

## 摩擦抵抗および熱輸送による乱流・粒子間相互作用についてのシミュレーション研究

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、微小粒子を多量に含む乱流（混相乱流）において、摩擦抵抗および熱輸送を通じた乱流・粒子間相互作用による粒子群の輸送・混合、また粒子群による乱流変調を明らかにすることである。本研究課題は2020年度からの継続課題であり、2021年度は主に以下の2テーマに関する研究を実施した。

### 微小粒子群による熱輸送を通じた乱流変調

前年度の研究において、微小粒子群による熱輸送を通じた流体温度場ゆらぎの変調について調査をした。そこでは、流体粒子として運動し、熱慣性を持ち、熱輸送のみを通じて周囲の流体と相互作用する単純化されたシステムを考えた。微小粒子群による流体温度場の揺らぎの変調を、ダムケラ数と呼ばれる無次元パラメータの関数としてモデル化できることを示した。しかしながら、現実的な微小粒子群は熱慣性だけでなく運動量慣性も持ち、それにより特徴的な振舞をする。例えば、乱流渦の旋回に粒子が弾き出されることによって粒子の数密度場に濃淡が生じる「慣性クラスタリング効果」などである(図1左図)。粒子の運動量慣性が流体温度場ゆらぎの変調に与える影響を調べるために、粒子が熱慣性だけでなく運動量慣性を持つ場合についての直接数値シミュレーションを行った。その結果、流体温度場ゆらぎの変調は粒子の運動量慣性の影響を受けるものの、その影響は粒子の摩擦抵抗に伴う乱流運動エネルギー散逸率の減少によって説明することができ、慣性クラスタリング効果のような粒子数密度場の濃淡は、変調には大きな影響を与えないことが明らかになった。この結果は、乱流-粒子間相互作用における慣性クラスタリング効果の重要性を示してきた先行研究を踏まえると少し意外ではあるが、統計モデルを用いた変調の予言のためには有用である。本研究成果は英文査読誌に掲載された [1]。

### ラグランジュ画像に基づくスカラー乱流シミュレーションについて

微小粒子群を含む乱流は、粒子の数密度・質量・温度などの集合を一つのスカラー場とみなすことで、スカラー乱流の問題として考えることができる。粒子によるスカラー場は分子拡散に対応するメカニズムが無いために、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）が無大の場合に対応する [2]。高シュミット数のスカラー乱流において、スカラー分散スペクトルは高波数側において傾き  $-1$  を示すことが理論的に予言されており、バチェラスペクトルと呼ばれる。本研究では、このようなスカラー乱流の統計理論が、微小粒子群によって構成されるスカラー場において成立していることを、熱慣性を持つ微小粒子群の乱流中における混合のシミュレーションにより、確かめることに成功した。図1右図は、粒子の温度の場の分散スペクトルを示している。図中で上の線になるほど乱流による輸送・混合が支配的になり、それに伴い分散スペクトルの傾きが理論予測  $-1$  (図中の水平点線) に収束していることが分かる。また、無次元係数であるバチェラ一定数は  $C_B = 5.7$  と評価され、先行研究による大規模DNSの結果と整合的であることが確かめられた。以上の研究成果は、現在論文として投稿準備中である。

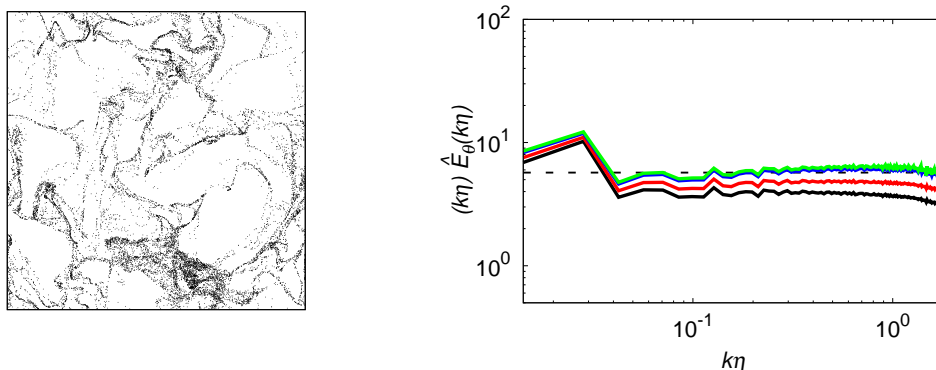


図1: (左図) 慣性クラスタリング効果によって濃淡が生じた粒子の分布。点々は粒子の位置を表す。(右図) 微小粒子群の温度の場の分散スペクトル。ただし各スペクトルに波数  $k$  を掛け、傾き  $-1$  が水平になるようにしている。上の線になるほど乱流による輸送・混合が支配的になり、それに伴いスペクトルは乱流統計理論の予言に近づいている。水平点線は  $C_B = 5.7$  を表す。

また以上の他に、研究初年度の成果報告において提出・審査中であると報告した、乱流・粒子間相互作用についての統計モデルの研究について、論文が英文査読誌に掲載された [3].

[1] Saito, I., Watanabe, T. & Gotoh, T. 2022 Modulation of fluid temperature fluctuations by particles in turbulence. *J. Fluid Mech.* **931** R6 (DOI: 10.1017/jfm.2021.939).

[2] Gotoh, T., Saito, I. & Watanabe, T. 2021 Spectra of supersaturation and liquid water content in cloud turbulence. *Phys. Rev. Fluids* **6** 110512 (DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.110512).

[3] Saito, I., Watanabe, T. & Gotoh, T. 2021 Statistical properties of a stochastic model of eddy hopping. *Atmos. Chem. Phys.* **21** 13119–13130 (DOI: 10.5194/acp-21-13119-2021).