

バリ島のリーフ周りの波、流れ、地形変化の観測

谷本修志*・宇多高明**・桜本 弘***

1. まえがき

近年、侵食あるいは越波防止対策として天然リーフの消波機能を取り入れた人工リーフが各地で建設されるようになった（浜口ほか, 1988）。また、水理模型実験による検討（宇多ほか, 1987; 宇多・小俣, 1987）も進められ、人工リーフの機能性はかなり明らかにされつつある。人工リーフの設計においては、水理実験による検討もさることながら、自然に形成された天然リーフの機能について十分理解することが必要とされる。このような視点より筆者らは、沖縄県を中心とする亜熱帯地方に発達しているサンゴ礁を選び、天然リーフ海岸の持つ諸特性についての調査・研究（谷本ほか, 1988）を進めてきた。しかしこれらの調査では波、流れの特性把握に主眼があり、天然リーフ海岸における海浜変形に関する検討は行われていない。実際にはリーフを有する海岸において海浜変形が問題になる事例もかなり多い。リーフ海岸の侵食問題を取り扱う場合、前出の諸研究においても指摘されているように、まず砂浜前面に存在するリーフ地形に支配される波浪や流れ等の外力の把握が必要である。本研究では、上記観点から現地観測及び水理模型実験により、波浪減衰、水位変化、海水流動等を調べ、それらに起因する海浜変形について研究を進めた。

なお、本研究は国際協力事業団によるインドネシア共和国バリ海岸緊急保全計画調査の一部分を成すもので、筆者らは作業管理委員あるいは調査団員としてこの調査に参加した（本件の報告書は国際協力事業団からインドネシア共和国政府に1989年3月に提出された）。

2. リーフ上の波と流れの特性

調査対象域は図-1に示したバリ島南部の Kuta, Nusa Dua 及び Sanur の3海岸である。当海岸へはインド洋からの入射波が卓越するが、南端に突出した半島状の岬や海底地形によって対象海岸への入射波は屈折・回折効果を受ける。また、沖合の深海部から急勾配で浅

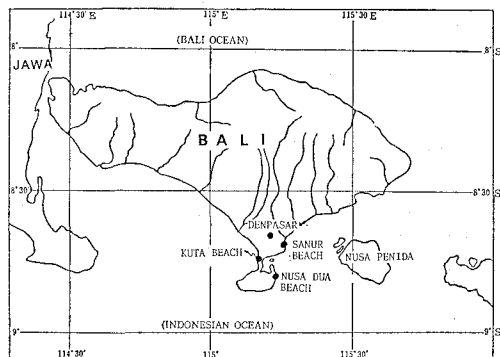


図-1 バリ島海岸の調査位置図

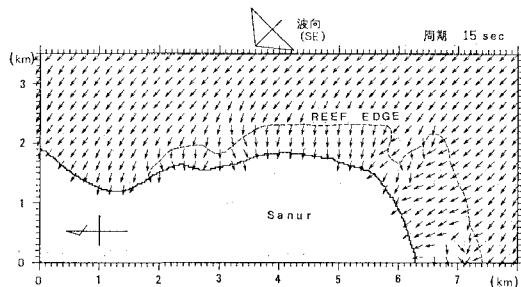


図-2 Sanur 海岸の屈折図の一例

海化し、幅広い平坦なリーフ礁原の広がるリーフ海岸への波の伝播は、そのリーフエッジ部で急激に波向を変化させることが特徴的である（図-2）。砂浜上に人工構造物の見られなかった1970年代の砂浜状況を撮影した航空写真（写真-1）からも、リーフエッジで著しく屈折した波が汀線にほぼ直角に入射していることが理解できる。リーフで囲まれた砂浜の汀線は曲線状であるが、これはリーフエッジで屈折した波向に対応している。

Kuta 海岸及び Nusa Dua 海岸において、リーフ沖合とリーフ上に水圧式波高計を設置し同時観測を実施した。潮位変動は近隣の Benoa 港の実測潮位によると、M.H.W.L. 及び M.L.W.L. は M.S.L. ± 1.3 m である。Kuta 海岸のリーフ礁原の水深は平均 M.S.L. -2 m 程度であり、干潮時にはリーフエッジの裾礁が露出する。一方、Nusa Dua 海岸のリーフ礁原の水深は平均 M.S.L. -1 m と浅く、干潮時には礁原が露出し、裾礁

* 正会員 (前)建設省土木研究所次長

** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

*** 正会員 (株)アイ・エヌ・エー新土木研究所海外部

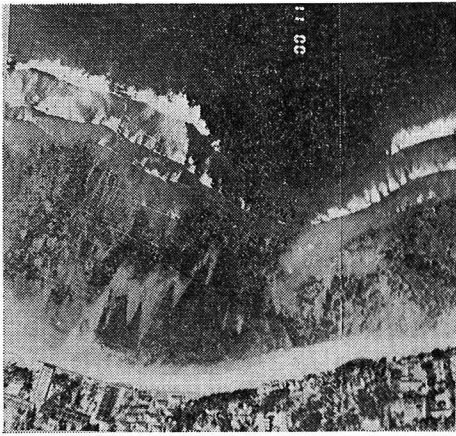


写真-1 リーフエッジ部の入射波 (Sanur 海岸)

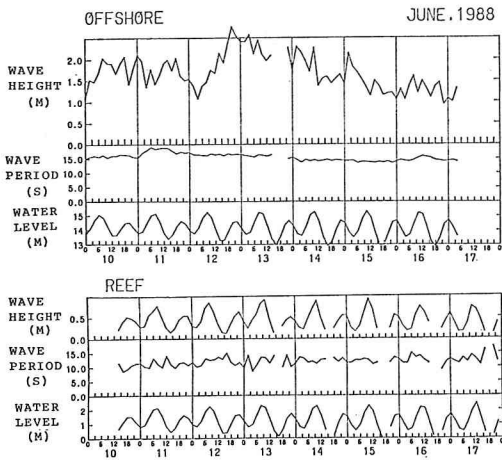
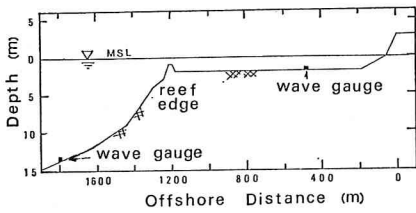


図-3 Kuta 海岸におけるリーフ内外の有義波高・周期の経時変化

の高さも M.S.L. ± 0 m 程度であることが目視観測されている。図-3 は Kuta 海岸における 1988 年 6 月の観測データ (有義波) の時系列である。下段に示したリーフ礁原上のデータの欠測はセンサー (地盤上 50 cm) が干潮時に露出したためである。また、図中の水位変動は 2 時間毎に 10 分間連続観測した水位変動を平均して算出したもので、リーフ内外の水位変動の位相と振幅はほぼ一致し、潮汐変動が卓越している。リーフ上の波高の時系列データには潮位変動に対応した特徴的な変化が認められると共に、リーフ上は沖合から高波浪が入射しても比較的静穏であることが明らかである。例えば、6 月

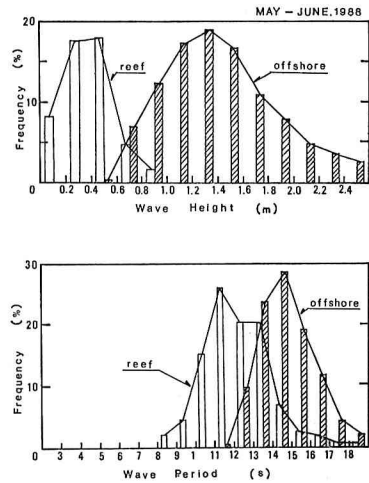


図-4 Kuta 海岸における有義波高及び周期の分布

12日のデータに見られるように、沖合の入射波高が 2.5 m 以上と高くてもリーフ上の波高はその時点の水位に応じた波高しか存在し得ないことが理解される。また、沖合の周期に比べリーフ上の周期は短い。これは、リーフエッジ近傍で碎けた波の分裂現象によると考えられる。これらの特徴は 5 月～6 月の 2 ケ月間にわたる観測データを統計処理した波高及び周期の分布 (図-4) から明らかで、天然リーフの持つ消波機能を示している。またこれらの結果は、沖縄のリーフで得られた結果 (谷本ほか, 1988) と良い一致を示す。

次に、電磁流速計により測定した流れの特性について

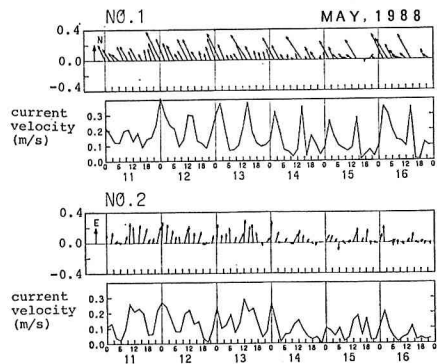
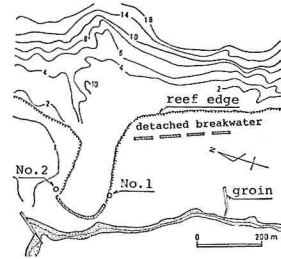


図-5 Nusa Dua 海岸における流速の経時変化

述べる。図-5はNusa Dua 海岸中央部に存在するリーフギャップの両端に設置した流速計の記録である。リーフギャップの岸側にはU字型の不透過性防波堤が建設されている。データを見ると両地点とも半日周潮の潮汐変動が見られるものの、No. 1 地点では切れ目に向かう最大 40 cm/sec の北向き流れが、No. 2 地点でも最大 30 cm/sec の切れ目に向かう東向きの流れが常時発生している。これより、当地点ではリーフ礁原上の水は潮位に関係なくリーフギャップから沖合へ流出することが明らかとなった。この沖向き流れの発生は、リーフ上において岸向きに運ばれた質量がギャップを通して沖向きに運ばれるためである。この現象は沖縄のリーフにおいても観測された(谷本ほか, 1988)。

3. 海浜地形変化

Kuta 海岸の最近 10 年間の汀線変化を図-6に示す。南端のリーフ上に建設された空港滑走路 (1970 年完成) の影響により、南西から入射する卓越波の遮蔽域に位置

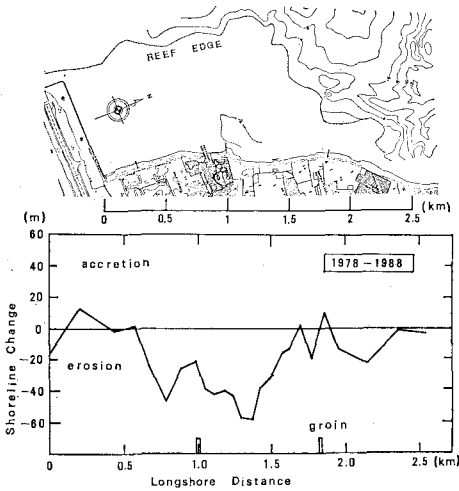


図-6 Kuta 海岸における汀線変化

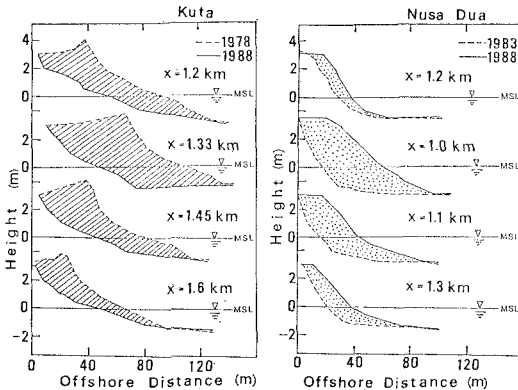


図-7 海浜断面形の変化 (Kuta, Nusa Dua 海岸)

する汀線は安定しているが、滑走路から 600 m 以北においては侵食が著しい。断面変化にも顕著な侵食が表れており(図-7)、断面変化より算出されたリーフ内の損失土砂量は、この 10 年間で $16,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ と見積もられた。図-7に示した海浜断面形の変化によると、リーフ上の平坦面上で海浜断面形はほぼ平行移動しており、一般に沿岸漂砂によって海浜地形変化が生ずる場合の変化と良く一致する。また、いずれの地点においても断面内では侵食のみ見られた。この現象は 1970 年頃から現れ始め、その後も侵食区域が北側へと広がりを見せている。これらのことから、図-6に示した汀線後退は沿岸漂砂が阻止されたため生じたと考えられる。侵食された砂は北側の海浜へと運ばれたが、一部の土砂は海岸の北端にあるリーフギャップより沖へ流出する流れによって運ばれた可能性もある。

Nusa Dua 海岸はリーフ礁原幅が 500~700 m のリーフ海岸であり、既に突堤、離岸堤及び養浜等による侵食対策が実施されている。当海岸の汀線変化は図-8に示す通り、総じて堆積傾向で、図-7に示した断面変化からも前浜部は堆積状況を示す。これは過去 5 年間に養浜が行われ、約 $100,000 \text{ m}^3$ の土砂が投入されたためである。しかし、実際に断面変化から堆積土砂量を求めると約 $81,000 \text{ m}^3$ となり、約 $19,000 \text{ m}^3$ の欠損がある。したがって、当海岸では $4,000 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で土砂損失が生じていることになる。この原因としては図-5において述べたリーフギャップからの土砂流出が考えられる。

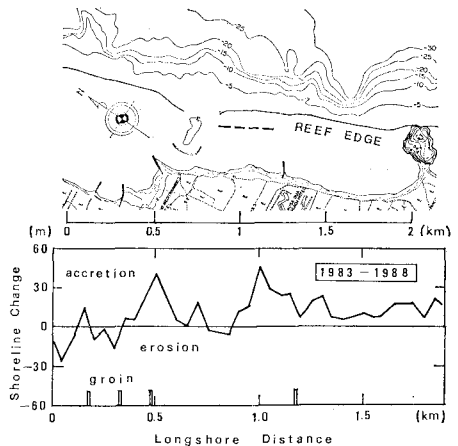


図-8 Nusa Dua 海岸における汀線変化

4. 水理模型実験と現地データの比較

現地実測データを基に、リーフ内の波高減衰、周期変化及び水位変動について検討を加えた。検討に際しては図-9に示すリーフ模型に対する 2 次元水理実験の結果(縮尺 1/50, 結果は現地換算で表示)も併せて示した。水理実験による測定波形の例を図-10に示す。図-10

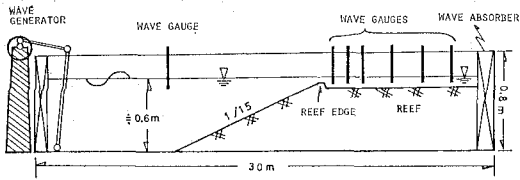


図-9 2次元造波水槽とリーフ模型

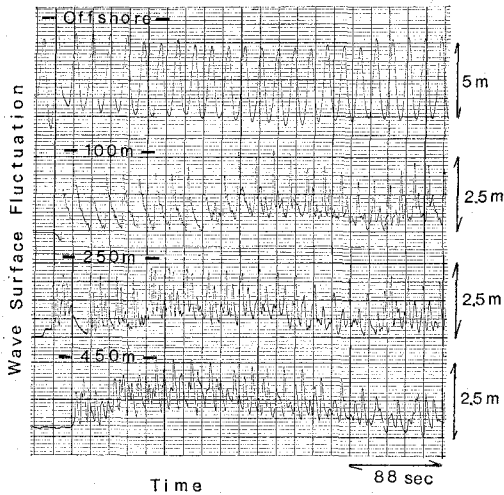


図-10 実験波形の例

では規則的な沖波が、リーフ内へ伝播するに従い分裂し、短周期波が再生される状況が認められる。なお、ゼロアップクロス法による有義波算出の際には、波形記録に顕著に出現している長周期水位変動を除去した。

図-11 は、リーフ上の波高が 50 cm 以上を示した有意なデータを用いてリーフ内外の波高比と相対水深との関係を示したものである。ここで、 h はリーフ上の水深 (wave set-up を含む)、 H_o^* は沖波波高 (現地では沖合の実測波高)、 H はリーフ上の波高 (水理実験ではリーフエッジから岸側へ 250 m, 350 m, 450 m 地点の波高を平均したもの) である。図示された如く、現地及び実験データには良好な直線関係が認められる。回帰式から判断するとリーフ上の波高はリーフ上の水深によって $H \approx 0.4h$ と一義的に決定され、沖合の入射波高はリーフ内の波高推算にとって 2 次的であると言える。リーフ上の水深が充分にあり、外洋からの入射波高が相対的に小さければ、砕波せずにリーフ内へそのまま伝播してくるが、リーフエッジ部の裾礁が発達して、その近傍で砕けるような入射波に対しては、リーフ礁原上の水深で波高が規定されることになる。

図-12 は、沖波波高が 20 cm 以下の時にリーフ内外の平均水位が一致するとの仮定のもとに算出したリーフ上の実測水位上昇量と水理実験で得られた水位上昇量をプロットしたものである。実験データに関しては実測と

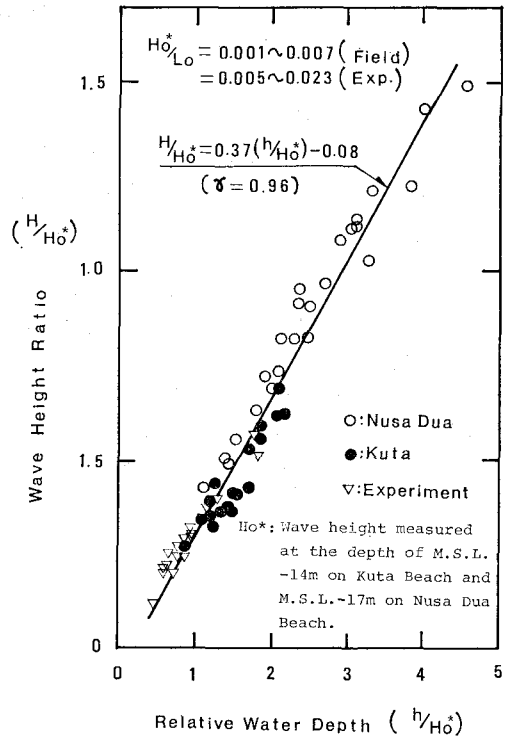


図-11 リーフ内外の波高変化と相対水深との関係

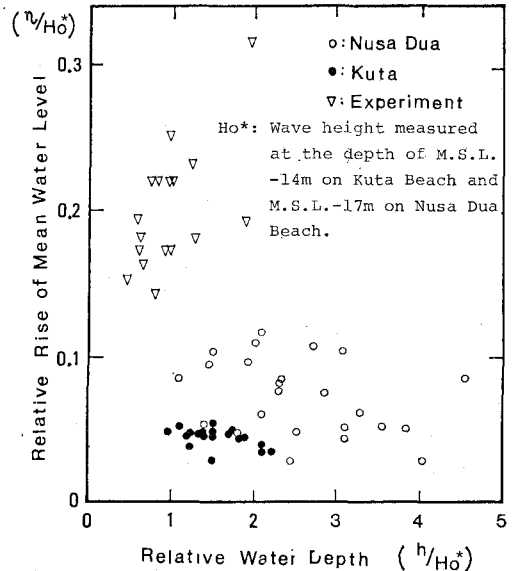


図-12 リーフ上の相対水位上昇量と相対水深との関係

同じ条件にするため、リーフ上の水深 h には set-up 量を含めており、水位上昇 η はリーフ上の測点 (リーフエッジから岸側へ 50 m, 150 m, 250 m, 350 m, 450 m の各地点) の値を平均して算出した。実測データの分布を見ると、Kuta 海岸の沖波入射波は 1.2~2.5 m, Nusa Dua 海岸では 0.5~1.4 m と Kuta 海岸の波高が高いに

もかわらず、リーフエッジ部の裾礁の発達している Nusa Dua 海岸のほうが水位上昇量は大きくなる傾向が認められる。これは Kuta 海岸の礁原幅が約 1 km と非常に広いことや裾礁天端高が M.S.L. 約 -1 m と低いために、海水がリーフ外へ流出し易いこと等が影響していると考えられる。総じて、実測された水位上昇量は沖波の 5~10% 程度となっている。一方、実験による水位上昇量は実測値と比べると大きな値を示しているが、これは実験水路の側壁等の影響により、平面的に広がっているリーフの現地条件と大きく異なることがその原因と考えられる。

最後に、リーフ内外の周期の変化を図-13 に示した。リーフ上の水深が小さく裾礁の発達した Nusa Dua 海岸のほうが分裂現象による周期の低下が顕著であり、沖波周期の 1/2 程度に低下している。

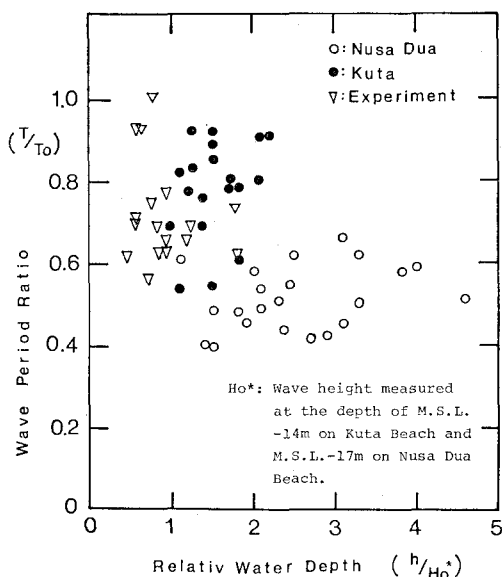


図-13 リーフ内外の周期変化と相対水深との関係

5. 結 論

インドネシア・バリ島において、リーフ礁原と裾礁の発達した海岸を対象に波、流れ、地形等の現地観測を行い、更に模型実験によって検討した。最後に、本研究によって得られた結論を要約すると次の通りである。

① 前浜にはリーフエッジで急激に屈折した波が平坦な

礁原上を直進して伝播する。砂浜汀線が波峰線と平行になろうとする特性を考慮すると、リーフエッジ部の平面的形状は汀線の平面的形状を決定する主要因となる。

② リーフエッジ部で碎波した波は、その後分裂し、リーフ上では短周期成分波となる。現地で見られたこの現象は実験によっても確認された。

③ 沖波波高が増大すると、リーフ上の平均水位も上昇するが、礁原上の短周期成分波の波高は wave set-up も含めた礁原上の水深によって一義的に決定される。当対象域の波高は水深の約 40% と見積もられた。

④ リーフエッジ部では碎波により波高が大きく減衰し、波エネルギーが流れのエネルギーに変化する。

⑤ リーフギャップから常時沖合へ向かう流れのあることが見出された。これは沖縄県中泊地区で観測された結果(谷本ほか, 1988)とも一致する。

⑥ リーフ礁原上の水位上昇は現地でも認められ、その値は沖波波高の 5~10% 程度であった。一方、2次元実験では沖波の 15~30% にも達した。現地ではリーフギャップ等による海水の流出口が存在するために、実験の場合ほど上昇量が増大しなかったと考えられる。

⑦ 前浜の侵食・堆積時の断面変化は、礁原の一樣水深部以浅において、その形状を平行移動させる形態で生じている。このような地形変化は、沿岸漂砂によって生ずる地形変化特性と良く一致する。

謝辞: 今回の研究に必要なデータの使用を御承認いただいた国際協力事業団及び有益な御助言を賜った京都大学防災研究所長・土屋義人教授、埼玉大学建設基礎工学科・堀川清司教授に深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1987): 人工リーフ周辺に生ずる海浜流と地形変化, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 337~341.
- 宇多高明・小俣 篤 (1987): 人工リーフの設計法, 土木技術資料, Vol. 29, No. 12, pp. 26~31.
- 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小俣 篤 (1988): 沖縄県中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.
- 浜口達男・宇多高明・井上 力・五十嵐 晃・中山 修 (1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 128~132.