

ロバストな幼稚仔海洋分散評価に向けた Lagrange粒子追跡モデルの感度解析

小碓 大地¹・内山 雄介²

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 神戸市灘区六甲台町1-1)

適切な内湾生態系ネットワーク解析手法の確立に向けて、高解像度瀬戸内海東部流動モデルを用いた3次元粒子追跡計算を行い、粒子数・放流水深等の粒子追跡パラメータ変化、および解像度・出力間隔・外力条件の違いに対する粒子の分散パターンの感度およびロバスト性を評価した。瀬戸内海東部海域の幼稚仔分散解析に必要な最小粒子数は、内湾で8,000個以下、外洋付近では12,000個以上と推定された。放流水深や流動-粒子モデルのカップリング時間間隔による分散特性への影響は限定的であるが、モデル解像度の向上に伴う沿岸域や海峡付近における流動構造変化や、潮汐混合の有無は粒子分散パターンに多大な影響を及ぼしていた。したがって、流動モデルの高解像度化と潮汐の考慮が欠かせないことが明らかとなった。

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

1. はじめに

近年、日本近海における漁獲量の減少が問題視されている。例えば、農林水産省によると、瀬戸内海の年間漁獲量は、1980年代までは約40万トンであったものが2009年には約18万トンと半分以下にまでに減少しており、漁獲量の早期回復に向けて効果的な水産資源管理を行うことが急務となっている。水産有用種を含む海洋生物の多くは、その生活史初期において海流に対してほぼ受動的な浮遊期間を有しており、幼稚仔の分散特性がその生物の生息域決定に多大な影響を及ぼすと考えられている。そのため、幼稚仔分散特性を把握することは、海洋生態系ネットワーク構造を解明し、適切な生息域保護等の水産資源管理を進めていく上で極めて重要である。しかしながら、主として観測および遺伝子解析の困難さから、幼稚仔分散に関する定量的な現地データは極めて乏しいのが現状である。そこで、現地調査と併せて、長期的かつ広域的な定量評価が可能な数値シミュレーション^{1,2,3,4}により幼稚仔分散特性を推定することが求められている。

幼稚仔分散シミュレーションには、海洋流動モデルとLagrange粒子追跡モデルによるカップリング手法を用いることが一般的である^{2,3,4}。上記手法の普及に伴い、数値モデル結果と現地データとの整合性評価に対する重要性が高まっている。流動モデルに対する現象再現性などに関するロバスト性の評価は広く行われているが、粒子

追跡モデルのパラメータ変化に対する感度およびロバスト性に関する研究はほとんどなされておらず、定量的な指針が策定されていないのが現状である(例えば、Miller⁵)。ここで粒子追跡パラメータとは、一般的に、粒子数、粒子の放流水深、および各粒子を追跡する移流時間等を指す。現地調査等によってこれらのパラメータ値やその合理的な同定方法に関する情報を予め収集しておくことが望ましいが、それらを事前に十分に把握することは事実上不可能である。粒子追跡計算では、粒子数が多いほど分散パターン(例えば、Lagrangian PDF分布)のロバスト性が向上する一方で、計算コストも増大する。同様に、流動モデル側の高解像度化や考慮すべき外力の種類数、流動モデル-粒子モデルのカップリング時間間隔などについても、精緻に設定すればそれだけ流動と粒子分散に関する再現性は向上することが期待されるが、ロバストな粒子追跡のための最適なモデル構成については全く知見がないのが現状である。したがって、粒子追跡パラメータ変化に対するモデル感度と、粒子追跡を前提とした最適な流動モデル構成に関する評価を実施することは、ロバストかつ合理的な粒子追跡計算を行う上で不可欠であると考えられる。

そこで本研究では、まず、領域海洋循環モデルROMSを用いた3段ネスティングの高解像度瀬戸内海東部流動モデルによる流動再解析を行う。さらに、その再解析結果を入力値として用いて同海域を対象とした3次元

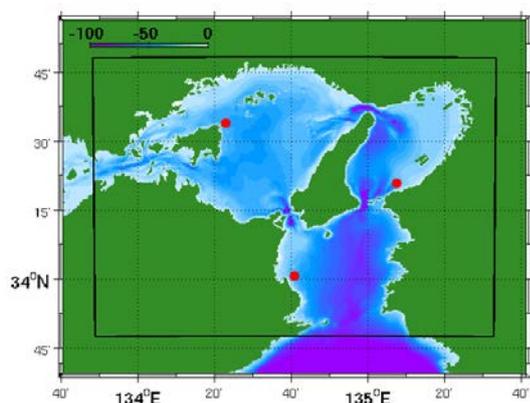


図-1 3段階ネスティングモデル計算領域（黒枠：L3モデル領域）と水深分布（カラー）．赤点は粒子の放流域（左から、播磨灘、紀伊水道、大阪湾）を示す．

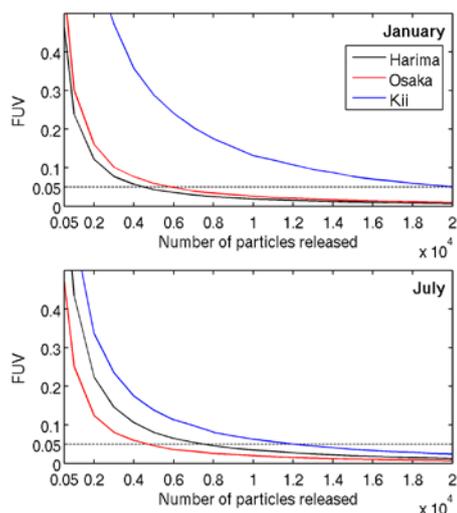


図-2 放流粒子数に対する FUV 上限値の変化（移流時間30日後，L2モデルによる）．上：1月，下：7月．

表-1 FUV 上限値 (<0.05) を用いて推定した移流時間30日後の最小粒子数 (L2モデルによる) ．

海域	1月	7月
播磨灘	4,300個	7,500個
大阪湾	5,800個	4,700個
紀伊水道	20,000個	12,000個

Lagrange粒子追跡をオフラインで実施し、放流する粒子数等の粒子追跡パラメータを変化させた数値実験を行う。また、流動モデルのグリッド解像度・外力条件（ここでは潮汐に着目）の有無などの流動モデル条件の違いに対する粒子の分散パターンの感度およびロバスト性を併せて評価することで、最適な海洋流動モデルLagrange粒子追跡モデルの構成に関する基礎的な情報を整理することを試みる。

2. モデルの概要

(1) 流動モデル

本研究では、3次元変分データ同化を組み込んだ海洋研究開発機構のJCOPE2海洋再解析値（水平解像度約10 km）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を用いた3段階の1-way offlineネスティングにより、ROMS-L1（水平解像度2 km）→L2（同600 m）→L3（同200 m）へと順次ダウンスケーリングした高解像度瀬戸内海東部流動モデル^{2), 3), 6)}を用いた（図-1）．ROMS-L1モデル領域は東西640 km×南北640 km（格子数320×320×鉛直32層），L2領域は，東西480 km×南北288 km（同800×480×鉛直32層），L3領域は東西160 km×南北112 km（同800×560×鉛直32層）である．本研究では、瀬戸内海内部における海面水温の再現性を向上させるために、海面熱収支をオンラインで解くCOAMPS型バルク式熱収支モジュール⁷⁾を導入した．海上風、気温、相対湿度および雲量には気象庁GPV-MSM再解析値を、全天日射量には気象庁観測値を使用した．海面淡水フラックスは、GPV-MSMによる降雨量とバルク法による潜熱フラックス計算値の差として与えた．また、長期計算に伴う塩分ドリフトを補正するために、海面塩分（SSS）をJCOPE2の20日平均値に緩和させた（緩

和時間スケール90日）．領域内に流入する一級河川（L1：29本，L2：27本，L3：10本）を考慮し、流量には日本河川協会の雨量・流量データベースから求めた10年間の月平均気候値を与えた．また、潮汐には、TPXO7.0による主要10分潮をL1開境界において考慮した．海岸海底地形には、ROMS-L1およびL2モデルではJEGG500（水平解像度500 m）をSRTM30（同30秒）で補完したものを、L3モデルでは内閣府中央防災会議データ（水平解像度：50 mもしくは150 m）を使用した．解析対象期間は、2012年1月1日から2012年2月29日（冬季）および2012年7月1日から2012年8月29日（夏季）の各60日間である．ROMS-L1モデルは2011年6月，L2モデルは2011年8月，L3モデルは2011年10月から計算を開始しており、それぞれ十分なスピニアップ期間を設定している．なお、粒子追跡計算の際に用いる流動モデル再解析値は、特記しない限りはROMS-L2モデルの結果を使用している．

(2) 粒子追跡モデル

上記の流動モデル再解析値を用いて、3次元のLagrange粒子追跡計算をオフラインで行った．粒子の放流源は半径3 kmの円形で定義し、播磨灘・大阪湾・紀伊水道の3ヶ所に放流源を設けた（図-1）．各放流源から、2012年1月1日から2012年1月30日（冬季）および2012年7月1日から2012年7月30日（夏季）の各30日にかけて2時間間隔で粒子を放流し、移流時間が30日になるまで追跡を行った．

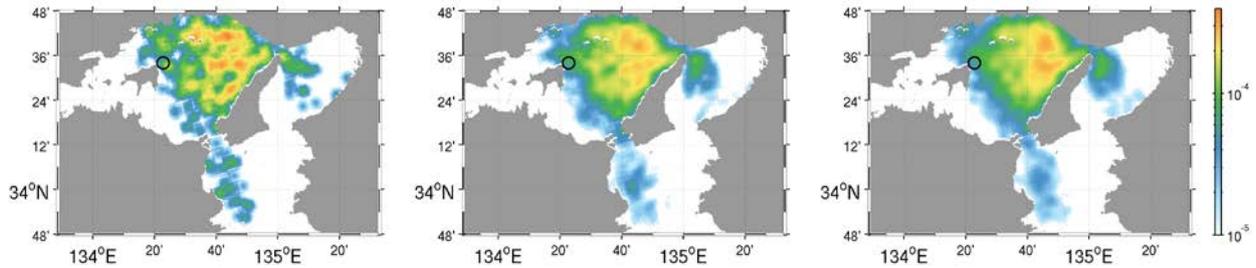


図-3 放流粒子数 500 個 (左), 4,000 個 (中央) および 8,000 個 (右) に対する移流時間 30 日後の Lagrangian PDF (km², 1 月, 播磨灘, L2 モデル) . 黒丸印は放流領域を示す.

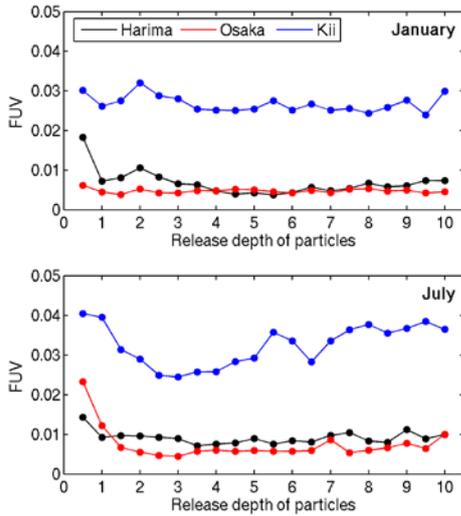


図-4 各海域における放流開始水深 (m) ごとの Lagrangian PDF とその全水深平均値間の FUV (移流時間 30 日後, L2 モデル) . 上: 1 月, 下: 7 月.

特記なき限り, 流動モデルによる流速3成分の2時間平均値を用いて粒子追跡を行った. すなわち, 流動モデル粒子モデルのカップリング時間間隔は2時間を標準とし, その間の3次元移流速度には時間的な線形内挿値を用いることとした. なお, 粒子の岸への衝突と停止 (ビーチング), 生物学的条件による粒子の鉛直挙動や付加的な擬似拡散 (random walk) は考慮しない.

(3) ロバスト性の評価手法

粒子追跡結果のロバスト性を評価するにあたって, 任意のLagrange粒子に関する2次元の確率密度関数であるLagrangian PDF^{2,4)}を用いて粒子の空間分布を定量化する. ただし, 粒子追跡結果のロバスト性を向上させるために, Lagrangian PDFに対して標準偏差3 kmのGaussian filterを施している. 続いて, 粒子数, 放流水深などのパラメータ変化などに起因するLagrangian PDFの差異の評価には, 次式で表されるSimons *et al.*⁸⁾によるFUV (Function of Unexplained Variance)を用いる.

$$FUV = 1 - r^2 \quad (1)$$

ここに, r : Lagrangian PDF間の線形相関係数である. し

たがって, FUVは0から1の値を取り, 0に近いほど2つのLagrangian PDFは同一に近いと判定されるため, PDF間の差異を定量的かつ簡潔に評価できる.

粒子数の変化に関しては, 以下の手順で求められるFUV上限値を用いて評価する. まず, 放流源パッチ内に初期配置する粒子数を, 期間内に放流される総粒子数が30,000個になるよう設定し, 粒子追跡を行う. その中から500個, および1,000個刻みで1,000個から20,000個までの計21通りの数の粒子群を乱数を用いてランダムに抽出し, それらを用いてLagrangian PDFを算出する操作を100回ずつ繰り返す. この手順により, 21通りの粒子数それぞれに対して100パターンのLagrangian PDFが作成される. さらに, それらのLagrangian PDFを用いて合計4,950通りのFUVを算出し, それらのうち95%が下回る値をFUV上限値とする. すなわち, FUVの上限値が小さいほど分散パターンの差異は統計的に無視でき, ロバスト性が確保されたと判定されることになる.

3. 粒子追跡モデルの感度解析

(1) 粒子数に関する感度: 最小粒子数の推定

放流する粒子数は, 粒子追跡計算のロバスト性および計算コストを考慮して最適な数を設定することが望ましい. 本研究では, Simons *et al.*⁸⁾を参考に, FUV上限値=0.05における粒子数を最小粒子数と定義し, L2モデルの結果を用いて粒子数に対するFUV上限値を求めた. 図-2に1月および7月における各放流粒子数に対するFUV上限値, 表-1に最小粒子数を示す. 3海域ともに放流粒子数の増大に伴ってFUVが低下し, ロバスト性が向上することが分かる. また, 播磨灘では夏季にFUV上限値が増大し, 紀伊水道では冬季に大幅に増大するなど, 放流海域や季節によってFUV上限値と最小粒子数にばらつきが見られる. 粒子の分散パターンのロバスト性確保に要する最小粒子数は, 外洋に接続する紀伊水道で12,000個以上であるのに対して, より内湾に位置する播磨灘, 大阪湾では流れが弱く分散距離が短いため, 8,000個以下である. 粒子数ごとの分散パターンの一例として, 2012年1月に播磨灘から放流した粒子に対するLagrangian PDFを

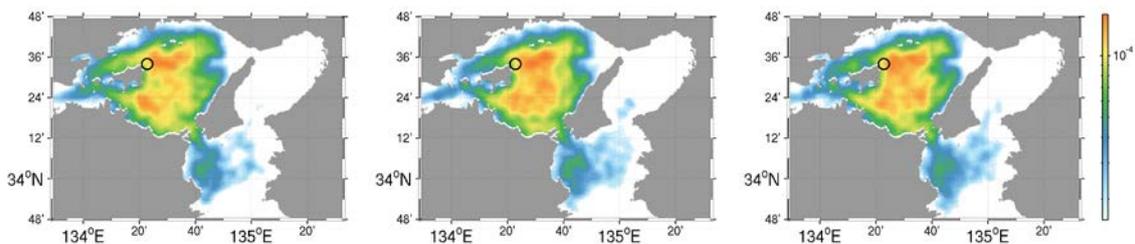


図-5 水深0.5 m (左), 5 m (中央) および10 m (右) から放流した粒子に対する移流時間30日後のLagrangian PDF (km², 7月, 播磨灘, L2モデル, 総粒子数20,000個)。

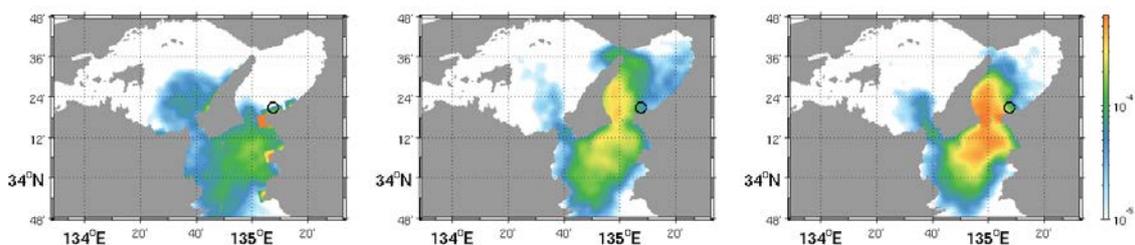


図-6 L1 (解像度2 km, 左), L2 (同600 m, 中央) およびL3 (同200 m, 右) モデルによる移流時間30日後のLagrangian PDF (km², 1月, 大阪湾, 総粒子数20,000個)。

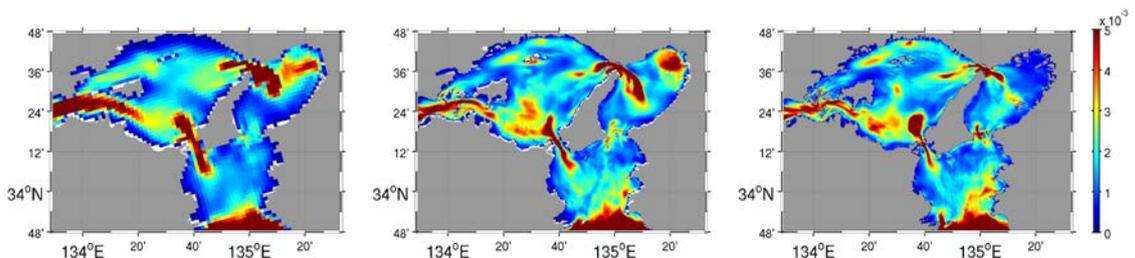


図-7 図-6と同じ。ただし, 表層(水深5 m)における運動エネルギーの期間平均値(m²/s², 1月)。

示す(図-3)。粒子数が500個の場合はPDFピーク位置が疎らに出現しており, 遠方においては粒子数が少ないためにパッチ状に孤立したPDF分布が多く存在している。一方, 粒子数の増大に伴いLagrangian PDFの分布は滑らかになり, 最小粒子数(4,300個; 表-1)以上であればPDF分布にほとんど違いが見られないことが分かる。

以上の結果から, 外洋付近においても十分なロバスト性を確保するため, 以下の粒子追跡計算では各放流源からの総放流粒子数を20,000個(30日間の合計, 放流1回あたり約56個)とすることとした。

(2) 放流開始水深に関する感度

孵化直後の浮遊幼稚仔は, 自身と海水の相対密度差や周囲の流況に応じて特定的水深から分散を開始すると考えられる。そこで次に, 粒子の放流開始水深の変化に伴う分散特性を評価する。本研究では, 浮遊幼生が沿岸部の比較的表層付近から放流されることを想定して, 水深0.5 mから10 mまで0.5 m間隔で粒子の初期鉛直位置を変化させた計20ケースの粒子追跡を実施した。放流開始水深ごとのLagrangian PDFとそれらの全水深平均値間の

FUVを図-4に示す。両季節ともに紀伊水道におけるFUVは他の放流域と比べて大きいものの, 全放流域ともFUVは0.05未満であった。また, 水深0.5 m, 5 m, および10 mから放流された粒子に対するLagrangian PDF分布の一例(図-5, 7月, 播磨灘)からも, 表層放流(水深0.5 m)の場合にPDFピーク位置が南北方向にわずかに分離する傾向にあるものの, 放流水深による粒子の分散パターンにはほとんど差異がないことが確認される。

4. 流動モデル条件による分散特性の差異

前章では粒子追跡パラメータ変化に対するモデルの感度およびロバスト性に注目したが, Lagrangian PDFおよびFUVを用いた評価手法は粒子追跡パラメータだけでなく, 流動モデルの水平解像度や出力間隔(流動モデル粒子モデルのカップリング時間間隔), 外力条件の有無に代表される流動モデル条件変化による結果の評価にも用いることが可能である。そこで本章では, 流動モデルの水平解像度・潮汐の有無に対する粒子の分散パターンの差異をFUVを用いて評価することを試みる。

表-2 ROMS-L3モデルとL1, L2モデルによるLagrangian PDF間のFUV.

海域	L1とL3		L2とL3	
	1月	7月	1月	7月
播磨灘	0.923	0.622	0.500	0.336
大阪湾	0.913	0.871	0.119	0.150
紀伊水道	Nul	0.842	Nul	0.166

表-3 カップリング時間間隔（出力平均時間）を2時間，24時間とした場合のLagrangianPDF間のFUV.

海域	1月	7月
播磨灘	0.104	0.058
大阪湾	0.054	0.060
紀伊水道	0.170	0.107

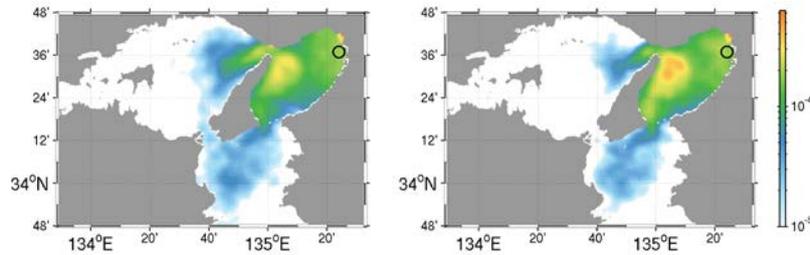


図-8 流動モデル出力の平均時間を2時間（左），24時間（右）とした場合の粒子追跡結果. 移流時間30日後のLagrangian PDF分布 (km², 7月, 大阪湾, L2モデル, 総粒子数20,000個) .

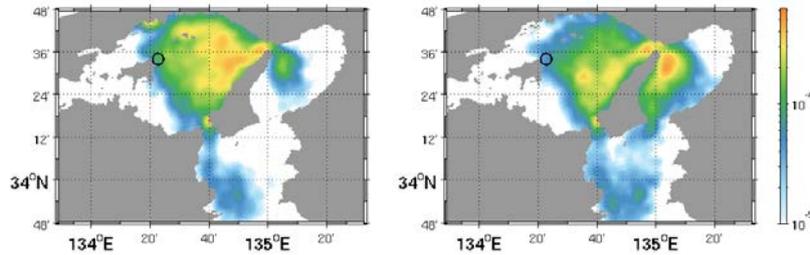


図-9：潮汐あり（左）および潮汐なし（右）の場合のLagrangian PDF（1月，播磨灘，L2モデル，総粒子数20,000個）.

(1) 水平解像度の影響

流動モデル水平解像度による粒子の分散パターンの違いを検討するために，ROMS-L1（解像度2 km），L2（同600 m）およびL3（同200 m）モデルによる流動場を用いて，1月に大阪湾から放流された粒子の移流時間30日後のLagrangian PDFを算出した（図-6）. 最も低解像度のL1モデルではほとんどの粒子が紀淡海峡を通過して紀伊水道側へ輸送されているのに対して，より高解像度のL2, L3モデルでは多くの粒子が大阪湾に残留しており，L1とL2モデルを境に分散パターンが大きく異なっている. また，L1モデルの紀伊水道西部沿岸において疎らに点在するPDFの高い箇所は，低解像度モデルでは一部の粒子が十分に分散されずにまとまって輸送されることを表している. 表層運動エネルギーKE分布から（図-7），解像度の向上に伴って海峡周辺でのKE増大域は狭くなり，沿岸部でKEは増大する傾向が見取れ，沿岸部や海峡部の流動構造を十分に再現するためには高解像度化が欠かせないことが分かる. ROMS-L3モデルとL1およびL2モデルによるLagrangian PDF間のFUVから（表-2，1月の紀伊水道に対するFUVは，粒子のほとんどがL3モデルの領域外に流出したため除外），L3による粒子分散パターンは最も低解像度のL1モデルと比べてL2モデルとのFUVの方が小さい（相関が高い）ことが

示され，高解像度化に伴ってロバスト性が向上したと評価される. したがって，粒子分散解析を介してFUVを用いることで，それを駆動する流動モデルの性能評価を間接的に行うことも可能であると捉えることができる.

(2) 流動モデル時間平均間隔と潮汐の影響

瀬戸内海周辺における主要外力の一つである潮汐が粒子追跡計算に及ぼす影響を評価するために，同一のL2流動モデルを用いて，潮汐による往復流の効果が含まれる2時間平均値と，潮汐残差流成分のみが残る24時間平均値の2通りの出力結果を用いた粒子追跡を行い，潮汐が分散パターンに及ぼす影響を検討する. 結果の一例として，冬季（1月）播磨灘から放流した粒子に対する移流時間30日後のLagrangian PDFを図-8に示す. 全体的な傾向は概ね類似しているが，24時間平均値を用いた場合に沖の瀬還流により多くの粒子が捕捉されているのに対し，2時間平均値の場合は相対的に広域的に分散している. 両者のFUVを算出したところ（表-3），放流海域および季節によって多少のばらつきはあるものの，全体的にはFUV<0.1と低い値となることから，時々刻々変化する潮汐流の分散特性への影響はそれほど強くないと判断される. この結果から，複数年にわたるような長期粒子追跡計算を行う際に，流動モデル内で潮汐が考慮されていれ

ば、日平均流動出力を用いても粒子分散に対してはロバスト性が確保されることを示している。

一方、流動モデルで潮汐を考慮しないと、2時間平均流動モデル出力を用いても粒子分散パターンには大きな差異が生じる(図-9)。潮汐を考慮した場合は全体的に東方向へと輸送されながらも、ほとんどの粒子は明石海峡を通過することなく灘内部に残留する。一方、潮汐なしの場合には多くの粒子が明石海峡を通過し、淡路島東部に粒子が集積している。冬季の瀬戸内海では強い北西風によって表層付近に東方向の通過流が生じることが知られているが⁹⁾、この結果は、潮汐による鉛直混合の強化によって粒子が鉛直方向に広く分布し、東方向への移流分散効果が相対的に低減することを示唆している。

5. おわりに

本研究では、高解像度瀬戸内海流動モデルを用いた3次元Lagrange粒子追跡計算を行い、粒子の放流数や放流水深、移流時間等の粒子追跡パラメータ変化、および水平解像度や外力条件の有無といった流動モデル条件の違いに対する幼稚仔分散パターンの感度解析とロバスト性の評価をSimons *et al.*⁸⁾のFUVを用いて実施した。瀬戸内海東部海域では、若干の季節差などはあるものの、ロバスト性を確保するための最小粒子数は、内湾部で8,000個以下、外洋付近で12,000個以上であった。一方で、初期放流水深は粒子の分散特性に対してほとんど寄与しなかった。流動モデルの水平解像度の向上に伴う沿岸部および海峡付近における流動構造変化は、粒子の分散パターンに多大な影響を及ぼすため、流動モデルの高解像度化は欠かせない。潮汐の有無に着目した解析結果から、流動モデル出力の時間平均間隔に伴う粒子の分散パターンの違いはごく小さいものの、潮汐による鉛直混合の影響は大きく、時間変動外力(潮汐など)はなるべく正確に流動モデルで考慮する必要があることが示された。

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) 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. I_1126-I_1130, 2009.
- 2) 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. I_1076-I_1080, 2014.
- 3) 小碓大地, 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 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1231-I_1236, 2015.
- 4) 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.
- 5) Miller, T. J.: Contribution of individual-based coupled physical-biological models to understanding recruitment in marine fish populations, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 347, pp. 127-138, 2007.
- 6) 内山雄介, 神吉亮佑, 中山明彦: 高解像度海洋モデルによる大阪湾・播磨灘における処理水分散シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1056-I_1060, 2013.
- 7) 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.
- 8) Simons, R. D., D. A. Siegel, and K. S. Brown: Model sensitivity and robustness in the estimation of larval transport: A study of particle tracking parameters, *J. Mar. Syst.*, Vol. 119-120, pp. 19-29, 2013.
- 9) 藤原建紀, 肥後竹彦: 瀬戸内海の通過流量と物質輸送に対する風の効果, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 23, pp. 109-119, 1986.

(2016.3.16 受付)

MODEL SENSITIVITY AND ROBUSTNESS IN THE ESTIMATION OF LARVAL DISPERSAL IN THE SETO INLAND SEA, JAPAN

Taichi KOSAKO and Yusuke UCHIYAMA

We evaluate sensitivity and robustness of larval dispersal patterns to particle tracking parameters (the number of particles and the particle release depth) and to configurations of circulation model (horizontal resolution and output interval), using a triple-nested, high-resolution Seto Inland Sea (SIS) circulation model coupled with an offline Lagrangian particle tracking model. The optimal number of particles is evaluated 8,000 in inner bays while 12,000 near the mouth. Although the depth of initial particle displacement relevant to vertical migration of spawned larvae is less influential, refinement of lateral grid resolution in the circulation model is essential to realistic larval dispersal patterns due to better representation of complicated flow structures near coastlines and straits. Inclusion of transient tidal forcing is substantial to enhance the robustness, even as residual effects through the daily-averaged circulation field.