

長期高解像度再解析に基づく瀬戸内海内部流動と 幼稚仔分散過程の形成メカニズムに関する研究

小碓 大地¹・内山 雄介²・御手洗 哲司³

¹正会員 (国研) 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@pari.go.jp

²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 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³沖縄科学技術大学院大学准教授 海洋生態物理学ユニット (〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1)

JCOPE2-ROMS2段ネスト瀬戸内海モデルによる8年間の長期再解析結果を用いた3次元Lagrange粒子追跡計算に基づく幼稚仔分散解析を実施し、周辺外力である黒潮流路変動、風応力および潮汐が瀬戸内海の内部流動および幼稚仔分散の変動特性に及ぼす影響を定量的に評価した。足摺岬および潮岬における黒潮離接岸変動は通過流の消長を通じて瀬戸内海東部海域の幼稚仔分散距離を増大させるなど、経年変化(特に夏季)に影響を及ぼす。冬季の強い北西風は瀬戸内海全体の時計回り通過流を強化し、瀬戸内海全域で幼稚仔を紀伊水道方向へ輸送する。西部海域の一部では北西風に対する南西方向のエクマン輸送の影響を受ける。潮汐は鉛直混合を強化して時計回り通過流を抑制し、幼稚仔を湾灘内部に残留させる傾向にある。

Key Words : ROMS, the Seto Inland Sea, larval dispersal, Lagrangian PDF, SIS throughflow

1. はじめに

瀬戸内海の内部流動は複雑であり、潮汐、海上風、浮力などの局所的な外力に加え、黒潮流路変動に伴う暖水波及に代表される広域的な影響を同時に受けて形成されている(例えば、著者ら^{1,2)})。その一方で、本海域の環境・生態系・水産資源等の持続的な管理という観点からは、内部流動とそれに伴う物質・海洋生物幼稚仔分散の長期的な動態把握(小碓ら²⁾;以下前報と呼称)に加え、それらの形成メカニズム、特に外力への応答特性について理解を深める必要がある。本海域が内包する複雑な流動環境下において上記の課題を解決するためには、高解像度かつ外力条件を仔細に考慮した流動モデルを用いた長期再解析によるアプローチは極めて有効である。

前報では、黒潮流路の経年変動および季節変動、密度場や風応力場の季節変動が瀬戸内海内部の流動構造と物質分散に与える影響を評価するために、2004年から2013年の10年間を対象とした幼稚仔分散の長期動態把握を試みた。その結果、足摺岬や潮岬における黒潮離接岸と密接な関係がある瀬戸内海全体の緩慢な時計回り通過流は、特に瀬戸内海東部海域における幼稚仔分散の経年変動に多大な影響を及ぼすことを示した。しかしながら、前報では瀬戸内海周辺外力(黒潮流路、風応力、潮汐等)を全て同時に考慮した解析を行ったため、個々の外力が瀬

戸内海内部の幼稚仔分散過程に及ぼす影響について、必ずしも適切に評価できていなかった。

そこで本研究では、瀬戸内海内部における流動と分散の長期変動特性に及ぼす主要な外力として黒潮流路変動、海上風および潮汐に着目し、それぞれの影響を分離して定量的に評価するべく、2007年から2014年の8年間を対象とした高解像度瀬戸内海モデルを用いた長期再解析を行った。ここでは、(1)全ての外力を考慮した場合、(2)

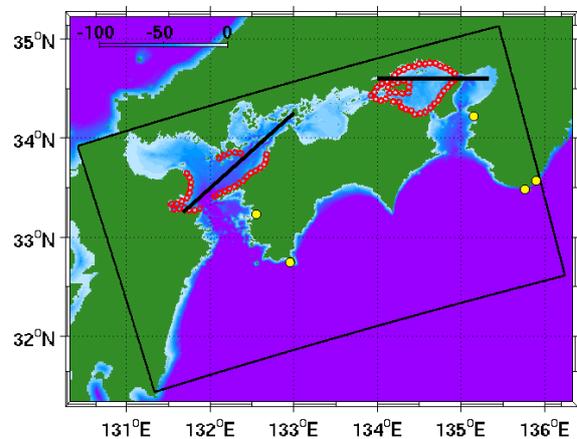


図-1 2段ネスティングによる ROMS-L2 計算領域(黒枠)と水深分布(カラー, m)。黄丸:左から順に, 宇和島, 足摺岬, 和歌山, 串本, 浦神。赤丸:幼稚仔放流源パッチ。黒線:図-10,11 に用いる検査線。

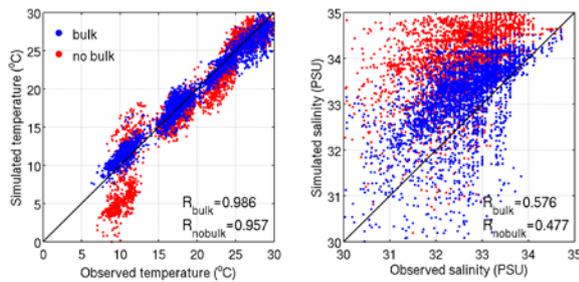


図-2 瀬戸内海全域における海面水温（左）と海面塩分（右）に関する計算値と観測値の比較。計算値はROMS-L2モデル、観測値は瀬戸内総合水質調査データを使用。青点はCOAMPS型バルク法による結果、赤点はCOADSによる海面フラックス月平均気候値を用いた結果である。

風応力を除去した場合、および(3)潮汐を除去した場合の3ケースの流動計算とそれらに基づくLagrange中立粒子3次元追跡計算を行い、各条件下での幼稚仔分散パターンを定量的に比較・解析することにより、各外力による幼稚仔分散特性の差異を評価したので、その結果を報告する。

2. モデルの概要

(1) 流動モデル

本研究では、3次元変分データを組み込んだJCOPE2海洋再解析データ³⁾を最外側境界条件および初期条件として与え、領域海洋循環モデルROMSを用いて2段階の1-way offlineネスティングにより、JCOPE2（水平解像度約10 km）→ROMS-L1（同2 km）→ROMS-L2（同600 m）へ順次ダウンスケーリングすることで、高解像度の瀬戸内海全域流動モデル^{1,2)}を構築した（図-1）。本研究では新たにCOAMPS型バルク法熱収支モジュール⁴⁾を組み込むことにより、熱収支および淡水収支が高精度化され、水温と塩分の再現性が大幅に向上した（図-2）。しかしながら、新モデルによる塩分は瀬戸内総合水質調査データと比べて、まだ若干の過大評価傾向にある。これは、領域への淡水供給のうち、2級河川や水路等からの排水を考慮していないことが原因と推察され、将来的にはこれらの陸水影響の導入が不可欠であると考えている。なお、その他流動モデルの計算条件については表-1に示すとおりである。解析対象期間は2006年12月1日から2015年1月31日までの約8年間であるが、L1モデルは2006年3月1日、L2モデルは2006年9月1日から計算を開始しており、それぞれ十分なスピニング期間を設けている。

(2) 粒子追跡モデル

ROMS-L2モデルの長期再解析結果を用いて3次元のLagrange中立粒子追跡計算を実施した。粒子放流源は半

表-1 ROMS-L2の計算条件

解析期間	2006年12月1日～2015年1月31日
格子数	802×482×鉛直32層（ $\Delta x=600$ m）
初期条件, 境界条件	ROMS-L1（ $\Delta x=2$ km, 日平均値）
海上風速, 気温 相対湿度, 降雨量	JMA GPV-MSM（2時間値）
全天日射量	気象庁観測値を解析領域内で内挿
海面熱フラックス	GPV-MSM等を用いたバルク法
海面塩分 (SSS)	JCOPE2（20日平均値） 緩和時間スケール：90日
一級河川流量	日本河川協会雨量・流量データベース（27本, 月平均気候値）
潮汐	TPXO7.0（主要10分潮）
海底地形	JEGG500+SRTM30_PLUS

径3 kmの円形として定義し、伊予灘および播磨灘の沿岸部をほぼ隙間なく取り囲むようにそれぞれ34個、48個ずつ配置した（図-1赤丸）。本研究では、各パッチ内の表層（水深0.5 m）に約267個の粒子をランダムに配置し、全パッチからそれらを同時に放流し、移流時間が30日になるまで3次元粒子追跡計算を行った。全パッチからの粒子放出は、2007年1月1日から2014年12月1日まで1日1回とした。すなわち、全期間を通して放流される粒子の総数は約6,300万個（各パッチ約77万個）である。本研究では、幼稚仔分散パターンのロバスト性を向上させるために、Lagrangian PDF⁵⁾に対して標準偏差3 kmのGaussian filterを適用した。粒子追跡計算やLagrangian PDF評価法のさらなる詳細については内山ら⁶⁾を参照されたい。

3. 瀬戸内海周辺外力が幼稚仔分散に及ぼす影響

(1) 黒潮流路変動の影響

第1章で述べたように、瀬戸内海流動を支配する主要外力として、四国沖を東進する黒潮、海上風、潮汐が挙げられる。以下では、これら3つの要素のそれぞれが瀬戸内海の内部流動構造と幼稚仔分散特性に及ぼす影響について評価する。まず、黒潮流路変動の影響を調べるために、図-3に2007年から2014年における(a) 宇和島と和歌山（宇和島一和歌山）の水位差（黒線）と風応力を除去した場合の豊後水道における通過流量（赤線、北向き・時計回り正）、(b) 足摺岬東西の水位差（黒線）と潮岬東西の水位差（赤線、串本—浦神）、および(c) 伊予灘（赤）と播磨灘（青）から放流された幼稚仔の移流時間30日後の月平均分散距離を示す。図-3(a)(b)については30日以下の短周期変動周期を除去している。

豊後水道における通過流量は正の割合が多く、瀬戸内海全体として時計回りの通過流が卓越していることが分かる。また、通過流量と宇和島（豊後水道側）・和歌山（紀伊水道側）間の水位差との間には極めて強い正の相

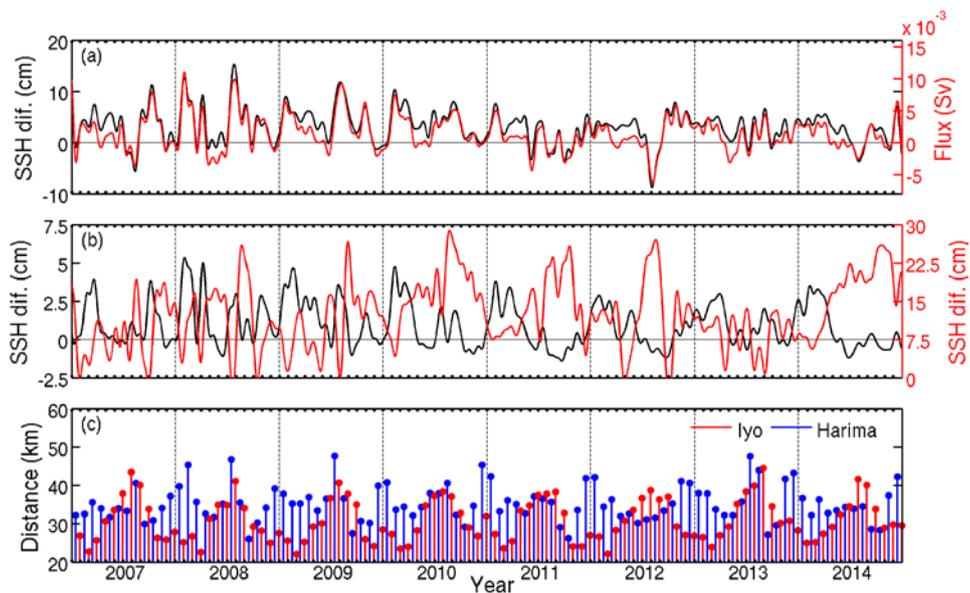


図-3 (a) 宇和島と和歌山の水位差 (黒) と豊後水道における海上風の影響を除去した通過流量 (赤, 北向き正), (b) 足摺岬東西の水位差 (黒) と串本・浦神間の水位差 (赤), および (c) 伊予灘 (赤) と播磨灘 (青) における移流時間 30 日後の幼稚仔分散距離の月平均値.

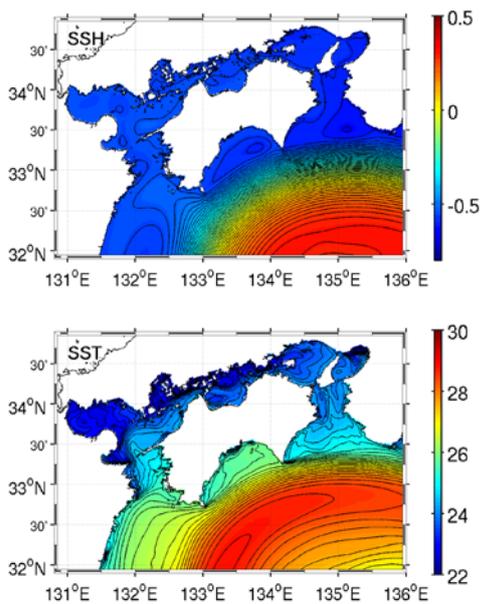


図-4 黒潮が足摺岬沖で接岸, 潮岬沖で離岸傾向にある期間 (2008年7月) における月平均水位 (上, m), および月平均海面水温 (下, °C) .

関 (相関係数0.919) があることから, 瀬戸内海の時計回り流動は太平洋に接続する両水道における水位差と密接な関係があることは明らかである. また, 潮岬東西 (串本・浦神間) の水位差は同岬沖における黒潮離接岸傾向を表すことが知られているが, 足摺岬東西の水位差は足摺岬と潮岬での離接岸の指標として捉えることが可能である. 例えば, 黒潮が足摺岬において接岸, 潮岬において離岸傾向時には足摺岬東西の水位差が増大するが, この水位差は豊後・紀伊両水道における水位差と比較的高い正の相関 (相関係数0.658) があり, 豊後水道 (宇

和島) と紀伊水道 (和歌山) の水位差は主に足摺岬 (潮岬) における黒潮の接岸 (離岸) 時に増大する. したがって, 足摺岬東西の水位差は瀬戸内海全体の緩慢な時計回り平均通過流変動とよく対応していると解釈される. 2008年7月における月平均水位と月平均水温 (図-4) を見ると, 黒潮は足摺岬で接岸, 潮岬で離岸傾向にあり, 水位の区間分布からも暖水である黒潮の離接岸状況に応じて豊後水道沖の水位が大きく変化することが分かる.

足摺岬東西の水位差には季節性が見られ, 1月から4月にかけて水位差が増大傾向になり, それに対応するように瀬戸内海の時計回り通過流も増大する. また, 2008年, 2009年, 2010年および2013年の夏季には足摺岬東西の水位差が急増し, 同時に通過流も大幅に増大している. 播磨灘における幼稚仔分散距離 (図-3 (c)) は, 足摺岬東西の水位差および時計回り通過流の増加に対応するように増大している. 特に, 2008年, 2009年および2013年の夏季にその傾向が顕著に見られることから, 播磨灘で孵化した幼稚仔は, 足摺岬沖における黒潮流路の経年変動の影響を大きく受けることが示唆される. 伊予灘における幼稚仔分散距離には, 夏季に増大し, 冬季に減少するといった季節性が見られる一方で, 播磨灘のような黒潮離接岸に対応した顕著な変動は確認されない.

(2) 風応力の影響

次に, 潮汐・風応力ありの場合, 風応力なしの場合, および潮汐なしの場合の比較数値実験を行った. 図-5は考慮する外力の組み合わせごとの両海域における月平均分散距離である. まず, 冬季に季節風として卓越する北西風の影響を評価するために, 1月に伊予灘および播磨

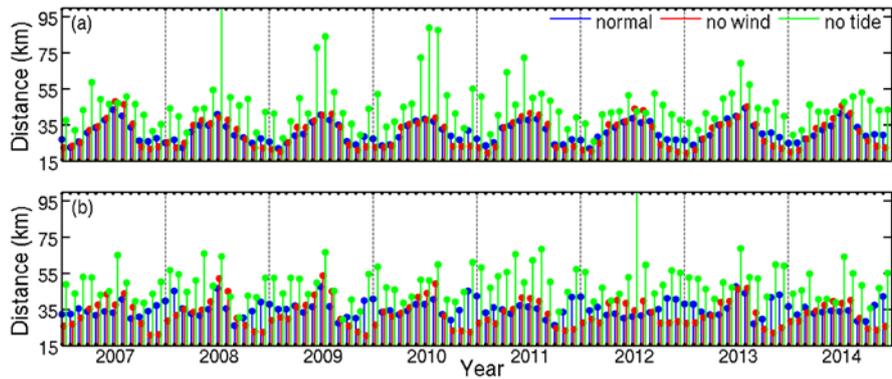


図-5 移流時間30日後の幼稚仔分散距離の月平均値。(a)伊予灘, (b)播磨灘での結果. 青:風応力・潮汐あり, 赤:風応力なし, 緑:潮汐なし.

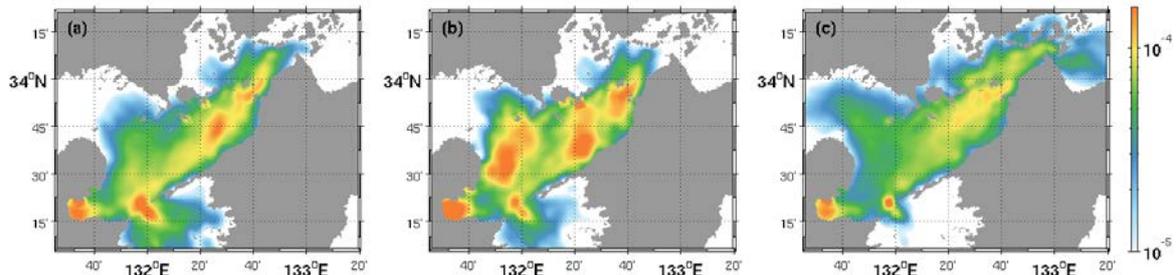


図-6 冬季(1月)における伊予灘から放流された粒子に対するLagrangian PDF. (a)潮汐・風応力あり, (b)風応力なし, および(c)潮汐なしとしたケースの結果.

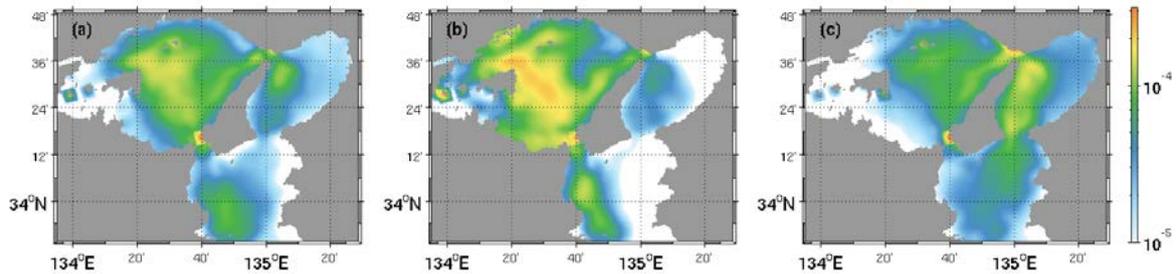


図-7 図-6と同じ. ただし, 播磨灘における結果.

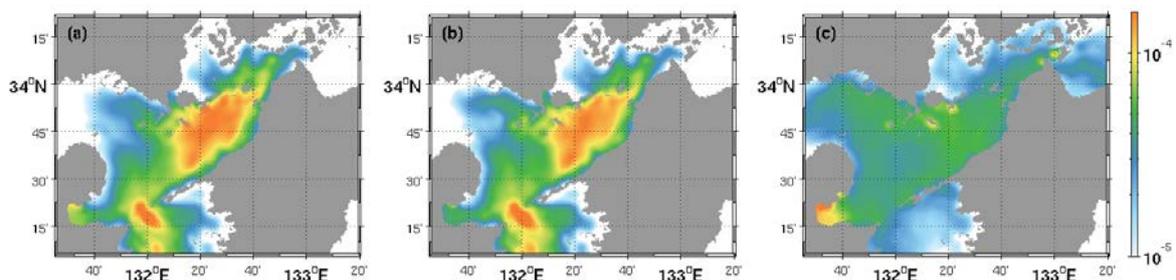


図-8 夏季(7月)における伊予灘から放流された粒子に対するLagrangian PDF. (a)潮汐・風応力あり, (b)風応力なし, および(c)潮汐なしとしたケースの結果

灘から放流された幼稚仔に対するLagrangian PDFの8年平均値を求めた(図-6, 7 (a) (b) 参照). 伊予灘では, 風応力ありの場合には佐多岬北岸(東経132度10分付近)西部では別府湾および豊予海峡に幼稚仔が集中し, 東部では四国沿岸に沿うように北東方向に輸送されており, 分散パターンが南西方向と北東方向に二分されている(図-6 (a)). 一方, 風応力なしの場合には, 幼稚仔のほと

んどが伊予灘内部に残留し(図-6 (b)), 放流位置からの分散距離も低下している(図-5 (a)). 冬季播磨灘では, 風応力を考慮した方が幼稚仔は全体的により東方向へと輸送され, 明石海峡から多くの幼稚仔が流出し(図-7 (a) (b)), 平均分散距離も大幅に長くなる(図-5 (b)). つまり, 海上風によって, 伊予灘では南西および北東方向, 播磨灘では東方向への輸送が強化される. この原因

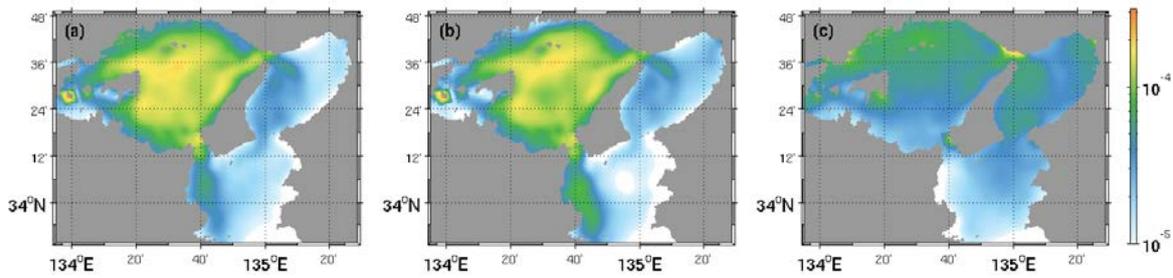


図-8 図-7と同じ。ただし、播磨灘における結果。

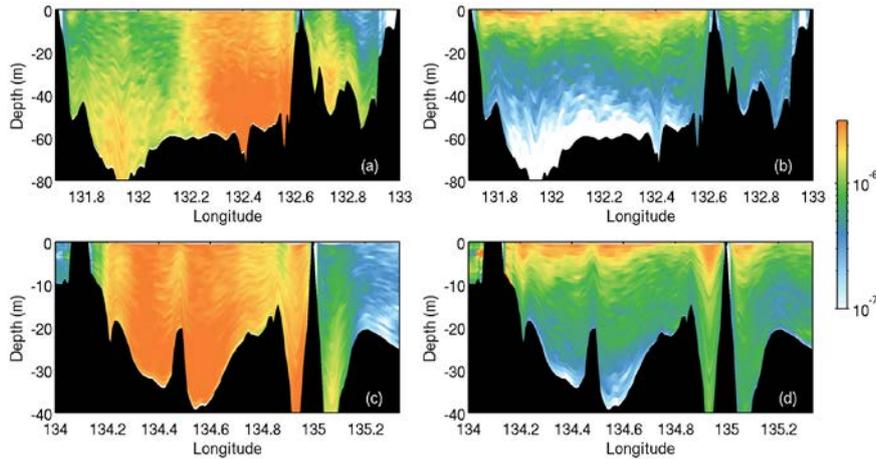


図-10 伊予灘（上）および播磨灘（下）における7月のLagrangian PDF（カラー）の鉛直分布。左は潮汐あり、右が潮汐なしの場合の結果を表す。検査線位置については図-1を参照。

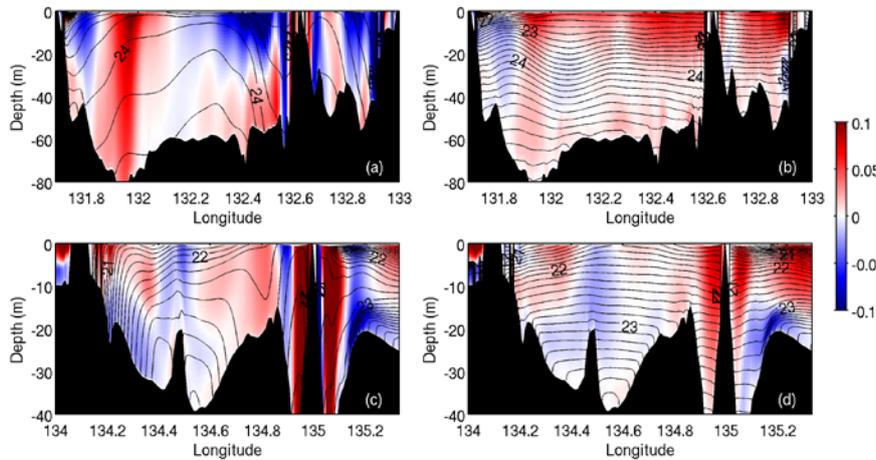


図-11 図-10と同じ。ただし検査線に沿う方向の月平均水平流速（カラー、m/s）および密度（コンター、 σ_t ）。

は、伊予灘西部では北西風に対して南西方向のエクマン輸送⁷⁾が発達し、伊予灘東部および播磨灘では北西風によって時計回り通過流が直接的に強化されたためと考えられる。

夏季についての比較実験結果を見ると（図-8, 9 (a) (b)），両海域から放流された幼稚仔は風応力の有無に関わらず概ね類似した分散パターンとなり、分散距離もほぼ同じである（図-5）。冬季の北西風と比べて夏季の季節風は比較的穏やかな南寄りの風であるため、瀬戸内海流動への影響は小さく、吹送流に伴う表層付近での幼稚仔分散に対してもほとんど関与しないことが分かる。

(3) 潮汐の影響

続いて、潮汐の有無による幼稚仔分散パターンの差異を評価した結果を図-5と図-6~9 (a) (c)に示す。潮汐なしの場合は、伊予灘、播磨灘ともに時計回り方向の幼稚仔分散が強化されて平均分散距離が大幅に増大し、より広範囲にLagrangian PDFが分布する一方で、全体的にはPDF値が低下している。潮汐なしの場合、特に夏季の幼稚仔分散距離が著しく増大しており、伊予灘から放出された幼稚仔のうち播磨灘にまで到達した粒子も確認された。潮汐の有無による幼稚仔分散パターン差が大きい夏季（7月）におけるLagrangian PDFの鉛直構造を見ると（図

-10), 潮汐ありの場合の幼稚仔は鉛直方向に強い混合作用を受けて海底近くまで多くの幼稚仔が輸送されているのに対して, 潮汐なしの場合は表層付近に高いPDF値が集中していることが分かる. この時の水平流速を比較すると(図-11), 潮汐なしの場合は表層付近により強い時計回り方向の流れ(通過流に対応)が生じている. つまり, 潮汐を考慮しないと夏季の成層化に伴って二層流構造が強化され, 幼稚仔は躍層下方へ沈降することなく, 表層に捕捉された状態でより東方向へ輸送されると考えられる. 反対に, 潮汐ありの場合は海峡付近を中心に潮汐フロントが発達して鉛直混合が活発となり, さらに潮汐残差流が重畳することで瀬戸内海全体の時計回りの通過流が抑制されたと推察される.

4. おわりに

本研究では, 8年間にわたる高解像度瀬戸内海モデル長期再解析とそれを用いた浮遊幼稚仔追跡計算を行い, 瀬戸内海流動を支配する3つの主要な外力(黒潮流路変動, 海上風, 潮汐)が内部の幼稚仔分散過程に及ぼす影響を個別に評価した. 主要な結論は以下の通りである.

(1) 黒潮流路変動の影響: 足摺岬および潮岬における黒潮離接岸に伴う瀬戸内海東西の水位差変動は, 瀬戸内海全体で時計回り通過流の強度を変化させ, 特に夏季の黒潮流路変動は瀬戸内海東部の幼稚仔分散距離に多大な影響を及ぼす.

(2) 海上風の影響: 冬季の強い北西風は時計回りの通過流を直接的に強化し, 瀬戸内海全域で幼稚仔を東方向へと輸送する. また, 瀬戸内海西部海域の一部では北西風に対するエクマン輸送の影響を受け, 南西方向の輸送が生じる. 一方, 夏季の季節風は比較的穏やかであるため, 幼稚仔分散過程に及ぼす影響は小さい.

(3) 潮汐の影響: 潮汐は強い鉛直混合(潮汐混合)を

引き起こし, 瀬戸内海全体の時計回り流動による東方向の幼稚仔分散を抑制する効果がある.

謝辞: 本研究は科学研究費補助金(15H04049, 15H00977)および港湾空港総合技術センター研究開発助成(第18-5号)の援助を受けた.

参考文献

- 1) 内山雄介, 栗山貴生, 宮澤泰正: 外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_481-I_485, 2013.
- 2) 小裕大地, 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.
- 3) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 737-756, 2009.
- 4) 内山雄介, 西井達也: 瀬戸内海周辺海域を対象とした台風通過時の広域海洋熱収支解析, 土木学会論文 B3(海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. I_383-I_388, 2015.
- 5) Mitarai, S., D. Siegel, J. Watson, C. Dong, and J. C. McWilliams: Quantifying connectivity in the coastal ocean with application to the Southern California Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, C10026, doi:10.1029/2008JC005166, 2009.
- 6) 内山雄介, 小裕大地, 西井達也, 御手洗哲司: コネクティビ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 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_1076-I_1080, 2014.
- 7) 内山雄介, 鈴江洋太, 小裕大地: 瀬戸内海および遠州灘沿岸域における陸域起源物質分散の季節変動について, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, I_949-I_954, 2016.

(2016.3.16 受付)

A MULTI-YEAR ANALYSIS ON CIRCULATION AND ASSOCIATED LARVAL TRANSPORT IN THE SETO INLAND SEA, JAPAN

Taichi KOSAKO, Yusuke UCHIYAMA and Satoshi MITARAI

We examine inter-annual and inter-seasonal effects of the fluctuating Kuroshio path, sea-surface wind and tides on circulation and larval dispersal in the Seto Inland Sea (SIS) using a massive amount of Lagrangian particles released in the modeled SIS circulation field with a double-nested, high-resolution ROMS-based SIS model for the years 2007-2014. When the Kuroshio path is close to Cape Ashizuri but far from Cape Shionomisaki, the clockwise SIS throughflow associated with the SSH difference between Bungo and Kii Channels is enhanced to transport more larvae eastward. Consequently, inter-annual variability of larval dispersal is largely affected by the fluctuating Kuroshio path. Northwesterly winter monsoon promotes direct eastward transport of larvae while resultant southwestward Ekman transport also play a role in the western side of the SIS. Tidal currents substantially reduce eastward larval transport through strong vertical tidal mixing that leads to downward larval transport across the pycnocline.