

斜め空中写真を用いたサンゴ礁海岸の 地形特性の判読

FIELD OBSERVATION OF CORAL COASTS BY OBLIQUE
AERIAL PHOTOGRAPHS

大中 晋¹・宇多高明²・遠藤秀文³・芹沢真澄⁴

Susumu ONAKA, Takaaki UDA, Shubun ENDO and Masumi SERIZAWA

¹正会員 工修 (株) ドラムエンジニアリング (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5-21)

²正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³正会員 日本工営 (株) (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-5)

⁴正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22-208 ローヤル若葉)

Aerial photographs were taken to investigate beach changes on coral coasts and sand movement around reef gap at Sanur and Nusa Dua Beaches on Bali Island by using a ultra light plane. At Sanur dominant beach changes can be observed around groins because of obstruction of longshore sand transport. On both beaches, beach erosion has become serious problem and various measures were taken, but lack of overall comprehensive plan reduces natural sandy beach to artificial coastline protected by many kinds of structures.

Key Words : Bali, beach erosion, coral reef, coastal resort, detached breakwater

1. まえがき

近年、CO₂の増加に起因した地球温暖化が問題となっているが、熱帯・亜熱帯に発達するサンゴ礁はCO₂の吸収機能を持つことから、CO₂吸収効果などに関する理学的研究がかなり多く進められている。しかし、これらのサンゴ礁海岸はまた多くの旅行者にとって魅力ある場所であるために、海洋性リゾート地としての開発も各地で進んでいる。海洋性リゾート地では、旅行者の落とす外貨がその地域の所得向上に役立つために、それぞれの地域では地球環境問題よりも、旅行者の快適性や利便性を保証する開発に多くの関心がある。このため、天然リーフに目先の快適性を追求した各種施設が造られ、それらが条件によってはリーフ海岸の侵食原因となることもある。天然リーフは、もともと優れた防災機能と同時に良好な環境を有していたにもかかわらず、それらが台無しになってしまう例はしばしば見かけるところである。こうしたことを防止するには、種々の開発の影響を正確に予測し、影響を未然に防止する策を提案する必要がある。これには、リーフ海岸の地形的特性などについての幅広い理解が必要である。天然リーフ

の地形特性の理解を進める場合、リーフは幅数kmにも達する規模を有することから、空中からの観察が有効な手段になり得ると考えられる。しかしサンゴ礁は限られた地域にしか存在しないことから、このような手法を用いた観察例はMaldivesでの実例^{1), 2)}を除いてごく少ないのが現状である。

そこで、本研究では、インドネシアのバリ島南部に位置するSanur海岸とNusa Dua海岸において斜め空中写真を撮影するとともに、現地踏査を実施してリーフ海岸の地形特性について調べた。

2. 調査方法

調査対象のバリ島南部には、毎年多くの旅行者を迎え入れているSanur、Nusa DuaおよびKuta海岸がある。図-1にはそれらの位置を示すが、バリ島南部にあるBukit半島の東側の海岸線がNusa Dua海岸であり、ここより海岸線は一旦くびれる。その付け根にBenoa港があり、そこから北東方向に再び張り出している海岸線がSanur海岸である。また、西側の海岸がKuta海岸である。近年、これらの海岸でも侵食が目立ってきている。侵食原因は様々であり、リーフ上に延ばされた空港滑走路や突堤な

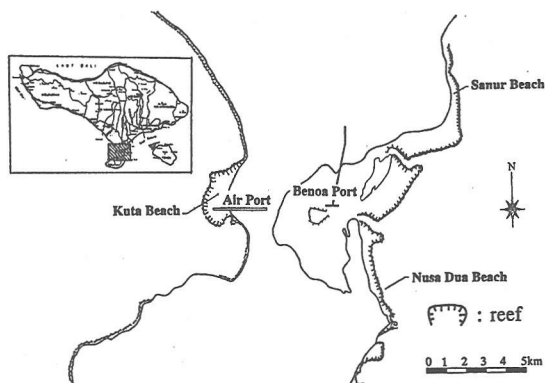


図-1 バリ島南部の海岸位置図

どの施設によって、リーフ上の漂砂移動パターンが大きく変化したこと、coral miningや海岸環境の悪化に伴って、サンゴ礁から海浜へのサンゴ砂の供給量が減少したことが複雑に絡んでいる。

斜め空中写真は、1997年9月4日にUltra-Light Plane（動力付きハンググライダー）により撮影した。バリ島南部では潮位差が2m程度あり、Sanur、Nusa Dua海岸では干潮時に礁原（リーフフラット）は完全に露出する。これより各海岸とも高潮時および干潮時の2回ずつ撮影を行った。本調査の着目点としては、既設構造物周辺の汀線変化および漂砂移動状況の把握、リーフフラット上の底質移動、海藻の繁茂状況の把握、リーフギャップ周辺の地形状況の把握などである。

3. Sanur海岸の特性

(1) 概況

図-2にSanur海岸の平面図を示す。なお図中には、斜め空中写真の撮影方向も同時に示している。Sanur海岸では、沿岸方向約6kmの範囲で広大なリーフが広がっている。リーフフラット幅は平均的には700m程度であり、北側では狭く、南側に行くにしたがって広がる。Sanur海岸南側には大規模なリーフギャップが存在する。このリーフギャップを境に、海岸線の曲率は大きく変わり、北側では南北に、南側では東西に延びる。リーフフラット上の大部分は海草類で覆われており、サンゴの生息は現在ほとんど見られない。リーフ沖端ではリーフエッジが存在し、この付近で僅かながらではあるが、サンゴの生息している状況が観察される。

(2) リーフギャップ周辺の海岸状況

写真-1は、Sanur海岸南側のKesumasari沖にある規模の大きなリーフギャップの空中写真である。このリーフギャップはSanur海岸で最も規模が大きいものであり、深みが沖合から岸側へと大きく入

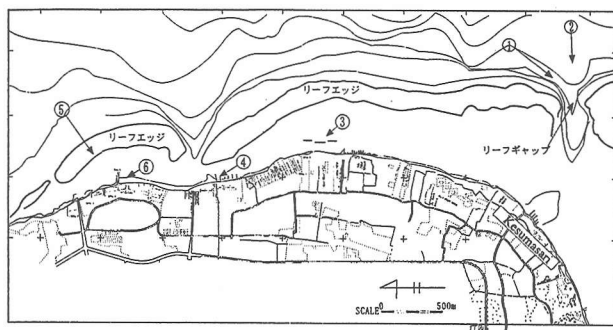


図-2 Sanur海岸



写真-1 Sanur海岸南部のKesumasari沖に発達するリーフギャップ

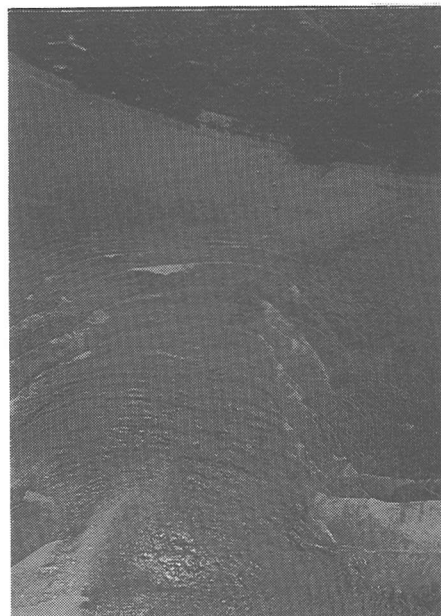


写真-2 高潮時のリーフギャップの状況

り込んでいる。リーフギャップより手前側のリーフエッジ付近には、岸向きに何本もの筋目模様が見られる。これはリーフで一般的に見られる現象^{1), 2)}である。次に高潮時のリーフギャップの状況を示したものが写真-2である。リーフギャップでの屈折により、ギャップから両側に波が広がっていく様子が見られる。なお当地点を境に、南（左）側

では南向きの、北（右）側では北向きの沿岸漂砂移動となることが見出されている。また、リーフギャップの岸側端には、他のリーフギャップでは見られない三角形の砂の堆積域が存在する。

（3）離岸堤および突堤周辺の海岸状況

写真-3は、Sanur海岸の中央部にある離岸堤群周辺の海浜状況である。写真左端に見える突堤の右（北）側の汀線が大きくフック状となっている。同様な状況は、写真の右端付近に見える突堤群の周辺でも観察され、突堤群の手前側（南側）では広い前浜があるのに対し、北側では前浜が狭い。このことは、この海岸では汀線に沿って北向きの沿岸漂砂が卓越していることを意味する。一方、3基の離岸堤の背後では、波浪静穏化のために緩やかな舌状砂州が形成されている。また、離岸堤の岸側で白っぽく見えるのは、海底面に砂が堆積しているものであり、周辺の海藻で覆われた海底面（写真では黒く見える）と堆積状況が大きく異なる。汀線付近と同一色調の区域は、離岸堤群の背後を除いて汀線沿いの狭い帯状の区域に限られている。このことは、海浜で、汀線と一体的な砂移動が生じている区域（それは沿岸漂砂の作用が卓越している区域でもある）が、写真-3の左端から3番目の突堤の先端付近までであることを意味している。また、リーフ上で離岸堤を建設しても、海浜砂の総量は増加する訳ではなく、離岸堤背後での堆積は周辺域での侵食と表裏の関係にあることから、リーフ海岸における離岸堤の建設には疑問が残る。

写真-4は、写真-3に示した離岸堤群の北側にある小突堤群周辺の海浜状況である。北端の突堤による沿岸漂砂阻止効果が著しく現れており、そのためこの突堤より南側では前浜が広いが、突堤の北側直近での砂浜幅は非常に狭くなっている。このような小規模な突堤群は、海岸全体の保全に関するマスタープランの下に設計されたのではなく、海岸侵食に対してそれぞれの地先での対応がなされた結果である。もともと、リーフエッジからのサンゴ砂の供給が十分あれば侵食は起こらず、むしろ海浜は堆積性であって、突堤や離岸堤などの侵食対策施設も不要であったと考えられる。しかし漂砂バランスが崩れて侵食が進み、それに対して次々と対策が必要となっている状況は、わが国の場合と全く同様である。異なる点は、土砂の供給源がわが国にあっては河川や海食崖であるのに対し、バリ島ではサンゴ礁であることのみである。

写真-5は、Sanur海岸北部のBali Beach Hotel前面のリーフ状況である。ホテルの前面付近ではリーフ幅は広いが、その南（左）側にはリーフギャップがあるため、リーフエッジでの碎波線が岸側に入り込んできている。リーフエッジから岸側には小高い場所があり、そこを越えて岸向きに移動する漂砂によって、何本もの筋目模様が付い



写真-3 Sanur海岸の離岸堤群背後の汀線状況

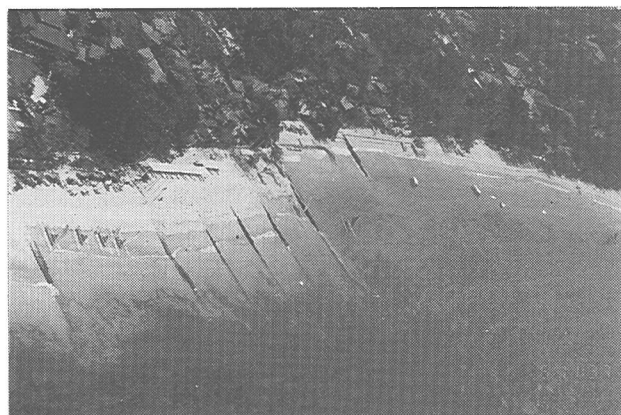


写真-4 Sanur海岸の突堤群周辺の汀線状況

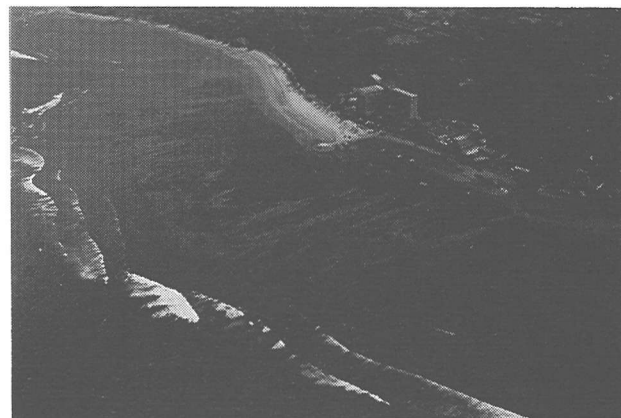


写真-5 Sanur海岸のBali Beach Hotel付近のリーフ状況

ている。リーフエッジのすぐ沖ではサンゴ礁の発達状況が沿岸方向に違いを示し、小規模な溝が形成されている。このため、碎波の白濁域が沿岸方向に周期的に並んでいる。また、碎波域の岸側延長線上ではリーフフラット上の筋目模様の発達が良好である。以上の点は、リーフの発達がよい場所ではそれだけ岸向きにサンゴ塊が運ばれ易く、そのためリーフフラット上の堆積が顕著になり、筋目模様が強調されたと考えられる。ホテルの前面にある突堤周辺の汀線状況に注目すると、南側（左側）では三角形の前浜が形成されているのに対し、北側での前浜の発達は悪い。このことは、

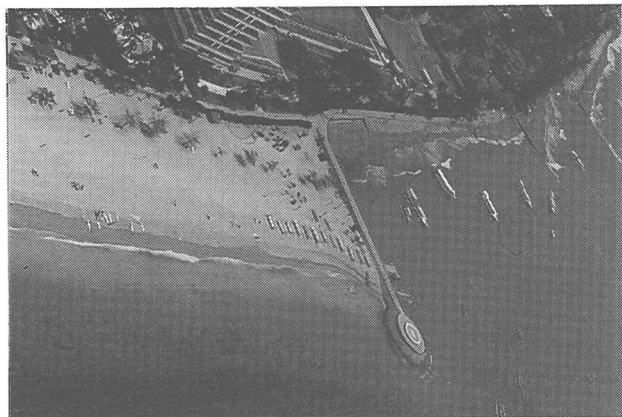


写真-6 Bali Beach Hotel前面の突堤とその周辺の
海浜状況

この付近でもやや北向きの沿岸漂砂が卓越し、それが突堤により阻止されていることを示している。写真-6は、Bali Beach Hotel前面にある突堤状況である。汀線のすぐ沖に白っぽい帯状の部分が観察され、その一部は突堤の先端から北側に延びている。このことは、漂砂帯の沖側限界がこの帯状区域の沖側端に相当すること、また漂砂の一部が突堤の先端を回り込んで北側へと移動していることを示している。

以上に見たように、Sanur海岸北側では全体として北向きの沿岸漂砂が卓越しており、その連続的移動が突堤や離岸堤群によって阻止されている状況にある。

4. Nusa Dua海岸の特性

(1) 概況

Nusa Dua海岸は、図-3に示すように沿岸方向約4kmにわたる海岸であり、海岸沿いに大規模な高級リゾートホテルが建立している。当海岸南部には、2つの陸繋島が存在する。Nusa Duaは「2つの島」を意味するが、これらの陸繋島の存在が海岸の名称となっているものである。また、Nusa Dua海岸の北側ではBenoa半島の砂嘴がのび、その先端付近でリーフは消滅する。リーフ幅は500～700m程度であり、リーフフラット上はSanurと同様、大部分は海藻類で覆われており、サンゴの生息はほとんど見られない。

(2) 2つの陸繋島周辺の海岸状況

写真-7は、Nusa Dua海岸南部を東向きに望んで撮影したものである。陸域の大規模なリゾート施設前面には広い前浜が、海岸線に沿って帯状に延びている。リーフ中央にはリーフギャップがリーフフラットを横切って入り込んでおり、それにあわせて岸側の汀線が大きく湾入している。写真に示すように、海岸線の東端には陸繋島があり、それが沿岸漂砂に対する固定境界となっている。このため、この区域の海岸線はポケットビーチとなり、海浜の安定性が高い。なお、汀線付近で発生した

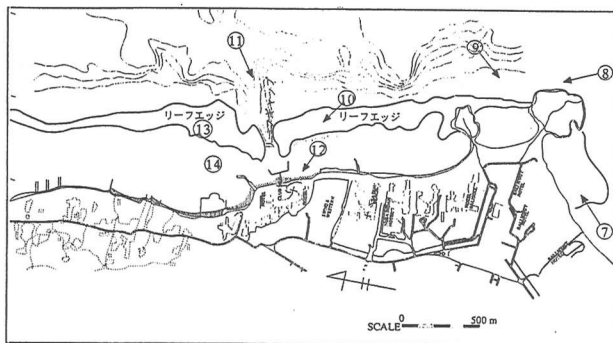


図-3 Nusa Dua海岸

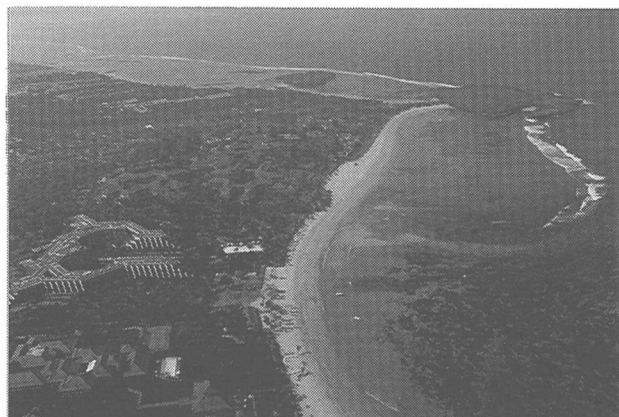


写真-7 Nusa Dua海岸の南部の海岸線を望む

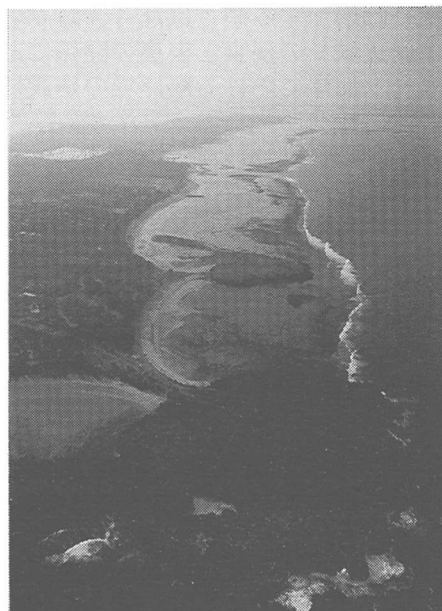


写真-8 Nusa Dua海岸南東端から北側の海岸線を望む

濁りがリーフギャップを通じた流れ（離岸流）によって細長く沖向きに流出しているのが見て取れる。このことより、リーフエッジからリーフフラットへと運び込まれた海水が、リーフエッジから離岸流となって沖へと戻っていること、それによってリーフ全体の循環流系が形成されていることが分かる。

写真-8は、2つの陸繋島から北方を望んで撮影し

た空中写真である。海岸線と平行に幅広いリーフが発達し、南側からの入射波が斜めに碎波している状況が見てとれる。この海岸は図-1に示したように、その地形的特性から北向きの沿岸漂砂が卓越している。この状況は、下から2番目の陸繋島より北側の海岸線がフック状となっており、陸繋島北側の平均汀線の位置南側より後退していることから分かる。2つの陸繋島は隆起サンゴ礁でできており、その上面は平坦である。島の周辺では波による侵食が進み、海食崖が形成されている。

写真-9は、2つの陸繋島から南方を望んで撮影した空中写真である。二つの陸繋島の前方にはリーフが広がっているが、南（左）側の島の南部に明瞭な形で深みが入り込んでいる。これが写真-7に示したリーフギャップである。

(3) 離岸堤およびU字型突堤周辺の海岸状況

写真-10は、Nusa Dua海岸中央部のリーフと、そこに設置された離岸堤群の状況を示す。写真の右端に碎波帯が一部見えている場所がリーフエッジであり、そこからリーフフラットが広がっている。そのほぼ中央部に4基の離岸堤群が設置されている。これらの端部では岸向きに堆積物が細長く伸びている。これは、離岸堤群によりリーフ上の岸向きの土砂移動が阻害されたことと、離岸堤の構成材の一部が、波の作用により岸側に移動したものである。一方、離岸堤群の岸側には舌状砂州が形成されている。舌状砂州の形成位置は、4基の離岸堤を結ぶ線と直交する中心線に対し、やや左（南）側にずれている。離岸堤群の開口部からは波浪が侵入するが、北側にはリーフギャップがあって波浪侵入が著しいのに対し、南側ではリーフフラット上の波浪が写真に示す突堤と離岸堤の間から入射することになり、南側からの入射波浪のエネルギーが相対的に小さい。このことから舌状砂州の位置が南側にずれたと考えられる。

写真-11は、Nusa Dua海岸中央部のリーフギャップの空中写真である。リーフフラットを横切って深い切れ込みが岸方向へ伸びている。外洋からの入射波がリーフエッジにおいて碎波するために、リーフエッジに沿って白濁域が見られる。これに対してリーフギャップでは碎波せずに、そのまま波浪が岸近くまで侵入していることが分かる。リーフギャップの南側にある4基の離岸堤群の端部では、いずれも岸向きの土砂堆積が見られる。とくにリーフギャップに近接するほど堆積範囲が岸側に大きく伸びている。また、リーフエッジの右側の区域では、リーフエッジから岸向きに何本もの筋目模様が見られる。

写真-12は、Nusa Dua海岸におけるU字型突堤とその背後の砂浜である。U字型突堤のすぐ沖にはリーフギャップが存在する。U字型突堤の北側にも一本の突堤があり、そこから北の汀線はフック状に後退している。このことから、この付近での沿岸漂



写真-9 Nusa Dua海岸南部にある2つの陸繋島の全景



写真-10 Nusa Dua海岸南部のリーフフラット上に建設された4基の離岸堤群



写真-11 Nusa Dua海岸南部のリーフギャップ

砂の卓越方向が北（写真右）向きであることが分かる。砂浜は、U字型突堤とその右側の突堤の間に限られており、その他の区域での砂浜幅は非常に狭い。海岸線背後のリゾート施設への滞在者は、この狭い区域での海浜利用を迫られている。特にU字型突堤の左側の区域では連続的に直立護岸が延び、その前面では前浜は全く存在しない。この付近では、写真-11に示したように南部の離岸堤群の消波効果によって海浜砂が舌状砂州の形成のために南側へと流出して侵食され、この結果海岸を防護するために護岸が造られたものである。ここでも、

沿岸方向に見たバランスの悪さが見られる。

(4) リーフフラット上の状況

斜め空中写真で見られたリーフフラット沖端のリーフエッジにおける筋目模様を確認するため、実際に干潮時にリーフエッジに近づいて撮影したものが写真-13である。リーフエッジにはこのような溝が数m～十数m間隔で形成されている。これらは、リーフエッジでの波・流れの作用によって、サンゴ塊が岸向きに運ばれる際、場所的に一様に堆積するのではなく、沿岸方向にある間隔で堆積の著しい場所が並んでいること、あるいは、リーフ沖側の新鮮な海水の流入によるサンゴの生育状況が、場所的に一様でないこと、などに起因すると考えられる。

次に写真-14は、写真-11のリーフギャップ北(右)側のリーフフラットの状況を撮影したものである。リーフフラット上の大部分は海草類で覆われているが、所々にリーフフラット面より0.5～1m程度深くなった窪地が点在する。この窪地は、Sanur海岸やNusa Dua海岸で、数年前まで行われていたcoral mining跡と思われる。窪地内の多くは海草類の生息は見られず、砂が堆積している。

5. 考察

バリ島のSanurおよびNusa Dua海岸ではリーフが発達し、風光明媚な海岸であることから、毎年多くの観光客が訪れている。そのこと自体は地域の発展のために望ましいことではある。しかし、水質など環境条件の悪化やcoral miningなどによって、サンゴ礁自体の活性度が低下し、それがサンゴ砂の供給減を招き海岸侵食をもたらした。侵食された海浜では観光客数の減少を防止するために、突堤や離岸堤などの各種侵食対策施設が造られるとともに、一部で養浜も行われたが、全体として海浜の環境条件の緩やかな低下は止まっていない。個々の地先での対応によって、それぞれ局所的には海浜の保持はなされたものの、海岸線全体を見れば海岸の人工化が進んできている。これらは観光客のリーフ海岸に対する魅力の低下、さらには観光収入の低下に繋がることになる。ここではバリ島のサンゴ礁リゾートの例を述べたが、筆者の一人(宇多)が調査を行ったMaldives^{1),2)}でも、あるいは最近訪れたFijiにおいてもよく似た状況にあった。サンゴ礁の問題はややもすると、地球環境に係わるグローバルな問題としてのみ捉えられ、CO₂の吸収源、あるいは海面上昇のインパクトの研究に目が向けられることが多いが、現実には、それ以前の問題として開発と保全のアンバランスなど、解決されるべき問題が多いのが現状である。すなわち、これにはここで用いたような斜め空中写真などを利用した大局的な調査をさらに行うことが必要である。

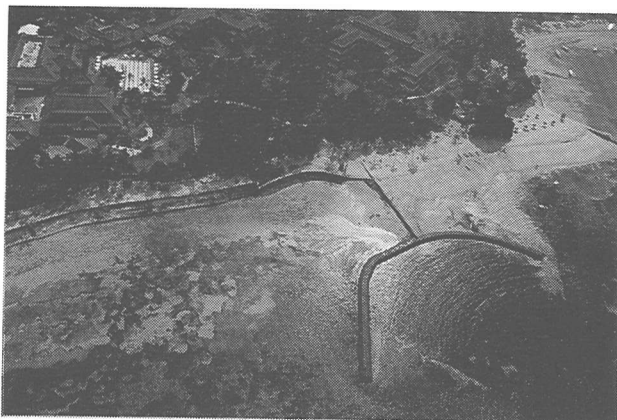


写真-12 リーフギャップの岸側に建設されたU字型突堤周辺の海岸状況



写真-13 筋目模様を形成するリーフエッジの溝



写真-14 リーフフラット上のcoral mining跡

参考文献

- 1) 宇多高明・桜本 弘・折下定夫(1993): サンゴ洲島の保全と利用に関する一考察、海洋開発論文集、Vol. 9, pp. 43-48.
- 2) 宇多高明(1993): モルディブのLhohifushi島における海岸保全、海洋開発論文集、Vo. 9, pp. 141-146.
- 3) 谷本修志・宇多高明・桜本 弘(1989): バリ島のリーフ周りの波、流れ、地形変化の観測、海岸工学論文集、第36巻、pp. 229-233.
- 4) 谷本修志・中野康雄・大月義和・宇多高明・小俣 篤(1988): 沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測、第35回海岸工学講演会論文集、pp. 207-211.

(1999. 4. 19受付)