

沖縄本島沿岸域における浅場-深場サンゴ生態系間の3次元コネクティビティ

張 天睿¹・内山 雄介²・竹安 希実香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)

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)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 日本工営株式会社 コンサルティング事業統括本部 交通運輸事業本部 港湾空港事業部 海岸港湾部 (〒102-8539 東京都千代田区麴町5-4)

世界的に進行するサンゴの白化現象に対して、水温が比較的安定な水深30~150mの深場 (mesophotic zone, MPZ) は浅場サンゴ遺伝子の避難場所と再供給源としての機能が期待されている。本研究では、サンゴ生態系保全の観点から、沖縄本島沿岸域を対象とした高解像度海洋モデルをベースにサンゴ浮遊幼生の移流分散をモデル化し、Lagrange統計解析によって浅場-MPZ間のサンゴ浮遊幼生の3次元輸送特性の定量評価を試みた。本島を時計回りに周回する平均流に対応してサンゴの連結度に東西海岸で非対称性が生じること、閉鎖性の強い金武湾・中城湾では浅場での自己漂着が強化されること、開放性の名護湾では浅場と深場の両方で集積が生じるなど、地形的な特徴によって連結性に大きな差異が生じることを見出した。

Key Words: mesophotic coral larvae, 3-D connectivity, Lagrangian PDF, source proportion, ROMS

1. はじめに

稚仔魚などに好適な生育環境を提供し、自らも炭素固定に寄与するサンゴ生態系の保全は極めて重要な海洋環境課題であるが、温暖化などに伴う白化現象の脅威に晒されている。2016年には海水温の上昇によってインド洋、オーストラリア沿岸、太平洋、紅海、カリブ海など世界中で大規模な白化現象が確認された^{1,2,3}。琉球諸島海域でも石垣島で90%、石西礁湖で50-80%ものサンゴが白化した⁴。一方、造礁サンゴの主たる生息域である浅場は水温変化が大きく白化が顕著となるのに対し、水温が比較的安定な30~150 mのmesophotic zone (MPZ) と呼ばれる水深帯は、浅場サンゴ遺伝子の避難場所と再供給源となることが期待されている⁵。しかしながら、潜水技術やコストの制約もあって、深場サンゴ生態系に関する広域的な調査は未だ乏しく、浅場-深場 (MPZ) サンゴ生態系間のリンク特性はほぼ未解明である。そのため、サンゴ生態系の持続可能な保全・管理施策の策定に向けて、浅場-深場間を含む3次元的なネットワーク構造を定量的に把握することが強く求められている。

例えば、沖縄本島周辺海域の造礁サンゴの主要種であるミドリイシ類は5月~6月の大潮の夜に一斉産卵し、そ

の後数日間から数週間の浮遊期間を経て、生育に適切な場所で着底して成長する。この浮遊期間中にサンゴの浮遊幼生は海流によって3次元的に輸送されるため、産卵海域と生育海域は異なることがある。したがって、サンゴ生態系を適切に保全・管理するためには、産卵海域と生育海域の両方を保護する必要があり、特に浅場とMPZ間の浮遊幼生輸送を含む鉛直・水平方向の3次元的な輸送過程を評価することが重要な課題となる。

これに対して内山ら^{6,7}は、3段ネスト高解像度海洋流動モデルとサンゴ浮遊幼生を模したLagrange粒子追跡モデルを用い、沖縄本島周辺海域におけるサンゴ幼生の近距離水平輸送とサンゴ生態系ネットワーク構造解析を行った。その結果、沿岸から放流された仮想浮遊幼生の大部分は岸から10 km程度までの比較的浅い海域を中心に浮遊すること、輸送・分散過程には本島の東西海岸で非対称性があること、浅場に捕捉された浮遊幼生は本島周辺を時計回りに循環する残差流の影響を受けること、閉鎖性が強い東海岸の金武湾・中城湾では浮遊幼生の捕捉率が高いことなどの重要な知見を得た。さらに竹安ら⁸ (前報と呼称)、内山ら^{6,7}と同様の3段ネストモデル出力を用いて浅場とMPZの水深帯別の水平輸送解析を行い、沖縄本島全体の浅場サンゴとMPZサンゴ間ネットワーク

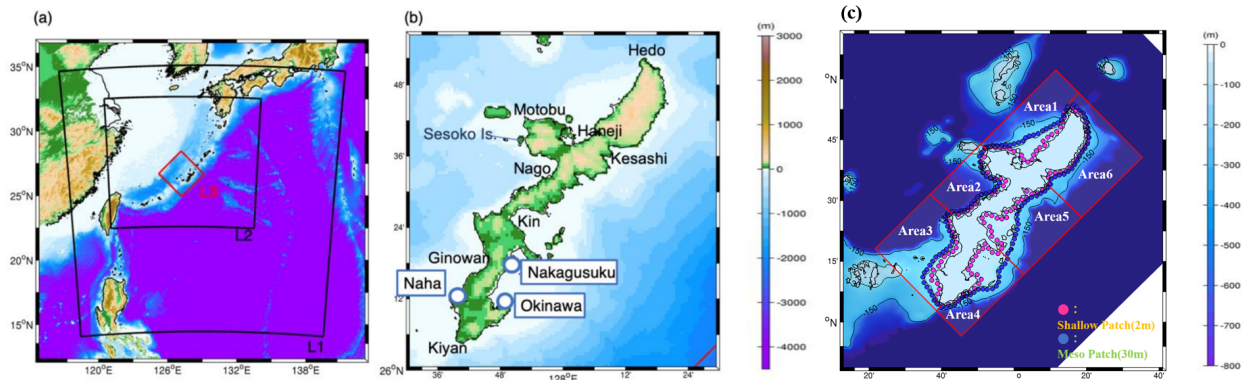


図-1 (a) ROMS モデルの計算領域。黒枠：ROMS-L1 および L2，赤枠：ROMS-L3。 (b) 沖縄本島沿岸域と主要な地名。青丸は検潮所。 (c) Lagrange 粒子追跡計算で設定した放流パッチの水平位置。ピンク丸は浅場放流パッチの位置，青丸は深場放流パッチの位置を表す。本島周辺の沿岸域を岬や半島などの地形的特徴によって 6 つのエリアに分類した（赤線で区切られた領域）。それぞれエリア 1(羽地内海)，エリア 2 (名護湾)，エリア 3 (宜野湾)，エリア 4 (中城湾)，エリア 5 (金武湾)，エリア 6 (慶佐次沖) と称呼する。黒実線は等深線。各図の背景カラーは水深 (m)。

表-1 3段ネスト JCOPE2-ROMS システムの計算条件.

モデル	ROMS-L1	ROMS-L2	ROMS-L3
計算期間	1/1/2008–11/2/2015	12/27/2010–11/2/2015	10/11/2012–1/31/2014
グリッド数	768×768×32層	1280×1120×32層	1088×1120×32層
水平解像度	3.0km	1.0km	250m
タイムステップ	240s	40s	15s
境界条件	JCOPE2 (日平均値)	ROMS-L1 (日平均値)	ROMS-L2 (2時間平均値)
風応力	GPV-GSM (6時間値)	GPV-MSM (1時間値)	GPV-MSM (1時間値)
海面フラックス	NOAA COADS05 (月平均気候値)		
海表面水温, 塩分	JCOPE2 (10日平均値) に 1/20 (day ⁻¹) で緩和 (熱・淡水フラックス補正)		
潮汐・潮流	-	TPX07.0 (10分潮)	ROMS-L2 (2時間平均値)
地形データ	SRTM30_PLUS (全球 30s)	SRTM30_PLUS+J-EGG500 (沿岸, 500m解像度)	

構造を評価した。その結果、浮遊幼生の鉛直輸送が産卵時期に形成される季節的な表層混合層の影響を受けつつも3次的に輸送され、本島沿岸全域で浅場-MPZ間に有意な連結性が形成されるなどの基礎的な知見を得た。

本研究は、前報⁸での解析をベースに、3次元的なサンゴ幼生輸送とネットワーク構造解析をさらに進め、新たに沖縄本島沿岸域に定義した130前後のサイト間の3次元的な連結性や、東西海岸間の地形差に伴う鉛直輸送過程の差異に関する解析を行い、サンゴ幼生の供給源などを評価することを目的とした。特に、地形的特徴に基づき本島沿岸を6つの海域に分類することで、各海域間における浅場-MPZ間の水平・鉛直輸送過程に着目した Lagrange統計解析および各海域の浅場とMPZに対する浮遊幼生の供給源を特定し、沖縄本島周辺海域のサンゴ生態系ネットワーク構造の総合的な評価を試みた。

2. 研究方法

(1) 3段ネストJCOPE2-ROMSモデル

本研究では、JCOPE2 再解析値を最外側境界条件とした領域海洋循環モデル ROMSによる3段ネスト高解像度

ダウンスケーリングモデル (ROMS-L3) を用いて海流を同定した。解析領域、計算期間・初期条件・境界条件を含むモデルの概要は図-1a および表-1 に示す通りである。ROMS-L3 モデルは沖縄本島沿岸域を包含する領域を水平解像度 250 m、鉛直 32 層で表現するとともに、沿岸地形、黒潮等の外洋影響、海上風、潮汐などの外力には可能な限り現実的なデータを用いた。図-1b に示す 3 つの検潮所の潮位や瀬底島の水温観測値等と比較し、良好な再現性を確認している (詳細は既報^{6,9}) を参照)。

(2) Lagrange粒子 (仮想サンゴ浮遊幼生) 追跡モデル

沖縄本島沿岸域におけるサンゴ浮遊幼生の3次元輸送は、ROMS-L3モデルの3次元流速2時間平均出力値を用いたオフライン Lagrange 粒子輸送モデル ($\Delta t = 200$ s) を用いて評価した。不確実性を極力排除するため、鉛直日周運動などの生物的な自律挙動やランダムウォークなどは考慮せず、物理場 (流速) に対する応答のみを考慮した。したがって、仮想サンゴ浮遊幼生 (以下、浮遊幼生あるいは粒子と呼称する) は密度的に中立な Lagrange 粒子で表現され、周囲の海流に対して完全に受動的に振る舞うと仮定した。このような解析手法はサンゴ浮遊幼生

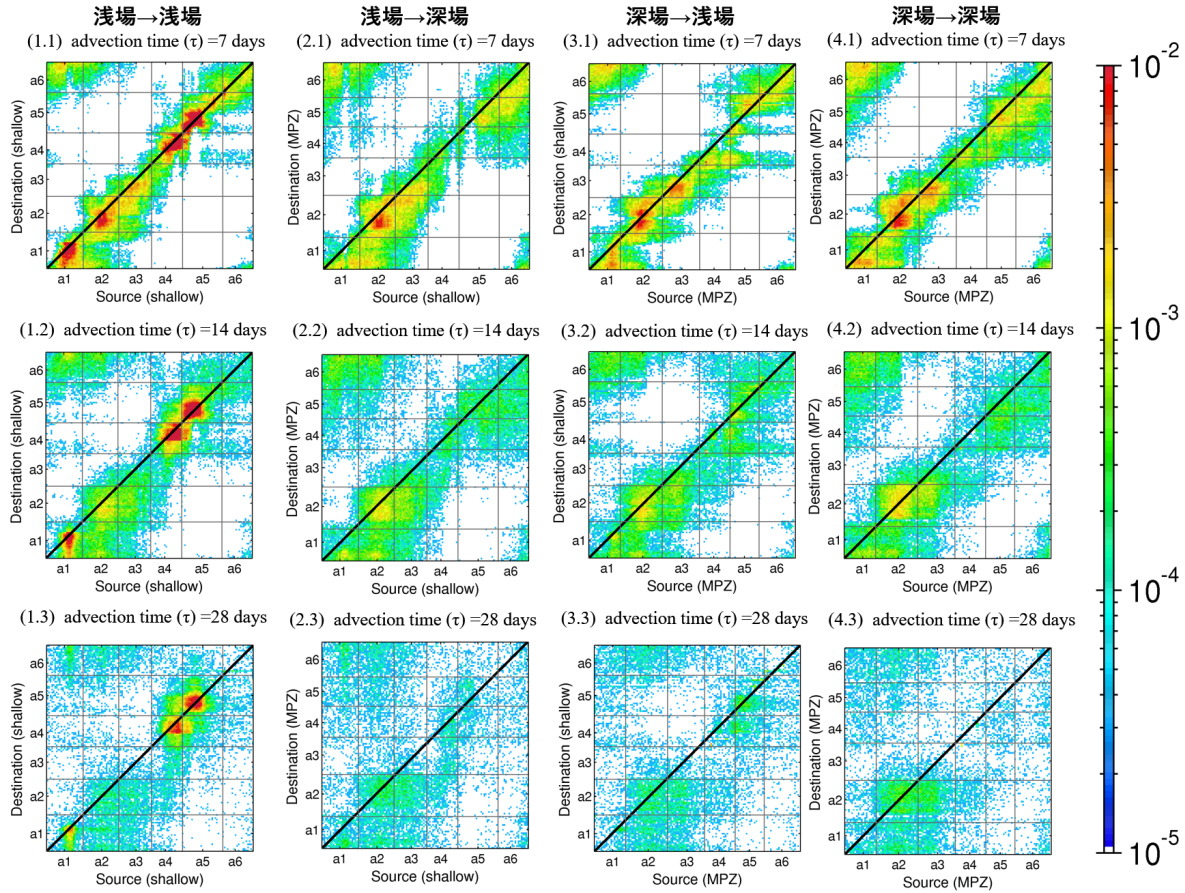


図-2 沖縄本島沿岸域のサンゴ幼生3次元コネクティビティマトリクス C_{ij} . (1.1-1.3) 浅場放流 (横軸) →浅場漂着 (縦軸), (2.1-2.3) 浅場放流 (横軸) →深場漂着 (縦軸), (3.1-3.3) 深場放流 (横軸) →浅場漂着 (縦軸), (4.1-4.3) 深場放流 (横軸) →深場漂着 (縦軸) の場合. 上から順に, 移流時間 7 日, 14 日, 28 日後. カラーはコネクティビティ (連結性に関する結合確率) を表し, 暖色系ほど連結性が強いことを示す. 各パネルの x 軸は放流パッチ, y 軸は漂着パッチを左下の原点から順に本島北端の辺戸岬から反時計回りに表示している. 補助線は図-1c の 6 つのエリア (a1-a6 と表記) に対応している. 斜め 45° の黒線は, 放流と漂着が同じパッチ (自己漂着) に対応している.

分散に関する既往研究で広く用いられ⁶⁻⁹⁾, GPS 漂流ブイ観測値との比較などを通じて高い統計的再現性が確認されている⁹⁻¹¹⁾.

浮遊幼生の連結性 (コネクティビティ) の同定のために, サンゴ生息域を模擬して沖縄本島沿岸域の浅場 (水深約 2 m) に 134 個, 深場 (MPZ, 水深約 30 m) に 129 個の半径 1 km の円形パッチを隙間なく配置し (図-1c), 各パッチからの浮遊幼生の放流および漂着を計算した. さらに, 半島・岬などの地形的な特徴を考慮して本島沿岸域を 6 つの海域 (エリア 1-6) に分け, エリア間の漂着特性なども併せて評価した. サンゴの産卵に伴う浮遊幼生の放流は, 本海域の主要種であるミドリイシ類サンゴの一斉産卵期間に対応させて 2013 年 5 月と 6 月の 2 ヶ月間とした. 放流は各パッチ内に粒子を 500 個ずつ等間隔で配置し, 12:00 UTC に 24 時間間隔で 2 ヶ月間, 粒子を全パッチから放流した. よって期間中の全放流粒子数は, 浅場・MPZ の各放流水深で約 400 万個ずつである. 本海域では放流後約 30 日間に生存する幼生は 10%程度であることから, 粒子の追跡は粒子が岸に接近もしくは

着岸することで沿岸グリッドに捕捉されるか, 領域外に放出されるか, または各放流から 31 日後まで行った.

(3) 3次元コネクティビティ

パッチ i から放流された浮遊幼生がパッチ j へ漂着する確率は連結性, すなわちコネクティビティ (マトリクス) C_{ij} として, 移流時間 (経過時間) τ ごとに次式のような結合確率として定義される⁹⁾.

$$C_{ij}(\tau) = f_x(\xi = \mathbf{x}_j; \tau, \alpha = \mathbf{x}_i)(\pi R^2), \quad (1)$$

ここに, f_x : 粒子位置に関する Lagrangian PDF (確率密度関数), \mathbf{x}_i : 放流パッチ座標, \mathbf{x}_j : 漂着パッチ座標, ξ : 粒子位置の標本空間, α : 粒子の初期位置, R : 放流パッチ半径 (= 1 km) である. C_{ij} が大きいほど粒子は i から j へと漂着しやすく, 連結性が高いことを示す.

本研究では, $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ の水平座標は各パッチ領域に対応させ, 鉛直座標は放流 (\mathbf{x}_i) に対しては浅場: $z = 2$ m, 深場: $z = 30$ m, 漂着 (\mathbf{x}_j) に対しては浅場: $z = 0 \sim 30$ m, 深場: $z = 30 \sim 150$ m と定義した. したがって, 浅場-深

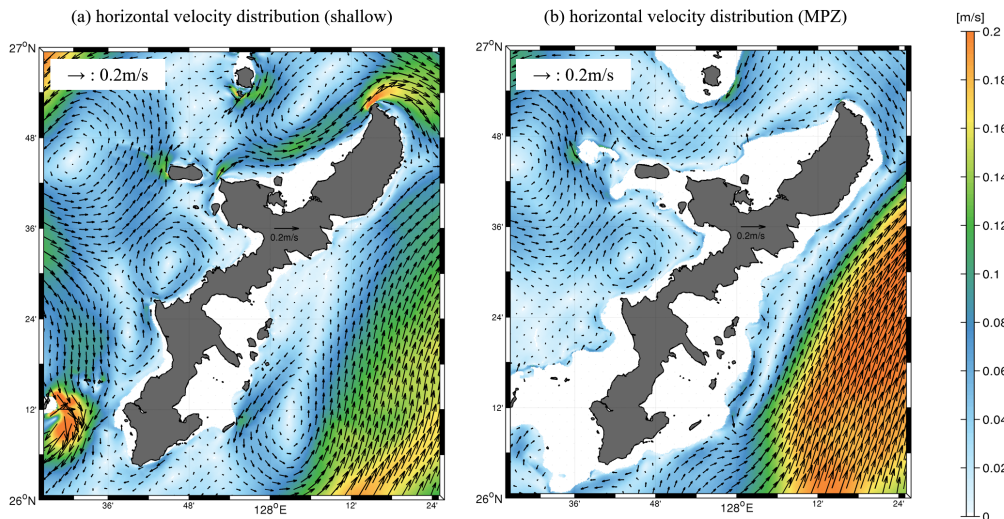


図-3 ROMS-L3による2013年5月-6月の期間平均水平流速分布。(a)浅場平均水深15m, (b)深場(MPZ)平均水深90mにおける値。矢印:流速ベクトル, 色:流速絶対値。

場間の3次元コネクティビティは放流・漂着パッチ座標に深度制限をかけることにより求められる。

また、沖縄本島沿岸域でのサンゴ生態系ネットワーク評価のために、6つのエリア(図-1c)の矩形領域内の浅場と深場を対象域として、各エリア各深度帯内に漂着した粒子数を供給源海域別に移流時間ごとに計数することで、各海域内のサンゴ幼生の供給源の構成を解析し、沖縄本島沿岸域間の連結性を定量的に評価した。

3. 結果と考察

(1) サンゴ浮遊幼生の3次元輸送とコネクティビティ

移流時間7, 14, 28日後の仮想サンゴ浮遊幼生に関する3次元コネクティビティマトリクス C_{ij} を求めた(図-2)。ここでは、浅場放流→浅場漂着、浅場放流→深場(MPZ)漂着、深場放流→浅場漂着、深場放流→深場漂着の4通りの C_{ij} を示している。横軸は放流パッチ、縦軸が漂着パッチに対応し、補助線により6つのエリアごとにブロック化している。 C_{ij} が大きいと横軸から縦軸のパッチへの粒子輸送が多く、連結性が高いことを示す。約45度の斜線は放流パッチに漂着する自己漂着に対応し、斜線左上の C_{ij} はy軸座標値がx軸座標値より大きいことから粒子が本島沿岸を反時計回りに輸送されることを、反対に斜線右下の C_{ij} は時計回りの輸送を示している。

4ケース(図-2)ともに移流時間14日までは45度の斜線付近で粒子が集まることを示しており、放流開始後2週間までは放流エリア付近に滞留し、その後、広域へ分散していく。移流時間28日では、全体的に45度の斜線左上よりも右下で C_{ij} が大きく、本島を時計回りに周回する粒子輸送が優勢であることを示している。このとき左

上で C_{ij} が大きいのが、これはエリア1や2から放流された粒子が本島北端の辺戸岬を回り込んでエリア6や5へ輸送されていること、つまり時計回り輸送を表している。一方で各図の中央部付近での C_{ij} は低めの値となっており、エリア3と4の間の輸送、特に3→4が少ない。これは本島南端の喜屋武岬の西側の海峡部で水深が著しく浅く(図-1b)、そこでの粒子交換が阻害されるためであり、南部での東西海岸間の連結性が弱化することを示している。

浅場→浅場の C_{ij} (図-2 1.1-1.3)を見ると、本島を時計回りに周回する輸送が卓越するとともに、東海岸のエリア4(中城湾)とエリア5(金武湾)、西海岸のエリア1(羽地内海)の3海域では移流時間28日後でも放流エリア付近に滞留しやすく、強い自己漂着が生じている。浅場→深場(図-2 2.1-2.3)も浅場→浅場と同様な傾向を示しているが、移流時間の経過とともに C_{ij} は弱化し、漂着域としてのMPZとの連結性は浅場とのそれよりも低くなる。特にエリア1, 4, 5の自己漂着がほとんどなくなり、他のエリアに離散している。また、浅場放流に対しては、エリア2(名護湾)には水深に関わらず自己漂着が見られ、時計回り輸送によってエリア3からの粒子も多く漂着しており、強い集積力があることが分かる。

深場→浅場(図-2 3.1-3.3)および深場→深場(図-2 4.1-4.3)の C_{ij} は互いに似たような分布形であり、全体的に浅場放流の場合よりも C_{ij} は低下するが、時計回り輸送や南端の喜屋武岬での東西間阻害などの傾向は共通している。浅場放流の場合と同様にエリア2での自己漂着は強いが、エリア1, 4, 5の深場から放流された粒子は自海域・近隣海域の深場にはあまり漂着せず、多くは領域外へと離散したと考えられる。ただし、エリア5から放流した粒子は時計回り輸送などの影響を受けてエリア4や5の浅場に漂着する傾向が示されている。

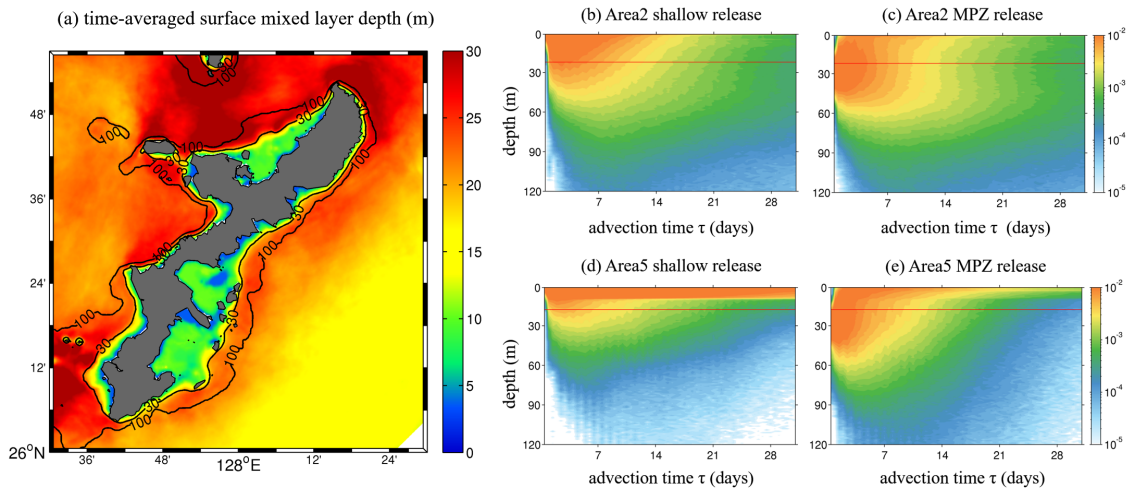


図-4 (a) 2013年5月-6月の期間平均表層混合層深さ (m, カラー) と水深 (m, 黒コンター) . (b)-(e) Lagrangian PDF の鉛直分布の (移流) 時間変化. (b) エリア2浅場放流, (c) エリア2深場 (MPZ) 放流, (d) エリア5浅場放流, (e) エリア5深場放流の場合の Lagrangian PDF に関する Hovmöller ダイアグラム. 縦軸: 水深 (m), 横軸: 移流時間, 色: Lagrangian PDF, 赤実線: 表層混合層の時空間平均深さ (m) を表している. Lagrangian PDF は各エリア全域の水平空間平均値である.

以上のような浮遊幼生輸送パターンは、期間内の浅場および深場 (MPZ) 水深帯における平均流動場 (図-3) でよく説明される. すなわち、両水深帯ともに沖側の流動とはあまり関係なく岸近くでは時計回り残差流が見られ、北端の辺戸岬では表層で西海岸から東海岸へ回り込む流れが発達し、反対に南端の喜屋武岬西側では浅瀬によって流動阻害が生じている.

(2) 浅場—深場間の鉛直輸送メカニズム

浅場-深場間の鉛直輸送に関するメカニズムを考察するために、エリア2 (名護湾) とエリア5 (金武湾) を例に、それぞれの浅場放流と深場放流の場合の粒子の Lagrangian PDF 鉛直分布の時間変化と、解析期間平均の混合層深さを求めた (図-4). 混合層深さは沖合では平均20-30m程度であるが、水深約30m以浅の浅場では海底境界層の影響を受けて10m程度に制限される (図-4a). いずれの場合も浅場-深場間での粒子交換は明確であるが、水深10-30mに発達する夏季の表層混合層が鉛直分散に強く影響しており、深場から浅場・表層への上方鉛直輸送は抑制され、反対に表層付近では粒子集積が促進される. 特にエリア5では表層集積が強化され、その結果、浅場への自己漂着が助長されたと考えられる. 一方で、エリア2は深場-表層間での鉛直分散が相対的に強く、浅場・深場の両方で自己漂着が生じるという前節の結果を支持している. これらの鉛直分散パターンの差異は、海底地形およびそれに伴う海流の影響に起因している. すなわち、両湾は水平地形による閉鎖度が高い点では共通しているが、エリア2は海底勾配が急峻なため岸沖間の粒子交換が助長されやすく、エリア5 (と4) は広大な浅海域を有し、浅場での粒子保持力が強いからである.

(3) 各海域におけるサンゴ浮遊幼生の供給源

沖縄本島周辺海域のサンゴ生態系の保全管理に向けて、沖縄本島全域のエリアごとの浅場と深場 (MPZ) のサンゴネットワーク構造を解析した. 表-2は、縦列のすべての潜在的なサンゴ供給源から、横列の各エリアの (a) 浅場, (b) 深場 (MPZ) への移流時間28日後の加入率 (%) を示している. 全体的に浅場漂着と深場漂着の間には顕著な違いが見られる. 浅場漂着域では、同じエリア (すなわち自己漂着) または近隣のエリアから放流された幼生が多く加入する. 対照的に、深場漂着域では西海岸 (エリア1と2) が本島沿岸全体の深場サンゴ生息域への幼生供給に重要な役割を果たしていることが分かる.

表-2aから、例えばエリア1の浅場漂着域では主な浅場供給源としてエリア1から (自己漂着), 深場供給源として近隣のエリア2から放流した幼生を受け入れている. 同様にエリア2-6では、主に同じエリアまたは近隣のエリアから幼生を受け入れている. さらに、エリア4-5の浅場漂着域では著しい自己漂着 (漂着幼生の約60%) が生じている. 一方、深場漂着域 (表-2b) では、エリア2の浅場と深場の両方がエリア1-3, 6に漂着する幼生の主な供給源となっている. 同様に、エリア4と5の深場漂着域は、エリア1の影響を最も強く受けている.

これらの結果は、沖縄本島における浅場-深場間の生息環境の複雑な相互作用を示唆するものである. 浅場は同じエリアの沖合の深場からの供給も含めて自己漂着の影響を強く受けるが、深場 MPZ は本島沿岸を時計回りに周回する循環流に支配され、しかも南端の喜屋武岬西部で浅瀬地形によって本島を周回する循環流の通過が阻害されるため、西海岸のエリア1と2が本島沿岸全域の主要なサンゴ浮遊幼生供給源となっている.

表-2 6エリアの浅場・深場への仮想サンゴ浮遊幼生の供給源ごとの加入率（移流時間 28 日後），（a）浅場漂着，（b）深場（MPZ）漂着の場合．縦軸：放流エリアと水深帯，横軸：漂着エリア．ハイライトは黄色：浅場のうち最も割合が高い供給源，緑：深場（MPZ）のうち最も割合が高い供給源．加入率は漂着エリア内（図-1c）に漂着した全粒子数を 100% とした．

(a) 各エリア浅場への粒子供給割合（加入率，%）

放流	漂着	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
	浅場	浅場	浅場	浅場	浅場	浅場	浅場
Area 1	浅場	28.58	2.33	3.21	2.78	3.95	18.37
	MPZ	7.59	2.49	3.44	2.61	3.14	9.09
Area 2	浅場	16.28	20.78	12.20	2.96	4.34	14.56
	MPZ	15.49	21.60	13.28	2.45	3.76	13.71
Area 3	浅場	10.33	17.39	13.50	1.66	2.08	7.79
	MPZ	9.71	16.22	13.22	1.12	4.37	6.57
Area 4	浅場	3.30	9.23	19.77	57.41	9.45	4.23
	MPZ	2.86	5.26	6.38	3.20	1.78	2.90
Area 5	浅場	1.18	1.63	6.79	17.82	60.86	9.36
	MPZ	1.15	1.85	4.54	4.88	5.57	4.07
Area 6	浅場	1.90	0.66	1.64	1.48	1.79	3.98
	MPZ	1.63	0.54	2.02	1.63	1.78	5.37

(b) 各エリア深場（MPZ）への粒子供給割合（加入率，%）

放流	漂着	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
	MPZ	MPZ	MPZ	MPZ	MPZ	MPZ	MPZ
Area 1	浅場	17.27	2.79	3.51	11.53	13.86	17.12
	MPZ	16.87	3.80	4.75	15.53	15.93	15.36
Area 2	浅場	16.77	19.90	14.52	9.21	12.51	16.99
	MPZ	18.59	27.60	19.64	7.85	11.32	16.67
Area 3	浅場	7.45	15.12	13.93	4.55	5.62	7.34
	MPZ	7.70	18.03	15.86	3.46	4.06	6.84
Area 4	浅場	1.72	5.42	10.89	6.65	3.22	1.91
	MPZ	2.01	4.04	5.67	6.38	3.54	2.27
Area 5	浅場	1.24	0.83	3.62	8.68	7.70	2.97
	MPZ	1.32	1.17	3.82	9.46	7.76	3.33
Area 6	浅場	4.68	0.61	1.64	7.06	6.24	4.32
	MPZ	4.36	0.69	2.16	9.64	8.22	4.86

4. おわりに

本研究では、JCOPE2-ROMSをベースに3段ネスト高解像度3次元流動モデルおよびLagrange粒子追跡モデルを用いて、2013年5-6月を例としてサンゴ浮遊幼生の3次元輸送過程に関する解析を行い、Lagrangian PDFと3次元コネクティビティマトリクスにより、沖縄本島沿岸域の浅場-深場（MPZ）間の連結性を定量的に評価した。その結果、海流による輸送と混合層の影響を受けて浅場と深場における遺伝子交流が広域で生じていることが強く示唆された。沖縄本島沿岸域の3次元的なサンゴ浮遊幼生輸送に対しては、本島を周回する時計回りの残差流と本島南端の喜屋武岬の地形的な影響を強く受け、西海岸と東海岸の輸送特性は東西海岸で非対称性になることを示した。また、東海岸に位置する半閉鎖性の中城湾、金武湾の浅場は強い自己漂着力を持つこと、開放性の湾である西海岸の名護湾では浅場と深場両方とも強い集積力を持

つことが分かった。一方、産卵時期の表層混合層は海表面から20 m程度の水深に発達し、深場から浅場・表層への上方鉛直輸送の抑制と表層付近での集積の促進という2つの役割があり、特に東海岸では浅海地形によってそのメカニズムが強化されていることが示された。さらに、沖縄本島沿岸域の浅場は自己漂着もしくは隣接海域からの幼生加入が卓越するが、深場では時計回り循環流による輸送に強く支配されており、喜屋武岬で地形的な通過障害を受けて西海岸が島全体への主要な幼生供給源となっていることを明らかにした。本研究の成果は、沖縄本島沿岸におけるMPZサンゴ生態系の実態解明と、それに基づく保全管理戦略策定への一助となることが期待される。今後はGPS漂流ブイとの比較などを通じて粒子追跡モデルの精度検証を行っていく必要がある。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費基盤研究A（18H03798，24H00337）の助成を受けた。

REFERENCES

- 1) Lafiatta, A., Fromont, J., Speare, P. and Schönberg, C.H.L.: Coral bleaching in turbid waters of north-western Australia, *Marine and Freshwater Research*, Vol. 68, No. 1, pp. 65–75, 2016.
- 2) Terry, T.P., Keny, J.T., Alvarez-Noriega, M., Alvarez-Romero, J.G., Anderson, K.D., ... Wilson, S.K: Global warming and recurrent mass bleaching of corals, *Nature*, Vol. 543, pp. 373–377, 2017.
- 3) Decarlo, T.M., Cohen, A.L., Wong, G.T.F, Davis, K.A., Lohmann, P., and Somng, K.: Mass coral mortality under local amplification of 2 °C ocean warming, *Scientific Reports*, Vol. 7, 44586, 2017.
- 4) Van Woelk, R., Sakai, K., Ganase, A. and Loya, Y.: Revisiting the winners and the losers a decade after coral bleaching, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 434, pp. 67–76, 2011.
- 5) Hughes, T.P., and Tanner, J.E.: Recruitment failure, life histories, and long-term decline of Caribbean corals, *Ecology*, Vol. 81, No. 8, pp. 2250–2263, 2000.
- 6) 内山雄介, 小谷瑛千花, 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. [Uchiyama, Y. Odani, S., Yamanishi, T., Kamidaira, Y. and Mitarai, S.: Impact of mesoscale recirculation of the Kuroshio on asymmetric oceanic structure around Okinawa Island, *J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 72, No. 2, pp. I_481-I_486, 2016.]
- 7) 内山雄介, 宮川翼, 小谷瑛千花, 上平雄基: 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_1291-I_1296, 2018. [Uchiyama, Y., Miyagawa, T., Odani, S. and Kamidaira, Y.: A biological network around Okinawa Island analyzed with a coupled high-resolution ocean circulation and Lagrangian particle tracking model, *J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 74, No. 2, pp. I_1291-I_1296, 2018.]
- 8) 竹安希実香, 内山雄介, 御手洗哲司: 沖縄本島リーフ海域におけるサンゴ浮遊幼生分散と3次元コネクティビティについて, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.79, No.17, 23-17137, 2023. [Takeyasu, K., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Coastal dispersal of coral larvae and associated 3-D connectivity in the reef areas around Okinawa Island, Japan, *J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.79, No.17, 23-17137, 2023.]
- 9) Uchiyama, Y., Odani, S., Kashima, M., Kamidaira, Y. and Mitarai, S.: Influences of the Kuroshio on interisland remote connectivity of corals across the Nansei Archipelago in the East China Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 123, pp. 9245-9265, 2018.
- 10) Matsushita, K., Uchiyama, Y., Takaura, N. and Kosako, T.: Fate of river-derived microplastics from the South China Sea: Sources to surrounding seas, shores, and abysses, *Environ. Pollut.*, Vol. 308, 119631, 2022.
- 11) Takeyasu, K., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Quantifying connectivity between mesophotic and shallow coral larvae in Okinawa Island, Japan: A quadruple nested high-resolution modeling study, *Front. Mar. Sci., Sec. Coastal Ocean Processes*, Vol. 10, 1174940, 2023.

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

THREE-DIMENSIONAL CONNECTIVITY BETWEEN SHALLOW AND DEEP CORAL ECOSYSTEMS ALONG THE COASTAL AREA OF OKINAWA ISLAND

Tianrui ZHANG, Yusuke UCHIYAMA, and Kimika TAKEYASU

In light of the ongoing global coral bleaching crisis, the mesophotic zone (MPZ) at depths of 30 to 150 meters, where water temperatures are relatively stable, is expected to serve as both a refuge and a resupply source for shallow-water coral genetics. To facilitate the establishment of a desirable coral ecosystem, this study employed a high-resolution ocean model for the coastal area around Okinawa Island, Japan, to investigate the advection-dispersion processes of coral larvae. A Lagrangian statistical analysis was conducted to evaluate the three-dimensional transport and population connectivity of the modeled virtual coral larvae between shallow areas and MPZs. The findings indicate that the degree of coral connectivity varies significantly depending on topographical features. Notable observations include asymmetry in coral connectivity between the east and west coasts, driven by the residual clockwise current around the island. Enhanced self-recruitment was evident in shallow areas around the semi-enclosed Kin and Nakagusuku Bays, while significant accumulation occurred in both shallow and deep MPZ areas of the more open Nago Bay.