

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04059

研究課題名(和文) 日本近海を網羅する高解像度粒子追跡データベースの構築

研究課題名(英文) Development of a high-resolution particle tracking system around Japan

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：日本列島近海全域を対象としながら約500 m 格子という高い解像度の数値海洋モデルを構築し、約1年間の数値シミュレーションを実施した。得られた高解像度流動場を用いて、特定の対象に限定しない網羅的な粒子追跡実験を実施し、膨大な数の粒子の軌跡及び経験・曝露環境を記録した。これによりサブメソスケール微細構造や複雑な海岸地形が、水塊や溶存・浮遊物質の輸送・拡散過程に及ぼす影響をラグランジュ的に追跡することが可能となった。様々な応用研究への活用を目的に、粒子追跡データのポストプロセスによって任意の日時・場所を指定すると該当する粒子群の軌跡・経験履歴を即時に取得・可視化できるシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海水中の溶存・浮遊物質の輸送・拡散過程の研究では粒子追跡実験が広く用いられているが、その精度は流動場の格子解像度に依存し、対象領域の広さとトレードオフの関係にある。本研究では日本近海全域を対象としながら約500m格子間隔という従来にない高い解像度での海洋流動場シミュレーションを実現し、10億を超える膨大な数の粒子の軌跡・経験環境を記録することに成功した。本研究で開発したモデリングシステム及びラグランジアン粒子データセットは、日本沿岸及び北西太平洋域での水産資源(卵や幼生・仔稚魚)や人為起源物質(プラスチック粒子や漂流ゴミ等)の輸送・拡散過程の解明に大きく貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：A high-resolution numerical ocean model of 1/180 degree horizontal-grid spacing covering the entire sea near the Japanese archipelago was developed. Comprehensive particle-tracking experiments were carried out using the simulated high-resolution flow field to record the trajectories and exposed environments of all particles for one year integration period. The obtained Lagrangian data of a huge number of particles enable us to qualitatively and quantitatively analyze the effects of micro-scale flow structure on the transport and diffusion of water mass and dissolved/suspended materials. For various applied research, we have also developed a postprocessing system that can immediately present and visualize the trajectory and experience history of the corresponding particles by specifying an arbitrary time and space.

研究分野：環境動態解析

キーワード：粒子追跡実験 数値海洋モデル 北西太平洋 サブメソスケール 水平渦拡散係数

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋中の溶存/浮遊物質の輸送・拡散過程を解析する手法として、衛星による海面高度データや現場観測を同化した再解析海洋流動場を用いた粒子追跡実験が広く活用されている。特に近年は社会的関心の高いマイクロプラスチック粒子や水産資源の卵・仔稚魚輸送に関して多くの応用研究成果が報告されている。ただし、粒子追跡実験の精度は用いる海洋流動場に大きく依存する。一般に数値シミュレーションの格子解像度と対象領域の広さ及び積分期間の長さはトレードオフの関係にあるため、広域・長期を対象とする研究では流動場の格子解が荒く、地形と流れの相互作用やサブメソスケール以下の渦活動に起因する輸送や拡散の効果が十分に反映されない。逆に特定の湾域のみを対象とする場合はそれらを再現できるものの、遠方からの輸送や連続性を扱うことができない。また、粒子追跡では格子スケール以下の乱流混合による拡散は乱数を用いた酔歩で表現されるが、粒子数が少ないと誤った結論を導く恐れがある。これらの問題に対処するには流動場の精度(すなわち格子解像度)と十分な積分領域・期間を両立しつつ、代表性に問題が生じないよう大量の粒子を扱う必要があるが、当然要求される数値計算コストは大きくなる。

既往の粒子追跡を用いる応用研究粒子は流れに影響を与えないパッシブトレーサーとして扱われており、遊泳等の粒子個別の振舞いが無視できる場合には、共通設定での粒子追跡実験結果を様々な対象に適用できる。高解像度流動場を用いて網羅的な粒子追跡実験を実施し、得られた結果を再利用可能な形式で共有できれば、個々の応用研究で粒子追跡実験を駆動する負担と計算コストを大きく削減することが期待できる。

2. 研究の目的

粒子追跡手法を用いる既往研究の対象の多くは、粒子は流動場に直接影響を及ぼさず、背景流動場に受動的に移流・拡散されるパッシブトレーサーとして扱っている。この場合、理想的にはあらゆる時空間格子を始点に粒子追跡計算を実施して、各粒子の軌跡ならびに経験環境履歴を保存しておけば、個々の応用研究で再計算を実施することなくその軌跡・経験環境履歴の復元が可能である。本研究は日本近海・北西太平洋域表層・1年間の時空間スケールを対象に、最先端の数値シミュレーションによる高解像度流動場を用いて網羅的な粒子追跡実験を行い、様々な応用研究に活用可能な粒子の軌跡・経験環境履歴のラグランジアンデータセットを作成すること、またそれを実現するモデリングシステムを構築することが目的である。

3. 研究の方法

本研究は数値海洋モデルによる日本近海の高解像度流動場の作成と、それを用いた網羅的粒子追跡実験の2段階で構成される。

(1) 日本近海高解像度数値モデルの構築

多重ネスティング手法を駆使して日本近海全域(118E-150E, 24N-47N)を1/180度(約500m)格子間隔で覆う日本近海高解像度モデリングシステムを構築し、2013年1月から11月期間の数値シミュレーションを実施した(図1)。現実的な黒潮流路を維持しつつ、粒子追跡実験に直接影響を与える表層の渦活動や地形と流れの相互作用等による微細構造を解像するため、水深200m以深でのみ水温・塩分を再解析値に緩和している。当シミュレーションによって得られた表層流動場や海面水温分布は地形による擾乱やフロント域での活発な渦活動による微細構造を従来にない解像度で表現しており(図2)、衛星海面水温画像との比較においてもその精度が確認できた。潮汐振幅及び位相も検潮所での潮位観測と整合している。粒子追跡実験に潮汐による影響を正しく反映させるため、全積分期間にわたり3次元流動場・水温塩分・海面昇降を1時間間隔で出力した。

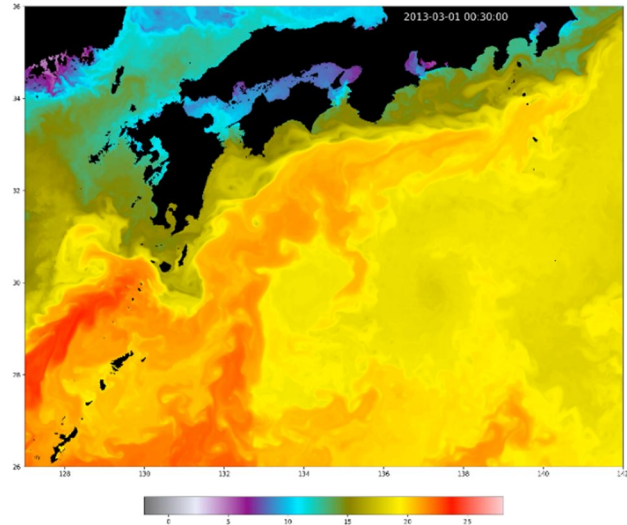
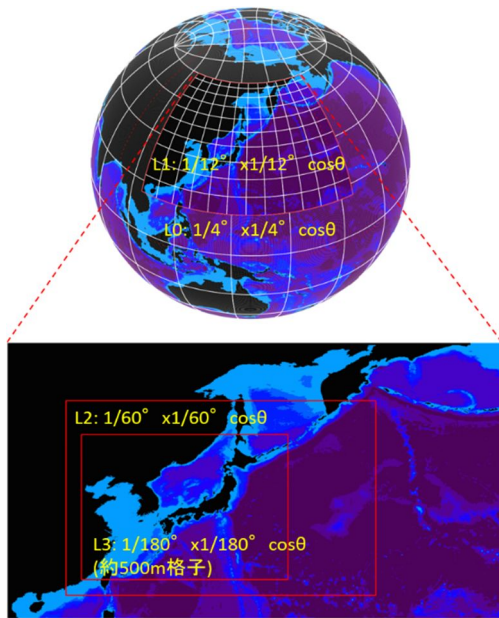


図 1: 日本近海高解像度モデリングシステム 図 2: 1/180 度格子解像度で再現された海面水温

(2) 網羅的粒子追跡実験

本研究は粒子が表現すべき特定対象を事前に定めることなく、あらゆる時空間座標を始点として網羅的なラグランジュ追跡を行うことが目的であるが、現実的には利用可能な計算機資源およびデータストレージ容量の制約があるため、毎日 0 時に領域全域に一定間隔で粒子を投入する。まず 2013 年 1 月 1 日から 3 月 31 までの 90 日間、 2×2 格子に一個（およそ 1km 間隔、領域全域で 1 日あたり約 580 万個、合計で約 5 億個）の粒子を投入し、全粒子の軌跡と経験水温・塩分及び粒子座標での渦度を 1 時間間隔で記録した。ただしこの設定では 1 時間毎の高解像度流動場の読み込みが時間を要し、効率が悪化した。そこで読み込み時間短縮のため、あらかじめ流動場出力データを本来の $1/180^\circ$ 解像度から $1/60^\circ$ 解像度にダウンコンバートし、以後の粒子追跡に用いることとした。なお格子流体モデルでは 2~3 格子幅の構造はそもそも正当に表現され得ないので、このダウンコンバートによって流動場の精度や情報量が $1/60^\circ$ モデル相当にまで低下するわけではない。ダウンコンバート流動場を用いた粒子追跡実験では毎日 0 時に全表層格子（約 1.5km 間隔）に粒子を投入した。1 月 1 日から 11 月 30 日まで流動場データの全期間の粒子追跡を実施し、約 8 億の粒子軌跡及び経験環境を 1 日間隔で粒子保存した。ただし、海面に浮遊して移流される物質の追跡へ適用する場合にはストークスドリフトの影響が無視できないため、欧州中期予報センター (ECMWF) による ERA-5 波浪解析データに基づくストークス速度を与えた実験も別途実施した。

4. 研究成果

網羅的粒子追跡実験によって得られた膨大な粒子の軌跡・経験履歴データをもとに、任意の領域・期間を指定することにより該当粒子を検索し、粒子群の軌跡を即座に取得・可視化するポストプロセスシステムを構築した。図 3, 4 はそれぞれ台湾北部及び津軽海峡内部を始点とする粒子群の軌跡について、経過日数を色で可視化したものであり、前者では黒潮、後者では津軽暖流系で移流される溶存・浮遊物質の経路と遠方での分散の様相を得ることができる。図は示さないが指定した時空間範囲に存在する粒子がどこからどのような経路で到達したかの逆追跡や、指定時空間範囲を始点とする粒子がある瞬間にどのような分布をとるか（粒脈線に相当）についても直ちに可視化、該当粒子の履歴を取得できる。今後は浮海洋ゴミや水産資源など様々な対象への応用を予定している。

領域全域・全期間を始点とした網羅的粒子追跡は、離散化格子によるオイラー形式の流動場をラグランジアン形式に変換することに相当する。近接した始点をもつ粒子群が時間とともにどのように離れていくか、すなわち粒子群を囲む包絡線の伸長と変形の履歴からサブメソスケ

ールの渦活動に起因する粒子拡散係数の分布を算出した。(図5)。離岸後の黒潮流流域で特に大きな値を取ることが確認でき、得られた定量的な知見はサブメソスケールプロセスを解像しない粗解像度モデルでの拡散パラメタリゼーションに応用できる。

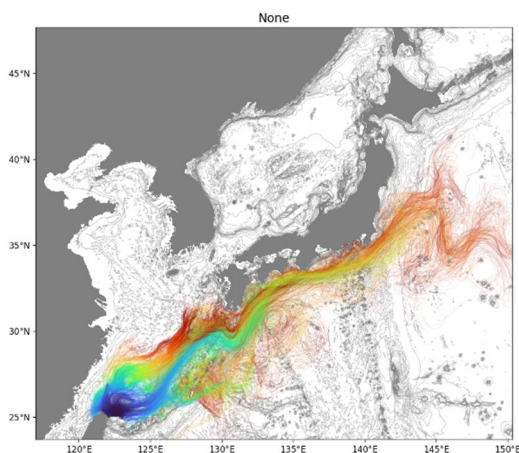


図3: 台湾北部を始点とする粒子群軌跡

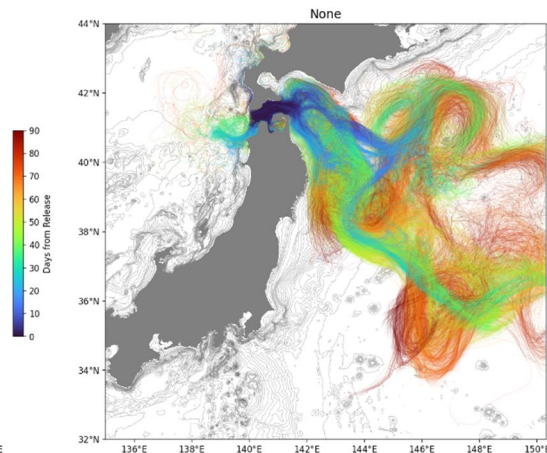


図4: 津軽海峡を始点とする粒子群軌跡

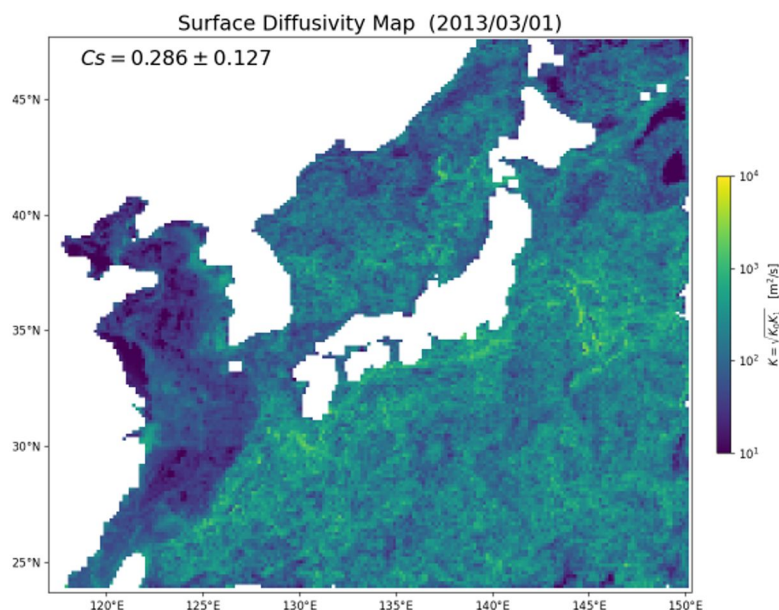


図5: 網羅的粒子追跡データから見積もった10kmスケールの渦拡散係数分布

前項(1)によるモデリングシステムは日本列島全体をカバーする広域モデルとしては従来にない高い解像度での海況シミュレーションを実現している。既往の高解像度モデリングは主に沿岸域を対象に実施されてきたのに対し、当システムは沖縄諸島を含む日本列島全域のみならず、大陸斜面から北西太平洋までをカバーしており、本研究の主題である粒子追跡だけでなく様々な用途に応用可能である。本研究遂行中は2013年度のみ積分に留まったが、今後より長期の積分を実施することで、サブメソスケール/微細構造に関する海洋物理研究や海洋生態系モデルの基盤としての応用が期待できる。前項(2)で開発した粒子追跡システムも流動場モデルとは独立に任意の対象に応用でき、既に北太平洋中層水の3次元逆追跡[1]、全球深層循環の経路と滞留時間スケール解析[2]等に既に活用されている。

参考文献:

- [1] Nakano, H., Y., Matsumura 他5名 (2021): Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137°E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM, *Journal of Oceanography*, **77**, 283-305.
- [2] Kawasaki, T., Y. Matsumura and H. Hasumi (2022): Deep water pathways in the North Pacific Ocean revealed by Lagrangian particle tracking. *Scientific Reports*, **12**, 6238

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 2件）

1. 著者名 Kawasaki T., Matsumura Y., Hasumi H.	4. 巻 12
2. 論文標題 Deep water pathways in the North Pacific Ocean revealed by Lagrangian particle tracking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-022-10080-8	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 Hoshiba Yasuhiro, Hasumi Hiroyasu, Itoh Sachihiko, Matsumura Yoshimasa, Nakada Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Biogeochemical impacts of flooding discharge with high suspended sediment on coastal seas: a modeling study for a microtidal open bay	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-021-00633-8	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 Nakano Hideyuki, Matsumura Yoshimasa, Tsujino Hiroyuki, Urakawa Shogo, Sakamoto Kei, Toyoda Takahiro, Yamanaka Goro	4. 巻 77
2. 論文標題 Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137°E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 283 ~ 305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00573-3	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松村義正 坂本天 他6名
2. 発表標題 高解像度粒子追跡モデルを用いた大槌湾内でのアワビ幼生の輸送及び着底分布の推定
3. 学会等名 JpGU meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Matsumura, Y., S. Ito and C. Sasak
2. 発表標題 Estimating vertical distribution of microplastic particles under wind-driven and Langmuir turbulence by Large Eddy Simulation
3. 学会等名 JpGU meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野英之 松村義正 他5名
2. 発表標題 粒子追跡法と渦解像モデルを用いた,東経137度に到達する水塊に対する中規模渦の働き
3. 学会等名 海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsumura, Y. and T. Endoh
2. 発表標題 Modeling asymmetric sediment transport caused by slope induced tidal straining
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hoshiba, Y., Y. Matsumura 他4名
2. 発表標題 Interactive effects between suspended sediment matter and physical processes induced by high riverine discharge on a microtidal open bay
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

非静力学数値海洋モデルkinaco ソースコードリポジトリ
<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/ymatsu/kinaco.git>

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
研究分担者	黒木 聖夫 (Kurogi Masao) (40512843)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報基盤センター)・准研究副主任 (82706)	

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
---------	---------