

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：82708

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18431

研究課題名(和文)人工マウンド礁近傍の内部波、乱流混合および粒子物質輸送過程に関する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical study of internal waves, turbulent mixing, and behavior of particulate matter around artificial mound reef

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・水研機構(神栖)・主任研究員

研究者番号：70588243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：「人工マウンド礁近傍の水圏環境形成」に寄与する背景物理機構解明のため、マウンド礁と背景流の相互作用によって生じる内部波、乱流混合および粒子動態に関する「高解像度LES数値実験」を行った。水理模型実験との比較によって数値計算手法の妥当性を確認した後に、様々な物理条件下における数値実験を実施し、内部波伝播、乱流混合、粒子動態の関連性を調べるとともに、それらの効果を海洋広域数値モデルへ反映するためのパラメータ化手法に係る検討を行った。このようにして構造物・小規模海底地形近傍の局所的な流体・物質輸送という海洋物理学・水産工学両分野に係る学際的課題に「ミクロな乱流・内部波」の観点から取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国・都道府県の事業によって人工マウンド礁(以下、マウンド礁)の設置が進められてきた。マウンド礁の設置によって、海洋内の物質輸送機構が変化し、一次生産量ひいては水産資源の増大が期待される。本研究は、高解像度の乱流計算手法であるLESと粒子追跡実験とを組み合わせることで構造物(小規模地形)近傍の局所的な流体・物質輸送に関する信頼性を高めた考察を行った。このようにして得られたこの知見は、広域的な海環境変化を評価・予測するためのモデルの改良や、堆周辺での漁場評価に役立つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：A large-eddy simulation (LES) study on tidally-induced internal waves and turbulent mixing processes over a marine bank (or an artificial mound reef) was conducted and the obtained results were used to examine the behavior of suspended particulate matters. After verifying the simulated results with the results from hydraulic model experiment, we carried out several numerical experiments to examine the effects of the existence of marine bank and sea water density stratification on the behavior of the suspended particulate matters. The simulated results demonstrated that the marine bank played important roles in the upward transport of particles from the near-bottom to the upper areas, especially under the stratified density conditions.

研究分野：水産工学・海洋物理学・海岸工学

キーワード：マウンド礁 内部波 乱流 粒子 LES

1. 研究開始当初の背景

「人工マウンド礁(以下、マウンド礁)」は、海底にブロック等を山脈状に積上げ造成された構造物である。マウンド礁と海洋内の背景流れ場との相互作用によって内部波(密度成層場を伝播する波動現象)が励起されると考えられており、この内部波の伝播・砕波から生じる乱流混合によって栄養塩類が底層から有光層へ供給され、一次生産量増加や有機物粒子(デトリタスなど)集積による水産資源の増大が期待される。マウンド礁設置によるこれらの効果を水産業の健全な発展や気候変動適応の視点から適切に評価していく上で、その背景機構としての内部波、乱流混合、粒子状物質の輸送過程等を解明することは必要不可欠な課題である。しかしながら、それらの内部波・乱流・粒子拡散ならびに輸送過程は、その時空間規模が極めて小さい故に、水平解像度が数 km ～数 100 m となる今日の海洋広域数値モデル研究をもってしても、そのみに基づく取り組みでは実態解明が甚だ困難である。

研究代表者は従来、海洋物理学(特に内部波・乱流混合)に基づく研究に従事してきており、特に 2008 年以降、Large Eddy Simulation (LES) と呼ばれる海洋物理学分野で利用が限られていた乱流計算のための手法を用いて、海洋表層・海底境界層の超高解像度(時間・空間間隔: 1 秒以下・約 0.2-1-m) 数値実験を行った。これまでに境界層内での LES の良好な再現性能を現場乱流観測との比較から示すとともに、得られた密な間隔の実験結果を用いて乱流の効果を「乱流拡散係数」として海洋広域数値モデルに組み込む乱流パラメータ化手法を検証・提案し、この手法は複数機関によって導入された。

2016 年 4 月より、代表者は水産研究・教育機構水産工学研究所(現在: 同機構水産技術研究所環境・応用部門水産工学部)に所属している。所属研究グループでは、マウンド礁近海を含む漁場や漁港に係る現地調査の他、代表者が取り組んだ経験のない水理模型実験研究などが進められてきた。この状況は、代表者が培った内部波、乱流、LES、パラメータ化、粒子追跡などに基づく海洋物理学的な知見と所属研究グループが培った水理模型実験・現地調査などに基づく水産工学(水産土木工学)的な知見を融合して構造物・小規模地形近傍の水圏環境形成の背景にある物理機構の解明を進める絶好の機会を提供するものであった。

2. 研究の目的

以上のような背景から本研究は、人工マウンド礁近傍の内部波・乱流混合・粒子状物質の動態を対象とした LES モデルを用いた高解像度数値実験を実施し、その結果に基づき、様々な物理条件下での「内部波の伝播の有無」「乱流混合の強度変化」と「マウンド礁近傍の粒子の輸送過程」との関連性解明、および、マウンド礁近傍の粒子の輸送過程などのパラメータ化手法構築に係る検討を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

研究方法の概要は以下の通りである。まず、「人工マウンド礁近傍の内部波・乱流混合過程」再現のための「LES モデルを用いた高解像度数値実験」を実施し、水理模型実験との比較などを通じて計算手法の有効性を検証した。流速や密度成層条件などの物理条件を変化させた数値実験から得られた高解像度乱流データベースを用いて粒子追跡の数値実験を行うことで内部波伝播、乱流混合、粒子動態の関連性を調べるとともに、マウンド礁近傍の乱流や粒子輸送効果などに係るパラメータ化手法を検討した。

数値計算は農林水産研究情報総合センターのシステムを利用して実施した。数値モデルは、海堆近傍の流動場を予測する海洋流動の LES モデルと、それにより得られた流速場データを用いて粒子の輸送・拡散を予測する粒子追跡モデルで構成した。

計算領域は水深 80m, 水平幅は東西 11000 m (11 km), 南北 40 m の仮想海域で、南北および東西境界には周期境界条件を適用した。格子幅は水平および鉛直方向に 1 m とした。

本稿では、成層条件や地形条件の変化が粒子動態に及ぼす影響を調べるため、4 種類の実験 (A: 密度成層あり・海堆あり、B: 密度成層なし・海堆あり、C: 密度成層あり・海堆なし、D: 密度成層なし・海堆なし) の結果を紹介する。密度成層あり条件では、初期水温の鉛直勾配を既往現地調査結果を参考に決定した。海堆あり条件では、計算領域の中央に高さ 20 m・幅 92 m・南北方向に一様形状の海堆を想定した理想的な地形条件を与え、南北および東西境界には周期境界条件を適用した。A-D の実験のそれぞれにおいて、流れ場の外力条件として東西方向が約 0.3 ms^{-1} である半日周期の M_2 潮汐流 (周波数 $\omega_{M_2} = 1.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) を励起するような背景圧力勾配を与えた。塩分場には一定値 (32.8) を、コリオリ力は 30°N における値を与えて計算を行った。粒子追跡の計算では、実験 A~D で得られた流動場のそれぞれに対し、沈降速度 $w_s = 5.7 \text{ m/day}$ (粒径が $20 \text{ }\mu\text{m}$, 比重が有機物を想定して 1.4 の粒子で、ストークス沈降式からの算定値) を有する懸濁粒子を計算初期に海底付近に配置させて粒子追跡計算を行った。

計算検証のための水理模型実験については、水産工学研究所内の実験水槽内に海堆の模型を設置し、海堆周辺の流れの様子を粒子画像流速計測法 (PIV 法) によって調べた。

4. 研究成果

図 1 左列に水理模型実験で得られた流速計測結果を示す。水理模型実験からは、海堆の背後で流れが小さくなる流れのよどみ域が形成される様子が確認できた (橙色の丸印部分)。数値計算結果において、密度成層なし・海堆あり計算 (ケース B) の場合に海堆の背後で流れのよどみ域が形成され (図 1 右列上側)、実験結果と矛盾しない結果を得られた。他方、海水密度成層 (密度成層の鉛直変化) の存在を仮定して計算したところ (ケース A)、海堆の背後での内部波の励起のような、流動場の顕著な擾乱が確認された (図 1 右列下側)。

図 2(a) に粒子追跡計算の結果を示す。一様の海水密度場においては、海堆の有無によらず、海底付近に初期配置された粒子が上層部まで達しやすい傾向が確認された。一方で、海水の密度成層を仮定した場合、海堆の存在によって、海洋内の中層部 (深度 30-60 m 付近) まで粒子が上方輸送されやすく、また、その輸送が密度場変化に沿う傾向があることが確認された。

海洋広域モデル内のパラメータ化手法に係る考察として、広域モデル内で利用される、「乱流拡散係数」の調査を行った (図 2(b))。本研究では乱流拡散係数 K_V を $K_V = -\langle w't' \rangle / \langle T_z \rangle$ で定義した (ここで w' は鉛直流速、 t' は水温擾乱、 T_z は水温の鉛直勾配、 $\langle \rangle$ は時間平均値)。 K_V 値は海堆あり (ケース A) の場合には、海底 (海底境界層) 付近のみならず、中層においても大きくなり、一方で、海堆なし (ケース C) の場合は、境界層付近のみで顕著な値となり、中層で大変小さい様子が明らかとなった。広域海洋モデルでは乱流の効果を十分に表現できない場合には、乱流拡散係数の K_V 値を適切に設定することでその効果を表現できるものと考えられた。

今日、計算機能力の向上や社会的期待の高まりを背景に海洋広域数値モデル実験の沿岸浅海域における高解像度化(ダウンスケーリング)が期待されているが、小規模海底地形近傍の局所的な物理過程および関連する物質輸送の問題は最も重要な未解決課題の一つである。本研究は、内部波・乱流・粒子動態などのいわば「ミクロな」観点から、海堆周辺での水圏環境形成に係る基盤的知見を獲得しようとしたものである。得られた知見は、広域的な海の環境変化などを評価・予測するためのモデルの改良や、海堆周辺での漁場評価に役立つものと期待される。

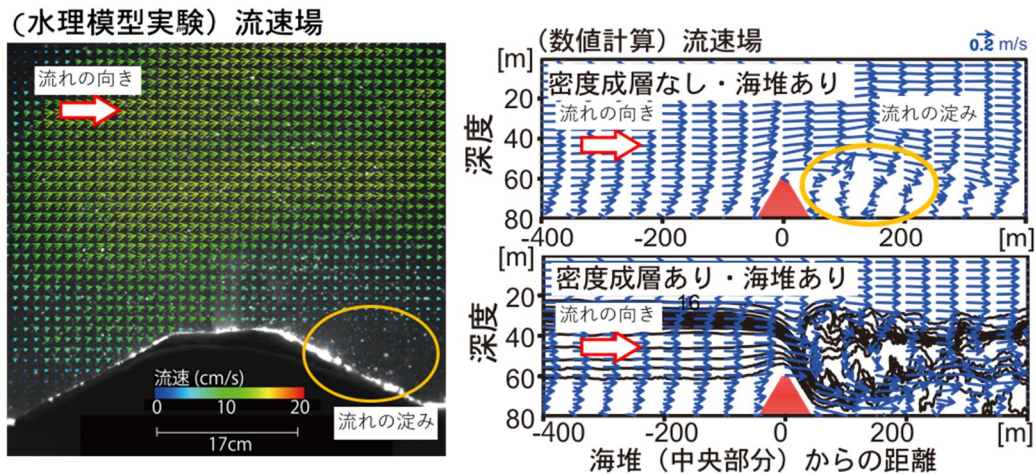


図1 (左) 水理模型 PIV 実験から得られた流速場。(右) 数値計算から得られた流速場。下段の等値線は水温を示す(等値線: 0.05 間隔)

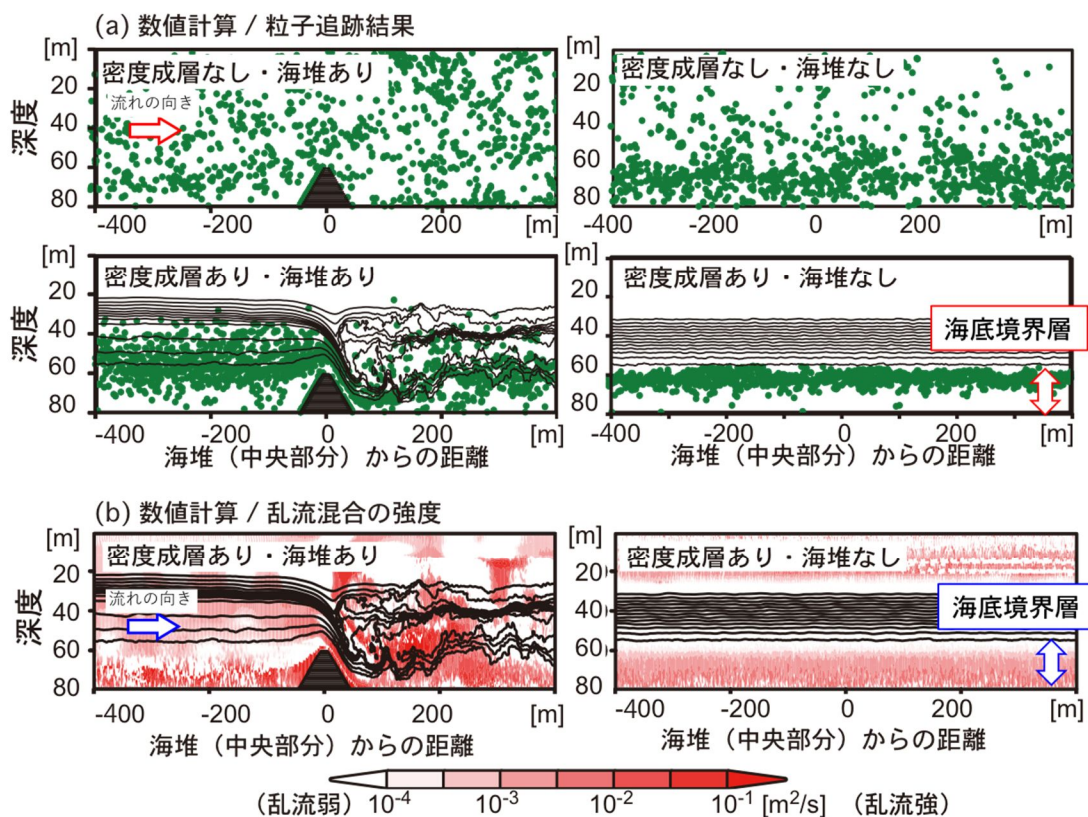


図2 (a) 数値計算から得られた粒子分布。(b) 数値計算から推定した乱流混合の強度(乱流拡散係数)。図内の等値線は水温を示す(等値線: 0.05 間隔)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 古市尚基・大村智宏	4. 巻 1
2. 論文標題 小規模海山近傍の粒子物質輸送過程に関する数値的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年 日本水産工学会 学術講演会 学術講演論文集	6. 最初と最後の頁 9-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18903/pamjsfe.2019.0_9	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 古市 尚基, 東 博紀, 杉松 宏一, 大村 智宏, 越川 海, 長谷川 徹, 山田 東也, 南部 亮元, 帰山 秀樹	4. 巻 57
2. 論文標題 海底混合層内の懸濁粒子動態	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 沿岸海洋研究	6. 最初と最後の頁 21-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32142/engankaiyo.2019.8.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 古市 尚基, 東 博紀, 杉松 宏一, 牧 秀明, 越川 海, 宇田川 徹, 遠藤 次郎, 大村 智宏	4. 巻 73(2)
2. 論文標題 現場観測に基づく海底混合層近傍の懸濁粒子動態に関する基礎的考察	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_85-I_90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.73.I_85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 東 博紀, 古島 靖夫, 古市 尚基, 福原 達雄	4. 巻 73(2)
2. 論文標題 相模灘の深海底乱流を対象とした現場観測と鉛直混合スキームの性能評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_79-I_84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.73.I_79	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasuo Furushima, Hironori Higashi, Tatsuo Fukuhara, Naoki Furuichi, Hiroyuki Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Direct measurement of near-bottom turbulence in deep ocean for predicting behavior of suspended particles in Sagami Bay and the Okinawa Trough, Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeding of OCEANS 2017 - Anchorage	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 古市 尚基, 大村 智宏
2. 発表標題 小規模海山近傍の粒子物質輸送過程に関する数値的研究
3. 学会等名 2019年 日本水産工学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古市 尚基, 帰山 秀樹, 杉松 宏一
2. 発表標題 茨城県から宮城県沖の海底近傍における懸濁粒子の現場観測
3. 学会等名 日本海洋学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古市 尚基, 帰山 秀樹, 杉松 宏一
2. 発表標題 茨城県から宮城県沖の海底近傍における懸濁粒子の現場観測
3. 学会等名 海洋乱流の観測およびモデリングに関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古市 尚基, 大村 智宏, 松村義正
2. 発表標題 堆近傍の粒子物質輸送過程に関する数値的研究
3. 学会等名 2019 年度 九州沖縄地区合同シンポジウム「魚礁を取り巻く海洋環境と漁場整備技術」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古市尚基、東博紀、杉松宏一、大村智宏、越川海、長谷川徹、山田東也、帰山秀樹
2. 発表標題 海底混合層近傍の懸濁粒子動態
3. 学会等名 日本海洋学会沿岸海洋シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古市尚基、東博紀、越川海、古島靖夫
2. 発表標題 A large-eddy simulation study on the tidal bottom boundary layer and the behavior of suspended particulate matter on the Okinawa Trough, Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古島 靖夫、東 博紀、福原 達雄、松田 健也、古市 尚基、山本啓之、福島 朋彦
2. 発表標題 VMP-X（投下式乱流微細構造プロファイラー）を用いた沖縄トラフにおける乱流計測
3. 学会等名 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研究集会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古市 尚基、東 博紀、杉松 宏一、牧 秀明、越川 海、遠藤次郎、宇田川 徹、大村 智宏
2. 発表標題 海底混合層近傍の懸濁粒子の動態に関する現場観測
3. 学会等名 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研究集会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古市 尚基、東 博紀、杉松 宏一、牧 秀明、越川 海、遠藤次郎、宇田川 徹、大村 智宏
2. 発表標題 現場観測に基づく海底混合層近傍の懸濁粒子動態に関する基礎的考察
3. 学会等名 第64回海岸工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東 博紀、古島 靖夫、古市 尚基、福原 達雄
2. 発表標題 相模灘の深海底乱流を対象とした現場観測と鉛直混合スキームの性能評価
3. 学会等名 第64回海岸工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古市 尚基、東 博紀、杉松 宏一、牧 秀明、越川 海、遠藤次郎、宇田川 徹、大村 智宏
2. 発表標題 海底混合層近傍の懸濁粒子の動態に関する現場観測
3. 学会等名 日本海洋学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------