

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

木村 和久¹・増永 英治²・小碓 大地³・内山 雄介⁴

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 (〒316-0036 日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:18nm808h@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 茨城大学助教 広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-0036 日立市中成沢町4-12-1)

E-mail:ejji.masunaga.office@vc.ibaraki.ac.jp

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、領域海洋循環モデルROMSを用いた伊豆諸島周辺海域の流動再解析値に対してLagrange粒子追跡計算を実施し、黒潮や渦、潮汐が複合的に影響する海域における物質輸送および拡散の評価を行った。潮汐による物質拡散への影響を調べた結果、2日間スケールでは潮汐が物質の拡散に大きく寄与していたが、2日間以上の長い時間スケールでは潮汐が大スケールの移流の効果を抑制し、物質の輸送を抑制させていた。また、粒子の移動速度の周波数スペクトルは、潮汐により日および半日周期にピークを示し、潮汐より高周波数側のスペクトルは潮汐を考慮したモデルの方が高く、低い周波数では潮汐を考慮していないモデルの方が高い値を示した。よって潮汐はサブメソスケール渦などの高周波数の運動を促進させ、長い時間スケールの大きな渦運動を抑制させている可能性があることが明らかとなった。

Key Words : The Izu-chain island, Lagrangian particle tracking model, Tides, Kuroshio

1. はじめに

日本本州南岸海域は、黒潮や渦、潮汐が複合的に影響する海域の一つである。黒潮は日本本州南岸海域を南から北に向かって流れており、その最大流速は2 m/s以上になる。さらに、黒潮には伊豆諸島周辺の海域の渦運動を活性化させる働きがある¹⁾。海洋内における物質や熱の輸送にはサブメソスケールの渦運動が大きく関わっていると言われており²⁾、黒潮による強い流れが島と干渉することにより、強い鉛直混合が生じ植物プランクトンの分布に影響を与えている³⁾。また、伊豆海嶺上を東から西に伝搬する潮汐波が強い潮流を引き起こし、非線形内部波や混合を生じさせ、潮汐が伊豆諸島周辺海域の運動エネルギーを3割程度増大させていることが報告されている⁴⁾。このように日本本州南岸に位置する伊豆諸島周辺の海域は黒潮や渦、潮汐が複合的に影響する海域の一つであるが、複雑な物理構造を伴う輸送プロセスが生じているため詳細な物質や熱の輸送・拡散についての知見は乏しい。

黒潮は海洋内の栄養塩や稚魚の輸送に密接に関わっ

おり、北西太平洋に位置する黒潮内側域である日本南岸の内湾や内海に栄養塩を輸送している⁵⁾。また、マイワシなどの稚魚は黒潮流路によって輸送されることで成長速度が変化することがある⁶⁾。近年の海洋シミュレーションにより、黒潮によって発生する中規模渦より小さなサブメソスケール渦が栄養塩の輸送を促進し、一次生産に強く影響を与えていることが報告されている⁷⁾。このように黒潮や渦は生態系に大きな影響を与えていることが分かっている。したがって、黒潮が影響する北太平洋全体の海洋環境や生態系を解明する上でこの海域における物質輸送過程を解明することは非常に重要と言える。

そこで本研究では、黒潮や渦、潮汐が複合的に影響する海域におけるサブメソスケール渦等による物質輸送および拡散の評価をするために、ROMSをベースとした2段ネスティング領域海洋ダウンスケーリングモデルを構築した。このうち、小領域モデルであるROMS-L2モデルを用いて、本州中部沿岸から伊豆諸島周辺海域を対象とした流動再解析値に対してLagrange粒子追跡計算を実施した。さらに、潮流による渦運動への影響や慣性振動による渦の働きについても報告する。

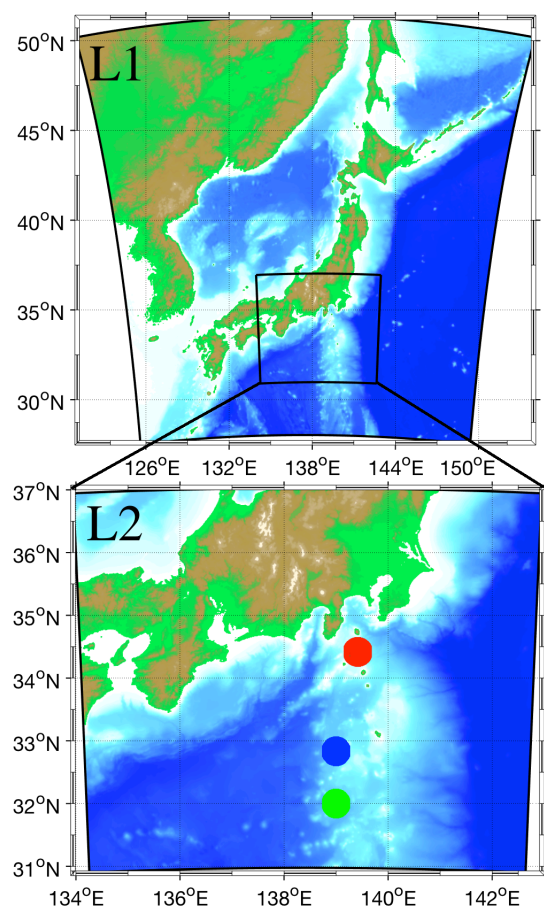


図-1 2段ネスト領域海洋モデルROMSの計算領域 (赤:伊豆大島南部, 青:黒潮流軸, 緑:黒潮南方にリリースした粒子の初期位置パッチを示す)

2. 研究手法

(1) 海洋数値モデル

本研究では、JCOPE2再解析値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、本州中部沿岸から伊豆諸島周辺海域を対象としたROMS-L2モデル（水平解像度1 km, 図-1, 表-1）を用いた⁴⁾。1段ネスティングROMS-L1モデル領域は東西2358 km×南北2598 km（格子数786×866×鉛直32層），ROMS-L2モデル領域は東西802 km×南北674 km（格子数802×674×鉛直40層）である。海面風応力と海面熱フラックスについては、気象庁GPV-MSM再解析値とCOADS月平均気候値を外力としてそれぞれ与えた。また、潮汐にはTPXO7.2潮位モデル値をL2領域の開境界から海面高度の外力として与えた。解析期間は2013年7月15日から2013年8月14日までの夏季を対象とした。ROMS-L2モデルは助走期間として、2011年12月から潮汐エネルギーを与えない計算を行い、その後2013年7月1日から潮汐エネルギーを考慮した約2週間のスピニアップを行い、7月15日以降の結果を解析に用いた。本研

表-1 ROMS-L2モデルの解析条件

計算期間	2011/12/1～2013/8/14
解析期間	2013/7/15～2013/8/14
格子数	674×802×40 層
水平空間解像度	1 km
境界条件	ROMS-L1 (3 km)
外力 (風応力)	JMA GPV-MSM
外力 (潮汐)	TPXO 7.2
海面熱フラックス	COADS
海底地形	JEGG 500+SRTM30

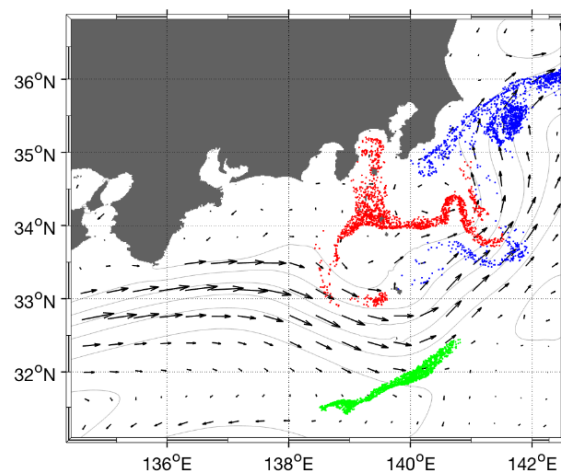


図-2 5日経過時の粒子の位置(赤:伊豆大島南部, 青:黒潮流軸, 緑:黒潮南方にそれぞれリリースした粒子)。

究と同様な多数のモデル研究事例により、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。なお、解析期間における対象領域の特徴として黒潮流軸が八丈島南岸を流れており、伊豆諸島の南を蛇行しながら東方向に流れていた（図-2）。

(2) 粒子追跡モデル

上記の海洋数値モデルの1時間再解析値を用いて、3次元のLagrange中立粒子追跡計算を実施した。粒子の初期分布は半径25 kmの円形と定義し、粒子のリリースパッチの初期位置は伊豆大島南部（34.4°N, 139.4°E），黒潮流軸（32.8°N, 139.0°E），黒潮流軸南方（32.0°N, 139.0°E）の計3箇所に設けた（図-1）。リリースパッチのそれぞれ表層2 mに1回につき約1800個の粒子を等間隔に配置した。各リリースパッチから2013年7月15日から1時間間隔で24回粒子を放出した。また、追跡期間は7月15日から8月14日の30日とした。物質輸送・拡散に対する潮汐の影響を評価するため、潮汐を考慮した場合と考慮しない場合の2ケースの粒子追跡計算を実施した。粒子の追跡は、ダウンスケーリングROMS-L2領域内のみで行い、領域外に粒子が放出された場合にはその粒子の追跡はその後行わない。なお、本研究では黒潮や潮汐に

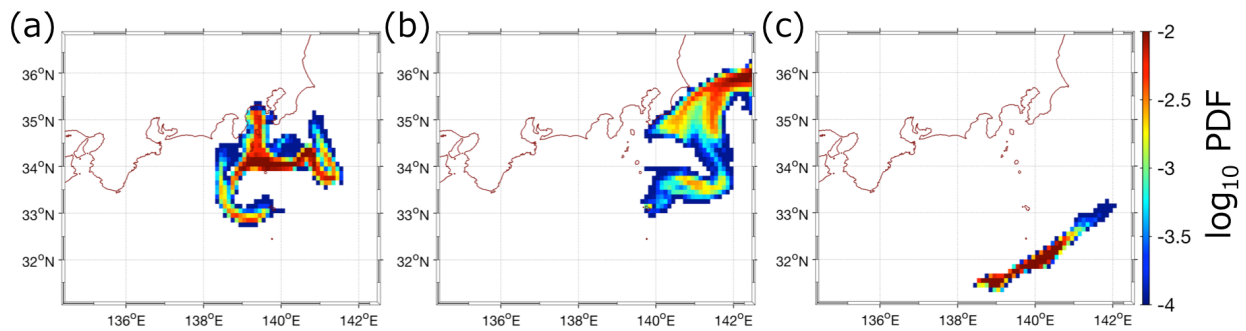


図-3 5日経過時の粒子の分布(左：伊豆大島周辺，中：黒潮流軸，右：黒潮流軸南方にリリースしたもの)

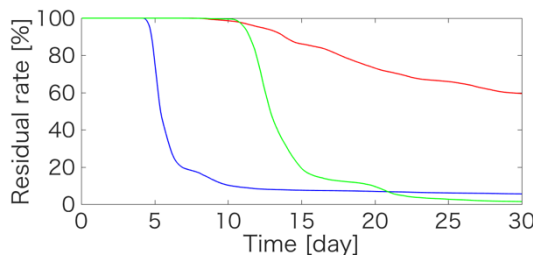


図-4 粒子の残留率（赤：伊豆大島周辺海域，青：黒潮流軸，緑：黒潮流軸南方）。

よって発生する移流効果を伴う流れや渦を対象としているため、ビーチングおよびrandom walkによる粒子の拡散は考慮していない。

3. 解析結果

(1) 粒子の軌跡

解析の結果、初期位置によって粒子の軌跡は大きく異なった（図-2）。粒子をリリースしてから5日経過（7月20日0時）した粒子の位置より黒潮流軸周辺にリリースした粒子は黒潮の影響を受け、5日程度で北東の領域外へ輸送され、一部の粒子は黒潮流路から外れて南房総へと輸送される様子も確認された。黒潮流軸南方にリリースした粒子は東西方向へ引き延ばされるように輸送された。粒子をリリースした後の5日経過時から24時間経過するまで（7月20日0時～7月20日23時）の確率密度（Lagrangian PDF）を図-3に示す。図-3は領域を0.1度ごとに分割し、各領域にある粒子の個数を全粒子の総数で除し、その確率を対数表示している。伊豆大島南部にリリースした粒子はリリースパッチから東および西方向へ輸送され、その後黒潮に取り込まれていた。一部の粒子は伊豆諸島北部に位置する相模湾内や伊豆諸島の島々周辺にトラップされるような分布を示した。黒潮流軸周辺にリリースした粒子はリリース直後から黒潮の流れにより輸送され、領域北東に多くの粒子が輸送されていた。さらに、南房総へは黒潮から外れた一部の粒子が多く輸送されていることもあり、房総半島沖合で粒子が広がるよ

うに分布している様子が確認された。

黒潮流軸周辺および黒潮流軸南方にリリースした粒子は30日後に90%以上の粒子が計算領域外へと輸送された（図-4）。黒潮流軸からリリースし領域外へ輸送されていない粒子は、図-3に示すように房総半島東側に輸送され、その後リリース10日程度で伊豆諸島北部、相模湾や東京湾湾口に輸送されていた。黒潮から沿岸域への輸送は、沿岸海域における魚群の分布に強く関わっていることが報告されており⁸⁾、解析結果に表れた粒子の輸送は黒潮と沿岸域間における幼稚仔の輸送過程を示している可能性がある。一方、伊豆大島南部にリリースした粒子は沿岸海域にトラップされ30日後にも約60%の粒子が領域内に残留した（図-4）。このことから伊豆大島周辺海域は外洋と直接接しているにも関わらず複雑な地形および島周辺で形成されるサブメソスケールの渦運動の影響により他の海域と比べて閉鎖性が高いことが示唆された。

(2) 二粒子分散解析

粒子の放流域および潮汐による物質拡散への影響を定量的に評価するため、二粒子分散解析⁹⁾により水平分散係数を求めた。ペアをなす二粒子の相対分散 R^2 およびLagrange相対分散係数 κ は以下のように求めた。

$$R^2(t, R_0) = \langle \mathbf{R}(t, \mathbf{R}_0) \cdot \mathbf{R}(t, \mathbf{R}_0) \rangle \quad (1)$$

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

ここで、 R_0 は初期間隔、 R は時刻 t における二粒子の間隔、 $\langle \cdot \rangle$ は時刻 t におけるペアをなす二粒子全てに対するアンサンブル平均操作を示す。

計算開始から2日経過時までは潮汐を考慮したモデルから得られた分散係数は伊豆大島南部にリリースした粒子は $1.50 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、黒潮流軸にリリースした粒子は $3.68 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、潮汐を考慮していないモデルから得られた分散係数は伊豆大島南部にリリースした粒子は $1.26 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、黒潮流軸にリリースした粒子は $2.90 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ と潮

汐を考慮したモデルから得られた分散係数の方が高くなった。一方、伊豆大島南部と黒潮流軸では2日経過以降は、潮汐を考慮したモデルから得られた分散係数は伊豆大島南部にリリースした粒子は $7.14 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、黒潮流軸にリリースした粒子は $9.21 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、潮汐を考慮していないモデルから得られた分散係数は伊豆大島南部にリリースした粒子は $8.73 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 、黒潮流軸にリリースした粒子は $9.68 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ と潮汐を考慮していないモデルの分散係数の方が高い結果となった（図-5、表-2）。よって2日以下の時間スケールでは潮汐が物質の拡散を促すが、2日間以上の長い時間スケールでは潮汐が大スケールの移流の効果を抑制し、物質の輸送・拡散を抑制させていたことがわかった。

また、潮汐を考慮したモデルと潮汐を考慮していないモデルの2013年7月15日0時における海面の相対渦度（図-6）を比較すると、潮汐を考慮することで領域全体で数十kmのサブメソスケール以下の渦構造が強化されていることが確認された。2013年7月15日から7月28日（大潮～小潮期間）における海面の渦運動エンストロフィーから、黒潮流路より北部では潮汐を考慮することで渦運動エンストロフィーが増大しており伊豆諸島周辺では10倍以上増えていたことがわかった。このことから伊豆諸島周辺では渦運動が潮汐によって強化され、物質の輸送や拡散が強められていると言える。

4. スペクトル解析

粒子の動態をさらに詳細に調べるために、粒子の移動速度の時系列データからパワースペクトル密度を求めた。

表-2 リリース地点ごとのLagrange相対分散係数 κ （計算開始～48時間までと49～100時間までの平均値、単位は m^2/s ）。

	潮汐あり		潮汐なし	
	1～48	49～100	1～48	49～100
伊豆大島	1.50×10^3	7.14×10^3	1.26×10^3	8.73×10^3
黒潮	3.68×10^3	9.21×10^3	2.90×10^3	9.68×10^3
黒潮南方	1.25×10^3	4.08×10^3	0.81×10^3	3.43×10^3

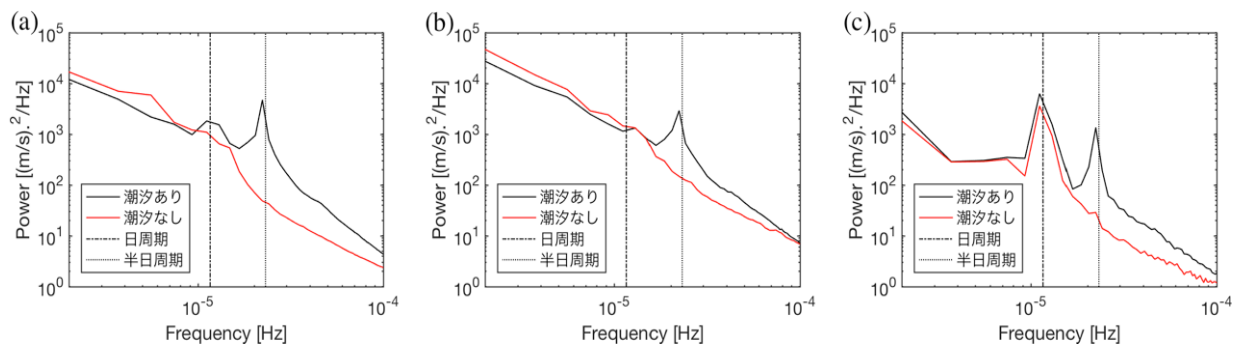


図-7 (a)伊豆大島周辺、(b)黒潮流軸周辺と(c)黒潮流軸南方にリリースした粒子の流速のエネルギー Spektral (黒線：潮汐を考慮したモデル、赤線：潮汐を考慮していないモデル)

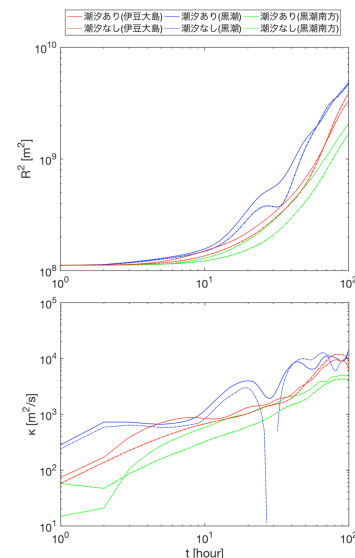


図-5 100時間経過までの(a)二粒子の水平相対分散 (b)分散係数（実線：潮汐を考慮したモデル、破線：潮汐を考慮していないモデル）。

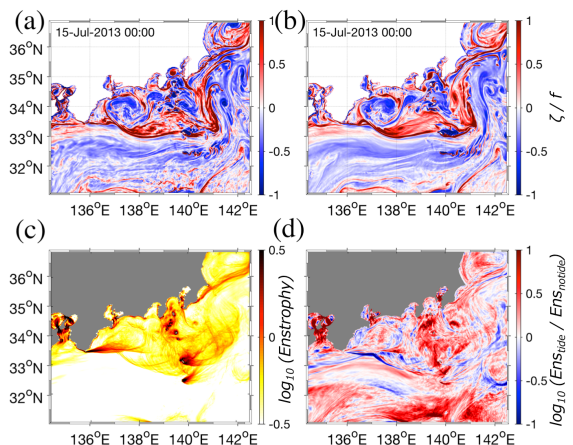


図-6 (a)潮汐を外力として与えたケースと(b)潮汐を外力として与えていないケースの海面の無次元相対渦度（2013年7月15日）、(c)潮汐を外力として与えたケースの渦運動エンストロフィー（2013年7月15日～7月28日の期間平均値）、(d)渦運動エンストロフィーの比（潮汐を考慮したモデルから潮汐を考慮していないモデルを除いた値）。

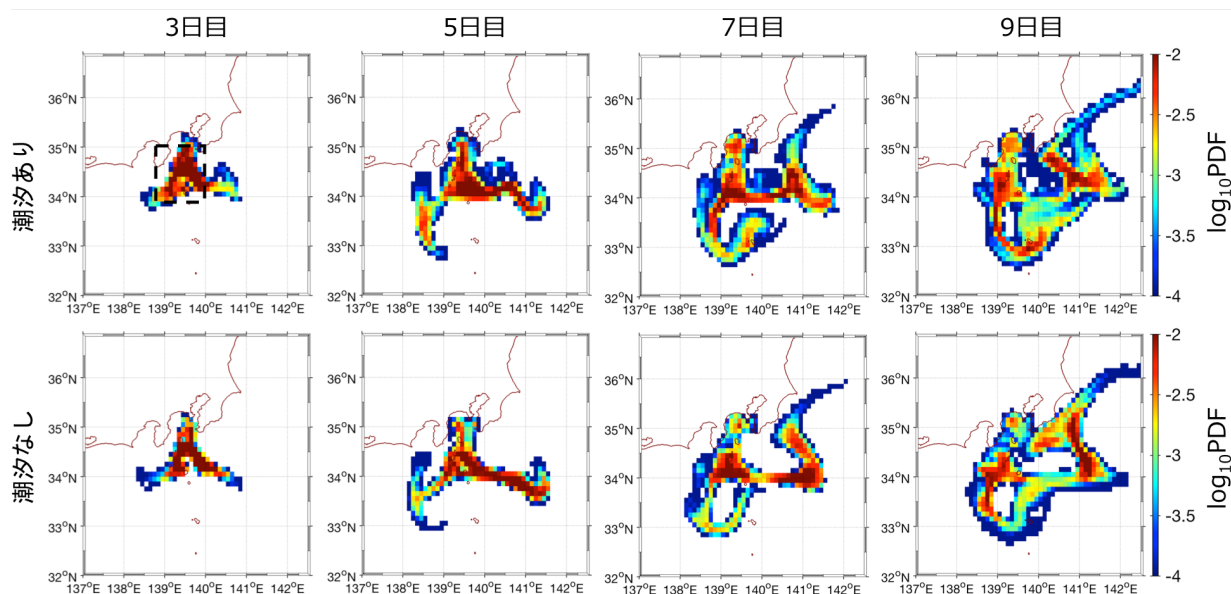


図-8 2日ごと（3日目、5日目、7日目、9日目）の粒子の分布(図-9で使した小領域を黒破線で示す)

計算は30日経過後にL2領域内に残った全ての粒子を対象に2013年7月15日から1時間間隔のデータ720個を用いて実施し、その平均スペクトルを図-7に示す。潮汐を考慮した全てのケースで半日周期 (M_2) にピークが見られた。このことから潮汐による影響が強いことがわかる。また、伊豆大島南部と黒潮流軸からリリースした粒子は、潮汐を与えることで半日周期より高い周波数帯 ($f > 3 \times 10^{-5}$ Hz) でエネルギーが増加し、日周期より低い周波数帯 ($f < 1 \times 10^{-5}$ Hz) のエネルギーが抑制されていた。よって潮汐は黒潮などの大スケールの運動からサブメソスケール渦などの小スケールかつ高周波数の運動への変換を促進させていると言える。黒潮南方では潮汐による高周期側のエネルギー増加は見られたが、顕著な低周波数側の減衰は見られなかった。一方、潮汐を考慮したモデルと考慮していない両モデル共に日周期に大きなピークが見られた。対象海域における慣性振動周期はおおよそ1日であり、潮汐を考慮しないモデルにおいても強い日周期のピークが見られることから、黒潮南方海域における日周期の振動は慣性運動に伴うものであると言える。過去の研究事例によると、台風による強い風や黒潮などの影響により海嶺や大陸棚の縁辺部で慣性振動が強化されると言われている¹⁰⁾。解析結果に表れた黒潮南方の慣性振動は、対象域が陸域から遠く離れているため地球自転の影響を強く受けた慣性振動の影響が顕著に表れたためだと言える。

5. 粒子の分布と残留率

沿岸域からの物質輸送に着目するために伊豆大島南部からリリースした粒子に対して1日毎のLagrangian PDF

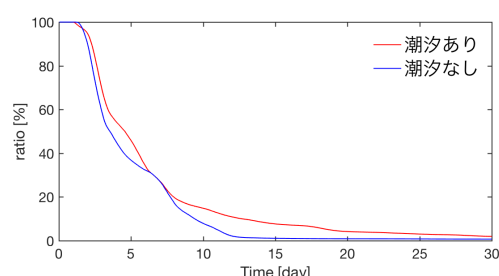


図-9 小領域での粒子の残留率 (赤：潮汐を考慮したモデル、青：潮汐を考慮していないモデル)

(粒子の変位に対する確率密度関数) を求め粒子の空間分布を定量化した。潮汐による効果を検証するために、潮汐を考慮したモデルと考慮していないモデルそれぞれの2日間隔（3日目、5日目、7日目、9日目）の粒子のLagrangian PDFを図-8に示す。潮汐を考慮したモデルの計算結果は、粒子をリリースしてから2日経過時まではほとんどの粒子がリリース海域に残留していた。その後、一部の粒子は、伊豆海嶺の東方および西方から黒潮流軸の近傍に輸送され、領域北東へ輸送されていた。一方で長期間相模湾等の沿岸域に残留する粒子も確認された。また、伊豆大島南部からリリースされた粒子のうち、東方向に輸送される割合が最も多いことがわかった。潮汐を考慮していないモデルにおいても粒子の輸送経路は似た結果を示したが、潮汐の効果による小スケールの渦現象が増強されていないため、粒子が輸送中に拡散されにくくパッチ状にまとまって輸送される様子が確認された。また、潮汐を考慮していないモデルでは、リリース後5日目より多くの粒子が東方向に輸送されていた。これは潮汐の効果がないため海域周辺の島にトラップされなかったことが原因であると考えられる。

伊豆大島周辺海域に潮汐の効果によって滞留する粒子をさらに解析するために、図-8に黒破線枠で示す領域内

に残った粒子の残留率を求めた（図-9）。粒子をリリースしてからおよそ2日目までは潮汐を考慮していないモデルの方が領域内に残留する粒子数が多かった。一方、40時間以降は潮汐を考慮したモデルの方が領域内に多く残留した。13日経過時には潮汐を考慮していないモデルでは領域内に1%を下回っていたのに対し、潮汐を考慮したモデルでは10%以上の粒子が領域内に残留していた。このことから潮汐は大スケールの移流効果を抑制させ、沿岸海域に粒子をより滞留させる効果があると言える。なお、本研究では、2013年の夏季を対象に解析を行ったため、今後は異なる期間で解析を行い黒潮の蛇行のタイプと渦や潮汐との関係を明らかにする必要性があげられる。

6. 結論

Lagrange粒子追跡モデルを用いた伊豆諸島周辺における計算・解析の結果から以下のことが明らかとなった。

- (1) 伊豆大島周辺海域は外洋と直接接しているにもかかわらず複雑な地形および島周辺で形成されるサブメソスケールの渦運動の影響により他の海域と比べて閉鎖性が高いことが示唆された。
- (2) 黒潮流軸以北の海域では、潮汐が小スケールおよび高周波数の渦や流れを活性化させ、粒子の運動に影響を与えていた。一方、潮汐により、大スケールおよび低周波数の運動は抑制されていた。
- (3) (2)から潮汐によって大スケールの運動がサブメソスケール渦等の小スケールな運動への変換が促進されていると言える。
- (4) 潮汐により大スケールの運動が抑制され、伊豆諸島周辺の小スケールな渦運動が強化されることで、沿岸海域に物質が滞留しやすくなることが明らかとなった。

謝辞：本研究は科学技術助成金（18H03798, 15KK0207）および造船学術研究推進機構（REDAS）の助成を受けた。

参考文献

- 1) Ma, X., Chang, P., Saravanan, R., Montuoro, R., Hsieh, J.S., Wu, D., Lin, X., Wu, L. and Jing, Z.: Distant Influence of Kuroshio Eddies on North Pacific Weather Patterns?. *Scientific reports*, Vol. 5, DOI: 10.1038/srep17785, 2015.
- 2) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Eddy-induced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.07.004>
- 3) Hasegawa, D., Yamazaki, H., Ishimaru, T., Nagashima, H., Koike, Y.: Apparent phytoplankton bloom due to island mass effect. *J. Marine Systems*, Vol. 69, pp238-246, 2008.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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続流の動態，水産海洋研究，77(4), pp290-298, 2013.
- 7) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, pp.5046-5062, 2017.
- 8) 山根猛：熊野灘南部定置網漁場における漁獲の多様性と投棄に関する事例研究，日本水産学会誌，2008;74(3):421-8.
- 9) 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.
- 10) Tada, H., Uchiyama, Y. and Masunaga, E.: Impacts of two super typhoons on the Kuroshio and marginal seas on the Pacific coast of Japan, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 132, pp80-93, 2018.

(2019.3.13 受付)

TRANSPORT PROCESSES AROUND THE IZU-CHAIN ISLANDS INVESTIGATED WITH A LAGRANGIAN PARTICLE TRACKING MODEL

Waku KIMURA, Eiji MASUNAGA, Taichi KOSAKO, and Yusuke UCHIYAMA

This study investigated mass transport and dispersion around Izu-chain islands off the Japan mainland using 3-D Lagrangian particle tracking simulations modeled in a high-resolution regional ocean modeling system (ROMS). The Kuroshio, eddies and tides largely influence physical processes in the study area. Details of transport processes involving the Kuroshio, eddies and tides have not been understood well. However, these processes are important for understanding oceanic environments and ecosystems in the North Pacific Ocean. The vorticity is enhanced by the tidal forcing in the whole study area. The tidal forcing enhances the horizontal diffusion of particles within a two-days scale. By contrast, in the longer time scale than two days, the dispersion of particles is suppressed by the tidal forcing, because large scale motions are suppressed by tides. The frequency spectrum of the particle velocity shows semi-diurnal peaks and high frequency (low frequency) is enhanced (decreased) by the tidal forcing. The tidal forcing promotes high frequency and sub-mesoscale eddies and suppresses low frequency and large scale motions.