

幼生放流によるサンゴ群集の修復技術

林原 毅・加藤 雅也・玉城 泉也・伏屋 玲子・清水 弘文*

水産総合研究センター西海区水産研究所石垣支所
*現所属：水産総合研究センター業務推進部

Restoration of coral assemblages by coral larvae seeding

T. Hayashibara・M. Katoh・M. Tamaki・R. Fuseya・H. Shimizu

●はじめに

造礁サンゴ群集の修復技術としては、これまで主にサンゴ断片の移植が世界各地で試みられてきました。サンゴの移植は潜水を伴う手作業によるため、大規模に実施するには多大な労力を必要とします。また、国内ではサンゴの採取を禁じる規則があるため、事業として実施する場合には移植片の確保が困難です。このことをクリアするために、近年は種苗生産が行われるようになりましたが、これにも相当な労力や時間・スペースが必要とされます。このほかにも、移植片の確保や取り扱いの容易さなどによって特定の種に偏りやすいことや、移植片の固定のため、必然的に接着剤や固定具を海中に持ち込み放置することになる、という点も気にかかるところです（日本サンゴ礁学会の「造礁サンゴの移植に関してのガイドライン」(<http://www.soc.nii.ac.jp/jcrs/information/ishoku-guideline.pdf>) や八重山環境ネットワークのHP (<http://www.churaumi.net/isiyoku.html>) に、

移植等修復技術の課題や問題点が示されている)。

そこで私たちは、移植に代わる新たな方法として、幼生放流による修復技術の開発を目指して「有性生殖を利用した造礁サンゴ群集の大規模修復・造成技術の開発」という研究課題を、阿嘉島臨海研究所やお茶の水女子大学（服田昌之助教授）等の協力を得て進めてきました。幼生放流による修復技術という着想に至った背景には、1980年代から急速に増大したイシサンゴ類の繁殖に関する知見、特に、産卵誘発技術(Hayashibara et al. 2004a)・着生促進技術(Morse et al. 1996, Iwao et al. 2002)の開発等によって実験的手法の導入に見通しが得られたことがあげられます。さらに、1998年に起こった大規模な白化現象からの回復状況を目の当たりにし、移植では何年もかかるであろうことが、恐らくたった1回の大量の幼生加入によって成し遂げられたことにも意を強くしました(図1)。

●幼生放流実験

幼生放流による修復技術のイメージは、サンゴの大規模産卵を予測して大量の受精卵を確保し、これを幼生にまで育て、着生能力が最も高い時期を見計らって対象海域に放流するというもので、短期間に大規模に実施できるという特徴があります(図2)。私たちは、サンゴ群集の主体をなす、ミドリイシ属サンゴを対象として考えています。というのも、白化現象やオニヒトデによる被害が最も顕著なのが他ならぬミドリイシだからです。また、ミドリイシは、多くの種が同調して大規模な産卵をする

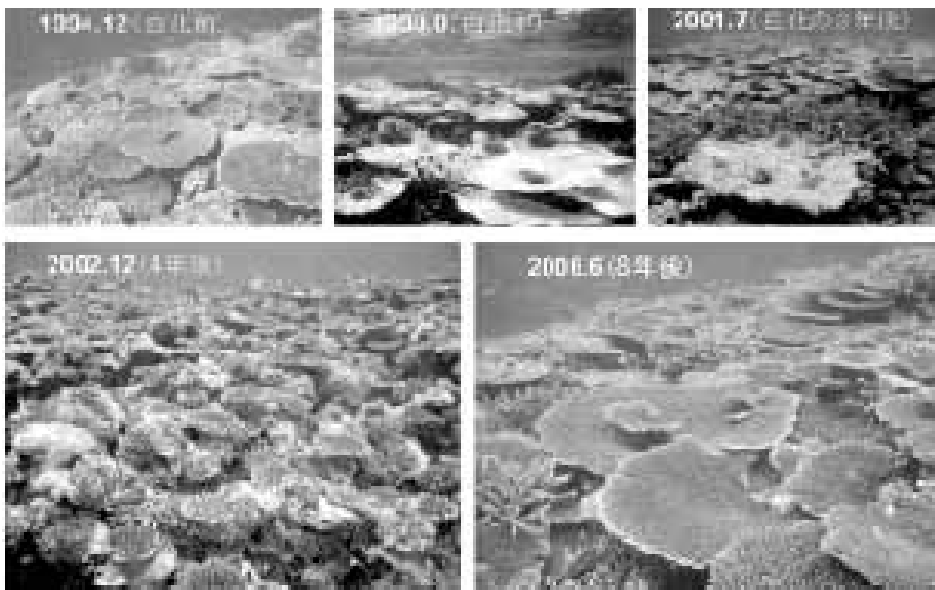


図1. 石垣島浦底湾礁斜面におけるサンゴ群集の景観の時系列変化
1998年の白化現象の影響と、その後の回復過程を示す。浦底湾には白化の翌年1999年に大量の加入があったことが報告されている(Hayashibara et al. 2004b)。1994年12月撮影の写真は橋本和正氏提供。

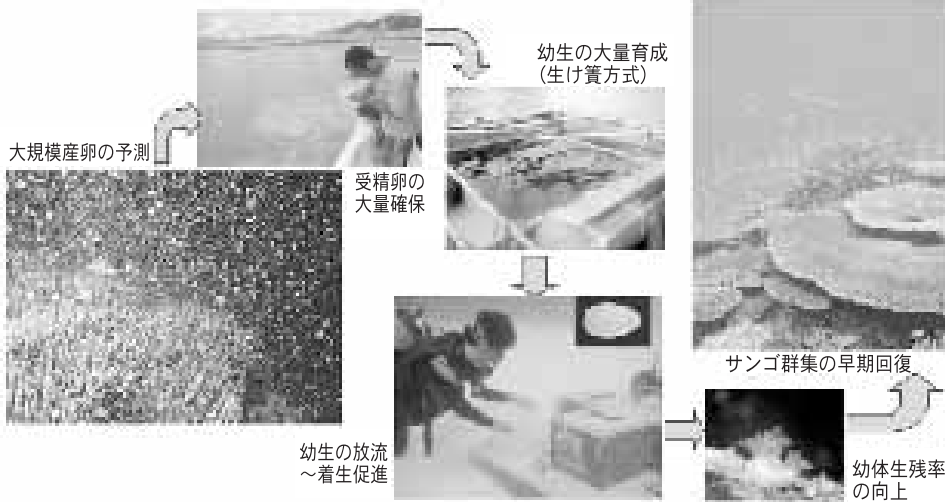


図2. 幼生放流による修復技術のイメージ
サンゴ産卵の写真は下池和幸氏撮影。

着生した幼体の数を比較して、放流効果を検討しました。実験の機会を増やして台風などによるリスクを軽減するため、幼生放流実験は、ミドリイシの産卵期が約1ヶ月ずれている石垣島と阿嘉島の2海域で行いました。放流した幼生は、石垣島では産卵誘発処理によって得た配偶子を人工受精して、5ないし6日間水槽で飼育したものです。

ことが知られており、いちどきに多様性に富む受精卵を大量に得ることができます。

しかし、海域に浮遊幼生であるプラナラを直接放流して、果たして本当に加入を増やすことができるのか、そのことが気がかりでした。そこでまず、実際に野外での幼生放流実験を実施しました。

天然の岩盤上では着生間もない幼体（ポリプ）を数えるのは事実上不可能で、また実験区の設定自体も困難なことから、コンクリート製の実験礁を製作しました。実験礁は3基ひと組で設置し、1つには大量のサンゴ幼生をそのまま周囲に放流し、もう1つには幼生が流れ去らないようにテントを被せてその中に同数の幼生を放流し、残る一つには何も放流しませんでした（図3）。着生状況を顕微鏡下で観察するために、実験礁には取り外しができる人工基盤を取り付けておき、放流2日後に回収して基盤上に

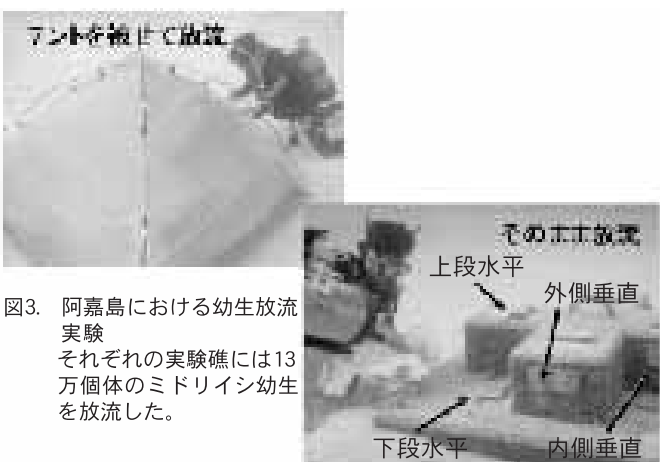


図3. 阿嘉島における幼生放流実験
それぞれの実験礁には13万個体のミドリイシ幼生を放流した。

2004年5月に石垣島の2地点で実施した実験では、どの試験礁にも同レベルの着生があり、特に放流しなかった礁にも着生していたことから、これらは放流した幼生ではなく、自然下で生まれた幼生が着生したものと判断されました（図4）。放流した幼生は、飼育中の水質管理に問題があったようで、水槽内で変態が始まってしまう、放流時には正常な着生能力を発揮できなかったものと考えられました。一方、6月に阿嘉島で行った実験は、明らかな放流の効果を示しました（図4）。すなわち、放流しなかった礁では殆ど着生が無かったのに、テントを被せた礁では全64枚の基盤を合わせると10000個体以上の着生があり、テントを被せなかつ

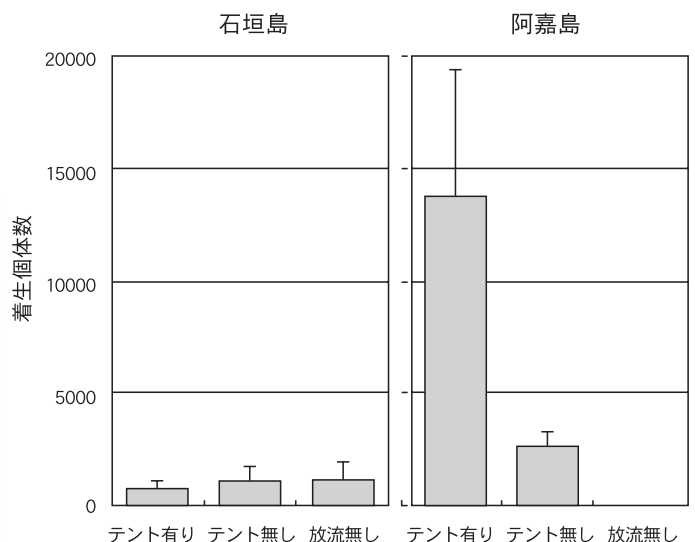


図4. 2004年の幼生放流実験の結果（左：石垣島、右：阿嘉島）
縦棒は実験礁あたりの着生個体数（それぞれ2地点の平均）。
エラーバーは標準偏差。

た礁でも数千個体の着生がありました。したがって、着生したのは確かに放流した幼生であると判断されました。以上の結果から、良好な生育環境が保たれている場合には、そのまま海域に放流しても加入を増やすことができるということが実証されました。石垣島では翌 2005 年にも同様の幼生放流実験を行い、このときは阿嘉島での結果と同様の加入促進効果が確認されています。そして、その 15ヶ月後の 2006 年 8 月現在、幼生放流を行った実験礁の上には、放流に使用したウスエダミドリイシの幼群体が多数確認されています (図 5)。

●幼生放流による修復技術の流れ

このように、幼生放流によって、確かに加入を増やせることが分かりました。それでは、具体的にどのように修復を行えばよいのでしょうか。

1) 対象海域の選定

まず第一に、修復すべき場所の検討が重要です。修復と言うくらいですから、過去にサンゴ群集が存在したことが前提です。どのような群集があったのか。どうして衰退してしまったのか。これが環境悪化によるものであったならば、現在の環境がサンゴの生育に適したレベルにまで回復しているかどうかが問題です (移植でも同じことがいえます)。

そして、自然下では幼生の加入レベルが低い (と思われる) 場所が対象海域になります。例えば、慶良間列島は沖縄本島へのサンゴ幼生の供給源だと言われていますが、本島西海岸に幼生を供給しているのは確かでしょう (木村ら 1992)、東海岸までは到達しないために回復が進まないという報告もあります (小谷・藤原 2004)。また、本誌 3-6 ページにあるように、沖ノ鳥島では、幼生の供給は極めて乏しいことが予想され、サンゴ群集の回復には、琉球列島の何倍もの時間がかかるでしょう。そのような場所、特に人的要因による環境悪化とは無縁の隔絶された島では、幼生放流によるサンゴ増殖が大いに期待できると思います。

2) 受精卵の確保

次に、どうやって放流する幼生を得るかです。近くに健全なサンゴ群集があれば良いのですが、そうではない場合でも、離れた場所から幼生を得て運ぶことは、難しいことではありません (幼生の段階だ

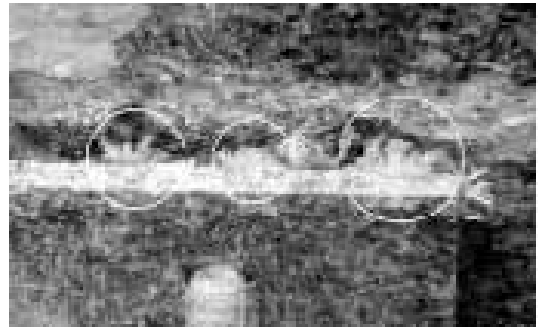


図5. 2005年5月に幼生放流を行った実験礁上の基盤の一例
放流したウスエダミドリイシの幼群体が3個見える
(2006年8月24日撮影)。

と比較的容易に大量に輸送できるので、このことは移植には無い大きな利点です)。しかし、その場合には遺伝子攪乱の問題が懸念され、慎重な調査や検討が必要です。

サンゴ群集が衰退している修復対象海域でも、目的とする種の群体が複数残存していれば、バンドルコレクター (図 6) 等による採卵～人工授精という手段が考えられます。サンゴ群体の密度が低いと、産卵しても受精が成立しない可能性が高いので、この方法は自然下の繁殖努力を無駄にしないという意味もあるのです。

なお、対象とするサンゴの産卵期は、基本的にその場所の水温の季節変化などを手がかりに推定しますが、紙数の都合上、ここでは説明を省略します。

予想産卵時期が近づいたら対象種の成熟状態を反



図6. バンドルコレクター
バンドルとはサンゴが産卵の際に放出する配偶子塊のこと
(ミドリイシは雌雄同体で、卵と精子を塊にして放出する)。
写真提供：服田昌之氏。

復してチェックし、可能な限り大規模産卵の当日または翌日にスリック（海面に浮遊する卵・胚の集合体）を採集します。しかし、気象条件にも左右されるので、あらかじめ産卵前のサンゴ群体の一部を採集しておき産卵誘発（Hayashibara et al. 2004a）によって採卵するとか、バンドルコレクターによる採卵を試みるなど、保険として複数の手段を講じるのがよいでしょう。

3) 幼生の育成

受精卵が大量に得られたら、これを着生可能な幼生にまで育成する必要があります。大量に飼育するには相当なスペースが必要になることから、陸上よりも海域を利用する方が現実的かもしれません。すでに、生け簀方式による飼育が試験的に実施されています（Omori et al. in press）。サンゴの幼生は、浮遊期間中は餌をとりませんが、水質の維持が重要で、密度の調整や換水のタイミングが鍵になります。

4) 幼生の放流

ミドリイシの場合、生み出されてから幼生が着生できるようになるまで少なくとも4-5日はかかるので、自然下で生まれた幼生は、普通ならば生み出された場所にはとどまらず、対象海域の外に散逸してしまう可能性が高いと考えられます。同じ理由から、本手法においても、幼生の着生能力がピークに達した時に放流をします（前述の野外放流実験では6日目に放流して好成績を得た）。幼生の着生能力は、着生誘引物質を使った実験（Morse et al. 1996）や刺胞組成の変化（Hayashibara et al. 2000）を調べることができ、産卵後の経過日数によって経験的に判断しても差し支えないと思います。ただし、着生能力はピークを過ぎると急速に低下してくるので、放流に適した時期は限られます。

放流の際には、広範囲の修復を目指しているので、手間のかかるテント等を使うよりも、直接、なるべく岩礁など海底に近づいて放流する方がよいと考えています（あるいはシートで広い範囲の基質を覆い、その下に放流する）。また、日中の強い光の下では着生行動が阻害されることが明らかになったため（Suzuki and Hayashibara 2006）、放流は日中を避けて実施した方が良いでしょう（前述の幼生放流実験では夕方6時頃に放流した）。

5) モニタリング

放流効果を確認するとともに、対象海域に合ったよりよい方法を検討するためにも、モニタリング調査は不可欠です。具体的には、取り外しができる着生基盤を事前に対象海域（や周辺海域）に設置し、放流の数日後に回収・観察し、可能であればその後も、回収・再設置を繰り返して生残状況をモニターします。基盤の上には着生があったのに、海域全体として回復してこない場合には、天然基質の表面の環境が加入・生残に適していないことが考えられます。そのような場合、あるいは対象海域にサンゴ幼生が着生するのに適した場（岩礁等）がない場合には、人工礁（サンゴ増殖礁）や人工基盤の設置を検討することになるでしょう。

●幼生放流による修復技術のもうひとつの特徴

ところで、前述の幼生放流実験で着生・加入した幼生は、実験礁の上に一様に着生したわけではありません。具体的には、基盤の裏面や側面といった遮蔽された空間に集中して着生していました。そして、裏面に多数着生した基盤を裏返して、幼体を表に露出させると一ヶ月後の生残率は著しく低下することも明らかになりました（図7）。したがって、幼生は、その後の生残・成長に適した場所を厳しく選択していると考えられます。このことから、幼生放流法では、幼生が着生に適した場所を自ら選ぶということも利点だと言えるかもしれません。というのも、移植は手軽に実施できて効果が上がりそうに思いましたが、実際には成功例は少ないようで、その理由の一つとして、植え付ける場所を人間が決めるためミクロな

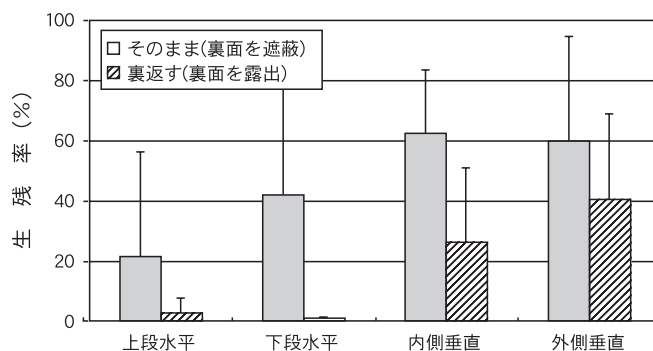


図7. 2005年石垣島で放流し着生した個体の1ヶ月後の生残率。基盤の設置方法については図3を参照。裏返して裏面を露出させると、特に水平に設置した基盤では著しく生残率が低くなった。エラーバーは標準偏差。

環境が移植した種に適していないということが考えられるかと思えます。また、移植片がそれまで自生していた場所から移植された場所への環境変化に適応しにくい（例えば共生藻の組成など）、といったこともあるのかもしれません。これに対して、幼生放流の場合は、自然下の幼生加入と同様のプロセスを経ることになり（自然加入と同レベルの生残率が期待できる）、回復したサンゴ群集も、きわめて自然に近いものになると予想されます。先に、幼生放流法の特徴として、短期間に大規模に実施できるということを述べましたが、むしろ、自然にきわめて近い修復技術だと言うことの方がより大きな利点かもしれません。何もしなければめったに流れてこないサンゴ幼生を、あるいは何もしなければ逸散してしまっただけな場所にとどまるサンゴ幼生を、対象とする海域に存在するようにしてやるだけなのです。

●終わりに

これまで述べてきたことを整理すると、幼生放流による修復技術は、①短期間に大規模に実施できる、②自然の回復過程にきわめて近い、といった利点がありますが、③幼生加入が少ないために回復が進まない場所でも有効、④環境悪化が原因で衰退した場合には環境の回復が前提となる（これは他の修復技術も同じ）、という適用上の制約もあります。また、⑤適用できる時期が限られる、⑥採卵・放流は実施日が限定されるため、悪天候等のリスクがある、といった欠点もあります。

近年、様々な修復技術が検討されていますが、どの方法にも一長一短があり、どれが優れているかということは一概には言えないと思えます。幼生放流法についてはまだ実績が無く、効果についても未知数ですが、技術の基礎はおおむね確立していると言えます。今後は、実践を通して技術を実用レベルに高めたいと思っていますので、もし、この技術を利用して、修復を図りたいという場所があれば、お知らせいただければと思います。どんな修復技術であっても、地元の理解と協力がなければ実施することはできません。

専門家の予測では、今後、少なくとも高水温による白化現象は、その頻度を増加させると考えられています。回復に時間がかかれば、サンゴ群集は総じ

て縮小していくと思われ、やがて幼生の供給源がなくなってしまうかもしれません。したがって、修復事業にはサンゴ群集の衰退に勝るスピードが求められている、と言えるのではないのでしょうか。

●謝辞

ここに述べた内容は、環境省の地球環境保全等試験研究費で実施した課題「有性生殖を利用した造礁サンゴ群集の大規模修復・造成技術の開発」に基づいています。環境省、水産庁、水産総合研究センターの関係者ならびに共同研究者、協力者の皆様にお礼申し上げます。

●引用文献

- Hayashibara, T., T. Kimura and M. Hatta 2000. Changes of cnida composition during planula development of a reef building coral *Acropora nasuta*. *Galaxea*, JCRS, 2: 39-42.
- Hayashibara, T., K. Iwao and M. Omori 2004a. Induction and control of spawning in Okinawan staghorn corals. *Coral Reefs*, 23: 406-409.
- Hayashibara, T., H. Shimizu, M. Tamaki, S. Nishihama and M. Minagawa 2004b. Mass coral settlement on the artificial reefs in Ishigaki Island, Okinawa, Japan: Evidence of sexual recruitment in the year following the 1998 bleaching event. *Galaxea*, JCRS, 6: 47-51.
- Iwao, K., T. Fujisawa and M. Hatta 2002. A cnidarian neuropeptide of the GLWamide family induces metamorphosis of reef-building corals in the genus *Acropora*. *Coral Reefs*, 21: 127-129.
- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 1992. 漂流ハガキ実験報告. *みどりいし*, (3): 18-21.
- 小谷和彦・藤原秀一 2004. 沖縄本島東海岸におけるサンゴ礁の再生について. *日本サンゴ礁学会第7回大会講演要旨集*, p.107.
- Morse, A. N. C., K. Iwao, M. Baba, K. Shimoike, T. Hayashibara and M. Omori 1996. An ancient chemosensory mechanism brings new life to coral reefs. *Biol. Bull.*, 191: 149-154.
- Omori, M., S. Shibata, M. Yokokawa, T. Aota, A. Watanuki and K. Iwao. Survivorship and vertical distribution of coral embryos and planula larvae in floating rearing ponds. *Galaxea*, JCRS. (in press)
- Suzuki, G., and T. Hayashibara 2006. Inhibition of settlement and metamorphosis in *Acropora* (Anthozoa, Scleractinia) larvae by high-intensity light. *Proc. 10th Int. Coral Reef Symp.*, pp.1627-1630.