

リーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と海岸侵食

宇多高明*・大須賀 豊**・大中 晋**・石見和久**
芹沢真澄***・三波俊郎****・古池 鋼****

Bali 島にある Sanur 海岸南西部ではリーフの大規模掘削により航路を掘ると同時に、掘削土砂による埋立地造成計画が立てられ、計画は 1997 年から実施に移された。しかし従来静穏であった区域が、水深の極端な増加に起因して波高・波向が大きく変化し、結果として掘削穴の陸側では著しい侵食が起こると同時に、全く新たに細長い島（バリアー）が形成された。本研究は、2000 年 8 月の現地踏査、2001 年 7 月のヘリによる斜め空中撮影、さらには掘削以前、工事中および工事終了後の空中写真の比較、さらには波浪・海浜流の数値計算などによりリーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と侵食の実態を明らかにする。

1. ま え が き

Bali 島にある Sanur 海岸は古くから海岸リゾートとして有名であり、毎年多くの観光客を集めている。1990 年代に Sanur 海岸南西部で大規模なリゾート開発計画として、リーフの大規模掘削により航路を掘ると同時に、掘削土砂により埋め立て地を造成する計画が立てられ、計画は 1997 年から実施に移された。しかし従来広大なリーフが存在したために静穏であった区域が、リーフの掘削により水深が極端に増加したために波高・波向が大きく変化し、結果として掘削穴の陸側では著しい侵食が起こると同時に、全く新たに細長い島（バリアー）が形成された。波浪場の変化に伴って岸向き漂砂が活発化する現象としては、大分県の住吉浜砂嘴周辺での海底掘削における事例（宇多ら、2001）があるが、巨大な島にまで発達した例が報告されることは稀である。本研究は、現地調査、空中写真撮影および波浪・海浜流の数値計算などによりこの現象の解明を進める。以下では、2000 年 8 月の現地踏査、2001 年 7 月のヘリによる斜め空中撮影、さらには掘削以前の 1991 年 8 月、掘削工事中の 1997 年 9 月、掘削工事終了後の 2001 年 12 月に撮影された垂直空中写真の比較によりリーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と侵食の実態を明らかにする。

2. 斜め空中写真撮影と現地踏査によるバリアーの形成と砂嘴の侵食調査

2001 年 7 月、リーフの掘削状況を調べるために筆者の一人（大中）がヘリ上から斜め写真を撮影した。写真一1 はサヌール海岸南部のリーフの空中写真である。写真上部には白濁した碎波帯が見られることから分かるように、サヌール海岸沖には幅約 1 km のリーフが発達している。一方写真左端にはサヌール海岸が見える。サヌール海岸は全域にわたって上述のような幅広いリーフが発



写真一1 サヌール海岸南部の斜め空中写真（2001 年 7 月）

達していた。しかし写真中央部から右端の間に黒々と見えるように、大規模な埋め立て地建設のための掘削が行われた。掘削深は約 9 m である。リーフと掘削穴の境界線をよく見ると約 140 m 間隔でリズム的なパターンが見えるが、これはその幅でリーフの掘削がなされた跡である。掘削以前、リーフは干潮時には干出するような標高を有していたが、掘削穴の水深はこれと比較してはるかに大きい。このためこの深みを通過して海岸線へ到達する波のエネルギーが増大するとともに、掘削穴の形状が岸向きに大きく突出しているために波の屈折状況も大きく変化した。この結果サヌール海岸では著しい地形変化が生じた。

第 1 の変化は、サヌール海岸南部にあった砂嘴先端部での侵食である。左端に見える緑に覆われた陸域からは手前側に向かって砂嘴が伸びている。砂嘴は白いサンゴ砂で構成されているが、これは主として有孔虫の遺骸でできている。この白い砂浜も端部 A と砂嘴の付け根の点 B を連続的につないだ時、線分 AB は緑に覆われた区域の外縁線と斜行し、緑に覆われた区域が右向きに突出している。AB 区間の外縁にはコンクリートで固めた護岸が存在したが、それらがリーフ面に取り残されている。この付近では汀線が急速に後退し、護岸に作用する波力が増大した結果、護岸は延長約 150 m にわたって倒壊し

* 正会員 工博 (財)土木研究センター審議役なごき総合研究室長

** 正会員 日本工営(株)コンサルタント国際事業本部

*** 正会員 海岸研究室(有)

**** 正会員 海岸研究室(有)



写真-2 護岸の被災状況 (2000年8月末)



写真-3 バリアーの岸端での堆積状況 (写真-1の点D)

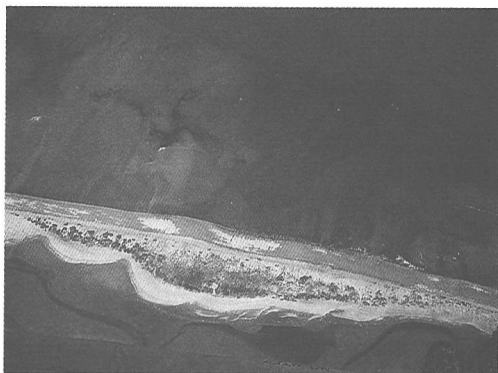


写真-4 バリアー中央部の空中写真 (2000年7月)



写真-5 バリアー西端の空中写真 (2000年7月)



写真-6 バリアーの前浜とバームの状況 (写真-5の点E, 2000年8月末撮影)

た。一例として写真-1の点Cで2000年8月末に撮影した護岸の被災状況を写真-2に示す。護岸は倒壊し、背後地が大きく侵食されたことが見て取れる。

第2の変化は新島の形成である。図-1において中央下部から斜め左上方へとバリアーが延びている。その先端は上述の砂嘴と対称的な形状を有している。このバリアーはリーフの掘削後新たに形成されたものである。バリアー周辺はマングロープの生育する環境にあったが、マングロープの一部は砂州に埋まった。写真-3は2000年8月末に写真-1のDで撮影したバリアーの岸端の状況であるが、沖合から大量のサンゴ片が干潟面上へ運ばれ、約1/2勾配の安息勾配をなして土砂が堆積したことが分かる。一方、バリアーを構成する砂の塊のすぐ陸側には、従来からそこに存在した干潟面がそのままの形で残されている。

写真-4はバリアー中央部の状況である。上部にはリーフの掘削によってできた深みが黒々と見える。この深みとやや斜行してバリアーが形成され、砂が十分打ち上げられた場所では植生の繁茂が始まっている。またバリアーの海浜は、リーフの平坦面から海浜勾配1/5~1/10で急激に立ち上がるが、海底勾配の急変点を結ぶ線はバーム頂と平行に伸びている。

写真-5はバリアーの西端を撮影したものである。バ

リアーの西端は既存のマングロープ林で終わっている。これより西は写真に示すように対岸のセランガン島が近接するためにインド洋からの波浪の作用は押さえられている。バリアーはマングロープ林に上から砂が覆い被さるようにして形成されている。このためバリアー上で大きく砂に埋もれたマングロープは一部枯れている。またバリアーの西端沖では岸向きの漂砂移動によって形成されたと考えられる漏斗状の砂の堆積域が見られる。

写真-6, 7は写真-5の点E, Fで2000年8月末に撮



写真-7 バリアーの陸側端の状況(写真-5の点F, 2000年8月末撮影)

影したもので、写真-6ではバリアーの前浜とバームの状況が、また写真-7ではバリアーの陸側端が干潟面に侵入している状況が良く分かる。

3. 垂直空中写真の判読

Sanur 海岸南西部における 1982 年から 1997 年までの砂嘴の発達については、既に遠藤ら (1999) が明らかにし、砂嘴の伸長と coral mining との関係について述べた。しかし、本研究では一般的な coral mining ではなく、大規模な海底掘削と砂嘴の伸長および周辺域での侵食との関連について新たな空中写真を加えて考察する。

写真-8 には 1991 年 8 月の空中写真を示す。海域には写真のほぼ全域を覆うようにしてリーフが発達し、また写真中央よりやや東には長さ約 240 m の砂嘴が発達していた。砂嘴の先端から約 600 m 東には突堤があるが、この突堤の東西で汀線位置に段差が付いており、西側の汀線が後退している。砂嘴の発達と突堤両側での汀線位置の違いは、この当時砂嘴付近では汀線に沿って西向きの沿岸漂砂が卓越していたことを示している。またこの砂嘴背後の波の遮蔽域は船溜まりに利用されていたが、この区域のさらに西側では浅い干潟状の土地が形成されており、その背後には密生したマングローブ林で覆われていた。

写真-9 には 1997 年 9 月の空中写真を示す。1991 年には 1 km 以上の幅があったリーフが大きく掘削され、海岸線近くに大きな深みが形成された。また掘削穴の東端部では当時進行中であった浚渫工事用の浚渫船も見える。このような掘削によってリーフの平坦面が消失し、約 9 m の深みが形成された。リーフの掘削と同時に、東部では砂嘴が陸側に後退しつつ先端部が約 120 m 前進した。なお砂嘴の内側の従来船溜まりであった部分では、埋め立てが進んで泊地は直線状に切られた。一方、西部ではマングローブ林の前面にあった狭い砂浜が消失し、その砂浜は陸側に押しやられ、一部のマングローブ林は深みから侵入する波浪に直接晒されるようになった。ま



写真-8 サヌール海岸南部の空中写真 (1991年8月)



写真-9 サヌール海岸南部の空中写真 (1997年9月)

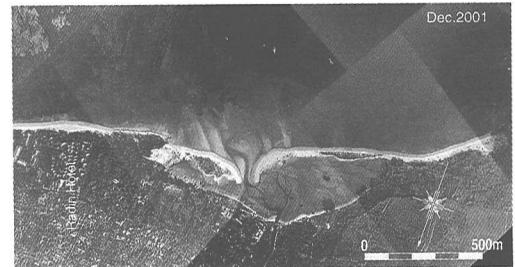


写真-10 サヌール海岸南部の空中写真 (2001年12月)

たマングローブ林の沖合約 120 m には東西の長さが約 170 m の細長い島が形成された。

写真-10 には 2001 年 12 月の空中写真を示す。1997 年と比較すると掘削穴の規模が増大し、沖合に幅広い深みが形成された。またこの深みまでの最短距離が約 120 m まで接近した。このような掘削穴の形成に伴って、砂嘴はさらに陸側へと後退しつつその先端が約 120 m 前進した。この段階でも砂嘴陸側の水域は船溜まりとして利用されているが、砂嘴先端が陸地に接近したことによって開口幅が 1997 年の 40 m から 2001 年の 30 m まで狭まった。

最も大きくかつ著しい変化は、西端のマングローブ林より長さ約 700 m、幅約 30 m のバリアーが忽然と姿を現したことである。写真に示すようにこのバリアーの西端はマングローブ林であって西側からの漂砂供給はあり得ず、また東端では対岸にある砂嘴との間に狭い水路を有しており、ここを通過して西向きに漂砂が通過すること

もあり得ない。このバリアーの東端に砂嘴が形成されており、その部分が大きく陸側に湾曲していることはバリアーの汀線に沿った沿岸漂砂の卓越方向が東向きであることを示唆している。このように考えると、このバリアーの唯一の土砂供給源はリーフエッジないしはリーフ面であったことになる。すなわち土砂移動は岸向き漂砂によって供給された後、沿岸漂砂によって現在見られるようなバリアーが形成されたと考えられる。この現象は、宇多ら (2001) が解析したように、大分県の守江湾と別府湾を区切る住吉浜砂嘴の沖合で見られたものと全く同一である。住吉浜砂嘴では海砂採取のために大規模な海底掘削が行われたあと、掘削穴の陸側斜面から波の作用で大量の土砂が打ち上げられ、それが沿岸漂砂の作用によって砂嘴の先端部へと運ばれたが、それと同じ現象が起きたと考えられる。

一方、従来から存在する東側の砂嘴の付け根では従来滑らかな曲線状に延びていた海岸線は、突出した護岸の存在によって汀線が不連続となり、そこより西側の汀線がフック状となった。さらにこのフック状汀線を形成させた護岸の東側では汀線が後退し、護岸が越波によって破壊されるとともに背後地にあった寺院が倒壊の危険に晒されている。このように深みの形成によって従来は入射することがなかった南側からの入射波が作用するようになったことから、それに合わせて東部の汀線は全体的に後退することになった。一方前面をバリアーでほぼ完全に塞がれたマングローブ林周辺では背後地への入退潮流が全て二つの砂嘴の開開口部を通ることになった。このことはバリアー背後の水域の水質悪化を招いている。さらに東向きに延びたバリアーとその先端の砂嘴はリーフの掘削穴から次第に遠ざかっているため作用波力が次第に低下し、このため現在位置でほぼ安定状況に近づいていると考えられる。

4. バリアーの汀線と断面形の変化

図-1は上述の空中写真をもとに作成した、砂嘴先端部付近の1991～2001年の拡大汀線変化である。海底掘削は1997年から始まったが、それ以前には西側のバリアーは全く存在せず、極浅海域の海岸線はマングローブで覆われていた。しかし2001年には掘削穴からの侵入波浪によって規模の大きなバリアーが形成され、背後に閉鎖度の大きなラグーンが残された。バリアーの形成土砂はその前面海域から打ち上げられたものである。一方東側の砂嘴は従来安定していたが、それが大きく伸びたことが分かる。

2002年4月21日には図-1に示す4測線においてバリアーの横断測量を行った。バリアー頂をほぼ一致させて測量結果を示すのが図-2である。これによればバ

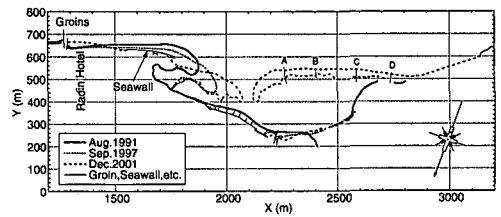


図-1 砂嘴先端部付近の汀線変化

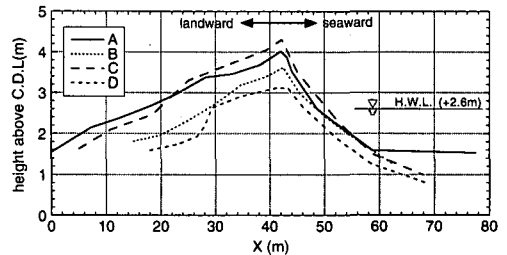


図-2 バリアーの横断形状 (2002年4月21日測量)

アーの前浜勾配は1/5～1/10である。これに対してバリアー頂の陸側斜面の勾配は約1/15であり、前浜勾配より緩い。また陸側斜面の末端は土砂の落ち込みにより安息勾配に近い急斜面となっている。またバリアー頂の高さはC.D.L.+3.1m～+4.3mで、H.W.L.(C.D.L.+2.6m)上0.5m～1.7mとなる。さらに砂州高が最も高い測線C(C.D.L.+4.3m)では砂州幅も広く、この測線では空中写真によればバリアー頂の背後には植生が固定化されていることが見出された。

さらにバリアーの全堆積土砂量の計算を行った。まず図-2に示す横断形から断面積を求めることができる。その上で図-1の平面図において測線Aから先端(東)部は測線Aで、測線Dの西側は測線Dで、さらに測線間は両側の2断面の平均値で代表させて断面積を算出した上でバリアーの堆積土砂量を計算すると、総土砂量は約64,000 m³となった。バリアーの形成には約4.5年を要しているので漂砂量を求めると、 1.4×10^4 m³/yrとなった。さらに図-1においてバリアー先端部の砂嘴は沿岸漂砂の作用で形成されているので、測線Aの東側の部分を除いたバリアーの海岸線延長560mで割ると、単位海岸線当たりの岸向き漂砂量は25 m³/m/yrとなった。

5. リーフの掘削による波・海浜流の変化

図-1はリーフ周辺の掘削状況を表す深淺図(2002年3月測量)である。従来沿岸方向にほぼ一様に発達していたリーフが大きく掘削された。図にはSanur海岸への卓越波浪である $H_0=1.3$ m, $T=13$ sの波をSE方向から入射させた場合の入射角の分布も示す。従来はリーフエッジ付近でそれに対してほぼ直交するように屈折して

