

平成 1 5 年度調査結果 中間報告概要
(その他の調査項目)

1. 海水流動等に関する観測

石西礁湖における海水流動等の調査は、2002年から2003年にかけて2期にわたって実施した。観測期間は2002年10月上旬から12月上旬（以降、「秋期」と、2003年5月上旬から7月上旬（以降、「春期」と）である。

この調査により、石西礁湖全域を対象とした流動構造・濁質輸送・水温特性に関し、次のことが明らかになった（表1）。

表1 主な調査結果

調査期間		2002年10月上旬～12月上旬	2003年5月上旬～7月上旬
気象	風向	北東～北北東	南～南南西
	総降雨量	石垣:784mm、大原:542mm	石垣:380mm、大原:394mm
	気温	日平均18～28	日平均24～30
	台風	なし	直撃 最大21.7m/s、有義波高最大6.1m
海水流動	特徴	潮流が卓越し、主軸方向が明確。流速の変動幅、主軸方向、位相は場所により大きく異なる。潮流には調査期間の違いは少ない。吹送流が卓越	潮流が卓越し、主軸方向が明確。流速の変動幅、主軸方向、位相は場所により大きく異なる。潮流には調査期間の違いは少ない。吹送流が卓越
	濁度	顕著な濁度の上昇は石垣島、西表島周辺部のみ	顕著な濁度の上昇は石垣島、西表島周辺部のみ 台風直撃時に礁湖全域で顕著な濁度上昇
水温特性	表層水温	24.5～26 石西礁湖内は外洋側より低水温 底層(水深50m)のみで水温変動あり	26～27 石西礁湖内は外洋側よりやや高水温 水深10m程度まで水温変動あり

以下に、各観測項目の結果を概説する。

1-1 気象

・風

秋期では北東あるいは北北東風が卓越しており、春期では南あるいは南南西風が卓越していた。また、石垣の地上気象台における風速と黒島で測定した風速を比較すると、強風時では黒島における風速の方が大きくなる傾向があった。

・降雨

石垣における秋期の総降雨量は784mm、春期の総降雨量は380mmであった。各月の降雨量の平年値と比較すると、秋期に含まれる2002年10月において平年値を大きく上回る降水量があった。春期については2003年6月に平年値を上回る降水量があった。各降雨イベントについての詳細は後述する。

・日射

2002年1月から2003年7月の1日平均日射量を測定した結果、冷却期にあたる秋期では全体的な傾向として徐々に日射量が低下し、加熱期にあたる春期では徐々に日射量は上昇し、春期が秋期より日射量が多かった。

・気温

秋期では、1日平均気温は18～28の間で徐々に低下しており、春期では、1日平均気

温は 24～30 の間で徐々に上昇していた。

1 - 2 イベント的気象海象擾乱

・台風

台風 6 号が 2003 年 6 月 18 日に石西礁湖を直撃した。風速は最大 21.7m/s で、有義波高¹は石西礁湖南側外洋において最大で 6.1m であった。

・降雨

降雨イベントにおける総降水量と 1 時間最大降水量を表 2 に示す。全体的に降雨前は南風で降雨後は北風となっている。

表 2 観測期間中の降水量

	期 間	単 位	石垣	大原
秋期	2002年10月7日～12月7日	総降水量(mm)	784.0	542.0
	10月18日～10月19日	一降雨イベント中の総降水量(mm)	118.5	94.0
		1時間最大降水量(mm)	33.5	25.0
	10月18日～10月19日	一降雨イベント中の総降水量(mm)	339.0	124.0
		1時間最大降水量(mm)	67.5	25.0
春期	2003年5月8日～7月4日	総降水量(mm)	380.0	394.0
	6月6日～6月8日	一降雨イベント中の総降水量(mm)	212.5	206.0
		1時間最大降水量(mm)	32.0	48.0
	10月16日～10月20日	一降雨イベント中の総降水量(mm)	100.0	62.0
		1時間最大降水量(mm)	18.0	16.0

¹ 有義波高：海上の 1 点を連続して通過する波のうち、高いほうから 3 分の 1 を選びそれらの波高の平均値。

1 - 3 海水流動

石西礁湖内の各観測地点における流速から調和解析により潮流成分を抜き出した結果を 図1 に示すと、潮流成分が最も大きく、その中でも M2 分潮 (12.42 時間周期) の成分が最も卓越していた。潮流の特徴として、主軸方向が明確で、流速の変動幅、主軸方向、潮流の位相が場所により大きく異なることが挙げられる。

潮流以外の流速成分 (以降、「平均流」と呼ぶ) について、各観測期間における平均値を比較すると、流速自体は小さいが、両期間の傾向は異なっている (図2)。秋期では E 地点 (ウマノハピー北) や I 地点 (黒島北) など、西向きの成分を持つ地点が多い。これは、全期間の平均風速ベクトルが南西向きであることと対応しており、吹送流が平均的に西向きであったためであると考えられる。春期では平均風速ベクトルが小さく、また平均流速ベクトルについても明確な傾向は見られない。

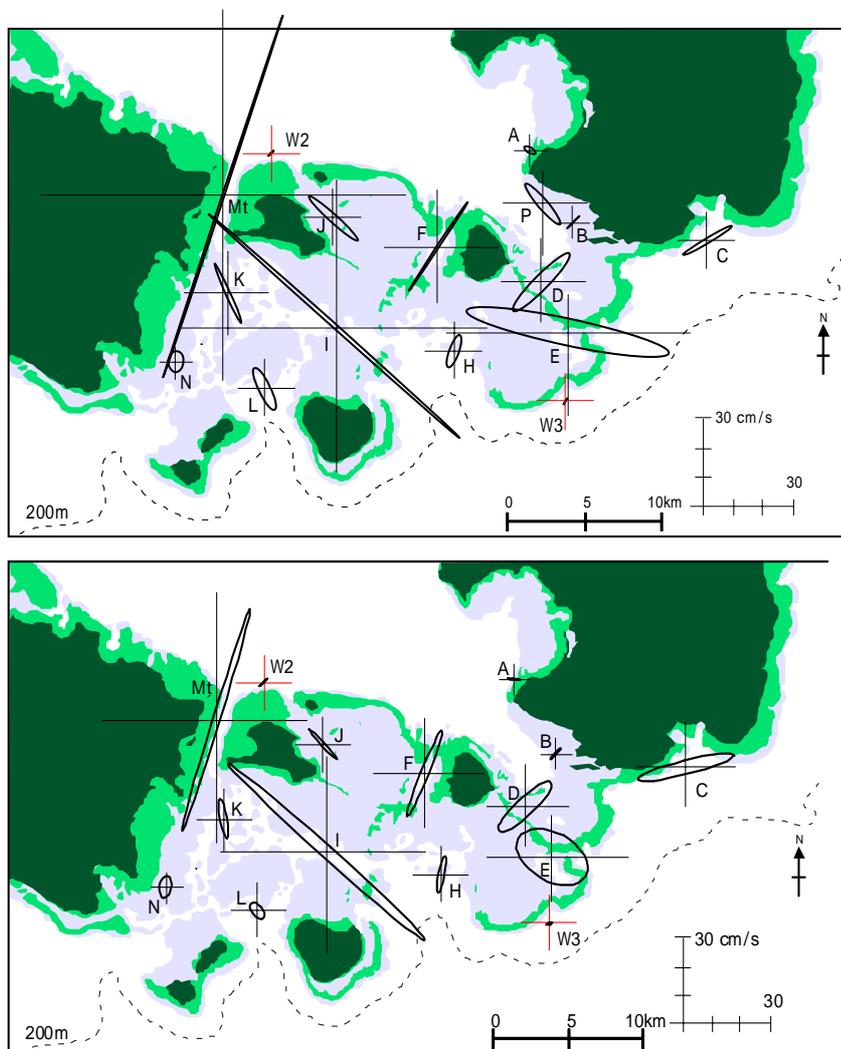


図1 潮流楕円 (M2 分潮) 上 : 秋期、下 : 春期

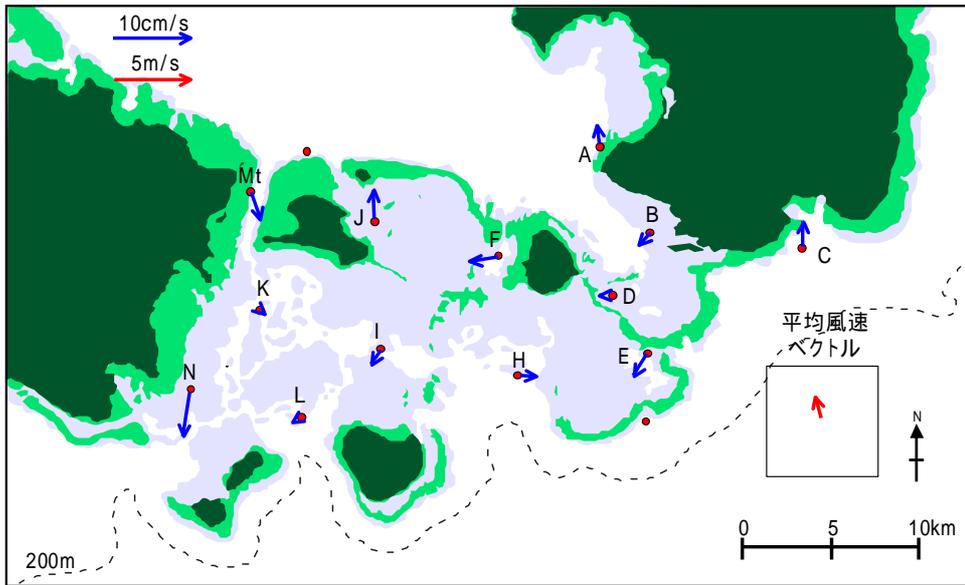
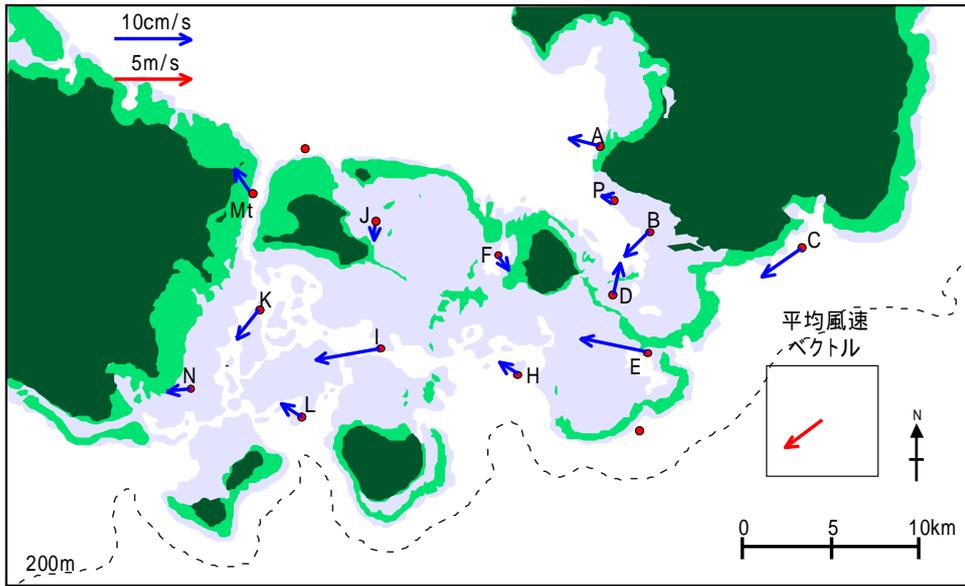


図2 平均流速ベクトル（上：秋期、下：春期）

1 - 4 水温特性

外洋の水温構造として STD 観測による水温・塩分の鉛直分布を測定した。秋期は冷却期であり、水面下 40m 以上まで表層混合層となっていた。一方、春期は加熱期であり、表層からの連続成層となっていた。また、両期間において内部波が観測されており、大きな水温変動が見られた。

・局所的加熱、冷却効果

各期間における平均表層水温をみると、冷却期である秋期では、外洋側に比べて石西礁湖内の方が低水温となる傾向があった。特に水深が浅い海域や外洋との海水交換があまりないところでは数日スケールの水温低下が顕著であり、これは気温の低下などの気象擾乱に対する低温化応答幅が大きく現れることによる。A 地点（名蔵湾南）、J 地点（小浜島東）、N 地点（西表島南東）などの地点で特に顕著であった。一方、春期の平均表層水温をみると、場所による違いはそれほど顕著ではなかったが、小浜島東の浅い海域などでは、高水温となる傾向が見られた。

・外部潮汐による熱の水平移流効果

上で述べたような水深による加熱・冷却効果の影響の違いにより、石西礁湖内と外洋では水温のコントラストが生じるため、それらの水塊をつなぐ水路周辺では、水平移流効果による潮汐周期の水温変動が生じる。M 地点（ヨナラ水道）、I 地点（黒島北）、E 地点（ウマノハピー北）などで水平移流の効果が顕著であった。

・外洋水塊の貫入

石西礁湖北側外洋において、2003 年 6 月 22 日に急激な水温上昇がみられた。水柱全体の水温が約 1℃ 上昇しており、水面下 5m では約 27℃ から約 28℃ へと変化していた。O2 地点（北西側外洋）では 22 日 0 時頃、O1 地点（北東側外洋）では 22 日 12 時頃に水温上昇が起きていた。南側外洋の O3 地点ではこのような水温上昇はみられない。この水温変動は黒潮の分枝流によるものと考えられるが、分枝流による暖水塊が石西礁湖内へ貫入しており、例えば F 地点（竹富島西）では 23 日午後から 24 日 0 時頃にかけて約 1℃ 上昇（底層で 27℃ から 28℃ へ）がみられ、K 地点（小浜島南西）では 22 日 0 時から 23 日 0 時頃にかけて全水深で約 1℃ 上昇していた。J 地点は平均の水温レベルが高く、すでに 28℃ 近くあったため、暖水塊によると思われる水温上昇はみられない。このときの北側外洋からの暖水塊の影響は A、B、D、F、I、K、M 地点でみられたが、E、H、L、N 地点へは及んでいないようであった。

1 - 5 イベント時における物理環境特性

・出水時

- 淡水・濁質輸送特性 -

02 年 10 月 19 日頃と 03 年 6 月 7 日頃における降雨イベント時における塩分低下量と濁度上昇量を図 3 に示す。10 月 19 日のデータ中 O2、O3、I、Mt 地点における塩分の値と 6 月 7 日のデータ中 O3、O4、C、H、J 地点における塩分の値、C、E 地点における濁度の値は台風

などによる測器の流出、測器の不具合等によって欠測となっている。

両期間において出水時の顕著な濁度上昇量は石垣島および西表島周辺に限られることがわかった。また、特に石垣側の方が西表側に比べて濁度上昇が顕著であり、石垣島からの赤土流入の割合が大きいことがわかった。

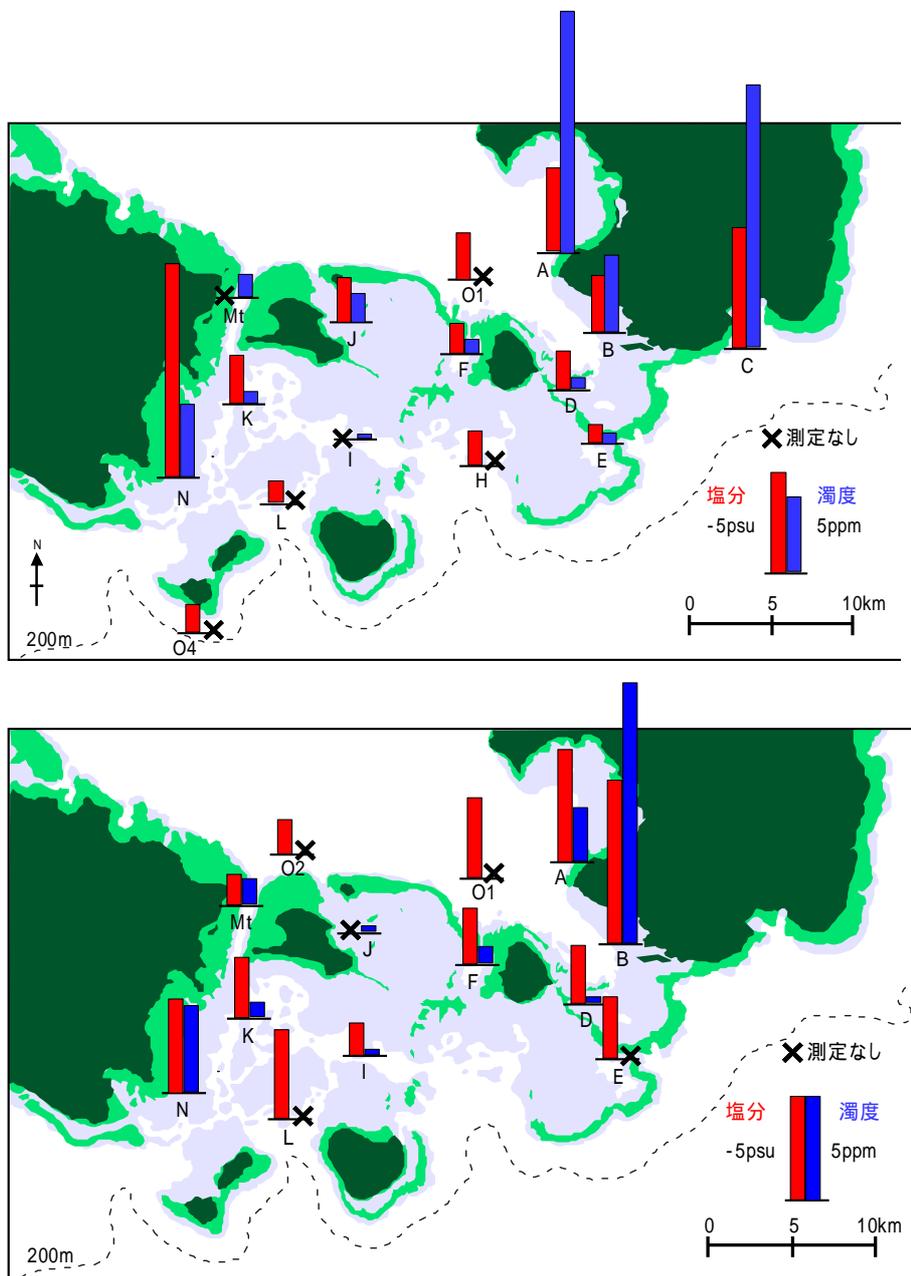


図3 出水時の塩分低下量と濁度上昇量
(上：2002年10月19日、下：2003年6月7日)

・台風時

- 淡水・濁質輸送特性 -

03年6月18日頃の台風通過時における塩分低下量と濁度上昇量を図4に示す。塩分低下量はMt、N地点を除くとそれほど大きくないが、濁度上昇量は全地点で大きな値となっていた。これは台風による底質の巻き上げによるものであると考えられる。

- 水温特性 -

台風通過前後の外洋における水温の時系列変化を見ると6月15日までは気象・海象条件は平常時とほぼ変わらず、16日頃から風速や波高が大きくなり、降雨も始まっている。石西礁湖北側外洋の01、02地点の水温を見ると、16日から18日頃にかけて内部潮汐による変動幅は小さくなっていき、表層付近の水温は次第に低下していることがわかる。このことは、台風により海水の鉛直混合が起こっていることを示している。02地点では水面下5mの水温は、台風通過前は約27であり、2～3日かけて25.5位まで低下しており、その後数時間経つと約26.8まで水温レベルは回復するが、その約3日後に暖水塊が及んでくるまで台風通過前の27まで上昇する事はなかった。

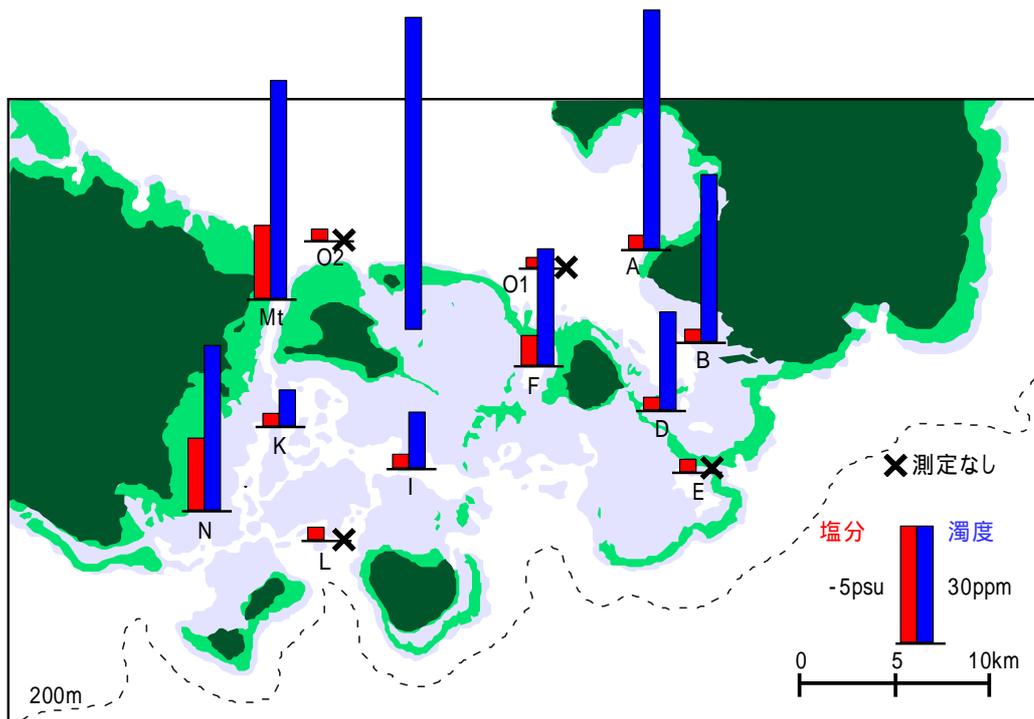


図4 台風時(2003年6月17日~18日)の濁度上昇量と塩分低下量

1 - 6 サンゴ幼生輸送特性

2003年5月12日の夜から石西礁湖内でサンゴの産卵が観察されており、その後数日間にわたって産卵が起こっていた。5月16日から19日にかけて、GPS搭載漂流ブイを用いてサンゴ幼生を想定した表層粒子の追跡を行った結果、漂流ブイは非常に複雑な経路を取りながら、全体的に南側へ輸送される傾向が見られた(図5)。この時期の風は、産卵が始まった5月12日から15日昼頃までは南風が卓越し、産卵時期の後半および漂流ブイ観測を行った期間は北あるいは北東風が卓越していることから、漂流ブイが南側へ流れた主な要因として、風による吹送流が効いていると考えられる。つまり、漂流ブイの追跡によって、産卵時期の後半に産まれたサンゴ幼生の一部分は石西礁湖の南側外洋へと輸送されたことが示唆された。

漂流ブイ観測と同時期に行ったサンゴ幼生採集の結果によると、石西礁湖北側外洋にも高密度でサンゴ幼生が存在していたが(図6)、石西礁湖内で産まれた幼生が北側の外洋へ輸送されたのか、あるいは他の海域からのものであるのか、現在のところ不明である。

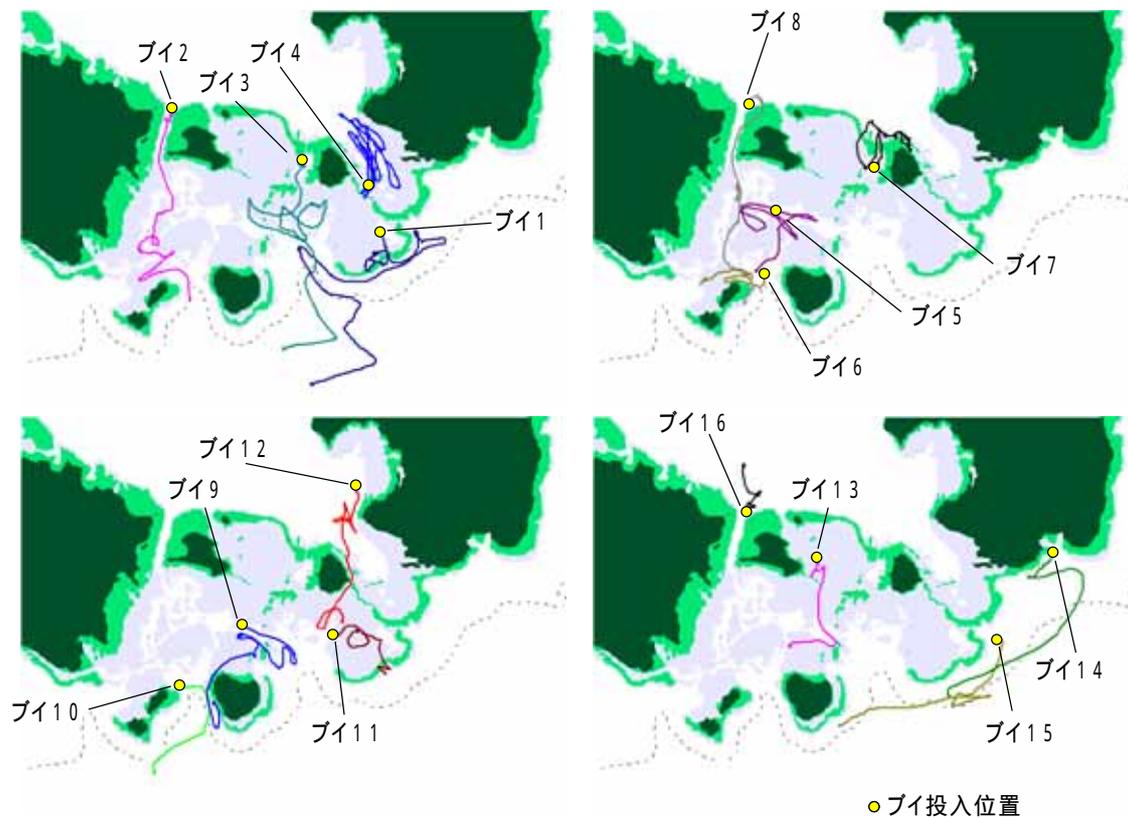


図5 漂流ブイの軌跡

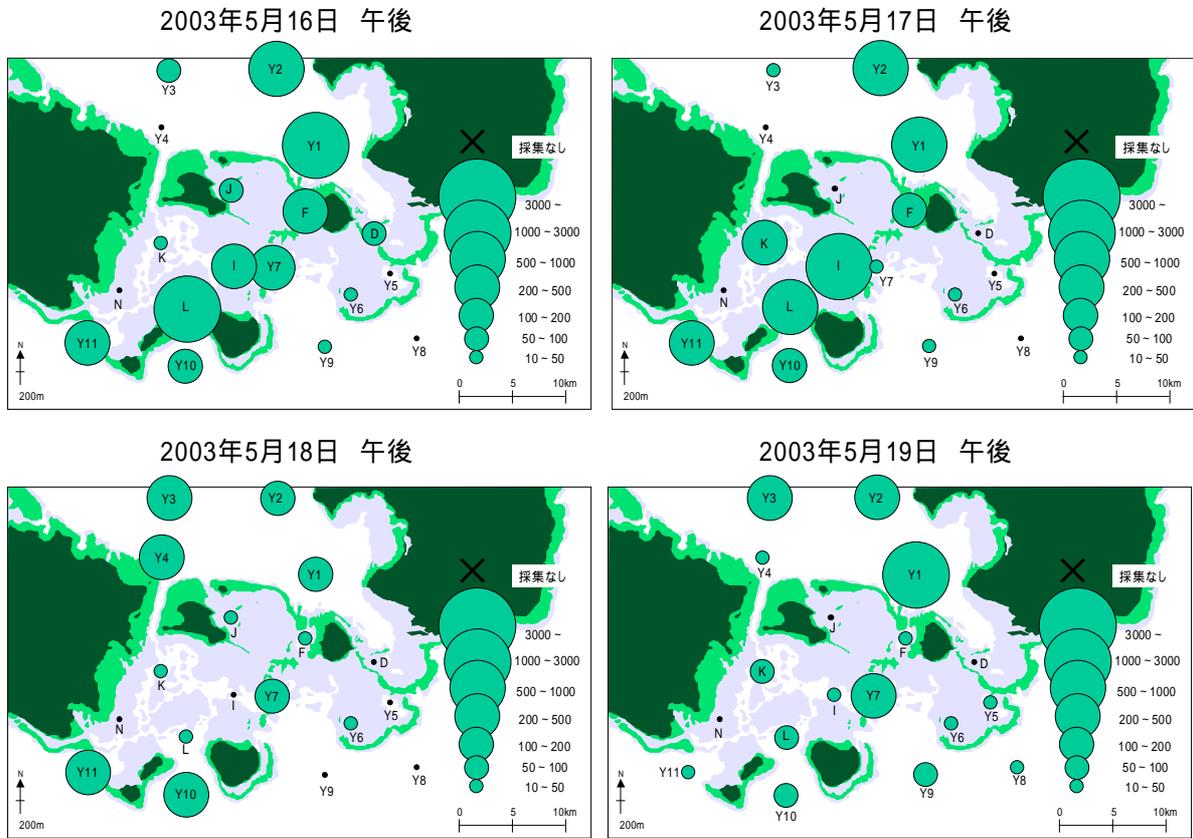


図6 1立方メートルあたりのサンゴ幼生の個体数（水深5mでの採集）

今後必要と思われる調査についての提案

(灘岡研究室)

1) 赤土流入について

赤土の発生源である陸域の評価を定量的に行うため次の調査が必要である。

- ・ リモートセンシングに基づく陸域の土地利用状況や植生被覆状況の把握
- ・ 各流域からの赤土流出量を、赤土流出算定モデル (Paringit & Nadaoka, 2003) 等によって定量的に評価
- ・ 過去にさかのぼって衛星画像を解析し、土地利用と植生被覆の経年変化を把握
- ・ 各主要河川の河口域周辺での海水流動・濁度に関するより詳細な調査

2) 石西礁湖を対象とした3次元海水流動モデルの開発と応用

3次元海水流動モデルを開発し、河川プルームなどの密度流効果が顕著なケースでの計算や吹送流の計算など、流動場の3次元性が顕著になる複雑な流動場の解析を行う。

これにより、周辺河川からの赤土や淡水流入過程等をより詳細に解析することが可能になる。さらに、夏期における外洋からの相対的に低水温の水塊の石西礁湖内への流入・波及プロセスをより現実に近い形で再現できるようになる。サンゴの重点的保護区域の合理的な設定に際しての有力なツールとなる。

3) 石西礁湖の水深データ算出手法の検証

石西礁湖内の流動場の解析には、詳細かつ正確な水深データが必要である。本年度実施中の平面2次元潮流数値シミュレーションでは、比較的水深の深い部分は海図からデータを取得し、水深5mより浅い海域については最近開発された 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ている。典型的な海底地形の領域で、検証のための実測データを得る必要がある。

4) 外洋からの水塊の石西礁湖に向けての波及過程の解明

ニライデータや沖縄亜熱帯計測技術センターの遠距離海洋レーダによる広域海水表面流動分布データ、数値解析等により、外洋水塊が石西礁湖にどのように伝播・波及し、影響を及ぼすのかを明らかにする必要がある。これにより、外洋の低水温塊や高水温塊がどの程度石西礁湖の水温環境に大局的に影響を及ぼすのかを知ることができる。

5) サンゴ幼生・オニヒトデ幼生の広域輸送過程の解明

石西礁湖は、琉球列島全体に対する広域的なサンゴ幼生の供給源になっている可能性があるため、広域的な漂流プイ調査や海水流動数値計算等を通じて、これを検証する必要がある。特に、石西礁湖海域から黒潮域にどのように接続しているのかを解明したい。沖縄亜熱帯計測技術センターの遠距離海洋レーダによる広域海水表面流動分布データやニライデータを利用し、同時にサンゴ幼生の広域的なプランクトンネットによる分布密度調査を行うことが望ましい。

オニヒトデ発生についても、その発生源を明らかにするために、モノクローナル抗体による新たなオニヒトデ幼生判別技術等を用いたオニヒトデ幼生の広域調査が望まれる。

2. サンゴ加入等の調査結果

2 - 1 サンゴの加入状況

2003 年の稚サンゴの加入状況を把握するために、石西礁湖内の 10 地点に設置した。定着基質としては天草陶石 (10 cm x 10 cm x 1.3 cm) を用いた。各地点にあらかじめブロック 5 個を設置し、そのブロック上に埋め込まれた 3 本のボルトに上下 2 枚ずつの 6 枚、各地点には合計 30 枚の定着版をミドリイシ類の一斉産卵直前の 5 月 10 日前後に設置した。

3 か月後の 8 月下旬に定着版を回収し、版上に定着した稚サンゴをミドリイシ属、ハナヤサイサンゴ科、その他に区別してカウントした。加入はミドリイシ属、ハナヤサイサンゴ科いずれも出現したが、ハナヤサイサンゴ科ではトゲサンゴが、またその他ではミレポラ属が多く見られた (図 7)。



図 7 プレート上の稚サンゴ (顕微鏡写真)

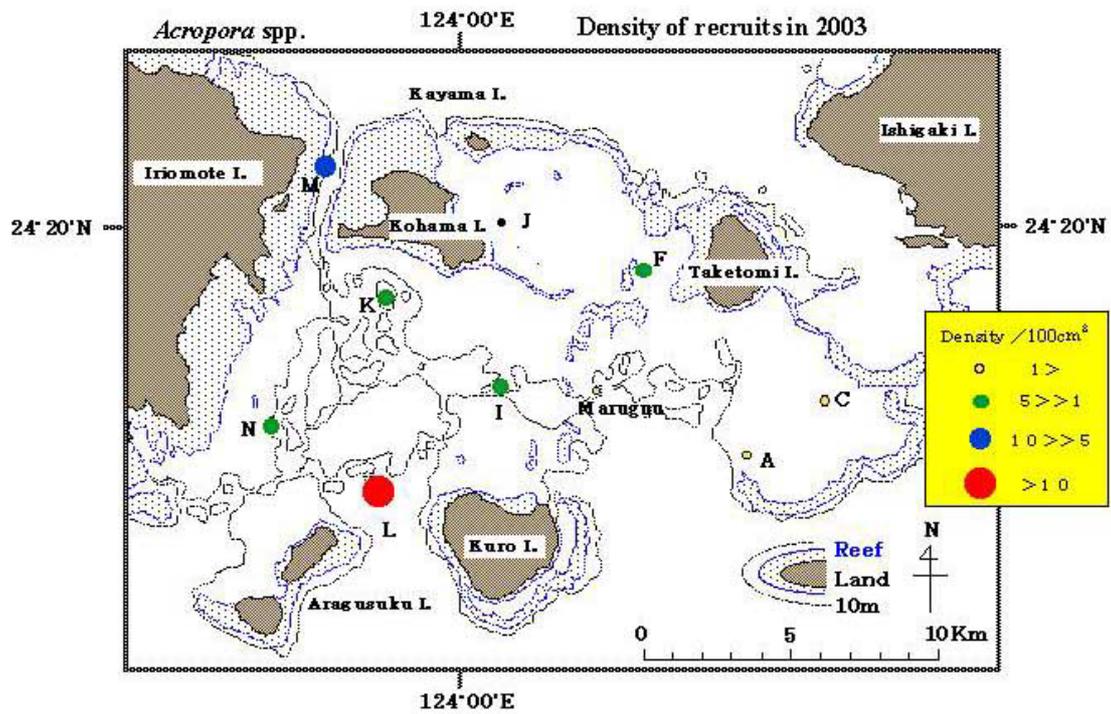


図8 - 1 プレート上のミドリイシ属の稚サンゴ密度（黒丸は加入無し）

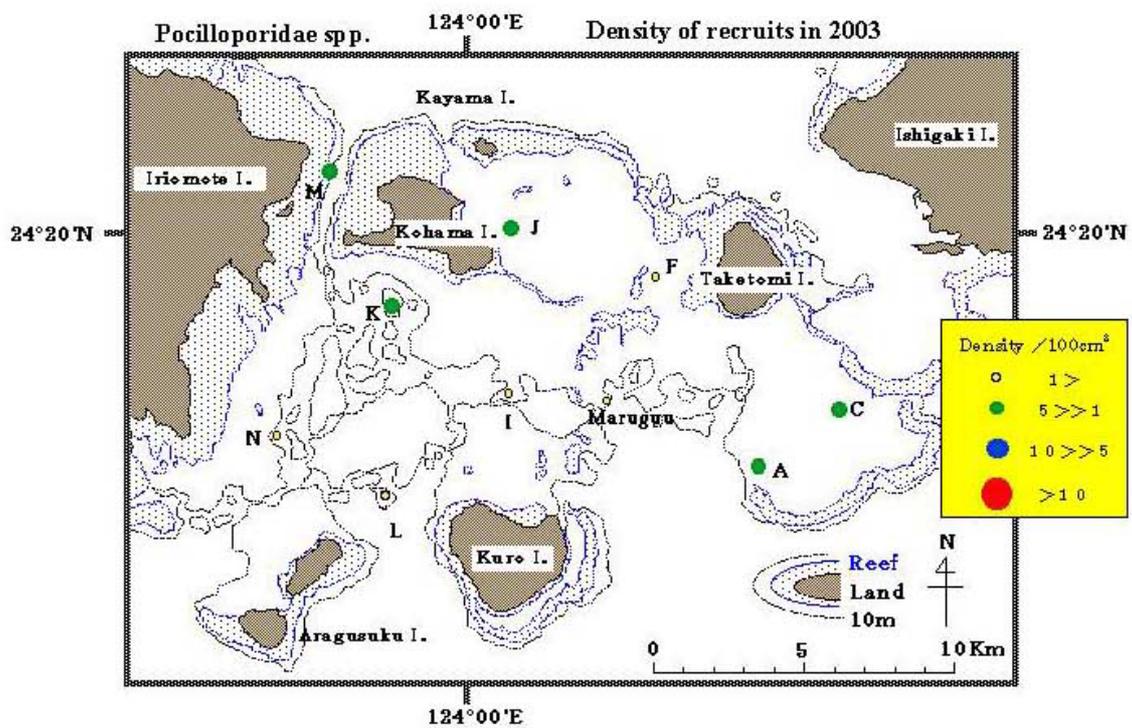


図8 - 2 プレート上のハナヤサイサンゴの稚サンゴ密度

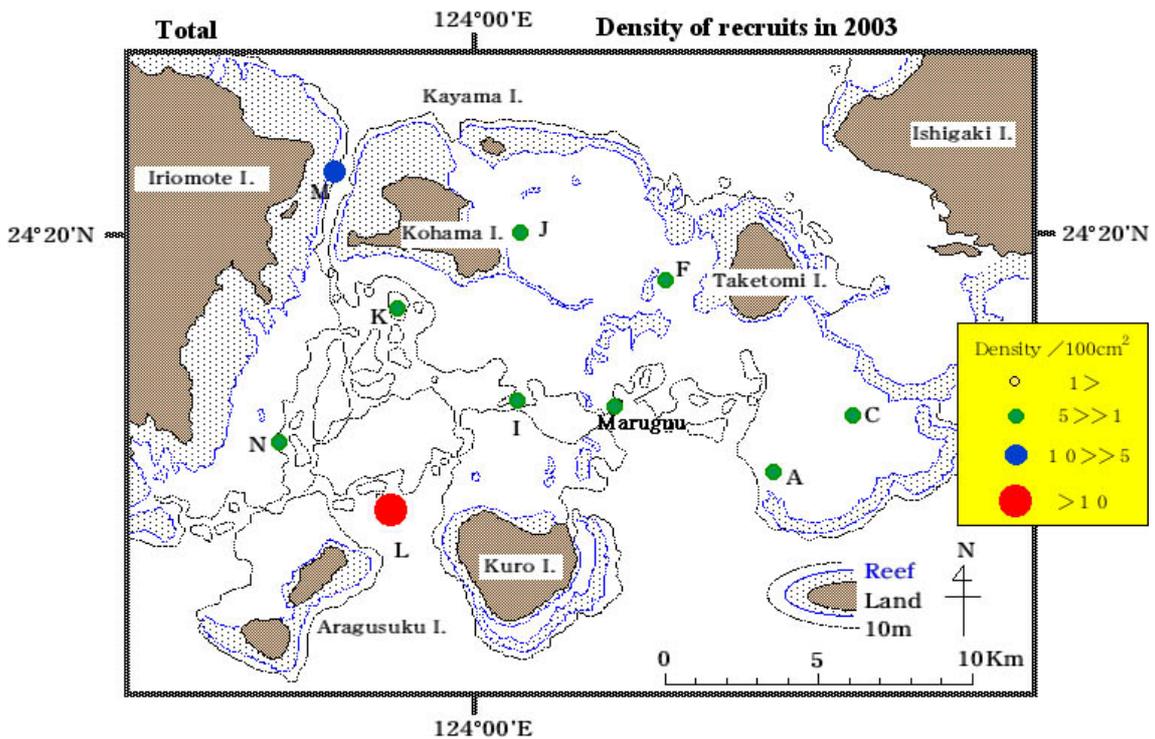


図8 - 3 プレート上の稚サンゴ密度（全種）

定着版(プレート)上の稚サンゴ密度は黒島と新城島間の St. L とヨナラ水道北部の St. M の2地点をのぞくと、全種でみても加入量が全て $5/100\text{cm}^2$ 以下で、沖縄本島と比べると非常に低かった(図8 - 3)。

ミドリイシ類では黒島 - 新城島間の離礁 (St. L) で平均 $29/100\text{cm}^2$ 以上と加入率が最も高く、次いでヨナラ水道 (St. M) の調査地点で高かった $5.8/100\text{cm}^2$ 。それ以外の地点では全て $5/100\text{cm}^2$ 以下で、特に St. J では加入が0であった(図8 - 1)。

ハナヤサイサンゴ類では一般的にミドリイシ類と比較して加入率は低く、2 ~ 4 群体 / m^2 の地点が5地点あったに過ぎず、全体として北半分に多い傾向がみられた(図8 - 2)。しかしながら、ミドリイシ類の多い St. L、St. M を除くと、むしろ石西礁湖内部ではミドリイシ類よりもハナヤサイサンゴ類のほうが加入量は多い傾向がある。

今回の調査では、調査地点が少ないために全体的な判断をするには限りがあるが、石西礁湖内では加入量は非常に低く、水道部や開口部に多い傾向がある。

2 - 2 1、2年生ミドリイシ属稚サンゴの密度分布

石西礁湖内の23地点において1、2年生ミドリイシ属稚サンゴの密度をコドラート法により調査した。1年生(2002年生まれ)稚サンゴ密度は、嘉弥真島北岸礁外縁、新城島下地西岸礁外縁、竹富島北岸礁外縁など外洋に面した外縁部で高く(>10群体/m²)、礁湖内ではウラビシ東離礁や新城島北側の離礁(>10群体/m²)などを除き低い傾向が確認された(図9-1)。

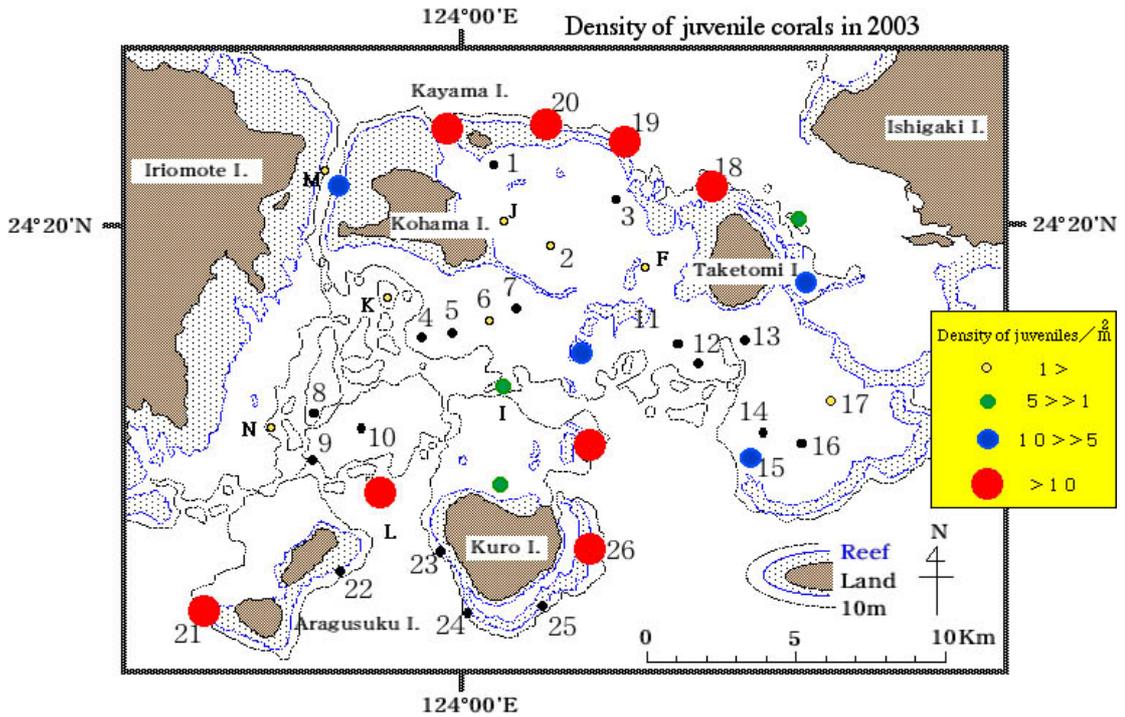


図9-1 ミドリイシ属1年生稚サンゴの密度(2003年)、黒丸は調査出来なかった地点

2年生(2001年生まれ)も同じように、石西礁湖内よりも水道入口(出口)や礁の外縁部分に多く、1年生(2002年生まれ)との回帰分析でも有意で、2001、2002年とも同様な傾向がみられた。

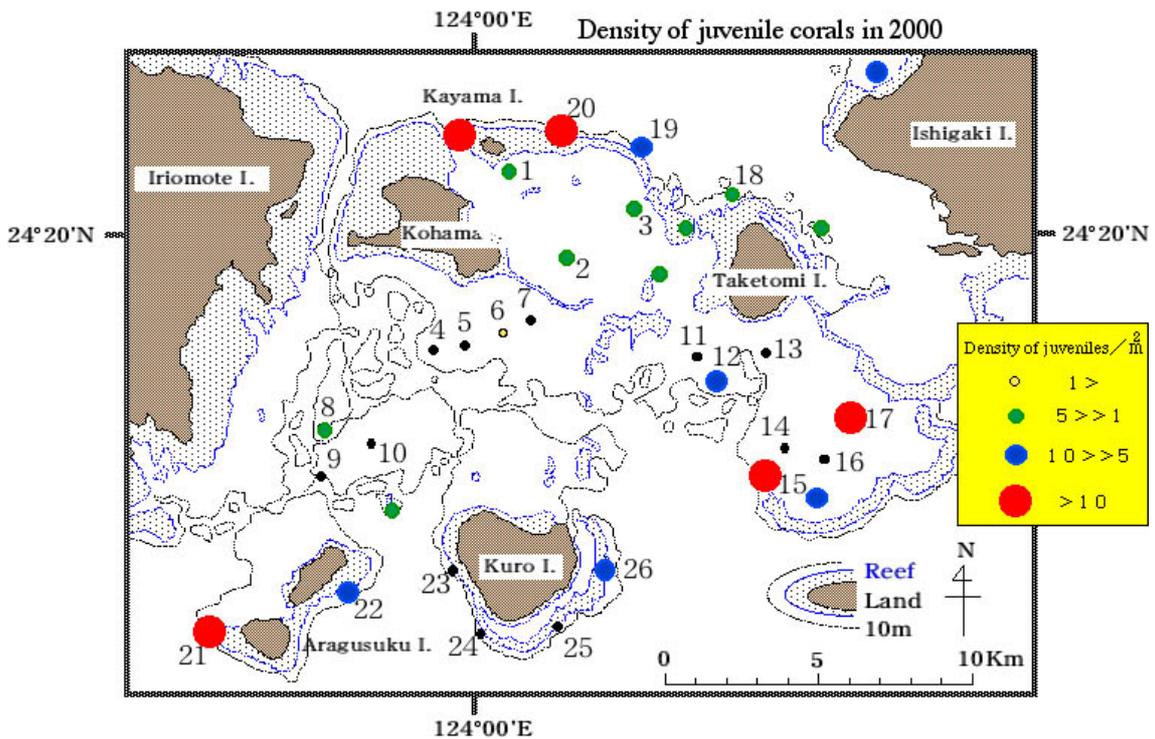


図9 - 2 ミドリイシ属1年生稚サンゴの密度(2000年)、黒丸は調査出来なかった地点
(野島・岡本・古島、未発表資料)

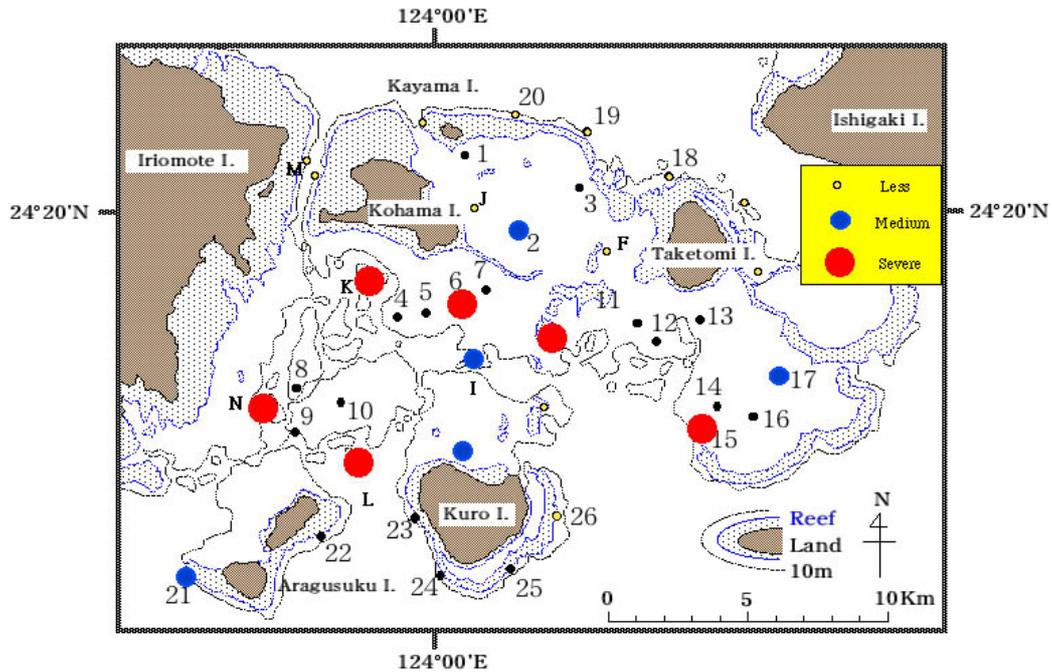
図9 - 2は同じく石西礁湖でミドリイシ属稚サンゴの密度を調べたものである(野島・岡本・古島、未発表資料)。2003年の結果と比較してもほぼ同様の傾向にあり、石西礁湖内では稚サンゴ密度は低く、礁外縁で高くなっている。

今回行った稚サンゴの加入量調査(2003年生まれ:図8 - 1、2、3)と稚サンゴ密度調査の双方を行った10地点について、今年の定着版に着いたミドリイシ属稚サンゴの加入量と1年生(2002年生まれ)、2年生(2003年生まれ)の間で回帰分析を行ったところ、1年生との間には有意性が認められたが、2年生との間には有意性は認められなかった。また、有意性が認められた1年生との間の結果でも、St. Lでの結果が大きく影響したことが考えられた。本来は生まれた年度が同じ稚サンゴ同士を比較すべきであり、次年度に1年生稚サンゴ密度を測定し、その結果と比較する必要がある。

いずれにしても、今年度の加入量調査結果も、稚サンゴの調査結果も石西礁湖内では定着/加入量は少なく、外縁部のサンゴ礁に多く定着するということを示唆している。

2 - 3 台風によるサンゴの破壊

2003年6月18日に石西礁湖を直撃した台風6号によるサンゴ礁への被害状況を調べた。その結果、この台風の影響は礁内(特に南西部)で甚大であり、北側の外洋に面した礁外縁部では軽微であることが確認された(図10)。



Effect by Typhoon No.6 in June 18, 2003 on living corals

図10 2003年の台風6号によるサンゴ礁の被害状況

(黒丸は調査できなかった地点を示す)

2 - 4 白化の状況

世界的にサンゴの白化が起こった 1998 年に引き続き、石西礁湖では 2001 年にもサンゴの白化が確認された。さらに、2003 の夏にも白化が確認されたため、8 月下旬石西礁湖内の白化状況について緊急調査した。

(1) 調査方法

15 分間遊泳法

調査はミドリイシ属稚サンゴ調査を行った 23 地点に 7 地点を加え、合計 30 地点で調査を行った。各地点において、スノーケリングにて 15 分間の遊泳し、目視による直接観察を行った。サンゴの白化現象による被害の程度を以下の 4 階級に分類し、それぞれの割合を記録した。(これは平成 13 年度石西礁湖及び西表島周辺海域モニタリング調査報告書に従った)

ランク : 白化による死亡(死亡)、著しい白化によって群体(全部および一部)が死滅した状態。

ランク : 完全な白化状態(白化)、著しい白化によって体内の共生藻が完全に脱落し、色がなくなった状態。

ランク : やや白化している(薄色)、白化によりサンゴ群体から共生藻が抜けかけているが、完全には白化せず、薄く色が残っている状態。

ランク : 健全な状態(健全) 白化の影響はなく、通常の色彩と変わらない状態。

記録の際には、以上の合計が 100% となるようにした。

ポイント法

8 月下旬に石西礁湖内の 21 地点について、クシハダミドリイシ *Acropora hyacinthus*, コクビミドリイシ *A. digitifera*, ハナガサミドリイシ *A. nasuta*, タチハナガサミドリイシ *A. selago*, ハナヤサイサンゴ *Pocillopora damicornis*, イボハダハナヤサイサンゴ *P. verrucosa*, トゲサンゴ *Seriatopora hystrix*, ショウガサンゴ *Stylophora pistillata*, コカメノコキクメイシ *Goniastrea pectinata* の 9 種類を選び、各調査地点で種ごとの白化状況を SCUBA 潜水により調査した。各種の白化状況は以下に示すように、各種の各群体ごとに正常、白化初期、白化中期、完全白化、白化後死滅 5 つのランクに区分した。

正常 : 白化の兆候が見られない群体。

初期 : 一般の褐色の群体では少し色あせてくる、また青色、黄色、ピンク色等の枝状ミドリイシ類やコモンサンゴ類では正常な状態に比べより鮮やかになる。

中期 : テーブル状群体の多くで周辺部、または一部が白化。塊状サンゴの頂部白化。

後期 : 調査地点での群体の全体もしくは大部分が完全に白化。

終期 : 白化後に群体が完全に死亡した状態。

各段階にそれぞれ 0 (正常) - 4 (終期) のポイントを与え、各群体に与えられたポイント

は各調査地点、各種ごとに集計して、平均値を計算した。

(2) 結果

15分間遊泳法による結果では、すべての調査地点で白化初期から中期以上のランクの群体がみられ、白化が程度の差こそあれ石西礁湖全域におよんでいることがわかった(図11)。また、30調査地点のうち5地点では完全白化、死滅群体の比率が10%を超えていた。特に竹富島と小浜島の間位置する2つの調査地点では30~50%と高い値を示した(図12)。

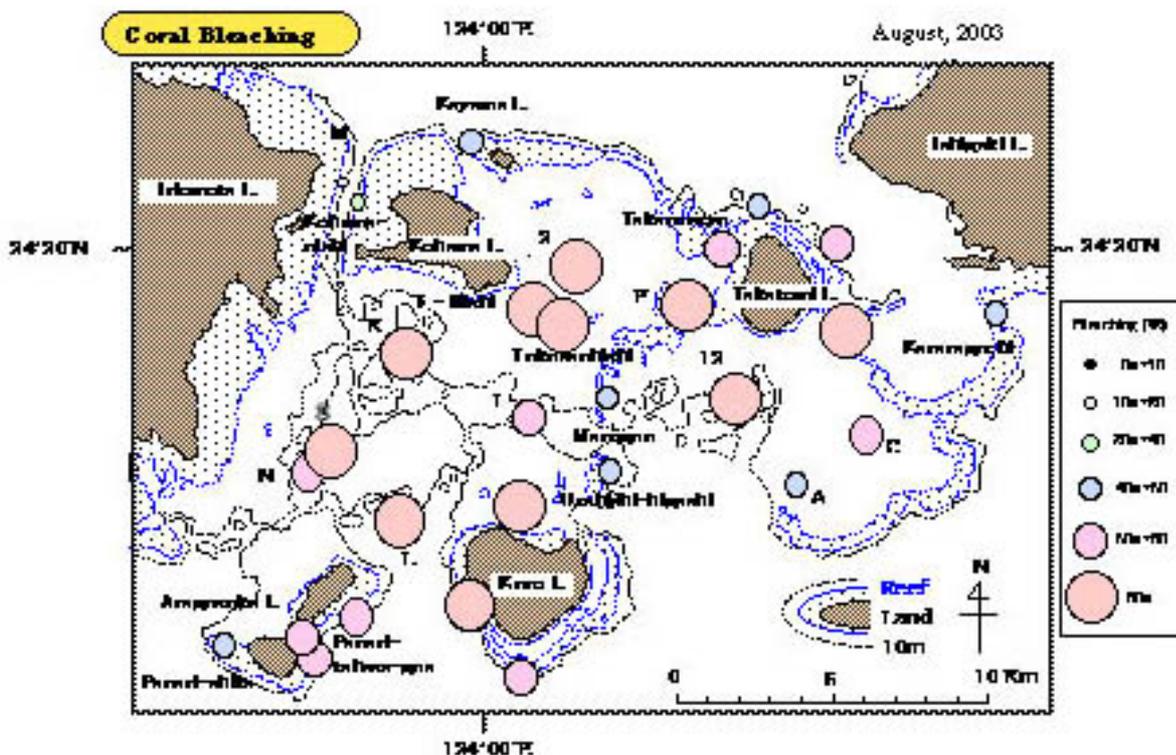


図11 15分間遊泳法による各調査地点でのサンゴの白化
(白化初期以上：ランク ~ 、白化はほぼ全域に及んでいる)

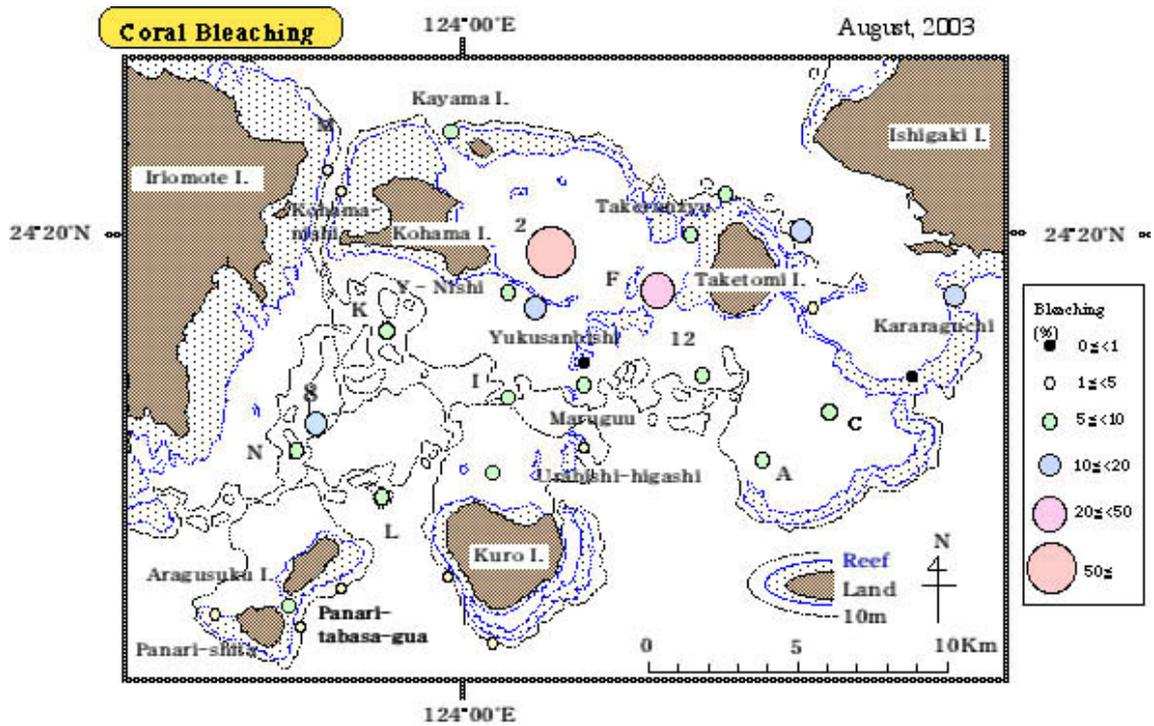


図 1 2 15分間遊泳法による白化調査結果、死滅完全白化群体の全体に対する百分率で示す。

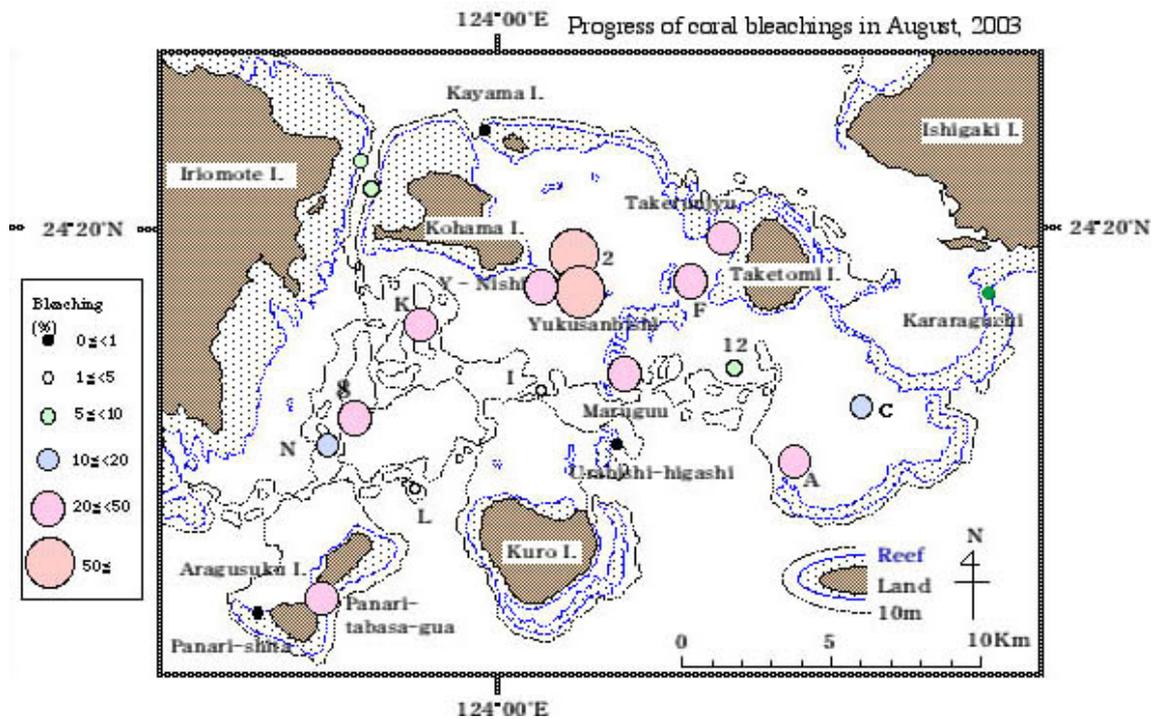


図 1 3 ポイント法による白化調査結果 死滅、完全白化群体の全体に対する百分率で示す。

一方ポイント法では、全種の群体のうちの完全白化（白化後期）もしくは既に死滅した

群体（終期）の比率は石西礁湖内部で高く、特に小浜島から竹富島間の海域では50%を越える地点がみられた。一方で、水代わりの良い水道部、アウターリーフでは白化程度は低かった（図13）。また、9種のうち、ショウガサンゴ *S. pistillata*、トゲサンゴ *S. hystrix*、ハナヤサイサンゴ *P. damicornis* の3種は他の種類と比較して高温に対する耐性が低いためか、調査した群体の50%以上が完全に白化するか、すでに死滅していた（図14）。2001年に行ったタチハナガサミドリイシ *A. selago*、クシハダミドリイシ *A. hyacinthus* の標識群体の追跡結果では、8月末に完全白化した群体は11月には100%死亡した。このことは、これらの白化群体が8月以降に死滅する可能性が高いことを示しており、今回の白化が他種にとっては軽微でも、これらの種にとっては種の存続に非常に重大な影響を及ぼす恐れがあるといえる。

また、各種ごとの白化状況は多少種によって異なるが、概して小浜島南から竹富島にかけての海域で白化は進んでおり、これはまた今回の遊泳観察法の結果や2001年の白化調査の結果とも一致している。この海域は石西礁湖を代表するエダサンゴの大群落が生育している場所でもあり、今後の白化の進行が憂慮される。

各種の間の回帰分析より得られた白化に対する耐性の相対順位

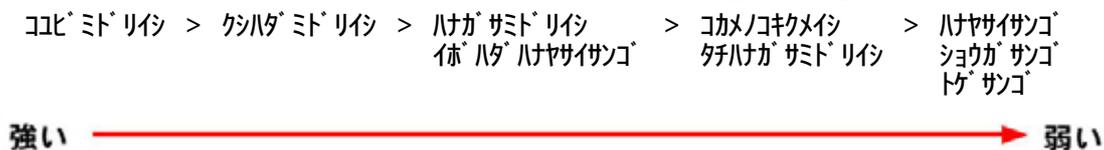


図14、ポイント法により調査した9種のポイント値から得られた高温に対する耐性