

JCOPE および沿岸域モデルを用いたサンゴ・オニヒトデ幼生 広域輸送特性の把握

鈴木 康 壱*・灘岡 和 夫**・宮澤 泰 正***
波利井 佐 紀****・安田 仁 奈*

サンゴ幼生やオニヒトデ幼生の広域的な輸送過程を明らかにするべく、その支配要因である広域海水流動場の解析を、JCOPE 黒潮モデルと沖縄本島南西陸棚海域を対象とした現地観測および沿岸域海水流動モデルを用いた数値計算によって行った。また、これらの広域海水流動計算結果を基に表層粒子追跡計算を行うことで、サンゴ・オニヒトデ幼生の広域輸送特性の把握を試みた。その結果、数値計算によって、慶良間列島から沖縄本島に向けてのサンゴ幼生供給を支配する、沖縄本島南西陸棚北側海域での東向きの流れを再現することができ、その流れの生成に、この陸棚の存在による地形効果が密接に関与していることが示された。また、表層粒子追跡計算によって、琉球列島沿岸域および九州地方沿岸域での幼生供給パターンが明らかになった。

1. はじめに

熱帯・亜熱帯地域における沿岸生態系の基盤となるサンゴ礁生態系の劣化は深刻で、現在全世界の約 6 割のサンゴ礁が危機的な状況にあると言われている。琉球列島においても同様な状況が見られるが、サンゴのダメージにはかなりの地域差があることが知られており、今後のサンゴ礁回復に向けて、比較的健全に残されているサンゴ礁からダメージの大きいサンゴ礁へのサンゴ浮遊幼生の供給が期待されている。一方、最近、琉球列島および九州地方などで典型的なサンゴ食害生物であるオニヒトデの大発生の兆候が見られており、その実態を早急に解明することが求められている。特に現在ブラックボックスとなっているオニヒトデ幼生の発生源地域の特定と分散過程の把握が必要とされている。本研究では、サンゴやオニヒトデ幼生の広域的な輸送過程を明らかにするべく、その支配要因である広域海水流動場の解析を、沖縄本島南西海域を対象とした現地観測と、宮澤・山形(2003)によって開発されてきている JCOPE 黒潮モデルならびにそれに連動させた沿岸域海水流動モデルを用いた数値計算によって行った。また、これらの広域海水流動計算結果をもとに表層粒子追跡計算を行うことで、サンゴ・オニヒトデ幼生の広域輸送特性の把握を試みた。

2. 係留系による水温・流速の現地観測概要

沖縄本島沿岸の海水流動場は、沖縄本島から西に約 200 km 沖合を流れる黒潮の影響を強く受けると考えられている(図-1)。そこで、沖縄本島南西陸棚海域およびその周辺海域における外洋影響を把握するため 2003 年 6 月から 7 月にかけての約 1 ヶ月間、自記式センサー

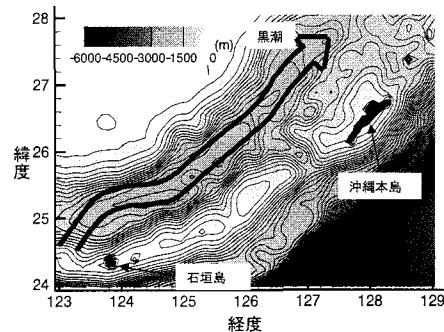


図-1 琉球列島周辺地形

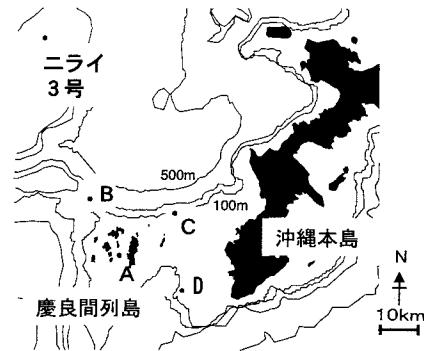


図-2 沖縄本島南西海域周辺地形

を用いて表層流速および水温の連続観測を行った。設置地点は図-2 に示す、沖縄本島南西海域の特徴的地形である陸棚上の A~D の 4 地点および西側外洋域のニライ 3 号(沖縄本島の西方約 100 km)とし、また A~D の 4 地点では、水温鉛直構造の動的特性把握のために独自に設置した係留ブイに 10 m 間隔で水温計の鉛直アレイを設置した。

これらの係留系での連続観測により、地点 B, C, D およびニライ 3 号において表層流速データを、また、地点 A, B, C, D において水温の鉛直分布データを得た。

* 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

** 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

*** (独法) 海洋研究開発機構 地球フロンティア研究所システム

**** 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

3. 数値計算概要

(1) JCOPE モデルの概要

JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment) 黒潮モデルによる 3 次元計算結果を解析することで、琉球列島や九州・四国沿岸を含む広域の海水流動場特性を把握することを試みた。なお、本研究で使用した JCOPE モデルでは、POM (Princeton Ocean Model) を基礎とし、風応力・塩熱フラックスを駆動力としたほぼ太平洋全体を含む低解像度モデル（計算領域：100 E–70 W, 30 S–62 N, 水平格子間隔 1/4 度、鉛直 21 層）による計算結果に対して、北西太平洋領域に限定した高解像度モデル（計算領域：117 E–180 E 12 N–56 N, 水平格子間隔 1/12 度、鉛直 45 層）をネスティング計算している。また、初期値として与えた風応力・熱塩フラックスには、6 時間毎の NCEP/NCAR データおよび QuikSCAT データを用いている。

(2) 表層粒子追跡計算の概要

オニヒトデの浮遊幼生期間は約 1 ヶ月程度と比較的長く、サンゴと比べてより広域に分散する可能性がある。このことから、表層粒子追跡計算では、粒子初期位置をフィリピン、パラオなどを含む北西太平洋の広範な地点に設定し、それぞれのケースでの広域幼生輸送の可能性を検討した。本論文では、このうち、石垣島周辺海域や沖縄本島周辺海域を初期位置とし、1998 年および 2001 年の 2 ケースについて検討した結果を示す。また、表層粒子追跡計算では、鉛直方向の移動は考慮せず、移流には JCOPE 低解像度モデルにおける計算結果を、拡散にはランダムウォークを導入し、水平方向の拡散係数には Smagorinsky モデルを用いて評価した。

(3) ネスティング手法を用いた数値計算の概要

これまでの調査結果（灘岡ら、2001, 2002, 2003）から、沖縄本島南西陸棚北側海域において卓越している東向きの流れが、慶良間列島から沖縄本島へのサンゴ幼生輸送を支配しているものと考えられている。この東向き流れの生成過程には、黒潮系暖水塊の沿岸波及やその際の陸棚地形効果の関与の可能性が指摘されているが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。そこで、本研究では JCOPE モデルによる計算結果をネスティングさせる形で外洋影響を合理的に反映させた沿岸海水流動計算を行うことで、沖縄本島周辺の海水流動特性の把握を試みた。ここで海水流動計算に用いたモデルは、平面 2 次元場に対する浅水流モデル（計算領域：126.5 E–128.5 E 25.25 E–27.25 E, 水平格子間隔 1/72 度）であり、ネスティング手法には二瓶らによって提案されている多重ネスティング計算法（二瓶ら、2003）を用いた。この手法では、水位や流速などの従属変数を、上位の大領域計算

結果（同化成分）とそこからの偏差となる変動成分に分離する、という変数分離操作を施し基礎方程式系を再定式化することで大領域計算結果を小領域計算結果に合理的に取込むことが可能となる。

4. 結果と考察

(1) 琉球列島周辺での海水流動場の把握

JCOPE 高解像度モデル計算結果から、黒潮流軸と琉球海嶺の間の海域は、黒潮反流と中規模渦が相互作用し複雑な流動場を形成していることが分かった。特に、石垣島北部海域付近で黒潮から分離した高気圧性の中規模渦が北東に進行し、暖水塊として沖縄本島沿岸に接近し、沖縄本島沿岸の流動場や水温環境に顕著な影響を与えていることが明らかになった（図-3）。またその特徴は、JCOPE 高解像度モデルの計算結果や TOPEX/Poseidon などの衛星画像による海面高度分布からも確

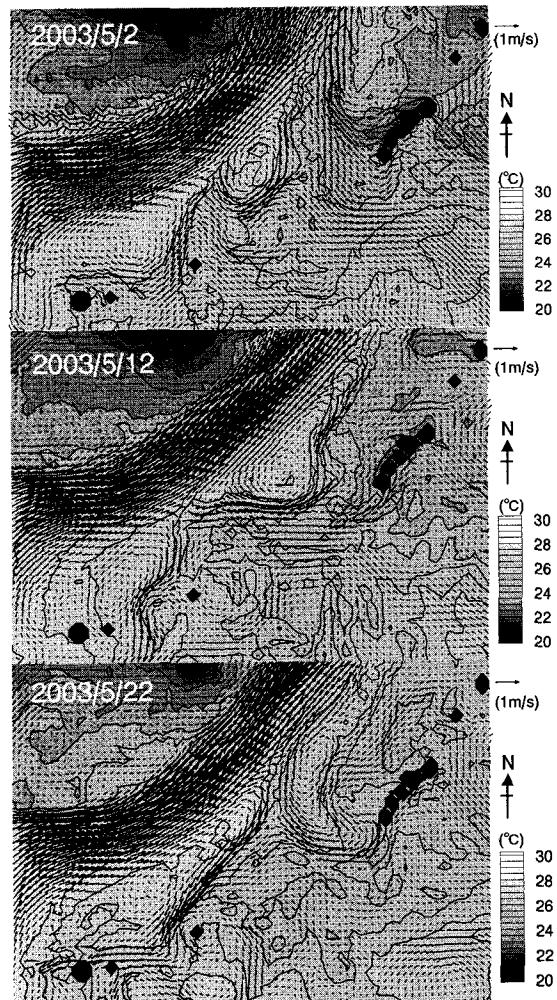
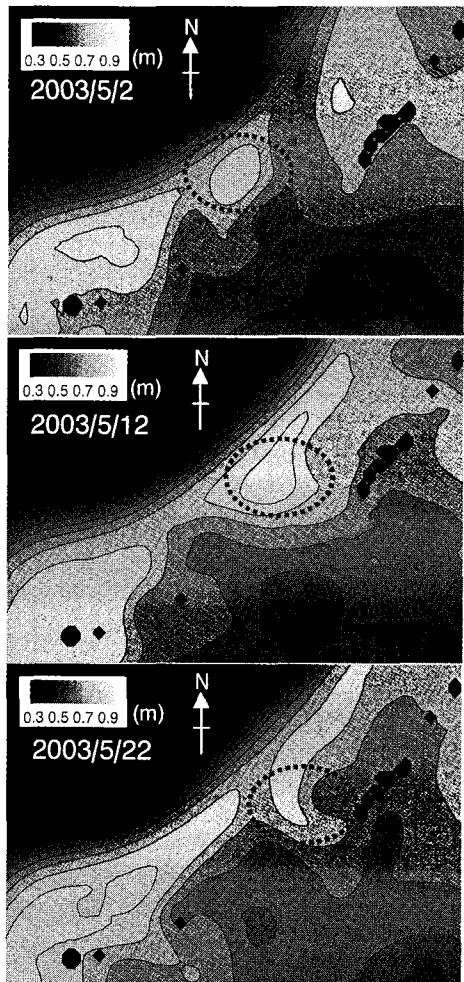
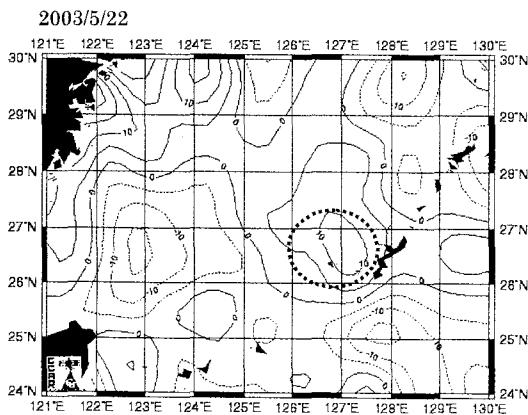


図-3 沖縄本島に波及する中規模渦（流速、水温）



(a) 計算結果による海面高度分布



(b) TOPEX/Poseidonによる海面高度分布 (アノマリ)

図4 沿岸域に波及する中規模渦

認することができた(図-4)。

(2) 表層粒子追跡計算によるサンゴ・オニヒトデ幼生広域輸送特性の把握

1998年5月12日に石垣島周辺に投入した表層粒子は、その大部分が黒潮によって輸送され約1ヶ月後に沖縄本島および九州・四国地方沿岸に輸送された。また、2001年6月9日に沖縄本島に投入した表層粒子は、その一部が黒潮反流によって南下し約20日後に宮古島周辺に到達した(図-5)。これらの結果は、琉球列島周辺海域において南北海域間での幼生の相互輸送・供給関係が存在する可能性を示すものである。実際、沖縄本島・奄美諸島では2002年にオニヒトデの大量発生が報告されはじめ、2003年には鹿児島や天草で、そして2004年初頭には宮古島でオニヒトデの大発生の兆候がみられるようになっている。これらの事実は、上記のオニヒトデ幼生の広域的な分散・供給パターンの計算結果と符合している。

特に、これまで、沖縄本島から宮古島や石垣島などへ南下する幼生の輸送経路については、その可能性は議論されてはいるものの実態は不明のままであったが、今回の表層粒子追跡計算やJCOPE高解像度モデルによる流動場計算の結果(図-6)により、沖縄本島およびその周辺海域から供給されたサンゴやオニヒトデ幼生が黒潮反流によって南下し、宮古島や八重山諸島にまで達する可能性が十分あることが明らかとなった。

なお、この表層粒子追跡計算結果は、さらに、これらの広域幼生輸送パターンが定常的なものではなく、黒潮流軸自体の変動や間欠的に波及する中模渦のタイミングの関係で非定常性の強いものになっていることを示している。また、石垣島北側海域に投入された表層粒子の一部は、黒潮に乗って北方に輸送されたのに対し、同時に約70km離れた石垣島南側海域に投入された表層粒子のほとんどは先島諸島周辺に留まった。このことは、沿岸域における幼生位置のわずかな違いによって、その後の広域輸送パターンが大きく変化することを示唆している(図-5)。

(3) 沖縄本島沿岸陸棚海域における外洋影響の把握

沖縄本島南西陸棚北側海域では、東ないしは北東向きの流れ(以下単に東向き流れ)の海流成分が卓越しており、それが慶良間列島から沖縄本島へのサンゴ幼生輸送の支配要因となっていることが知られている(難岡ら、2001, 2002, 2003)。図-7は、沿岸域への外洋影響を見るために、6月12日から7月3日までのニライ3号、地点B、地点Dでの東西方向流速を示したものである。これから、6月20日から24日にかけて、明瞭な流速変動パターンが外洋側から沿岸域へ伝播していく様子が確認でき、また、23日から24日にかけて地点Bで表層水温が急

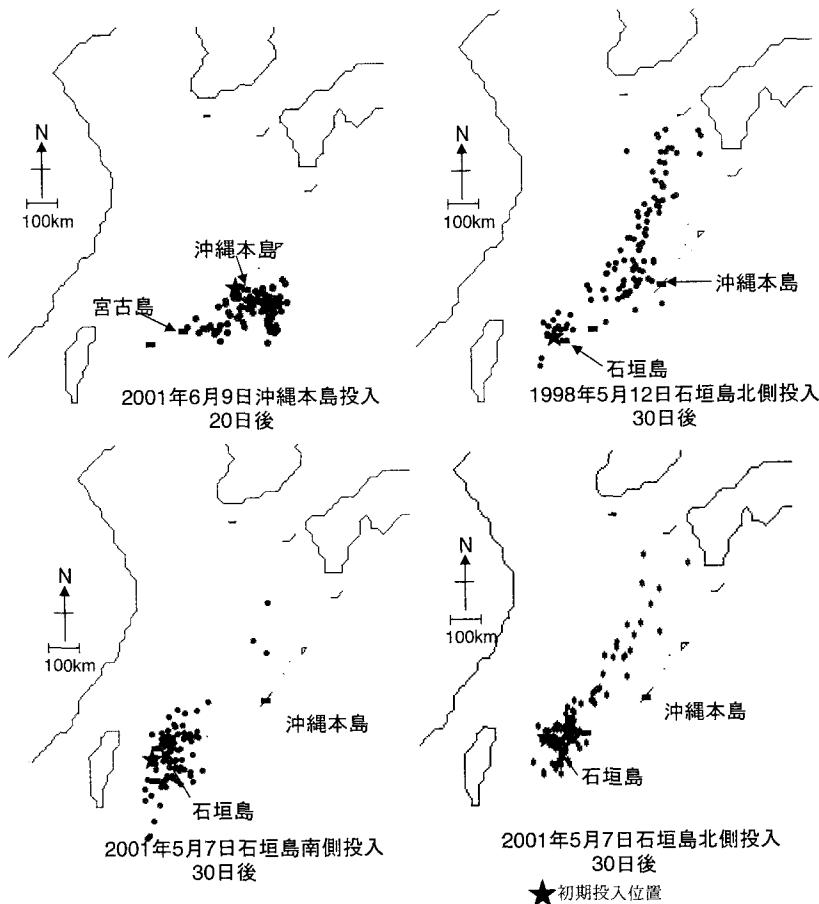


図-5 表層粒子追跡計算

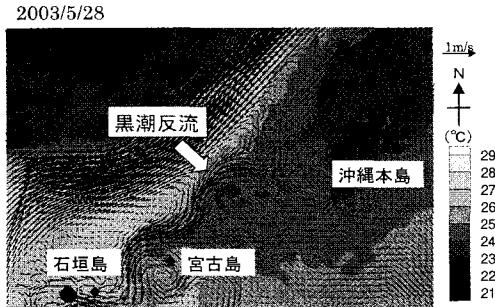


図-6 沖縄本島から宮古島、石垣島に向かう黒潮反流の存在を示す数値計算結果

激に上昇し、外洋側であるニライ3号の表層水温とほぼ同じ値となっていることがわかる(図-8)。このことから、この東向き流れの生成過程には、外洋から沿岸域への黒潮系暖水塊の波及過程が密接に関与しているものと考えられる。この黒潮系暖水塊の波及の様子は、NOAAのSST画像からも確認できる(図-9)。

一方、図-7では、沿岸域、特に水深200 m以浅の陸棚

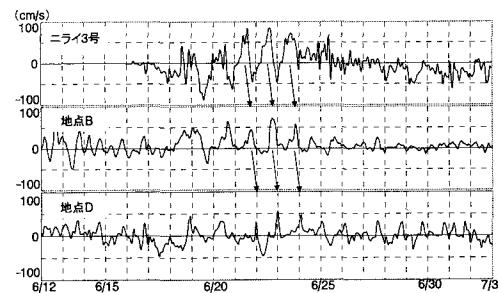


図-7 ニライ3号、地点B、Dにおける表層流速の経時変化

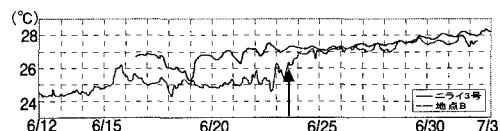
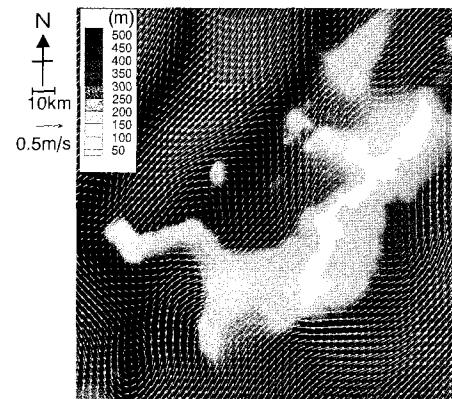
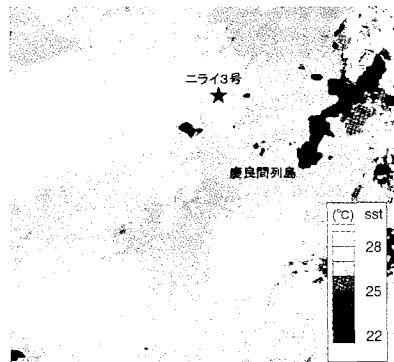


図-8 ニライ3号、地点Bにおける表層水温の経時変化

上で、上記の流速変動パターンの変動振幅レベルが大きく低下していることが併せて示されている。このことは、上記の外洋からの沿岸域への波及過程において、陸棚の



存在が流動場に有意な影響を与えていていることを示唆するものである。さらに、ここでは、JCOPEモデル計算結果を同化させることにより外洋影響を取り込んだ2次元沿岸海水流動計算によって、陸棚北側海域において、陸棚地形に沿った特徴的な東向きの流れを再現することに成功している(図-10)。この平面2次元計算で東向き流れを再現出来ているという事実は、外部モード成分がこの東向き流れの生成に直接寄与していることを示しており、このことは、ひいては、この東向き流れがこの海域での陸棚端部の地形的特徴に強く支配されたものであることを示すものである。今後、より本格的な3次元密度流計算を実施し、ここでの平面2次元計算結果と比較することによって、より詳細な力学過程の内容を明らかにしていく予定である。

5. まとめ

(1) 表層粒子追跡計算によって、琉球列島沿岸域から広く九州、四国沿岸域まで1ヶ月程度でオニヒトデ幼生が供給され得ること、また、逆に沖縄本島海域から宮古・八重山海域に向けての幼生供給パターンも存在することが明らかになった。

(2) JCOPEモデルの計算結果から、黒潮から分離した高気圧性の中規模渦が暖水塊として、沖縄本島沿岸域

の流動場や水温環境に影響を与えていることが分かった。

(3) 数値計算によって、沖縄本島南西陸棚北側海域での東向きの流れを再現することができ、その流れの生成に、この陸棚の存在による地形効果が密接に関与していることが示された。

参考文献

- 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 (2001): HFレーダー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、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・田村 仁・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.
- 灘岡和夫・波利井佐紀・鈴木庸志・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 (2003): 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、海岸工学論文集、第50巻、pp. 1191-1195.
- 二瓶泰雄・佐藤慶太・灘岡和夫・熊野良子・西村 司 (2003): 沿岸海水流動シミュレーションに対する新しい多重ネスティング計算法の開発、土木学会論文集、No. 740, II-64, 171-183
- 宮澤泰正・山形俊男 (2003): JCOPE海岸変動予測システム、月刊海洋、Vol. 35, No. 12, pp. 881-886.