

粒子追跡モデルを用いた 黒潮から沿岸域への物質輸送過程の評価

増永 英治¹・木村 和久²・小裕 大地³・張 旭⁴・内山 雄介⁵

¹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

²非会員 鹿島建設(株) 東京土木支店(〒107-8477東京都港区元赤坂1-3-8)

E-mail: kimuraw@kajima.com

³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)

E-mail: kosako@p.mpat.go.jp

⁴非会員 神戸大学 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: zhangxu51876@gmail.com

⁵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

本研究は2段ネスティング領域海洋循環モデルROMSを用いた日本本州南岸海域における流動再解析値に対してLagrange粒子追跡を実施し、黒潮から沿岸域への物質の輸送過程を評価した。夏季には伊豆諸島周辺と沿岸域において渦運動が活性化し、冬季には黒潮流軸以南の海域において渦運動が活性化していた。黒潮が伊豆諸島の地形効果によって複数の分岐流を形成し、西方向へ分岐した流れが遠州灘において低気圧性渦を発生させ駿河湾への黒潮由来の物質の輸送を促進していた。一方東側へ流れる分岐流によって相模湾や房総半島沿岸域への物質輸送を発生させていた。冬季に比べ夏季の方が黒潮が接岸し沿岸域への黒潮からの物質輸送が顕著に現れていた。渦運動が活発化する冬季は鉛直方向の物質輸送が夏季に比べ強かった。また潮汐により渦運動等の擾乱が活性化することで黒潮から沿岸域への物質輸送が促進されることが示唆された。

Key Words : Kuroshio, Transport, Tides, Eddy, Numerical simulations, Particle tracking model

1. はじめに

日本沿岸海域、特に本州南岸の海域は、黒潮、渦、潮汐や内部波等の様々な物理現象が複合的に影響する海域である。黒潮は本州南岸海域を南西から北東に向かって流れ、日本沿岸海域に熱、物質や栄養塩等を輸送し北太平洋全体の海洋環境に強く影響している¹⁾。黒潮が鉛直混合を促進し植物プランクトンの分布に影響を与えることや²⁾、マイワシの稚魚が黒潮に輸送されることで成長速度が変化するということが知られ³⁾、黒潮は生態系にも強い影響を与えている。また近年環境問題として重要視されている海洋マイクロプラスチックの改善策を提言する上でも黒潮が影響する海域における物質輸送の評価は急務と言える。

急激に水深が浅くなる伊豆小笠原海嶺上では、潮汐流が強められ顕著な内部潮汐が発生することが知られ、内部潮汐が潮汐のエネルギーをトラップさせ強い物質の輸

送と混合を発生させている⁴⁾。伊豆諸島周辺では、潮汐による効果が運動エネルギーを30%程度増大させているという報告があり、黒潮と潮汐が干渉することで強い内部潮汐を発生させていることがわかっている⁵⁾。黒潮によって発生するメソスケール及びサブメソスケール渦によって物質輸送が強化され一次生産が強化されると言われている⁶⁾。このように日本本州南岸では黒潮や渦、潮汐等が複合的に影響し、複雑な物理構造を伴う輸送プロセスが生じているために詳細な物質や熱の輸送拡散過程についての知見が乏しい。したがって黒潮が影響する海域における沿岸域における黒潮に関わる物質輸送過程を評価することは重要と言える。

本研究では、黒潮や潮汐が強く影響を与える本州中部南岸海域を対象に黒潮から沿岸域へ輸送される物質の輸送過程を評価するために、Regional Ocean Modeling System (ROMS)⁷⁾を用いた2段ネスティング領域海洋モデルを構築した。このモデルの出力値を用いてLagrange中立粒

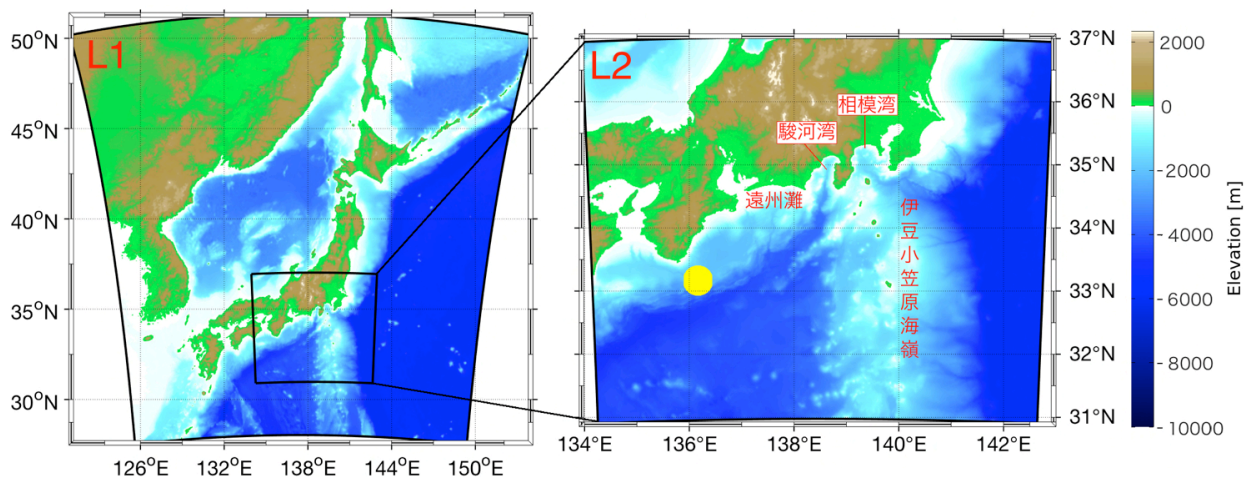


図-1 2段ネスト領域海洋モデルROMSの計算領域 (右L2領域内の黄丸は粒子の初期位置パッチを示す)

子計算を実施し、黒潮から沿岸域への物質輸送の再現を行なった。

粒子追跡計算は、L2領域のみで実施しL2領域外に粒子が移流した場合はその後の追跡を行わない。

2. 研究手法

(1) 領域海洋モデル

本研究では、日本本州沿岸海域における一般的な海洋環境を再現するために2008から2014年の7年平均したJCOPE2再解析値(日平均値)⁹⁾を境界条件とした領域海洋モデルROMSを用いた。2段ネスティングにより本州中部沿岸から伊豆諸島周辺海域を水平解像度1 kmで解像するモデルとし、東西802 km×南北674 km(格子数802×674)とした(図-1)。鉛直格子にはs-layerを採用し、鉛直格子数は40とした。海面風応力と海面熱フラックスは、気象庁GPV-MSM再解析値とCOADSの気候値を外力として与えた。TPXO7.2潮位モデルをL2領域開境界から海面高度の外力として与えた。1段ネスティングL1領域における1年間の助走期間後の1年間(360日)の解析データを用いL2領域における計算を実施した。さらに本研究の解析対象とする2段ネスティングL2領域における助走を潮汐を与えずに1年間実施し、その後潮汐外力を加え夏季と冬季を対象にそれぞれ30日間を解析対象期間とした。また本モデルの日本周辺海域における研究実績は多数報告されており、計算精度は十分に担保されている⁹⁾。

(2) 粒子追跡モデル

海洋数値モデルの1時間平均の流速場計算結果を用いて、Lagrange中立粒子追跡計算を実施した。粒子の放流位置は、紀伊半島南部(33.2°N, 136.2°E)を中心とした半径25 kmの円とした(図-1)。この放流円内の水深2 mに粒子約1800個を等間隔に配置し、1時間毎に24回粒子を放流した。粒子の移流時間は30日間とした。物質輸送・拡散過程に対する季節変化及び潮汐の影響を評価するために、夏季と冬季、潮汐を外力として与える場合と与えない場合の計4ケースの粒子追跡計算を実施した。

3. 海洋数値モデルの解析結果

L2ダウンスケーリング領域における計算結果を用いて日本本州南岸海域における流動場の解析を実施した。夏季と冬季の解析期間における15日間平均海面流速、海面無次元相対渦度の瞬間値及び海面エンストロフィーを図-2に示す。ここでエンストロフィーとは、各格子点における無次元相対渦度の二乗の時間平均値と定義した。気候値を用いた計算結果では、黒潮の流路は本州南岸に沿って流れる接岸流路であることがわかる(図-2ad)。解析期間中に黒潮の流路が大きく蛇行することはなかったが、伊豆諸島を通過する海域において10から100 km程度の黒潮流路の南北変動があった。この小規模な黒潮流路の変動は、黒潮が伊豆海嶺を通過することにより擾乱が発生するためだと考えられる。また伊豆半島から房総半島沖において夏季に比べ冬季の方が黒潮流路が沿岸からより離れていた。

夏季における海面渦度から、黒潮が伊豆諸島を通過することで渦運動が強化されることがわかる(図-2b)。一方冬季には、黒潮下流域だけでなく領域全体で渦度が増大していた(図-2e)。この冬季の渦度の増大は、過去の研究事例⁹⁾から海面冷却によるコンベクションがサブメソスケール渦運動を強化していることが原因と言える。また渦運動エンストロフィーから、遠州灘、駿河湾、伊豆諸島等の沿岸海域において渦運動が夏季に強化されていることがわかる(図-2cf)。これらのことから研究対象海域では、黒潮が直接発生させる流れの他に沿岸海域において強化される渦運動が物質や熱輸送に強く関わっていることが示唆される。また夏季に沿岸域において強化される渦運動は、黒潮の接岸に加え、夏季に強化される内部潮汐⁴⁾も一つの要因として考えられる。

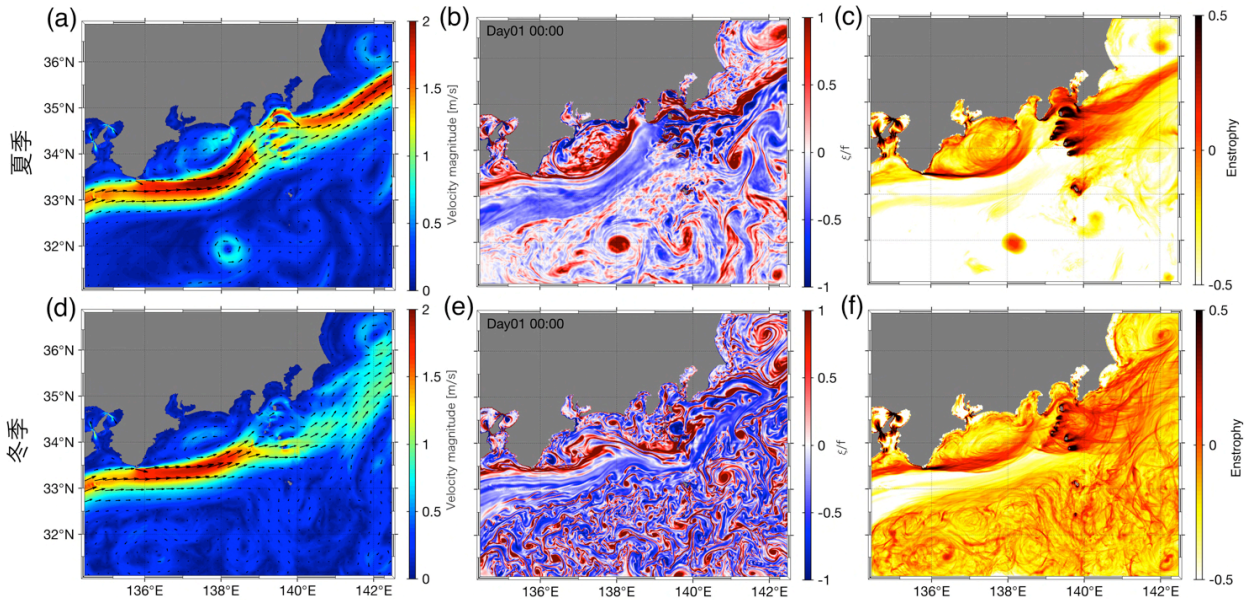


図-2 夏季(上段)及び冬季(下段)における領域海洋循環L2モデル計算結果, (a,d)時間平均海面流速, (b,e)海面無次元相対渦度の瞬間値, (c,f)海面渦運動エンストロフィー

4. 粒子追跡モデルの解析結果

(2) 粒子の輸送過程

粒子追跡モデルの結果から黒潮の流れによって放流粒子は東方向に強く輸送されるが, 伊豆小笠原海嶺に達した粒子の輸送は夏季と冬季で顕著に異なった(図-3)。図-3内における青線で示した軌跡は, 経過時間までに放流粒子が通過した海域を示す。夏季の放流5日経過後には, 房総半島沖合や本州沿岸に多くの粒子が輸送されていた。その後10日経過時には, 領域北東部の領域外へ多くの粒子が輸送されていた。夏季の領域内に長時間滞留している粒子は, 本州沿岸に多く分布しており, 特に愛

知県・静岡県沿岸の遠州灘に多く分布していた。遠州灘に輸送された粒子は反時計回りに流れる低気圧生渦に取り込まれ, 沿岸域を循環している様子が見られた。

一方冬季では黒潮の影響により領域外へ輸送される粒子と沿岸へ輸送される粒子に加え, 伊豆小笠原海嶺付近で黒潮流路から大きく外れ, 領域南部へと輸送される粒子の3パターンの輸送経路が確認された(図-3def)。領域南部へ輸送された粒子は黒潮から海嶺を沿い南方向に流れる分岐流によって輸送されたと言える(図-2d)。また冬季は渦運動が活性化されており黒潮流路から外れる粒子も増えることが予想される。放流から15日経過後には, 一部の粒子が計算領域南方境界に到達していた。潮汐を外力として加えたモデルに加えないモデルの比較結

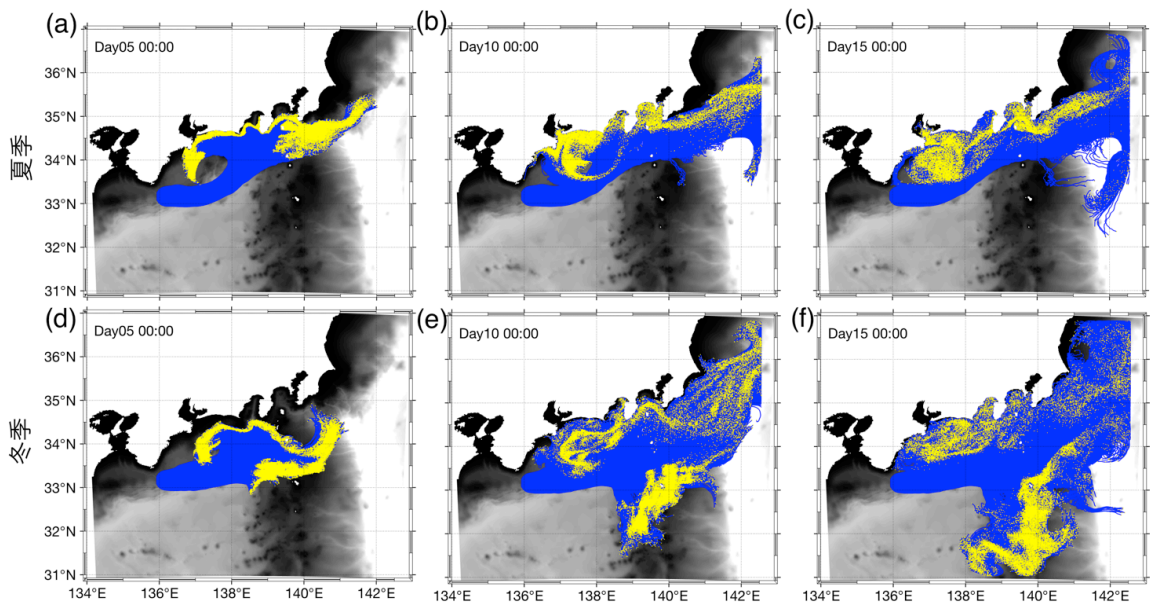


図-3 夏季(上段)と冬季(下段)における粒子放流後5日(左), 10日(中央)と15日(右)の粒子追跡モデル計算結果(青線: 粒子の軌跡, 黄色点: 各経過時点における粒子の水平分布)

果から潮汐の効果により沿岸域への輸送が増える傾向であったが、粒子の輸送パターンに違いは見られなかった。

鉛直方向の放流粒子の輸送状態を調査するために放流した全粒子の水深分布PDFを作成した(図4)。夏季では、解析全期間においてほとんどの粒子が水深50 m以浅に位置していた。これと対照的に冬季では、放流から5日経過時につけ強い鉛直方向の輸送が見られ、200 m程度まで多くの粒子が分布していた。この冬季における強い鉛直方向の粒子の移流は、冬季において強化される対流運動もしくは渦運動が要因と考えられる。夏季と冬季ともに放流後2~5日経過後までの期間に多くの粒子の鉛直輸送が発生していた。この放流後2~5日経過の期間は黒潮により輸送された粒子が伊豆小笠原海嶺を通過する時間と一致しており(図-3ad)、伊豆小笠原海嶺周辺で発生する渦等による擾乱が粒子の鉛直輸送を促進している可能性がある。

(2) Lagrangian PDF

粒子追跡計算結果を用いて、放流した粒子の空間分布を定量化するためにLagrangian PDF (L-PDF)を求めた。L-PDFとは、任意の移流時間における粒子位置の変位に対する確率密度関数である。本研究では解析領域を0.1度毎に分割し、全ての計算ケースに対して移流解析期間30日間全体を積分期間として粒子の確率分布を求めた(図-5)。さらに潮汐の効果を検証するために潮汐を外力として与えたモデルと与えないモデルケースから求めたL-PDFの比を求め潮汐による粒子分布の変化を定量化した(潮汐を外力として与えたケースのL-PDFを潮汐を外力として与えないケースから計算したL-PDFで除した値)。

夏季におけるL-PDFは、黒潮流路上及び遠州灘、駿河湾、相模湾等の沿岸海域で高い値を示していた(図-5a)。また伊豆小笠原海嶺の西側に比べ東側の方が粒子の黒潮流軸に対する拡散が大きい。このことは、黒潮流路上の粒子が伊豆諸島を通過時に大きく水平方向に拡散することを示唆している。伊豆諸島通過後は、領域外に流出する粒子と黒潮流路南側の時計回りの渦に取り込まれる粒子に分かれていた(図-5ab, 緯度: 32.5°N, 経度: 142°E)。また潮汐外力の有無の比較から、潮汐が沿岸域、特に遠州灘への粒子の輸送・滞留を3倍程度増大させていることがわかる(図-5c)。

冬季の粒子追跡結果から計算したL-PDFは、図-3defに示される粒子分布同様に黒潮流路上、沿岸域と伊豆小笠原海嶺に沿って南下する粒子の3パターンに分かれていた(図-5def)。黒潮から分岐した流れによる遠州灘及び伊豆小笠原海嶺南部への粒子輸送が顕著に見られ、これらの黒潮流路から外れる粒子は夏季同様に潮汐の効果により増大していた。

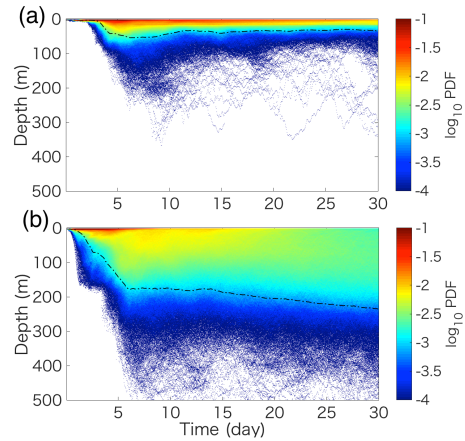


図-4 (a)夏季と(b)冬季における放流粒子の鉛直分布 PDF。黒破線は粒子分布の95パーセンタイルを示す。

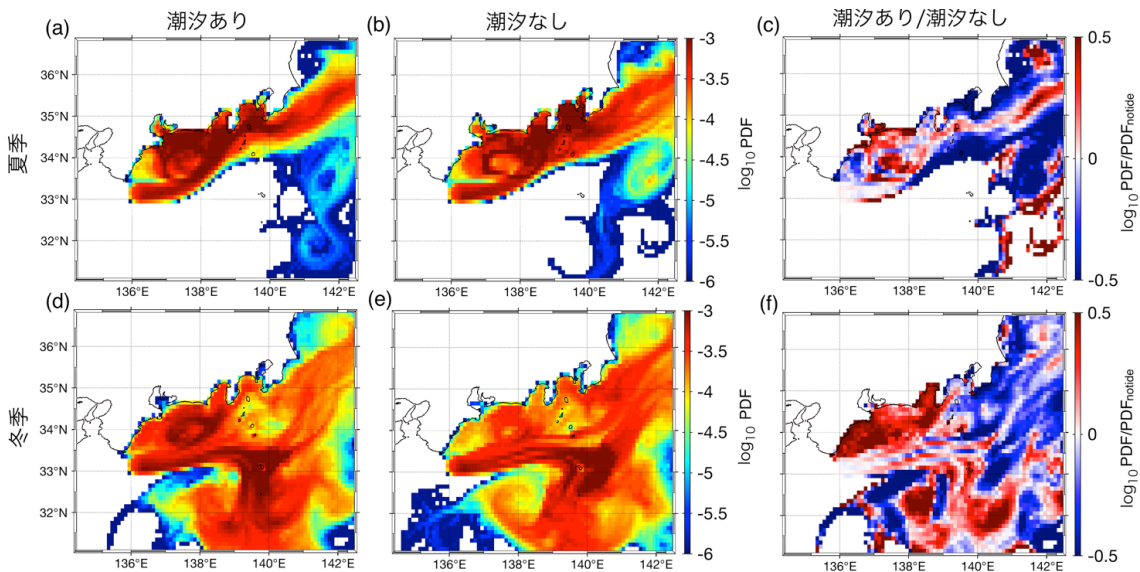


図-5 夏季(上段)と冬季(下段)におけるL-PDF及び、潮汐を外力として与えた場合のL-PDFと潮汐を与えない場合のL-PDFの比(右)

夏季と冬季の両ケースにおいて潮汐の効果により沿岸域への物質輸送が強化されることがわかる (図-5cf) . 潮汐により伊豆諸島周辺ではサブメソスケール渦運動が活性化することが過去の研究事例から明らかになっており¹⁰, 黒潮流域から遠州灘沿岸域への物質輸送は潮汐によるサブメソスケール渦等の擾乱により数倍増加すると言える. また全ケースにおいて紀伊半島より西側の紀伊水道に入る粒子は一つも確認できなかった. このことは黒潮の強い東向きの流れが紀伊半島東側の物質を西側へ輸送することを強く抑制し, 紀伊半島を境界に沿岸域では東側から西側への物質輸送のコネクティビティが無いことを示唆している.

5. 沿岸域への物質輸送の評価

黒潮流域から沿岸海域への物質輸送量をより詳細に調べるために, 放流した粒子が沿岸海域にどの程度流入したかを解析した. 本解析では, 沿岸海域を領域内における陸と海の境界部から24海里 (約44km) の接続水域とした (図-6a) . この接続水域に存在している粒子の割合を沿岸捕捉率と定義し解析を行った. また伊豆諸島は接続水域を求める解析から除外した. さらに追跡粒子の分布から黒潮により輸送される粒子が伊豆諸島周辺において遠州灘方向の西側と相模湾方向の東側に分かれることから, 伊豆半島南端の石廊崎を境に西側と東側に分けた沿岸捕捉率も同様に求めた.

夏季における沿岸捕捉率は, 放流後3から4日に85%のピークを示した後に徐々に減少し30日経過後には10%程度であった (図-6b) . 潮汐による外力が加わることで, 捕捉率のピークは20%増大していたことから, 潮汐によって強化される渦等の擾乱が粒子の拡散を促し沿岸域への捕捉率が増大したと考えられる. さらに過去の研究事例では夏季に強化される内部波が潮汐周期の運動エネルギーを2倍程度増大させることがわかっており⁴, 渦運動や内部潮汐により沿岸域への輸送が促進されていると言える. 伊豆半島を境に西側と東側へ沿岸捕捉された粒子の比較から, 放流後3から4日経過後のピークは西側の方が20%程度大きいことがわかった. 一方潮汐を外力とし

て与えないケースにおける解析結果では, 西側と東側での顕著な違いは見られなかった. このことは潮汐により発生する擾乱は黒潮から伊豆諸島西側の遠州灘や相模湾への物質輸送を促進していることを示唆している. また潮汐を外力として与えないケースの西側領域において8から10日に2回目のピークが現れている. この2回目のピークは, 遠州灘沖に発生した低気圧性渦に取り込まれた粒子が黒潮に取り込まれ, 再び沿岸域に現れた粒子群により発生したと考えられる. また30日経過後の沿岸捕捉率より, 黒潮から輸送された物質の長期的な滞留には潮汐の影響及び東西の差は小さいことがわかる.

冬季の沿岸捕捉率は, 夏季に現れていた明瞭なピークは示さず3日経過以降10%程度で解析期間中推移していた (図-6c) . 冬季は夏季に比べ黒潮が離岸していたため, 黒潮によって直接沿岸域に多くの粒子が流入していなかったと言える. よって冬季に沿岸域に流入した粒子は, 黒潮流路から渦等による拡散効果によって流路から外れ沿岸域に流入した粒子であると考えられる. また黒潮が離岸していたため一度沿岸域に流入した粒子が再び黒潮に取り込まれることが少なく, 沿岸捕捉率が夏に比べ安定していたと考えられる (図-6c, Time > 5 days) . 潮汐を外力として加えた冬季のケースでは, 西側に捕捉される粒子が東側に比べ2倍程度高かった. 一方潮汐を外力として与えない場合は, 東側への捕捉率の方が高かった. したがって, 潮汐によって発生する擾乱が黒潮から伊豆半島西側沿岸域への物質輸送を促進していると言える.

夏季及び冬季における沿岸捕捉率から, 潮汐を考慮した現実的な条件の場合は黒潮から沿岸海域へ輸送される物質の多くは伊豆半島より西側の領域へ輸送されることがわかった. また夏季は接岸する黒潮の影響により一時的に黒潮から多くの物質が流入するが, 黒潮によって再び多くの粒子が外洋へ輸送される. これに対し冬季は黒潮が離岸していることで流入する物質は少ないが, 一度流入した物質は長期間沿岸域に滞留する.

黒潮によって輸送される物質中には, 海洋生態系や水産業に大きく影響する魚卵や仔稚魚が含まれていることが知られている. 黒潮が南方の海域から輸送し日本本

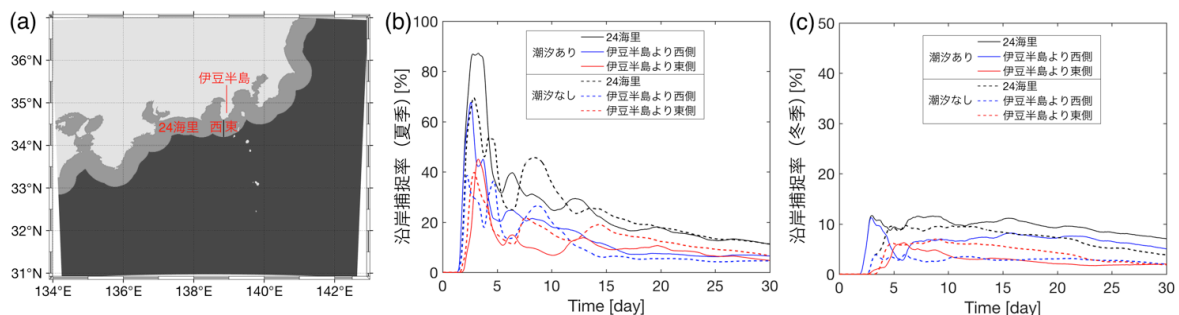


図-6 (a)海岸から24海里を示す領域図, (b)夏季及び(c)冬季における粒子の沿岸捕捉率

州沿岸海域へと鰻の仔稚魚を輸送し、黒潮流路の変動によりその輸送量が変化している¹¹⁾。また近年の研究では、黒潮の接岸が遠州灘に面する浜名湖における鰻の仔稚魚の漁獲量を有意に増加させていることがわかっている¹²⁾。本研究で用いた計算領域はこれらの仔稚魚輸送に関する研究事例と空間・時間スケールが大きく異なるが、本研究により明らかになった黒潮により輸送された物質が遠州灘へ流入するようなメカニズムが、水産資源に関わる仔稚魚の輸送や生態系に関わっている可能性が示唆される。

6. 結論

領域海洋モデルと粒子追跡モデルを統合した計算及び解析の結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 黒潮により沿岸域に輸送される粒子は伊豆諸島周辺の海域で分岐し、西側の遠州灘及び東側の相模湾・房総半島周辺へ輸送される2パターンの輸送経路が確認された。
- (2) サブメソスケール渦が強化される冬季は夏季に比べ粒子の鉛直方向の輸送が4倍程度強い。
- (3) 夏季は黒潮が接岸することにより冬季に比べて多くの粒子が黒潮から沿岸域へ輸送されていた。
- (4) 潮汐によって発生する擾乱により黒潮から沿岸域、特に遠州灘への粒子の輸送が促進されていた。

これらの結果から、黒潮から沿岸域へ輸送される物質輸送には季節的な黒潮流路の変化、渦と潮汐による擾乱が複合的に寄与していることが示唆される。

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) 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.
- 2) Hasegawa, D., Yamazaki, H., Ishimaru, T., Nagashima, H., Koike, Y.: Apparent phytoplankton bloom due to island mass effect. *J. Marine Systems*, 69, pp.238-246, 2008.
- 3) 高木香織，高橋素光，木下貴裕，谷津明彦，本田聡，西田宏：北西太平洋におけるマイワシ稚魚の水平分布の変化と黒潮流路の動態，水産海洋研究，77(4), pp.290-298, 2013.
- 4) Masunaga, E., Arthur, R. S., Yamazaki, H., Baroclinic Residual Circulation and Mass Transport Due to Internal Tides, *J. Geophys. Res. Oceans*, 125, in press, 2020.
- 5) 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.
- 6) Uchiyama, Y., Suzue, Y., Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, pp. 5046-5062, 2017.
- 7) Shepelin, A. F., McWilliams, J.: The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modelling*, Vol. 9(4), pp. 347-404, 2005.
- 8) Miyazawa, Y. et al.: Water mass variability in the western North Pacific detected in 15-year eddy-resolving ocean reanalysis, *J. Quant.*, Vol. 65(6), pp. 737-756.
- 9) Sasaki, H., Klein, P., Qiu, B., Sasai, Y., Impact of oceanic-scale interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere, *Nature communications*, 5(1), pp. 1-8, 2014.
- 10) 増永英治，鈴江洋太，内山雄介，山崎秀勝，黒潮と内部波が影響する伊豆諸島周辺海域における流動場の解明，土木学会論文集 B2 (海岸工学) 73/2, I_451-I_456 2017.
- 11) Chang, Y.L.K., Miyazawa, Y., Miller, M.J., Tsukamoto, K., Potential impact of ocean circulation on the declining Japanese eel catches, *Scientific reports*, 8(1), pp.1-12, 2018.
- 12) Miyake, Y., Tellier, M. A., Takeshige, A., Itakura, H., Yoshida, A., & Kimura, S., Past and lost influence of the Kuroshio on estuarine recruitment of *Anguilla japonica* glass eels. *J. Oceanogr.*, in press, 2020.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

MASS TRANSPORT TOWARD COASTAL REGIONS FROM THE KUROSHIO INVESTIGATED WITH A PARTICLE TRACKING MODEL

Eiji MASUNAGA, Waku KIMURA, Taichi KOSAKO,
Xu ZHANG, Yusuke UCHIYAMA

This study investigated mass transport processes from the Kuroshio toward coastal regions along the southern area of the Japan mainland using a downscaled oceanic numerical simulator (ROMS) and a particle tracking model. Eddy motions are enhanced in the vicinity of the Izu chain islands and coastal regions in summer. By contrast, in winter, enhanced eddy motions appear in south areas of the Kuroshio. The Kuroshio generates several flow branches due to the Izu-Ogasawara Ridge, which results in a cyclonic eddy in Enshu-nada and transport toward Sagami Bay. Mass transport from the Kuroshio toward coastal regions are mainly caused by two Kuroshio branches toward (1) Enshu-nada and (2) Sagami Bay. The shoreward transport is much higher in summer than that in winter, since the Kuroshio axis is located near the coast in summer. Enhanced eddies in winter contribute to vertical mass transport. The tidal forcing significantly promotes mass transport toward coastal regions.