

サンゴ群集の修復技術

—石西礁湖と阿嘉島、 それぞれに適した再生戦略は？—

Restoration technology of coral communities: What is the appropriate strategy for Sekisei Lagoon and Kerama Islands, respectively?

林原 賢

独立行政法人水産総合研究センター
西海区水産研究所石垣支所

T. Hayashibara

●はじめに：これまでの研究の経過

筆者は、阿嘉島臨海研究所在職中（1989-1996年）、下池和幸氏や木村 匠氏と共にサンゴの産卵調査を中心、サンゴの生物学的研究に取り組んでいた。しかし、その当時はまだサンゴ群集の修復技術を強く意識していたわけではなかった。1996年に西海区水産研究所に移り、1997年から石垣島に新設された現職場に勤務し、他の業務の傍らサンゴの増殖技術にも取り組み始めた。ところが、1998年には大規模な白化現象が起こり、職場の前面の浦底湾のミドリイシ類は殆ど全滅してしまった。しかしながら、この世界的な白化現象が契機となって、サンゴ群集の修復技術に対する関心や期待が高まったのではないだろうか。既に、ミドリイシ類を中心に様々なサンゴから採卵し、幼生を得ることが可能となっていたので、石垣支所では、その幼生を用いて、野外実験を主体にミドリイシ類の着生率や生残率の向上を目指していた。2003年には、環境省の予算が得られ「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、お茶の水女子大学（服田昌之准教授）とともに実施した。この課題で、私たちは幼

生放流による大規模修復技術の開発に取り組み、環境その他の条件が良ければ、十分に実用的な技術であるという確信を得た。残念ながら、順調にサンゴが育ちつつあった基盤（林原ら 2007：みどりいし 18号 p. 9 の図5）は、何者かによって悉く破壊され（犯人は大型のフグ類であろうか）、今では図1に示すサンゴだけが生き残っている。

●なぜ修復を検討するのか：石垣島と石西礁湖の現状

サンゴ群集が死滅または衰退したとき、すぐに修復技術の適用を考えるのは早計であろう。白化現象やオニヒトデの大発生で短期間に大量に死滅したときは、むしろ原因が去った後は、環境自体は元のサンゴが生育できていた状態が維持されており、サンゴ群集も自然に回復することが期待できる。先に述べたように、石垣島の浦底湾では1998年の白化現象でミドリイシ類がほぼ全滅したが、礁斜面の卓状ミドリイシを中心とした群集は約6年で白化前の水準にまで回復した（林原ら 2007）。これは白化の翌年に大量の幼生加入があったからだと考えられたが（Hayashibara et al. 2004）、その後、調べてみると、浦底湾では毎年コンスタントにミドリイシ類の幼生加入が確認されている（Suzuki et al. 2008、鈴木・林原 未発表）。

これに対して、国内最大のサンゴ礁である石西礁湖では、かつては枝状ミドリイシを主体とした被度50%以上の群集（図2参照）が広範囲に存在していたが、1998年の白化現象よりも以前、1980年代に起きたオニヒトデの大発生によって大半が失われ、その多くは未だに回復していない（環境省自然環境局 2007）。漁業者の話では、1980年頃には人の背丈ほどもある枝状サンゴが石西礁湖の広範囲に亘ってみられ、そのような場所がミーバイ（ハタ類）やイラブチャー（ブ



図1 2005年に行なった幼生放流実験で多数着生した中で、現在も生き残っている群体 (*A. tenuis*: 2008年10月3日撮影)

ダイ類) の漁場として非常に重要な場所であったが、今では漁場として使われなくなっているという(渋野私信)。そのことだけが原因ではないと思われるが、1980年当時、八重山におけるハタ類とブダイ類の漁獲量はともに年間約250トンであったのが、近年(2004年)では前者が38トン、後者が62トンに減少しているのである(沖縄県農林水産統計年報による)。このように枝状サンゴ群集は、大きな価値があったにもかかわらず、今もって回復が見込まれないことから、後述のように、人為的な修復を目指す価値があると考えられるのである。

●修復事業の実施条件

サンゴ群集は、本来であれば、サンゴが死滅した要因が取り除かれれば、自然に回復するはずである。世界的に見ても、健全なサンゴ群集が急速に減少している状況ではあるが、その回復・再生にはサンゴが死滅した要因への対策が最も重視されるべきであろう。サンゴ群集の修復事業を実施しようとする場合には、まず次のような点を検討し、合理性や必要性を判断するべきではないかと考えている。

- 1) その場所のサンゴ群集が死滅または衰退した原因は何か。その原因は現在は取り除かれているのか。
- 2) その場所のサンゴ群集は、自然に(早期に)回復することはないのか。しないと考えられるなら、それは何故か(回復阻害要因の特定)。
- 3) 回復阻害要因は克服できるのか(適切な手法があるのか)。その場所はサンゴが生育できる環境であるのか。
- 4) 経費や労力の負担も考えて、修復事業にコンセンサスが得られるのか(費用対効果等の検討)。

この点検項目に照らして、まず、石西礁湖において想定している枝状ミドリイシ群集の修復事業を検討してみたい。

●石西礁湖における再生戦略：回復阻害要因の検討と対策

石西礁湖の枝状サンゴ群集の多くは、先に述べたように1980年代のオニヒトデの大発生によって死



図2 石垣島浦底湾の枝状ミドリイシ類を中心としたサンゴ群集

滅したとされている。そして、それらの場所におけるオニヒトデの現状は、次の大発生の兆しはあるものの、一部を除いてまだ大発生には至っていないようである。つまり、死滅した原因は、現在は取り除かれていると考えることができる。では次に、枝状サンゴ群集が回復しない原因は何だろうか。かつて枝状ミドリイシが優占していた場所の中には、今ではガレ場や砂地となっている地点が少なくない。恐らく、枝状サンゴ群集はそのような底質の上にも成立していたのであろう。卓状のミドリイシ類は岩礁や岩盤がなければ存在すらできないが、枝状ミドリイシは、砂地やガレ場のように安定した基盤が無い場所でも生息できていたのである。しかし、いったん死滅した後に、幼生加入から再生する場合には、安定した基盤が欠かせない。幼生は砂地には着生できず、またガレキに着生しても、やがて台風による擾乱やサンゴ自体の重みで転倒したりして大きく育つことは困難であろう。即ち、枝状サンゴ群集の回復阻害要因の一つは、底質が不安定なことであると推測される。

もう一つ考えられることは、枝状ミドリイシ類は幼生加入そのものが少ないのでないのではないかと言うことである。Wallace (1985) は、調査した9種のミドリイシのうち、枝状の3種では、幼生加入によって生じたと思われる幼群体がほとんど認められず、もっぱら折れた枝から増殖していることを報告した。しかし、これまで枝状種の幼生加入量そのものを評



図3 サンゴ幼生の加入調査用基盤
ミドリイシ類の幼生は、上側の基盤の下面に最も多く着生する。

価した例は無かった。そこで我々は、サンゴ幼生の加入調査（図3）において、形態では分類できない着生直後のミドリイシ幼体の遺伝子解析による種判別を試みた（Suzuki et al. 2008、鈴木・林原 未発表）。その結果、たとえ礁斜面下部の枝状ミドリイシが優占するような場所であっても、加入幼体に占める枝状種の割合は非常に低いことが明らかになった。

このように、枝状ミドリイシ群集が回復しない要因としては、底質の不安定さと、幼生加入の少なさがあると考えられた。こうした回復阻害要因に対策はあるのだろうか。単純に考えて、安定した適切な基盤と枝状ミドリイシの幼生を供給できればよいと思われる。そして、枝状種は、ある程度成長したら枝が折れて周囲に拡散することによって勢力を拡大していくのが生態上の戦略である。従って、こうした対策により回復の核となる群集を作り出すことができれば、そこから周囲に枝状サンゴ群集が拡大することが期待されるのである。現在、私たちの研究室では、（株）ダイクレと共同開発したサンゴ増殖用構造物の試作品（図4）を使って、浦底湾で実用化試験を始めたところである。この構造物は、次のような特徴・利点を持っている。

- 1) 樹脂製で軽量なため砂に埋没しにくい
- 2) 格子状のため水の流通がよく堆積物がたまりにくい
- 3) 立体的に高さがあるので荒天時の砂礫の移動による幼体への影響を避けられる
- 4) ミドリイシ幼生は着生時に遮蔽された暗がりを好むが、この構造物は全体がそうした空間になっている
- 5) 大量生産により安価に供給できる

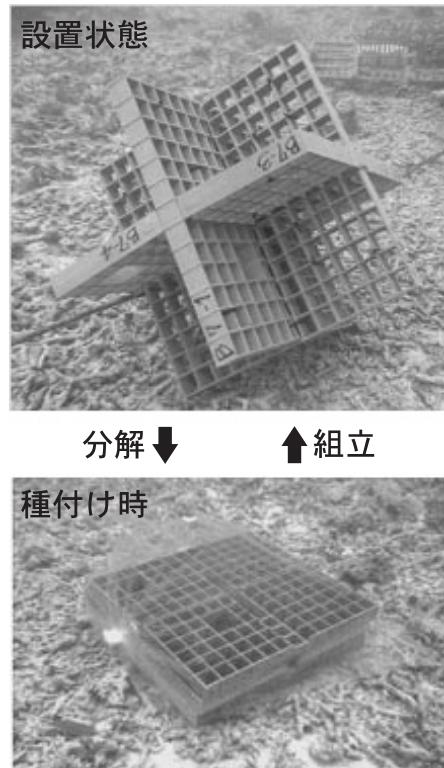


図4 サンゴ増殖用構造物（（株）ダイクレと特許共同出願中の試作品
海中での設置状況（上）と種付け時の状態（下：一時的に分解して海底で大きなビニール袋に入れ、その中に多数の幼生を放つ。2日後に袋から出して再び組み立て設置する。）

- 6) 分解・組み立て・輸送が容易
- 7) 分解して効率よく種付けができる（図4下）
- 8) 移植断片の固定にも適している

先に述べたように、石西礁湖において枝状サンゴ群集は、もともとそこに存在していたもので、漁場や稚魚の成育場として特に重要であったが、過去30年に亘って回復が見られなかった。こうした背景に加え、石西礁湖では、環境省による自然再生事業が営まれ、サンゴ群集の修復もメニューとして取り上げられていることから、人為的な修復事業の導入にもコンセンサスが得られていると考えて良いだろう。即ち、石西礁湖における枝状サンゴ群集の修復については、一応、衰退原因や回復阻害要因が特定され、それに対する対策の実現性および、事業として取り組むコンセンサスの点もほぼクリアできていると思われる。

●阿嘉島のサンゴ群集：早期の回復が望めるか

残念ながら、現在の阿嘉島のサンゴ群集は、かつて筆者が在籍していた頃からすると、見る影もないほどに衰退しているという。その原因は、2001年頃から始まったオニヒトデの大発生であり（谷口 2004）、現在は、その大発生は収束している（岩尾私信）。

即ち、死亡原因是特定されており、既に原因は取り除かれている。では、今後、早期の回復は望めるであろうか。最近の状況を見ていないのではっきりしたことは言えないが、阿嘉島の周囲は石垣島に較べて外洋水の影響が強く、一部の場所を除き水質には問題がないと想像される。気がかりなのは、十分なサンゴ幼生の加入があるかどうかであろう。かつて、健全なサンゴ群集が見られた頃に阿嘉島周辺で下池氏が行っていた幼生加入調査では、着生基盤へのミドリイシ類の加入は殆ど見られなかったという。また、琉球大学の酒井先生による慶良間諸島における幼生加入調査でも、ミドリイシ類など放卵放精型サンゴの加入レベルはあまり高くないことが報告されている（酒井ら 2007）。

慶良間諸島は、沖縄本島への幼生の供給源であることが明らかになっているが、では、慶良間諸島への幼生の供給源はどこにあるのだろうか。海流の上流にあたる宮古島や八重山列島は、いささか距離が遠く、幼生が着生能力を維持している間に到達する確率はそれほど高くはないであろう。この推測は、集団遺伝学的研究（西川 2004）によっても支持されているように思われる。また、かつて阿嘉島周辺からスリックに乗せて漂流ハガキを流したときには、大半のハガキは慶良間諸島の中で回収されたが、それらは産卵の翌日から2日以内が大半で（木村ら 1992）、胚か着生能力がまだ十分に高まっていない幼生の時期に相当する（ちなみに沖縄本島での回収は10日後以降で、幼生着生のピーク期は過ぎているが漂着から発見までに要した時間をも考慮すれば十分に着生可能な期間にある）。慶良間諸島は海流に洗われている小島なので、1週間近くも島の周囲にサンゴ幼生が滞留することは少ないのでないだろうか。こうしたことから、オニヒトデ被害を受け、サンゴ

が大きく減少した慶良間諸島におけるサンゴ幼生の加入はあまり多くはないかもしれない。今後の回復過程を記録し分析するためにも、サンゴ幼生の加入状況を、詳細に調査することは重要なミッションであろう。

●阿嘉島における再生戦略

もし、幼生の加入レベルが低く、石垣島（浦底湾）で見られたよりも回復に時間要することが予想される場合には、人為的な修復技術の適用が検討されても良いかもしれない。慶良間諸島のサンゴ群集は、沖縄を代表する海中景観を構成する重要な要素であり、それを求めて国内外から多くのダイバーを引きつけてきた。また、前述のように、沖縄本島へのサンゴ幼生の供給源としても極めて重要である。恐らく、サンゴだけでなく他の多くの生物の幼生供給源となっていると予想される。

慶良間諸島における回復阻害要因が、幼生加入レベルの低さであるとするならば、多様な幼生の供給がもっとも合理的な修復手法であろう。サンゴの生育環境が整っている阿嘉島のような場所では、種苗の生産とその移植は、回り道であるばかりでなく、多様性の低い偏った群集を作り出すことになるかもしれない。

阿嘉島の周囲には、地元ダイビングサービスの人々を主体としたボランティアダイバーが、頻繁にオニヒトデ駆除を行って死守したサンゴ群集があるという。その群集こそが、回復・修復の最も重要な役割を担うことになるであろう。例えば、ニシハマのように潮通しの良い場所では、生み出された受精卵は、潮に乗って速やかに慶良間諸島の外に運び出されてしまう可能性が高い。そのような卵を産卵直後に捕集し、飼育管理を行い、着生能力を持った幼生にまで育てて最適なタイミングで放流する、いわゆる幼生放流法が、早期の回復を実現する最も有効な手法ではないかと考えられる（林原ら 2007）。

その流れを簡単におさらいすると、まず、産卵日を予測して大量の受精卵を得る。一斉産卵後のスリックを採取すれば多様性の高い受精卵が大量に確保

できる。陸上での飼育スペースが限られる場合には生け簀による中間育成技術が既に実用化されている(青田ら 2006)。ただしシリック由来の胚の飼育管理は難しいので、人工授精による胚の飼育も並行して行うのがよいだろう。野外では同種の群体が少なくて受精しにくい状況になっている可能性もあるので、その場合にはバンドルコレクターで採卵し、人工授精を施せば、自然に産み出された卵よりも質の高い受精卵が得られる。熟練した地元ダイバーの協力が得られれば、多くのサンゴから相当な量の卵が確保できるのではないだろうか。産卵は5月から8月までの間に何回も起こるので(対象はミドリイシに限らず多様な種をターゲットにすると良いだろう)、その都度このような試みができれば、多少の失敗があっても結果として多様性に富んだ幼生の大放流が実現するであろう。以前に行った幼生放流実験ではテントを使ったが(林原ら 2007)、実際に自然の海域で放流を行うには、テントの代わりに大きなシートを使って岩礁を覆い、その下に幼生を放流してはどうだろうか。幼生加入基盤を予め設置しておき、放流した場所としない場所で着生数やその後の生残状況等をモニタリングすると、効果や課題が見えて来るであろう。まずは、実験規模で効果を実証し、実現性を認めてもらうことで、コンセンサスが得られるのではないだろうか。阿嘉島臨海研究所には、これまでの研究の蓄積を還元する好機と捉えて、今後ますますの奮闘を期待したい。

●謝辞

私が阿嘉島臨海研究所に着任したのは1989年の5月で、間もなく20年が経とうとしています。自分をサンゴ研究者として育ててくれた阿嘉島の海と阿嘉島臨海研究所には改めて感謝したいと思います。もちろ

ん、保坂理事長、大森所長、かつての同僚諸氏、金城英盛氏をはじめとする阿嘉島の皆様には公私ともに大変お世話になり、この場を借りて篤くお礼申し上げます。本稿の前半では石垣島での研究活動を紹介しましたが、これは西海区水産研究所石垣支所の渋野拓郎生態系保全研究室長、阿部寧主任研究員および(株)ダイクレとの共同研究に基づくものです。また、渋野拓郎氏、岩尾研二氏、下池和幸氏、鈴木 豪氏からは情報や研究データの提供を受けました。ここに記して深謝いたします。

●引用文献

- 青田 徹・柴田早苗・綿貫 啓 (2006) サンゴ幼生の大量飼育、運搬、基盤着生によるさんご礁回復技術の開発. みどりいし 17: 4-10
- 環境省自然環境局 (2007) 平成16年度 石西礁湖自然再生調査 報告書 211pp +添付資料
- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 (1992) 漂流ハガキ実験結果報告. みどりいし 3: 18-21
- 酒井一彦・岩田幸一・向草世香 (2007) 沖縄本島と慶良間列島におけるサンゴメタ個体群の危機. 第54回日本生態学会大会講演要旨集 p192
- Suzuki G, Hayashibara T, Shirayama Y, Fukami H (2008) Evidence of species-specific habitat selectivity of *Acropora* corals based on identification of new recruits by two molecular markers. *Marine Ecology Progress Series* 355: 149-159
- 谷口洋基 (2004) 最近6年間の阿嘉島周辺の造礁サンゴ被度の変化: 白化現象とオニヒトデの異常発生を経て. みどりいし 15: 16-19
- 西川 昭 (2004) 琉球列島における造礁サンゴの集団遺伝学的研究. みどりいし 15: 20-22
- Hayashibara T, Shimizu H, Tamaki M, Nishihama S, Minagawa M (2004) 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
- 林原 毅・加藤雅也・玉城泉也・伏屋玲子・清水弘文 (2007) 幼生放流によるサンゴ群集の修復技術. みどりいし 18: 7-11
- Wallace CC (1985) Reproduction, recruitment and fragmentation in nine sympatric species of the coral genus *Acropora*. *Marine Biology* 88: 217-233