

リーフギャップ背後における三角形状砂州の形成と その周辺における流れ、汀線変化の機構

遠藤秀文* ・大中 晋** ・宇多高明***・大貫輝雄*
三波俊郎****・古池 鋼****・芹沢真澄*****

1. はじめに

多くのサンゴ礁海岸ではリーフの切れ目(リーフギャップ)が存在し, このリーフギャップを介してリーフ内外の海水交換が行われていることが, これまでの研究により明らかにされている(例えば, 谷本ら, 1988, 1989)。またリーフギャップ付近は, リーフ上の他の地点に比べてサンゴや魚介類の生育環境が良好であるとともに, 汀線に近い場所に位置するため, ダイビング等のマリンスポーツの貴重な場所となる。一方, リーフギャップでは沖への砂の流出が生ずる可能性が指摘されており(宇多ら, 1990), 近年問題となっているリーフ海岸での侵食問題に対し, リーフギャップ周辺の取り扱いには十分注意する必要がある。

バリ島南部に位置する Sanur 海岸では, 南側に大規模なリーフギャップが存在する。ここではリーフギャップの岸側に, 他のリーフギャップでは見られないような形状と規模を持った砂州が形成されているとともに, 通常の沿岸漂砂の卓越する海岸とは異なる汀線変化が見られる。バリ島では現在, リーフ上の海岸侵食が問題となっている。今後適切な保全対策を行っていく上でも, 外力変化やそれに伴う底質移動が顕著となるリーフギャップ周辺での地形変化特性を十分に理解しておく必要がある。

そこで, 本研究ではこれらの現象を報告するとともに, 砂州の形成および汀線変化と波, 流れの関係について, 深浅測量, 底質調査, 現地観察等による現地調査, 数値計算および空中写真判読により明らかにする。

2. 対象海岸の状況

(1) Sanur 海岸の状況

本研究の調査位置を図-1に示す。バリ島南部には, 世界的に有名なリゾート海岸として, Sanur, Nusa Dua, Kuta 海岸がある。これらのうち東側に位置する Sanur

海岸は, 沿岸方向の延長が約 6 km のリーフ海岸である。海岸のリーフフラット幅は, 北側では狭く, 南側に行くにしたがって広がるが, 平均的には 700 m 程度となっている。リーフフラット上の水深は 0.5~1 m 程度であり, 当地点の潮位変化は MSL \pm 1.3 m 程度であることから, 干潮時にはリーフフラットの大部分は干出する。リーフの沖側縁には, リーフフラットよりも 0.5~1 m ほど高いリーフエッジが存在する。ここでは, 急激な水深変化に伴う砕波が常に生じている。また, Sanur 海岸南側には大規模なリーフギャップが存在し, このリーフギャップを境に海岸線の曲率が大きく変化し, 北側では南北に, 南側では東西に延びる。

(2) リーフギャップ周辺の地形および利用状況

写真-1は, 1997年9月に撮影されたリーフギャップ周辺の空中写真である。汀線から沖合約500mよりリーフギャップが発達している。このリーフギャップは, バリ島南部のリーフ海岸の中でも最大規模で, ギャップ幅は広いところで1kmを越える規模を有する。ここでは屈折により波が両側に発散するため, 砕波は生じない。このため, リーフ外に行くレジャーボートの航路として利用されている。現在, リーフフラット上にはほとんどサンゴの生息は見られず, 大部分は海藻類に覆われている。しかし, リーフギャップ付近では現在も比較的良好なサンゴの群生が存在するため, ダイビングやシュノー

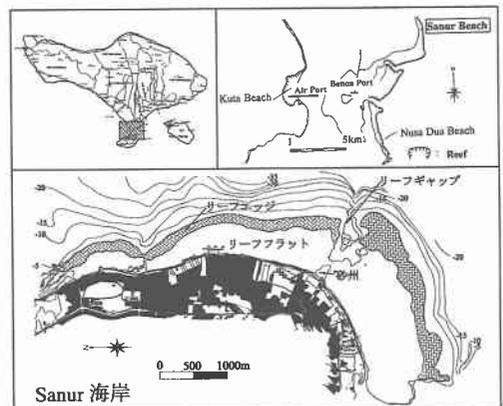


図-1 調査位置図挿入

* 正会員 日本工営協 国際事業部交通技術部
** 正会員 工修 (株)ドラムエンジニアリング
*** 正会員 工博 建設省土木研究所
**** 海岸研究室(有)
***** 正会員 同上

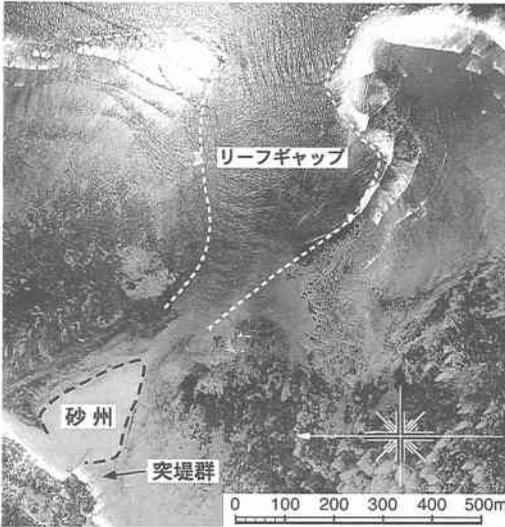


写真-1 リーフギャップ周辺の航空写真



写真-2 砂州岸側の汀線状況

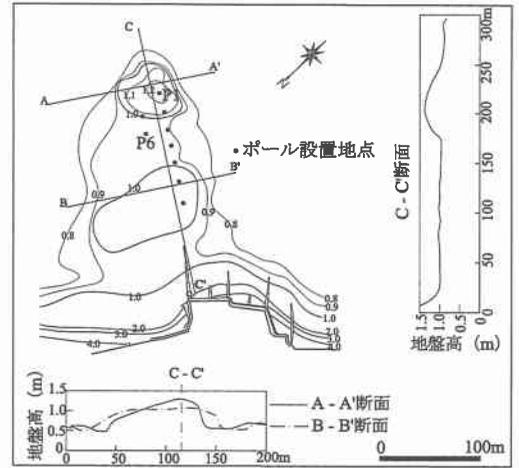


図-2 砂州平面図

(Syamsudin, 1993). 現在, 写真に見られるように, 突堤群の南北両側で, 汀線の後退が生じている。これは, 通常の高潮における一方の卓越沿岸漂砂の阻止に起因する現象とは異なる。このことは, 当地点が汀線付近における沿岸漂砂の分岐点となっている可能性があること, および侵食が起こる以前は, 当地点へ沖合からの連続的な漂砂供給があったことを意味する。

3. 砂州の形成について

砂州の形成には, リーフギャップ周辺での波, 流れが大きく影響していると考えられる。そこで, リーフギャップ周辺における流れの再現計算を行い, 砂州の形成機構について検討した。リーフ上の流れとしては, 高潮時にはリーフエッジでの砕波に伴う急激な波高変化により発達する海浜流が, 低潮時には潮位変化に伴うリーフ内外の水位差より生ずる流れが支配的となることが現地観察結果より得られている。このうち, リーフ内外の水位差より生じる流れについては, 水位差データ等, 十分な現地データが得られていないことから, ここでは海浜流計算により検討を行う。海浜流計算に用いる Radiation Stress の算出は, 放物型方程式 (磯部, 1986) を用いて行った。用いた入射波条件は, 過去に実施した現地波浪観測結果より, 荒天時の波浪条件として $H_1 = 1.3\text{ m}$, $T = 12\text{ s}$, 波向 ESE と設定した。また潮位については, HWL および MSL の 2 ケースで行った。MSL 時における波, 流れの計算結果を示したのが図-3, 4 である。図-3 は波の場の計算結果より得られる波向分布を, 図-4 はそのときの海浜流の結果を示す。図-3 より, リーフギャップでの屈折により波が外側に発散していく状況, また砂州付近では, 浅瀬の存在により逆に波が取れんする様子が見られる。このような状況は, 高潮時に

ケリングの絶好のポイントとなっている。

リーフギャップの岸側には, 図-2 に示すように幅約 150 m, 長さ約 250 m の三角形の砂州が形成されている。バリ島南部の海岸には, 当地点以外にもいくつかのリーフギャップが存在するが, このようにリーフギャップ岸側に砂の堆積域が存在するのは当地点のみである。砂州の地盤高は, 周辺のリーフフラットよりも 1 m ほど高くなっており, 南側ほど, また先端部にいくほど高い。砂州上の底質は, 汀線付近と同様, 平均粒径 0.4~1 mm 程度の比較的粒径の大きい淡茶色のサンゴ砂で構成されている。ここは干潮時には完全に干出するため, 砂州上には多くの日光浴客が集まってくる。このように, リーフギャップから背後の砂州周辺にかけては, 生態系および観光利用の両面において, 非常に重要な地点であるといえる。

次に, 砂州岸側の汀線状況を写真-2 に示す。ここでは 1987 年に長さ 50 m 程度の突堤が 4 基建設されている

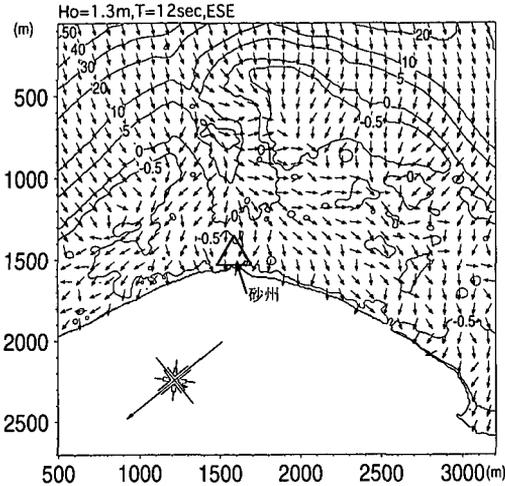


図-3 波向分布 (MSL時)

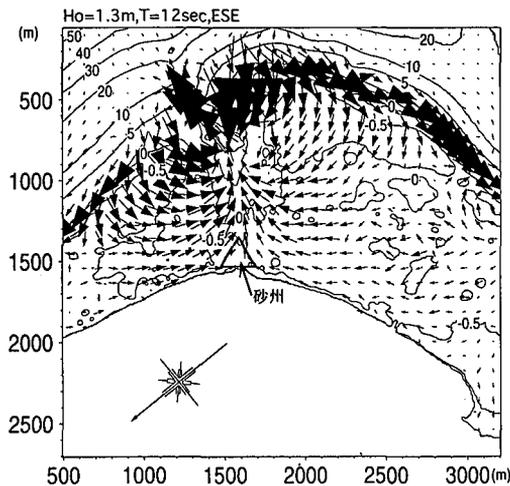


図-4 海浜流分布 (MSL時)

現地でも観察された結果と一致する。次に、図-4の流れの計算結果より、リーフエッジからリーフギャップに向かう一対の循環流が生じている様子がわかる。ここで三角形砂州が形成されている場所は、両側のリーフラット上から流れが集まる場所の付け根付近に相当している。これより、この三角形砂州は、リーフエッジからの岸向きの流れにより運び込まれたサンゴ砂が、リーフギャップの存在による循環流の岸向き成分によりさらに岸側に運ばれ、それが両側から集まる流れの会合点付近に堆積して形成されたといえる。なお、H.W.L.時の結果についても、M.W.L.時と同様の傾向が見られたが、水深が深い分、屈折や流れの流速が緩やかとなる傾向が見られた。

低潮時に生ずるリーフ内外水位差に伴う流れについて

は、海浜流計算結果に見られるようなリーフエッジでの岸向き成分は存在しないが、リーフギャップ付近で生ずる沖向き成分については、定性的には本計算結果と同様の傾向になると考えられる。

4. 汀線変化について

砂州岸側における汀線変化状況について示す。写真-3は、1982年から97年までの16年間におけるSanur海岸南部の空中写真を示したものである。ここで上段は突堤建設前の1982年、中段は突堤建設4年後の1991年、下段は1997年の状況を示す。また図-5は、これらの空中写真から判読した汀線変化を示したものである。これより、突堤群建設後、突堤群の両側で汀線が急激に後退したことが分かる。汀線後退量は、1991年時点で、北側突堤の北側で30m程度、南側突堤の南側で40m程度である。ただしその後の1991年から97年にかけては、多少の汀線の後退は生じているものの、それ以前に比べて後退量は少ない。当地点周辺の沿岸漂砂の卓越方向は、突堤群南側では砂嘴が南に発達していることから南向きであることが明らかである。一方突堤北側では、既設の突堤に対する汀線状況より、北向きの沿岸漂砂の存在が確認される。これらは、リーフギャップを境にリーフ地形が大きく湾曲し、北側では南北に、南側では東西に延びるため、波がリーフエッジに対して北側では斜め右前方から、南側では斜め左前方から入射することに起因すると考えられる。これらの状況、および突堤両側で汀線が後退していることから、当地点が沿岸漂砂の分岐点となっていると考えられる。また、汀線付近の底質移動は、常時生じているわけではなく、干満差が大きく、しかも高潮時にのみ生ずることが現地での観察より確認された。これは、汀線前浜部ではある程度十分な水深が確保されないと、リーフ外からの入射波はリーフラットを伝搬する間に十分減衰してしまい、汀線付近にまで到達できないためである。リーフ上の水深が十分となる潮位時においては、リーフエッジで碎波し、リーフラット上の一定水深部を伝搬した波は、汀線前浜斜面上で再び2次碎波する。これにより、汀線付近の底質が巻き上げられ、碎波角方向に移動する。汀線付近の波の入射方向は、現地観察結果より得られる砂連の方向より推定できる。図-6は、現地観察結果より得られた砂州周辺の砂連の方向を模式的に示したものである。これより、砂州の浅瀬沖側では屈折により内側に向いているものが、焦点より岸側では両外側に広がっていく様子が見られる。これより、両突堤外側に波が広がり、それにより突堤両外側で汀線が後退したと考えられる。ただし、図-2に示す数値計算結果からは、砂連の向きから判読される汀線付近での局所的な波向変化について、十分に再現することはできない

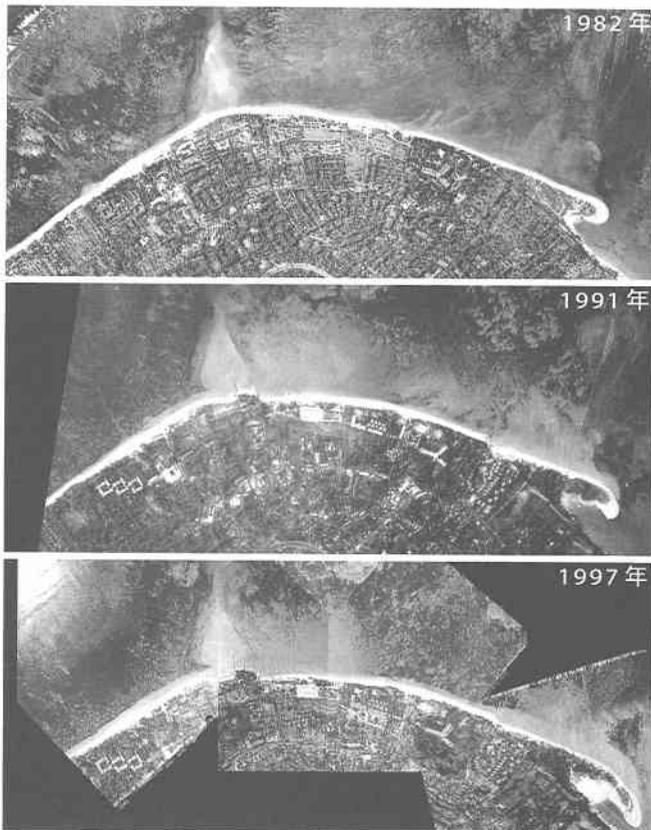


写真-3 航空写真による汀線変化

かった。

つぎに南端部の砂嘴について着目すると、年とともに徐々に発達していく様子が見られる。ちなみに1972年当時の空中写真からは、当地点付近では周辺に比べて浜幅が広がっていたものの、このような砂嘴は形成されていなかった。Sanur 海岸の侵食は、1970年頃から始まったとされている (Syamsudin, 1993)。その原因として、1960年頃から行われたリーフ上での Coral Mining (サンゴ採掘) による漂砂源の減少および波、流れの外力場が変化したことを挙げている (山下ら, 1996)。砂嘴の生成時期は、この Coral mining が行われた時期と対応している。これより砂嘴の形成は、Coral Mining による水深の増加により、汀線付近の南向きの沿岸漂砂移動を引き起こす波、流れの作用が増大したことによると考えられる。リーフギャップ背後の汀線においても、これに加えて、サンゴの激減により以前に比べて沖からの汀線付近への砂の供給が減少したことより、漂砂の分岐点付近で侵食が始まり、さらに突堤群の建設により、両側への連続的な土砂移動が阻止されたために侵食が助長されたと考えられる。

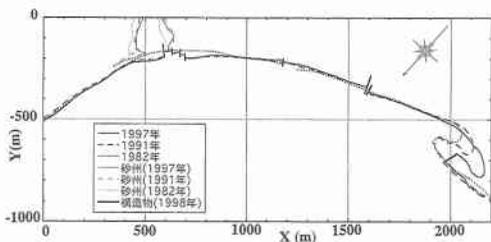


図-5 汀線変化図

5. 潮位変化と砂州および汀線変化の関係

以上示したように、リーフギャップ岸側の砂州の形成や汀線変化は、潮位条件と密接に関連していることがわかった。しかし、潮位変化と砂州の形成過程、汀線への砂の供給と砂州との関係については不明である。そこで、大潮時および小潮時を含む約3週間にわたり、日々干潮時に砂州および汀線の観察を行い、定点からの写真撮影および砂州の地盤高および砂州幅の測定を行った。測定は、図-2に示すように、砂州上の計9地点にポールを埋め込み、地盤高変化およびポールから砂州外縁までの距離を測定することにより行った。写真-4は、小潮時(H.W.L.+1.9m) および大潮時(H.W.L.+2.5m) に撮影された砂州中央部付近(図-6参照)での写真である。これより、小潮時には砂州表面はほとんど起伏もなくなってきたものが、大潮時には顕著な砂漣が形成されている。そこで、砂州上の代表的な2地点において、潮位と砂漣高の経日変化を示したが図-7である。ここで潮位については、日々のH.W.L.を示す。先端部のP1地点では、常に砂漣は形成されていない。これは、P1地点では水深が浅いために、潮位条件に係わらず常にシー

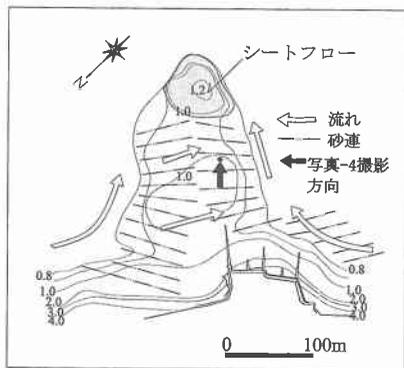
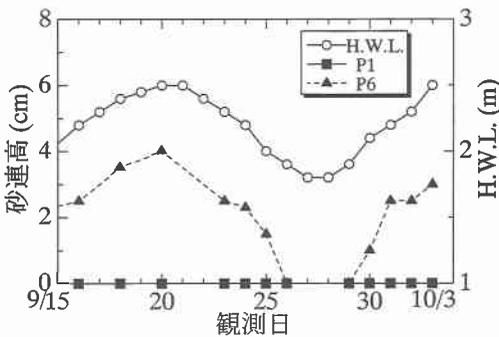


図-6 砂州周辺の砂運および流れの模式図



写真—4 大潮、小潮時の砂州中央部付近の状況



図—7 潮位と砂連の経日変化

トフロー状態にあるためと考えられる。写真撮影地点に近い P6 地点では、砂連高と潮位変化はほぼ対応しており、潮位が高いほど砂連高も高くなっている。このような変化は、潮位変化に伴い波と流れの相対強さが変化するためと考えられる。すなわち、大潮満潮時には流れよりも波の作用の方が相対的に大きくなる一方、小潮時にはリーフ上での波高は小さく、リーフ内外水位差に伴うリーフギャップに向かう流れの影響が相対的に大きくなるため、波の作用により形成された砂連は消滅する。また写真—4で、小潮時ではサンゴ塊北側(写真左側)に窪みが存在する。このことより、砂州上では全体的に南向向に向かう流れが卓越し、これにより底質も南側に移動

していることが確認できる。なおこのような南向きの流れは、図—3に示す流れの計算結果でも再現されている。これに対し、大潮時にはこのような窪みはほとんど消滅している。これは、流れによる南側への移動よりも、波による岸沖方向移動が顕著となるためと考えられる。また砂州の地盤高変化より、大潮時には砂州先端付近で低くなり、岸側中央部付近で高くなる。一方小潮時には逆に砂州中央部で低くなり、先端部南側で高くなる傾向が見られた。これらの結果より、砂州両縁でのリーフギャップに向かう流れ、および砂州上での南向きの流れにより、砂州上の底質は北側から南側に押されながら、岸から沖に移動する。一方、大潮満潮時のように波の作用が大きくなるときは、砂州上の砂は岸側に移動し、その際一部が汀線付近まで到達し、これが沿岸漂砂に対する供給源になると考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) Sanur 海岸のリーフギャップ岸側では、三角形の砂州が形成されているが、この砂州はリーフギャップに向かう流れの作用により形成された。
- 2) 三角形砂州の形成と変化は平均潮位以下の条件で、汀線変化は主として満潮時に起こることが明らかとなった。
- 3) 近年 Coral Mining や環境悪化に伴うサンゴ砂の供給量の減少と漂砂に対する外力の増加により、汀線付近での侵食や南端の砂嘴の形成が起きたと考えられる。

参考文献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 宇多高明・谷本修志・坂野 章・高木利光 (1990): リーフ上およびリーフギャップ周辺におけるサンゴ片の移動機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 215-219.
- 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.
- 谷本修志・宇多高明・桜本 弘 (1989): パ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.
- 山下隆男・西平守孝・土屋義人・スワンディー (1996): サンゴの移植によるパ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, pp. 1281-1285.
- Syamsudin, A. R. (1993): Beach Erosion in Coral Reef Beaches and Its Control, Dr. Eng. Thesis, Kyoto Univ. 225 p.