

# 領域海洋モデル全域から放流した粒子追跡実験を用いた東日本南岸海域の物質輸送過程の評価

佐近 淳平<sup>1</sup>・増永 英治<sup>2</sup>・内山 雄介<sup>3</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  
(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: 23nm820r@vc.ibaraki.ac.jp

<sup>2</sup>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: eiji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</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

本研究は、領域海洋モデルROMSで再現された東日本南岸海域の全域から放流したラグランジュ粒子を追跡し黒潮や沿岸地形が影響する物質輸送過程の評価を行った。本手法は一般的な特定の領域から放流した粒子追跡手法とは異なり、領域全域に粒子を初期配置することで再現海域全体の物質輸送過程が評価可能となる。放流した粒子は、黒潮や渦のフロントを境界に強く引き伸ばされるように拡散し、強い方向依存性を伴った拡散過程を示した。この方向依存性は沿岸域から黒潮流軸までの海域で見られ、東西方向の水平拡散係数は南北方向に比べ5~10倍程度大きい値を示した。一方黒潮流軸以南の海域では、等方的な拡散が発生しており季節的な依存性が強く、冬季の水平拡散係数は夏季に比べ1オーダー程度強いことがわかった。

**Key Words :** ROMS, Lagrange particle tracking model, material transport, Kuroshio, Diffusion

## 1. はじめに

日本列島の南岸海域は黒潮や潮汐、沿岸及び海底地形が複合的に影響する海域である。黒潮は南西から日本列島南岸を東に向かって流れ、最大流速 $2\text{ m s}^{-1}$ に達する。黒潮流軸は本州中部から南に約1000 km広がる伊豆小笠原海嶺とその周辺の島々を通過する。黒潮は海嶺上の島の地形効果により島陰に強い鉛直混合や渦を発生させることで、プランクトンの湧昇に強く寄与する可能性が示されている<sup>1)</sup>。また黒潮と地形効果に伴う渦運動が表層植物プランクトン分布に影響し、黒潮が海嶺通過時に発生させる輸送現象が表層の一次生産や栄養塩輸送に重要な役割を果たすことが報告されている<sup>2)</sup>。渦運動は水平スケールが100 km以上のメソスケール運動と数10 km程度のサブメソスケール運動に分類されるが、近年開発された高解像度数値シミュレーション技術は東日本南岸海域におけるサブメソスケール程度の小さいスケールの複雑な海洋物理構造の詳細を明らかにしつつある<sup>3)</sup>。例えば、黒潮が伊豆小笠原海嶺上の島々を通過する時に、島背後でカルマン渦のようなサブメソスケール渦が生じることが報告されている<sup>4)</sup>。また、黒潮、潮汐と地形の相

互作用により潮汐力に伴う水平せん断応力がサブメソスケール運動を強化する<sup>5)</sup>。さらに、黒潮と日本南岸に挟まれた海域で低気圧性渦（サブメソスケール渦）が栄養塩を湧昇させ海洋表層の一次生産に強く寄与する一方で、黒潮流軸以南の海域では鉛直下向きの渦運動が生産性を制限することが報告されている<sup>2)</sup>。したがって、黒潮や渦、潮汐、地形効果が東日本南岸海域において複合的に影響し、複雑かつ海域ごとに異なる海洋環境の形成に重要な役割を果たしており、海洋環境や生態系を解明する上で物質輸送過程を解明することは非常に重要と言える。

近年、海洋の物質輸送を再現するために粒子追跡が有用な手法として広く利用されている<sup>6)</sup>。例えば、黒潮は数年ごとに蛇行し、その勢力の変化がシラスウナギの日本南岸海域の到着時期に影響することが指摘されており、粒子追跡を用いてその生息域や回遊ルートの変遷を把握する研究が行われている<sup>7)</sup>。また、黒潮は日本南岸海域の動物プランクトンを黒潮域へ移流し、仔魚の生存に寄与する可能性が示されている<sup>8)</sup>。さらに、海洋のマイクロプラスチック汚染の検証<sup>9)</sup>にも粒子追跡を用いた研究が行われている。このように数値モデルと粒子追跡モデルを統合した技術の発展に伴い、海洋の物質輸送プロセ

スが明らかになりつつある。そこで本研究は、ダウンスケーリングを行い高解像度化した領域海洋数値モデルROMS<sup>10)</sup>とLagrange粒子追跡を統合させ、東日本南岸海域の再現領域全域を対象とした物質輸送過程の評価を行った。特に、再現海域の海域特性に焦点を当て、物質輸送過程および拡散現象について報告する。

## 2. 研究手法

### (1) 海洋数値モデルROMS

本研究では、JCOPE-2再解析値<sup>11)</sup>を境界条件とした領域海洋循環モデルROMSを用いた2段ネスティングによりダウンスケーリングされたROMS-L2モデル（水平解像度：1 km, 表-1）を用いて解析を実施した。ROMS-L2モデル領域は東西802 km×南北674 kmで構成され、格子数は802×674×鉛直40層で構成されている<sup>12)</sup>。海面風応力と海面熱フラックスは気象庁GPV-MSM再解析値の日

表-1 ROMS-L2モデルの解析条件

解析条件	値
計算期間	2年間
解析期間	30日間
計算間隔	10秒間
境界条件	ROMS-L1 (水平解像度3 km)
格子数	674×802×40
水平空間解像度	1 km
海面風応力	JMA GPV-MSM日平均気候値
海面熱フラックス	NOAA COADS月平均気候値
潮汐	TPXO7.0

平均気候値とCOADS月平均気候値をそれぞれ外力として与えた。表面熱、淡水、及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>13)</sup>。全球潮汐モデルTPXO7.0を用いてROMS-L2開境界から潮汐を外力として与え、1時間平均のモデル出力が解析で使用された。ROMSを用いた流動解析場の計算期間は約2年間とし（約1年間の助走期間を含む）、粒子追跡は1年で最も水温が高い期間を夏季、最も水温が低い期間を冬季と定義し、それぞれ30日間の解析値を用いた。本研究では境界条件の設定の制約上、海陸風等の日周期以下の時間スケールの現象の外力的影響を考慮せず、海洋内部の物質輸送・拡散現象を評価することに焦点を当て解析を行った。本研究のモデルに関しては、日本周辺海域における計算精度は既存研究<sup>2)</sup>により十分に担保されている。

### (2) Lagrange粒子追跡モデル

粒子追跡の解析にはROMS-L2モデル出力を用いて、3次元のLagrange中立粒子追跡を実施した。初期粒子はROMS-L2モデルの1グリッドに1つの粒子を等間隔（1 km）でモデル海域全域に配置した。粒子数は約 $3.79 \times 10^5$ 個となる。粒子の追跡はダウンスケーリングされたROMS-L2領域内のみで行い、領域外に放出された粒子は追跡しない。また、解析は夏季と冬季で実施し、粒子の拡散効果（ランダムウォーク）は考慮していない。Lagrange粒子追跡モデルの積分時間間隔は200秒に設定し、1時間毎の出力値を用いて解析を行った。

さらに、ROMS-L2再現海域から過去の研究<sup>9)</sup>で定義された6つの領域に該当する粒子を抽出し、初期配置から粒子を分類することで物質輸送過程の地域性を評価した（図-1、沿岸上流域・下流域、黒潮上流域・下流域、沖

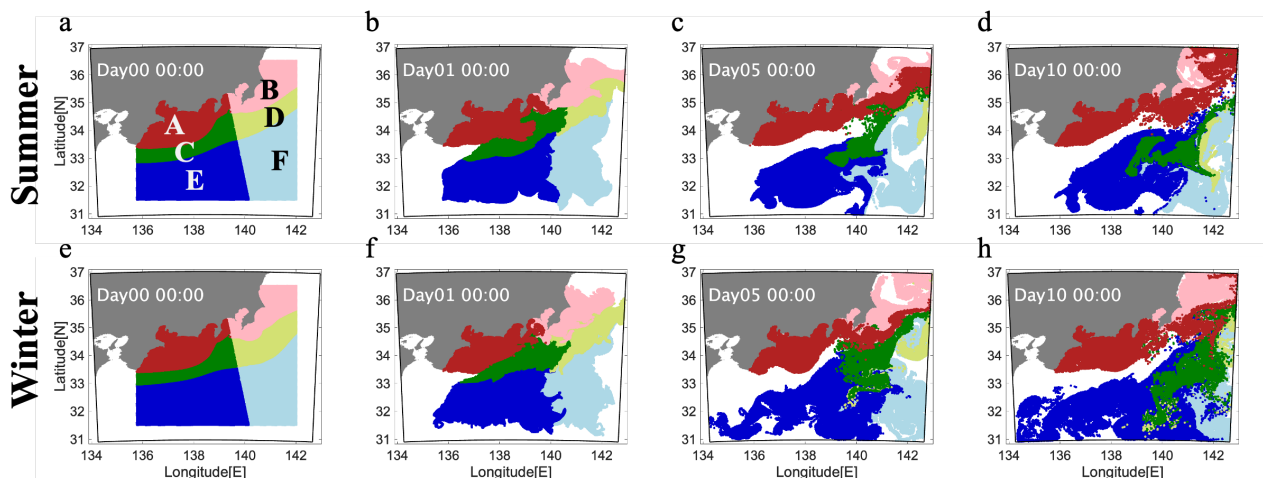


図-1 粒子の初期配置と1日、5日、10日経過後の粒子追跡結果（上段：夏季，下段：冬季）

（赤：沿岸上流域，ピンク：沿岸下流域，緑：黒潮上流域，黄緑：黒潮下流域，青：沖合上流域，水色：沖合下流域）

合上流域・下流域を赤, 緑, 青の濃淡で表示し, 順にアルファベットA~Fとする). この領域分けは, 伊豆・小笠原海嶺に位置する島々を通るおよその直線 (緯度  $= -4.4 \times \text{経度} + 648.12$ ) を用いて黒潮上流と下流側を分けている. 沿岸, 黒潮および沖合の領域分けは夏季においてそれぞれ0.1 m未満, 0.1~0.6 m, 0.6 m以上の時間平均海面高度によって定義される. 冬季の場合, これらの3つの領域は時間平均海面高度がそれぞれ0.3 および 0.3 mで定義される.

### 3. 粒子の輸送過程

粒子の初期位置の領域毎に6色に色分けした粒子追跡結果を図-1に示す, 黒潮流軸上 (領域C, D) の緑色系の粒子は黒潮により強く東方向に輸送され, 沿岸・沖合 (領域A, B, E, F) の粒子は黒潮の強い流れ (図-1) に捕捉されるように一部の粒子が黒潮に取り込まれ輸送された. 粒子全体の動きは概ね東方向の輸送が支配的であるが, 季節や領域で粒子の輸送は異なっていた. 沿岸・沖合域 (領域A, B, E, F) の赤色系と青色系の粒子は初期配置の領域に滞留している粒子が見られるほか (図-1c,d,g,h), 黒潮流域 (領域C, D) の緑色系粒子の

一部は黒潮下流のモデル境界へ到達せず, 下流域近辺で黒潮流軸から外れ南方へ輸送されていた (図-1g,h). この現象は冬季に特に顕著に現れ, 伊豆・小笠原海嶺という浅い海底地形と黒潮によってサブメソスケール運動が強化されること<sup>9)</sup>や島陰で黒潮流路が南北変動すること<sup>10)</sup>に起因すると考えられる.

遠州灘や相模湾などの沿岸海域 (領域A, B) では赤色粒子が反時計回りに湾内を滞留し次第に黒潮に捕捉され黒潮下流域まで輸送される様子が見られた. 遠州灘や相模湾は黒潮と陸地に囲まれた海域であり, 過去の研究事例から黒潮流軸の北側の前線付近で傾圧不安定性が低気圧性渦を誘発していることが知られている<sup>9)</sup>. 粒子が沿岸海域に反時計回りの運動を伴いながら滞留する現象は, 黒潮と沿岸地形によって強化される低気圧性渦によると考えられる.

沖合域粒子 (領域E, F) の輸送過程については季節による違いが明瞭に表れた. 夏季において青色粒子はゆっくり徐々に東方向に輸送される一方で, 冬季には粒子が東西の両方向に比較的強く輸送されていた (図-1c,d,g,h). 夏季の沖合上流域 (領域E) の青色粒子は解析期間の10日目で初期粒子数に対して約65%の粒子が領域内に滞留していたのに対し, 冬季では10日目で約47%であった. 夏季冬季の季節間で特に沖合域上流域の粒子

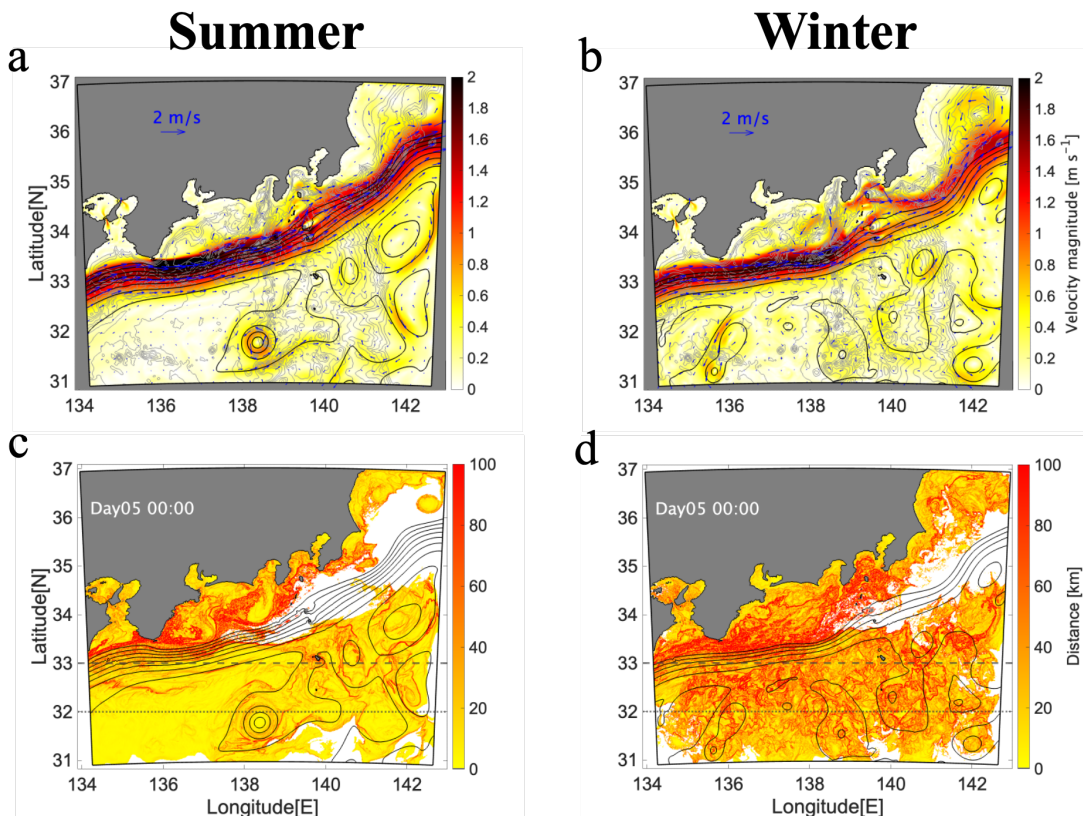


図-2 平均流動場 (上段) と5日経過時の粒子間距離マップ (下段) (左: 夏季, 右: 冬季, 黒線: 0.1 m間隔の海面高度, 灰色線: 400 m間隔の等深線, 灰色破線: 北緯33度線, 灰色点線: 北緯32度線)

の輸送・拡散方向は季節で顕著に異なり、夏季に比べ冬季に沖合粒子の輸送が盛んになる可能性が示唆された。

これらの輸送過程を踏まえ、より詳細な輸送過程や拡散現象とその季節変動性、領域の接続性に関して解析を行った。

#### 4. 二粒子間距離

モデルで再現された粒子追跡結果から拡散の過程を明らかにするために粒子間距離を用いて解析を行った。ここで言う粒子間距離とは初期配置の一つの粒子に対して東西と南北に隣接した粒子をペア粒子と定義し、ペア粒子間の水平距離から二乗平均平方根を求めたものである。ここで、5日間平均の流動解析場および5日経過時の粒子間距離の水平分布を図-2に示す。粒子間距離の水平分布は、初期配置として各計算格子点を取り囲む4つの粒子がどの程度離れたかを示している。また、領域外に放出されてしまった粒子ペアは欠損値として計算できず、図内で白色で表示している。

粒子間距離は夏季よりも冬季に明らかに長くなる傾向があり、冬季の方が粒子の拡散が強いことがわかる(図-2c,d)。季節に依らず、等海面高度線が密に分布する海域において粒子間距離が高い値を示していた。等海面高度線が密に分布していることは、黒潮や渦のフロントの影響で地衡流が強化されていることを意味する。特に、そのような状況は黒潮流軸上や夏季の沖合域の大きな渦が生じている海域(図-2, 東経138°, 北緯32° 付近)で顕著に確認され、黒潮や渦のフロントで引き伸ばし効果により粒子間距離が長くなっていったと考えられる。

各領域の粒子間距離について比較し考察する。粒子追跡結果では沿岸域(領域A)の赤色粒子が領域内に滞留している様子(図-1d,h)が確認され、夏季には沿岸域の黒潮流軸側、冬季には沿岸域の広い範囲で粒子間距離が高い値を示していることから、沿岸域内に滞留する物質でも拡散現象が顕著に現れていることが分かった。これは黒潮流軸にトラップされるように沿岸域の粒子が輸送されることや沿岸域内の低気圧性渦の影響により粒子が同海域に留まりながら拡散するためであると考えられる。季節間の違いとしては、冬季に多少広い範囲の沿岸域で粒子間距離が高まるが、沖合域では顕著に異なる結果を示した。沖合域において夏季では流動が強まる流域で粒子間距離が高い値を示す一方で、冬季では流域全体に広がって粒子間距離が高い値を示した。一方、黒潮流軸上では明瞭な季節による差異は見られなかった。

5日経過時点で黒潮流軸上では夏季、冬季ともに粒子間距離は200 km程度、沖合域では夏季に流動が小さい流域で粒子間距離が50 km未満だったのに対し、冬季に沖

合流域全体で100 km程度の高い値を示した。さらに、粒子の拡散速度を比較する。5日経過時の粒子間距離の拡散速度アンサンブル平均は夏季に約 $4.8 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$ 、冬季に約 $9.7 \times 10^2 \text{ m s}^{-1}$ であった。冬季の拡散速度は夏季の2倍程度を示し、モデル領域全体では粒子の拡散率が季節間で大きく異なることがわかった。

以上のことから全域に放流した粒子の粒子間距離は季節や領域間で明らかな違いが見られ、黒潮や渦、季節変動を反映していることから物質輸送や拡散現象を評価する上で一つの指標になり得ると言える。

#### 5. 粒子拡散の評価

##### (1) 二粒子分散分析

海域と季節による粒子の時空間水平拡散状態を定量的に評価するために粒子間距離から二粒子分散分析<sup>19)</sup>を行った。相対分散 $R^2$ とLagrange拡散係数 $k$ は以下のように定義される。

$$R^2(t, R_0) = \langle R(t, R_0) \cdot R(t, R_0) \rangle \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{2} \frac{dR^2(t, R_0)}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $R_0$ は初期の二粒子間距離、 $R$ は時刻 $t$ における二粒子間距離、 $\langle \cdot \rangle$ は時刻 $t$ における全二粒子ペアのアンサンブル平均操作を示す。二粒子分散分析は東西と南北のペア粒子それぞれに対し実施し、夏季冬季の2期間ごとに平均した時系列拡散係数を図-3に示す。水平拡散係数 $k$ は領域や季節に関わらず、時間に対し指数関数的に高くなることが分かった。冬季では領域間の拡散係数に大きな違いは見られないが、夏季においては沖合域の拡散係数が他の領域に比べ低い値を示し、沖合域の粒子の拡散運動が他の流域とは異なることがわかった。また、拡散係数は100時間経過時付近で一定になり始め、拡散

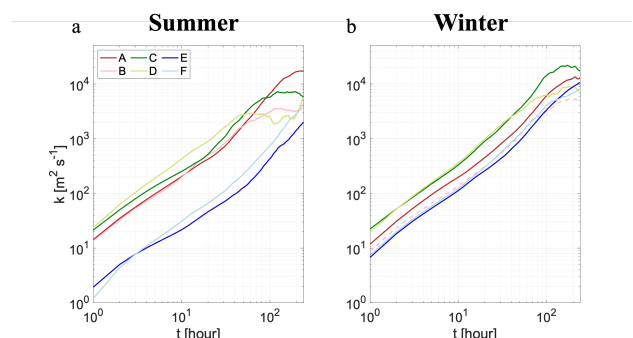


図-3 水平拡散係数 $k$ の時系列変化(左:夏, 右:冬)

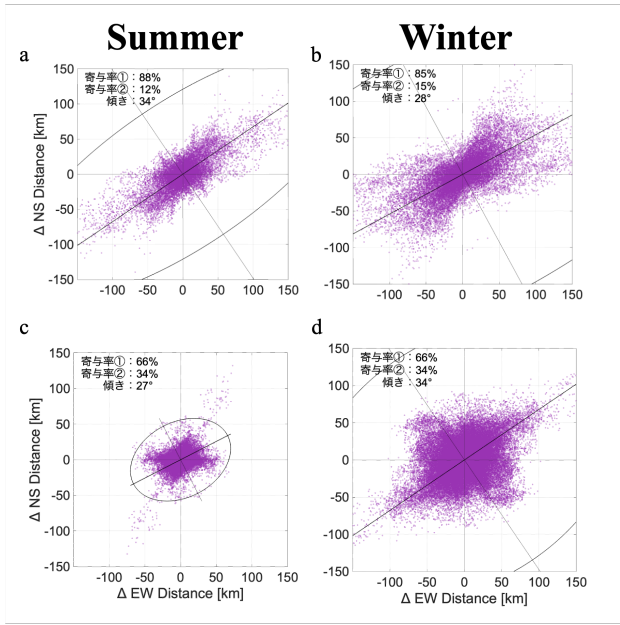


図4 方向依存した拡散方向分析例 (左:夏季, 右:冬季, 上段:黒潮上流域(領域C), 下段:沖合上流域(領域E), 楕円プロットは標準偏差の6倍)

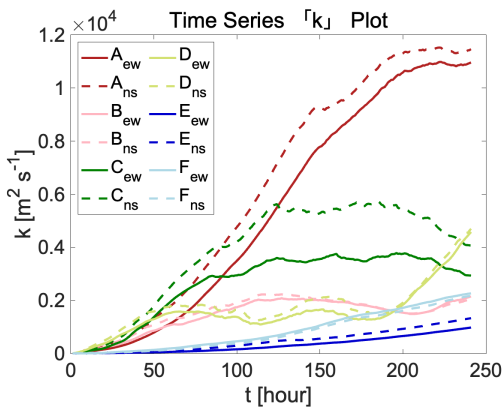


図5 夏季の方向依存した時系列水平拡散係数

の上昇が落ち着き始める。このことは、100時間程度経過すると領域外へ流出した粒子を考慮していないため、モデル領域内に残る粒子のみで推定した拡散係数では過小評価になることを意味する。つまり、このモデル領域内における拡散の評価可能な時間スケールは概ね100時間程度であると言える。

(2) 粒子分散の方向依存性

粒子の拡散とその方向を定量的に評価するために、粒子ペアの分散の長軸方向と短軸方向を主成分分析 (PCA) を応用して算出し、長軸と短軸方向の水平拡散係数を求めた。PCAは東西と南北のペア粒子に対して、それぞれ

表-2 夏季の水平拡散係数および比率

12E1 [hour]	水平拡散係数 $k$ [ $m^2 s$ ]		
夏季	major方向	minor方向	major成分 / minor成分
A	$6.0 \times 10^3$	$5.6 \times 10^2$	10.7
B	$2.1 \times 10^3$	$4.3 \times 10^2$	4.9
C	$4.5 \times 10^3$	$6.8 \times 10^2$	6.7
D	$1.3 \times 10^3$	$2.0 \times 10^2$	6.2
E	$3.4 \times 10^2$	$1.6 \times 10^2$	2.1
F	$6.0 \times 10^2$	$3.2 \times 10^2$	1.9

表-3 冬季の水平拡散係数および比率

12E1 [hour]	水平拡散係数 $k$ [ $m^2 s$ ]		
冬季	major方向	minor方向	major成分 / minor成分
A	$4.8 \times 10^3$	$1.1 \times 10^3$	4.5
B	$2.1 \times 10^3$	$5.9 \times 10^2$	3.6
C	$1.0 \times 10^4$	$1.7 \times 10^3$	5.9
D	$4.0 \times 10^3$	$5.6 \times 10^2$	7.1
E	$2.4 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$	1.9
F	$3.0 \times 10^3$	$1.6 \times 10^3$	1.9

の中心座標を算出し、中心座標点からの座標を元に粒子群の分散から拡散方向軸として主要2成分を第一主成分軸 (major) と第二主成分軸 (minor) として算出した (図-4)。例えば、図-4aは領域Cにおける夏季の5日 (121時間) 経過時点の東西ペア粒子の拡散状況とその主要2成分軸を示している。楕円は粒子分布を可視化し、その長軸と短軸がそれぞれmajorとminor方向、傾きと大きさは主成分軸方向と粒子拡散量を標準偏差の6倍で表している。傾きは水平軸 (東西軸) から34°、寄与率は粒子の分散の何割を説明するかを示す指標で寄与率①と寄与率②はそれぞれ第一主成分と第二主成分に対する指標である。つまり、寄与率①が高い値を示すほど、傾きの方向依存が強いと言える。

東西ペアと南北ペア粒子それぞれ主成分軸方向の二粒子分散分析を施し、その時系列変化を図-5に示す。ペア組みの初期配置 (東西と南北) によって、沿岸上流域 (領域A) と黒潮上流域 (領域C) では南北ペアの拡散係数が東西ペアよりも高い値を示したが、他の流域では概ね一致した。これは、沿岸から黒潮流域にかけて粒子の拡散が概ね東西方向の流れ場に強く依存し、南北に配置されたペアが南北方向のせん断による流れによって強く引き伸ばされるためであると考えられる。実際に、

東西軸からの主成分軸の傾きは沿岸上流域の夏季と冬季で $18^\circ$ と $21^\circ$ 、沖合上流域の夏季と冬季で $34^\circ$ と $27^\circ$

(図-4a,b)である。さらに、沿岸から黒潮流域(領域A, B, C, D)にかけて第一主成分の寄与率は83~92%という高い比率を示し(領域A, B, Dは図省略)、粒子の拡散が東西軸から $20\sim 30^\circ$ 傾いた方向(西南西と東北東方向)へ依存する可能性がある。沖合流域(領域E, F)では傾きが沿岸・黒潮流域と同程度であるが、上流域(領域E)の寄与率①が60%程度、楕円は円形に近く、粒子は四方に概ね等方向へ拡散していると言える(図-4c,d)。ここで、5日経過時点の主成分軸方向の水平拡散係数 $k$ 及び、minor成分に対するmajor成分の拡散係数比を夏季と冬季それぞれ表-2, 表-3に示す。拡散係数は式(1), (2)より東西と南北ペアそれぞれで算出し、その平均値を求めた。

拡散係数比はminorとmajor方向の拡散係数のアスペクト比であり、拡散方向の依存度を表す。沿岸から黒潮流域ではアスペクト比は5~10倍程度を示し、粒子の拡散がmajor方向(おおそ東西方向)に強く依存することが分かる(表-2, 3)。一方で、沖合域では拡散係数の比率は1~2倍程度で拡散の方向依存度が低く、粒子の分布状況(図-4c,d)から粒子が等方的に拡散する一般的な乱流理論に沿うような拡散を伴うことが明らかとなった。

方向依存する粒子の拡散現象は領域間で顕著に異なったが、季節間でのアスペクト比の大きな違いは沿岸上流域(領域A)を除き見られなかった。沿岸上流域では冬季に対し夏季に2倍程度の高いアスペクト比を示し、夏季の遠州灘を起源とする物質は東西方向に強く引き伸ばされるように拡散していく傾向が強いと言える。また、夏季冬季ともに沿岸上流域(領域A)と黒潮上流域(領域C)は高い拡散係数を示し(表-2, 3)、これらの海域では黒潮により直接的に粒子が引き伸ばされるように拡散している可能性がある。さらに、黒潮下流域(領域D)は上流域(領域C)よりも拡散係数が低く(表-2, 3)、このことは下流域では島背後で黒潮による渦乱れが粒子の拡散に影響し引き伸ばし効果を弱め低い拡散となった可能性が考えられる。

沖合域(領域E, F)では季節差が顕著であり、冬季は夏季に比べ拡散係数が1オーダーほど高い。冬季にはサブメソスケールによる対流効果が粒子の拡散と輸送に影響し、領域全体で粒子拡散が強化されていると考えられる。一方、夏季の沖合域では黒潮とサブメソスケール渦の効果が非常に弱く粒子の拡散が他の領域と比べ非常に小さいスケールで起きていることがわかる。

水平方向の拡散現象が季節によって異なることと同様に、鉛直方向の輸送距離も夏季と冬季で顕著な差異が見られた。鉛直方向の粒子の輸送距離は冬季において平均して100 m程度に達する一方、夏季には平均して20 m程

度にとどまり、冬季の鉛直方向の輸送距離は水平方向の輸送に比べ2オーダー程度小さいスケールであることがわかった。このことは、冬季において強化されるサブメソスケール渦が鉛直方向へも粒子の拡散を強化していることを意味している(図省略)。

## 7. 終わりに

本研究では、モデル領域全域に粒子を配置し、粒子追跡を行った結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 季節や領域間で粒子の輸送過程は異なり、特に夏季と冬季では沖合上流域の粒子の輸送方向に顕著な変化が見られた。
- (2) 粒子間距離は黒潮や流動、渦が発達する海域で長く、粒子の引き伸ばしが助長され、流動や季節変動による物質輸送や拡散現象を評価する指標となる。
- (3) 沿岸から黒潮流域にかけて粒子の拡散方向は概ね東西方向に強く依存し、拡散には数倍から10倍程度の強い非等方性を伴うことがわかった。一方、沖合流域においては粒子は等方的な拡散傾向が強かった。
- (4) 冬季の粒子間距離はモデル領域全体で高い値を示し、領域に依存せず拡散現象が活発化した。

これらの結果から、日本本州南岸海域においては、黒潮によって生じる流れが物質輸送に強く関わっており、特に海岸地形と黒潮の効果が物質拡散の方向依存性を高め東西方向の輸送を強化していることが定量的に明らかとなった。今後の展開として、黒潮や季節性が鉛直方向の物質輸送・拡散や混合プロセスにどのように影響するか評価することが課題である。

謝辞：本研究は科学研究費助成事業(22K18018, 22H05201, 24H00337)の援助を受けた。

## REFERENCES

- 1) Hasegawa, D., Yamazaki, H., Lueck, R.G., Seuront, L.: How islands stir and fertilize the upper ocean, *Geophysical Research Letters*, Vol.31, L16303, 2004.
- 2) 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.
- 3) Masunaga, E., Uchiyama, Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Dynamics of Internal Tides Over a Shallow Ridge Investigated With a High Resolution Downscaling Regional Ocean Model. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 3550-3558, 2018.
- 4) Liu, Chin-Lun., Chang Ming-Hue.: Numerical Studies of

- Submesoscale Island Wakes in the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, 123, pp.5669-5687, 2018.
- 5) Masunaga, E., Uchiyama, Y., Zhang, X., Kimura, W., Kosako T.: Modulation of submesoscale motions due to tides and a shallow ridge along the Kuroshio, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 186, 103828, 2022.
  - 6) 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, I\_1291-I\_1296, 2018. [Uchiyama, Y., Miyagawa, T., Odani, S., Kamidaira, Y.: A biological network around Okinawa island analyzed with a coupled high-resolution ocean circulation and Lagrangian particle tracking model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Volume 74, Issue 2, pp.I\_1291-I\_1296, 2018.]
  - 7) 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, *Journal of Oceanography*, Volume. 76 pp259-270, 2020.
  - 8) 数野真, 加古真一郎, 中村啓彦, 山城徹, 仁科文子, 久米元, 小針統: 高分解能沿岸海洋モデルの粒子追跡による黒潮への黒潮内側域水塊移流の評価, 水産海洋研究 86(4), pp153-165, 2022. [Kazuno, Shin., Kako, S., Nakamura, H., nishina, A., Kume G., Kobari, T.: Evaluation of coastal waters advected to the Kuroshio based on particle-tracking experiments with a high-resolution coastal ocean model, *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.*, 86(4) pp153-165, 2022]
  - 9) 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. Vol. 74, No. 2, I\_1291-I\_1296, 2018.
  - 10) Alexander F. Shchepetkin., James C. McWilliams. : The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, 9(4), pp.347-404, 2005.
  - 11) Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T., Komatsu, K. : Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *Original Articles*, Volume 65, pages 737-756, 2009.
  - 12) E.J. Mason, A.F. Molemaker, F. Shchepetkin, J.C. Colas, McWilliams, P. Sangrà : Procedures for offline grid nesting in regional ocean models, *Ocean Model.*, 35 (1), pp. 1-15, 2010.
  - 13) S.D. Woodruff, R.J. Slutz, R.L. Jenne, P.M. Steurer : A comprehensive ocean-atmosphere data set, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 68 (10) (1987), pp. 1239-1250, 1987.
  - 14) 増永英治, 木村和久, 小裕大地, 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評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, 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.]
  - 15) Romero, L., Uchiyama, Y., Ohlmann, C., McWilliams, J. C. and Siegel, D. A. : Simulations of Nearshore Particle-pair Dispersion in Southern California, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 43, pp. 1862-1879, 2013.

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

## MATERIAL TRANSPORT PROCESSES OFF THE SOUTHERN COAST OF THE JAPAN MAINLAND USING PARTICLE TRACKING EXPERIMENTS RELEASED IN THE ENTIRE REGIONAL OCEAN MODEL DOMAIN

Junpei SAKON, Eiji MASUNAGA, Yusuke UCHIYAMA

This study investigated mass transport processes influenced by the Kuroshio current and coastal topography with a Lagrange particle tracking simulations. Particles are released from the entire area of off the southeast Japan mainland as simulated by the Regional Ocean Modeling System (ROMS). Unlike conventional particle tracking methods that release particles from specific regions, this approach enabled the evaluation of material transport processes throughout the simulated region by initially distributing particles across the entire domain. The released particles diffused strongly along the boundaries of the Kuroshio current and eddy fronts, exhibiting pronounced directional dependence. This directional dependence was observed from coastal areas to the Kuroshio, with the east-west horizontal diffusion coefficients being 5-10 times larger than those in the north-south direction. On the other hand, in the offshore regions, isotropic diffusion occurred with strong seasonal dependence, showing that the horizontal diffusion coefficient in winter is approximately one order higher than in summer.