

バリ島 Nusa Dua 海岸における リーフギャップ周辺の波・流れの観測

大 中 晋* ・ 宇 多 高 明** ・ 大 貫 輝 雄***
遠 藤 秀 文*** ・ 芹 沢 真 澄**** ・ 三 波 俊 郎*****

1. はじめに

近年、熱帯圏諸国では開発に伴ってリーフの人為的改変が進んでおり、これに起因してリーフ海岸での侵食や環境問題が顕在化しつつある。リーフ上の波浪変形や地形変化特性については、リーフが二次元的な場合については現象の理解が進んでいる（例えば高山ら, 1977；津嘉山ら, 1995）。しかし、リーフでは沿岸方向に必ずリーフギャップがあり、そこでは波浪・流れが複雑に変化するとともに、底質移動も顕著となることが実験的に明らかとなっている（宇多ら, 1990）。しかし、現地におけるリーフギャップ周辺での波、流れ、さらには底質移動の機構について調べた事例はごくわずかであり（例えば谷本ら, 1989；遠藤ら, 1999）、未だ不明な点が多く残されている。そこで本研究では、バリ島の代表的なリーフ海岸である Nusa Dua 海岸を観測対象として、リーフギャップ周辺に着目し、リーフ上での海水循環機構の解明、およびこれらがリーフ上の底質移動や生態系に及ぼす影響について検討した。

2. 調査内容

(1) Nusa Dua 海岸の状況

本研究の調査地点を図-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、Kuta, Sanur, Nusa Dua 海岸が存在する。このうち、Nusa Dua 海岸は、南部の Bukit 半島の東側に位置する沿岸方向約 4 km の海岸である。当海岸では、幅 500～700 m の礁原（リーフフラット）が広がっている。リーフ上の平均水深は M.S.L. -1 m、潮位変化は M.S.L. ±1.3 m であり、干潮時にはリーフ上の大部分は干出する。また、リーフ沖側にはリーフフラットよりも 0.5～1 m 高いリーフエッジが存在し、外洋からの入射波の第 1 砕波がここで起こる。砕波した波は、ほぼ MSL 以上の潮位条件の場合には、リーフ内に進入するが、それ以下の場合には、ほとんど進入せ

ず、リーフ上は非常に静穏となる。当海岸の地形的特徴として、南側に陸続きとなった 2 つの島が存在すること、およびこの 2 つの島の南側約 400 m 地点、および北側約

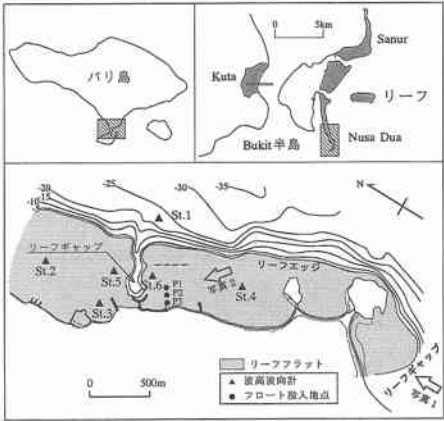


図-1 調査位置図



写真-1 Nusa Dua 海岸南側の状況



写真-2 Nusa Dua 海岸北側の状況

* 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
*** 正会員 日本工営 国際事業部港湾空港部
**** 正会員 海岸研究室(有)
***** 正会員 海岸研究室(有)

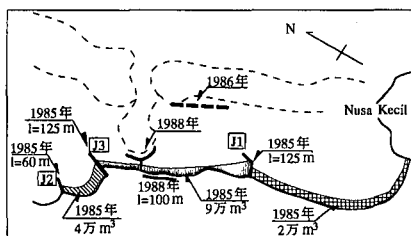


図-2 リーフギャップ周辺での構造物建設の経緯

1.2 km 地点に、それぞれリーフギャップが存在することである。また写真-1 に示すように、2つの島の南側では十分な浜幅をもつ砂浜が存在するのに対し、北側では現在深刻な侵食状況にあり、その防止対策として、いくつかの海岸構造物が建設されている(写真-2)。図-2は、北側リーフギャップ周辺における海岸構造物建設の経緯を示したものである(Syamsudin, 1993)。当海岸では、1980年代からリゾート開発に伴うホテルの建設が始まり、それとともに、汀線部での侵食が始まった。当初、Nusa Kecil 北側部で侵食が生じたため、1985年に突堤(J1)が建設された。しかしその後、今度は J1 突堤北側で侵食が始まった。このため、約 15 万 m^3 におよぶ養浜を行ったが、その後も侵食は止まらなかったため、1986年にリーフ上に4基の離岸堤が建設された。さらに1988年にはリーフギャップからの砂の流出防止を目的としたU字型突堤、さらに南側の100 m間で直立護岸が建設された。このような対策にもかかわらず、海岸状況はさらに悪化し、現在護岸前面では現在まったく前浜が存在せず、背後のホテルの観光客は、わずかに存在するU字型突堤～J3突堤間の浜辺で、日光浴やシュノーケリング等のマリッジングを行っている状況である。

(2) 現地調査

現地調査は大きく2回に分けて実施した。第1回目は1991年12月～1992年5月にかけて、リーフ沖側での入射波浪調査、および1992年5月に実施したリーフ上の波と流れの特性の把握を目的とした定点波高流速調査である。図-1に示すように、波高流速計をリーフ沖側の水深20 m付近に1台、リーフ上に5台設置し、波高と流速の計測を行った。第2回目は1997年8月から約半年間にわたり、リーフ内外の深浅測量とともに、フロートによる流況観測、底質調査、および数回にわたる現地踏査によるリーフ上の底質移動および生態状況調査、コードラートおよび潜水調査によるサンゴおよび海藻生息状況調査、等を実施した。またこれと合わせて、波と海浜流の数値計算、および新旧の空中写真判読を行った。

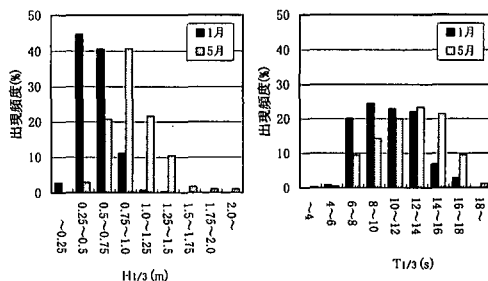


図-3 波高、周期の出現頻度 (St. 1)

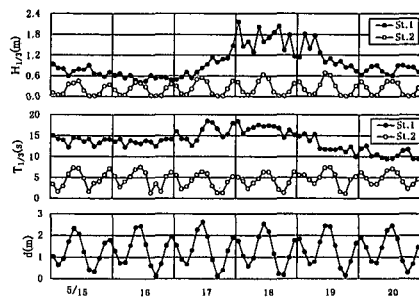


図-4 リーフ内外の波高、周期、潮位変化

3. 調査結果

(1) リーフ沖側入射波浪特性

バリ島は熱帯モンスーンに属し、12～3月にかけては雨季となり西風が、また5月～10月にかけては乾季となり東から南東風が卓越する。これに伴い沖波特性としては、雨季においては南西の波向が、また乾季では南東の波向が支配的となる。図-3は、雨季の1月および乾季の5月のそれぞれ1ヶ月間における、リーフ沖側での入射波高、周期の頻度分布を示したものである。これより、乾季に属する5月は、雨季に属する1月に比べて、高波浪、長周期の波の出現頻度が多くなっている。なお、それぞれの1ヶ月間における平均的な波高、周期は、1月では $H_{1/3}=0.53$ m, $T_{1/3}=10.5$ s, 5月では $H_{1/3}=0.95$ m, $T_{1/3}=12.2$ sである。

(2) リーフ上の波浪特性

リーフ上の波高は、リーフ外での入射波浪諸元の違いに関わらず、ほぼリーフ上の水深で規定され、またリーフエッジからの距離に応じて波浪減衰が生じることが、これまでの研究からも明らかとなっている。図-4は、リーフ内外の波高、周期、潮位の経時変化を示したものである。港内の波高は潮位変化に応じて増減しており、満潮時に最も波高が高くなる。またリーフ外の入射波高が大きいほど満潮時の波高も大きくなる傾向が見られる。周期についても、リーフエッジにおける碎波による波の分裂により、リーフ内ではリーフ外に比べて短く

なっているととも、潮位変化に応じて増減し、潮位が高いほど周期も長くなる傾向が見られる。

(3) リーフ上の流れについて

従来、リーフ上の流れとしては、リーフエッジでの碎波に伴う急激な波高変化により発達する海浜流成分のみで議論されることが多かった。図-5は、リーフギャップ北側の St. 5 および南側の St. 6 で観測された平均流速と入射波高の関係を示したものである。これより St. 5 の結果は、波高の増加に比例して平均流速も増加していることから、この地点では従来と同様、波浪起源の海浜流成分が卓越しているといえる。つぎに、波による Radiation Stress を起因力として得られる海浜流の数値計算結果と、リーフギャップ周辺の空中写真を合成して示したものが図-6 である。これより、St. 5 における計算結果は、流向、流速ともほぼ実測結果を再現している。一方、リーフギャップ南側の St. 6 では、St. 5 に比べてはるかに大きな流速が生じており、また入射波高との相関もあまり見られない。図-6 の数値計算結果においても、リーフギャップ南側では、北側に比べて流速はむしろ小さくなっており、図-5 で示す顕著な流速は再現されていない。これより、St. 6 で生じている流れは、海浜流とは異なる流れであると考えられる。図-7 は、St. 1 における入射波高、潮位変化、St. 6 および St. 5 における流速の経時変化を示したものである。これより、St. 6 では潮位変化に伴い流速も大きく変動し、しかも顕著な流れは、高潮時よりもむしろ低潮時に生じている。そこで、潮位変化との関係で整理し直したものが図-8 である。これより、潮位との明らかな相関関係が見られ、潮位が低いほど顕著な流速が生じていることが分かる。このような流れは、海浜流とは別に、潮位変化に伴うリーフ内外の水位差により、リーフ上の海水がリーフギャップからリーフ外へ集中的に排出されるために生ずる流れと考えられる。つぎに、顕著な流速が観測されたリーフギャップ南側での平面流況と潮位との関係を調べるために、フロートによる流況調査を実施した。調査は高潮時 (HWL+2.5 m) の満潮時刻前後に、図-1 に示す 3 地点でフロートを同時に投入し、これを追跡することにより行った。その結果を示したものが図-9 である。なお図中の x は、汀線からの離岸距離を示している。3 地点いずれもリーフギャップに向かう北向き流れとなり、満潮時に最も流速は小さくなり、その前後の上げ潮時および引き潮時に流速が大きくなるといった、定点波高流速観測結果と同様の傾向が観察された。また流速値は、岸に近づくほど減少する傾向が見られた。これは、岸に近づくほどリーフギャップに向かう流れが、U 字突堤により阻止されるためと考えられる。

このように、リーフ上ではリーフエッジでの強制碎波

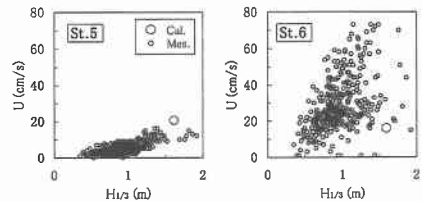


図-5 入射波高と平均流速の関係

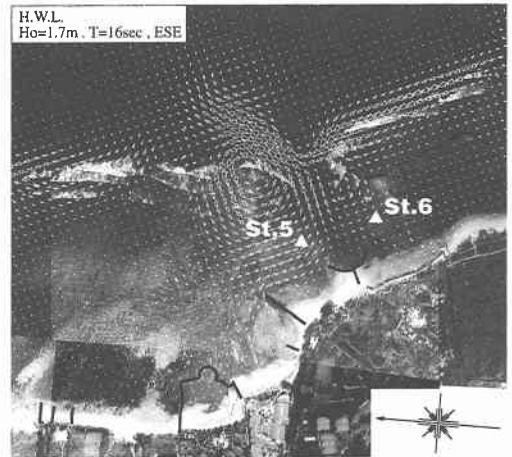


図-6 海浜流の数値計算結果

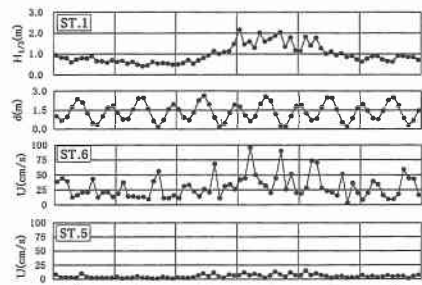


図-7 入射波高、潮位、平均流速の経時変化

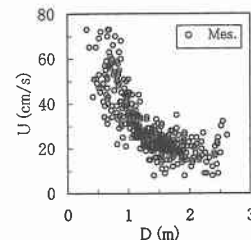


図-8 潮位変化と平均流速の関係 (St. 6)

に伴う急激な波高変化により生ずる海浜流が卓越する地点と、リーフ内外の潮位変化に伴う水位差より生じる流れが卓越する地点があることがわかった。さらにリーフ

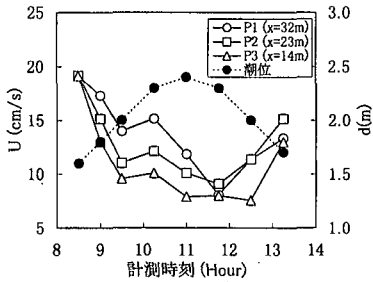


図-9 フロート流況調査結果

ギャップ近傍では、後者の流れが卓越するとともに、その流れは海浜流成分に比べて格段に大きいことがわかった。

(4) リーフ上の生態系の変化

つぎに、新旧の空中写真判読および現地踏査による底質および生態状況調査より、海岸構造物建設等の人為的作用が、リーフ上の海水循環および生態系に及ぼす影響について調べた。図-10は、空中写真から判読される1982年、1992年および1997年における、リーフ上の状況変化を示したものである(木庭, 1995)。ホテル建設や海岸構造物の建設がほとんど行われていなかった1982年当時では、リーフフラット上には砂層域とともに、低密度海草域が広がっていた。ちなみにこのような状況は、現在人為的作用が加わっていないリーフでよく見られる状況である。これが、構造物建設から5～6年ほど経過した1992年には海草域が拡大している。特に離岸堤背後およびNusa Kecil北側の汀線付近では、海草密度が低密度から高密度へと変化している。さらに5年後の1997年になると、リーフ上の大部分は高密度の海草域となっている。図-11は、1997年に実施したコードラートおよび潜水調査により得られた、リーフスロープからリーフフラットに至るリーフ縦断方向のサンゴおよび海草藻類の生息状況を示したものである。ここで縦軸はそれらの密度に相当する値を示す。リーフフラット上では海草類(アマモ類)が大部分を占め、これがリーフエッジからリーフスロープにかけて急激に減少し、代わりに海藻類(主に紅藻類)の割合が多くなる。なお、汀線付近の砂の主要な供給源の1つである有孔虫は、この紅藻類に多量に付着している。またリーフフラットからリーフエッジにかけては生きたサンゴの生息はほとんど見られないが、リーフスロープでは比較的良好な生息状況が確認された。海藻生育要因としては、水深、水中光量、砂面変動、水温、流れ等の物理的要因、および塩分、COD、栄養塩類等の化学的要因が挙げられる。このうち、当海岸で考えられる要因としては、

① サンゴの採掘に伴うリーフフラット上の平均水深の増加により、干出する範囲が減り、海草が生育しや

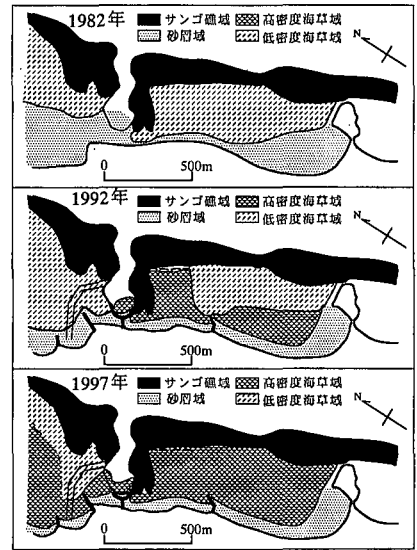


図-10 リーフ面の経年変化

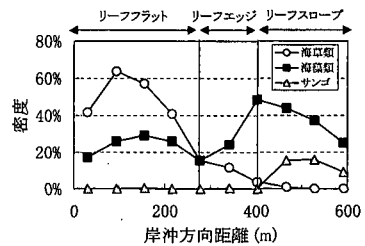


図-11 リーフ縦断方向の生息状況

すくなったこと。

- ② 離岸堤等の海岸構造物の建設による背後での海水の滞留により、流速ならびに底質に対する掃流力が、海草類が着底する程度まで減少したこと。
 - ③ 背後地のリゾート開発に伴い、生活排水がリーフ上に排出された結果、水質の富栄養化を招いたこと。
- が挙げられる。山下ら(1996)によると、Nusa Kecil北側の汀線付近でサンゴの採掘が行われていたことが示されている。またこの周辺におけるリーフエッジは、北側のリーフギャップ周辺のリーフエッジに比べて地盤高が高く、汀線付近で海水は、より滞留しやすい状況にある。これより、Nusa Kecil北測での海草類の増加は、外力変化を引き起こすような構造物も見られないことから、①および③が原因と考えられる。一方、離岸堤背後での海草類の増加は、明らかに②が原因であると考えられる。

なお、このような海草類の増加により、海草生育域内での捕砂機能が高まる反面、リーフエッジから岸側への底質移動は妨げられ、その結果、汀線への砂の供給量が低下することも考えられる。



写真-3 離岸堤沖側のサンゴ塊堆状状況



写真-4 離岸堤岸側の帯状模様

(5) リーフギャップ周辺の底質移動

当海岸では、既設構造物に対する沿岸方向汀線変化より、南東からの入射波による北向きの漂砂移動が見られる。また、リーフ海岸が通常の砂浜海岸と大きく異なる点は、漂砂の供給源として、このような沿岸漂砂による領域内への流入とともに、リーフエッジでの碎波に伴う岸向漂砂による流入が卓越することである(宇多ら1990)。このことは、浜を構成する底質組成として、サンゴ塊や貝殻類とともに、リーフエッジ付近の海藻類に付着している新鮮な有孔虫成分が多数含まれていることから立証される。写真-3は、離岸堤沖側の様子を示したものであるが、沖側から運ばれてきたと思われるサンゴ塊が、離岸堤により阻止され、離岸堤前面側に堆積している様子が分かる。また写真-4はリーフギャップ周辺の斜め空中写真を示したものであるが、離岸堤端部から岸側に帯状に堆積物が伸びている様子が示されている。これは波の作用により剝離した離岸堤構成材が、岸側に移動している様子を示している。なお帯状の模様は、リーフギャップに近いほど波の作用が強いため顕著となっている。以上より、離岸堤をリーフ上に広範囲に設置することは、汀線付近の砂の主要な供給源と考えられるリーフエッジから岸向きへの底質移動を妨げ、汀線への砂の供給を低下させる恐れがあることがわかった。

つぎに、リーフギャップ内における潜水調査結果より、リーフギャップ内には他のリーフ外の底面に比べて層厚の大きい堆砂域が存在することがわかった。遠藤ら

(1999)に示す、バリ島 Sanur 海岸でのリーフギャップ内では、明らかにリーフ上と同じ組成、色調の底質が存在していることが確認された。一方当地点のリーフギャップ内の底質は、リーフ上の底質に比べて色調は白っぽく、また汀線付近の砂に多数含まれる有孔虫成分は少なく、粒径の細かいものであった。これより、少なくとも近年においては、汀線付近に設置された U 字型突堤により、リーフ上からリーフギャップ内に落ち込む砂は低減していると考えられる。

4. 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 リーフ上では波浪起源の海浜流とともに、リーフギャップ周辺では、潮位が低い条件下においてリーフ内外の水位差により生ずる強い流れが生ずることがわかった。

② リーフ上では、海岸構造物設置による海水循環の変化に伴う流れや底質移動の非活発化、および開発に伴う水質悪化や富栄養化により、リーフ上での生態系や底質移動機構に大きな変化が生じることがわかった。

③ リーフ上の底質移動は、汀線付近での沿岸方向移動とともに、リーフエッジから供給されるサンゴ塊、有孔虫成分の岸向き移動が複合したものであることが現地でも確認された。これより、リーフフラット上で広範囲に離岸堤を設置することは、そのような岸向き底質移動を阻止する恐れがあることがわかった。

参考文献

- 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.
- 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 (1999): リーフギャップ背後における三角形砂州の形成とその周辺における流れ, 汀線変化の機構, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 531-535.
- 木庭元晴 (1995): インドネシアバリ島南部, 現成サンゴ礁海岸の海岸人工構造物の設置と採砂行為による砂分布の改変の空中写真判読法による研究, エコテクノロジー研究報告書.
- 高山知司・神山 豊・菊地 治 (1977): リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No. 278, 32 p.
- 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.
- 津嘉山正光・河野二夫・仲座栄三・大城真一・福田孝晴 (1995): リーフ上の波の変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 176-180.
- 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バ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 University, 225 p.