

# 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 After Executing Large-Scale Coral Transplantation on Kuta Beach in Bali Island

大中 晋<sup>1</sup>・Rahmadi Prasetyo<sup>2</sup>・西平守孝<sup>3</sup>・遠藤秀文<sup>4</sup>・吉井一郎<sup>5</sup>

Susumu ONAKA, Rahmadi Prasetyo, Moritaka NISHIHARA, Shubun ENDO and Ichiro YOSHII

The large-scale coral transplantation with applying asexual reproduction method has been implemented in the shallow lagoon at Kuta Beach in Bali Island of Indonesia. The monitoring and maintenance works after fixing coral fragments were continued for 1.5 years to observe the coral growth and survival conditions. The high survival rate and significant growth of transplanted corals were observed for branching and leaf type coral species which were brought from same coral reef area in comparison with other experiments in Japan. This is mainly caused by different environmental conditions from that in Japan; such as high water temperature with range of 24 to 30 degrees C, no disturbance by storm, inexistence of natural enemy, etc.

### 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（日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会，2008）。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（大中ら，2005）。当海岸のサンゴ礁は、過去に行われた大規模なサンゴ採掘や、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。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と、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生物環境変化を明らかにすることを目的とする。

### 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回に分けて実施され、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温期が重なることを避けた

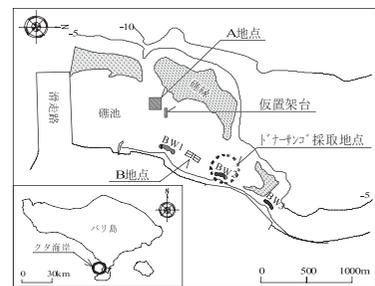


図-1 位置図

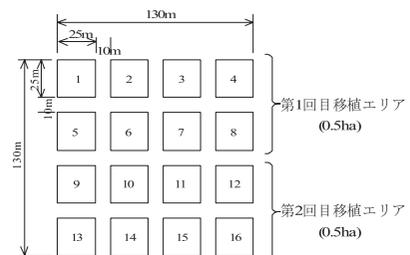


図-2 サンゴ移植場所（地点A）の配置

- |       |    |                    |
|-------|----|--------------------|
| 1 正会員 | 工修 | 日本工営（株）海外事業部専門部長   |
| 2     |    | 日本工営（株）バリ海岸保全開発事務所 |
| 3     | 理博 | 名桜大学教授総合研究所        |
| 4 正会員 |    | 双葉測量設計（株）専務取締役     |
| 5 正会員 |    | 日本工営（株）海外事業部部長補佐   |

表-1 実施時期、基盤石総数およびサンゴ片総数

	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

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1トン、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、礫およびサンゴ塊で覆われている。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。

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、および礁池内外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~

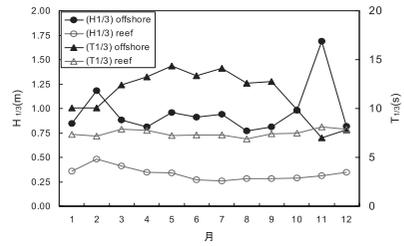


図-3 礁池内外の月別平均波高、周期(2008年)

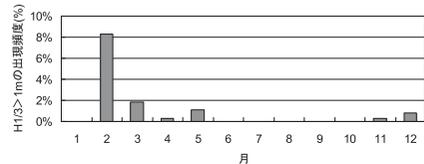


図-4 礁池内における波高1m以上の月別出現頻度(2008年)

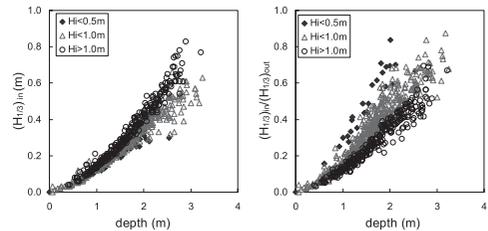


図-5 礁池内波高および礁池内外波高比と水深の関係

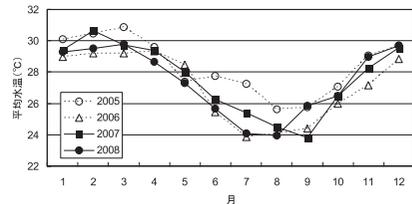


図-6 4年間における各月の礁池内平均水温変化

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。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

表-2 用いたサンゴ種とその総数

形状	サンゴ属	個数	%
樹枝状 サンゴ	ミドリイシサンゴ ( <i>Acropora</i> Sp.)	107,987	95.8
	葉状 サンゴ		
葉状 サンゴ	スリバチサンゴ ( <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 ( <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

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 (遠藤ら, 2006) 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、これを移植に用いる主要なドナーサンゴとした。それ以外の種として、葉状サンゴのコモンサンゴ (*Montipora* sp.) およびスリバチサンゴ (*Turbinaria* sp.), また数は少ないが塊状サンゴ、ソフトコーラル等も用いた。表-2に、用いたサンゴ種および取り付けけたサンゴ片の総個数を示す。なお、当クタ海岸から東方約42km離れたキャンデイダサ海岸で、商用を目的としたコーラルファームから運搬した樹枝状ミドリイシをドナーとして用いた移植も、一部の基盤石を用いて実施した。

(2) 移植方法

サンゴ移植の詳細については大中ら (2008) に述べているので、ここでは簡単に説明するに留める。

基盤石として用いる石灰岩は、予め陸上において固定用釘挿入のための搾孔を行った。事前調査結果から得られた成長後のサンゴ占有状況を考慮して、孔の配置、間隔を決め、上層面に9箇所、また各ブロックの外周に設置される基盤石については、側面に3箇所の孔を設けた。搾孔した基盤石は、台船にて運搬され、サンゴ固定前に予め礁池に設置した。つぎに移植に用いるドナーサンゴを、バリ州環境局の許可の元、同じ礁池の離岸堤設置位置付近より採集し、1km程度離れた移植地点付近に設置した仮置架台に運搬・移設した後、1日以上順化させた。順化後、5-10cm程度のサンゴ片への切断作業を行い、切断し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。順化後、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、事前調査で得られた実績 (遠藤ら, 2006) と作業性、コストを考え、プラスチック製結束バンドによる固定方法を用いた。

なお塊状サンゴと一部の樹枝ミドリイシの、合わせて

約2,500個のサンゴ片については、水中セメント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 (西平, 2006)。

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%問題のない状態が確保されており、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、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、塊状サンゴやソフトコーラル等、他の少数サンゴに対するモニタリングも適宜実施した。

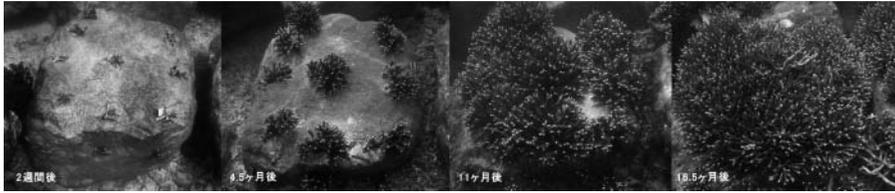


写真-1 樹枝状サンゴの成長状況 (ミドリイシ (*Acropora nobilis*))

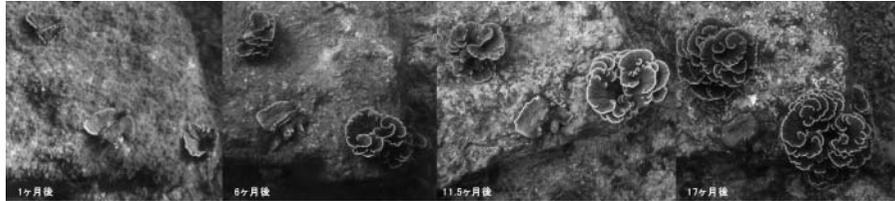


写真-2 葉状サンゴの成長状況 (コモンサンゴ (*Montipora* sp.) スリパチサンゴ (*Turbinaria* sp.))

4. 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-1, 2に、樹枝状ミドリイシ (*Acropora nobilis*), 葉状サンゴのコモンサンゴ (*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-7に, またその変化率 (1回目に計測された高さ, 幅で無次元化したもの) を図-8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-8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, 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倍程度まで成長している。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, コモンサンゴは高さ1.9cm/年, 幅5.3cm/年, スリパチサンゴは高さ1.9cm/年, 幅9.3cm/年と, 国内事例に比べて高い成長率を示す。図-9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る。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国内に比べて持続していることに起因すると考えられる。

(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, 1) 基盤石表面での定期的な海藻の繁殖による, 固定サンゴ片の隠蔽による白

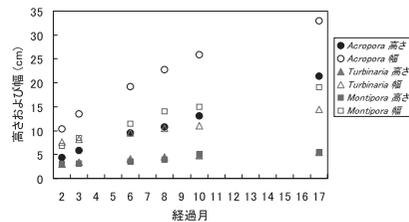


図-7 樹枝状サンゴおよび葉状サンゴの高さ、幅の変化

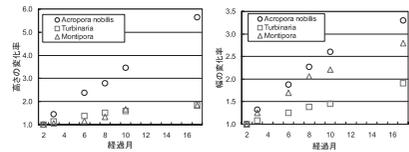


図-8 樹枝状サンゴおよび葉状サンゴの高さ、幅の変化率

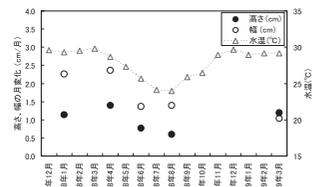


図-9 各観測期間での成長率水温変化の関係

化・死亡, 2) 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面での砂移動による固定サンゴの損傷・死亡, 3) 特に成長後での高波浪時の波力による脱落, 4) 侵入者による人為的損傷, 5) 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, 6) 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。1) 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, 特に褐藻綱 (*Padina*) および紅藻綱 (*Gracillaria*, 他) の繁殖が顕著となり, 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 (大中ら, 2008)。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。2) 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。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。なおその後は、このような顕著な堆積は生じていない。

(3) 生残率

a) 同礁池内の樹枝状サンゴ・葉状サンゴを用いた場合

第1回目の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。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、1) 適切な固定法と作業の正確さにより離脱が少なかった、2) 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、3) 台風のような自然撓乱要因がない、4) 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、5) 海藻の繁茂を取り除きによって押さえた、6) 人為的損傷が軽微であった、7) 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。

b) 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。またソフトコーラルについて、25個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。

c) 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。



写真-3 新たな生物環境の形成 (左：成魚群；右：稚魚群)

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る、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、その空間を住処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(西平, 1996)。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-3)。

6. おわりに

インドネシアのバリ島クタ海岸にて大規模に実施されたサンゴ移植のその後の状況について明らかにし、環境条件の違いにより、国内事例に比べて高い確実性を持って移植できることを示した。サンゴ礁の損傷・破壊は地球規模の問題であるため、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。

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

遠藤秀文・Rahmadi Prasetyo・西平 守孝・大中 晋(2006) : 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.  
 遠藤秀文・Rahmadi Prasetyo・西平 守孝・大中 晋(2008) : 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.  
 大中 晋・遠藤秀文・宇多高明・吉井一郎(2005) : 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.  
 大中 晋・遠藤秀文・西平 守孝・吉井一郎(2008) : 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.  
 西平守孝(1996) : 足場の生態学, 平凡社, 267 p.  
 西平守孝(2006) : 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.  
 日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会(2008) : 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.