

マリブロック[®]によるサンゴ礁再生技術

Reproduction Technology of Coral Reefs Using “MARINE BLOCK[®]”

小山田久美 OYAMADA Kumi JFE 技研 アクア・バイオ・ケミカル研究部 主任研究員(課長) 兼 JFE スチール資源循環推進部 主任部員(課長)・Ph. D.
渡辺 圭児 WATANABE Keiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員(課長)
岡本 峰雄 OKAMOTO Mineo 東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 准教授・Ph. D.
岩田 至 IWATA Itaru 芙蓉海洋開発(株) 環境システムセンター 課長

要旨

熱帯から亜熱帯の海域においては、環境破壊や地球温暖化が原因と考えられるサンゴの白化現象が頻発し、沿岸域の生態系が衰弱する傾向にある。JFE グループでは、東京海洋大学でサンゴ幼生の着床基質として開発されたサンゴ着床具と、鉄鋼スラグ炭酸固化体「マリブロック[®]」を組み合わせることで、白化などによりダメージを受けたサンゴ礁を再生するための技術開発を実施している。現在行っている実海域試験でマリブロック上での稚サンゴの順調な成長を確認したので報告する。

Abstract:

In tropical to subtropical marine areas, coral bleaching frequently occurs probably due to environmental destruction and global warming, and coastal ecosystems are degrading. JFE Group is engaged in technological development for restoring coral reefs, which have been damaged due to bleaching, etc., by combining the coral-implanting tool, which was developed by Tokyo University of Marine Science and Technology to prepare the substrate for coral larvae, and the carbonic solid of iron-steel slag “MARINE BLOCK[®].” This paper reports on the healthy growth of young coral on Marine Block in the ongoing test in the actual sea.

1. はじめに

サンゴ礁は、熱帯から亜熱帯域の海洋に広く分布し、生態系における一次生産を担う場として非常に重要である。また、人間の生活にとっては漁業資源、観光資源の提供者であると同時に、台風や津波などの自然の驚異から陸地を保護する重要な機能も合わせ持つ。しかしながら、世界のサンゴ礁は、陸域からの土砂の流入、オニヒトデなどの捕食生物の爆発的な増大、地球温暖化にともなう海水温の上昇などにより、深刻な危機にさらされている。

我が国においても、このような状況が国民に広く認知されるようになり、環境保全に対する意識も高まりつつある。その結果、CO₂の放出抑制、資源の再利用、循環型社会形成推進基本法、自然再生推進法などが施行されるようになり、資源の有効利用や省エネルギー的な方法で環境を保全・再生することが諸公官庁で求められるようになってきた。

このような背景のもと、JFE グループでは鉄鋼スラグに

よる CO₂ 固定技術として確立した、鉄鋼スラグ炭酸固化体であるマリブロック^{®1,2)}と、東京海洋大学で開発したサンゴ着床具を組み合わせることで、サンゴ礁再生技術を開発し、実用化を目指している。本技術開発は、環境、港湾、水産などの各方面から注目されており、その内容について紹介する。

2. サンゴ礁再生の必要性

熱帯から亜熱帯にかけての貧栄養海域には、サンゴが長い年月をかけて作り出したサンゴ礁が分布する。そこにはサンゴに共生する褐虫藻の光合成によって豊かなサンゴ礁生態系(食物連鎖)が形成され、海の熱帯雨林と呼ばれている。

サンゴ礁の地形は、リーフ(礁)と呼ばれる岩盤(石灰岩)と、ラグーン(礁池)と呼ばれるリーフの内側にある砂地(サンゴ砂や有孔虫)からなる。

リーフは外洋に面した海水交換の良い環境で形成され、卓状サンゴや被覆状サンゴが密に育つ。赤道周辺域の多くの島嶼が、海底のプレートの沈み込みにもなって沈降す

2007 年 11 月 12 日受付
マリブロック、MARINE BLOCK は JFE スチール(株)の登録商標である。



写真1 1998年の白化でサンゴが死滅したリーフ（サンゴ礁）
（宮古島，2005年3月）

Photo 1 Coral reef 7 years after 1998 bleaching (March 2005, Miyako Island)



写真2 1998年の白化でサンゴが死滅したラグーン（礁池）
（石西礁湖，2006年2月）

Photo 2 Lagoon 8 years after 1998 bleaching (February 2006, Sekisei Lagoon)

るのをサンゴがリーフを嵩上げしてきたことで、水没を補償する役割を担ってきた。また、リーフは防波堤として機能し、サンゴが生育してリーフを造り続けることでその浸食を防いできた。

ラグーンは波がさえぎられた穏やかな海域で、砂地の海域に樹枝状サンゴが互いに絡み合っって美しい景観を呈し、多くの生物が生活し、それらの幼生の生育の場となっている。

1998年の地球規模のサンゴの白化とそれによる死滅は、地球温暖化による海面水温の上昇がもたらしたものとされ、その後も各地で白化が頻発している。白化被害は水深が浅い場所ほど大きく、リーフ上面域に繁茂していたサンゴの多くは壊滅的な打撃を受けた。また、閉鎖的なラグーンでは海水温の上昇が著しく、多くのサンゴが死滅した。（写真1、2）

サンゴ死滅の影響は島嶼の沈降やリーフの浸食に代表されるように深刻な事態であり、温暖化による海面上昇がこれを加速させている。こうした事態に対処するため、地形に応じたきめ細かなサンゴ再生技術の開発が急務である。

3. 使用する材料

本技術開発には鉄鋼スラグ炭酸固化体である「マリブ

ロック[®]」と、サンゴ幼生の着床率を高める構造を有する「サンゴ着床具」を利用する。

3.1 マリブロック

マリブロックは以下の特徴を有する^{1,4)}。

- (1) 製鉄プロセスで副生するスラグ（主成分は石灰）と二酸化炭素のみを原料として製造した素材
- (2) 製造時に二酸化炭素を吸収し（重量%で1~7%）、炭酸カルシウムとして固定
- (3) 貝殻、サンゴと同じ炭酸カルシウムを主成分とした被覆層を保有する気孔率20~40%のポーラスブロック
- (4) 海水へのアルカリ影響なし

3.2 サンゴ着床具

サンゴ着床具は、東京海洋大学において開発され、直径40 mm、高さ26 mmのセラミック製で、サンゴ幼生の着床率を高めるとともに、ウニや魚類から幼生が捕食されないよう形状についても加工も施している（写真3）。

サンゴは卵から幼生となり3~7日程度の間、海面近くを漂流した後、基盤（岩、サンゴ礁など）に着底して成長を始める。この時に着床具にも着床するため、サンゴの産卵時期（5~6月頃）に合わせてサンゴ礁海域に着床具を収納したケースを設置する（写真4）。

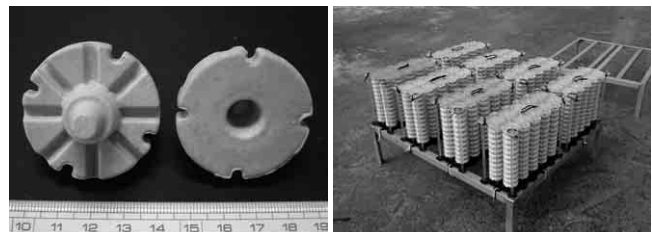


写真3 サンゴ着床具

Photo 3 Coral settlement devices



写真4 サンゴ着床具を搭載したフレームの設置

Photo 4 Installation of a base frame supporting coral settlement devices

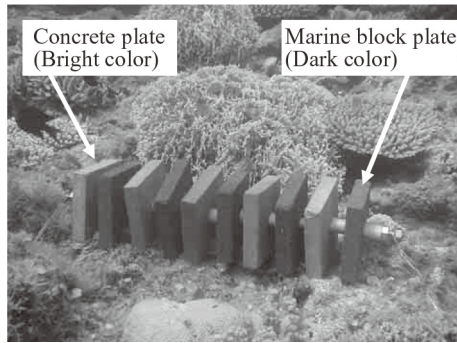


写真5 マリブロックとコンクリートプレートによるサンゴ着床比較試験

Photo 5 Field test of Marine block plates and concrete plates

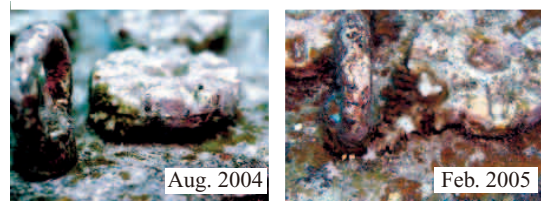


写真6 マリブロックとサンゴ成長の状況

Photo 6 Overview of Marine Blocks and close views of grown coral

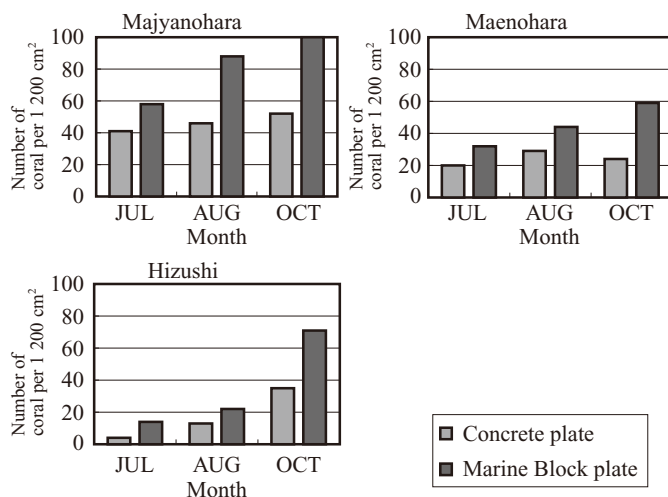


図1 基質の違いによるサンゴ着床数の変化 (2002)

Fig.1 Numbers of implanted coral on different plate materials (2002)

4. 研究成果

4.1 サンゴ幼生の着床試験

2001～2003年にかけて沖縄県の阿嘉島において、マリブロックとコンクリートのプレートを用いて、サンゴ幼生の着床率に関する実験を行った(写真5)³⁾。2002年の実海域実験では、各フィールドともスラグプレートでコンクリートプレートに比べ約2倍のサンゴが着床する結果を得た。マリブロックが高い生物親和性を有することが証明できた(図1)。

本研究は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の産業技術実用化開発費助成金を受けて行ったものである。

4.2 マリブロックへのサンゴ移植試験

阿嘉島での研究成果にもとづき、2003年6月に石西礁湖において、有性生殖による稚サンゴ確保を目的として着床具を設置した。8月には着床具の一部を、サンゴ移植基盤であるマリブロック上に固定した。作業はすべて水中で

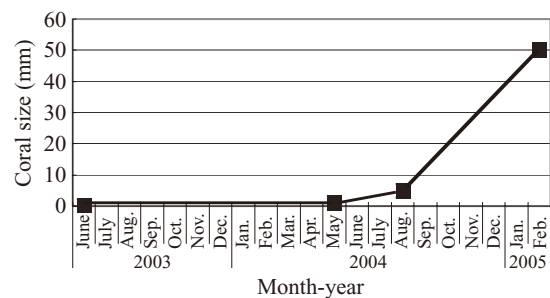


図2 マリブロック上サンゴの成長速度

Fig.2 Growth rate of coral on Marine Block (Acropora sp.)

行い、着床具はあらかじめ穿たれたマリブロック上の孔へ水中ボンドを使用して取り付けられた。

2003年6月の段階では、移植に用いたすべての着床具について、肉眼でサンゴを確認することはできなかった。2004年5月には一部の着床具において、目視によるサンゴの着生が確認できたが、いずれも数ミリメートルの小さな群体であった。8月にはこれらのサンゴが成長している状況が認められ、5mmを越えるサイズとなっていた。2005年2月には、さらにサンゴの成長が確認でき、最大のもので約5cmの大きさまで成長している状況を確認した(写真6、図2)。

この結果により、マリブロックがサンゴの成長を妨げることなく、サンゴ移植基盤として機能することが証明できた⁴⁾。

4.3 サンゴ礁再生技術の実用化

JFEグループでは、2003年以降宮古島においても、マリブロックによるサンゴ礁再生技術開発を開始した。先行的な阿嘉島、並行的な石西礁湖での研究実績をもとに、実用化に向けた実機レベルでの技術開発を目指している⁵⁾。

この技術開発は、今まで再生が難しいとされていた、死サンゴがガレキ状となって堆積している過去のサンゴ礁



写真7 マリブロック (サンゴ礁造成基盤)
Photo 7 Marine Blocks (Artificial base for coral reefs)

(ガレ場) を、マリブロックと着床具の組み合わせによって再生するものであり、地元海域で完結することが可能となるものである。宮古島では、2005年以降毎年有性生殖による稚サンゴを確保するため、宮古島周辺海域にサンゴ着床具を設置した。移植基盤として用いる1tタイプのマリブロック(写真7)を2005年10月に平良港のトゥリバー海域に4個を沈設した。サンゴ移植は、稚サンゴの成長が確認できている着床具をマリブロックに取り付ける方法で行い、2006年10月より本格的な移植を開始した。

移植したサンゴは、2007年6月時点でも順調に成長している状況を確認した。写真8に示したミドリイシ属のサン

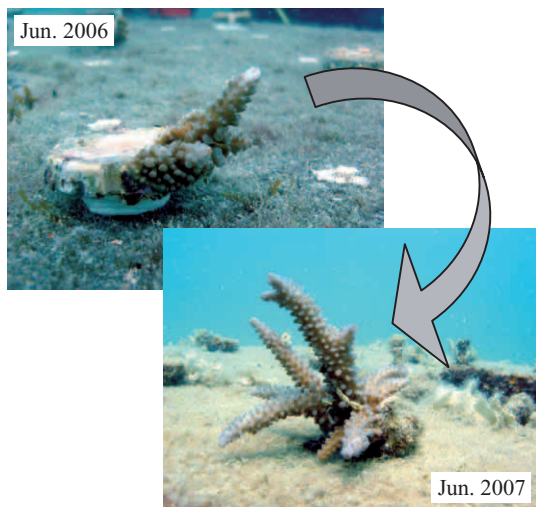


写真8 マリブロック上サンゴの成長状況
Photo 8 Coral growth on Marine Block (Acropora sp.)

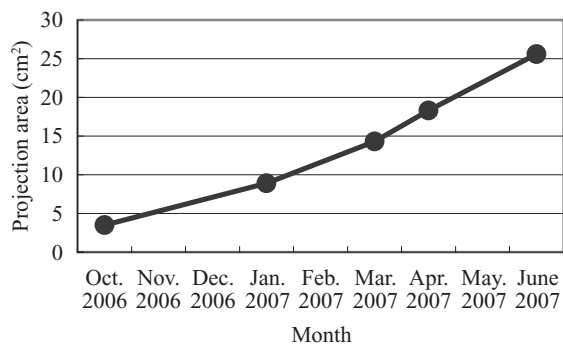


図3 サンゴの成長の状況 (投影面積)
Fig.3 Development of coral growth (projection area)



写真9 マリブロックに活着したサンゴ
Photo 9 Coral growth on Marine Block (Acropora sp.)

ゴについて、成長度合いを真上からの投影面積でみると、2006年10月が3.5 cm²、2007年1月が8.9 cm²、3月が14.3 cm²、2007年4月が18.3 cm²、2007年6月が25.6 cm²という結果であった(図3)。また、移植したサンゴがマリブロックへ活着しながら成長している状況も確認できるようになってきた(写真9)。

5. サンゴの生態と再生のシナリオ

サンゴの再生産には、台風などで折れた枝が漂流し、適地に定着した上で成長する無性生殖と、卵子と精子の受精による新たな個体が生産される有性生殖の2種がある。

また、有性生殖には2種があり、ひとつは満月の夜に一斉産卵する放卵放精型、もうひとつはサンゴから幼生が産まれる幼生放出型である。前者はミドリイシ属に代表され、数キロメートル四方で100種近くが一斉に卵子と精子の束(バンドル)を放出する。バンドルは海面ではじけて無数の卵子と精子が海面近くを漂って受精する。受精卵は2日弱で幼生になり、産まれてから3~7日の間にリーフに適地が得られれば着生する。幼生は潮流や海流の影響を受けて拡散、移動するためほとんどは着生できないと考えられている。後者はハナヤサイサンゴ科に代表され、幼生は放出後1日以内にごく近い範囲に着生する。

5.1 サンゴの再生法

サンゴが激減している現在、成体の枝を折って移植する方法(無性生殖の利用)を大規模工事に用いるのは望ましくない。そこで著者らは有性生殖を利用したサンゴ再生技術の開発を2002年から進め、着床具とマリブロックを組み合わせ、日本各地でサンゴ再生実験を行ってきた。多種の実験を行った結果、着床具とマリブロックを用いたサンゴ礁再生技術のシナリオを描くことができた。この技術は、国内のみならず熱帯の島嶼のサンゴ礁再生にも利用できると考えている。

5.2 着床具の機能と使用法

サンゴ着床具は、一斉産卵によって産まれる多種かつ無数のサンゴ幼生に新しい着生適地を提供し、成長したサン

ゴを移植に供するものである。海中での大量運用や移植工法までを配慮してデザインした。

着床具は多数を架台に配置し幼生の着生量が多い海域を選んで設置する。まずサンゴの一斉産卵日を予測し、その1週間前から当日までに着床具を設置することでミドリイシ属の幼生を着生させる。ハナヤサイサンゴ科はその後適時幼生を放出するため、さらに多くの着生を期待できる。サンゴは着成後1年を経ると海中で確認できるようになり、適時に必要な数の着床具を選別し移植に用いることができる。

着床具は岩盤やマリンブロックに1m²あたり10個を固定し、以後継続的に管理（死亡個体の差し換えなど）することでサンゴの再生を行う。着床具は海中に設置したまま稚サンゴの成長を待つが、その段階で海域間の移動は容易である。高水温による白化が予想される場合は少し深くて水温の低い海域に一時的に避難させる。また幼生着生適地が波浪の強い海域の場合、着生後に静穏海域に移動する。

マリンブロックとサンゴ着床具を用いた、サンゴ礁再生技術について開発した手順を紹介する。

(1) 幼生確保の着床具設置（5月～6月）

サンゴの産卵に合わせて、対象海域に着床具を設置する。この際、最適な着床具の設置場所、設置間隔、設置法、設置コストなどの検討が必要である。

(2) 着床具の移設

春季に設置した着床具は、台風などによる流出の危険性を回避するため、台風シーズン前に深場などの安全な場所に移設する。着床具の移設に際しては、着床後間もないサンゴにダメージを与えないよう配慮し、空気に触れさせることや、急激な水温変化を与えることは避ける必要がある。

(3) 着生サンゴの育成（約1年間）

夏季に着床具を移動した場所において、1年程度育成する。これにより、自然淘汰から生き残った稚サンゴを入手できることになる。また、サンゴのサイズアップも期待されることより、被捕食などの可能性は低くなる。

(4) マリンブロックの設置

サンゴ礁再生海域にマリンブロックを沈設する。波浪などの条件が厳しい場所においては、安定計算を行い、アンカーリングやフレーム固定などの対策を講じる。また、沈設するマリンブロックにはあらかじめ着床具取り付け用の孔を穿っておくことが望ましい。

(5) 着床具の移植

着床具をフレームから取り出し、着床具上で成長しているサンゴを選別する。選別を終えた稚サンゴが着生している着床具をマリンブロック上へと移植することとなるが、最終的なサンゴ群体の密度が1m²あたり10群体程度になるように、移植数を調整する。

(6) 移植効果確認とモニタリング

移植した着床具上のサンゴの生育状況を定期的に観察し、その効果を評価するとともに、新たな移植場所や追加移植の必要性を判断する。併せて、水質や周辺の生物生息状況をモニタリングし、データの蓄積を図り今後の対策の資料とする。

5.3 マリンブロックの機能と使用法

着床具を固定するための基盤はリーフである。しかしサンゴ礁には死んだ樹枝状サンゴが瓦礫化した広大なラグーンが存在し、そこでは人工基盤を設置して着床具を移植するしかない。また、陸域からの負荷が大きいリーフでは、富栄養化により表面に微細藻類が繁茂し、それが浮泥を捉えてリーフをマット状に覆い、サンゴ幼生が着生できない状態となっている。このような場所でも人工基盤の利用が必要となる。

サンゴ礁再生のための人工基盤は、素材そのものがサンゴの着生や生育に適していることが必要である。4.1節で述べたように、マリンブロック自体にサンゴ幼生が良く着生するため、その面で適切な素材である。

マリンブロックはサンゴ礁再生にうえて二つの異なる利用法がある。ひとつはサンゴの育った着床具を移植し、また継続的に管理するための人工基盤として利用する方法。もうひとつは、マリンブロックにサンゴ幼生を着生させて育てるための人工リーフである。

マリンブロックを着床具の移植基盤として用いる場合、着床具にサンゴが育った段階で初めて必要になる。したがって、あらかじめサンゴ再生場として設置造成されていても、移植直前に必要数を設置することでも対応できる。この場合、設置時期を問わない。

人工リーフとして用いる場合には、事前の穴あけ加工や設置時期を着床具と同様のタイミングとするなどの配慮を要する。

(1) 自然のリーフに着生するサンゴ

自然界でサンゴ幼生（ミドリイシ属）はリーフの小さな穴や溝の中で影になった場所に着生する。約1年後には直径約10mmまで育って穴の外に出、以後は成長を速める。この穴の中の生活はナガウニなどの食害を防ぐための自己防衛策と考えられている。

サンゴの幼生がこのような穴に着生するにはそこがきれいな状態でなくてはならない。さらに、サンゴがゆっくりと成長する間、穴が藻類や赤土で埋まるような環境では、着生したサンゴが穴の中で死んでしまう。

着床具の場合（写真10）、それを重ねて横向きの隙間をつくり、着床板部の下面にサンゴ幼生をつけるのは、自然界のサンゴの当初1年間の生残メカニズムを配慮したものである。また海域への設置を一斉産卵の直前に行うのは着床具の表面に他の生物が着くのを避



写真 10 設置 26 ヶ月着床具の海中選別（石西礁湖，2004 年 6 月，着床具直径 44 mm）

Photo 10 Underwater inspection of corals on the coral settlement devices (CSD) 26 months after deployment (June 2004, Sekisei Lagoon)

けるためである。

(2) マリブロックに着生するサンゴ

マリブロックを人工リーフとして用いる場合、ブロック表面が平坦なままでは幼生が着生してもすぐに生物の食害を受け、ほとんどの場合成長が困難と考えられる。自然のリーフや着床具に着生・生育するサンゴの生態を配慮すると、着生した幼生が 1 年間に安全に過ごせる場所を作る必要がある。

そのための加工は単純で、サンゴの一斉産卵の直前にマリブロック表面に直径 10 mm の穴をあけることで対処できる。陸上で穴をあけてから産卵直前に設置しても、海域に設置済みのものに直前に穴をあけてもよい。

一斉産卵の直前に、あらかじめ直径 10 mm の穴をあけて海域に設置したマリブロックには、自然のリーフと同様に穴にサンゴ幼生が着生し、1 年を経て概ね直径 10 mm に達する（写真 11）。マリブロックは、天然のリーフがサンゴ幼生を着けて育てる機能と同じことを再現できる素材である。



写真 11 マリブロック上面の直径 10 mm の穴に育つ 13 ヶ月のミドリイシ（左上と右下の穴のなか，石西礁湖，2007 年 6 月）

Photo 11 13 months old Acropora settled in the 10 mm diameter holes (at the upper right and the lower left) on the Marine Block (June 2007, Sekisei Lagoon)

5.4 サンゴ礁再生のシナリオ

サンゴ礁の再生は、着床具とマリブロックを組み合わせることで、サンゴと自然界に何ら負荷を与えることなく実施可能である。サンゴの生態からみて、多種のサンゴが大規模に一斉産卵する機会を利用することが自然の理にかなっている。そこで産まれる無数のサンゴ幼生の 99% 以上は着生適地を得られずサンゴ礁海域から流れ去って死滅すると考えられているためである。そこに着床具を提供することにより死滅する幼生のごく一部を救って再生に利用することができる。生物多様性の場として重要なサンゴ礁で、現存するサンゴ群集の構成比そのままに、さまざまなサンゴ種の種苗を用いて再生することが重要である。

大型のマリブロックの場合、それを一斉産卵直前に海域に設置し、また設置後に回収や移動を行うことは難しい。小回りの効く着床具を組み合わせることで新しいサンゴ再生技術が展開できたといえる。

移植したサンゴは、そのすべてが順調に生育するとは限らない。1 m² に 10 個の割合で植え、死亡個体については順次入れ替え作業を行う。このような手入れを継続することで、移植後 5~6 年で直径 40 cm ほどに成長したさまざまな種類のサンゴがマリブロックを覆いつくすこととなる。

6. おわりに

着床具とマリブロックを用いたサンゴ再生技術では、いくつかの新しい試みが行われている。粘土製の瀬戸物だけでなく、鉄鋼スラグを成型・焼成した新素材の着床具が開発された。これは良好な表面形状と高い強度を有し、波の荒いリーフや護岸構造物に固定できる。

また、サンゴの減少により産まれる幼生数が減少している。この対策として小型軽量な着床具の特性を利用しサンゴ幼生を集め、海域で着床具に着生させる試みが進んでいる。

石西礁湖の水質は比較的良好的なため、白化で死んだサンゴも多くの海域で回復傾向にある。しかし、石垣島周辺には陸域の負荷によって再生しない場所がある。その原因の特定のため、着床具とマリブロックを組み合わせた「沿岸海域の生物学的評価ユニットの開発研究」が名蔵湾で進行中である。

熱帯諸国でもサンゴ礁は日本同様に危機的状況にある。このような海域ではサンゴの生態情報が極度に少なく、サンゴ再生を行うには事前のサンゴ再生産力評価がきわめて重要である。このために、着床具とマリブロックを組み合わせた「サンゴ礁再生海域の事前評価システムの開発研究」がインドネシア、マナドのブナケン国立公園で進行中である。

サンゴ礁の再生は海域ごとにきめ細かい対応が必要である。1年で10mmまでしか成長しないサンゴの歩みに合わせ、自然のままにサンゴ礁を再生するための強力な手段が着床具とマリプロックである。

JFEグループは、本稿で述べた新しい技術を駆使し、生態系をはじめとした自然環境の保全、国土の保全に貢献したいと考えている。



小山田久美



渡辺 圭児



岡本 峰雄

参考文献

- 1) 磯尾典男, 高橋達人, 岡田光正. 藻場造成用基質としての炭酸固化体の評価. 日本水産学会誌. 2000, vol. 66, p. 647-650.
- 2) 鉄鋼スラグ炭酸固化体 利用マニュアル—藻場・サンゴ礁の再生に向けて—. 港湾空間高度化環境研究センター. 藻場着生基盤技術研究会.
- 3) 小山田久美, 高橋達人, 岩尾研二. 多孔質炭酸固化体を用いたサンゴ幼生着生試験. 日本サンゴ礁学会第6回大会要旨集. 2003.
- 4) Okamoto, Mineo; Nojima, Satoshi; Furushima, Yasuo; Phoel, William C. A basic experiment of coral culture using sexual reproduction in the open sea. Fisheries Science 2005.
- 5) 大門高久, 山室悠太, 岡本峰雄, 岩田至, 小山田久美. マリプロックを用いたサンゴ再生技術の検討. 日本水産学会秋季大会講演要旨集. 2007.



岩田 至