Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

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

内山，雄介
宮川，翼
小谷，瑳千花
上平，雄基

(Citation)
土木学会論文集B2,74(2):I_1291-I_1296

(Issue Date)
2018

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
© 2018 公益社団法人 土木学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006806

土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 74, No. 2, I_1291-I_1296, 2018.

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

内山 雄介[1]・宮川 翼[2]・小谷 瑳千花[3]・上平 雄基[4]

[1]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
[2]学生会員　神戸大学 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）
[3]非会員　（株）ケイ・オプティコム（〒540-8622 大阪市中央区城見2-1-5）
[4]正会員　（国研）日本原子力研究開発機構（〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765-1）

3段ネスト高解像度海洋流動モデルとサンゴ卵・幼生を模した3次元Lagrange中立粒子追跡により，沖縄本島沿岸域における浮遊幼生の海洋分散とコネクティビティの出現特性および形成機構を明らかにした．合計約2427万個の粒子を用いたLagrange解析から，本島東海岸での北上流，西海岸での南下流によって特徴づけられる沿岸域を時計回りに周回する残差流が粒子分散パターンとコネクティビティ形成に対して重要であることが分かった．また，半閉鎖性内湾は湾スケールの局所的な停滞性の循環流によって強い粒子捕捉を促進するが，特に東海岸の金武湾と中城湾は，本島北端の辺戸岬と併せて集積域を形成し，分散パターンのノードとなる．したがって，沖縄本島におけるローカルな近距離コネクティビティ形成に対しては，本島を周回するように発達する時計回りの沿岸循環流と地形的な拘束が重要となることが示された．

Key words : *coral larvae and spawn, Lagrangian analhysis, connectivity, ROMS, Okinawa Island*

1. はじめに

海洋生態系多様性の維持やブルーカーボン形成に重要な役割を果たすサンゴを適切に管理・保護することは，海洋環境・地球環境の保全に対して極めて重要な課題である．本研究で対象とする南西諸島・沖縄本島周辺海域に生息する造礁性サンゴの主要種であるミドリイシ類は，5月～6月の大潮（満月）の夜に一斉に産卵する．その後3～4週間の浮遊期間を経て，幸運にも生育に適切な環境へ到達した幼生は着底してそこで成長し，一生を終える．浮遊期のサンゴは卵もしくは遊泳力を持たない浮遊幼生（プラヌラ幼生）として周囲の海流に対して受動的に振る舞うため，海流による移流分散作用を受けて輸送され，産卵場所とは異なる場所で生育する可能性が高い．したがって，サンゴ生態系の保全のためには生育海域だけではなく，浮遊期の幼生の挙動を解析し，産卵場所として保護するべき海域を特定することが鍵となる．

このような要請に対して，空間的に離れた場所に生育する親個体と子個体のネットワーク構造を定量的に評価するための指標として，空間位置iとjの間のリンクの強さを確率的に表すコネクティビティ（C_{ij}）が広く用いられる．コネクティビティの同定に際しては，遺伝子解析によって群体の分布履歴を逆探査する方法に加え，数値海洋流動モデルとラグランジュ中立粒子追跡を用いて任意の位置iとjの生物的なリンクを統計力学的に客観評価する方法（例えば，内山ら[1]，小谷ら[2]）が非常に有効である．小谷ら[3]（以下前報と呼称）は，後者の考え方に基づいて，南西諸島における長距離サンゴ卵・幼生輸送に着目し，JCOEP2-ROMSシステムに基づく2段ネスト海洋モデルによる3次元流速解析値を用いたラグランジュ中立粒子追跡数値解析を行った．その結果，南西諸島でのサンゴ卵・幼生は黒潮の移流効果によって長距離輸送され，さらに黒潮-南西諸島間に季節的に発達する黒潮反流の分散作用を受けることにより，最大で1000 kmにも及ぶ広域の島間リンク構造が形成されることが明らかとなった．その一方で，産卵場所近傍地点間のコネクティビティは長距離輸送によるコネクティビティよりも1桁以上高いことから，同一の島内や群島内（例えば八重山諸島）における短距離リンクもまた極めて重要であることが併せて示された．

本研究で対象とする沖縄本島（**図-1**参照）は，その西側と東側では地形条件や海流特性が大きく異なり，海洋構造にも顕著な東西の非対称性が出現することが示唆されている[4]．本島の西側海域は，西から順に遠浅の東シナ海，急峻な大陸棚斜面，最大水深約2200 mの沖縄トラフがあり，鋭く切り立ったリッジ地形上に沖縄本島

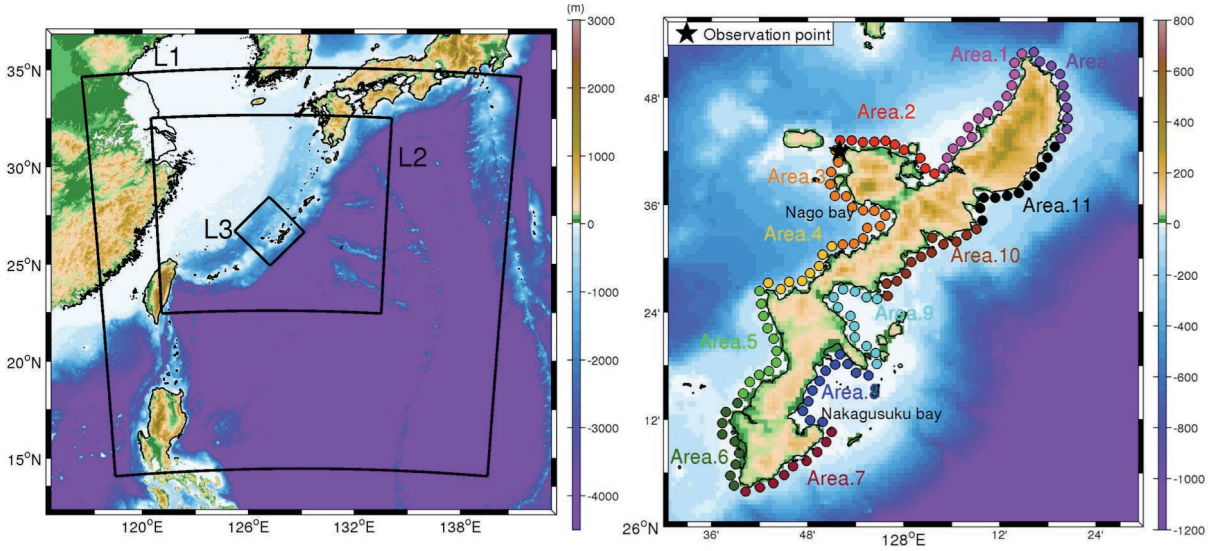


図-1　左図：JCOPE2-ROMS ダウンスケーリングシステムによる 3 段ネスト沖縄流動モデル領域．黒枠は外側から ROMS-L1（水平解像度 3 km），L2（同 1 km），L3（同 250 m）．右図：ROMS-L3 モデル沖縄本島周辺海域のズームイン．丸は沿岸域に配置した粒子ソース・シンクパッチであり，Area 1-12 までグルーピングして色分けしている．粒子は各パッチから毎日 500 個ずつ 1 年間放流した（合計 500 個×133 パッチ×365 回≈2.43×10^7 個）．いずれも背景カラーは水深（m）．

表-1　ROMS-L3 沖縄本島海域モデル計算条件

計算期間	2012 年 10 月 11 日–2014 年 1 月 31 日
格子数	1088×1120×鉛直 32 層
水平解像度	約 250 m（Oblique Mercator 投影法）
時間ステップ	15 s（baroclinic モード）
側方境界条件	ROMS-L2 モデル（前報：小谷ら [3]）
海上風	気象庁 GPV-MSM（1 時間値）
海面フラックス	NOAA-COADS（月平均気候値）
海表面温度・塩分	JCOPE2-SST，SSS（20 日平均値）
海底地形	SRTM30_Plus データ（全球 30 秒）

が位置する．本島東側にも急峻な海底斜面があり，最大水深約7500 mの琉球海溝を経て太平洋へ接続している．沖縄本島の海洋環境を決定づけているのは本島の西側約150～200 kmの東シナ海陸棚斜面に張り付くように北東方向へ進む黒潮である．黒潮は低緯度域から大量の熱を輸送し，中規模渦・サブメソスケール渦に伴う強い渦混合作用によって150 km以上離れた沖縄本島にも強い影響を与えている[5, 6]．また，本島南端と渡嘉敷島の間の浅い海峡（渡嘉敷海峡，**図-1**右のエリア6沖）は黒潮影響や潮汐伝播に対してノードの役割を果たしており，本島海域環境の東西差を助長している[4]．当然ながら，このような複雑な地勢・海洋条件は物質分散やコネクティビティにも多大な影響を及ぼしている可能性が高い．

そこで本研究では，前報[3]で開発した2段ネスト南西諸島全域モデルにもう1段階のネスティングを行い，沖縄本島周辺の海底地形や海岸地形をできる限り精緻に表現可能な水平解像度250 mの3段ネスト海洋ダウンスケールモデル（L3モデルと呼称）を新たに開発し，約16ヶ月の長期流動シミュレーションを実施した．さらに，L3モデルによる3次元流速出力を用いたofflineラグランジュ中立粒子追跡モデルを用いて，本島周辺の沿岸域において約2.43× 10^7個の中立粒子を放流し，移流時間（放流後経過時間）最大30日までのLagrange的な粒子追跡を行った．その結果を統計的に整理することにより，沖縄本島周辺における浮遊幼生の通年および季節的な分散特性と，近距離コネクティビティの形成過程を統計力学的に解析し，その実態とメカニズムの一端を明らかにした．

2.　方法

(1) 3 段ネスト領域海洋流動モデル

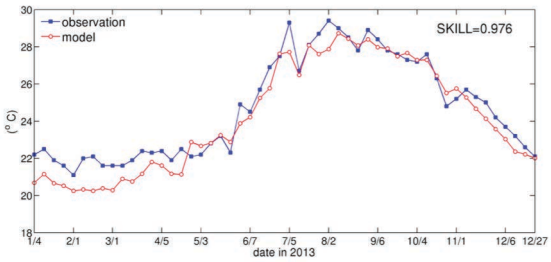
前報[3]のL2モデルに対してもう一段階のネスティングを行い，水平解像度250 m，鉛直32層のROMS-L3モデルを構築し，2013年1年間を含む約16ヶ月の流動再解析を行なった（**図-1**，**表-1**）．L3モデルは高解像度であると同時に，沖縄本島と周辺諸島および黒潮反流を包含するように十分な広領域をカバーする．L3モデルの初期条件・側方境界条件は，L2モデル2時間平均値出力を時空間的に線形内挿して与えた．L2境界で順圧潮汐を付与しているため，L2内で励起された内部潮汐を含む高周波シグナルは，L3境界を通じて流入することになる．その他の計算条件等はL2モデルを踏襲している．

(2) Lagrangian 中立粒子追跡モデル

L3モデルの2時間平均値出力を用いて，Lagrangian中立粒子追跡計算をオフラインで実施した（**表-2**）．追跡モデルは前報[3]，内山ら[1]，小硲ら[2]で南西諸島海域および瀬戸内海に対して用いられた実績のあるモデルであり，粒子位置で時空間線形内挿されたROMSによる3次元Euler流速を用いて3次元的な移流のみを考慮している．モデル化に際する不確実性を極力排除するために，粒子

表−2　Lagrange 中立粒子追跡計算条件

計算期間	2013 年 1 月 1 日–2013 年 12 月 31 日
時間ステップ	200 s
放流パッチ数	133 パッチ（**図-1** 右参照）
放流水深	水深 2 m（z=−2 m）
放流間隔	24 時間毎に各パッチから約 500 個
放流時刻	12:00 UTC
移流速度	ROMS-L3 の 3 次元流速（2 時間平均値）
最大移流時間	放流から 30 日後まで
停止条件	漂着，系外への流出



図−2　国頭郡本部地先水深 20m 地点における亜表層水温時系列の比較．青：第 11 管区海上保安部における実測値，赤：ROMS-L3 モデルによる計算値．

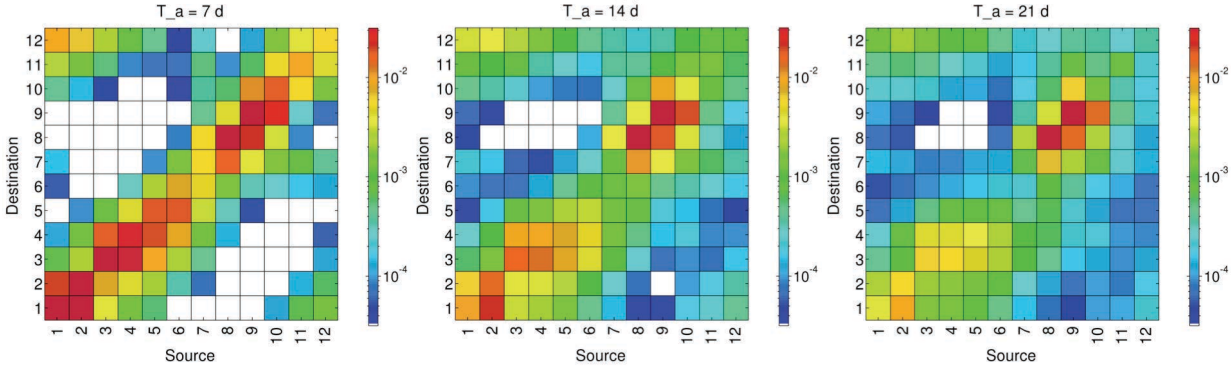


図-3　2013 年 1 年分の放流粒子を用いた移流時間 T_a 日ごとのエリア間コネクティビティマトリクス C_{ij}．横軸はソースエリア，縦軸はシンクエリア．エリア番号の定義は**図-1** 右を参照．

の自発的な挙動（日周期鉛直移動など）やランダムウォークなどは考慮しない．粒子の放出源であるソースパッチは半径 1 km の円として定義し，その中心は沖合 3 km までの浅海域に配置した．パッチ間の隙間が極力小さくなるように133個のパッチにより沖縄本島を取り囲み，それらを地形条件を考慮して12のエリアに分割することで，パッチ間もしくはエリア間のコネクティビティを同定することとした（**図-1**右）．各パッチの水深2 mの鉛直位置に等間隔で約500個の粒子を配置し，12:00 UTCから24時間間隔で2013年の1年間にわたって断続的に放流を行った．したがって，解析に用いた放流粒子の総数は約2.43 × 10^7 個である．粒子追跡は移流時間最大30日まで，もしくは粒子が陸地に漂着あるいは系外に流出するまで行なった．

(3) コネクティビティ

コネクティビティは，移流時間毎の粒子の平面位置ベクトルに関する確率密度関数（Lagrangian PDF）を用いて，ソースパッチ $\boldsymbol{x}_i$ からシンクパッチ $\boldsymbol{x}_j$ へ至る確率として次式のように定義される．

$$C_{ij}(T_a) = f_x(\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{x}_j; T_a, \boldsymbol{a} = \boldsymbol{x}_i)(\pi R^2), \qquad (1)$$

ただし，f_x：空間フィルター操作後のLagrangian PDF，$\boldsymbol{a}$：粒子の初期位置ベクトル，$\boldsymbol{\xi}$：粒子位置の標本空間関数，R：パッチ半径，T_a：移流時間である．本研究では，まず133のパッチに対してC_{ij}を求め，ソース133 × シンク133の組み合わせを行列（コネクティビティマトリクス）で表現する．さらに，133 × 133のC_{ij}を**図-1**右に示す12のエリア毎に構成パッチ間のC_{ij}の結合確率を求めることでエリア間のコネクティビティを推定した．

3.　モデルの再現性

親領域モデルであるL2モデルについては，人工衛星観測データによる表層地衡流速・海面高度分散・海表面温度，船舶を用いたライン計測による鉛直断面内の成層構造，潮位計データによる水位変動，GPS漂流ブイによる軌跡などとの比較を通じた性能評価が既に行われ，高い再現性があることが示されている[3), 7)]．L3モデルもL2モデルの性能・性質を色濃く引き継いでおり，沖縄本島周辺での再現性は十分であることを確認している．紙面の都合上，ここでは一例として沖縄本島西海岸に位置する国頭郡本部町地先（**図-1**右の黒星マークの地点．26.7°N，127.867°E）における第 11 管区海上保安本部による水深約20 mでの水温の時系列データをL3出力と比較した結果を**図-2**に示す．2013年の約1年間にわたる亜表層水温の再現性は概ね良好であることが確認される．

4.　生態系ネットワーク構造

(1) エリア間コネクティビティ

図-3に**2. (3)** の方法で求めた沖縄本島内に定義された

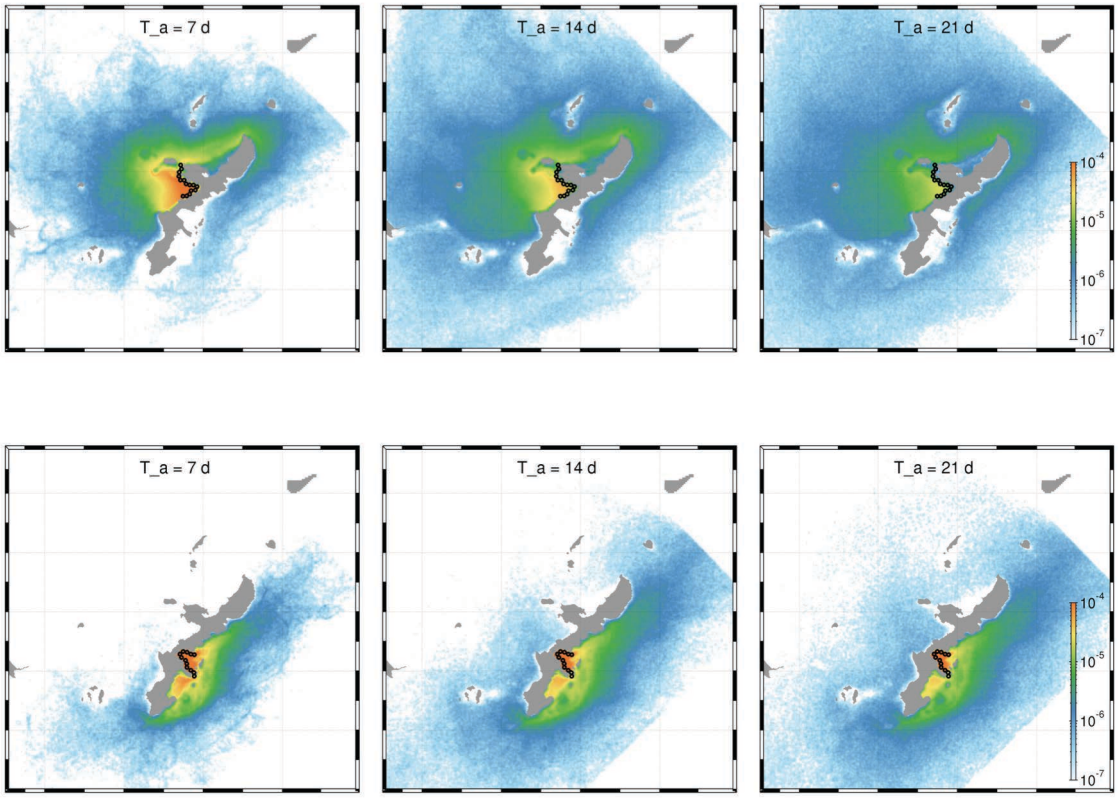


図-4 Lagrangian PDF の時間発展の一例．図中黒点群部分は放流パッチ群を表す．上：エリア 3（西海岸の名護湾北部海域），下：エリア 9（東海岸の金武湾）の存在する 14，12 個のパッチ全てから 1 年（365 回）にわたって放流された全ての粒子を移流時間 T_a（日）における位置ベクトルの確率密度関数として整理した結果を示している．PDF が高い領域には，放流後 T_a（日）の時点において統計的により多くの粒子がその水平位置に存在していることを表す（鉛直位置は計算では考慮しているが，図では考慮していない）．上図の例では，T_a=7 日では粒子の多くは西海岸に沿って北上し，北端を通過してその大部分が東海岸側に回り込み，T_a=14,21 日には東海岸沿岸に有意な PDF 値が分布していることから，沖縄本島を時計回りに回り込む輸送パターンが卓越していることが分かる．一方で，エリア 9（下図）から反時計回りに輸送される粒子は非常に少ない．

12のエリア間コネクティビティマトリクスC_{ij}（12 × 12）を示す．ここでは移流時間T_a= 7, 14, 21日後についてのみ図示しているが，これらは異なる時刻から放流される粒子を放流開始からの経過時間（T_a）ごとに整理した結果である．例えば横軸7，縦軸11のC_{ij}（=$C_{7,11}$）が10^{-3}であれば，エリア7から11へ10^{-3}の確率で加入が生じることを示す．つまり1000個の放流卵・幼生のうち1個が加入することになる．また，傾き1，斜め45度ライン近傍に見られる高いC_{ij}値は，放流エリア周辺に滞留したままの粒子が多く，遠方への輸送・分散が少ない状態を表す．

放流直後は傾き1の直線付近でC_{ij}が高く，放流限近傍によく留まるが，移流時間の増加とともに本島の各区域へと分散する．45度ライン近傍のC_{ij}のピークはエリア1–6（西海岸）と7–12（東海岸）の2つのグループに大きく分かれることから，大局的には本島の東・西海岸でそれぞれ別個に粒子輸送が生じている．また，エリア3–4（名護湾），8（中城湾），9（金武湾）といった比較的閉鎖性の強い内湾での残留率が高い．このような内湾域での捕捉に加え，本島北端のエリア12では移流時間経過後も全エリアから満遍なく粒子が到達している点が特筆される．一方で南端のエリア6（渡嘉敷海峡周辺）での残留粒子は少なく，C_{ij}は全体的に低い．

(2) Lagrangian PDFの時間発展

これらの傾向は各エリアからの放流粒子のLagrangian PDFの時間発展から明確に説明される（**図-4**）．ここでは例としてエリア3（西海岸名護湾北部）と9（東海岸金武湾）のPDF分布を示している．エリア3からの放流粒子PDFは移流時間の経過とともに低下し，最終的には粒子の大半は本島周辺海域を離脱する．PDF分布は非等方的であり，北上して北端を回り込み，西海岸方向へ時計回りに輸送される傾向が強く，反対に南側への反時計回り輸送は少ない．エリア9の捕捉能は極めて高く，移流時間21日を過ぎても多くの粒子は残留し，南へ輸送されたものは隣接する中城湾に再捕捉されるため，北向き輸送と南向き輸送が均衡している．すなわち，分散パターンには一方向的と等方的な成分が混在し，本島北端や内湾域に漂着する粒子が多く，これらのエリアがノー

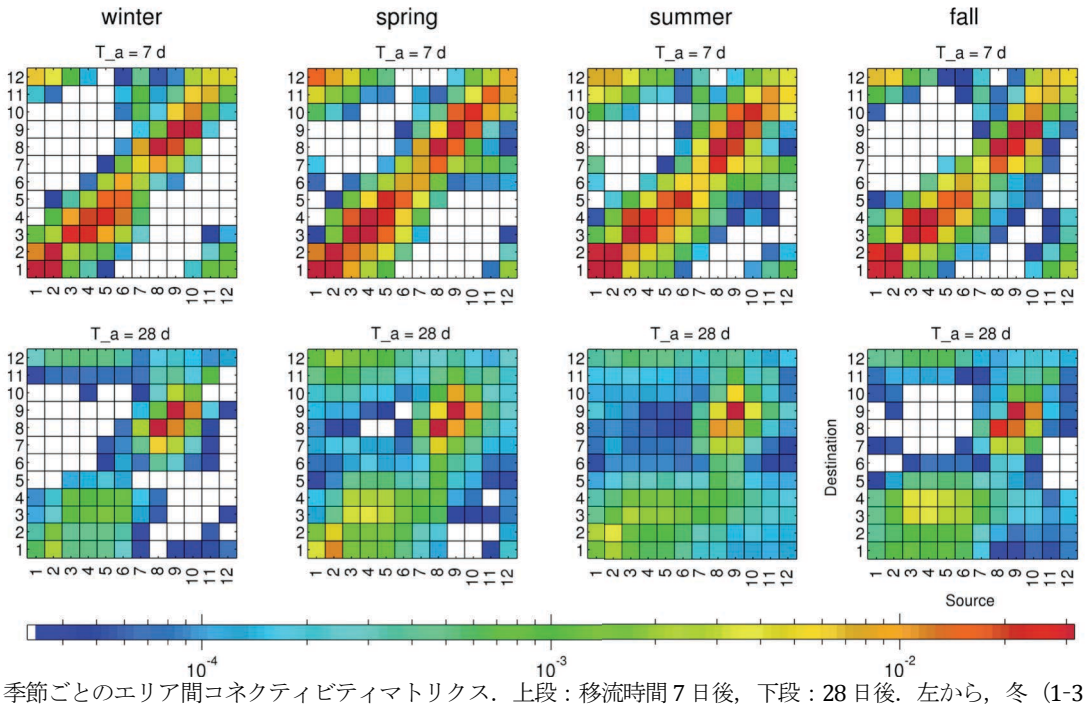


図-5 季節ごとのエリア間コネクティビティマトリクス．上段：移流時間 7 日後，下段：28 日後．左から，冬（1-3 月），春（4–6 月），夏（7–9 月），秋（10–12 月）を示している．カラースケールは全パネルで共通である．

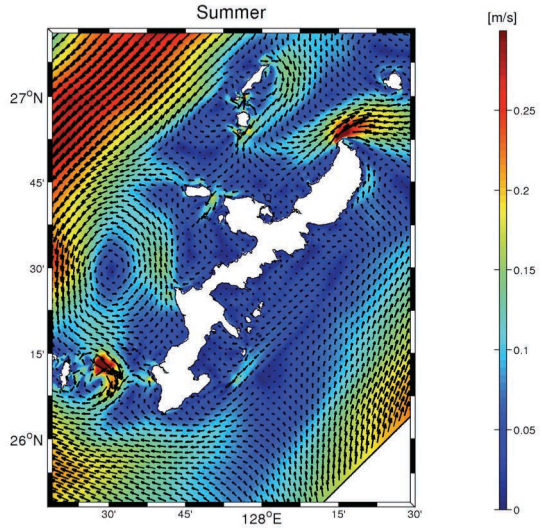


図-6 沖縄本島周辺海域における時間平均表層流速分布の一例．ROMS-L3 モデルによる 2013 年 7-9 月（夏季）の 3 ヶ月間の平均値．カラーは流速絶対値．

ドとなるように粒子を捕捉した結果，不均一なretention分布を反映した形でC_{ij}が形成されると理解される．

このような傾向は年間を通じて概ね保持され，各季節で概ね同様なネットワークが形成されることが分かる（**図-5**）．したがって，本島内の近距離コネクティビティは産卵期の違い（例えば，ミドリイシ類は5–6月，キクメイシ類は8月など）によらずに一般的な知見として用いることが可能である．ただし，移流時間28日後では寒冷期（秋・冬）よりも温暖期（春・夏）のほうが本島近傍でのC_{ij}が高めに保たれており，沖へ輸送される割合が低く，retentionが高いことが分かる．このような季節変動は本海域におけるサブメソスケール渦の季節消長[4), 7)]とよく対応しており，寒冷期の海面冷却の強化に伴う傾圧不安定の促進等によって発達するサブメソスケール混合により沖への粒子分散が促進されることで沿岸でのretentionが低下したものと解釈される．

(3) 表層流速場との関係

コネクティビティや粒子のPDFは3次元的な流動とそれに付随する中規模渦・サブメソスケール渦による混合の影響を強く受けるため，その形成機構を精査することは容易ではない．ここでは，粒子の大半が海洋表層の混合層内を輸送されることから，表層平均流速（**図-6**）との対応について簡単に整理する．まず，沖縄本島沖海域には，西側に南下する黒潮反流[4)]，東側に北上する琉球海流の一部が表出している．一方で，沿岸域の流れは沖側海域よりもかなり弱い．しかし，地形の影響を受けて，海峡部，島近傍，本島北端の辺戸岬，南端の渡嘉敷海峡[4)]などでは強い残差流が生じている．岸近くでは西海岸は北上傾向，東海岸は南下傾向の残差流が発達するため，沿岸の流れは時計回りの循環流を形成していることが分かる．粒子捕捉能の高い内湾域の流速は著しく小さい．本島北端では東向きの強い残差流のすぐ南側に西向き流れが卓越しており，岬近傍に直径15 km程度の強い時計回り局所循環流が形成されていることが分かる．南端周辺では渡嘉敷島方向からの強い東進流が岬を周回した西進流を打ち消しており，南端での粒子分散の連続性を阻害している．これらの流動構造はコネクティビティやPDF分布の特徴と定性的によく対応しており，この

ような表層平均流による輸送の影響を受けて本島周辺の生態系ネットワークが形成されていると解釈される．

5. おわりに

南西諸島海域の生態系ネットワーク形成には，長距離移流分散[3), 7)]と，ローカルな沿岸捕捉による島周辺での近距離輸送の二つが支配的であった．本研究では後者の近距離輸送に着目し，沖縄本島周辺海域を対象とした高解像度数値モデルを用いたローカルな海洋生態系ネットワーク構造解析を行った．まず，前報[3)]で開発した2段ネストJCOPE2-ROMS南西諸島モデルにもう1段階のネスティングを行った水平解像度250mの3段ネストモデルを開発し，その再現性を確認した．次いで同モデルによる3次元流速出力を用いて，サンゴ卵・浮遊幼生分散を模擬したLagrange粒子追跡を実施し，現実的な気象海象条件と微細な地形を緻密に考慮した超多粒子Lagrange統計解析を行った．得られた主要な結論は以下の通りである．

岸近傍で放流された粒子の大多数は岸沖方向の分散作用をあまり受けず，岸から10km程度までの比較的浅い海域を中心に浮遊する．黒潮，黒潮反流，琉球海流の直接的な影響は限定的であり，全体的には本島周辺を時計回りに循環する弱い沿岸残差流の影響を強く受ける．この循環流は本島南北端で生じる強い局所残差流によって，閉じたループ構造というよりは，西海岸での北上流と東海岸での弱い南下流から構成されている．特に本島北端の辺戸岬で発達する直径15km程度の強い時計回り残差流により，粒子が集積する傾向が強化される．粒子の輸送・分散過程は本島の東西海岸で大きく異なり，東海岸では北上流の作用により粒子は北東方向へ移流され，北端で集積作用を受けながら一部は辺戸岬を回り込んで西海岸へ到達するため，時計回りにコネクティビティが形成される．西海岸には閉鎖性が強い金武湾，中城湾において非常に強い粒子捕捉が生じるため，南下残差流の影響をあまり受けず，南北両方向へ比較的等方的に分散される．これらの知見は海洋保護区の選定などに対して直接的に有用な情報を与えるものである．

謝辞：本研究は科学研究費（15H04049, 15KK0207, 18H03798）の援助を受けた．

参考文献

1) 内山雄介，小砺大地，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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70, No.2, pp. I_1076–I_1080, 2014.
2) 小砺大地，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, I_1231-I_1236, 2015.
3) 小谷瑳千花，内山雄介，鹿島基彦，上平雄基，御手洗哲司：琉球諸島周辺海域における生態系ネットワーク形成に対する黒潮の影響について，土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 73, No. 2, pp. I_1315–I_1320, 2017.
4) 内山雄介，小谷瑳千花，山西琢文，上平雄基，御手洗哲司：黒潮暖水波及に伴う沖縄本島周辺海域における非対称海洋構造の形成機構，土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 72, No. 2, pp. I_481–I_486, 2016.
5) 内山雄介，上平雄基，御手洗哲司，坂上太一郎：琉球諸島周辺海域におけるサブメソスケール乱流混合による黒潮波及効果に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69, No.2, I_471–I_475, 2013.
6) 上平雄基，内山雄介，御手洗哲司，仲田翔平：琉球諸島周辺海域におけるeddy heat fluxを用いたサブメソスケール乱流混合強化メカニズムの解析，土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 71, No. 2, I_1219–I_1224, 2015.
7) Uchiyama, Y., S. Odani, S., M. Kashima, Y. Kamidaira and S. Mitarai: Influences of the Kuroshio on interisland remote connectivity of corals across the Nansei Archipelago in the East China Sea, J. Geophys. Res. Oceans, 2018 (in revision)

（**2018.3.15受付**）

A BIOLOGICAL NETWORK AROUND OKINAWA ISLAND ANALYZED WITH A COUPLED HIGH-RESOLUTION OCEAN CIRCULATION AND LAGRANGIAN PARTICLE TRACKING MODEL

Yusuke UCHIYAMA, Tsubasa MIYAGAWA, Sachika ODANI, and Yuki KAMIDAIRA

A triple-nested downscaling oceanic circulation model coupled with a 3-D Lagrangian particle tracking model was developed for quantifying coastal connectivity of coral larvae and spawn originated from nearshore areas around Okinawa Island, Japan. Coastal dispersal of neutrally buoyant Lagrangian particles was extensively examined as a proxy of corals. A Lagrangian analysis of ~24.3 millions of particles revealed that the along-island residual currents are responsible for the prevailing clockwise coral transport consisting of the northeastward residual current on the west coast and the opposing currents on the east coast. Semi-enclosed coastline topography locally induces residual stagnating circulations, resulting in notable particle entrainment. In particular, Kin and Nakagusuku bays on the east coast and Cape Hedo at the northernmost tip of the island serve as nodes, where intensive particles accumulation provokes. Therefore, the along-island residual currents and topographic constraint jointly affect the local, short-distance coral connectivity around the island.