

バリ島の珊瑚礁海岸の侵食制御について

土屋 義人*・Abdul R. Syamsudin**・山下 隆男***

1. 緒 言

バリ島には美しい珊瑚礁海岸があるが、近年開発にともなって著しい海岸侵食が進み、昔の面影がなくなっており、その回復は国際問題になっている。本研究では、珊瑚礁海岸における波浪の変形とくに海浜変形に最も影響を与える波浪条件を調べ、それによる海浜変形の予測を実施し、また適用な境界条件を与えることによって安定海浜を形成させることができることを確認し、さらに sedimentation cell を明らかにして砂浜の形成過程に基づいて安定海浜を形成させる方法を研究し、Kuta および Nusa Dua 海岸に実際適用してきた結果（詳細は、Syamsudin, 1993）について述べる。

2. 波浪の変形と海浜変形における最危険波浪条件

バリ島には乾季、雨季においてそれぞれ東、西向きの波浪とくにうねりが来襲するが、屈折して、Nusa Dua および Kuta 海岸にはいずれもほとんど直角に入射することになる。珊瑚礁上では波浪の分裂、砕波などとそれに伴うサーフビートの発生や流れなどの特異な現象の存在が報告（たとえば、仲座・日野, 1988, 日野・仲座・野中・武若, 1990）されており、それらが海浜過程を考えるうえで大変重要になっている。しかし、どのような波浪条件が最も海浜変形に対して危険であり、それを支配するかはいまだ判明していない。ここでは、珊瑚礁にほとんど直角に入射したうねりが浅水変形、海底摩擦によって変形し、海浜に到達するうねりの波高が最大になる条件を調べる。

(1) うねりの変形と最危険波浪条件 まず、珊瑚礁の沖側斜面におけるうねりの変形は浅水変形と海底摩擦によるとして計算し、ある砕波指標を与えて砕波点を計算し、砕波高を求める。まず、浅水変形ではうねりは分裂しないものとして、通常のように次式で計算する。

$$H = K_s K_f H_0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H は波高、 H_0 は換算沖波波高、 K_s および K_f はそれぞれ浅水係数および海底摩擦による波高減衰係数である。式(1)で波高変化を計算し、砕波指標を用いて砕波点を求め、そこから砕波変形するとして波高減衰を次のような方法で計算する。Battjes・Janssen (1978) の段波モデルを用いて波のエネルギーフラックスの保存則を適用すれば、その波高変化は次式で表わされる (Syamsudin et al.1993)。

$$\frac{H}{H_b} = \exp \left\{ -\beta \gamma \left(\frac{x_b}{T \sqrt{gd}} \left(\frac{x}{x_b} \right) \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H_b は砕波波高、 T は波の周期、 g は重力の加速度、 d は水深、 x_b は砕波減衰の範囲を示し、 $H = \gamma d$ で、 γ および β は係数である。このように砕波変形が起こるとし、それが $x = x_f$ において $H = \gamma' d_f$ (ただし、 d_f は珊瑚礁上の水深) で表わされる周期波に再び戻り、式(1)によって減衰していき、珊瑚礁海岸の砂浜では波高 H_s になるものとして、これらの計算を実施する。この方法による波浪の変形計算をバリ島海岸についてうねりを対象として計算した波高変化の一例を図-1に示し、砂浜に到達する波の波高と沖波波高との関係を図-2に示すが、明らかに砂浜に到達する波の波高は沖波波高の増大にともなって最大値をとり、その波は周期波として取り扱ってよいことがわかる。もちろんそれは図-3に示すように、珊瑚礁上の水深とともに増大する。外洋から同じうねりが侵入してきていても、珊瑚礁上での潮位により波高は変化するので、最高潮位のときの波高が最危険

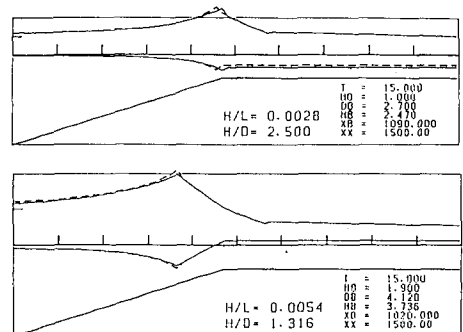


図-1 珊瑚礁海岸における波高変化の計算結果一例

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 ** 工博 インドネシア水資源開発研究所水理実験所長
 *** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

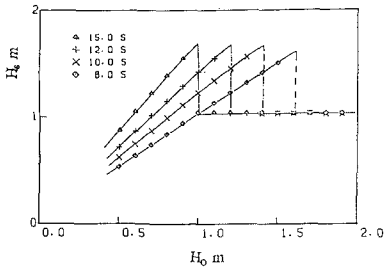


図-2 砂浜に到達する波の波高と沖波波高との関係

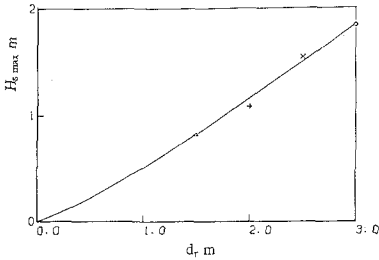
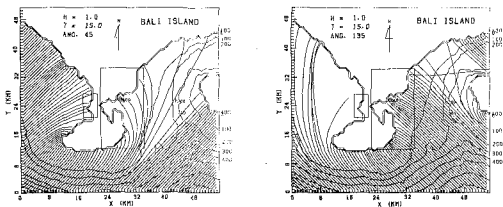


図-3 最危険波浪条件における波高と水深との関係

波浪条件を与えることになる。

(2) Kuta および Nusa Dua 海岸への適用 以上の結果からわかるように、これは波の周期にほとんど関係しないので、海浜変形に最も関係するものとして、沿岸漂砂を取り上げ、波の周期との関係で最危険波浪条件における波の周期を調べることにする。まず、これらの海岸には SW および SE からのうねりが来襲するが、図-4 に示した屈折図からわかるように、Kuta 海岸には SE からのうねりは入らないが、Nusa Dua 海岸には両方からのうねりが入射する。一例として、前者において海岸侵食の著しい地点での波向、屈折係数および観測された周期の出現頻度を用いて沿岸漂砂量に及ぼす周期の影響を



(a) SW からのうねり (b) SE からのうねり

図-4 バリ島におけるうねりの屈折図

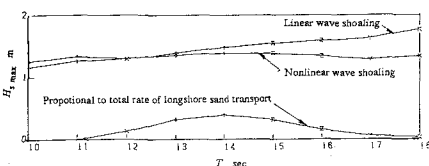


図-5 沿岸漂砂量を指標として得られた最危険波浪条件における波高の周期による変化

計算し、最危険波浪条件における波高と周期との関係を求めて図-5 に示す。これから海浜変形に対する最危険波浪条件における周期は 14 s 程度であることがわかるので、海浜変形の予測では最危険波浪条件として周期 14 s で砂浜に到達して波高 1.3 m となる沖波を対象とする。

3. 海浜変形の予測とその安定化の条件

(1) 汀線変化の予測法 前述した最危険波浪条件で、緩勾配方程式を用いてうねりの変形を計算し、珊瑚礁上での変形計算を実施して波のエネルギーフラックスの沿岸分布を求め、次式による汀線変化予測モデルによって汀線変化を計算する。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\left(\frac{\partial Q}{\partial a_{bs}}\right)}{(1-\lambda)d_k \left\{1 + \left(\frac{\partial y_0}{\partial x}\right)^2\right\}} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial a_{bs}}\right) = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_0^2 K_r^2 \cos 2a_{bs} \dots\dots\dots (4)$$

であり、 Q は沿岸漂砂量、 d_k は海浜変形の限界水深、 y_0 は基準線からの汀線変化、 a_{bs} は初期汀線に対する碎波角、および λ は空率である。ただし、境界条件は構造物などで沿岸漂砂が阻止されている場合には $Q=0$ 、また汀線変化がなく平衡状態であれば $Q=$ 一定とするなどして与えられる。

(2) 汀線変化の予測と海浜の安定化 対象とした Kuta および Nusa Dua 海岸について、まず最危険波浪条件において波の変形計算を実施したが、前者の結果を図-6 に示す。ただし、この海岸には 1968 年空港滑走路が珊瑚礁上に建設され、それが侵食原因となっているので、その基部から沿岸方向に距離をとり、砂浜前面における波高 H_0 、碎波角 α_{bs} 、基準線からの汀線位置、およびそれに対する碎波角のほか、それらの移動平均したものも示してある。境界条件として、滑走路のほか、この海岸の安定化のためヘッドランドを 2 つまたは 3 つ設置したときの汀線変化を予測し、どういう場合が最も安定

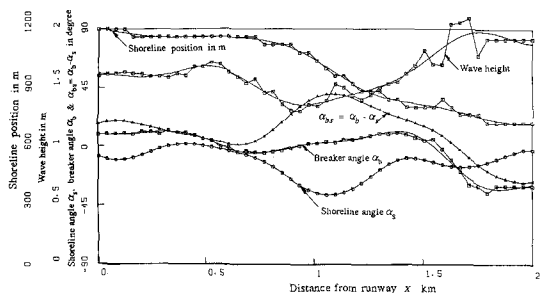
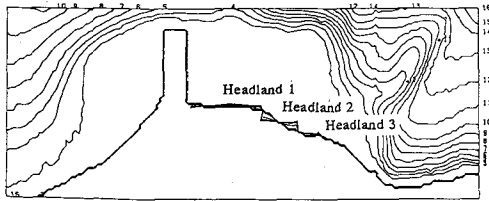
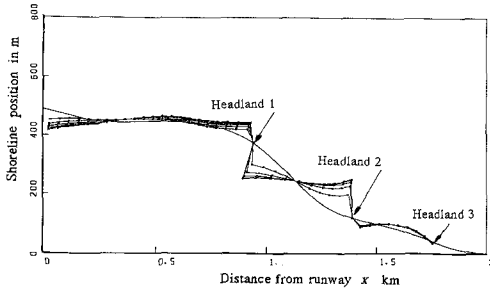


図-6 Kuta 海岸におけるうねりの変形計算結果



(a) 珊瑚礁上での汀線変化状況



(b) 汀線変化の拡大表示

図-7 Kuta 海岸における汀線変化の計算結果

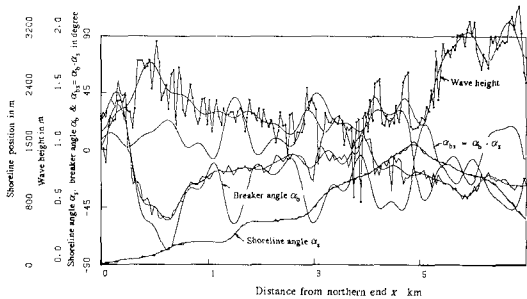


図-8 Nusa Dua 海岸におけるうねりの変形計算結果

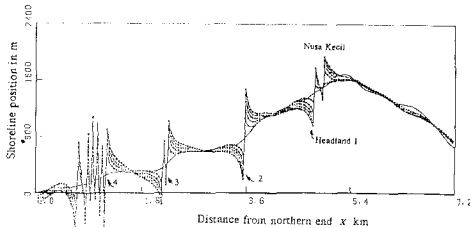


図-9 Nusa Dua 海岸における汀線変化の計算結果

化できるかを見出すことにした。図-7に汀線変化を30 hrsごとに示すように、ヘッドランドによる波の回折の効果は入っていないが、ヘッドランドを3つ設置した場合が最適であり、そのときに限り、現状より大きな汀線変化は起こらず安定にさせることができることがわかる。

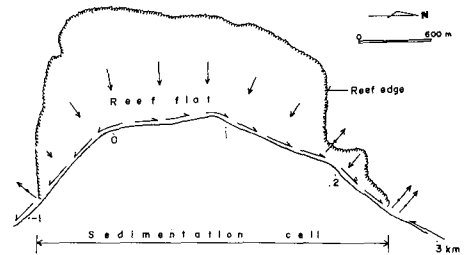
一方、Nusa Dua 海岸についても同様な計算を実施した。図-8はうねりの変形計算の結果であり、また図-9にはいくつかのヘッドランドを設置した場合の汀線変化の予測結果を示す。この場合も、ヘッドランドを適当な

ところに設置すると、汀線変化は安定な方向に向かうことがわかる。

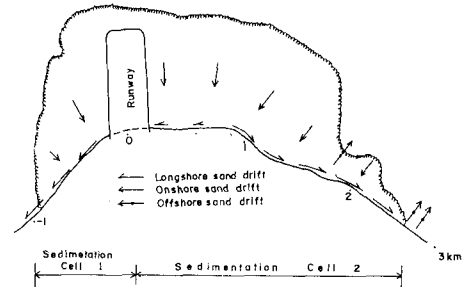
4. 安定海浜工法の適用

これらの海岸における侵食を制御して、長期的に安定な砂浜を形成させるために、前述した波浪の変形、汀線変化の特性に基づき、さらにそれらの海岸における sedimentation cell を調べて、安定な砂浜群を形成させる安定海浜工法の適用（土屋ら、1979, 土屋, 1991, 1994）を考える。

(1) Sedimentation cell と海岸侵食の原因 Kuta 海岸においては、1968年に空港滑走路が建設されたの

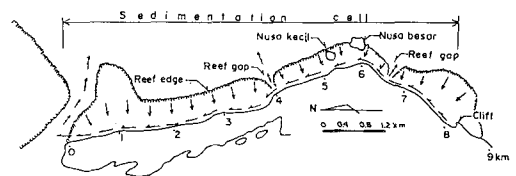


(a) 滑走路の建設以前

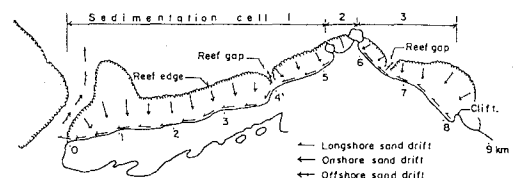


(b) 滑走路の建設以後

図-10 Kuta 海岸における sedimentation cell とその変化



(a) Nusa Kecil 島のトンボロの形成前



(b) Nusa Kecil 島のトンボロの形成後

図-11 Nusa Dua 海岸における sedimentation cell とその変化

で、その前後における変化がわかるように sedimentation cell を示すと、図-10 のようになる。これは汀線付近の底質特性の沿岸方向の変化や構造物などによる海岸微地形の変化から求めたものである。滑走路の建設によって明らかに sedimentation cell が分断されたことが海岸侵食の原因になっていることがわかる。

また、図-11 には Nusa Dua 海岸について同様な結果を示す。この sedimentation cell はかなり広域に及ぶが、Nusa Kecil 島にトンボロが形成される以前では、南側からの約 $9400 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂の連続性が保たれていたが、20 年程前よりトンボロ地形が固定化してきたため、沿岸漂砂が遮断されることになった。同時に、珊瑚礁上で珊瑚塊の取り出しが住民によって行われ、これらが海岸侵食の原因となっており、その後護岸などによる反射波の発生がそれを助長してきていたのである。

(2) 安定海浜工法とその適用 以上述べたこれらの海岸の sedimentation cell および汀線変化とその安定化のための予測計算の結果から、その具体的な安定海浜群の形成方法を次のように考える。まず、Kuta 海岸においては、図-12 に示すように著しい海岸侵食が起こり、漂砂源は珊瑚砂の生産しか考えられないので、静的に安定な砂浜群を形成させため、図-13 に示すように、基本とするヘッドランド Nos. 1, 2 および 3 を設置して、その間に適当な養浜を実施することとし、さらにその北側では汀線の方が変わり沿岸漂砂の挙動も変化すると予想されることから、自然海岸との沿岸漂砂の調和のため、

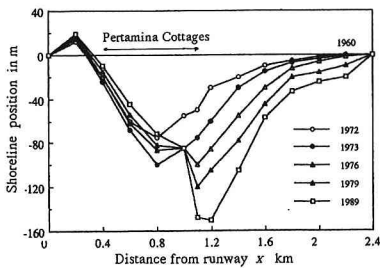


図-12 Kuta 海岸における汀線変化

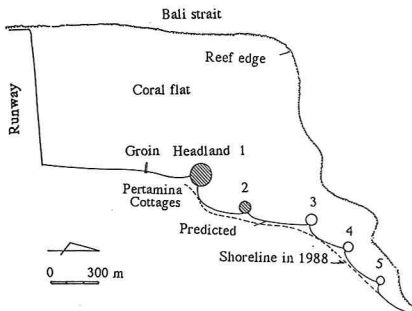


図-13 Kuta 海岸への安定海浜工法の適用



写真-1 Kuta 海岸における 1989 年当時の安定海浜の形成

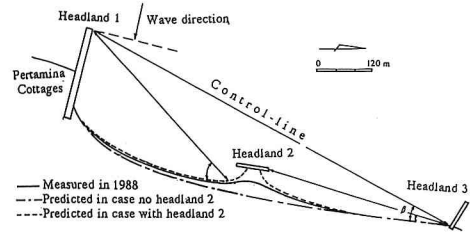
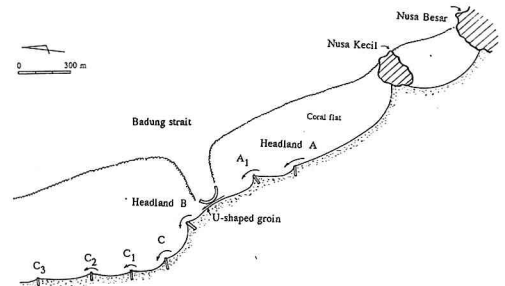
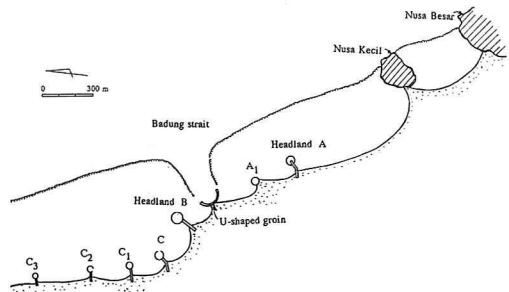


図-14 Kuta 海岸に形成された砂浜形状と安定海浜形状との比較

さらに小規模のヘッドランドを基本ヘッドランドの影響を見ながら設置することとした。試験施工としてヘッドランド Nos. 1 および 2 をそれぞれ突堤および離岸堤形式のもので 1986 および 1987 年に施工した。ただし、この試験施工では養浜は実施しなかったが、急速にトンボロが形成され写真-1 に示すような美しい砂浜が形成され



(a) 動的に安定な海浜群による場合



(b) 静的に安定な海浜群による場合

図-15 Nusa Dua 海岸における安定海浜工法の適用

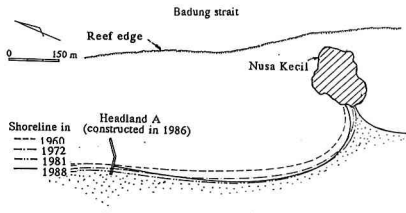


図-16 Nusa Dua 海岸におけるヘッドランド A による静的に安定な砂浜の形成

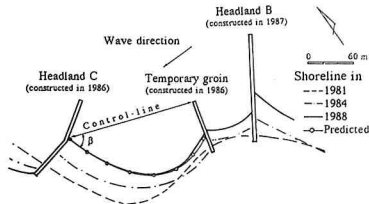


図-17 Nusa Dua 海岸におけるヘッドランド B, C による静的に安定な砂浜の形成

始めた。そのときの汀線形状をヘッドランド No. 2 を考えた場合と考えない場合について Hsu et al. (1988) の安定海浜形状の経験式と比較して、図-14 に示す。これからヘッドランドの構造についてはなお検討しなければならないが、提案した工法によって安定海浜に近い砂浜が形成されつつあったことがわかるであろう。ただし、現状ではこのような砂浜の形成直後に、その背後地の開発が進んでしまい、いまやこの雄大な砂浜の全貌を見ることはできない。

次に、Nusa Dua 海岸では、前述したような侵食原因からその制御のためには、1) 沿岸漂砂のサンドバイパスによりその連続性を図り、かつ護岸の線形とその構造を変えて砂浜の形成に協調させる方法、または 2) 沿岸漂砂のサンドバイパス量を最小限にできるような安定海浜群を形成させる方法が考えられる。サンドバイパスする位置の関係から対象範囲において境界条件の設置に伴う汀線変化の予測結果に基づいて、図-15(a) および (b) に示すように動的および静的に安定な砂浜群を形成させる方法を提案した。ここでは後者の場合をとりあげ、このうち突堤状のヘッドランド A と試験的にヘッドランド B および C が施工されたので、それらの適用性について簡単に述べる。このうち前者は 1987 年に施工し、約 40,000 m³ の珊瑚砂で養浜した。また、ヘッドランド B, C は 1986 年から 1987 年にかけて設置された。図-16 および写真-2 に示すように、Nusa Kecil 島とヘッドランド A との間には美しい砂浜が形成されており、それはほぼ安定の状態になっている。また、後者では図-17 に示すように小さな試験突堤の設置も行ったが、Hsu et al.

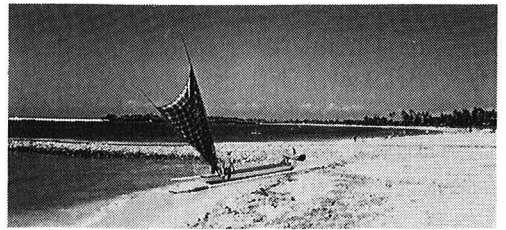


写真-2 Nusa Dua 海岸における静的に安定な砂浜の形成状況

(1988) の安定海浜形状の経験式と比較してあるように、小さな 2 つの美しい安定に近い状態の砂浜が形成された。しかし、こもその直後に開発のため護岸が汀線付近まで作られ、いまや当時の状態を見ることはできない。

5. 結 論

以上、バリ島における珊瑚礁海岸の侵食制御として Kuta および Nusa Dua 海岸をとりあげ、最危険波浪条件における汀線変化の予測から安定海浜が形成できる条件を見だし、sedimentation cell の変化を考慮して安定海浜工法の適用を考え、その一部を具体的に実施したところ、かなり良好な結果が得られたことを報告した。残念ながら形成された一部の砂浜はすでに開発のため利用されたが、このような実績が珊瑚礁海岸の恒久的な保全に寄与することを期待する。本研究の実施にあつてご協力いただいたインドネシア水資源開発研究所長 Badruddin Machbub 博士をはじめとする関係者に感謝する。

参 考 文 献

- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 15th ICCE, ASCE, Vol. 1, pp. 569-587.
- 日野幹雄・仲座栄三・野中雅彦・武若 聡 (1990): リーフ性海岸における波群性サーフビートの発生と個々波の変形, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 81-84.
- 仲座栄三・日野幹雄 (1988): リーフ性海岸における Bore 状サーフビートによる災害の実態調査, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 202-206.
- Syamsudin, A. R. (1993): Beach Erosion in Coral Reef Beaches and Its Control, Doctoral Dissertation, Kyoto Univ., 221p.
- Syamsudin, A. R., Y. Tsuchiya and T. Yamashita (1994): Transformation of swell on coral reef and the most affective wave in beach change in coral-sandy beach, Bulletin, D. P. R. I., Kyoto Univ. (in printing).
- 土屋義人・R. Silvester・芝野照夫 (1979): 安定海浜工法による海岸侵食制御について, 海岸工学論文集, 第 26 巻, pp. 191-194.
- 土屋義人 (1990): 安定海浜の形成と海岸侵食制御について—安定海浜工法とは?—, 第 22 回海岸講習会講義集, (社) 全国海岸協会, pp. 11-26.