

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

③ 流況と水質の相互作用を考慮したサンゴ礁群集の回復促進要因の解明

独立行政法人産業技術総合研究所

海洋資源環境研究部門 海洋地球変動研究グループ 鈴木 淳・川幡穂高

平成12～14年度合計予算額 8, 138千円
(うち、平成14年度予算額 3, 050千円)

〔要旨〕サンゴ礁における海水の流動は、環境負荷物質を希釈・除去し、水温の安定化に効果的であって、サンゴ礁群集の健全度を維持し、回復を促す効果が期待される。本サブテーマでは、この海水の流況という物理的側面に、水質という化学的側面を加え、その相互作用を解析して、サンゴ礁群集の回復促進メカニズムを検討する。平成13～14年度に、石垣島周辺サンゴ礁の7箇所での夏および冬の観測を行い、(1) サンゴ礁に流れ込む河川水の水質、(2) 地域によるサンゴ礁海水の水質の差異、(3) サンゴ礁海水の外洋水との交換過程、および(4) 2001年夏の高水温傾向、についての検討を行った。石垣島の主要な河川水の窒素およびリン濃度は一般に高く、地下水とともにサンゴ礁の富栄養化の大きな要因となっていることが確認された。石垣島最長の宮良川について水源である底原ダムから河口までの濃度変化をみると、下流に行くにつれて栄養塩濃度が増加し、これらの栄養塩の起源として中流の農耕地の寄与が大きいことが示唆される。人口が密集する石垣島南部（宮良川河口部や白保）と、自然状態に近い植生が広がる石垣島北部（安良崎および平久保）のサンゴ礁について水質の比較を試みたが、サンゴ礁海水の硝酸態窒素やリン酸態リンなど栄養塩類濃度の差異は必ずしも明瞭ではない。ケイ酸や懸濁物濃度については、島南部のサンゴ礁のほうが北部に比べて若干高い傾向がみられる。また、サンゴ礁海水の外洋との交換状況の推定には多点水温計測による評価が有効と思われる。2001年の夏は、近年では1998年夏の大規模白化現象が観察された年に次いで高水温状態が観測され、沖縄本島周辺では再び白化現象も報告された。石垣島の2ヶ所のサンゴ礁（白保、安良崎）の観測点でも日平均水温でも30℃以上の日が9月中旬まで継続しており、平年に比べて高水温傾向であったことが明らかとなった。

〔キーワード〕サンゴ礁、水温、水質、流況解析、河川

1. はじめに

サンゴ礁は、熱帯雨林と共に極めて高い生物多様性をもつ生態系である。しかし、人間活動の影響を受けやすく、環境の悪化と生物多様性の減少が問題となっている。サンゴ礁群集の多様性の減少は、その海域での漁獲高の減少に直結するほか、造礁能力が高いサンゴ類の減少は、サンゴ礁の消波機能の低下をもたらし、ひいては、地球温暖化による海面上昇の効果と重なって、海岸侵食の増進も懸念される。また、1998年夏に発生した大規模白化現象によって琉球列島周辺のサンゴ礁は深刻な被害を受けた。自然な状態ではこのような攪乱は、時間の経過とともに回復する

ことが期待されるが、陸域からの環境負荷物質の流入や温暖化傾向の継続など、現在の琉球列島のサンゴ礁を取り巻く環境は必ずしもサンゴ礁群集の回復にとって適した状態ではない。琉球列島のサンゴ礁群集が順調に回復していくものかどうか懸念される。そこで、ダメージを受けたサンゴ礁生物群集の回復過程に注意を払い、回復を促進する環境条件および回復を阻害する環境因子を解析し、今後の回復促進のための具体的施策についての指針を策定する必要がある。

2. 研究目的

本研究では、各種の環境悪化により状態の悪化したサンゴ礁生態系について、その回復の促進に寄与しうる手法の探索および検討を行う。サンゴ礁における海水の流動は、環境負荷物質を希釈・除去し、水温の安定化に効果的であって、サンゴ礁群集の健全度を維持し、回復を促す効果が期待される。この海水の流況という物理的側面に、水質という化学的側面を加え、その相互作用を解析して、サンゴ礁群集の回復促進に効果的な作用、因子を明らかにして、群集の健全度のランクに応じた回復促進対策のために有用な知見を得ることが本サブテーマの目的である。

3. 研究方法

石垣島周囲のサンゴ礁を対象に、平成12年度に地形および流況の予察的な調査を行った後、平成13年度は、流況および水質環境の季節性を把握するために、夏(2001年7月)および冬(2001年12月)の2回の調査を実施した(図1、表1)。対象海域は、夏季に実施した石垣島南部の宮良川河口左岸(図1の地点5)、白保集落東岸(同、地点4)、浦底湾(同、地点3)の3地点に加え、冬季調査の際には、石垣島北部の平久保(同、地点1)および安良崎北の2点を加えた(同、地点2)。2002年9月には、追加2地点について夏季の状況を知るために再度調査を実施するとともに、宮良湾近傍のサンゴ礁に調査対象を拡大した(図1の地点6、7)。宮良湾のサンゴ礁は、人口密集地に近く、宮良川集水域の大部分が耕作地であることから、陸起源の環境負荷物質の流入を多く受けていると考えられる。一方、北部の平久保および安良崎北においては、環境が良好と考えられ、これらの海域間の各種水質項目について比較することを目的とする。

選定した各海域のサンゴ礁の礁原に流速計および水温塩分計の多点設置による流況観測を実施し、同時に環境負荷物質である栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$)や懸濁物濃度(SS)を測定した。また、群集の有機炭素・無機炭素(炭酸塩)生産について把握するために、海水中の炭酸系総量(pH、全炭酸、全アルカリ度)についても測定を行った。これらの結果は、群集の多様性やサンゴ被覆度等の生態指標との対応関係を検討することを目的とする。

2001年7月および12月には、宮良川をはじめ、島東岸に分布する河川について下流部で水質測定を行った。

また、長期間の水温変動をモニターするために、安良崎の宮良口および白保の通称第2ポール

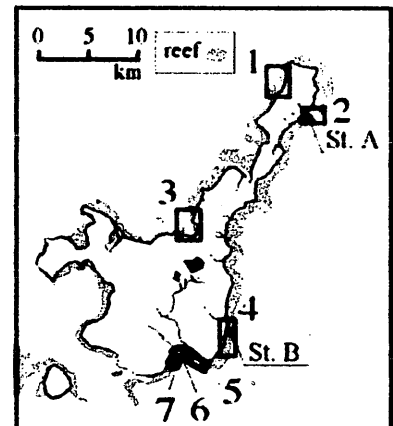


図1 琉球列島石垣島における調査地点位置図。

1: 平久保、2: 安良崎北、
3: 浦底、4: 白保、5: 宮良、6: 磯辺、7: 大浜。
St. AおよびBは水温計設置点を示す。

付近に自記記録式水温計を設置して観測を行った（図1）。

表1 調査期間および対象海域一覧

	夏 Jul. 1-9, 2001	冬 Dec. 1-9, 2001	夏 Sep. 15-Oct. 5, 2002
1 平久保	-	○	○
2 安良崎北	-	○	○
3 浦底	○	○	-
4 白保	○	○	-
5 宮良	○	○	○
6 磯辺	-	-	○
7 大浜	-	-	○

4. 結果・考察

(1) サンゴ礁に流れ込む河川水の水質

サンゴ礁に流れ込む河川水の水質の測定結果を図2に示す。7月および12月の調査は、各河川について極めて類似した結果を示した。一般に河川水の窒素およびリン濃度は高い。宮良川、轟川は硝酸態窒素に大きな値が見られ、一方、石垣島北東部の小河川は相対的にリン濃度が高い。海岸湧水、地下水流入とともに^{1,2)}、河川水も大きな栄養塩の流入源サンゴ礁の富栄養化の大きな要因となっていることが確認できる。石垣島最長の宮良川について水源である底原ダムから河口までの濃度変化をみると、下流に行くにつれて栄養塩濃度の増加が大きく、これらの栄養塩の起源として中流の農耕地の寄与が大きい可能性を示唆する。

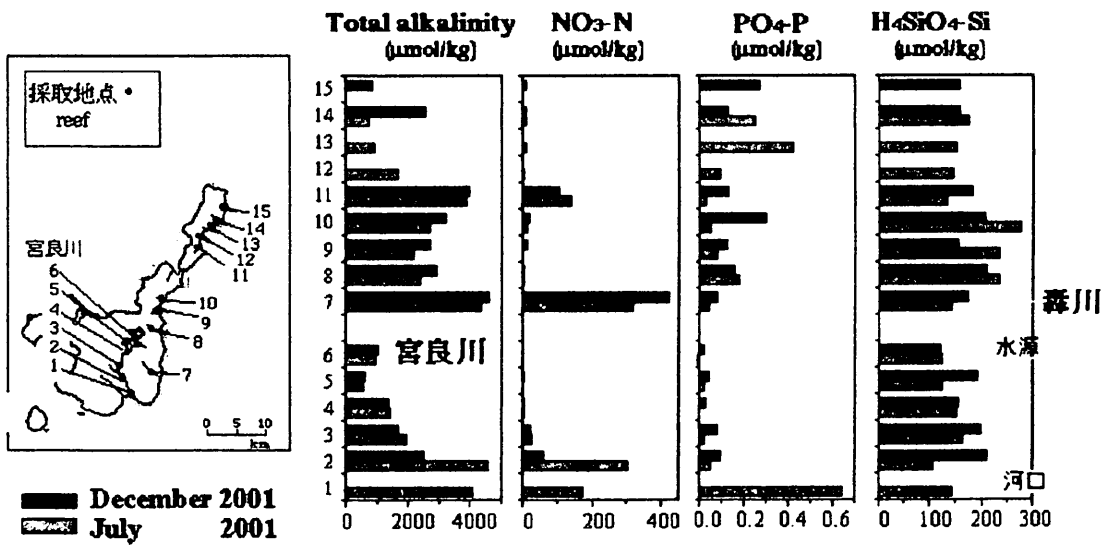


図2 石垣島の宮良川の水源から河口部およびその他の河川下流部の水質（2001年7月および12月）。

(2) サンゴ礁海水の水質の地域差

①水質平面分布観測

水質および溶存成分のある瞬間における分布状況を捕らえることを目的とした、いわゆる「スナップショット」観測を石垣島周囲のサンゴ礁でそれぞれ複数回実施した。図3に、石垣島北岸の浦底湾のサンゴ礁における多点採水による水質平面分布観測の例を示した。採水計画と実施に際しては、以下の点に注意を払った。：

- ・採水は1隻の調査船で行うものの、満潮を挟む約2時間以内に終了するように努めた。
- ・採水地点は、対象とするサンゴ礁全体の水質を把握するために、基本的に格子点様の配置とし、また、各生物地形区が含まれるように留意した。

この結果、一部の結果に海水移動の影響が散見されるものの、近似的には、ある一潮時における平面分布パターンを捉えられたと考えられる。干潮時には礁原部の水位が浅くなり、調査船の河航範囲が限定されてしまうことから、満潮時に観測を行っているが、干潮時に観測を行えば、生物量や陸水流入量などの水質影響因子と水量との相対比率の関係から、満潮時よりも大きな成分変化が予想される。サンゴ礁内の定点での連続観測によると、海水のpHの日周変化がおよそ1.0に達する変化があること、また、潮位変化とともに流入する外洋水によって急激な水質変化が生じることが知られている³⁾。このような知見は、本研究で実施した水質の平面分布を解析・解釈する際に参考とされた。

図3では、浦底湾の観測例として、塩分、pHおよび全アルカリ度、懸濁物濃度、クロロフィルa、フェオ色素濃度を示した。塩分は陸水の流入状況を把握するために有効であり、海水中の炭酸系総量（pH、全アルカリ度）からは、その海域のサンゴ礁群集の有機炭素・無機炭素（炭酸塩）生産についての情報を、定性的ではあるが、収集することが可能である。栄養塩類の分布図は省略したが、塩分低下が顕著な湾奥部で外洋水に比べて高い値が得られた。

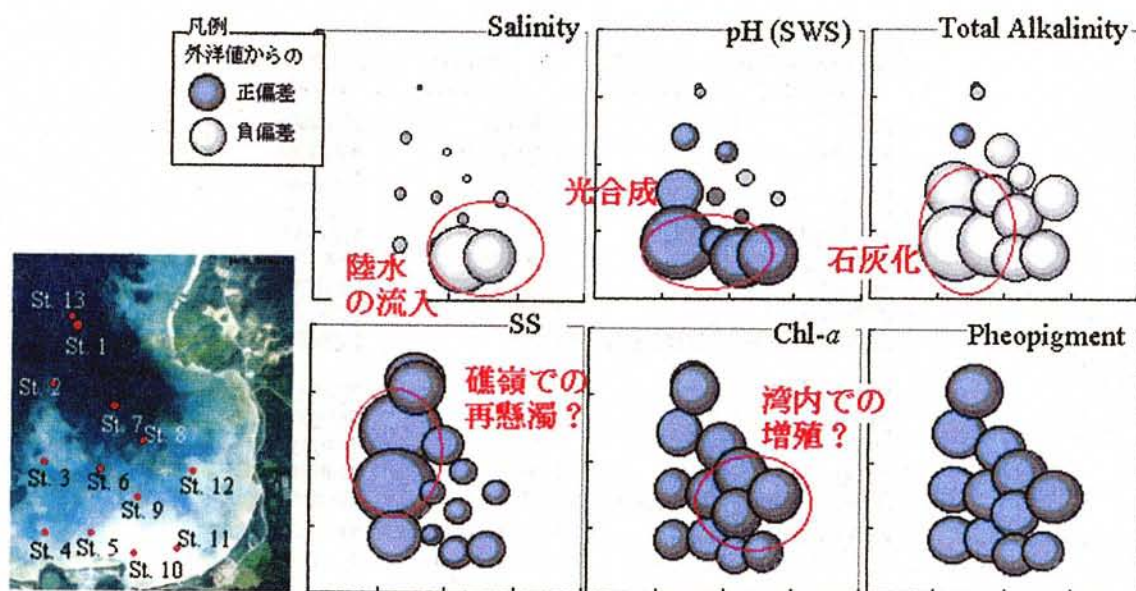


図3 石垣島北岸の浦底湾のサンゴ礁における多点採水による水質平面分布観測の例。2001年7月3日17:00-19:00の間にSt.1からSt.13までの地点で採取を行った。各分析値は、外洋値（St.1および13）より大きい地点を青色球記号で、外洋値より低い地点を白色球記号で示し、球記号の大きさは外洋値からの偏差の絶対値に対応する。外洋値は各分析項目について以下のとおり：塩

分34.01、pH(全水素イオン濃度スケール)8.156、全アルカリ度 2200 $\mu\text{mol/kg}$ 、懸濁物 2.74 mg/L、クロロフィルa, 0.56 $\mu\text{g/L}$ 、フェオ色素 0.067 $\mu\text{g/L}$ 。湾奥部のSt. 10と11において陸水による塩分の低下が、また、サンゴ礁生物の現存量が多い礁原部(St. 3, 4, 5)周辺で活発な光合成・石灰化活動によるpH上昇と全アルカリ度減少が見られる。懸濁物量とクロロフィルa濃度には逆相関傾向が認められる。

浦底湾の観測例では、沿岸部での陸水の流入、湾奥から礁原部にかけてのサンゴ礁群集による光合成及び石灰化の存在、礁原・礁嶺における再懸濁、そして浮遊性生物の内湾部での増殖の可能性などの諸現象が認められた。これらの作用や現象は、石垣島の他のサンゴ礁ではどのようなになっているであろうか？ 詳細についての記述は省略するが、各サンゴ礁における水質分布図には、浦底湾に類似の諸作用が存在していることが認められる。

地球表層のグローバル炭素循環や、地球温暖化による環境変動についての関心が高まりを背景として、熱帯および亜熱帯海域に広く分布するサンゴ礁生態系が、どのような生物地球化学的機能を有しているかというトピックスは、現在も多くの研究者によって論じられている。著者らは、本研究の一環として、石垣島サンゴ礁のほか、西太平洋周辺のいくつかのサンゴ礁(パラオ、マジュロ、モルジブ、グレートバリアリーフなど)について、海水の炭酸系計測の結果を再解析、総合し、サンゴ礁の重要な機能として、「活発な石灰化による海水の全アルカリ度の低減効果」および「陸起源有機物の分解による海水の全炭酸増加」の2点を指摘した^{2,3)}。今回の石垣島周辺サンゴ礁においても、外洋水に比べてサンゴ礁海水の全アルカリ度の減少は顕著であり、生物群集が活発に石灰化を行っていることが確認された。

②石垣島周辺のサンゴ礁間の水質の差異

人口が密集する石垣島南部(宮良湾周辺部や白保)と、自然状態に近い植生が広がる石垣島北部(安良崎および平久保)について、礁池内の造礁サンゴ群集の被度や多様性に違いがあるのではないかと考えられてきた。そして同時に栄養塩類濃度などの水質についても南北間の差異があるのではなかろうかと考えられてきた。そこで、本研究で実施した各々のサンゴ礁での計測結果に基づいて、石垣島周辺のサンゴ礁間の水質の差異を検討する。ここでは簡単のため、個々の試水の採水時刻、位置および潮時との詳細な関係の記載を省略し、サンゴ礁毎に各採水試料毎の分析値を図示して(図4-6)、大局的な地域差を検討する。

2001年7月の結果によると、宮良川河口左岸の宮良サンゴ礁では、各種栄養塩濃度や懸濁物量が、白保および浦底湾に比べて高い傾向がみられる(図4)。興味深いのは、前述の浦底湾でも見られたように懸濁物量とクロロフィル濃度に逆相関の傾向が認められる点である。栄養塩濃度が高く、また懸濁物量の多い宮良サンゴ礁においてクロロフィル濃度レベルが最も低い。通常、栄養塩の増加は海水中のクロロフィル濃度の増加をもたらすと考えられるが、少なくとも今回の測定では逆の傾向が見られている。この説明としては、宮良では、河川水からの栄養塩流入が大きいものの、地形的な特徴からサンゴ礁海水の外洋水との交換がよいために、植物プランクトンが十分な増殖を行う前に流出してしまう可能性などが考えられるが、今後の検討が必要である。海水中のクロロフィル濃度は、グレートバリアリーフでの研究例⁶⁾から示されるように、一般にサンゴ礁環境の健全度の指標となりうると考えられているが、石垣島サンゴ礁について適応する場合

には注意が必要であらう。

(2001年7月)

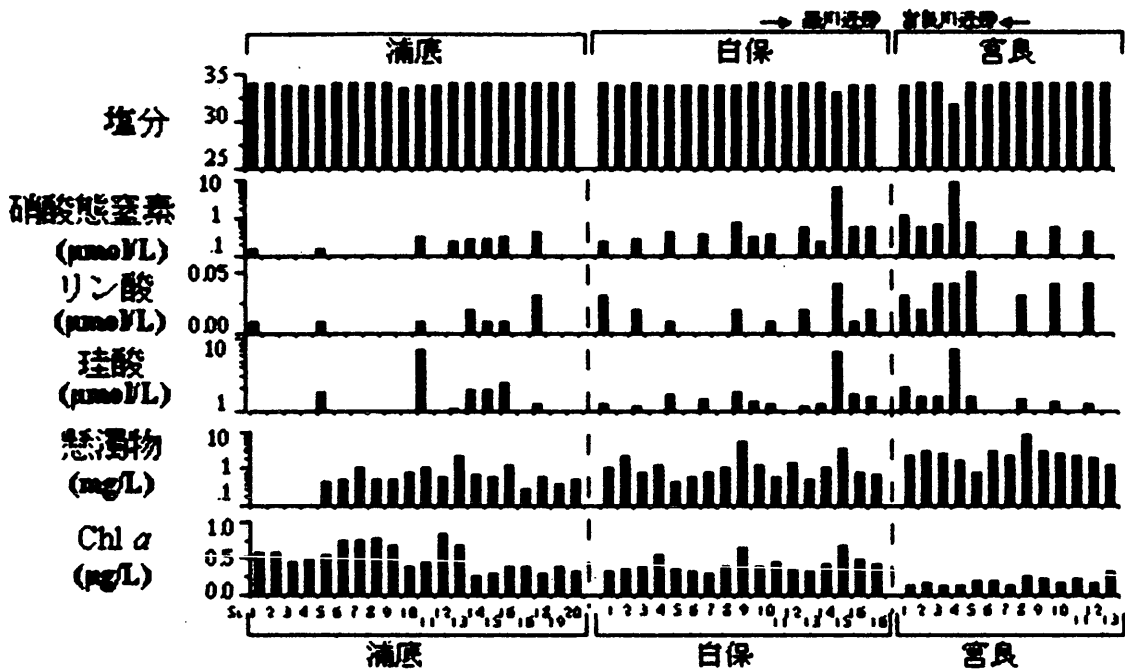


図4 石垣島の3ヶ所のサンゴ礁（浦底、白保、宮良）の礁原部における塩分、栄養塩、濁度およびクロロフィルa濃度の測定結果（2001年7月）。図中の左側に石垣島北部、右側が南部のサンゴ礁からのデータを配置した。全体の傾向を把握するために、各サンゴ礁毎に分析結果を測点毎に配列した。硝酸・珪酸および懸濁物濃度については対数目盛でプロットされていることに注意。

2001年12月および2002年9月の結果についても地域間の水質の比較を試みた（図5、6）。ここで注意すべき点は、地域毎の各種水質項目について平均を取る際に、浦底湾の湾奥部で認められたような陸水の影響を受けた採水点の数や値が、全体に大きく影響してしまう危険性があることである。2001年12月の宮良サンゴ礁での観測例や、2002年9月の大浜サンゴ礁での結果は、岸に近い測点で繰り返し採水をしたことが、その地域のサンゴ礁全体の代表性に若干影響していることが懸念される。このような測点のデータを除外してみると、サンゴ礁内の硝酸態窒素やリン酸態リンなど栄養塩類濃度の差異は必ずしも明瞭ではない。一方、珪酸や懸濁物濃度については、島南部のサンゴ礁のほうが北部に比べて若干高い傾向がみられる。

岸近傍の測点にそのサンゴ礁の全体の平均値が大きく影響される可能性があるという問題を意識しながらも、3回の調査期間中の結果をまとめたものを表2に示す。まず、塩分であるが、平久保や安良崎などの北部のサンゴ礁の値は外洋値に極めて近いが、南部のサンゴ礁では一般に外洋値よりも低く、もっとも低い大浜サンゴ礁では、外洋水に比べて0.8近くも低い値となっている。これは、大浜サンゴ礁海岸部の測点での繰り返し測定の結果が影響しているが、大浜サンゴ礁そ

(2001年12月)

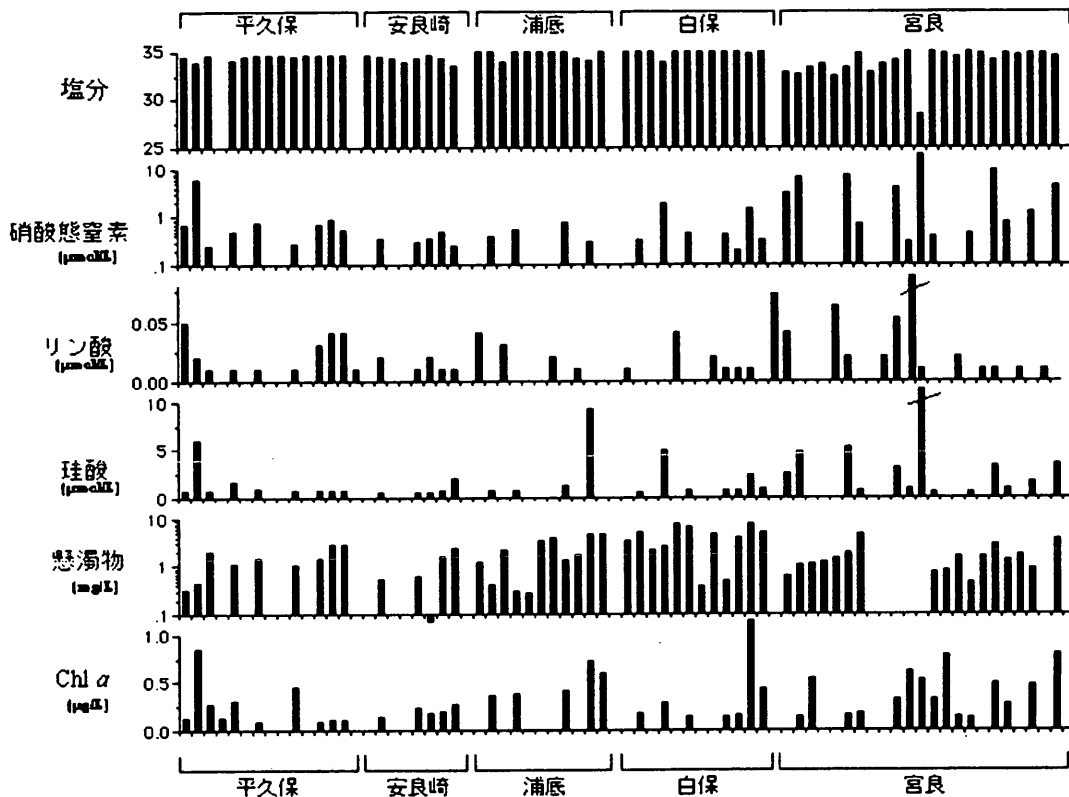


図5 石垣島の5ヶ所のサンゴ礁(平久保、安良崎北、浦底、白保、宮良)の礁原部における塩分、栄養塩、濁度およびクロロフィルa濃度の測定結果(2001年12月)。図中の左側に石垣島北部、右側が南部のサンゴ礁からのデータを配置した。図4と同様に、全体の傾向を把握するために、各サンゴ礁毎に分析結果を測点毎に配列した。硝酸および懸濁物濃度については対数目盛でプロットされている。

の他の測点でも塩分の減少傾向は顕著であり、このサンゴ礁に陸水の流入が多いことが推測される。調査は夏冬と季節を変えて実施されたが、いずれの調査期間中にも大規模な降雨はなかったため、宮良川から河川水が大量に宮良湾に流入した様子は見られない。むしろ、この海岸部の塩分低下は地下水の流入によるものである可能性が高い。大浜サンゴ礁の全アルカリ度は、比較したサンゴ礁の中で最大となっているが、これは地下水が高濃度の全アルカリ度をもたらすことに起因している²⁾。このサンゴ礁の各種栄養塩濃度も総じて高くなっている。サンゴ礁に流入する地下水由来の栄養塩流入量をより正確に評価するために、汀線付近から海水を多数採取し、塩分と各種栄養塩濃度の相関関係を基に地下水中の栄養塩濃度を推定する手法が最近、同じ石垣島をフィールドとして提案されている⁷⁾。

表2に見られるように、大浜サンゴ礁の各種濃度が他のサンゴ礁の値から大きく異なっているものの、他のサンゴ礁については差異が不明瞭な項目が多い。クロロフィルaについては、浦底

サンゴ礁が最大の値を示すが、他のサンゴ礁については北と南で明瞭な傾向は見られない。リン酸態リンについては磯辺を除くすべてのサンゴ礁で外洋水とほぼ等しく、分析精度の下限に近い値を取っている。一方、石垣島の北と南で若干の違いが認められるものが、珩酸と懸濁物濃度である(図7)。珩酸は、サンゴ礁においては窒素・リンに比べてその重要度が低く、一般に枯渇することがない。窒素・リンが陸からサンゴ礁に流入するとただちに生物活動によって摂取され、サンゴ礁海水中の濃度が大きく低下しているのとは対照的である。サンゴ礁生物からの要求度の低い珩酸は、陸水流入量のよい指標となることは、著者らの研究によって明らかにされている²⁾。

本節冒頭で触れた、「人口が密集する石垣島南部と北部について、礁池内の造礁サンゴ群集の被度や多様性に違いがあるのではないか」という考えは、藤岡ら⁸⁾の最近の詳細な検討により否定されつつある。石垣島東岸の礁池内の現在の造礁サンゴ群集の被度は全般的に低く、南北の明瞭な対応は見られないことが報告されている。水質については、両地域で土地利用形態の違いが顕著であることを反映して、なんらかの差異があることが予想されたが、本研究の結果からみると、その差異はかなり限定的であり、サンゴ礁生物の被度や多様性を大きく支配するようなものではないと判断される。

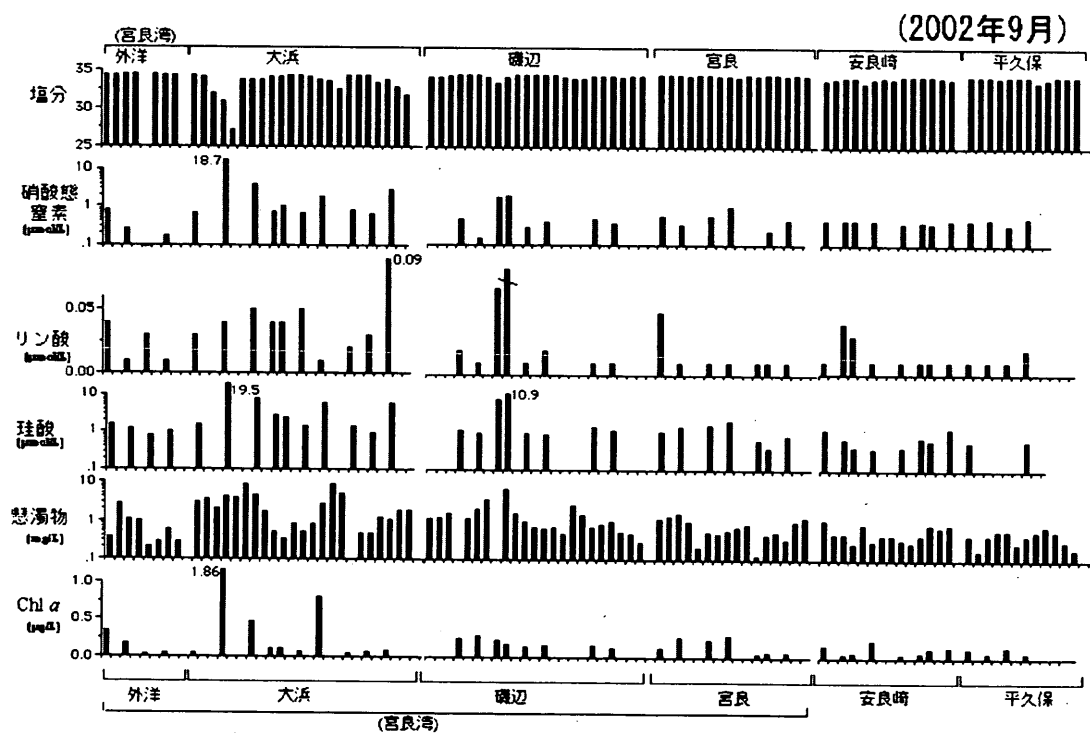


図6 石垣島の5ヶ所のサンゴ礁(大浜、磯辺、宮良、安良崎北、平久保)の礁原部における塩分、栄養塩、濁度およびクロロフィルa濃度の測定結果(2001年12月)。大浜、磯辺、宮良のサンゴ礁が面する宮良湾についてはサンゴ礁外の海水の分析値を外洋値として示した。図4、5と異なり、図中の左側に石垣島南部、右側に北部のサンゴ礁からのデータを配置した。全体の傾向を把握するために、各サンゴ礁毎に分析結果を測点毎に配列した。硝酸・珩酸および懸濁物濃度については対数目盛でプロットされていることに注意。

表2 石垣島周囲のサンゴ礁における水質の差異。各項目の最大値を太字で示した。

	塩分	全アルカリ度 $\mu\text{mol/kg}$	Chl <i>a</i> $\mu\text{g/L}$	フエオ色素 $\mu\text{g/L}$	NO ₃ -N $\mu\text{mol/L}$	PO ₄ -P $\mu\text{mol/L}$	SiO ₂ -Si $\mu\text{mol/L}$	懸濁物 mg/L
外洋平均	34.36	2220	0.16	0.09	0.33	0.03	1.15	0.80
平久保	34.36	2217	0.27	0.19	1.44	0.02	1.53	0.80
安良崎	34.22	2163	0.15	0.18	0.40	0.02	0.79	0.72
浦底	34.12	2203	0.47	0.19	0.32	0.02	3.23	1.09
白保	34.16	2238	0.38	0.30	0.66	0.03	1.55	2.16
宮良(2002)	34.37	2202	0.16	0.18	0.46	0.03	1.14	1.82
宮良(2001)	33.76	2243	0.30	0.25	2.47	0.03	2.41	0.74
磯辺	34.23	2220	0.20	0.21	0.76	0.08	3.16	1.43
大浜	33.54	2246	0.37	0.27	3.18	0.04	5.06	2.44

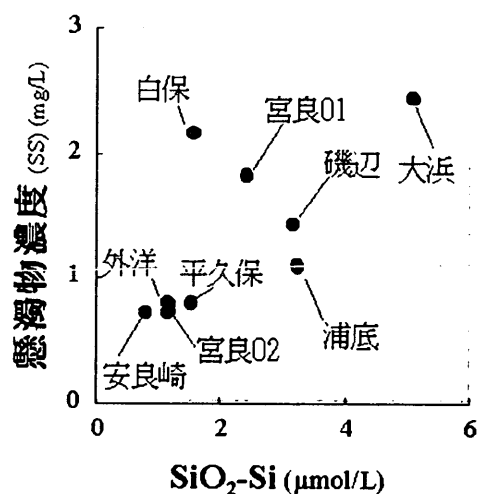


図7 石垣島の7ヶ所のサンゴ礁(平久保、安良崎北、浦底、白保、宮良、磯辺、大浜)における珪酸および懸濁物濃度。宮良サンゴ礁については2001年7月および12月の測定結果と、2002年9月の結果が大きく違うために両方を示した。

③宮良湾サンゴ礁での水質変動の詳細解析

石垣島各地のサンゴ礁の環境要因の比較調査の一環として、大浜、磯辺、宮良の3つのサンゴ礁が分布する宮良湾にて、懸濁物の挙動に注目して重点的な調査研究を実施した。海水中の懸濁物濃度は、石垣島南北のサンゴ礁間で、差異が見られた数少ない水質項目であり、懸濁物濃度の変動は、底質中の赤土成分の再懸濁過程が寄与している可能性が考えられる。2002年9月に、宮良湾において堆積物を表面からプラスチックの容器を用いて500ml程度ずつ採取し、『赤土汚染簡易測定法の手引き』(沖縄県水産業改良普及所、1989)に基づいて底質中懸濁物質含量(いわゆるSPSS)を測定した。礁縁部や礁原では採取可能な堆積物がない測点もあったが、その場合は周辺の窪地などから採取した試料を参考とした。また、この調査期間中に、短時間多点採水による水温、塩分、濁度の測定を試みた。

SPSS測定の方法では、堆積物を一定量の水に懸濁させ透視度計を用いて濁度を定量しているが、個人差や測定環境の影響を排除するために濁度計(携帯用2100P型濁度計; Hach社)の利用が有

度は高くなる傾向を示した。これは、ハマサンゴの加入が主に破片化した群体の海水流動による分散によって起こるものと推測される。サンゴの破片分散は、波浪などで比較的容易に壊れる枝状のミドリイシなどについてよく知られているが、塊状のハマサンゴなどでも頻度は低いものの群体の一部もしくは全体が離脱することがある。群体は礁池内の卓越流の方向に規定されて倒れているものが多いことは、塊状群体であって終始安定して固着・成長しているわけではないことを示唆する。塊状群体の破片は、大きく立体的なサンゴ片となる潜在性をもつため、枝サンゴ片などの比べて生存する可能性が相対的に高くなる。よって、海水流動により堆積物が移動しやすい海域では、塊状ハマサンゴが卓越する場合があると考えられる。河川水がサンゴの分布に影響を及ぼす可能性も考えられるが、塩分の計測結果からは、宮良川の影響による礁池内の塩分の慢性的な低下は認められない。一方、台風などに伴う降雨時には河口域で顕著な塩分の低下が観測されており、海岸から流入する陸水の影響と併せて、今後、礁池内のサンゴ群集の維持機構に与える影響について検討する必要がある。

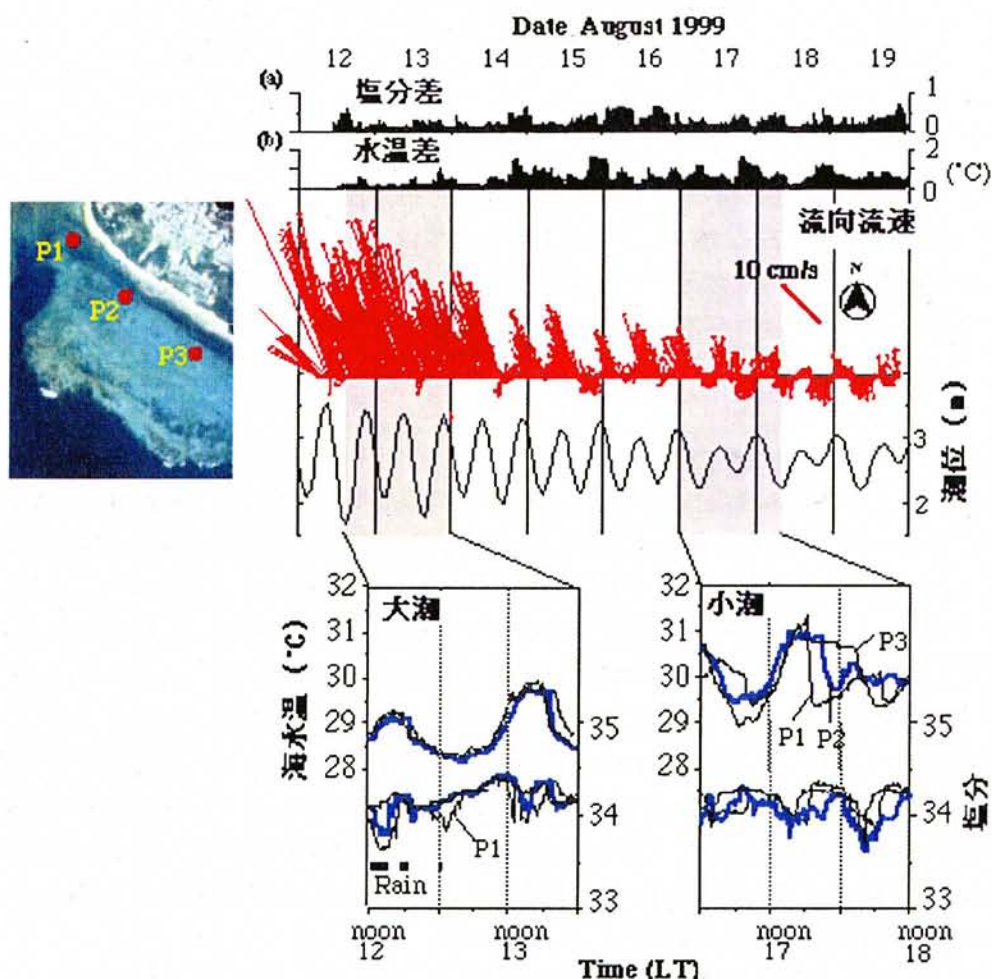


図 11. 石垣島宮良サンゴ礁における、1999年8月12日から19日の流況および水温・塩分観測結果。各グラフは、上から St. P1、P2およびP3における塩分(a)および水温(b)の差の最大値、St. P2における流向流速(c)、潮位(那覇港、d)。観測期間中の大潮時および小潮時のSt. P1、P2およびP3における水温・塩分を

の濁度も基本的には塩分と相関している様子がわかる。しかし、磯辺サンゴ礁の最湾奥部周辺では、塩分の変動とは独立して濁度が大きい部分が存在する。塩分と懸濁物濃度についての相関図でも、全体的な塩分と濁度のトレンドから独立に、塩分はほとんど変わらないながら、濁度が大きくなるデータ列が認識できる。これは陸水の流入よりむしろ満潮時の潮流による再懸諾の過程が影響している可能性がある。サンゴ礁内での濁質の挙動に関する研究はこれからの進展が期待される。

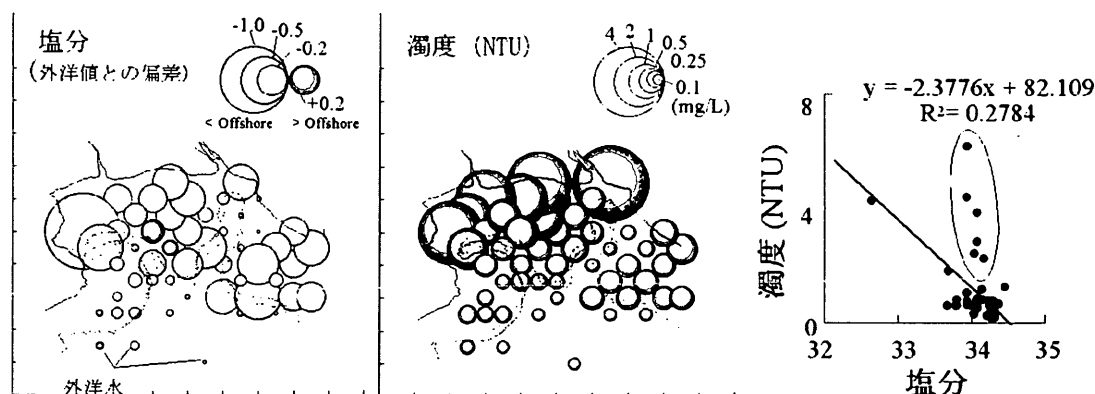


図 10 2002年9月20日16:50-18:40の満潮時に実施した約50測点での採水調査による塩分、濁度、水温の分布。水温および塩分については、外洋値 (St. A10) より大きい地点を青色(濃色)球記号で、外洋値より低い地点を白色(淡色)球記号で示し、球記号の大きさは外洋値からの偏差の絶対値に対応する。外洋塩分値は34.01であった。

(3) サンゴ礁海水の外洋水との交換過程

サンゴ礁に流入する栄養塩等の環境負荷物質は、海水の外洋との交換が活発であれば、希釈・緩和されることになる。サンゴ礁における海水の流動は地形的な制約を強く受けるものと思われるが、同一地点であれば、潮汐周期に応じて海水の交換効率が大きく変わることが考えられる。

石垣島宮良サンゴ礁における流況観測の結果を図11に示した。調査地域の中央付近(P2)における流向・流速の連続観測から、大潮～中潮にかけて水道方向(北西)への一定した流れが観測され、特に下げ潮時に強まる(30 cm/s以上)傾向がみられた。中潮～小潮に向かうに従い、下げ潮時の流速が低下し、逆に上げ潮時の水路からの海水の流入が強化される。熱帯低気圧が接近した8月20日には、小潮にも関わらず北西方向への強い流れ(最大98 cm/s)が確認された。観測期間中、気象台の記録では風向が南西～南東で安定し、夏季季節風の影響下にあった。また熱帯低気圧が接近した8月20日以降、風向は南東となり風速も増加した。今回の調査からは風向・風速と、流向・流速に明瞭な対応関係は認められなかった。

宮良川河口部に繋がる水道(チャンネル)からの距離が異なる3点(P1、P2、P3)で塩分に大きな差異は認められなかったが、潮汐との関係から変化のピークがずれる傾向が見られ(図8)、これは小潮時に顕著である。流速が大きいと3つの測点の水温・塩分が一致してくる傾向が見られるが、これはサンゴ礁内の海水の交換が小潮時よりも大潮時に活発であることを示す。

この宮良サンゴ礁の礁池で優占する塊状ハマサンゴは、礁池内の水深が大きい地点ほど分布密

度は高くなる傾向を示した。これは、ハマサンゴの加入が主に破片化した群体の海水流動による分散によって起こるものと推測される。サンゴの破片分散は、波浪などで比較的容易に壊れる枝状のミドリイシなどについてよく知られているが、塊状のハマサンゴなどでも頻度は低いものの群体の一部もしくは全体が離脱することがある。群体は礁池内の卓越流の方向に規定されて倒れているものが多いことは、塊状群体であって終始安定して固着・成長しているわけではないことを示唆する。塊状群体の破片は、大きく立体的なサンゴ片となる潜在性をもつため、枝サンゴ片などの比べて生存する可能性が相対的に高くなる。よって、海水流動により堆積物が移動しやすい海域では、塊状ハマサンゴが卓越する場合があると考えられる。河川水がサンゴの分布に影響を及ぼす可能性も考えられるが、塩分の計測結果からは、宮良川の影響による礁池内の塩分の慢性的な低下は認められない。一方、台風などに伴う降雨時には河口域で顕著な塩分の低下が観測されており、海岸から流入する陸水の影響と併せて、今後、礁池内のサンゴ群集の維持機構に与える影響について検討する必要がある。

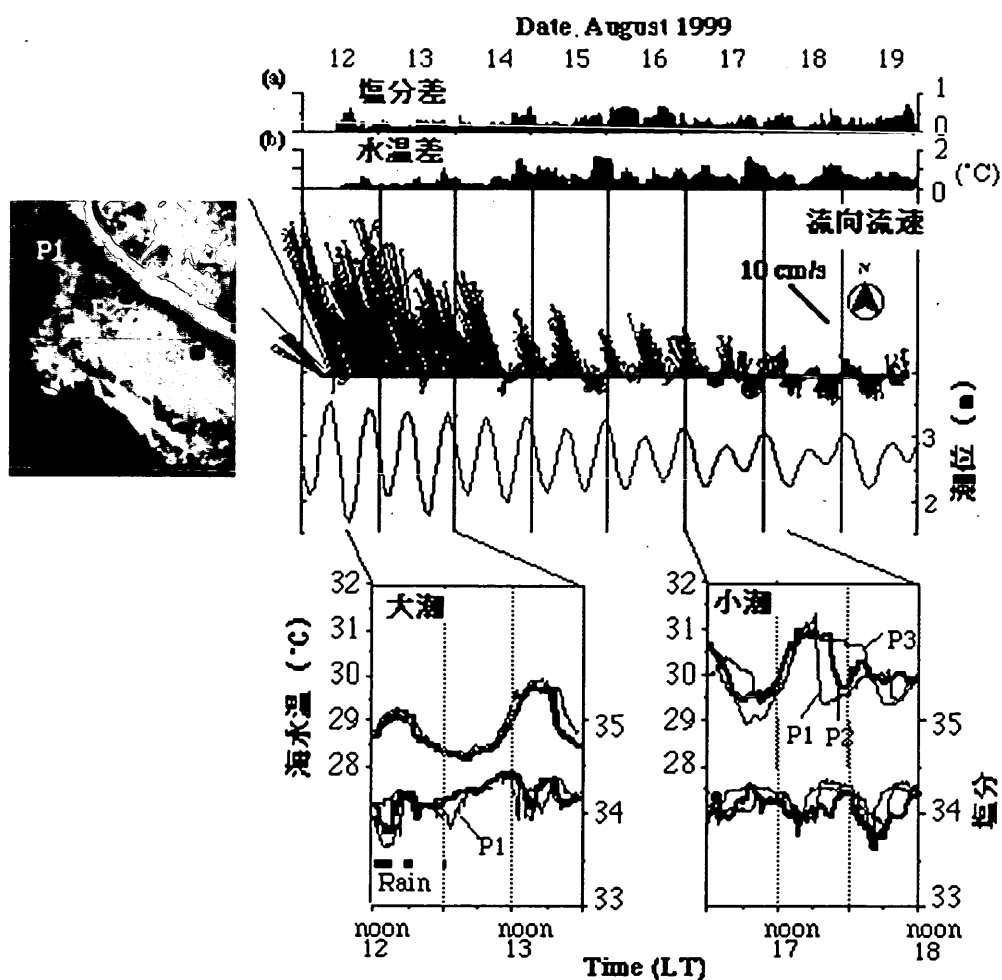


図 11. 石垣島宮良サンゴ礁における、1999年8月12日から19日の流況および水温・塩分観測結果。各グラフは、上から St. P1、P2およびP3における塩分(a)および水温(b)の差の最大値、St. P2における流向流速(c)、潮位(那覇港、d)。観測期間中での大潮時および小潮時のSt. P1、P2およびP3における水温・塩分を

それぞれ(e)および(f)に示した。なお、期間中1mm/h以上(最大10.5 mm/h; 8月20日12:00)の降水は、8月12日8:00~11:00、17:00、13日4:00(1.5 mm/h)、20日12:00、17:00、22:00~23:00に観測された(石垣島地方気象台)。

(4) 2001年夏の高水温傾向

2001年の夏は、近年では1998年夏の大規模白化現象が観察された年に次いで高水温状態が観測され、沖縄本島周辺では再び白化現象も報告された(図12)。石垣島の2ヶ所のサンゴ礁(白保、安良崎)における水温の変化を図6に示した。日平均水温でも30℃以上の日が9月中旬まで継続しており、平年に比べて高水温傾向であったことが確認できる(図13)。石垣島では20世紀を通じて水温の上昇が進行している。エルニーニョなどのイベントに同期して発生する高水温状況は、今後もサンゴの白化減少を引き起こす可能性が高く、海水流動の強弱と外洋水との交換の良否は個々のサンゴ礁にとって重要な影響を持つことになる。

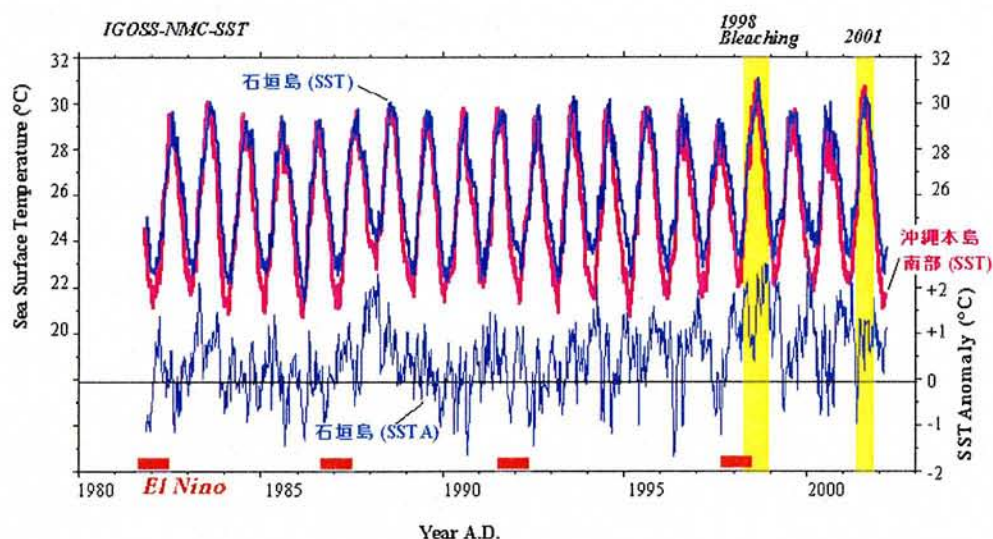


図12 石垣島および沖縄本島南部周辺海域の表層水温。石垣島周辺海域については平年値からの偏差を合わせて示した。水温記録は主に人工衛星観測によるIGOSS-NMC-SSTデータ⁹⁾を用いた。詳しくはSuzuki et al.¹⁰⁾を参照のこと。

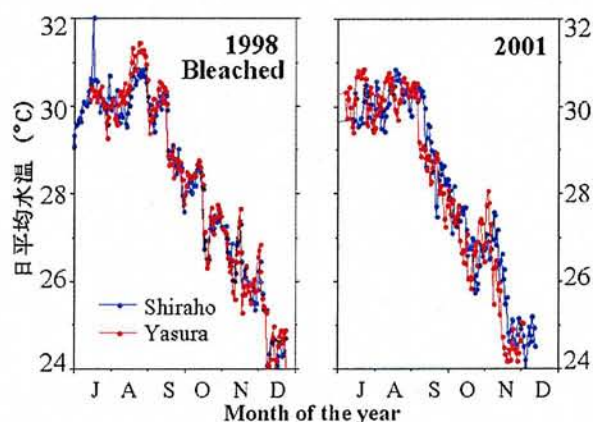


図13 石垣島の2ヶ所のサンゴ礁(安良崎、白保)における水温の1998年と2001年の比較。両年とも7月から12月の期間について示した。1998年の水温記録はSuzuki et al.¹⁰⁾による。

5. 本研究により得られた成果

サンゴ礁に流入する河川についての水質計測により、海岸湧水、地下水流入とともに、河川水も大きな栄養塩の流入源でありサンゴ礁の富栄養化に寄与していることが確認された。宮良川、轟川は硝酸態窒素に高い値を示し、一方、石垣島北東部の小河川は相対的にリン濃度が高い。環境が良好と考えられる石垣島北部のサンゴ礁と、陸起源の環境負荷物質の流入を多く受けていると考えられる宮良川河口部など島南部のサンゴ礁の海域間の各種水質項目について比較を試みたところ、窒素及びリンの栄養塩濃度で見ると、地域差は不明瞭である。一方、懸濁物濃度には、北部のサンゴ礁で低く、大浜サンゴ礁に代表される南部のサンゴ礁で若干高い傾向が見られた。ただし、この南北間の差異は、サンゴ礁群集の被度や多様性に大きな影響を与える程のレベルとは思われない。懸濁物とクロロフィル a 濃度には一部で明瞭な逆相関関係が見られるなど、その変動プロセスに関心がもたれるところであるが、今後、慎重な検討が必要である。海水中の懸濁物濃度の変動は、底質中の赤土成分の再懸諾過程が寄与している可能性が推定された。そこで海水中の懸濁物量と底質中の赤土量の双方を比較する調査手法を検討し、小型調査船による短期間多点採水と小型濁度計の利用による底質中懸濁物質含量（いわゆるSPSS）の測定の手間・高精度化を試みた。サンゴ礁海水の交換については自記記録センサーによる多点水温計測による評価が有効と思われ、宮良川河口部のサンゴ礁については大潮・小潮時の水温場の不均一性から定性的な海水交換量の評価が可能であった。2001年の夏は、近年では1998年夏の大規模白化現象が観察された年に次いで高水温状態が観測され、沖縄本島周辺では再び白化現象も報告された。石垣島のサンゴ礁でも日平均水温でも30℃以上の日が9月中旬まで継続しており、平年に比べて高水温傾向であったことが明らかとなった。石垣島では20世紀を通じて海水温の上昇が進行している。エルニーニョなどのイベントに同期して発生する高水温状況は、今後もサンゴの白化減少を引き起こす可能性が高く、海水流動の強弱と外洋水との交換の良否は個々のサンゴ礁にとって重要な影響を持つことになる。

6. 引用文献

- 1) Kawahata H., Yukino, I. and Suzuki, A. (2000) Terrestrial influence on the Shiraho fringing reef, Ishigaki Island, Japan: high carbon input relative to phosphate, *Coral reefs*, 19, 172-178.
- 2) Umezawa, Y., T. Miyajima, M. Yamamuro, H. Kayanne, I. Koike (2002) Fine-scale mapping of land-derived nitrogen in coral reefs by $\delta^{15}\text{N}$ in macroalgae, *Limnol. Oceanogr.*, 47(5), 2002, 1405-1416
- 3) Suzuki, A., T. Nakamori, . and H. Kayanne, (1995) The mechanism of production enhancement in coral reef carbonate systems: model and empirical results, *Sediment. Geol.*, 99, 259-280.
- 4) A.Suzuki, H.Kawahata, T.Ayukai and K.Goto (2001) The oceanic CO_2 system and carbon budget in the Great Barrier Reef, Australia. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1243-1246.

- 5) Suzuki, A. and H. Kawahata (2003) Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in the fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions. *Tellus B*, 55, 428-444.
- 6) Van Woesik, R., T. Tomascik and S. Rillake (1999) Coral assemblages and physico-chemical characteristics of the Whitsunday island: Evidence of recent community changes. *Mar. Freshwater Res.*, 50, 427-440.
- 7) Umezawa, Y., T. Miyajima, H. Kayanne, and I. Koike (2002) Significance of groundwater nitrogen discharge into coral reefs at Ishigaki Island, southwest of Japan. *Coral Reefs*, 21: 346-356.
- 8) 藤岡義三、大葉英雄、渋谷拓郎、高田宜武、鈴木淳 (2002) 石垣島礁池の造礁サンゴ群集は回復するのか? 日本サンゴ礁学会第5回大会.
- 9) Reynolds, R. W. and Smith, T. M. (1994) Improved global sea surface temperature analyses using optimal interpolation. *J. Climate*, 7, 928-948.
- 10) Suzuki, A., Kawahata, H., Tanimoto, Y., Tsukamoto, H., Gupta, L. P. and Yukino, I. (2000) Skeletal isotopic record of a *Porites* coral during the 1998 mass bleaching event. *Geochim. J.*, 34, 321-329.

7. 国際共同研究等の状況

産業技術総合研究所・海洋資源環境研究部門の前身である工業技術院地質調査所海洋地質部では、日豪科学技術協力協定登録課題「熱帯陸棚域の炭素循環に関する研究」をオーストラリア海洋科学研究所（担当：Gregg Brunskill グループリーダーおよび鮎貝天志主任研究員）と平成10-12年に実施し、研究者の相互訪問と共同観測結果の解析を進めた。これらの成果は、Suzuki et al. (The oceanic CO₂ system and carbon budget in the Great Barrier Reef, Australia, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1243-1246, 2001) として公表論文に反映された。また、フィリピン大学国立地質研究所（担当：Prof. Fernando P. Siringan）と「サンゴ骨格および群集解析による海水準変動とサンゴ礁形成過程に関する研究」を平成13年度より実施し、ルソン島南部のサンゴ礁にて研究試料採取調査を実施し、その後、相互の研究所訪問を行っている。さらに、インドネシア科学研究所（担当：Dr. Wahyoe S. Hantoro）との共同研究「サンゴ骨格等を用いた海洋環境汚染の復元に関する研究」を平成13年度から開始し、平成14年3月にはジャカルタ湾近傍のサンゴ礁にて共同調査を実施した。

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）>

- ① 佐藤崇範, 堀 信行, 鈴木 淳 : *Galaxea*, JCRS, 2, 43-50 (2000)
「石垣島宮良湾の裾礁礁池における塊状ハマサンゴの分布」
- ② A. Suzuki, H. Kawahata, T. Ayukai and K. Goto : *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1243-1246 (2001)
“The oceanic CO₂ system and carbon budget in the Great Barrier Reef, Australia”
- ③ A. Suzuki, M. K. Gagan, P. De Deckker, A. Omura, I. Yukino, and H. Kawahata : *Geophys. Res. Lett.*,

28, 3685-3688 (2001)

"Last Interglacial coral record of enhanced insolation seasonality and seawater ^{18}O enrichment in the Ryukyu Islands, northwest Pacific"

- ④ 川幡穂高、鈴木 淳：日本海水学会誌、56, 2, 98-102(2002)

「海洋の炭素循環におけるサンゴ礁の役割ー石垣島白保裾礁、グレートバリアリーフ、パラオ堡礁、マジュロ環礁、モルジブ・南マレ環礁」

- ⑤ 井上麻夕甲、鈴木 淳、菅 浩伸：地球化学、36, 65-79 (2002)

「サンゴ骨格中の微量元素ー海洋汚染指標としての可能性ー」

- ⑥ A. Suzuki, and H. Kawahata: Tellus B, 55, 428-444 (2003)

"Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in the fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions"

<学術誌(査読なし)>

- ① 鈴木 淳、川幡穂高：Isotope News, 2000年9月号, 2-5, (社)日本アイソトープ協会 (2000)

「骨格の酸素・炭素同位体比分析によるサンゴ白化現象の解析」

<書籍>

- ① 日本海洋学会編：『海と環境：海が変わると地球が変わる』、講談社、51-63 (2001)

「サンゴの年輪は語る(執筆担当：鈴木 淳)」

- ② 茅陽 一編：『環境年表2004/2005』、オーム社

「第IV部 海洋データ編 1・1・11 熱帯海洋の環境変遷(執筆担当：鈴木淳)」(印刷中)

<報告書類等>

- ① 鈴木 淳、川幡穂高：地質ニュース、2000年9月号、551, 61-65 (2000)

「白嶺丸によるグレートバリアリーフ調査航海」

(2) 口頭発表

- ① A. Suzuki, H. Kawahata, and T. Ayukai: 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai (2001)

"The oceanic CO_2 system and carbon budget of coral reef systems: A synthesis of observations in the fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions"

- ② H. Kawahata, A. Suzuki, L.P. Gupta, and H. Ohta: 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai (2001)

"Decrease in the CO_2 fugacity during a hurricane event"

- ③ A. Suzuki, H. Kan, H. Kawahata, and A. Edward: 7th International Conference on Paleoceanography, Sapporo (2001)

"Coral oxygen isotope record of marine environmental variability in the Chuuk Atoll, the North equatorial Pacific"

- ④ 藤岡義三、大葉英雄、渋谷拓郎、高田宜武、鈴木淳：日本サンゴ礁学会第5回大会 (2002)

「石垣島礁池の造礁サンゴ群集は回復するのか？」

- ⑤ 鈴木 淳、M. K. Gagan, K. Fabricius, 川幡穂高：地球惑星関連学会2003年合同大会 (2003)

「骨格の酸素・炭素同位体比変動からみたサンゴ白化現象」

- ⑥ A. Suzuki, H. Kawahata and T. Ayukai : 2003 Goldschmidt Conference , Kurashiki, Japan (2003)

“The oceanic CO₂ system and biogeochemical processes in the Great Barrier Reef, Australia” (アブストラクト提出済み)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、本研究の成果を発展させ、学会誌および国際誌での公表活動を進めるとともに、サンゴ礁保全地域の選定等の政策的な課題へ適用できるように努める。

付録 I :
サンゴ群体競合成長モデルプ
ログラム

```

c 複数サンゴ群体系成長シミュレーションプログラム
c ある地点の種数種のサンゴ群体系分布を初期条件とし、
c 仮定した成長率と種ごとの競合順位を与え、
c 年次ごとの群体系分布変化をシミュレートする
c 群体系周囲の成長で成長するものとする。
c from given shape of initial coral.
c 同じ空間は1種のサンゴでのみ占められるとする
c i: 行が増大する方向の番号
c j: カラムが増大する方向の番号
c k: サンゴ種付番
c loop: シミュレーション期間日数
c year: 初期状態よりの年数(不動小数)
c 配列
c a(256, 256): サンゴで占められていれば1.
c b(256, 256): a のミラー配列, 計算用領域、値を a に返す。
c c(256, 256): 進出可能領域のフラッグ
c i, j 方向とも -77(ista), 178(iend) まで付番
c z(j): ファイル読み込み用1次元配列
c w: 一律成長率
c w2(k): サンゴ種 k の成長率
c ファイル機番 1: file="data", 初期分布を z で読み込み、a, b に移す
c ファイル機番 2: file="init", 初期分布書き出し
c z:
c z:
c z:
c z:
c z:
c integer ista
c integer iend
c
c real a(-77:178, -77:178, 5)
c real a2(-77:178, -77:178)
c real b(-77:178, -77:178, 5)
c real b2(-77:178, -77:178)
c real c(-77:178, -77:178, 5)
c real c2(-77:178, -77:178)
c integer z(-77:178)
c
c integer i, j, k, y, loop
c real w, w2(5)
c real year
c
c
c initializing
c
c ista = -77

```

```

iend = 178
do 1 k = 1, 5
do 1 j = ista, iend
do 1 i = ista, iend
b(i, j, k) = 0.0
a(i, j, k) = 0.0
1
c XXに成長率(外縁半径の増大/年)を与える
year = 1
w = XX/365.0
w2(1) = w
w2(2) = w
w2(3) = w/5
w2(4) = w/5
w2(5) = 0
c w = 3.8/12.0
c
c loop = 365 * year
c a(50, 50) = 1
c
c サンゴ初期分布を与える
open(1, file="data")
do 10 i = ista, iend
read(1, *) (z(j), j=ista, iend)
do 10 j = ista, iend
if (z(j).gt.0) then
a(i, j, z(j)) = 1.0
b(i, j, z(j)) = 1.0
endif
10 continue
close(1)
c
c サンゴ種の区別をつけて(aに1, 2, 3, 4, 5を乗じて)ファイル出力
c
open(2, file="init")
do 400 i = ista, iend
write(2, 301) (((a(i, j, 1)) + (a(i, j, 2)) * 2
+ (a(i, j, 3)) * 3
+ (a(i, j, 4)) * 4
+ (a(i, j, 5)) * 5), j=ista, iend)
1
1
1
400 continue
close(2)

```

```

c サング種の区別をつけて(aに1, 2, 3, 4, 5を乗じて)画面出力
do 299 i = -10, iend
  write(*,302) ((a(i,j,1))+(a(i,j,2))*2+(a(i,j,3))*3
    +(a(i,j,4))*4+(a(i,j,5))*5), j=5, 74)
  1
299 continue
c
c
c-$B#4$$$+$$N$H$--(Ba,b
c-$B$=$!$$$$g$&$N$H$--(Ba2,b2
c
c
c do 2 i = istart, iend
c do 2 j = istart, iend
c a(i,j)=abs(a(i,j))
c if (a(i,j).lt.4) then
c b(i,j) = a(i,j)
c a2(i,j) = 0
c b2(i,j) = 0
c
c else
c a2(i,j) = a(i,j)
c b2(i,j) = a2(i,j)
c a(i,j) = 0
c b(i,j) = 0
c
c endif
c 2 continue
c
c
c do loop as long as the given years
c 指定継続日数だけdoループをまわす
c
c do 200 kk = 1, loop
c
c 各種(レイヤー)ごとに成長可能空間を定義
c call mkter(a,c)
c
c
c do 1000 k = 1, 4
c
c do 100 i = -76, 177
c do 100 j = -76, 177
c if (a(i,j,k).gt.0.8) call grow(i,j,k,a,b,c,w2(k),ista,iend)
c 100 continue
c
c do 101 i = -76, 177
c do 101 j = -76, 177
c if (b(i,j,k).gt.0.8) call grow(i,j,k,b,a,c,w2(k),ista,iend)
c 101 continue

```

```

c 旧プログラムデバッグ用
c open(2, file="3year-1")
c do 300 i = -77, 178
c 300 write(2, 301) (abs(a(i, j)), j=-77, 178)
c close(2)
c
c open(2, file="3year-2")
c do 500 i = -77, 178
c 500 write(2, 301) (abs(a2(i, j)), j=-77, 178)
c close(2)
c
c 最終結果をファイル出力
c open(2, file="year-all")
c do 600 i = ista, iend
c 600 write(2, 301) (((a(i, j, 1)) + (a(i, j, 2)) * 2 + (a(i, j, 3)) * 3
c + (a(i, j, 4)) * 4 + (a(i, j, 5)) * 5), j=ista, iend)
c 1 continue
c 600 close(2)
c
c 301 format(256f3.0)
c 302 format(256f2.0)
c stop
c end
c
c*****
c 成長率 w を main からもらう
c a: 作業変数
c b: 作業変数
c c: 作業変数
c
c subroutine grow(i, j, k, a, b, c, w, istart, iend)
c integer i, j, k, m, n, istart, iend
c real a(-77:178, -77:178, 5)
c real b(-77:178, -77:178, 5)
c real c(-77:178, -77:178, 5)
c real w, ww
c 縦・横隣には成長率(進出率)で伸びる
c 斜め隣には半分の成長率(進出率)で伸びる
c ww = w * a(i, j, k)
c if (c(i-1, j, k).gt.0.5) b(i-1, j, k) = b(i-1, j, k) + ww*c(i-1, j, k)
c if (c(i+1, j, k).gt.0.5) b(i+1, j, k) = b(i+1, j, k) + ww*c(i+1, j, k)
c if (c(i, j-1, k).gt.0.5) b(i, j-1, k) = b(i, j-1, k) + ww*c(i, j-1, k)
c if (c(i, j+1, k).gt.0.5) b(i, j+1, k) = b(i, j+1, k) + ww*c(i, j+1, k)
c
c ww = ww/2

```

```

if
b(i-1, j-1, k)=b(i-1, j-1, k)+ww*c(i-1, j-1, k)
if
b(i-1, j+1, k)=b(i-1, j+1, k)+ww*c(i-1, j+1, k)
if
b(i+1, j-1, k)=b(i+1, j-1, k)+ww*c(i+1, j-1, k)
if
b(i+1, j+1, k)=b(i+1, j+1, k)+ww*c(i+1, j+1, k)
c
do 100 m = i-1, i+1
do 100 n = j-1, j+1
if (b(m, n, k).gt.1.0) then
b(m, n, k)=1.0
elseif (b(m, n, k).lt.0.0) then
b(m, n, k)=-1.0
endif
100 continue
return
end
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
subroutine brnd(k, a, c, ista, iend)
integer i, j, k
integer ista, iend
real a(ista:iend, ista:iend, 5)
real c(ista:iend, ista:iend, 5)
real sum
c 同じメッシュに他のサンゴ(1~4)がはいっていれば(日陰)成長できない。
do 100 j = ista, iend
do 100 i = ista, iend
sum = a(i, j, 1)+a(i, j, 2)+a(i, j, 3)+a(i, j, 4)
+c(i, j, 1)+c(i, j, 2)+c(i, j, 3)+c(i, j, 4)
if (sum.gt.0.01) a(i, j, k) = 0.0
100 continue
return
end
c*****
cccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccccc
c 成長可能な空間のチェック。
c subroutine mkter(a, c)
c real a(-77:178, -77:178, 5)
c real c(-77:178, -77:178, 5)
c real a2(-77:178, -77:178)
c real c2(-77:178, -77:178)
c integer i, j, k, nm

```

```

real zijk
integer s(5)
c c(i,j) > 0.5: 成長可能
c c(i,j) = -1: ?
c
c 隣接メッシュに当該サンゴが一部でもあれば、成長可能な空間とする。
c
do 100 k = 1, 4
do 100 j = -76, 177
do 100 i = -76, 177
c(i,j,k) = 0
if (((a(i-1,j-1,k)+a(i-1,j,k)+a(i-1,j+1,k)+a(i,j-1,k)
+a(i,j,k)+a(i,j+1,k)+a(i+1,j-1,k)+a(i+1,j,k)
+a(i+1,j+1,k)).gt.0.0)
) then
zijk = 0
do 200 nm = 1, 4
if (nm .ne. k) zijk = zijk + a(i,j,nm)
continue
do 201 nm = 1, 4
if (nm .ne. k) zijk = zijk + c(i,j,nm)
continue
if (zijk .le. 0.01) then
c(i,j,k) = 1
write(*,*) "zijk = ", zijk, k, (a(i,j,nm), nm=1, 5)
endif
else
c(i,j,k) = 0
endif
if ((k.eq.1).and.((i.eq.99).or.(i.eq.100))) then
write(*,*) i,j,c(i,j,k)
endif
if (((a(i-1,j-1)+a(i-1,j)+a(i-1,j+1)+a(i,j-1)+a(i,j)
+a(i,j+1)+a(i+1,j-1)+a(i+1,j)+a(i+1,j+1)).gt.0.0)
.and.(c2(i,j).ne.1)) then
c(i,j) = 1
else
c(i,j) = 0
endif
100 continue
c
c サンゴ種 5 はどこでも成長できない(すでに死んでいる)。

```

```

do 300 j = ista, iend
do 300 i = ista, iend
c(i,j,5) = -1
300 continue
c
return
end

c *****
subroutine dstry(c2,a,b)
real c2(-77:178,-77:178)
real a(-77:178,-77:178)
real b(-77:178,-77:178)
do 100 i = -77, 178
do 100 j = -77, 178
if (c2(i,j).gt.0.5) then
a(i,j) = 0.0
b(i,j) = 0.0
endif
100 continue
c
return
end

```

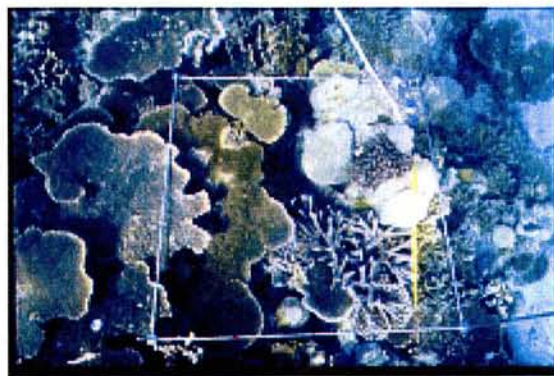
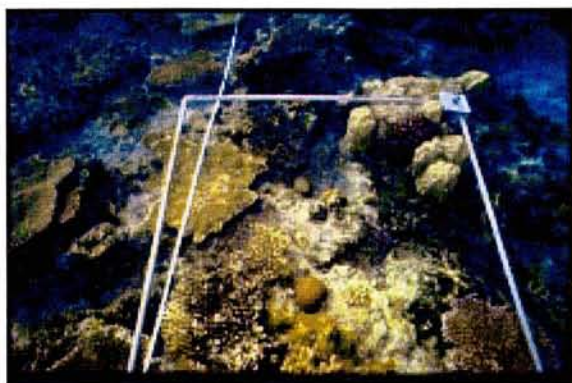
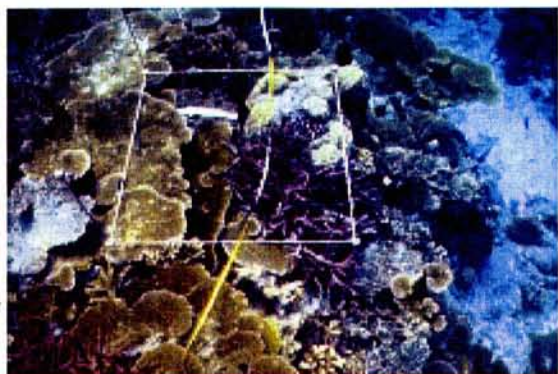


図7 黒島港北トランセクト (K1) の25m地点における画像時系列。
(a)1994年10月 (b)1998年1月



(c)2002年10月

(d)一般的な競合のケース。卓状ミドリイシがキクメイシに対して一定の距離をおき、避けて成長する
(海中公園センターによる調査時の撮影)。



図8 PC用ので立体画像解析用ソフトウェアを用いて、卓状ミドリイシの外縁を定義してコードラートに対する相対位置座標を写真計測した例。

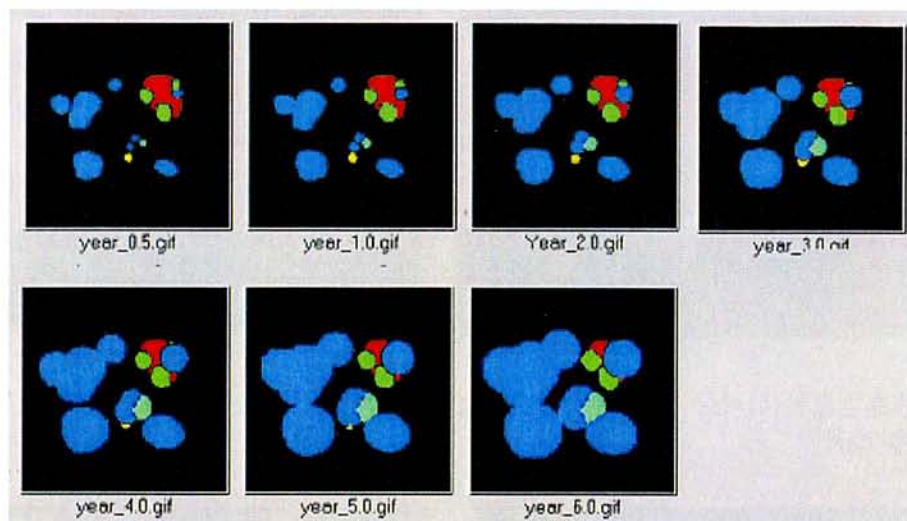


図9 群体成長モデルによるシミュレーション結果。計算領域は $2.56\text{m} \times 2.56\text{m}$ 。計算開始後、6年後にはキクメイシが卓状ミドリイシおよび枝状ミドリイシで覆われて見えなくなる。



図10 石垣島浦底湾で採取したハマサンゴL



図11 石垣島浦底湾で採取したハマサンゴS

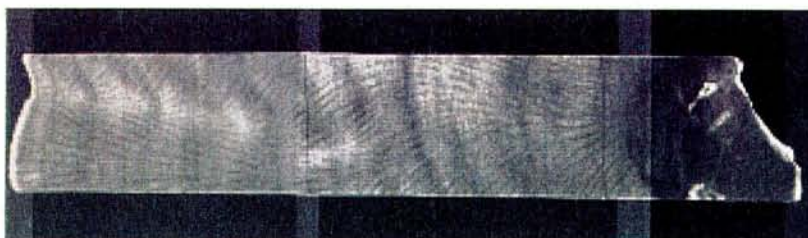


図12 ハマサンゴ大の透過X線画像

3枚の透過X線画像を合成したもの。明るい部分は、X線成長が少ない、すなわち密度が高く成長が遅い部分、暗い部分は成長が早い部分に相当する。



図13 ハマサンゴSの透過X線画像

付録 II

サンゴ移植によるサンゴ礁の回復技術を広く一般に普及させる事を目的とし、(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では、本研究により得られた成果及び我が国で行われているサンゴ移植研究の最先端の話題を集め、大森信編「サンゴ礁修復に関する技術手法—現状と展望—」として、環境省自然環境局から刊行する。

環境省地球環境研究総合推進費

「サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究」

サンゴ礁修復に関する技術手法
—現状と展望—
(案)

大森 信 編著

2003 年 3 月

環境省自然環境局

はじめに

サンゴ礁は海の熱帯林とも呼ばれ、高い生産性と生物多様性を有しており、食料供給、観光の場のみならず、遺伝子資源の宝庫としても注目されている。しかし、過去 40 年にわたってサンゴ礁はオニヒトデの大発生による食害、表土流出による土砂の堆積、ダイナマイトや毒物を使用する破壊的漁業等の影響を受けて環境の衰退が著しいため、国際的にその保全が緊急の課題となっている。そのため、1995 年には日米豪など世界の関係国が協力し、保全の活動を進めるための国際協力の枠組みとして国際サンゴ礁イニシアチブが発足し、わが国はこれを積極的に推進してきた。

わが国には琉球列島を中心に約 96,000ha のサンゴ礁が分布しており、先進国の中で数少ないサンゴ礁保有国であるため、研究、保全の分野で果たすべき役割は大きく、積極的な貢献が期待されている。

このため、環境省は地球環境研究総合推進費において、平成 12・14 年度、サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究を実施し、その中でサンゴ生息のための堆積環境やサンゴの着生加入過程に関する研究を精力的に進め、サンゴ移植の基本的な知見を得た。なお、これとは別に、阿嘉島臨海研究所や海洋科学技術センター等の取組みとして、サンゴ礁の修復を目的に多くの調査と研究開発が行われ、大きな実績が積み重ねられている。

本書は今後荒廃したサンゴ礁において移植等によるサンゴ礁修復の要請が高まることを想定し、各地でサンゴ礁修復の事業が行われる際に参考となるよう、それぞれの研究と事業で主要な役割を果たした方々に成果と既往の知見をとりまとめたものである。

作成に当たり、ご協力いただいた関係各位に深謝するとともに、本書が広く活用され、サンゴ礁の再生修復に役立つことを心から願うものである。

2003 年 3 月

環境省自然環境局

監修・編者

大森 信（阿嘉島臨海研究所）

執 筆 者

岩尾研二（阿嘉島臨海研究所）

大久保奈弥（東京工業大学）

大森 信（阿嘉島臨海研究所）

岡本峰雄（東京水産大学）

谷口洋基（阿嘉島臨海研究所）

野島 哲（九州大学天草臨海実験所）

服田昌之（お茶の水女子大学）

藤原秀一（国土環境株式会社）

細谷誠一（国土環境株式会社）

目 次

はじめに	環境省自然環境局
1. 序論	大森 信
2. これまでのサンゴ礁修復研究	大森 信・大久保奈弥
3. 有性生殖を利用したサンゴ礁修復	
3-1. 種苗生産	服田昌之・岩尾研二・谷口洋基・大森 信
(1) 野外での卵・胚の採集	
(2) 産卵誘発	
(3) 幼生飼育	
(4) 幼生の大量生産	
(5) 幼生の運搬	
(6) 着生・変態の誘導	
(7) 着生基盤	
(8) 着生基盤への幼生の導入方法	
(9) 着生後の稚サンゴ育成	
3-2. 基質加工による幼生着生誘導	藤原秀一
4. 無性生殖を利用したサンゴ礁修復	
4-1. 分割群体の移植	大久保奈弥
(1) 移植断片の採集	
(2) 移植断片の大きさ	
(3) 運搬	
(4) 固定方法	
(5) 移植の適地	
(6) 移植に適した基盤	
(7) 移植時期	
4-2. 稚サンゴを採取して移植する試み	岡本峰雄・野島 哲
(1) 稚サンゴとその採取法	
(2) 移植方法	
(3) 本手法の評価	
5. 全群体の移植及びサンゴ群集（礁全体）の移築	藤原秀一・大森 信
5-1. 全群体の移植	
5-2. 礁全体の移築	
(1) 移築元と移築先の選定	
(2) 予備実験	
(3) 岩盤の採取	
(4) 岩盤の輸送	

- (5) 岩盤の設置
- (6) モニタリング調査結果の概要
- 6. サンゴ礁修復への海中技術の展開及び修復の事例
 - 6-1. 有性生殖を利用したサンゴ礁修復法開発の試み 岡本峰雄・野島 哲
 - (1) はじめに
 - (2) 有性生殖を用いたサンゴ礁再生法の概念
 - (3) 着生板利用の問題点
 - (4) 新しい着生具開発の背景
 - (5) 着生具の構造と配置法
 - (6) サンゴの着生から育成・移植
 - (7) 本手法の評価と将来の展開
 - (8) まとめ
 - 6-2. 枝状ミドリイシ *Acropora formosa* とテーブル状ミドリイシ *A. hyacinthus* 分割群体の移植 大久保奈弥
 - (1) 材料と方法
 - (2) 結果
 - (3) 考察
 - 6-3. コブハマサンゴ *Porites lutea* 群体の移植 細谷誠
 - (1) 方法
 - (2) 結果
 - (3) まとめ
- 7. 着生種苗と移植群体および移築サンゴ群集の管理 藤原秀一
 - (1) 海藻、食害生物除去
 - (2) 投釣と投錨の防止
 - (3) モニタリング
 - (4) 再生産の確認
- 8. まとめ 藤原秀一・大森 信
 - (1) 修復技術の進展と比較
 - (2) 今後の研究課題

1. 序 論

地球規模でのサンゴ礁の劣化と破壊が憂慮されている。サンゴ礁の再生や修復には好ましい環境条件の維持と回復が必要であり、それにはこの大きな問題に対する社会の認識、民意の向上、そしてサンゴ礁を護ろうとする行政側の姿勢に支えられた法的規制や勧告や協力がなくてはならない。台風や高温によるサンゴの自然死は、生育環境条件さえ良好であれば数年から十年以内に回復が可能である。回復が遅々として進まないどころか、サンゴ礁がますます減少しているところに問題の深刻さがある。

こうした事情を背景に、サンゴ礁の修復のための各種の研究開発が行われている。しかし、このような研究開発は人間活動の増大によるサンゴ礁の破壊を仕方ないものと認め、修復技術の確立によって陸上や海岸の開発を容易にしようとするものであってはならない。このことをはじめに強調しておきたい。サンゴ礁の修復が最も強く望まれている沖縄では、今でも多くのサンゴ礁が開発事業の犠牲となって失われつつある。

サンゴ礁の修復技術として、我が国では 1990 年代からサンゴの分割群体（断片）の移植が各地で行われている。一方、近年、港湾建設などでやむを得ず除去しなければならなくなった群体全部や礁の一部を岩盤ごと切り取って別の場所に移植（移築）することも行われるようになった。しかし、これらの修復事業や研究開発の多くはまだ実験中あるいは試行の段階にある。過去に行われた移植事業の中には十分な科学的計画なしに行われたものや結果のモニタリングなしに行われたものが少なくない。また、成果が公開されなかったために、必ずしも修復技術の進歩につながらなかった。

このたび、環境省地球環境研究総合推進事業の一つであるサンゴ群集回復促進研究にサンゴ礁修復のためのマニュアル作りを入れ、我が国を中心としたこれまでの修復技術に関する成果と知見を公開することにした。本書には、既に公表されたものと公開してもよいと思われる成果が各章の執筆担当者の責任のもとに取りまとめられている。まだ試行や実験の途中にある、いわゆる state of the arts の段階にあるものや、特許に関わる成果については簡単な概要の説明にとどめた。サンゴ礁修復のための研究開発は、これまでどちらかといえば各機関で個々に進められてきた。現状と展望をまとめた本書の刊行によって関係者相互の理解が深まり、情報の交流を通じてさらなる発展につながるであろうことを編者は信じる。

なお本書の執筆にあたっては、山本秀一氏（株式会社エコー）をはじめ、多くの人々からの助言や教示を得た。ここにそれらの御好意に対して感謝したい。

（大森 信）

2. これまでのサンゴ礁修復研究

サンゴ礁が健全な状態にあって、ほかの水域へのサンゴ幼生の供給源となる可能性の大きい水域を保護区域に指定して適当な法制のもとに管理することや、過剰なダイバーの利用によって損傷が目立ってきたダイビングスポットを一時的に閉鎖して回復を待つといったこともサンゴ礁の修復のための方策の一つである。しかしながら、本書では、1) サンゴの有性生殖を利用した種苗生産や着生誘導、2) 無性生殖を利用した分割群体の移植、3) 全体および礁全体の移植、および4) 着生種苗と移植群体およびサンゴ群集の管理、について、それらの方法と成果および問題点をとりまとめた。

造礁サンゴは有性生殖によって生まれた幼生がやがて基底に着生して変態し、ポリプがほぼ完成するとまもなく娘ポリプを作り始めて群体になる。群体は出芽を続けてポリプをふやして成長するが、台風などによる波浪によって折れた群体の一部が基底に再び固着し、そこから無性生殖によって成長することがある。この古くから知られている性質を利用して、サンゴ分割群体（以下断片）を移植してサンゴ礁を修復しようとする試みが、海外では1980年代から、我が国では1990年代から行われるようになった。断片の移植には、直接実海域の岩盤等に固定するほか、一旦基盤に定着させ、成長してから実海域に移す方法がある。また、これらとは別に断片をロープに結び付けて海中に垂下して成長させるという技術が特許を受けている（沖縄タイムス1996年9月18日）。これまでの試みでは、しかしながら、移植のための適種と適地の選択、移植方法、移植サンゴの断片の大きさなどについては比較的調べられておらず、また移植後のサンゴの状態や移植地周辺の生態的变化についての長期にわたる観察はあまり行われていない。移植技術の進歩は、サンゴ礁の修復や人工サンゴ礁の創造のほか、観賞用サンゴ群体の生産増殖を通して天然のサンゴ採取を少なくする効果も期待されることから、知見の充実が望まれるが、これまで日本では、移植が十分な科学的計画なしに行われたケースが少なくなく、また得られた知見が整理されていないので、必ずしも全てが移植技術の進歩につながりはしなかった。生きたサンゴ群体（以下ドナー）を壊して断片を得るというやり方に対する批判と、移植法が標準化しにくい難しさ、および断片の大規模な移植にはかなりの人手と費用を要することは、この方法につきまとう大きな問題である。

さらに、移植した断片を、ワイヤーを張った台に取り付けて電気を流し、海水中の炭素イオンとカルシウムイオンの沈着（石化）を促進して、サンゴの成長を助けるという方法が考案されている（van Treek and Schuhmacher 1997, 1999）。

群体全部やサンゴ群集（礁全体）の移植の場合も、事前に適地の選択や移植のための水深、波あたり、底質などについての総合的な調査はあまり行われておらず、移植・移築後のサンゴ群体の生育状態に関する観察結果も多くが公表されていない。海外では岩盤ごと切り取ったサンゴ群体を組み合わせ、人工的なサンゴ礁を造園した事例があるが、国内では港湾建設作業などの際、やむを得ず除去したり埋め立てられるサンゴ礁の一部を切り取り、近くに移築するケースが多い。

有性生殖を利用したサンゴ礁修復技術の開発は、1990年代はじめから阿嘉島臨海研究所で研究テーマの一つとして取り上げられ、それを支える各種の基礎生物学的な観察や実験がオーストラリアの Heyward 博士や Harrison 博士、米国の Morse 博士夫妻、日本の杉山勉博士や服田昌之博士らの協力を得て行われた。これは室内でサンゴを産卵させたり、野外で一斉産卵直後にみられる海上のスリックやサンゴ群体から胚や幼生を採取して、生け簀や水槽に移して中間育成した後、幼生を適地に移して着生を促進したり、適当な基盤に着生させたりした後、移植するもので、研究には日本財団他の温かい理解と費用面での助成があった。海外では前出の Heyward 博士らがオーストラリアで同様の種苗生産に成功している。

これまでの研究により、石灰藻などある種の紅藻類が幼生の着生を促進することや、ある種の神経ペプチドに変態誘因効果があることなどが明らかになった。中間育成の方法や着生の促進方法には一定の成果が挙げられている。今後の研究課題は、基盤に着生したポリプの成長と生残を如何に高めるかであろう。基盤上に繁殖する藻類の除去やサンゴ食性魚類に対する防御対策が必要である。

防波堤などの海洋構造物の表面に細かい凸凹を加工して幼生が基質表面に滞留する可能性を高め、着生を誘導する試みも行われている。

以下はこれまでに報告されたサンゴ移植に関する世界の文献を縦覧し、レビューしたものである。

断片の採取には主にハンマーやノミやペンチが用いられている。この時、ドナーに与える影響を最小限にするために、一つの群体から多量の断片を採取するのではなく、少量ずつ取る必要がある。但し、採取の影響についての生理学的知見はほとんどない。台風などによって自然に生じた断片を拾って移植に用いることも考えられるが、実際に大規模に行われた例は、調べた限りない。

運搬方法には研究者間であまり違いが見られない。主な方法は、移植場所が近ければ、断片を水中から取り出さずにダイバーが容器に入れて運び (Dodge *et al.* 1999)、遠ければ船尾に吊り下げた金網やメッシュバッグの中に入れて運んだり (Dodge *et al.* 1999; Munoz-Chagin 1997)、ボートに海水を入れたバケツを用意して、そこに入れて運んだりする方法 (Bowden-Kerby 1997) がある。

これまで移植されたのは、長さや直径が約 2~30cm の断片や群体 (ドナー全体) である。固着性の塊状群体である *Montastrea curta* の直径 2.5~5.1 cm の断片を移植した結果、9ヵ月後の生残率が 75%であったことから、Becker and Muller (1999) はおそらく直径 2.5 cm 以下でも移植は可能だろうと考察している。しかし、*Acropora echinata* と *Pavona cactus* などの 5~10、10~15、15~25 cm の 3 サイズの群体と、2~4、3~6 cm の 2 サイズの断片を用いた移植では、群体 3 サイズ間での死亡率に差は見られなかったが、断片の死亡率は群体より高くなったものが多かった (Plucer-Rosario and Randall 1987)。 *Acropora prolifera* の 3~5、8~12、15~22 cm の 3 サイズを比較した実験では、小さい断片ほど明らかに死亡率が高かった (Bowden-Kerby 1997)。これらのことから、断片よりも群体で移

植したほうが生残率は高く、断片で移植する場合には大きいものほど生残率が高いと考えられる。

断片の基盤への固定は、まず基盤についている藻類等をワイヤーブラシなどで取り除き、断片を基盤に縦もしくは横にしてエポキシ系の中水セメントで接着しているものが多い。中には、中水セメントではなく通常の産業用セメントが使われる場合もあった。一方、基盤に打った釘に断片を添え、針金やケーブルタイ等で固定する方法もしばしば用いられている。

これまで我が国では断片を中水セメントでサンゴ岩やコンクリートブロックに固定する方法が主に用いられてきた。中水セメントはどんな形状の断片でも固定できるのが利点であるが、その組成は製造元によって異なり、組成がサンゴに与える化学的影響は明らかにされていない。また、市販のもので 100 g あたり約 300 円と高価で、また接着できる時間が約 1 時間と限られているので、短期間に多くの人数を集中しなければならない。大規模な移植を行う場合にはかなりの経費が必要とされ、試算では 1ha あたり 245,000 本を移植した場合、作業代を含めて 59 万豪ドルかかる (Kaly 1995)。これに対して著者らはコンクリート釘を基盤は打ち込み、そこにケーブルタイで固定する方法が簡便で、費用は前者の半分程度で済むと報告した (大久保・大森 2001)。

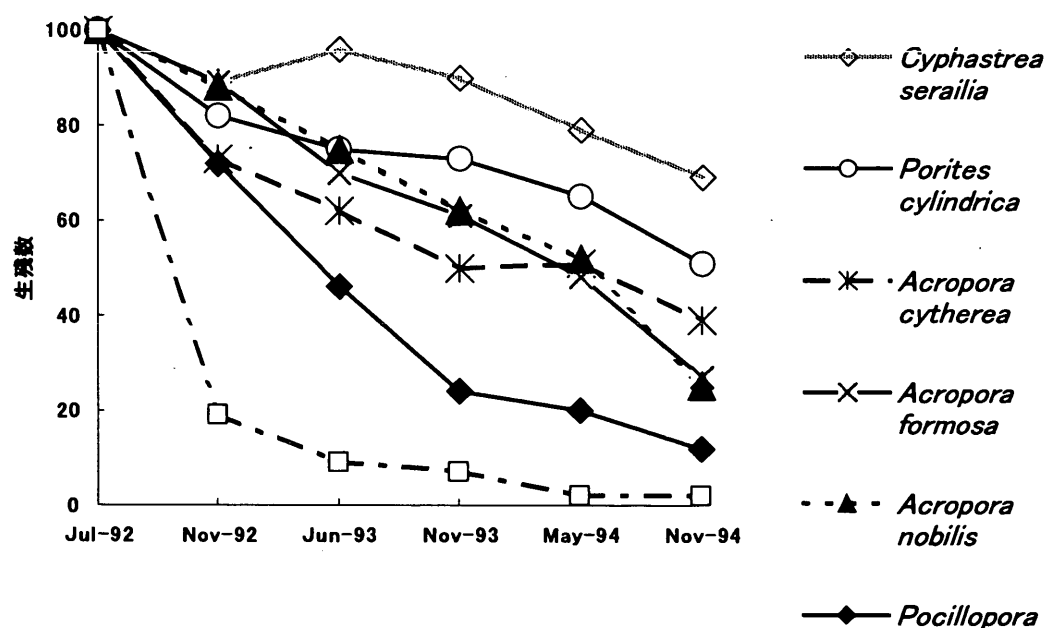


図 2-1. 黒島港北沖 St. 9 におけるサンゴ 7 種の断片移植後生残率の変化
(海中公園センター 1995 から改図)

移植に用いられた種は 8 科 66 種で、最も多く移植されたのはミドリイシ科ミドリイシ属の種である (表 2-1)。わが国では比較的波当たりの強い礁池などで普通に見られる *Acropora formosa* と、礁池や波当たりの弱い礁斜面の浅所など様々な場所で見られる *A. nobilis* などの枝状サンゴ移植例が多い。図 2-1 は海中公園センター (1995) が石西礁湖のほぼ同じ地点で

行った断片移植の結果を種類ごとに示したものである。

各地でいろいろな種について行われた移植についての報告をまとめると、*Acropora formosa* の断片を2回移植した結果、生残率は1回目の移植で43ヵ月後に69%、2回目の移植で17ヵ月後に100%であった（沖縄開発庁沖縄総合事務局 1997）。また、最も高い生残率を示したのは、波浪がほとんどなく潮流が強い場所で、最も低かったのは干潮時に外海から遮断されて濁りがある潮流の弱い場所であった（海中公園センター 1993, 1994, 1995）。一方、*A. nobilis* の生残率は1年半後に82%（海洋科学技術センター 1991）、水質良好で波浪がある潮流の速い浅海に移植したものは活性と成長が良好とある（海中公園センター 1993, 1994, 1995）。同じく枝状の *A. microphthalma* の場合は、生残率は17ヵ月後に100%であり、移植適性が高い（沖縄開発庁総合事務局 1997）と評価されている。ミドリイシ属サンゴでは、コリンボース状の *A. prominens* の生残率が1年後に51.8%（Auberson 1982）、*A. humilis* では2年後に79.9%（Clark and Edwards 1995）で、1、2、4群体づつほぼ同じ環境に移植された *A. tenuis* の場合は、2年後の生残率が100%、50%、25%と変動した（Clark and Edwards 1995）。テーブル状サンゴの、*A. hyacinthus* を用いた3つの異なった場所での実験の結果、生残率は1年半後に24%（海洋科学技術センター 1991）、2年後49%（Clark 1997）、17ヵ月後44%（Plucer-Rosario and Randall 1987）と一致しないが、比較的低かった。これに比べて同時に移植した *A. divaricata* の2年後の生残率は80.6%で、成長速度も大きかった（Clark and Edwards 1995）。*A. cytherea* の2年後の生残率は50%（Clark and Edwards 1995）で、潮通しの良い浅海に移植した場合の生残率と成長率は良いと判定されている（海中公園センター 1993, 1994, 1995）。

コモンサンゴ属では、港湾内に移植した *Montipora foliosa* と *M. stellata* の15ヵ月後の生残率はともに100%（沖縄開発庁沖縄総合事務局 1997）であった。また、*M. digitata* の1年後の生残率はリーフ内では80%以上であったが、波浪・潮流の強い場所では10%前後となった（海中公園センター 1995）。

ハナヤサイサンゴ科の *Pocillopora damicornis* は分布域が広く生息環境が多様であるためか、移植の結果は7ヵ月後（Harriott and Fisk 1988）と17ヵ月後（沖縄開発庁沖縄総合事務局 1997）ともに生残率100%であった。また、*Seriatopora hystrix* と *Stylophora pistillata* は荒廃したサンゴ礁にすぐ入り込む pioneer species だが、移植後の生残率は低いとみられている（Bouchon *et al.* 1981）。*S. hystrix* を港湾内に移植した結果、43ヵ月後に13%と低下しており（沖縄開発庁沖縄総合事務局 1997）、*S. pistillata* では、18ヵ月後の生残率は39%であった（海洋科学技術センター 1991）。

キクメイシ科のサンゴの場合、サンゴ岩に移植した *Echinopora lammellosa* の3ヵ月後の生残率は80%であった（Kaly 1995）。しかし、*Leptastrea purpurea* と *L. transversa* は、28ヵ月後に全て死亡した（Clark and Edwards 1995）。これまで生残率が極めて高かったのはハマサンゴ科ハマサンゴ属である。*Porites lichen* が2年後100%、*P. lobata* は2年後97.2%、*P. lutea* は28ヵ月後91.9%、*P. nigrescens* は比較的低いがそれでも2年後83.7%であった（Clark and Edwards 1995）。また、*P. cylindrica* を様々な場所に移植した結果で

は、潮通しの良い遮蔽水域への移植結果が優れていた（海中公園センター 1993, 1994, 1995）。別の実験では生残率は5ヵ月後75%であった（海洋科学技術センター 1991）。ピワガラシ科のアザミサンゴやヒラフキサンゴ科シコロサンゴ属も移植後の生残率は比較的高いようだ（海洋科学技術センター 1991 ; Plucer-Rosario and Randall 1987）。また、浅所に生息する *Pavona frondifera* の移植後の生残率は高いという（Clark and Edwards 1995; Plucer-Rosario and Randall 1987）。この種は無性生殖で増える割合が多く、白化にも強い（Yap *et al.* 1992）とされている。これと比較して、*Leptoseris gardineri* は、浅所から深所のどの実験場所でも生残率が低かった（Plucer-Rosario and Randall 1987）。

イシサンゴ目以外の造礁サンゴでは、八放サンゴ、アオサンゴ科の *Heliopora coerulea* が移植されており、1年後の生残率は100%（Auberson 1982）であった。また、ヒドロ虫綱ヒドロサンゴ目の *Millepora dichotoma* は移植後1年で生残率68%、*M. platyphylla* は1年後に58%であった（Auberson 1982）。

これまでの経験を最大限に活用し、十分に計画された方法に基づく実験と長期にわたる移植現場での観察により更なる知見を充実させ、適種、大きさ、時期、場所、固定方法、基盤等を組み合わせて適切な移植事業が展開されることが望まれる。

表 2-1. 分割群体の移植に用いられたサンゴ種リスト

学 名	和 名	出 典
Family Acroporidae		
<i>Acropora bruggemanni</i>	フトエダミドリイシ	Auberson (1982)
<i>cervicornis</i>		Becker and Mueller (1999)
<i>conferta</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>corymbosa</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>cytherea</i>	ハナバチミドリイシ	Clark and Edwards (1995); 海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>digitifera</i>	コユビミドリイシ	Clark and Edwards (1995)
<i>divaricata</i>	ヤッコミドリイシ	Clark and Edwards (1995)
<i>echinata</i>	トゲツツミドリイシ	Plucer-Rosario and Randall (1987)
<i>formosa</i>	スギノキミドリイシ	国営沖縄記念公園事務所 (1997, 1998, 1999); 沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997); 海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>gammifera</i>	オヤユビミドリイシ	Clark and Edwards (1995); Kaly (1995); 海洋科学技術センター (1991)
<i>humilis</i>	ツツユビミドリイシ	Clark and Edwards (1995)
<i>hyacinthus</i>	クシハダミドリイシ	足摺宇和海国立公園 (私信); Clark and Edwards (1995); 海洋科学技術センター (1991); 沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997); Yap et al. (1992)
<i>microphthalma</i>	コエダミドリイシ	沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997)
<i>nasuta</i>	ハナガサミドリイシ	沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997)
<i>nobilis</i>	トゲスギミドリイシ	海洋科学技術センター (1991); 国営沖縄記念公園事務所 (1999); 西平 (1994); 沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997)
<i>palmata</i>		Becker and Mueller (1999); Iliff (1999)
<i>prolifera</i>		Bowden-Kerby (1997)
<i>prominens</i>		Auberson (1982)
<i>prostrata</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>pulchra</i>	オトメミドリイシ	Yap and Gomez (1984)
<i>tenuis</i>	ウスエダミドリイシ	Clark and Edwards (1995)
<i>tumida</i>	エダミドリイシ	阿波竹が島海中公園 (私信)
<i>Montipora digitata</i>	エダコモンサンゴ	海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>foliosa</i>	ウスコモンサンゴ	沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997)
<i>prolifera</i>		Auberson (1982)
<i>pulcherrima</i>		Plucer-Rosario and Randall (1987)
<i>stellata</i>	トゲエダコモンサンゴ	Clark and Edwards (1995)
Family Agariciidae		
<i>Pavona cactus</i>	サオトメシコロサンゴ	Plucer-Rosario and Randall (1987); 海中公園センター (1993, 1994, 1995)

学 名	和 名	出 典
<i>frondifera</i>	コノハシコロサング	Clark and Edwards (1995); Yap et al. (1992)
<i>lata</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>Leptoseris gardineri</i>	エダセンベイサング	Plucer-Rosario and Randall (1987)
<i>Pachyseris rugosa</i>	シワリュウモンサング	Chen and Xiong (1995)
Family Faviidae		
<i>Cyphastrea serailia</i>	フカトゲキクメイシ	海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>Favia matthai</i>	アラキクメイシ	Chen and Xiong (1995); 海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>speciosa</i>	キクメイシ	Clark (1997)
<i>stelligera</i>	ホシキクメイシ	Kaly (1995)
<i>Goniastrea aspera</i>	バリカメノコキクメイシ	Chen and Xiong (1995); Clark (1997)
<i>reticulosa</i>		Clark and Edwards (1995)
<i>Leptastrea purpurea</i>	ルリサング	Clark and Edwards (1995)
<i>transversa</i>		Clark and Edwards (1995)
<i>Montastrea annularis</i>		Gil-Navia (1999)
<i>cavernosa</i>		Dodge et al. (1999)
<i>faveolata</i>		Becker and Mueller (1998)
<i>Pistogyra rustica</i>		Chen and Xiong (1995)
Family Mussidae		
<i>Symphylia agaricia</i>	ヒロクチダイノウサング	Chen and Xiong (1995)
Family Oculinidae		
<i>Gallaxea fascicularis</i>	アザミサング	Chen and Xiong (1995); 海洋科学技術センター (1991)
<i>lamarcki</i>		Chen and Xiong (1995)
Family Pocilloporidae		
<i>Madracis decactis</i>		Dodge et al. (1999)
<i>Pocillopora brevicornis</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>damicornis</i>	ハナヤサイサング	Chen and Xiong (1995); Clark and Edwards (1995); Harriott and Fisk (1988a); 沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997); Yap et al. (1992)
<i>danae</i>		Chen and Xiong (1995)
<i>eydouxii</i>	ヘラジカハナヤサイサング	海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>verrucosa</i>	イボハダハナヤサイサング	海洋科学技術センター (1991)
<i>Seriatopora hystrix</i>	トゲサング	沖縄開発庁沖縄総合事務局 (1997)
<i>Stylophora pistillata</i>	ショウガサング	海洋科学技術センター (1991); Kaly (1995)

学 名	和 名	出 典
Family Poritidae		
<i>Porites astreoides</i>		Dodge et al. (1999); Güll-Navia (1999)
<i>cylindrica</i>	ユビエダハマサンゴ	海洋科学技術センター (1991); 海中公園センター (1993, 1994, 1995)
<i>lichen</i>	ベニハマサンゴ	Clark and Edwards (1995)
<i>lobata</i>	フカアナハマサンゴ	Clark and Edwards (1995); Clark (1997)
<i>lutea</i>	コブハマサンゴ	Clark and Edwards (1995)
<i>nigrescens</i>	アミメハマサンゴ	Clark and Edwards (1995)
Family Helioporidae		
<i>Heliopora coerulea</i>	アオサンゴ	Auberson (1982)
Family Milleporidae		
<i>Millepora alcicornis</i>		Clark and Edwards (1995)
<i>dichotoma</i>		Auberson (1982)
<i>platyphylla</i>	イタアナサンゴモドキ	Auberson (1982)
<i>prominens</i>		Auberson (1982)

引用文献

- Auberson B (1982) Coral transplantation; an approach to the re-establishment of damaged reefs. *Kalikasan* 11: 158-172.
- Becker LC and Mueller E (1999) The culture, transplantation, and storage of *Montastraea faveolata*, *Acropora cervicornis*, and *A. palmata*: what we learned so far. *National Coral Reef Institute Abstract*: 53.
- Bouchon C, Jaubert J and Bouchon-Navano Y (1981) Evolution of a semi-artificial reef built by transplanting coral heads. *Tethys* 10: 173-176.
- Bowden-Kerby A (1997) Coral transplantation in sheltered habitats using unattached fragments and cultured colonies. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym. Panama*, 2: 2063-2068.
- Chen G. and Xiaog S (1995) A study on the transplantation of reef-building corals in Sanya waters, Hainan province. *Tropic Oceanology* 14: 51-57.
- Clark S and Edwards AJ (1995) Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldives Islands. *Coral Reefs*, 14: 201-213.
- Clark T (1997) Tissue regeneration rate of coral transplants in a wave exposed environment, Cape D'Aguilar, Hong Kong. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym. 2*: 2069-2074.
- Dodge RE, Anderegg D, Fergen R and Cooke P (1999) Sewer outfall coral transplantation project. *National Coral Reef Institute Abstract*: 80.
- Gil-Navia MF (1999) Transplantation of reef-building corals on the Rosario archipelago, Colombian Caribbean. *Natl. Coral Reef Inst. Abstract*: 91.
- Harriott VJ and Fisk DA (1988) Accelerated regeneration of hard corals: a manual for coral reef users and managers. *GBRMPA Tech. Memo* 16.
- Illiff JW, Goodwin WB, Hudson JH, Miller MW and Timber J (1999) Emergency stabilization of *Acopora palmate* with stainless steel wire and nails: impressions, lessons learned, and recommendations from Mona Island, Puerto Rico. *Natl. Coral Reef Inst. Abstract*: 110.
- 海中公園センター (1993) 平成 4 年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 42pp.
- 海中公園センター (1994) 平成 5 年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 86pp
- 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
- 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.
- Kaly UL (1995) Experimental test of the effect of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. *CRC Reef Research Centre Tech. Rep. (1)* 28pp.
- 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.
- Munoz-Chagin RF (1997) Coral transplantation program in the Paraiso coral reef, Cozmel Island, Mexico. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym. 2*: 2075-2078.
- 西平守孝 (1994) 群体破片の用いた造礁サンゴの移植について—竹串を用いる簡便な方法

ー. Biol. Mag. Okinawa 32: 49-56.

沖縄開発庁沖縄総合事務局 石垣港湾事務所 (1997) 石垣港サンゴ移植調査. 5pp.

大久保奈弥・大森 信 (2001) 世界の造礁サンゴの移植レビュー. Galaxea, JCRS 3: 31-40.

Plucer-Rosario GP and Randall RH (1987) Preservation of rare coral species by transplantation: an examination of their recruitment and growth. Bull. Mar. Sci. 41: 585-593.

van Treek P and Schuhmacher (1997) Initial survival of coral nubbins transplanted by a new transplantation technology: options for reef rehabilitation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 150: 287-292.

van Treek P and Schuhmacher (1999) Artificial reefs created by electrolysis and coral transplantation: An approach ensuring the compatibility of environmental protection and diving tourism. Est. Coast. Shelf Sci. 49:75-81.

Yap HT and Gomez ED (1984) Growth of *Acropora pulchra* II. Response of natural and transplanted colonies to temperature and day length. Mar. Biol. 81: 209-215.

Yap HT, Alino PM and Gomez ED (1992) Trends in growth and mortality of three coral species (Anthozoa: Scleractinia), including effects of transplantation. Mar. Ecol. Prog. Ser. 83: 91-101.

その他の役に立つ参考文献

Birkeland C, Randall RH and Grimm G (1979) Three methods of coral transplantation for the purpose of reestablishing a coral community in the thermal effluent area at the Tanguisson Power Plant. Univ. Guam Tech. Rep. 60pp.

Carlson, BA (1987) Aquarium systems for living corals. Int. Zool. Yb. 26: 1-9.

Edwards AJ and Clark S (1999) Coral transplantation: A useful management tool or misguided meddling. Mar. Poll. Bull. 37: 474-487.

Franklin H, Muhando CA and Lindahl U (1998) Coral culturing and temporal recruitment patterns in Zanzibar, Tanzania. Ambio 27: 645-650.

Heeger T, Cashman M and Sotto F (1999) Coral farming as alternative livelihood, for sustainable natural resource management and coral reef rehabilitation. Proc. Ocean. Intl. Pacific Rim, Singapore, 171-185.

Heeger T and Sotto F (2000) Coral Farming: A Tool for Reef Rehabilitation and Community Ecotourism. German Ministry of Environment, German Technical Cooperation and the Tropical Ecology Program (GTZ-TÖB), 94pp.

Highsmith RC (1982) Reproduction by fragmentation of corals. Mar. Ecol. Prog. Ser. 7: 207-226.

- Lindal U (1998) Low-tech rehabilitation of degraded coral reefs through transplantation of staghorn corals. *Ambio* 27: 645-650.
- Oren U and Benayahu Y (1997) Transplantation of juvenile corals: a new approach for enhancing colonization of artificial reefs. *Mar. Biol.* 127: 499-505.
- Rinkevich B. (1995) Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits. *Res. Ecol.* 3: 241-251.

(大森 信・大久保奈弥)

3. 有性生殖を利用したサンゴ礁修復

3-1. 種苗生産

南西諸島を含む西部太平洋のサンゴ礁では、ミドリイシ属の現存量が多く、また成長も速いため、サンゴ礁修復において重要な種類である。しかも、ミドリイシ属サンゴの多くの種類は一斉産卵を行うために大量の卵が生産され、その多くが初期減耗によって消滅する。そこで産卵直後からその翌日までの間に卵を採取し、種苗として育成することは、サンゴの増殖に有効であると考えられる。

(1) 野外での卵・胚の採集

a. 一斉産卵日の予想

南西諸島では5月から6月にかけて、ミドリイシ属を中心とした一斉産卵が見られる。八重山諸島周辺では5月（林原 私信）、慶良間列島周辺（Hayashibara et al. 1993）と沖縄本島（Heyward et al. 1987）では6月を主に、それぞれの月の満月前後に一斉産卵が起こる（図3-1）。しかし月齢と水温との関係から1ヶ月ずれることや、2回に分かれることもある。各地域における過去の産卵日の記録を参考にすると良い。満月からの日にちのずれも水温や海況の影響を受け、満月の2日前から7日後までの間を、産卵予想日として待機するのが良い。ひとつの島においても、場所によって産卵日が異なることもある。産卵日の予測は、枝を折って卵の成熟度を見る。産卵日が近づくと卵は色づく。産卵の2～3時間前には、バンドルがポリプの口に現れる。産卵時刻は日没時間によって若干ずれるが、ウスエダミドリイシ等が19時から19時30分、他の多数の種類が21時30分から22時をピークとする（Fukami et al. 2003）。これらの間の20時頃の時刻に産卵する種や、8月に産卵する種がいくつかあるが、種数・生息数ともに多くはない。

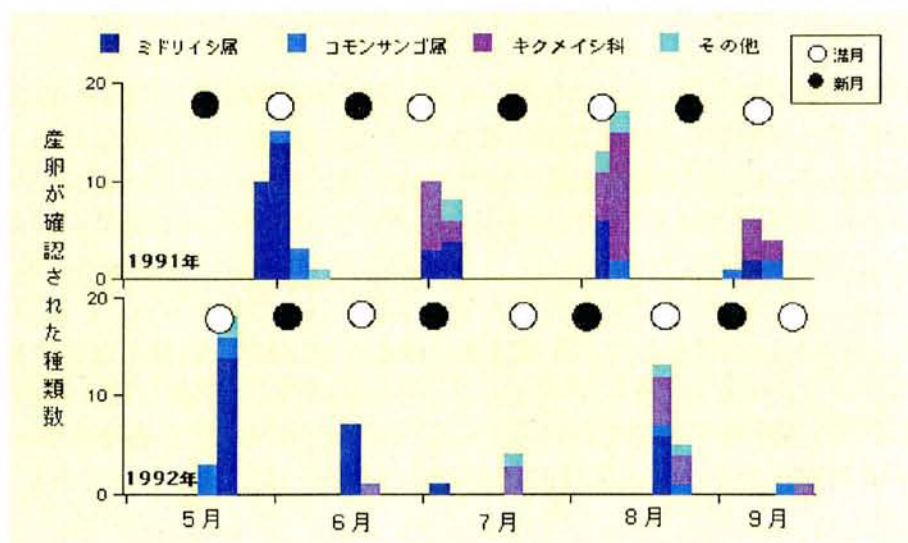


図3-1. 慶良間列島阿嘉島周辺でのサンゴの産卵パターン
(大潮・中潮・小潮の区切り毎の産卵したサンゴ種数を示す。)

b. 産卵直後の卵の採取

ミドリイシ属においては、各々の個虫からは卵と精子がひとつの塊（バンドルと呼ばれる）となったものが放出される。バンドルは卵の浮力によって海面へと浮上し、やがて卵と精子が解離し他群体から放出された配偶子と出会うと受精する。そこでサンゴ群体の上部に漏斗状の採卵装置（バンドル・コレクター）を設置することによって、容易にバンドルを採取することができる（北田 2002）。典型的なバンドル・コレクターの概略を図3-2に示す。

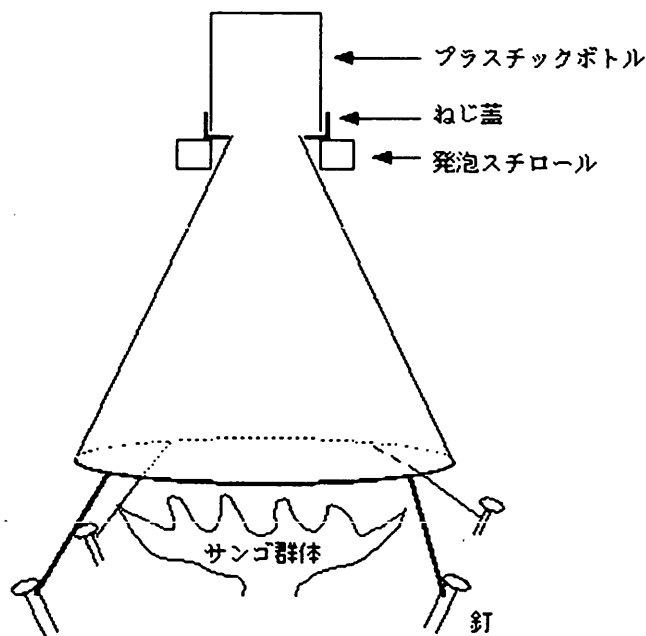


図 3-2. バンドル・コレクターの概略

目の細かいナイロンメッシュやビニールシートなどで円錐を作り、形状を保つためにステンレス針金などで支柱を張る。円錐上部にはねじ蓋付きのプラスチックボトル（500mlから1l前後の容量サイズ）と、ボトルを上部に保つために発泡スチロールなどの浮子を装着しておく。ボトルは内部が観察できるように透明な材質を選ぶ。ボトルの脱着が可能なように、蓋と漏斗部分を連結固定しておく。このような採卵装置を、産卵予想期間の毎日夕刻に、サンゴ群体の上部に、ヒモと釘を用いて設置する。産卵時刻には立ち会って、産卵が無ければ装置を撤収し、翌日再び設置することを産卵まで繰り返す。装置を設置したまま放置すると、サンゴ群体にダメージを与える恐れがあるうえ、海況悪化による装置逸失の可能性が高くなる。産卵があれば、産卵終了後速やかにボトルをはずし、蓋をはめて施設に持ち帰る。ボトルの中に卵が長時間にわたって高密度のままに置かれると酸欠等によって死亡する恐れがある。

採取したバンドルはバケツ等の容器に移す。1種類のサンゴにつき3群体以上から採取したバンドルを混合して受精させる。ミドリイシは基本的には自家受精は起こらないうえ、2群体からの配偶子の受精では個体の組み合わせによっては受精率が低い場合がある。また形態からは判別が困難な隠蔽種からバンドル採取してしまう可能性もあるので、群体数は多くしたほうが無難である。

媒精時の配偶子の密度は白濁が目でわかる程度の精子濃度 (10^7 / ml 前後) で、浮いた卵が容器内の水面を一面に覆う程度を目安とする。媒精作業は産卵後 4 時間以内に終わるのが望ましい。時々混ぜながら 1~2 時間置く。その後、大型の飼育水槽に、卵をすくって移す。精子の混入は水質悪化につながるので注意する。

コリンボース形状のウスエダミドリイシの場合、直径 30cm 前後の群体であれば 3 群体から約 100 万個の卵が採取できる (下村ほか 2002)。

c. 一斉産卵翌朝の卵・胚の採取

地域の地形や海流などの環境や海況にもよるが、一斉産卵の翌朝には帯状に海面を漂流するサンゴの受精卵の密な集団 (スリックと呼ばれる) が形成されることが多い。裾礁が中心の南西諸島ではサンゴ礁が陸地に近いために、スリックが海岸に打ち上げられることが多い。満潮時に漂着するので、これより早い時刻に、スリックが打ち上げられる前に採取することが必要となる。この時間帯におけるミドリイシサンゴの発生段階は桑実胚で、波浪によって岸壁に打ち付けられるだけでも割球が簡単に解離して死滅してしまうので、採取地点の選定も重要である。港湾の中にスリックが漂着しやすい場所もある。この場合は 10 時頃までスリックが温存される (図 3-3)。



図3-3. 港湾内に漂着したスリック

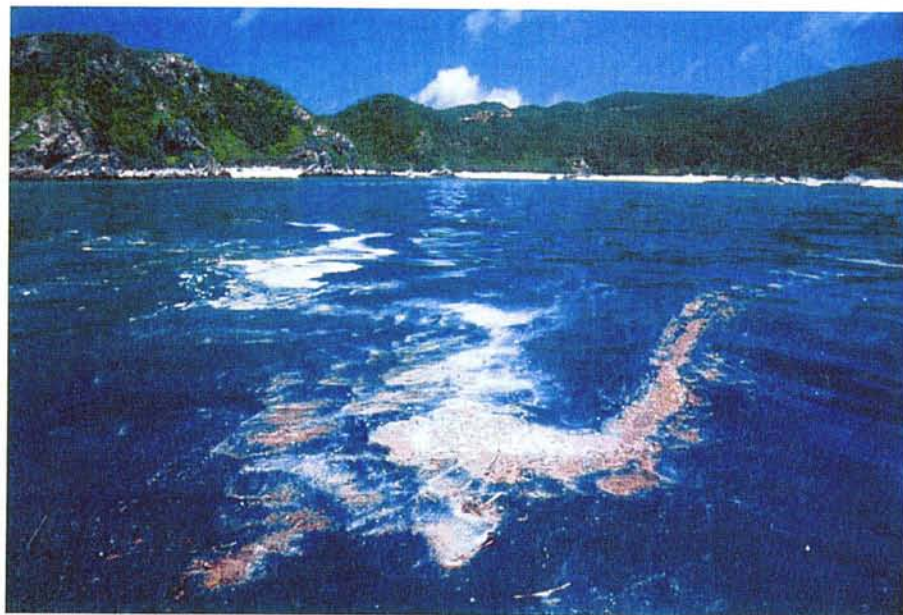


図3-4. 沖合のスリック

ボートで海上を探索してスリックを発見できることもある（図3-4）。陸地から遠い場所に形成されたスリックのほうが、陸地由来の混入物が少ないため、飼育には適している。調査地点とは別のビーチにおける一斉産卵に由来するスリックの漂着や、一斉産卵の翌々朝にスリックが接岸することもまれにあるので、調査地点の産卵翌朝以外にもスリックの探索を行う価値はある。しかしながら海況によってはスリックを発見できない年もあることを覚悟しなければならない。

スリックの採取にあたっては、柄杓ですくい、バケツに移して搬入する。一斉産卵の大部分はミドリイシ属であるためにスリックに含まれる胚・幼生もほとんどがミドリイシ属であるが、コモンサンゴ属が混じることもある。コモンサンゴ属の幼生はミドリイシ属の幼生に比べて小さく、褐虫藻を含むことで識別できる。飼育前に実体顕微鏡で胚の状態を確認する必要がある。割球の解離や未受精卵が多く見られるようであれば飼育の成功は望めない。混入物が多い場合には面倒でもピペットで出来る限り胚を選び分けて飼育に供するのが良い。

（2） 産卵誘発

小規模な実験研究の目的であれば、室内で産卵させることも、さらには産卵を人為的に誘発することも可能である。サンゴの人為的産卵誘発はほとんど成功例がないが、唯一過酸化水素を用いて、ミドリイシ属とコモンサンゴ属のいくつかのサンゴでは可能である。その方法は以下の通りである(Hayashibara et al. 1996; 西海区水産研究所石垣支所資源増殖研究室 1999)。

海中より採集してきたサンゴ群体を水槽に収容した後、コリンボース状ミドリイシ属では過酸化水素を 2mM で 3 時間、または 5mM で 2 時間添加し、その後清浄な流水中で維持し産卵を待つ（図 3-5）。誘発による産卵時刻は、自然の光条件の下では、野外での自然産卵と同様に処理日の午後 8 時から 11 時の間に起こる。ただし、誘発処理から産卵時刻までには少なくとも 9 時間が必要であり（より高い確率で産卵を起こすには 16 時間が必要）、9 時間

が経過しない間に産卵予定時刻を迎えた場合には産卵せず、翌日の同時刻に産卵は延期される。

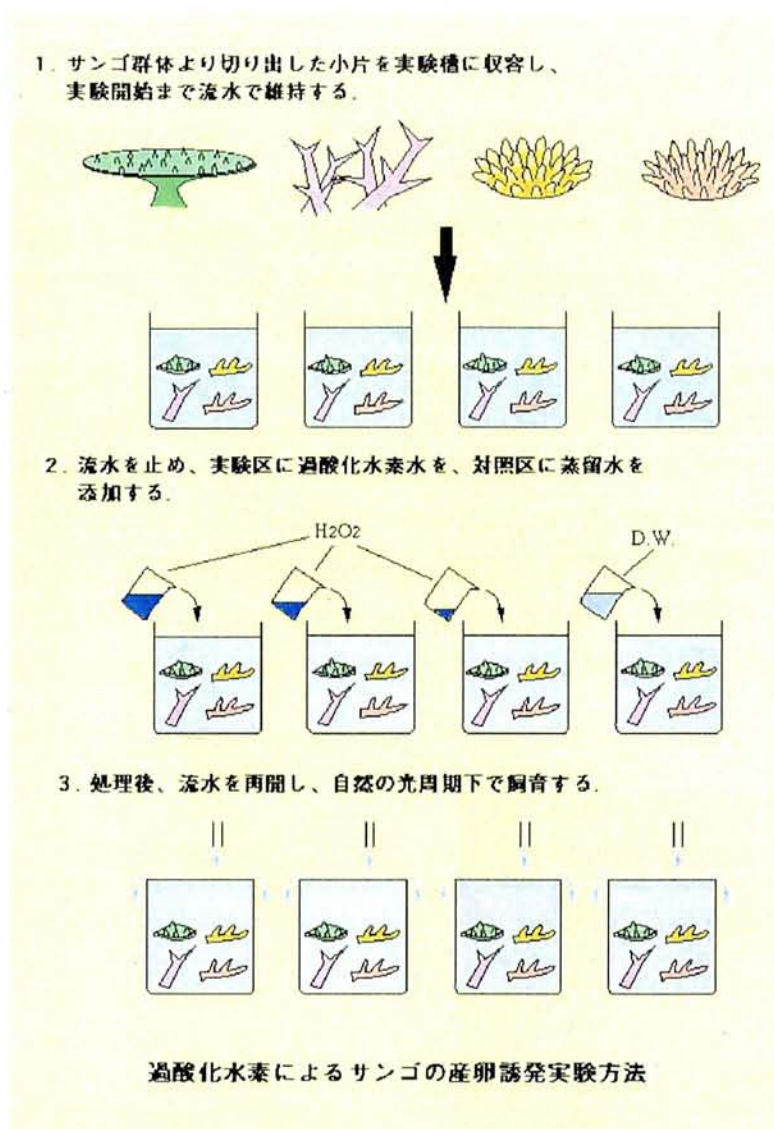


図 3-5. 過酸化水素によるサンゴ産卵誘発方法
(西海区水産研究所石垣支所資源増殖研究室 1999 より)

上記の産卵誘発手法に加えて光条件を操作することによって、産卵時刻を変更させることも可能であり、誘発処理から9時間以上経過した後に、暗箱で囲うなどして暗くすれば、それから2—3.5時間後に産卵させることができる(岩尾 2000)。

このように一連の操作によって、望んだ日時に産卵を誘発することが可能であるが、この産卵誘発手法では、過酸化水素での処理中に粘液の分泌や褐虫藻の放出など、サンゴ群体に大きなダメージが生じ、その結果死亡することもある。群体の状態や種によって過酸化水素によるダメージは異なるので、処理中の群体の様子を観察し、濃度や時間を加減した方がよい。また、出来る限り速やかに過酸化水素をすすいで清浄な流水中に入れた方が、死亡は少

なくてすむ。群体のもっている卵が未成熟な場合には、産卵は起こらない。ただし、成熟群体から得られた配偶子は、受精して正常な発生過程を経てプラナラ幼生になり、ポリプへと変態することが確認されている (Hayashibara et al. 2003)。

(3) 幼生飼育

幼生は、小規模な実験研究の目的であればボウルを用いて飼育することが可能で、1日1回以上の頻度で、ピペットを用いて幼生を新しいボウルに移すことで状態の良い幼生を維持することができる。幼生の飼育密度は海水1リットルあたり2000個体以下が望ましい。変態可能なまでに成熟するのに要する期間は、水温26℃で産卵後6日、27℃で5日が目安となる。一般に幼生は、3週間ほどは着生能力を維持することができる。幼生の成熟度は、幼生をスライドグラス上でつぶして刺胞の数を計測することによって知ることができる (Hayashibara et al. 2000)。10万個体を越える大規模飼育においては、幼生を移す作業は不可能であり、換水をせずに幼生を維持することになるため、低密度でないと飼育できない。大型水槽に分散させて飼育する(下村ほか 2000)。バンドル採取によって得られた幼生は容易に飼育でき、海水1tあたり50万個体の飼育が可能であった(図3-6)。スリックから得られた幼生は混入物や未受精卵等の死滅によって水質悪化が生じやすく、より低密度での飼育が必要となる。受精後2日間は胚が水面に浮遊するため、換水が可能である。屋外では日射による水温上昇が問題となる。水温は30℃未満に保つ必要がある。できれば27℃以下が望ましい。

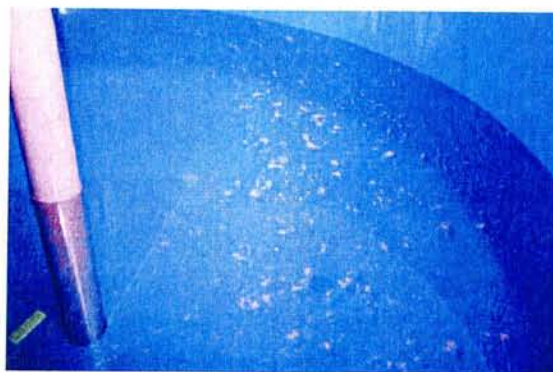


図3-6. 室内で大量飼育中の幼生

飼育の密度と総数の計測は、飼育海水を0.1リットル程度採水してその中に含まれる幼生の

数を数えて割り出せばよいが、正確な値を得るのは実際にはかなり難しい。発生初期の幼生の分布は表面に偏るほか、水面の照度や戸外では風にも影響されるためである。また、幼生に物理的衝撃を与えないために飼育海水の攪拌混合は避ける方がよい。どんな方法を用いても、採水は、少なくとも3-5回行って検定し、信頼できる値を求める必要がある。

(4) 幼生の大量生産

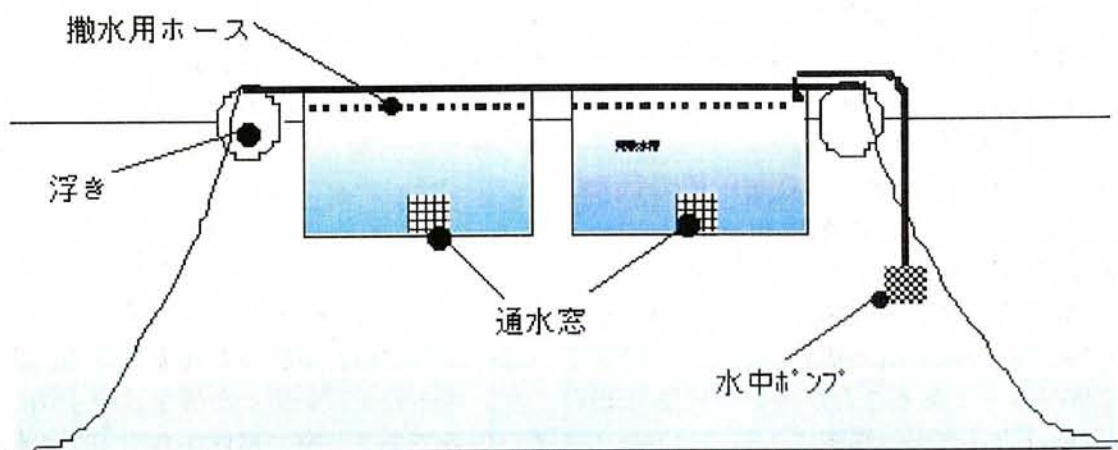
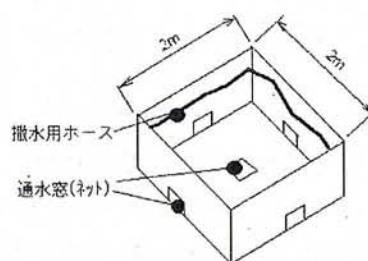


図 3-7. 生け簀を用いた幼生の大量生産

海上に生け簀を浮かべ、大量の幼生を生産することが可能である(青田ほか 2002)。小割生け簀用筏に養鰻用のビニール製シートを張ったものを幼生飼育用の水槽として用いる。シート上部には所々に穴を開けたホースをめぐらせ、筏付近の海中から水中ポンプで取水して、幼生が付着しないように側面に向かって海水を撒水する。また、四方の側面と底面にネット製の通水窓を設け、ホースからの撒水により海水交換が行われるようにする。通水窓が珪藻類などの付着で目詰まりする場合にはダイバーによる掃除が必要だが、青田ほか(2003)は図 3-7 に示した 2 m 角生け簀(深さ 1.0 m)を 8 つ用いて、200 万個体以上の幼生を生産することに成功している。1 リットル当たり 200-400 個体の幼生が生産可能である。

(5) 幼生の運搬

小規模であれば、1リットルポリビン等を容器として、一般的な宅配便や小包によって遠隔地に送ることも可能である。阿嘉島臨海研究所では、50mlチューブを用いて幼生を生かしたままドイツやオランダの水族館に送ることに成功している(Petersen and Tollrian 2001)。もっと大量の幼生を運搬する場合は、短距離であれば蓋付きバケツを用いる。密度は飼育と同程度で問題は無い。運搬時間が長くなる場合には密度を低く調整し、運搬時における振動のストレスを低減するため、容器いっぱいまで海水を満たして密閉する。容器には蓋付きバケツや口の小さなコンテナやポリタンク等を用いるが、水中でダイバーが幼生を放流する場合は、押すと中の海水が出てくるような軟らかいポリエチレン製のコンテナが適している。運搬の時期は、幼生が着生能力を持ちはじめ、各種のストレスに対して抵抗性力をもつ、受精から4日目以降がよい。

(6) 着生・変態の誘導

造礁サンゴ類の着生・変態機構は、いまだ未解明の部分が多いが、Morse and Morse (1991)により、カリブ海産サンゴ *Agaricia humilis* 幼生の着生・変態が、紅藻サンゴモの一種 *Hydrolithon boergesenii* 由来の抽出物により誘導されることが明らかにされた。その研究を発展させて、Morse et al. (1994) によって、サンゴモの着生誘引分画から“flypaper”と呼ばれる着生誘導基質が作製されているが、それを作るには多くの労力がかかる。より簡便にサンゴモで着生を誘導するには、藻体自体を使用するか、チップ（サンゴモチップ）を作製して添加すればよい。チップは、サンゴモ藻体の表面部分をナイフ等で削り取り、リファンピシン水溶液（2mg/l）の入ったビーカーに浸して洗浄した後、濾紙などでチップの水分を取り除き、冷凍保存することによって1年以上の保存が可能である。濾過海水中に、幼生とともにチップを添加すれば、6～72時間で着生が生じる。チップ上に着生するときもあるが、チップのそばの底面や角を作っている部分に着生することが多い。コブイシモ *Hydrolithon reinboldii* のチップによって、日本産のミドリイシ属幼生も着生が誘導できることが確認されている（Morse et al. 1996）。また、サンゴモ類ではないが、紅藻類イワノカワ科に属する *Peyssonnelia* sp. でも同等あるいはそれ以上の着生誘導が可能である。着生率は90%以下であることが多い（岩尾 1997）。サンゴモチップを使った着生誘導手法は比較的簡便な方法だが、場所によっては藻体の入手が困難であり、堅い藻体からチップの削り出すのに労力が必要である。

神経ペプチド Hym-248 を用いれば、より高く安定した着生誘導率が得られる(Iwao et al. 2002; Hatta and Iwao 2003)。Hym-248 は、淡水ヒドラ *Hydra magnipapillata*（刺胞動物門ヒドロ虫綱）から単離されたものだが、人為的な合成が可能であり、必要量を作製することができる。幼生の入った濾過海水中に 1×10^{-6} M の濃度で添加すると、体軸方向に収縮したり、反口端を基盤や容器壁にこすりつけたりするなど、幼生は速やかに反応し始め、ペプチド添加から12時間以内に着生は終了する（図3・8）。これまでのところ、Hym-248 は、ミドリイシ属幼生にしか効果が見られていないが、着生率は、ほぼ100%である。ただし、その効果は、幼生の日齢によって変化し、若すぎる幼生（4日齢以下）の場合には、着生率は低い。しかし、それより日齢が進み、着生率が100%に達したものでは、2週間以上にわたって、その効果を維持することが確認されている（岩尾 2001）。

また、近年、サンゴモからミドリイシ属サンゴ幼生の着生を誘導するバクテリアが単離された(Negri et al. 2001)。その着生率は 52%程度であるが、培養したバクテリアを用いた着生誘導方法が確立できれば、この方法でも容易に稚サンゴを生産することができるようになるだろう。

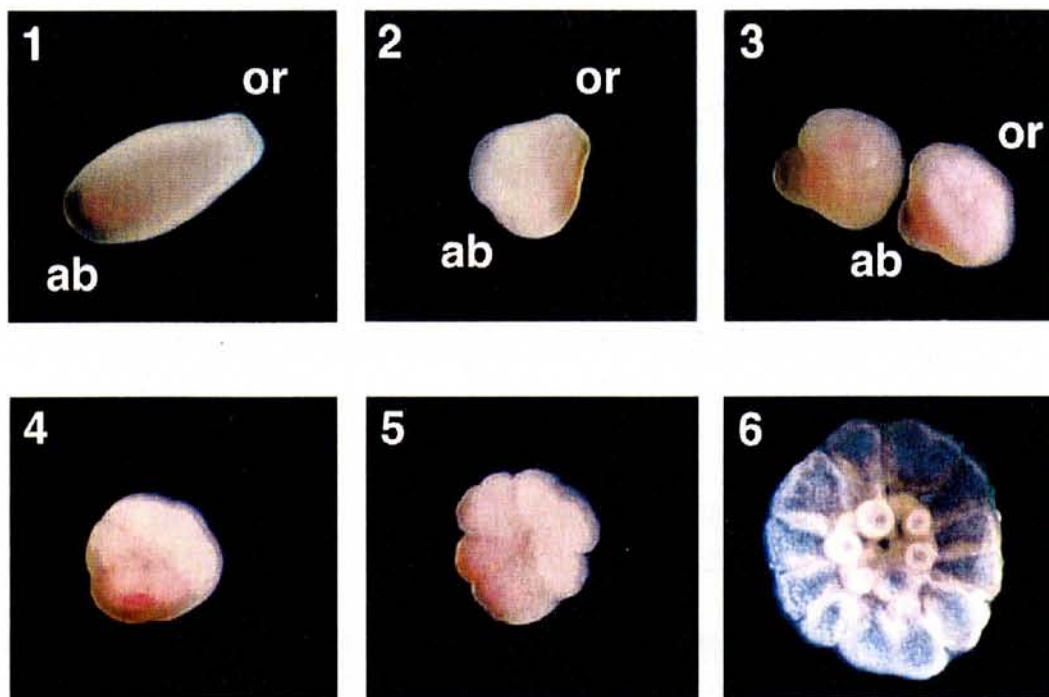


図 3-8. 神経ペプチドによって誘導された着生変態過程

プラヌラ幼生 (1) は、神経ペプチドの添加された海水中を満した容器壁上で体軸方向に収縮し始める (2)。このステージでは、付着力が弱く、時に容器壁からはずれて回転しながら遊泳することもある (3)。着生した幼生は、体軸方向に更に扁平になり (4; 上面から見た像)、隔膜が形成され (5)、さらに触手と隔壁が形成されポリプへと変態していく (6)。なお、図中、or は口側、ab は反口側を示す。

(7) 着生基盤

これまで着生基盤として、コンクリート、素焼きタイル、貝殻、陶石タイル、陶器、スレート板などが用いられてきた (これら以外にも多くの研究者によって、様々な素材が用いられている)。何れの素材も前処理なしに使用するよりも、あらかじめ海中に放置して表面に他の生物を付着させてから使用した方が、より多くの着生が生じる。基盤に付着した生物には、褐藻などの大型海藻類や芝生状の海藻、珪藻、群体ボヤなどサンゴ幼生の着生を妨たり、止水水槽内で着生させている間に腐敗し、着生やその後の変態中に悪影響を及ぼす恐れのあるものがあるので、使用直前にブラシでこすり、粗くクリーニングしてから用いる。着生能力を持つ幼生であれば、早ければ 1 日で、遅くとも 5 日程度で着生する (図 3-9)。

基盤をあらかじめ海に沈めておく期間は 1 年以上の方が成績が良いという報告があるが、もっと短い期間でも幼生は着生する (谷口 2002)。

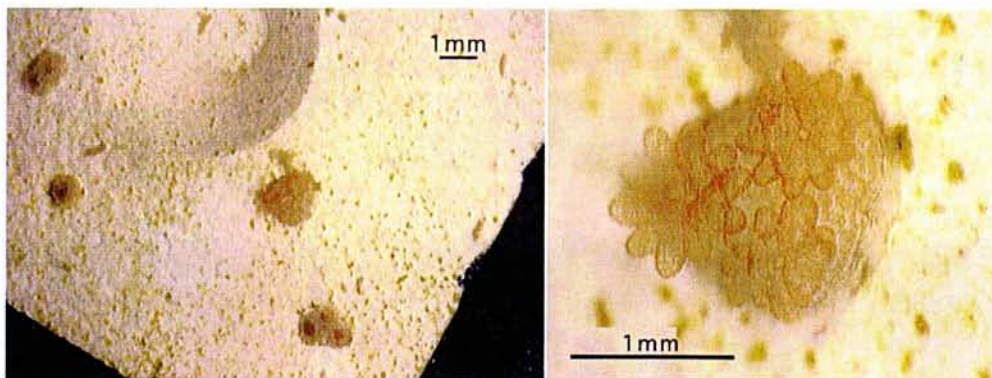


図 3-9. 基盤に着生した稚サンゴとその拡大写真(右)

角の内側やくぼみにより多くの幼生が着生するため、溝などの立体的な構造をもつ基盤がよいと考えられるが、その最適な形状に関しては、まだ明確な答えが出ていない。基盤上面にも多くの幼生が着生するが、野外ではやがて堆積物が増加し、藻類が繁殖しやすくなる。

(8) 着生基盤への幼生の導入方法

海底にテント（水通しのよい内張りのみを使う）を張って、内部に着生基盤を入れ、その中に幼生を導入して稚サンゴを得ることができる。この方法では、室内で着生させる時に注意すべき水温の管理や水の蒸散を気にしなくてすみ、大規模に稚サンゴを生産することができる。

さらに大規模な稚サンゴ生産の取り組みも行われている。株式会社テトラと阿嘉島臨海研究所の共同研究では、那覇港内の海中にシートで囲った縦 5.5×横 5.5×高さ 6.0m の囲場を作り、阿嘉島から船で運んだサンゴ幼生 164 万個体をダイバーがその中に放流して、囲場の海底に設置したブロック上へ稚サンゴを着生させた。

採集したスリックを海上に浮かべた生け簀に収容して飼育した後、生け簀を目的地に移動させ、通水窓を閉じてポンプで注水して生け簀の水位を上げ、水压によって幼生を下部から伸ばしたチューブを通して海底に設置したテントの中に導入し、シート上に並べた着生基盤上に誘導するという方法（Heyward et al. 2002）もある（図 3-10）。

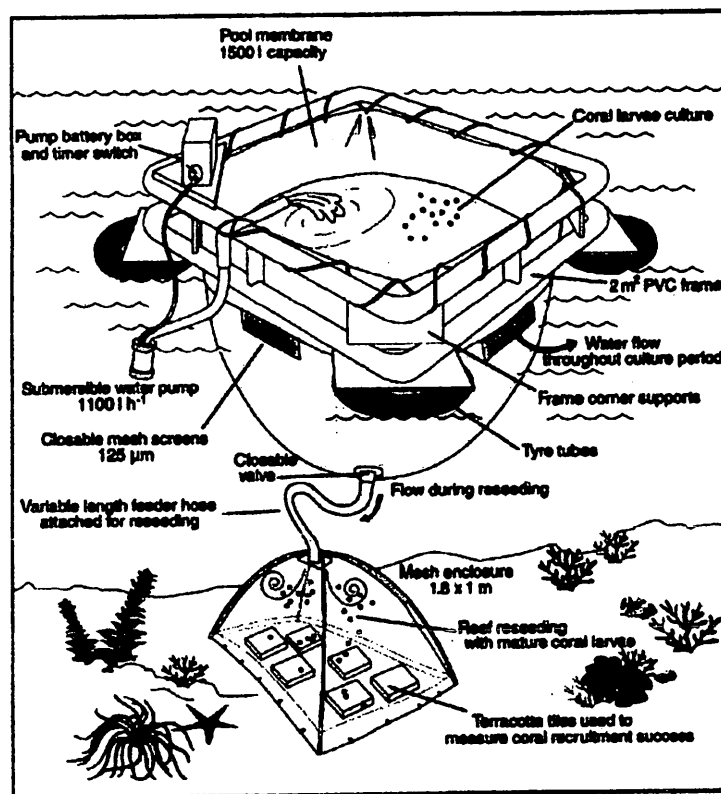


図 3-10. 生け簀から海底のテントへ幼生を導入する方法の例
(Heyward et al. 2002 より)

(9) 着生後の稚サンゴ育成

基盤に着生したポリプを親群体とともに流水水槽に収容したり、サンゴ礁上に置いておくと、1週間以内に褐虫藻が体内へ移入する。褐虫藻と共生しないポリプは、やがて死亡してしまうので、まずは、共生を開始させることが重要である。着生直後のポリプは、ヨコエビ類などによって捕食されたり、ウニ類や巻貝類によって削られたり、海藻や群体ボヤ、コケムシ類などにより覆われたりして死亡しやすい。また、堆積物に覆われて死亡することもある。そうした死亡要因を取り除いた環境で育成することが望ましいが、現時点では方法は確立されていない。初期ポリプを大きな群体まで飼育した例はいくつかある（御前 1998, 2002）が、大量育成に成功したという報告はまだない。ポリプの着生した基盤を野外に設置する場合には、上向きの面のポリプのほとんどは、堆積物で埋もれて死亡してしまうため、下向きないし横向きに設置するべきである。設置の労力を少なくし、横向きに設置するためには、穴を開けた複数の基盤をステンレス棒などで串刺し状に取り付け、海底に設置するのが良い。その時、魚類によるポリプの捕食やポリプを削り取るウニ類や巻貝類などの侵入を防ぐために、長さ 5～10mm のスペーサーを基盤と基盤との間に入れておき、ポリプの成長に伴って、スペーサーの間隔を広げるとよい。

図 3-11 は阿嘉島臨海研究所からオランダのロッテルダム水族館に送られた *Acropora florida* のプラヌラ幼生が着生し、成長したものである。



図 3-11. ロッテルダム水族館の *Acropora florida*
(阿嘉島臨海研究所より送られた幼生が成長したもの)

引用文献

- 青田 徹・綿貫 啓・大森 信・谷口洋基 (2002) プラヌラ幼生の大量運搬によるサンゴ回復技術. 海洋開発論文集. 19: (投稿中)
- Fukami H, Omori M, Shimoike K, Hayashibara H and Hatta M (2003) Ecological and genetic aspects concerned with reproductive isolation by differential timing of spawning in *Acropora* corals. Mar. Biol. 142: 679-684.
- Hatta M and Iwao K (2003) Metamorphosis induction and its possible application to coral seedlings production. Rec. Adv. Mar. Biol. Tech. (印刷中)
- Hayashibara T, Iwao K and Omori M (1996) Spawning induction for *Acropora* spp. Abstr. 8th Intl. Coral Reef Symp. 86.
- Hayashibara T, Iwao K and Omori M (2003) Induction and control of spawning in Okinawan staghorn corals. Coral Reefs. (投稿中)
- Hayashibara T, Kimura T and Hatta M (2000) Changes of cnida composition during planula development of a reef-building coral *Acropora nasuta*. Galaxea, JCRS 2:39-42.
- Hayashibara T, Shimoike K, Kimura T, Hosaka S and Heyward A, Harrison P, Kudo K, Omori M (1993) Patterns of coral spawning at Akajima Island, Okinawa, Japan. Mar. Ecol. Prog. Ser. 101: 253-262.
- Heyward AJ, Smith LD, Rees M and Field SN (2002) Enhancement of coral recruitment by *in situ* mass culture of coral larvae. Mar. Ecol. Prog. Ser. 230: 113-118.
- Heyward AJ, Yamazato K, Yeemin T and Minei M (1987) Sexual reproduction of corals in Okinawa. Galaxea 6: 331-343.

- 岩尾研二 (1997) サンゴ幼生の変態促進物質. みどりいし 8: 20-22.
- 岩尾研二 (2000) 造礁サンゴ産卵時刻のコントロール. みどりいし 11: 24-25.
- 岩尾研二 (2001) 造礁サンゴ幼生の着生・変態誘引の 3 手法. 日本サンゴ礁学会第 4 回大会講演要旨集. 52.
- Iwao K, Fujisawa T and Hatta T (2002) A cnidarian neuropeptide of the GLWamide family induces metamorphosis of reef-building corals in the genus *Acropora*. Coral Reefs 21: 127-129.
- 北田英之 (2002) 阿嘉島周辺に生息するウスエダミドリイシの群体あたり産卵数. みどりいし 13: 26-29.
- 御前 洋 (1998) 稚サンゴの成長 (4). マリンパビリオン 27: 65.
- 御前 洋 (2002) 稚サンゴの成長 (6). マリンパビリオン 31: 42-43.
- Morse ANC, Iwao K, Baba M, Shimoike K, Hayashibara T and Omori M (1996) An ancient chemosensory mechanism brings new life to coral reefs. Biol. Bull. 191: 149-154.
- Morse DE and Morse ANC (1991) Enzymatic characterization of the morphogen recognized by *Agaricia humilis* (scleractinian coral) larvae. Biol. Bull. 181: 104-122.
- Morse DE, Morse ANC, Raimondi PT and Hooker N (1994) Morphogen-based chemical flypaper for *Agaricia humilis* coral larvae. Biol. Bull. 186: 172-181.
- Negri AP, Webster NS, Hill RT and Heyward AJ (2001) Metamorphosis of broadcast spawning corals in response to bacteria isolated from crustose algae. Mar.Ecol. Prog. Ser. 223: 121-131.
- Petersen D and Tollrian R (2001) Methods to enhance sexual recruitment for restoration of damaged reefs. Bull. Mar. Sci. 69: 989-1000.
- 谷口洋基 (2002) 造礁サンゴの種苗生産に関する研究: 中間育成のための条件検討. 日本サンゴ礁学会第 5 回大会講演要旨集. 19.
- 西海区水産研究所石垣支所資源増殖研究室 (1999) 過酸化水素による造礁サンゴの産卵誘発. 西海区水産研究所主要研究成果集 1: 8-9.
- 下村優子・服田昌之・綿貫 啓・青田 徹・岩尾研二 (2002) ミドリイシ幼生の大量飼育: サンゴ種苗生産に向けて. 日本サンゴ礁学会第 5 回大会講演要旨集. 36.

(服田昌之・岩尾研二・谷口洋基・大森 信)

3-2. 基質加工による幼生着生誘導

防波堤などの海洋構造物表面に1~3cm程度の大きさの凹凸等を加工し、サンゴ幼生が着生しやすくする方法である。幼生が構造物に接近する際に構造物基質表面が複雑であれば、ミクロスケールの流れの乱れで発生する渦により、幼生が基質表面に滞留する可能性が高まり、着生しやすくなると考えられる。また、着生後も表面形状の凹凸がウニなどの捕食者からの捕食の危険性を低下させることが予想される。海洋構造物はコンクリート製であることが多いため、製作時にその表面に加工を施すことは容易である。防波堤の例では堤前方の消波ブロックや堤後方の根固めブロックが加工の対象となる（図3-12）。ブロックの加工方法としては次のような方法が考えられている（港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所 1999）。

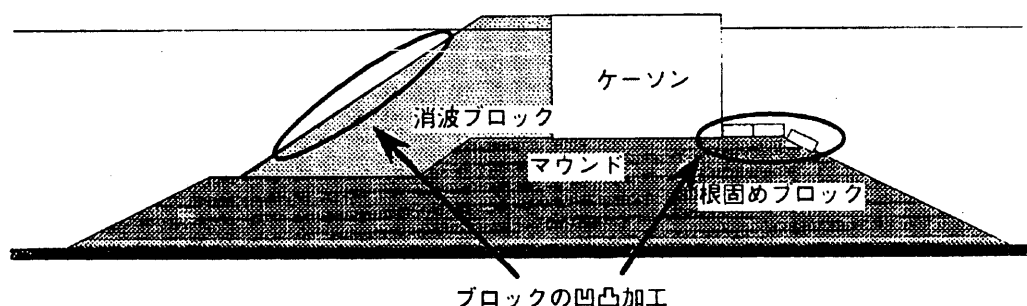


図3-12. 基質加工の対象部

（港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所 1999）

- a) スペーシングの省略：ブロック表面を円滑にするスペーシングの工程を省略することにより、ブロック表面の凹凸を残す。
- b) 打設口の表面加工：ブロック型枠にコンクリートを流し込む口に角材等を用いて凹凸を形成する。
- c) 型枠内側の加工：ブロック型枠の内側に木やゴム板等を取り付けて、ブロック表面に凹凸を形成する。
- d) 二次製品の貼り付け：接着剤やボルトを用いてプレート等の二次製品をブロック表面に貼り付け、凹凸を形成する。
- e) コンクリートの吹き付け：ブロック表面にコンクリートを吹きつけることにより、凹凸を形成する。

このうち、打設口の表面加工を用いたサンゴ着生状況及び経年変化調査結果（港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所 1999）によれば、粗度の大きな角材加工で顕著にサンゴの群体数が多い傾向が得られている（図3-13）。なお、基質の傾斜角度については、

2m深付近で垂直面よりは水平面、45度面の方が被度、群体数とも多い傾向が得られ、水深10m付近では傾斜による差異は認められていない。

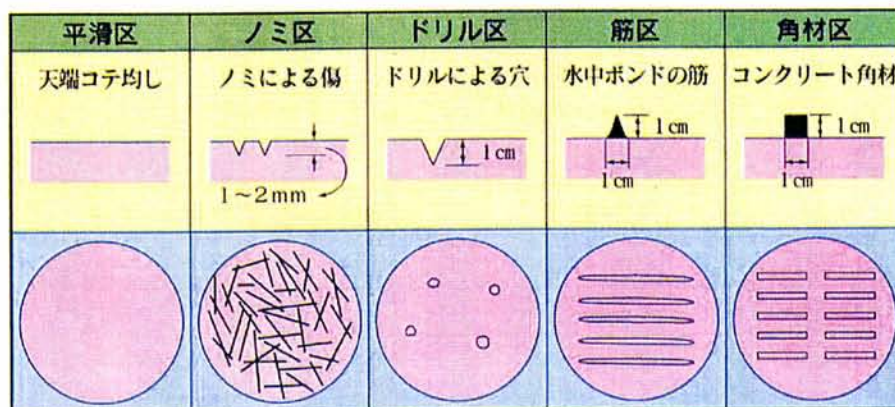
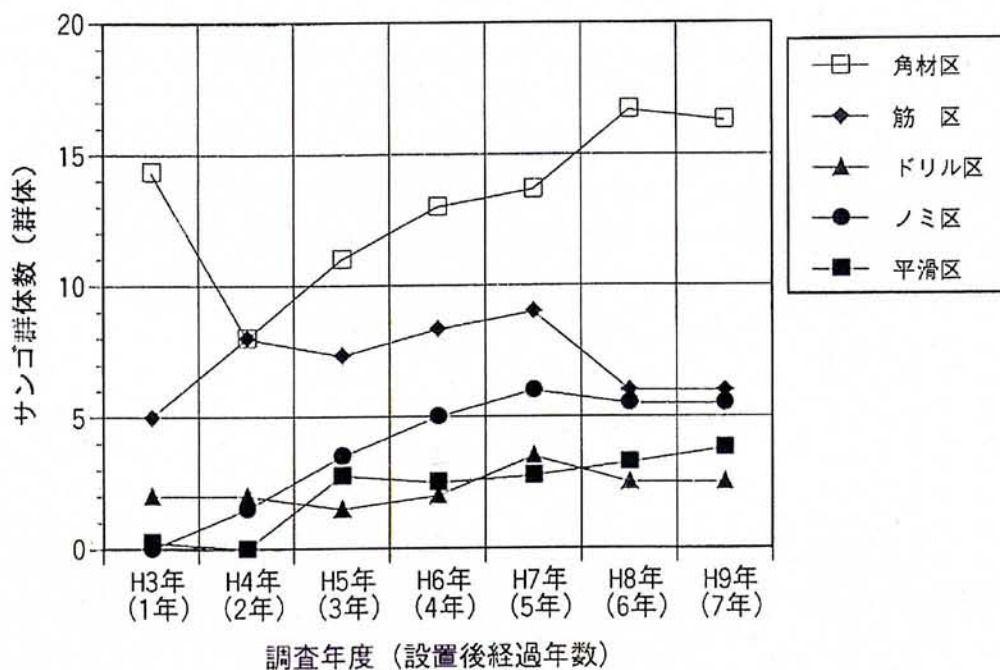


図 3-13. 基質加工部のサンゴ着生状況および経年変化
(港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所 1999)

基質加工を行う対象域としては、サンゴが生息可能な環境を有している海域である。サンゴ分布域であれば、河口等を除けば多少なりとも生息は可能と思われるが、極端に堆積物が多いと予想されるような場所は幼生の着生が期待できず、また着生しても堆積物に覆われ死滅する可能性がある。赤土懸濁物下及び堆積物下におけるウスエダミドリイシ *Acropora tenuis* とアオサンゴ *Heliopora coerulea* の幼生着生実験では、両種とも両環境下で着生率が減少し、粘液分泌が観察されている (波利井ら 2002)。

山本ら (2002) は那覇港において、人工構造物上のサンゴ被度と生息環境について調査

し、成長に不適な地区と成長が可能な地区とに区分した。その結果、サンゴの成長に適した環境条件として表 3-1 のような数値を示している。

表 3-1. 那覇港でのサンゴ群集の成長に適した環境条件 (山本ら 2002)

環境項目	平均値±sd
堤前波高(m)	8.4±3.4
塩分	34.7±0.1
透明度(m)	13.7±3.5
SS(mg/l)	1.2±0.5
COD (mg/l)	0.8±0.1
TN (mg/l)	0.15±0.04
TP (mg/l)	0.012±0.005

また、サンゴ移植についてまとめた Heeger & Sotto (2000) は移植の適地環境について特に対象種を示さず表 3-2 のような条件を示している。

表 3-2. 移植の適地環境 (Heeger & Sotto 2000)

環境項目	適性値	備 考
水温	22℃以上 (25℃以上が望ましい) 30℃以下	
塩分	32～36	河川の影響がないこと
透明度	12m以上	
潮流	1m/s 以下	
水深	6～12m	浅所は漂砂の影響を受けやすい
底質	砂、海草群落でサンゴ群集が点在するところ	

サンゴ卵・幼生の浮遊期間は 5 日間程度であるが、表層付近を浮遊するため、吹送流の影響を強く受ける。浮遊卵・幼生の挙動は風況に強く影響されるため、その時の気象条件により変動する。そのため、ある場所におけるサンゴの加入状況は年により偏りがあるのが普通である (海中公園センター 1995)。しかし、マクロなスケールで考えれば、地形と恒流により中規模の渦や反流が起こり、幼生滞留の潜在的可能性の高い場所が存在すると思われる。このような場所であれば、加入の頻度は高いと考えられる。

対象水深は対象地付近のサンゴ生息水深が参考となるが、低潮線付近から透明度の良好な場所であれば、水深 30m 付近までは生息可能域である(図 3-14)。

加工した構造物を海中に投入する時期は当然サンゴ産卵期前でなければならないが、その時期は場所により、年により異なる。サンゴ礁地域では水温が高めに推移する年では 5 月から産卵が始まり、本土海域では例年 7-8 月である。投入はコンクリートが海水になじむ時間を考慮する必要があるが、海藻が付着して基質を覆うと幼生の着生が阻害される恐れがあるので注意する。但し、無節サンゴモ類はサンゴ幼生を誘引する効果があるとされているので、これに覆われることはかまわないであろう。海中に 3 週間、6 ヶ月間、1 年間沈めておいた各人工基盤(素焼きタイル)に対するクシハダミドリイシ *Acropora hyacinthus* とウスエダミドリイシ *Acropora tenuis* 幼生の着生数実験では、海中沈水時間が長いほど幼生の着生数は多く、基盤を覆ったサンゴモ上に幼生が着生したことが報告されている(谷口 2002)。サンゴモ以外の海藻類やホヤ、カイメン、コケムシ類などの場を競合する付着動物が覆っている場合は取り除く必要がある。



図 3-14. 消波ブロック上のハナヤサイサンゴ(石垣港)

引用文献

- Heeger T & F Sotto (2000) Coral Farming: A Tool for Reef Rehabilitation and Community Ecotourism, 9pp.
- 波利井佐紀・灘岡和夫・岩尾研二・林原 毅(2002) サンゴ幼生の定着に及ぼす赤土の影響. 日本サンゴ礁学会第 5 回大会講演要旨集. 17.
- 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.

港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所（1999）サンゴ礁と共生する港湾整備マニュアル案、99+27pp.

谷口洋基（2002）造礁サンゴの種苗生産に関する研究：中間育成のための条件検討.

日本サンゴ礁学会第5回大会講演要旨集. 19.

山本秀一・高橋由浩・住田公資・林 輝幸・杉浦則夫・前川孝昭（2002）人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析. 海岸工学論文集 49：1186-1190.

（藤原秀一）

4. 無性生殖を利用したサンゴ礁修復

4-1. 分割群体の移植

(1) 移植断片の採集

一番大切なのは、断片を採取するドナー群体への影響を最小限にするため、一つの群体から一度に多量の断片を採集してはならないということである。採取の影響についての生理学的知見はほとんど無いが、十分に産卵可能なサイズの群体から移植断片を採取した場合には、群体組織の8割程度が残れば確実に生残する。また、翌年の産卵にも大きな問題はない（大久保 未発表）。

ドナー群体から移植断片を採取する際、枝状サンゴの場合はニッパーや水中バサミを使ってそっと折り取り、テーブル状・コリンボース状・塊状等その他の形状にはハンマーと鑿を使って強い力でなるべく一度に割り取れば、ドナー群体や移植片を無駄に傷つけることがない。

(2) 移植断片の大きさ

一般的には、移植断片のサイズが大きければ生残率は高いと考えられている。しかし、必要以上の大きさをとるとドナー群体の方に影響がでるため、今後の移植実験では断片の生残率が100%となる必要最低限のサイズを探ることが一番重要なポイントであろう。そのためには後の項目に述べる移植時期等の環境条件も関わってくるので、6節-2の事例を参照されたい。

これまでは、長さや直径が2~30cm程度の断片や群体（群体まるごと、即ちドナー全体）が移植されている。固着性の塊状群体である *Montastrea faveolata* の直径2.5から5.1cmの断片を移植した結果、9ヵ月後の生残率が75%であったことから、Becker and Muller (1999) はおそらく直径2.5cm未満の群体でも移植は可能だろうと考察している。

(3) 運搬

運搬方法には研究者間であまり違いが見られない（大久保・大森 2001a）。移植場所が近い場合には、断片を水中から出さずにダイバーが容器に入れて運び（Dodge et al. 1999）、遠ければ船に吊り下げた金網やメッシュバックの中に入れて運ぶ（Dodge et al. 1999; Munoz-Chagin 1997）。

ボートに海水を入れたバケツを用意して、そこに入れて運ぶこともある（Bowden-Kerby 1997）が、気温が高い時期には運搬中にバケツの中の海水が温まらないよう注意しなければならない。

移植断片を空気中にだして運搬できるかどうかは種によって異なる。*Acropora gemmifera* や *Favia stelligera* の断片は2時間程度であれば水から上げて運搬できるが、*Stylophora pistillata* や *Rumphella* sp. は水浸したまま運ぶ必要がある（Kaly 1995）。基本的には水から出さないで運搬するのが好ましい。

(4) 固定方法

断片を移植する際に重要なのは、

- 1) 断片の支持材（釘等）を基盤にしっかりと固定させることと、
- 2) 断片を固定する方向、である

である。

予め基盤に打ち込んだ釘に断片を添え、ケーブルタイで固定した場合（図 4-1-e）、断片の成長様式により基盤に固着しにくい種では、移植後の年数が経つにつれて釘が基盤から抜け落ちる可能性が高まる。ケーブルタイが切れて釘が外れることはないので、基盤と釘をエポキシ系の水中セメントでより頑丈に固定すればほぼ確実に損失は防げる。水中セメントが移植断片に与える化学的影響は正確に測定されていないので、水中セメントが確実に固まってから断片を移植する方が良い。水中セメントを使用する場合には、基盤についている藻類等をワイヤブラシなどで取り除く必要がある。また、断片を固定する方向は垂直が良い（大久保・大森 2000; 大久保ほか 2001b, 大久保ほか 2002）。これは堆積物の影響等による。

参考までに、これまで用いられた固定方法の幾つかについて説明する（図 4-1）。

1) 断片の基盤への固定はエポキシ系の水中セメントによるものが多い。まず基盤についている藻類等をワイヤブラシなどで取り除き、断片を基盤に縦もしくは横にして水中セメントで接着する。中には、水中セメントではなく通常の産業用セメントが使われたものもあった。また、それだけでは移植したサンゴが基盤から外れ易いため、様々な方法を組み合わせて補完されている。

（図 4-1-a）

2) 基底のサンゴ岩に掘った穴に小さな植木鉢を入れ、その中にサンゴ断片を差し込み、あらかじめ陸上で真水と混ぜておいたセメントを流し込んで固める（Auberson 1982）。（図 1-b）

3) 小さなポリエチレン袋にセメントと凝固遅延剤を入れ、コンクリートマットでできた枠の中にその袋を入れる。そして袋の上から断片をあるいは群体を差し込んで固定する。10cm 以上の群体には支柱としてコンクリート釘を基部に打ち込んで固定する（Clark and Edwards 1995）。

（図 4-1-c）

4) ナイロン袋にセメントと凝固遅延剤を入れて、断片を差し込み、袋の端には海中でその袋を固定するためのフックを付け、セメントが固まるまで水槽内に置く。セメントが固まったらフックをロープで岩盤に固定する（Clark 1997）。（図 4-1-d）

5) 移植基盤に釘を打ち、針金あるいはケーブルタイでサンゴ断片を固定する（Iliff *et al.* 1999; 大久保・大森 2000; 大久保ほか 2001b; 大久保ほか 2002）。（図 4-1-e）

6) 串刺し法：サンゴ断片中央辺りにドリルで穴を開けて竹串を刺す。移植基盤にも水中ドリルで穴を開けて、その穴に破片に刺した竹串を差し込む（西平 1994）。（図 4-1-f）

また、堆積物の影響等により、断片を固定する方向は垂直が良い（大久保・大森 2000; 大久保ほか 2001b; 大久保ほか 2002）。

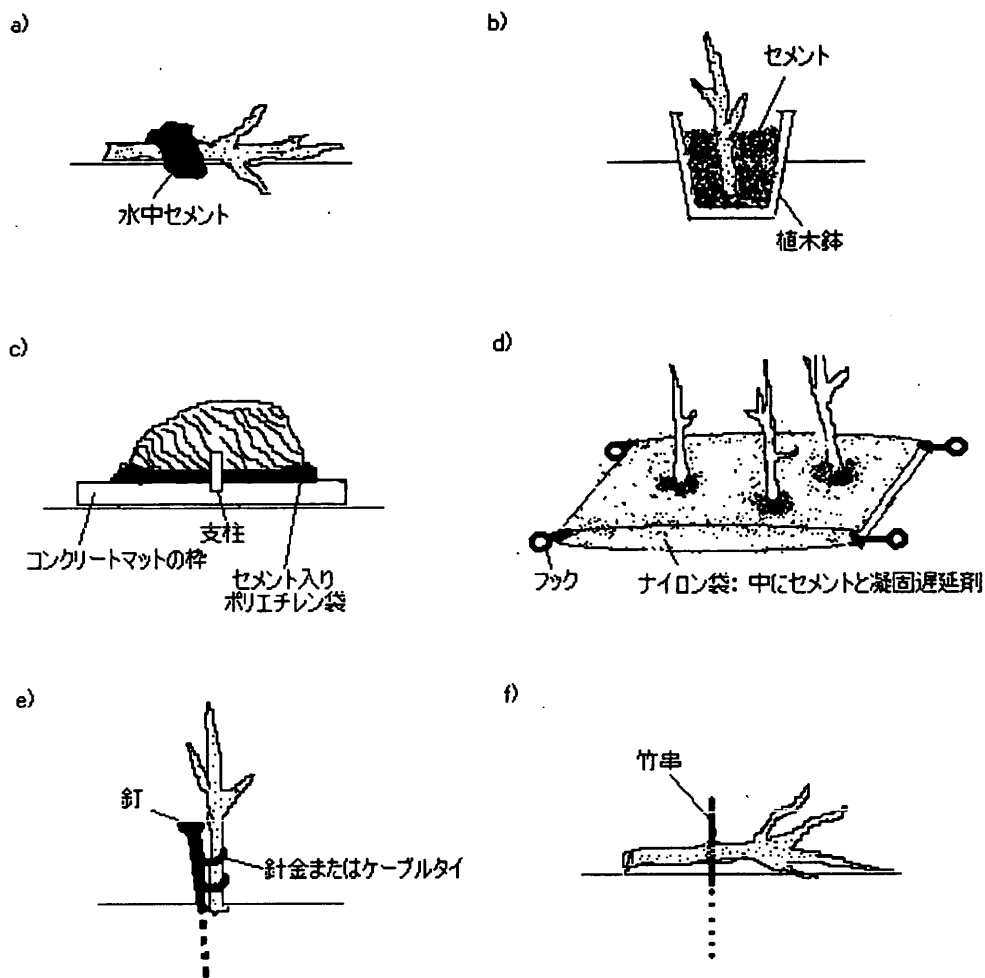


図 4-1. 移植断片の固定方法 (大久保・大森 2001a)

(5) 移植の適地

サンゴは種によって生育条件が異なるため、断片を採取したドナー群体が生息する場所と断片を移植する場所の物理的特性（波浪、潮流、濁度、水深、光量、堆積物量、塩分等）を移植前に調査する必要がある。その二つの場所の環境特性が類似していれば移植の成功率は高まるが、異なった環境に移植した場合の生残率はおもわしくない (Auberson 1982; 海中公園センター 1993, 1994, 1995)。

移植する場所にオニヒトデやレイシガイダマシなどのサンゴを捕食する生物が見られるかどうか調べる必要がある。高知県足摺宇和海国立公園の海中公園地区では移植場所にレイシガイダマシが大量発生したことから、過去 3 回の移植とも 1 年後の生残率は 0%であった(足摺宇和海国立公園 私信)。

移植することによってその場所に経済的価値が生まれることは好ましいが、観光客の立ち

入る場所では、人間のもたらす物理的影響によって新たな生息環境の攪乱が起こりうることも考慮しなければならない (Harriott and Fisk 1988)。

ミドリイシ科の3形状、*Acropora intermedia* (枝状)、*A. millepora* (コリンボース状) と *A. hyacinthus* (テーブル状) から採取した断片を、礁原と礁嶺と礁斜面に固定せずに置いた実験がある (Smith and Hughes 1999)。生残率は、17ヶ月後に礁原で37%、礁嶺で15%、礁斜面で10%であり、基盤への固着率は、礁原で39%、礁嶺で31%、礁斜面で4%であった。その理由として、礁原に置かれた断片は礁嶺と比べて周辺のテーブル状サンゴに光を遮られる事が少ないので成長速度が高く、また、礁原は底質が固いサンゴ岩なので断片が固着しやすく、礁斜面のように堆積物に埋もれて死亡する断片が少ないことが挙げられている。

(6) 移植に適した基盤

採取した断片を海中構築物等に移植する必要がある場合、サンゴが固着しやすい基盤とはどのようなものかが理解されていると大変役立つ。移植に適した基盤に関しては、フェライトコンクリートと素焼きのタイル、海中構築物によく利用されているコンクリートブロックと鉄、自然のサンゴ岩の5種類を用いて比較した実験がある (大久保 2003)。その結果、移植断片の固着率が高かったのはコンクリートとフェライトコンクリートであった。池田・岩尾 (2001) は、産業副産物である石炭灰をコンクリートに混ぜて移植基盤とし、*A. formosa* の10cm断片を本実験と同じ方法で移植した。その結果、固着率は通常のコンクリートに移植した断片とほとんど変わらなかった。両方の結果を合わせると、コンクリートを用いた基盤には、なんらかの理由で他の材料よりサンゴ断片が固着しやすいのではないかと考えられる。

(7) 移植時期

移植はほとんどが月平均の気温が24℃から28℃の暖かい時期に行われている。しかし、これまでの移植では場所や種や固定方法等が異なるために、どの時期が移植に最も適しているのかは十分に比較検討できない。筆者らは同じ材料と方法で移植時期のみを変えた実験を行ったので、6節-2を参照されたい。

種は異なるが、月平均気温が26.6~28.3℃の暖かい時期に水温の変化が比較的大きい亜熱帯域で、ほぼ同じ断片サイズと固定方法で行われた4つの実験では、移植3ヶ月後の生残率が *Dichocoenia stoksii*、*Montastrea cavernosa*、*Porites astreoides* など13種全体で98.5% (Dodge *et al.* 1999)、43ヶ月後の生残率は *Acropora formosa* で69% (沖縄開発庁沖縄総合事務局 1997) であった。移植何ヶ月後かは不明だが *A. echinata* では46% (Plucer-Rosario and Randall 1987) と結果はばらばらである。

また、移植後の生残率と温度及び日長光周期の関係を調べた結果、生残率は温度に逆相関し、日長光周期に相関する傾向が見られている (Yap and Gomez 1984; Yap *et al.* 1992)。移植のストレスに加え、高水温期には白化も起こりやすいので死亡率が高くなる (Yap and

Gomez 1984) との考えもある。

引用文献

- Auberson B (1982) Coral transplantation: an approach to the re-establishment of damaged reefs. *Kalikasan* 11: 158-172.
- Becker LC and Mueller E (1999) The culture, transplantation, and storage of *Montastraea faveolata*, *Acropora cervicornis*, and *A. palmata*: what we learned so far. *Natl. Coral Reef Inst. Abstract*: 53.
- Bowden-Kerby A (1997) Coral transplantation in sheltered habitats using unattached fragments and cultured colonies. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym.* 2: 2063-2068.
- Clark S and Edwards AJ (1995) Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldives Islands. *Coral Reefs* 14: 201-213.
- Clark T (1997) Tissue regeneration rate of coral transplants in a wave exposed environment, Cape D'Aguilar, Hong Kong. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym.* 2: 2069-2074.
- Dodge RE, Anderegg D, Fergen R, Cooke P (1999) Sewer outfall coral transplantation project. *Natl. Coral Reef Inst. Abstract*: 80.
- Harriott VJ and Fisk DA (1988b) Coral transplantation as a reef management option. *Proc. 6th Intl. Coral Reef Symp.* 2: 375-379.
- 池田 穰・岩尾研二 (2001) 石炭灰硬化体へのサンゴの移植. 日本サンゴ礁学会第 4 回大会講演要旨集: 38.
- Iliff JW, Goodwin WB, Hudson JH, Miller MW and Timber J (1999) Emergency stabilization of *Acropora palmata* with stainless steel wire and nails: impressions, lessons learned, and recommendations from Mona Island, Puerto Rico. *Natl. Coral Reef Inst. Abstract*: 110.
- 海中公園センター (1993) 平成 4 年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 42pp.
- 海中公園センター (1994) 平成 5 年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 86pp.
- 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.
- Kaly UL (1995) Experimental test of the effect of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. *CRC Reef Research Centre Tech Rep* (1) 28pp.
- Munoz-Chagin RF (1997) Coral transplantation program in the Paraiso coral reef, Cozmel Island, Mexico. *Proc. 8th Intl. Coral Reef Sym.* 2: 2075-2078.
- 西平守孝 (1994) 群体破片を用いた造礁サンゴの移植について - 竹串を用いる簡便な方法 - . 沖縄生物学会誌 32: 49-56.
- 大久保奈弥・大森 信 (2000) *Acropora muricata (formosa)* の最適移植方法. 日本サンゴ

礁学会第3回大会講演要旨集. 18.

大久保奈弥・大森 信 (2001a) 世界の造礁サンゴの移植レビュー. *Galaxea, JCRS*, 3: 31-40.

大久保奈弥・大森 信・本川達雄 (2001b) スギノキミドリイシ *Acropora muricata (formosa)* の最適移植方法. 日本サンゴ礁学会第4回大会講演要旨集. 5.

大久保奈弥・谷口洋基・大森 信・本川達雄 (2002) 形状の異なる *Acropora* 3種の最適移植方法. 日本サンゴ礁学会第5回大会講演要旨集. 20.

大久保奈弥 (2003) サンゴの移植に適する基盤. *みどりいし* 14: 32-34.

沖縄開発庁沖縄総合事務局 石垣港湾事務所 (1997) 石垣港サンゴ移植調査. 5pp.

Plucer-Rosario GP and Randall RH (1987) Preservation of rare coral species by transplantation: an examination of their recruitment and growth. *Bull. Mar. Sci.* 41: 585-593.

Smith LD and Hughes TP (1999) An experimental assessment of survival, re-attachment and fecundity of coral fragments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 235: 147-164.

Yap HT and Gomez ED (1984) Growth of *Acropora pulchra* II. Responses of natural and transplanted colonies to temperature and day length. *Mar. Biol.* 81: 209-215.

Yap HT, Alino PM and Gomez ED (1992) Trends in growth and mortality of three coral species (Anthozoa: Scleractinia), including effects of transplantation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 83: 91-101.

(大久保 奈弥)

4-2. 稚サンゴを採取して移植に利用する試み

石西礁湖でのサンゴの調査を続けるうちに、単位面積あたりの稚サンゴの分布密度（着生して1-2年目のサンゴ幼体）が場所によって大きく異なることに気付いた。このこと自体は一般的に知られた現象である。問題は、例えばテーブル状や枝状となるミドリイシ類の幼体が波の荒いリーフの浅所に多数着生し、その環境下では成熟サイズまで成長することが困難と考えられ場合である。このような稚サンゴは成長につれて波浪の影響で壊されやすくなり、成熟サイズに達することは望めない。この稚サンゴを採取して生育に適した海域に移植することを考えた。

(1) 稚サンゴとその採取法

サンゴの幼生はサンゴ礁の表面にできた裂け目や窪みの中に着生する。死んでからあまり年月を経ずに表面が他の生物でおおわれていないサンゴにも多数が着生する。幼生がこのように凹凸の多い場所に着生するのは、着生した後の生残を高めるための行動と考えられる。着生した幼生は概ね1年を経過すると溝から外に向かって成長し、1 cm 程度の大きさとなって、十分に視認できるようになる。こうした稚サンゴは波の荒いリーフの浅所に多数見られることが多く、密度は1 m²あたり数十個またはそれ以上に達することも珍しくはない。この稚サンゴを基質ごと採取することで、移植用種苗とすることができる。

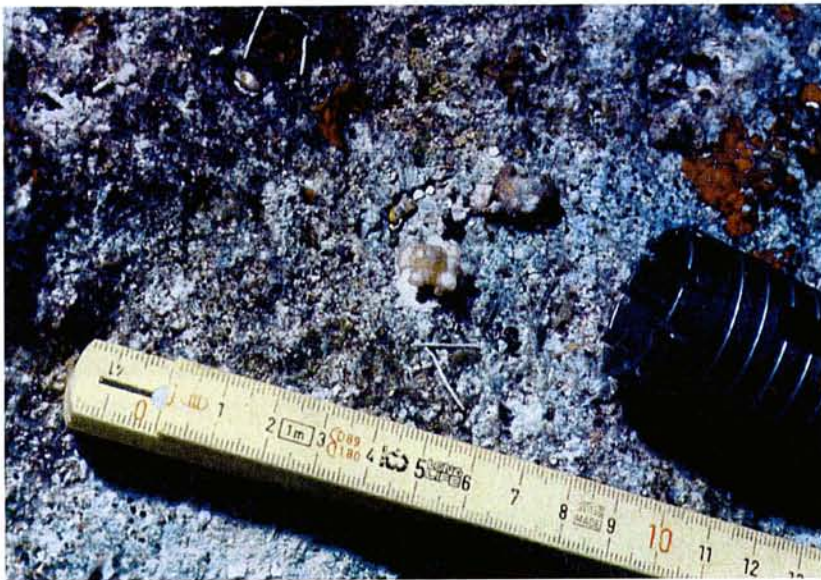


図 4-2. 自然の稚サンゴとコアドリル

そこで陸上用のエアードリルを使って、移植用の稚サンゴ採取を試みた。稚サンゴは、その大きさに対して十分な余裕をもった口径のコアドリルを用いることで、比較的容易に採取できる。稚サンゴだけを削り取るのではなく、基質のサンゴ礁を移植に利用しやすい3-4 cm の長さまで掘り下げ、短いコア状に採取する（図 4-2, 4-3）。



図 4-3. 採取した稚サンゴ



図 4-4. 採取した稚サンゴの移植（接着剤で固定）

（２） 移植方法

基質とともに採取した稚サンゴは移植適地まで運んで移植作業を行う。採取から移植までの間に中間育成などで長期海中保管を行う場合には、基質の部分をビニールテープなどで被うことにより、付着生物がコア状の基部表面に着くことを予防する。

移植先では、稚サンゴを採取したのと同じ口径のコアドリルで固定用の孔を掘る。孔の中に少量の水中接着剤を入れ、その上から接着剤を潰しながら稚サンゴを差し込むことで固定が完了する。移植先がシルトなどの堆積しやすい環境である場合、固定用の孔を浅く掘り、稚サンゴを海底面から少し突出させて固定することが望ましい（図 4-4）。

(3) 本手法の評価

従来の移植法においてはサンゴのコロニーの一部または全体を移植に用いてきた。この方式では、サンゴを如何にしっかりと基質に固定するかが、移植の成否を決定する最大の懸案事項であった。移植するサンゴの形状が様々であることが工事を困難にしている根本原因であり、効率的な移植のためには形状の異なるサンゴを固定するための共通的な手法の開発が必要であった。固定作業の確実性に個人差があること、作業中にサンゴを如何に丁寧に行うかといった統一化が困難な要因によって移植後の生残が異なることは良く知られている。

自然に産した稚サンゴを基質とともに採取する方法では、基質部が滑らかなコア状に統一されている。従って海中や船上での運搬に際しては、容器の中に多数のコアを立てた状態で収納しても稚サンゴを傷つける恐れは少ない。また移植先では、基質に孔を空けて接着剤で固定するという単純かつ確実な方法を採用することが可能となった。この方式であれば事業規模の移植工事を行う場合でも、固定作業を同一基準で行うことに何ら不安はない。

以上のように、自然着生して育った稚サンゴを採取して移植に用いることは技術的には可能である。しかしサンゴが白化やオニヒトデの影響で大きな被害を受けている現在、サンゴの再生産の要である稚サンゴを多数採取するには十分な規制のもとに行う必要がある。稚サンゴが多数着いている場所であっても生育適所でない場合があるのは事実である。しかしそうした場所で稚サンゴを採取する行為は、専門家が的確に判断したうえで実行する必要がある。

結論として、稚サンゴを採取して移植に利用する試みは、数千個程度で小規模に行う場合には、専門家の指導のもとに実施可能である。しかし事業規模で数万個さらにはそれ以上の稚サンゴを採取する必要がある。稚サンゴを大量採取するには、1998年の白化前のように、どこにでも稚サンゴが育っていた状況下でないと実施は難しくなっている。

(岡本峰雄・野島 哲)

5. 全群体の移植及びサンゴ群集（礁全体）の移築

5-1. 全群体の移植

サンゴ移植はサンゴ群集の回復を目指して、既存の枝状ミドリイシ群体を採取、分割して植え付ける方法が一般的であるが、沿岸における開発工事などでサンゴ群集が消滅せざるを得ない場合には、事前に可能な限り多くの群体を適地に移植させることも行われる。

これまで実施された例として、6 節 (3) にコブハマサンゴ群体の移植事例が紹介されている。塊状ハマサンゴ類は大きなものでは直径 1m を超えるものが珍しくなく、通常行われている群体分割による移植は不可能である。そのため、群体全部の移植を行わなければならない。6 節の移植事例では、比較的取り扱いやすい直径 20-30 cm の群体が移植対象として選ばれている。

移植はまず、サンゴを破損しないようタガネを用いて、注意深く群体基部を海底からはがし、水中でコンテナ容器に収納し、移植場所へ運搬、水中ボンドを用いて基部接着を行う。固着基盤はコンクリート板でできた人工基盤と自然岩盤の 2 種類が使われた。

自然岩盤では後に群体基部にアンカーボルトを打ち込み固定させる方法が実施され、有効であることが実証されている。

移植後 4 年間にわたる追跡調査の結果、サンゴの生残、生長とも人工基盤よりも自然岩盤の方が良好であったことから、固着基盤として自然岩盤の方が優れていることが示された。塊状ハマサンゴには直径 1m を超えるものが普通にみられることを考えると自然岩盤に移植することが適切である。

塊状ハマサンゴは礁池に分布することが普通であるため、移植も礁池になされることが適当と思われるが、礁池には砂底域が多く適当な固着基盤が求められないことが一般的である。そのため、砂底に移植せざるを得ない場合には、海底に鉄筋杭をエアハンマーを用いて打設し、これを微調整して固着杭とするとよい。移植事例では取り扱いやすい直径 20-30 cm のものが用いられたが、それ以上の大きさになると人力では運搬が不可能である。その場合には、次項で述べるような移築工法が必要となってくる。

5-2. 礁全体の移築

「サンゴ群集の移築技術」は、福西ほか(1998)や財団法人港湾空間高度化センター(1999)がサンゴ礁と共生する港湾整備の計画手法の一つとして、サンゴ礁が埋立てや防波堤建設によって消滅する可能性がある場合に、サンゴ群集を岩盤ごと移動することによって保全する手法として紹介している。

これらを受けて、沖縄県宮古島の平良港でサンゴ群集に配慮した港湾整備を進めるための新たな実験的取り組みが 1998 年以降継続的に行われており、その成果の一部は石井ほか(2000, 2001)等に報告されているとともに、沖縄総合事務局平良港湾工事事務所(2002)のパンフレットにも紹介されている。

サンゴ群集の移築工程を図 5-1 に示すとともに移築工程および平良港におけるサンゴ

群集移築実験結果の概要を以下に示す。

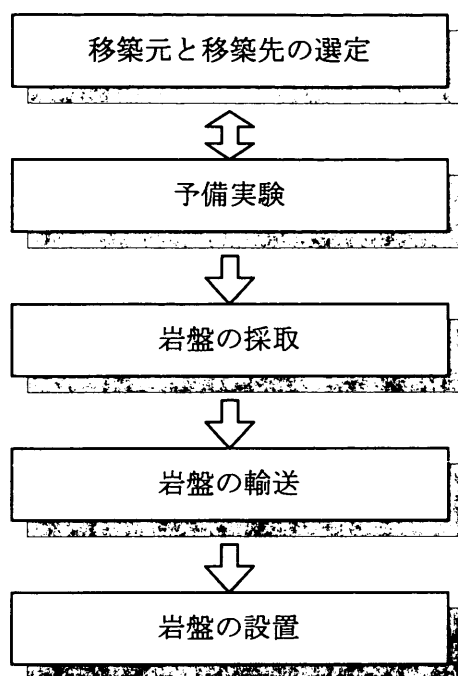


図 5・1. サンゴ群集の移築工程(港湾空間高度化センター 1999 より)

(1) 移築元と移築先の選定

サンゴ群集の移築計画に先だって直接的影響や間接的影響が想定される範囲を想定し、その範囲に存在するサンゴ群集の実態調査を行い、移築が必要なサンゴ群集の選定を行う。

サンゴ群集の移築先は移築元と類似した環境であることが望ましいため、想定される移築先についても事前に実態調査を行い具体的な移築先の候補地を選定する。

(2) 予備実験

移築先の候補地において移築の予備実験を行い、適地判定の確認を行うことが望ましい。

(3) 岩盤の採取

サンゴ群集が着生している岩盤を採取するためには岩盤を破壊する必要がある。その際にサンゴ群集へのダメージが小さい岩盤破壊手法の検討と移築する岩盤の大きさの検討を行う必要がある。サンゴ群集の移築に際しては他に例がないため、1998、1999 年度は水中バックホウを用い、2000 年度にはウォータージェット、エアールフト等を用いて着生基盤を掘り上げている (図 5・2)。

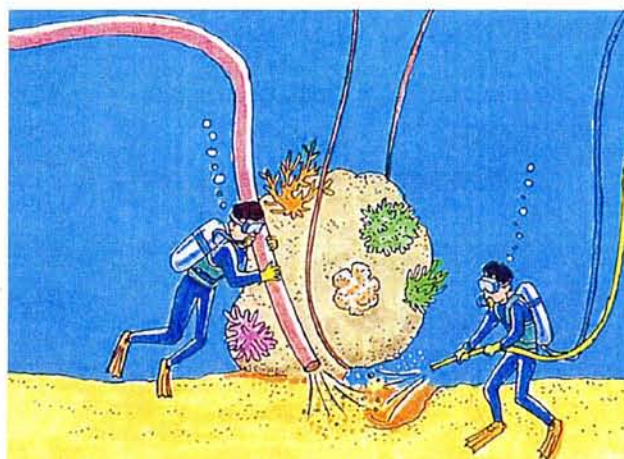


図 5-2. サンゴ群集が着生した岩盤の採取方法 （平良港湾工事事務所 2002 より）

（4） 岩盤の輸送

岩盤の輸送は、平良港では図 5-3 に示すようにサンゴにストレスを与えることを避けるために空気に触れさせないようにして行っている。この方法は近い場所への移築には有効だが、距離が遠くなると輸送効率が悪くなる。サンゴ群集の種組成によってはある程度の干出に対して耐性があると考えられるので船上輸送についても検討したい。その際にはサンゴへのダメージを最小化するための対策が必要となり、継続的に海水をかけること（散水）や遮光シートで覆うことなどが考えられる。事前に干出耐性実験を行うなどして対策の効果を確認することが望ましい。

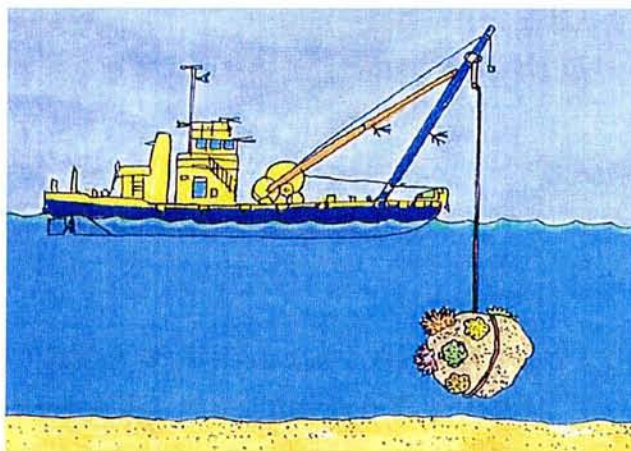


図 5-3. 採取した岩盤の輸送状況 （平良港湾工事事務所 2002 より）

(5) 岩盤の設置

岩盤を設置する際には岩盤の大きさ、移築場所の波浪条件等に注目し、岩盤が安定するように配慮することが望ましい。

平良港では 1998、1999 年度は水中バックホウを用い、2000 年度にはエアジャッキ、ウォータージェット等を用いて着生基盤を掘り上げた。その結果、1998 年度は岩盤の多くが直径数 10cm～1m 程度の破片に分割してしまったので、バケットに乗せて水中で運搬した後、マウンド周辺に直接設置した。1999 年度は数 10 cm～1m 程度の岩盤はバケット内に固定し、約 1 m を越える大型の岩盤はマウンド周辺に直接設置した。2000 年度には、十分大きな岩塊を移築することが可能となり、港内側のマウンド周辺にまとめて移築している。

(6) モニタリング調査結果の概要

以下に石井ほか(2001)から抜粋して平良港におけるサンゴ群集移築実験結果の概要を示す。

図 5-4 は 1999 年 1 月に移築したサンゴ群集 12 地点の被度の経年変化である。移築したサンゴ群集は、ハマサンゴ科、ヤスリサンゴ科、ククメイシ科等から構成されていた。1999 年 1 月の移築サンゴ群集は岩塊が小さく、台風時の波浪等により一部が流失した地点がある。このような地点では被度が低下しているものの、安定している基盤のサンゴ群集はほぼ全て生存している。また、移築先の環境条件による違いもみられず、移築によるストレスや、移築前後の環境変化により死亡したものはほとんどないことが確認された。なお、2000 年 10 月(21 ヶ月後)の調査では被度が増加した地点もみられた。

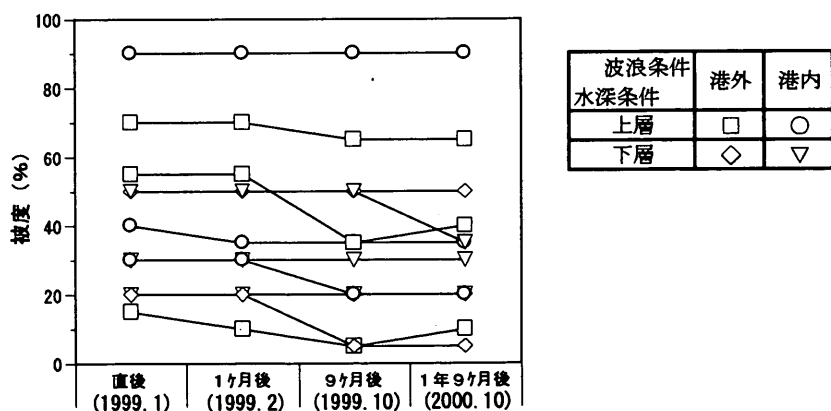


図 5-4. 1998 年度移築サンゴの被度の経年変化（石井ほか 2001 より）

1998 年には沖縄県だけでなく世界的な高水温によるサンゴ群集の白化現象が生じており、平良港で移築したサンゴ群集にも白化したものがあつた。しかし、図 5-5 に示すように 1999 年 10 月(9 ヶ月後)の調査時には回復し生存しているのが確認されており、2000 年 10 月には白化の影響は認められなくなった。このように移築に伴いサンゴ群集が受けたストレスはきわめて小さいと考えられる。



図 5-5. 白化した部分の回復状況（石井ほか 2001 より）

左：移築直後(1999. 1)、中：移築後 9 ヶ月(1999. 10)、右：移築後 1 年 9 ヶ月(2000. 10)

表5-1には2000年11月の移築直後のサンゴ群集を含む岩塊上で観察された大型動物の出現状況を示す。大型底生動物の種類数は0～11種、個体数は0～25個体である。なお、個体数が計測できない海綿類や群体ホヤ類も着生している。以上の大型底生動物は、移築前から着生していたものが、移築によって岩盤ごと運ばれて来たものである。このように、サンゴ群集の移築技術では、サンゴ群集だけでなくその他の付着動植物もあわせて保全することが可能である。

サンゴの移植技術と比較すると、サンゴ群集の移築技術は、サンゴ群集以外の付着動植物を移築によって保全できる点や、ハマサンゴ等の分割しにくい塊状サンゴの取り扱いが可能なこと等を利点としてあげることができる。

なお、本工法は、特許出願中の技術である。

表5-1. サンゴ群集を含む岩盤上の大型生物の出現状況（石井ほか 2001 より）

	平 均	標準偏差	最 小	最 大
種類数(/ m^2)	5.0	2.7	0	11
個体数(/ m^2)	7.3	8.5	0	25

また、平良港では図 5-6 に示すように「サンゴ群集の移築」に合わせて、「通水型ケーソン」、「溝加工を施した消波ブロック」、「多様な空間を有する根固ブロック」なども用いた「環境共生型防波堤」の建設が進められている。

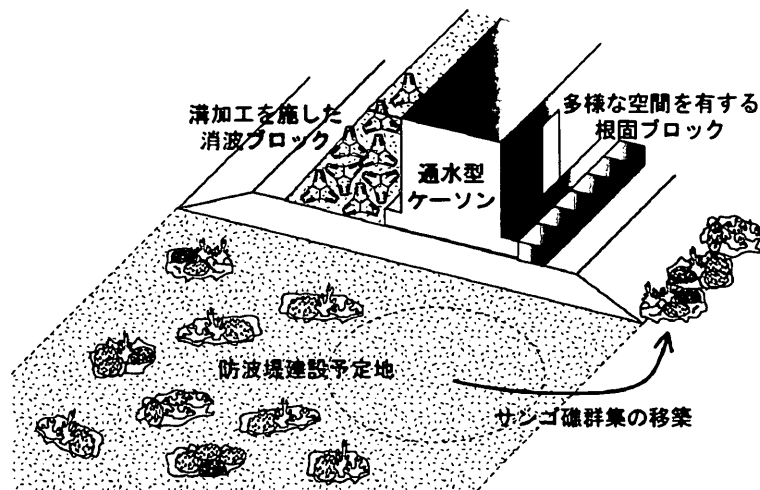


図 5-6. 平良港における環境共生型防波堤の概要（石井ほか 2001 より）

引用文献

- 福西 謙・与那覇健次・森田 整・山本秀一・高橋由浩（1998）サンゴ礁と共生する港湾整備計画手法について. Techno-ocean'98 Intl. Symp. Proc. 181-184.
- 港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所（1999）サンゴ礁と共生する港湾整備マニュアル案. 99+27pp.
- 石井正樹・前幸地紀和・大村 誠・山本秀一・高橋由浩・田村圭一（2000）平良港におけるサンゴ群集の移築等による環境配慮実験. 日本サンゴ礁学会第3回大会講演要旨集. 19.
- 石井正樹・前幸地紀和・大村 誠・山本秀一・高橋由浩・田村圭一（2001）平良港におけるサンゴ群集に配慮した環境修復技術. 海岸工学論文集. 48: 1301-1305.
- 平良港湾工事事務所（2002）環境共生型防波堤の実現をめざして（パンフレット）

（藤原秀一・大森 信）

6. サンゴ礁修復への海中技術の展開及び修復の事例

6-1. 有性生殖を利用したサンゴ礁修復法開発の試み

(1) はじめに

1998 年度から 2000 年度の海洋科学技術センターのプロジェクト研究において、石西礁湖全域を対象にさまざまな調査研究が大規模に展開された (Okamoto 1998)。残念なことに調査開始の 1998 年には世界規模の白化が起き、それまでに得ていた石西礁湖のサンゴの状況が激変した (Okamoto et al. 2000; Yamazato 1999)。さらに 2001 年には再度の白化被害を受け、石西礁湖のサンゴの生残が憂慮される事態となっている。

こうしたなか 2001 年度から、石西礁湖において、サンゴ礁再生を目指した基礎研究を開始した。従来の調査研究で得たサンゴの生態学的な知見、広大な石西礁湖のサンゴが度重なる白化で死滅途上にあること、そしてダイビングを主にした海中作業技術を背景に、「石西礁湖ではサンゴの再生産力を強化するための活動が今まさに必要であり、またそれが可能な海域である」と認識したうえでの活動である。

本稿で述べるサンゴ礁再生の試みは、従来のサンゴ移植法を踏まえたうえで、「地球温暖化の影響でサンゴが死滅しつつある事実」に対処可能なものとして立案、実施している。少ない具体的事例、なおかつ試みの途上であるため十分な成果に言及できないことをご容赦いただき、サンゴ礁修復への海中技術の展開ということで紹介したい。

著者らは、一斉産卵時に発生したサンゴ幼生の着生ポテンシャルを計測するため、天草陶石製の着生板 (10×10×1.3 cm。板中央に固定用の孔を空ける) を用いて実験を行ってきた。着生板は建築用のブロックをベースにし、1 個のブロック上に、水平に隙間を空けて二段に重ねたものを 3 組ずつ、計 6 枚を固定している。着生板の設置は一斉産卵の概ね 1 週間前から産卵日までを目処に行う。これは着生板の表面がサンゴの幼生が着く際の競争相手または障害となる物質によって覆われるのを防ぐためである。

幼生の着生ポテンシャルを調べる方法として、一斉産卵の約 3 ヶ月後に着生板を回収して、乾燥後に実験室に持ち帰って着生したサンゴの計数を行ってきた。着生板の一部は産卵後 1 年間を経た時点で回収・計数することで、着生したサンゴの減耗率も調べてきた。

着生板に着いたサンゴは、3 ヶ月後の回収の時点では、板の裏側の外縁近くに集中的に分布する。板をそのまま海中に放置すると、サンゴは外側に向かって成長し、次第に板の側面から表に出る。表に出たサンゴは成長が速くなり、ウニや魚類の食害は受けにくくなる (図 6-1)。

着生板をそのまま海中に放置しておくと、稚サンゴは自然に着生したサンゴと同様に成長する。着生板に育った稚サンゴは、そのまま移植に用いることが可能である。



図 6・1. 着生板の裏に付いて側面に出てきた稚サンゴ

(2) 有性生殖を用いたサンゴ礁再生法の概念

サンゴの一斉産卵で発生する無数のサンゴの幼生を利用し、移植用の稚サンゴを育てる方式は、従来の移植法(無性生殖)に比較すると少なくとも1年以上の長い準備期間を要する。しかし一斉産卵はサンゴが生残するための基本戦略であり、自然界の理である。これを利用する最大の利点は、サンゴが特定種に偏らず、産卵海域のサンゴの群集構成に準じた形で稚サンゴ群集を得られる可能性が高いことにある。つまり単なるサンゴの移植再生でなく、自然の摂理を利用し、サンゴ群集を保持したままでサンゴ礁再生を可能にすると考えた。

再生法の基本概念は次のようである。

- a) サンゴの一斉産卵直前に、幼生着生適地に幼生着生装置を設置し、一斉産卵で発生した幼生を自然の中でそこに着生させる。
- b) 幼生着生適地と生育適地は必ずしも一致しないため、着生後に、着生装置を育成海域に移動させる。
- c) 幼生が稚サンゴになるまでの間、外敵防除や清掃などで適時介在し、生残率を高める。
- d) 成長した稚サンゴ(幼サンゴ)は大量減耗段階を生き抜いた強い個体であり、これを移植に用いる。

(3) 着生板利用の問題点

移植用の稚サンゴを得るために、幼生着生ポテンシャルの研究に用いた従来の着生板をそのまま用いるには次のような問題があった。

- a) 幼生着生板が必要以上に大きすぎる。

着生板の裏面には多数のサンゴが付くが、それが着生する位置は、成長に伴って表に出てくるのが容易な板の外縁付近に限られる。また移植後はサンゴの生存競争により、

板 1 枚あたり 1 個体のサンゴしか成長しない。

b) 多数設置する作業が困難。

着生板は、サンゴの幼生が裏面に付くため、水平に隙間を空けて重ねて配置する必要がある。板 1 枚の空中重量は約 300g であり、これを多数配置するには特製のフレーム等を製作する必要がある。また海中での設置や運搬を考えると、着生板とフレームの総重量は空中で数十 kg 程度にすることが望ましく、板は 50 枚程度しか配置できない。

c) 移植段階で固定する工事が複雑。

移植段階に達した稚サンゴは、着生板の下面から側面にかけて成長している。この板を海底に固定するためには、下面のサンゴを傷つけないよう、板の下にスペーサーを挟んだ状態でステンレス製の釘で止めるような面倒な工法が必要となる。

(4) 新しい着生具開発の背景

着生板を稚サンゴの着生、育成そして移植に用いるには、前述のような基本的な問題を解決する必要があった。検討初期段階では着生板や石材にさまざまな加工をして着生具として用いる方法を試みた。この過程で、細長い丸棒と角棒の石材を着生具として加工し、海中設置法、サンゴの着生状況、移植工法等について一連の実験を行った。その結果、細長い棒状の着生具であれば、4 節 (2) 「稚サンゴの移植」で述べたコアドリルによる孔空け固定方法が容易に実施できることがわかった。しかし、小型で複雑な形状のものを石材で製作するには、材料費のほかにかかなりの加工経費を必要とした。

着生具の素材に関しては、天草陶石や琉球石灰岩などを用いた予備試験や自然に生育した稚サンゴの分布基質などを参考にして検討した。その結果、素材自体による相違よりも、材質の表面の粗さや微細な間隙などがより重要であると判断した。

こうした検討の結果、既存の着生板の概念から離れ、サンゴの着生から移植工事までの全段階を踏まえた、新しい着生具の開発が必要と判断した。着生具の形状は、海中作業を行ううえでの操作性の観点と、従来得られたサンゴの着生、成長、生残のメカニズムを踏まえた生態学的な知見とを配慮して検討した。

操作性の観点からは、以下の 3 点、

- a) 移植工事に適した形状（特に基質への固定法）
- b) 多数の着生具を海中で容易に扱える（小型軽量）
- c) 製作費が安価（大量生産できること）

生態学的な観点からは、以下の 3 点が重要な検討箇所であった。

- a) サンゴの幼生が着生しやすい形状
- b) 着生初期のサンゴが食害を受けにくい形状
- c) 成長した稚サンゴが育つのを阻害しない形状

以上の要求を満たす着生具を製作するためには、既存の石材などを加工することでは技術的に困難であり、仮にできたとしてもコストが相当高いものとなる。そこでセラミックの利

用を考え、形状をさまざまに変えて強度や製作方法などを検討した。その結果、愛知県瀬戸の陶器の技術を利用することで実験用の着生具を大量に製作できる見通しが得られた。2002年4月に製作した着生具第1号（ONF・I）は、石膏型を利用した圧力鋳込みによって陶土を成型し、1,250℃の酸化焼成で製作した。着生具は十分な強度を有し、容積の約5%の微細間隙があり、これが海中設置後に短時間で海水に馴染むのに有利と考えた。原料は通常の陶土を用いたが、この焼成法であれば、火力発電所などで生ずる石炭灰を用いても同じ性能を持った着生具の製作が可能である（図6・2）。

着生具単体はサンゴ幼生が着床しやすく、小型軽量で、移植工事が簡単に行える形状とした。また単体を重ね合わせてフレームに配置することで、海中で多数の着生具を容易に運搬・設置できるようにするとともに、その配置間隔を調整することで幼生着生後の捕食者の侵入を防ぐことができるよう配慮した。



図6-2. サンゴ着生具

（5） 着生具の構造と配置法

着生具単体は、玩具の木製のコマに似た形状とした。着生板部、スペーサー部、連結挿入部から構成される。着生板部は従来から用いてきた天草陶石板の形状に基づいて、下面に必要かつ十分な着生面を有し、上面には連結用の孔を配置した。また下面に複数の溝を配置して着生面積を増やす工夫をしている。スペーサー部は、従来の着生板の下面に隙間を空けて重ねていたように、着生具を重ねる際に着生板間の隙間を一定の値に保つ役割を有する。連結挿入部は、多数の着生具を上下に重ねるためのガイドである（図6-3、6-4）。

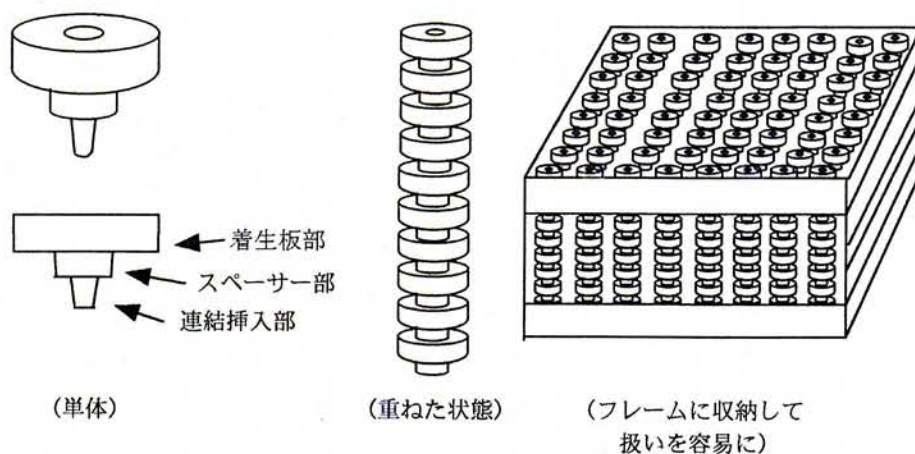


図 6-3. サング着生具と組み立て法



図 6-4. フレームに組み立て中の着生具

着生具は多数を重ねたうえ、フレームに密な間隔で並べて配置する。着生具を重ねることによってスペーサー部で形成される隙間は、着生したサンゴがナガウニの侵入などで食害を受けることを防止する。重ねた着生具をフレーム上に密に配置するのは、同様に貝類や魚類が入り難くしてそれらの食害を防止するためである。もちろん、サンゴの成長や付着生物の成長に伴って、重ねた着生具は適時、適切な間隔になるよう間引きすることを想定している。

移植段階では、稚サンゴは着生板部の下面から側面に出て成長している。リーフなどに小さな孔を空け、接着剤を入れ、接着剤をつぶしながら連結着生部を挿入する。連結着生部は、移植までの間、着生板上面の孔に入ったままであり、付着生物が付きにくい条件が保たれる。またスペーサー部は移植時にはストッパーとして機能し、着生板下面から育っている稚サン

ゴを傷つけないよう保護する（図 6-5）。

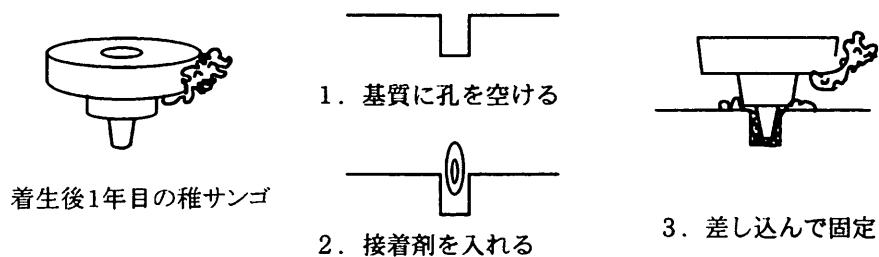


図 6-5. 着生具の挿入接着法

(6) サンゴの着生から育成・移植

自然界においてサンゴが多数着生するのは比較的浅い場所であるが、そこは波浪の影響を受けて破損しやすい（図 6-6）。そうした場所にフレームに収容した着生具を設置してサンゴを着生させる場合、着生後なるべく早い時期に、より静穏な海域に移動したほうが安全である。また外敵生物の除去、生育状況の調査、サンゴの成長に伴う着生具の間引き作業（重ねた着生具束の配置間隔を調整するため）などを行ううえでも、静穏海域のほうが行きやすいし、作業もし易い。石西礁湖の場合、竹富島の南方に広くて穏やかな礁湖があり、水深 7～10m の育成適地が各所に得られる。

幼生の着生は概ね一斉産卵の 10 日後までに終了すると考えられている。そこで、着生幼生が確実に固着して安定すると思われる約 1 ヶ月後、着生具をより穏やかな育成海域に移動させる。近距離であればダイバーによる海中移動、遠距離の場合はエアリフターで浮かせた海面輸送（図 6-7）で簡便に行うことができる。将来、事業規模で数十万個以上の移動を行うような場合、海中移動用の曳航式架台や運搬用生け簀などの利用が考えられる。



図 6-6. 海中に設置した着生具フレーム

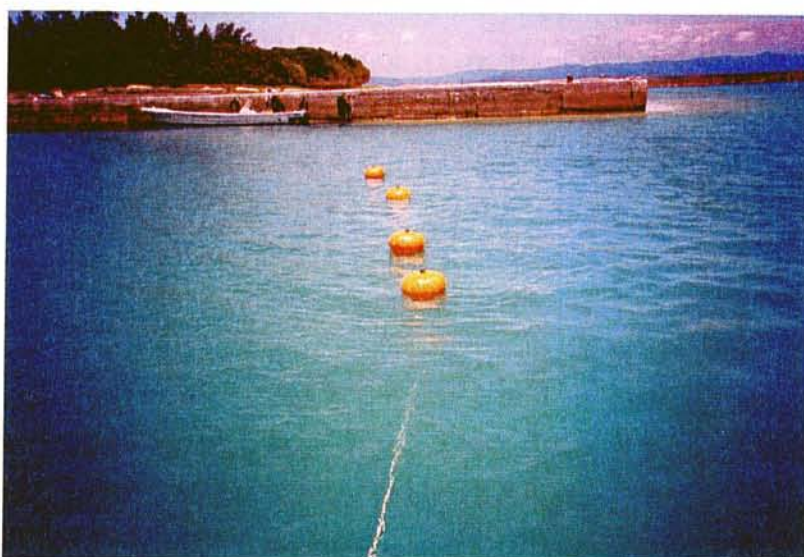


図 6-7. 着生具フレームをエアリフターで浮かせて育成海域に移動

本方式での幼生着生実験は現在実験中であり、移植工事を行うには至っていない。しかし移植作業は、移植先の基質に空けた小さな孔に接着剤を入れ、着生具を差し込んで固定するという単純なものである。4節-2の「稚サンゴを採取して移植する試み」で示したように、既存の海中作業で十分に対応できる内容である。またいくつかの要素技術を開発することによって、プロダイバーに限らずレジャーダイバーによるボランティア的な移植も可能になると考えている。

(7) 本手法の評価と将来の展開

移植対象海域については、石西礁湖の南部に位置するパッチリーフ群を想定している。石西礁湖のなかでも比較的サンゴが豊富で開放性も高く、また流動環境からも、石西礁湖全体のサンゴ幼生の供給源と考えられる海域である。ここでサンゴの再生産力を保持し続けることが石西礁湖にとって大切であり、また長期的には黒潮流域に分布する日本のサンゴを絶滅から防ぐための最重要海域であると考え。この海域での移植サンゴの減耗は水温上昇とオニヒトデによる食害の二つが想定されている。それでもなお、沖縄島や石垣島などの海岸近くのサンゴが赤土や海洋汚染などにさらされているのに比べると移植条件はかなり良好である。

白化によるサンゴの死滅が起きても、次の白化が起きるまでに7～10年の年月があればサンゴは再生して死滅の危機を免れると考えられている。しかし石西礁湖では1998年の白化のわずか3年後の2001年に白化が起き、回復途上のサンゴが再度の打撃を受けた。このように頻繁に白化被害を受け、しかも海水温上昇が地球温暖化の影響であることがほぼ確実視される現状では、基本的に石西礁湖のサンゴが死滅過程にあると考えるほうが自然である。

海水温度の上昇はサンゴの分布域を地理的に北上させているが、日本列島では、沖縄県のサンゴ礁海域のようなサンゴの生育に適した場所は少ないため、北上しても生育場所の規模(サンゴ礁)は大きなものとはなり得ない。海水温の上昇に対しては、サンゴに共生する褐虫藻が現在より高温耐性を持ったものに進化すれば、白化の被害を受けることが少なくなると想定されている。この場合、水温上昇の速度に褐虫藻の進化が追いつけるか否かが焦点となる。

この実験は、有性生殖を利用したサンゴ再生の一連の流れが、実海域で実施可能なことを検証するために行っている。即ち、「海域のサンゴ群集に何ら被害を与えること無く、自然の生物の営みに僅かの制御を行うことで回復能力を強化させる」こと、また「全ての制御をサンゴの棲む海中で行う」という方法論の検証である。一般的な海域実験では、多くの陸上実験の結果を踏まえて海域実験へと進む。我々が海域実験を急いだ理由は、現状ですら自然着生によるサンゴの着生数がごく小さく、今後はこの概念を海域で総合的に検証することが困難になると考えたためである。もちろん、この仮説は十分に実施可能と判断したうえでの実験を開始した。しかし石西礁湖の南部海域であっても、着生板を用いた幼生の着生数計測結果は、1998年以前の瀬底島周辺で得られていた値に比較するとはるかに小さい。2001年に起きた再度の白化の影響で、2002年に設置した新しい着生具によって得られる稚サンゴの数はごく僅かであろうと想定している。

本実験でサンゴ礁再生の全体的な概念を検証できれば、その各プロセスでより容易・確実な手法を採用することで、実用化へと進むのは比較的容易と考えている。例えば海域でのサンゴの着生数が今後大きく減少しても、陸上水槽や仕切り網で囲った海域に多数の着生具を設置し、そこに一斉産卵で発生した幼生を多数入れることで、確実な着生は可能である。人為産卵も含め、こうした分野は栽培漁業関連の研究機関が得意とするものである。これらの概念を図6・8、6・9にまとめて示した。

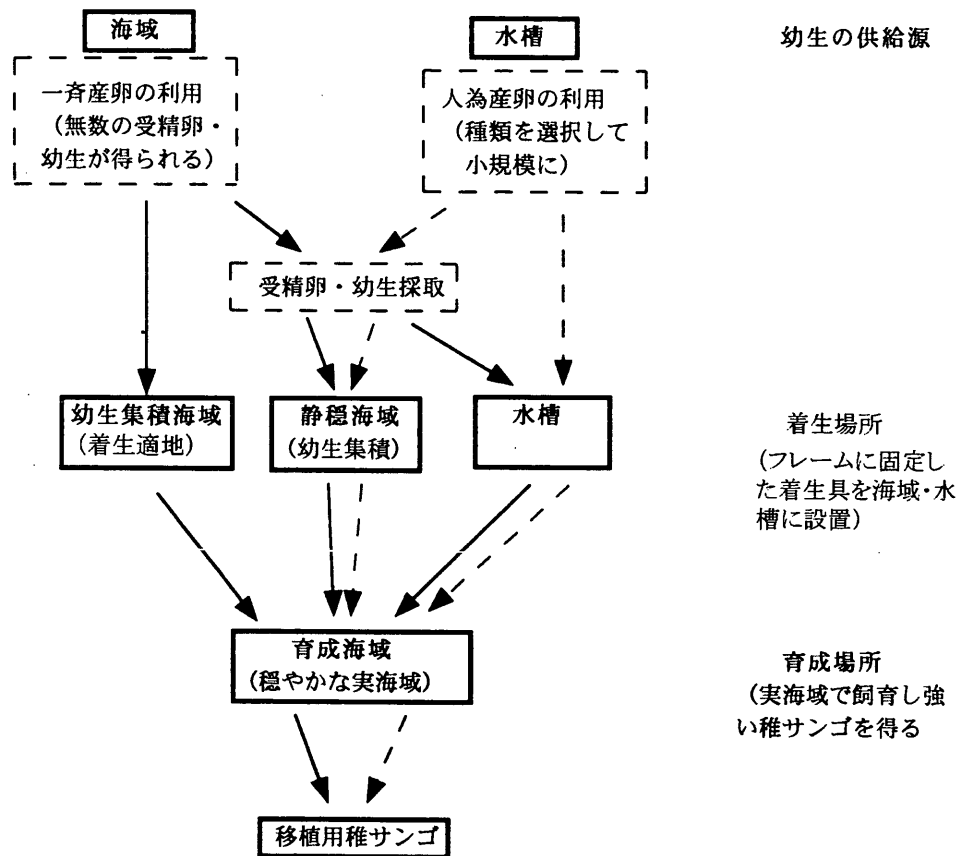


図 6-8. 移植用稚サンゴを得るための方法

次に、着生具を用いた移植の応用について考える。本手法の利点は、既に海中にある基質を利用してさまざまな場所でサンゴの再生を行うことが可能な点にある。自然環境下では、人工の基質やリーフにサンゴが着生する機会は、時期的にかなり限定される。その時期に基質表面が波浪などできれいに洗われていないと着生の可能性は低くなる。当初からサンゴの効果的な着生をねらって構造物を設置しようとしても、着生時期まで配慮して工事を行うことは難しい。そうした時、稚サンゴのついた着生具を利用して、構造物設置後にサンゴ礁造成を行うことができる。

自然着生したサンゴや着生具で移植したサンゴであっても、年月とともに一部が斃死することはやむを得ない。その場合、着生具で育ったサンゴを継続的に移植することでサンゴ礁の再生がより確実に行われることになる（表 6-1）。

表 6-1. 想定されるサンゴの移植対象海域

1. サンゴの幼生供給源と考えられる海域（再生産力強化）
石西礁湖南部の開放的な海域や慶良間諸島など
2. 一過性の要因でサンゴが被害を受けた場所（再生）
白化被害（海水交換の良好な場所を対象）
オニヒトデの食害
台風などでサンゴが破壊
船舶の座礁等でサンゴが破壊
3. 人工基質によるサンゴ礁の造成（造園）
既存の設置物を利用（再利用）
新たに設置する構造物に利用（ミチゲーション）

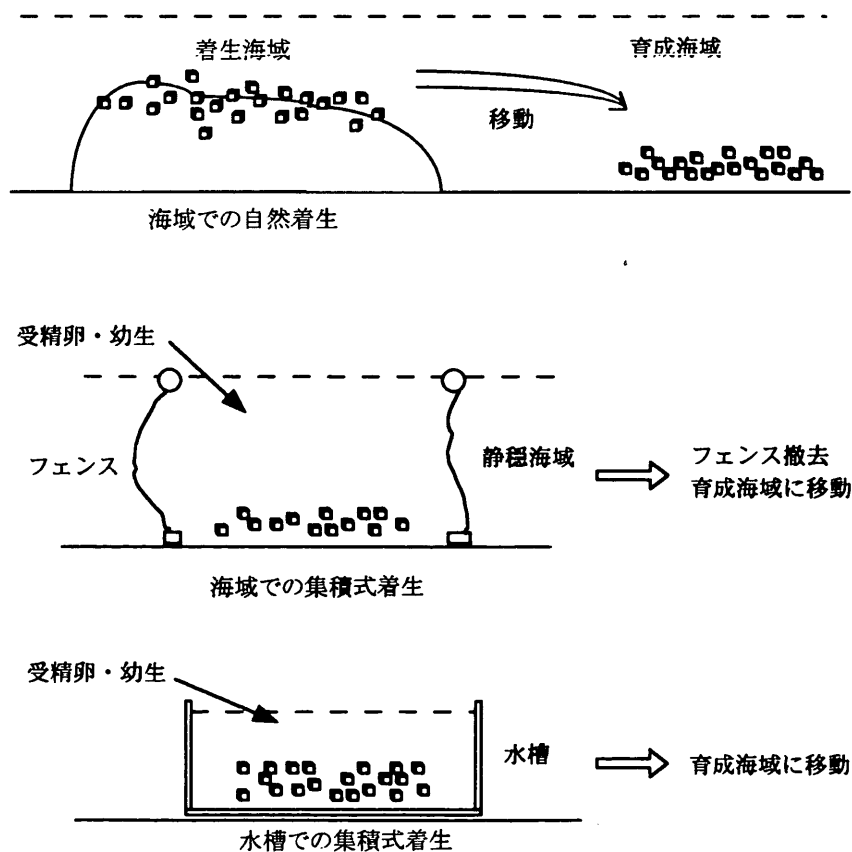


図 6-9. 着生から育成までのイメージ

(8) まとめ

サンゴの一斉産卵を利用して実海域において移植用稚サンゴを得る試みについて紹介した。実海域で稚サンゴの着生・育成を行うには、一斉産卵によって発生する受精卵の分散状況の把握や幼生が着生する海域の確定等について確実な情報が必要である。広大な石西礁湖の南部海域は、一斉産卵を行うためのサンゴ群集が概ね健在で、受精卵が幼生になるまでの期間その中に留まることのできる広さを有している。稚サンゴ増殖のうえでは、日本で最も適した海域のひとつと考えられる。石西礁湖はこうした自然条件に恵まれているために現在まで広大なサンゴ礁を維持できてきたともいえる。

実験に用いた着生具は形状を単体で移植工事を行うのに適したものにしたこと、単体を重ね組み合わせることで着床から育成までの間、外敵生物の被害を受け難い形状としたことに特徴がある。セラミックを用いたことで自由な形状に加工でき、原料は普通の粘土のかわりに石炭灰を利用することで安価に大量生産することが可能である。

本実験では、サンゴ幼生の着生数自体が僅かという悪条件のもとで、海域実証試験を最優先した。今後、海域のみならず陸上実験も含め、さまざまな要素実験と技術開発を行うことで本方式の実用化を進めることが必要なのは言うまでもない。

謝辞

有性生殖による稚サンゴ育成の試みは、著者らが海洋科学技術センターのサンゴ礁研究に従事していた間に得られた知見に基づいて、2001 年度から実施した。この実験が可能となったのは、同センターでの集中的なサンゴ礁研究で得られた多くの生態学的な知見と先進の海中作業技術を背景に有していたためである。著者らのサンゴ礁研究を温かく見守ってくださった海洋科学技術センターの関係者各位、また 2001 年度からの海域実験や技術開発に参加協力を賜った多くの方々に深謝する。

引用文献

- Okamoto M, Sato T and Morita S. (2000) Basic coral distribution data for long term monitoring at Sekisei Lagoon. OCEANS 2000: 1383-1387.
Okamoto M (1998) Fundamental study for quantitative measurement of coral biomass. J. Recherche Oceanogr. 23: 57-65.
Yamasato K (1999) Coral bleaching in Okinawa, 1980 vs 1998. Galaxea, JCRS 1: 83-87.

(岡本峰雄・野島 哲)

6-2. 枝状ミドリイシ *Acropora formosa* とテーブル状ミドリイシ *Acropora hyacinthus* の移植

(1) 材料と方法

移植場所は沖縄県慶良間列島阿嘉島のマジノハマである。この場所は入り込んでいて、台風時以外は流れが穏やかである。2001年に測定した平均時間流は $4.08 \times 10^{-2} \text{m/sec}$ であった(谷口 2001)。堆積物量が比較的多く、島の周りの露出部より多少濁りがある。1999年から2002年の水温は $21.3 - 30.3^\circ\text{C}$ の間であり(岩尾 2001, 谷口 2002)、1974年から1990年の月別平均光量は 8.4 MJ/m^2 (1月) から 20.5 MJ/m^2 (7月)(理科年表 2000) であった。移植海域の礁原にはミドリイシ科が優占しており、その被度は枝状が 44%, コリンボース状が 21.7%, テーブル状が 7.0%, 準塊状が 6.0% で、ミドリイシ以外のサンゴは 21.4% (谷口ほか 1999) である。

本実験で用いた種は枝状ミドリイシ *Acropora formosa* とテーブル状ミドリイシ *Acropora hyacinthus* である。沖縄ではそれらは9月の終わりから10月にかけて卵を作り始め、翌年の5月と6月に産卵する。*A. formosa* の移植は1999年11月7日、2000年3月15日、2000年8月11日に行い、*A. hyacinthus* の移植は2001年7月13日、2002年2月20日に行った。

Acropora formosa の大きな群体(高さ約 1m、表面積約 4.5 m^2) から長さ 5cm、10cm、20cm の3サイズの断片を計 470 本、ニッパーで採取し、0.1mm 単位のノギスで長さを測定した。また、*A. hyacinthus* 5 群体(約 $0.35 \text{ m high} \times 0.54 \text{ m}^2$) から、ハンマーと鑿を使用して、 $8 \text{ g} \pm 0.4 \text{ g}$ と $30 \text{ g} \pm 0.4 \text{ g}$ の断片を計 220 本採取した。移植する全ての断片は大体同じ表面積になるようにしながら、手製の天秤で水中重量を近似させた。採取した *A. formosa* と *A. hyacinthus* の断片はカゴに入れて、ドナー群体から 15-20m 離れた移植場所まで水中を運搬した。採取場所と移植場所の水深は 2-3m である。

長さ 8cm のコンクリート釘を基盤(サンゴ岩)に約 3cm の深さで予め打ち付けておき、移植断片を垂直にして釘に添え、ケーブルタイで固定した(図 6-10)。*A. formosa* の 5cm と 10cm 断片では1本のケーブルタイを、20cm 断片では2本のケーブルタイを用いて釘に固定した。*A. hyacinthus* では1本の釘と1本のケーブルタイで基盤に固定した(図 6-11)。垂直方向は *A. formosa* の成長様式と同じである。また、*A. formosa* の11月の移植実験と *A. hyacinthus* の8月の移植実験では、固定方法を比較するために、それぞれのサイズの半数を水平方向に移植した。水平方向とは *A. hyacinthus* の成長様式と同じである。

移植時の卵母細胞の有無を調べるため、両種のドナー群体から移植時に3本ずつサンプルを採取し、ブアン液で固定・脱灰後に解剖した。移植後2ヶ月に一度、スキューバ潜水により移植断片の生残率を測定した。一斉産卵予定月の満月前後5晩、計11日間、21時から23時まで夜間潜水を行い、ドナー群体と移植断片のバンドルの有無を確認した。また5月と6月に産卵した断片の数を、移植した断片数から途中で使用したサンプル数を引いた数で割り、百分率に直したものを産卵率とした。

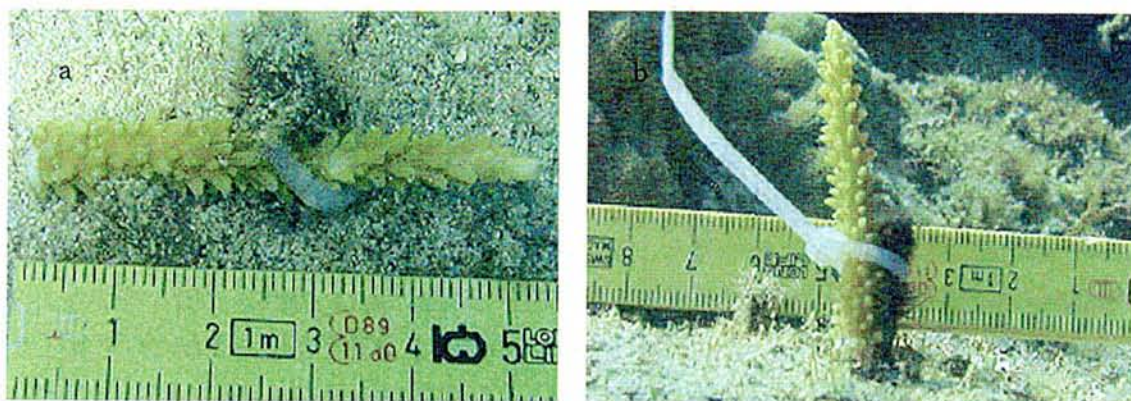


図 6-10. 移植直後の *Acropora formosa* 断片.

a: 水平方向に固定した 5cm 断片, b: 垂直方向に固定した 5cm 断片



図 6-11. 移植 2 ヶ月後の *Acropora hyacinthus* 断片.

a: 水平方向に固定した 30g 断片, b: 垂直方向に固定した 30g 断片

(2) 結 果

a. ケーブルタイと釘による固定方法

ケーブルタイと釘で断片を固定した *A. formosa* と *A. hyacinthus* の断片は、移植 1 年半後でも損失が見られなかった。

Acropora hyacinthus: 移植前に成長点だった部分だけでなく、ドナー群体から採取した際に出来た切断面からも新たなポリプが出芽していた。垂直方向に固定した断片では、移植後 2 ヶ月以内に約 80% が固着していたが、水平方向に固定した断片は移植 1 年後でも固着していなかった。移植後の生残率は、水平方向に固定した断片よりも垂直方向に固定した断片の方が高かった。

Acropora formosa: 移植後 1 年半の間、固定方向に関係なくほとんどの断片が基盤に固着していなかった。垂直方向に固定した断片の大部分は枝の上部から新しいポリプが出芽していた。それらは波に揺られてぐらぐらとしていることが多かったが、堆積物は積もらなかった。水平方向の断片は移植後の時間が経つにつれ、垂直の方向に成長の仕方を変えた。水平方向に固定した断片は移植したサンゴ岩の基盤に触れている部分が多く、波浪で揺られることがほとんどなく安

定していたが、基盤への固着は見られなかった。断片の表面には粒子の細かな堆積物が多く積もっていた。光が当たらない断片の下面は死亡しており、藻類に覆われていた。11月の移植で垂直方向と水平方向の固定方法を比較した結果、全てのサイズにおいて、垂直に固定した断片の方が生残率は高かった。水平に固定した断片は大きなサイズの断片では90%が生き残ったが、10cmと5cmの生残率は低く、その後も相次いで死亡した。5cmでは10%しか生き残らなかった。

b. 生残率

Acropora Formosa: 縦に固定した移植断片の生残率は、移植時期に関わらず高かった。特に、20cmの断片は生残率がほぼ100%であった。8月に移植した断片は5cmを除いて100%の生残率であった(図6-12、6-13)。

小さなサイズの断片ほど移植時期による生残率の差は明らかである。11月と3月に移植した5cmの断片は3ヶ月以内に約15%が死亡した。一方8月の5cmは全て生残していた。3月に移植した断片はその後死亡することはなかったが、11月に移植した断片は1年半後には28%まで生残率が低下した。

Acropora hyacinthus: 2月に移植した断片では、移植後90日間の生残率はサイズに関係なく100%であった。一方、7月に移植した断片は、移植後2ヶ月以内に多くが死亡した(図6-14)。その原因は2001年夏の高水温と考えられる。7月29日から8月8日(8月3日を除く)まで、30℃以上の高水温が10日以上続き(谷口2002)、実験区ではサンゴの白化が見られた。8月28日の観察では、7月に移植した断片のほとんどが白化しており、夏の間に半数以上が死亡した。その後は移植断片の死亡は見られなかった。

c. 産卵

Acropora formosa: 1999年11月の断片移植時、ドナー群体はすでに卵母細胞を有しており、移植断片も2ヶ月の卵母細胞を持っていた。5月25日、26日と6月17日の21時には、移植した水平と垂直に固定した20cm断片と、垂直に固定した10cmの断片にバンドルが確認された。それらは22時30分から40分にバンドルを放出した。

産卵率は水平よりも垂直に固定した断片の方が高く、大きい断片ほど高かった(表6-2)。垂直の20cm断片では80%が、水平の20cm断片では20%が産卵した。垂直の10cmは7%が産卵したが、水平の10cmは産卵しなかった。移植断片の半数が5月に産卵したが、ドナー群体は6月17日にしか産卵しなかった。

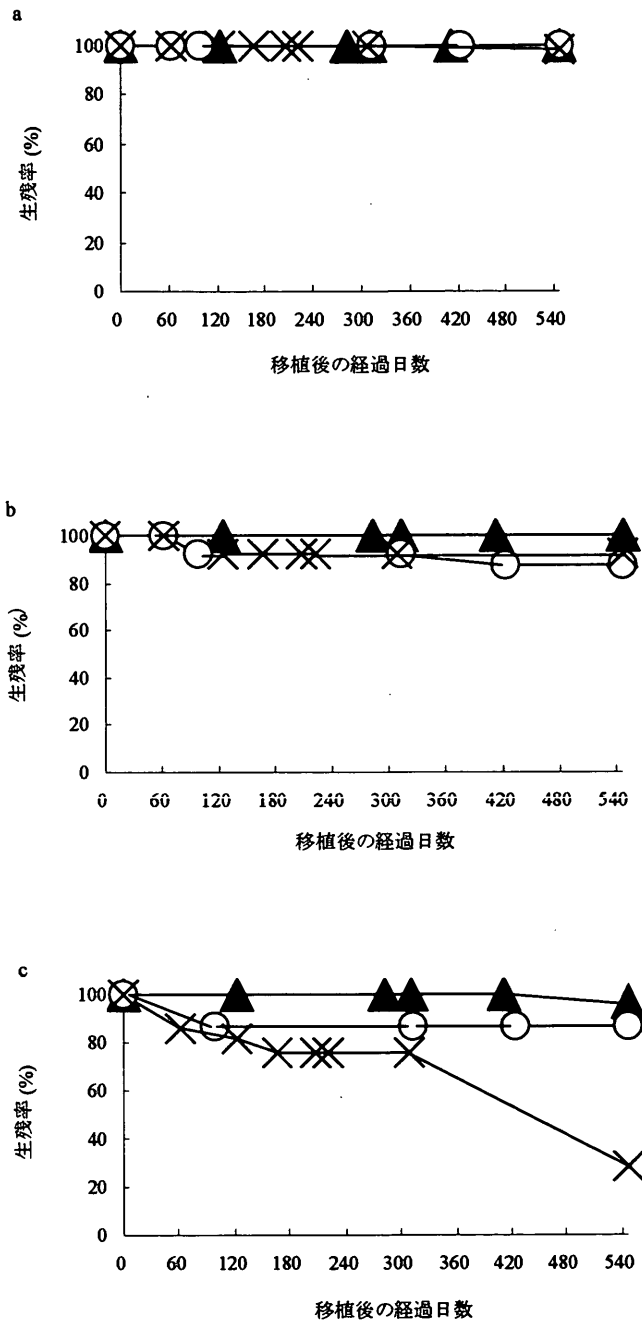
3月の移植断片は全てが移植時に7ヶ月の卵母細胞を有していた。産卵は11月に移植した断片と同じく、5月25日、26日と6月17日に起こった。産卵率は断片のサイズが大きいほど高かった(表6-2)。3月の移植断片の半数が5月に産卵したが、ドナー群体は6月のみ産卵した。

表 6-2. 移植した *A. formosa* 断片の次年度（5 月・6 月）の産卵率.
（ドナー群体は 6 月のみ産卵した。）

移植時期	断片の長さ (cm)	産卵率 (%)		
		5月	6月	合計
11月 (垂直固定)	20	40	40	80
	10	4	0	4
	5	0	0	0
11月 (水平固定)	20	16	4	20
	10	0	0	0
	5	0	0	0
3月	20	47	53	100
	10	20	0	20
	5	20	0	20
8月	20	0	47	47
	10	0	0	0
	5	0	0	0

一斉産卵後の 2000 年 8 月、ドナー群体は未だ卵を持っておらず、そのため移植断片も卵は持っていなかった。2001 年 6 月 6 日、7 日の 21 時には、ドナー群体と 20cm の断片でバンドルが確認され、22 時から 22 時半に産卵した。20cm の断片の 47% が産卵した（表 6-2）。

Acropora hyacinthus: 2001 年 7 月に移植した断片は卵を持っておらず、2002 年 2 月に移植した断片は卵を持っていた。2002 年 5 月 29 日 21 時、垂直方向に固定した 30g の移植断片にバンドルが確認された。それらは 22:15 から 23:00 に放出された。産卵率は 2 月に移植した垂直の 30g 断片で 18%、7 月の 30g 断片で 2% であった。水平方向に移植した断片と垂直の 8g では産卵が見られなかった。



6・12. 垂直固定した *A. formosa* の移植後の生残率.

a: 20cm 断片, b: 10cm 断片, c: 5cm 断片. ▲: 8月移植; ○: 3月移植; ×: 11月移植

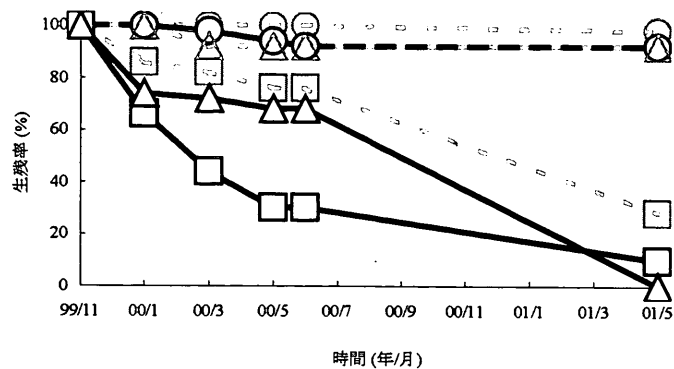


図 6-13. 11 月に移植した水平固定 *A. formosa* 断片 (棒線) の 移植後の生残率. [比較のため、垂直固定した断片を波線で示す。○: 20cm 断片, △: 10cm 断片, □: 5cm 断片]

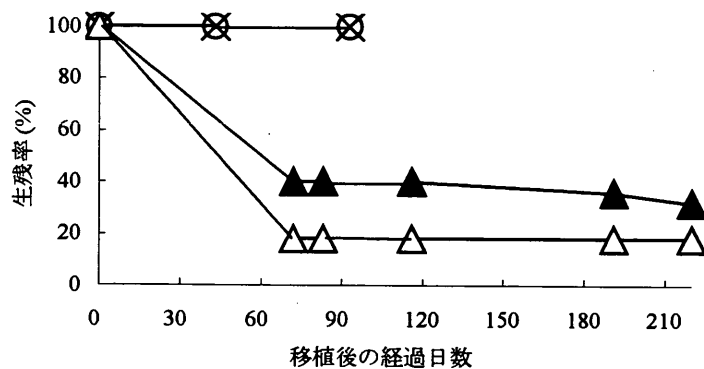


図 6-14. *Acropora hyacinthus* 移植後の生残率

[垂直固定した 2 月の断片サイズに関係なく生残率が 100%であった (×: 8 g 断片、○: 30 g 断片)。7 月に移植した 30 g の断片 では、垂直固定した断片 (▲) の方が、水平固定した断片 (△) よりも生残率が高かった。]

(3) 考察

a. 固定方法

枝状の *Acropora formosa* と テーブル状の *A. hyacinthus* とともに、移植に適したサイズのもを適時に移植した場合には、釘とケーブルタイによる固定方法での生残率は100%であった。また、移植断片の損失も見られなかった。釘とケーブルタイによる移植は安価であり、245,000断片を1ヘクタールに移植した場合、水中エポキシセメント(Kaly 1995)に比べてかかる費用は約半額(大久保・大森 2001)である。垂直方向に固定した方が、水平方向に固定するよりも生残率は高い。*A. formosa*の成長様式は垂直方向であり、*A. hyacinthus*では水平方向である。それにも拘わらず、*A. formosa*だけでなく、*A. hyacinthus*においても垂直に固定した方が生残率は高く、2月に垂直に固定した場合の*A. hyacinthus*断片の生残率は100%であった。本種は過去の移植において死亡率が高いと考えられており(Yap et al. 1992, Clark and Edwards 1995)、そのためClark and Edwards(1995)は*A. hyacinthus*を移植種に選ぶのは賢明でないとしている。しかしながら、熟慮した条件のもとで移植を行えば本種は移植に不適ではない。Clark and Edwards(1995)は枝状と塊状サンゴの移植を薦めているが、テーブル状の本種を垂直に移植すれば枝状にはないメリットがあり、2ヶ月以内にしっかりと基盤に固着した。そのような固着の速さは枝状の*A. formosa*では見られなかった。断片が基盤に固着するということは移植において重要なファクターである。移植した2種の固着率の差は、枝状とテーブル状というそれぞれの成長様式による。*A. formosa*の成長は、ほとんどが基盤から離れた枝の先端部で起こる。一方、*A. hyacinthus*では、群体の周縁部すべてで成長するため、移植時の切断面であっても群体(断片)の“周縁部”となり、その部分が基盤に接触しているので、そこから新しいポリプが出芽する。だから、いち早く基盤に固着する。この実験によって、テーブル状の群体でも固定方法を考えれば移植で高い生残率を得られることがわかった。

水平方向に固定した断片の生残率が低い原因は主に堆積物である。断片が基盤に近いので堆積物が積もりやすく、水の流れを受けにくいためその堆積物が落ちにくく、ポリプの捕食は邪魔され、光が当たらないので褐虫藻が光合成できない。また藻類の侵入を受けやすい。そのため、移植種に関係なく、断片を固定する方向は垂直方向が良い。

b. 移植時期

2月(冬)に移植した*A. hyacinthus*の生残率は100%であったが、7月(夏)に移植した断片の生残率は大変低かった。一方、*A. formosa*では8月(夏)に移植した断片の生残率は秋と春と比べて一番高かった。その原因は、*A. hyacinthus*の移植直後に起こった白化現象によると思われる。実験区において30℃以上の高水温が連続して続き、移植断片を含めた多くのサンゴが白化し、夏の終わりには死亡したサンゴが多数見られた。高水温は強光阻害を引き起こし、ひいてはサンゴの死と低い成長率をもたらすことが知られている。枝状の*Acropora pulchra*を移植したYap and Gomez(1984)は、水温30℃以上における移植サンゴの生残率と成長率の低下を報告している。そのため、2001年7月に移植した*A. hyacinthus*

の死亡原因は移植直後の連続した高水温によるものだと考えられる。

移植直後の期間は移植した断片が外的ストレスに対して敏感な時期であることは間違いない。*A. hyacinthus* とは対照的に、*A. formosa* では夏に移植した断片の生残率が最も高かった。その理由は、同種を移植した 2000 年の夏の水温が 30℃を超えず、移植後のダメージから回復するための成長速度が早かったからと考えられる。Kajiwara et al. (1995) は、*A. pulchra* の総光合成量は 20 - 30℃で直線的に増加し、最大石灰化量は 28℃で見られ、30℃で低下したとある。2000 年 8 月の水温は 28℃前後であり、それが夏に移植した *A. formosa* 断片の高い生残率の理由ではないかと考えられる。

異常な高水温の夏以外、移植サンゴの断片サイズが大きければ、季節に関係なく生残率は高い。しかし、同じ 5cm 断片で 11 月と 3 月を比べてみると、11 月は 3 月よりも水温が高いが、11 月に移植した *A. formosa* の 5cm 断片の生残率は 28%と低い、それよりも低い水温の 3 月に移植した 5cm 断片の生残率は 87%である。また、光量は 11 月と 3 月ではほぼ同じである。水温と光量が 3 月移植後は上昇するが、11 月移植後は低下することから、移植時の水温が 20℃でも、移植のストレスを受けやすい移植後 2 ヶ月間で水温と光量が上昇すれば移植が可能であることがわかる。

以上のことから、移植後 2 ヶ月間に移植断片が外的ストレスを受けず、また水温や光量などが低下して生残・成長率を低下させる時期を避けて移植するのが望ましく、光合成量が増え、白化の危険がない春に移植するのが良いと考えられる。

(c. 断片のサイズと生残率

Acropora formosa では 20cm 断片の生残率はほぼ 100%であった。サイズが大きいほど生残率は高く、その関係は、固定方法と移植時期などの外部要因によるストレスの度合いが高いほど明らかとなった。

サイズが小さくなるほど生残率が低くなるという結果から、断片で移植するよりも群体まるごとで移植する方が良いという考えがある (Plucer-Rosario and Randall 1987)。しかし、死亡率はある一定のサイズ以上から 3%以上にはならない (Connell 1973)。移植断片を採取したドナー群体は生残し、同海域にある同種他群体と同じく産卵した。移植断片は固定されており、転がって組織が損傷することはないので、自然で破片化した断片よりも生残率と成長率は高い。そのため、破片化することにより、ドナー群体の死亡する危険率を分散することができる (e.g. Smith and Hugh 1999)。ドナー群体が生残するのに十分な大きさがあれば、断片で移植するべきだろう。そして、生残率が 100%となる断片のサイズを求めることが大切である。

産卵率はサイズ依存性であった。*A. formosa* の 20cm 断片は一斉産卵に参加し、垂直に固定した断片の方が水平固定した断片よりも産卵率は高かった。一方、5cm と 10cm の断片の産卵はほとんどみられなかった。

移植に適した時期に 20cm の断片を垂直に固定すれば、確実に生残し、産卵も可能であることから、*A. formosa* の移植に適したサイズは 20cm である。

引用文献

- Clark S and Edwards AJ (1995) Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in the Maldives Islands. *Coral Reefs* 14: 201-213.
- Connel J (1973) Population ecology of reef building corals. Jones OA, Endean R (eds) *Biology and geology of coral reefs* 2, Biology 1: Academic Press, New York, 205-245.
- 岩尾研二 (2001) 1995 年から 2000 年の阿嘉島の海象. *みどりいし* 12: 21-25
- Kajiwara K, Nagai A, Ueno S and Yokochi H (1997) Examination of the effect of temperature, light intensity and zooxanthellae concentration on calcification and photosynthesis of scleractinian coral *Acropora pulchra*. *Bull. Inst. Oceanic Res. Develop. Tokai Univ* 18: 1-10.
- Kaly UL (1995) Experimental test of the effect of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. *CRC Reef Research Center Tech. Rep.* (1): 28pp.
- 国立天文台編 (2000) 第 73 冊 理科年表. 丸善株式会社 東京 1064pp.
- 大久保奈弥・大森 信 (2001) 世界の造礁サンゴの移植レビュー. *Galaxea, JCRS* 3: 31-40.
- Plucer-Rosario GP and Randall RH (1987) Preservation of rare coral species by transplantation: an examination of their recruitment and growth. *Bull. Mar. Sci.* 41: 585-593.
- Smith LD and Hughes TP (1999) An experimental assessment of survival, re-attachment and fecundity of coral fragments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 235: 147-164.
- 谷口洋基 (2001) 阿嘉島周辺海域における時間平均流の測定. *みどりいし* 12: 18-20.
- 谷口洋基 (2002) 阿嘉島周辺における 2001 年の白化現象 - 1998 年との比較 - *みどりいし* 13: 26-29.
- 谷口洋基・岩尾研二・大森 信 (1999) 慶良間諸島阿嘉島周辺の造礁サンゴの白化。I. 1998 年 9 月の調査結果. *Galaxea, JCRS* 1: 59-64.
- Yap HT and Gomez ED (1984) Growth of *Acropora pulchra* II. Responses of natural and transplanted colonies to temperature and day length. *Mar. Biol.* 87: 209-215.
- Yap HT, Aliño PM and Gomez ED (1992) Trends in growth and mortality of three coral species (Anthozoa: Scleractinia), including effects of transplantation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 83: 91-101

(大久保奈弥)

6-3. コブハマサンゴ *Porites lutes* 群体の移植

近年、沿岸における開発工事などによりサンゴ群集が消滅する恐れがある場合など、環境保全上の観点からサンゴ群体全体を他の場所へ移植する試みが行われるようになった。例えば、橋梁設置により消滅する橋脚設置部のサンゴ移植などが行われている。

一例として、沖縄県により実施された沖縄島北部に建設された本島と離島を結ぶ古宇利大橋の移植実施例を紹介する（沖縄県土木建築部北部土木事務所・国土環境株式会社 2002）。

(1) 方 法

古宇利大橋本島側浅所の橋脚設置部には直径 5~80 cmの塊状ハマサンゴが優占的に分布している（図 6-15）。このうち、直径 20~30 cmのコブハマサンゴ *Porites lutea* 群を主に採取し、橋梁東部の砂礫底域に移植し、経年的に追跡調査を行った。移植は人工基盤と自然岩盤に行われ両者の比較が行われた。人工基盤の水深は基準面下約 2m、自然岩盤の水深は基準面下約 1mである。



図 6-15. 移植対象の塊状ハマサンゴ

人工基盤は 1.2m×1.2m×0.2mのコンクリートブロック板で、表面に 5ヶ所移植用の穴（φ10 cm×5 cm深）が設けられている（図 6-16, 6-17）。

コブハマサンゴの採取はサンゴを破損しないよう注意深くタガネを用いて群体基部から行い、海底からはがし、水中でコンテナ容器に収納し、移植場所へ運搬した。基盤への接着は水中ボンドを用いて行い、自然岩盤への接着はあらかじめ岩盤にタガネとハンマーで移植用の穴（人工基盤と同様）をあけてから行った。後に、群体基部の基質にアンカーボルトを打ち込み固定させる方法も用いられたが、群体がボルトを包み込む成長がみられ、固着に有効であった。

移植サンゴは 5枚の人工基盤に 25 群体、自然岩盤に 5 群体が 1998 年 12 月に移植され、

移植後4年間にわたり年5回追跡調査が行われてきた。調査内容は移植サンゴの

- ・ 生存・死亡状況
- ・ 成長
- ・ 活性状況
- ・ 食害生物
- ・ 浮泥堆積

などについてである。

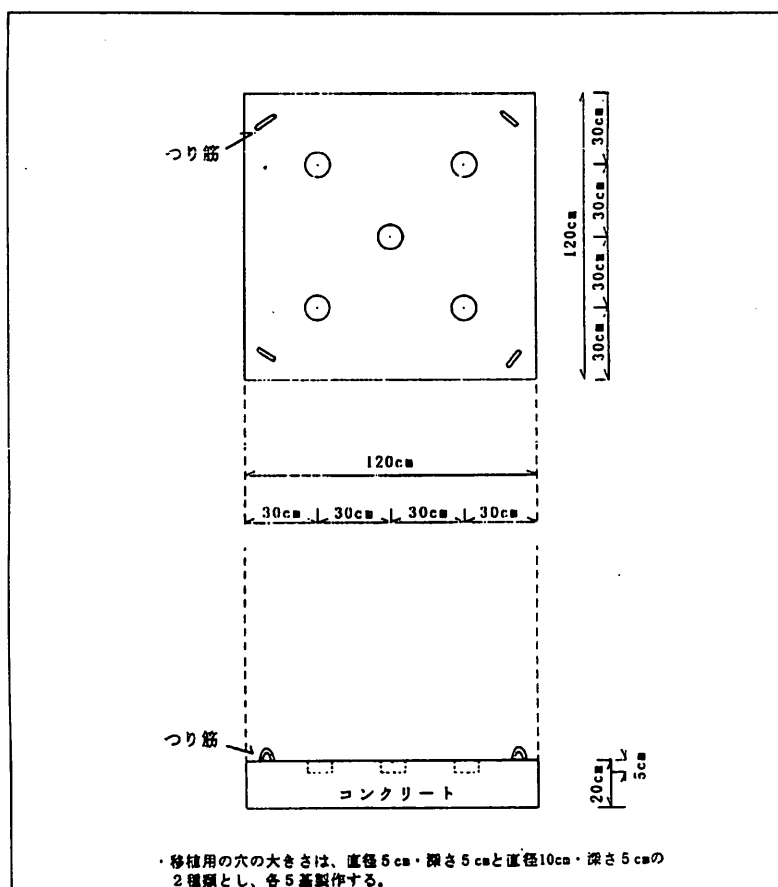


図 6-16. 人工基盤図

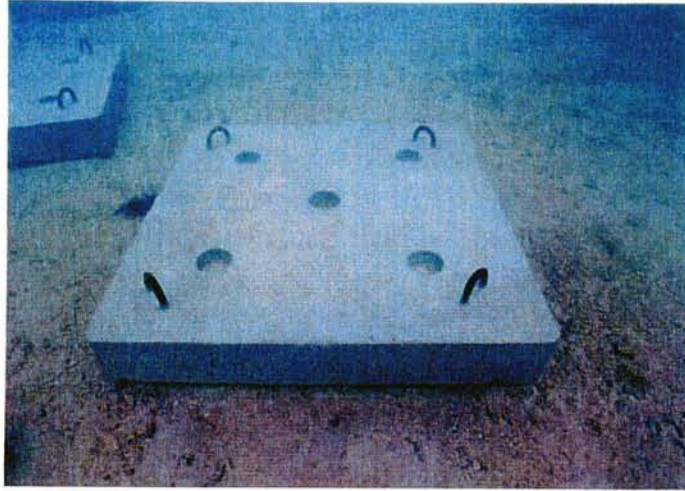


図 6-17. 海底に設置された人工基盤

(2) 結果

a. 生存・死亡状況

人工基盤に移植された 1 群体が移植後 7 ヶ月目に死滅したが、他の人工基盤、自然岩盤の群体は 45 ヶ月後まで生残している。特に自然岩盤に移植された群体はほとんど部分的なポリプ死滅もみられなかった。人工基盤群体は夏季の高水温期に部分的にポリプ死滅のみられる群体が増加するものの群体全体が死滅するまでには至っていない。

b. 成長

人工基盤と自然岩盤上の群体の平均年間成長量を比較すると、1999 年では水平、垂直方向とも人工基盤のほうが多かったが、2000、2001 年では自然岩盤のほうが人工基盤を上回っており、水平方向で 3~4 mm、垂直方向で 2~5 mm、自然岩盤の方が多かった。人工基盤では部分的にポリプが死滅する群体があるため、成長量に影響を及ぼしたとみられる (図 6-18)。

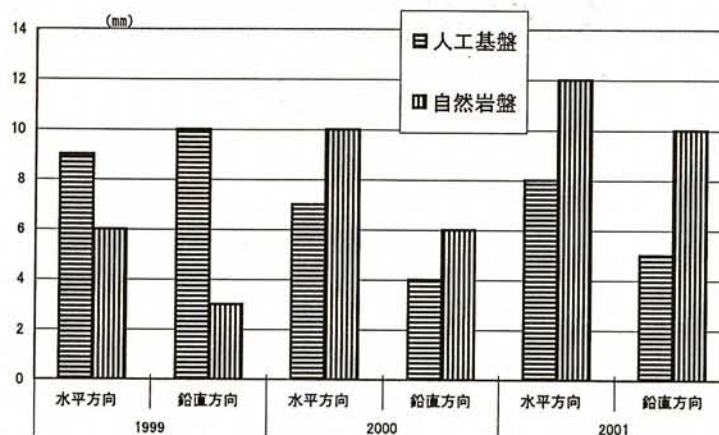


図 6-18. 年間平均成長量の比較

c. 活性状況

白化や色彩の薄いサンゴを除いた健全なサンゴ群体の占める割合を年毎にみると各年とも自然岩盤の群体のほうが健全率が高い傾向を示している。なお、2001 年は夏季の高水温のため白化群体が多く出現し、健全なものが減少した（図 6-19）。

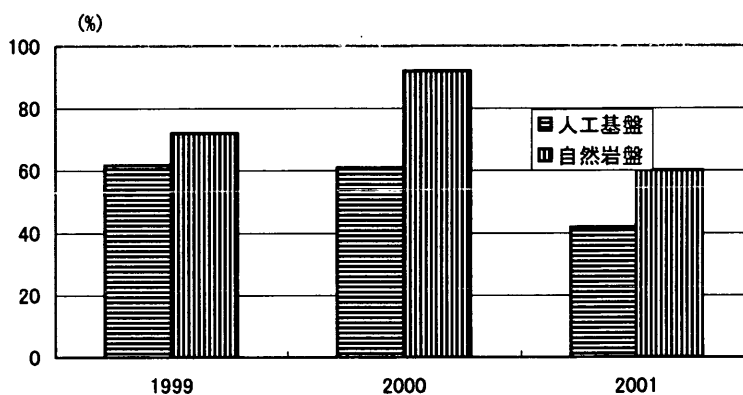


図 6-19. 健全群体数の比較

d. 粘液分泌群体数

浮泥の堆積状況をみると、人工基盤のほうが自然岩盤より多い傾向があり、そのため浮泥の排除行動である粘液を分泌する群体は各年とも人工基盤の方が多かった。2001 年は夏季高水温のためか粘液を出す群体が増加した（図 6-20）。堆積を受けた群体では頻繁に粘液を分泌し、浮泥を排除する様子が観察されており、これに相当のエネルギーを費やすことが想像される。

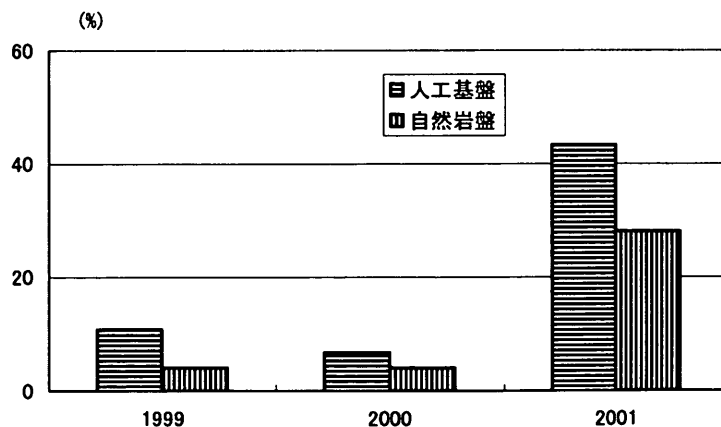


図 6-20. 粘液分泌群体数の比較

石垣島東海岸におけるコブハマサンゴの生殖細胞の観察結果（波利井 2002）によれば、赤土堆積の多い場所では、少ない場所に比べて生殖細胞を持つ群体の割合が少なく、赤土排除にエネルギーを費やすため、生殖細胞の形成がなされないことが示唆されている。この面からも、再生産に影響を及ぼす可能性を避けるため、コブハマサンゴについては、自然岩盤への移植が適当である。

（３） まとめ

コブハマサンゴは礁池に多くみられるため、礁池への移植が勧められる。石垣島宮良湾礁池での塊状ハマサンゴ分布調査によれば、水深の深い地域ほど群体密度が高く、平均水深2-3mに多く分布することが報告されている（佐藤ほか 2000）ことから、礁池のできるだけ深場に移植することが、固着安定性の面からも適当である。しかし、礁池内には砂底域が多いため、固着基盤を得ることが困難であることが予想される。そのため、何らかの固着基盤が必要であるが、前述のようにアンカーボルトが良好な結果をもたらしている（図6-21）、砂底で使用可能な鉄筋杭の打設が考えられる。砂底での実施経験から鉄筋杭を使用する場合は、直径12mm、長さ1mのものが扱いやすい。打ち込みはエアハンマーを使用すると容易であるが、打ち込み途中で礫にあたったときに破碎しやすいよう先端を鋭角に切断しておくといよい。鉄筋杭は比較的柔軟なので、打設後、曲げるにより微調整が可能である。



図6-21. アンカーボルトを包み込んで生長するサンゴ

移植対象群体の大きさとしては直径20-30cm以下が潜水作業上からも扱いやすいと考えられるが、塊状ハマサンゴには直径や高さが1m以上あるものも珍しくない。このような規模の群体を移植する必要性が生じた場合には、個々の地形により個別に検討する必要がある。

引用文献

- 波利井佐紀・灘岡和夫（2002）赤土がハマサンゴの繁殖に及ぼす影響．日本サンゴ礁学会
第5回大会講演要旨集：35.
- 佐藤崇範・堀 信行・鈴木 淳（2000）石垣島宮良湾の裾礁礁池における塊状ハマサンゴ
の分布特性．Galaxea, JCRS 2：43-50.
- 沖縄県土木建築部北部土木事務所・国土環境株式会社（2002）古宇利大橋海生生物移植
保全調査業務（その4）報告書．83+61pp.

（細谷誠一）

7. 着生種苗と移植群体の管理

(1) 海藻、食害生物除去

移植後の分割群体には固着部などに海藻が付着しやすく、海藻の成長に伴いサンゴを覆い、サンゴを死滅させることもあるため、定期的に監視し海藻を除去することが必要である。特に低水温期には海藻の生長が旺盛となるため、頻繁な除去が必要である(図7-1)。また、オニヒトデやシロレイシガイダマシ類のようにサンゴを食害する生物が周辺に分布する場合にも監視が必要である。特に、移植直後はサンゴ切断のためサンゴが粘液を出しやすく、それがオニヒトデを誘引する可能性があるため、あらかじめ周辺のオニヒトデを駆除する必要がある。

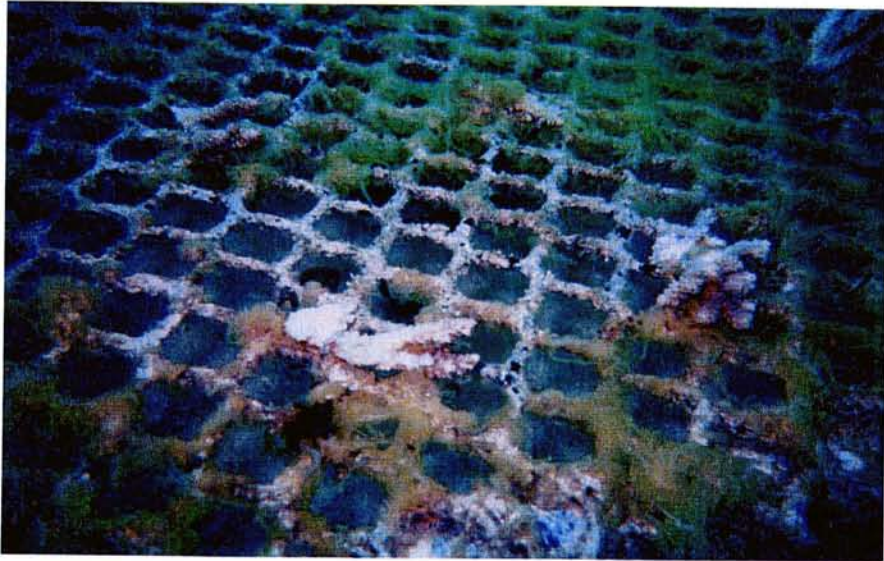


図 7-1. 海藻に覆われた移植基盤上のウスエダミドリイシ (2002 年 3 月)

(2) 投釣と投錨の防止

移植地が海岸に近い場合には投釣の針がサンゴを引っ掛ける可能性があるため、付近に釣りを避けるよう呼びかける看板を設置し、釣客の協力を得る必要がある。

移植サンゴに最大のダメージを与える可能性があるのが舟艇の投錨である。ブイを設置して移植地であることを示すとともに、投錨頻度の高い場所ではモアリングブイを設置し、投錨を避ける措置が必要である。また、移植に漁業者やダイビングサービスの協力を得て、当事者に加わってもらうことが望まれる。漁業者やダイビングサービスにとってサンゴ礁は事業の場であり、サンゴ礁の再生は最大の関心事であることから、積極的な参加が期待できる。移植を行うことによりサンゴ礁への認識が深まり、環境教育的な効果も期待できる。ただし、移植については十分な技術的指導がなされ、自然公園法や漁業調整規則等関係法令が遵守されることが必要である。

沖縄県八重山群島石西礁湖では西表国立公園のサンゴ礁再生のため、環境省国際サンゴ礁

研究・モニタリングセンター、沖縄県、竹富町、八重山海中公園研究所、ダイビングサービスの組合等、サンゴ礁にかかわる機関が参加し、八重山サンゴ礁保全協議会を結成し、その事業の一環として、分割群体の移植を行った。この事業は、様々な基金の助成を得ながら数年に渡り続けられ、サンゴ礁の再生に貢献した。また、この事業がきっかけとなり、同協議会の活発な活動の発展へとつながった（図 7-2）。このような活動はケラマ列島阿嘉島周辺でも行われており、地元の漁協や座間味ダイビング協会が参加し、阿嘉島臨海研究所の協力を得て、リーフチェックやオニヒトデの除去、サンゴの移植などを実施している。



図 7-2. 移植を行うボランティアダイバー

(3) モニタリング

移植や移築をしたサンゴが経時的にどのように生残していくかをモニタリングすることは移植・移築を評価する上で必要である。モニタリングの内容としては次のような内容が挙げられる。

a. サンゴの生存・死亡状況

移植サンゴ群体の死滅状況により次のように分けられる。

生存：死滅した部分が全くない

部分死：部分的に死滅している（死滅部 30%未満）

部分生：部分的に生存している（死滅部 70%未満）

僅生：わずかに生存している（死滅部 70%以上 100%未満）

死滅：生存部が全くない

消失：サンゴ群体が消失している

b. サンゴ活性状況

移植サンゴ群体の状況により次のように分けられる。

良好：ポリプ、共肉部の色彩が正常で、触手の伸長にも異常がなく、また多量の粘膜に覆われることがない。

不良：ポリプ、共肉部の色彩が白化した状態、または表面が多量の粘膜で覆われたり、藻類やカイメン類等が異常に付着して、死滅部が拡大している。

移植サンゴのモニタリング頻度は基本的に季節ごとに行うが、移植直後1ヶ月は不安定期であるので、これを加えることが必要である。モニタリング期間としては最低5年間必要である。着生種苗から作った稚サンゴを海底固着した場合、群体が自然状態に近い景観を呈するまでに4年程度かかると想定されるため、フォローアップ調査を含めて5年間継続することが適当である。

移植の科学的評価のためには、自然群集を対照区として、移植群との比較を行う必要があるが、移植がそもそもサンゴの無い場所の再生を目指すものである以上、付近に自然群集の存在を求めることは道理にかなわないので、対照区の設定を行わないことはやむをえないことであろう。

c. 生息環境のモニタリング

サンゴのモニタリングとともに生息環境のモニタリングも合わせて行い、サンゴの生残変動の要因として把握する必要がある。サンゴの生息に影響を与える環境要因として重要なのは水温、流動、堆積物である。高水温によるサンゴの白化現象が世界的な問題となっているように、水温の長期間にわたる上昇はサンゴに致命的な影響を与える。水温を長期間連続観測することにより移植場所の水温特性を知り、生残対策を検討することができる。最近では安価でコンパクトな自記水温計が開発されており、毎時計測で0.5年は継続できるものもあり、サンゴ礁海域での測定に使用されている（環境省自然環境局 2001）。

水温とともにサンゴの生残に影響を与える可能性があるのが流動である。一般的に潮通しのよい場所ではより多くの種が移植適正を示すので（海中公園センター 1995）、流動は重要な環境要因である。移植場所の流動特性を知る簡便な方法としては、石膏球による測定法がある（鍋島・喜田 1990; 小松 1992; Komatsu and Kawai 1992; 古島ら 2000; 古島ほか 2001）。この方法は時間積分的な流動状況を知ることができるため、場の平均的な特性を知るには適当である。また、安価で簡便に製作できるので測定設定数の制限を受けないであろう。

人為的な影響を受ける環境要因として堆積物があげられる。サンゴ礁ではしばしば表土の流出がおり、特に礁池環境に影響を及ぼしている。堆積物はサンゴの生残に大きな影響を及ぼすので重要な環境要因である。堆積物の堆積状況を知る方法としては目視観察により定性的に知る方法やセディメント・トラップによる方法（環境省自然環境局 前出）、検体の透視度を測定する SPSS 法（大見謝・満本 2001）がある。目視、SPSS、トラップの順に簡単

に実施でき、いずれも目的に応じて有用なデータが得られるので、モニタリングの規模に応じて手法の検討を行うとよい。

この他にも光量子、栄養塩など重要な要因があるが、いずれも長期測定に多大な費用を要するので、可能な限り選択して行うことが適当である。

(4) 再生産の確認

移植サンゴが放卵することができればサンゴの供給源が増加することになり、サンゴ礁の回復にさらに寄与することになる。移植群体の成長に伴って放卵の可能性は増すので、産卵期を確認する。産卵期は年により、海域により異なるが、通常多くの種で初夏の満月前後、夜の満潮時であることが知られているので、この間、水温の上昇傾向に注意しながらポリプの観察を継続して確認する必要がある（図 7-3）。



図 7-3. 成熟したミドリイシ属の生殖腺（下池和幸氏提供）

引用文献

- 古島靖男・岡本峰雄・小黑至・栢 孝雄・松田龍典（2000） サンゴ近傍の海水運動の評価(1)―積算型流速センサーの試作―. 海洋科学技術センター試験研究報告（41）：15-20.
- 古島靖男・岡本峰雄・小黑至・栢 孝雄・松田龍典・小松輝久（2001） パッチリーフ近傍における微細流動の計測. 海洋科学技術センター試験研究報告（43）：125-132.
- 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.

環境省自然環境局（2001）水質調査．平成 12 年度サンゴ礁研究・モニタリング活動推進事業業務報告書：153-157.

小松輝久（1992）石膏球による時間平均流の強さ測定方法の改良と観測例、月刊海洋 24(8)：

Komatsu T and Kawai H (1992) Measurements of time-averaged intensity of water motion with plaster balls. J. Oceanogr. 48: 353-365.

鍋島靖信（1990）石膏ボールによる海水流動の測定法．水産増殖 38(2)：127-133.

大見謝辰男・満本裕彰（2001）サンゴ礁における濁度・水平透明度・SPSS 測定値の関係について．沖縄県衛生環境研究所報 35：103-110.

（藤原秀一）

8. まとめ

(1) 修復技術の進展と比較

わが国におけるサンゴ移植の最も古い事例は恐らく和歌山県の串本海中公園センターが1970年に海中展望塔を建設した際、展望塔周辺の海中景観を修復するため、周辺のサンゴを移植したことであろう。同海域は本州における代表的な造礁サンゴ分布域で、卓状のクシハダミドリイシ *Acropora hyacinthus* が広範に群生することで知られている。同種を用いた移植では1-2年で群体の特徴を示す大きさに成長したことが報告されている(辰喜 1977)。世界的には1960~1970年代にオニヒトデ大発生による大規模なサンゴ食害後、回復の進まないサンゴ礁の復元手法として、分割群体の移植が行われるようになった。現在では人間活動によって荒廃が進んだサンゴ礁の修復活動を進める団体(例えば Reef Ball Development Group, Ltd: www.artificialreefs.org) が活動し、また修復活動や観賞用サンゴの生産を通して、貧しい国の漁民の雇用機会を増やそうとする運動も試みられている(例えば Heeger et al. 1999)。本格的な Coral farming(種苗生産あるいは分割断片の増殖・移植)を軌道に乗せることができれば、栽培漁業関連事業では世界トップの技術を持つわが国研究機関の実績がその進展を支え、優れた修復技術を熱帯の国々に移転し、世界の海洋環境の保全に寄与できるに違いない。

サンゴ礁が広範囲にオニヒトデ食害を受け、ほとんどのサンゴ群集が死滅した場合、その回復には長い時間が必要であることが知られている。沖縄県八重山群島石西礁湖の例では1981年のオニヒトデ大発生で小浜島北部を除くほぼ全域のサンゴが死滅後、石西礁湖全般に目だって回復が認められるようになるまで10数年の時間がかかっている(森 1995)。この間の回復のありようは単純でなく、閉鎖的な地形を呈する礁池内では開放的な礁縁などに比べ回復が遅れることが普通であり、ごく近縁の場所であっても生息環境の差異により回復の度合いが異なることが普通に見られる。例えば、石西礁湖黒島東側のキャン沖礁池の枝状ミドリイシ群集域は石西礁湖でも最も回復の遅い場所である。ここは、礁池としては深く、平均水深が4m近くあり、潮通しもよい。この枝状ミドリイシ群集はかつて高さが1m以上あり、八重山海中公園研究所に残された骨格標本からオトメミドリイシ *Acropora pulchra* の群生域と推定される。このような群生はおそらくまれと思われ、特殊な環境条件が分布を許したものと考えられるが、群生の形成には、相当の時間がかかるものであろう。幼生加入の偶然性や波当りや水の流入など水域の物理環境がサンゴの生産や礁形成に与える影響についてはほとんど研究されていない。幼生放流や移植のための適地の選定をめぐっても、研究の進展が強く望まれている。

1980年代からは陸域表土の流出による土砂の堆積が顕著となり、これがサンゴ幼生の着生を阻害したり、成長を妨げたことが考えられ、回復の過程を複雑にした。サンゴ幼生到達の可能性、着生した幼生の生残率のみならず、サンゴ群集の生息環境の悪化に対する生残率の違いは場所によるサンゴ礁の回復度を大きく変える要因となる。

このような状況下で、自然による回復を待つだけでなく、サンゴ移植等積極的な人為的な

修復を試みることは、水産生物の生息・産卵の場や景観の再生という点において意義がある。さらに、移植サンゴが再生産をし、放卵を行えば、幼生供給源の増加により、幼生の分散度が高まり、サンゴ礁の回復に寄与する。

サンゴ礁の修復技術は当初、既存群体の分割による移植断片の作成、固着から始まり、今日ではサンゴ移植は有性生殖を利用した種苗生産技術、幼生着生誘導技術へと展開し、既存群集に手を加えない方向へと進みつつあるように思われる。今後さらに研究が進められ、サンゴ礁修復技術が一層発展することが予想されるが、本書では、ひとまず現在までの研究開発の進展状況を整理し、体系的にとりまとめた。以下にそれら修復技術の比較を行った（表 8-1）。

表 8-1. サンゴ礁修復技術の比較

	種苗生産法	種苗放流法	幼生着生誘導法	分割群体移植法	稚サンゴ移植法
技術概要	室内における採卵あるいは野外における採卵後、室内において卵・幼生飼育。基盤への着生。稚サンゴ着生基盤を海底固着	種苗の生産は左に同じ。サンゴ幼生を運搬し、海底に放流	野外に設置した着生具や表面加工構造物に浮遊幼生を着生誘導	野外における既存群体の分割による断片作成。海底固着	野外からの稚サンゴの採集。移植し、海底固着
再生までの時間	夏季採卵、次年度春季海底固着、計5年程度	夏季着生、次年度春季海底固着、計5年程度	夏季着生可能、着生すれば計5年程度	春季海底固着、計3年程度	通年（春季）移植、計3年程度
施設、機材	飼育・蓄養装置、着生基盤、接着剤。	飼育・蓄養装置。表面加工構造物	着生具、表面加工構造物	針金、釘、ケーブルタイ、接着剤	接着剤
労力*	飼育・蓄養に約1週間程度、毎日の管理必要。海底固着100個/人/日（10㎡）	飼育・蓄養に約1週間程度の管理必要	着生具の設置・回収、構造物表面加工	海底固着100個/人/日（10㎡）	左に同じ
再生の規模	飼育・蓄養施設、海底固着数はダイバー数に制限される	飼育・蓄養施設に制限されるが比較的広範囲	着生具の海底固着数はダイバー数に、構造物の表面加工は規模に制限される	海底固着数はダイバー数に制限される	左に同じ

* 海底固着後の管理労力は共通なので省略

ある程度の生態的知見と移植技術があれば、すぐにでも実施可能なのは分割群体の移植である。釘と針金さえあれば実施可能であるため、最もはじめに採用された方法でもある。その後、海中で使用可能な接着剤が使われるようになり、広く普及し移植の代表的方法となっ

た(図8・1)。一方、有性生殖を利用し、ドナーへの影響を小さくしてサンゴを増やそうとする試みは、幼生を室内で生産する方法、野外で採苗する方法、着生を誘導する方法などがあるが、それぞれに特徴があり、状況に応じて最適な方法を選択することが望ましい。種苗生産法は室内の水槽や野外の生簀を用いて種苗を生産する方法で、最も費用、労力がかかるが、相対的に安定して種苗を得ることができ、また種を選択することができる。種苗放流法は浮遊幼生の挙動予測の確実性が高まれば、種を選択をしながら、種苗を広範囲に着生させることが可能である。幼生着生誘導法は最も費用、労力がかからない。幼生の到達が気象、海象に左右されるので、幼生スリックを移送し、構造物付近に滞留させる方法を開発することができれば、修復を確実にすることができる。

サンゴの成長については、那覇港における6年間の連続観測結果から山本ほか(2002)は水深1m傾度10°での成長近似式を次のように示している。

$$\text{被度 } y = 0.0227e^{1.25t} \quad (R^2=0.69, n=9, t: \text{年})$$

なお、グレートバリアリーフの、ヘロン島における自然群集の調査報告から推定した水深0.5mのサンゴの成長近似式は次のように示されている。

$$\text{被度 } y = 0.0261e^{1.10t} \quad (R^2=0.95, n=4, t: \text{年})$$

これらによれば、サンゴ被度の増加は1～5年目まで急速に増加し、6年目から安定成長期に入るとされているため、表8・1で示した再生までの時間を5年程度とした。また、7節－3でモニタリングの必要期間を5年間とした。

表8・1で示した技術以外にも6節－3で述べたコブハマサンゴ全群体の移植例があるが、この方法は移植によるサンゴ礁の再生とはやや性格が異なり、消滅する可能性のある群生の避難的性格が強いので、事例紹介にとどめた。サンゴ礁の移築も同様の理由によって比較には入らなかった。

(2) 今後の研究課題

今後のサンゴ礁修復技術は幼生を扱うことが主流となると予想される。比較的閉ざされた海域であれば、幼生の挙動予測は比較的容易と思われるが、外海域では吹送流により短時間で遠距離移送されると予想されるため、幼生スリックの挙動予測が不可欠となる。しかし、浮遊幼生の挙動予測を行うにはあまりにも海洋学的情報が不足しており、この分野の調査研究の発展が望まれる。

移植や放流に当って適地の選択は極めて重要な問題である。いうまでもないことだが、修復は新たな環境に移植したサンゴが短期間で成長し、順調に子孫を残して生息範囲を拡大して行かねば成功ではない。この点で、浮遊幼生がどのような環境に着生するのかを含めて、サンゴの全生活史の各段階と種間競争やスズメダイなどによる食害の効果などの生物学的要因を含めた現場要因の関連を詳しく明らかにする必要がある。先にも述べたように、殊にサンゴ礁域での水の流れなどのミクロあるいは中規模な物理学的要因についての調査研究にはこれまでほとんど見るべきものがなく、今後の重要な研究課題である。

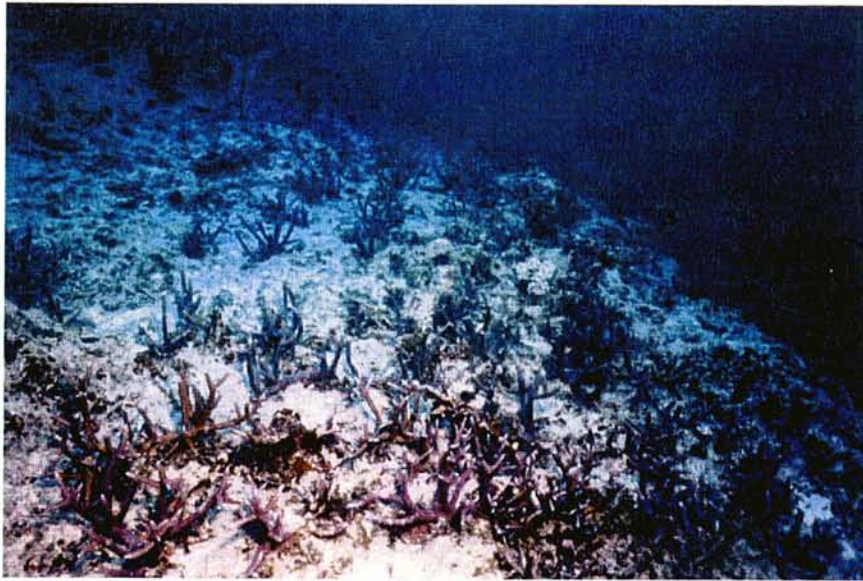


図 8・1. 移植された枝状ミドリイシ

最後に修復事業がおこす可能性のある攪乱と遺伝子多様性の低下について述べたい。自然条件下で卵が分散する範囲での移植は問題ないが、そうでない遠距離の地へのサンゴの輸送は地域的遺伝子の特性を乱すおそれがある。また、造礁サンゴには遺伝的多様性が高いことと雑種形成がよく知られている(Hatta et al. 1999; Willis 1997)から、種苗生産にしても分割群体の移植にしても、ドナーとなる親サンゴは遺伝子プールが多様に保たれている群体を用いなくてはならない。このためにはできるだけ広範囲に分布している多くの群体から得た卵や分割群体が必要である。もしドナーの群体数が限られていたり、それらの遺伝子プールの多様性が欠如していれば、環境や病原体にきわめて弱いサンゴの群生ができてしまう。ハマサンゴの *Polites compressa* では比較的大きな環境の攪乱のある場所で遺伝的多様性が大きく、攪乱が小さいところで低いことが知られている(Hunter 1993)。現在進歩が著しい分子生物学的技術を用いて現場のサンゴ群集の遺伝子多様性の大きさをあらかじめ推定し、室内産卵による種苗生産や現場からの分割群体の移植の際の参考にすべきである。

引用文献

- Hatta M, Fukami H, Wang W, Omori M, Shimoike K, Hayashibara T, Ina Y and Sugiyama T (1999) Reproduction and genetic evidence for a reticulate evolutionary history of mass-spawning corals. *Mol. Biol. Evol.* 16: 1607-1613.
- Heeger T, Cashman M and Sotto F (1999) Coral farming as alternative livelihood for sustainable natural resource management and coral rehabilitation. *Proc. Ocean. Intl. Pacific Rim, Singapore*: 171-185.
- Hunter CL (1993) Genotypic variation and colonial structure in coral populations with different disturbance histories. *Evolution* 47: 1213-1228.

森 美枝 (1995) 石西礁湖におけるイシサンゴ類とオニヒトデの推移、海中公園情報 (107) : 10-15.

辰喜 洸 (1977) 海中景観の復元、海中公園情報 (41) : 10-12.

山本秀一・高橋由浩・住田公資・林 輝幸・杉浦則夫・前川孝昭 (2002) 人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析、海岸工学論文集 49 : 1186-1190.

Willis BL, Babcock RC, Harrison PL and Wallace CC (1997) Experimental hybridization and breeding in compatibilities within the mating systems of mass spawning reef corals. Coral Reefs 16 (Suppl.): S53-S65.

(藤原秀一・大森 信)

Manual for restoration and remediation of coral reefs

Edited by Omori M (Akajima Marine Science Laboratory)

Contents

Forward Department of Natural Environment, Ministry of Environment

1. Conservation, restoration and remediation of coral reefs: Background and significance Omori M

2. Previous research and undertaking of coral reefs restoration Omori M & Okubo N

3. Restoration technology using sexual reproduction

3-1. Seed Production

Hatta M, Iwao K, Taniguchi H & Omori M

(1) Sampling of eggs and embryos from the sea

(2) Spawning inducement

(3) Maintenance and culture

(4) Mass production of larvae

(5) Transportation

(6) Inducement of settlement and metamorphose

(7) Substrates

(8) Introduction larvae to substrate

(9) Culture of polyps on substrate

3-2. Introduction of larvae to artificial reef Fujiwara S

4. Restoration technology using asexual reproduction

4-1. Transplantation of coral piece Okubo N

(1) Sampling of donor coral

(2) Size of suitable pieces

(3) Transportation

(4) Fixation methods and choice of place

(5) Choice of place

(6) Preferable substrate

(7) Preferable season

4-2. Transplantation of juvenile corals Okamoto M and Nojima A

(1) Sampling

(2) Method of transplantation

(3) Evaluation of the method

5. Transplantation of whole coral colony and coral reef

Fujiwara S and Omori M

5-1. Transplantation of whole coral colony

5-2. Replant of coral reef

- (1) Selection of coral reef and choice of place
- (2) Preliminary test
- (3) Sampling
- (4) Transportation
- (5) Placement
- (6) Monitoring

6. Development of underwater engineering for coral reef restoration

6-1. Experiment 1. Restoration using sexual reproduction

Okamoto M and Nojima A

- (1) Introduction
- (2) Conception of methodology
- (3) Problem of use of substrate
- (4) Development of new artificial substratum
- (5) Design and construction of substrate
- (6) Larval settlement and replant of substrate
- (7) Evaluation of methodology and perspective
- (8) Conclusion

6-2. Experiment 2. Transplantation of coral piece: *Acropora formosa* and *A. hyacinthus*

Okubo N

- (1) Material and methods
- (2) Results
- (3) Discussion

6-3. Experiment 3. Transplantation of whole coral colony: *Porites lutea*

Hosogaya S

- (1) Method
- (2) Results
- (3) Conclusion

7. Maintenance and culture of polyps on substrate, transplanted coral piece and replaced reef

Fujiwara S

- (1) Removal of sediments, seaweeds and predators
- (2) Problems of fishing and anchoring
- (3) Monitoring
- (4) Reproduction

8. Concluding remarks

Fujiwara S and Omori M

(1) Techniques of reef rehabilitation: Development and comparison

(2) Future subjects to study