)。

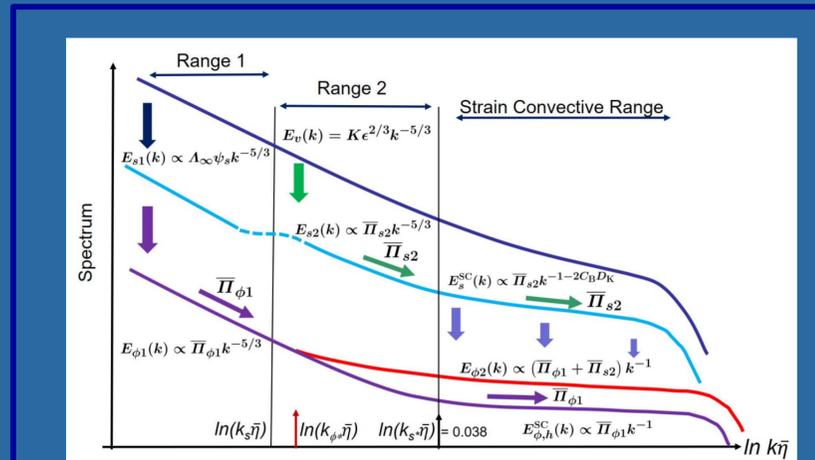


図4 雲乱流における過飽和度場 $s$ と雲水混合比場 $\phi$ の分散スペクトルの振る舞いを乱流統計理論に基づいて理論的に予測した模式図を示す。 $E_v(k)$ は乱流の運動エネルギースペクトルを表し、Range 1では乱流速度場による注入によって $E_{s1}(k)$ が励起され、 $E_{s1}(k)$ はさらに $E_{\phi1}(k)$ を励起する。Range 2の $\phi$ のスペクトルは、Range 1とは異なる注入率のため、励起されるスペクトルの振幅がRange 1のものとは異なる。Strain convective領域においては、 $E_s^{SC}(k)$ は $E_{\phi2}(k)$ を励起し、これは遷移波数 $k_\phi^* \eta$ で $E_{\phi1}(k)$ と接続する。(T. Gotoh, I. Saito, T. Watanabe, Phys. Rev. Fluids **6**, 110512 (2021)より)。