

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解析

灘岡 和 夫* ・二 瓶 泰 雄** ・花 田 岳***
藤 井 智 史**** ・佐 藤 健 治**** ・池 間 健 晴*****
鹿熊信一郎***** ・岩 尾 研 二***** ・若 木 研 水***

1. はじめに

1998 年に世界規模で生じたサンゴ白化・死滅現象は、沖縄でも大規模に発生しており、リーフによっては、サンゴのほとんどが白化・死滅する場合も見られた。このような白化ダメージが顕著であったサンゴ礁では、外部からのサンゴ幼生の新規加入 (recruitment) が必要となるが、今回のように、周辺のサンゴ礁も含めて大規模にダメージを受けた場合には、当該海域から遠く離れた比較的ダメージの低いサンゴ礁海域からのサンゴ幼生供給が重要になってくる。そしてそのようなサンゴ幼生のソースエリアが同定できれば、そのような海域を重点的に保全することにより、今後のサンゴ礁の回復過程をより確実なものにすることが可能になる。しかし、実際にそのようなソースエリアとサンゴ幼生供給経路を同定するためには、広域的な表層海水流動構造の実態を明らかにする必要がある。これに関して、例えば、木村ら(1992)は、漂流はがき調査によって、サンゴ供給源としての可能性が以前から指摘されている沖縄本島西方海域に位置する慶良間諸島から放流された漂流はがきの一部が沖縄本島の本部半島などに漂着したことを報告し、慶良間諸島がサンゴ幼生の供給源になり得ることを示している。しかし、その具体的な供給経路は漂流はがき調査では不明であるし、サンゴ幼生の生物的な時間サイクルの観点から重要となる、どの程度の時間を要して他のリーフ海域まで輸送されるか、という情報も得ることができない。

本研究では、このような背景のもとに、慶良間諸島を含む沖縄本島西南海域を対象として、漂流ブイや HF レーダなどを用いた現地観測を行うことによってこの海域の表層海水流動特性を把握することを試みた。また、数値流動シミュレーションと観測結果を比較すること

で、海水流動の各構成要因、特に海流の寄与を検討した。

2. 観測の概要

サンゴ幼生広域輸送過程の解明には、対象海域におけるサンゴ幼生の広域ラグランジュ輸送過程を把握するとともに、それを支配している対象海域の広域表層流動特性を把握することが重要となる。そこで本研究では、サンゴ浮遊幼生の広域ラグランジュ輸送特性を把握するための GPS 搭載型漂流ブイを用いた観測と、広域表層流動特性を把握するための HF レーダを用いた広域表層流速観測を行った。なお、これらに関する既存の関連研究としては、Great Barrier Reef におけるサンゴ卵輸送に関連して漂流ブイ観測を行った Wolanski et al. (1989) の試みや、サンゴ幼生ではないが California や Florida 沿岸での種々の幼生の輸送を HF レーダによる広域表層流動観測の結果から検討している Bjorkstedt & Roughgarden (1997) や Graber & Limouzy-Paris (1997) の例がある。

図-1 に、HF レーダの計測領域を含む観測海域周辺の地形図を示す。これからわかるように、観測海域周辺は、沖縄本島から慶良間諸島、久米島にかけて水深 100 m から 200 m の陸棚が広がっている。陸棚周辺は急勾配部を経て水深 1000 m 級の深海域につながっている。

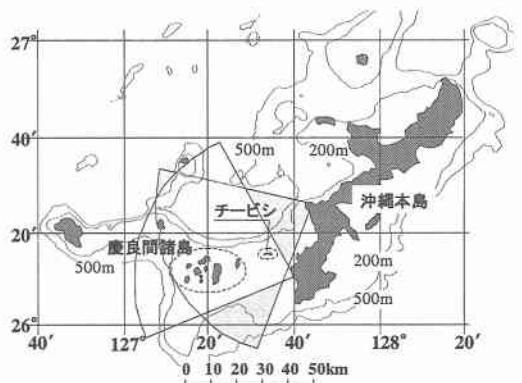


図-1 沖縄南西海域の海底地形と HF レーダ観測領域

* 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
** 正 会 員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科
*** 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
**** 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
***** 沖縄県水産試験場
***** 阿嘉島臨海研究所

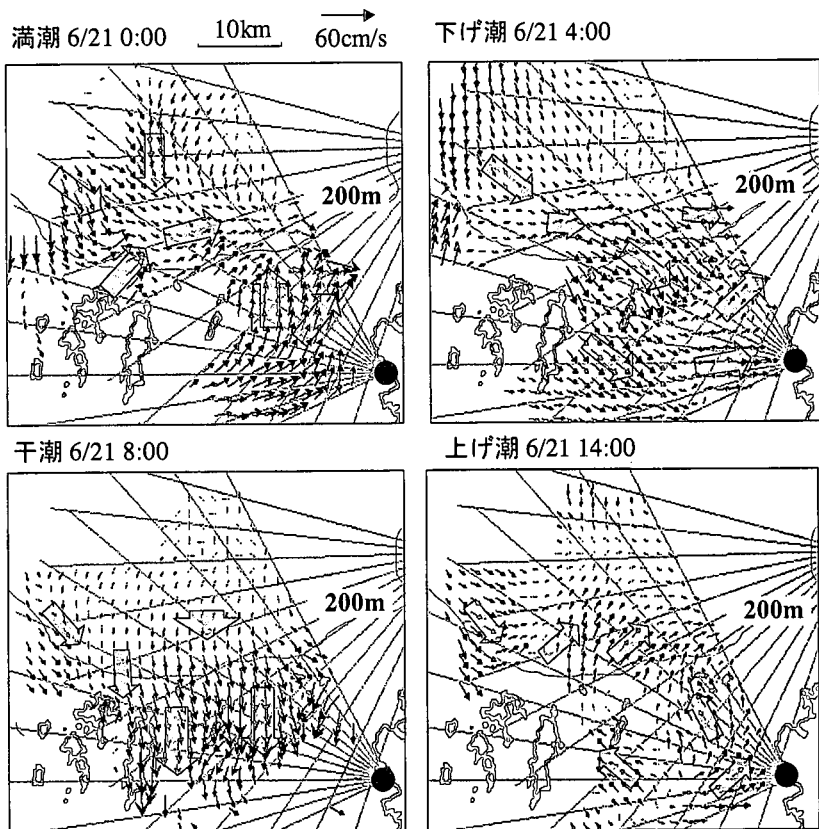


図-2 一潮汐間の典型的な流動特性

2.1 漂流ブイ観測

慶良間諸島・チービシ周辺を対象海域とし、複数のGPS搭載型漂流ブイを用いて1999年5月31日～6月3日、7月5日～7月9日において衛星経由でブイの追跡観測を行った。このうち5月31日～6月3日の観測では、5月31日頃に対象海域においてサングの一斉産卵が確認されている。漂流ブイの抵抗体 (drogue) の取り付け水深は約1.0mとした。

2.2 HFレーダ観測

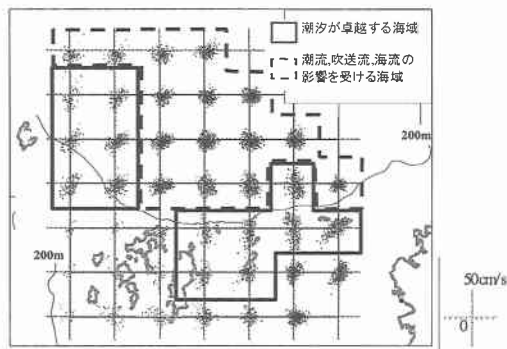
HFレーダによる計測領域は、読谷村楚辺と豊見城村与根の二箇所に設置したHFレーダから発射される電波の重なる沖縄南海域 (図-1) である。空間分解能はレンジ方向に1.5kmで、アジマス方向にビームを7.5度間隔でスキャンさせて12のビーム方向で計測した。各ビーム方向では10分間平均の信号が得られる。したがって、各点の観測データは2時間ごとに得られることになる。観測期間は、漂流ブイ観測を含む5月25日～7月8日の約1.5ヶ月である。データはビームに対し島陰にならない慶良間諸島の北側と東側において良好に得られた。

3. 解析結果と考察

3.1 HFレーダ観測結果

HFレーダによる広域表層流速観測の結果を示す。図-2は、典型的な一潮汐間における表層流速分布の計測例を示したものである。これにも示されているように、慶良間諸島の東側の陸棚域では満潮時には北向き、干潮時には南向きの速い流れが卓越している。慶良間諸島北側の水深200m位深の海域では、観測期間を通じて潮流変動に対応した南北方向の流速変動が見られたが、大きさは陸棚域に比べると微弱で、逆に、主として東方に向かう一方向流的な流動パターンがしばしば観測された。

図-3は、HFレーダから得られる各グリッドポイントでの全観測期間における流速データの u - v プロットを示したものである。場所によって流速データのプロット数が違うのはデータの欠損によるものである。この図を見ると、陸棚域では潮流変動に対応すると考えられる明確な方向性が現れているのに対し、陸棚北側の深海域では流速変動に明確な方向性がなくなっていることがわかる。また、観測期間中、図-4に見られるように南風が卓越していたのに対し、この陸棚域北側の深海域では、

図-3 HFレーダによる表層流速の $u-v$ プロット

$u-v$ プロット点が全体的に東に偏った形になっている。このことは、この領域において、主として東向きの海流の影響が現れていたことを示唆するものである。

3.2 漂流ブイ観測結果

図-5 に、漂流ブイ観測の結果を示す。5月31日に放流した No. 1 ブイは、慶良間諸島内部において約1日半にわたり南北方向に往復運動を繰り返し、慶良間諸島の西側に出た後、速い速度で一方向的に慶良間諸島の北側に流されその後大きく東に流されている。6月2日に放流した No. 2 ブイは、約半日にわたり南北に往復運動し、No. 1 ブイと同様に慶良間諸島の北側に流されている。

ここでは、大きく東に流された No. 1 ブイの駆動要因を詳細に検討するため、各時間におけるブイのラグランジュ流速ベクトルと潮汐、風、漂流ブイに取り付けた水温計の時間変動を比較した結果を図-6 に示す。ここで、ブイの挙動の特徴から、5月31日12:00～6月1日16:00までを Period 1、6月1日16:00から6月2日5:00までを Period 2、6月2日5:00から6月3日0:00までを Period 3 として以下の検討を行った。

Period 1 では、ブイ挙動と潮汐との相関が高く、ブイ

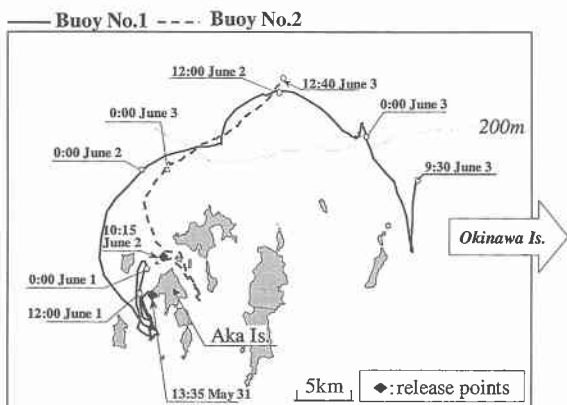


図-5 漂流ブイの軌跡 (5/31~6/3)

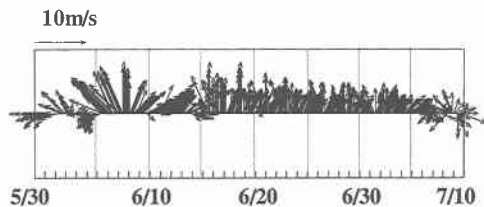


図-4 観測期間中の風速ベクトル

2も同様の特徴を示していることから考えて、水深の浅いこの海域では主に潮流によって流動が規定されていたものと考えられる。Period 2 では、風が東風から約6 m/s ほどの相対的に強い南東の風になっており、この影響によって No. 1 ブイがまず慶良間諸島の西側に輸送されたものと考えられる。その後、慶良間諸島の北側に速い速度で一方向的に大きく輸送されているが、図-7(a)に示した HF レーダから得た表層流速のホドグラフにおいて、Period 1 の期間に、風が微弱であったにもかかわらず慶良間諸島の北西域で北東向きの大きな恒流成分が確認できることから、No. 1 ブイはこの流れの影響を受けて輸送されたものと考えられる。Period 3 では、ブイは慶良間諸島北側の200 mコンターで示す陸棚端よりも深部の領域に入り、そこで潮汐の影響を受けながらも大きく東に流されている。このとき風は微弱であったことから、吹送流の寄与は考えられない。一方、漂流ブイの水温変動履歴をみると、この期間、1.5から2.0度の急激な水温上昇を示している。また、図-7(a)と(b)を比

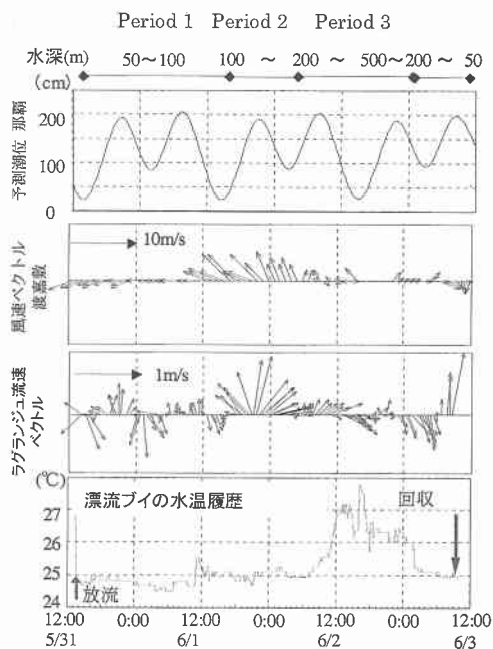
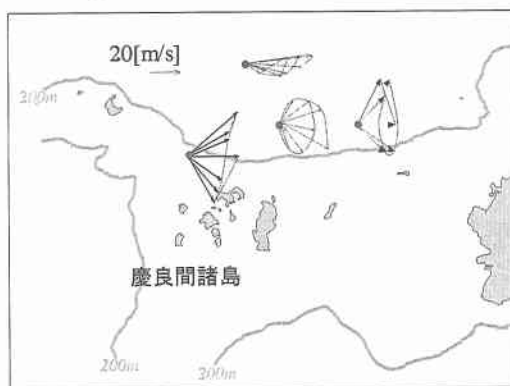


図-6 No. 1 の漂流ブイの挙動と潮汐、風との比較



(b). 5/31 20:00–6/1 12:00 (Period 1)



(b). 6/1 20:00–6/2 12:00 (Period 2 & 3)

図-7 HF レーダによるホドグラフ

較すると、ブイが大きく東側に流された Period 3 では慶良間諸島北側において東向きの流れが確認できる。以上のことから、この陸棚北側の深海域では、沖縄本島の西方約 150 km を流れる黒潮からの分枝流の一部と思われる暖水塊の影響が波及してきており、それによりブイが大きく東方に移流されるパターンになったものと考えられる。

3.3 海水流動シミュレーション

実測された広域表層流動特性に対する吹送流や潮流、海流影響の寄与を検討するために、Dual- σ 座標系(灘岡ら, 1999)を組み込んだ汎用海水流動モデル (POM) に基づく 3 次元海水流動計算と、サンゴ幼生を模擬した表層浮遊粒子の追跡計算を実施した。

3.3.1 計算概要

上述したように計算モデルには POM (Princeton Ocean model) を使用した。基礎式は、静水圧・Boussinesq 近似を仮定した 3 次元の NS 方程式と連続式であり、水平・鉛直渦動粘性係数はそれぞれ、Smagorinsky モデル、Mellor and Yamada の乱流モデル (レベル 2.5) を用いて計算している。ここでは、海水流動を規定すると考えられる、潮汐、風、海流の 3 要因のうち、海流影響をメソスケールの開放性計算領域に合理的に取り込む手法が現在のところ開発されていないことから、潮汐と風のみを考慮して計算を行った。そして、そのように計算された海水流動をもとに表層浮遊粒子追跡計算を行い、その結果と実測値である No. 1 漂流ブイの挙動を比較することで、表層浮遊粒子輸送への海流成分の寄与を検討することを試みた。

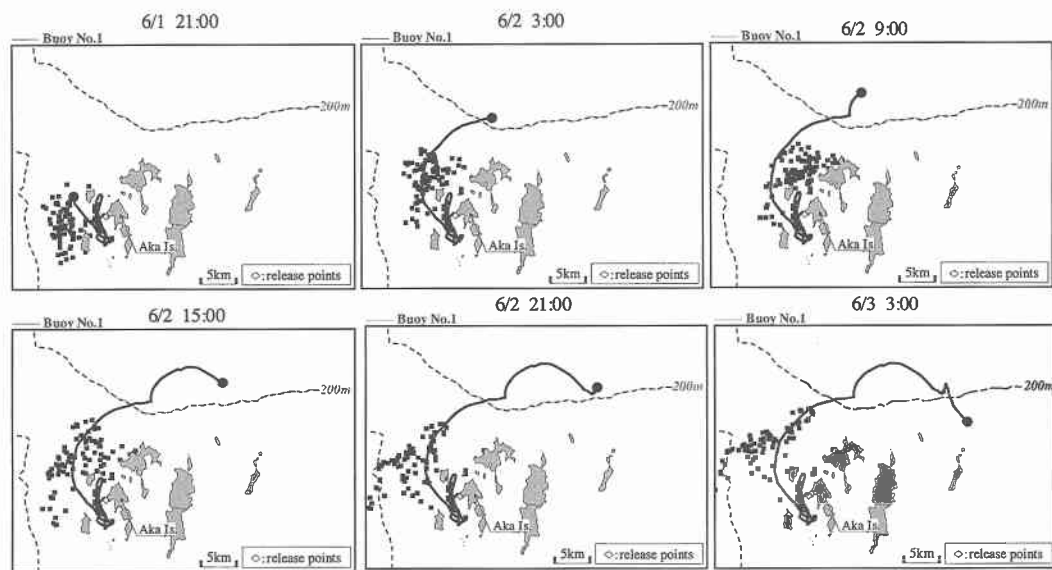


図-8 粒子追跡計算結果と実測値の比較：● No. 1 漂流ブイ，■ 表層浮遊粒子(計算結果)

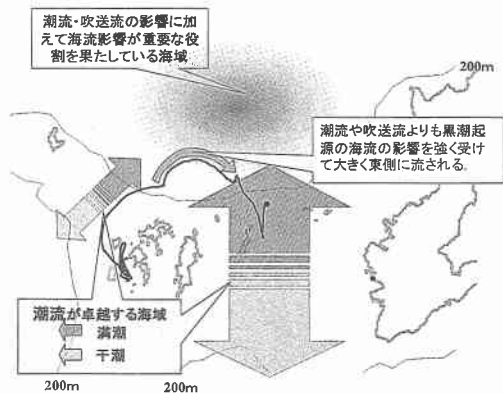


図-9 沖縄南西海域における流動特性

計算期間は、漂流ブイ観測を行った期間を含む5月31日～6月3日までとした。計算領域は、沖縄本島、慶良間諸島、久米島を含む、南北240 km、東西274 kmの領域で、4辺開境界領域である。水平方向には2 kmの正方形格子を設定し、鉛直方向には水深を15層に分割した。境界条件としては、南と東側境界において主要16分潮を与え、北と西側境界における水位の境界条件としては、長波に対する透過条件を設定した。各分潮の振幅の設定には、TOPEX/POSEIDON海面高度データと流動シミュレーション結果より得られた潮汐データ(Matamoto et al., 2000)を用いている。潮汐変動の位相設定は、対象期間の水位変動観測データを調和解析することにより行った。水深データは日本海洋データセンター(JODC)の海洋データオンライン提供サービス(J-DOSS)を利用した。風データは渡嘉敷のAMeDAS地上気象データを用い空間的に一様に与えた。

3.3.2 表層浮遊粒子の追跡計算

海水流動計算結果に基づいて表層浮遊粒子の追跡計算を行った。表層浮遊粒子はNo. 1ブイが慶良間諸島の西側に出た6月1日15:00を起点として、1時間ごとに慶良間諸島の西側に9個ずつ放出した。粒子運動の計算結果とNo. 1ブイの軌跡の実測値を重ねたものを図-8に示す。これを見ると、計算結果は、慶良間諸島北西の陸棚海域を往復するだけで、深海域には出ていかず、慶良間諸島の東までは輸送されないことがわかる。このことから、ここでの計算に考慮されていない海流成分が、慶良間諸島から東方に向けての一方向的な輸送に大きく寄与していることが分かる。

4. おわりに

本研究では、1998年の白化ダメージが大規模であった沖縄本島西岸と、比較的ダメージが軽微でもともとサン

ゴ幼生供給源である可能性が示唆されていた慶良間諸島を含む、沖縄本島南西海域を対象海域として、サンゴ幼生広域輸送過程を把握するためのHFレーダによる広域表層海水流動観測と、数個のGPS搭載型漂流ブイによるラグランジュ型計測を実施するとともに、関連する海水流動シミュレーションと表層浮遊粒子追跡計算を行った。

図-9は、本研究によって得られた知見をまとめて図式的に示したものである。すなわち、陸棚領域では潮流が卓越し、その中に位置する慶良間諸島域では、浮遊粒子は基本的に往復運動パターンを示すことになる。一方、陸棚域北側に深海域では潮流・吹送流に加えて海流影響が顕著に現れ、何らかの原因でこの領域に浮遊粒子が入り込むと、大きく東方へ輸送されることが可能になる。

今後は、このような海流影響をも合理的に取り込むことができる一般的な数値シミュレーション手法を開発することによって、より広範な海象・気象条件下での広域幼生輸送を計算するとともに、サンゴ幼生(プラナリア幼生)がある時期から遊泳能力を持ち鉛直移動することについても実測によって明らかにし、その効果を数値シミュレーションに反映させていく予定である。

なお、本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(研究代表者: 灘岡, 課題番号: 10450181 及び 12450198), 同基盤研究(B)(2)(研究代表者: 灘岡, 課題番号: 12555147), 平和中島財団国際学術共同研究助成金(研究代表者: 灘岡)を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 (1992): 漂流葉書き実験報告, みどりいし, No. 3, pp. 18-21.
- 灘岡和夫・吉野忠和・二瓶泰雄 (1999): 高度化した沿岸流動数値計算法を用いた原油流出シミュレーション, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 461-465.
- 山里 清(1999): 沖縄におけるサンゴの白化, GALAXEA, No. 1, pp. 83-88.
- Bjorkstedt, E. and J. Roughgarden (1997): Larval transport and coastal upwelling: An application of HF radar in ecological research, *Oceanography*, Vol. 10, No. 2, pp. 64-67.
- Graber, H. and C. B. Limouzy-Paris (1997): Transport patterns of tropical reef fish larvae by spin-off eddies in the straits of Florida, *Oceanography*, Vol. 10, No. 2, pp. 68-71.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *J. Oceanography*, Vol. 56, pp. 567-581.
- Wolanski, E., D. Burridge and B. King (1989): Trapping and dispersion of coral eggs around Bowden Reef, Great Barrier Reef, following mass coral spawning, *Continental Shelf Res.*, Vol. 9, No. 5, pp. 479-496.