

Bali 島南部 Nusa Dua 海岸の侵食と対策

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

Bali 島南部にある Nusa Dua 海岸を対象として、深浅測量、空中写真撮影、波浪・海浜流および汀線の数値計算、侵食域の現地踏査などからなる総合調査を実施し、侵食実態を明らかにした。この海岸では北向きの沿岸漂砂が卓越するが、近年南部からの漂砂供給が枯渇した結果侵食域が北側へと広がってきた。等深線変化モデルにより汀線変化の再現を行うとともに、縦断面変化データより海浜土砂量の沿岸方向分布を算出し沿岸漂砂量の分布を算出した。この結果海岸北部での平均沿岸漂砂は約 9300 m³/yr となったが、この値は宇多の示した、波による地形変化の限界水深からの沿岸漂砂量の推定式による値とほぼ一致した。

1. ま え が き

Bali 島南部には図-1 に示すように海岸リゾートとして世界的に有名な 3 海岸（南部の Nusa Dua 海岸、東部の Sanur 海岸、そして西部の Kuta 海岸）がある。これらの海岸はいずれも幅広いリーフにより囲まれており、良好な海洋性リクリエーションゾーンを有しているが、近年侵食が目立って進んできている。3 海岸のうち最も南側において南北に延びる Nusa Dua 海岸では、リーフ海岸の特徴としてリーフエッジ付近からのサンゴ砂の供給にとどまらず、もともと「Nusa Dua」が「2 つの島」の意味を持つことから明らかなように、南端部近くに島がありその背後を北向きの沿岸漂砂が通過し、これによって海浜形成が促されてきたという特徴を有する。しかし近年南部地区の開発に伴い島背後の砂州を埋めて本島と陸続きにする工事が行われ、これにより北向きの沿岸漂砂の供給が絶たれた。この結果沿岸漂砂の供給不足により侵食域が北側へと広がりを示してきた。現在では従来安定していた北部にまで激しい侵食が迫っている。本研究では、深浅測量、空中写真撮影、波浪・海浜流および汀線の数値計算、侵食域の現地踏査などからなる総合調査を実施し、侵食実態を明らかにするとともに今後の対策について検討した。

2. 空中写真によるリーフ地形の判読

この海岸については 1991 年 8 月、1997 年 9 月および 2001 年 12 月に空中写真撮影が行われている。まずこれらの空中写真を比較し、Nusa Dua 海岸の海浜変形について調べた。

写真-1 (a) は 1991 年 8 月撮影の空中写真である。Nusa Dua 海岸の南側半分には幅約 500 m のリーフが発達しているが、中央部から北側では南部からほぼ直線状に延びてきたリーフエッジが直角に曲がり、リーフ幅が

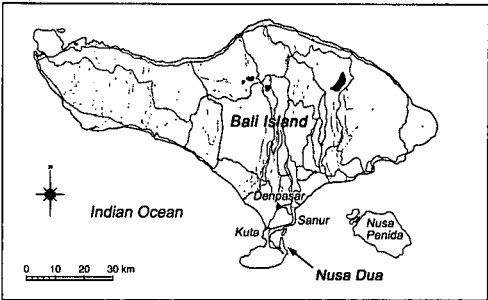
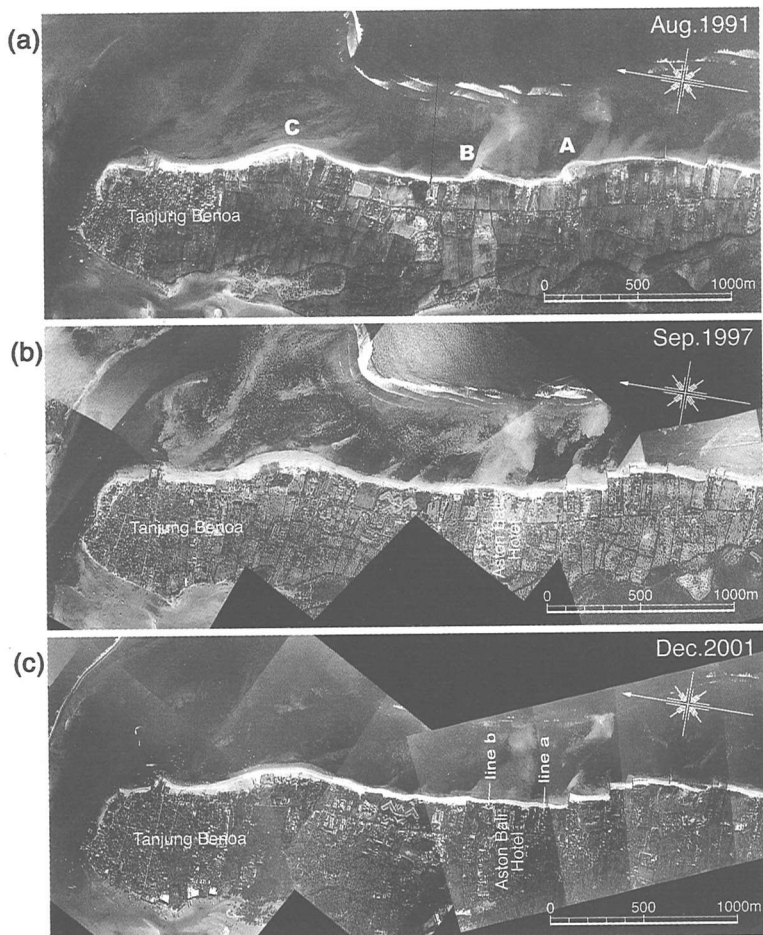


図-1 Bali 島 Nusa Dua 海岸の位置

急激に拡大している。リーフエッジ付近では白濁した碎波帯が数段観察される。1991 年当時、海岸線に沿って白い帯状の区域が延びていたが、これは砂浜を表している。海岸線は南部では東側に突出しているが、写真に示すように 2 基の突堤が建設されており、これによって海岸線が階段状となっている。Nusa Dua 海岸では全体として北上する方向の沿岸漂砂が卓越しているが、各種施設の建設によって南部からの漂砂供給量が大きく減少し、侵食域が次第に北側へと広がってきている。しかしながら 1991 年当時にはまだ突堤群の北側での侵食はそれほど顕在化していなかった。

一連の突堤群のうち、最北端の突堤の北約 500 m では汀線が半円形状に突き出ている（舌状砂州 A）。またそこから北約 500 m にも同様に汀線の突出（舌状砂州 B）が見られる。そして舌状砂州 B ではリーフエッジ付近に集積したサンゴ砂が斜め岸向きに運ばれ、汀線の突出部へと砂の一部が打ち上げられている状況が観察される。さらに舌状砂州 B の北約 1 km には舌状砂州 A、B と比較して規模の大きな舌状砂州 C が存在していた。これらの舌状砂州が一般の砂浜海岸に形成されていた場合、沖合に離岸堤などの消波構造物があるか、または沿岸砂州が存在する場合を除けば、波の作用下で直ちに直線状となるし、またそもそもこのような舌状砂州が形成されること自体その発生原理の説明がかなり難しい。一つの説明は、海岸線に対して波が大きく斜め入射するために、

* 正会員 工博 (財)土木研究所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
*** 海岸研究室(有)
**** 正会員 海岸研究室(有)



写真—1 Nusa Dua 海岸の空中写真 ((a): 1991年8月, (b): 1997年9月, (c): 2001年12月)

不安定原理に基づいて砂嘴群が発達するという説 (Ashuton ら, 2001) である。しかし写真—1 (a) に示すように Nusa Dua 海岸ではリーフエッジに対して 45° を超えるような大きな波向角は生じていないので、この考えに従うことは難しい。最も規模の大きい舌状砂州 C については、その沖合のリーフ地形と深い関係があると思われる。すなわち南部からリーフは直線状に延びてきているが、舌状砂州 C の沖合でリーフ幅が著しく拡大している。このことはリーフの消波効果がそこで著しいと考えられるので、ちょうど沖合に離岸堤が存在するのと同じ効果が発揮されたと考えられる。この点は実際の海底形状を与えた数値計算によって確認される。

細長い海岸線の最北端は Benoa 港へと繋がる水路に面している。この水路に面した部分では海岸線の方向がほぼ直角に曲がっている。この曲がり部分にも砂浜が存在していた。曲がり部分から 200 m 南には小規模な突堤状の施設があったが、そこでは砂が先端部を超えて流出していた。

写真—1 (b) は 1997 年 9 月の空中写真である。写真—1 (a) との比較により約 6 年間の海浜変形が明らかになる。南部では突堤の設置区域が北部へと広がり、全体で突堤の基数が 7 基に増加した。特に最北端とその南側に隣接する突堤は 1991 年当時舌状砂州 A があった場所に設置されたために、突堤の建設に伴って汀線が最大 70 m も後退した。後退後の汀線は突堤間で互いにほぼ平行な形状となっている。突堤間の汀線が階段状になっていることは汀線が局所的意味で波の入射角とほぼ直角となって安定していることを意味する。このことから逆に、リーフ地形が大きく変化しない限りにおいて、このような波の条件は昔から継続しているはずなので、この地点付近において観察された 1991 年当時見られた舌状砂州 A の形成は、写真—1 (b) に示す突堤間の階段状汀線の形成を促した波と同じ波が外力として与えて解明を進めても機構を明らかにすることは難しいと考えられる。一つの案として、1991 年に形成されていた舌状砂州 A, B では、舌状砂州のピーク位置付近で沖合から斜めに砂が運ばれ

ていると推定されるような模様が見られることがヒントになる。すなわち一定の波浪場のもとで舌状砂州 A, B ができたのではなく、ある特定地点において沖合からリーフ起源の砂が大量に供給されたことが舌状砂州 A, B の形成理由と推定される。これはあたかも直線状汀線に養浜において大量の土砂を供給して汀線が前進した場合の汀線変化に類似している。

一方、北部の舌状砂州 C については、砂が堆積してその規模が増大している。砂の堆積は舌状砂州の北側部分で著しい。このことは舌状砂州 C が安定的に存在するものであり、また北向きの沿岸漂砂が存在することを明らかに示している。詳細に観察すると、Benoa 港へ続く水路の手前では従来規模が小さかった突堤状の施設の規模が大きくなり、その上手側で帯状に砂浜が広がっている。このことから舌状砂州 C の規模が増大した主な理由は、海岸線北端にある突堤状施設の規模の増加によって沿岸漂砂の移動が阻止されたことが要因と推定される。突堤状の施設の規模が拡大し、これによって沿岸漂砂が阻止されたという推定は、この施設の北側の水路に面した部分で侵食が進んだこととよい対応を示している。

写真-1(c)は2001年12月の空中写真である。1997年と比較して南部での突堤群の状況にはあまり変化がなく、突堤群に挟まれた区域では階段状の汀線が形成されている。しかし突堤群の北側では全体に侵食傾向である。また撮影時のリーフ上水深が異なるので定量的には言えないが、1991年当時見られたリーフエッジから汀線方向へと向かう砂の供給を表す模様がほとんど見られなくなったことが注目される。リーフエッジからの砂の供給が大きく減少していると考えられるためである。

3. 現地踏査による Aston Bali Hotel 周辺の侵食実態

Aston Bali Hotel は、写真-1 (c) に示すように7基の突堤群の北約 300 m に位置する。Nusa Dua 海岸では北上する沿岸漂砂が卓越しているが、従来は南部からの沿岸漂砂の供給が十分であったためにこのホテル周辺の海浜は安定していた。しかし北上する沿岸漂砂の供給が枯渇状態に近づいた結果、侵食域から順に侵食対策として数多くの護岸、突堤、離岸堤が建設された。現在 Aston Bali Hotel の立地する付近も、従来は堆積傾向にあったが近年では侵食傾向に変化した。ここでは侵食の最も著しい区域として Aston Bali Hotel 周辺を選び、2000年8月31日と2001年10月16日の踏査結果の比較を行った。

写真-2は2000年8月31日撮影の Aston Bali Hotel 前面の前浜状況である。この時点でも侵食が進んでいたためすでに一部土嚢が設置されていたが、土嚢は海浜の

侵食とともに著しく散乱していた。その後同じ場所における2001年10月16日の現地踏査によれば、写真-3のように新たに突堤が建設され、その南側には大量の土嚢が設置されていた。これに加えて砂を盛り上げてようやく日光浴用のベッドを並べる空間が造られていた。土嚢は3層置かれており上面・下面の標高差は1.1 m あった。写真-4は突堤の裏側を撮影したものである。突堤南側の土嚢を積み上げた部分の高さと比較すると北側の海浜地盤高は約1.6 m 下がっていた。突堤の北側では、突堤の建設によって沿岸漂砂の移動が阻止されたために侵食が進んでいる。土嚢は突堤の近傍だけではなく、写真-5に示すようにかなり長い距離にわたって積まれている



写真-2 Aston Bali Hotel 前面の前浜状況 (2000年8月31日)



写真-3 侵食対策としての突堤と土嚢袋 (2001年10月16日)



写真-4 突堤裏側の侵食状況



写真-5 突堤下手側の侵食と土嚢による対策

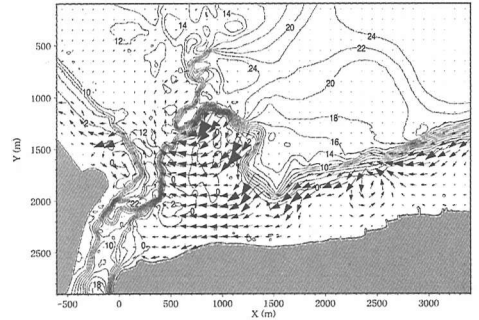


図-4 リーフ周辺の海浜流速・流向分布

た。しかし土嚢は中央部で大きく散乱しつつあった。浜崖の背後には平坦な地盤があり、その奥にはホテルの別のプールがあったが、プールと海浜とを分ける遊歩道の幅は約5mと狭く、浜崖侵食が進めば背後の利用施設付近まで容易に侵食される危険性が高いと判断された。

4. リーフ周辺における波浪・海浜流の数値計算

図-2は2001年測量による海底地形を与えて卓越波($H_0=1.7$ m, $T=16$ s)をSEから入射させた場合の屈折図である。沖に突出した浅瀬とその南側の深みの存在によって著しい屈折が起こり、舌状砂州C付近では波が分散し、その南側の汀線が凹状となっている場所では波の

集中が起きている。

図-3はリーフ周辺の波高分布である。リーフ上は浅海であるためにリーフエッジでの碎波減衰が起こり、その結果としてリーフフラットでは波高が低くなるが、屈折効果により沿岸方向に見て局所的に波高が相対的に高い場所も見られる。

図-4は海浜流の分布である。波の斜め入射によってリーフエッジを中心として全体として北向きの流れが誘起されている。流れの向きは写真-1(a)に示す舌状砂州C沖の砂面の模様とよく一致している。

5. 沿岸漂砂量の算定と等深線変化モデルによる検証

次に、汀線変化量の沿岸方向分布を算出するとともに縦断形変化データを加えて海浜土砂量の沿岸方向分布を計算し、これより沿岸漂砂量を算出した。また等深線変化モデルによる再現計算を行った。まず図-5は1997年を基準とした場合の2001年までの汀線変化量である。X=2,500 m以南では突堤群が設置されているため汀線の後退量は小さいが、Aston Bali Hotel付近での最大汀線後退量は約30 mであった。また舌状砂州Cの北側部分には集中的な堆積域があり、そこでの最大汀線前進量は約20 mである。

次に、Nusa Dua海岸で経年的に行われてきた海浜測量データのうち、Aston Bali Hotel付近で得られた2測線での断面データを図-6に示す。測線位置は、写真-1(c)に示すように北端の突堤の北にそれぞれ140 m, 440 m離れた測線a, bとする。図-6には測線a, bの縦断形

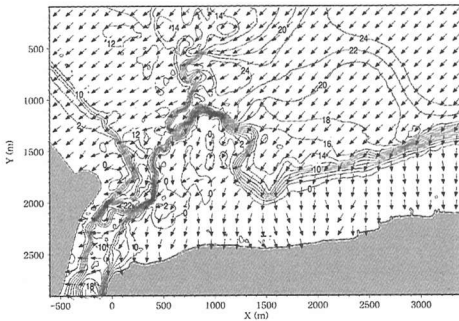


図-2 リーフ周辺の波向分布

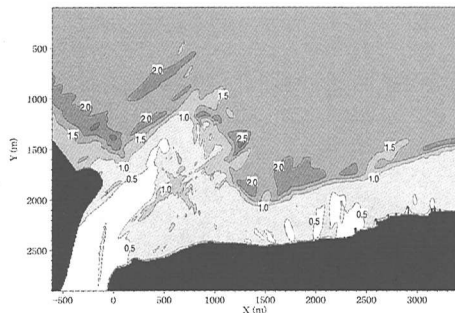


図-3 リーフ周辺の波高分布

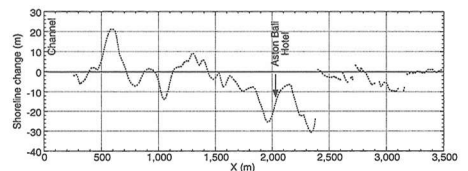


図-5 汀線変化量 (1997年～2001年)

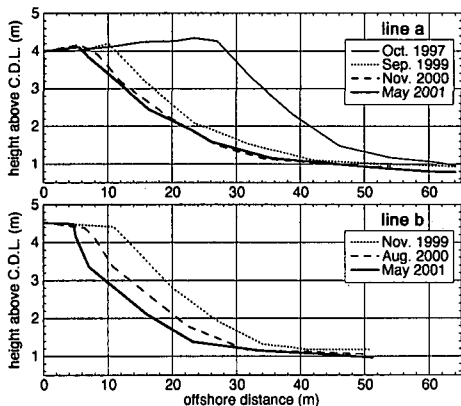


図-6 海浜断面形の変化 (line a および line b)

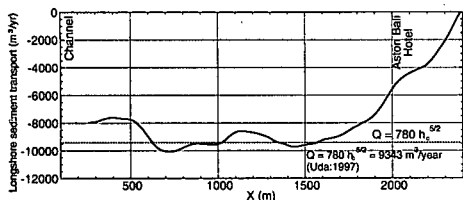


図-7 沿岸漂砂量の沿岸方向分布

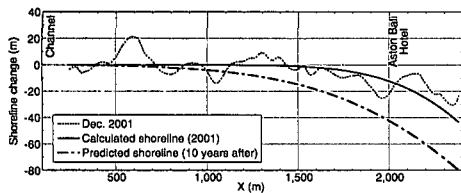


図-8 汀線変化の将来予測結果 (無対策の場合)

変化をまとめて示す。測線 a では 1997 年から測量が行われているが、侵食が進むとともに海浜断面は平行移動しつつ後退したことが分かる。また断面が後退する際、地形変化は 1 m から約 4 m の範囲で生じている。同様に測線 b では、1999 年以降のデータしかないが、測線 a と比較して近年の侵食が著しく、また地形変化は 1 m からほぼ 4.5 m の範囲で生じていることが分かる。

図-7 は 1997~2001 年の汀線変化量を沿岸方向に積分するとともに、深浅測量から得られた移動高を乗じて求めた沿岸漂砂量の沿岸方向分布である。海岸北部での平均沿岸漂砂は、宇多 (1997) の示した、波による地形変化の限界水深からの沿岸漂砂量の推定式による値とほ

ぼ一致し、約 $9,300 \text{ m}^3/\text{yr}$ であることが分かる。

図-8 は汀線変化の実測値との比較結果である。南端からの供給土砂量を 0 として計算を行ったが無対策ではこの後 10 年で激しく汀線の後退が進むことが分かる。

6. 考 察

一連の写真に明らかなように、Aston Bali Hotel 前面の海岸では侵食が進んできている。侵食原因はこの区域の南側に各種施設が建設され、沿岸漂砂の供給が不足するためである。侵食に対してホテルの管理者は当初土嚢を並べて侵食防止を図った。しかし侵食は止まらないことから、ホテルの前面に突堤を建設した。突堤は 2000 年 8 月以降に建設されたもので、いまだ十分長い時間は経過していない。それにもかかわらず突堤の建設後直ちにその北側で浜崖侵食が発生し、現在でも侵食区域は広がりを示している。突堤の下手側には現在のところ新たなコントロールポイントは存在しない。このため現況で放置すれば浜崖侵食はさらに進み、範囲が広がるとともに突堤付け根での汀線後退量も大きくなる。

この区域を現況のまま放置することができないことは自明であるが、侵食の著しい Aston Bali Hotel より北側では、海浜・海域を使った海洋性リクリエーション (バナナポート、パラセーリング、水中バイクなど) が盛んに行われており、これらの利用を考慮すると海岸線から直角方向に構造物が突き出る突堤や、海岸線と平行に設置される離岸堤などを設置することは不可能である。唯一可能性があるのは養浜である。しかも北向きの沿岸漂砂は最終的に Nusa Dua 海岸北部や Benoa 港内に堆積するので、そこからの浚渫土砂をリサイクルして利用する方法が考えられる。

結局、対策案としては、背後地および周辺においてできる限り海洋性リクリエーションの障害とならないようにしつつ突堤の建設が可能な場所を最小限 3 箇所選び、その上手側海岸で大量の養浜を行い、北側へ流出した土砂は維持工事として地元が行うという方向が採択された。突堤群を配置した条件下で養浜を行った場合の汀線変化は上述のモデルにより定量的な比較が行われた。

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, p. 442.
- Ashuton, A., A. B. Murray and O. Arnault (2001): Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves, *Nature*, 414, 296-300.