

# 海洋表層混合層中の乱流による粒子の凝集・分裂と鉛直物質輸送に関する数値実験

海洋物理学分科 西野圭佑 (NISHINO, Keisuke)

## 1. はじめに

海洋表層混合層中の沈降粒子は大気中の CO<sub>2</sub> を深海へ輸送するなど物質循環の一端を担うが、その定量的な評価は未だ十分でない (e.g. Laufkötter et al., 2016)。困難の一因は、粒子の凝集体が乱流シアによって凝集/分裂する正味の効果が明らかでない点にあると考える。本研究では、風によって表層混合層に生成された乱流シアが粒子の凝集や分裂を通して物質輸送量に及ぼす影響を数値実験により調査し、実海洋においては乱流による凝集/分裂のどちらがより卓越するのかについて評価した。

## 2. 手法

### (i) 流体モデルについて

乱流の構造を精度よく再現するため、流体の数値計算には LES モデルを使用した。サブグリッドスケールのパラメタリゼーションには Deardorff (1980) の手法を用いた。

### (ii) 粒子モデルについて

粒子についてはその運動はもとより周囲の粒子や背景流速場による凝集・分裂も表現する必要がある。そのため粒子モデルとして、雲粒の成長過程を研究するため Riechelmann et al. (2012) など整備されてきた Lagrangian cloud model (LCM) を海洋の粒子向けに改良して使用した。このモデルでは複数の粒子を (パケットとして) まとめて扱い、その平均位置や平均速度、そして内部の粒子の粒径と粒子数のみを追跡することで、大量の粒子の相互作用を低い計算コストで評価できる。

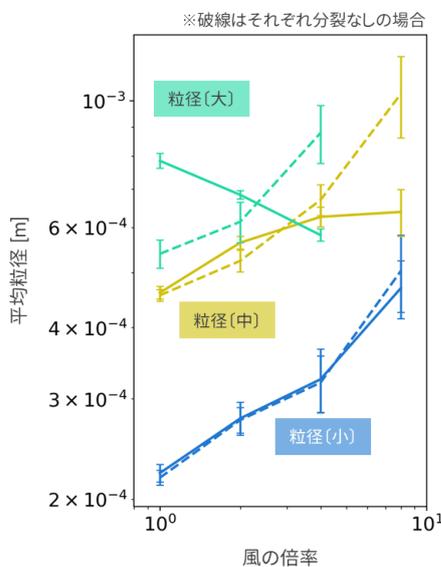


図 海上風速の倍率と排出粒子の平均粒径との関係。色が流入粒径の違いを表しており、エラーバーは統計的な定常状態における標準偏差の大きさを意味している。

凝集のメカニズムとして考慮したのは、①Brown 運動②沈降速度差③流速シアの3つである。これらは主に凝集カーネル (e.g. Burd and Jackson, 2009) を用いてパラメタライズした。ただし流体の計算格子よりも大きなシアは LES により解像している。また乱流による粒子の分裂過程では、Takeuchi et al. (2019) を参考に Kolmogorov スケールを基準にしたモデル化を行った。

### (iii) 実験設定

海洋表層における風成混合層乱流を想定し、海面での一定の風応力による乱流場をバケット沈降の背景場とした。乱れの深さが水深の 2/3 まで到達するように領域長さを設定した。海面へ一定の数フラックスでバケットを注入し続けながら底面へ到達したバケットは順次取り除き、定常化した粒径分布について解析を行った。領域上面から注入する粒径は3種類、風の強さは4種類の実験を行った。ただし実験間で流入“粒子”の数フラックス、数密度を一定に保った。

## 3. 結果と考察

粒径スペクトルの形状は①背景鉛直流の大きさの指標である相等粒径と②乱流場の最小渦のスケールである Kolmogorov スケールから影響を受けており、前者は風の強化に伴い粒径スペクトルをより大粒径側へ、後者は小粒径側へと変形する効果を持っていた。このことから相等粒径は乱流の強化によって粒子の遭遇確率が上昇し凝集が促進される効果を表し、Kolmogorov スケールは乱流シアが粒子を引きちぎることで分裂を促進する効果を表すものと考えられる。また、特に流入粒径が大きく強風の場合に粒径スペクトルは分裂の影響を強く受けることが分かった。

乱流が粒子の凝集/分裂のいずれをより強化したかを下面から排出される粒子の平均粒径によって評価することとし、風の強さと平均粒径の対応を見た (図)。その結果、流入粒径が小さな場合には風の強化は粒子の凝集を促進し、大きな場合には分裂を促進することが分かった。これらの変化は粒径スペクトルの変形に関して得た知見と整合するものであった。

実海洋の粒子の大きさは粒径の小さな実験に相当し、乱れの強さは弱風の実験に相当するものであった。このことから実海洋では主に粒子の凝集が発生しており、乱流の強化は平均粒径を増大させると考えられる。その結果、平均沈降速度は増加して粒子体積を介する物質輸送量が増加し、表面積フラックスは減少して粒子表面を介する物質輸送量が減少するのではないかと考えられる。

## 4. 参考文献

- Takeuchi, M. et al. *Sci. Rep.* (2019) **9**:16280
- Riechelmann et al. *New J. Phys.* (2012) **14**:27
- Burd, A. B. & Jackson, G. A. *Annu. Rev. Mar. Sci.* (2009) **1**:65-90