

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04049

研究課題名(和文) マルチスケール統合型沿岸環境解析システム開発と変動環境下における広域海洋動態解析

研究課題名(英文) Development of a multi-scale integrated analysis system for coastal environmental studies and its application to synoptic-scale time-varying ocean dynamics

研究代表者

内山 雄介 (Uchiyama, Yusuke)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：80344315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、砕波帯・陸棚・外洋をシームレスに接続するマルチスケール統合型沿岸環境解析システムの決定版とも呼ぶべき海洋モデリング技術開発を行った。本システムは、地球規模環境シグナルを考慮しつつ、沿岸域における精緻な再解析・予報、海流、波浪、河川、潮汐、風応力等の浅海域海洋物理学に求められる全ての要素を包含した流動環境、およびそれに惹起される物質分散の統一的な動態解析などが可能な画期的なシステムである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本システムは、高い性能要求に対して新技術開発を行いながら一つ一つクリアすることで、人間活動や地球環境問題に関連する沿岸域で生じる様々な複雑流体現象に適用された。それらの多くは開発された技術を盛り込むことによって初めて再現・解析可能となった事象である。本研究では、例えば、海岸侵食等に密接に関係する離岸流の3次元乱流構造解析、福島第一原発事故に伴う放射性核種の海洋分散、サブメソスケール乱流に伴う海洋表層混合過程と海洋生物生産性の関係、台風通過に伴う高潮を含む内湾・沿岸環境変化、沿岸-外洋相互作用による広域サンゴ幼生輸送過程の解明など、新規性・学術性の高い多くの研究成果をあげることに成功した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at developing a novel oceanic modeling framework that integrates multi-scales and multi-processes occurred in coastal oceans. The system seamlessly concatenates processes in surf-zones, continental shelves, and offshore open waters. It is applicable to precise reanalysis and prediction with all the factors mandatory in coastal oceans such as currents, waves, river inputs, tides, wind stresses, etc., and their mutual interaction, by taking account of global signals through a nesting technique.

研究分野：海岸工学，海洋物理学

キーワード：領域海洋循環モデル 波-流れ相互作用 サブメソスケール乱流 物質分散 ネスティング

## 1. 研究開始当初の背景

沿岸域流動の時空間的構造の実態把握と定量的評価は、地球物理学的には海洋循環に対しての境界条件を与え、土木工学的には、a) 津波や高潮など沿岸災害の評価・予測、b) 海岸侵食対策、c) 海洋構造物の性能設計、d) 物質分散・循環を通じた環境アセスメント等に対して根幹的に重要である。海岸域や沿岸域に代表される浅海域では、流れに対する波の影響が波長スケールを超えて表層数 100m にまで及ぶことに加え、砕波に伴う運動量輸送が他の外力より卓越するため、風波の影響を考慮することが不可欠である。Uchiyama ら (2010) は、オイラー型漸近展開理論を砕波帯などの強非線形波動環境へ拡張し、領域海洋循環モデル ROMS に組み込み、海盆・領域スケールから海浜スケールまでのマルチスケールでの 3 次元海洋構造を精緻に再現することに成功した (ROMS-WEC モデル)。この理論とモデルは、原理的に海岸工学・海洋物理学において重要な現象のほぼ全てを統一的に包含しているため一般性が非常に高く、これまで別個に取り扱われていた沿岸流動と地球規模の海洋流動とをシームレスに接合し得る画期的なフレームワークである。ROMS-WEC モデルをベースに、より精緻かつユニバーサルな海洋環境予測技術の確立に向けて、上記の技術に加えてマルチネスティング技術の開発、波-流れ相互作用や精緻な物質分散解析を可能とする普遍的な 3 次元海洋モデリング技術の開発が強く求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下に掲げる要素技術およびモデリング技術の開発および適用を通じ、沖合で発達するサブメソスケール渦、波浪場および海浜流場との間で生じる強い相互作用、さらにはそれらに惹起される流動場・乱流場によって生じる懸濁態輸送・溶存態分散解析などを行うことで、沿岸から沖合までを統一的かつ精緻に記述しうる普遍的な 3 次元海洋流動モデリング技術の開発およびその応用を進めることを大きな目的とした。具体的には開発中の海洋モデルを用いたこれまでの様々な成果を踏まえ、この技術をさらに発展させるために、①多段双方向ネスティング技術の高度化 (two-way ネスティングの導入)、②波-流れ相互作用理論とモデル化の高度化 (平均流・波浪変形に加え乱流モデルの検討)、③メソスケールデータ同化の導入、④①に基づくサブメソスケール現象の評価と up-scaling 効果の導入、⑤高精度 Eulerian/Lagrangian 物質分散モデルの統合を行い、マルチスケール統合型沿岸環境解析システムを開発することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究ではこれまで開発・改良中の ROMS-WEC モデルに対して以下の要素研究を行い、飛躍的な高精度化を狙った。具体的には以下の 6 項目の実施を計画した。すなわち、①波-流れ相互作用理論とモデルの高度化、②モデル検証のための紀伊半島および沖縄本島海域における ADCP 長期連続観測と短期曳航観測、③仏 IRD との協働によるネスティング技術の導入、④客観解析や変分原理を用いたデータ同化スキームの開発と組み込み、⑤高精度 Eulerian/Lagrangian 物質分散モデルの統合、⑥GPS surface drifter を用いた沿岸域-外洋間の物質分散現地観測とそのモデル化、⑦西日本沿岸域の中領域 (瀬戸内海・四国沖海域) および高領域 (東シナ海～関東黒潮続流域) に対する短期 (3 年間程度) および気候変動シグナルを考慮した長期 (10 年間程度) モデリングである。

## 4. 研究成果

研究方法の項で示した 6 項目全てについて詳細な研究を行い、以下のような研究成果を得た。①波-流れ相互作用理論とモデルの高度化に向けて、米国北カロライナ州ダック海岸を対象とした 3 次元非定常離岸流の乱流構造解析 (Uchiyama, McWilliams and Akan, 2017) や、南カリフォルニア湾を対象とした広域波浪場推算 (Cao et al., 2018) などを実施した。②モデル検証のための紀伊半島および沖縄本島海域における ADCP 長期連続観測と短期曳航観測を夏季から秋季の台風時期を狙って毎年数ヶ月にわたって行った。その結果は馬場ら (京大防災研報告, 2015; 2016; 2017) に詳細にまとめられたほか、海面過程、境界層変化、湾内水交換に関する研究成

果として久保ら(2016), 猿渡ら(2016;2018), 内山ら(2016), 岡田ら(2018)として公表した. ③ 仏 IRD との協働によるネスティング技術の導入に関しては, 主としてオフラインネスティングによる多段ダウンスケーリングモデルの開発に注力した. その成果は, 太平洋沿岸での海洋表層の渦輸送に着目した Uchiyama, Suzue et al.(2017), 黒潮再現性について精緻な評価を行った Uchiyama, Kanki et al.(2018), 台風に代表される強い擾乱の効果に関わる再現性や海洋環境改変機構に着目した Tada et al.(2018)などで公表した. ④客観解析や変分原理を用いたデータ同化スキームの開発と組み込みに関しては, シンプルな 4 次元 nudging 法による日本沿岸広域長期再解析の方向性を明確に示した Uchiyama, Kanki et al.(2018)および南シナ海を対象とした Uchiyama, Sengo et al.(2018), さらにはより高度な 3 次元変分法データ同化に基づく瀬戸内海流動再現計算を行った黒澤ら(2017)に取りまとめた. ⑤高精度 Eulerian/Lagrangian 物質分散モデルの統合も鋭意実施し, ROMS 出力を用いたオフライン Euler 型移流拡散モデルの開発(内山・鈴江・小碓, 2016), Lagrangian 粒子追跡を用いてサンゴ礁生態系ネットワーク構造を解析した Uchiyama, Odani, et al.(2018)などに取りまとめた. ⑥GPS surface drifter を用いた沿岸域-外洋間の物質分散現地観測とそのモデル化については, 示した Uchiyama, Odani, et al.(2018)に加え, 沖縄本島に着目した Uchiyama, Miyagawa et al.(2018)として公表した. さらに, ⑦ 西日本沿岸域の中領域(瀬戸内海・四国沖海域)および高領域(東シナ海～関東黒潮続流域)に対する短期(3 年間程度)および気候変動シグナルを考慮した長期(10 年間程度)モデリングも実施し, 例えば Tada et al.(2018), Kamidaira et al.(2017)などとして公表した. 以上のように, 研究計画時に掲げた全ての目標を高いレベルで達成しており, 一連の研究成果は新しい沿岸環境数値シミュレーション技術の発展に大きく寄与することが期待される.

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 56 件)

### ■ 査読付き WoS 登録原著学術論文 (16 編)

- 1) Cao, Y., Dong, C., Uchiyama, Y., Wang, J. and Yin, X. (2018): Multiple-scale variations of wind generated wave in the Southern California Bight, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 123, Issue 12, pp. 9340-9356, doi: 10.1029/2018JC014505
- 2) Uchiyama, Y., Odani, S., Kashima, M., Kamidaira, Y. and Mitarai, S. (2018): Influences of the Kuroshio on interisland remote connectivity of corals across the Nansei Archipelago in the East China Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 123, Issue 12, pp. 9245-9265, doi: 10.1029/2018JC014017
- 3) McWilliams, J.C., Akan, C. and Uchiyama, Y. (2018): Robustness of nearshore vortices, *J. Fluid Mech.*, Vol. 850, R2, 12 pp., doi: 10.1017/jfm.2018.510
- 4) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y., Kawamura, H., Kobayashi, T. and Furuno, A. (2018): Submesoscale mixing on initial dilution of the radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 123, No.4, pp. 2808-2828, doi: 10.1002/2017JC013359
- 5) Masunaga, E., Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H. (2018): Dynamics of internal tides over a shallow ridge investigated with a high-resolution downscaling regional ocean model, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 45, No. 8, pp. 3550-3558, doi: 10.1002/2017GL076916
- 6) Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y. and Nakayama, A. (2018): Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulation-dispersal model, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 130, pp.40-54, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.03.007
- 7) Tada, H., Uchiyama, Y. and Masunaga, E. (2018): Impacts of two super typhoons on the Kuroshio and marginal seas on the Pacific coast of Japan, *Deep-Sea Res. Part I*, Vol. 132, pp.80-93, doi: 10.1016/j.dsr.2017.12.007
- 8) Uchiyama, Y., Kanki, R., Takano, A., Yamazaki, H. and Miyazawa, Y. (2018): Mesoscale reproducibility in regional ocean modeling with a 3-D stratification estimate based on Aviso-Argo data, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 56, No. 4, pp. 212-229, doi: 10.1080/07055900.2017.1399858
- 9) Dauhajre, D.P., McWilliams, J.C. and Uchiyama, Y. (2017): Submesoscale coherent structures on the continental shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 47, pp. 2,949 - 2,976, doi:10.1175/JPO-D-16-0270.1
- 10) Uchiyama, Y., McWilliams, J.C. and Akan, C. (2017): Three-dimensional transient rip currents: Bathymetric excitation of low-frequency intrinsic variability, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 122,

- pp. 5,826–5,849, doi:10.1002/2017JC013005
- 11) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S. (2017): Eddy-induced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 143, pp. 206–218, doi:10.1016/j.csr.2016.07.004
  - 12) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H. (2017): Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 122, pp. 5,046–5,062, doi:10.1002/2017JC012847
  - 13) Romero, L., Siegel, D.A., McWilliams, J.C., Uchiyama, Y. and Jones, C. (2016): Characterizing stormwater dispersal and dilution from small coastal streams, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 121, doi:10.1002/2015JC011323
  - 14) Kumar, N., Feddersen, F., Suanda, S., Uchiyama, Y., McWilliams, J. and O'Reilly, W. (2016): Mid-to inner-shelf coupled ROMS-SWAN model-data comparison of currents, and temperature: Diurnal and semi-diurnal variability, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 46, pp. 841-862, doi:10.1175/JPO-D-15-0103.1
  - 15) Marchesiello, P., Benshila, R., Almar, R., Uchiyama, Y., McWilliams, J. and Shchepetkin, A. (2015): On tridimensional rip current modeling, *Ocean Modell.*, Vol. 96:1, pp. 36–48, doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.003
  - 16) Kumar, N., Feddersen, F., Uchiyama, Y., McWilliams, J. and O'Reilly, W. (2015): Mid-shelf to surf zone coupled ROMS-SWAN model-data comparison of waves, currents, and temperature: Diagnosis of subtidal forcings and response, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 45, pp.1464–1490. doi: 10.1175/JPO-D-14-0151.1

■ 査読付き国際会議プロシーディングス論文 ( 5 編 )

■ 査読付き和文原著論文 ( 30 編 )

■ 総説・レビュー ( 5 編 )

■ 紀要論文 ( 5 編 )

[ 学会発表 ] ( 計 93 件 )

■ 国際会議等での招待講演 ( 13 件 )

- 1) Uchiyama, Y. (2018): Oceanic Dynamics and Modeling: Implications to marine biological connectivity studies, RinkaiHackathon2018, Marine Biological Laboratory, Hiroshima University at Mukaishima Island, June 10-13, 2018. (invited lecture)
- 2) Uchiyama, Y. (2018): A post-disaster assessment on coastal dispersal of suspended radio-cesium after the Fukushima nuclear accident with a coupled river-ocean-wave-sediment model, 2nd International Workshop on Regional Ocean Modeling and Observation, Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing, China, July 1-3, 2018. (invited)
- 3) Uchiyama, Y. (2018): Downscaling ocean modeling and its application to coastal environmental problems, Special Seminar at Faculty of Engineering and Green Technology, Universiti Tunku Abdul Rahman (UTAR), Kampar, Perak, Malaysia, Nov. 22, 2018. (invited lecture)
- 4) Uchiyama, Y. (2017): Evolution of high-resolution regional ocean modeling: applications to waste water and larval dispersal in an estuary, 2nd International Symposium on Green and Sustainable Technology (ISGST2017), Universiti Tunku Abdul Rahman, Kampar, Malaysia, 10-13 Jan. 2017. (invited keynote lecture)
- 5) Uchiyama, Y. (2017): Effects of surface waves on submesoscale coherent structures on an inner continental shelf, The 2nd Ocean Surface Waves and Wave-Coupled Processes Workshop, First Institute of Oceanography, Qingdao, China, Oct. 10-12, 2017. (invited)
- 6) Uchiyama, Y. (2017): Challenges and issues in forward regional ocean modeling: Eddies, terrestrial influences, and surface gravity waves, Data Assimilation Seminar Series at RIKEN AICS, Kobe, Japan, Nov. 17. (invited)
- 7) 内山雄介 (2016): 津波・高潮による沿岸災害～発生・伝播・増幅メカニズムと防災対策, 第9回災害対策セミナー in Kobe, シンポジウム「神戸における自然災害の防止・減災を目指して」, 神戸国際会議場, 2016年1月21日 (invited)
- 8) 内山雄介 (2016): マルチクラス懸濁質輸送モデルによる福島沿岸域堆積物シミュレーション, 2016年度沿岸海洋シンポジウム: 震災復興に対する沿岸海洋学の貢献, 東京大学, 2016年3月21日 (invited)

- 9) Uchiyama, Y. (2016): Wave-current interaction in coastal and shelf seas, International Workshop on Regional Oceanic Modelling and Observation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China, May 31, 2016. (invited)
- 10) Uchiyama, Y. (2016): Subtidal and semi-diurnal intrusion of offshore water into Tanabe Bay predicated upon a comprehensive field observation and a high-resolution down-scaling ocean modeling, International workshop on field measurements in fluvial and coastal areas and the utilization of the observed data, Wakayama, Japan, Nov. 22, 2016. (invited keynote lecture)
- 11) Uchiyama, Y. and Suzue, Y. (2015): Coastal dispersal of the land-derived tracer in an estuary and a continental shelf margin, Japan Geosciences Union Meeting 2015, Chiba, Japan, May 2015.(invited)
- 12) Uchiyama, Y. (2015): Submesoscale stirring of the Kuroshio in the East China Sea, International symposium on Submesoscale Oceanography : Prospect for a new world, JOS Fall Meeting 2015, Matsuyama, Japan, Sept. 2015. (invited)
- 13) Uchiyama, Y. (2015): Three-dimensional modeling of time-dependent wave-driven currents on a sandy beach, Seminar on Simulation of Coastal Processes, Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Shiga, Japan, Nov. 24, 2015. (invited)

■ 国際会議等での英語による発表 ( 54 件 )

■ 国内会議等での発表 ( 26 件 )

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

神戸大学内山研究室 : <http://coast.dce.kobe-u.ac.jp>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

なし .

### (2)研究協力者

- 研究協力者氏名 : James C. McWilliams ( 米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校教授 )
- 研究協力者氏名 : Alexander F. Shchepetkin ( 米国カリフォルニア大学ロサンゼルス校研究員 )
- 研究協力者氏名 : Patric Marchesiello ( フランス IRD-LEGOS )
- 研究協力者氏名 : 馬場康之 ( 京都大学防災研究所准教授 )  
ローマ字氏名 : Yasuyuki Baba
- 研究協力者氏名 : 御手洗哲司 ( 沖縄科学技術大学院大学准教授 )  
ローマ字氏名 : Satoshi Mitarai

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。