

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 28 年度は 1) マクロスケールでの乱流変調が粒子間衝突頻度に及ぼす影響、2) 乱流中の有限サイズ粒子群の挙動解析に向けたコード開発とその評価、の二つのテーマに関する研究を主に進めてきた。詳細はそれぞれ以下の通りである。

巨視的な乱流変調が粒子間衝突頻度に及ぼす影響

乱流中の粒子間衝突頻度が種々のパラメータにどう依存するかを理解することは、例えば高精度な雲マイクロ物理モデルの構築や、海洋中の水生生物の繁殖やその集団挙動の理解に向けて極めて重要である。衝突頻度は乱流の小スケール条件（ストークス数 S_t 、粒径と散逸長の比 σ/η ）に強く依存することが知られている一方で、乱流のマクロ条件への依存性はよくわかっていない。そこで本研究では乱流の小スケールの条件 ($R_\lambda, S_t, \sigma/\eta$ 等) は揃えつつ、マクロスケールの条件（積分長と散逸長の比やマクロレイノルズ数）が異なる乱流で粒子間衝突頻度はどの程度の差異が見られるか、を DNS により調べた。マクロ条件の変化は、印加する外力場（速度に比例した形）が及ぶ波数領域を変化させることで実現した。図 1 は無次元化された衝突カーネルのストークス数依存性を示す。図中の A, B でそれぞれ R_λ 等のミクロ条件は揃っているが、乱流のマクロ条件が異なっている。この結果から、1) $S_t < 0.4$ では条件によらずに両者は一致する。とくに $S_t \rightarrow 0$ で Saffman-Turner の予測に漸近する、2) $0.4 < S_t < 0.8$ では A と B に差異が生じるが、 R_λ には強く依存しない、3) $S_t > 0.8$ では、同じ R_λ では A の方が B よりも小さくなる傾向がある、が明らかになった。この結果は、慣性粒子の衝突頻度は乱流のミクロ条件だけでは制御できないことを示唆している。

乱流中の有限サイズ粒子群の挙動解析に向けたコード開発

衝突合併を繰り返した雲粒子や雲中で成長する氷晶は、その粒径が散逸長よりも大きくなるためもはや質点として取り扱うことはできない。この場合、粒径の大きさを考慮して計算を実施する必要がある。本研究では雲マイクロ物理過程に代表される粒子群と乱流の相互作用に関する計算の高精度化と拡張性を鑑みて、有限の大きさを持つ粒子群の乱流中での挙動を解析するためのコードの作成を行い、その評価を行った。粒子系は Volume Penetration 法を用いて流れ場とのカップリングを実現し、粒子間相互作用には DEM を用いて実装した。図 2 に計算結果の一例を示す。2 次元領域における粒子群の重力沈降とそれに伴う流れ場の乱流化の様子を示している。得られた結果は、本課題の共同研究者である横嶋らによる埋め込み境界法を用いた結果と概ね一致していることが確認された。

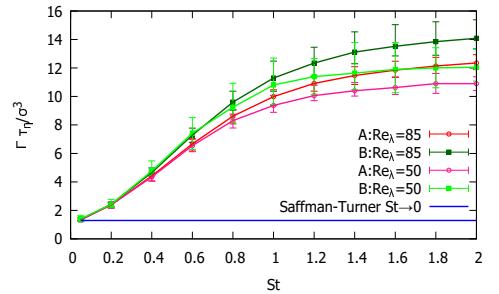


図 1: 無次元化された衝突カーネルのストークス数依存性を示す。 $R_\lambda = 50, 85$ の場合について、それぞれ外力が印加される波数領域を変えることで乱流のマクロ条件を変えて計算した結果を比較している。Run A と B では乱流の小スケールでのパラメータを一致させているが、マクロなレイノルズ数は A の方が大きい。

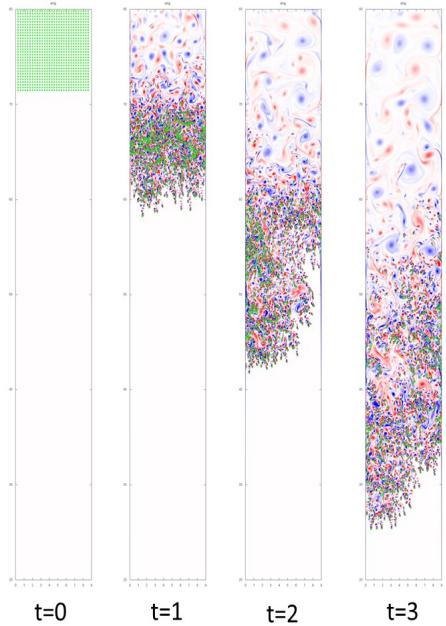


図 2: 有限サイズ粒子群の重力沈降シミュレーション。計算は 2 次元領域で行い、初期時刻に格子状に配置された 900 個の粒子が、お互いに相互作用しながら沈降していく様子を示している。背景のコンター図は渦度の値を示している。