

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

小裕 大地¹・内山 雄介²・御手洗 哲司³

¹学生会員 神戸大学大学院 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)

E-mail:kosako.taichi@gmail.com

²正会員 神戸大学准教授 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 海洋生態系物理学ユニット (〒904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1)

黒潮大蛇行期を含む2004年から2013年の10年間を対象として、領域海洋循環モデルROMSをベースとした高解像度の瀬戸内海全域流動モデリングとその結果を用いた3次元Lagrange中立粒子追跡を実施し、九州・四国沖での黒潮流路変動が瀬戸内海内部の流動構造および幼稚仔分散過程に及ぼす影響を評価した。黒潮流軸距離と瀬戸内海内部の通過流量等との対応から、瀬戸内海全体の時計回り流動が潮岬・足摺岬・都井岬における黒潮離接岸状況と豊後-紀伊水道間の水位勾配の影響を強く受けて形成されることを明らかにした。粒子追跡結果に対してLagrangian PDF解析などを行い、瀬戸内海東部海域(播磨灘)からリリースされた幼稚仔分散は黒潮流路変動により強く依存し、瀬戸内海西部海域(伊予灘)からリリースされた幼稚仔は海域特有の還流と季節風に依存した分散特性を有することが示唆された。

Key Words : ROMS, Kuroshio path, the Seto Inland Sea, larval dispersal, Lagrangian PDF

1. はじめに

瀬戸内海は多くの海洋生物が生息する生産性の高い海域である。しかし、漁獲量は減少の一途をたどり、農林水産省によれば、1980年代までは年間40万トン前後であったものが2009年には半分以下の約18万トンにまで減少した。今後、瀬戸内海の海洋生態系を豊かにし、漁獲量を維持・回復させるために、有用水産魚種の生息域保護等の適切な資源管理が求められる。海洋生物、特に底生生物の多くは、生活史初期に数週間から数ヶ月にわたる幼稚仔期間を経て着底生活に移行することが知られており、この幼稚仔期における広域的な分散過程が生息域の決定に多大な影響を与えていると考えられる。しかしながら、幼稚仔分散の定量的な情報は未だ極めて乏しいのが現状である。現地調査による幼生分散過程の定量的評価を広域的に実施することが実質的に困難であるため、流動モデルを用いた幼稚仔分散シミュレーション(例えば、中山ら¹⁾)により分散特性を定量化することが海洋生物の生息域解明の鍵となる。

瀬戸内海は豊後水道および紀伊水道を介して外洋と接続しており、黒潮系暖水塊の流入が内部の流動構造の形成に多大な影響を及ぼしている²⁾。一般的に、黒潮は四国南部において十数年の周期で蛇行することが知られて

おり³⁾、最近では2004年中旬から2005年中旬にかけて黒潮大蛇行が発生している。また、内山ら⁴⁾は、瀬戸内海内部の年スケール以下の季節的な水位変動およびsubtidal流動特性が黒潮流路変動と密接な関係があることを指摘している。海洋生物の幼稚仔は遊泳能力が低く、海流に対して概ねpassiveに移流分散すると考えられるため、このような黒潮流路変動が瀬戸内海における幼稚仔分散にも少なからぬ影響を及ぼすことが予見される。

本研究では、内山ら^{4,5)}による瀬戸内海流動モデルをベースに、領域海洋循環モデルROMSを用いた2段ネスティングの高解像度瀬戸内海全域モデルによる再解析を行い、黒潮大蛇行期を含む2004年から2013年の10年間を対象に黒潮流路変動が瀬戸内海全体の流動構造に及ぼす影響を検討する。次いで、瀬戸内海西部海域および東部海域の代表として、伊予灘および播磨灘全域を対象とした3次元Lagrange中立粒子追跡による幼稚仔分散シミュレーションを実施し、Lagrangian PDF^{5,6)}等を算出することにより、黒潮流路の経年変動および季節変動と幼稚仔分散特性との対応を評価することを目的とする。

2. 海洋モデル

本研究では、JCOPE2海洋再解析データ(水平解像度

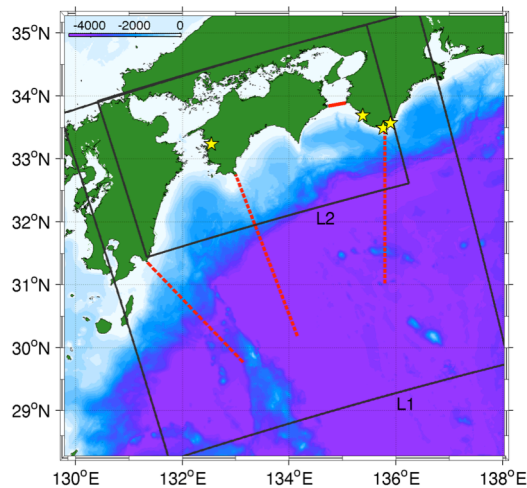


図-1 2 段ネスティングによる計算領域（黒枠），水深分布（カラー）．赤実線：紀伊水道における通過流量検査線，赤破線：黒潮流軸検査線（左から，都井岬，足摺岬，潮岬），黄星：水位観測地点（左から，宇和島，白浜，串本，浦神）．

約1/12度）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をベースとした2段階の1-way offlineネスティングにより，ROMS-L1（水平解像度2 km）からROMS-L2（同600 m）へとダウンスケーリングすることで瀬戸内海全域流動モデルを構築する（図-1，表-1）．本研究では新たに，黒潮の流路変動パターンを大域的に整合させるためにL1に対してJCOPE2の10日平均値を用いたTS nudging⁷⁾を施すとともに，L1，L2の海面温度（SST）および海面塩分（SSS）をJCOPE2の20日平均値に緩和させることで海面フラックスの補正を行い，長期計算に伴うドリフトを排除した．解析対象期間は，2004年中旬から2005年中旬に生じた黒潮大蛇行期を含む2004年1月1日から2014年1月31日までの約10年間である．ROMS-L1モデルは2003年1月，L2モデルは2003年7月から計算を開始し，それぞれ十分なスピナップ期間を設定している．

3. 黒潮流路変動が瀬戸内海内部の流動構造に及ぼす影響

(1) 黒潮流路と瀬戸内海内部の通過流量

図-2に (a) 気象庁による都井岬，足摺岬および潮岬から黒潮流軸までの距離，(b) 串本と浦神の水位差（串本－浦神），(c) 宇和島と白浜の水位差（宇和島－白浜），(d) 紀伊水道における通過流量（外洋への流出を正）の経年変化（2004年～2013年）を示す．ここで，黒潮流軸評価にはROMS-L1の結果を用い，水深50 mにおける流速最大地点で定義している．水位にはROMS-L1結果（黒線）および気象庁検潮所によるデータ（赤線）を用い，通過

表-1 ROMS-L2 の計算条件

計算期間	2004 年 1 月 1 日～2014 年 1 月 31 日
格子数	802×482×32 層，水平解像度 600 m
初期条件，境界条件	ROMS-L1（水平解像度 2 km）
外力（海上風）	JMA GPV-MSM（1 時間平均値）
海面フラックス	COADS（月平均気候値）
海面温度(SST)	JCOPE2（20 日平均値），緩和時間
海面塩分(SSS)	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	TPXO7.2（主要 10 分潮）
海底地形	JEGG500+SRTM30 PLUS

流量はROMS-L2結果の流速をもとに算出している．各観測地点と検査線は図-1に示されている．

大蛇行期である2004年中旬から2005年中旬では，黒潮は都井岬および足摺岬で接岸，潮岬で大きく離岸傾向にある．大蛇行期以降，黒潮は足摺岬および潮岬南部において比較的安定した流路を維持しているのに対して，都井岬から黒潮流軸までの距離は20～170 kmと大きく変動している．これは，豊後水道南部に発達する中規模渦が黒潮に接近することにより小蛇行が生じたことを反映していると考えられる．串本－浦神間の水位差は黒潮の蛇行・非蛇行との対応が良く，紀伊半島南部における黒潮の離接岸の指標として用いられる．本モデル結果は観測による串本と浦神の水位差を良好に再現できている．2004年7月～2005年9月，2006年6月～12月などに見られるように，串本－浦神の水位差の計算値の誤差が大きい期間もあるが，大蛇行期を除くと黒潮は潮岬のすぐ南を通過しており（図-3），黒潮流路位置の微妙な誤差によって水位差の誤差が増幅されやすいという側面がある．なお，串本と浦神の水位差と潮岬からの黒潮流軸距離との間には負の相関が見られ，黒潮接岸時に水位差が増大し，黒潮離岸時に水位差が減少する傾向がある（図-3）．

一方で，宇和島と白浜の水位差は瀬戸内海と外洋を結ぶ豊後水道と紀伊水道の水位差として捉えることができる．瀬戸内海内部の通過流量は，全期間を等して時計回りの還流が卓越しており，大域的には冬季に増大，夏季に減少するように季節変動している（図-2 (d)）．通過流量変動には，都井岬からの黒潮流軸距離および宇和島と白浜の水位差と正の相関，串本と浦神の水位差と負の相関が見られる．10年間の解析期間中，複数の年で夏季に一時的な通過流量の増大が見られるが，このとき常に宇和島－白浜間の水位差が増大している．以上のことから，瀬戸内海の通過流量は冬季に極大，夏季に極小となるような季節変動が卓越し，さらに夏季の豊後水道および紀伊水道南部における黒潮離接岸に伴う海面上昇による水位差が重畳しているものと解釈される．

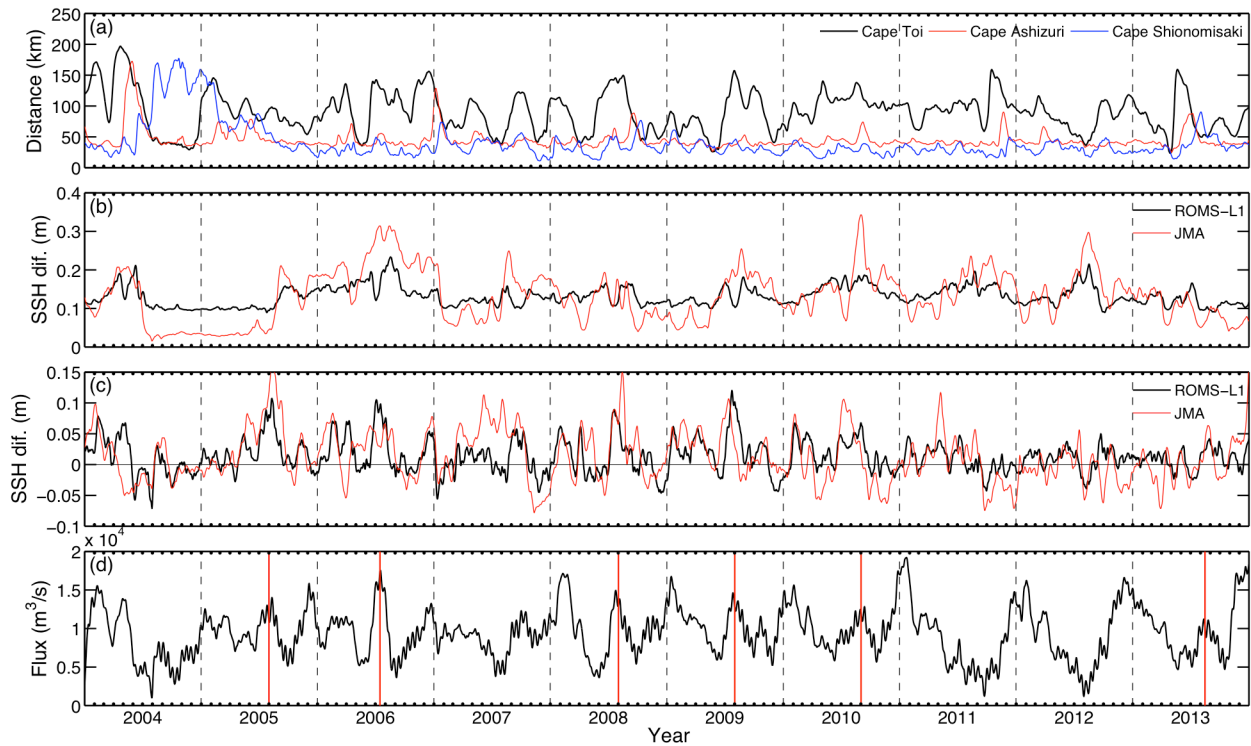


図-2 2004年から2013年における (a) 都井岬、足摺岬および潮岬から黒潮流軸までの距離、(b) 串本と浦神の水位差 (串本-浦神)、(c) 宇和島と白浜の水位差 (宇和島-白浜)、(d) 紀伊水道における通過流量 (外洋への流出を正) の日平均値の経年変動。赤実線は夏季における流量増大箇所を示す。

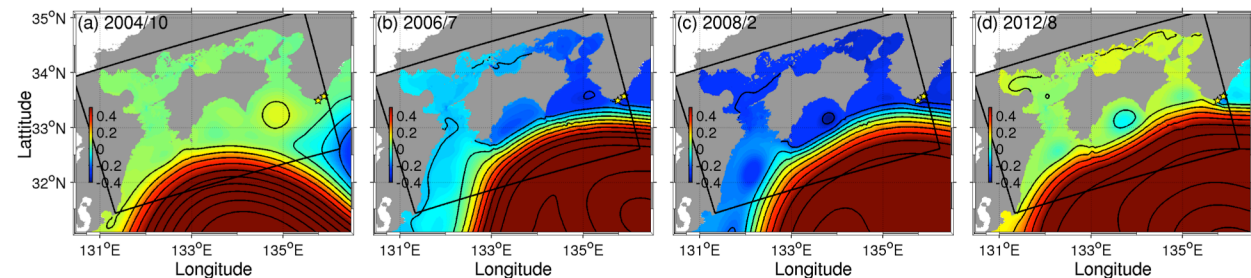


図-3 (a) 2004年10月 (大蛇行期, 流量低下)、(b) 2006年7月 (夏季, 流量増大)、(c) 2008年2月 (冬季, 流量増大)、(d) 2012年8月 (夏季, 流量低下) における水位 (SSH, m) の月平均空間分布。SSH コンターは0.1m間隔である。

(2) 瀬戸内海内部の水位分布パターン

年8月 (夏季, 流量低下時) における月平均SSH空間分

L1, L2の結果を用いて、前節で明らかとなった瀬戸内海通過流量の変動特性に対応した水位 (SSH) 空間分布を調べる。典型例として、図-3に (a) 2004年10月 (黒潮大蛇行期, 流量低下時)、(b) 2006年7月 (夏季, 流量増大時)、(c) 2008年2月 (冬季, 流量増大時)、(d) 2012年8月 (夏季, 流量低下) を示す。 (c) を除くと瀬戸内海内部の水位勾配はほぼゼロであり、夏季の流量増加は豊後水道-紀伊水道間の水位差の影響を強く受けることが確認される。大蛇行期を除いて黒潮流路は潮岬のすぐ沖側に位置している。流量増加時には都井岬では黒潮は離岸傾向、反対に足摺岬では接岸傾向にあること、また、夏季流量低下時には潮岬での接岸傾向が強化されること (潮岬-浦神間水位差は増大; 図-2 (b) 参照) が分かる。以上のことから、瀬

戸内海全体の通過流量は、都井岬、足摺岬、潮岬における黒潮離接岸状況に、夏季の流量増加は豊後水道-紀伊水道間水位差 (水位勾配) に強く依存することが明らかとなった。

4. 幼稚仔分散シミュレーション

前章で明らかとなった、季節変動、経年変動する時計回りの瀬戸内海通過流は、内海全体の物質輸送を支配していることが予想される。そこで本章では、瀬戸内海全域における幼稚仔分散特性を評価するために、ROMS-L2モデルの再解析結果を用いて3次元のLagrange中立粒子追跡を行う。粒子の放出源は半径3 kmの円形として定義し、瀬戸内海西部海域および東部海域をそれぞれ代表して、伊予灘および播磨灘の沿岸をほぼ隙間なく取り囲むようにそれぞれ35個、48個のパッチを配置する (リリー

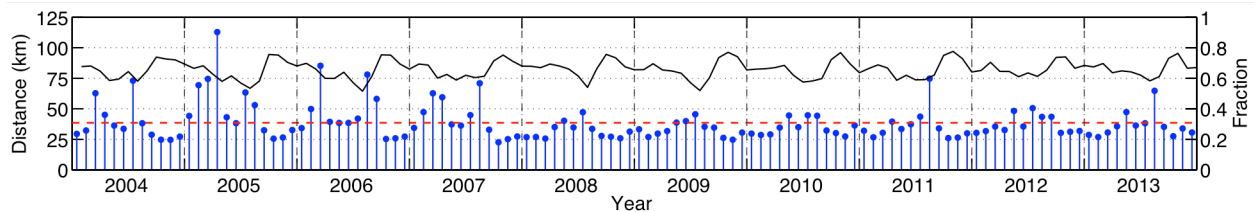


図-4 伊予灘全域からリリースした幼稚仔の分散距離（青バー）および海域内残留率（黒線）の月平均値（移流時間 30 日経過後）。赤破線：幼稚仔分散距離の期間平均値（約 35 km）。

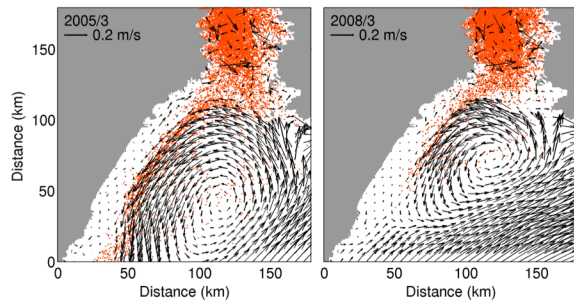


図-5 2005 年 3 月（蛇行期）と 2008 年 3 月（直進期）に伊予灘全域からリリースした幼稚仔の移流時間 30 日経過後の位置（赤点）および月平均流速分布（ベクトル）。

スパッチの配置については図-6, 9を参照）。本研究では、各パッチ内の表層（水深0.5 m）に約100個の粒子を均一に配置し、全パッチからそれらを同時にリリースし、マコガレイの幼稚仔を想定して移流時間が30日になるまで3次元追跡計算を行う。粒子のリリースは、2004年1月1日から2013年12月31日にかけて1日おきに行う。したがって、全期間を通してリリースされる粒子の総数は約3千万個である。粒子追跡計算方法およびLagrangian PDFの算出方法の詳細については、内山ら⁹⁾を参照されたい。

(1) 瀬戸内海西部（伊予灘）における幼稚仔分散

図-4に伊予灘全域からリリースした幼稚仔の移流時間30日経過後の分散距離および海域内残留率の経年変動を示す。放流から30日経過後の幼稚仔の期間平均分散距離は約35 kmであり、全期間を通して大幅に変動することはないが、春季から夏季にかけて分散距離がやや増大する。30日経過後に伊予灘内部に残留する幼稚仔の割合は50～75 %であり、10月頃にピークを迎え7月に向かって減少するといった季節変動性が確認される。黒潮大蛇行後期である2005年2～4月では、分散距離が増大しながらも60 %程度の幼稚仔が海域内に残留していることから、一部の粒子はかなり遠方へと輸送されたと考えられる。そこで、黒潮蛇行時（2005年3月）と直進時（2008年3月）の流速分布および幼稚仔の分散傾向を比較すると（図-5）、いずれも豊後水道南部に反時計回りの還流が発生しており、伊予灘から豊後海峡を経て豊後水道まで南下した幼稚仔の一部がこの還流にトラップされて九州右岸に沿って南下している。より強い還流を形成する蛇行時

の方が、より多くの粒子を九州東岸方向に流出させている様子が見て取れる。

次に、10年分の粒子追跡計算結果を用いて、伊予灘における移流時間30日経過後のLagrangian PDFの季節変動を評価する（図-6）。瀬戸内海全域における平均的な時計回り還流（図-2 (d)）によって幼稚仔は全体的に東方向へ輸送される傾向が見られるが、分散パターンには明瞭な季節差が現れている。春季（3～5月）および夏季（6～8月）に放流された幼稚仔の多くは伊予灘東部海域に集中するのに対し、秋季（9～11月）および冬季（12～2月）に放流された幼稚仔の多くは西寄りに輸送され、豊予海峡周辺と別府湾内部に集積する傾向にある。各季節における水深20 mの水温を比較すると（図-7）、春季から夏季の伊予灘東部には周囲より水温が低い冷水塊が存在する。これは冬季に発達し、夏季まで維持される底部冷水（cold dome⁸⁾）に対応しており、その水温構造に伴って発達する反時計回りの水平還流によって幼稚仔の東方向への輸送が維持・強化されたと考えられる。また、秋季から冬季にかけて伊予灘西部に幼稚仔が多く分布するのは、底部冷水の消滅に伴う東向き輸送の縮退と、北寄りの季節風（図-7）に対するエクマン輸送による南西方向流れの強化が原因であると考えられる。

(2) 瀬戸内海東部（播磨灘）における幼稚仔分散

次に、瀬戸内海東部海域の一例として播磨灘を取り上げ、前節と同様の解析を行う。図-8に、播磨灘からリリースされた幼稚仔の移流時間30日経過後の分散距離および海域内残留率の経年変動を示す。幼稚仔の分散距離の期間平均値は伊予灘の倍以上の約80 kmに達し、しかも冬季に分散距離が増大し、夏季に減少するなど季節変動振幅が大きい。結果として、2005年、2006年および2008年に見られる分散距離増大期を含め、分散距離と瀬戸内海の通過流量は正の相関を持つ。また、幼稚仔の海域内残留率も60～90 %と変動幅が大きく、通過流量が大きい冬季に海域外に流出して残留率が低下し、反対に通過流量の小さい夏季には海域内に多く残留する傾向がある。

図-9に播磨灘からリリースされた幼稚仔に対する移流時間30日経過後のLagrangian PDFの季節変動を示す。春季から夏季にかけてリリースされた幼稚仔の多くは、海域外にあまり流出することなく、播磨灘北部に集積して

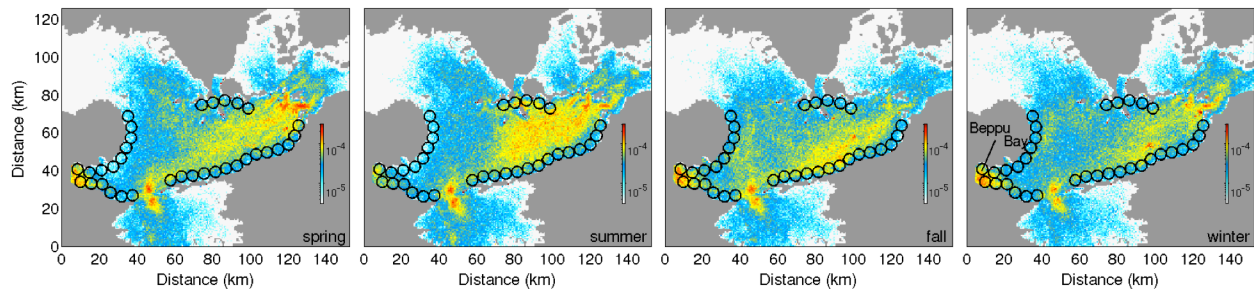


図-6 伊予灘全域からリリースした幼稚仔に対する Lagrangian PDF の季節変動 (移流時間 30 日経過後) . 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季に対する解析結果. 黒丸はリリースパッチを表す.

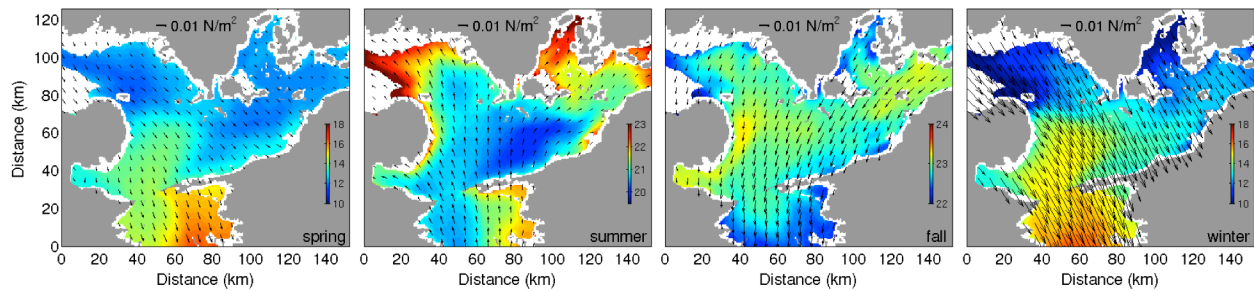


図-7 図-6 と同じ. ただし, 伊予灘全域における水深 20 m の水温 (カラー) および海上風応力 (ベクトル) の季節平均値.

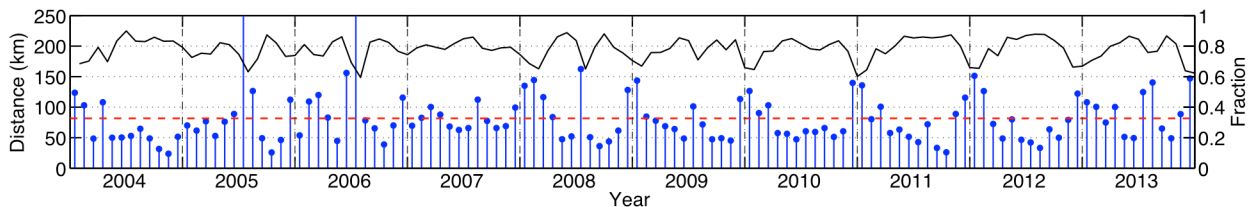


図-8 播磨灘全域からリリースした幼稚仔の月平均分散距離 (青バー) および月平均海域内残留率 (黒線) の経年変動 (移流時間 30 日経過後) . 赤破線: 幼稚仔分散距離の期間平均値 (約 80 km) .

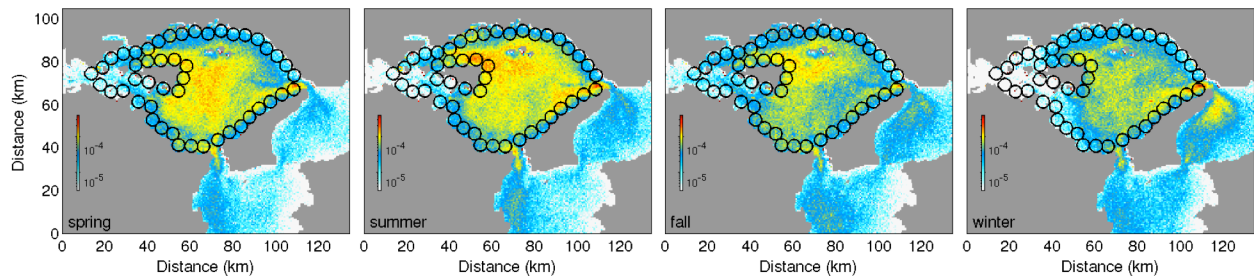


図-9 播磨灘全域からリリースした幼稚仔に対する Lagrangian PDF の季節変動 (移流時間 30 日経過後) . 左から春季, 夏季, 秋季, 冬季に対する解析結果. 黒丸はリリースパッチを表す.

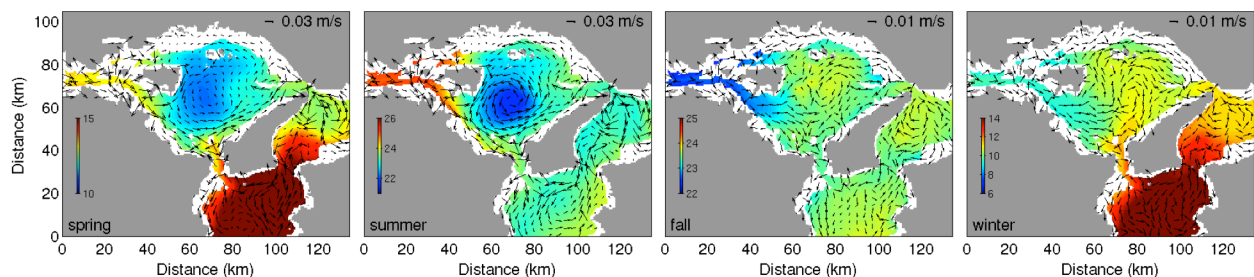


図-10 播磨灘全域における水深 20 m の水温 (カラー) および水深平均流速 (ベクトル) の季節変動. 海峡部での視認性向上のため, 春季, 夏季は流速 0.05 m/s 以上を 0.05 m/s, 秋季, 冬季は流速 0.01 m/s 以上を 0.01 m/s に置き換えている.

いる. 秋季から冬季にかけてリリースされた幼稚仔は全体的に東方向へ輸送されており, 明石海峡と鳴門海峡

(特に前者) からの流出が大きい. 各季節における水温および流速分布を比較すると (図-10) , 春季から夏季

にかけて伊予灘と同様に底部冷水の形成に伴う反時計回りの還流が灘全体に発達している。また、秋季・冬季は海域全体的な流れが緩慢であるものの、東方向の流れが卓越している。以上のことから、播磨灘における幼稚仔分散は、春季から夏季にかけて発達する反時計回りの還流にトラップされることによって灘内部の広範囲に分散し、灘北岸の西向き沿岸流によって比較的な流れが緩慢な小豆島北岸海域に多くの幼稚仔が集中する。一方、秋季から冬季には、黒潮離接岸になど伴って増大する瀬戸内海全体の時計回りの還流が強化されることによって灘東部や大阪湾への輸送が卓越するものと解釈される。

5. おわりに

本研究では、黒潮流路の経年変動および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詳細に評価した。瀬戸内海全体の時計回り流動は、都井岬、足摺岬および潮岬の3地点における黒潮離接岸や、豊後水道と紀伊水道の水位差に依存することを示した。次いで、黒潮流路変動が幼稚仔分散過程に及ぼす影響を評価するために、3次元Lagrange中立粒子追跡を実施し、平均分散距離やLagrangian PDFなどによりその影響を評価した。瀬戸内海西部（伊予灘）からリリースされた幼稚仔は、黒潮大蛇行期に豊後水道沖の反時計回り流れの影響を強く受けるものの、全期間を通して黒潮流路変動による影響は小さく、海域特有の還流と季節風に依存した分散特性を示した。瀬戸内海東部（播磨灘）からリリースされた幼稚仔は時計回り流動に依存した輸送パターンを示し、西部海域よりも黒潮流路変動の影響を強く受けている。分散パターンの季節差は大きく、非成層期には通過流の影響が卓越するものの、成層期には灘全体に形成される反時計回り還流の影響が強くなることが分かった。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C（24560622）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) 中山哲蔵, 八木 宏, 藤井良昭, 伊藤 靖, 三浦浩, 安信秀樹, 杉の博之, 山田達夫: 瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生産モデルの開発及びマコガレイ幼稚仔分散過程への適用, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 65, No. 2, pp. 1126-1130, 2009.
- 2) 駒井克昭, 日比野忠史, 大釜達夫: 黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海の流れに及ぼす影響, 土木学会論文集B, Vol. 64, No. 3, 165-179, 2008.
- 3) Kawabe, M.: Spectral properties of sea level and time scales of Kuroshio path variations, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 43, pp. 111-123, 1987.
- 4) 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. 481-485, 2013.
- 5) 内山雄介, 小碓大地, 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. 1076-1080, 2014.
- 6) 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.
- 7) 内山雄介, 神吉亮佑, 高野祥子, 山崎秀勝, 宮澤泰正: 海面高度計および Argo データに基づく 3 次元密度推定値を同化した海洋流動モデルの再現精度について, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 71, No. 2, 2015. (印刷中)
- 8) Chang, P., X. Guo, and H. Takeoka: A Numerical Study of the Seasonal Circulation in the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp. 721-736, 2009.

(2015.3.18 受付)

INFLUENCES OF KUROSHIO PATH ON LARVAL DISPERSAL IN THE SETO INLAND SEA, JAPAN

Taichi Kosako, Yusuke UCHIYAMA and Satoshi MITARAI

We investigate influences of fluctuating Kuroshio path on circulation and larval dispersal in the Seto Inland Sea (SIS) using a massive amount of Lagrangian particles released from 83 patches in the modeled SIS circulation field with a double-nested, high-resolution ROMS configuration for the years 2004-2013. The clockwise overall circulation in the SIS is largely affected by the distances of the Kuroshio axis from the Capes Toi, Ashizuri, and Shionomisaki. Interannual and seasonal variability of the pelagic larval dispersal is then examined with Lagrangian PDFs of the dispersed particles. The larval dispersal generally occurs eastward, mainly caused by the clockwise SIS circulation and thus the transient Kuroshio. In summer, however, the eastward larval dispersal is pronouncedly altered by locally-developed anticyclonic gyres associated with the “cold dome” in the Iyo Sea and Harima Sea. In the Iyo Sea, the eastward transport is maintained by a relatively weak gyre, while it is rather reduced through trapping of a strong gyre in the Harima Sea. In winter, many of the larvae released from the Iyo Sea are transported westward due to the northerly winter monsoon, while the persistent eastward transport is predominant in the Harima Sea.