

# 海洋混合層中の乱流が粒子状物質の沈降過程に与える影響

海洋物理学分科 修士2年 萬年隆裕

## はじめに

海洋混合層中での粒子の沈降過程は、海洋表層の炭素を深層へと輸送する役割を果たす生物ポンプと呼ばれる機構を通じて、地球規模での炭素循環や地球気候システムにおいて重要な役割を果たす。生物ポンプは「海洋表層での粒子状有機炭素の生産量」と「生産された粒子状物質の沈降」と「粒子状物質の分解（無機化）」から構成され、これらのバランスにより海洋深層への炭素の輸送量が決まるが、これらは生物学的な過程を含む、様々な要因に影響されると考えられている。粒子状物質の平均沈降速度は流れ場によって影響を受け、終端速度（静止流体中の沈降速度）から変化する（Noh et al. 2006）と考えられるが、その効果の詳細やメカニズムは不明である。本講演ではここに焦点を絞って説明する。

## 手法

Large-eddy simulation (LES) モデルを用いて風および波で駆動した海洋混合層乱流を再現し、生物起源の粒子を想定した仮想粒子を投入・追跡しその運動を解析した。モデル領域は水平方向に320[m]、鉛直方向に40[m]の矩形海とし、海面で大きさ $\tau = 1.0[\text{Nm}^{-2}]$ の東向きの風応力を与えた標準実験と1/2倍、2倍の風応力を与えた実験の計3種類（風応力が小さい方から「U0」、「U1」、「U2」とする）を行なった。さらに、先行研究で言及されたラングミュア循環の影響を調べるために、風のみを強制力とした風強制実験（「O」で表す）と風および波を強制力とした波風強制実験（「L」で表す）を行なった。粒子は、投入深度 $D_p$ 2種類（海面と混合層中央の深さ）と終端速度

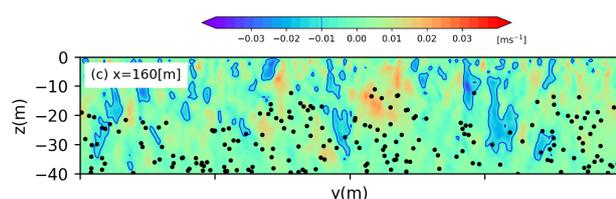


図1 風強制標準実験 (LES-U1O) における南北方向の鉛直断面 ( $x=160[\text{m}]$ ) の鉛直流速 (色) と粒子位置 (点)。ただし時刻 $t=40,000[\text{s}]$ 。●印は各断面を中心に1.25[m]の幅にある、中央深に投入した終端速度 $W_T=0.005[\text{ms}^{-1}]$ の粒子を示す。

$W_T$ 9種類 ( $5 \times 10^{-4}[\text{ms}^{-1}] \sim 5 \times 10^{-2}[\text{ms}^{-1}]$ ) の計18種類を扱った。粒子は乱流が定常状態になった後、各深度に連続的に投入して (図1)、混合層内の粒子の平均沈降速度( $\langle W_s \rangle$ )の定常状態を得た。

## LESモデルの結果

図2に粒子の混合層内での平均沈降速度偏差 $\Delta \langle W_s \rangle (\equiv \langle W_s \rangle - W_T)$ と終端速度 $W_T$ の関係を示す。海面に投入した粒子 (図の▼印で示す) の平均沈降速度 $\langle W_s \rangle$ は終端速度 $W_T$ から増減しない。一方で、中央深に投入した粒子 (図の●印で示す) の平均沈降速度 $\langle W_s \rangle$ は終端速度 $W_T$ から減少する。その減少の大きさは $W_T/w_{\text{rms}} \sim 1$ で最大となり、最大減少幅は波風強制実験でより大きくなる。

## 2次元理想化渦モデルの結果

LESモデルの実験で明らかになった、混合層中の乱流が粒子の平均沈降速度を変化させる仕組みを明らかにするために、鉛直2次元の理想化渦モデルを用いた実験を行った。その結果、粒子の平均沈降速度は「Fast-tracking」と「Vortex-trapping」、「Loitering-effect」の3つの機構に支配され、終端速度からの増減は流れ場の長さスケールと時間スケールのみによって記述され、波による強制を加えた場合の変化も流れ場の長さスケールと時間スケールの変化でほぼ説明できることを明らかにした。

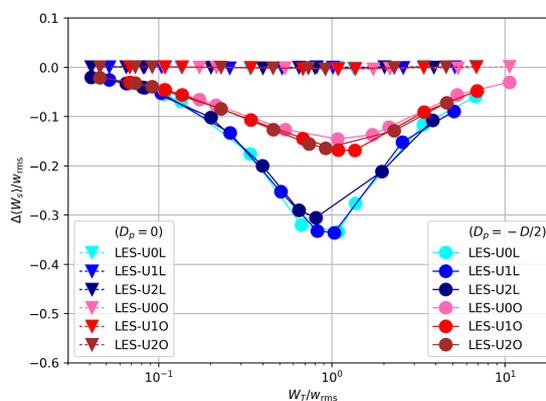


図2 凡例に示す各実験での粒子の平均沈降速度偏差 $\Delta \langle W_s \rangle$ の終端速度 $W_T$ との関係。ただし両軸とも鉛直流速の二乗平均平方根 $w_{\text{rms}}$ で規格化している。●印は海面に投入した粒子、▼印は中央深に投入した粒子を示す。