

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

竹安 希実香¹・内山 雄介²・御手洗 哲司³

¹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 東京都千代田区麹町5-4)

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)

近年, 世界的に深刻化するサンゴの白化問題は本邦南西諸島でも顕在化しており, 2016年には沖縄本島を含む琉球諸島の多くで大規模白化現象が生じた. これに対して, 水温が比較的安定で低温な水深30m~150mのmesophotic zone (MPZ) のサンゴ生態系は, 水温変化が大きく白化が顕著な浅海域のサンゴ遺伝子型の避難域として期待されている. しかしながら, 浅海域-MPZ間の生態系リンク構造は十分に解明されていない. そこで本研究では, 沖縄本島沿岸のサンゴ礁を対象に多段ネスト高解像度海洋モデルとサンゴ幼生を模したオフラインLagrange粒子追跡モデルを用いた数値解析を行い, 浅海域-MPZ間のコネクティビティ評価, 幼生放卵期における混合層の鉛直効果と3次元輸送との関係の解明, MPZサンゴ生態系が確認されている沖縄本島西海岸の瀬底島海域におけるサンゴ幼生加入および幼生供給過程の把握を試みた.

Key Words : mesophotic coral larvae, Lagrangian dispersal, 3-D population connectivity, ROMS

1. はじめに

近年, 世界的にサンゴの白化が進行しているが, 琉球諸島周辺においても1998年, 2001年, 2016年に高水温の影響によって大規模な白化現象が生じ, 沖縄本島西海岸の瀬底島周辺海域では水温変化に敏感な*Seriatopora hystrix*が浅海域の生息地から消失し¹⁾, 石垣島では90%, 石西礁湖では50-80%ものサンゴが白化したと報告されている²⁾. 一方, 外乱に対して水温が比較的安定な水深30 m~150 mのmesophotic zone (MPZ) のサンゴ生態系は, 水温変化が大きく白化が顕著な浅海域のサンゴ遺伝子型の避難域として期待されている³⁾. しかしながら, 浅海域-MPZ間のサンゴ生態系のつながり (リンクあるいはネットワーク構造) はほぼ未解明であるため, 浅海域-MPZ間の浮遊幼生輸送を含む水平および水深帯間の3次元サンゴ生態系ネットワーク構造を定量的に把握し, 保全に活用していくことが求められている.

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べき海域を特定することが鍵となる. これに対して著者らは, 3次元海洋流動モデルとLagrange粒子追跡モデルを用いて, 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数値解析フレームを構築し, 琉球諸島・八重山諸島・沖縄本島海域におけるサンゴ生態系ネットワーク構造の一端を明らかにしてきた^{3,4,5)}.

内山ら^{6,7)} (以下前報と呼称) は, 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に着目し, 高解像度数値モデルを用いたサンゴ生態系ネットワーク構造解析を行った. その結果, 岸近傍で放流されたLagrange粒子 (仮想サンゴ浮遊幼生) の大部分は岸沖方向の分散作用をあまり受けず, 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, 浅海域に補足された粒子は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と, 粒子の輸送・分散過程は本島の東西海岸で大きく異なり, 閉鎖性が強い東海岸の金

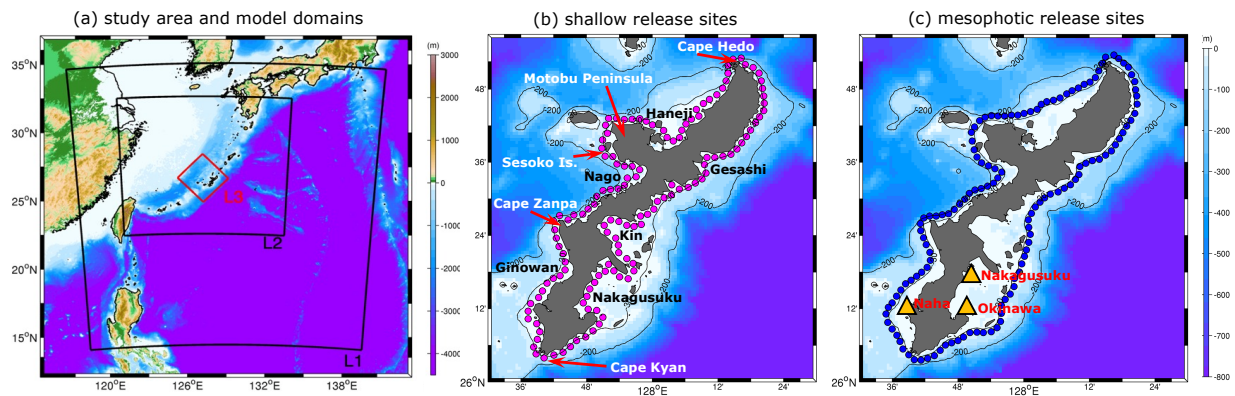


図-1 : (a) 研究対象海域. 黒枠は外側から ROMS-L1 および L2 モデル, 赤枠は ROMS-L3 モデル計算領域. 背景カラーは水深 (m). (b) (c) 本文中で参照する地名と Lagrange 粒子追跡計算で設定した放流・漂着サイトの水平位置. (b) 水深 2m 放流と (c) 水深 30m 放流の 2 ケースを行った. 黒実線は代表的な等深線. 背景カラーは水深 (m). (c) 中の三角マークは検潮所.

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	240 s	40 s	15 s
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 30 s)	SRTM30 PLUS+J-EGG500 (沿岸, 500m 解像度)	

武湾・中城湾等において強い粒子捕捉が生じることなどの重要な知見を得た. そこで本研究では, 前報で構築したモデルを用い, 水平方向だけではなく水深帯別の粒子分布に着目した Lagrange 粒子解析を行うことで, 沖縄本島における浅海サンゴと MPZ サンゴ間のネットワーク構造に着目した解析を行った. さらに, 幼生放卵期における混合層の効果と 3 次元輸送との関係の解明, MPZ サンゴ礁が確認されている沖縄本島西海岸の瀬底島海域における幼生加入および幼生供給過程の把握を試みた.

2. 研究方法

(1) 3 段ネスト領域海洋モデル

本研究では, JCOPE2 (水平解像度約 1/12 度) を最外側境界条件とした 1-way offline ネスティングによる 4 段ネスト高解像度海洋ダウンスケーリングモデル⁹⁾のうち, 水平解像度 250 m, 鉛直 32 層の ROMS-L3 モデルによる 2013 年 1 年間を含む約 16 ヶ月分の流動再解析値を用いた (図-1a, 表-1). L3 モデルは複雑な海岸地形・水深分布を表現可能な高解像度モデルであると同時に, 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に広い領域をカバーする. L3 モデルの初期条件・側方境

界条件は, ROMS-L2 モデル^{11,12)}による 2 時間平均値出力を時空間的に線形内挿して与えた. L2 モデルの境界で付与された順圧潮汐によって L2 領域内で励起された内部潮汐を含む高周波シグナルは, L3 モデルの側方開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表-1 に示す通りである. なお, 流動モデルの再現性については, 図-1c の検潮所での潮位変動などを含めて総合的・包括的に確認されている^{3),6),7)}.

(2) Lagrange 粒子追跡モデル

ROMS-L3 モデルの 3 次元流速 2 時間平均出力値を用いて, サンゴ浮遊幼生に見立てた Lagrange 中立粒子追跡計算をオフラインで (事後的に) 行なった. この追跡モデルは, 琉球諸島および沖縄周辺の海域に対して用いられるなど ROMS モデルとのコンビで数多くの適用事例があり^{3),7)}, 表層ドリフター軌跡の実測値などとの比較を通じてその正確性が検証されている³⁾. 本研究では, 挙動モデルの導入に伴う不確実性を極力排除するため, 粒子の自発的な挙動やランダムウォークなどは考慮せず, 粒子位置で時空間線形内挿されたオイラー流速を用いて 3 次元的な移流効果のみを考慮した⁵⁾. 本海域における既往研究^{8),9)}を参考に, 粒子の放流は浅海域でのサンゴ産卵を想定した水深 2m からと, MPZ での産卵を想定した

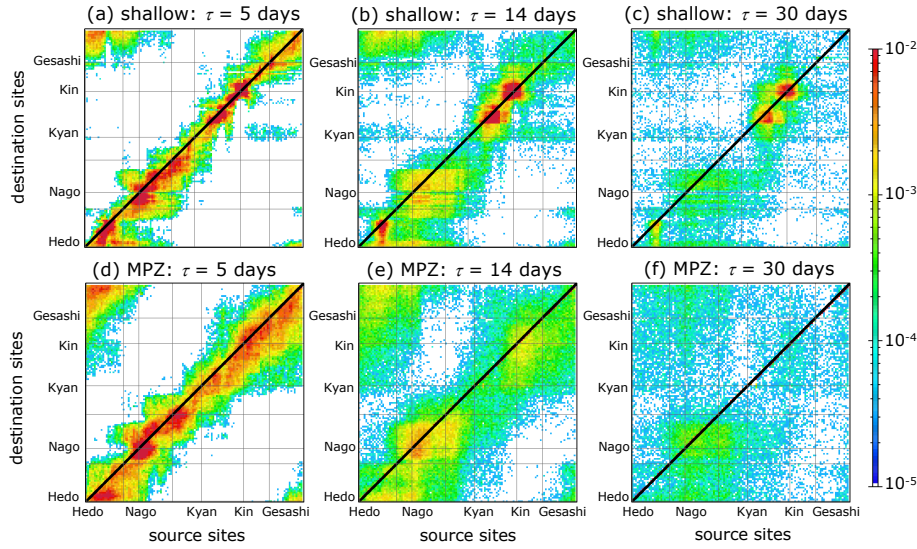


図-2：沖縄周辺のサンゴ幼生水平コネクティビティマトリクス C_{ij} （カラー）。暖色系ほどリンクが強固なことを示す。x軸は放流サイト、y軸は漂着サイトを、各サイトは本島北端の辺戸岬から反時計回りに表示している（図-1b, c参照）。上段(a-c)：水深2m放流、下段(d-f)：水深30m放流の場合の結果。左から順に、移流時間 $\tau=5$ 日、14日、30日後の結果。

水深30mからの2パターン行なった。粒子の放出源（ソースサイト）は半径1kmの円とし、水深2mから放流する場合は134個（図-1b）、水深30mから放流する場合は129個（図-1c）の円形パッチを各等深線の周辺にほぼ隙間なく配置した。サンゴの産卵期間・産卵状況を模して、2013年5月1日～6月30日の2ヶ月間にわたって1日1回各パッチ内に約500個のLagrange粒子を等間隔に初期配置し、放流した。各放流サイトからリリースされる粒子の総数は各ケースで約390万個である。本研究対象域では放流後30日後まで生存するサンゴ浮遊幼生は10%程度であることから、粒子の追跡は粒子が陸近傍グリッドで停止するか、計算領域外に放出されるか、あるいは放流から30日後まで行った。

(3) 3次元コネクティビティ

移流時間ごとの粒子の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 $\mathbf{x}_i$ からシンクパッチ $\mathbf{x}_j$ へ至る結合確率としてコネクティビティが次式のように定義される。

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

$\mathbf{a}$ は粒子の初期位置、 τ は移流時間、 f_x は空間平滑フィルター操作後のLagrangian PDF、 ξ は粒子位置の標本空間関数、 R は放流・漂着サイト半径（ $R=1$ km）である。

本研究では、位置ベクトル $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ に対して水平空間範囲に加えて任意の水深帯を考慮することにより、水平方向および水深帯別輸送（例えば浅海域放流サイトからMPZ漂着サイトへ輸送される幼生の割合など）を含む3次元的な漂着確率（コネクティビティ）を求めた⁵⁾。鉛

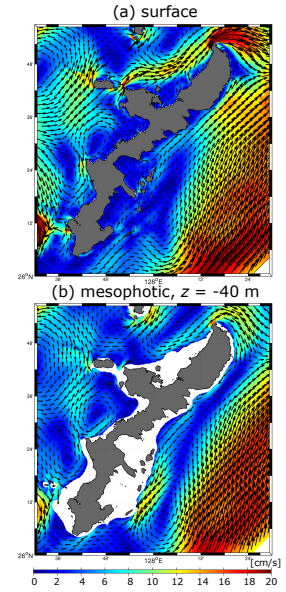


図-3：ROMS-L3による2013年5-6月の2ヶ月平均流速。(a)表層、(b)MPZ: $z=-40$ m。

直座標の定義は、放流サイトに対する $\mathbf{x}_i$ については、浅海域放流： $z=-2$ m、MPZ放流： $z=-30$ mとした。また、漂着サイトに対する $\mathbf{x}_j$ では、浅海域漂着： $-30\text{ m} < z \leq \eta$ （ η は水位）、MPZ漂着： $\max(-150\text{ m}, -h) < z \leq -30\text{ m}$ （ h は水深）とした。さらなる詳細についてはTakeyasuら⁵⁾を参照されたい。

(4) 粒子の供給源と漂着域の評価

サンゴ浮遊幼生の供給源と漂着域を定量的に評価するために、任意の移流時間 τ における $C_{ij}(\tau)$ を任意の放流サイト群 I あるいは漂着サイト群 J で総和を取ることににより、destination強度 $D_j(\tau)$ とsource強度 $S_i(\tau)$ を次式のように定義する。

$$D_j(\tau) = \sum_{i \in I} C_{ij}(\tau); \quad S_i(\tau) = \sum_{j \in J} C_{ij}(\tau) \quad (2)$$

$D_j(\tau)$ は、移流時間 τ において指定した放流サイト群 I から供給された粒子が任意の漂着サイト j に到達する確率であり、粒子（浮遊幼生）の集積しやすさの指標である。反対に $S_i(\tau)$ は、移流時間 τ において、指定した漂着サイト群 J に対して放流サイト i が供給源となる確率であり、粒子の起源（親世代）となる可能性の指標である。

3. 結果と考察

(1) サンゴ浮遊幼生の水平輸送と水平コネクティビティ

移流時間 $\tau=5, 14, 30$ 日後の粒子（仮想サンゴ浮遊幼生）の平面位置に関するLagrangian PDFを用い、浅海域

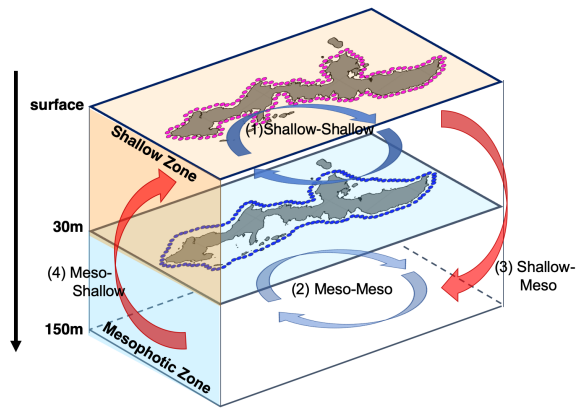


図-4：3次元コネクティビティ C_{ij} の概念図。海表面から水深30mまでの水深帯を漂着に対する浅海域（shallow）、水深30m～150mを漂着に対するMPZ（“Meso”photoc）と定義した。青矢印：(1)浅海域→浅海域間、(2)MPZ→MPZ間の水平コネクティビティ、赤矢印：(3)浅海域→MPZ間、(4)MPZ→浅海域間の鉛直コネクティビティを表す。

放流→浅海域漂着、MPZ放流→MPZ漂着のケースについて、ソースサイト i からシンサイト j へ至る確率 C_{ij} （コネクティビティ）をマトリクスで評価した（図-2）。横軸が放流サイト i 、縦軸が漂着サイト j であり、カラーが C_{ij} を表し、暖色系ほど $i \rightarrow j$ への浮遊幼生の輸送が多く、生態系の交流がある可能性が高いことを示す。

両ケースともに移流時間初期（ $\tau = 5, 14$ 日）では傾き1の直線付近で C_{ij} の値が大きいことから、放流域近傍に粒子が多く滞留していることが確認される。マトリクスの左上でも C_{ij} 値が大きくなっているが、これは沖縄本島北端の辺戸岬から北東海岸の慶佐次方面へ粒子が輸送・漂着することを示している（時計回り輸送）。一方、マトリクス右下での C_{ij} 値は大きくないことから、慶佐次→辺戸や、辺戸→名護への反時計回り粒子輸送はほとんど生じていないことが分かる。このような粒子輸送傾向は、辺戸岬沖で発達する北東方向の強い残差流の影響により、偏向が顕在化されたためと考えられる（図-3）。

いずれのケースも移流時間の経過とともに C_{ij} 値が全体的に小さくなり、本島周辺へ広域分散していく傾向にある。しかしながら、移流時間が経過しても（ $\tau = 14, 30$ 日）傾き1の直線周辺に赤～暖色系の C_{ij} 値が団子状・パッチ状に残っている（図-2b, c, e, f）。これは名護湾、中城湾、金武湾といった半閉鎖的な海域から放流された粒子が、時間が経過しても湾外へあまり流出せず、同じ海域内で捕捉されることを表している。東海岸の中城湾、金武湾での捕捉は浅海域の C_{ij} で顕著であるものの、MPZの C_{ij} は著しく減少しており、むしろ相対的に名護湾での捕捉が強い。これらの原因は海底地形の差異（図-1, 図-3b参照）による湾口通過流の差異に起因する。湾外で生じるMPZ放流粒子は、遠浅な中城湾、金武湾

表-2：2つの水深帯間の移流時間5, 14, 30日後における3次元コネクティビティ。(1)～(4)は図-4に対応している。

source → destination	$\tau = 5$ days	$\tau = 14$ days	$\tau = 30$ days
(1) SS: shallow → shallow	1.01×10^{-1}	4.28×10^{-2}	1.48×10^{-2}
(2) MM: MPZ → MPZ	4.90×10^{-2}	1.50×10^{-2}	3.91×10^{-3}
(3) SM: shallow → MPZ	3.53×10^{-2}	1.38×10^{-2}	3.71×10^{-3}
(4) MS: MPZ → shallow	4.47×10^{-2}	1.38×10^{-2}	3.90×10^{-3}

の湾内には流入しづらいが、海底勾配が比較的急な名護湾では他の内湾域と比較して海水交換率が高く、MPZ粒子が湾内に流入しやすいことによるものと考察される。

(2)3次元コネクティビティ

水平コネクティビティ評価に続いて、浅海域とMPZの2つの水深帯間のネットワーク構造（図-4）を移流時間5, 14, 30日での鉛直コネクティビティ C_{ij} を用いて評価する（表-2）。ここで、各 C_{ij} は x_j で定義した水深帯（2.(3)参照）で鉛直積分された、全放流・漂着サイトに対する総和である。例えば、図-4, 表-2の(3)SM: shallow → MPZコネクティビティとは、全ての浅海域放流サイト水平位置（図-1b, 水深2m）から放流された粒子のうち、全てのMPZ漂着サイト水平位置（図-1c）の水深帯 $max(-150\text{ m}, -h) < z \leq -30\text{ m}$ に到達するサンゴ浮遊幼生の割合の総和を表している。

表-2を見ると、鉛直コネクティビティ(3)と(4)は $\tau = 30$ 日でも $C_{ij} \sim 4 \times 10^{-3}$ 程度と有意な値を示しており、水平 C_{ij} (2)とはほぼ同程度の大きさとなっている。一方で、水平 C_{ij} (1)は移流時間に関わらず(2)～(4)よりも3倍程度大きく、浅海域間でのリンクが強固であることが分かる。時間経過とともに沖合海域や系外流出が生じるため全ての C_{ij} は徐々に低下し、 $\tau = 5$ 日との比較では $\tau = 14$ 日で1/3程度、 $\tau = 30$ 日で1/10程度にまで減少している。興味深いことに、 $\tau = 5$ 日では(4)が(3)を0.01程度上回っているのに対して、 $\tau = 14$ 日、 $\tau = 30$ 日ではその差は約 2×10^{-4} 程度にまで小さくなる。つまり、放流初期にはMPZから浅海域への幼生供給が優勢であるものの、時間経過とともに浅海域からMPZへの供給が増加し、最終的には両水深帯間での粒子交流は同程度になっている。以上のことは、MPZと浅海域が互いに重要な幼生ソースとして機能している可能性を示唆している。

(3)鉛直コネクティビティの形成メカニズム

以上のような浅海域とMPZ間の鉛直コネクティビティ形成メカニズムを理解するために、領域A・Bから放流された全粒子のLagrangian PDFの鉛直分布の時系列変化を検討する（図-5）。いずれの領域・水深帯から放流した場合も上下に鉛直分散し、浅海域→MPZ間での粒

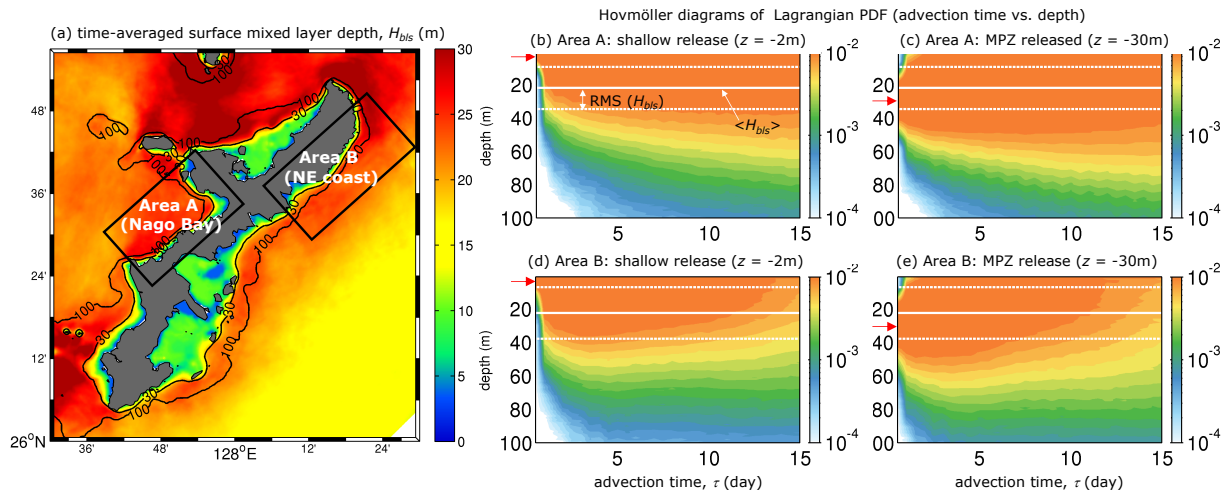


図-5：(a) 表層混合層深さ H_{mls} 空間分布（2013 年 5 月～6 月の期間平均値）および領域 A・B の定義（黒枠）．黒コンター線：30, 100 m の等水深線．(b)–(e)：放流された仮想サンゴ浮遊幼生の存在確率 Lagrangian PDF 鉛直分布（領域水平積分値）の Hovmöller 図．白実線： H_{mls} の期間・領域平均値，白破線：その標準偏差 σ ，赤矢印：放流水深．(b)–(c)：領域 A（名護湾），(d)–(e)：領域 B（慶次湾を含む本島北東沿岸）からの放流，(b), (d)：浅海域放流 ($z = -2m$)，(c), (e)：MPZ 放流 ($z = -30m$)．

子交換が生じ得ることが確認される．海表面で上方輸送が阻害されるため，暖色系の高い PDF 値は表層付近に集中する傾向があり， 10^2 以上になるのは浅海域放流の場合は水深約 30 m，MPZ 放流では約 50 m より上である．

鉛直輸送に対しては表層混合層の影響を受ける⁹⁾ことが予想されるが，対象海域の混合層深さ H_{mls} を見ると（図-5a），沖合では平均で 20～30 m 程度，標準偏差を考慮すると水面下数 m～40 m 程度である．特に水深 30 m 以浅の沿岸域では，海底境界層の影響を受けるため H_{mls} は 10 m 程度にまで制限される（空間平均値は約 22 m）．浅海サンゴは H_{mls} 以浅，MPZ サンゴは H_{mls} の下限付近から放流されるので，前者は混合層内で鉛直輸送が促進されて下方へも輸送される一方で，混合層以深への輸送は制限される．後者の場合は，放流直後は混合層の影響は相対的に弱いものの，水平輸送により浅海域へ移流されるなど時間の経過とともに粒子が混合層に到達し，その後は速やかに上方輸送される様子が見て取れる．

領域 A・B の PDF 分布を比較すると，浅海域・MPZ 放流の両ケースにおいて領域 A の方が鉛直下方への分散傾向が強く，領域 B では PDF 分布が時間の経過とともにより表層に偏っていく．これは本島東海岸（領域 B）の方が H_{mls} が浅いために表層の保持力（retention）が相対的に強化されることが主たる原因であり，加えて，岸沖流動を中心とした水平輸送パターン之差によって浅海域への粒子の集積のしやすさが異なるためと考えられる．いずれにしても，本研究では，既往研究を参考に MPZ サンゴの産卵は調査海域での大規模産卵期の 5～6 月に水深 30 m で生じると設定したが，これが同時期の表層混合層深さと概ね一致することにより，浅海域—MPZ 間の

鉛直コネクティビティが強化されたものと考察される．つまり，混合層は浅海（MPZ）サンゴ浮遊幼生の下方（上方）への輸送を妨ぐバリアであると同時に，幼生を表層付近に集積させて表層付近での retention を促進するという 2 つの役割を担っていると解釈される．そのため，例えばもし混合層深さがより浅い夏季に放卵が生じるとすれば，混合層のバリアとしての役割が卓越して鉛直コネクティビティは弱化するものと推察される．

(3) 瀬底島周辺海域でのコネクティビティ

沖縄本島北西部の瀬底島周辺海域（図-1b, 6a-b）では MPZ サンゴの分布が確認され⁸⁾，各種調査が行われている⁹⁾という点で，琉球諸島の中では希少な MPZ サンゴの研究対象海域である．ここではまず，瀬底海域の MPZ から放流された浮遊幼生が同じ海域内に漂着する（self recruitment）割合を評価するために，全 MPZ 放出粒子数に対する瀬底海域漂着サイトへの現地漂着率（local settlement）を求めた（図-6c）．瀬底 MPZ 起源幼生の現地漂着率は移流時間の経過とともに減少するが， $\tau = 30$ 日でも浅海域へ約 12%，MPZ には 10% 程度の幼生が漂着し得ることが示されており，ローカルな幼生加入が比較的高い確率で生じていることが確認できる．

次に， $\tau = 14$ 日における瀬底島海域の MPZ へ漂着する幼生の source 強度 S_i と，瀬底 MPZ から放流される幼生の destination 強度 D_j を評価した（図-7）．まず source 強度 S_i の分布を見ると（図-7a-b），瀬底 MPZ サンゴ生態系に対する主な幼生供給源は，瀬底島海域（すなわち self recruitment）と本島西海岸南部（名護湾，宜野湾など）の浅海域と MPZ の両方であることが分かる．また，

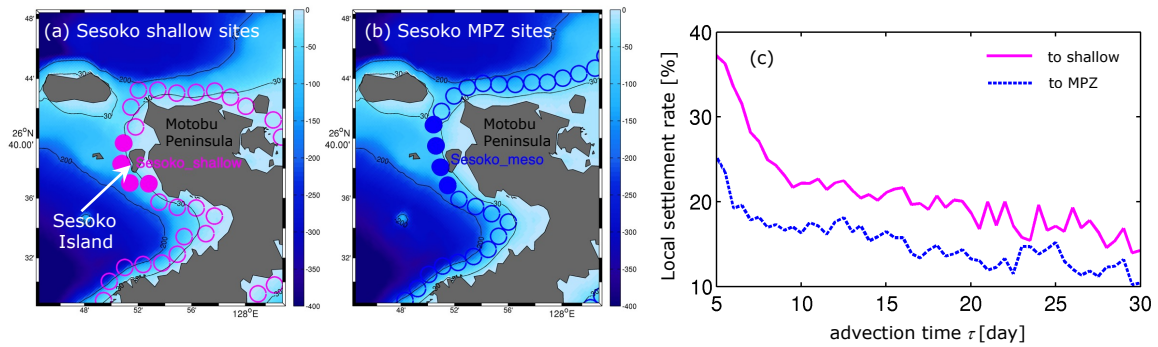


図-6: (a) 瀬底島周辺の浅海域放流・漂着サイト分布 (マゼンダに塗られた4つの円形サイト), (b) 同じく MPZ 放流・漂着サイト (青に塗られた4サイト) 分布. 背景カラー: 水深 (m), 黒コンター線: 水深 30 m, 200 m の等水深線. (c) 瀬底島 MPZ 放流サイトの水深 30 m から放流された MPZ サンゴ浮遊幼生が同海域の浅海域に漂着する現地漂着率 (マゼンダ実線) および MPZ に漂着する現地漂着率 (青点線). 現地漂着率は全瀬底放流サイトからの全放流粒子数に対する割合 (%) .

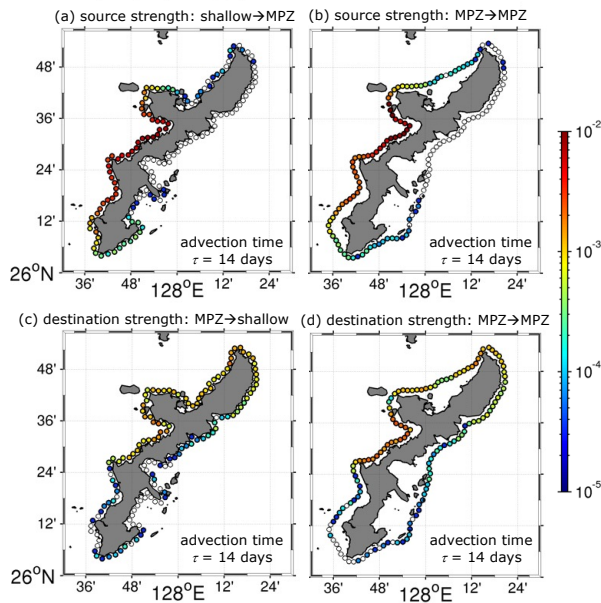


図-7: (a)-(b) 瀬底島海域 MPZ への (a) 浅海域および (b) MPZ 起源サンゴ浮遊幼生の source 強度 S_i 分布. (c)-(d) 瀬底島海域 MPZ からの (c) 浅海域および (d) MPZ 漂着サイトへの destination 強度 D_j 分布. 移流時間はいずれも $\tau=14$ 日である.

destination 強度 D_j の分布を見ると (図-7c-d), 瀬底 MPZ サンゴは瀬底島海域 (自己増殖) と本島西海岸の北部および辺戸岬を超えた東海岸北部の浅海域と MPZ の両方へ幼生を供給している. これらの MPZ サンゴ生態系ネットワーク構造は, 本島西海岸沿岸での北上流, 辺戸岬での強い東向き残差流, 東海岸沿岸での南下流によって構成される本島を周回する時計回り還流 (図-3) の影響を受けて形成されたものであることは明白である. 以上のことから, 瀬底島周辺海域では, 平均流動パターンに対応した浮遊幼生の周辺海域 (名護湾など) からの加入および高い現地漂着率に伴う強い局所的な retention による self recruitment によって MPZ サンゴ生態系が維持されていること, さらに瀬底島海域 MPZ サンゴは沖縄本島北部の浅海・MPZ サンゴ生態系への浮遊幼生供給源にな

っていることが示された.

4. おわりに

沖縄本島周辺では移流時間の経過とともに粒子 (仮想サンゴ浮遊幼生) が広域分散していくが, 閉鎖度の低い名護湾などを除き, 金武湾や中城湾などの半閉鎖海域では放流域近傍に捕捉される粒子 (self recruitment) の割合が高い. 本島北端で生じる強い残差流を伴う本島を周回する時計回り還流の影響を受けて沖縄本島東岸と西岸の C_{ij} は非対称性となり, 東岸域→西岸域のコンネクティビティ C_{ij} はその逆の西岸域→東岸域の C_{ij} よりも大きく, より強固な生態系リンクが形成される. 一方, 鉛直 C_{ij} 解析からは浅海域と MPZ は互いに重要な幼生供給源として機能していることが示された. 粒子の鉛直輸送は表層約 30 m 以浅に形成される季節的な混合層深さ H_{mix} の影響を受け, 水深 2 m から放流された粒子 (浅海域サンゴ浮遊幼生) は H_{mix} 以深への輸送が制限される一方で, 水深 30 m から放流される MPZ サンゴ浮遊幼生は H_{mix} 近傍から放流されるため, 表層混合層に捕捉されて表層にも多く輸送される傾向にあった. さらに, MPZ サンゴ生態系が形成されている瀬底島海域では, 局所的な C_{ij} (self-recruitment) が卓越するものの, 北部海域への幼生ソース, また南部海域から放流された幼生のシンクとしても機能し, 周囲の MPZ・浅海サンゴ礁保全に重要な役割を果たしていることが分かった.

謝辞: 本研究は科学研究費 (18H03798) の援助を受けた.

REFERENCES

- 1) Kayanne, H., Suzuki, R., and Liu, G.: Bleaching in the Ryukyu Islands in 2016 and associated degree heating week threshold. *Galaxea, J. Coral Reef Studies*, Vol. 19, pp. 17–18, 2017.

- 2) Van Woerk, R., Sakai, K., Ganase, A., and Loya, Y. J. M. E. P. S.: Re-visiting the winners and the losers a decade after coral bleaching. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 434, pp. 67–76, 2011.
- 3) 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, Issue 12, pp. 9245–9265, 2018.
- 4) Takeda, N., Kashima, M., Odani, S., Uchiyama, Y., Kamidaira, Y. and Mitarai, S.: Identification of coral spawn source areas around Sekisei Lagoon for recovery and poleward habitat migration by using a particle - tracking model, *Sci. Rep.*, Vol. 11, 6963, 2021.
- 5) 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.*, Vol. 10, 1174940, 14 pp., 2023.
- 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 Eng.)*, 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., Kamidaira, Y.: 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 Eng.)*, Vol. 74, No. 2, pp. I_1291 -I_1296, 2018.]
- 8) Sinniger, F., Morita, M. and Harii, S.: “Locally extinct” coral species *Seriatopora hystrix* found at upper mesophotic depths in Okinawa. *Coral Reefs*, Vol. 32, pp. 153–153, 2013.
- 9) Sinniger, F. and Harii, S.: Studies on mesophotic coral ecosystems in Japan. In: *Coral Reef Studies of Japan*, Springer, Singapore, pp. 149–162, 2018.

(Received March 16, 2023)

(Accepted July 20, 2023)

COASTAL DISPERSAL OF CORAL LARVAE AND ASSOCIATED 3-D CONNECTIVITY IN THE REEF AREAS AROUND OKINAWA ISLAND, JAPAN

Kimika TAKEYASU, Yusuke UCHIYAMA and Satoshi MITARAI

While coral bleaching has been progressing worldwide in recent years, an extensive bleaching event occurred in 2016 around the Ryukyu Islands. Coral ecosystems inhabiting in the mesophotic zone (MPZ) at intermediate depths of 30 m–150 m, where water temperature is more stable and colder than that in the shallow-water zone (SWZ), are expected to serve as refuges for coral genotypes in the SWZ that has suffered from pronounced bleaching due primarily to high water temperature. However, the structure of the ecosystem linkage between the SWZ and the MPZ is still poorly understood. Therefore, we conducted a numerical analysis using a triple nested high-resolution ocean circulation model coupled with an offline 3-D Lagrangian particle tracking model that represents coral larval dispersal to evaluate population connectivity between the SWZ and the MPZ, to identify the relationship between vertical mixing effects in surface mixed layer during the larval spawning period, and to examine the larval recruitment and their supply near the Sesoko Island at the west coast of Okinawa Island, where mesohotic corals have been observed.