

#### D-4 サンゴ礁生態系の維持機構の解明とその保全に関する研究

##### (3) サンゴ礁変質のモニタリング手法の開発に関する研究

###### ①水中画像アーカイビングによるサンゴ礁変質のモニタリング手法の開発

研究代表者

国立環境研究所地球環境研究グループ  
海洋研究チーム 原島省

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ  
地球環境研究センター

海洋研究チーム

原島省・功刀正行・原田茂樹  
宮崎忠国

平成6～8年度合計予算額 25,020千円)

(平成8年度予算額 8,247千円)

[要旨] サンゴ礁における生態系構成要素の分布状態とその成長・変質等を客観記述し、サンゴ礁環境の長期変動の解析するために、水中画像を系統的に撮影し、アーカイブ（保存データ）とする手法を確立した。画像取得の方法として以下の2系統を考えた。A方式は同一地点に年1回～数回繰り返しコドラートを置き、スチル画像を撮影する方式で、八重山諸島黒島周囲の7測線で実施した。これらの画像をデジタル化しCDROM格納を行う。さらに、コドラートが正方形になるような幾何補正による規格化をおこない、これに基づいて数値処理を行った。1994～1996年度内に行った画像取得の他に、海中公園センター（財）によって行われた1990～1992年の同地点のコドラート水中画像を収集した。B方式ではビデオカメラとスチルカメラを収めた水中ハウジングを調査船にとりつけ、サンゴ礁海域を低速で航走撮影を行う。この方式で、石垣島～西表島間のリーフに沿って数キロメートル分の画像取得を行い、無作為抽出と考える。96年度には、さらに西海区水産研究所石垣支所所属のグラスボートにより浦底湾のバッチリーフの航走撮影を行った。ビデオ画像は動画処理ソフトウェアによりデジタル化する。得られた画像時系列からは、オニヒトデの食害からのサンゴの回復状況、種による群体成長率の相違、サンゴ種同士の競合などが判読できる。このような手法がサンゴ礁の変質を評価し、環境管理を行うための有効な手法であると考えられる。

[キーワード] サンゴ礁変質、CDROM、アーカイブ、水中コドラート撮影、航走撮影

#### 1. 序

近年、陸上起源による海域の汚染、土地利用形態の改変による栄養塩、土砂流入などの影響によるサンゴへのストレスと、これに起因するサンゴ礁の変質、さらに地球温暖化で海面上昇が起こった場合のサンゴ礁の感受性などが問題になっている。このような背景から、サンゴ礁の保全が日米包括協議の事項にあげられ、国際サンゴ礁イニシアティブ（ICRI）が発足するに至っている。ICRIは、サンゴ礁の保全の機構を創出することに主眼をおいているが、特に、サンゴ礁のモニタリング手法、データ管理に関する事項にプライオリティがおかれている。

サンゴ礁変質の実例あるいは症例として報告されているのは(1)サンゴの白化現象、(2)blackband disease等のサンゴの感染症、(3)オニヒトデやレイシガイダマシによる食害、(4)土砂粒子沈降によるサンゴの弊死、(5)栄養塩濃度の増加によるサンゴ→海藻の遷移等である<sup>7)</sup>。

(1)はサンゴに共生している渦鞭毛藻が何らかのストレスによってサンゴから離脱するため、サンゴ組織が白変し、さらには死に至る現象のことである。この第一の原因は、異常高水温であると考えられているが、その他の環境ストレスも一因となることが考えられる。本課題の他のサブテーマでは、この白化現象を中心に環境ストレスの分析が行われているので、モニタリングにおいても、この症例が捉えられるような手法開発を行うことが必要になる。

近年、広域海洋の環境モニタリングあるいはマッピングに、衛星データの利用が試みられるようになった。これは、主に海水中の植物プランクトン量(クロロフィル濃度)に依存しておこる海面射出光のスペクトル組成の相違を検知するものである。サンゴ礁についても、広域のマッピングという文脈においては、植物プランクトン分布と同様に、Landsat-TMやSPOT-HRVなどの衛星探査が重要な手段となる。ただし、サンゴ礁の変質、すなわち、サンゴ被覆率、種組成、多様度の長期変動や種間競争、サンゴ群体表面の色、成長率、サンゴ→藻類の遷移の有無などの特性は、既存の衛星センサーの空間分解能・スペクトル分解能では十分に捉えきれない。現時点では、分光計測を中心とした基礎研究<sup>8), 10)</sup>に基づいて、今後センサーの研究開発を進めてゆくことが必要であろうと思われる。さらに、衛星データを有効に利用するためには、グラウンドトゥースデータとしての現場海底の分布データを組織的にとる必要がある。

生態系記述のためには、長期的に同じ基準でとられた時系列という要素が必須である<sup>5)</sup>。また、個々のサンゴの存在を判読し、年次間比較に用いるためには、海中での記述情報が必要になる。しかも、観察者による任意性を少なくするためには、画像としての取得・保存が有効である<sup>1)</sup>。

ここで、画像のデータ量は文字データに比べてはるかに大きいため、海上で効率よくデータを記録し、さらに、多量の画像を保存(アーカイビング)しておくための技術上の課題がある。近年、CD-ROMや光磁気ディスクなどの情報媒体の進歩により、大量の画像保存がパーソナルコンピュータシステムのレベルで可能になった。このサブテーマでは、このような進展に合わせ、海域現場でどのような撮影システムおよびプラットフォームを稼働するかを考案し、どのように系統的に水中画像を採取してゆくに焦点をあわせた。また、衛星のミッションと同様、幾何補正、色管理、データアーカイブ作成・解析の手法についても、必要最小限の手法を確立することに努めた。

## 2. 水中画像取得法の検討

### 2-1. カメラの選択・検討

第一に、スチルカメラか、ビデオかとの選択がある。作成したアーカイブから、後にサンゴ礁構成生物群集の目、属、種など分類のhierarchyのどの階層まで判読する必要があるかという任意性はあるが、画像分解能が高いほど有利であることは間違いない。

スチルカメラの特性としては、画質(色再現、画像分解能)がよいことがあげられる。また、画材の歴史が長いために、規格が安定しており、将来、各国が共通の画像アーカイブを作る際にも合意が得やすいと思われる。

カラーフィルムが長期的には褪色するから、CDROMなどの電子媒体による保存が必須である。画期的なことは、近年、35mmフィルムからフィルムスキャナーによりフォトCDを作成するサービスが商業ベースで行われるようになったことである。このフォトCD規格では、標準

で、192×128、384×256、768×512、1536×1024、3072×2048の5段階の画像分解能が設けられている。したがって、検索用に比較的荒い画像が必要な場合、通常のパソコンで画像処理を行う場合、さらに高分解能を必要とする場合、などに応じて適宜選択できる。

また、カメラに関しても（ア）ニコノスなどの水中カメラ、（イ）通常の一画レフやコンパクトカメラなどを水中ハウジングに格納して使う、の選択がある。一画レフにおいてはレンズの焦点距離の選択が豊富であるが、水中では広角系統のレンズが普通である。さらに、水中では空中よりも実効上焦点距離が長くなり、空気中での焦点距離を海水の屈折率で割った値となる。また、水中ハウジングのポート（レンズ前のガラス部分）が平面であると、画像周辺部に収差がでやすいので、ドームポート仕様になっていることが好ましい。

近年技術的發展がめざましいものに、（ウ）CCDカメラがある。現在、分解能が1000×1200程度のもので製作されており、画質の点でも要求に答えられるようになりつつある。ただし、個々の画像のファイルサイズが大きくなるため、本業務のように多量の画像を次々に、船上で採取してゆくことを考慮すると、現時点ではメモリ容量やディスクへのデータ転送率の点で無理がある。

一方、ビデオカメラは、分解能ではスチルカメラに一步ゆずるが、多量の画像を連続的あるいは高頻度に格納してゆくことができる。また、コンピュータ上でビデオ取り込みプログラムにより、デジタルファイルへの変換が可能になっている。現在、民生用8mmビデオのうちHi8の分解能が48万画素（800×600程度）程度であり、価格、水中ハウジングの作成、水中操作の容易さを考慮するとこのクラスの機器の利用が中心になる。現在、オーストラリアのAIMSやハワイ大学が、このクラスのビデオによりライントランセクトに沿ったサンゴ分布の画像アーカイブ作成を行っている。

画質に関しては、業務用ビデオさらにはハイビジョンビデオカメラが、分解能の点でも事実上遜色ないところにまで達しているが、小型船舶上で作動するには無理がある。さらに軽量化、操作の簡便化も進みつつあるため、将来的にはハイビジョンの使用が考慮に値すると思われる。

### 3. システム作成と画像取得方式

以上の点を考慮し、図1のフローに示すように、コドラート撮影（A.）と航走撮影（B.）の2系統による画像取得を採用した。

A.では、海域に水中セメントで固定したマーカーを設置し、この間に調査時に50mの巻き尺を張る。5mごとに1m×1mのコドラート（方形枠）を置いてスチルカメラで画像取得を行う。さらに各5m間を補間する目的で、巻き尺に沿ってビデオカメラで連続的に撮影して行く方式も併用した。

B.では、ビデオカメラとスチルカメラをそれぞれ防水ハウジングに格納し、これを調査船に装着し、ビデオのモニターを船上で見ながら連続的に撮影してゆく。また、スチルカメラは、パーソナルコンピュータのキー入力により、だいたい数秒に1回の割合で撮影してゆく。シャッターと同時に、GPSによる緯度・経度、魚群探知機による深度をパーソナルコンピュータに記録する。なお、GPSは現在標準仕様のものであるが、これによる緯度・経度出力の相対精度は0.01分、すなわち20m程度であるため、GPS出力値を見ながら同一のサンゴ群体に再度アクセスすることには無理がある。将来的に陸上局に準拠したディファレンシャル型のGPSが使用できれば、精度をほぼ1m以内程度にすることができ、同一のサンゴ群体上に繰り返しアクセスすることも可能になる。したがって、現行のB.方式では海域のサンゴを無作為抽出的に記

サンゴ礁水中画像のアーカイビング

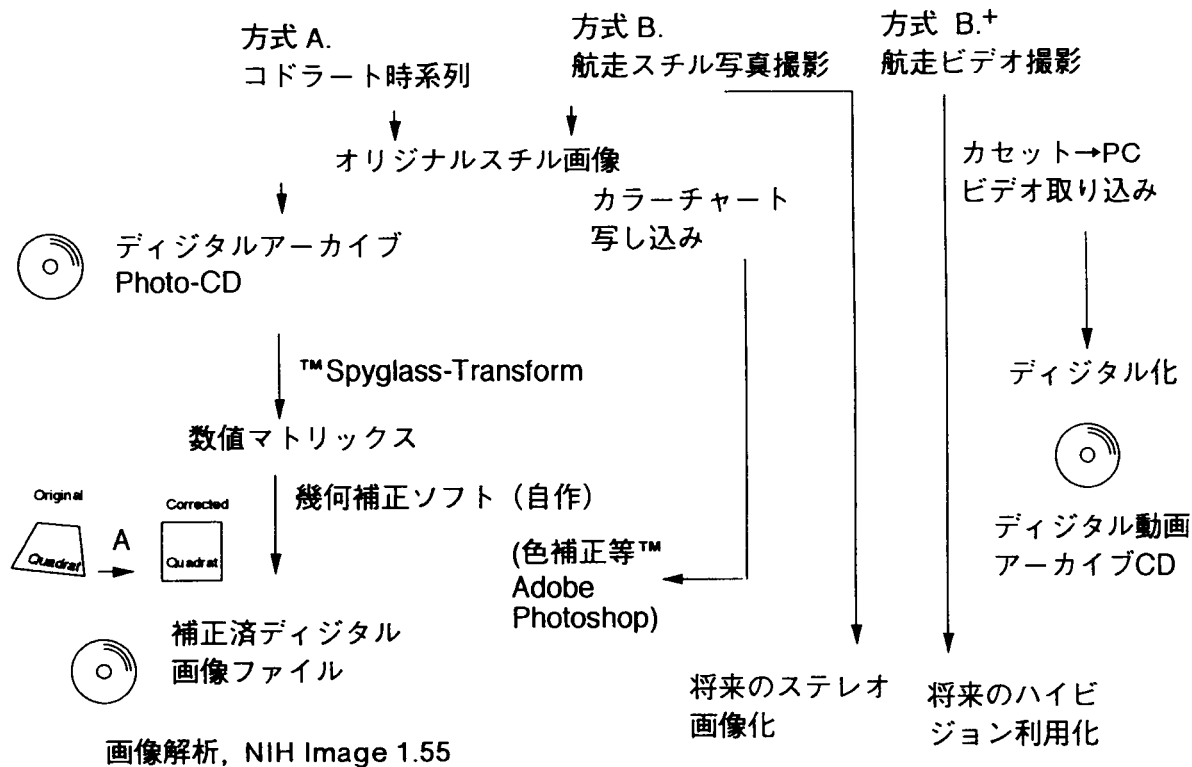


図1 水中画像取得およびデータ処理フロー図

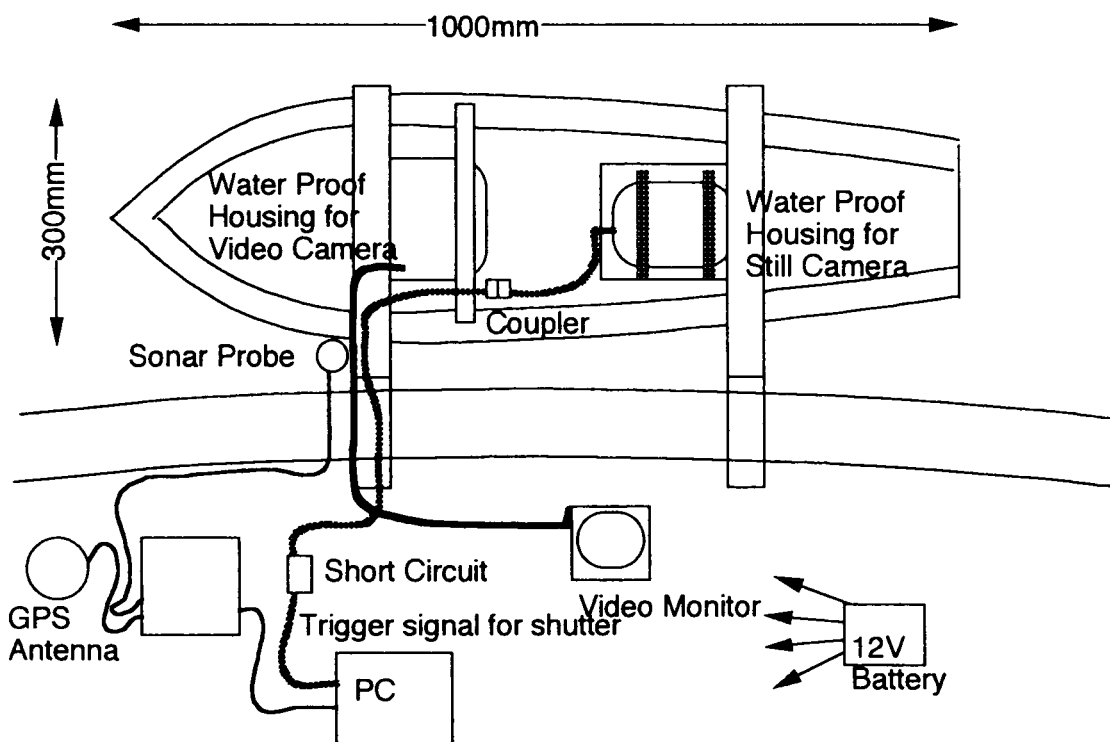


図2 海域航走方式の画像取得用側船と信号処理系統図

述したという意味あいをもつといえるだろう。

1994年度には、この水中部を小型カタマラン（双胴船）の中央にとりつけ、調査船で曳航する方式でB.を実施した。ただし、この方式では、曳航索と信号線のトラブルが起りやすいことがわかり、1995年度には、水中ハウジングを約1mの流線型の小船体（図2）に納め、調査船の脇に装着する方式で行った。さらに、1996年度には、西海区水産研究所石垣支所所有のグラスボートで航走撮影を行った。

なお、海水中では、比較的長波長側（赤側）の光が吸収されやすいため、A.、B.ともに本来の対象物の色が空中太陽光下よりも青みを帯びる。また、天然光の状態の変化、フィルム選択・現像状態の相違などにより、得られた画像の色はかならずしも画一的なものではない。本研究では、これらの補正のために、特にフィルターによる色温度の調整や人工光使用などの算段はとらず、後述のように、デジタル化した画像をコンピュータソフトウェアで修正を行う方針をとった。このための、海中での色再現が空中太陽光下からどの程度ずれているかをモニターするため、KODAKより発売されているカラーチャートを防水処理し、フィルム1本につき1コマの割合で、対象物とともに写し込んだ。原理的には、写されたテストチャートが空中太陽光下、あるいは5000Kの標準光下と同じ色になるように補正処理すればよいことになる。

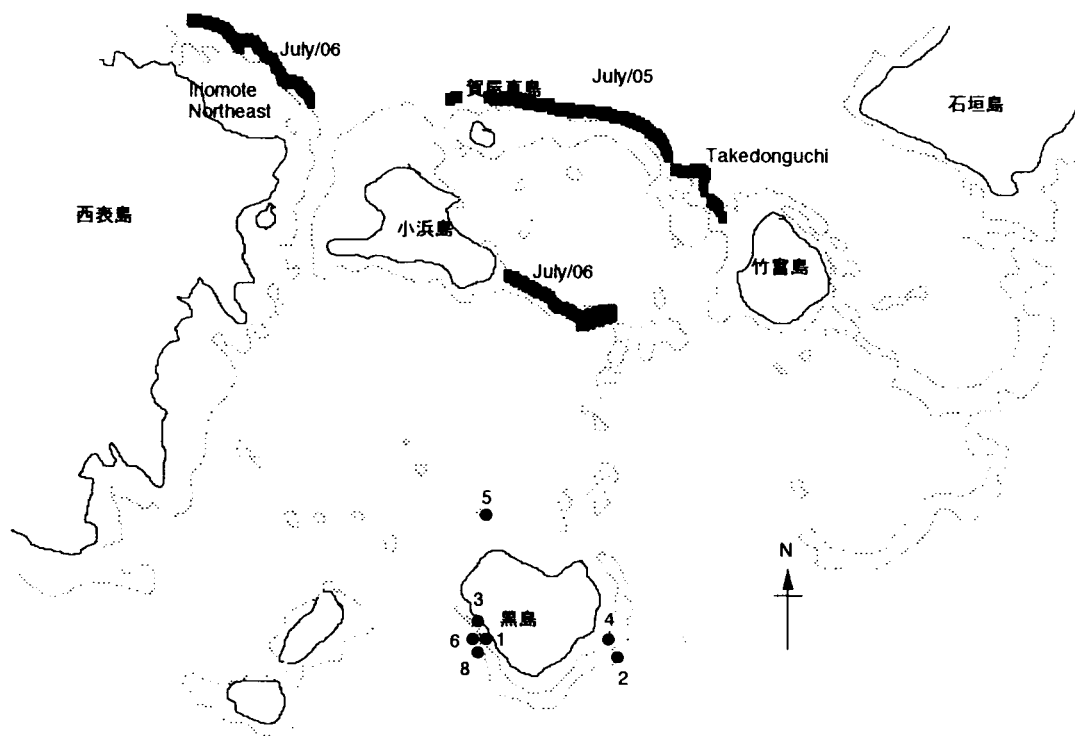


図3 石西礁湖における画像取得地点

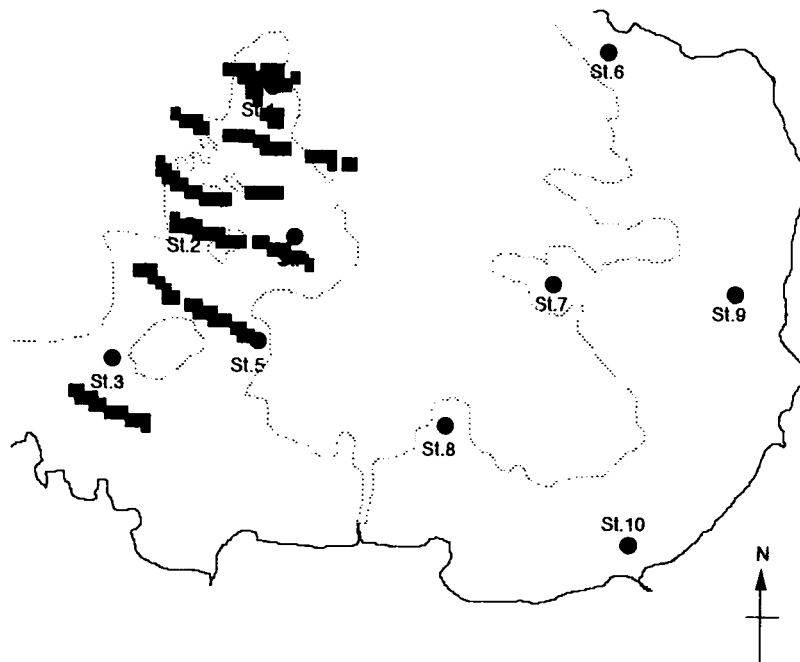


図4石垣島浦底湾における画像の航走による取得ライン  
(●は南西海区水産研究所、藤岡らによるコドラート調査地点)。

#### 4.フィールドにおける画像取得

図3に、1994-1996年度に、A方式で行った黒島周囲のコドラート画像取得地点を示す。これらの地点は、1990年度から3年の間、環境庁自然保護局から海中公園センターへの委託事業としてコドラート調査が行われた際のマーカーを復活したものである。5年間の間に、サンゴの成長等で必ずしも同一の群体かどうかの確認が容易ではなかった。従って、すべての地点で両調査の撮影対象の連続性が満たされたわけではない。

B方式で行った航走ルートも図3に示す。また、図4は、1997年7月3日に、石垣島浦底湾のパッチリーフにおいて、西海区水産研究所のグラスボート「ひるぎ」に設置して航走撮影を行ったコースを示す。取得したスチル画像とビデオ画像の目録をAppendixに示した。

#### 5.画像の処理・解析フロー

以上のようにして得られたスチル画像はデジタル化してフォトCDに格納した。図1に示したように、これらのオリジナル画像は、必ずしもコドラートの真上から撮られていないから、コドラートが正方形であるとはかぎらない。これから、サンゴ群体の被覆率等を計算するためには、なんらかの規格化をほどこす必要がある。そこで、射影変換のアルゴリズムによる幾何補正プログラムを作成した。また、このフローでもう1つの重要なポイントは、数値処理をするために、オリジナルのカラー写真の色に対応した数値を割り当てることであり、

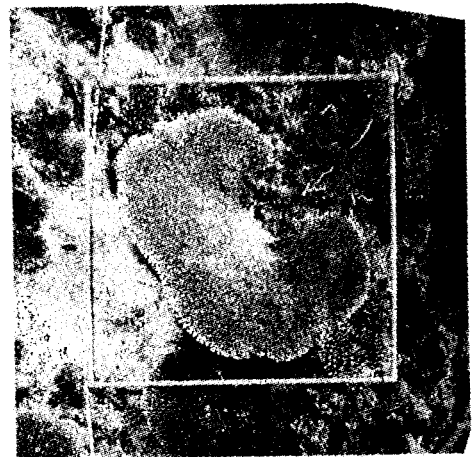
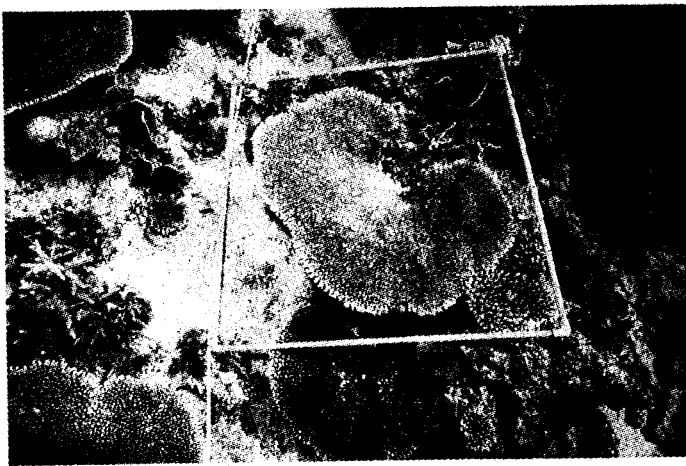
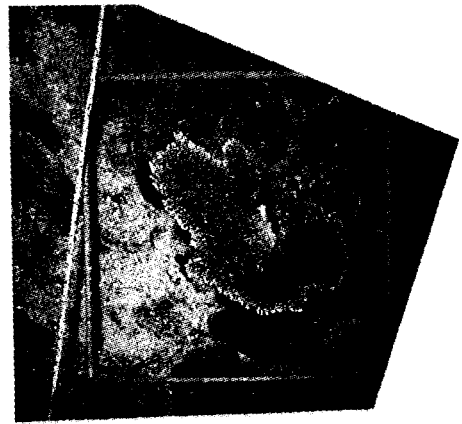
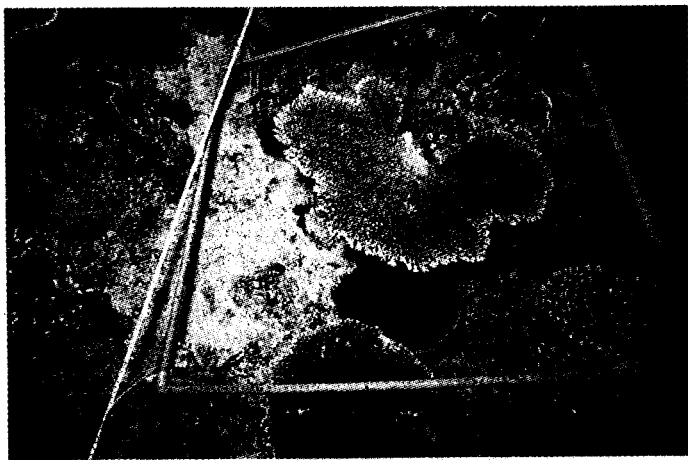
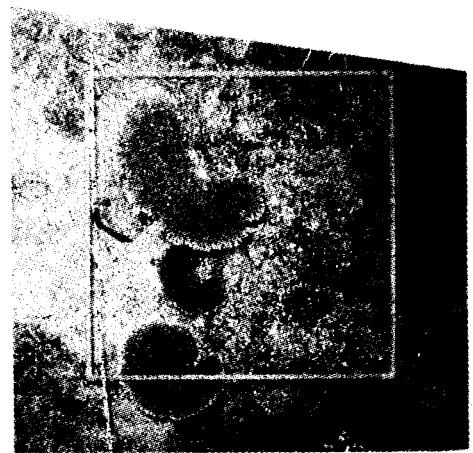
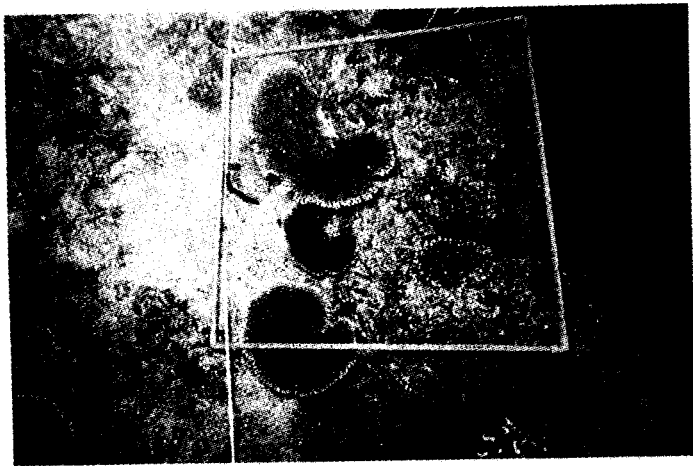
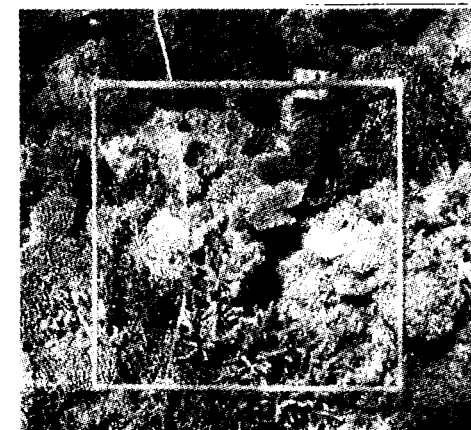
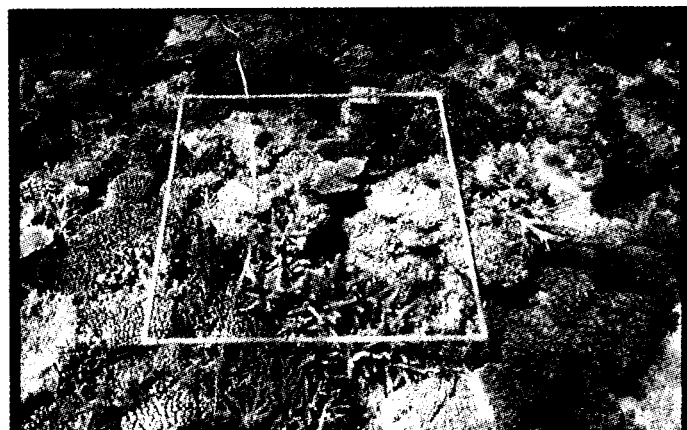
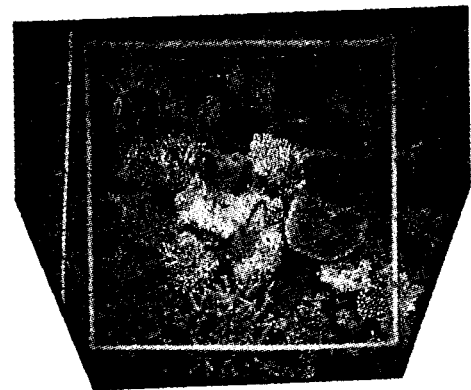
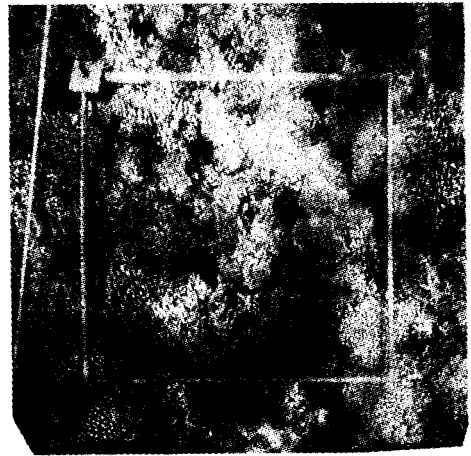
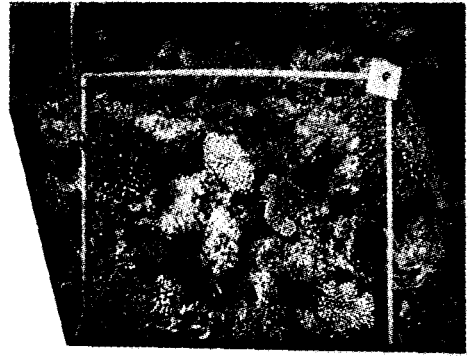
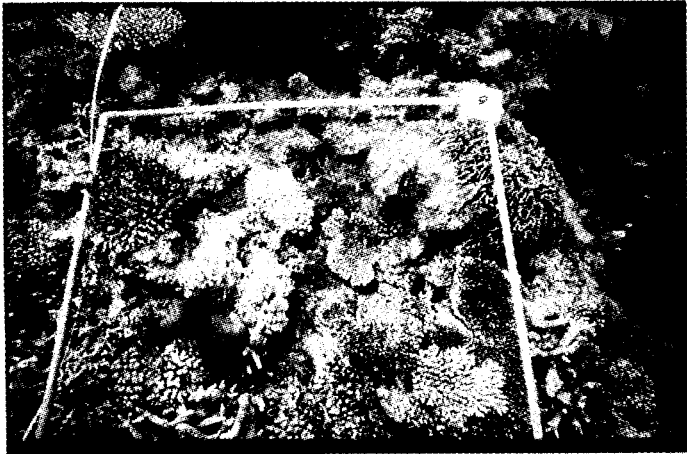


図5 (上図) 黒島北側パッチリーフSt5R5地点における1990-1992年のサンゴ群体の成長  
左側はオリジナル、右側はそれを幾何補正したもの。

図6 (次図) 図5の近傍の地点における1994-1996年のサンゴ群体の成長





SpyglassTransformという既存ソフトウェアにこの機能があった。幾何補正のフローを以下に示す。

1. フォトCD中のオリジナル画像ファイルをSpyglass Transformに取り込み、カラースケールとしてMacintosh Color System Tableを選択して画像表示する。
2. 表示された画像の中で、コードラートの4隅を左上隅→左下隅→右下隅→右上隅の順でクリックし、画面左下に表示される座標値を読みとる。
3. 画像ウィンドウから、(背後の)数値テキストウィンドウに切り替え、数値表をテキスト保存する。
4. 幾何補正プログラムを実行するが、2.で読みとったコードラート4隅の位置座標をパラメータとして代入する。幾何補正されたファイルがテキスト型で出力される。
5. 幾何補正後のテキスト表をSpyglass Transformにより画像化する。
6. この幾何補正済みファイルをTMADOBE Photoshopに取り込み、画像(Tiffファイル形式)で保存する。

#### 6. アーカイブからの画像時系列出力

図5に1990年度から3年間のコードラート画像を示す。それぞれ左側がオリジナル画像、右側が幾何補正済み画像である(黒島北方のSt.5測線上始点より5mの地点)。縦方向下向きに年月の推移を示す。図6も同様に、1994年から3年間のコードラート画像を示す。本来、同一地点の復活を意図したが、この地点においては、前述のように、両シリーズ間の連続性は達成できなかった。図5の1990年頃は、オニヒトデの食害からサンゴが回復しはじめた時期であり、サンゴ群体の加入後で、各群体が空白を占有するための競争状態にあったと判断できる。

なお、幾何補正された画像からは、Image1.55(アメリカNIHより公開されているパブリックドメインソフトウェア)等を用いて、群体の面的な成長率等を算出することが可能である。この計算例については、95年度の報告書に記述した。

図5中では、画面中央部の卓状ミドリイシ群体の面的な成長率が速く、1年間で10%程度にまで達している。また、右下のサンゴとの競合・相克も判読できる。これに対して、図6は、やや極相に近い状態を表現しているらしく、各サンゴ群体の面的な成長率もそれほど大きくない。

このように、面的成長率は、種により(卓状ミドリイシは速く、塊状サンゴは遅い等)、また、群体相互間の競合等により影響を受ける。当然、水質環境、海水流動や光環境も成長率に影響すると思われるため、今後、画像アーカイブの充実と共にこれらの因子とサンゴ成長との関連を解析することが必要になると思われる。

なお、単一の画像からの幾何補正画像には、厳密にはサンゴの高さによる誤差が存在する(サンゴの背が高く、カメラに近いほど大きく写る)。この誤差を解消するためには、カメラ2台による立体画像としてのアーカイブを作成することが有効である。1996年10月の画像取得(Appendix参照)以降は、試行としての立体画像取得を行った。

#### 7. 研究成果のまとめ

上記のように、サンゴ礁生態系の長期変化、環境ストレスによる変質をモニター・客観記述するために、水中画像のアーカイビング手法を確立した。画像取得は、同一地点でのコードラート方式(A.)とある程度広域を対象とした航走方式(B.)による。スチル画像、ビデオ画像ともに、原画像を、デジタル化、CDROM格納によりアーカイブ(保存記録)とする。

A方式では、デジタル化した原画像ファイルからMacintoshコンピュータ上で幾何補正し、画像解析するフローを作成した。コドラートを設置する関係上、広域を対象とするのには適さないが、各海域をのダイビングポイントを熟知したダイバーのボランティアによって、広域を対象としたアーカイブを作ることは可能であると考えられる。

B方式は、深いところのサンゴの記述するには適さないが、通常のサンゴ礁海域の透明度で水深3メートルくらいまでで、ほぼ属レベルまでの判別に関して有効であることが確認できた。今後、この方式はデジタルビデオ化、ハイビジョンビデオの簡便化、ビデオ画像のコンピュータ処理技術の高度化などにより、発展性がある。

単一の画像から平面投影面積を算出すると、サンゴ群体の高度差（カメラとの距離の不均一さ）のため誤差が含まれることがある。この解消のためには、2台のカメラによる立体画像取得を併用することが有効である。したがって、撮影者が熟練しており、後に鉛直座標を算出する目的にはB方式が適している。広範な地域を対象としてボランティアダイバー等に依頼する場合には、黙視で解析することを前提にA方式が適していると思われる。

本研究期間に取得された水中画像からは、群体レベルで白化したサンゴはみられなかった。1996年10月の調査で、サンゴの一部が暗緑色になっている画像が得られたが、近年報告されているblackband Disease<sup>12)</sup>によるものかは確認できなかった。

## 8. 引用文献

- 1) Done, T. (1988) Photogrammetry in coral ecology: A technique for the study of change in coral communities, Proc. 4th Internat'l Coral Reef Symp., Manila, 1988, Vol2., 315-320.
- 2) 海中公園センター(1990) 平成元年度サンゴ礁生態系の維持及び安定化機構に関する研究報告
- 3) 海中公園センター(1991) 平成2年度サンゴ礁生態系の維持及び安定化機構に関する研究報告
- 4) 海中公園センター(1992) 平成3年度サンゴ礁生態系の維持及び安定化機構に関する研究報告
- 5) Powell, T. M. and Steele, J. (Eds.) (1995) Ecological Time Series, Chapman & Hall, 491p.
- 6) English, S., Wilkinson, C and Baker, V. (eds.) (1994), Survey Manual for Tropical Marine Resources, p368, Australian Institute of Marine Science, Townsville.
- 7) Birkeland, C. (Ed.) (1997) Life and Death of Coral Reefs, Chapman & Hall, p536.

## 9. 国際共同研究等の状況

- ・ オーストラリア海洋研究所と、水中画像取得方式に関して相互比較を行った。
- ・ 1997年2月17～20日に、Internatinal Coral Reef Initiative、第2回東アジア域会合が開催され、各国のサンゴ礁環境の現況、環境保全対策の実状、public Awareness, capacity buildingなどについて議論、行動計画状況の紹介、今後の行動計画について議論を行った。また、韓国海洋研究所が済州島のソフトコーラル群集について、国立環境研究所と同様な手法で水中画像アーカイビングを行う方針で、1997年度以降の共同研究の方針を決めた（共同研究項目未定）。

## 10. 研究発表の状況

### 10-1. 口頭発表

- 8) 原島省、宮崎忠国、御前洋、浅井信吉、鈴木孝雄、興石肇、中谷幸廣、稲見薫(1994)、サンゴ礁のモニタリング(1), 水中分光輝度計測, 日本海洋学会1994年度春季大会講演要旨、328-329.

9)原島省,功刀正行,宮崎忠国,藤原秀一,森美枝,佐藤文宏,浅井信吉,宮丸正人,中谷幸廣(1995)、サンゴ礁のモニタリング(2),水中画像アーカイビング,日本海洋学会1995年度春季大会講演要旨、350-351.

10) Miyazaki, T, Nakatani, Y., and Harashima, A. (1995), Measuring the coral reef distribution of Kuroshima Island by satellite remote sensing, Proc. of Conf. on Global Process Monitoring and Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice, 65-72, Paris.

#### 10-2.印刷発表

11)原島省(1996)データの画像化・画像のデータ化,ふんせき、1996-4, 28-35.

12)原島省・功刀正行(1997)「海の働きと海洋汚染」、裳華房ポピュラーサイエンス、181p。

### Appendix 1. 取得画像データリスト]

#### A-1 過去のコドラート画像データ (海中公園センター調査<sup>2),3),4)</sup>より)

1990年 1月 黒島周辺 8測線(各測線 10ポイントコドラート)

1990年 6月 黒島周辺 8測線(各測線 10ポイントコドラート)

1990年12月 黒島周辺 8測線(各測線 10ポイントコドラート)

1991年 6月 黒島周辺 8測線(各測線 10ポイントコドラート)

1991年11月 黒島周辺 8測線(各測線 10ポイントコドラート)

#### A-2 本サブテーマによるコドラート画像

1994年10月 黒島周辺 7測線(各測線 10ポイントコドラート)

1995年 7月 黒島周辺 7測線(各測線 10ポイントコドラート)

1995年10月 黒島港北パッチリーフの測線のみ 10ポイントコドラート  
50m測線に沿ったビデオ (遊泳撮影)

1996年 1月 黒島港北パッチリーフの測線のみ 10ポイントコドラート  
同測線に沿ったビデオ (遊泳撮影)

1996年 4月 黒島港北パッチリーフの測線のみ 10ポイントコドラート  
同測線に沿ったビデオ (遊泳撮影)

1996年 7月 黒島周辺 7測線(各測線 10ポイントコドラート)  
同測線に沿ったビデオ撮影

1996年10月 黒島港北パッチリーフの測線のみ 10ポイントコドラート (ステレオ撮影)  
同測線に沿ったビデオ (遊泳撮影)

1997年 2月 黒島港北パッチリーフの測線のみ 10ポイントコドラート (ステレオ撮影)  
同測線に沿ったビデオ (遊泳撮影)

#### B.航走調査

1994年 10月ビデオおよびスチル写真

西表島北東リーフ→タキドングチ

賀屋真島→小浜島リーフ北側・往復・南側

1995年 7月 ビデオ&スチル写真

西表島北東リーフ→タキドングチ

小浜島リーフ北側、南側往復

1996年 7月 ビデオ&スチル写真 浦底湾

西表島北東リーフ→タキドングチ

小浜島リーフ北側、南側往復