

沖縄・石西礁湖における海水流動および濁質・熱・サンゴ幼生 輸送特性解明のための総合的観測と解析

三井 順*・灘岡和夫**・鈴木庸彦***・熊谷 航***・石神健二****
波利井佐紀*****・Enrico C. Paringit*****・田村 仁*****・安田仁奈***
飯塚広泰***・濱崎克哉*****・木村 匡*****・上野光弘*****

日本最大のサンゴ礁海域である石西礁湖は、近年様々な環境ストレスにより生態系の劣化が危惧されているが、その適切な保全策を探るための基本的情報が不足している。本研究では、様々な物理環境の連続観測を行うとともに、サンゴ産卵期に多点サンゴ幼生採集および漂流ブイによる表層粒子追跡を行うことで、石西礁湖における物質・熱輸送特性を支配する海水流動特性や、水温・濁質環境特性、サンゴ幼生の輸送特性の概要を明らかにした。さらに、石西礁湖海域全体を対象とした海水流動数値シミュレーションを行い、この海域で卓越する潮流を概ね再現することができた。

1. はじめに

石西礁湖は、琉球列島の南西端に位置する日本最大のサンゴ礁海域であり、非常に高いサンゴの種多様性が認められているなど、サンゴを基盤とした豊かな生態環境が成り立っている。しかし、石西礁湖を始めとする琉球列島のサンゴ礁は近年、オニヒトデの大量発生によるサンゴの食害や陸域からの赤土汚染、高水温などによるサンゴの白化といった様々な環境ストレスによって生態系の劣化が著しい。このような様々な環境問題を解決するためには、その海域の物質・熱輸送を支配する海水流動場や水温特性、陸域からの負荷を含めた濁質環境等を明らかにする必要がある。著者らは、2002 年 10 月上旬から 12 月上旬にかけての冷却期に、このような目的のための総合的な現地観測を石西礁湖について行い、その結果を昨年の本論文集で報告している（灘岡ら、2003）。

本稿では、この冷却期の観測に引き続いて行われた 2003 年 5 月上旬から 7 月上旬までの加熱期での総合的な現地観測の結果について述べる。この加熱期の観測は、期間中に梅雨期とサンゴの一斉産卵期を含む、ということで 2002 年の冷却期の観測と大きく異なる要素を含んでいる。特に、サンゴ産卵に関しては、その浮遊幼生の挙動を明らかにすることが、他のサンゴ礁海域や石西礁湖自体へのサンゴ幼生の供給特性を明らかにすることにつながることも重要な課題となっている。石西礁湖の基本的な海水流動場の特性については灘岡ら（2003）

ですでに述べているので、本論文では、主として、加熱期の水温特性や、暖水塊の波及・台風通過等のイベント時の水温・濁質環境の変化、さらにサンゴ幼生の輸送過程について検討を行った結果について述べる。さらに、石西礁湖全域を対象として行った海水流動数値シミュレーションの結果についても述べる。

2. 現地観測

(1) 方法

2003 年 5 月上旬から 7 月上旬の約 2 ヶ月間、多数の自記式センサーを用いて表層流速、水位、波浪、濁度、塩分、水温、風向風速、日射量、雨量に関する連続観測を行った。観測地点を図-1 に示す。測器係留方法、計測機器の測定モード、各観測地点の水深と観測項目については 2002 年の観測とほぼ同じであるので、灘岡ら（2003）を参照されたい。

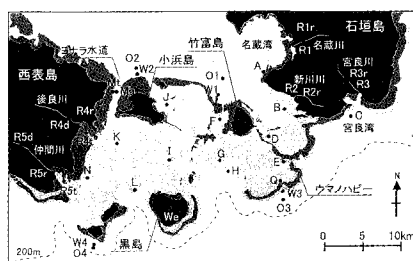


図-1 観測地点

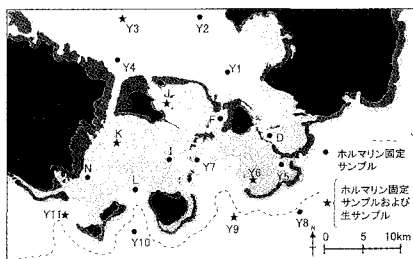


図-2 サンゴ幼生採集地点

- * 修(工) (株)テトラ ブロック本部 技術部
- ** 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
- *** 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
- **** 元東京工業大学 開発システム工学科
- ***** 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
- ***** 博(工) 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
- ***** 正 会 員 博(工) 日本学術振興会特別研究員
- ***** (財)自然環境研究センター研究員
- ***** (財)自然環境研究センター上席研究員

これらの観測とは別途に、サンゴの一斉産卵期後半の4日間(2003年5月16日から19日)を対象に、サンゴ幼生の輸送特性解明を目的とした観測を行った。具体的には、GPS搭載小型漂流ブイ(灘岡ら, 2002)によるラグランジュ的流動観測を行うとともに、周辺外洋を含む多点サンゴ幼生採集による幼生の個体数密度および形状の時空間変化を調べた。漂流ブイ観測では、15個の漂流ブイをスリック(サンゴ卵・幼生の带状集合体)地点を含む石西礁湖内および周辺のさまざまな地点に投入して、その後の移動軌跡を観測した。サンゴ幼生採集は、石西礁湖内および周辺外洋18地点(図-2)で午前と午後の1日2回採集し、幼生の個体数密度を調べた。表層での採集はプランクトンネットを用い、水面下5mと10mでの採集は水中ポンプを用いた。採取したサンプルは船上でホルマリン固定したが、ホルマリン固定した場合、幼生形状が変化するため、ホルマリン固定せずに生きたまま持ち帰るサンプル(以下、生サンプル)も6地点で別途

採集し、顕微鏡で拡大して幼生の形状を撮影・解析した。

(2) 結果および考察

a) 加熱期水温特性

加熱期水温特性の特徴として、まず、成層が発達することがあげられる。2003年6月末に行ったSTD観測による外洋水温の鉛直分布の例を図-3に示す。表層からの連続成層となっていることがわかる。

また、水温の時系列をみると、内部波による水温変化が大きいことがわかる(図-4)。この水温変動に対してスペクトル解析を行った結果、北側・南側外洋の両方で、M2周期(12.42時間)が卓越する内部潮汐であることがわかった。

次に、冷却期、加熱期それぞれにおける水温の空間的な分布をみるために、2002年11月9日~12月6日、2003年5月14日~5月27日における表層水温の平均値を

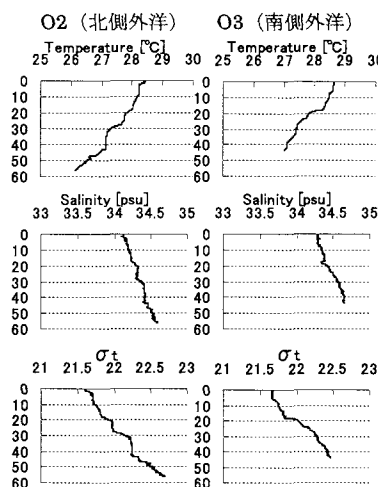


図-3 外洋における水温、塩分、密度の鉛直分布の計測例

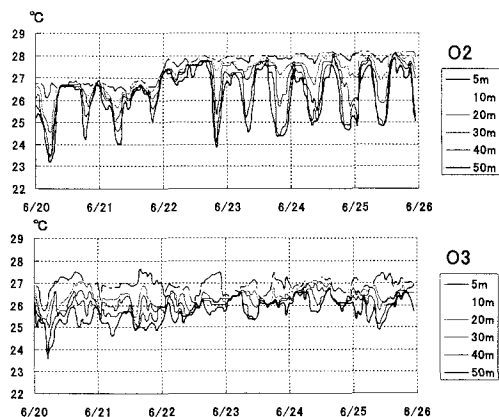


図-4 外洋水温の時系列

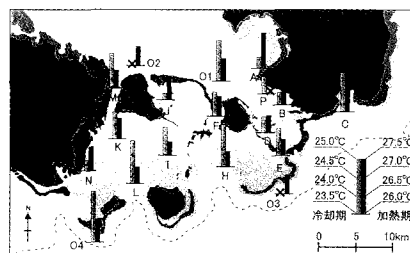


図-5 表層水温の平均値

左: 2002年11月9日~12月6日

右: 2003年5月14日~5月27日

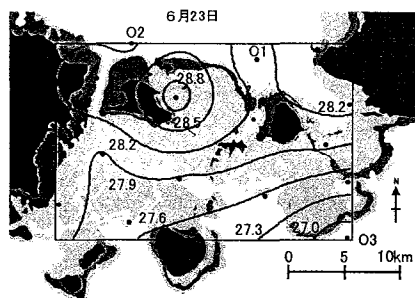


図-6 暖水塊波及後の表層水温(6月23日)

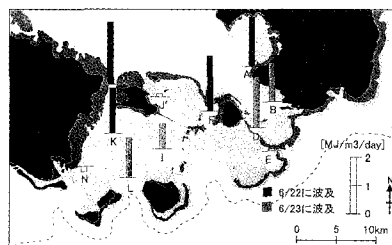


図-7 暖水塊波及時の移流熱フラックス

(6月22日、23日の内でフラックスが大きい方を暖水塊波及時とした)

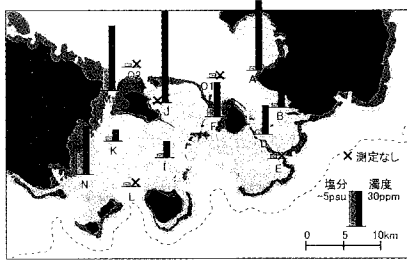


図-8 台風通過時の塩分低下量・濁度上昇量

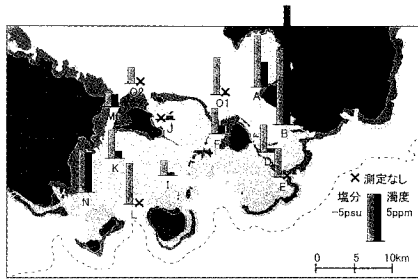


図-9 出水時の塩分低下量・濁度上昇量

図-5に示す。特に冷却期では、水温の空間的なコントラストが明確にみられ、礁湖内では外洋に比べて低水温であった。冷却期に比べて加熱期では表層水温の局所性があり、あまり顕著ではないことがわかる。

b) イベント的な外洋水塊の波及による水温変化

再び図-4の水温時系列をみると、石西礁湖北側外洋のO2地点では、6月22日前後に全水深帯で急激な水温上昇がみられ、表層水温は約27°Cから約28°Cへと不連続に上昇している。それに対して、南側外洋のO3地点では水温上昇はみられない。また、水温上昇後(6月23日)の表層水温の1日平均値をコンター図で表したものを図-6に示す。水温上昇前の水温分布は空間的にほぼ一様であったが、上昇後は石西礁湖北側が高水温となり、南側が相対的に低水温となっていて、南北方向に水温の空間分布がはっきりついている様子がわかる。この水温上昇は、石西礁湖の北部を流れる黒潮の分枝流の波及によるものであると考えられる。このような移流による熱輸送を定量的に把握するために、熱収支解析から各地点での水平移流拡散熱フラックス(以下、移流熱フラックス)を求めた。その結果、6月22日あるいは23日に移流熱フラックスのピークが見られ約1~2 MJ/m²/dayの値となった。このことは、これらの地点において外部からの熱の急激な流入があったことを示している。ピークの時期とそのときの移流熱フラックスを地図上に示すと、図-7のようになり、暖水塊が北西側外洋から波及している様子がわかる。また、水温上昇は石西礁湖内ではなだらかなり、暖水塊は石西礁湖内では拡散しながら

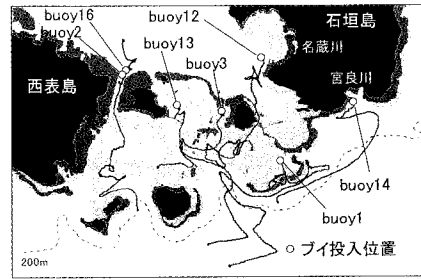


図-10 漂流ブイの軌跡

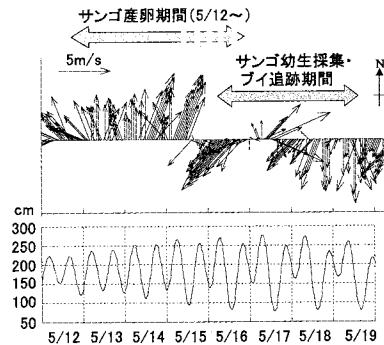


図-11 サンゴ産卵期間中の風および潮位

徐々に波及したものと考えられる。

c) 濁質環境特性

図-8は、2003年の観測期間中に石西礁湖を直撃した台風6号通過時における、塩分低下量および濁度上昇量を示したものである。ここでの塩分低下量・濁度上昇量とは、台風前の塩分・濁度値を基準として、台風通過前後で最も低塩分・高濁度となった時の値との差を示している。比較のために、出水時における塩分低下量および濁度上昇量を図-9に示す。出水時に比べて、塩分低下量は小さいが、濁度については非常に大きな上昇が見られる。このことは、このときの濁度上昇は河川から直接流入したものではなく、ほとんどは台風による底質の巻上げによるものであることを示している。

石垣島名蔵川・宮良川河口周辺に投入した漂流ブイ(buoy 12, 14)の軌跡をみると、石西礁湖内あるいはその周辺へ輸送されていることがわかる(図-10)。漂流ブイ観測は出水のない、平常時に行ったものであるが、河川ブルームがこのようなブイ軌跡パターンに対応した流れに乗ることによって、流出した赤土が石西礁湖内へ流入する可能性があることを示唆している。

d) サンゴ幼生輸送特性

・2003年サンゴ産卵状況

サンゴ産卵期間の潮位、風速ベクトルを図-11に示す。スリックが5月13日から17日まで観察されていることから、2003年の産卵は5月12日から始まり、その後

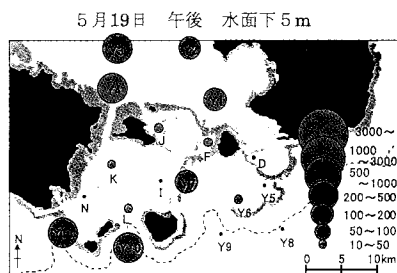
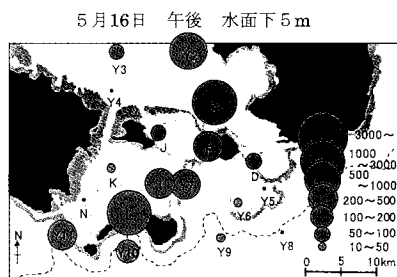
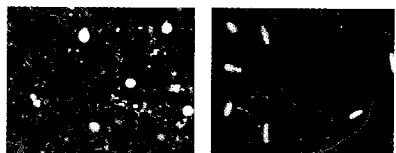
図-12 1 m³あたりのサンゴ幼生の個体数

図-13 サンゴ幼生の画像の例

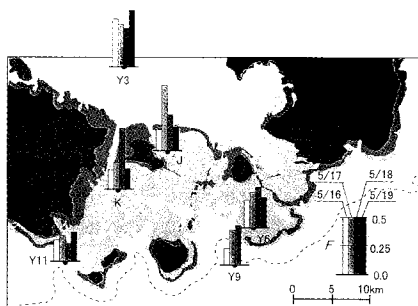


図-14 サンゴ幼生の形状 (表層での値)

数日間にわたって徐々に産卵していたと考えられる。

・サンゴ産卵期におけるラグランジュ的流動特性

図-10に軌跡を示した漂流ブイの調査は、サンゴ産卵期の後半にあたる5月16日から19日の期間に行ったものであるが、石西礁湖内及び周辺に投入されたのべ16個のブイのうち、12個が南側へ輸送された。サンゴ産卵期間中の風を見ると、ブイ追跡期間中は、北東風が卓越しており、平均風速は2.9 m/s、最大風速6.4 m/sであった。この北東風による南西方向の吹送流によって、ブイが平均的に南側へ輸送されたものと考えられる。

・サンゴ幼生の個体数密度および形状

プランクトンネットサンプリングにより得られたサン

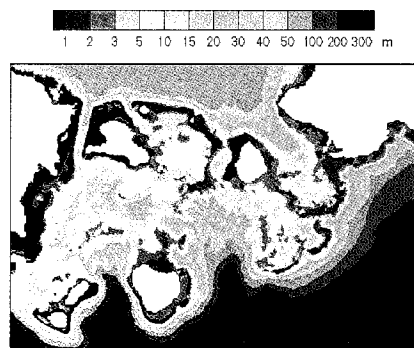


図-15 計算領域 (色の違いは水深を表す)

ゴ幼生数データを、1 m³あたりの海水中に存在したサンゴ幼生の数の形で図-12に示す。5月19日午後の幼生数密度分布をみると、礁湖内に比べて外洋側で多く分布しており、5月16日の時点と比較すると、石西礁湖で生まれたサンゴ幼生の一部が3日間程度の期間で石西礁湖外へ輸送されていることが示唆される。

次に、生サンプルの幼生画像から、幼生の形状の時空間変化を調べた。幼生画像の例を図-13に示す。一般に、サンゴの卵は球状をしており(図-13左)、受精後、発生が進んでプラヌラ幼生となると洋なし型や棍棒状となる(図-13右)。このことから、幼生の形状が細長くなるほど、受精からの日数が経過していると考えられる。撮影した画像上で、幼生の周長と面積を測定し、次式で定義される無次元数 F によって幼生形状(細長さ)を指標化した。

$$F = \frac{(\text{周長})^2}{(\text{面積}) \times 4\pi} - 1 \dots \dots \dots (1)$$

上式からわかるように、完全な円形の場合、 $F=0$ となり、形状が細長くなるほど F の値は大きくなる。この F の値を画像解析によって算出した結果を図-14に示す。これから、5月16日から18日にかけて幼生が細長くなっていき、成長する様子が読み取れる。また、礁湖北側外洋では5月16日の時点ですでに成長した幼生が多く存在していたことがわかる。このことと、図-12で、5月16日から19日にかけて北風が卓越していたにもかかわらず、北側外洋域では高いサンゴ幼生個体数密度となっていることと考え合わせると、プランクトンネット調査を開始した5月16日以前の数日間は南風が卓越していた(図-11)、それによって産卵期初期の産卵によるサンゴ幼生が石西礁湖から北側外洋域に輸送された可能性が考えられる。もちろん、石西礁湖に限らず北側外洋域に面する石垣島や西表島沿岸のサンゴ礁域からのサンゴ幼生も考えられる。

3. 数値シミュレーション

(1) 方 法

計算領域を図-15に示す。また、計算領域サイズ、格子数、格子幅、計算時間間隔を表-1に示す。水深データについては、水深2 m以上の海域については海図からデータを取得し、水深2 mより浅い海域については、Paringit・灘岡(2002)の手法により、衛星画像から逆推定した値を用いることによって、礁嶺等のごく浅い海域の地形効果をより正確に取り込むことを試みた。なお、計算負荷を考慮して、水深300 m以上の海域は全て水深300 mとして計算を行った。

境界条件は、西側の境界はslip壁とし、北・南・東側の境界では、水位については観測値をもとに主要4分潮の潮位を与え、流速についてはSommerfeldの放射条件を与えた。初期条件は、各領域の水位及び流速に対して全て0を与えた。

干潮時に干出する部分では、水深0.1 mを閾値として海陸判定を行い、陸域部分では流速が0となるようにしている。底面摩擦係数については、水深によって係数を変えた。風応力は、現段階では考慮しないで計算を行った。主なパラメータを表-2に示す。

表-1 計算条件

領域サイズ	35 km×23 km
計算格子数	350×230
計算格子幅	100 m
計算時間間隔	1 s

表-2 主なパラメータ

水平拡散係数	1.0
コリオリパラメータ	5.99×10^{-5}
底面摩擦係数	水深5 m以下： 1.0×10^{-3} 水深50 m以下： 2.6×10^{-3} 水深50 m以上： 1.0×10^{-3}
水面摩擦係数	0

(2) 結果および考察

まず、計算結果の妥当性の検証として、各観測地点における流速の u - v プロットを図-16に示す。観測値は、流速を主要4分潮で調和解析して、潮流成分を抜き出したものを用いている。観測値と比較して、その特徴を概ね再現できていることがわかる。

4. おわりに

今回の観測および海水流動計算から得られた主要な結論を以下に示す。

- ① 黒潮の分枝流に伴うものと思われる暖水塊が、北側外洋から礁湖内へとイベント的に波及する様子が観測

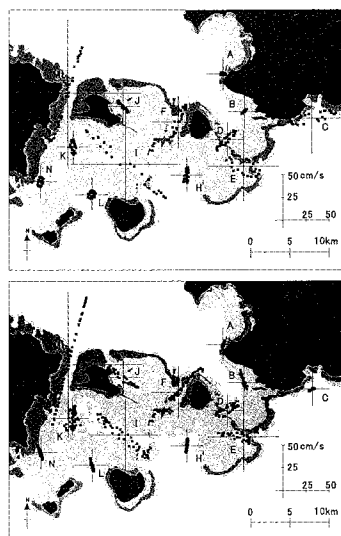


図-16 表層流速の観測値(上)と水深平均流速の計算値(下)の u - v プロット

された。熱収支解析を行うことで、その時期に有意な水平移流熱フラックスがあったことが確認された。

- ② 台風通過時には、石西礁湖内全域で底質の巻上げが起こり、濁度が顕著に上昇する。
- ③ 漂流プイの軌跡から、石垣島名蔵川・宮良川河口から流出した赤土が礁湖内へ流入する可能性が示唆された。
- ④ 漂流プイ追跡およびサンゴ幼生採集の結果から、礁湖内から外洋域への幼生輸送過程の存在が示唆された。
- ⑥ 数値計算により、地形効果による局所性の大きな本海域の潮流の特徴を概ね再現することができた。

なお、本研究は、環境省平成15年度石西礁湖自然再生調査による調査研究委託ならびに日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A(1)(一般)(研究代表者：灘岡和夫、課題番号：14205071)を得て行ったものである。

参 考 文 献

- 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): 小型漂流プ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・三井 順・濱崎克哉・波利井佐紀・田村 仁・鈴木庸孝(2003): 沖縄・石西礁湖における海水流動構造および濁質・淡水・熱輸送特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1036-1040.
- Paringit Enrico・灘岡和夫(2002): 多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法の応用, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1191-1195.