

バリ島クタ海岸における大規模サンゴ移植実施後の状況について

CORAL CONDITION 1.5 YEARS AFTER LARGE-SCALE CORAL TRANSPLANTATION AT KUTA LAGOON, BALI ISLAND

大中 晋*・ラフマディ プラセディオ**・西平守孝***・遠藤秀文****・吉井一郎*
Susumu ONAKA, Rahmadi Prasetyo, Moritaka NISHIHARA, Shubun ENDO and Ichiro YOSHII

Transplantation of coral was conducted on a large scale in the shallow lagoon at Kuta Beach, Bali Island, Indonesia. The asexual reproduction method, whereby colonies are divided and fragments are transplanted, was used. Monitoring and maintenance works after fixing coral fragments were continued for 1.5 years to observe coral growth and survival. Compared to similar experiments conducted in Japan, considerably higher survival rate and significant growth of the transplanted corals were observed for locally occurring branching and foliose type coral species. This improved survival and growth was mainly caused by the different environmental conditions from those of Japan, such as higher water temperature of 24 to 30 °C and absence of disturbance by storm and absence of natural enemies.

Keywords : coral transplantation, coral reef, coral rehabilitation, beach conservation, beach erosion, Indonesia, ODA

1. はじめに

近年地球規模でのサンゴ礁の劣化に対し、サンゴ移植を用いたサンゴ礁保全・再生の取り組みが行われている。国内では沖縄諸島を中心に、これまでいくつかの事例が報告されている。しかしながら現状のサンゴ移植は、実施規模としては小規模なものに留まり、1年間に1ha以上の海域で有効な移植を実施した事例はない⁷⁾。また、海外での異なる環境条件下で実施されたサンゴ移植事例について示されているものは数少ない。

インドネシアのバリ島南部に位置するサンゴ礁海岸であるクタ海岸では、海岸侵食により失われた砂浜を復元するために、わが国の援助による海岸保全事業が実施されてきた。当海岸のサンゴ礁は、過去に行われた大規模なサンゴ礁基盤の採掘や、サンゴ礁上での滑走路建設により、これまで大きな損傷を受けており、それが海岸侵食を助長した要因の1つとして挙げられていた³⁾。そこで、これらの損傷を受けたサンゴの復元を目的とした、無性生殖（サンゴ片の基盤上への固定）を活用したサンゴ移植・増殖が、本事業の一環として実施された。本事業で実施したサンゴ移植は、移植面積が約1haで、過去に例を見ない大規模な

ものである。また事業として実施されることから、成長性と生残率に対する高い確実性が求められた。本研究は、国内ではまだ事例の少ない大規模サンゴ移植・増殖について、実施から1年半以上経過した移植サンゴの成長状況および環境変化を明らかにすることを目的とする。

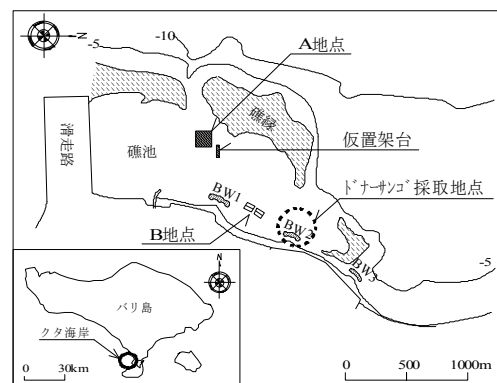


図-1 位置図

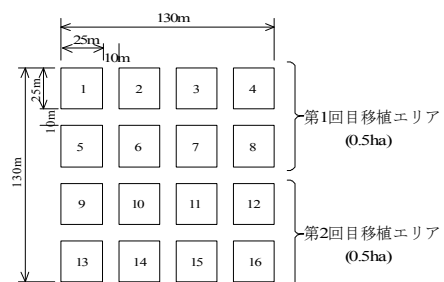


図-2 サンゴ移植場所（A地点）の配置

* 海外事業本部 運輸技術部 港湾・空港グループ
** (元) バリ島海岸保全プロジェクト事務所
*** 名城大学教授 総合研究所
(現：海洋博覧会公園管理財団・総合研究センター)
**** 双葉測量設計 (株)

2. 実施概要および自然条件

(1) 実施場所および移植規模

サンゴ移植・増殖は、図-1に示すインドネシアのバリ島南西部に位置するクタ海岸の沿岸方向約2.5km、岸沖方向0.5km～1.3kmの礁池内の岸から約700m離れたA地点において実施した。サンゴ移植は2回に分けて実施し、第1回目は2007年9月から11月初旬にかけて、沖側の0.5haのエリアで、第2回目は2008年6月から8月にかけて、岸側の0.5haのエリアでそれぞれ実施した。2009年3月現在、1回目の移植完了から約1年半が、2回目の移植から約7ヶ月が経過した。2回に分けて実施した理由は、最もサンゴへのストレスがかかると考えられる移植時および移植初期時と高水温期が重なることを避けるため、および1回目の移植後の結果を2回目のサンゴ移植に反映させるといった順応的管理を考えたものである。なおB地点(0.3ha)でのサンゴ移植については、今後インドネシア政府側で引き続き実施する予定である。サンゴ移植は図-2に示すように、A地点1haのエリアを25m四方の16ブロックに分割し、各ブロックにサンゴ基盤用としての石灰岩(重さ約1t、高さ60cm程度)を投入し、その表面上にサンゴ片を固定していく。第1回目および第2回目のサンゴ移植の時期、用いた基盤石の総数、移植したサンゴ片数は表-1に示すとおりである。

(2) 対象エリアの地形および波浪

対象地点のクタ海岸の礁池面積は約200haであり、その大部分はサンゴ砂、礫およびサンゴ石で覆われている。礁嶺付近では比較的良好なサンゴ群集が存在するとともに、礁池内においても小規模なサンゴ群集が一部で見られる。空中写真解析および現地調査結果より算定された礁嶺および礁池合わせたサンゴ群集の総面積は、約28.5ha(被度30～50%程度)である。礁池内の地盤高は0～-1.8mであり、A地点での平均地盤高は-0.8mである。潮位はHWL+2.6m、LWL±0.0mであり、基盤石の平均高が60cm程度であることから、干潮時においても大部分の基盤石上のサンゴ固定面が干出することはないが、局所的な海底地盤の凹凸により、投入した基盤石の一部は、大潮時に数時間程度干出する時間帯が生じる。

表-1 実施時期、基盤石総数および移植サンゴ片総数

	実施時期	基盤石	サンゴ片
第1回	07年9～11月(50日間)	4,992	46,745
第2回	08年6～7月(45日間)	6,947	64,997
総計		11,932	111,742

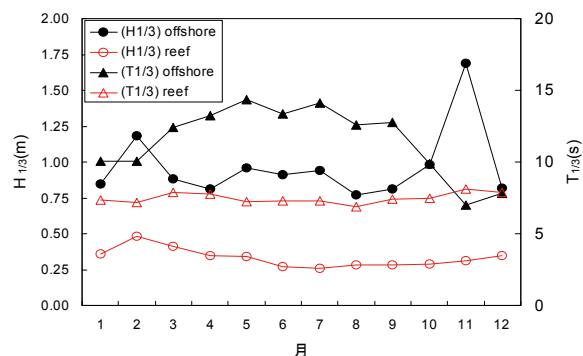


図-3 礁池内外の月別平均波高、周期(2008年)

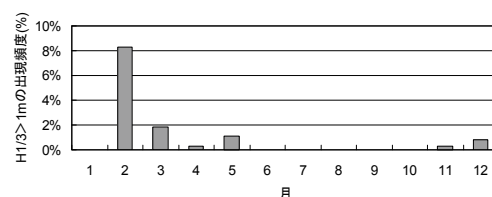


図-4 礁池内における波高1m以上の月別出現頻度(2008年)

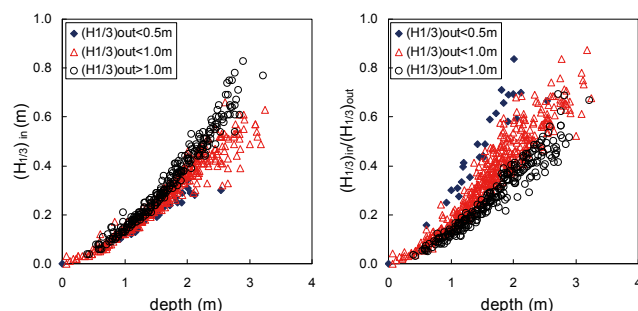


図-5 礁池内波高および礁池内外波高比と水深の関係

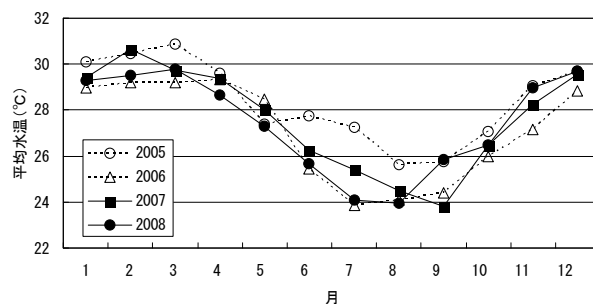


図-6 4年間にわたる各月の礁池内平均水温変化

図-3は、当地点の礁池内外の2地点で、海底設置型波高波向計を用いて計測された、2008年における平均有義波高($H_{1/3}$)および周期($T_{1/3}$)の月変化を示す。礁池沖側では、 $H_{1/3}$ が1.0m程度、 $T_{1/3}$ は11.5s程度であるが、礁池内では $H_{1/3}$ が平均0.3m、 $T_{1/3}$ は平均7.5s程度である。図-4は、礁池内における1m以上の波高の出現頻度を、図-5は礁池内波高と水深、および礁池内波高を礁池外入射波高で無次元化した波高比と水深の関係を示す。礁池内波高は潮位変化に応じた水深変化でほぼ規定され、水深の

表－2 移植したサンゴ種とその総数

形状	サンゴ属	個数	%
樹枝状 サンゴ	ミドリイシ類(<i>Acropora</i> sp.)	107,987	95.8
葉状 サンゴ	スリパチサンゴ(<i>Turbinaria</i> sp.)	1,993	1.7
	コモンサンゴ(<i>Montipora</i> sp.)	1,500	1.3
塊状 サンゴ	キクメイシ類(<i>Favia</i> , <i>Favites</i> sp.)	564	0.5
	ハマサンゴ(<i>Porites</i> sp.)		
	ハナガササンゴ(<i>Goniopora</i> sp.)		
その他		718	0.6
合計		111,802	100

ほぼ0.2倍程度となっている。また潮位が低くなるほど(礁池水深が浅くなるほど)波高比は低下する。また1年を通して2月が礁池内の波高が最も高くなる。礁池では波浪および水位変化に応じた流れが生じ、流速は平均0.1m/s程度(最大0.4m/s)である。

(3) 水温変化

図－6は、事前調査時から継続的に実施されてきた、礁池における海水温の観測結果から得られた2005年～2008年の4年間における各月の平均水温変化を示す。各年による若干の変動は見られるが、1年の変化パターンはほぼ同様であり、雨季の12月から4月頃にかけて水温は上昇し29℃前後となる。特に2月、3月あたりには、月平均水温が30℃を超える年も見られる。一方、乾期の6月から9月頃にかけて水温は低下し、24～26℃程度とな

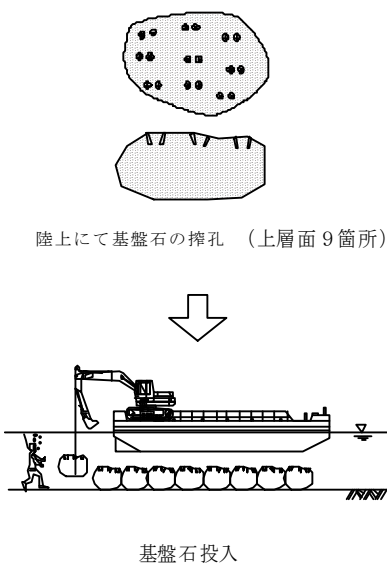
る。ちなみに、沖縄海域の低海水温期では20～21℃程度である(気象庁ホームページより)。なお、1日の中で水温は1.5～2℃程度の変動が生じる。また各月では、平均水温±2℃程度の変動が生じる。

3. サンゴ移植内容

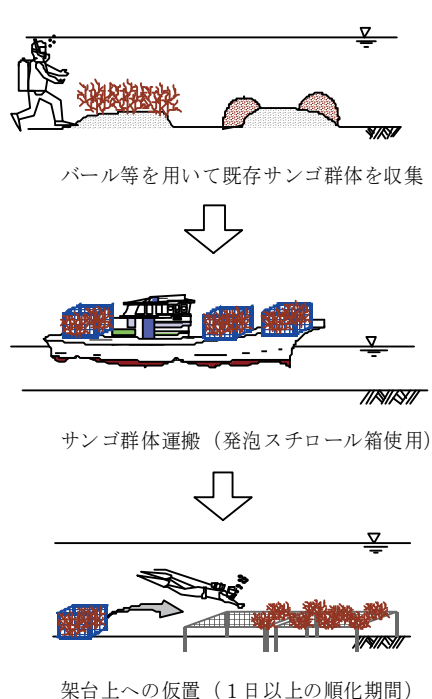
(1) 用いたサンゴ種および個数

移植するサンゴ片を採取するためのドナーサンゴとして、図－1に示す離岸堤(BW2)設置エリア付近の一部に現存するサンゴを用いた。ここでは18のサンゴ属(37種)が確認されたが、このうちの9割以上が樹枝状ミドリイシ(*Acropora nobilis*)であった。一方、事前調査結果^{1),2)}から、最も高い定着率、成長率が得られたのもミドリイシ類であったことから、これを主要なドナーサンゴとした。それ以外の種として、葉状コモンサンゴ(*Montipora* sp.)およびスリパチサンゴ(*Turbinaria* sp.)、また数は少ないが塊状サンゴも用いた。表－2に、用いたサンゴ種および取り付けたサンゴ片の総個数を示す。なお異なる海岸におけるサンゴをドナーとして用いた場合との比較を行うため、当海岸から東方約42km離れたキャンデイダサ海岸におけるコーラルファームから運搬した樹枝状ミドリイシを用いたサンゴ移植も、当移植エリアの一部の基盤石上で実施した。

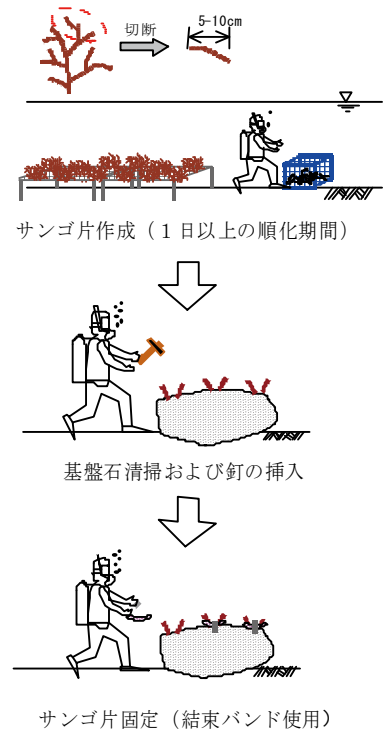
1. 基盤石挿孔および投入



2. サンゴ群体収集～仮置台への移設



3. サンゴ片作成～固定



図－7 サンゴ移植手順

(2) 移植手順

サンゴ移植の作業手順を示したものが図－7である。

1) 基盤石搾孔および投入

予め陸上において、基盤石として用いる石灰石の表面に、固定用釘挿入のための搾孔を行う。孔の配置および間隔は、基盤石の上層面の面積（約 0.65 m²）と成長後のサンゴ占有状況を考慮し、上層面の 9 箇所とした。また各ブロックの外側に設置される基盤石については側面にも 3 箇所の孔を設けた。1 箇所の孔の間隔は、固定するサンゴ片の大きさを考慮し 7～8cm とした。搾孔された基盤石は、台船にて運搬され、サンゴ固定前に予め現地に設置した。なお、1 ブロック当たり（25m 四方）の基盤石総数は 700～800 個程度である。設置に際しては、特に基盤石設置高の慎重な管理を心がけた。

2) サンゴ群体収集～仮置架台への移設

ダイバーによる水中作業により、パール等を用いて BW2 設置エリアからサンゴ群体を採集した。採集したサンゴ群体は、運搬用ボート上の海水を満たした発泡スチロール箱に入れて、仮置架台まで運搬した。仮置架台は 1m × 2m の大きさを持つ、鉄筋棒で組んだものであり、図－1 に示す A 地点近くに計 70 個設置した。なお仮置架台までの運搬距離は 1km 程度であり、運搬後直ちに仮置架台上へ移設し、1 日以上の上順化期間を設けた。

3) サンゴ片作成～固定

1 日以上の上順化後、仮置架台上に固定されているサンゴ群体から、サンゴ片の切断を行う。サンゴへのストレスを極力抑えるために、作業はすべて水中作業とした。サンゴ片は 5～10cm 程度の大きさとし、作成されたサンゴ片はプラスチックカゴに入れて再び同地点で 1 日以上上順化させた。特に切断後にはストレスからくる粘液の分泌が顕著であったことから、この粘液が完全に消えるまでは固定作業を実施しないこととした。上順化後、予め基盤石表面の清掃を行った後に、サンゴ片の固定作業を実施した。サンゴ片の固定は、釘とプラスチック製結束バンドを用いて行った（写真－1）。なお大量のサンゴ片を限られた期間内に固定する必要があることから、一連の水中作業は三グループに分け、第一グループは基盤石の清掃、第二グループは釘の



写真－1 サンゴ片の固定

打ち込み、第三グループは結束バンドを用いたサンゴ片の固定というように、水中作業は流れ作業的に行った。なお個数は少ないものの、塊状サンゴおよび一部の樹枝ミドリイシについては、水中セメントのみによる固定方法も合わせて組み入れた。

(3) 固定時の留意事項および管理方法

無性生殖によるサンゴ移植では、固定後のサンゴの成長や生残率を左右する要因として、サンゴ片の固定時における取り扱い上の要因と、その後の成長過程で生じる物理的、化学的および生物学的要因に分けられる。固定時には、慎重かつ確実な固定がなされることが、高い生残率を確保するための第一ステップとして重要となる。本サンゴ移植は、事業の一環として実施されるものであることから、高い生残率を確保することが要求され、仕様書において、現地事前調査結果を参考に、工事終了時点（1 回目のサンゴ移植開始時から 1 年 5 ヶ月後）で 70% 以上を確保することが義務づけられた。

固定時における留意事項として、確実な固定を行うとともに、サンゴ自身の基盤石への再固着が容易に行えるよう、軟体部が基盤面に広く接触し、動かないように固定させることを心がけた⁶⁾。

サンゴ片の固定作業実施後、速やかにすべての固定サンゴ片に対する立会検査を実施し、固定が不十分なものや検査時に既に白化が著しいもの、その他サンゴ状態が思わしくないと判断されたものについては、固定のやり直しや移植サンゴ片の交換を行った。このような管理を実施することにより、検査直後においては固定方法の不備や、状態の悪いサンゴ片の使用といった、固定時に生じる不備はほぼ完全に取り除かれた。すなわち、少なくとも検査直後は 100% の生残率が確保されており、その後生じたサンゴの死亡・脱落は、すべて固定後の成長過程で生じた要因によるものといえる。

(4) モニタリング

移植作業完了後に実施されるモニタリング項目としては、固定したサンゴ片の高さ・幅の計測と、写真撮影による成長および定着状況の観察、および波浪、水温、水質の計測である。サンゴの写真撮影によるモニタリング用に、各ブロックから 14 個の基盤石を選定した。またそれらの基盤石に固定した移植片から各 2 つを用いて成長記録の計測を行った。

第 1 回目のサンゴ移植では、1 ブロックを除く 7 ブロックで、各ブロック 28 個、総計 196 個のサンゴ片をモニタリング計測用サンゴとして抽出し、生残率はこの抽出したサンゴを用いて評価した。なお抽出したサンゴ片の 96% は樹枝状ミドリイシ、残りの 4% が葉状サンゴであり、これらはすべて同じ礁池内から採取されたものである。なお

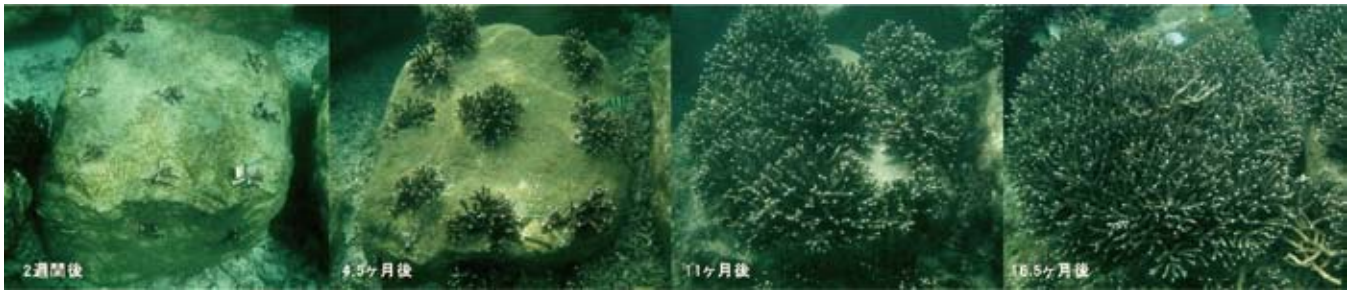
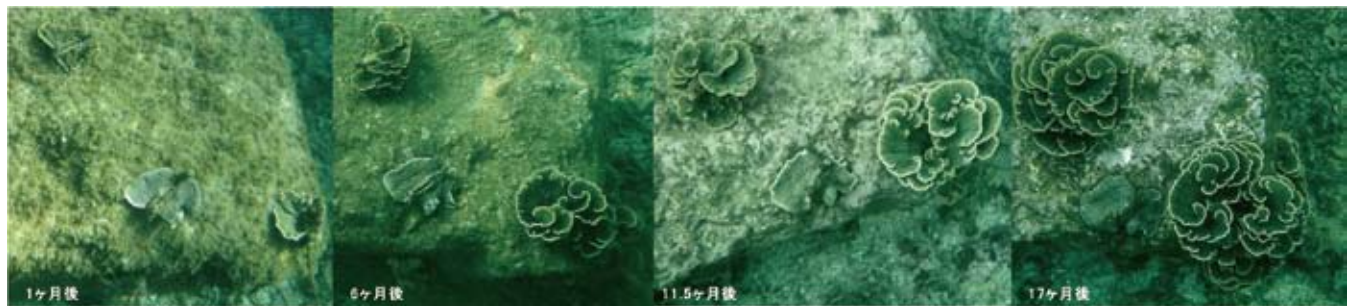

写真-2 樹枝状サンゴの成長状況（ミドリイシ *Acropora nobilis*）

写真-3 葉状サンゴの成長状況（コモンサンゴ *Montipora* sp. とスリパチサンゴ *Turbinaria* sp.）


写真-4 サンゴ群生の成長状況

比較のために、これ以外に他海岸のサンゴを用いたものや、塊状サンゴ等、他の少数サンゴに対するモニタリングも適宜実施した。

4. 第1回目移植サンゴの成長状況および生残率

(1) 成長状況

移植直後から約1年半経過後までにおける、移植した各サンゴ種に対する成長状況を示す。写真-2、3に、樹枝状ミドリイシ（*Acropora nobilis*）、葉状コモンサンゴ（*Montipora* sp.）およびスリパチサンゴ（*Turbinaria* sp.）の成長状況を示す。また移植から2ヶ月後からの樹枝状ミドリイシおよび葉状サンゴの幅、高さの成長過程を図-8に、またその変化率（移植直後の初回に計測された高さ、幅で無次元化したもの）を図-9に示す。これより樹枝状ミドリイシおよび葉状サンゴは順調な成長が見られ、従来言われているように樹枝状ミドリイシの成長が著しい。図-9より、移植から約1年半経過時点でミドリイシは高さが5.6倍、幅は3.3倍に、葉状コモンサンゴは高さが1.9倍、幅が2.8倍に、スリパチサンゴは高さ、幅とも1.8倍

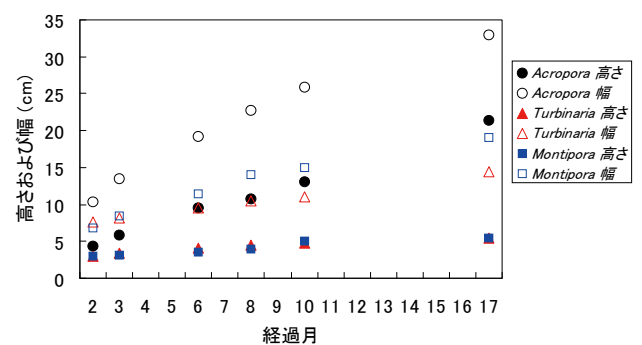


図-8 樹枝状サンゴおよび葉状サンゴの高さ、幅の変化

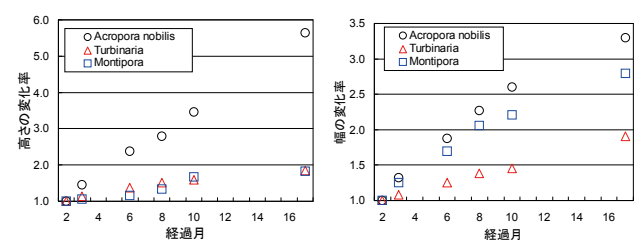
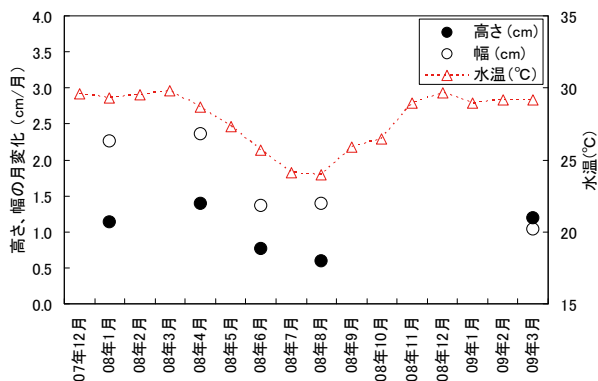


図-9 樹枝状サンゴおよび葉状サンゴの高さ、幅の変化率



図－10 各観測期間での成長率水温変化の関係

程度まで成長した。今回の約1年半のモニタリング結果から得られた各サンゴの年平均成長速度は、ミドリイシでは高さ13.1cm/年、幅17.2cm/年、葉状コモンサンゴは高さ1.9cm/年、幅9.3cm/年、スリパチサンゴは高さ1.9cm/年、幅5.3cm/年であった。図－10は、ミドリイシについて、各モニタリング期間中における月成長率と、水温変化との関係を調べたものである。水温と月変化率の変動はほぼ同様の傾向が見られ、高水温期には高い成長率が、低水

温期には成長率が下がる傾向が見られた。これより、当地点での速い成長率は、サンゴの成長に適した高水温期が持続していることに起因している可能性が示された。

写真－4は、移植サンゴの平面的な成長状況を示す。1年半経過現在、設置した基盤石がほとんど見えないほど移植したサンゴ片は成長し、サンゴ群生が形成された。

(2) 成長過程における死亡要因

これまでの約1年半のモニタリングより、固定後のサンゴの死亡・脱落原因として、a) 基盤石表面での時期的な海藻の繁殖による、固定サンゴ片の隠蔽による白化・死亡、b) 高波浪時の漂砂移動による基盤石の埋没と、その結果生じる基盤石表層での砂移動による固定サンゴの損傷・死亡、c) 特に成長後での高波浪時の波力による脱落、d) 侵入者による人為的損傷、e) 水温やサンゴの干出等、自然条件要因によるサンゴの白化・死亡、f) その他、生物学的要因に起因すると思われる原因不明の死亡、等が挙げられた。a) については、第1回目、2回目のサンゴ移植とも、固定完了から1ヶ月程度経過した時点から、特に褐藻類 (*Padina*) および紅藻類 (*Gracillaria*、他) の繁殖が顕著



写真－5 基盤上での海藻の繁殖



写真－6 白化したサンゴ移植片



写真－7 漂砂による沖側基盤石の堆積



写真－8 新たな生物環境の形成（左：成魚群 右：稚魚群）

となり、成長前の固定サンゴ片がこれらの海藻に覆われ、白化・死亡するケースが見られた（写真－5,6）。ただしこの要因によるサンゴ片の死亡は、固定直後からサンゴ片がある程度の大きさまで成長する時期のみで問題となった。b) については、2008 年 2～3 月にかけて、沖側列での基盤石沖側で著しい堆積が生じた（写真－7）。堆砂厚は沖側基盤石近傍で 40～60cm 程度であり、一部の沖側列の基盤石は、天端面とほぼ同レベルまで堆積した。この期間は高波浪と満潮時が重なり、礁池内の波高が 1m を超える頻度が他の月に比べて極端に高かった（図－4）。これより、礁池での沖から岸に向かう漂砂移動を、沖側基盤石により妨げられたことにより生じたものである。なおその後、礁池内で 2008 年 2 月～3 月に見られたような高波浪が継続することはない、このような顕著な堆積は生じなかった（2009 年 3 月時点）。

(3) 生残率

1) 同礁池内の樹枝状サンゴ・葉状サンゴを用いた場合

第 1 回目サンゴ移植に対する計 196 個のモニタリング用サンゴ片の観察結果から得られた生残率は、固定完了から 5 ヶ月経過後で 97.4%、9 ヶ月経過後で 96.9%であった。さらに固定から 1 年半経過した 2009 年 3 月時点で、ランダムに抽出したサンゴ片から得られた生残率として 95%程度と見積もられた。なお、モニタリング用サンゴ片の 4%（8 個）にあたる葉状コモンサンゴ（*Montipora* sp.）およびスリパチサンゴ（*Turbinaria* sp.）はすべて順調に成長している。このように、同じ礁池内から採取されたサンゴを用いたものは、これまでのところ、非常に高い生残率が確保されている。高い生存率が得られた要因として、a) 適切な固定法と作業の正確さにより離脱が少なかった、b) サンゴの天敵となるオニヒトデやサンゴ食巻貝等の天敵がほとんど見られなかった、c) 台風のような自然撓乱要因がない、d) 沖側列の基盤石を除けば、漂砂による基盤石表面の覆いかぶせ、サンゴレキの移動がほとんどなかった、e)

海藻の繁茂を取り除いたことによって、大部分は未然に防げた f) 人為的損傷が軽微であった、g) 病気や水温上昇による白化がこれまでのところほとんど見られないこと、などが挙げられる。

2) 同礁池内の他のサンゴを用いた場合

第 1 回目のサンゴ移植時に固定した、ハナガササンゴ属（*Goniopora* sp.）を除く、54 個の塊状サンゴから得られた 1 年半経過後の生残率は 96%であった。そのほとんどは固定直後からあまり変化していないが、いくつかのサンゴで表面軟体部が縮小しているものが見られた。一方、25 個のハナガササンゴ属（*Goniopora* sp.）のサンプルから得られた 1 年半経過後の生残率は 28%であった。

3) 異なる海岸の樹枝状サンゴを用いた場合

他海岸から運搬された樹枝状ミドリイシを用いた 157 個のサンゴ片から得られた生残率は、固定から 1 年半経過後の 2009 年 3 月時点で 57%であった。これらのドナーサンゴは商用を目的として栽培されているものであり、同じミドリイシ属でも種の異なるものである。これより一概には比較できないが、同じ礁池から採取されたサンゴに比べて低い生残率となった。

5. 生物環境の変化

サンゴ移植は、移植後の高い成長率と生残率が求められ、これらに適したサンゴ種が選定されるため、サンゴ種そのものの多様性は低くなる。しかしサンゴの存在により、その空間を住处とする多くの生物が集まることにより、種の多様性は増大する⁵⁾。本事業で実施したサンゴ移植は 1ha のエリアで新たなサンゴ群集が形成され、サンゴの成長とともに、以前は礁池内ではほとんど見られなかった様々な魚類、甲殻類が見られるようになった。第 1 回目サンゴ移植から 5 ヶ月経過した時点で、34 種以上の魚類が、目視調査により確認された（写真－8）。

6. おわりに

インドネシアのバリ島クタ海岸にて、海岸保全事業の一環として実施された大規模サンゴ移植の実施方法と、移植サンゴのその後の成長および生残状況について調べ、移植から1年半経過現在、高い成長率と生残率が維持されていることを示した。サンゴ礁の損傷・破壊は地球規模の問題であり、それぞれの生息エリアでの固有の自然環境条件を有する。よって、その保全・再生を目指すためには、異なる環境下におけるサンゴ移植についての更なる事例の蓄積が必要と考えられる。

謝辞：最後に、本事業に関わったインドネシア公共事業省、JICA ジャカルタ事務所、大成建設(株)現場事務所の関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 遠藤秀文・Rahmadi Prasetyo・西平 守孝・大中 晋：移植サンゴの定着率に関する長期現地モニタリングおよびサンゴ移植の適用性の検討、第53回海工論文集、pp. 1196-1200、2006.
- 2) 遠藤秀文・Rahmadi Prasetyo・西平 守孝・大中 晋：バリ島・クタ海岸におけるサンゴ移植・増殖の適用性に関する検討、第55回海工論文集、pp.1121-1125、2008.
- 3) 大中 晋・遠藤秀文・宇多高明・吉井一郎：リーフ海岸における養浜工の設計・施工および養浜後の海浜応答、第30回海洋開発論文集、pp.475-480、2005.
- 4) 大中 晋・遠藤秀文・西平 守孝・吉井一郎：インドネシアにおける大規模サンゴ移植の実施、第33回海洋開発論文集、pp.825-830、2008.
- 5) 西平守孝：足場の生態学、平凡社、267p、1996.
- 6) 西平守孝：伸縮性素材を用いたサンゴ片の新たな固定法、名桜大学総合研究所紀要9、pp.71-75、2006.
- 7) 日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会：造礁サンゴ移植の現状と課題、日本サンゴ礁学会誌第10巻、pp.73-84、2008.