2024 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

雲乱流中を運動する水滴のラグランジュ統計

名古屋工業大学・工学研究科・工学専攻　齋藤　泉

本研究の目的は, 乱流的な雲環境内において水滴が経験する過飽和度揺らぎのラグランジュ統計と, それに対する水滴の重力沈降の影響を明らかにすることである. これらの知見は, 近年注目され開発が進んでいる超水滴法に基づく雲モデルにおいて, 超水滴の凝縮成長を計算する際に用いられるサブグリッドスケールモデルにおいて重要であるが, その調査は未だ不十分である. そこで本研究では, 本グループで開発してきた雲乱流の直接数値シミュレーションモデル「雲マイクロ物理シミュレータ」を用い, 雲乱流内で水滴が経験する過飽和度揺らぎのラグランジュ統計を解明する. 本研究では特に, 未だ研究が不十分なラグランジュ的自己相関時間 τ_L を中心に調査を行った.

雲乱流中の微小水滴が経験する, 過飽和度揺らぎのラグランジュ的自己相関時間 τ_L に対する, 水滴の重力沈降の影響を調べるために, 以下のようなシミュレーションを行った. 3 次元の周期箱を考え, 速度場およびスカラー場 (過飽和度場) に対し白色ランダムな外力を注入することにより一様等方性乱流を駆動する. 多数の質点粒子を乱流場に移流させ, 統計的平衡状態において粒子が経験するスカラー揺らぎのラグランジュ的自己相関時間を計測する. 重力の影響が無い場合と有る場合の相関時間をそれぞれ τ_{L0} および τ_L とし, 比 τ_L/τ_{L0} によって変調の程度を調べる. 乱流速度場に用いる格子点数は $128^3, 256^3, 512^3, 1024^3$ とし, それぞれのテイラー長レイノルズ数は $R_\lambda = 25, 47, 80, 130$ である.

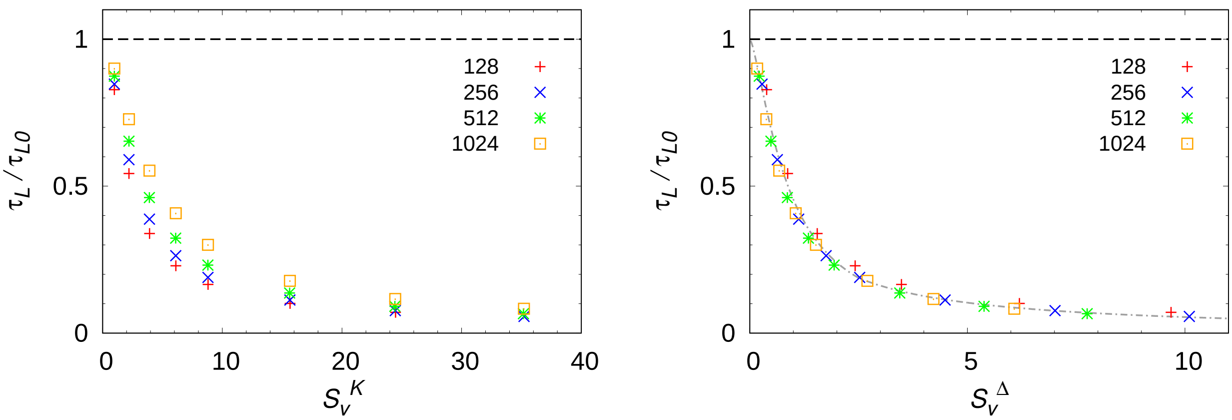

図 1: 乱流中を重力沈降する粒子が経験するスカラー揺らぎのラグランジュ的自己相関時間の変調 (重力沈降する場合の相関時間 τ_L の, しない場合の相関時間 τ_{L0} に対する比). (左パネル) 変調を最小スケールの乱流渦に対する沈降パラメータ (S_v^K) で表したグラフ. (右パネル) 変調を最大スケールの乱流渦に対する沈降パラメータ (S_v^Δ) で表したグラフ. 点の種類の違いは, DNS に用いた流体格子点数の違いを表す ($128^3, 256^3, 512^3, 1024^3$, それぞれテイラー長レイノルズ数 $R_\lambda = 25, 47, 80, 130$).

図 1 は, 本シミュレーションにおいて得られた比 τ_L/τ_{L0} の結果をまとめたものである. ここで, 左パネルは粒子の重力沈降の影響の程度を表す沈降パラメータにおいてコルモゴロフ速度 v_K(最小スケールの渦の特徴的速さ) を用いて $S_v^K = V_T/v_K$ (V_T は粒子の終端速度) とした場合, 右パネルは乱流速度場の RMS 速度 v_{rms}(最大スケールの渦の特徴的速さ) を用いて $S_v^\Delta = V_T/v_{rms}$ とした場合の結果を表している. 両パネルを比較すると, いずれも沈降パラメータが大きいほど変調の程度が大きくなり, τ_L は τ_{L0} に比べて短くなっていることが分かる. しかし, 右パネルの方が各シミュレーション結果が一つの曲線上に集まっている. この結果より, 相関時間の変調を特徴付けるパラメータとしては S_v^Δ が適切であること, つまり変調において大スケールの乱流渦が重要な役割を果たすことが明らかになった.

沈降パラメータに対する依存性をより詳細に調べるために, 次の解析を行った. 図 1 右パネルの曲線の様子から, 比 τ_L/τ_{L0} は S_v^Δ に対して以下のような関数形で表せる.

$$\frac{\tau_L}{\tau_{L0}} = \frac{1}{1 + R(S_v^\Delta)} \tag{1}$$

ここから $R(S_v^\Delta)$ を抽出するために, 以下のように式変形を行う.

$$R(S_v^\Delta) = \left(\frac{\tau_L}{\tau_{L0}}\right)^{-1} - 1$$

この式に基づいて, 右辺の (τ_L/τ_{L0}) にシミュレーション結果を代入することで $R(S_v^\Delta)$ を評価した結果が, 図 2 に示されている. 図 2 より, $R(S_v^\Delta)$ は異なるベキを持つ 2 つの領域を持つことが分かる. $S_v^\Delta \gg 1$ においては傾き 1, $S_v^\Delta < 1$ においては傾きがおよそ 1.4 になっている. $S_v^\Delta \gg 1$ における傾き 1 については, 簡単なスケーリング解析から予想されることで, 先行研究でも指摘されていた. 一方で $S_v^\Delta < 1$ における傾きおよそ 1.4 は本研究で明らかになったもので, 終端速度が十分に大きくないために, 乱流の影響を受けているためと考えられる.

図 2 より, 関数 R として以下のようなフィッティングを与える.

$$R(x) = \begin{cases} c_1 x^{\gamma_1} & (x < x_0) \\ c_2 x^{\gamma_2} & (x \geq x_0) \end{cases} \tag{2}$$

ただし $x = x_0$ における接続条件より, $c_2 = c_1 x_0^{\gamma_1 - \gamma_2}$ であり, 図の結果から $x_0 = 2.5$, $\gamma_1 = 1.4$, $\gamma_2 = 1.0$, $c_1 = 1.2$ と評価した. 図 2 の灰色一点鎖線はこのフィッティング関数を表しており, シミュレーション結果と良く一致していることが分かる. 更に, 式 (1) においてこのフィッティング関数を用いた結果が, 図 1 右パネルに灰色一点鎖線で描かれている. やはり, フィッティング関数はシミュレーション結果と良く一致している. これらの結果は, 今後行う重力沈降の影響のパラメタリゼーションにおいて重要な土台となる. 以上の成果は現在論文として発表準備中である. また, 昨年度のプロジェクトの研究成果を英文査読誌に発表した [1].

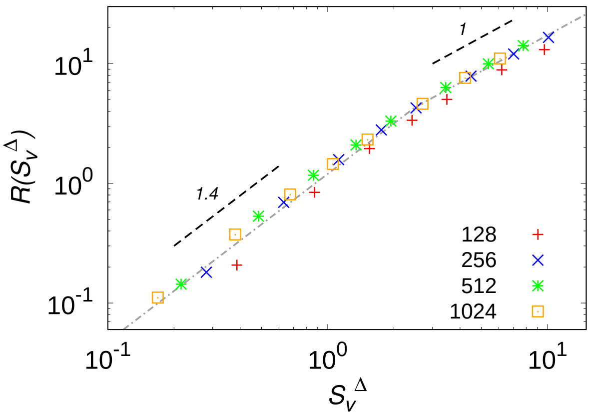

図 2: 相関時間の変調の S_v^Δ 依存性を, 指標 $R(S_v^\Delta)$ で表した両対数グラフ. 「1.4」と「1」のラベルが付いた破線はそれぞれ 1.4 と 1 のベキに対応する. 灰色の 1 点鎖線は式 (2) によるフィッティング曲線を表す.

[1] Saito, I., Watanabe, T. & Gotoh, T. Spectrum of passive scalar carried by particles in isotropic turbulence. *Phys. Rev. Fluids* **9**, 054601 (2024).