

## 高レイノルズ数・高シュミット数におけるスカラー乱流の 直接数値シミュレーションのためのラグランジュ描像に基づく手法の開発

名古屋工業大学・工学研究科・工学専攻 齋藤 泉

本研究課題の目的は、雨粒や鉱物ダストなど乱流中の微小粒子群の輸送・混合による、高シュミット数かつ高レイノルズ数スカラー乱流のための直接数値シミュレーション手法を開発することである。微小粒子群を含む乱流は、巨視的には乱流的な速度場によるスカラー量（粒子の数密度、質量、温度など）の場の輸送・混合の問題とみなすことができる。その特徴は、数密度や質量・温度など粒子が持つ属性の場には分子拡散に対応するメカニズムが無くシュミット数（流体速度場の動粘性係数とスカラー場の拡散係数の比）が高い（実質的に無限大）こと、また粒子の運動量慣性により数密度場に濃淡が生じる（クラスタリング効果）など粒子性に起因する現象の影響を受けることにある。

このような粒子のスカラー場の乱流混合の問題を調べるために、乱流中における点粒子群の理想化された系を考えた。各点粒子はスカラー量  $\theta_p$  を持ち、このスカラー量は時定数  $\tau_\theta$  で緩和されると共に外場  $f_\theta$  の影響を受ける。各粒子のスカラー量  $\theta_p$  の空間分布としてスカラー場  $\theta$  を考えると、緩和時間  $\tau_\theta$  が十分に長く緩和の影響が小さい極限において、スカラー場  $\theta$  の支配方程式はシュミット数無限大のスカラー乱流の方程式と同じになる。本研究では格子点数  $256^3$  以下程度の比較的小規模な乱流と粒子群のシミュレーションを行い、粒子のスカラー場  $\theta$  の統計的な性質を調べ、乱流理論の予測と比較することで、本手法の妥当性検証を行った。

図1はシミュレーションで得られた各種乱流統計の結果を示している。スカラー分散スペクトル（図1(a)）は  $-1$  の傾き（図中の水平線に対応）を示しており、乱流理論による予言（いわゆるバチェラスペクトル）と一致している。また無次元定数は  $C_B = 5.9 \pm 0.3$  程度と評価され、先行研究による報告と整合的であった。スカラー分散の輸送フラックス（図1(b)）では、外場の影響を受ける最小波数成分以外はほぼ全波数領域で一定になっており、バチェラスペクトルに対応してフラックス一定の領域が実現していることが分かる。また3次混合構造関数（図1(c)）では、小スケールの領域（図の左側）において  $4/3$  の一定値（いわゆるヤグロムの  $4/3$  則）の領域が現れており、理論予測との整合性を物理空間において保証している。

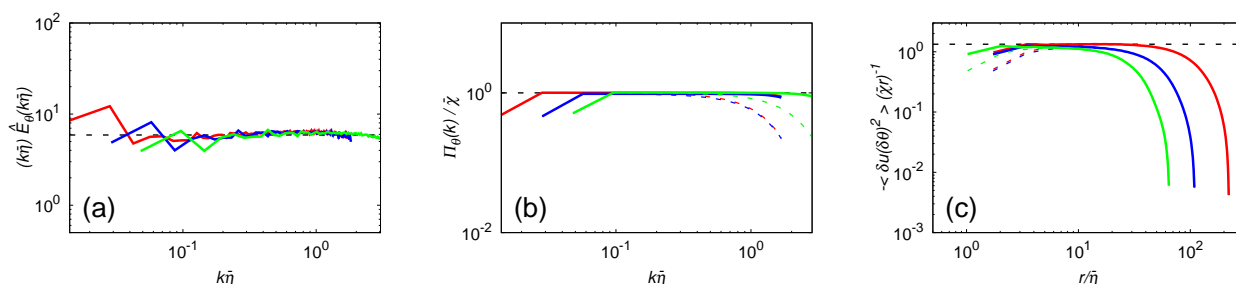


図1: 粒子のスカラー場  $\theta$  の各種統計. (a)  $k^{-1}$  で補償及び規格化したスカラー分散スペクトル. 水平点線はバチェラスペクトルの理論予測  $k^{-1}$  に対応する. ただしバチェラー定数  $C_B = 5.9$ . (b) 規格化されたスカラー分散の輸送フラックス. 水平点線はフラックス一定の理論予測に対応する. (c) 規格化された、3次速度スカラー混合構造関数. 水平点線は理論予測の  $4/3$  (いわゆるヤグロムの  $4/3$  則) を表す. 線色は、青色実線: 格子点数  $128^3$ , テイラー長レイノルズ数  $R_\lambda = 83$ , 緑色実線: 格子点数  $128^3$ ,  $R_\lambda = 58$ , 赤色実線: 格子点数  $256^3$ ,  $R_\lambda = 136$ .

以上各種の乱流統計により、高シュミット数スカラー乱流の理論予測との整合性を確かめることができたので、次に粒子によるスカラー場  $\theta$  を可視化することでその特徴を調べた。図2は、乱流的な流れ場における渦領域（シアン）とスカラー場  $\theta$ （黄色）の時間発展のスナップショットを示している。まずパネル (a) では、スカラー場  $\theta$  がシート状の構造を持って広がった領域（丸で囲った部分）があり、その下にはチューブ状の渦領域（赤矢印）がパネル手前から奥にかけて伸びているのが分かる。このチューブ状の渦はパネルから見て時計回りに旋回しており、パネル (b)(c) と時刻が経過するにつれて、シート状の領域を旋回しながら巻き込んでいるのが分かる。このようなスカラー場のシート状の構造とその乱流混合の特徴は、高シュミット数スカラー乱流において期待されるものであり、可視化結果からもスカラー乱流との整合性を確かめることができた。

以上より、まずは格子点数  $256^3$  以下の比較的小規模なシミュレーションによって本手法の妥当性検証を行

うことができた。本成果は論文にまとめ、現在英文査読誌への投稿を準備中である。今後の課題としては、格子点数を増やし、レイノルズ数を増加させることで、高シュミット数かつ高レイノルズ数のスカラー乱流を実現することが挙げられる。また本研究では各粒子は運動量慣性を持たず、流体粒子として運動するという、最も単純な状況を考えていたため、粒子が運動量慣性や重力の影響を受ける場合の調査も今後必要である。

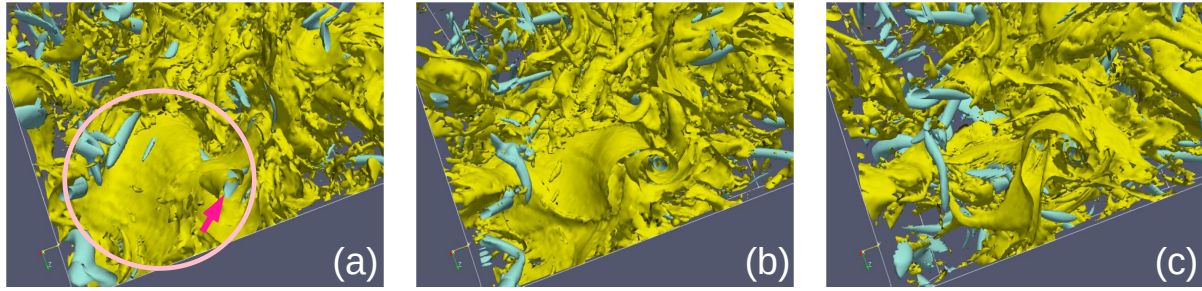


図 2: 流れ場とスカラー場の時間発展のスナップショット。流れ場の渦領域をシアン色で、スカラー場の等値面を黄色で示している。(a) 丸で囲った部分に、スカラー場のシート状の構造が広がっており、その下にチューブ状の渦領域 (赤矢印) がパネル手前から奥にかけて伸びている。チューブ状の渦領域は時計回りに旋回しており、(a)→(b)→(c) の順に時間発展するにつれて、スカラー場のシート状の構造を巻き込んでいく。