

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82708

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26740009

研究課題名(和文) 海洋混合層における乱流パラメタリゼーションと粒子状物質の動態

研究課題名(英文) Turbulence parameterization and suspended particulate matter dynamics in the ocean boundary layers

研究代表者

古市 尚基 (Furuichi, Naoki)

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産工学研究所・研究員

研究者番号：70588243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Large Eddy Simulation (LES) の手法を用いて様々な大気・潮汐流条件下の海洋混合層乱流変動の数値実験を行い、従来広く使われてきたMellor-Yamada(MY)による乱流パラメタリゼーション手法を検証した。大気境界層における先行研究を参考に修正したところ、様々な外力下の混合層応答の再現性が向上した。LESの結果を用いて粒子状物質の動態を調べた結果、粒子の拡散係数と海水の渦粘性・拡散係数が同オーダーであることが示唆された。乱流手法を組み込んだ広域海洋シミュレーション実験において、修正された手法が海底混合層の発達を再現する上でMYと比べて良好な性能を示すことがわかった。

研究成果の概要(英文)：Using a large eddy simulation (LES) model, we carried out numerical experiments for the upper-ocean boundary layer processes under several atmospheric forcing scenarios as well as the tidal bottom boundary layer (BBL) processes; the obtained results were used to assess the widely-used Mellor-Yamada (MY) turbulence scheme. We modified its formulations following recent studies in the atmospheric boundary layer to improve the performance in reproducing the response under each forcing. We next used the LES results to examine the suspended particulate matter dynamics. The result suggested that the vertical diffusivity coefficient of particles is of the same order as the vertical eddy viscosity or diffusivity coefficients derived from the velocity or temperature fields of seawater. We finally incorporated the modified turbulence scheme in a hydrodynamic simulation model to assess its performance. The improved scheme performed better than MY in reproducing the BBL development.

研究分野：環境動態解析・海洋物理学

キーワード：乱流 海洋混合層 粒子状物質 Large Eddy Simulation パラメタリゼーション

1. 研究開始当初の背景

海洋の表層および海底付近では、風や潮汐流などの外力により活発な乱流が励起され、一様な水温場や塩分場などで特徴づけられる「混合層（表層混合層・海底混合層）」が形成される（図1）。混合層のふるまいは、大気-海洋間での熱や運動量、酸素、二酸化炭素などの交換のみならず、海洋内部の流速場、水温場、塩分場の形成や様々な溶存物質や粒子状物質の鉛直輸送において重要な役割を果たしている。今日、計算機性能の飛躍的向上やネスティング手法の開発により外洋と沿岸双方を同時に取り扱うような海洋の高解像度広域数値シミュレーションが可能となりつつある一方で、高々数m~数10m規模の現象である乱流混合過程をモデル内で陽に再現することは依然として甚だ困難である。そのため、乱流混合の効果を鉛直渦粘性・拡散係数として適切にパラメータ化して広域数値モデル内に組み込むことは、気候変動、海洋循環、および海洋生態系変動の評価と予測精度の向上のために必要不可欠な課題である。

これまで国内外の多数の研究者が海洋混合層乱流を研究してきているものの（例えば Mellor and Yamada 1982, Reviews of Geophysics, 以後 MY）、乱流諸量を表現する定数の多くが室内実験に基づいて決定されており、その検証のための現場観測データのほとんどが疎らな時空間間隔（数10分-1ヶ月、鉛直方向：数m-数100m毎）で取得された「巨視的」な観点のものだった。今日においても、既存の乱流パラメタリゼーション手法を組み込んだ海洋広域数値モデルによって再現された海面水温などの海洋表層変動、密度成層、海底混合層変動が、観測結果と著しく異なってしまうことが報告されている。

研究代表者は、平成20年以降、Large Eddy Simulation (LES) と呼ばれる、気象学や工学の分野でよく利用されてきた一方で、海洋物理学の分野では特に日本においてその利

用が限られていた数値手法を用いて、荒天時など現場観測が困難な状況も仮想した多数の海洋表層混合層の高解像度数値実験を実施した。LES 実験から得られた密な間隔（数秒、鉛直・水平方向：1-数m毎）のデータを、現実海洋の乱流混合過程を「転写」したリファレンスとして使用することで、乱流エネルギーや乱流長さスケールなどの諸パラメータを「微視的」な観点から検証した。その結果、MY手法と比べて、大気境界層を対象として開発された Nakanishi and Niino 手法 (2009, Journal of Meteorological Society of Japan, 以後 NN)の海洋表層混合層パラメタリゼーション手法としての優位性を確認するとともに、NN手法をさらに微修正・高精度化した (Furuichi et al. 2012, Journal of Oceanography)。

しかしながら、研究代表者はこのように外洋の表層混合層、ひいては、大気海洋相互作用、海洋循環に注目して研究を進めた一方で、沿岸域、特に潮汐流に伴う海底混合層の発達に関する乱流パラメタリゼーション手法の性能は十分に検証しておらず、海洋生態系問題との関連も議論しなかった。また、海洋生態系問題では粒子状有機物などの拡散や沈降過程を扱うことも重要となるが、その動態に関しては「水温・塩分場と同一の鉛直渦拡散係数」が頻りに仮定されているものの、その妥当性を詳細に検証した例はほとんどない。水温・塩分場の鉛直渦拡散係数自体の検証の必要性も考えれば、粒子状物質の動態に関するパラメタリゼーション手法は「二重の不確実性」に直面していると言える。

2. 研究の目的

研究代表者は、平成24年度から国立環境研究所地域環境研究センターに所属し、土木工学や海洋生物学などの専門家と共同で研究を進めてきた。同センターでは、東シナ海や東京湾などにおける環境・生態系の現場観測が継続実施されており、平成20年以降、海洋内の鉛直微細構造を計測可能な観測測器 TurboMAP-9 を用いた「海洋沿岸域における乱流混合の現場観測」も行われてきた。このような状況は、同センターで取得された沿岸域の乱流・環境データと研究代表者の外洋域の乱流の知見およびLESの数値手法とを組み合わせることで外洋沿岸双方の海洋運動および物質輸送に関して良好な性能を発揮する海洋混合層の乱流パラメタリゼーション手法の構築を進めていく絶好の機会を提供するものであった。

以上の背景から本研究は、LES 実験を重ねることで海洋混合層過程に関するきわめてユニークな「高解像度乱流データベース」を作成し、その情報に基づき、流速場、密度場の鉛直混合過程、さらには、粒子状物質の鉛直拡散過程に関する既存のパラメータ化手法の検証・改良を行うことを目的とした。

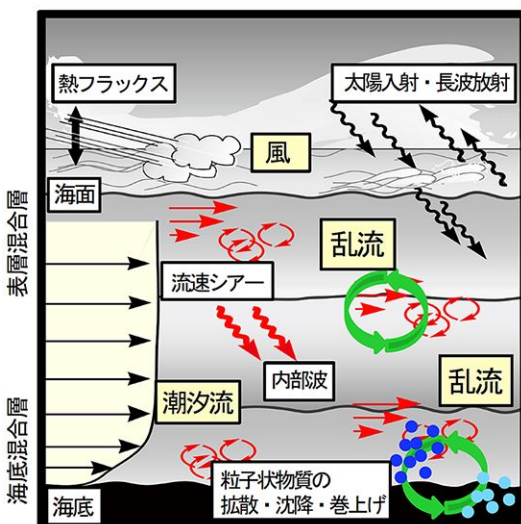


図1 海洋表層・海底混合層における諸物理過程の模式図。

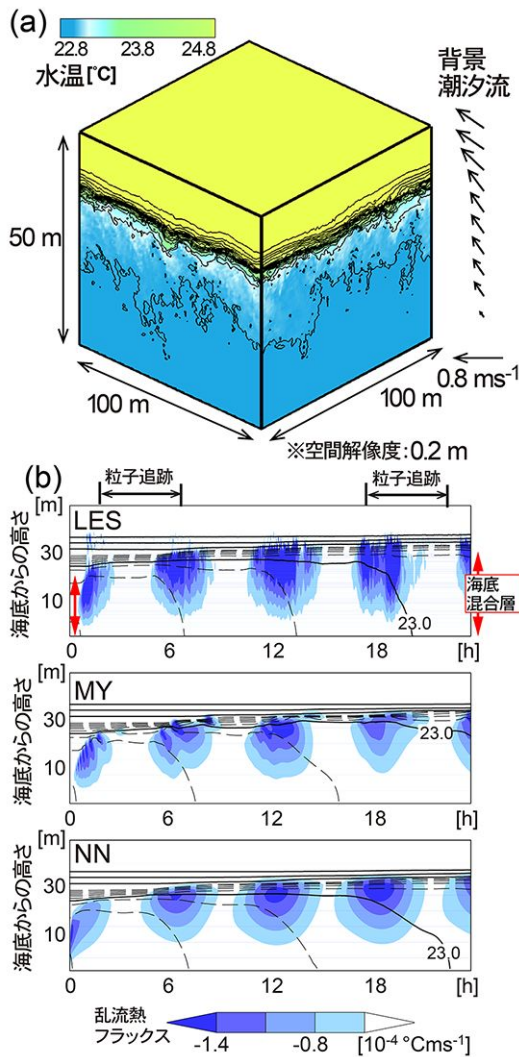


図 2 (a)潮汐流による海底混合層発達の数値実験に関する LES 実験の例。(b)LES による計算結果と各種の乱流パラメタリゼーション手法を組み込んだ鉛直 1 次元モデルによる計算結果との比較。陰影は乱流熱フラックス、等値線は水温 (0.1 間隔) を示す。

3. 研究の方法

(1)LES モデルを用いて海洋混合層応答の高解像度数値実験を行うとともに、その手法の妥当性を東シナ海や東京湾における乱流強度の現場観測との比較を通じて検証した。有効性を確認した LES 実験の結果に基づき、乱流エネルギーや乱流長さスケールなどの「微視的」観点まで踏み込んで海洋物理場 (流速場・密度場) の鉛直混合強度に関する既存の乱流パラメタリゼーション手法を検証・改良した。

(2)LES 実験から得られた時々刻々の流速、密度場の情報を用いて各粒子に作用する重力、浮力、流れによる抵抗力などを見積もることで、粒子追跡の数値実験を行った。様々な密度 (比重)・粒径の粒子を仮定して行って得た実験結果に基づき、粒子状物質の鉛直拡散に関する乱流パラメタリゼーション手法を検討した。

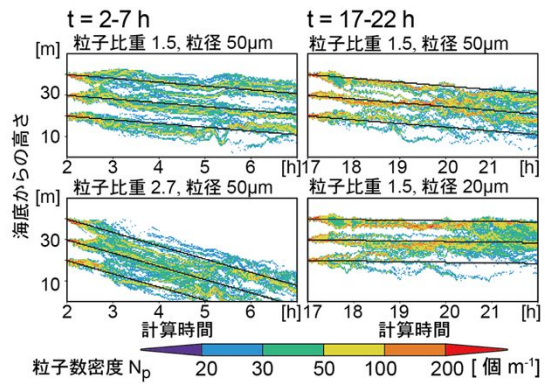


図 3 LES の流速・密度場情報を用いて行った粒子追跡実験の結果の例 (鉛直方向の各層における粒子数密度 N_p の深度-時間分布)。左列および右列は図 2(b) の矢印で示された期間における LES の情報を用いて得られた結果。黒線は静止流体中の沈降の様子を示す。

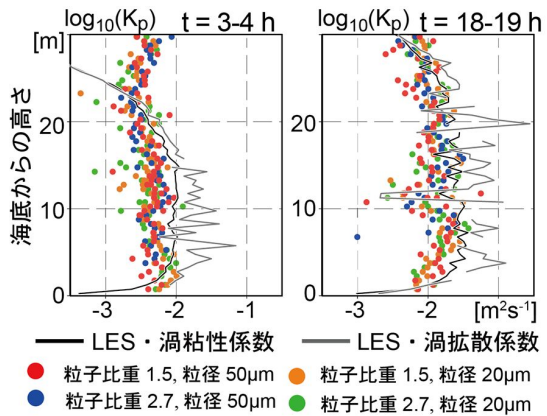


図 4 粒子追跡実験の結果から求めた粒子の拡散係数 (K_p) および粒子追跡実験に使用した LES 実験の流速・水温場から求めた鉛直渦粘性・拡散係数の時間平均値。

(3)改良した乱流パラメタリゼーション手法を組み込んだ広域海洋数値モデルを用いた、海洋環境の広域シミュレーションにおける乱流パラメタリゼーション手法の性能評価を行った。

なお、研究代表者は平成 28 年度より国立環境研究所から水産研究・教育機構へ異動したが、業務内容には海洋数値モデルの関連研究が引き続き含まれており、前所属機関のメンバーと適宜連絡をとりながら本課題を実施した。

4. 研究成果

(1)東シナ海や東京湾などの河川水や海面加熱の影響が顕著な沿岸域、および、沖縄トラフ海底付近などの成層強度が弱い深海域を想定した表層・海底混合層過程の数値実験を行った。得られた結果を現実海洋における乱流強度データと比較することで、LES 実験

の妥当性を確認した。LES 実験の結果に基づいて広域海洋数値モデル内に組み込むための海洋物理場（流速・密度場）に関する既存の乱流パラメタリゼーション手法を乱流長さスケール等の「微視的」な観点から調べた結果、大気境界層用に開発された NN 手法を乱流強度が密度成層に応じてさらに制限されるように修正することで、LES で計算された海洋混合層の発達過程を良好に再現できることが分かった（図 2）。

(2) 東シナ海陸棚域を想定した海底混合層乱流の LES 実験結果を用いて、粒子追跡の数値実験を行った。実験結果からは、水温場の鉛直渦拡散係数と粒子状物質のそれとが同オーダーであり、その結果が粒子の粒径・粒子密度に顕著には依存していないことなどが明らかになった（図 3・図 4）。さらに沖縄トラフ海底付近などの深海域を想定した海底混合層内の乱流過程やそれに伴う濁質動態に関しての粒子追跡実験を行った結果、潮汐による海底境界層の発達の高々 40-60 m 程度であること、懸濁粒子の大部分はその海底境界層内に留まる範囲で輸送・拡散していることが試算された。この結果は、既往の ADCP 観測研究の結果と矛盾しないものであることが確認され、海洋混合層過程が懸濁粒子の動態に対して大きな影響を及ぼすことが示された。

(3) 本研究で検証・改良した乱流パラメタリゼーション手法を広域海洋数値モデル内に組み込み、東シナ海や日本近海の沿岸域を対象とした広域シミュレーションにおける乱流パラメタリゼーション手法の性能評価を行った。相模灘を対象とした広域シミュレーションでは、乱流強度の現場観測結果との比較を通じて、NN 手法が海底混合層過程に関しても既存の手法と比較して良好に振る舞うことを確認した。

今日、高解像度の海洋広域数値シミュレーションに対する社会的期待が益々高まる一方で、様々な時空間スケールの海洋運動や物質輸送に影響を及ぼす乱流混合過程を陽に扱うことは依然として甚だ困難である。本研究の成果は、海水温変動などの気候的観点に加え、東シナ海における植物プランクトンへの栄養塩供給過程、放射性物質の動態、海底資源掘削活動に伴う環境影響などの多様な海洋環境・生態系問題の評価・予測能力の高精度化に向けた基礎的知見を提示するものである。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

古市 尚基、東 博紀、杉松 宏一、海洋内における懸濁粒子等の動態モデル構築に向けて、はまべ交信、査読無、25、2017、84-87

Furushima, Yasuo, Hironori Higashi, Hiroshi Koshikawa, Naoki Furuichi, and Hiroyuki Yamamoto, Periodic behaviors of deep-ocean flow and turbulent mixing in hydrothermal field on the Okinawa Trough, Japan, Proceeding of Oceans 16 MTS/IEEE Monterey, 査読無、2016, doi:10.1109/OCEANS.2016.7761170
古市 尚基、東 博紀、古島 靖夫、深海における懸濁粒子の動態モデル構築に向けて-潮流海底境界層の LES 実験-、海洋と生物、査読無、38、2016、145-150
Higashi, Hironori, Yu Morino, Naoki Furuichi, and Toshimasa Ohara, Ocean dynamic processes causing spatially heterogeneous distribution of sedimentary caesium-137 massively released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Biogeosciences, 査読有、12、2015、7107-7128, doi:10.5194/bg-12-7107-2015

古市 尚基、東 博紀、LES 実験を応用した海底混合層内の粒子状物質の動態に関する基礎的考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、70、2014、I_1096-I_1100, doi:10.2208/kaigan.70.I_1096

〔学会発表〕（計 16 件）

古島 靖夫、福原 達雄、東 博紀、古市 尚基、伊藤 博和、山本 啓之、海底熱水噴出域近傍における微細流動（乱流）計測の試み、第 26 回海洋工学シンポジウム、2017 年 3 月 6 日、日本大学、東京

古市 尚基、東 博紀、越川 海、長谷川 徹、西内 耕、山田 東也、夏季の東シナ海における乱流強度の現場観測とスケーリング、海洋乱流の観測およびモデリングに関する研究集会（九州大学応用力学研究所共同利用研究集会）、2017 年 1 月 5 日、九州大学、福岡

Furushima, Yasuo, Hironori Higashi, Hiroshi Koshikawa, Naoki Furuichi, and Hiroyuki Yamamoto, Periodic behaviors of deep-ocean flow and turbulent mixing in hydrothermal field on the Okinawa Trough, Japan, Oceans 16 MTS/IEEE Monterey, 2016 年 9 月 19-23 日、Monterey, U.S.A.

古市 尚基、東 博紀、越川 海、長谷川 徹、西内 耕、山田 東也、夏季の東シナ海における乱流強度の現場観測とスケーリング、日本海洋学会 2016 年度春季大会、2016 年 9 月 13 日、鹿児島大学、鹿児島

古島 靖夫、古市 尚基、東 博紀、福原 達雄、伊藤 博和、御手洗 哲、山本 啓之、投下式乱流微細構造プロファイラー（VMP-X）を用いた海底近傍における乱流計測の試み、海洋理工学会平成 28

年度春季大会シンポジウム海洋開発に伴う環境計測の展望、2016年5月26日、東京海洋大学、東京

東 博紀、森野 悠、越川 海、永島 達也、王 勤学、古市 尚基、秋山 千亜紀、長谷川 徹、西内 耕、清本 容子、山田 東也、大気窒素沈着の経年変化が東シナ海の陸棚域の一次生産に及ぼす影響、日本海洋学会 2016 年度春季大会、2016年3月17日、東京大学、東京

古市 尚基、東 博紀、越川 海、山田 東也、夏季の東シナ海における懸濁粒子観測、日本海洋学会 2016 年度春季大会、2016年3月15日、東京大学、東京

Furuichi, Naoki, Hironori Higashi, Hiroshi Koshikawa, and Yasuo Furushima, A large-eddy simulation study of the tidal bottom boundary layer and the behavior of suspended particulate matter on the Okinawa Trough, Japan, 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016年2月23日、New Orleans, U. S. A.

古市 尚基、LES モデルを用いた沖縄トラフ上の海底混合層過程に関する数値的研究、海洋乱流の観測およびモデリング研究集会（九州大学応用力学研究所共同利用研究集会）、2016年1月17日、京都大学、京都

東 博紀、森野 悠、古市 尚基、大原利真、海底土セシウム 137 の不均質空間分布の形成プロセス、日本海洋学会 2015 年度秋季大会、2015年9月27日、愛媛大学、愛媛

古市 尚基、夏季の東シナ海における乱流強度観測およびスケーリング、名古屋大学地球水循環研究センター平成 27 年度共同研究集会「東シナ海陸棚域の物質循環に関わる物理・化学・生物過程」、2015年6月13日、名古屋大学、愛知

古市 尚基、東 博紀、越川 海、古島靖夫、LES モデルを用いた沖縄トラフ近傍の海底混合層過程に関する数値実験、日本海洋学会 2015 年度春季大会、2015年3月22日、東京海洋大学、東京

古市 尚基、東 博紀、LES 実験を応用した海底混合層内の粒子状物質の動態に関する基礎的考察、第 61 回海岸工学講演会、2014年11月12日、ウインクあいち、愛知

Furuichi, Naoki, Hironori Higashi, Hiroshi Koshikawa, Toru Hasegawa, Kou Nishiuchi, and Haruya Yamada, Observations of turbulence in the summer East China Sea, PICES 2014 Annual meeting, 2014年10月14日、Yeosu, Korea

古市 尚基、東 博紀、LES 実験を応用した海底混合層内の粒子状物質の鉛直拡散過程に関する研究、日本海洋学会 2014 年度秋季大会、2014年9月14日、長崎

大学、長崎
古市 尚基、海洋混合層における乱流パラメタリゼーションと粒子状物質の動態、名古屋大学地球水循環研究センター平成 26 年度共同研究集会「東シナ海陸棚域の物質循環に関わる物理・化学・生物過程」、2014年6月2日、名古屋大学、愛知

〔図書〕(計0件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古市 尚基 (Furuichi, Naoki)
水産研究・教育機構・水産工学研究所・研究員
研究者番号：70588243

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし