

令和元年6月12日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12575

研究課題名(和文) 粒子追跡による海洋物質循環・生態系モデリング手法の構築

研究課題名(英文) development of a comprehensive particle tracking system for marine ecosystem and material transport

研究代表者

松村 義正 (Matsumura, Yoshimasa)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：70631399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：数値海洋モデルに汎用のオンライン粒子追跡法を導入し、物質循環や海洋生態系に応用可能な包括的モデリングフレームワークを構築した。

本研究で開発した数値モデルコードは流体部分と粒子部分を同時に解く"オンライン"モデルであることを特徴としており、これによりオイラー的な流体モデルとラグランジュ的な粒子追跡モデルが相互に影響を与えあうことが可能となっている。

新たに開発したモデルを洪水時に河川水に含まれる懸濁粒子が湾内におよぼす影響の調査や、水産資源の輸送過程に関する研究等に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の計算機資源の発達に伴い、数値海洋循環モデルは海洋学の様々な分野で重要な役割を担っている。本研究はオイラー的な格子流体モデルである数値海洋モデルに粒子追跡手法を組み込みむことで、ラグランジュ的な視点を海洋モデルに導入した。開発したプログラムコードは特定の用途に特化したものではなく、可能な限り汎用性を重視しているため、様々な応用が可能である。

本研究期間においては洪水時の河川水に含まれる懸濁物質の影響評価等に適用したが、他にも例えば海洋ゴミの輸送・集積に関する研究など様々な応用が考えられる。

開発した数値モデルコードは広く海洋研究コミュニティに公開している。

研究成果の概要(英文)：A comprehensive and multi-purpose particle tracking framework coupled with an ocean circulation model is developed. The model developed in the present study uses "online" coupling so that the Eulerian fluid phase and Lagrangian particles can dynamically interact each other.

This newly developed Eulerian-Lagrangian hybrid ocean modeling framework was applied to studies on the effects of suspended sediment matter in riverine discharge, water mass tracking in the Pacific ocean, tracking of trajectories of eggs/larvae and their exposed environment for fisheries species.

研究分野：海洋物理学・環境動態

キーワード：数値海洋モデル 粒子追跡法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋物理のみならず、生物地球化学や水産資源研究においても数値海洋モデルが果たす役割は大きい。特に近年は双方向ネスティング等の高度な数値計算技法を駆使し、現場直接観測や衛星観測データと直接比較し得る時空間精度での循環場の再現が可能となりつつある。これをうけ、海洋循環モデルにトレーサーとして炭素や鉄分・栄養塩といった微量元素の輸送過程を組み込んだり、動物・植物プランクトンの基礎生産を扱う低次生態系モデルや、さらに回遊魚の成長や捕食関係までも扱う高次生態系モデルが開発され、それらを用いた応用研究が活発になされている。このような海洋中の様々な物質およびその形態・多様な生物種を個別に扱い、それらの間の相互作用を陽に扱うことを目指す試みは、一方でモデル予報変数の数、すなわち計算負荷の爆発的な増大をもたらし、効率的な計算手法が求められている。

2. 研究の目的

本研究は有限体積法に基づく数値数流体モデルとして構築された海洋循環モデルにラグランジュ粒子追跡法を組み込むことにより、海洋物質循環や海洋生態系に関する様々な用途に応用可能なオイラー-ラグランジュ型の包括的海洋モデリングフレームワークを構築することを目的としている。粒子追跡は個々の粒子の変遷(軌跡のみならず、粒子自身の特性や経験環境の履歴)を追跡できるため、物質循環や生態系を論ずる上で従来のオイラー型トレーサーより遥かに適している。加えて時空間的に不均一な状況を効率良く扱う事ができるため、対象となる物質の種類や形態・生物種の増大にも対応できる。

粒子追跡手法自体は特に水産科学分野において既に広く利用されているが、既往研究では流動場として衛星観測値や既に実施された海洋循環モデル出力を用いる「オフライン」型の粒子追跡が主であり、また計算コスト等の理由より粒子数が十分でない、あるいは水平2次元のみしか考慮できていないという問題もあった。本研究は海洋モデルに密に結合した粒子追跡コードを開発することで、流動場のシミュレーションと粒子追跡を同時に実施する「オンライン」粒子追跡を可能とする点が特徴である。最先端の大型計算機資源を活用して膨大な数の粒子を扱おうことを可能とするコード資産を開発することも本研究の重要な目的である。

3. 研究の方法

研究代表者・松村は従来より海洋非静力学モデル kinac を開発・運用してきており、本研究の数値モデル基盤としてもこれを用いる。松村は本研究課題に先立ち kianco にオンライン粒子追跡を導入することによって晶氷の凝結・融解とその熱輸送過程等を表現する新規的モデルを開発した(Matsumura and Ohshima, 2015)が、本研究課題ではその手法を発展・応用してより汎用的なモデリング基盤を構築した。コード実装時に特定の対象を想定せず、可能な限り汎用性を重視した。各粒子は近傍格子点での予報流速の線形内挿値と粒子毎に与えた流動場に対する相対速度(例えば浮遊堆積物であれば沈降速度、浮き魚であれば回遊速度/方向等)によって3次的に移流(4段の Runge-Kutta 法を用いた)し、また別途実効拡散係数を与えることで、酔歩による粒子拡散が実現される。粒子は任意の数のカテゴリーに分類でき、カテゴリー毎に任意に定義可能なプロパティ値を保持する。プロパティ値として上記の相対速度並びに粒径や年齢といった粒子個々の(動的に変化し得る)特性を与えるほか、毎タイムステップの経験環境(水温や餌密度等)を自動的に記録する用途にも用いることができる。技術的実装の特徴として粒子群を格子毎に連結リストによるデータ構造で表現し、それぞれの格子に存在する粒子を高速に特定可能とした。こ

これは例えば近傍粒子との衝突や相互作用を扱う上で重要である。また任意の場所・時間で粒子の生成消滅が可能となっており、例えば海底からの堆積物粒子の浮遊及び沈降による除去、生物資源を表現する粒子の産卵・死亡による個体の増減等を動的に表現できる。粒子情報の出力は特定時間間隔で全粒子の情報を書き出す他、指定した特定粒子について全てのタイムステップでの座標及びプロパティ値を逐次出力することが可能である。また動的に生成及び消滅させた粒子についてはそれぞれ生成・消滅時の座標及びプロパティ値が自動的に記録される。MPI 及び OpenMP を用いて並列化されており、大型計算機を用いて高い時空間解像度の流動場と膨大な数の粒子を扱える。また研究協力者山岸により GPU アーキテクチャへの移植も実施した。

以上の基盤を利用することで、最小限のコーディングで様々な個別用途への応用が可能となっている。例えば後に述べる浮遊堆積物を扱う粒子を導入する場合、プロパティ値として粒子を構成する物質の密度と粒径分布を与えれば Rubey の式によって沈降速度が規定され、また各格子に含まれる全粒子の水中重量の総和を見かけの海水密度や流動場の鉛直加速度に反映させることで、堆積物粒子と流動場との力学的な結合が容易に実現できる。粒子拡散は流動場から Smagorinsky スキーム等によって算出されて酔歩が適用され、着底した粒子はモデルから除去されてその時刻と場所が着底粒子の質量等とともに記録される。このような流体相とそこに多数分散している粒子の力学的な相互作用（分散混相流としての振舞い）を表現するにはオンライン粒子追跡が必須であり、海洋モデルが対象とする時空間スケールでそれを実現したことが本研究の大きな特徴である。

3. 研究成果

本研究課題の成果は、上で述べた汎用オンライン粒子追跡を組み込んだ海洋数値モデリング基盤の開発と、それを用いた個別の応用研究に分けられる。前者については、成果物としてコードを公開し、さらなる発展・応用を推進している。また粒子追跡コードについては、気象庁気象研究所が開発運用する海洋大循環モデルである MRI.com に移植された(中野ら, 2019)。

開発した数値モデル基盤の具体的な応用研究の成果として、まず上でも例を挙げた浮遊堆積物 (suspended sediment matter, SSM) をオンライン粒子追跡によって表現した研究を紹介する。浮遊堆積物は主に出水時の河川水に多く含まれ海洋に供給されるが、出水時の直接観測が困難なため定量的な実態は未だ未解明である。具体的な研究対象海域として現場観測が実施されている由良川河口域とグリーンランド北西部の Bowdoin フィヨルドを選定し、それぞれ数値シミュレーションを実施した。前者においては粒径分布や SSM 密度を様々に変えた感度実験を実施し、SSM の存在が河川水の広がり及び循環に与える影響を調査した (Hoshiba et al., 査読中)。後者では現地及び衛星による濁度観測とモデル粒子の輸送過程を比較し、高濁度の氷河融解水が (衛星からは観測困難な) 亜表層を外洋に向かって広がる様子を再現した(松村ら, 2017)。これらの研究では対象とする河川水/融解水の SSM 含有量が (たとえ出水時においても) それほど多くないため、SSM が直接流動場に与える影響は軽微であったが、モデルで表現された粒径毎の粒子沈降域と現場の堆積物サンプルとの直接比較が可能となり、開発したモデルの有用性を確認できた。今後はより大量の SSM を含有する大河川を対象とし、特に SSM による河川水の見かけの密度が海水密度を上回る hyperpycnal 流と呼ばれる極端現象をターゲットに研究を発展させる予定である。また SSM は陸起源の栄養塩や微量元素を海洋に供給する一方、遮光によって生物

生産を抑制する効果を持つと考えられる。本研究で開発したモデル基盤はそのような物理場と生態系を含む複雑な相互作用を直接扱うことが可能であり、今後の発展的研究が期待できる。

次にモデル基盤をより広い時空間スケールに適用した例として、東北マリンサイエンス事業と連携して実施した三陸リアス海岸を解像するダウンスケーリングモデルの成果を紹介する。同事業では三陸沿岸域の水産業に資する海洋数値モデルの構築を目指している。我々は本研究課題の成果物である粒子追跡パッケージが結合された非静力学海洋モデルを用いて三陸沖沿岸全域を約 300m の格子間隔で解像する非静力学ダウンスケーリングモデルを構築し、2013 年 9 月を対象に三陸沿岸の各湾から粒子を移流させる実験を実施した。各湾を始点とする粒子の一部が潮汐やサブメソスケールの渦によって南方の近傍湾に到達・滞在していることから、湾間で水（及びそこに含まれる物質や生物）が頻繁に交換されている可能性を指摘した。今後はより長期・広範囲の実験を行いつつ、各湾で採取された個体の遺伝子解析等による検証を合わせて実施することで当該海域における生物資源とその変動に関して研究を進展させる予定である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

松村義正 大橋良彦 青木茂 杉山慎, 氷河融解水を起源とする高濁度水ブルームの数値モデリング, *低温科学*, **75**, 2017.

〔学会発表〕(計 6 件)

Matsumura, Y., Y. Ohashi, S. Aoki and S. Sugiyama, Modeling turbid meltwater plume and associated sediment transport, IGS International Symposium on Interactions of Ice Sheets and Glaciers with the Ocean, 2016.

Yamagishi, T. and Y. Matsumura, GPU Acceleration of a Non-Hydrostatic Ocean Model with Lagrangian Particle Tracking, SC16: The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2016.

Matsumura, Y., Modeling flazil ice dynamics and thermodynamics by using Lagrangian particle tracking, The Arctic Science Summit Week 2017, 2017.

Matsumura, Y. A particle-in-cell modeling framework for simulating riverine and oceanic suspended sediment transport, JPGU-AGU joint meeting 2017, 2017.

Hoshihara, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, Y. Yamashita, Simulation on the Effects of Suspended Sediment Matters Induced by High Riverine Discharge on Coastal Mixing, Asia Oceania Geosciences Society 14th Annual Meeting, 2017.

Yamagishi, T., Y. Matsumura and H. Hasumi, Multi-GPU Accelerated Non-Hydrostatic Numerical Ocean Model with GPUDirect RDMA Transfers, Supercomputing Conference 2018, 2018

〔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〕

非静力学海洋数値モデル kinaco (粒子追跡パッケージ含む) 公開 git リポジトリ URL
<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/ymatsu/kinaco.git/>

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：干場 康弘

ローマ字氏名： (HOSHIBA Yasuhiro)

研究協力者氏名：山岸 孝輝

ローマ字氏名： (YAMAGISHI Takateru)

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。