

バリ島クタ海岸におけるサンゴ移植の適用性に関する研究

EXPERIMENTAL CORAL TRANSPLANTATION IN THE MOAT OF KUTA, BALI ISLAND, INDONESIA

遠藤秀文*・ラフマディ プラセティオ**・西平守孝***・大中 晋**
Shubun ENDO, Rahmadi PRASETYO, Moritaka NISHIHIRA and Susumu ONAKA

In a search for effective methods of coral transplantation, we conducted experimental coral transplantation on 20 limestone substrates in the moat of Kuta on Bali Island, Indonesia. We found that 1) the re-attachment rate to the substrate for *Acropora* sp. was more than 80%, 2) the re-attachment rate of corals fixed by a wire spring was highest (85%), 3) there were no differences between the re-attachment rates on horizontal and vertical surfaces, 4) the annual growth rate of *Acropora* sp. was 16.4 cm in width and 13.5 cm in height, and 5) *Acropora* sp. recovered from high-temperature induced bleaching of 30 to 50% of the whole colony after water returned to normal temperature.

Keywords : *Coral transplantation, re-attachment rate, growth rate, Bali, Kuta beach, bleaching*

1. はじめに

近年の国内におけるサンゴ移植・増殖の研究は、有性生殖(自然基盤および人工基盤へのサンゴの自然着生)および無性生殖(サンゴ片の移植)を利用して行われている。有性生殖による方法では、効果が現れるまでに一般に長い年月を要するが、無性生殖によるサンゴ片の移植は比較的速く効果が得られる反面、サンゴ採取の規制や移植片採取のためにドナーとなるサンゴ群体を傷つけることがある。後者は、海外の比較的サンゴの豊富な熱帯地域に属する一部の国々では、実用レベルで実施されている事例もある。しかしこれまで、無性生殖によるサンゴ移植方法について、サンゴの種類、固定方法、あるいは移植場所等の環境条件の違いが、移植したサンゴの残存率や基盤への再固着速度および成長率に及ぼす影響について、長期的かつ定量的に検討された事例はほとんど見られない。

インドネシア国バリ島のクタ海岸では、建材採取として 1970 年代初頭まで行われた礁池でのサンゴ掘削や埋立による滑走路建設によってサンゴの大半を失う結果を招いた。その一方で、限られたエリアではあるものの、礁池の一部で再びサンゴが生息している状況が観察された。

本研究は、1)サンゴ片の固定方法、2)サンゴ種および環境の違いが再固着および成長に及ぼす影響を明らかにし、3)当海岸でのサンゴ移植の適用性を把握することを目的

とする。

2. 調査の概要

調査地点を図-1に示す。沿岸方向約 2.5km および岸沖方向 0.5km ~ 1.3km のエリアを有するクタの礁池内に 4 点を選定し、サンゴ移植用の基盤として当地の波浪に耐えうる約 500kg の自然石基盤(以下、基盤と記す)を各地点に 5 個ずつ、計 20 個設置した。各地点を空港側よりそれぞれ St.1 ~ St.4 とし、1 地点内の 5 個の基盤を 1 ~ 5 とする。なお、基盤同士の間隔は 3 ~ 5m 程度とした。

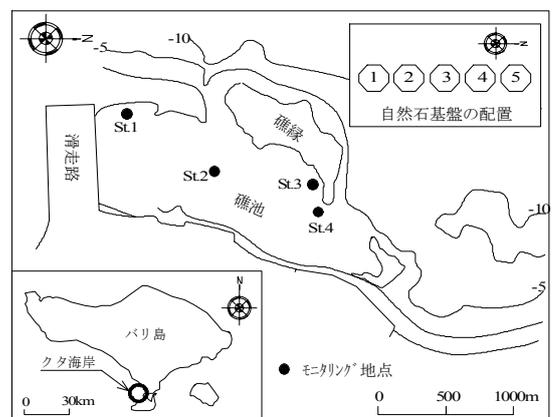


図-1 調査地点 (St. 1 ~ St. 4) および基盤設置位置 (1 ~ 5)

基盤設置場所の平均標高および基盤上面の平均標高を表-1に示す。St.1、St.2 は St.3、St.4 に比べ水深が浅く、St.2 では大潮期の干潮時には一部干出する。当地の潮位条

* コンサルタント海外事業本部 運輸・交通事業部 港湾・空港部
** コンサルタント海外事業本部 バリ海岸保全開発事務所
*** 名桜大学教授 総合研究所 (東北大学名誉教授)

件は、LWL= ± 0.0m、MSL=+1.3m および HWL=+2.6m である。

表-1 基盤各設置地点の標高および基盤高

	設置場所の平均標高(m)	基盤の平均高(m)	基盤上面の平均標高(m)
St.1	-0.77	0.47	-0.30
St.2	-0.49	0.44	-0.05
St.3	-1.71	0.41	-1.30
St.4	-1.61	0.39	-1.22

移植試験には、クタの礁池に多く生息する 1) 樹枝状ミドリイシ、2) ハナヤサイサンゴおよび 3) チヂミウスコモンサンゴの 3 種を用いた。本調査で用いるサンゴ片は、同地点の礁池に現存するサンゴより採取した。

これについては、事前にインドネシア政府より採取許可を得るとともに、ドナーのサンゴ群体への影響を考慮し、採取量を群体サイズの 3 割程度に止め、タガネとニッパを用いて慎重に採取した。採取したサンゴ片は、タガネとハサミを用いて、可能な限りダメージを与えないようにしつつ約 4.5cm ~ 約 6cm の大きさに揃えて切断した。準備したサンゴ片は、各移植場所に輸送した後、約 24 時間現場の海中で順化させた。表-2 は、各地点の 1 ~ 5 の基盤における使用したサンゴ種、固定方法、サンゴ片数、サンゴ片のサイズについてまとめたものである。全地点でのサンゴ片の総数は、以下の通り 280 片である。

- ・ 樹枝状ミドリイシ : 30 片 × 4 地点 = 120 片
- ・ ハナヤサイサンゴ : 20 片 × 4 地点 = 80 片
- ・ チヂミウスコモンサンゴ : 20 片 × 4 地点 = 80 片

280 片

表-2 基盤上の移植サンゴ片の配置と固定材料

基盤番号	基盤固定面	サンゴ種	固定方法	サンゴ片数	サンゴ片の大きさ
1	上面	樹枝状ミドリイシ	テグス・2点固定	5	約 6 cm
			鉄片・1点固定	5	約 6 cm
	側面		テグス・2点固定	5	約 6 cm
			鉄片・1点固定	5	約 6 cm
2	上面	ハナヤサイサンゴ	テグス・2点固定	5	約 5 cm
	側面			5	約 5 cm
3	上面	ハナヤサイサンゴ	鉄片・1点固定	5	約 5 cm
	側面			5	約 5 cm
4	上面	樹枝状ミドリイシ	ワイヤースプリング・2点固定	5	約 6 cm
	側面			5	約 6 cm
5	上面	チヂミウスコモンサンゴ	テグス・2点固定	5	約 4.5 cm
			鉄片・1点固定	5	約 4.5 cm
	側面		テグス・2点固定	5	約 4.5 cm
			鉄片・1点固定	5	約 4.5 cm

基盤へのサンゴ片の固定方法については、これまでいくつかの方法が提案されている⁵⁾。今後当海岸でのサンゴ移植が住民参加やサンゴ礁修復工事による移植等を想定すれ

ば、できるだけ簡便な方法であることが望ましい。そこで、サンゴ片固定の水中作業時間を極力抑えるために、樹枝状ミドリイシについては写真-1~3に示すように、1) 鉄片・一点固定、2) テグス・2点固定および 3) ワイヤースプリング・2点固定の 3 法を用い、ハナヤサイサンゴおよびチヂミウスコモンサンゴについては、1) および 2) の 2 法を用いた。

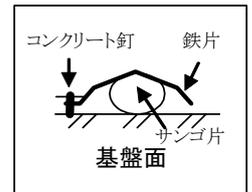


写真-1 鉄片・1点固定

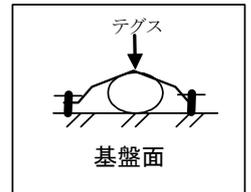


写真-2 テグス・2点固定

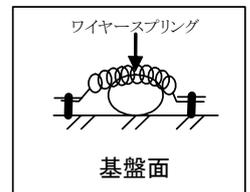


写真-3 ワイヤースプリング・2点固定

陸上で基盤上面および側面に約 5cm 間隔の対の穴 (φ 3.5mm) をそれぞれ 5 対または 10 対開け、実験場所に設置した。次に水中でサンゴ片固定位置の藻類や沈殿物をワイヤブラシで除去し、コンクリート釘を打ち込み、それぞれの固定材料を用いてサンゴ片を固定した。

本調査は、2003 年 9 月より開始し、サンゴ移植後 10 日、1 ヶ月、2 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月、9 ヶ月、12 ヶ月、18 ヶ月および 24 ヶ月においてモニタリング調査を実施した。モニタリングの項目は、1) 基盤上面・側面および各々のサンゴ片の写真撮影、2) 各サンゴ群体の最大幅および最大高の測定、3) サンゴ片の固定材料および基盤への固着状況、4) 基盤およびサンゴ片への藻類や動物等の付着状況、5) 基盤が沈下または移動していないかの確認等である。また、2004 年 10 月からは、水温変化がサンゴへ及ぼす影響を調

べるために、クタの礁池の 6 地点に自記式水温計を設置し、水温の毎時連続観測を行っている。

3. 移植後のサンゴ片の再固着および残存率

(1) 固定材料および基盤への再固着状況

全地点および固定位置におけるサンゴ種ごとの固定材料および基盤への再固着率(残存片の内、再固着したサンゴ片の比率)をそれぞれ図-2および図-3に示す。図-2より、固定材料への再固着率は、樹枝状ミドリイシおよびチヂミウスコモンサンゴが移植後 1 ヶ月で 90% 以上を示し、ハナヤサイサンゴは移植後 2 ヶ月で 90% に達した。

図-3より、基盤への再固着率は、樹枝状ミドリイシが移植後 2 ヶ月で 87.1% に達したが、ハナヤサイサンゴおよびチヂミウスコモンサンゴは、移植後 3 ヶ月で 50 ~ 60% に留まり、すべての残存サンゴが基盤に再固着するまでに約 18 ヶ月の期間を要した。樹枝状ミドリイシは、固定材料を抱き込み後、基盤への固着が速く、その後は急激に固着面を広げ、固着強度を増大させるため、波や流れ等の外力による脱落が少ないものと考えられる。一方、ハナヤサイサンゴおよびチヂミウスコモンサンゴは、樹枝状ミドリイシに比べ 1 ヶ月ほど遅く基盤へ再固着し始めたが、固着強度が弱いため、波や流れの外力により脱落と固着を繰り返す傾向が見られた。これらのことから、樹枝状ミドリイシでは約 2 ヶ月程度、ハナヤサイサンゴおよびチヂミウスコモンサンゴでは、6 ヶ月 ~ 1 年程度、確実にサンゴ片を固定できる素材と方法を選定する必要があると考えられる。

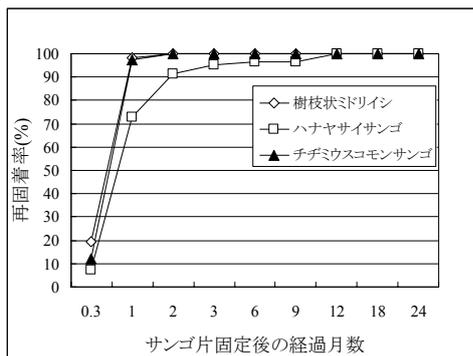


図-2 固定材料への固着率

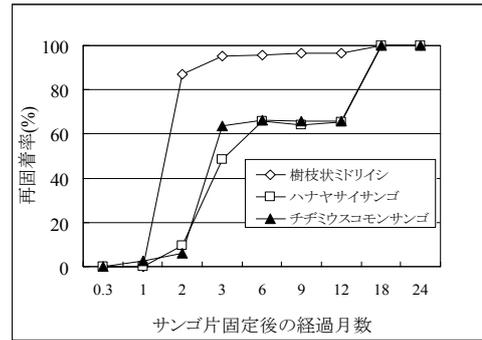


図-3 基盤への固着率

(2) 固定材料ごとのサンゴ片の残存率

全地点および固定位置におけるサンゴ種ごとの固定材料の違いによる残存率を図-4 ~ 6に示す。樹枝状ミドリイシについては、固定材料によって残存率の差はほとんど見られず、移植後 24 ヶ月経過後もすべての固定材料で 78 ~ 85% の高い値を示した。一方、ハナヤサイサンゴについては、移植後 12 ヶ月時点での残存率が、鉄片・1 点固定で 13%、テグス・2 点固定で 53% と著しい差があった。さらにその後はテグス・2 点固定による残存率も大幅に低下し、最終的に両者とも 10% 程度となった。12 ヶ月時点までの両者の違いについては、鉛直方向での圧力の違いによると考えられるが、その後の残存率の大幅な低下は、後述する高温水によるサンゴの白化、それによる死亡が原因と考えられる。チヂミウスコモンサンゴについては、固定後 2 ヶ月の残存率が、テグス・2 点固定で 78% であるのに対し、鉄片・1 点固定では 20% と明らかな違いが生じた。それ以降、いずれの固定材料でも残存率が低下し続け、固定後 24 ヶ月の残存率は、テグス・2 点固定では 20%、鉄片・1 点固定で 0% と非常に低い値となった。チヂミウスコモンサンゴは、基盤への再固着が遅い上、群体が葉状で波や流れの外力の影響を受けやすく、他のサンゴ種に比べて脱落が起こりやすかったと考えられる。

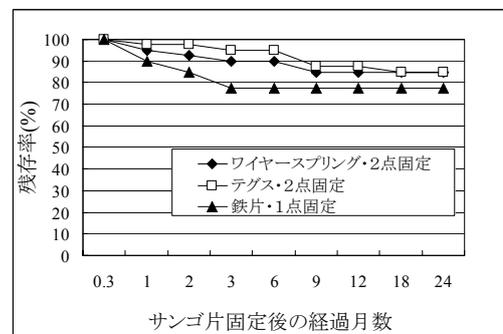


図-4 樹枝状ミドリイシの残存率の変化

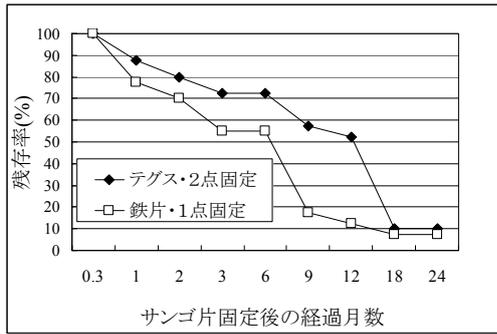


図-5 ハナヤサイサンゴの残存率の変化

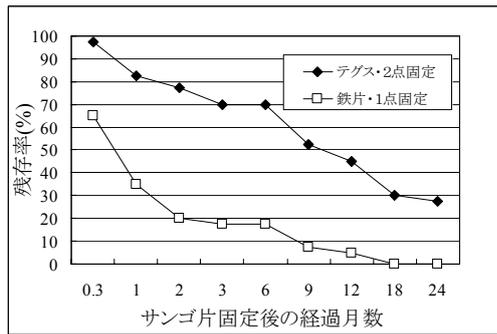


図-6 チヂミウスコモンサンゴの残存率の変化

(3) 外力の違いによるサンゴ片の残存率

各サンゴ種の残存率について、設置地点の違いを示したものが図-7～9である。また、高潮時における各地点の平均波高および流速は、表-3に示す通りである。

表-3 各地点での平均波高および流速(高潮時)

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
平均波高(m)	0.90	0.60	0.80	0.95
平均流速(m/s)	0.10	0.15	0.20	0.25

樹枝状ミドリイシについては、固定後24ヶ月時点において、St.2で93%と非常に高い残存率となる一方、St.4で73%と最も低い残存率となった。St.1およびSt.3の残存率は、それぞれ83%および80%であった。このように、樹枝状ミドリイシについては、波や流れの外力条件の厳しい場所ほど、残存率が低下することが示された。図-8に示すハナヤサイサンゴについては、サンゴ片固定後6ヶ月後まではSt.2で75%、St.1およびSt.4で55%と場所による違いが若干見られた。しかし、固定後9ヶ月以降は、すべての場所で著しい低下を示し、18ヶ月で5～15%と非常に低い値になった。これは、基盤への固着が弱いことと波や流れによるサンゴ片の脱落が起因したものと考えられる。チヂミウスコモンサンゴについては、St.2でサンゴ片固定後6ヶ月までは他の地点に比べて高い残存率を示したが、24ヶ月経過後の残存率はSt.4で25%と最も高く、St.2で0%と上記の樹枝状ミドリイシと逆の傾向が見られた。これは、St.2が他の場所に比べて基盤高が高

く、大潮干潮時には基盤が干出し、これによると思われる基盤上での藻類の繁茂が確認されている。チヂミウスコモンサンゴのような平面的に成長する葉状サンゴでは、これら藻類の繁茂がサンゴ群体を隠蔽し、その結果低い残存率になったものと考えられる。ちなみに、調査最終時点での24ヶ月における残存したサンゴ片数は、樹枝状ミドリイシで102片、ハナヤサイサンゴで10片およびチヂミウスコモンサンゴで12片である。

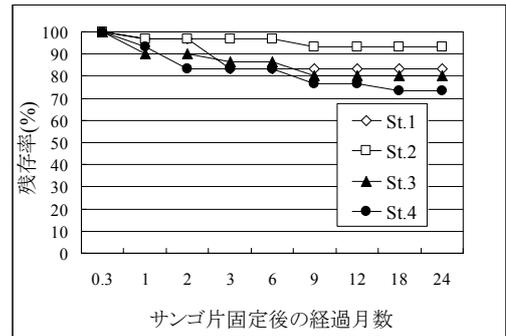


図-7 各地点における樹枝状ミドリイシの残存率

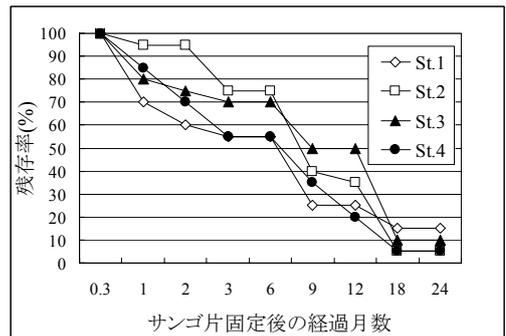


図-8 各地点におけるハナヤサイサンゴの残存率

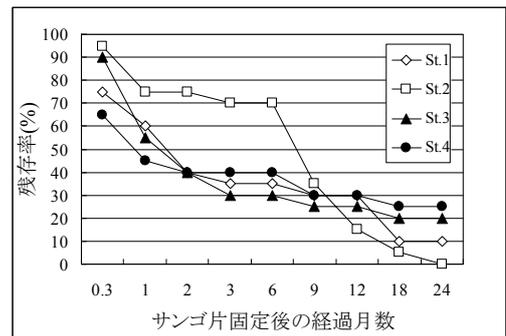


図-9 各地点におけるチヂミウスコモンサンゴの残存率

(4) 固定位置による残存率の違い

これまで、サンゴ礁や人工基盤への移植では、基盤の上面へのサンゴ片の固定が行われてきた。本調査では、すべての基盤で上面と側面に同数のサンゴ片を移植することにより、両者の残存率の違いを調べた。図-10にその結果を示す。

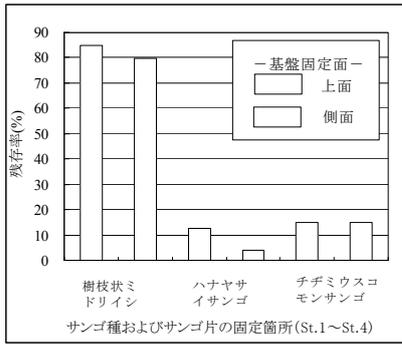


図-10 基盤固定面(上面および側面)による残存率の違い

これより、基盤上面は基盤側面に対して若干残存率が高いものの、それほど違いが生じないことが確認された。今回の手法では、サンゴ片の移植が基盤上面のみならず側面にも可能であることがわかった。

4. 移植後のサンゴ片の成長状況

(1) サンゴ種ごとの成長速度

各サンゴ種平均成長速度を表-4に示す。ここでは成長速度の指標として、移植した個々のサンゴ単体の最大幅および最大高を用いる。群体の最大幅の変化は、樹枝状ミドリイシ 16.4cm/年(上面)および 19.7cm/年(側面)、ハナヤサイサンゴ 6.7cm/年(上面)および 7.4cm/年(側面)、チヂミウスコモンサンゴ 3.5cm/年(上面)および 5.5cm/年(側面)であった。つぎに最大高の変化は、樹枝状ミドリイシ 13.5cm/年(上面)および 14.4cm/年(側面)、ハナヤサイサンゴ 7.7cm/年(上面)および 4.3cm/年(側面)、チヂミウスコモンサンゴ 3.1cm/年および 3.4cm/年であった。これらより、樹枝状ミドリイシの成長速度は、最大幅、最大高とも、他のサンゴ種に比べ非常に速いことがわかる。

表-4 各サンゴ種の成長速度(最大幅および最大高)

サンゴ種(固定面)	平均成長速度(cm/年)	
	最大幅	最大高
樹枝状ミドリイシ(上面)	16.4	13.5
樹枝状ミドリイシ(側面)	19.7	14.4
ハナヤサイサンゴ(上面)	6.7	7.7
ハナヤサイサンゴ(側面)	7.4	4.3
チヂミウスコモンサンゴ(上面)	3.5	3.1
チヂミウスコモンサンゴ(側面)	5.5	3.4

St.1の基盤#1に移植した、樹枝状ミドリイシの成長過程を写真-4に示す。この基盤には、上面および側面にそれぞれ10片のサンゴを移植したが、移植後12ヶ月ですでに高い被度を示し、24ヶ月には、ほぼ100%の被度に達した。また、成長した樹枝状ミドリイシの群体には、様々な種類の魚介類が棲み込んでいることが確認された。これよりサンゴ群体の成長により、新たに多様

な生物の生息環境を創り出していることが示された(西平、1996)。

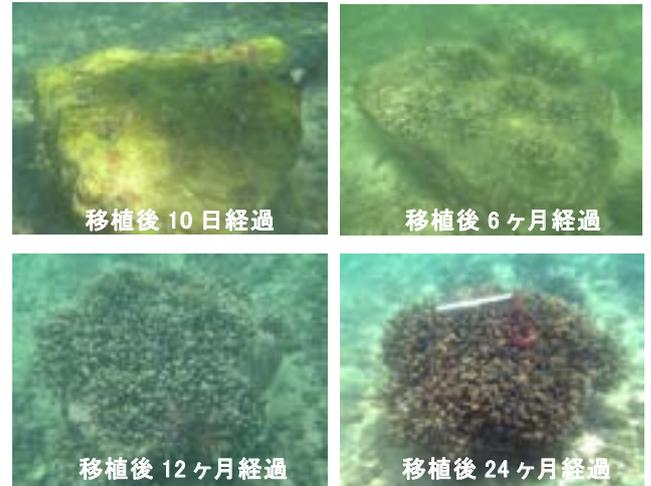


写真-4 樹枝状ミドリイシの成長過程

(2) 海水温とサンゴの白化

2004年10月(移植後13ヶ月)~2006年2月(移植後27ヶ月)の期間の月ごとの最低水温、最高水温および平均水温を図-11に示す。クタの礁池では、2005年1月~2005年3月の期間平均海水温が30℃を超え、2005年3月に33℃の最高水温を示した。この期間において、樹枝状ミドリイシとハナヤサイサンゴの一部で白化が確認された。写真-5は、この高温期間中の2005年3月(移植後18ヶ月)および平温時の2005年9月(移植後24ヶ月)における、樹枝状ミドリイシの変化状況を示す。高温期間中の2005年3月時点では、群体の30~50%に白化が見られたが、6ヶ月後の平温時(平均水温26~28℃)には、白化したサンゴが完全に回復し、生存している様子が確認された。

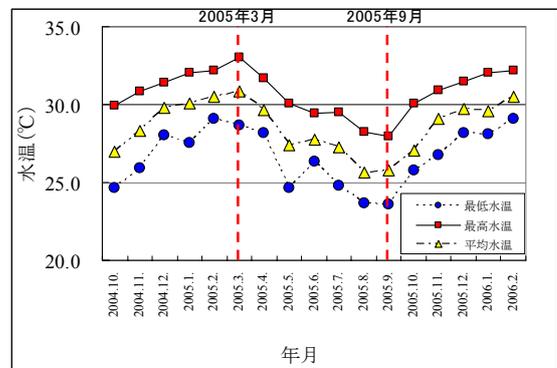
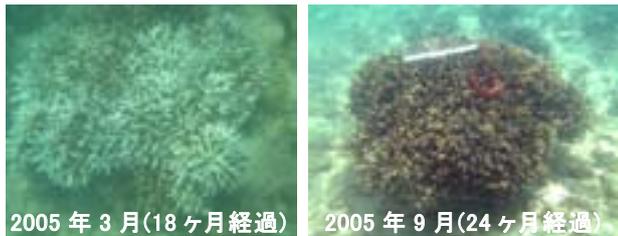


図-11 各月の水温変化



白化状態 回復状態
写真-5 サンゴ白化からの回復

5. おわりに

本研究では以下の点を確認することができた。

- (a) 各サンゴ種の固定材料および基盤への再固定に要する期間から、樹枝状ミドリイシは2ヶ月程度、ハナヤサイサンゴおよびチヂミウスコモンサンゴは6ヶ月～1年サンゴ片を固定可能な素材の選定が必要である。
- (b) ワイヤースプリングおよびテグスの2点固定は、鉄片・1点固定に比べ、残存率が非常に高い。とくに、ワイヤースプリングは、調査終了時の24ヶ月経過でも基盤上にそのほとんどが残っており、鉛直方向の圧力が持続することが確認された。これより、ワイヤースプリングは、サンゴの種別にかかわらず適用可能と考えられるが、とくに成長速度の遅いサンゴ種、また波・流れの影響を受けやすい形状のサンゴ片の固定に適用することが望ましい。
- (c) 礁縁やリーフギャップに近く波や流れの外力が強い場所では、サンゴ片の残存率が低い。とくに、水圧を受けやすい形状のチヂミウスコモンサンゴは、場所による残存率の違いが見られる。
- (d) 干潮時に基盤が干出する場所では、基盤に藻類が繁茂し、チヂミウスコモンサンゴは、藻類がサンゴ群体を隠蔽し、低い残存率を示した。これより、鉛直方向への成長が遅い、とくに葉状サンゴについては、藻類が繁茂する環境で成長することが困難であることから、常時水面下かつできるだけ水深が確保される場所へ移植することが望ましい。
- (e) 基盤上面および側面での残存率は、いずれも同様の結果が得られ、側面での移植が可能であることを示した。
- (f) 樹枝状ミドリイシの成長速度は、基盤上面での最大幅が16.4cm/年および最大高が13.5cm/年と、他のサンゴ種に比べ非常に早いことが示された。
- (g) 樹枝状ミドリイシは、高水温(平均30度以上)時に群体の30～50%が白化したが、平温(平均水温26～28℃)に戻ると白化したサンゴが完全に回復することが確認された。

現在、サンゴ片の移植方法による本格的なサンゴ群集回

復の実施に向けて、移植時の施工性、経済性、およびサンゴの成長後の水中景観向上を調べるための第二次現地試験を実施中であり、その結果は別途報告したい。

謝辞：本研究の実施に際し、多くの意見を頂いたインドネシア国公共事業省および国際協力銀行の方々ならびに研究の計画からモニタリングまで貴重な助言を頂いた屋比久壮実氏に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 山下隆男、西平守孝、土屋義人、スワンディー：サンゴの移植によるバリ島サヌール海岸の保全について、海岸工学論文集、第43巻、No. 21(2)、pp.1281-1285、1996.
- 2) 宇多高明、大須賀豊、遠藤秀文、芹沢真澄、三波俊郎、古池鋼：Bali島のKuta海岸の侵食原因に関する考察、海岸工学論文集、第51巻、pp.1376-1380、2004.
- 3) 西平守孝：足場の生態学、海遊舎、東京、pp.269、1996.
- 4) 西平守孝：伸縮性素材を用いたサンゴ片の新たな固定方法、名桜大学総合研究、pp.71-75、2006.
- 5) 大久保奈弥・大森信：世界の造礁サンゴの移植レビュー、Galaxea、JCRS、No. 3、pp.31-40、2001.