

沖縄本島南西海域におけるサンゴ幼生広域供給過程に関する研究

灘岡和夫* ・波利井佐紀** ・鈴木庸彦*** ・田村 仁****

三井 順*** ・Enrico Paringit***** ・松岡建志***** ・児島正一郎*****

佐藤健治***** ・藤井智史***** ・池間健晴*****

大部分のサンゴが死滅したサンゴ礁の回復を促進させるには、比較的被度の高い他海域からのサンゴ幼生供給が重要となる。本研究では、GPS 搭載型小型漂流ブイや HF レーダによる広域表層流動場の解明とともに、沖縄本島南西海域 21 地点においてプランクトンネットを用いた多点広域サンプリングを行い、実際にどの程度の範囲にどれだけの量のサンゴ幼生が供給されているか、といった広域供給の実態の解明を試みた。その結果、サンゴ幼生が慶良間列島から沖縄本島西岸域へ広域分散し、実際に供給されていること、また、サンゴ幼生がその供給源である慶良間列島内に滞留・回帰し、定着する可能性があることが示された。

1. はじめに

1998 年の大規模な白化現象は、世界中のサンゴに観測史上最大の被害を与え (Wilkinson, 1998), 沖縄・琉球列島でも沖縄本島本部町瀬で 90% のサンゴが白化するなど壊滅的なダメージを与えた (Yamazato, 1998; 谷口ら, 2000)。今後、地球温暖化などの影響でサンゴ礁が被害を受ける頻度が高まる可能性があることから、被害を受けたサンゴ礁の回復を促進させることが必要となり、それには比較的被度の高い他の海域からのサンゴ幼生の供給が重要となる。また、そのような供給源となりうる海域を特定することができれば、保護すべき対象が明確となり、今後のサンゴ礁保全を進めていく上で、保全戦略上の指針を得ることができる。

造礁サンゴは有性生殖と無性生殖で増殖し、有性生殖では、卵と精子が放出され、受精しプラナラ幼生となる。卵や精子は、脂質を含むため水面に浮上し、時にスリックという集合体を形成し、風や海水流動の影響を受けて分散する。一方で、プラナラ幼生は、自らも遊泳能力を持っており、受精後数日経過すると海底へ移動し、定着場所を探して、定着する。このように、サンゴ幼生の供給過程は、物理的要因と生物的要因が合さって決定されていると考えられ、両方の影響を考える必要がある。

琉球列島では、沖縄本島南西約 40 km に位置する慶良間列島が、1998 年の白化により被害のあった沖縄本島のサンゴ幼生供給源の一つとして考えられている (図-1)。

* フェロー	工 博	東京工業大学教授	大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
**	博(理)	東京工業大学助手	大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
***		東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程	
****	学生会員	修(工)	東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程
*****		日本学術振興会外国人特別研究員, 東京工業大学准客員研究員	
*****		通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター	
*****		亜熱帯総合研究所	



図-1 沖縄本島周辺水深コンター図

木村ら (1992) は漂流はがき調査を行い、慶良間列島内のスリックに放流したはがきの一部が、沖縄本島西岸に漂着したことを報告した。その後、著者ら (2001, 2002) は、HF レーダや漂流ブイを用いて現地観測を行い、広域表層流動場、幼生供給過程の経路と時間を調査した。その結果、慶良間列島に投入した漂流ブイは 4～5 日で沖縄本島西岸に到着し、サンゴ幼生の輸送経路と輸送に要する時間を把握することができた。一方、室内実験において、サンゴ幼生の探索・定着能力の変化を調べた結果、探索行動のピークは、受精後 4 日頃にみられた。これらより、沖縄本島西岸までに輸送に要する時間とサンゴ幼生の探索行動率がピークとなる時期がほぼ一致し、時間的な整合性が取れていることから、慶良間列島から沖縄本島へ幼生が供給される可能性が示された。しかし、サンゴ幼生の輸送供給が空間的にどの程度の範囲であるのかは不明であり、その量の把握も課題として残されている。

本研究では、サンゴ一斉産卵後のサンゴ幼生の時空間的な広域分散過程を具体的に明らかにするべく、広域多点・多時点でのサンゴ幼生採取調査を実施した。サンゴ幼生の広域での時空間分布を把握するために、沖縄本島

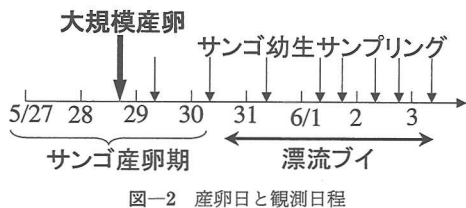


図-2 産卵日と観測日程

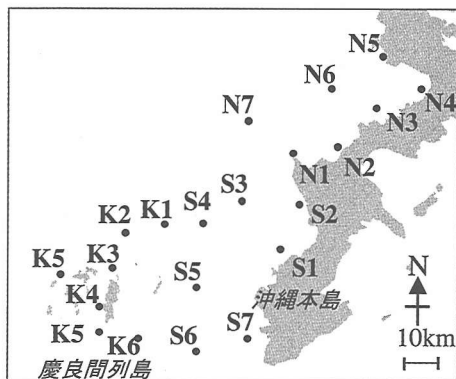


図-3 サンゴ幼生のサンプリングポイント

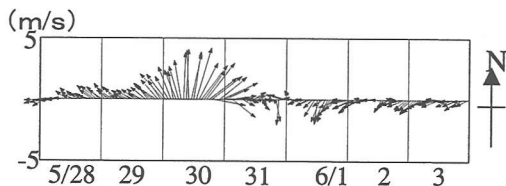


図-4 観測期間中の風向風速 (2002, 阿嘉島中岳)

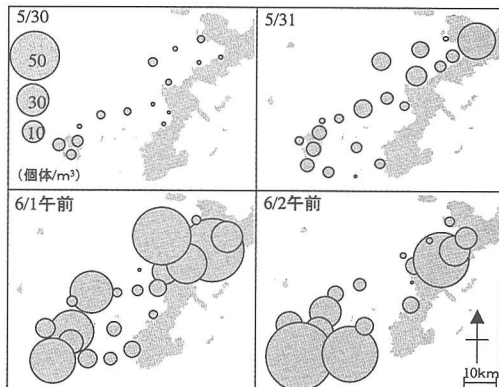


図-5 サンゴ幼生分布の時系列変化 (水平曳き)

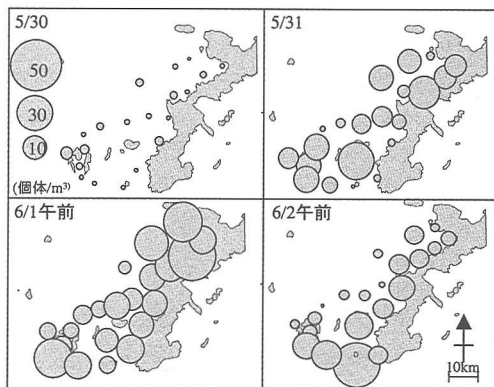


図-6 サンゴ幼生分布の時系列変化 (鉛直曳き)

南海海域の多地点においてプランクトンネットを用いたサンゴ幼生のサンプリングを行った。また、前回観測(灘岡ら, 2002)と同様に, サンゴ幼生の輸送経路を把握するために, GPS搭載型小型漂流ブイによる表層粒子のラグランジュ的追跡調査を行うとともに, 短波海洋レーダ(HFレーダ)を用いて広域表層流動場観測を行った。

2. 現地観測概要

(1) プランクトンネットによる多点広域サンプリング

サンゴ一斉産卵後のサンゴ幼生の時空間的な広域分散過程を把握するための, サンゴ幼生の広域多点・多時点サンプリングを行った。慶良間列島でのサンゴの産卵は, 2002年5月27日から5月30日に確認された。サンプリングは, 特に産卵の規模の大きかった5月28日夜の一斉産卵の翌日5月29日から6月3日に実施し, 合計約800本のサンプルを採集した(図-2)。サンプリングは慶良間列島内・周辺を含む沖縄南海域に設定した21の固定

点で行った(図-3)。サンプリングには改良型ノルパックネット(口径45cm, 目合い100 μ m)を用い, 各地点で船上から鉛直曳き3回, 水平曳き1回を行った。鉛直曳きは, 船を止めプランクトンネットを水深30mから曳き上げた。水平曳きは, 船を約1knotで走らせ水面下を3分間曳いた。採集した幼生は, 船上で5%ホルマリンを用いて固定し, サンプル瓶に保存して実験室に持ち帰り, 個体数を数えた(大森・池田, 1979)。

(2) 漂流ブイによる表層粒子のラグランジュ的追跡調査

2002年5月30日から6月3日にかけて, GPS搭載型小型漂流ブイ(以下, 漂流ブイ)を慶良間列島内に9個投入し, 表層粒子(サンゴ幼生)のラグランジュ的追跡調査を行った(図-2)。ブイを投入したのは5月30日午前10時頃から午後2時頃までの時間帯である。前回調査では, サンゴ一斉産卵の翌日にスリックが何カ所かで観察され, 多くの漂流ブイをスリック内もしくはごく近辺に投入したが, 前回調査でのブイ投入時に比べて今回は海象条件がやや荒くスリックが形成されなかったため,

慶良間列島内の海域の代表的な点をいくつか選んで漂流ブイを投入した。なお、漂流ブイの詳細については、灘岡ら (2002) を参照されたい。

(3) 短波海洋レーダによる広域表層流動場観測

サンゴ幼生の広域供給輸送を支配する沖縄本島南西海域での表層流動場を、広域かつ長期間にわたって把握するために短波海洋レーダ (HF レーダ) による広域表層流動場観測を行った。観測期間は、漂流ブイ観測期間を含む 5 月 23 日から 7 月 1 日までとした。データは基地局から島影にならない慶良間列島北側および東側の海域で良好に得られた。また、サンゴ幼生サンプリング期間中、風は 5 m/s 以下であり、水表面での吹送流が風速の 3 % 程度であることを考慮すると、この期間の表層流動場への風の影響は小さかったものと考えられる (図-4)。

3. 観測結果および考察

(1) サンゴ幼生広域分散過程

鉛直曳き・水平曳きサンプリングによって得られた幼生密度の時系列変化をそれぞれ図-5, 6 に示す。鉛直曳きは 3 回行った結果の平均である。これからわかるように、サンゴ幼生数の体積密度は時空間的に大きく変化し、5 月 31 日以降次第に増加して、鉛直曳き・水平曳きともに 6 月 1 日午後に最も多く採集され (鉛直曳き: 地点

S6, 最大 44.8 個体/m³, 水平曳き: 地点 S6, 最大 99.7 個体/m³)、その後減少した。空間的には、沖縄本島中西部から南西部の沿岸域にかけての広い海域にサンゴ幼生が分散していることがわかる。これらのことは、サンゴ幼生が、沖縄本島西岸海域全体に広域的に分散・供給されていることを実証するものである。

(2) 漂流ブイの輸送経路

無事回収でき軌跡データが得られた 8 個の漂流ブイのうち、4 個は慶良間列島内に滞留した。一方、慶良間列島から離れた 4 個のうち、3 個が東に向かい約 24 時間後に沖縄本島沿岸に到達した。その後、沖縄本島沿岸の漂流ブイは南西に進み、慶良間列島方向に回帰した (図-7)。両方の場合とも、慶良間列島付近に戻るまでの期間が約 4 日間であり、サンゴ幼生の探索行動がピークとなる期間 (灘岡ら, 2002) と一致した。このことから、慶良間列島からの幼生が、慶良間列島内に滞留しそのまま定着するか、慶良間列島からいったん離れたのち回帰することによって慶良間列島内に定着する (self-seeding) 可能性が示された。これは、慶良間列島内で生まれたサンゴ幼生が、慶良間列島自体のサンゴ礁の維持にも貢献し得ることを示すものである。

2001 年の著者ら (灘岡ら, 2002) による調査では、慶良間列島内のスリック内・近辺に投入した 8 個の漂流ブ

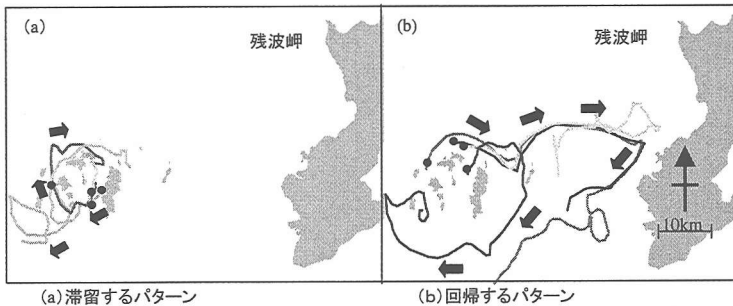


図-7 2002 年観測・漂流ブイ軌跡 (●は投入位置)

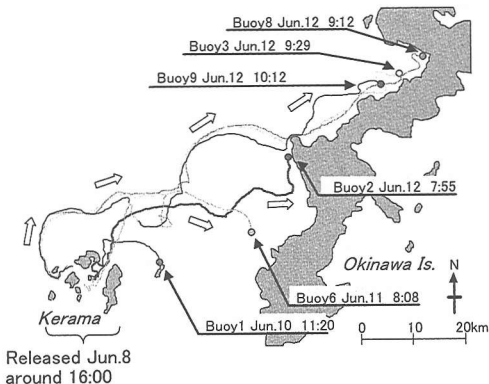


図-8 2001 年観測・漂流ブイ軌跡

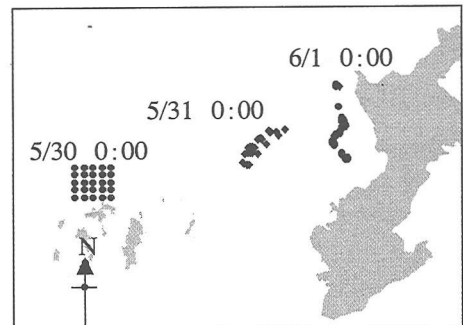


図-9 粒子追跡計算

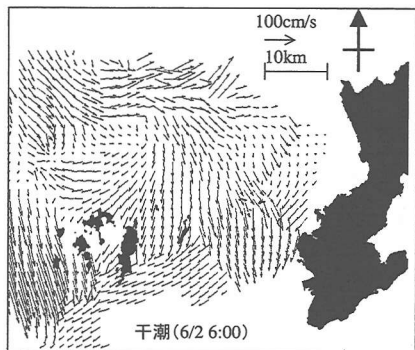


図-10 干潮時の代表的な表層流動場

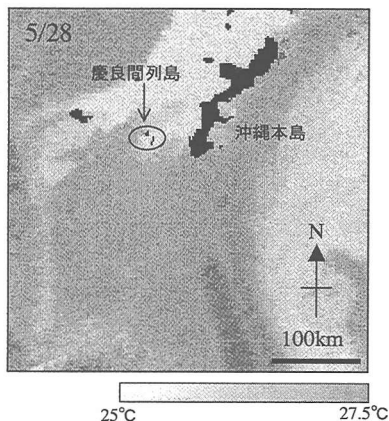


図-12 NOAAによる表層水温

イのうち3個が残波岬より北側の沿岸海域に輸送された(図-8)。慶良間列島内およびその周辺の海水流動分布は非常に複雑で時間的にも大きく変動するため、漂流ブイ投入の僅かな時空間的相違によって、その後の輸送経路は大きく異なるものと考えられる。前述のように、今回の調査ではサンゴ産卵の翌日にスリックが形成されなかったため、慶良間列島内の海域の代表的な位置をいくつか選び、5月30日の午前10頃から午後2時頃までの時間帯に漂流ブイを投入した。このことから、今回の漂流ブイによるサンゴ幼生の追跡には初期位置・時間による不確実性が残った。そこで、今回の調査で得られたHFレーダによる表層流速データを用い表層粒子追跡計算を行ってみた。計算としては、理想的にはブイ投入前夜のサンゴ産卵時間帯(5月29日午後9時から10時頃)に慶良間列島内の海域から表層粒子追跡計算を開始するのがよいが、慶良間列島内は島影になるためHFレーダのデータはほとんど得られていない。そこで、このサンゴ産卵とそれ以降の数時間が北向き潮流が卓越する時間帯であったことから、サンゴ産卵の数時間後にはある程度のサンゴ卵・幼生が慶良間列島の北側の海域に抜けてい

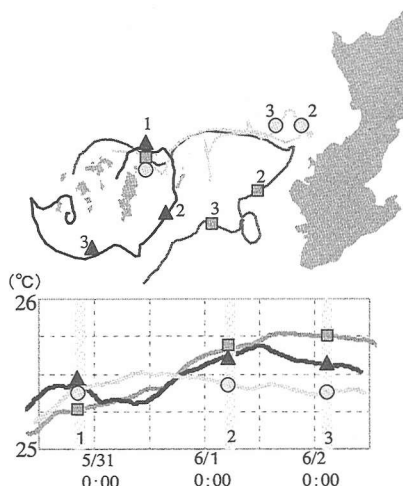
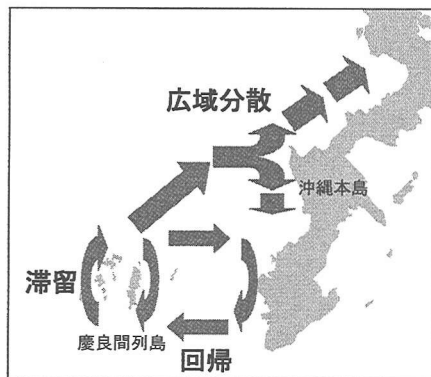
図-11 漂流ブイ周辺での表層水温
(24 時間移動平均)

図-13 サンゴ幼生供給過程概念図

たものと仮定し、5月30日0:00を粒子追跡の初期時刻とし、慶良間列島北側海域に表層粒子をおいてその後の粒子追跡を行った。計算の結果、図-9に示すように、表層粒子が、今回の漂流ブイの軌跡よりも前回調査の場合(図-8)に近い、より北側のルートをとることがわかった。粒子追跡の範囲がHFレーダの計測範囲に限られるため、さらに先の軌跡については計算できないが、漂流ブイの投入時刻や場所のわずかな違いによって、輸送ルートが前回調査の輸送ルートに近づく形で北側にシフトすることが示されたことから、今回も残波岬より北側の沿岸域に漂流ブイ(したがってサンゴ幼生)が輸送された可能性が高いものと推測される。このことは、多点広域幼生サンプリングの結果とも整合している。

(3) 表層流動場とサンゴ幼生分散

HFレーダの結果から、慶良間列島周辺の広域表層流動場が明らかになり、幼生分散と流れ場の関係を一部把握することができた。この海域では、慶良間列島北側の

深海域において東向きの流れが特徴的で、黒潮分枝流の影響が指摘されている(灘岡ら, 2002)。今回の観測でも、最大流速 60 cm/s 以上の東向きの流れが存在し、その流れに乗って漂流ブイが約 24 時間で沖縄本島に到達した。

一方、200 m 以浅の陸棚では潮汐の効果が顕著になり、満潮時に北、干潮時に南に流れが卓越する傾向があるが、沖縄本島沿岸に接近した漂流ブイが南西に大きく方向を変えたのは、この干潮時の潮流と考えられる最大 80 cm/s 以上の南西向きの流れによるものと推測される(図-10)。サンゴ幼生数の密度分布をみると、6/2 午前には調査海域南部(地点 S6, K7)に多くの幼生が出現しており、この南向きの流れによって幼生が分散したものと判断できる。また、この海域で採集された幼生のほとんどが鉛直曳きによるものであった。このことは、サンゴ産卵後の一定期間、サンゴ幼生が海表面付近に浮遊する形で輸送され、その後、海洋表層の鉛直混合やサンゴ幼生の探索行動によって鉛直方向に分散したことを示すものと推察できる。

漂流ブイの移動に伴う海洋表面付近の水温の変化を知るために、漂流ブイに取り付けたメモリー式小型水温計(StowAway Tidbit, Onset Computer Corporation 製)のデータを解析した。その結果、慶良間列島を含む沖縄本島南西に位置する陸棚域において、その北側の海域を漂流ブイが移動する期間では水温に大きな変化がなかったのに対して、南側の海域で水温が約 0.5°C 上昇していることがわかった(図-11)。一方、NOAA の衛星画像による海表面水温分布からも、南方から暖水塊が流れ込んできている様子が確認された(図-12)。これらから、南方からの暖水塊が陸棚域南側海域の流れに影響を与えている可能性が示唆された。

4. 結 論

本研究から、以下の結論が得られた。

- 1) 広域多点・多時点サンゴ幼生サンプリングを行うことにより、慶良間列島で生まれたサンゴ幼生が、沖縄本島西岸海域全体に広域的に分散・供給されていることを実証するデータを得た。
- 2) サンゴ幼生の供給過程として、慶良間列島から沖縄本島西岸域に広域に供給することに加えて、供給源である慶良間列島内に滞留・回帰する(self-seeding)というパターンがあることが分かった。

- 3) 表層海水流動とサンゴ幼生分散の関係を具体的に把握することができた。

本研究は、CREO (Coral Reef Environments in Okinawa) プロジェクトの一環として行われた。本論文では具体的に示していないが、同プロジェクトにおいて酒井ら(琉球大学)は、慶良間列島と沖縄本島西岸に幼生定着基盤を設置し、自然に加入したサンゴ幼生をサンゴ群集構造とともに記録している。このデータと本研究の結果を照合することで、サンゴ幼生供給の定量的な議論を進める予定である。また、より長い時間スケールでの供給・加入関係を明らかにするための集団遺伝学的解析を行うとともに、慶良間周辺の複雑な地形効果や黒潮影響等を考慮した数値モデルの開発を行い、それによって八重山諸島などより遠方のサンゴ礁海域とのリーフ・コネクションについても可能性を具体的に検討していく予定である。

なお、本研究は、亜熱帯総合研究所・内閣府調査研究事業「サンゴ礁に関する調査研究」による受託研究費および科学研究費補助金基盤研究 A (1) (一般) (研究代表者: 灘岡, 課題番号: 14205071) を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 大森 信・池田 勉 (1979): 動物プランクトン生態研究法, 生態学研究講座 5, 共立出版株式会社。
- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 (1992): 漂流はがき実験報告, みどりいし, No. 3, pp. 18-21.
- 谷口洋基・岩尾研二・大森 信 (2000): 慶良間諸島阿嘉島周辺の造礁サンゴの白化, 1998 年 9 月の調査結果, 日本サンゴ礁学会, *Galaxea*, Vol 1, pp. 73-82.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・花田 岳・藤井智史・佐藤健治・鹿熊信一郎・岩尾研二・若木研水 (2001): HF レーダ・漂流ブイ観測と数値シミュレーションによるサンゴ幼生の広域輸送過程, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 431-435.
- 灘岡和夫・波利井佐紀・三井 順・花田 岳・Enrico Paringit・二瓶泰雄・藤井智史・佐藤健治・松岡建志・鹿熊信一郎・池間健晴・岩尾研二・高橋孝昭 (2002): 小型漂流ブイ観測および幼生定着実験によるリーフ間広域サンゴ幼生供給過程の解明, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 366-370.
- Wilkinson C. (1998): The 1997-1998 mass bleaching event around the world. In C. Wilkinson, ed. Status of coral reefs of the world: 1998. Aust. Inst. Mar. Sci., Townsville, Ophelia, Australia, pp. 15-38.
- Yamazato (1998): Coral bleaching in Okinawa, 1980 vs 1998, *Galaxea*, JCRS, Vol. 1, pp. 83-87.