

第 5 章

サンゴ礁の修復と再生

世界のサンゴ礁生態系が人的攪乱によって衰退している。自然の再生能力の限界を越えて攪乱が加えられたサンゴ礁は、衰退の道を進むばかりである。人間がサンゴ礁の自然と共存していくためには、これ以上人的攪乱を与えないようにすることはもちろんのこと、人間の手によって衰退してしまったサンゴ礁については、人間の手によって再生を促す必要がある。この章では、わが国で行われているサンゴ礁の修復技術開発と、再生に向けた取り組みについて述べる。

5-1 修復と再生の技術

藤原秀一・大森 信

1 はじめに

世界のサンゴ礁生態系は乱獲と汚濁のために100年前から衰退傾向にあり、近年の白化現象や病気の蔓延がこれに拍車をかけているため、早急に保全対策を実行しないと20～30年以内に衰亡してしまうという (Pandolfi *et al.* 2003)。開発途上国ではダイナマイトや毒物による破壊的漁法がさらに加わり、サンゴ礁は深刻な状態を呈している。わが国のサンゴ礁でも、1970年代からのオニヒトデ (*Acanthaster planci*) 大発生による食害、表土の流出、最近の高水温による白化などのため、サンゴ群集は繰り返し攪乱を受け、衰退の傾向にある。

これらの動向を受けて、1995年には日米豪等関係国が参加して国際サンゴ礁イニシアチブ (ICRI) が構築され、サンゴ礁保全に関して国際的に議論する体制が整った。ICRIでは様々な保全のための活動が考えられているが、最近管理の課題としてその重要性が認識され、注目を集めているのがサンゴ礁の「修復・再生」である (ICRI 2003)。

オニヒトデ大発生による食害等のため衰退したサンゴ群集へのサンゴ幼生の新規加入は、地形や繁殖期の気象・海象条件などに左右されるため、回復の程度は場所により大きく異なる。そのため、自然のままでは回復が遅いサンゴ礁において、人為的に修復・再生を行って回復を早め、幼生供給源の拡大、他の動物のすみかの提供、海中景観の改善などに資することが期待されている。

本節では、まずサンゴ礁にこれまでどのような攪乱が起り、それに対してどのような回復のための努力がなされてきたかを、沖縄県八重山群島石西礁湖を例として紹介し、続いて回復のために行われてきたこれまでの修復・再生に関する調査研究について概観するとともに、修復・再生技術の現況について述べ、将来の展開について考察したい。

2 石西礁湖における これまでの回復への努力

沖縄県八重山群島の石西礁湖はわが国最大規模のサンゴ礁で、全域が1972年に西表国立公園に指定されている。国立公園に指定された後、国は管理事務所を石垣市に置き、管理を開始した。また、1975年には(勲)海中公園センターが石西礁湖の黒島に八重山海中公園研究所を設置し、サンゴ礁の調査研究にあたったことなどから、国立公園指定以降の石西礁湖の変遷は比較的よく調べられている。国立公園指定当時、石西礁湖ではサンゴ群集に大きな食害をもたらすオニヒトデの大発生はまだ知られておらず、また、大きな人為的攪乱もなかったことから、ほぼ「原始的なサンゴ礁の極相の状態」を示していたと考えられる。その状態は、1980年に環境庁が石西礁湖の海中景観の保全と活用計画策定のために、カラー空中写真 (国土地理院1977年撮影) 画像を基に礁湖のサンゴ群集の分布状況を調査・作成したサンゴ類分布図から明らかである (環境庁自然保護局 1981)。同分布図から、石西礁湖では被度の高い枝状ミドリイシ (*Acropora*) の分布が、小浜島東部から竹富島を経てウマノハピーにかけて、ウラビシから黒島キャングチ礁池にかけて及びマイビシ付近に広がり、サンゴ群集がほぼ最大限に成長した状態だったと推定される。

しかし、1980年調査直後に石西礁湖でオニヒトデの大発生が起り、礁湖のサンゴは食害によって小浜島北部を除いてほぼ全域で死滅した (福田・宮脇 1982)。この間、国、県、地元の人々によって大規模なオニヒトデ駆除が実施されたが、大発生の規模には追いつかなかった。その後、1980年代にはサンゴの回復はほとんど進まず、停滞した状態が続いた。

オニヒトデ大発生による攪乱で衰退したサンゴ礁の

現況を把握するため、環境庁（現 環境省）は1991年に自然環境保全基礎調査・サンゴ礁調査を実施し、最新の空中写真を基に行った現地調査結果から、石西礁湖のサンゴ礁分布を明らかにした。同図は石西礁湖のサンゴ群集が最も衰退した後、回復に向かう変わり目の状況が把握されたものである。調査結果（環境庁自然保護局 1994b）によれば、石西礁湖のサンゴ群集は被度5%未満（被度階級+）の割合が53.7%、被度5~50%（被度階級 I, II）が36.4%、被度50~100%（被度階級 III, IV）が9.9%で、礁湖の半分以上が被度5%未満の低被度域であった。

このような状態が続くサンゴ礁の回復に必要な科学的知見を得るため、環境庁は研究に着手し、1992~1994年に「サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究」を行い、サンゴ移植によるサンゴ群集の復元手法について報告した（環境庁自然保護局 1993, 1994a, 1995）。

またこの頃、石西礁湖の回復を図るための枠組み構築の動きが起こり、環境庁西表国立公園管理事務所、沖縄県自然保護課、石垣市、竹富町、地元ダイビング組合、八重山海中公園研究所が参加して、1990年4月に八重山サンゴ礁保全協議会が設立された。同協議会はパイロット的の事業として造礁サンゴ（以下、サンゴ）群体の株分けの移植（断片移植）を富士フィルム・グリーンファンドの活動助成金を得て、竹富島の南約1kmの海域で実施した。この移植事業では1,000m²に5,000本のスギノキミドリイシ（*Acropora formosa*）などの枝状ミドリイシの断片が用いられた。同協議会は、日本アムウェイ株式会社の助成金を活用して、翌年以降も数度に渡り移植を実施した。これらの移植サンゴの状況については、御前（1998a）により追跡調査の結果が報告されている。

1990年代に入り石西礁湖のサンゴ群集は次第に回復の兆しを見せ始め、後半にはかつての状態に回復するほどになったが、1998年に起こった長期間の異常高水温による白化現象が広範な死滅をもたらした。

沖縄県では、1972年の日本復帰後、本島を中心に大規模な公共工事が相次いで行われた。亜熱帯島嶼の自然条件への配慮が不十分であった当時の土地改良事業では、大雨の後には濁水がそのまま海に流入するようになり、その結果多くのサンゴが死滅した。このように沖縄では、オニヒトデ大発生、白化現象とともに、表土流出による赤土汚染もサンゴ礁劣化の大きな要因となった。環境省

は、2000~2002年度、地球環境研究総合推進費によって、石西礁湖において4種のサンゴ断片を5カ所の異なる堆積環境に移植し、微細な懸濁物質に対する耐性に関する研究を行った（藤原 2003）。また、八重山サンゴ礁保全協議会では事業の範囲を拡大し、赤土対策のための一般市民を巻き込んだ堆積物調査やサンゴモニタリング調査を展開し、地域ぐるみの活動へと発展させることに尽力した。

3 修復・再生技術

多くのサンゴは、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、ポリプが完成するとまもなくクローンポリプを作り始めて群体になる。群体はその後出芽を続けてポリプを増やして成長するが、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して新たな群体を形成することがある。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、わが国では1990年代から本格的に行われるようになった。この断片移植では、実海域の岩盤等に直接固定するほか、一旦基盤に定着させ、成長させてから基盤ごと実海域に移す方法も知られている。これら以外にも、国内でも様々な修復・再生に関する試みが行われてきた。例えば、断片を取り付けたロープを海中に垂下して群体を成長させるという増殖技術があり、特許を取得している。また、沖縄県知念村沖では、ワイヤーを張った台上に断片を移植して電流を流し、海水中の炭酸イオンとカルシウムイオンの沈着（石灰化）を促進させることによって、サンゴの成長を促すという試みも行われた（Kudo and Yabiku 1988）。

ここでは、これらの修復・再生技術の中から、無性生殖を利用した技術として、これまで主として行われてきた断片移植法と稚サンゴの移植について紹介し、次いで有性生殖を利用した技術として、今後発展が期待される種苗生産技術について述べる。そして最後に、既存の群体やサンゴ群集そのものを移植・移築する技術について述べ、それぞれのこれまでの調査研究の経緯と技術の現状を紹介する。

1. 無性生殖を利用した技術

●サンゴ断片移植

これまでの世界のサンゴ断片移植については大久保・大森 (2001) によりレビューされている。サンゴ移植については多くの試みが行われてきたが、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もあまり行われてこなかった。日本でも、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、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。移植技術の進歩は、サンゴ礁の修復や人工サンゴ礁の造成のほか、観賞用サンゴ群体の生産・増殖を通して天然のサンゴ群体の採取量を少なくする効果などが期待されることから、知見の充実が望まれる。これまで行われてきたサンゴ断片の移植技術については、大久保 (2003) が自身の研究結果も含めて取りまとめているので、それを以下で要約して紹介する。

移植断片を採取した場合の採取元のサンゴ群体 (以下、ドナー) への影響に関する生理学的知見はほとんど無いが、経験的には、十分に産卵可能なサイズの群体組織の8割程度が残ればドナーは確実に生残し、翌年の産卵にも大きな問題はないようである。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が、Becker and Muller (1999) は長さ2.5cm未満の断片でも移植はできるだろうと述べている。

運搬方法は、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暖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出して運搬できるかどうかは種によって異なる。オヤユビドリイシ (*Acropora gemmifera*) やホシキクメイシ (*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、ショウガサンゴ (*Stylophora pistillata*) や *Rumphella* sp. は水浸したまま運ぶ必要がある (Kaly

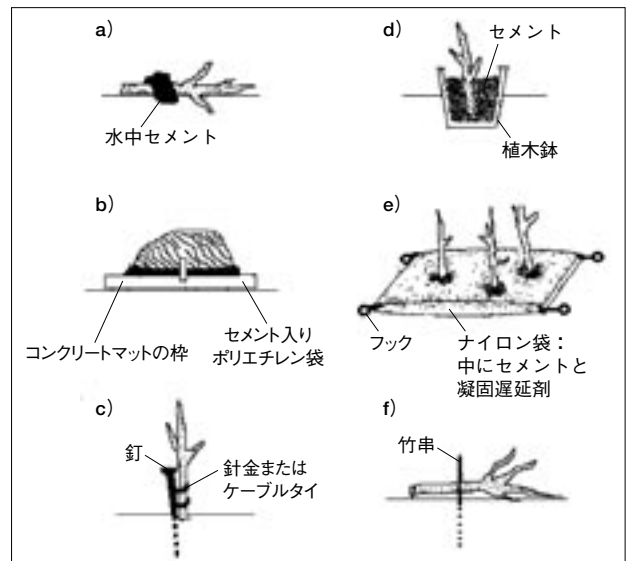


図1 サンゴの断片を移植する際の固定方法例 (大久保・大森 2001)

1995)。基本的には水から出さないで運搬するのが好ましい。

断片を移植する際に重要なのは、①断片の支持材 (釘等) を岩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。予め岩盤に打ち込んだ釘に断片を添え、ケーブルタイ (プラスチック製の締め具) で固定した場合 (図1c)、断片が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ごと基盤から抜け落ちることがあるが、岩盤と釘をエポキシ系の水中用の接着剤で固定すれば損失はほぼ防ぐことができる。断片を水中セメントを用いて固定する場合は、岩盤についている藻類等をワイヤーブラシなどで予め取り除き、水中セメントがある程度硬化しはじめてから断片を移植すると、安定して固定することができる。研究者によっては水中セメントに石灰を等量加えて使っている場合もあるが、水中セメントが移植断片に与える化学的影響は十分に検証されていない。また、断片 (枝の場合) は一般に基盤に対して水平方向よりも鉛直方向に固定した方が結果は良かった。これは、堆積物などの影響を小さくできるためだと考えられる (大久保ら 2002)。

採取した断片を人工海中構築物等に移植する場合、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、フェライト入りコンクリート、素焼きタイル、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及び鉄、自然のサンゴ岩の5種類を用いて比較が行われた。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入りコンクリートであった（大久保 2003）。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、スギノキミドリイシの10cm断片を移植したが、固着率は通常のコンクリートに移植した場合とほとんど変わらなかった。このように、コンクリートを用いた基盤は、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。

サンゴは種によって生育条件が異なるため、ドナー群体が生息していた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）を移植前に予め調査する必要がある。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かった（Auberson 1982；環境庁自然保護局 1993, 1994a, 1995）。移植する場所にオニヒトデやシロレイシガイダマシ（*Drupella cornus*）などのサンゴを捕食する生物が見られるかどうかも予め調べる必要がある。

移植後の生残率と温度及び日長光周期の関係を調べた実験では、生残率は温度に逆相関し、日長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、白化も起こりやすいので、高水温期には断片の死亡率が高くなる（Yap and Gomez 1984）との報告もある。

この断片移植方法につきまとう大きな問題として、ドナーを壊して断片を得るといった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が挙げられる。

●稚サンゴ移植

野外において稚サンゴを採取して移植する方法については、岡本・野島（2003a）が取りまとめている。以下はその要約である。稚サンゴは、陸上用のエアドリルを使って基質ごと採取し、移植先では、稚サンゴを採取したのと同じ口径の固定用の孔をコアドリルで掘る。孔の中には少量の水中セメントを入れ、その上から採取したコアを差し込んで固定する。移植先がシルトなどの堆積しやすい環境である場合は、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（写真1）。この方法では、採取した基質部が滑



写真1 採取した稚サンゴの移植（岡本・野島 2003a）。稚サンゴをコア状に採取し同径の穴に水中ボンドを入れて固定する

らかなコア状に統一されているため、海中や船上での運搬に際して、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が少ない。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であるため、大量の移植を行う場合でも、同一基準で作業することができる。

2. 有性生殖を利用した技術

●種苗生産

有性生殖を利用したサンゴ礁修復技術の開発は、日本では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 Heyward A.、Harrison P.、Morse D. & A. 夫妻、杉山、服田らの協力を得て行われた。これは、飼育水槽内でサンゴを産卵させたり、スリック（一斉産卵の翌朝にしばしば出現し、帯状に海面を漂流するサンゴの受精卵の密な集団）や親群体から胚や幼生を採取して、生けすや水槽に移して中間育成し、幼生を適地に移して着生を促進させたりした後に移植するものである。当研究は日本財団他の助成を得て行われた。海外では、Heyward *et al.* (2002) がオーストラリアで同様の種苗生産に成功している。種苗生産については、一斉産卵を行うミドリイシ属について前出の服田ら（2003）がとりまとめており、以下はその要約である。

南西諸島では5～6月の満月前後に、ミドリイシ属の一斉産卵が起こるので、スリック（写真2）を発見して採取する。また、産卵直前にサンゴ群体の上部に漏斗状の採集装置を設置することによって、バンドル



写真2 沖合漂うスリック（服田ら 2003）

（卵と精子がひとかたまりに包まれた袋）を採取し、室内で交配する方法もある（北田 2002）。ウスエダミドリイシ（*Acropora tenuis*）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（下村ら 2002）。また、小規模な実験研究の目的であれば、過酸化水素を用いて産卵を人為的に誘発することも、ミドリイシ属とコモンサンゴ属（*Montipora*）のいくつかのサンゴでは可能である（Hayashibara *et al.* 2003）。

得られた幼生の飼育は、小規模な実験であれば小型容器で、また、10万個体を越えるような大規模飼育においては、大型水槽に分散させて飼育する（下村ら 2002）。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が、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であった。青田ら（2003）は2m角生け簀（深さ1.0m）を8つ用いて、200万個体以上の幼生を育成することに成功している。

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の着生を誘導できることが確認されている（Morse *et al.* 1996）。さらに、神経ペプチド Hym-248を用いて、より高く安定した着生を誘導できることも示された（Iwao *et al.* 2002；Hatta and Iwao 2003）。また、近年、サンゴモからミドリイシ属のサンゴ幼生の着生を誘導するバクテリアが単離され（Negri *et al.* 2001）、わが国でも追跡研究が行われている（服田未発表）。

幼生の着生基盤については、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

られてきたが、何れの素材も前処理なしに使用するよりも、予め海中に放置して表面に他の生物を附着させてから使用した方が、より多くの着生が生じる。

野外に設置した着生基盤への幼生の導入方法としては、次のような試みが行われた。㈱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5.5m × 横5.5m × 高さ6.0mの圃場を作り、阿嘉島から船で運んだ164万個体のサンゴ幼生をダイバーがその中に放流することによって、圃場の海底に設置したブロック上へ幼生を集中的に着生させた（青田ら 2003）。また Heyward *et al.*（2002）は、採集したスリックを海上に浮かべた生け簀に収容して幼生まで飼育した後、生け簀を目的地に移動させて、海底に設置した着生基盤を囲ったテントと生け簀との間をホースで接続し、幼生を生け簀からテント内へと誘導することによって、幼生を集中的に基盤上に着生させる試みを行った。

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、サンゴ礁上に置いたりしておくと、通常1週間以内に褐虫藻がポリプ内で共生を始めることが確認できる。初期ポリプを大きな群体まで飼育した例はこれまでにいくつかある（御前 1998b, 2002；Petersen and Tollrian 2001）が、大量育成に成功したという報告はまだない。

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も必要である。

●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。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、構造物に接近した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。人工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2）。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（財港湾空間高度化センター・港湾海域環境研究所 1999）。

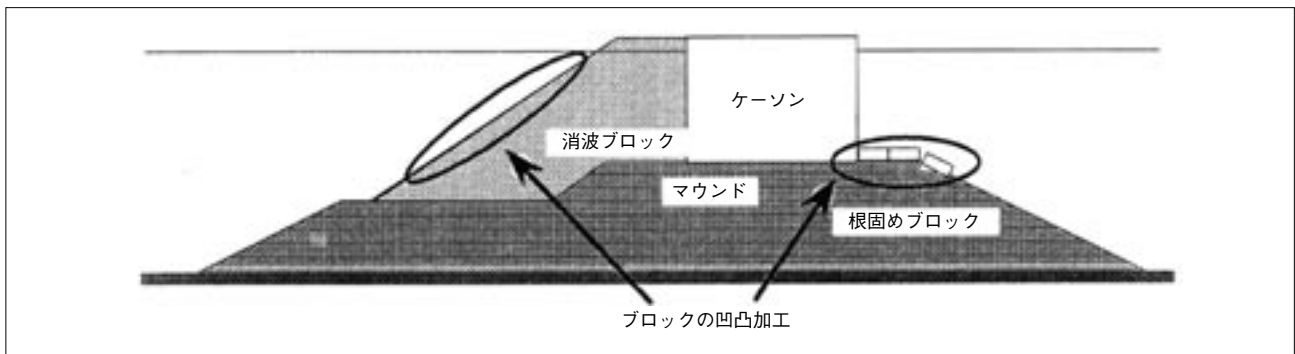


図2 防波堤の基質を加工してサンゴ幼生の着生を促す場合の基質加工の対象部（港湾空間高度化センター・港湾海域環境研究所 1999）

- (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（ブロック末端面）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に関する調査結果によれば、粗度の大きな角材加工でサンゴの着生群体数が多かったという顕著な傾向がみられた。なお、基質の傾斜角度については、水深2m付近で、鉛直面よりは水平面や45度面の方が被度、群体数とも多くなる傾向が得られた。但し、水深10m付近では傾斜による差異は認められなかった。

●幼生着生具による採苗

野外で幼生を採苗するための着生具の開発が岡本・野島(2003b)によって行われている。以下はその要約である。

着生具は、玩具の木製のコマに似た形状で、「着生板部」、「スペーサー部」、「連結挿入部」から構成され、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よう工夫されている(図3)。これ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℃の酸化焼成で作成され、安価に大量生産できる。

着生板部は、上面には他の着生具の連結挿入部が入る

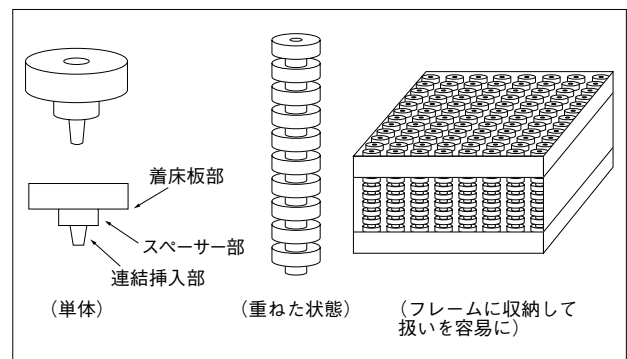


図3 サンゴ着生具（岡本・野島 2003b）

孔があり、下面には複数の溝が配置されていて着生面積を増やす工夫がされている。スペーサー部は、着生具を複数個重ねる際に着生板間に一定の隙間を保つ役割を有し、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となっている。着生具を重ね合わせてフレーム状に配置することによって、海中で多数の着生具を容易に運搬・設置できるとともに、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などもできるよう配慮されている(図3)。

連結して採苗した着生具を移植する際は、それぞれ個々に切り離してから、岩盤にドリルで小さな孔を開け、接着剤を入れて、連結挿入部をその孔に挿入して固定する。連結挿入部は、採苗から移植までの間、着生板上面の孔に入ったままなので、付着生物は付きにくい。稚サンゴは着生板部の下面に着生し、そこから側方に出て成長することから、スペーサー部は着生板下面に付着した稚サンゴを移植時に傷つけないよう保護する役割を果たしている。

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

定したと考えられる約1カ月後に、稚サンゴを育成するために着生を図った着生具をより穏やかな海域に移動する。近距離であればダイバーによる海中移動、少し距離がある場合はエアリフター（風船状の袋の付いた吊り具。浮力を利用して水中の物体を吊る）で浮かせて簡便に海面輸送を行うことができる。

本方式での幼生着生実験は現在実験中であり、移植工を行う段階には至っていない。また、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。

3. 群体の移植及びサンゴ群集の移築

サンゴ移植はサンゴ群集の回復を目指して、既存の群体、特に枝状ミドリイシ群体を採取、分割して植え付ける断片移植（前述）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などには、事前に可能な限り多くの群体をそのまま移植、あるいは岩盤も含めて群集ごと移築することも行われている。これらの移植・移築の場合も、事前に適地の選択や移植・移築先の水深、波あたり、底質などについての総合的な調査が不可欠であるが、知見は不足している。そのため、開発工事の際に実施された移植・移築後のサンゴやサンゴ群集の生育状態に関する観察結果の積極的な公表が望まれる。海外では岩盤ごと切り取ったサンゴ群体を組み合わせて、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、近くに移築するものに限られている（福西ら1988）。

●群体の移植

これまで実施された例として、沖縄島の古宇利大橋建設工事に伴うコブハマサンゴ (*Porites lutea*) の移植が細谷(2003)により報告されている。以下はその要約である。

塊状ハマサンゴ類は大きなもので直径1mを超え、断片移植には不向きである。そのため、移植事例では、比較的取り扱いやすい直径20~30cmの群体の移植が行われた。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、水中セメントを用いて基部接着を行った。固着基盤はコンクリートの人

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する方法が実施され、有効であることが実証された。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。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、一般に礁池には砂礫底域が多く、適当な固着基盤が求められない。砂底に移植せざるを得ない場合には、海底に鉄筋杭などを打設し、これを微調整して固着杭とするとよい。

●サンゴ群集の移築

福西ら(1998)や(助)港湾空間高度化センター・港湾海域環境研究所(1999)は、「サンゴ礁と共生する」港湾整備の計画手法の一つとして、サンゴ群集を岩盤ごと移動することによって保全する手法を紹介している。また、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ら(2000, 2001)、沖縄総合事務局平良港湾工事事務所(2002)等で報告されている(図4)。以下はそれらの要約である。

サンゴ群集の想定される移築先については、事前に実態調査を行って具体的な移築先の候補地を選定し、予備実験を行って、適地判定の確認を行うことが望ましい。サンゴ群集の移築に際しては他に例がなかったため、平良港では1998、1999年度には油圧式ショベル型掘削機の水中バックホウを用いた。2000年度には、海水噴射装置であるウォータージェットを使って岩盤を掘り上げ、サンゴにストレスを与えないよう、エアリフトによって水面に露出させないで十分大きなサンゴ群集を輸送することが可能になった。この手法により、港内側の防波堤マウンド周辺にまとめて移築が行われた。

移築したサンゴ群集は、ハマサンゴ科(Poritidae)、ヤスリサンゴ科(Siderastreidae)、キクメイシ科(Faviidae)等から構成されていた。1999年1月に移築したサンゴ群集は付着していた岩塊自体が小さく、台風時の波浪等によって一部が流失した地点があった。このような地点ではサンゴの被度が低下していたものの、安定していた岩盤のサンゴ群集はほぼ全て生存していた。また、移築先の環境条件による違いも見られず、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

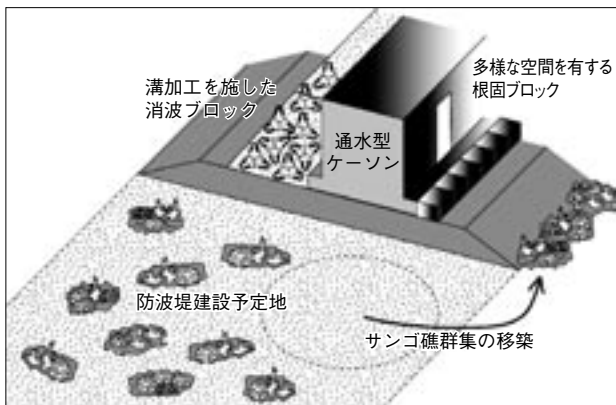


図4 平良港における環境共生型防波堤の概要（石井ら 2001）。防波堤の建設などで消失するサンゴ群集を他の安全な場所に移築する

かったことが確認された。なお、2000年10月（21カ月後）の調査では、被度が増加した地点もみられた。

サンゴ群体の移植技術と比較すると、サンゴ群集の移築技術は、サンゴ以外の付着性動植物も同様に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挙げることができる。この工法は、特許出願中の技術である。

4. 種苗と移植群体および 移築サンゴ群集の管理法

移植後の断片には固着部などに海藻が付着しやすく、海藻の成長に伴ってサンゴを覆い、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。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。また、移植直後は折られたサンゴは粘液を出しやすく、それがオニヒトデを誘引する可能性があるため、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している場合には、予めそれらを駆除しておく必要がある。

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、釣客の協力を得たい。また、移植サンゴに大きな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（舟艇係留用ブイ）を設置し、投錨を避ける措置が必要である。

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；①サンゴの生存・死亡状況、②サンゴの活性状況、③生息環境のモニタリング、が挙げられる。

移植サンゴのモニタリングは、基本的に季節ごとに行うが、移植直後1カ月は不安定期であるので、これを加える。モニタリング期間としては、着生種苗から作った稚サンゴを海底固着する場合、群体が自然状態に近い外見を呈するまでに4年程度かかる想定されるので、フォローアップ調査を含めて最低5年間継続することが望ましい。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、サンゴの成長・生残変動の要因として把握する必要がある。サンゴに影響を与える主要な環境要因としては、水温、流動、堆積物、食害などが挙げられる。

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ことから、水温を予め長期間連続観測することによって、移植場所の水温特性を把握し、生残対策に役立てることができる。最近では安価でコンパクトな自記式水温計が開発されており、毎時計測で約半年間連続測定できるものもあり、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）。海水の流動では、一般に潮通しのよい場所ではより多くの種の移植ができるとされている（環境庁自然保護局 1995a）。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（古島ら 2001；Komatsu and Kawai 1992）。また、堆積物はより人為的な影響を受けやすい要因である。サンゴ礁ではしばしば陸域からの表土の流出がおこり、特に礁池環境に悪影響を及ぼしている。堆積状況は目視観察やセディメント・トラップ法（環境省自然環境局 2001）、検体の透視度を測定する SPSS 法（大見謝・満本 2001）などで測ることができる。目視、SPSS、トラップの順に簡単であるが、いずれも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。この他にも光量子量、栄養塩など重要な環境要因があるが、いずれも長期測定に多大な費用を要するので、可能なものを選択する。

断片の移植などでは再生産より成長の速さを重視すべきであるが、移植サンゴが放卵することができれば幼生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。移植サンゴの産卵はサンゴの状

表1 サンゴ礁修復技術の比較

	分割群体移植法	稚サンゴ移植法	種苗生産法	幼生放流法	幼生着生誘導法
技術概要	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採集。移植し、海底固着	室内における採卵あるいは野外における採卵後、胚と幼生を育成。基盤への着生。稚サンゴ着生基盤を海底固着	胚・幼生の育成は左に同じ。サンゴ幼生を運搬し、海底に放流（着生場所にシートを設置）	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
再生までの時間	春季海底固着、3年程度	通年移植、計3年程度	夏季採卵、海底固着、計5年程度	夏季着生、海底固着、計5年程度	夏季着生、着生すれば計5年程度
施設、機材	針金、釘、ケーブルタイ、接着剤	接着剤	育成装置、着生基盤、接着装置	飼育・育成施設。表面加工構造物	表面加工構造物
労力*	海底固着100個/人/日	左に同じ	幼生育成に約1週間程度、毎日の管理必要。海底固着100個/人/日	幼生育成に約1週間程度の管理必要	着生具の設置と回収、表面加工構造物の製作
再生の規模	海底固着数はダイバー数に制限される	左に同じ	飼育施設、海底固着数はダイバー数に制限される	着生場所の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

*海底固着後の管理労力は共通なので省略

態が安定している証でもあるため、配偶子形成の有無、および産卵の有無の観察も重要である。産卵日は年や海域により異なるが、通常多くの種で初夏の満月前後、20～22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産卵を確認することが望ましい。

4 今後の展開と課題

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、恐らく和歌山県の榎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。同種を用いた断片移植実験では、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）。

前述のように、サンゴ礁の修復技術は当初既存群体を分割して作った断片から始まったが、今日では有性生殖を利用した種苗生産技術や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。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のトップの技術を持つわが国の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。サンゴ礁修復・再生技術は今後さらに研究が進められ、一層発展することが予想されるが、ひとまず現在までの研究開発の進展状況を整理し、表1に示した。

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になると予想される。比較的閉ざされた海域であれば、スリック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って短時間で遠距離移送されると予想されるため、スリックの挙動予測は不可欠となる。しかし、それ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。

移植や放流に当たって適地の選択は極めて重要な問題である。言うまでもないことだが、修復は新たな環境に導入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いかなければ成功とは言えない。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で、種間競争や貝類、サンゴ食性魚類による食害の影響などを明らかにする必要がある。また先にも述べたように、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。

最後に、修復事業がおこす可能性のある交雑による個体群への遺伝的攪乱と群集の遺伝的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組成の特性を乱すおそれがある。また、サンゴには遺伝的多様性が高いことと雑種が形成されることがよく知られていること (Hatta *et al.* 1999; Willis *et al.* 1997) から、種苗生産にしても断片の移植にしても、できるだけ広範囲に分布している多くの群体から得た配偶子や断片が必要である。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、環境の変化や病原体に弱いサンゴの群生ができてしまう可能性がある。ハワイのハマサンゴ属の1種 *Porites 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かった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を予め推定し、室内交配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。

5 おわりに

環境省は1998年、ICRIの活動の柱であるモニタリングの拠点として石垣島に国際サンゴ礁研究・モニタリングセンターを設立し、石西礁湖保全の活動拠点を得た。2002年には自然環境を保全、再生、創出する自然再生推進法を制定し、石西礁湖をその対象として取り上げ、地域の多様な主体が参加して実施する自然再生事業に取り組むこととし、サンゴ礁の再生に取り組みつつある。サンゴ礁の自然再生には本項で紹介したような技術が役立つはずであり、その成果が国内外の他のサンゴ礁でも生かされることが期待される。