

# 広域沿岸生態系ネットワーク解明にむけての琉球列島周辺の 海水流動と浮遊幼生輸送解析

灘岡和夫<sup>1</sup>・鈴木庸亮<sup>2</sup>・西本拓馬<sup>3</sup>  
田村 仁<sup>4</sup>・宮澤泰正<sup>5</sup>・安田仁奈<sup>6</sup>

JCOPE モデルによって黒潮影響を取り込み、かつ潮汐の影響も取り込んだ多重ネスティング沿岸海水流動モデルを開発し、琉球列島周辺海域の流動場解析を行った。その結果、黒潮と八重山諸島北側の中間海域での高気圧性渦の準周期的発生、その後の黒潮南縁辺に沿った移動に伴う黒潮反流の生成、さらに沖縄本島西方海域での陸棚の地形効果による東向き流れの生成といったプロセスを明らかにするとともに、それらに伴うサンゴ・オニヒトデ幼生の輸送パターンを明らかにした。また、オニヒトデ幼生輸送から見た広域的なコネクティビティーの変動性を検討した。

## 1. はじめに

サンゴ礁生態系は様々なストレスによって劣化の進行が危機的な状況になってきている。琉球列島においても状況は深刻であるが、ダメージの程度にはかなりの地域差があることが知られている。このような状況でのサンゴ礁生態系の保全・再生を図るには、個々のサンゴ礁生態系のスポット的な保全・再生ではなく、広域的なサンゴ礁間の連結性 (reef connectivity) を明示的に捉えた上で保全・再生という視点が必要となる。具体的には、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ルートが存在することが確認できれば、供給源のサンゴ礁海域を重点的に保護することによって、広域沿岸生態系ネットワーク全体としての回復力を増強させることができることになる。またこのような広域沿岸生態系ネットワーク解明は、典型的なサンゴ食害生物であり、琉球列島および九州・四国・紀伊半島沿岸の各地で大量発生の報告が最近相次いでいるオニヒトデの大量発生メカニズムを解明する上でも緊急の課題となっている。これまで沖縄本島周辺では沿岸生態系ネットワーク解明の手がかりとして慶良間諸島から沖縄本島への東向き流れの存在 (灘岡ら、2002) などが指摘されている。また、鈴木ら (2004) は JCOPE モデル (宮澤・山形、2003) をベースとした計算結果より、琉球列島周辺における海水流動場の特徴を把握するとともにサンゴ・オニヒトデ幼生の広域輸送特

性を調べている。本研究では鈴木ら (2004) の検討結果をさらに発展させるべく、JCOPE モデルによって黒潮影響を取り込み、かつ潮汐影響も取り込んだ形の多重ネスティング沿岸海水流動モデルを開発し、特に黒潮周辺の渦構造やその沿岸への波及過程、それに伴うサンゴ・オニヒトデ幼生の輸送過程を解明することを試みた。

## 2. JCOPE モデルをベースとした多重ネスティング沿岸海洋モデルの開発

### (1) 多重ネスティング沿岸海洋モデルの概要

中規模渦や黒潮などの外洋影響を適切に取り入れるために、地球環境フロンティア研究センターによって開発されている JCOPE モデルの計算結果を同化するとともに、ネスティングを複数回行うことと、対象とする沿岸海域の 3 次元数値流動計算を高精度で行うことが出来る多重ネスティング沿岸海洋モデルを開発した。ベースとなる海洋モデルには、JCOPE に準じて POM (Princeton Ocean Model) を使用した。POM は静水圧近似、Boussinesq 近似された 3 次元 Reynolds 方程式を基礎式とし、水平および鉛直 Reynolds 応力の評価に、それぞれ Smagorinsky 型モデルと Mellor-Yamada レベル 2.5 モデルを用いている。また、沿岸浅海域では潮汐・潮流成分が有意な大きさを持つようになることから、ここではさらに、NAO.99Jb モデルに基づく潮汐・潮流成分計算を組み入れることにより、沿岸浅海域での流動場を詳細に再現することを試みた。

### (2) 計算領域

本研究では、日本有数のサンゴ礁海域である沖縄本島西方海域と八重山諸島周辺海域の 2 海域をネスティング計算対象とし、それぞれの流動特性とサンゴ・オニヒトデ浮遊幼生輸送特性を把握すると同時に、この 2 海域を含む広域的なリーフコネクションの実態を解明することを試みた。図-1 に示すように、沖縄本島西方海域のネスティング計算領域は、沖縄本島と黒潮流域を含む領域 (KERAMA1, 水平解像度 1/60 度、鉛直 45 層) と慶良

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  
2 J R 東日本  
3 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  
4 正会員 博(工) (独) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター 研究員  
5 博(理) (独) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター 研究員  
6 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・日本学术振興会特別研究員 DC

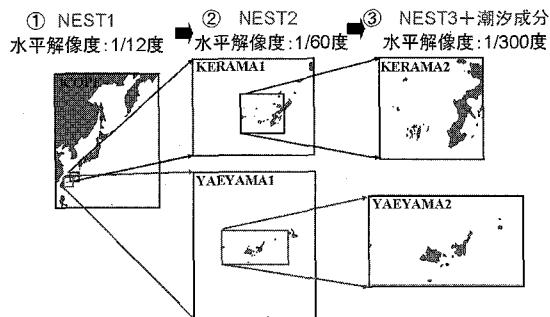


図-1 多重ネスティング領域設定図

間列島周辺海域 (KERAMA2, 水平解像度 1/300 度, 鉛直 45 層)とした。また、八重山諸島周辺海域のネスティング計算領域は、黒潮と石垣島、西表島を含む領域 (YAEYAMA1, 水平解像度 1/60 度, 鉛直 45 層) と石垣島・西表島にクローズアップした領域 (YAEYAMA2, 水平解像度 1/300 度, 鉛直 60 層) とした。このうち、KERAMA2 および YAEYAMA2 については、上記の潮汐・潮流成分の計算をあわせて行っている。また鉛直方向には、上層では  $z$  座標、下層では、海底地形に沿う鉛直格子間隔を持つ座標系を併用した。

### (3) ネスティング計算における境界条件・外力条件

ネスティング方法は、低解像度モデル計算結果を高解像度モデルに一方向的に与える one-way 法を用いた (Guo et al. 1999)。低解像度モデルは高解像度モデルに比べて分解能が時空間的に粗いため、高解像度モデルの境界条件には、低解像度モデルの計算結果を時空間的に線形補間する形で与えた。ただし、流速の単純な線形補間による高解像度および低解像度モデル間での境界通過流量の不一致を防ぐため、境界において順圧流量の調整を行っている。外力条件としては、JCOPE と同様に、風応力に関しては QuikSCAT 衛星海上風データ (水平 1/2 度, 12 時間間隔) によって与え、また海表面熱フラックスについては、NCEP/NCAR 再解析データの海上気象要素 (水平約 2.5 度, 6 時間間隔) と衛星海上風データを組み合わせてバルク法を用いて算出した。

## 3. 琉球列島周辺海域における海水流動特性

### (1) 八重山諸島周辺海域における海水流動特性

数値シミュレーション結果により、黒潮と八重山諸島の中間海域では、準周期的に時計回りの渦構造 (高気圧性渦) が発生していることがわかった (図-2)。この渦は八重山諸島北側海域で生成されたのち、黒潮に沿う形で北東に輸送され、約 20 日で沖縄本島付近まで到達する (図-3)。この渦構造は、石西礁湖から沖縄本島方面への幼生輸送といった物質輸送において重要な役割を演

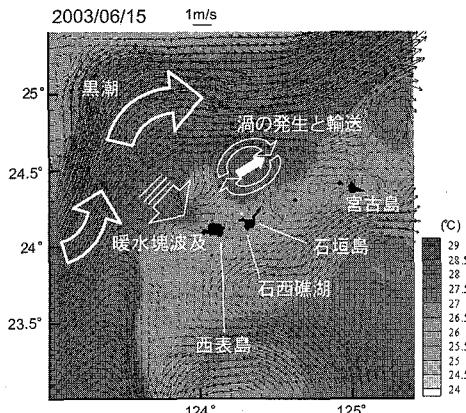


図-2 八重山諸島北側海域での準周期的な高気圧性渦の生成とそれによる暖水塊波及 (YAEYAMA1, コンターは水温)

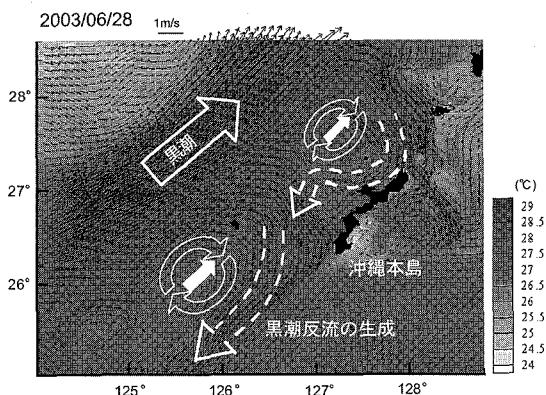


図-3 高気圧性渦の沖縄本島方向への黒潮に伴う移動と黒潮反流の生成 (KERAMA1, コンターは水温)

じているだけでなく、沿岸域への暖水塊の波及といった熱輸送現象にも大きな影響を与えている。

### (2) 沖縄本島西方海域における海水流動特性

#### a) 黒潮・沖縄本島中間海域での海水流動特性

図-3 では、北東方向に流れる黒潮や、それに付随する高気圧性の渦だけでなく、高気圧性渦群の南東側縁辺部において強い南西方向への流れが再現されている。これが、いわゆる黒潮反流に他ならない。したがって、これらの高気圧性の渦は、黒潮反流の生成にも重要な役割を果たしていることが分かる。なお、この高気圧性渦の通過に伴って振幅 50 cm/s 以上の流速変動が生じるが、この流速変動は、係留ブイ NIRAI3 号 (北緯 26.673 度、東経 127.944 度) に設置した電磁流速計による現地観測から得られた南北・東西方向流速の特徴とほぼ一致することが確認されている。

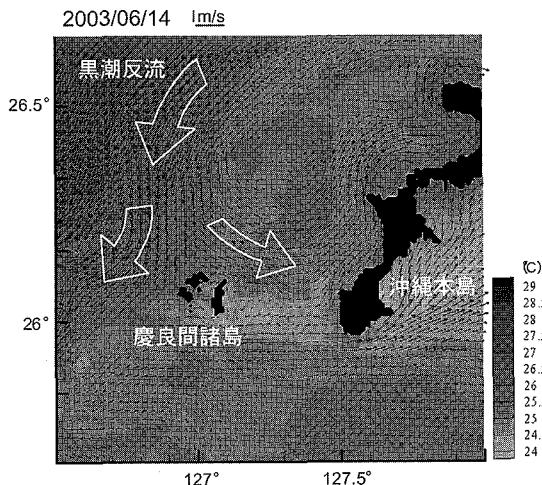


図-4 沖縄本島西方海域における慶良間諸島から沖縄本島に向かう流れの再現 (KERAMA2, コンターは水温)

#### b) 沖縄本島西方海域での東向き流れの再現および暖水塊波及

多重ネスティング手法によって沿岸域流動場計算に外洋影響を取り込むだけでなく、さらに潮汐の効果を考慮した KERAMA2 での数値シミュレーションにより、これまでの観測で明らかになっている、沖縄本島西方海域での流動場の特徴、特に、慶良間列島北側海域での東向き流れ (灘岡ら, 2002) を再現することに成功した (図-4)。また、黒潮系暖水塊を伴う上記の高気圧性渦はイベント的に沖縄本島沿岸域に直接波及することがあり、慶良間列島周辺海域の水温環境に大きな影響を与えていたことがわかった。

#### (3) 琉球列島周辺海域における海水流動メカニズム

黒潮と琉球列島の中間海域では準周期的に高気圧性渦群が発生している。これらの渦群は八重山諸島北方海域から黒潮流路に沿って北上し、渦群の南東側縁辺部では黒潮反流が発生する (図-5)。黒潮反流の分枝流は沖縄

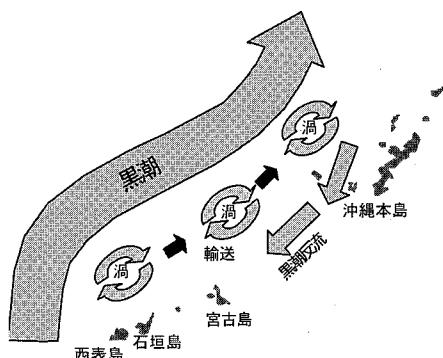


図-5 琉球列島周辺における海水流動構造の概念図

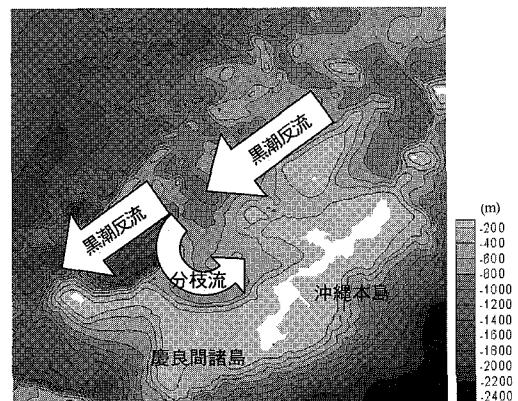


図-6 沖縄本島周辺における海水流動構造の概念図  
(センターは水深)

本島南部から西に伸びる陸棚による地形効果を受けることによって東向きを変え、沖縄本島沿岸域に流入する形となる (図-6)。

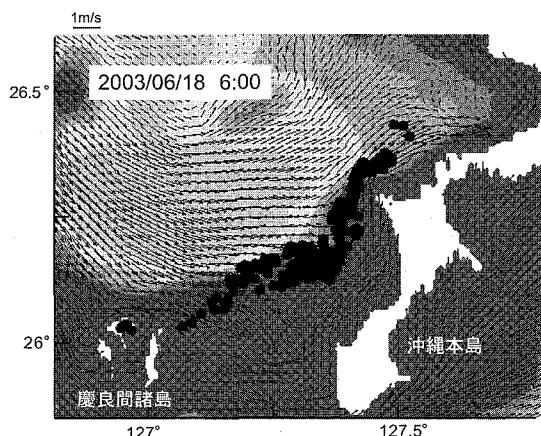
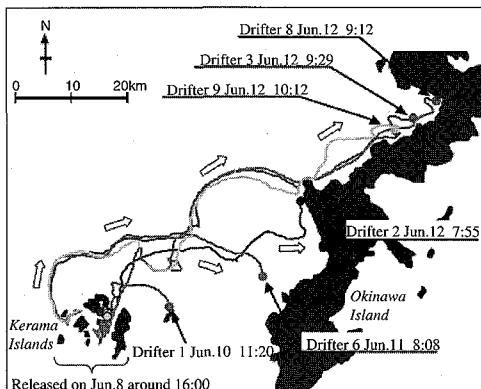
#### 4. サンゴ・オニヒトデ浮遊幼生広域輸送特性

サンゴ・オニヒトデ浮遊幼生広域輸送特性を明らかにするために、浮遊幼生を模擬した粒子追跡計算を行った。粒子の移流は多重ネスティングモデルから得られる流速データを、また拡散はランダムウォークと平均 2 乗行程を用いて評価している。水平拡散係数はスマゴリンスキーモデルを用いて評価し、鉛直拡散は考慮していない。なお、粒子は流れに対して完全に受動的であるとして追跡計算を行った。サンゴの場合は最大で数十日間、オニヒトデの場合は最大で 2 ヶ月程度の浮遊幼生期間を持つことから、数値計算による追跡期間を 2 ヶ月と設定した。

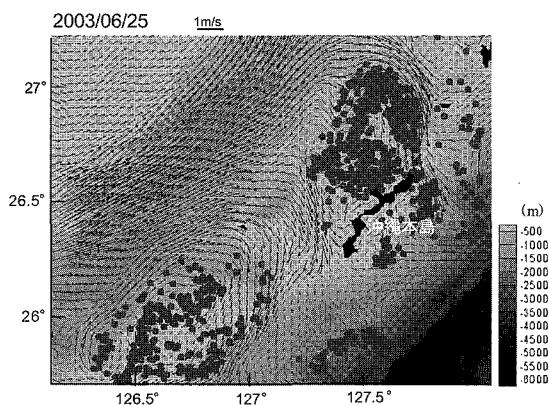
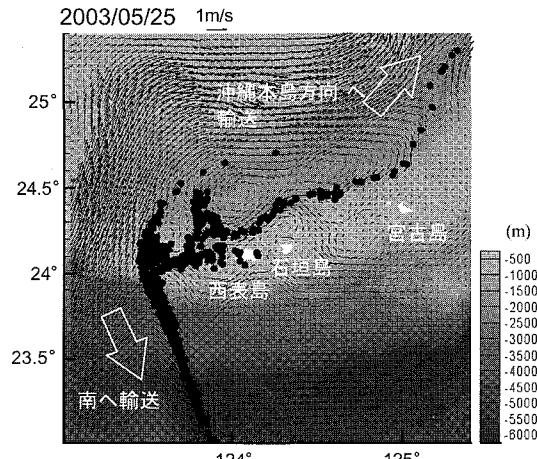
#### (1) 沖縄本島周辺での浮遊幼生広域輸送特性

慶良間列島が沖縄本島のサンゴ幼生の供給源となっていることを、灘岡ら (2002) は漂流ブイ追跡実験から明らかにしている (図-7)。図-8 は、漂流ブイ実験と同様の条件での粒子追跡計算の結果である。慶良間列島内に投入された粒子は、漂流ブイとほぼ同じ軌跡で沖縄本島西岸に到達した。また、慶良間列島北側海域の東向き流れによる慶良間列島から沖縄本島沿岸域への具体的な輸送経路が明らかになったことで、慶良間列島が沖縄本島のサンゴ幼生の供給源となっていることが示された。

また、沖縄本島西岸恩納村付近に投入した粒子は、約 3 週間後に慶良間列島に到達し、沖縄本島から慶良間列島への逆向きの浮遊幼生輸送の可能性があることも分かっている。なお、近年慶良間列島ではオニヒトデの大量発生が確認されており、過去に頻繁に大量発生が起こっている恩納村がオニヒトデ幼生のソースエリアとなっている可能性があることも示唆された。



(2) 石西礁湖から沖縄本島への浮遊幼生広域輸送特性  
琉球列島西側を流れる黒潮は流れが速く、浮遊幼生は一度黒潮に乗ると広域に輸送されると考えられる。ここでは、石西礁湖から沖縄本島へのサンゴ・オニヒトデ幼生の輸送可能性を検討する。現地観測においてサンゴ幼生が確認された石西礁湖北側海域を初期位置として、産卵が確認された2003年5月中旬から追跡計算を行った。投入された粒子は、先述の高気圧性渦に取り込まれ北東に輸送されるものと、黒潮流反によって南に輸送されるものに分かれた(図-9)。北東に進んだ粒子は、約2週間に後に沖縄本島西方約100kmに位置する久米島に到達した。その後、石西礁湖に投入されてから約35日後に沖縄本島沿岸域に到達した(図-10)。同様に石西礁湖南側海域に投入した場合においても粒子は黒潮流路に進入し北東方面に輸送されたが、ほとんどが沖縄本島沿岸には接近せず、そのままさらに北東方面に輸送された。また今回の結果では、粒子は八重山諸島と沖縄本島の中間



にある宮古島には到達しなかった。

これらの結果から、石西礁湖で産卵されたサンゴ・オニヒトデ浮遊幼生が沖縄本島沿岸域に輸送され得ることが示された。一方で、サンゴ・オニヒトデ浮遊幼生の輸送経路と到達地点は、物理的な空間距離に依らず、その産卵時期における当該海域の流動場分布によって大きく異なるものであることが分かった。

### (3) 沖縄本島から本州南岸へのオニヒトデ浮遊幼生広域輸送特性

一般的にオニヒトデは1ヶ月程度の浮遊幼生期に適当な基盤を探索した後に着底し、着底後2年間かけて成体へ成長すると言われる。つまり成体が確認される2年前の産卵期における幼生輸送状況を把握することが、海域間でのオニヒトデ幼生の輸送・供給関係を把握する上で重要となる。この事を念頭におき、これまでのオニヒトデ駆除数の集計結果から高知県足摺岬及び和歌山県串本

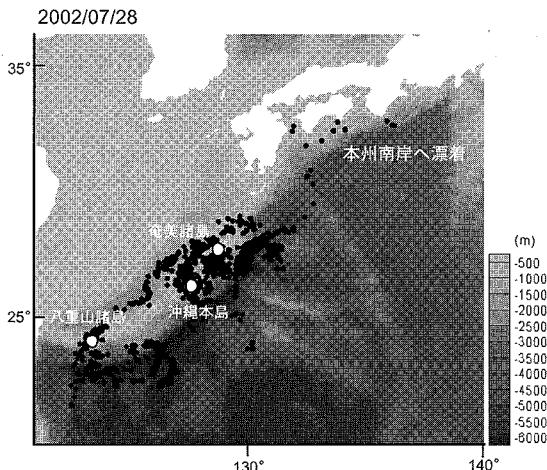


図-11 沖縄本島西岸域に投入した粒子の 50 日後の分布状況（センターは水深）

における 2004 年の発生数ピークに注目し、2002 年産卵期の浮遊幼生輸送状況を粒子追跡計算によって模擬する事で、オニヒトデ幼生の広域輸送特性について検討した。

粒子追跡計算には JCOPE モデルによる流動計算結果を直接使用した。なお、粒子の移流・拡散についての評価方法は前述した通りである。その結果、2002 年産卵期に沖縄本島西岸域に投入した中立粒子は、1ヶ月半ほどの期間で四国沿岸・紀伊半島沿岸に到着することが確認された（図-11）。比較のため 2004 年の同時期についても粒子追跡計算を行ったが、中立粒子は本州南岸へ漂着することはなかった。特に 2002 年と 2004 年の流動場を比較すると、2002 年の場合は黒潮流軸が 2004 年に比べて本州沿岸域に近い場所に存在していたため、粒子が本州南岸へ到達しやすい流動構造になっていたことが考えられる。

また、オニヒトデ駆除数の集計結果より、2002 年には沖縄本島・慶良間諸島周辺においてオニヒトデ成体の発生ピークが見られた。従って 2002 年産卵期には相当の幼生が沖縄本島西岸域に存在していたものと思われる。

つまり、このような幼生の絶対数が多い時期に本州沿岸と南西諸島をつなぐような流動場が存在した事が、四国沿岸・紀伊半島沿岸でのオニヒトデ発生の 1 つの要因となる可能性が示唆された。

## 5. 結論

本研究では、多重ネスティング沿岸海水流動モデルを

開発し琉球列島沿岸域へ適応することで、海水流動特性およびサンゴ・オニヒトデ浮遊幼生輸送特性の解明を試みた。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 黒潮と八重山諸島北側の中間海域では、高気圧性渦が準周期的に発生し、それが黒潮に沿う形で北東に輸送され、20 日程度で沖縄本島西方まで到達する。この渦構造は、石西礁湖から沖縄本島方面への幼生輸送において重要な役割を演じているだけでなく、沿岸域への暖水塊波及といった熱輸送現象にも大きな影響を与えており、
- (2) この高気圧性渦群の南東側縁辺部において非定常的に強い南西方向への流れが生成されることが確認されたが、これがいわゆる黒潮反流に他ならない。その分枝流が沖縄本島南部から西に延びる陸棚による地形効果を受けることによって東に向きを変え、沖縄本島の沿岸域に流入する形になることが分かった。
- (3) これは、2001 年に同海域で行った漂流ブイ調査により判明した慶良間列島から沖縄本島西岸域に向けての表層粒子輸送を支配する流動メカニズムを説明するもので、実際、表層粒子追跡計算はこの現地調査結果を良好に再現することができた。
- (4) オニヒトデ浮遊幼生の輸送経路及び到達地点は海水流動パターンによって大きく異なり、幼生の広域輸送構造は、産卵期と産卵期における周辺流動場に依存していることが分かった。

## 参考文献

- 鈴木庸亮、灘岡和夫、宮澤泰正、波利井佐紀、安田仁奈(2004)：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、海岸工学論文集、第 51 卷、pp. 1146-1150。
- 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 卷、pp. 366-370。
- 灘岡和夫、安田仁奈(2005)：生殖腺観察による琉球列島 5 海域におけるオニヒトデ産卵期の推定ならびに幼生種判別システムの開発、亜熱帯地域の有害・有害生物に関する調査研究報告書、pp. 43-50。
- 宮澤泰正、山形俊男(2003)：JCOPE 海洋変動予測システム、月刊海洋、Vol. 35, No.12, pp. 881-886。
- Guo X, H.Hukuda, Y.Miyazawa and T.Yamagata(1999) : A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio - roles of horizontal resolution on JE BAR, Journal of Physical Oceanography, vol.33, No.1, pp. 146-169