

F-5 サンゴ礁における生物多様性構造の解明とその保全に関する研究

(3) サンゴ礁生物多様性モニタリング手法の開発に関する研究

③ 水中画像アーカイブによるサンゴ礁の生物多様性維持機構の解明に関する研究

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 海洋研究チーム 原島省・功刀正行

平成9年度～11年度合計予算額 17,290 千円)
(平成11年度予算額 5,704 千円)

[要旨] サンゴ礁においては、サンゴの新規加入によるサンゴ自身の多様性ととともに、その成長でできた3次元構造が、空隙棲息性や穿孔性生物の多様性を維持している。逆に環境ストレスはサンゴを破壊・変質させ逆の方向に働く。これらの過程を検知するためには、数年以上にわたってそれらの変遷を記述する必要がある。しかも空間的条件づけが重要であるため、単なる生物群集のセンサスだけでは不十分であり、サンゴの3次元形状や群体相互間の位置関係を立体画像として蓄積し長期時系列的な評価を供することが必要になる。これがアーカイビングである。この目的で2方式の技術開発を行った。方式Aは、水中スチルカメラを並列させて同一地点に反復的にアクセスして画像取得する方法で、八重山諸島の黒島周囲の2つの固定トランセクトに適用した。方式Bは、ステレオビデオカメラをガラスポートに設置して航走しながら連続的に撮影するもので石垣島浦底湾に適用した。さらに、ステレオ画像から3次元情報を抽出する画像解析フローを確立した。

また、得られたアーカイブから、八重山諸島周辺では1980年代にオニヒトデの食害で壊滅したサンゴ礁が90年代にはいって回復基調にあったこと、裸地にサンゴが加入してゆく過程では、多種のサンゴコロニーが存在するが、卓状ミドリイシのように、光獲得の競合のために速い成長スピードを生存戦略とするものが占める割合が大きくなること、塊状サンゴのように、成長は遅いが群体間の闘争に強いことを生存戦略にすること、等の所見が得られた、また、サンゴの感染症と思われる弊死や、1998年の異常高水温による白化現象およびその後の弊死が記述されたが、これは海水交流の悪い場所で顕著だった。以上の結果により、生物多様性の維持機構の解明には、水中立体画像のアーカイブを取得し、その成長・変質を長期的に解析・評価することが有効な手段であると結論できる。

[キーワード] 生物多様性、サンゴ成長、3次元構造、水中ステレオ画像アーカイブ

1. 序

生物多様性が形成・維持される機構の一つとして、基幹生物によって形成された3次元空間構造が二次的な棲息空間あるいはニッチを形成することがあげられる。造礁サンゴの成長(accretion)¹⁾は、新規加入(recruitment)や再生(reproduction)とともに、まさにこの役割をはたし

ており、逆にその破壊あるいは変質は多様性を減少させる要因となる。さらに、サンゴの成長は炭酸カルシウムの析出(calcification)あるいは石灰岩の生成²⁾という要素をもち、物質循環や気候変動にも大きく関わっている。また、地球温暖化によって現実的に海面上昇が起これば、そのスピードとサンゴの成長スピード³⁾のどちらが大きいかは、温暖化の影響評価の点でも重要になる。また、サンゴ群体の3次元形状は、流れとの相互作用という要素^{4), 5)}、すなわち、波浪への耐久度や通過流におけるプランクトンの摂食の点でもサンゴ礁の生物多様性維持機構に強く関わってくる。

2. 目的

上記の過程を解明するには、長期にわたって生物群集の分布構造を記述して年次間の変化を抽出する必要がある。ただし、空間的条件づけが重要であるから、生物群集のセンサスだけでは不十分で、3次元的なサンゴ形状・分布の変化を客観記述する必要がある。この目的で、これまでも写真計測技術(photogrammetry)を適用することが試みられている⁶⁾。特に我々は、本研究に先だつ1994～96年度の研究課題「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」のサブサブテーマ「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」において、水中画像を系統的に撮影し、アーカイブ(保存データ)とする手法を構築した^{7), 8)}。その際には、主にモノラルの画像を中心とした画像取得・解析を行った。本研究期間では、さらにステレオ画像の取得による3次元記述という要素を加え、合わせて計6年間に得られた画像アーカイブの所見から、生物多様性を維持させている機構を抽出することを目的とする。

これまでも、AIMS(Australian Institute for Marine Sciences)で、ステレオ画像によるサンゴ分布の把握が試みられた⁹⁾。本テーマでは、この方式も参考にして、それ以来の撮影機材・画像処理技術の進歩もとりいれることにより、新規に2つの方式によるステレオ画像取得方式および得られたステレオペアから、パーソナルコンピュータ上で3次元情報を抽出する手法を確立した。

3. 研究方法

3-1 A方式(スチル画像)

本方式は、スチルカメラ2台の並列させて同一のサンゴ群体に反復的にアクセスし、ステレオ画像ペアを取得する。そして、それから写真計測により3次元数値情報を抽出する。研究の過程では、様々な選択肢について試行錯誤を行ったが(図1)、最終的には、画像取得の機材としてはNikonos-Vを用い、レンズは水中専用のUW-Nikkor 20mm(水中では焦点距離26mm相当)を用いることが最良であることが確認された(図1中のa-1)。また、良好な画像を得るためには、深度1.3～5mが適しており、これからはずれる場合には、潮時等の選択により調整する必要がある。

また、生物センサスに一般的に使われるコドラート(方形枠)は、本研究の場合、記述範囲と縮尺を示すだけでなく、3次元写真計測の際の標定点としての役割があり、最終的には図2(a)のように、コドラートの4隅に高さ0.5mの直交する柱を立てて、独立した8点の3次元座標が既知となるような設定とした。

撮影時に記録される色は、天候、波浪状態、透明度、深度、カメラと対象物の間の距離などによって対象物の本来の色とは異なる。また、フィルムの種類、ロット、現像状態、さらにはディ

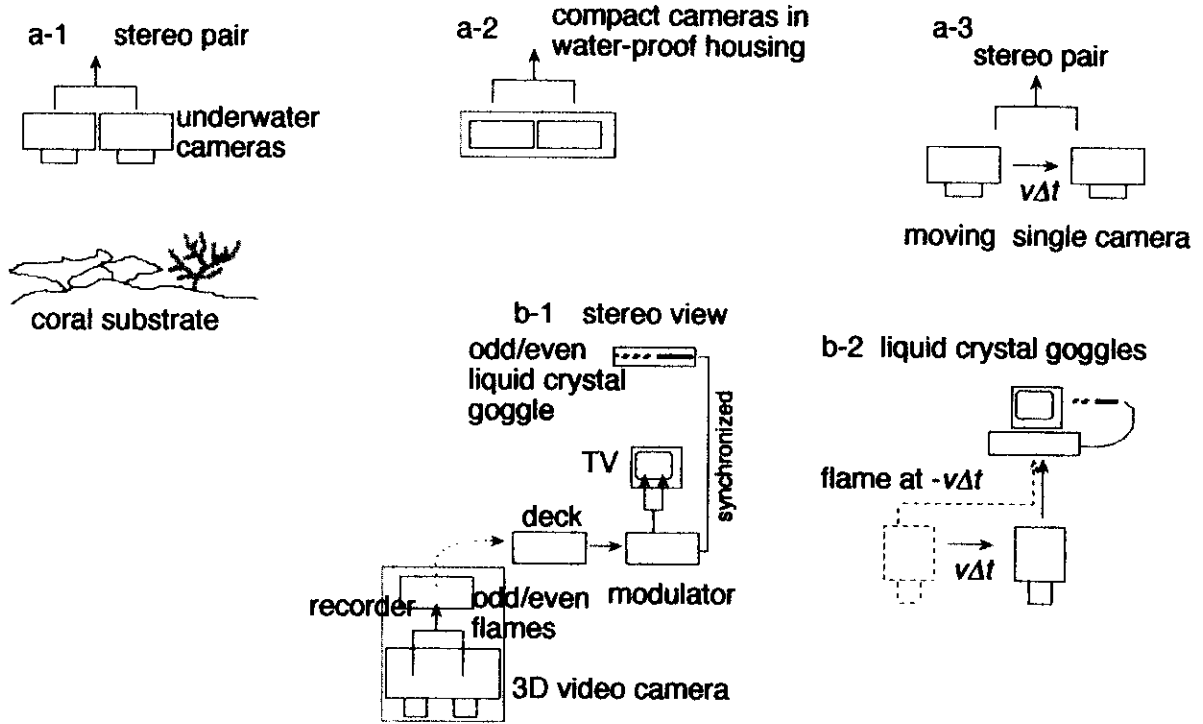


図 1 (a) 水中ステレオ画像の取得方式

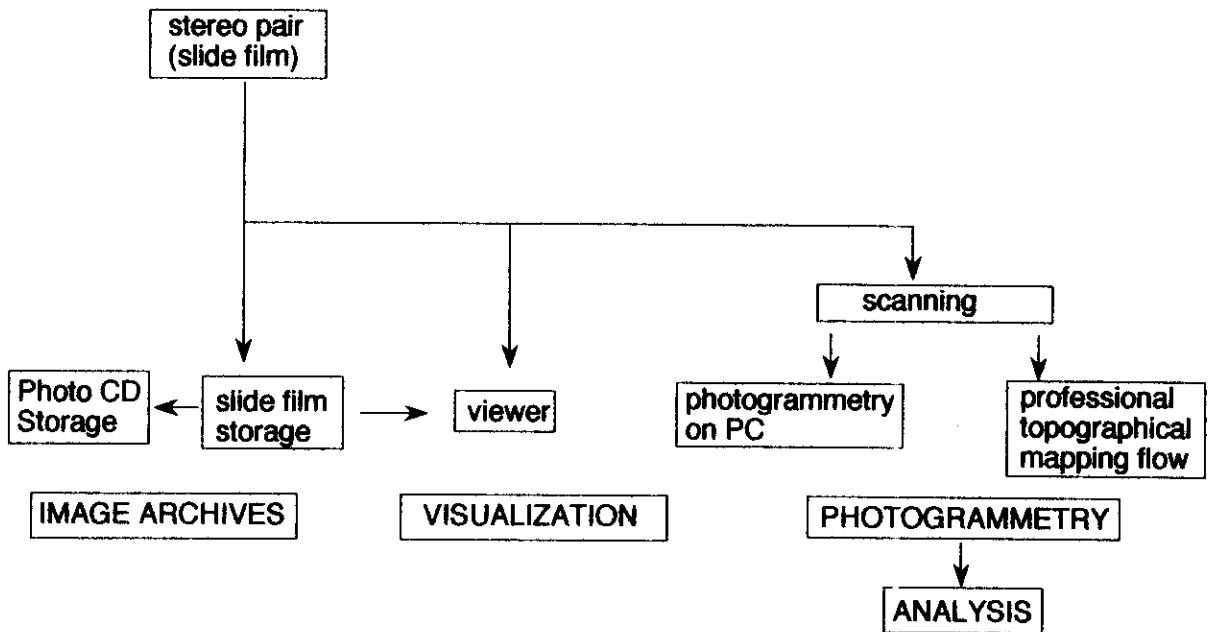


図 1 (b) 水中ステレオ画像のアーカイビングおよび解析のフロー

デジタル化する時のスキャナーや再生時のモニターの設定によっても異なってくる。これらの差異を記録媒体で画一的に補正することは難しい。このため、記録された色が現実の色からどれくらいシフトしているかを推定できるように、撮影の際に標準カラーチャート（KODAK 製）を防水ラミネート処理したものをコードラートにつけ、画像に写し込んだ。原理的には、Photoshop などのフォトタッチプログラムで、RGB 分解した各成分を、写しこまれたカラーチャートが本来の色に近づくように調整すればよい。具体的には R の情報をエンハンスするのである。ただし、前述のように、深い位置での撮影や光路長の長い場合には、R の情報量が小さくなっているため、エンハンスしても良好な画像にならないこともある。

上記以外の設定をした場合に生ずる問題は以下のようにまとめられる。

i) 水中カメラのかわりに、防水ハウジングに一般のカメラを格納するほうが機材の選択範囲はひろがる。ただし、ハウジング窓面における光の屈折のため、画像に糸巻き状収差が生じ、可視化には十分であるが写真計測には適さない。

ii) ただし、ボランティアダイバーなどに預託して簡便にステレオ画像採取を依頼するものとして、水中アクリルハウジングにコンパクトカメラ（Kyocera/P-mini）2 台をに格納したものも作成した（図 1 中の a-2）。この場合には前述のように収差が出たが、簡便な立体視には十分であった。

iii) 5 m 程度より深い場合には、光量が不足になり、特に長波長側が著しい。ストロボの使用は一助となるが、左右のストロボの重複などの問題が出てくる。すなわち、厳密には一灯のストロボの閃光時に左右のシャッターを同調させるか、左右のシャッターが開く時間をずらし、それぞれの時間に 2 台のストロボを別々に閃光させるような設定が必要なる。このメカニズムを組み込むと、設定が複雑になり、コストやダイビング作業への負担が増加する。

iv) 上記範囲より浅い場合には、対象物への距離が長くとれず、超広角の水中レンズを用いる必要がある。この場合レンズが高価となり、また像の歪みの問題も出てくる。

3-2 A 方式のフィールド適用

同一サンゴ群体の変化を記述するため、図 3 に示すように石西礁湖の黒島周囲の 2 地点にトランセクトを設け、反復的（表 1）画像取得を行った。本計画開始時に、両トランセクトの両端を示す標識を水中セメントで固定し、各調査のたびに、この間に巻き尺を張り、5m おきにコードラートを置いて撮影した（図 2）。コードラートの最終形は図 4 に示すように 1m × 1m の 4 隅に 0.5m のロッドを立てたものであるが、この形に至るまでには、3 角柱型、0.5m × 0.5m × 0.5m の立方体型などいくつかの形を試した。

黒島港北の調査区（図 3 中の Pt.19, 24° 15' 32.7"N, 123° 59' 58.0"E）では、黒島港の北方約 1km 沖に位置する離礁群の 1 つの上部に、起点 90°（東）から終点 270°（西）の方向にトランセクトを設定した。ライン下の水深（平均潮位面から）は平均 1.8m である。

阿名泊前の調査区（図 3 中の Pt.11, 24° 14' 48.6"N, 124° 01' 43.6"E）では黒島北東側の阿名泊沖約 500m の、礁池内に散在する離礁群の 1 つを選定し、その礁上部から斜面にかけて起点 285°（西北西）から終点 105°（東南東）の向きにトランセクトを設定した。ライン下の水深（平均潮位面からの深さ）は平均 1.7m である。

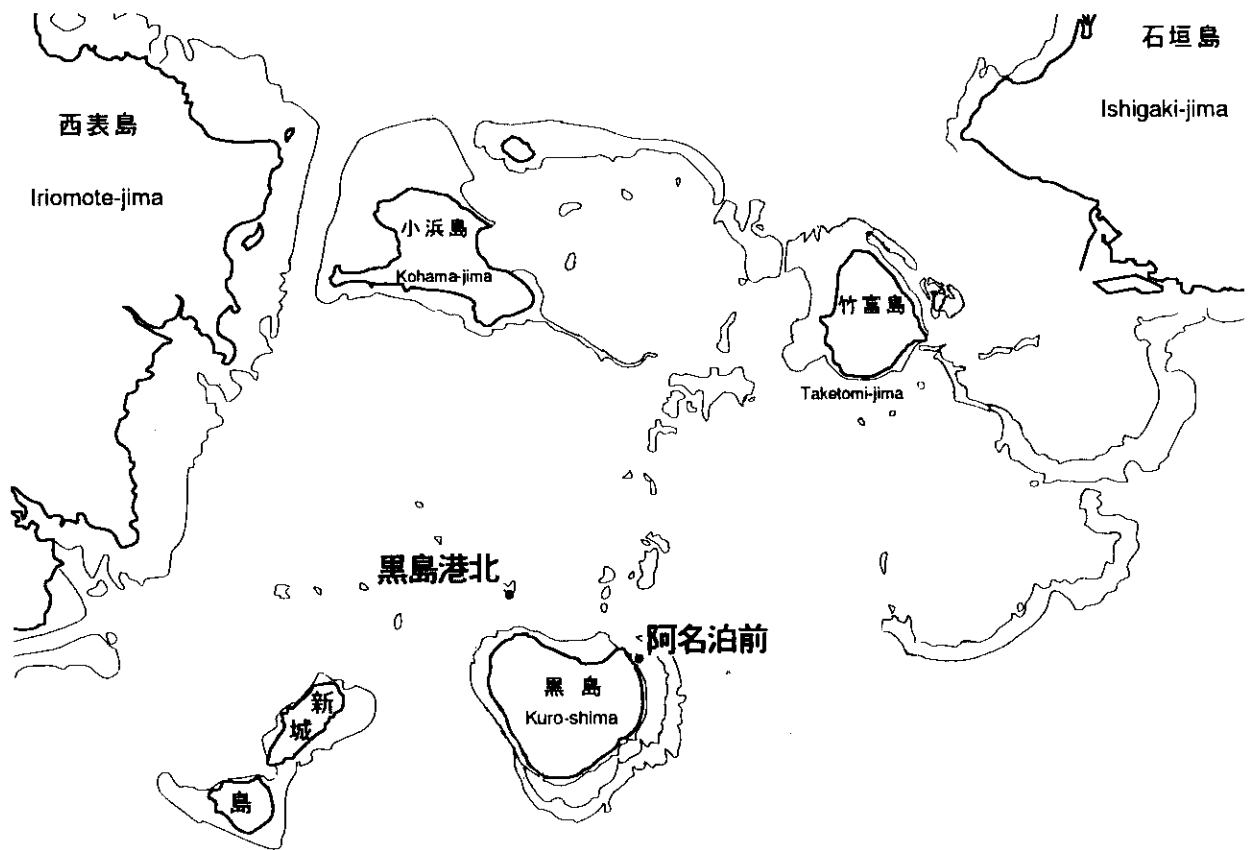


図3 黒島港北と阿名泊前のトランセクト位置図。
前者は比較的海水交流の良い地点。
後者は比較的海水が滞留する地点を代表する。

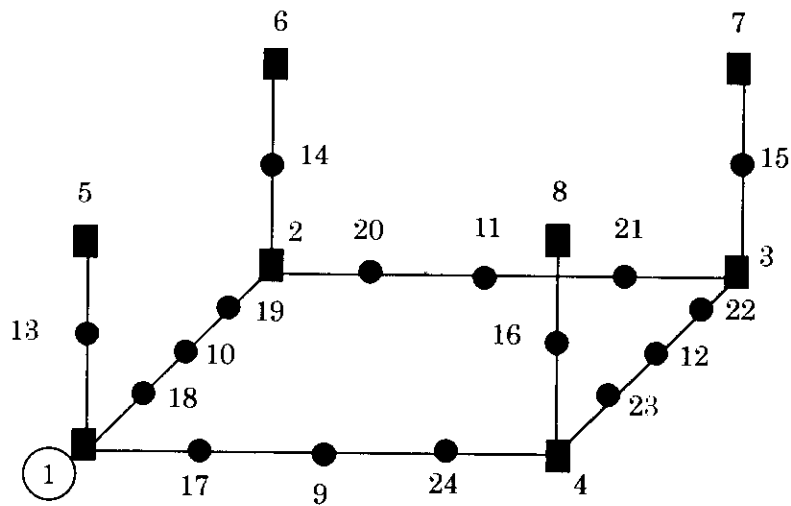


図4 立体コドラート（1 m × 1 m × 0.5 m）の模式図。
各辺の中点や4分点を座標原点や基準点に使う。

3-3 B方式（ステレオビデオカメラ）とその広域の航走撮影への適用

B-方式は、近年小型化が進んだステレオビデオカメラを小型船舶に設置して、ある広がりをもった海域を航走し、立体画像を連続的に取得するものである（図1中のb-1）。原理的には、単一のスチールカメラによって時刻をずらしてステレオペアとする方法（a-3）や、単一のビデオカメラの時刻のずれた画像を電子回路で遅延させてステレオペアとする方法（b-2）も可能であるが、ステレオビデオ専用カメラが好ましい。また通常はこれを水中ハウジングに収めて航走撮影する必要があるが、本研究では、西海区水産研究所石垣支所の協力により、同所所属のグラスボートを利用することで、カメラ本体のみの稼動が可能であった。1998年7月および1999年7月に同所近傍の浦底湾中央部のサンゴ礁上の撮影を行った。この時、差分型GPS（DGPS）（図5参照）により緯度・経度を記録した。

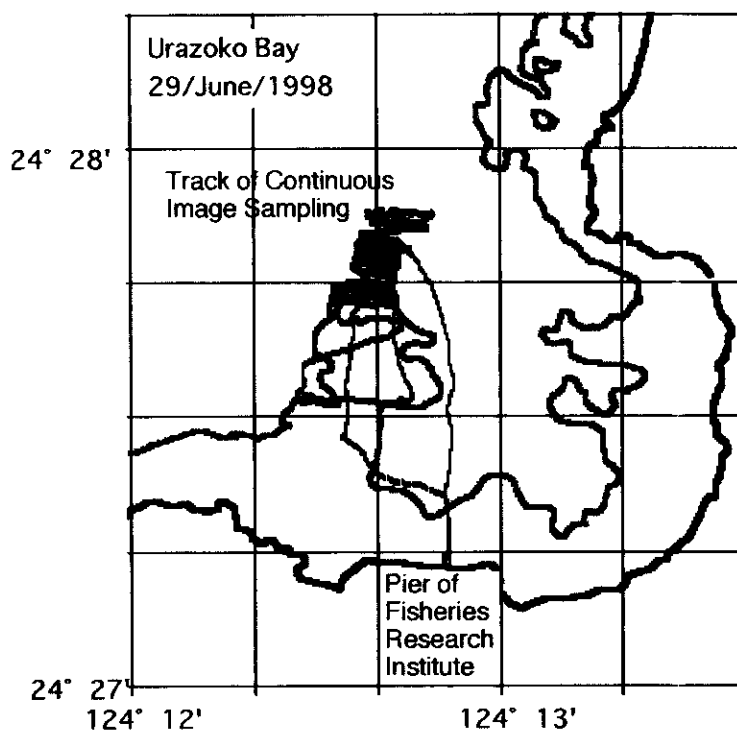


図5 方式Bによる石垣浦底湾内の航走によるステレオビデオ画像取得（西海区水産研究所のグラスボート「ひるぎ」による）（GPSにより求めた1998年6月29日調査分）。

3-4 画像のアーカイブ化と簡易可視化

取得された画像（スライドフィルム）は、図1に示すように、スリーブのままフィルムアーカイブとして保存する。また、これからKODAK-フォトCD規格によりPhoto-CDに保存し、デジタルファイルとして永久保存する。

得られた立体視で定性的な分布形状を観る場合には、(a)A方式のほうは、スライドを簡易ステレオビューワーに挿入することで簡便な立体視が可能である。また、B方式のステレオビデオ画像は、図1に示すような、モジュレータとテレビの組み合わせで簡単な立体視が可能である。

すなわち、記録された偶数コマと奇数コマをモジュレータにより振り分けて単一のモニターに交互に出力し、これに同期して左眼・右眼が交互に開く液晶シャッターゴーグルにより立体視を行うのである。

3-5 画像の処理・解析フロー

(1) 航空写真処理フローによる処理

アーカイブから3次元座標情報を導出する手法については、従来航空測量による写真測量技術としての業務的な図下処理のフローが存在する。標準的には、ポジフィルムのオリジナルを高分解能の業務用スキャナーにかけ、4000 × 4000 の画素数のファイルを作成する。このファイルから解析図化処理装置により、左右の画像で同一と認識できる点について自動的に3次元座標値を算出する。この方式によってサンゴ縁辺の3次元座標を求めた例は、1998年度の報告書に記載済みである。ただし、この方式には専門的なハードウェアが必要になる。

(2) パーソナルコンピュータ上のソフトウェア利用による処理

一方、パーソナルコンピュータ上で稼動するステレオ画像処理ソフトウェアが販売されるようになった（例えばアジア航測製 ADIMS-2）。このソフトウェアにおける作業のフローは以下のようである。

1. スライド画像をスキャナーにかけ、左右のデジタル画像（ビットマップ）を作成する。
2. 現場での座標の既知量（基準点）による標定解析処理。
3. 画面上の格子点の各座標を自動ステレオマッチングによって自動的に計測する（左画像の隣接する画素集合と類似したパターンを持つ画素集合をソフトウェアが右画像で探し、両画像の視差から3次元座標を導出する（図6参照）。
4. 手動により選択した点（ポイントストリング）に対して計測を行う（図7の例では卓状サンゴの縁を手動で順次指定し、その3次元座標を求め、さらには平面投影図を作成した）。
5. 解析画像作成（上記の図の他にも、鳥瞰図、等高線入り写真画像等を作成する）。

4. 結果・考察

上記の手法の実行例や、その結果明らかになった要件や改良点を、本章の前半でまとめる。また、次節後半では、アーカイブから得られた所見をまとめる。

4-1 画像取得

本研究においては、左右のレンズ間の間隔（基線長）は156mmとした。基線長を長くすると、奥行き方向の算出精度は上がるが、左右の画像の差異が大きくなり、マッチングの誤差が大きくなる。また、レンズの光軸は平行にすることが理想的であるが、左右画像の共通部分を増やすため、光軸は約1.5m先で交わるようにした。使用したレンズの公称焦点距離は20mmであるが、水中では水の屈折率1.33を考慮した26.6mmが実効焦点距離である。サンゴに対して垂直撮影に近いステレオペア写真を選んでいる。また、スキャナーでデジタル化する際の解像度は2400dpi（スライドフィルムの粒子サイズのほぼ10μmという値に近い）で行った。また、画像の精度が悪くなる要素として、強い密度成層境界面の形成が考えられる。1999年7月の撮影前に大量の降水があり、それによる塩分成層境界面のゆらぎ（水潮）がその例である。

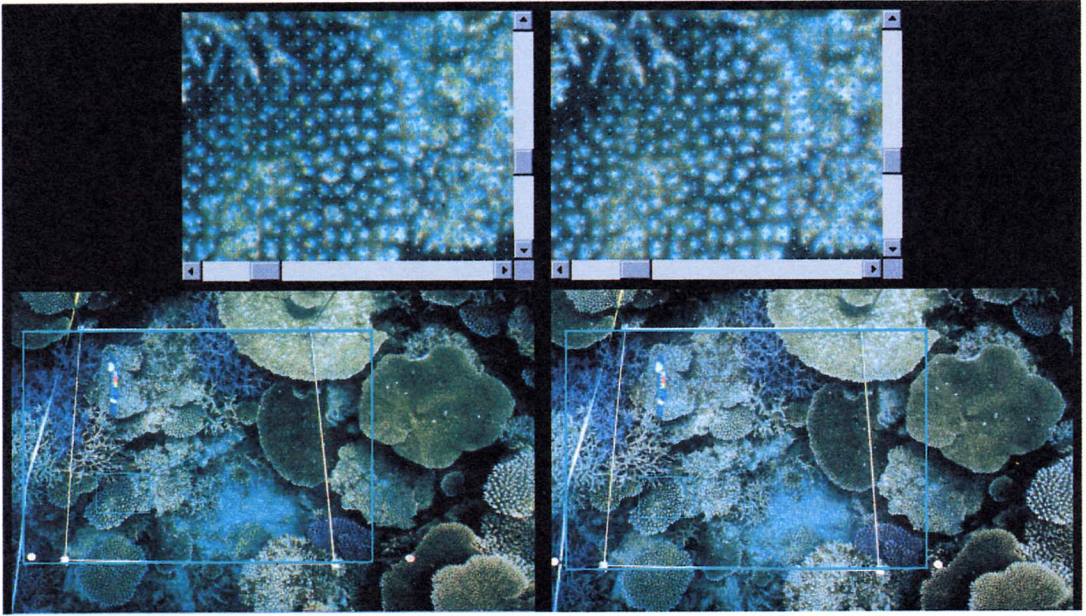


図6 サンゴの水中ステレオ画像と画像処理ソフトウェアでのステレオマッチングの例

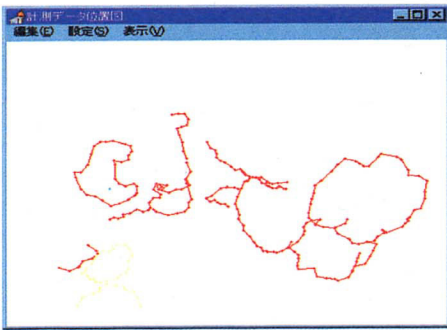


図7 同上ステレオペアからの手動ポイントストリング解析による平面図の描画例

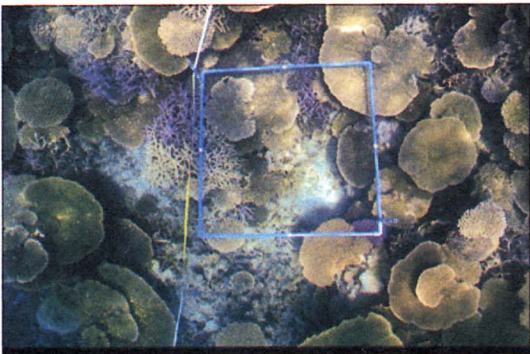


図9 黒島阿名泊前トランセクトの起点より14-15m地点における白化直前（左図、1999年7月3日）および白化中（右図、同年9月12日）の画像。白化中はサンゴ群体が白色の他、固有のピンク、青、紫等の色を呈している。

4-2 標定解析

3-2で述べたコドラートの4隅の座標を既知として標定計算を行った。すなわち、いくつかの基準点（各片の midpointあるいは4分点の座標値）を計算し、それらが本来の値からどれくらいずれるかを計算した。図6の画像ペアについて得られた基準点残差は、x座標で0.008～0.3cm、y座標で0.08～0.5cm、z座標で0.005～0.5cmとなった。

これらの残差が出てくる原因として、コドラートの部材が5mmのステンレス丸棒であること、測定ミス、前述の水潮による光の屈折などが挙げられるが、コドラート自体の、自重から生じる歪みによる基準点位置のずれも考えられる。

また、ADIMS2ソフトウェアでは、原画像ファイルの4隅の実座標を定義する必要がある。したがって、スライド画像が枠も含めてスキャナーにかかる必要がある。際商業用のフォトCD作成の過程では、フィルムの4隅がフィルムスキャナーの枠に隠れてしまう場合があるため、理想的には、スライドはマウントに入れず、スリーブのまま自前のスキャナーにかける必要がある。

これらの評定計算の結果、比較的良好なステレオペアによれば、概ね1cm以内の精度で座標値を算出できることが確認できた。一般にミドリイシ系のサンゴは成長が速く、特に水平方向には1cm/年以上であるので、水平方向の生長量を見積もることは可能であることが結論できる。鉛直方向については、その絶対量を得るには水準点にあたるものが必要であるが、すぐに付着生物に覆われてしまうのでむずかしく、サンゴの群体間の相対的高度の変化を計測することで評価をする必要がある。

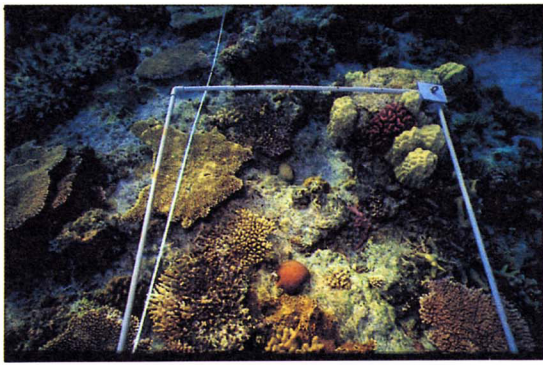
4-3 手動指定計測と自動ステレオマッチング

標定解析を経た後は、ソフトウェアで表示された左右の画像（図6下半部）の視差により、立体コドラートで原点を定義した3次元座標系における3次元座標値が計算できる。この時、ソフトウェアのパターン認識機能による「自動ステレオマッチング処理」の場合と、手動で片方の画像における点列を指定して、その座標値を計算する場合がある。前者では、図6上半部で示したような格子点の座標のマトリックスが一括して計算される。また、後者では、手動で対象点（列）を指定すると結果としてその座標値や、図7の平面図等が得られる。

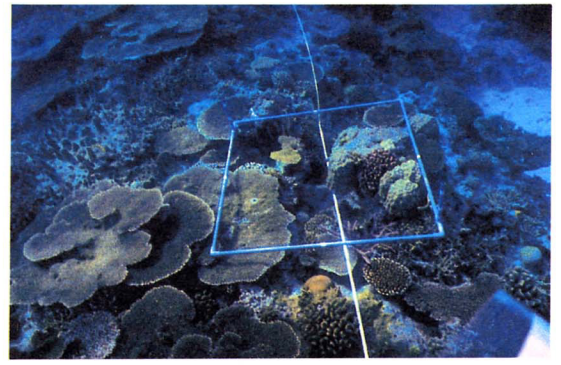
航空写真測量において自動ステレオマッチング処理においては、一般に、急斜面や、逆にパターンが認識しにくい平面において、正確にマッチングできないことが多い。また、斜め写真では突起物の反対側には事実上画像データが存在しないので、マッチングが不可能になる。本研究においても、サンゴ群体の直立面、オーバーハング面、該当ピクセルが対象物にまたがっている場合には、このようなエラーが起きた。ただし、サンゴが複雑な形状を示しているにもかかわらずマッチングエラーは比較的軽微だった。これは、基線長を15cm程度に止めたためであると考えられる。

4-4 図化

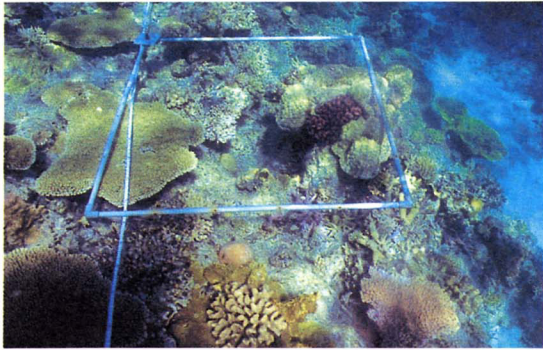
本ソフトウェアでは、図6、図7の他に鳥瞰図、等高線図、水平面投影図等が作成可能である。ただし、ピクセルが異なる対象物にまたがる場合、具体的には群体がオーバーハングをしているような場合には良好な図は作成できなかった。しかしながら、水中スケッチなどに比べ、観察者の個人差が少なくすることができ、しかも複数の人員が同一画像をもとにして陸上で議論できる



(a)October/1994



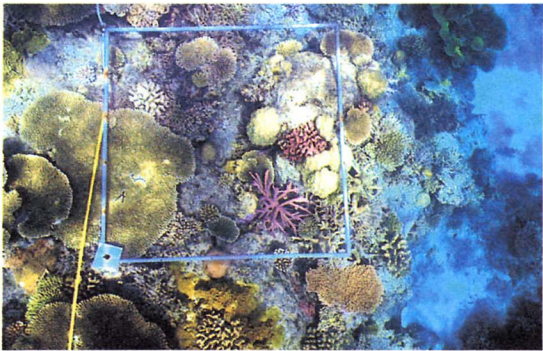
(e) January/1998



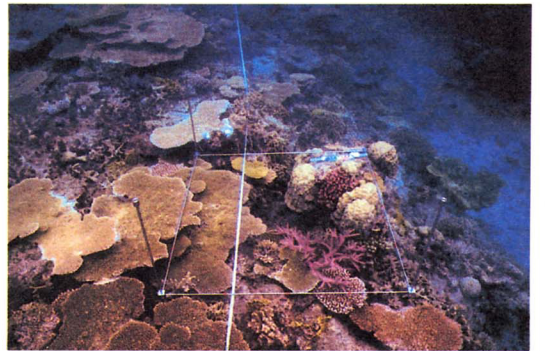
(b)July/1995



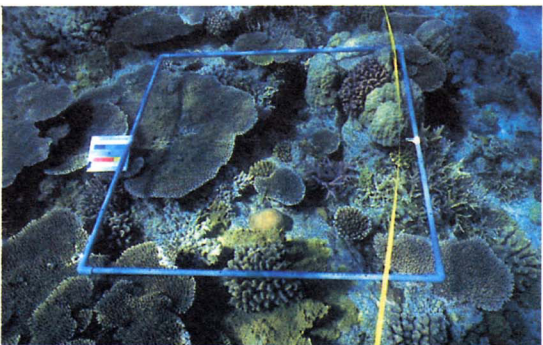
(f) February/1999



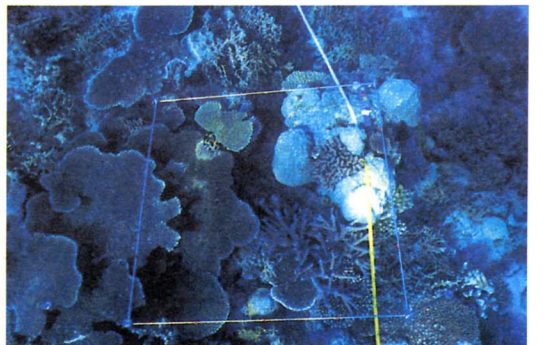
(c)July/1996



(g)July/1999



(d) February/1997



(h)January/2000

図8 サンゴ群集の6年間の変遷の例（水中画像アーカイブより黒島港北トランセクトの起点より24-25mの地点における画像を時系列的に配したもの）。

ようになったことは大きな成果といえるだろう。

4-5 アーカイブから得られた所見（概況）

前述の2-2節、2-3節および表1に記述したように、黒島港北トランセクトにおいて、1994～2000年の間に14回、阿名泊トランセクトにおいて、1998～2000年の間に6回の画像取得をおこない、アーカイブを作成した。各地点とも、1999年7月にコドラート内のサンゴ群集について、種レベル、生育状態（生死、白化等）の分布図を作成した。図8に、アーカイブから選択した1つの地点における時系列の例を示す。アーカイブ取得時期以前も含めた概況は以下のようである。

黒島港北では、1981年前後にオニヒトデの食害に遭い、サンゴ群集が全て消失した。1985年頃よりサンゴの定着が目立つようになり、1990年には被度20%、1995年には被度60%、そして1998夏季前には被度70%までに回復した。この過程が図8(a)～(e)に現れている。ところが、1998年の夏季の異常な高水温の影響を受け、サンゴ全体の20%程が死滅し、1999年春季では被度は50%に低下した。ただし、リーフ外の石西礁湖全体でみると、本地点の昨夏高水温の影響は軽微で、依然、良好なサンゴ景観が残る。これは、本地点が島から離れた離礁に位置するため潮通しが良く、水温の上昇度合いや高水温塊の滞留性が低かったことに起因するものと推察される。ただし、高水温以降、卓状ミドリイシ類で、縁部から徐々に死滅していく感染症と思われる症例が散見した。

1999年夏季には高水温の影響は全く観察されず、サンゴ群集の被度は秋期には60%に回復したが、1999年12月末の異常寒波のため、ミドリイシ類の一部（全体の10%以下）が斃死した。これは、寒波の襲来と大潮の干潮（-20cm前後）が重なり、水面より干出、もしくは水面付近のサンゴ類が外気の影響を受けて凍死したためと考えられる。

阿名泊前では、1981年前後にオニヒトデの食害に遭い、サンゴ群集が全て消失した。1990年頃よりサンゴの定着が目立つようになり、1993年には被度20%、1996年には被度50%、そして1998夏季前には離礁上部は被度90%までに回復した。ところが、その年の夏季高水温の影響を強く受け、ミドリイシ類の50%程が死滅し、1999年春季のサンゴ類全体の被度は約50%に低下した。図9(a)、(b)は阿名泊前トランセクト上の同一地点における白化直前と直後の状態を示す。なお、高水温以前の1998年5～6月にかけて、水深3m以深の調査地点一帯の指状ミドリイシ類が大量斃死した。この原因は、感染症の疑いが持たれるものの詳細は不明である。

1999年夏季は高水温の影響は全く観察されず、サンゴ群集の被度は秋期には60%に回復した。ところが、1999年12月末の異常寒波のため、ミドリイシ類の約50%（卓状ミドリイシ類では70%）が斃死した。黒島港前と比較して死滅率が高いが、これは当該地点の礁原が黒島港前に比べて浅く、より多量のサンゴ類が干出し寒波の影響を強く受けたためと考えられる。

4-6 アーカイブから得られた所見

アーカイブより黒島港北トランセクトの起点より25m地点の画像を時系列的に図10に示すとともに、1999年夏の時点（図9(g)）を中心に所見を記述する。

a. 画面右上にコブハマサンゴ（白っぽい塊状）が3～4群体存在するが、これはオニヒトデ食害によって一時死滅状態にあった群体が土台となって再生してきたものと考えられる。

- b. 画面左側より、クシハダミドリイシ（緑色のテーブル状）の群体が水平的に成長している。この種の群体の水平的な成長はきわめて速く、5年間に数十 cm に及ぶこと、また一段めのテーブル状群体の上に新しい群体が形成されて水平的に伸びてくることが見て取れる。
- c. 枝状のミドリイシ（本分類群には、スギノキミドリイシ、トゲスギミドリイシ、コエダミドリイシなどが含まれるが、目視では識別が難しい）の成長も比較的速く、1994年の時点でコブハマサンゴの手前にあった定着直後の小群体が、2000年時点では40cmほどの規模に成長している。
- d. サンゴの群体同士は常に光やスペースを求めて競合しており¹¹⁾、奪取型競合（exploitative competition）と呼ばれる。1994年時点（図9(a)）では、コドラート内の手前側にコモンキクメイシ（褐色球状）が存在していたが、1999年（図9(g),(h)）では上部が死滅していた。この場合は、クシハダミドリイシが速く成長して覆われ、光競合の点で不利になったか、周囲の海水の交流が悪くなったために生育上の不利をこうむったためと考えられる。
- e. 多くのコドラートで、卓状ミドリイシが、キクメイシやヒメアナサンゴモドキなどを水平的には避けて成長している状況が観察された。これは異種サンゴの群体が互いに刺胞で攻撃する妨害型競合（interference competition）¹¹⁾の結果と考えられる。卓状ミドリイシの速い成長に対し、別種のサンゴでは、刺胞の到達範囲での攻撃を行うことを生存戦略にしていると考えられる。
- f. 成長の速い卓上ミドリイシでは、群体の欠損や倒壊が起こることがしばしば見られた。これは、台風などの波浪によるものと考えられるが、状況からみてダイバーに踏まれたためとみられる場合もあった。

5. 本研究により得られた成果のまとめ

- 1) サンゴ礁の水中立体画像の取得について、同一トランセクトに反復的にアクセスし、スチールステレオ画像を採取する（A方式）と、ステレオビデオ装置を設置して海域を航走する（B方式）の2つの手法を確立した。また、得られたステレオ画像を系統的に保存する手法（アーカイブ化）およびパソコン上で3次元数値処理を行う手法も確立した。
- 2) 先行課題によって得られた1994～99年の画像アーカイブ（後半のみステレオ画像）から、サンゴ群体間の奪取型競合および妨害型競合の実態が記述され、3次元の空間的条件付けが重要であることが確認された。
- 3) 特記事項として、1998年夏季（8～9月）には、南西諸島で大規模なサンゴの白化が起こり、その画像が記録できた（白化中の撮影は海中公園センター八重山研究所による独自調査による）。
- 4) 白化が起こるのは基本的には海水の異常昇温によるが、現場の海水の交流がよいかどうかという空間的条件付けによるところも大きい。
- 5) サンゴ礁の多様性を解明するためのモデルとして、熱帯雨林などに適用されるロッターモデルの他に、近年使われはじめた個体ベースモデル（IBM: Individual Base Model）がある。本手法は後者のモデルの構築に必要な基礎的なパラメータを明らかにするものである。
- 6) 以上のように、サンゴ礁における生物多様性構造に関わる過程には、3次元の空間的条件付けが重要であり、その成長・変質を長期的に監視・評価する手段として、水中立体画像のアーカイビングが最も有効であることが結論される。

6. 参考文献

- 1) Richmond, R. H. (1997): Reproduction and recruitment in corals: Critical links in the persistence of reefs, in Birkeland, C. (ed.), *Life and Death of Coral Reef*, 175-197, Chapman & Hall.
- 2) Hallock, P. (1997): Reefs and reef limestones in earth history, in Birkeland, C. (ed.), *Life and Death of Coral Reef*, 13-42,
- 3) Davies, P. J. and Hatchings, P. A. (1983): Initial colonization, erosion and accretion on coral substrate. Experimental results, Lizard Island, Great Barrier Reef, *Coral Reef*, 2, 27-35.
- 4) Vogel, S. (1981) *Life in Moving Fluids -The Physical Biology of Flow-*, Princeton University Press, 352pages.
- 5) Denny, M. W. (1988) *Biology and the Mechanics of the Wave-Swept Environment* Princeton University Press, 329pages.
- 6) Stoddard (1969) Ecology and morphology of recent coral reefs, *Biological Review*, 44, 433-498.
- 7) 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 1995 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集、350-351.
- 8) 原島省 (1996) 「データの画像化・画像のデータ化」*ぶんせき*, 1996-4, 28-35.
- 9) Done, T. J.: Proc. Fourth International Coral Reef Symposium, 315-320 (1981) "Photogrammetry in Coral Ecology: A Technique for the Study of Change in Coral Communities"
- 10) Connel, J. H. (1983) : On prevalence and relative importance of interspecific competition: Evidence and field experiments, *American Naturalist*, 122, 661-678.
- 11) Lang, J. and Chornesky, E. (1973): Competition between scleractinian reef corals - A review of mechanisms and effects, in Dubinski, Z. (ed.) *Ecosystems of the World* 25, Coral Reefs, 209-252.

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表 :

- ① 原島省, 功刀正行, 岩瀬文人, 野村恵一, 橋本和正, 渋野拓郎 (1999) : サンゴ礁のモニタリング - (3) 水中立体画像アーカイビング 1999 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集、258.
- ② 濱田史生, 斉藤和也, 木下茂信, 原島省, 功刀正行 (2000) : 水中ステレオ画像を用いたサンゴの写真計測、*日本写真測量学会平成 12 年度年次学術講演会要旨*、258.

(2) 論文発表 :

- ① 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*, 181 ページ.
- ② 原島省・功刀正行 (1998) : 「サンゴ礁の水中画像アーカイブ」*海中公園情報*, 120, 3-8.