

平成29年度名古屋大学HPC計算科学連携研究プロジェクト 成果報告書  
巨視的非平衡状態における乱流マイクロ混合の大規模シミュレーション

名古屋工業大学・工学研究科・物理工学専攻 渡邊 威

本研究課題の目的は、乱流によって輸送・混合されるスカラー量や粒子群の振る舞いが、乱流の巨視的な非平衡揺らぎに対してどのような応答を示すのかを大規模計算を用いて解析し、小スケールにおけるマイクロ混合過程への影響を詳らかにすることである。平成29年度は以下の3テーマに関する研究について進めた。

#### 乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模計算

昨年度より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の計算コードの開発を進めている。流体と固体粒子の相互作用の計算には Volume Penalization 法を用いた。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。今年度は、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6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、乱流中の粒子の空間分布の様子(図1)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 [1]。

#### 乱流中の非慣性粒子の粒径分布の理論とその検証

雲乱流中の粒子の凝集・合併による成長の詳細を理解することは、雲マイクロ物理の理解に向けて大変重要な課題の一つである。本研究では、等方乱流中での非慣性粒子の衝突・併合による粒径成長について理論および数値シミュレーションによる解析を行った。粒子間衝突について Saffman-Turner の衝突カーネルを用い、粒子の質量分布関数の時間発展が Smoluchowski 方程式に従うと仮定すると、粒子のサイズ分布が  $\sigma^{-2}$  ( $\sigma$  は粒子体積) に比例すること、これが乱流と非慣性粒子群の直接数値計算の結果と非常によく一致することが明らかになった [2]。

#### 2way カップリング計算におけるポイント力の計算効率化

質点粒子群と流れの相互作用の解析には、2way カップリング計算と呼ばれる場と粒子間の相互作用計算が行われる。そこで扱われるデルタ関数の平滑化による影響と計算コストについて、いくつかのテスト関数の場合についてその精度とコストの評価を行った。その結果、ガウス関数を用いた平滑化手法は、計算精度とコストの両面において優れていることが明らかになった。また近似ガウス関数を用いた平滑化法を提案し、これにより 2way カップリング計算にかかる計算コストが大幅に縮小されることがわかった [3]。

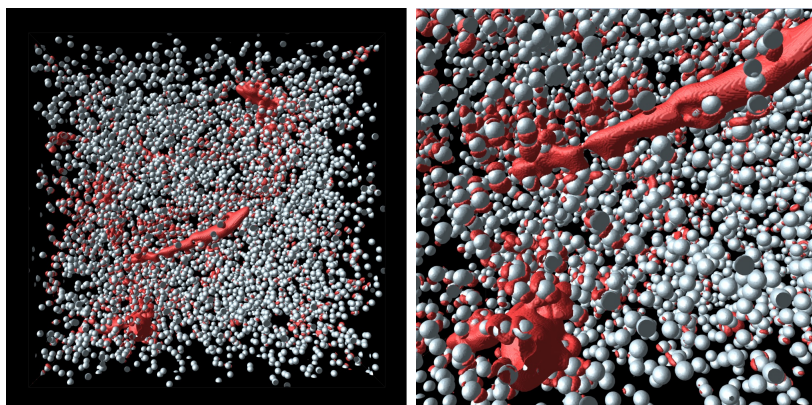


図 1: 乱流中の有限サイズ粒子群と渦構造の分布の可視化結果である。一様等方乱流中に約 6000 個の固体粒子を分散させた計算例。粒径はコルモゴロフ長さ程度の小さな粒子であるが、粒子周りの流れは精度よく解像されている。左図は計算領域全体の様子を示し、右図はその一部を拡大したものである

[1] 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* **37**,123-128 (2018).

[2] I. Saito, T. Gotoh and T. Watanabe, “Size distribution spectrum of noninertial particles in turbulence”, *Phys. Rev. E* **97**, 053108 (2018).

[3] T. Watanabe and T. Gotoh, “On the smoothing of point force in the two-way coupling simulation of polymer-laden turbulent flow”, *J. Phys. :Conf. Ser.* **1035**,012010 (2018).