

「マリブロック®」によるサンゴ礁再生技術の展開

Development of Restoration Technology of Coral Reefs Using “Marine Block”

小山田久美 OYAMADA Kumi JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員(課長) Ph. D.
岡本 峰雄 OKAMOTO Mineo 東京海洋大学 海洋科学部海洋環境学科 教授 Ph. D.
岩田 至 IWATA Itaru 芙蓉海洋開発(株) 技術部 部長代理

要旨

JFE スチールでは、鉄鋼スラグ炭酸固化体「マリブロック®」を用いて、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。沖縄県の宮古島では移植した幼生サンゴが産卵したことを確認し、サンゴ礁再生技術として優れた技術であることを証明した。更に、本技術をインドネシア共和国でも展開しているのでその状況を報告する。

Abstract:

JFE Steel has developed restoration technology of damaged coral reefs using carbonated block, “Marine Block.” In Miyakojima in Okinawa Prefecture, the transplanted larva coral on “Marine Block” had spawned eggs, and it was proved that this technology is well suited to coral reef restoration. Furthermore, this technology is currently on-site evaluation in the Republic of Indonesia, and the progress of this experimental project will be introduced in this paper.

1. はじめに

「マリブロック®」¹⁾によるサンゴ礁再生技術の開発については2008年発行のJFE技報にて報告した²⁾。

当技術開発は順調に進んでおり、サンゴの有性生殖を利用した着床具³⁾と「マリブロック®」を用いたサンゴ礁再生の研究については、日本の沖縄県宮古島での成果が先進事例として挙げられる。この事例は、東京海洋大学やJFEスチールのグループが中心となって研究を進めており、サンゴ礁再生技術として着実な成果を得てきた⁴⁻⁶⁾。また、「マリブロック®」は、本稿では詳しく触れないが、サンゴ礁とともに藻場再生基盤としても優れた業績をあげている⁷⁾。

サンゴ礁は、熱帯から亜熱帯域の海洋に広く分布し、当該海域の生態系における一次生産を担う場として重要である。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⁸⁾。しかしながら、現在サンゴ礁は、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ダメージを受け、世界的に急激に減少している⁹⁾。

日本においても、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 スチール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®」と、東京海洋大学等で開発したスラグ製サンゴ着床具を組み合わせたサンゴ礁再生技術を日本国内だけでなく海外での試験も開始し、本稿ではその成果を報告する。

2. 実施内容

沖縄県宮古島の港湾区域において、以前のサンゴ礁を取り戻すための再生技術の開発を実施している。技術開発の実施場所は、海底が死サンゴのガレキで覆われており、サンゴの幼生が着床できる基質が存在しない。また、周辺海域においても温暖化によるサンゴ白化やオニヒトデによる食害のため、サンゴの現存量が減少している。

このような場所においては、枝を折ることができるサンゴの群集がないため、サンゴを植えるための基質がないことなどの理由により、既存技術でのサンゴ礁再生は困難である。

これらの状況に対応するため、サンゴを移植する基盤である「マリブロック®」と、サンゴの有性生殖で得られる稚サンゴを確保するための着床具を用いたサンゴ礁再生の技術開発を実施している。

沖縄県宮古島のサンゴ礁再生海域は、死サンゴが厚く堆

積するガレ場となっている。ガレ場では、海底に堆積した死サンゴが常に海流などで揺れ動き、また台風が来れば流されてしまうなど物理的に不安定である。さらに、死サンゴの上には、サンゴの生育を妨げる要因となる、浮泥などの堆積物や小型藻類など他の生物も付着しやすい。そのため、ガレ場では自然にサンゴが着生し成長することは困難である。現在実験を行なっているこのガレ場でも、技術開発を実施した当初より実験区画周辺でサンゴが自然に再生していることは認められていない。

ただ、死サンゴが大量に堆積することから、過去には規模の大きなサンゴ礁があったことが類推でき、サンゴが成長するための条件は備わっていると判断できる場所である。

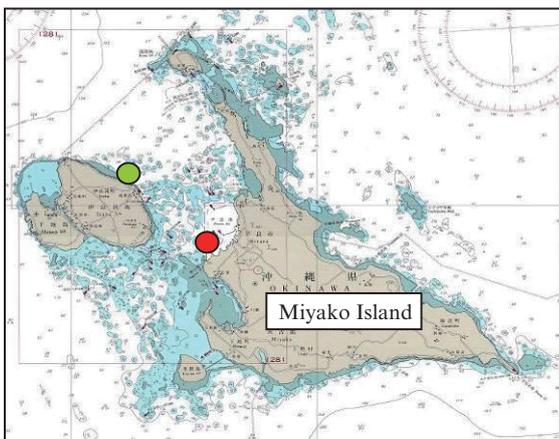
このような場所では、移植するためのサンゴを確保できていたとしても、サンゴ移植が可能な海底面が存在しない。この技術開発では「マリブロック®」というサンゴの成長に適した人工基盤を用いることで、移植する場の問題を解決している。

「マリブロック®」の人工基盤として選定した理由には、以下が該当する（写真1）。

- ・製鉄プロセスで副生するスラグ（主成分は石灰）とCO₂のみを原料として製造する省エネルギー素材である。



写真1 「マリブロック®」(左) とスラグ製着床具 (右)
Photo 1 "Marine Block" (left) and coral settlement devices (CSD) (right)



- : Location of "Marine Block" installation
- : Location of coral settlement devices (CSD) installation

図1 実証実験場所
Fig. 1 Location of field test

- ・製造時にCO₂を吸収し（重量%で1~7%）、CaCO₃として固定しているため、CO₂削減に寄与する素材である。
- ・貝殻、サンゴと同じCaCO₃を主成分とした被覆層を保有するため、生物親和性が高い。
- ・気孔率が20~40%のポーラスブロックであるため、水中での安定度が高い。
- ・製品からの成分溶出がないため、海水へのアルカリ影響がない。
- ・表面に微小な凹凸があり生物が着生しやすい。

また、実海域のサンゴの幼生の着生試験では、対照のコンクリートより、幼生の着床率が約2倍と、サンゴ幼生が着生するのに適した材質であることが示されている¹⁰⁾。

下記(1)~(4)に実証試験方法を記す。

(1) 「マリブロック®」の設置

サンゴの移植基盤として使用する「マリブロック®」を沖縄県宮古島海域に設置した(図1)。なお、当実証実験は、沖縄総合事務局の実海域実験場提供システムにより、国立大学法人東京海洋大学と共同で行なったものである。

(2) 着床具の設置

移植用サンゴを確保するため、サンゴの産卵時期に合わせて、サンゴ幼生が多く流れ着くと考えられる海域に着床具を設置した。この作業については、2005年以降毎年行なっている。

(3) 「マリブロック®」への稚サンゴ移植

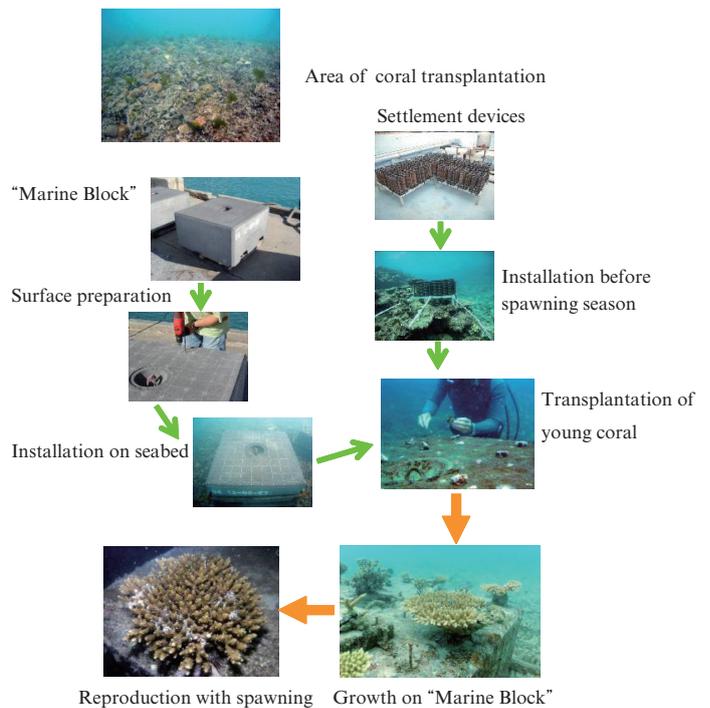


図2 実証実験の流れ
Fig. 2 Operation sequence

サンゴの産卵時期に合わせて設置した着床具は、移植サンゴのストック場所にて成長する。着床具に着床したサンゴ幼生は、約1年で肉眼でも確認できる稚サンゴへと成長する。「マリブロック®」への稚サンゴ移植は、稚サンゴが成長し肉眼でも確実に確認できるサイズとなってから実施する。東京海洋大学での研究では、5 cm以上のサイズに成長したサンゴを移植すると歩留まりが良くなるとされているが、宮古島の海域でこのサイズにまで成長するには2年以上の時間が必要である⁴⁻⁶⁾。

(4) 全体作業の流れ

本技術の作業手順イメージを図2に示した。

3. 成果

3.1 海底状況と移植サンゴ

本研究の開始以来、海底状況はずっとガレ場のままであるが、移植したサンゴは成長している(写真2)。

3.2 移植サンゴと魚の集集

「マリブロック®」に移植したサンゴは、順調に生育している。

移植したサンゴが大きく成長することで、そのサンゴを隠れ家として利用する魚や、サンゴに付着する餌を食べに来る魚が集まりはじめる現象も確認されている(写真3)。サンゴ移植により、失われていた自然の生態系が回復することが示された事例となっている。

3.3 移植サンゴの成長状況

移植したサンゴの成長状況を例として図3に示した。

ミドリイシは他種のサンゴと比較しても成長が早く経時的に大きくなった。一方、ハナヤサイサンゴはある程度のサイズまで成長すると、大きさは頭打ちとなり、部分的な死亡と再生を繰り返しながら個体群を維持する傾向があった。

ミドリイシとハナヤサイは、宮古島の代表的なサンゴである⁴⁻⁶⁾。特にミドリイシは、造礁サンゴとしてサンゴ礁生態系にとって重要な種であるが、世界的に衰退が著しく、その再生が急務となっている^{8,9)}。

3.4 移植サンゴからの再生産

2011年5月に「マリブロック®」に移植したサンゴが産卵する状況を確認した。このサンゴは図4に示したサンゴである。

本種はハナガサミドリイシで、2005年5月に採苗し、10月に「マリブロック®」へ移植した。移植したサンゴの中で最も大きく成長しており、産卵時のサイズは最大径で300 mmであった。産卵の確認は、インターバルカメラを用い、5月16日~18日の夜間(19:00~翌1:00)に1分ご



Seabed condition of control area

Transplant operation on "Marine Block" (2005)



Seabed condition (Remaining rock field) of control area

Grown coral transplanted on "Marine Block" (2007)



Seabed condition (Remaining rock field) of control area

Grown coral transplanted on "Marine Block" (2009)



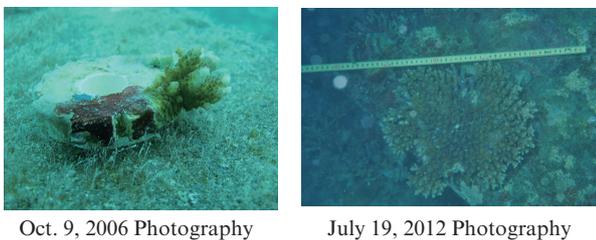
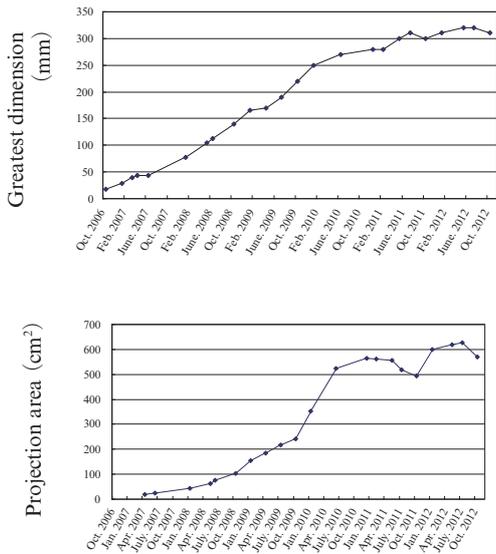
Seabed condition (Remaining rock field) of control area

Grown coral transplanted on "Marine Block" (2012)

写真2 比較対照区と「マリブロック®」上のサンゴの成長
Photo 2 Control area and growth of coral on "Marine Block"

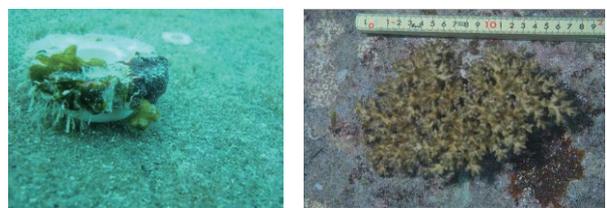
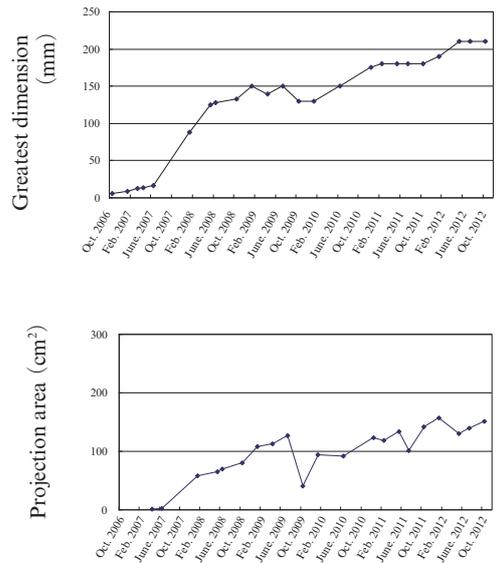


写真3 「マリブロック®」に集集する魚
Photo 3 Fish gathering to "Marine Block"



Oct. 9, 2006 Photography July 19, 2012 Photography

図3 ミドリイシの成長状況
Fig. 3 Growth of *Acropora sp.*



Oct. 9, 2006 Photography July 19, 2012 Photography

図4 ハナヤサイサンゴの成長状況
Fig. 4 Growth of *Pocillopora sp.*

との撮影により行なった。

サンゴの産卵は、5月17日の22:47, 22:48にポリプ（サンゴの基本単位、イソギンチャクと同じような形状の動物でサンゴ骨格の中に入っている、通常目にするサンゴはポリプの集合体）先端にバンドル（精子と卵子とが詰まったカプセル状のもの）がみられることから始まった。22:49以降はバンドルがポリプより浮き上がりはじめ、22:51には一斉にバンドルがポリプより離れることで一旦産卵が終息した。しかし、22:56には、再度産卵が始まり、22:58には産卵が終息した（写真4）。

移植したサンゴの産卵が確認できたことは、移植場所において、サンゴの再生産サイクルが完成したことを意味する。死サンゴからなるガレ場でも、適切な手法・材料を用いることで、サンゴ礁を再生させることが可能となった。

本技術開発は、サンゴ礁が世界的に急速に減少している現状において、今までは不可能とされていた場所におけるサンゴ礁再生を可能にするものであり、その意義は大きい。

このように「マリブロック®」上でサンゴの再生産に成功した。上述したようにガレ場は、サンゴ幼生が着生し成長するには物理的に不安定であり堆積物なども積もり不適な状態となる。今回の対照区（「マリブロック®」非設置区）のように一旦ガレ場になるとガレ場のままで、サンゴ礁が自然に回復することはない。今回、サンゴ幼生の成長に適して

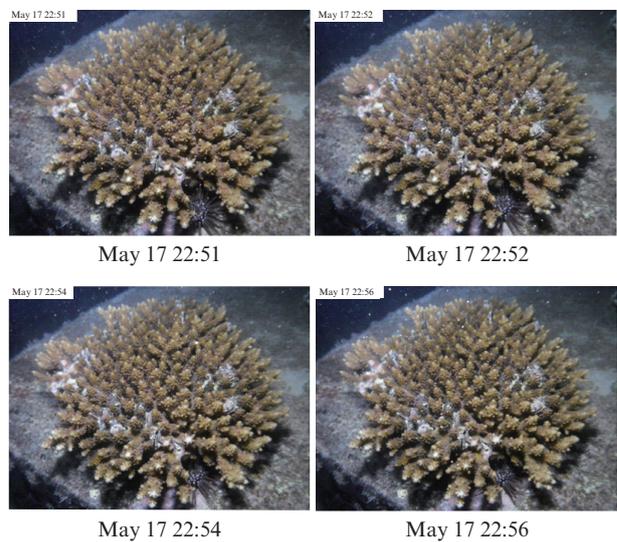


写真4 サンゴ (*Acropora nasuta*) の産卵状況
Photo 4 Spawning of transplanted *Acropora nasuta*

いる「マリブロック®」という安定した成長基盤を設置することで、ガレ場でも、サンゴ礁の再生が可能であることが証明された。



図5 実験の実施位置 (マナド)

Fig. 5 Location of the experiment (Manado)

4. 海外への展開

4.1 背景

本研究の成果は、世界中のサンゴ礁再生事業へ技術展開することが可能である。

実績としては、経済産業省が調査事業として、インドネシア共和国北スラウェシ州において(図5)サンゴ礁再生のための実証実験を実施した¹¹⁾。これは、2008年6月に設立された、東アジア・ASEAN 経済研究センター (ERIA: Economic Research Institute for ASEAN and East Asia) のワーキンググループ会議¹²⁾の中で報告された。

4.2 北スラウェシ州のサンゴ礁の現状

北スラウェシ州のサンゴ礁は、爆弾漁、シアン化合物漁、オニヒトゲ食害等により被害を受け、衰退する状況が進行している。また、1998年の世界的なサンゴ白化の影響も受けていると考えられる。

2010年には、前述の経済産業省の調査事業¹⁰⁾により、マナド海域のサンゴ状況が調査されている。

本調査によれば、サンゴ被度が低い場所は死サンゴの被度が高い傾向がみられており、マナド海域のサンゴ礁が健全性を徐々に失いつつある状況にあると報告されている¹⁰⁾。

4.3 実施目的

インドネシア共和国の北スラウェシ州は、発達したサンゴ礁が広がるエリアである。熱帯から亜熱帯の浅海域では、サンゴ礁は生態系の基礎を担う役割を担っている。

特に、インドネシアの海域は、コーラル・トライアングルの中心であり、世界的な生物多様性の維持のために必要不可欠な海域である。コーラル・トライアングルは、世界のサンゴ礁のほぼ30%を擁し、3,000種以上の魚類が生息する生物多様性豊かな海域である¹²⁾。

しかし、インドネシアのサンゴ礁は、インドネシア政府がCOP10(生物多様性条約第10回締約国会議)の場においてサンゴ礁に迫る脅威、失う経済的価値の大きさについて言

及しており、サンゴ礁保護のための資金供給の重要性を強調するまでの状況へと悪化している。

このような現状を放置することは、インドネシア共和国の観光資源や水産資源の減少といった経済への影響が懸念されることともなる。

当試験は、日本で開発された「マリブロック®」を用いたサンゴ礁技術がインドネシアで適用できるかを検証することを目的としている。

4.4 実験内容とモニタリング状況

北スラウェシ州でのサンゴ礁再生実験は、経済産業省の調査事業の中で実施された。現地には「マリブロック®」10個が図5に示した地点に設置された。

今回の実験では、サンゴ移植後1ヶ月においてモニタリング調査を実施し、生残率は93%と高い初期生残率であった。移植後3ヶ月の2011年2月18日には浮泥の堆積が懸念されたためメンテナンスのために目視観察をしたが、浮泥の堆積は流速が早いためにみられず、サンゴ類の減耗も確認されなかった。これにより、「マリブロック®」はサンゴ類の生育基盤としてインドネシア共和国でも適用できることが示された。

移植用の稚サンゴは、着床具をサンゴの産卵時期に合わせてサンゴ幼生が流れ着くと思われる場所に設置し、着床

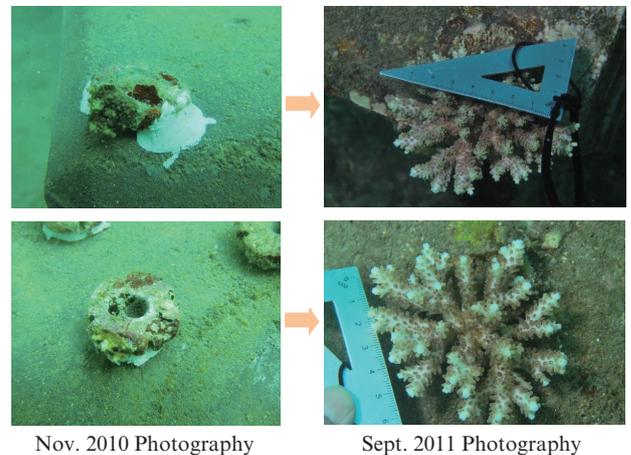


写真5 サンゴ(ミドリイシ属)の成長状況

Photo 5 Growing *Acropora* sp. on "Marine Block"

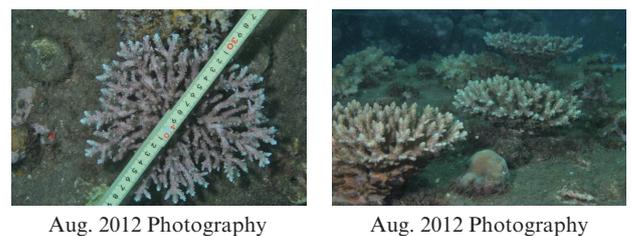


写真6 サンゴ(ミドリイシ属)の成長状況

Photo 6 Growing *Acropora* sp. on "Marine Block"

具にサンゴ幼生が自然に着床させることで確保している。稚サンゴの移植においては、かつてサンゴ類が多かったが白化現象以降の再生が進んでいない場所に「マリブロック®」を設置し、移植基盤として用いることでサンゴ礁の再生を目指している。

その後の東京海洋大学などによるモニタリングでは、「マリブロック®」に移植した稚サンゴが順調に生育している状況が確認されている（写真5, 6）。また、データは精査中ではあるが、サンゴの成長速度は日本にくらべ早いことがわかってきた¹³⁾。

4.5 期待される効果

健全なサンゴ礁を維持することは、水産資源の維持と水産業の発展、海域環境における多様性の確保、観光業の発展に貢献することとなる。

(1) インドネシアにおける水産資源の維持と水産業の発展

サンゴ礁生態系は、多種多様な生物の格好の生息地になっているため、サンゴ礁漁業の基盤となっている。北スラウェシ州のサンゴ礁からは、ハタ類、タイ類およびエビ類が漁獲され、住民に利用されている。

しかし、北スラウェシ州では、爆弾漁、シアン化合物漁のため漁獲量が著しく減少する傾向にある。近年では、政府、州としての厳しい規制により、サンゴ礁の保全を目指しているが、一度破壊されたサンゴ礁が元の状態に戻るには長い時間が必要となる。しかも、これらの漁によりサンゴ礁が破壊され死滅し、サンゴ礁生態系が復活しない状況も存在する。

これらの現状に対応するためには、早急なサンゴ礁再生が望まれる。サンゴ礁再生により、水産資源の復活・維持を見込むことが可能となり、地域の活性化にもつながることとなる。サンゴ礁再生は周辺の住民にとっての意義が大きく、食糧の確保のみでなく雇用の創出にもつながる可能性が高い。

(2) 生物多様性の確保

インドネシア共和国は、島嶼国でありサンゴ礁の海から5000m級の山まで変化に富んだ環境を有しており、世界有数の高い生物多様性を有している。また、生息する生物の、固有種割合も高く、貴重性の高さにおいても世界有数である。

Indonesian biodiversity strategy and Action plan (2006)によると、インドネシア共和国のサンゴ礁における生物多様性の価値は、5億6700万USドルと試算されている。サンゴ礁は生物資源の生産力が高く、水産や海洋生態系保全などに大きな役割を果たしている。

このように生物多様性を確保することは、大きな価値を有することと同義であり、サンゴ礁を保全・再生することの意義は大きい。

(3) 観光業の発展

インドネシア共和国の観光業に着目すると、国が主要な5島と中規模な群島を含めた約17000以上の島々から成り立っているため、美しい自然と動植物の多様性が観光資源となっている。なかでも、大きく広がるサンゴ礁は、世界中でも有数の観光スポットとされており、ダイビングなどの海洋レジャーを目的とした観光客に利用されている。インドネシア共和国のサンゴ礁面積は、7500km² (KLH 1992) から85707km² (Tomascik et al. 1997) などと幅がある見積りがなされているが、世界のサンゴ礁の約14%と考えられている。

しかし、本エリアのサンゴ礁はさまざまな要因により衰退する傾向にあり、回復の傾向は全くみられない。早急にサンゴ礁の保全・再生に着手することは、莫大な観光資源を維持し、観光業の発展に貢献することとなる。

(4) 国土保全

サンゴ礁は自然の驚異から、住民の生活エリアを守る防波堤の効果を有することが知られている。例えば、2004年12月のインドネシアのスマトラ島沖で大地震による津波では、サンゴ礁が発達しているエリアでは被害が小さくおさえられたとの報告もみられる¹⁴⁾。これは、サンゴ礁域は水深が浅く津波の速度を低下させると同時に、砕波効果により津波のエネルギーが減衰される効果によるものである。

このように、国土保全の観点からもサンゴ礁の保全・再生は重要な要素である。

4.6 成果の普及

現地モデル試験を進めるにあたり、カウンターパートとなったサムラトランギ大学水産学部とともに、北スラウェシ州や関連する中央政府部局や団体などのネットワークが構築されている。

また、リクバンでのサンゴ礁再生の取組みで順調な成果が示されていることから、地元の大学や政府関係者の関心も高まりつつある。昨年、リクバンでのサンゴ礁再生の関係者において、北スラウェシ州の自然保護のための調査や情報交換について円滑に進めるための覚え書きも交わされている。

2011年4月のERIAにおけるワーキンググループ会議では、サンゴ礁再生の取組みが参加国の大きな関心を呼んだ。

2011年2月16日には、現地試験結果を基本にして、人工リーフに関わる国際シンポジウムが北スラウェシ州マナドで開催されている。主催は、サムラトランギ大学であった。

実際にサンゴ礁再生に関心がある専門家と、有効利用の成果を分かち合うことにより、ネットワークを構築することが目標として掲げられている。このシンポジウムには、サムラトランギ大学、地元関係者、東京海洋大学などが参加し、交流が行われた。

また、2012年7月には、国際サンゴ礁学会において成果を発表したことにより、サンゴ礁再生に関する先駆的な取り組みとして、世界的にも注目を浴びている¹⁵⁾。

6. おわりに

宮古島における「マリンブロック®」と着床具によるサンゴ礁再生技術の開発は、サンゴの有性生殖を利用した手法が、有効であると証明することに成功した。また、移植サンゴが産卵する状況も確認しており、本技術の利用により、サンゴが再生産のサイクルに入る状況を確認したことの意義は大きいと考えている。

サンゴ礁は、熱帯・亜熱帯の海域に広く分布しており、開発した技術の展開についても、広範囲にわたる応用が可能である。

2010年以降は、インドネシア共和国北スラウェシ州でも本技術を利用したサンゴ礁再生への取り組みが実施されており、順調な成果を得ることに成功している。

コーラルトライアングルのサンゴ礁の85%が絶滅の危機にある¹⁶⁾といった状況の中、CTI（コーラルトライアングルイニシアティブ）といったプログラム¹⁷⁾が立ち上がりサンゴ礁を持続可能に管理し守る機運が高まっている。

JFEスチールは、今後も、鉄鋼スラグを活用しながら、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。

参考文献

- 1) 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（WAVE）、藻場着生基盤技術研究会、2004。
- 2) 小山田久美、渡辺圭児、岡本峰雄、岩田至。マリンブロック®によるサンゴ礁再生技術。JFE技報。no.19、スラグ製品特集号、2008。
- 3) 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.
- 4) 大門高久、山室悠太、岡本峰雄、岩田至、小山田久美。マリンブロック®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。
- 5) Okamoto, Mineo; Yap, Minlee; Roeroe, Kakaskasen A.; Nojima, Satoshi; Oyamada, Kumi; Fujiwara, Syuichi ; Iwata, Itaru. Development of a coastal environment assessment system using coral recruitment. Fisheries Science. 2008.
- 6) 山室悠太。着床具と人工基盤（マリンブロック）を用いた宮古島平良港でのサンゴ再生実験について。東京海洋大学大学院。2011。修士論文。
- 7) 小山田久美。地球環境保全に貢献するサンゴ礁・藻場造成基盤「マリンブロック™」。建設リサイクル。2012。vol.28、冬号。
- 8) 環境省国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター。サンゴ礁の役割。http://www.coremoc.go.jp/coral_reef/role
- 9) 国際サンゴ礁シンポジウム（International Coral Reef Symposium, ICRS）。米スミソニアン協会 Jeremy Jackson。2012。
- 10) 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。
- 11) 経済産業省。平成22年度東アジア省エネルギー推進研究事業「東アジアにおける鉄鋼スラグ製品の有効利用による省エネルギー・環境基礎調査」報告書。2011。
- 12) 3rd Meeting of the ERIA Research Working Group for Analysis of Energy Saving potential in East Asia Region. 2011。
- 13) Ecological assessment of the coral communities of Bunaken National Park: Indicators of management effectiveness. Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium. Lyndon DEVANTIER, Emre TURAK and Posa SKELTON, 2006。
- 14) 田中厚成。津波の恐ろしさとその対応。<http://www.cis.ac.jp/research/satellite/popup/0605a.html>
- 15) Okamoto, Mineo; Roeroe, Kakaskasen A.; Yap, Minlee; Lalamentic, Laurethius Th. X.; Fujiwara, Syuichi; Oyamada, Kumi; Experimental transplantation of corals using sexual reproduction in Manado. Indonesia Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium. 2012。
- 16) EIC ネット海外ニュース。<http://www.eic.or.jp/news/?act=view&oversea=1&serial=27756>
- 17) <http://www.coraltriangleinitiative.org/>



小山田久美



岡本 峰雄



岩田 至