

F-5 サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究

(2) サンゴ礁生態系の回復促進

① サンゴ群集の回復促進に関する研究

国土環境株式会社 ((財) 海中公園センター) 藤原秀一

<研究協力者> (財) 海中公園センター 内田紘臣・島田直幸・木村匡・小寺昌彦・
鈴木弓子・ライゾウガ・茂代
東京商船大学 大島正毅
東京水産大学 大森信・大久保奈弥
国土環境株式会社 石丸 圭・中西喜栄・勝腰清紀・水谷晃
(株) 串本海中公園センター 御前洋、カーツアイズビジョン 高川悦子

平成 12-14 年度合計予算額 23,796 千円

(うち平成 14 年度予算額 8,000 千円)

[要 旨]

礁池サンゴ群集の現況把握を空中写真画像解析により行うことを目的とし、まずサンゴと海藻の海水の動揺に対する安定度に着目した予備的画像解析を行った。海水が動揺する条件下の水槽内に様々なサンゴと海藻の被度の組み合わせを再現し、短い間隔で連続的に撮影した画像間で RGB ごとに画像濃度値の変化率を調べた結果、変化率とサンゴ被度の相関は負の回帰式を示した。すなわちサンゴ被度が低いと、変化率が大きくなる傾向を示し、サンゴでは画像間の変化は少なく、海藻では変化が大きいことが示唆された。この結果を基に空中写真画像からサンゴ被度によるサンゴ群集の類型化を行うことを目的として、画像の解析を行った。沖縄県八重山群島石西礁湖における既存空中写真のサンゴ被度が知られている画像を解析した結果、予備解析結果と同様に低被度サンゴ群集では画像間の変化が大きくなる傾向を示した。

サンゴ移植手法確立のため、サンゴの堆積物に対する耐性を調べることを目的として、沖縄県八重山群島石西礁湖において、移植実験を行った。礁湖内でシルト堆積状況の異なる系列的な 5 カ所を選定し、2001 年 11 月、礁湖に普通に見られる「*Acropora nobilis*、*A. tenuis*、*A. cytheraea*、*A. formosa*」の 4 種、各 50 片を作り、秤量した後、移植基盤に識別できるよう移植した。また、各地点に連続水温の測定を行うため長期水温記録計を設置するとともにシルトの堆積状況を測定するためセディメント・トラップを各地点 2 個設置した。移植サンゴを 2002 年 3 月に生残状況観察、また 2002 年 12 月に観察、回収秤量を行い、堆積物、水温との関係を検討した結果、堆積物がサンゴの成長の阻害要因となることが示唆され、移植種の中では *Acropora nobilis* が死滅率が低く、生長量が高く、堆積物に対する耐性が高いことが明らかとなった。

[キーワード] サンゴ礁、リモートセンシング、画像解析、サンゴ移植、堆積物

1. はじめに

琉球列島では1970年代以降、サンゴを食害するオニヒトデ *Acanthaster planci* の大発生による大規模なサンゴ群集の死滅現象があちこちでみられた。死滅後のサンゴ礁は石灰質のサンゴ骨格堆積域となり、時間の経過とともに骨格上には海藻群落の着生、繁茂がおこり、さらに新たなサンゴの加入によりサンゴ群集の回復へ向かう遷移が多くのある場所で見られた。この遷移は閉鎖的な地形環境にある礁池では、場所によりサンゴ幼生の到達性が様々であるため、その速さが異なった。そのため、礁池サンゴ群集の有り様は変化に富み、また、礁池は場所により陸域表土流出などの攪乱の影響を受けたため一層複雑な様相を呈した。

サンゴ礁面積の過半を占め、多くの生物のすみかとして重要な役割を果たしている礁池は、その回復再生が緊急に求められている。回復再生を促進するためには、まず、礁池内のサンゴ群集の現況を把握することが有効な対策を立てる上で不可欠である。調査対象としては広大なサンゴ礁を調べるには空中写真などリモートセンシングの活用が不可欠である。特に、サンゴ礁礁池は水深が浅いため、画像から多くの情報を得ることが可能であるが、サンゴと海藻の区別など解決すべき課題は少なくない。また、衰退したサンゴ礁再生の手法として、サンゴ移植がこれまで行われてきているが、移植の環境条件、特に堆積物に対する耐性などについては十分に研究されてはこなかった。

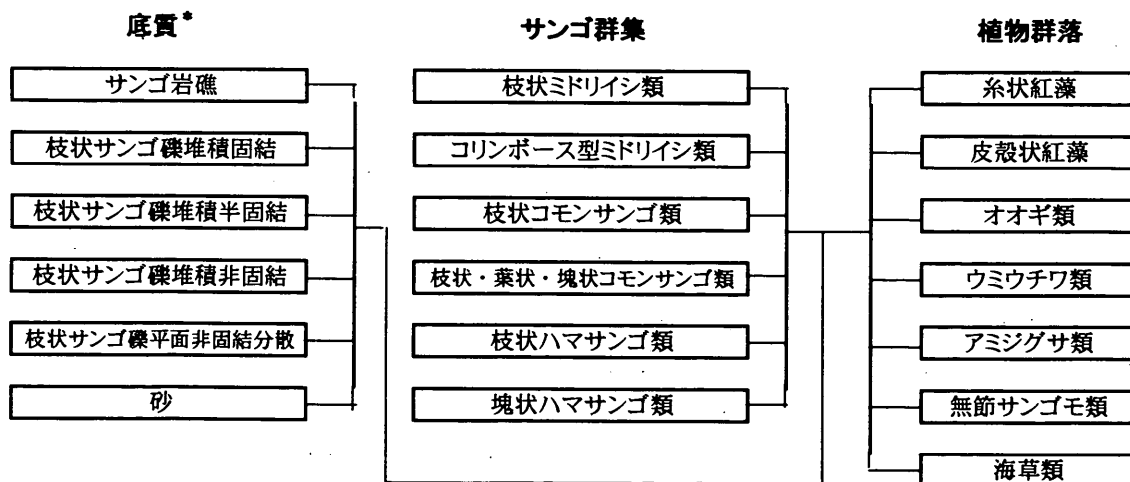
2. 研究目的

本研究では、空中写真画像の解析により、礁池サンゴ群集の現況、特にサンゴ被度を把握することを目的とし研究を行った。また、衰退したサンゴ群集回復手段としてのサンゴ移植手法確立を目的として、サンゴの堆積物に対する耐性を移植実験により調べた。

3. 研究方法

(1) 空中写真画像の解析

礁池の海底性状は主に底生生物の着生基質である底質と底質を覆うサンゴと海藻の混生により成っている (図1)。



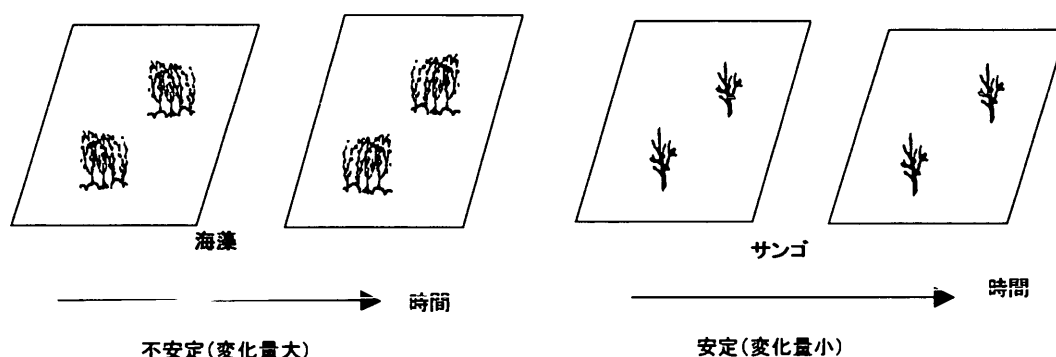
* 底質の類型は今野・藤原 (1990) に基づく

図1 礁池底性状の主たる底質、サンゴ、植物

混生の程度（サンゴと海藻の被度）は遷移の段階により異なる。そこで、空中写真画像からこの状態を把握する手法を開発するため、2000年度に予備的解析を水槽において行い、その結果を基に2001年度、サンゴ礁域空中写真画像の解析を行った。

① 予備的解析

サンゴと海藻を海水の動揺に対する安定度で比較すると、サンゴは石灰質の骨格を有するため安定度が高く、海藻は無節サンゴモや皮殻状紅藻を除くと波浪に対し藻体が揺動するため相対的に不安定である。そのため、ある一定の微少な範囲を短い間隔で連続的に撮影した場合、光条件に変化がないとすれば、サンゴでは画像間の変化は少なく、海藻では変化が大きいことが考えられる（図2）。そこで、実験的に確かめるため海水が動揺する条件下にある水槽内に様々なサンゴ



と海藻の被度の組合せを再現し、連続撮影を行い、その画像濃度値を解析した。

図2 サンゴ群体と海藻藻体の海水動揺に対する安定度の違い

ア 撮影方法

屋外に設置された水槽（横 92cm×縦 61.5cm×深さ 13.5cm）底に 20cm×20cm の実験区を 6 区設定し、サンゴ（エダコモンサンゴ *Montipora digitata*）と海藻（糸状紅藻）の様々な被度の組合せを再現し（図3）、水槽底中央部に設置した穴をあけたパイプの両側から海水を噴流させ、海藻の揺動状態を再現した。水槽の鉛直上方 1.3m から 35mm 1 眼レフカメラ（オリンパス OM-2、f:35mm、コダックゴールド ASA100、1/250、5.6、自然光）で 1.2 秒間隔で水槽の連続撮影を行った（図4）。

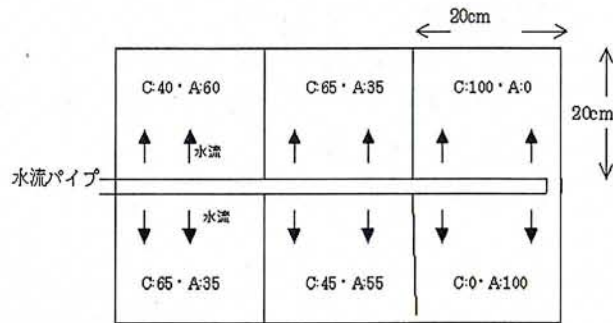


図3 実験水槽 (c:サンゴ被度%・A:海藻被度%)



図4 撮影画像

イ 画像解析

撮影した紙焼き写真 (25cm×20cm) をデジタルスキャニングカメラ (ProgRes3012、Kontron Elektronik 社製、解像度 700 万画素、Rheinmetall Jenoptik Optical Metrology 社製無歪み測定用レンズ Lameter25mm 使用) でマクロスタンド (ハロゲンランプ 300w 2 灯落射照明) から実験区ごとに読み込み、ファイリングシステムに入力した。

入力した実験区ごとの画像を画像解析装置 (Kontron Elektronik 社製インテリジェント画像解析装置 KS400) を用いて、480 のメッシュに区分し (図 5)、メッシュごとに画像の RGB 各平均濃度値を測定した。次に、同様にして 1.2 秒後及び 2.4 秒後の写真の同一のメッシュの平均濃度値を測定した。同じ作業を異なる写真で繰り返した。

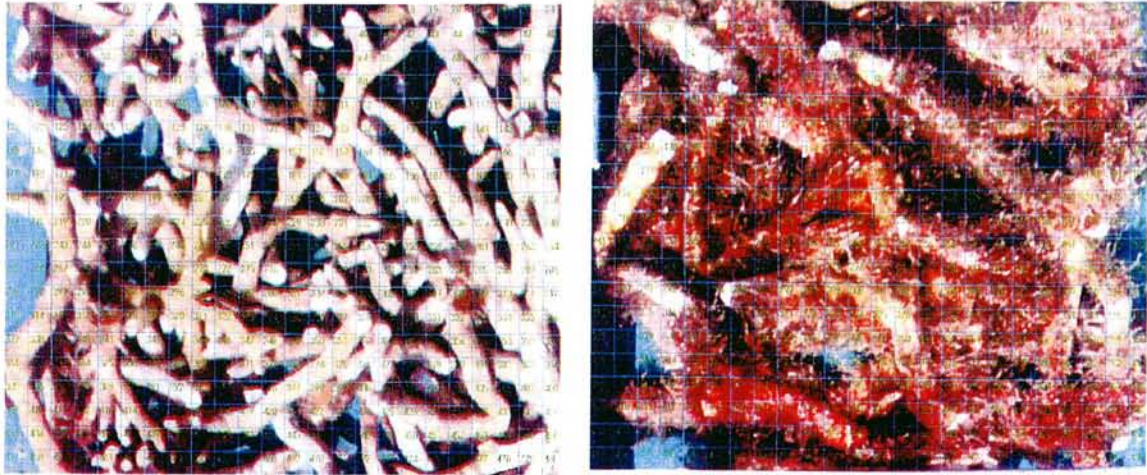


図5 メッシュに区分した画像（左：サンゴ被度 100%、右：海藻被度 100%）

得られたメッシュごとの平均濃度値について、1番目と2番目の画像、2番目と3番目の画像濃度値を次式に挿入し、濃度値変化率を求めた。

$$v = \frac{\sqrt{(n_1 - n_2)^2}}{n_1} \dots \dots \dots (1)$$

v：濃度値変化率、 n_1 ：最初の写真の濃度値、 n_2 ：次の写真の濃度値、

得られた濃度値変化率 v について画像ごとに全メッシュの平均値を求め、サンゴ被度との相関を検討した。

② 空中写真の解析

水槽における画像の RGB 濃度値変化率とサンゴ被度との相関結果に基づき、サンゴ礁の空中写真画像の解析を行うため、沖縄県八重山郡石西礁湖において、連続的に撮影された既存空中写真を用いて、サンゴ被度が知られている場所の解析を行った。解析対象画像の空中写真を表 1 に示す。1977 年撮影の黒島キャングチの枝状サンゴ群集画像は非常に高いサンゴ被度であることが 1980 年のサンゴ礁調査結果から推定された²⁾。1991 年撮影の黒島キャングチ及び伊原間の枝状サンゴ群集画像は非常に低いサンゴ被度であることが 1991 年のサンゴ礁調査結果から推定された³⁾。1995 年撮影の石垣島玉取崎の高被度ユビエダハマサンゴ及び 1994 年撮影の黒島研究所前のガラモ場画像は撮影当時の現地確認による結果である。

表 1 解析対象画像と空中写真

No	地点	地形	生物相	サンゴ被度	空中写真地区名	空中写真 No	撮影年	撮影者
----	----	----	-----	-------	---------	---------	-----	-----

				被度	地区名	No		
1	黒島キャ ングチ	礁池	枝状サンゴ群 集	高	COK-77-5	C18-5&6	1977年	国土地理院
2	黒島キャ ングチ	礁池	死サンゴ	低	COK-91-1	C24-13&14	1991年	国土地理院
3	黒島研究 所前	礁嶺	ガラモ場	低	94IRIOMOTE	C18-8&9	1994年	沖縄県
4	石垣島玉 取崎	礁池	ユビエダハマ サンゴ群集	高	95ISHIGAKI	C5-8&9	1995年	沖縄県
5	石垣島伊 原間西岸	礁池	死サンゴ	低	COK-91-1	C1-8&9	1991年	国土地理院

表1に示した密着カラー空中写真ポジフィルム（23cm×23cm）の解析対象部をスキャナー（ウルトラスキャン5000、ベクセル社）で読み込み（約2000dpi）、画像解析ソフトENVI上で画像のRGB各濃度値を測定した。測定は測定対象部ごとに任意の各10ヶ所の領域（30×30pixel：6m×6m）を抽出し、測定し、次に約10秒後に連続撮影された空中写真のオーバーラップ部分の同一領域で同様にして測定した。各地点で同じ作業を繰り返し、1番目と2番目の画像の濃度値変化率を（1）式により算出し、得られた値 v とサンゴ被度の相関を検討した。

（2）移植サンゴの堆積物耐性

移植サンゴの環境適性のうち特に礁池において深刻な影響を与えている堆積物に対する耐性について検討するため、八重山群島石西礁湖の異なる堆積物環境において4種のサンゴ移植を行いその成長を調べた。移植地点は平成12年度環境省国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター広域モニタリング調査シルト堆積状況調査結果等を参考にして、堆積状況の異なる系列的な5カ所を選定し、移植地点とした（表2、図6）。2001年11月15～22日、各移植地点において、スノーケリングによる探査の後、移植場所を決定し、次のように移植を行った。

表2 移植地点の概要

St	水深(m)*	底質	浮泥の堆積状況	周囲の状況					
				底質	サンゴ被度(%)	植被(%)	裸面(%)	主な出現サンゴ	主な出現海藻
1	1.5	砂礫	観察されず	枝状礫堆積	+	80	20	スギノキミドリイシ	ハイオオギ、アミジグサ類、糸状紅藻、無節サンゴモ
2	3.3	砂底上枝状礫平面分散	薄く堆積	砂底上枝状礫平面分散	50	30	20	スギノキミドリイシ、トゲスギミドリイシ、ハナガサミドリイシ、ウスエダミドリイシ	ハイオオギ、アミジグサ類、無節サンゴモ
3	5.0	砂	観察されず	枝状礫堆積	50	10	40	スギノキミドリイシ	-
4	1.3	砂底上枝状礫散在	基盤埋没	砂底上枝状礫散在	+	+	100	-	ホンダワラ類
5	1.0	砂	薄く堆積	枝状礫堆積	+	20	80	ハナヤサイサンゴ、コモンキクメイシ、オオツツミドリイシ	ウスユキウチワ、ホンダワラ類、アミジグサ類、ガラガラ類

* 水深は石垣港基準面からの水深

- ① 移植地点において、基質の違いによるサンゴへの影響を避けるため、移植用人工基盤を設置することとし、基盤固着用杭をエアハンマーで打設した。杭はφ12mm×1mの鉄筋を用いた。
- ② 杭は正方形の四隅に、海底から20cm位でるように打設し、各杭頂部にはL型塩ビパイプを水中ボンドで固着した。
- ③ 移植用人工基盤は1.2m×1.2mとし、鉄管を溶接した正方形の枠にトリカルネット(2cmメッシュ)を張り、細ロープで固定した。

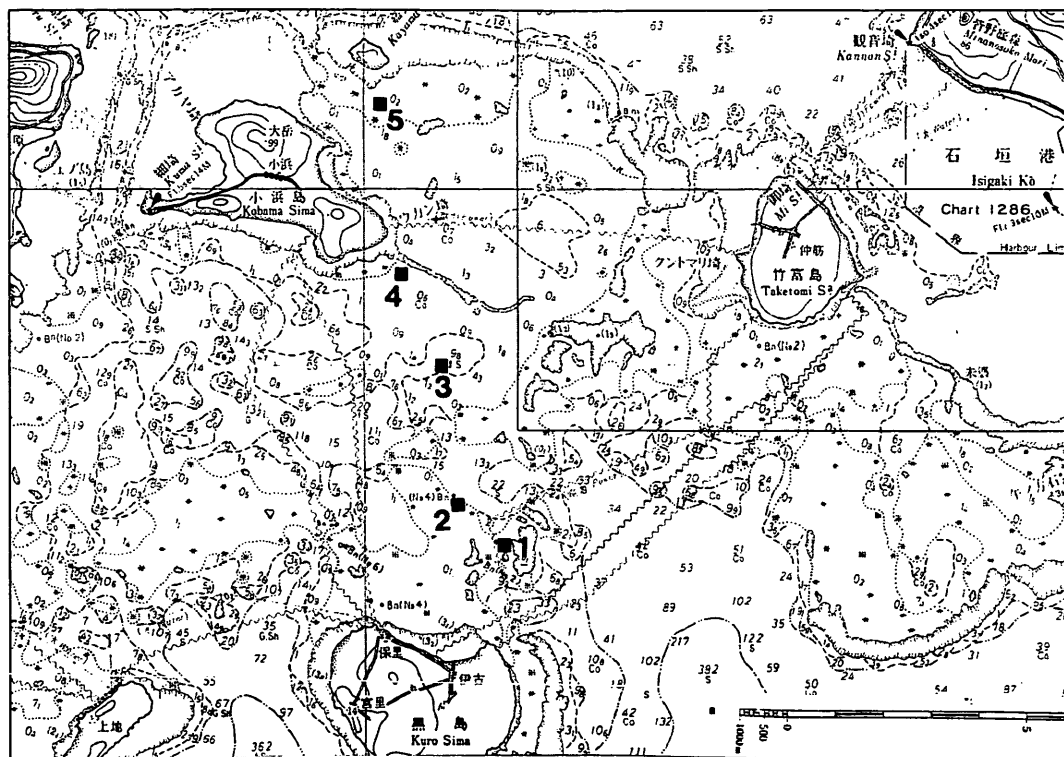


図6 サンゴ移植地点 (St. 1~5)

- ④ 移植用人工基盤を移植場所に持ち込み、杭頂部のL型塩ビパイプに金属サドルとインシュロックタイで固定した。
- ⑤ 移植種は礁湖に普通に見られる「*Acropora nobilis*(A. n)、*A. tenuis*(A. t)、*A. cytherea* (A. c)、*A. formosa* (A. f)」の4種とした。
- ⑥ 移植用サンゴは各種とも同一群集から採集し、船上で約10 cm長に分割した後、各種50片を製作した。移植片は船上で秤量した後、識別番号付きビニールタイで順番にネット上に固着した(図7、8)。
- ⑦ 各地点に長期水温記録計ティドビットを1個設置し、1時間に1回連続測定した。また、シルトの堆積状況を測定するためセディメントトラップ(内径8 cm×高さ30 cm、塩ビ製円筒形。口部に十字型の異物進入防止棒)を各地点2個設置した。

移植したサンゴは4ヵ月後の2002年3月5日及び約1年後の2002年12月9日~18日に生存、活性状況の観察を行った。生存、活性状況は次のような基準で判定した。

<生存>

- ・ 消失：移植片が消失
- ・ 死滅：移植片に生存部がない
- ・ 大半死滅：移植片の生存部が50%未満
- ・ 大半生存：移植片の死滅部が50%未満
- ・ 生存：移植片に死滅部がない

<活性>

- ・ 良好：移植片の色彩が正常で、粘液の分泌が認められない
- ・ 不良：移植片に白化がみられ、また粘液の分泌が認められる

12月観察終了時に全移植片を回収、実験室に持ち帰り、移植片ごとに秤量し、移植時との重量差を求め成長量とした。同時に水温計及びセディメント・トラップ堆積物の回収を行い、水温については日平均値を算出し、堆積物については実験室において乾燥重量、粒度組成、強熱減量、有機窒素量の測定を行い、2個の平均値を算出した。

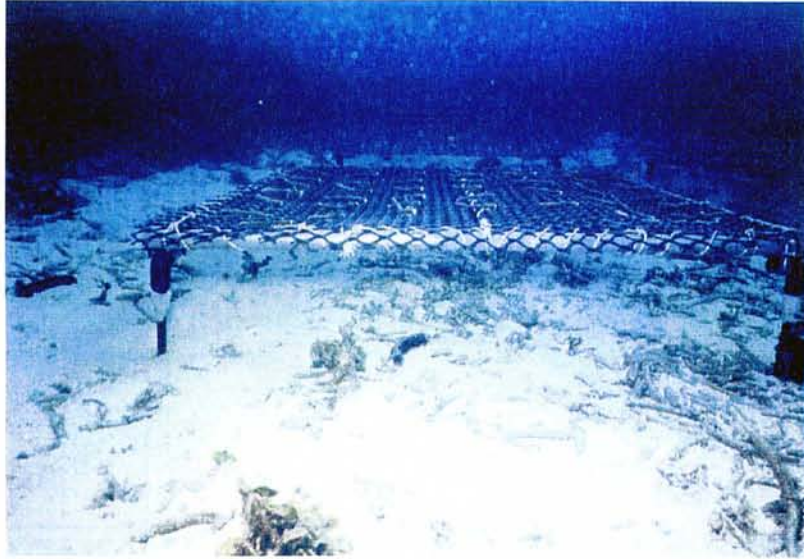


図7 サンゴ移植基盤 (2001年11月)

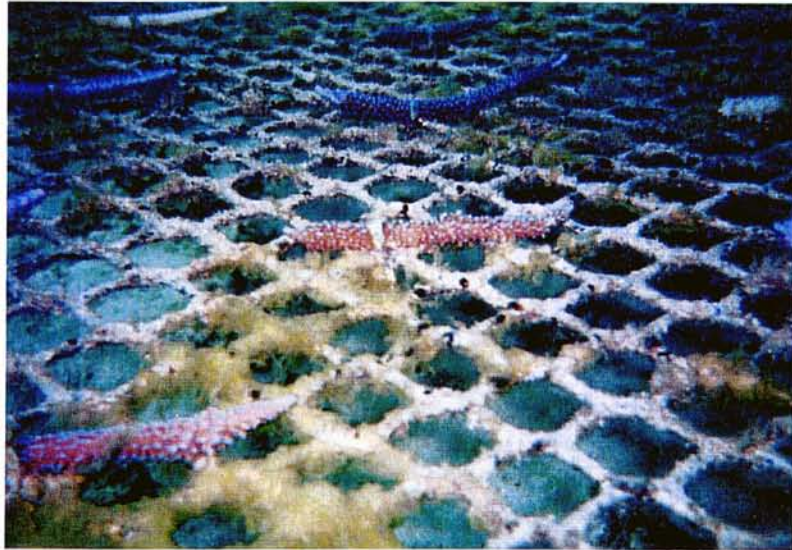


図8 移植4ヵ月後のスギノキミドリイシ

4. 結果・考察

(1) 空中写真画像の解析

① 予備的解析

RGB ごとの濃度値の変化率とサンゴ被度の相関を図 9 に示す。各画像間の変化率の回帰式はいずれも負の傾向を示した。すなわち、サンゴ被度が高いと変化率は小さく、サンゴ被度が低いと変化率は大きくなる傾向を示した。バンドでは G のバンドが安定した結果を示すように思われる。この結果から、空中写真画像を用いてのサンゴ群集被度解析の可能性が得られた。

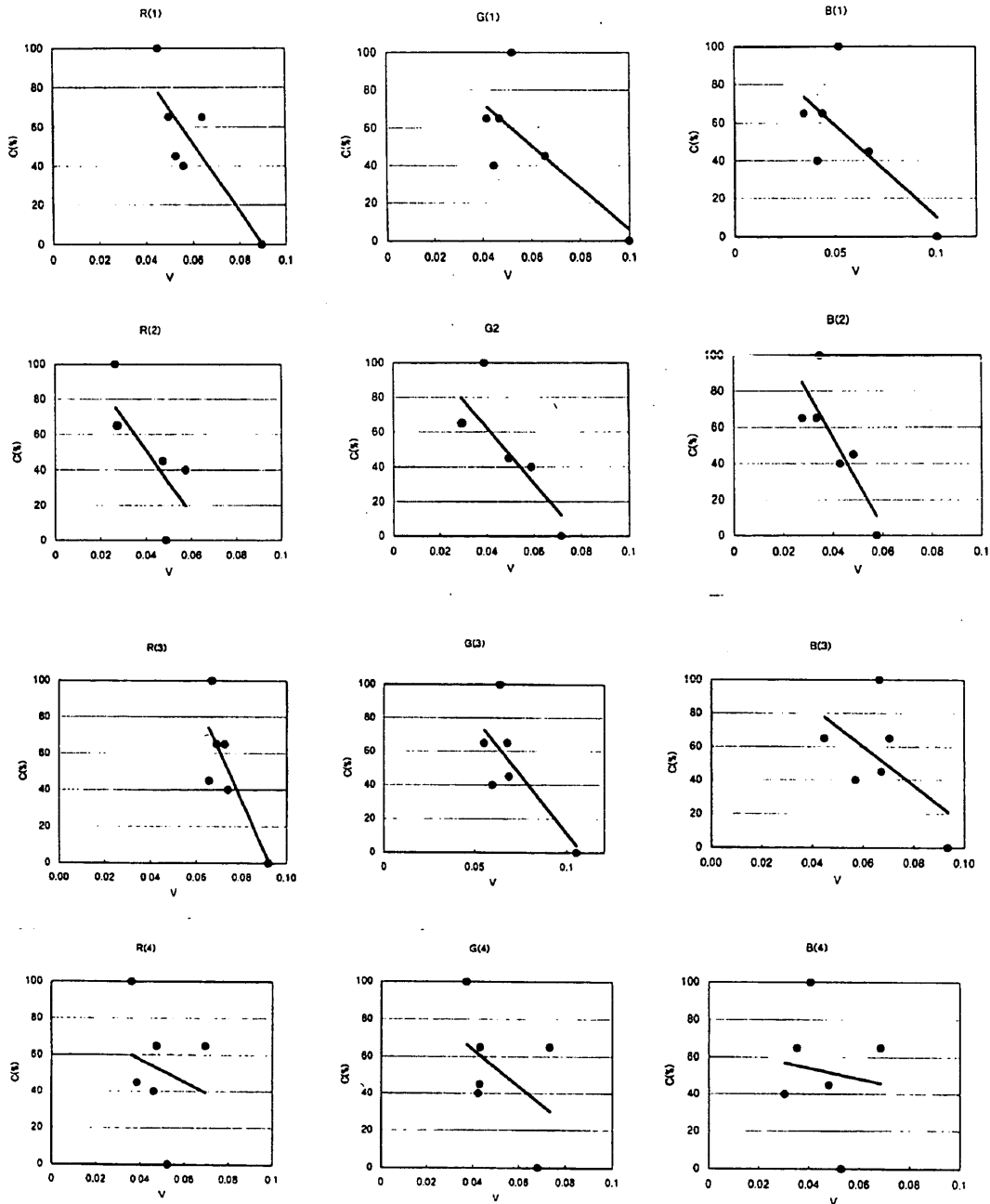


図 9 濃度値の変化率とサンゴ被度の相関

② 空中写真の解析

空中写真の撮影間隔は 1/10,000 密着写真の場合、約 10 秒とされているが、この間隔では撮影時の日射条件が一定とは必ずしもいえず、濃度値が相当異なる場合もあった。そのため、RGB 間の濃度値の比をとり、変化率を算出し、サンゴ被度との相関を検討した。消散率の低い B を使用した結果を図 10 に示す。サンゴ被度は便宜上、高被度を 100%、低被度を 0% として示してあるが、実際に測定した値ではない。変化率の傾向は予備的解析結果と同様、変化率が大きいとサンゴ被度が低いという傾向を示した。

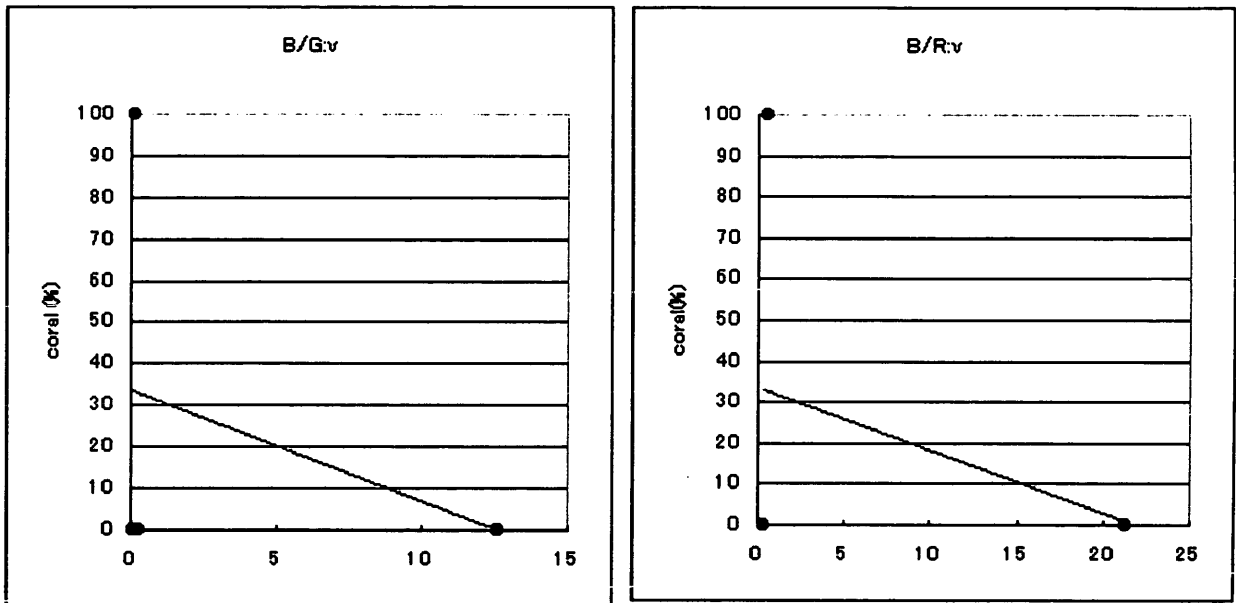


図 10 サンゴ被度と濃度値変化率

ただし、空中写真画像は水槽写真画像に比べて解像度が低いため、濃度値の変化を十分に分離することができない可能性が考えられる。また撮影間隔が長いことから起こる日射条件の変化を受ける可能性がある。そのため、より低高度で撮影を行い、高解像度で撮影間隔の短い写真を得る必要がある。また、サンゴ被度が低いサンゴ群集において、無節サンゴモなど立ち上がらない海藻類が繁茂する場合には、サンゴ被度が低いにもかかわらず、小さい変化率を示すことが考えられる。この点については無節サンゴモの卓越する画像では各波長帯で濃度値が高くなることが考えられるので、別に濃度値を検討する必要がある。

(2) 移植サンゴの堆積物耐性

各移植地点における移植サンゴの 2002 年 3 月の生存、活性状況観察結果から死滅率を図 11 に示す。全種の死滅率が St. 3 において最も高く、St. 4 において最も低い結果が得られた。逆に活性良好率は全種について St. 3 で最も低く、St. 4 において最も高い結果となった (図 12)。St. 3 はセディメント・トラップの堆積物乾重量分析結果で、粒径 2 mm φ 以上の割合が高く (図 13)、特にサンゴ片の混入が多かった。このことは、St. 3 が他の地点に比べて波当たりの強さが大きいことを示唆しており、底質の巻き上げによる堆積が移植サンゴの生残に強く影響したと考えられる。St. 4 も乾重量が多いが、St. 4 は 12 月観察時には移植基盤全体がほぼ埋没していた。台風

よる突発的な漂砂が原因と考えられる。通常は潮通しが良好であるため、3月時点の死滅率が低く活性良好率が高かったと考えられる。St.3の中では*Acropora nobilis*が死滅率が低く、活性良好率が高かった。同種は全般的に死滅率が低い傾向をみせたが、特に堆積物に対する耐性が高いことが示唆される。

12月観察時における死滅率を図14に示す。全地点で概ね60%を超えており、顕著な差は見られないが、St.2とSt.5における*Acropora nobilis*が際立って死滅率が低かった。図15に2002年12月時点で、わずかでも生存部があったサンゴの平均成長量を示す。死滅率の高かったSt.3を除くと地点間に顕著な差は見られなかったが、種間では*Acropora nobilis*がどの地点でもほぼ成長量が高く、*Acropora tenuis*と*Acropora formosa*が低い傾向がみられた。*Acropora cytherea*は堆積物の影響を強く受けたSt.3、St.4以外では成長量は高かった。移植種の中では*A. nobilis*が堆積物に対する耐性が高いという傾向が得られた。*A. nobilis*は生長が速く活性が良好であることから様々な環境に対する適応性が高いと考えられる。一般的に同種は生長、活性が良好で生残率が比較的高いことが報告されており^{4) 5) 6)}、今回も同様の結果を得た。

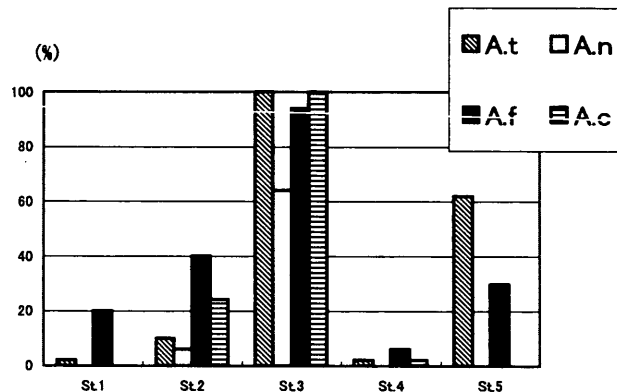


図11 移植サンゴ死滅率 (2002年3月)

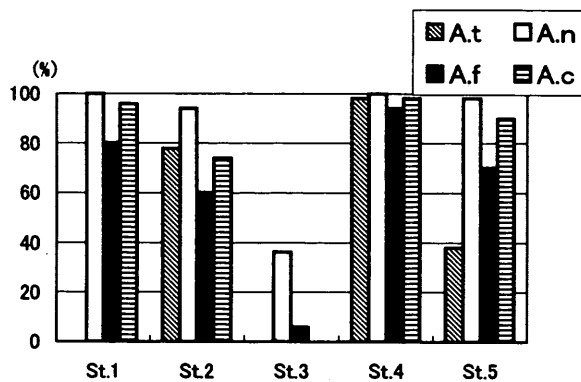


図12 移植サンゴ活性良好率 (2002年3月)

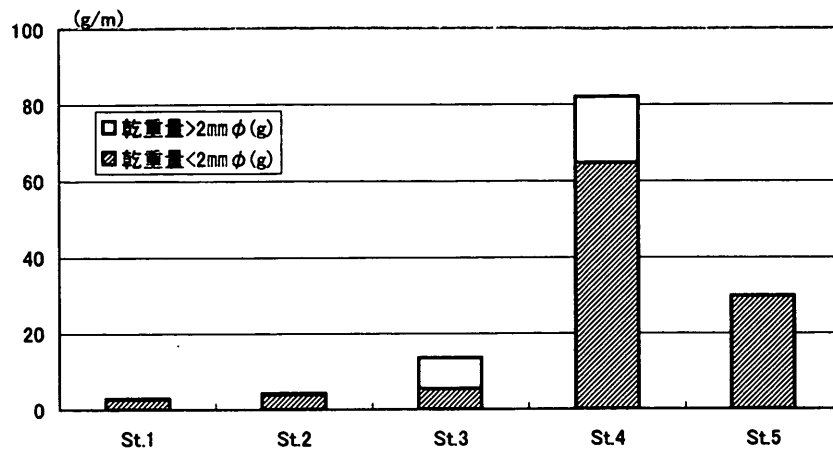


図 13 堆積物量 (月値)

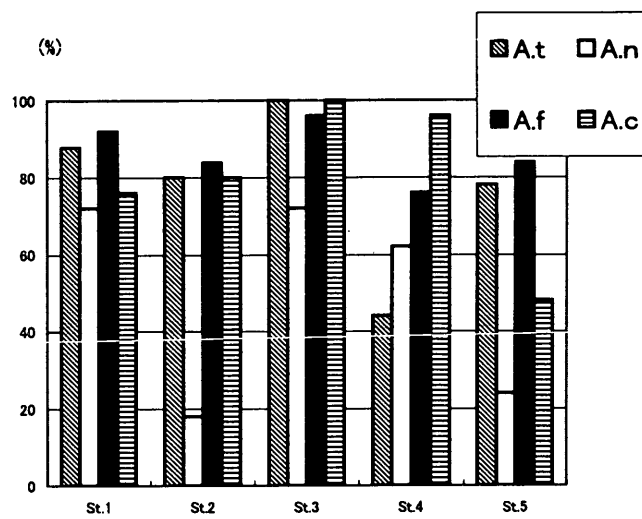


図 14 移植サンゴ死滅率 (2002年12月)

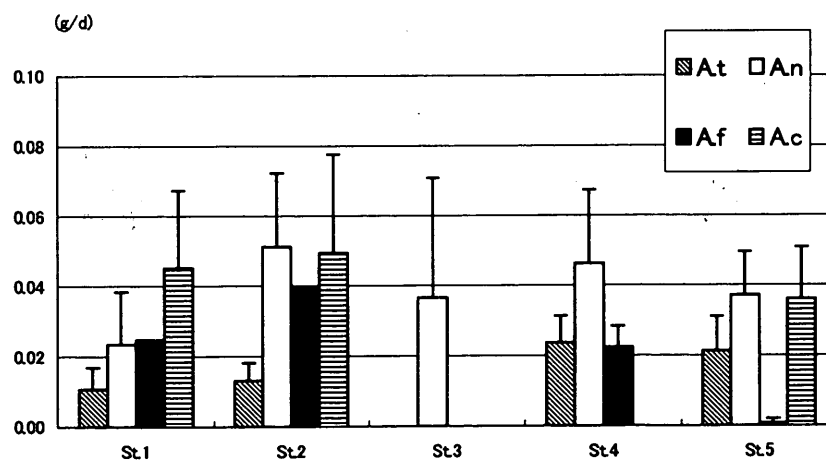


図 15 サンゴ日平均成長量 (m±sd)

図 13 に示したように堆積物量は St. 1 から St. 5 に向けて高くなる傾向があり、当初の予想を裏付けた。粒径 2 mm 以下の試料についてのレーザー回折式測定器による粒度分布分析結果を図 16 に示す。St. 5 でシルトが少なく、中砂が多い点を除いては St 間に顕著な差はみられなかった。同様に粒径 2 mm 以下の試料についての強熱減量を図 17 に、有機物量を図 18 に示す。いずれも St. 1 から St. 5 にかけて減少の傾向がみられ、堆積物量と逆の傾向を示した。St. 1-St. 3 では有機物の割合が高く、陸土の影響が少ないことを示すものと思われる。サンゴ日平均生長量 (図 15) は堆積物量の少ない St. 1、St. 2 が St. 3、4、5 に比べて高い傾向があり、堆積物量がサンゴの生長に影響を及ぼしたことを示唆している。

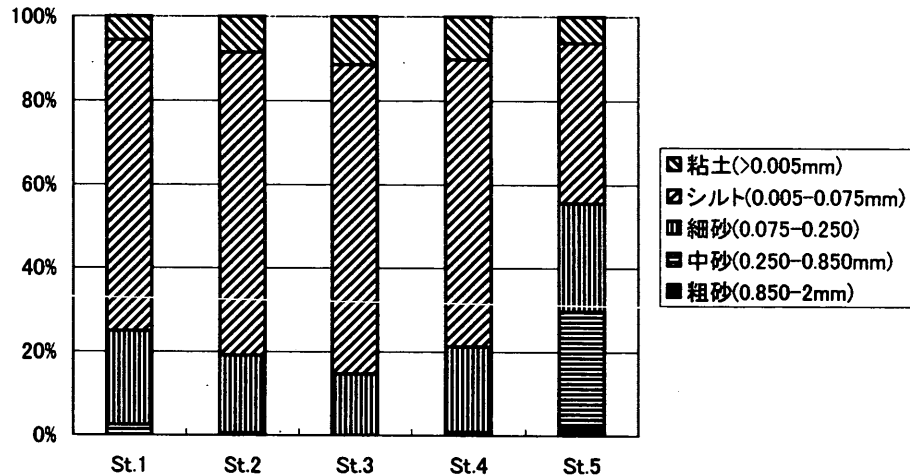


図 16 粒度分布

(粒径 2 mm 以下の試料について分析)

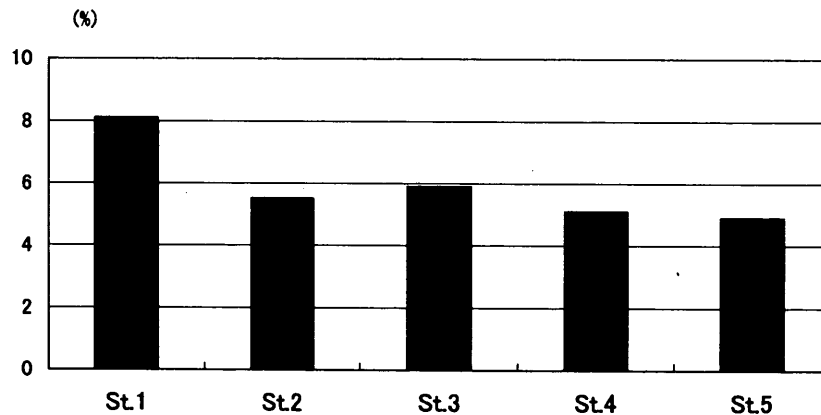


図 17 強熱減量

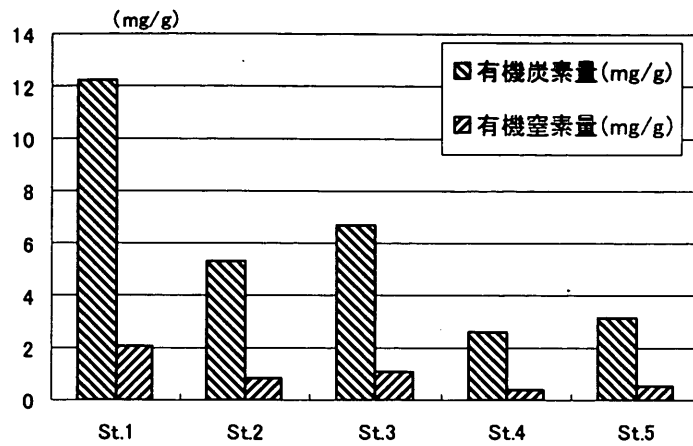


図 18 有機物量

日平均水温から求めた月平均水温を図 19 に示す（平年値は石垣港における 1971-2000 年の気象庁統計値）。機器の故障などのため研究期間中のデータを全地点では得られなかったが、水温から各地点の開放性傾向をみる事ができた。すなわち St. 1 から順に St. 5 に向かって開放性が減少する傾向が見て取れる。図 20 に典型的な例として 6 月と 11 月の各地点の月平均水温を示す。11 月の各地点間の水温には St. 1、2 と St. 3、4、5 の間には有意の差がみられた（一元分散分析、 $p < 0.05$ ）。

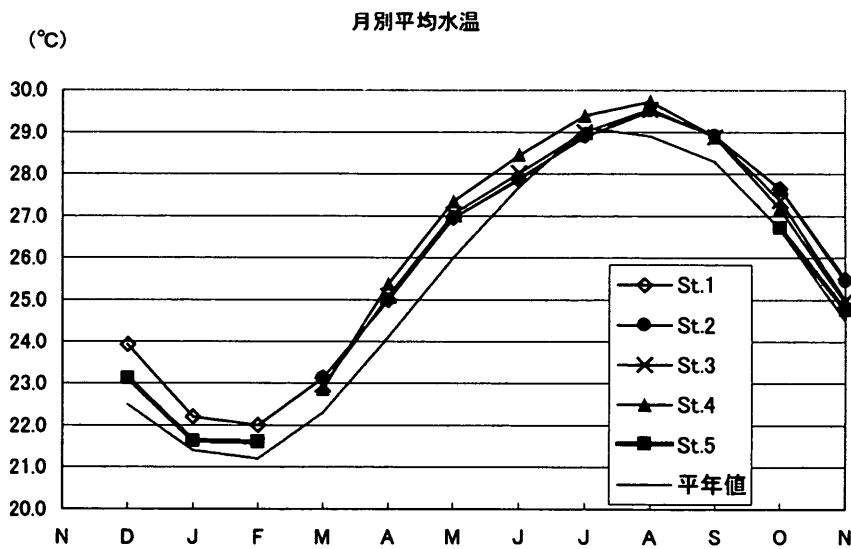


図 19 月平均水温

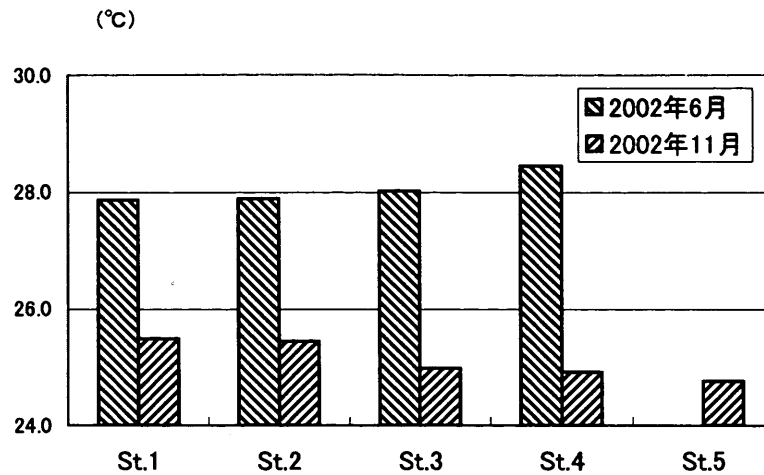


図 20 6月と11月の平均水温 (°C)

高水温期の6月にはSt.1からSt.4に向かって上昇がみられ、低水温期の11月にはSt.1からSt.5に向かって低下がみられた。干潮時停滞した水塊が日射により暖められたり、季節風連吹により冷却された結果である。また、各Stにおいて夏季に日平均水温が30°C以上の日数を図21に示した (St.5は欠測)。St.1からSt.4に向かって日数が増加する傾向がうかがえ、St.4では7,8月で計24日間あった。このように、St.1からSt.5に向かって水温環境は変動が大きくなるが、これがサンゴの死滅率や生長に影響をどのように与えたかについては今後さらに研究が必要がある。

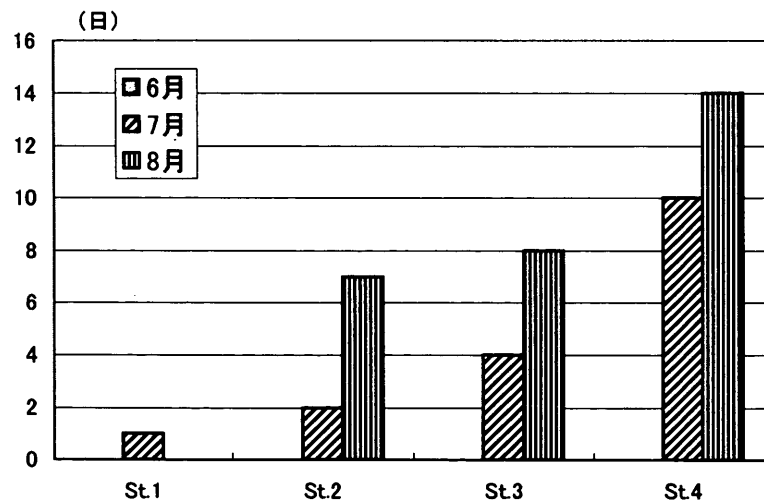


図 21 日平均水温 30°C以上の日数
(St.1は6,7月のみ)

5. 本研究によって得られた成果

短い間隔で連続的に撮影した空中写真画像間のRGB濃度値の変化率はサンゴ被度が低いと、大きくなることが示唆された。*Acropora nobilis*, *A. tenuis*, *A. cytheraea*, *A. formosa*の4種について、異なる堆積物環境での移植実験の結果、堆積物がサンゴの成長の阻害要因となることが示唆され、移植サンゴの中では*Acropora nobilis*が死滅率が低く、生長量が高いことから、堆積物に対する耐性が高いことが明らかとなった。

6. 引用文献

- 1) 今野敏徳・藤原秀一. 1990. 西表島崎山湾自然環境保全地域における海藻植生—1989年夏季相、崎山湾自然環境保全地域調査報告書：43-82. 環境庁自然保護局.
- 2) 環境庁自然保護局・国立公園協会. 1981. 浅海における海中景観の保全と活用の推進に関する調査報告書. 161pp.
- 3) 環境庁自然保護局・海中公園センター. 1994. 第4回自然環境保全基礎調査、海域生物環境調査報告書（干潟、藻場、サンゴ礁）第3巻サンゴ礁、262pp.
- 4) 海中公園センター. 1995. 平成6年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 87pp.
- 5) 海洋科学技術センター. 1991. サンゴ礁造園技術の研究開発報告書. 1：1-25.
- 6) 国営沖縄記念公園事務所. 1999. 平成9年度サンゴ生態基礎調査報告書. 403pp.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

なし

<学術誌（査読なし）>

なし

<書籍>

- ① 「サンゴ礁修復に関する技術手法—現状と展望—」大森信編として書籍刊行の予定
付録Ⅱとして本報告書に添付

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① 平成15年度日本サンゴ礁学会において発表の予定

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

適切な時期、方法を考慮の上、実施の予定。

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

サンゴ移植事業に広く活用できるよう普及に努める。