研究課題名：海洋混合層スキームの高度化と流動・水質・生態系シミュレーションへの応用

課題代表者：国立環境研究所地域環境研究センター　東　博紀
共同研究者：国立環境研究所地域環境研究センター　古市尚基

実施年度：平成 25 年度～平成 27 年度

1. 研究目的

海洋における乱流混合過程は、海洋流動・水循環を支配する大気-海洋間での熱・運動量交換や粘性・拡散に関与する重要な物理過程であるのみならず、大気-海洋間での酸素・二酸化炭素等のガス交換、海洋内部における有機物・無機栄養塩の輸送、赤潮・貧酸素水塊の発生・消滅など海洋の物質循環・環境形成にも大きく関わっている。しかし、既存の海洋混合層モデルではその効果を適切にパラメータ化できていないことが明らかにされており、流動場・水質場の予測精度低下の主要因になっている。本研究では、Large Eddy Simulation (LES)に基づく海洋混合層モデルの改良を実施するとともに、その成果を既存の流動・水質・生態系モデルに反映させることにより、海洋における水・物質循環および生態系機能等の環境評価・予測の精度向上を目指す。

2. 研究計画

前年度に引き続き、濁質や有機物を想定した粒子状物質の動態に関する LES 実験を実施する。同時に、LES 実験で得られた知見を東シナ海の広域海洋環境予測研究(東アジア広域環境研究 PG)、東京湾の水質・底質改善に関する研究(特別研究)、東北太平洋沖の放射性セシウムの動態予測研究(災害環境研究)等で使用している流動・水質・生態系モデルに反映させ、各海域における再現精度等への効果を検証する。

3. 進捗状況

LES 実験に基づく乱流および粒子状物質動態に関する研究や流動・水質・生態系モデルを用いた環境影響評価・予測に関する研究を継続実施した。本稿では、新たに着手した海底資源掘削に起因する環境影響問題に関連した LES 研究の事例を紹介する。

深海域における熱水孔が固有の生態系および豊かな鉱物資源を形成することは広く知られている。その周辺の流体変動を明らかにすることは、熱水孔近傍における生物生息環境の理解、および海底資源の掘削活動に対する環境影響アセスメントの実施において不可欠である。本研究は、熱水活動が活発である沖縄トラフ上の深海流体力学の特性およびその浮遊粒子動態への影響を明らかにすることを目的として、潮汐流によって駆動された海底混合層過程に関する LES 実験を行った。

基礎方程式は f 面上のブシネスク近似を施した 3 次元 Navier-Stokes 方程式である。Furuichi et al.（2012）による LES 研究と同様に、格子下スケールの乱流フラックスの算定は Ducros et al.（1996）に従った。沖縄トラフ付近の海域を想定して慣性周波数を 28°N における値とし、World Ocean Atlas を参考に、初期条件として約 4×10-3 °Cm^{-1} の鉛直勾配をもつ水温場と一定の塩分を仮定した（34.4）。外力条件として、先行観測・数値研究を参考に長軸方向の振幅が約 0.2-0.3 ms^{-1} である半日（M2）周期の潮汐流を励起する背景圧力勾配を与えた。海底摩擦速度は水平流速の最深値に壁法則を適用することで求めた。モデル海洋は水平方向が 200 m、鉛直方向が 150 m の矩形領域で、その上端付近には擾乱成分を減衰させるスポンジ層を仮定した。水平・鉛直解像度は 0.5 m で、計算は約 70 h 行った。図 1ab に LES 実験から得られた水温・潮汐流速場の瞬間図および水温、乱流エネルギーの消散率ε、乱流熱フラックス $w'\theta'$ および混合層の上端の時間変化を示す（w'とθ' はそれぞれ流速擾乱および水温擾乱）。潮汐流変動に応答して海底乱流が発達し、水温場が次第に混合されていく様子がわかる。

本研究における一つの重要な実験結果は、海底混合層厚が実験終了時において約 40-60 m に達することである（図 1c）。このことは潮流海底混合層に関するスケーリング関係を調べた先行研究と矛盾しない。さらに、LES から得られた鉛直 2 次元流速場を用いた簡易的な粒子追跡実験からは、浮遊粒子の大部分が、その初期位置によらず、最終的に混合層内に分布することが示された（図 2）。

最近、沖縄トラフの海底に音響流速計（ADCP）を設置した先行調査からは、記録するべき最大高さが約 120m に設定されていたにもかかわらず、利用可能な流速データが海底から上方 40-60m までの層に限られたことが報告された。このことからは ADCP 観測に必要な浮遊粒子がその下層内に集中的に分布したであろうことが示唆され、本研究の結果は、この観測結果に対して考えられる説明の一つを与える。同時に、本研究の結果は、掘削に起因する環境影響（例えば有害粒子の拡散）をコントロールする物理ファクターの一つとしての海底混合層過程の重要性を示唆している。

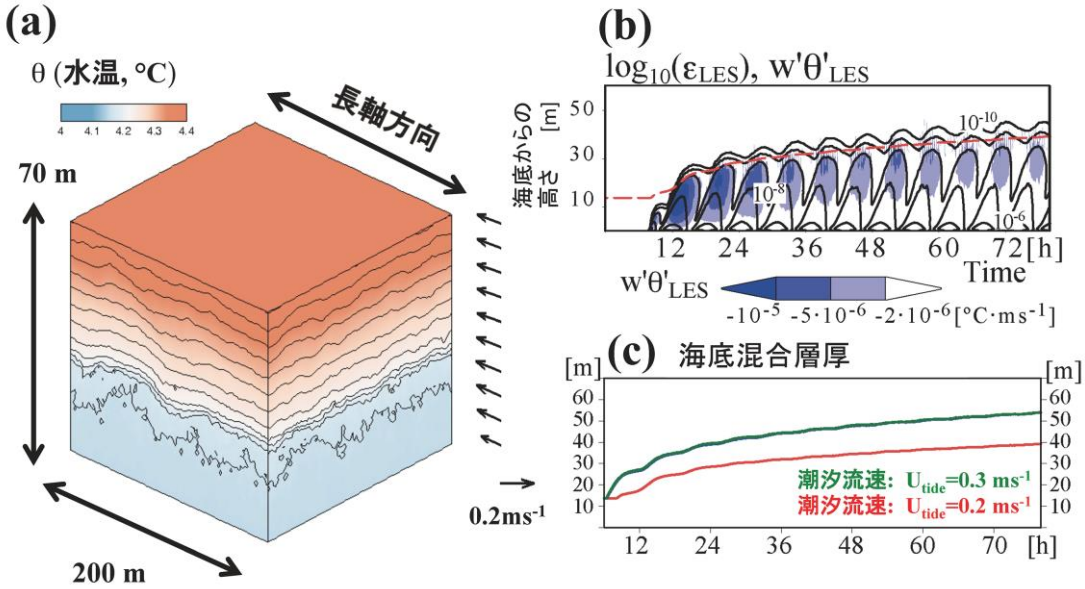

図 1. LES 実験によって再現された潮汐流起源の乱流混合過程の結果。(a) 水温場（陰影）および流速場の水平平均（ベクトル）の瞬間図。(b) 海底混合層内における乱流エネルギー消散率 (*ε*: 等値線)、乱流熱フラックス (*w'θ'*: 陰影)および海底混合層の上端（水温が最深値より 0.1 °C 高い深度で定義: 赤破線）の深度-時間変化。(c) 異なる潮汐流速度を仮定した場合の海底混合層厚の時間変化。

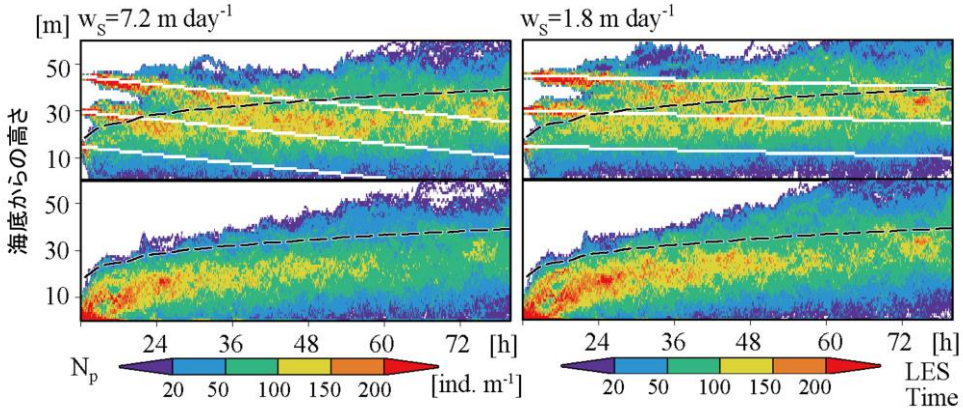

図 2. 粒子を海底から 15 m・30 m・45 m の高さ（上段）および海底付近（下段）に初期配置して追跡実験を行った場合の粒子数密度 N_p の深度-時間分布。白線は静止流体中の沈降の様子を、破線は海底混合層の上端を示す。左（右）列は沈降速度 7.2 (1.8) m day^{-1} の場合の実験結果。

4. 今後の計画

今年度 11 月以降には当研究所と海洋研究開発機構との共同研究において海底掘削の影響評価に関連した観測航海が計画されている（沖縄トラフ、伊豆−小笠原海嶺近海など）。その中では乱流強度(乱流エネルギー消散率)の直接観測も予定されおり、その観測結果に基づいて今回の LES 実験の結果を検証する。さらに、LES 実験から得られた知見を本課題における流動・水質・生態系モデルに反映させることで、これまでに取り組んできた東シナ海、東日本沿岸、東京湾などにおける事例に加えて、近年注目されている、海底資源掘削に伴う環境影響問題の評価・予測能力の向上を目指す。

5. 計算機資源の利用状況

5.1. 今年度計算機資源の利用状況（2015 年 6 月 1 日～2015 年 9 月 30 日、SX-ACE）

実行ユーザ数: 2

CPU 時間 v_deb: 365.7612194 hours, v_32cpu: 37,985.0115 hours, v_96cpu: 130,903.5304 hours, v_160cpu: 0.00 hours, 計: 169,254.3031 hours

5.2. 昨年度計算機資源の利用状況（2014 年 4 月 1 日～2015 年 3 月 31 日、SX-9/A(ECO)）

実行ユーザ数: 2

CPU 時間 v_deb: 951.54 hours, v_cpu: 0.00 hours, v_8cpu: 471.35 hours, v_16cpu: 171,563.20 hours, 計: 172,986.09 hours