

粒子追跡モデルとドリフターデータを用いた 日本海における物質輸送過程の研究

原田 一宏¹・増永 英治²・内山 雄介³

¹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 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:22nm832l@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学講師 地球・地域環境共創機構 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:hanako@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻

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

海洋における物質輸送について把握することは海洋ゴミの分布や海洋環境の形成を把握する上で重要である。日本海における物質輸送特性を把握するために、領域海洋モデリングシステムと3次元Lagrange粒子追跡を統合し数値実験を行った。粒子は放出地点を対馬海峡とし、放出時期を季節毎に300日間の追跡を実施した。また、粒子追跡結果を公開されている表層ドリフターデータと比較・検証を行った。粒子追跡結果は観測値と同様の輸送時間スケールと水平分布を示し、粒子追跡モデルの適切な再現性が確認できた。冬季と秋季に放出した粒子は広範囲に拡散したが、春季と夏季に放出した粒子は陸地沿いに分布した。粒子は冬季に発達するサブメソスケール渦によって広範囲に輸送されることが分かった。

Key Words : japan sea, lagrangian particle tracking, ROMS, Tsushima Warm Current, material transport

1. はじめに

日本海はユーラシア大陸と日本列島に囲まれており、海峡部の水深が200 m以下であるため外海との海水交換が少なく、閉鎖性の高い海域である¹⁾。日本海には水産資源や鉱物資源等が豊富に存在しており、海洋資源の観点から重要な海域である。日本海に対する外海から影響を与える海流は対馬海峡から流入する対馬暖流と、間宮海峡から流入するリマン寒流が挙げられる(図-1)。対馬暖流は黒潮を主な起源とする暖流で対馬海峡を通じて東シナ海から日本海へと流入する。その大部分は津軽海峡を通じて太平洋に流出し、一部が宗谷海峡を通じてオホーツク海へ流出する。よって、対馬暖流は日本海における漂流物の分布や水産有用種へ大きな影響を及ぼしており、海洋環境の形成に重要な役割を果たしていることが知られている²⁾。

海洋における物質輸送について把握することはマイクロプラスチックを初めとする海洋ゴミの分布や海洋環境の形成を把握する上で重要である。物質輸送特性を把握するための主な研究手法として海洋数値モデルを活用した粒子追跡が挙げられる。領域海洋モデル ROMS (Regional Oceanic Modeling System) と Lagrange 粒子追跡モ

デルを用いて実施された琉球諸島を対象としたサンゴの産卵や幼生の島間接続性に関する研究では、黒潮が長距離の物質輸送に強い影響を与えていることが示された³⁾。黒潮や潮汐が強く影響を与える日本本州南岸地域を対象とした研究においては、黒潮の流路変動が物質輸送に影響を与えていることが示された⁴⁾。さらに南シナ海を対象として海洋マイクロプラスチックを想定した研究が実施され、粒子に浮力や水平拡散を与えることで物質の輸送過程が変化することが分かっている⁵⁾。有明海を対象としたアサリ幼生の干潟間でのネットワーク形成解明を目的とした研究においてはアサリの成長速度や成長段階を考慮した解析が実施された⁶⁾。流木漂流シミュレーションモデルの開発を目的とした研究では風を考慮した物質輸送シミュレーションが実施され、高精度な漂流予測における風の重要性が示された⁷⁾。これらの研究によって海洋における物質輸送の過程や海域ごとの特性が明らかになりつつある。しかしながら、対馬暖流を経由した日本海における物質輸送に関する研究知見は乏しく、日本海内での輸送過程及び海洋環境形成過程は未解明な点が多い。

そこで本研究では対馬暖流を通じた物質輸送が日本海の海洋環境に与える影響を明らかにすることを目的とし、

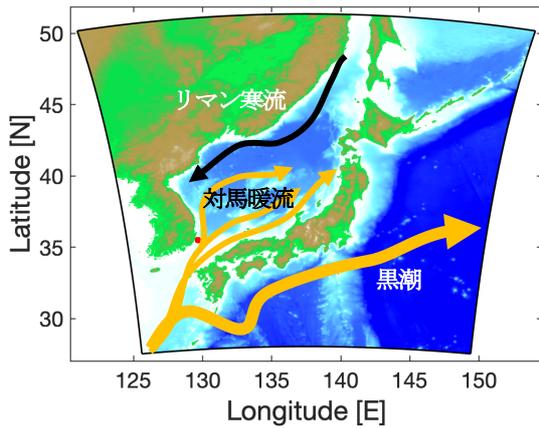


図-1 ROMS-L1 領域. 粒子の放出地点を赤点で示す.

表-1 ROMS-L1モデルの計算条件

解析条件	値
境界条件	Jcope-2再解析値 月平均気候値
格子数	784×864×32層
水平解像度	3km
海面風応力	JMA GPV-GSM日平均気候値
海面熱フラックス	NOAA COADS 月平均気候値
海底地形	SRTM30 PLUS+J-EGG500

表-2 表層粒子追跡とドリフターデータの津軽海峡到達日数

	平均値 (日)	中央値 (日)	津軽海峡到達割合 (%)
観測値	141	147	25
冬季 (計算値)	195	184	9.14
春季 (計算値)	157	160	6.67
夏季 (計算値)	93	85	12.5
秋季 (計算値)	221	238	2.94
全体 (計算値)	150	148	7.81

領域海洋モデル ROMS と Lagrange 粒子追跡モデルを用いて粒子追跡を実施した。また、日本海における粒子追跡モデルの妥当性を検証することを目的として水面を漂流するブイ（ドリフター）の座標データを蓄積した Global Drifter Program のデータとの比較も実施した。

2. 研究方法

(1) 海洋数値モデル

本研究では、日本周辺の流動構造の再現にJCOPE-2再解析気候値をダウンスケーリングしたROMS-L1モデルを用いた（図-1, 表-1）。海面風応力は、1993年から2007年までの気象庁GPV-GSM再解析値の日平均気候値を外力として与えた。海面熱フラックスについては、COADSの月平均気候値を外力として与えた。地形データは全世界の海洋が収録されているSRTM30_PLUSに日

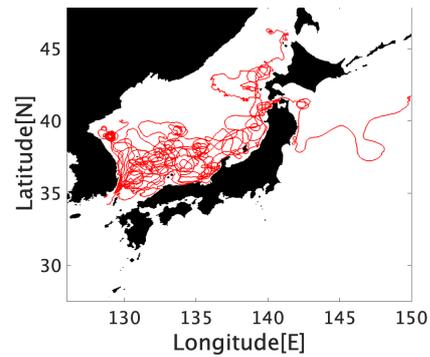


図-2 漂流ブイの軌跡例

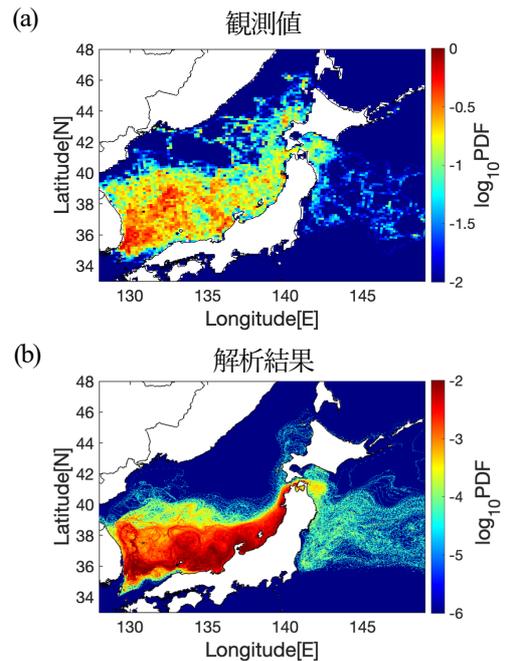


図-3 LagrangianPDF (a:GDP 観測値, b:表層粒子)

本周辺の沿岸域を解像度500 mでカバーするJ-EGG500を加えたものを用いている。ROMS-L1モデル領域は日本周辺海域の東西2358 km×南北2598 km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。これまでの研究事例より、本モデルの黒潮域および太平洋における流況の再現性が確認されており、計算精度が十分に担保されている⁹⁾。また、粒子追跡結果と観測値（ドリフターデータ）を比較することで本研究の主な解析領域である日本海における計算精度の検証を実施した。

(2) Lagrange粒子追跡モデル

海洋数値モデルの流速計算結果を用いて、Lagrange 粒子追跡を実施した。粒子の放出地点は対馬海峡西岸側に設定し、放出時期を四季（冬季（1月）、春季（4月）、夏季（7月）、秋季（10月））とした。粒子の初期分布は直径20 kmの円形と定義し、水深2 mの位置に315個の粒子を1 km間隔に配置した。粒子は初期位置から1時間間隔で24回放出した。全ての季節での総放流粒子は

30240 個である。粒子は質量・体積を持たず、流動の影響のみを受けて輸送される。粒子追跡は (1) 海面を移動する浮力を伴う物質を想定した粒子 (表層粒子) と (2) 流速に対し受動的に輸送され 3 次元的に移動する粒子 (3 次元粒子) の 2 つの条件を設定し 300 日間追跡した。粒子が ROMS-L1 モデル領域外に流出した場合、その粒子の追跡はその後行わないものとした。粒子の放出位置を対馬海峡西岸に設定した理由は、この海域から多数の漂流観測ブイが放流されており実測データとの比較検証を直接行うためである。本研究では複雑さや不確実性を排除するためにランダムウォークによる分散の再現と潮汐の考慮は行わないものとした。

(3) ドリフターデータの概要

粒子追跡モデルの検証には Global Drifter Program (GDP) により公開されている漂流観測ブイデータを用いた⁹⁾。GDP は海に放流した漂流観測ブイ (ドリフター) を用いて座標、海面水温、気圧、風速などのデータを観測している。ドリフターを用いた観測は世界各地で実施されており、膨大なデータが蓄積されている。本研究では 6 時間毎の座標データを用いて粒子追跡モデルの検証を行った。1988 年から 2014 年に観測が行われたデータ 15000 基のうち粒子の初期位置である対馬海峡付近から放出された 148 基のドリフターの観測結果を用いた。各ドリフターごとに稼働期間は異なり、平均 166 日間稼働している。ドリフターの放出時期は春季である 4 月から 6 月に集中しており、36.5% が春季に放出された。対馬海峡から放出された漂流ブイの軌跡例を図-2 に示す。

3. 粒子追跡モデルの検証

追跡した粒子の水平分布を比較するために、任意の移動時間における粒子位置の変位を確率密度関数で表す Lagrangian PDF (LPDF) を 300 日間の積分期間全体の解析結果とドリフター観測値から作成した (図-3)。表層粒子とドリフターは類似した分布をしており、放出地点の対馬海峡から日本海南部を東方向へ粒子が移動し津軽海峡

を通じて太平洋への流出という輸送過程を示した。さらに日本海における放流粒子の輸送時間スケールの検証を行うために、対馬海峡放出から津軽海峡到達までの日数を粒子追跡結果と観測されたドリフターデータ間で比較した (表-2)。ドリフターデータにおいて津軽海峡到達までの日数は平均値が 141 日、中央値が 147 日となった。粒子追跡結果では春季が観測値に近い値を示し、平均値が 157 日、中央値が 160 日であった。それに対して冬季、夏季、秋季の粒子追跡結果では観測値と 50 日~90 日程度の差が確認された。これはドリフターの放出時期が春季に集中していることが要因であると考えられる。

また、全季節粒子追跡データを統合して平均値・中央値を算出した場合に平均値 150 日、中央値 148 日となり、ドリフターの観測データに近い結果を示した。このことから表層粒子はドリフターと同様の輸送時間スケールを示した。

以上のことから、数値実験により再現された粒子追跡結果は、水平分布と輸送時間スケールともにドリフターデータと整合しており適切な再現性が担保されていると言える。

4. 粒子の水平分布および輸送過程

(1) 流況の背景場

冬季 (1 月~3 月末) と夏季 (7 月~9 月末) における平均表層流速分布を図-4 に示す。日本海には間宮海峡から流入し、ユーラシア大陸に沿って日本海を南下するリマン寒流と黒潮を起源とする対馬暖流が存在する (図-1)。対馬暖流には分岐が存在し、3 本の流れを形成するとされている。対馬と九州の間を通過後に日本列島に沿って北東に流れる第 1 分岐、対馬と韓国の間を通過した水のうち沖諸島西側に流れる第 2 分岐、韓国東岸沿いに北上する第 3 分岐がある。本研究における粒子の放出地点は第 3 分岐と第 2 分岐の分岐地点に位置している。夏季では対馬暖流の分岐流が明確となっており定常的に強い流れが存在する。対して、冬季では夏季と比較して分岐流が減衰しており、サブメソスケール渦による水平混合作用

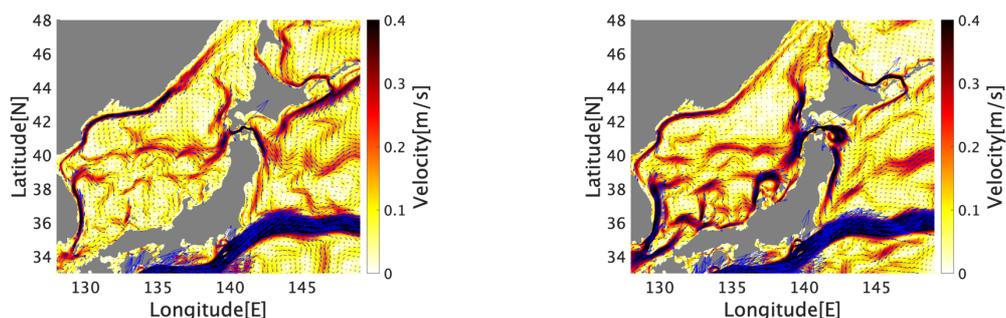


図-4 表層平均流速 (左:冬季, 下:夏季)

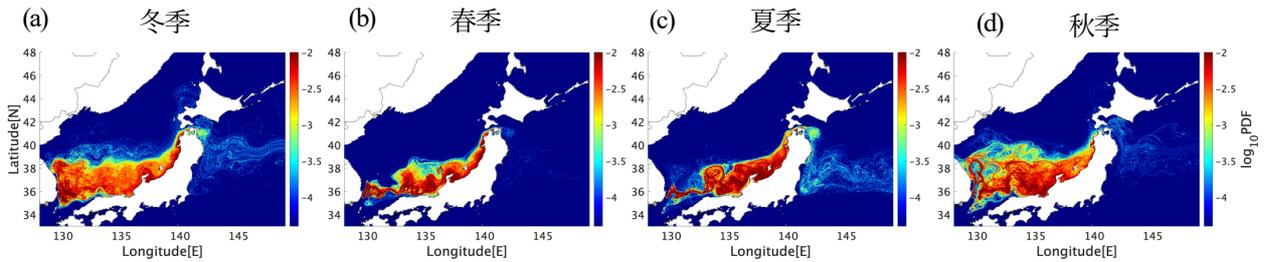


図-5 表層粒子 LagrangianPDF (a:冬季, b:春季, c:夏季, d:秋季)

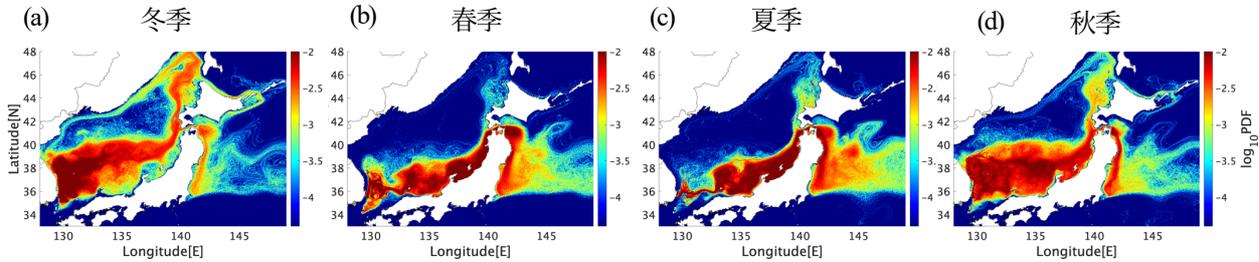


図-6 3次元粒子 LagrangianPDF (a:冬季, b:春季, c:夏季, d:秋季)

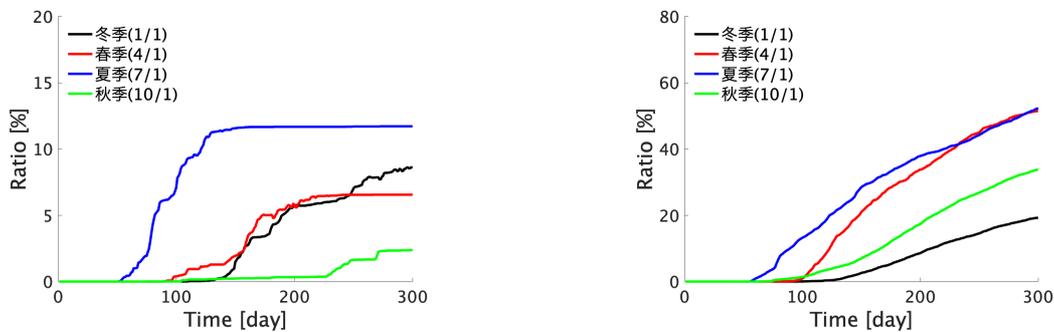


図-7 津軽海峡通過率 (左:表層粒子, 右:3次元粒子)

によって減衰したと解釈される。このような季節変動特性は現地データ¹⁰⁾や広域流動モデル¹¹⁾を用いた既存の研究と一致している。

(2) 粒子の水平分布

LPDFを用いて全4季節及び表層・3次元の全ての8ケースでの粒子の水平分布を示す(図-5, 図-6)。全てのケースにおいて津軽海峡を通過する粒子が確認された。津軽海峡を通じて太平洋へと流出した粒子は太平洋西岸を南下し東北・関東沖で混合するような挙動を示し、東方領域外へと輸送された。冬季と秋季に放出したケースでは粒子は放出直後に広範囲に拡散し、その後東方向に輸送されていた。一方、春季と夏季に放出したケースでは日本海東岸側を沿うように比較的まとまって分布していた。また、表層粒子は3次元粒子と比較して陸地沿いを移動する粒子数が多く9割程度の粒子が日本海に留まる。一方、3次元粒子は約4割の粒子が津軽海峡を経由し太平洋に輸送されていた。3次元粒子は北海道沿岸を北上しロシア沿岸域にも輸送されており、対馬暖流によって輸送された粒子がリマン寒流の影響でユーラシア大陸沿いを南下し朝鮮半島へ戻るような輸送経路も示した(図-

1)。このことは3次元粒子で考慮されている鉛直移流が物質の輸送と拡散に強く寄与していることを意味している¹²⁾。

(3) 津軽海峡を通じた太平洋への流出率

日本海から太平洋へ津軽海峡を経由して流出した粒子の割合を算出した(図-7)。表層粒子は流出率が15%を下回っており、一定時間経過すると流出率の変動が僅かとなる。それに対して3次元粒子は流出開始から解析期間終了まで流出率が増加し続けており、表層粒子と比較して多数の粒子が流出している。夏季は他のケースと比較して流出開始が早く、放流後50日程度から太平洋への流出が開始する。夏季以外のケースでは放流後100日程度で太平洋への流出が開始する。このことから夏季に放出した粒子の日本海における輸送速度は他のケースと比較して早い。これはサブメソスケール渦が発達することで平均場において対馬暖流が減衰する冬季に対して、夏季では対馬暖流が定常的な強い流れとして存在することが要因であると考えられる(図-4)。粒子の輸送時間をより詳しく評価するために放出から経過した時間の平均を示す輸送時間スケールのマップを作成した(図-8,

図-9) . 表層粒子追跡において冬季・秋季に放出した粒子は東北地方日本海沿岸部で平均 200 日以上経過している (図-8, a, d) . 太平洋への流出結果同様に春季・夏季は冬季・秋季と比較して速く輸送されており, 200 日以上経過を示す地域が日本海側にほとんど存在していない (図-8, b, c) . 特に春季では北陸地方以西は平均 100 日以下となっている. 3 次元粒子追跡でも同様に春季・夏季に放出した粒子は冬季・秋季に放出した粒子と比較して速く移動している (図-9) . 特に秋季は他のパターンと比較して平均 100 日以下を示す領域が狭く, 移動速度が遅いことが分かる (図-9, d) .

また, 3次元粒子は津軽海峡の通過まで平均で200日程度時間を要し, さらに太平洋に長時間滞留していることが確認できた. 一方で表層粒子追跡では流入量は少数だが移動時間は早く, その後三陸沖や常磐沖での滞留時間が短いことが示唆された.

とが明らかにされている¹³⁾. ROMS の流速解析結果から表層の無次元相対渦度を算出し, 日本海における渦運動の季節変化を調べた. 冬季 (1月1日), 夏季 (7月1日) における無次元相対渦度の瞬間値を図-10 に示す. 両季節とも対馬暖流が強く影響する日本海南部で高い渦度を示していた. 夏季では空間スケールの大きな水平スケール 100km の渦が発達しているが冬季の渦運動は規模が小さい水平スケールの 20 km 程度のサブメソスケール渦が支配的であり, 冬季の方が渦の強度も高い. この冬季に強化される渦は強化された海面冷却に伴う現象であることが一般的に知られている⁸⁾. よって粒子追跡結果において冬季・秋季に放出した粒子と春季・夏季に放出した粒子間に生じる輸送過程の差異は, 海面冷却によって冬季に発達するサブメソスケール渦によって生じた活発な小スケールな海水運動に伴う拡散現象が影響していると考えられる.

5. 季節変動する渦構造

沿岸域では直径数十 km のサブメソスケール現象に伴う乱流混合が海洋での物質輸送に大きな影響を与えるこ

6. おわりに

本研究では, 領域海洋循環モデルROMSを用いた日本周辺の流速計算結果に対してLagrange粒子追跡計算を実

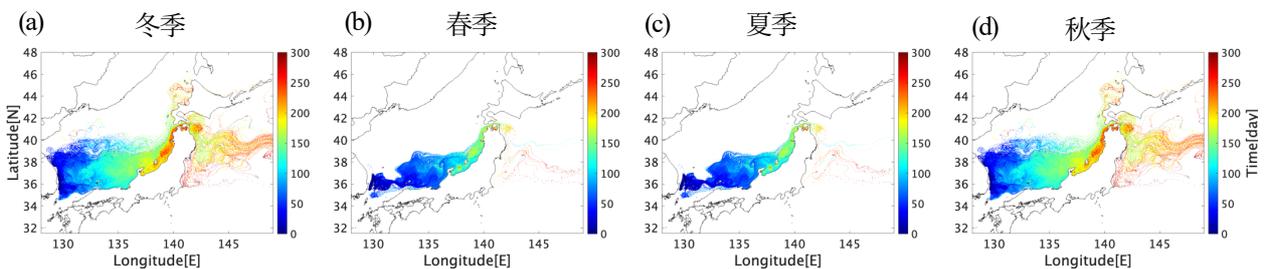


図-8 表層粒子到達平均時間 (a:冬季, b:春季, c:夏季, d:秋季)

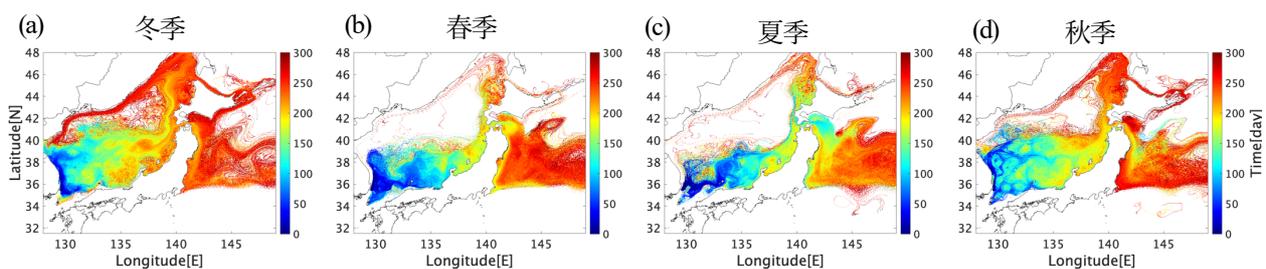


図-9 三次元粒子到達平均時間 (a:冬季, b:春季, c:夏季, d:秋季)

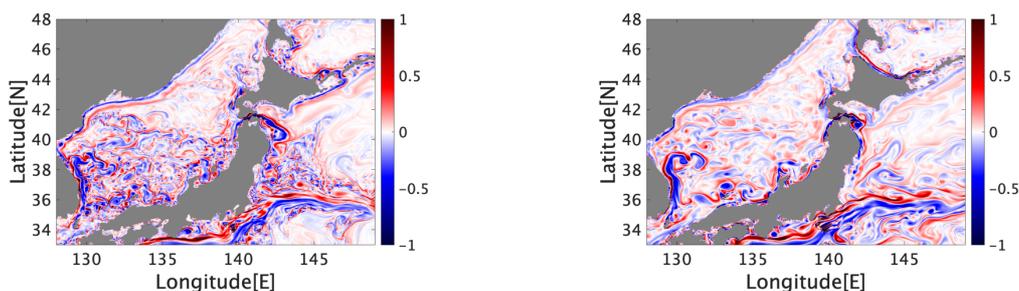


図-10 表層無次元相対渦度(左:冬季, 下:夏季)

施し、日本海における物質輸送の評価とモデルの検証を行った。以下に本研究で得られた主要な知見を示す。

- (1) 観測値と粒子追跡結果を比較・検証したことによって類似した結果が得られ、日本海を対象とした領域海洋モデルおよび粒子追跡の妥当性が確認できた。
- (2) 領域海洋モデルの流速計算結果を用いて実施した粒子追跡において対馬暖流によって輸送された粒子は津軽海峡を通じて太平洋へと流入した。
- (3) 鉛直移流を考慮せず表層を移動する粒子は陸地沿いを輸送されるのに対して、3次元的に移動する粒子は日本海の広範囲に拡散し、表層粒子と比較して低速で移動する傾向にあった。
- (4) サブメソスケール渦が発達する冬季において粒子が広範囲に拡散する様子が確認され、サブメソスケール渦が物質の輸送に影響を与えていることが示唆された。

本研究の結果から、物質の輸送及び拡散には鉛直移流と冬季に発達するサブメソスケール渦が寄与していることが明らかとなり、季節や物質の浮力によって輸送動態が大きく異なることが示唆された。

謝辞：本研究は科学研究費助成事業（22K18018, 22H05201, 18H03798）の助成を受けた。

REFERENCES

- 1) 岸田 達, 木所 英昭: 日本海の海洋環境と漁業資源の近況, 日本水産学会 74 巻, 5 号, 873-875, 2008. [Kishida, T., Kidokoro, H.: The recent status of oceanographic conditions and fisheries resources in the Sea of Japan, *NIPPON SUISAN GAKKAISI*, Volume 74, Issue 5, pp. 873-875, 2008.]
- 2) 児玉武稔: 黒潮・対馬暖流域における栄養塩動態を中心とした低次生態系の解明, 海の研究, 29 巻, 2 号 pp.55-69, 2020. [Taketoshi, K.: The nutrient dynamics and the lower trophic ecosystems in the warm waters in the vicinity of Japan, *Oceanography in Japan*, 29(2), pp.55-69, 2020.]
- 3) Uchiyama, Y., Odani, S., Kashima, M., Kamidaira, Y. and Mitarai, S.: 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, 2018.
- 4) 増永英治・木村和久・小碓大地・張旭・内山雄介: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_91-I_96, 2020. [Masunaga, E., Kimura, W., Kosako, T., Zhang, X., Uchiyama, Y.: Mass transport toward coastal regions from the kuroshio investigated with a particle tracking model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 76, Issue 2, pp. I_91-I_96, 2020.]
- 5) Matsushita, K., Uchiyama, Y., Takaura, N., Kosako, T.: Fate of river-derived microplastics from the South China Sea: Sources to surrounding seas, shores, and abysses, *Environmental Pollution* 308, 19631, 2022.
- 6) 藤家 亘, 井下 恭次, 武元 将忠, 江口 秀治, 西 利明, 松山 幸彦: 有明海アサリ浮遊幼生の干潟間供給ネットワーク, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 74 巻 2 号 p.I_1261-I_1266, 2018. [Wataru, F., Kyoji, I., Masatada, T., Shuji, E., Toshiaki, N., Yukihiko M.: Numerical Simulation For Larval Supply Network Of Manila Clam *Ruditapes Philippinarum* In Ariake Bay, Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 74, Issue 2, pp. I_1261-I_1266, 2018.]
- 7) 鈴木 聖悟, 井手 喜彦, 山城 賢, 橋本 典明, 児玉 充由: 風からの抗力を考慮した非構造格子流木漂流シミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 77 巻 2 号 p.I_325-I_330, 2021. [Shogo, S., Yoshihiko I., Masaru, Y., Noriaki, H., Mitsuyoshi, K.: Development Of An Unstructured-Grid Driftwood Simulation Model Considering The Drag From Wind, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 74, Issue 2, pp. I_325-I_330, 2021.]
- 8) 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. 5,046-5,062, 2017.
- 9) Hill, H. W., and J. W. Horwood: Computer-simulation of surface drifter returns, *Journal Du Conseil*, 35(2), pp. 158-164, 1974.
- 10) Toba, Y., Tomizawa, K., Kurasawa, Y. and Hanawa, K.: Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru warm current system with its possible cause, *La mer*, Vol. 20, pp. 41-51, 1982.
- 11) 重岡裕海: MOVE/MRI.COM-WNP データを用いた日本海の極前線の指標水温, 測候時報, 第 77 巻特別号, S109-S118, 2010. [Shigeoka, H.: emperature indices of the polar front in the Sea of Japan using MOVE/MRI.COM-WNP, *Weather service bulletin*, Volume 77, pp. S109-s118, 2010.]
- 12) 井上孝義・増永英治・小碓大地・Xu Zhang・内山雄介: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 77, No. 2, pp. I_373-I_378, 2021. [Inoue, T., Masunaga, E., Kosako, T., Zhang, X., Uchiyama, Y.: Transport processes around sagami bay and suruga bay using a particle tracking model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 77, Issue 2, pp. I_373-I_378, 2021.]
- 13) 内山雄介, 石井翔太, 宮澤泰正: 黒潮続流フロント域におけるサブメソスケール乱流の発生機構と混合評価, 海岸工学論文集 Vol69, No2, pp. 2pp. I_456-I_460, 2013. [Uchiyama, Y., Ishii, S., Miyazawa, Y.: Submesoscale instability and associated mixing in the Kuroshio Front, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 69, Issue 2, pp. I_456-I_460, 2013.]

(Received March 16, 2023)

(Accepted July 20, 2023)

TRANSPORT PROCESSES IN THE JAPAN SEA INVESTIGATED WITH PARTICLE TRACKING SIMULATIONS AND DRIFTER DATA

Kazuhiro HARADA, Eiji MASUNAGA and Yusuke UCHIYAMA

Material transport in oceans is important for understanding e.g., distributions of microplastics and formations of marine environments. In order to investigate transport processes in the Japan Sea, this study conducted oceanic numerical simulations using the Regional Oceanic Modeling System with a Lagrangian particle tracking model. Particles were released from the Tsushima Strait in four seasons. Modeled results were validated with publicly available observed surface drifter data (GDP). The GDP data are consistent with our numerical simulations, which implies that our regional numerical model well reproduces transport processes in Japan Sea. Particles released in winter and fall tend to distribute over a wide area, while those released in spring and summer are distributed along the coast. Submesoscale eddies enhance particle dispersions in the winter season.