

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

山下隆男*・西平守孝**・土屋義人***・スワンディー****

1. 緒 言

現在、インドネシア、バリ島のクタ、サヌール、ヌサ・ドゥワ、チャンディダサ海岸では、貴重な観光資源である珊瑚礁背後の美しい砂浜の侵食が問題となっている。Syamsudin ら (1994) によれば、この原因は大きく2つに分けられる。一つは、クタ海岸のように空港の滑走路等の大規模海岸構造物の建設によるものであり、他の一つは、多くの海岸で行われてきた珊瑚礁からの建材用としてのサンゴ塊の掘り出しである。何れの場合にも、珊瑚礁砂浜の漂砂源であるサンゴや有孔虫の生態を破壊するとともに、波浪、海浜流場を変えたことが海岸侵食の原因である。特に後者の場合には、海岸前面の水深を深くしたこと、さらにサンゴや海草藻場（アマモ類）を取り去り掘削穴にしたために、波浪、海浜流、潮流の減衰効果を弱めたことが侵食の要因となっている。

サンゴは無性的にも繁殖するため、人工的な移植が可能な生物であり、これまでにも、(財)海中公園センターにより、沖縄県八重山海域で移植実験が行われ、適合種の特選やそのノウハウがまとめられている。また、タイやフィリピンでも、サンゴ群集の回復の手助けや促進を目的として、移植が研究されている。(財)海中公園センターによれば、移植によりサンゴの復元期間を自然状態で放置しておく場合に比べて1/3以上に短縮できようである。

珊瑚礁海浜の侵食を制御するためには、失われたサンゴや海草藻場の回復を図ることも選択肢のひとつである。しかしながら、サンゴ群集の回復の程度が明らかにされていないため、バリ島の海岸保全のように緊急性の高い場合には、サンゴの移植がどの程度有効なのかを判断する基準が無く、具体的な事業が展開できないのが現状である。本研究では、バリ島サヌール海岸において、サンゴの移植による海岸保全の可能性を調べるため、移植するサンゴの種類や供給地の調査、移植したサンゴの成長の早さ、保全事業の推進方法について調査、検討す

る。

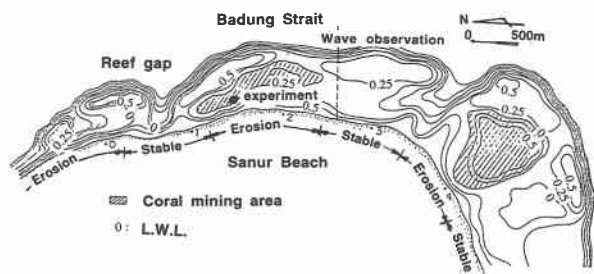
2. 珊瑚塊の採掘による海岸侵食

バリ島は西の古い火山群 (Kelataken, Merbuk, Patas) と東の活火山群 (Batukau, Buyan Bratan Batur, Agung) とから形成された火山島である。これらの火山は漂砂の供給源となっている反面、土砂災害を発生させている。観光資源、人口の集中する島の南部は、Bukit Badung と呼ばれるサンゴ起源の石灰岩の平坦な大地で、世界的なリゾート海岸であるサヌール、クタおよびヌサ・ドゥワの珊瑚礁海岸がある。これら珊瑚礁海岸の主たる漂砂源はサンゴと有孔虫の死骸、石灰岩大地の侵食崖、河川からの土砂供給であるが、ここで対象とするサヌール海岸では、サンゴと有孔虫の死骸が大半を占めている。

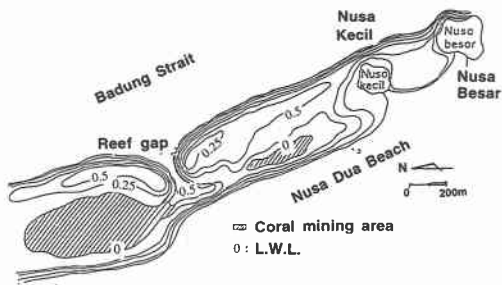
近年、これらの海岸では砂浜の侵食が問題となっており、それに対する対策が検討されているが、多くの珊瑚礁海岸での侵食の要因のひとつに、建材として用いられる珊瑚礁石灰石 (珊瑚塊) の採掘である。全採掘量は明らかになっていないが、珊瑚礁上の地形を変えるくらいの膨大な量である。Syamsudin (1993) によれば、サヌールおよびヌサ・ドゥワ海岸の珊瑚礁上の平均低潮面からの等水深線は図-1に示すようであり、図中の斜線は珊瑚塊の採掘が行われてきた領域を示す。図からわかるように、サヌール海岸では珊瑚塊の採掘により水深が0.5 m以上深くなっている領域が2ヵ所あり、北側の採掘域の面積は約200,000 m²、南側のそれは600,000 m²である。なお、珊瑚礁縁辺の地形は平均低潮面から0.25~0.5 m水面上であり、満潮位でもインド洋からのうねりの大半はここで砕波する。ヌサ・ドゥワ海岸では汀線近くで採掘が行われてきたが、採掘領域の面積は約200,000 m²である。現在は高級な国際ホテル街となっているこの海岸の南部領域でのサンゴの採掘は禁止されている。チャンディダサ海岸では、汀線から80 mまでの海域で、1969年から1974年の間に活発に採掘が行われ、その総面積は約200,000 m²である。

サヌール海岸を例にして、珊瑚塊の採掘による侵食機構を示すと、以下のようである。(1)珊瑚塊の採掘により珊瑚礁上の水深が増加するとともに、サンゴや海草藻

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
 ** 理博 東北大学教授 理学部 生物学教室
 *** 正会員 工博 名城大学教授 都市情報学部
 **** インドネシア公共事業省バリ地方局



(a) サヌール海岸
(サングの移植実験位置と波浪観測線)



(b) ヌサドゥワ海岸

図-1 パリ島の珊瑚礁における珊瑚塊の採掘場所



写真-1 基盤用の捨て石と珊瑚塊採掘穴の様子

類が減少し、波浪、海浜流、潮流への減衰効果が弱くなる。(2)このため、砂浜海岸に高波浪が来襲する機会が増加し、流れが強くなり、漂砂を活発にする。(3)そのため、汀線の変動が大きくなり、これを制御するために護岸、突堤や離岸堤などの構造物を建造する。これにより漂砂の連続性が壊され、砂の堆積、侵食領域がはっきりしてくる。砂が堆積し海浜が広くなればホテルが海側に進出してくる。侵食が起これば護岸などの構造物を建造するので、反射波により沖に砂が運ばれ、侵食が助長される。

3. サングの移植実験

バリ島の多くの珊瑚礁海岸では、上述したような海岸侵食が多く見られるが、このような侵食対策には、珊瑚塊採掘穴を埋め戻し、波浪、海浜流場のエネルギー散逸効果を回復させることが原則であろう。ただ埋め戻すだけでは能がないから、そこに昔の賑やかなサング礁を蘇らせたら楽しいであろう。ここでは、サヌール海岸を例として、破壊された珊瑚礁をサングの移植により回復させ、珊瑚礁背後の海浜の侵食を防ぐことの可能性を調べるため、サングの移植実験を行い、移植方法、成長速度、移植に伴う問題点、および移植後の管理について検討する。

サングの移植実験は1994年7月21日にサヌール海岸において実施された。実験地と波浪観測線を図-1に示したが、図からわかるように、この海岸の北半分には珊

瑚塊の採掘によってできた穴が点在しており、この背後での砂浜の侵食が深刻である。南部にはサングと海草藻類の共存する健全な珊瑚礁が現在に残っている。ここには一見して約十数種類のサングが生息していたが、ワシントン条約との関連で国内への持ち込みが容易にできないため、サングの種名を全て特定することはできなかった。移植は、そのうちの優勢種のひとつである枝状ミドリイシの1種 (*Acropora* sp.) について行った。

汀線から100 m沖合い(珊瑚礁縁辺から400 m陸側)のひとつの採掘穴(満潮時には水深2~2.5 m、干潮時には周囲は干上がるが穴の中は水深約50 cmの水たまりとなる)に、重さ約50 kgの8個の石灰石を捨てし(写真-1)、そこに健全な珊瑚礁から切り出してきたサング片を固定した。固定方法としては、基盤に穴をあけてそこにサング片を差し込む方法、基盤に打ち込んだ釘にサング片を針金で縛る方法、竹串に針金でサング片を縛って

表-1 移植後1週間と2ヶ月のサング片の高さおよび枝数の変化(77片中39片について)

Zone 1				Zone 2			
1 week		2 months		1 week		2 months	
H cm	Bran	H cm	Bran	H cm	Bran	H cm	Bran
11	5	15.5	34	3	4	13	18
9	8	13	29	15	7	13	15
6	7	20.5	23	8	6	10	16
5	3	14	29	10	1	14	16
5	5	16	31	8	2	16.5	14
3	12	17	27	9	5		
9	7			9	3	12	26
11	5	13	29	6	5	13.5	16
6	4	17	22	7	3	14	9
13	5			7	7	10.5	22
12	7			8	4	13.5	18
11	7	15	37	8	4	20	29
11	6	17	42	7	7		
13	3	16.5	12	11	4	27	46
8	6	16	37	10	5	15	27
9	7	16	18				
11	4	17	15	9	5	13	24
9	3	17.5	5	8	2		
9	3			10	2		
10	4	17.5	22	8	5	14	13



(a) 移植後1週間



(b) 移植後約2ヵ月

(c) 移植後約6ヵ月
(基盤の石灰岩はかなり砂に埋没している)

写真-2 サンゴ片の成長の様子

砂中に差し込む方法、水中ポンドでサンゴ片を直接基盤石に接させる方法の4方法を試みた。実験を行った採掘穴を2つのゾーンに分け、合計77のサンゴ片について移植後の定着、成長を観測した。表-1に移植、1週間と2ヵ月後のサンゴ個体の高さで成長の速さを示す。また、写真-2は移植直後、2および6ヵ月後のサンゴの様子を比較して示したものであるが、個体数は観光客に持ち去られたものもあり、サンゴ片数は77から54に減少しているが、サンゴはしっかりと成長している様子がわかる。図-2および3に、サンゴの成長速度を高さおよび枝数で示した。離脱したサンゴは約半数で、固定

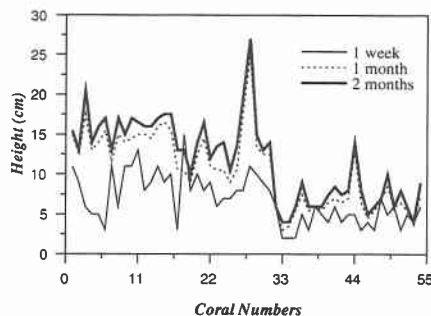


図-2 移植後1週間、1ヵ月および2ヵ月のサンゴ片の高さの変化 (77片中54片について)

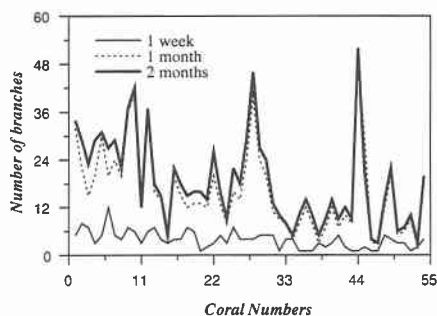


図-3 移植後1週間、1ヵ月および2ヵ月のサンゴ片の枝数の変化 (77片中54片について)

方法により差異はなかった。これから、サンゴの成長は極めて早いことが確かめられ、サンゴの移植により荒廃した珊瑚礁を回復できる可能性は高いと考えられる。

実験は、移植後6ヵ月頃まで継続したが、その後に来襲したと思われる高波で、基盤の石灰岩の埋没、転倒のためサンゴ片が激減したため打ち切った。この高波がどのような条件で来襲したのかは観測できなかったが、以下のような可能性が考えられる。実験を行った位置は採掘穴が多く有り、珊瑚礁縁辺から400 m陸側にある。図-4は、Sulaimanら(1994)が1992年6月に実験場所で観測した波高、周期の岸沖方向変化の一例を観測点とともに示したものである。図より、通常の波浪条件では、実験地(汀線から100 m沖合い)の波高は、碎波のために沖波波高の20%に減衰し、周期は分裂のため約半分になることがわかる。また、来襲波浪の年変化特性は図-5のようであり、高波浪は6～8月の東モンスーン期(干季)に来襲し、12～2月の西モンスーン期(雨季)には最大波の周期8～9 s、波高80 cm程度の風波である。実験を行った採掘穴に高波が来襲した時期は西モンスーン期で、1992年の通年の沖波観測では1 mを越える最大波高は観測されていない。このことから、基盤の石灰岩を埋没、転倒させた現象は、珊瑚礁縁辺で碎波せずに侵入してきた波浪が集中した場合であろうと考えられる。この

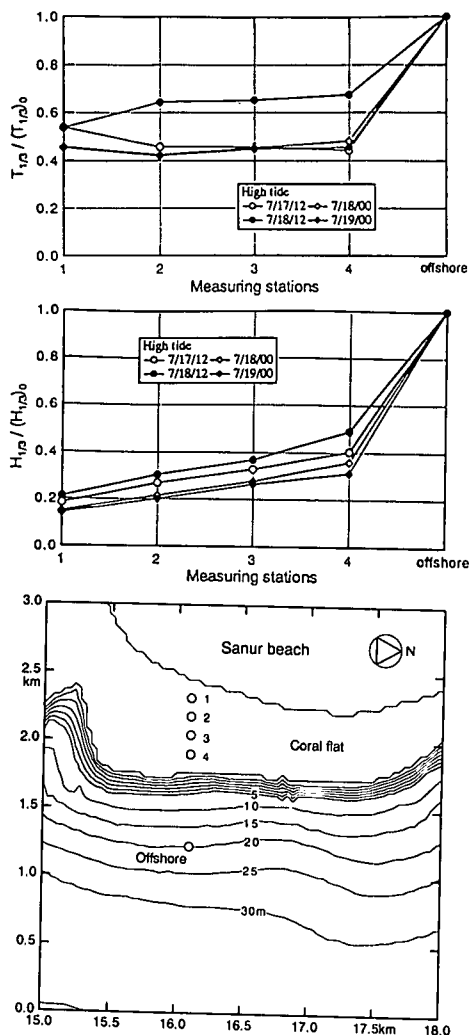


図-4 サヌール海岸における珊瑚礁上での波浪観測結果(有義波周期, 有義波高)と観測点の位置 (Sulaiman ら (1994) による)

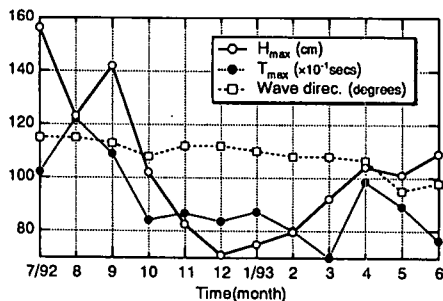


図-5 サヌール海岸における有義波周期, 有義波高, 主波向きの年変化特性 (Sulaiman ら (1994) による)

様な波浪が, 珊瑚礁背後の砂浜に大きな変化をもたらす可能性は Syamsudin (1993) により指摘されているが, 今後の調査が必要である。

4. サンゴおよびアマモ類の移植について

4.1 サンゴの移植

一般には, どの種類のサンゴを掘るか移植しようとする場所と目的により異なる。また, どのような手法を取るかによって適した群体の形状が決まる。成長の速い種もあり, 遅い種もあるが, サンゴの成長には現場の環境条件が第一である。比較的波当りの弱い礁池などでは, 繊細な形状の枝サンゴや葉状の群体が対象になるが, このような形状の種は波が激しくぶつかるような場所には向かない。また, 比較的近くにどのようなサンゴが生育しているかも判断の基準になる。ここで試した枝状ミドリシの1種 (*Acropora* sp.) はサヌール海岸での優占種であった。

サンゴの移植で留意しなければならないことは, もともと生育している場所から, 移植しようとするサンゴをそっくり採集することは避けるべきである。群体の一部を採集して使用し, もとの群体はそのままの環境で生育し続けるようにする方法を取り, サンゴ群集の破壊は慎むべきである。また, サンゴは基本的に水から干出した状態では生育できないので, 十分に群体が成長した状況下でも常に水中に位置するような場所に移植する必要がある。

採集地の決定も, 状況によって異なる。海岸保全のための移植が目的の場合には, 希な種は対象にしない方がよい。たくさんある種はそれだけ旺盛な生育を示す種であるので, 普通種を使うべきである。サンゴが沢山生育している領域から, サンゴ群体に決定的なダメージを与えないように配慮しつつ, 群体の一部を少量ずつ集める方法が良い。よいサンゴ群集が成立している場所から移植体を得るため, 一見良い環境の場所を破壊するような印象を与えるかも知れないが, サンゴの性質をよく知った上で理にかなった方法で採取すれば問題はない。

4.2 サンゴの移植後のモニタリング

定期的にモニターすることが望ましい。実験的には複数の種を複数の方法で移植し, 確実にモニターすることによって, 失敗と成功の原因を探り, 失敗の修復や以後の移植に活かすやり方がよい。活着, 死亡, 成長 (枝の数や長さ, 群体の高さや大きさなど), 被度 (基盤の被覆の割合, %) のほかに, サンゴ群集が形成されることに伴って, 周りの動物がどのように変化したか, 底質の動きがどのように変化したかなどの記録を観察しなければならない。移植直後は短いインターバル (週, 月単位) で, しばらくたった後は間隔を広げていけばよい。また, 生育を妨げるような要因, 例えば人による攪乱, オニヒトデなどの捕食者による攪乱, 淡水の流れ込みなどの監視も必要である。

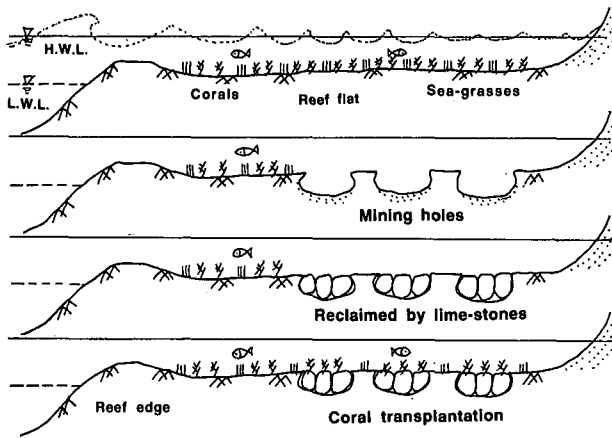


図-6 サンゴの移植によるサヌール海岸の保全(試案)の概略
(上から、自然状態→珊瑚塊の採掘後→採掘穴を石灰岩で修復→サンゴの移植)

4.3 アマモ類の移植について

海草藻類が生育することの効果は、砂の動きを止めること(これは海浜植物の砂止め効果と同じ)、多くの小型動物の棲み場所になって棲息する動物の種数と個体数が増えること、および水流を緩和されることも等の効果がある。現在、東南アジアでは、アマモ類の衰退などが水産の面からも、生物種の保全の点からも大きな問題となっており、移植の研究が行なわれている。サヌール海岸は海草藻類がサンゴと共存しており、ここにはインドネシアで報告されている7属全てが見られ、確認した種は8種であったが、本格的に調査すればもっと見つかる可能性がある。この海岸の珊瑚礁は極めて良い藻場であり、サンゴと共存しているアマモ類の移植も重要であると思われる。この海岸では、広範囲に渡り海草藻類の生えていない珊瑚塊の採掘による穴が見られるが、この穴に海草藻類を移植することは、海草藻類の根に付く有孔虫の死骸は珊瑚礁の砂浜の底質の一部であることから、積極的な意味がある。小さな穴では、砂を埋め戻しておくだけで周辺部から地下茎の伸長による侵入があり藻場が自然に広がるのが期待できるが、採掘穴のように穴が大きな場合には砂が活発に動くために、移植を含めて何らかの対策が必要である。石灰石のブロックを切り出して埋め込み砂で覆う方法が考えられる。

5. サンゴの移植によるサヌール海岸の保全(試案)

サンゴにしても、アマモ類にしても、移植は一度行えばそれで終わりではない。サンゴ群集の造成も一気に済ませるのではなく、目的とする状態に達するまでには時間がかかることを想定しておかなければならない。土

木工事の場合には、竣工すればそれで終わりであるが、サンゴやアマモ類の移植は裸地に森を作るようなもので、小さな破片を移植し、その成長によって群集が形成される時間のかかる事業であることを認識しなければならない。相手が生き物である以上、常にケアが必要である。生態系に配慮するということはそういうことも含んでいる。海岸保全を目的としている事業ではあるが、「工事」という感覚でサンゴの移植を見ないようにすべきである。

この様な観点から、サヌール海岸におけるサンゴやアマモ類の移植による海岸保全を如何に実施するかを考え、以下のような手順と方法を提案した(図-6)。

(1) 珊瑚礁南部域の生物調査の後、移植体のボーサイトを決定する。

(2) 専属のダイバーにより採取された最小限度の数のサンゴ体は、一旦サンゴ苗床に植えられた後、移植の必要な場所に移される。

(3) 回復の必要な採掘穴に石灰石等の移植床を設置する。移植床にはサンゴを挿入するための穴を前以て開けておく。

(4) シュノーケリングを楽しむ観光客に移植してもらう。サンゴの里親制度等を行うのも一案である。

5. 結 語

バリ島サヌール海岸において、サンゴの移植による海岸保全の可能性を調べるため、サンゴの移植実験を行った。その結果、サンゴの成長の早さ、移植方法、問題点を明らかにすることができた。今後、生態系調査と具体的な工法とをさらに検討する必要があるが、現在、バリ島の珊瑚礁海岸で進行中の潜堤やヘッドランド工法にここで提案したサンゴの移植を併用する形で、海岸保全対策が推進されることを期待する。

最後に、本研究は国際防災十年の一貫として京都大学防災研究所で平成3～5年度に実施された国際共同研究の成果の一部であることを明記するとともに、現地実験に協力して下さったインドネシア公共事業省バリ地方局の諸官に謝意を表する。

参 考 文 献

- Sulaiman, D. M., S. Tsutsui, H. Yoshioka, T. Yamashita, S. Oshiro and Y. Tsuchiya (1994): Prediction of the maximum wave on the coral flat, Proc. 24rd ICCE, ASCE, pp. 609-623.
- Syamsudin, A. R. (1993): Beach Erosion in Coral Reef Beaches and Its Control, Dr. Eng. Thesis, Kyoto University, 225 p.
- Syamsudin, A. R., Y. Tsuchiya and T. Yamashita (1994): Beach erosion in Kuta Beach, Bali and its stabilization, Proc. 24th ICCE, ASCE, pp. 2683-2697.