

# 粒子追跡モデルを用いた相模湾及び 駿河湾周辺の物質輸送過程の解析

井上孝義<sup>1</sup>・増永英治<sup>2</sup>・小碓大地<sup>3</sup>・Xu Zhang<sup>4</sup>・内山雄介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>非会員 茨城大学 大学院理工学研究科都市システム工学専攻 (〒316-0036 日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail:20nm805f@vc.ibaraki.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 茨城大学助教 地球・地域環境共創機構 (〒316-0036 日立市中成沢町 4-12-1)

E-mail:eiji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究グループ  
(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>4</sup>非会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail:zx563840766@163.com

<sup>5</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail:uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

本研究では、2段ネスティングによりダウンスケーリングした水平空間解像度1 kmの領域海洋モデルROMS-L2及び粒子追跡モデルを用いて、相模湾及び駿河湾周辺の物質輸送の評価を行った。解析結果から、相模湾から湾外に流出した粒子の多くは北東方向に輸送され、一方駿河湾では主に南西方向に粒子が輸送されることが分かった。水平拡散は相模湾及び駿河湾の流出率を上昇させることが分かった。また、ランダムウォークモデルにより付加された水平拡散 ( $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ ) に比べサブメソスケール渦に伴う鉛直移流の方が湾内から湾外への物質輸送と拡散に大きな影響を与えることが分かった。領域海洋モデルによって再現されている鉛直移流は、両湾において地形的閉鎖性を緩和しており、その傾向は相模湾の方がより顕著に現れていた。潮汐は、相模湾において粒子の南西方向の輸送を抑制し、駿河湾においては粒子の北東方向の輸送を抑制及び西側への輸送を促進する働きがあった。

**Key Words :** material transport, ROMS model, 3-D Lagrange particle tracking model, The Kuroshio, Tides

## 1. はじめに

日本本州南岸海域は黒潮や潮汐が複合的に影響する海域である。相模湾及び駿河湾は、日本本州南岸に位置する代表的な湾である。黒潮は、最大流速 2 m/s 以上にもなる海流であり、日本本州南岸海域を南西方向から北東方向に流れている。特に相模湾内へ間欠的に流れ込む黒潮暖流は相模湾表層の流動構造や沿岸域と外洋間の物質輸送に大きな影響を与えており<sup>1)</sup>、本州沿岸の海洋環境の形成に重要な役割を果たしていると考えられている。海洋内の栄養塩や稚魚の輸送に黒潮は多大な影響を与えており、日本南岸の内湾に栄養塩を輸送している<sup>2)</sup>。相模湾内に生息する稚魚や植

物プランクトンの分布は、黒潮の影響を強く受けている<sup>3)4)</sup>。相模湾沖に位置する伊豆大島周辺の海域は、外洋と直接接しているにも関わらず、複雑な地形の影響で形成されるサブメソスケールの渦運動により他の海域と比べて閉鎖性が高いと報告されている<sup>5)</sup>。また黒潮の影響を受ける沖縄本島の岸近傍で放流した粒子の多くは強い岸沖方向の分散を伴わず、岸から 10 km 程度までの比較的浅い海域を中心に浮遊することが報告されている<sup>6)</sup>。このように日本本州南岸海域と黒潮を対象とした解析は多く行われているものの相模湾及び駿河湾の物質輸送と湾と外洋間における物質輸送の知見は乏しい。相模湾と駿河湾はそれぞれ豊かな生態系を築いており、その大きな要因として黒潮、

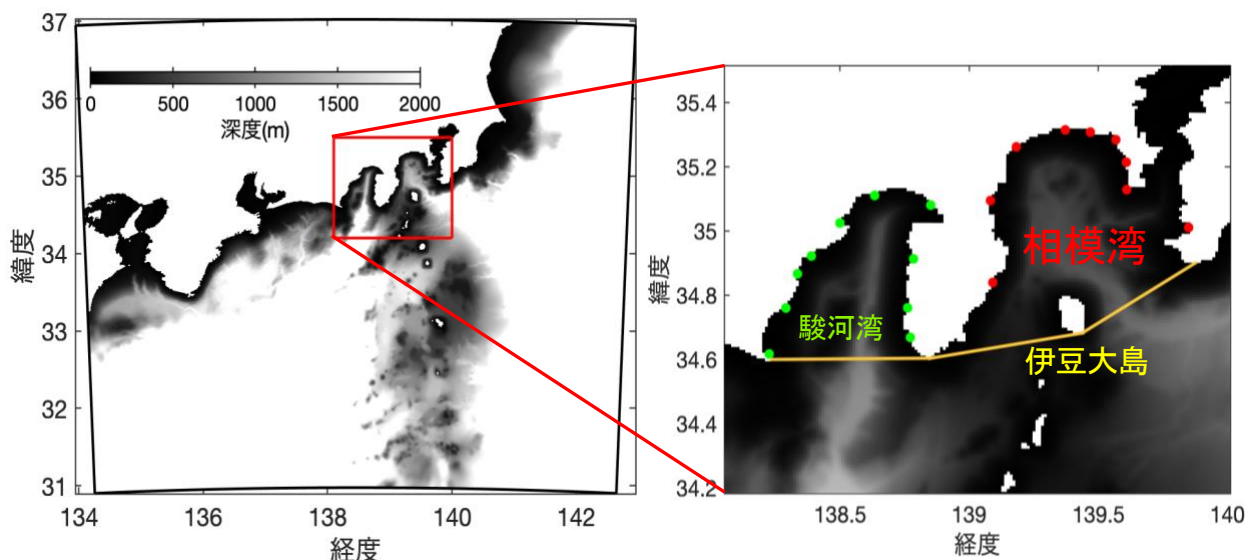


図-1 領域海洋モデルの解析範囲と放流粒子の初期位置  
(赤点が相模湾, 緑点が駿河湾の粒子放流の初期位置)

表-1 ROMS-L2 モデルの解析条件

解析条件	値
計算期間	約2年間(助走期間含む)
解析期間	夏季・冬季の各30日間
境界条件	ROMS-L1(3km)
格子数	674×802×40層
水平空間解像度	1km
海面風応力	JMA GPV-MSM 日平均気候値
海面熱フラックス	COADS 月平均気候値
一級河川流量	日本河川協会雨量・流量データベース(31本, 月平均気候値)
潮汐	TPXO7.2
海底地形	JEGG500+SRTM30

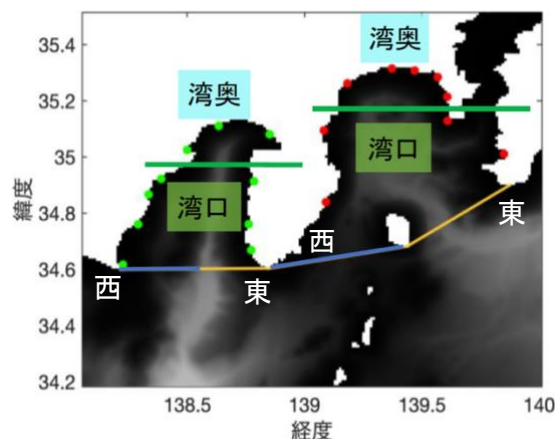


図-2 湾口東側及び西側の定義と湾奥・湾口の定義  
(青色線が西側, 橙色線が東側)

潮汐の影響が挙げられるが, 複雑な物理構造を伴う輸送プロセスが生じており, 詳細な物質輸送過程は明らかとなっていない. そこで本研究では相模湾及び駿河湾を対象に領域海洋モデル ROMS と粒子追跡モデルを用いた解析により, 黒潮や潮汐が相模湾及び駿河湾の物質輸送に与える影響について明らかにすることを目的とした.

## 2. 研究手法

### (1) 海洋数値モデル

本研究では, JCOPE2流動再解析値<sup>8)</sup>から2段ネスティングによりダウンスケーリングした水平空間解像度1kmの領域海洋モデルROMS-L2モデルを用いて, 相模湾及び駿河湾の物質輸送の評価を行った(図-1, 表-1). オフラインネスト手法によって流動再解析値JCOPE2の流域の気候値解析結果を1段ネストROMS-L1モデルの初期及び境界条件とした<sup>7)</sup>. 1段ネスティ

ングROMS-L1モデル領域は東西2358km×南北2598kmで構成されており, 格子数は786×866×鉛直32層で構成されている. また, L1モデルからダウンスケーリングした2段ネスティングROMS-L2モデル領域は東西802km×南北674kmで構成され, 格子数は802×674×鉛直40層となっている<sup>9)</sup>. 海面風応力は, 気象庁GPV-MSM再解析値の日平均気候値を外力として与えた. 表面熱, 淡水, および放射フラックスは, NOAA-COADSの月平均気候値を外力として与えた<sup>10)</sup>. 河川水流入については, 31箇所の一級河川から淡水を流入させた<sup>11)</sup>. ROMSを用いた流動解析場の計算期間は約2年間とし(約1年間の助走期間含む), 粒子追跡はこの内夏季及び冬季の2期間を解析対象とした. 流動解析結果を元に, 1年で最も水温が高い30日間を夏季, 最も水温が低い30日間を冬季と定義して解析期間の設定を行った. これま

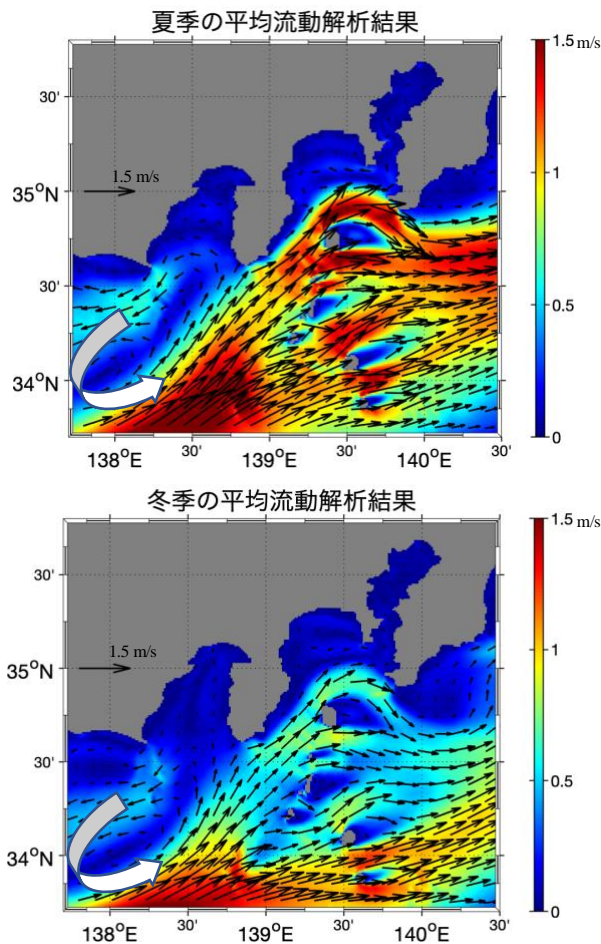


図-3 潮汐を考慮した平均流動解析場  
(上段：夏季，下段：冬季)

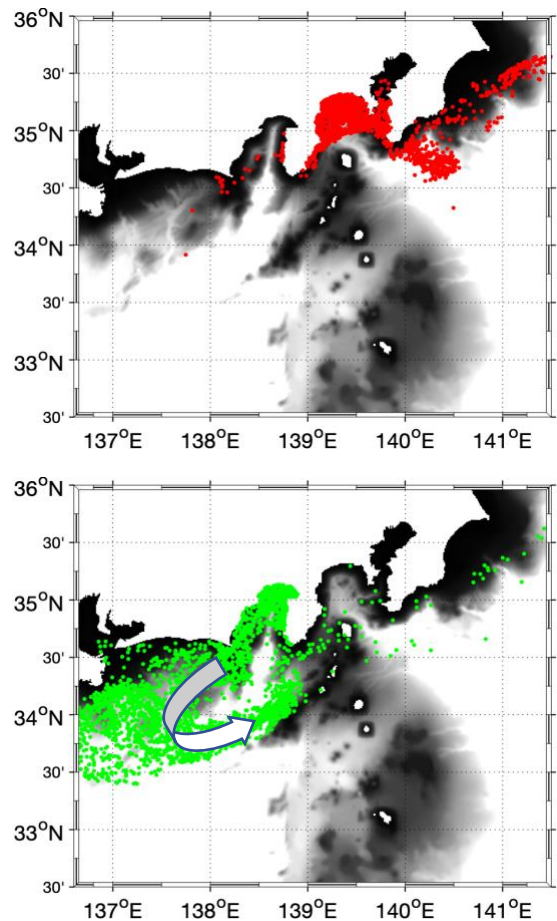


図-4 潮汐を考慮した夏季の放流15日経過後の  
粒子追跡結果 (上段：相模湾，下段：駿河湾)

での研究事例により，本モデルの日本周辺海域における計算精度は十分に担保されている<sup>12)</sup>。

## (2) Lagrange粒子追跡モデル

本研究の粒子解析では，ROMS-L2モデル出力を用いてLagrange粒子追跡モデルを用いた。この粒子追跡モデルは過去の研究により十分に検証が行われているモデルである<sup>13) 14)</sup>。放流粒子の初期分布は直径1 kmの円形と定義し，粒子の初期位置は相模湾内に9箇所，駿河湾内に10箇所，それぞれ主要な河川や港に設置した(図-1)。各リリースパッチの水深2 mの鉛直位置に1箇所につき約334個の粒子を等間隔に配置し，各リリースパッチから1時間間隔で24回粒子を放出した。したがって，解析に用いた粒子の総数は約 $1.52 \times 10^5$ 個である。また，追跡期間は夏季冬季ともに30日間とした。ROMSモデルの出力時間間隔は1時間，Lagrange粒子追跡モデルの時間刻み $\Delta t$ は200秒に設定した。粒子がROMS-L2領域外へ流出した場合，その粒子の追跡はその後行わないものとした。物質輸送に対する季節の影響と潮汐の影響を評価するため，夏季と冬季の流動再解析値を

用いた場合，潮汐を考慮した場合と考慮しない場合の計4ケースの粒子追跡計算を実施した。さらに水平拡散及び浮力による効果を検証するために，ランダムウォーク(水平拡散係数： $D_H = 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ )を追加した解析，並びに水平移流と鉛直移流の両方を考慮した3次元粒子と海面に浮かぶ漂流物を想定した水平移流のみを考慮する表層粒子を用いた解析も夏季を対象に実施した。水平拡散係数( $D_H = 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ )は拡散スケールのダイアグラム<sup>15)</sup>を元にROMS-L2モデルの水平空間解像度(1 km)と照らし合わせて決定した。

## 3. 解析結果

### (1) 流動解析結果

潮汐を考慮した場合の夏季及び冬季の30日平均流動解析場を図-3に示す。解析の結果，夏季の平均流動解析結果では相模湾湾口部の北緯34.5°以北にも流速1.0 m/sを超える速い流れが存在しているが，冬季の平均流動解析結果では相模湾湾口部での強い流れは発生していなかった(図-3)。この結果から，夏季は冬季

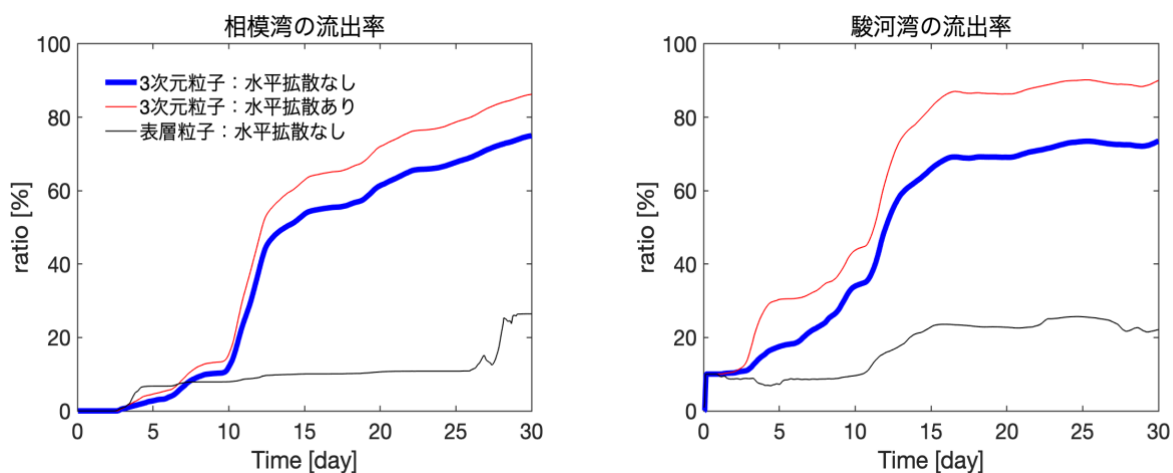


図-5 潮汐を考慮した夏季における流出率(左：相模湾，右：駿河湾)

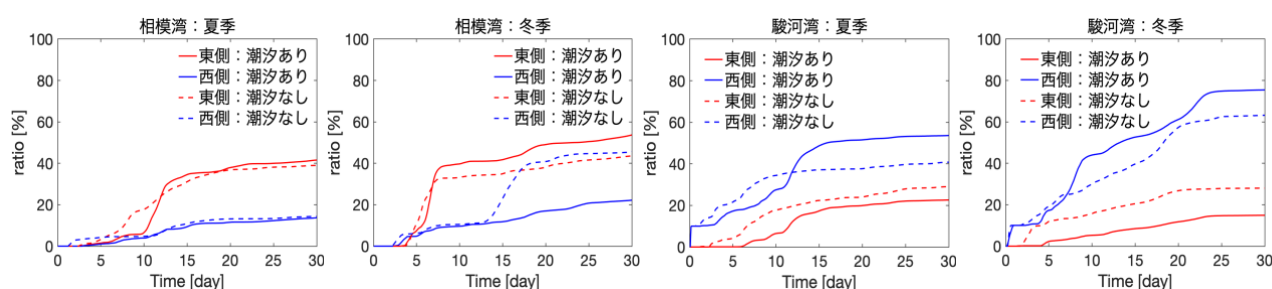


図-6 相模湾の3次元粒子流出率(左：夏季，右：冬季)

図-7 駿河湾の3次元粒子流出率(左：夏季，右：冬季)

よりも黒潮が接岸していたため、相模湾及び駿河湾周辺の流速が比較的速くなっていたと言える。また、黒潮の一部が伊豆半島を境に分岐しており、相模湾では1.0 m/s程度の強い北東方向の流れが発生し、駿河湾湾口では弱い南西方向の流れが発生していることが分かった。駿河湾湾口の南西方向の流れは、その後黒潮に再び合流しており、駿河湾の西側に位置している遠州灘付近で低圧性の渦を発生させていた。

## (2) Lagrange粒子追跡結果

潮汐を考慮した夏季の放流15日経過後の3次元粒子追跡結果を図-4に示す。図-4上段の赤点は相模湾のリリースパッチから放たれた粒子を示しており、図-4下段の緑点は駿河湾のリリースパッチから放たれた粒子を示している。解析の結果、相模湾から湾外に流出した粒子の多くは北東方向に輸送されていた(図-4上段)。駿河湾では主に粒子が南西方向に輸送されており、その後遠州灘付近に発生している低圧性の渦に取り込まれ、黒潮に合流することで北東方向に輸送されていた(図-4下段)。両湾の結果とも図-3に示されている平均流動解析場で、黒潮によって形成された湾内および湾口付近の流れの影響を強く受けたものと言える。

## 4. 粒子の流出率

### (1) 表層粒子と3次元粒子の流出率

図-1の橙色線よりも沿岸側を「湾内」、外洋側を「湾外」と定義し、湾外に流出した粒子の割合を流出率とした。水平拡散と鉛直移流が物質輸送に与える影響の違いを調査するために、潮汐を考慮した夏季において、水平拡散無しの表層粒子、水平拡散無しの3次元粒子、水平拡散有りの3次元粒子の3ケースで流出率を求めた(図-5)。両湾における3次元粒子では特に10日経過後から15日経過後にかけてまとまった粒子の流出があったが、表層粒子では30日間通して比較的緩やかな流出傾向を示した(図-5)。このことから鉛直移流を伴わない表層粒子は、3次元粒子に比べ湾外に輸送されにくいことが分かった。また、水平拡散の有無による3次元粒子流出率の結果を比較すると、12日経過以降に差が大きくなっていった。水平拡散を考慮することで30日経過後において相模湾では12%、駿河湾では15%流出率が上昇していた(図-5)。3次元粒子における水平拡散の有無と表層粒子の流出率を比較すると、水平拡散よりも、領域海洋モデルで表現されているサブメソスケール渦等に伴う鉛直移流の効果が物質輸送に大きな影響を与えていると言える(図-5)。

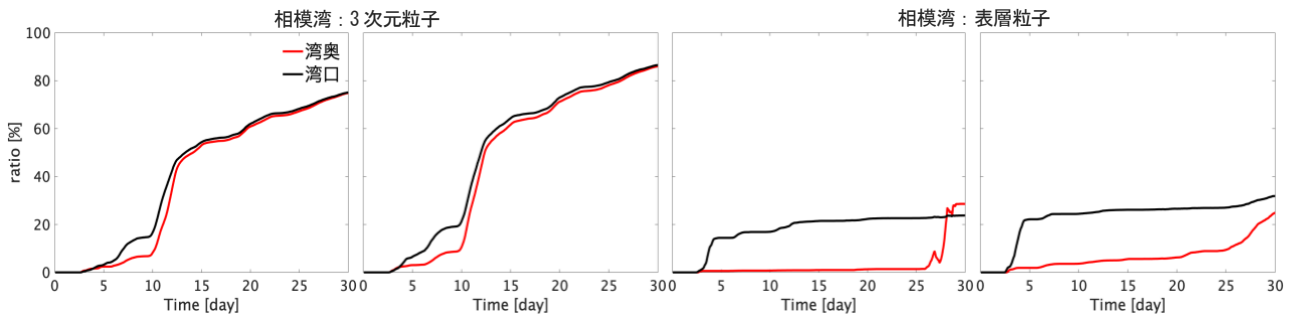


図-8 相模湾における湾奥側及び湾口側の3次元粒子流出率  
(左) 水平拡散無し, (右) 水平拡散有り

図-9 相模湾における湾奥側及び湾口側の表層粒子流出率  
(左) 水平拡散無し, (右) 水平拡散有り

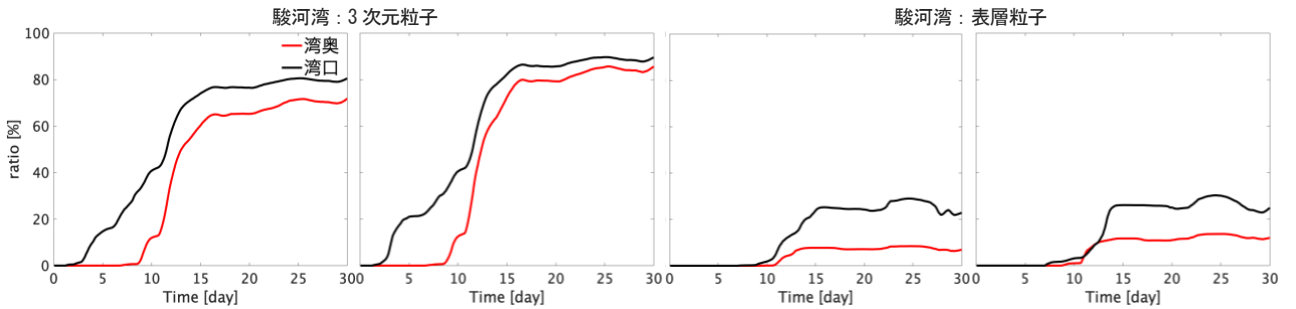


図-10 駿河湾における湾奥側及び湾口側の3次元粒子流出率  
(左) 水平拡散無し, (右) 水平拡散有り

図-11 駿河湾における湾奥側及び湾口側の表層粒子流出率  
(左) 水平拡散無し, (右) 水平拡散有り

## (2) 湾口西側及び東側から粒子の流出率

東西方向の流出の傾向を調査するために、湾口を東側（橙色線）と西側（青色線）にグループ分けして解析を行った（図-2）。東西それぞれの領域を通過した3次元粒子の流出率を図-6、図-7に示す。相模湾では伊豆大島を境に東西に分け、駿河湾では経度138.548°を境に東西に分けた。相模湾では東側からの粒子の流出が西側よりも2.7倍多く、駿河湾では西側からの粒子の流出が東側よりも3.4倍強いことが分かった（図-6、図-7）。潮汐は湾からの全流出率には強く影響しなかったが、東西の流出率に顕著な影響を与えており、相模湾では冬季に粒子の西側からの流出を強く抑制した（図-6）。駿河湾では、潮汐は夏季冬季ともに粒子の東側の輸送を抑制し、西側の輸送を促進していた（図-7）。このことは潮汐が湾内の物質輸送及び拡散に強い影響を与えていることを示唆している。

## (3) 湾口と湾奥部の粒子輸送

相模湾及び駿河湾の地形的閉鎖性と粒子の初期位置による輸送傾向を調査するために、リリースパッチの初期位置によって湾奥と湾口でグループ分けを行い（図-2）、各グループの流出率を求めた（図-8～図-11）。相模湾では緯度35.180°を境に湾奥・湾口に分け、駿河湾では緯度34.970°を境に湾奥・湾口に分けた。3次

元粒子を用いた解析において、水平拡散を考慮しない場合の結果と考慮した場合の結果を比較すると、両湾とも顕著な違いは見られず、同様な傾向を示した（図-8～図-11）。3次元粒子と表層粒子を用いた解析において、両湾ともに湾奥の方が残留しやすく湾口の方が流出しやすいという結果を示した（図-8～図-11）。しかし相模湾において、3次元粒子を用いた解析では湾奥と湾口の流出率の差は小さく、表層粒子を用いた解析ではその差が大きくなっていた（図-8、図-9）。この結果から、3次元モデルによって再現されている鉛直移流は、相模湾の地形的閉鎖性を緩和しており、相模湾内の物質拡散を促進していると言える。

一方駿河湾において、放流開始から初めて粒子が湾外へ流出するまでの湾奥と湾口の時間差は、表層粒子を用いた解析ではほとんどなかったが、3次元粒子を用いた解析では湾奥よりも湾口の方が約6日間早く湾外へ流出していた（図-10、図-11）。従って放流開始から10日経過後までのタイムスケールにおいて、3次元モデルによって再現されている鉛直移流は、相模湾とは対照的に湾奥と湾口の流出傾向を大きく乖離させ湾口からの物質流出を強く促進していた。このことは、相模湾と比較し駿河湾では湾奥と湾外との物質交換が抑制されていることを示唆している。

## 5. 結論

Lagrange 粒子追跡モデルを用いた相模湾及び駿河湾周辺海域における解析の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 相模湾及び駿河湾周辺海域において、夏季は冬季よりも黒潮が接岸していることが分かった。また、伊豆半島を境に分岐した黒潮の一部が駿河湾の西側に位置している遠州灘付近で低圧性の渦を発生させることが分かった。
- (2) 相模湾から湾外に流出した粒子の多くは北東方向に輸送され、一方駿河湾では主に南西方向に粒子が輸送されることが分かった。
- (3) 水平拡散は相模湾及び駿河湾の流出率を上昇させることが分かった。また、水平拡散よりも、鉛直移流の方が湾内から湾外への物質輸送に大きな影響を与えることが分かった。
- (4) 潮汐は、相模湾において粒子の南西方向の輸送を抑制し、駿河湾において粒子の北東方向の輸送を抑制及び南西方向の輸送を促進する働きがあった。
- (5) 領域海洋モデルによって再現されている鉛直移流は地形的閉鎖性を緩和し、その影響は相模湾の方が顕著に現れていた。

謝辞：本研究は科学研究費助成事業（18H03798, 19K20432）及び造船学術研究推進機構（REDAS）の助成を受けた。

### 参考文献

- 1) Kawabe, M. and M. Yoneno: Water and flow variations in Sagami Bay under influence of the Kuroshio Path. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol.43, pp.283-294, 1987.
- 2) 郭新宇: 東シナ海における外洋起源栄養塩の輸送量と

- 低次生態系への影響, 水環境学会誌, 第 34 巻, 第 9 号, pp.293-296, 2011.
- 3) Sassa, C., Kawaguchi, K.: Occurrence patterns of mesopelagic fish larvae in Sagami Bay, central Japan, *Journal of Oceanography*, 62, 143-153, 2006.
- 4) Shimode, S., Toda, T., Kikuchi, T.: Spatio-temporal changes in diversity and community structure of planktonic copepods in Sagami Bay, Japan, *Marine Biology*, 148, 581-597, 2006.
- 5) 木村和久, 増永英治, 小碓大地, 内山雄介: Lagrange 粒子追跡モデルを用いた伊豆諸島周辺海域の物質輸送及び拡散の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp.I\_211-I\_216, 2019.
- 6) 内山雄介, 小碓大地, 西井達也, 御手洗哲司: コネクティブティを用いた瀬戸内海全域における海洋生態系ネットワーク構造の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_1076-I\_1080, 2014.
- 7) Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams: The regional ocean modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, 9(4), pp.347-404, 2005.
- 8) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu: Water mass variability in the Western North Pacific detected in 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, 65, 737-756, 2009.
- 9) Masunaga, E., Uchiyama, Y., Suzue, Y., Yamazaki, H.: Dynamics of internal tides over a shallow ridge investigated with a high-resolution downscaling regional ocean model, *Geophysical Research Letters*, 45(8), pp.3550-3558, 2018.
- 10) Woodruff, S. D., R. J. Slutz, R. L. Jenne, and P. M. Steurer: A comprehensive ocean-atmosphere data set, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol.68, 1239-1250, 1987.
- 11) 公益社団法人 日本河川協会. “雨量・流量年表データベース(DVD)”. 日本河川協会. [http://www.japanriver.or.jp/publish/book/nenpyou\\_dvd.htm](http://www.japanriver.or.jp/publish/book/nenpyou_dvd.htm).
- 12) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol.122, pp.5046-5062, 2017.
- 13) 内山雄介, 宮川翼, 小谷瑛千花, 上平雄基: ラグランジュ粒子追跡による沖縄本島周辺海域における海洋生態系ネットワーク構造の高解像度数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I\_1291-I\_1291, 2018.
- 14) 小碓大地, 内山雄介, 御手洗哲司: 黒潮流路変動が瀬戸内海全域の幼稚仔分散過程に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I\_1231-I\_1236, 2015.
- 15) Okubo, A.: Oceanic diffusion diagrams. *Deep-Sea Research*, Vol. 18, pp. 789-802, 1971.

(Received March 17, 2021)

(Accepted July 22, 2021)

## TRANSPORT PROCESSES AROUND SAGAMI BAY AND SURUGA BAY USING A PARTICLE TRACKING MODEL

Takayoshi INOUE, Eiji MASUNAGA, Taichi KOSAKO, Xu ZHANG, Yusuke UCHIYAMA

This study investigated material transport and diffusion processes in Sagami Bay and Suruga Bay using the ROMS model with a 3-D Lagrange particle tracking model. Particles that flowed out from Sagami Bay were mainly transported to the north-east ward caused by the Kuroshio Current. For Suruga Bay, particles were mainly outflowed on the west side of the bay mouth and the out flowed particles were transported to the south-west ward due to a cyclonic eddies located off Suruga Bay. Vertical advective transport due to submesoscale eddies largely contributes to diffusive processes and particle transport toward offshore areas. Diffusions caused by the vertical advective term are much greater than that by horizontal diffusion ( $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ ) implemented by a random walk model. Transport from the inner part toward out of Sagami Bay is much higher for that of Suruga Bay when the vertical advective transport is considered. Tides suppressed south-west (north-east) ward transport in Sagami Bay (Suruga Bay) and enhanced south-west ward transport in Suruga Bay.