

Coral reefにおける砂浜発達のモデル化

MODEL FOR PREDICTING FORMATION OF SANDY BEACH ON REEF FLAT

小林昭男¹・宇多高明²・野志保仁³・芹沢真澄⁴
Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI and Masumi SERIZAWA

¹正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカビル)

³学生会員 工修 日本大学大学院生 理工学研究科海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

⁴海岸研究室 (有) (〒160-0011 新宿区若葉1-22 ロイヤル若葉301)

A model for predicting the formation of a sandy beach on a reef flat was developed applying the contour-line-change model. The condition of a sandy beach on the Oku coast with coral reefs in Okinawa was investigated. On this beach, a stable sandy beach with a slope of 1/10 was developed due to the shoreward sand transport, the materials of which were originally supplied from the coral reef. The formative mechanism was investigated using a movable bed experiment. It was confirmed that coarse sand placed on the flat surface is carried shoreward, resulting in the formation of a beach with a steep slope. This mechanism was simulated using the BG model (Serizawa et al., 2006), given the equilibrium slope of sand. Predicted results were in good agreement with the experimental results.

Key Words: Coal reef, sandy beach, predictive model, BG model, Oku coast

1. はじめに

熱帯・亜熱帯のサンゴ礁海岸にあってはリーフと白い砂浜が発達し、それらは貴重な観光資源となっている。このようなリーフの陸側縁辺に沿って延びる砂浜は、沖合にリーフがあるためかなり安定であるが、その砂浜の構成材料の多くはサンゴ礁海域に生息する有孔虫の遺骸、サンゴや貝殻のかけらである¹⁾。海浜構成材料を調べればこれは明白な事実であるが、これらが海岸線に集積して海浜を造る機構の定量的説明は十分ではない。これに関連し、宇多ら²⁾はサンゴ洲島の形成実験を行い、平坦なリーフ面の沖の急勾配で落ち込むリーフエッジ付近から砂礫がリーフ内へと運び込まれる現象を二次元移動床模型実験によって検討した。さらに、宇多ら³⁾はギャップを有する3次元リーフ模型を用いてリーフエッジ付近に敷かれた砂の移動を調べた。これらより、リーフエッジ付近から岸向きに砂が運ばれ、リーフ上に堆積する現象は明らかにされたが、リーフ岸端での砂浜形成については未検討である。本研究では、この点に着目し、リーフ海岸における砂浜発達が、砂の平衡勾配を考えれば単純な原理によって説明できることを水理模型実験により明らかにするとともに、芹沢ら⁴⁾の数値モデル (BG モデル) によってその定量的予測を行った。

2. 沖縄本島北部に位置する奥海岸の例

2006年4月14日、図-1に示すように沖縄本島北端部に位置する奥海岸の現地踏査を行った。この海岸はリーフの発達が非常に良好で、汀線付近に人工構造物が全く造られていない、沖縄の海岸の原風景がよく残された海岸である。奥海岸は両端を岩礁によって囲まれた延長約500mのポケットビーチである。図-2は奥海岸の全景である。沖合からリーフがよく発達しており、汀線付近には大量のcoral起源の砂が堆積している。この海浜は前浜勾配が約1/10と急勾配であり、リーフの平坦面とはきれいに

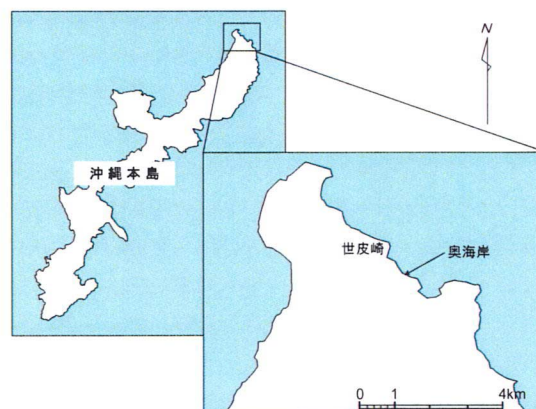


図-1 奥海岸の位置



図-2 奥海岸の全景



図-3 干潮時に露出した前浜のり尻の状況

に分かれる。前浜と沖合のリーフの平坦面の間には緩やかに粒径が変化する遷移帯を有しておらず、急に砂の分布域が始まることが特徴である。図-3 は干潮時に露出した前浜のり尻の状況である。このように前浜とリーフフラット面とは非常に明瞭に区分される。碎波に伴う攪乱によって前浜の砂がリーフフラットに落ち込むことがあったとしても、それ

を直ちに前浜へと引き戻す非常に強い復元力が働いていない限りこのような地形は形成されることがないと考えられる。

このようにリーフ平坦面の岸側端に海浜が形成される機構は次のよう推定される。図-4 を参照して考える。海浜の構成材料は coral 片である。これらはいずれも粒径が大きくかつ相対的に比重が小さい。そして平衡勾配が 1/10 程度とリーフ平坦面の勾配に比べてかなり大きい。リーフ平坦面の沖側端部（リーフエッジ）からこのようなリーフ起源の砂礫が供給されると、砂は平坦面上を岸向きに移動し、不透過な壁体（陸地）に当たるとそれ以上移動ができなくなり、そこに前浜を形成する。その際の前浜の勾配は平衡勾配と同一となる。リーフ面は固定床と同じ役割を果たし、ただ砂礫が通過するのみである。結果として形成された礫浜は非常に安定である。

3. 移動床模型実験

(1) 実験装置と条件

奥海岸で観察されたように、リーフ海岸では coral 起源の海浜が発達することはよく知られた事実であり、周辺海岸からの土砂供給がなくとも、サンゴの破碎片や有孔虫の遺骸が集積してサンゴ洲島が形成される。このようなリーフ海岸における砂浜発達の機構を調べるために移動床水槽実験を行った。水槽実験には、図-5 に示すように、一端にピストン式造波装置を備えた片面ガラス張りの小型二次元波動水槽（7m×0.4m×0.3m）を用いた。水槽内にリーフ模型を木板により造り、リーフ端には粗礫を敷いて消波ビーチとし、これより沖にリーフの平坦面を造った。またリーフの長さは 1.4m とし、リー

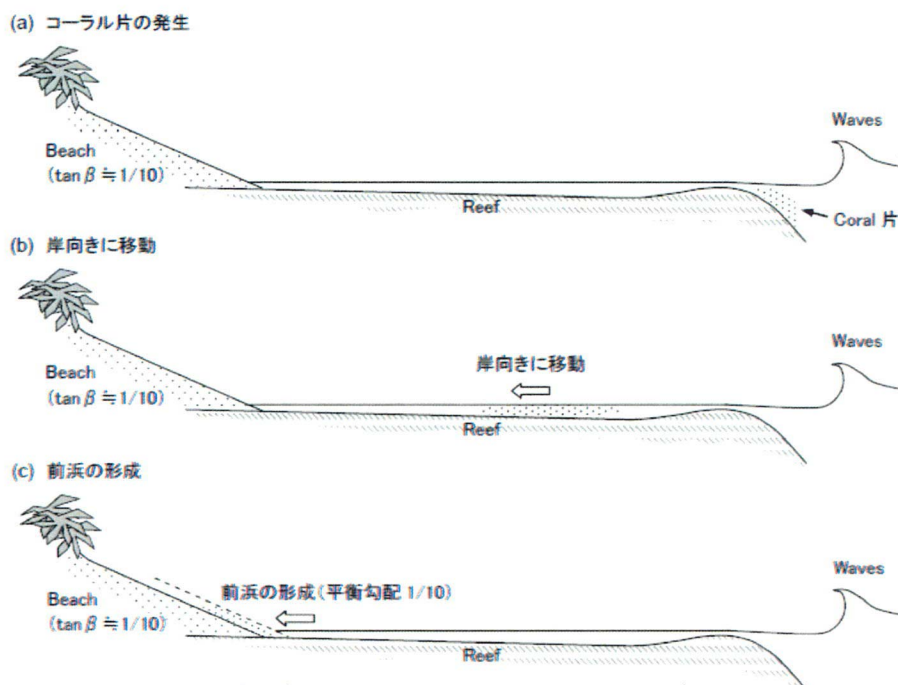


図-4 Coral reefにおける砂浜の発達

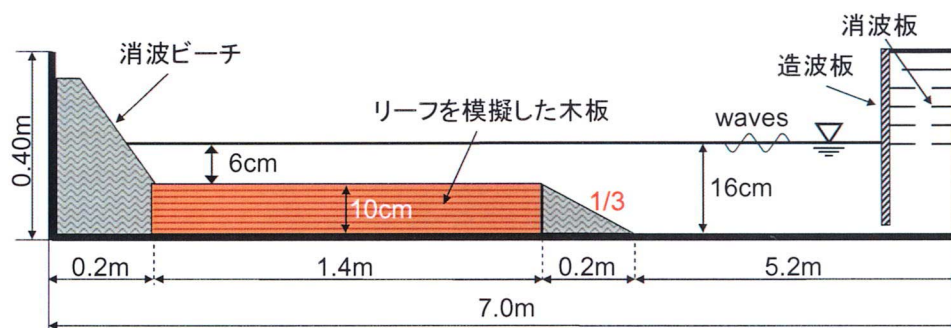


図-5 実験水槽断面図

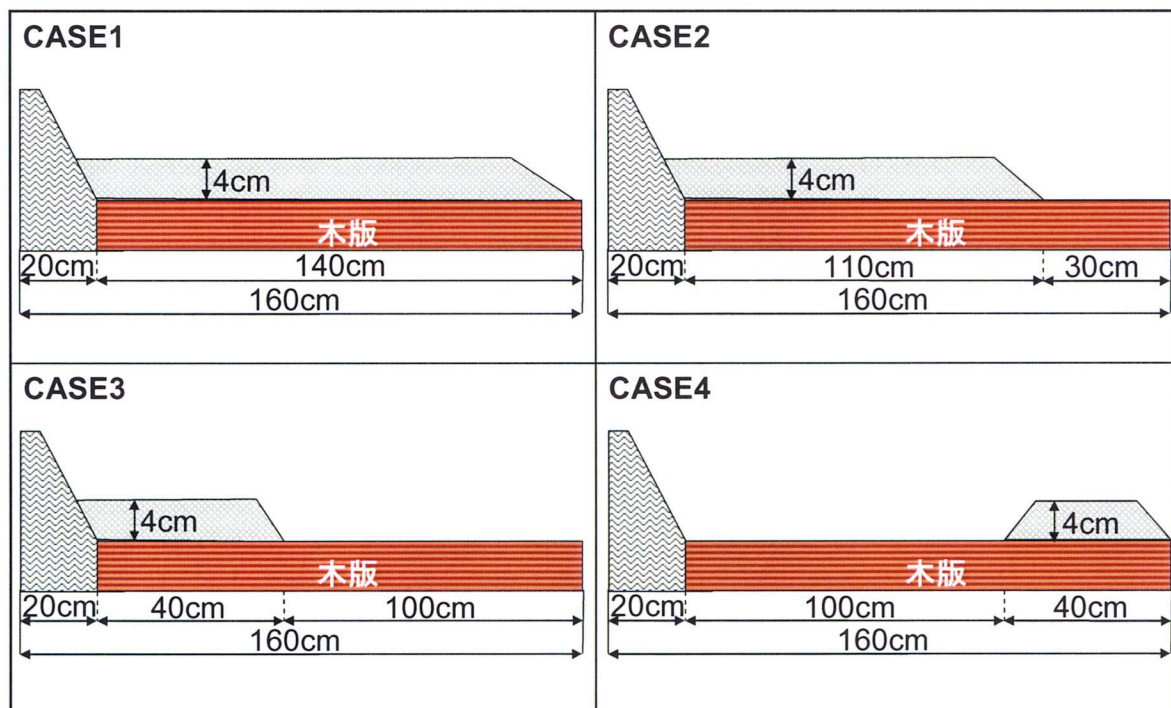


図-6 各ケースの断面形状

フ端では 1/3 勾配で沖合の一定水深（16cm）へとすり付けた。リーフの固定床部分の水深は 6cm とした。模型縮尺については、奥海岸のリーフ平坦面の水深が通常 1.5m 程度であることを考慮し、その 1/25 模型を考えた。移動床模型実験については相似則が確立していないが、フルード則に基づく縮尺を考え、沖合での平坦面上での入射波高を $H=4\text{cm}$ 、 $T=1.0\text{s}$ とした。実験に使用した砂は $d_{50}=0.2\text{mm}$ の東北硅砂である。

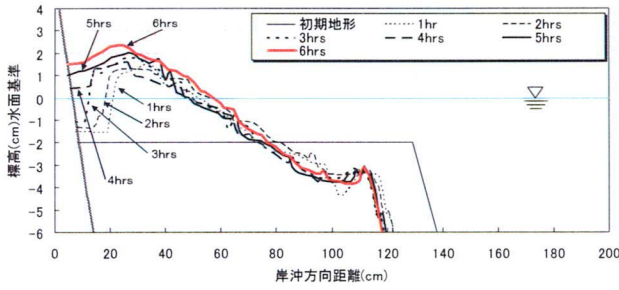
実験は砂の供給方法を変えて 4 ケース行った（図-6 参照）。ケース 1 では、リーフ模型上に 4cm 厚で砂を一様に敷き詰めた。これは coral 起源の砂がリーフ上に一様に堆積していると考えたケースである。ケース 2 では、ケース 1 と同様な厚さで砂を敷くが砂量を少なくした。ケース 3 では砂量をさらに少なくした。ケース 4 は、リーフエッジ付近に砂を敷いて一定時間毎に砂を供給するケースであり、リーフエッジ付近から連続的な砂の供給を想定した。実験では海浜形状が十分安定となるまで、前述の実験波をそれぞれ 6 時間（ケース 1）、19 時間（ケース 2）、4 時間（ケース 3）、9 時間（ケース

4）作用させ、この間の縦断形変化を調べた。縦断形はガラス張り側面の写真撮影により測定した。また一般に、二次元実験では波による岸向きの質量輸送によって岸側へと水が運び込まれ、水位上昇が起こるが、それを防止するために消波ビーチの表面に実験砂が通過できない細かな網の目のネットを敷き、消波ビーチを通過した水が背後へ抜けたあとリーフ模型の下部を通過して沖へと戻ることができるようにした。

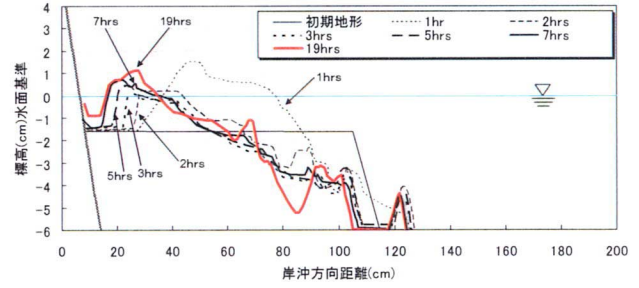
(2) 実験結果

ケース 1 の実験結果を図-7 (a) に示す。波の作用時間は 6 時間である。実験開始とともに砂層の沖端付近から削られ、削り取られた砂が岸向きに運ばれた。岸向き漂砂によって運ばれた砂は水面上にバームを形成して堆積したが、バームはその高さが増大するとともに、陸側端が陸側へと移動して消波ビーチと繋がり、6 時間後には高さ 2.4cm のバームが形成されてほぼ安定化した。最終的に前浜勾配は約 1/10 となった。この間、砕波点は、実験開始時はリーフエッジ付近にあったが、水底に敷いた砂の

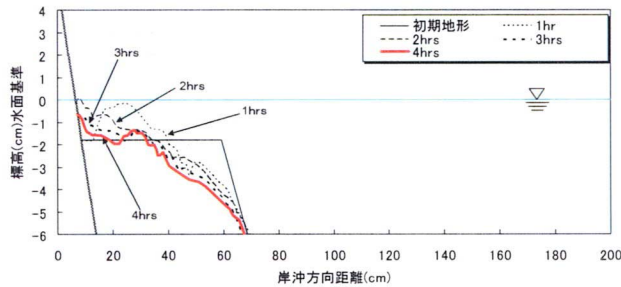
a) ケース1



b) ケース2



c) ケース3



d) ケース4

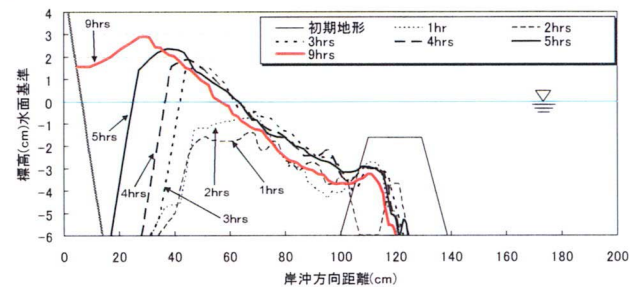


図-7 各ケースの実験結果

岸側への移動に伴い岸側へ移動し、碎波高も低くなった。さらに一定時間の経過後碎波点は一定地点 ($X=115\text{cm}$) から移動しなくなった。

図-7 (b) にはケース 1 より砂量を少なくしたケース 2 の結果を示す。ケース 1 とよく似た変形が起きたが、波の作用時間は 19 時間と、ケース 1 の 6 時間よりもはるかに長い。ケース 1 と比較して海浜縦断形は不規則であるが、この場合にもバームが発達した。その高さは砂量が減少したことによってバーム高は 1.1cm と低くなった。さらに砂量を少なくしたケース 3 では、図-7 (c) のように岸向き漂砂は起きたものの、バームは形成されなかった。

一方、ケース 4 は、リーフエッジ付近からほぼ連続的な砂の供給を想定しており、数回に分けて砂の供給を行った。砂の供給は 1 時間ごとに初期形状となるよう侵食量と同量の砂を入れた。6 時間後には砂の投入を止めた。図-7 (d) のように初期形状から次々と岸向き移動が起こり、ケース 1 と同様にバームが形成され、6 時間後には安定した前浜が形成された。この場合、ケース 1、4 の断面積はほとんど等しかった。海浜縦断形の時間的変化に着目すると、バームの発達に伴い、砂の塊の岸側端は砂の安息勾配を保ちつつ前進し、砂の塊の先端が消波ビーチに到達すると、消波ビーチと砂の塊の間を埋めながら砂州の標高が高まった。

4. BG モデルによる地形変化の再現

リーフ海岸における砂浜の形成機構を調べるために、Bagnold³⁾の考え方に忠実に従って誘導された芹沢ら⁴⁾による漂砂量式をもとに一次元の海浜変形の数値計算を行った。芹沢らのモデル (以下、BG モデル) は砂の平衡勾配を与え、それと実測の海底勾

配とのバランスにより岸向き・沖向き漂砂が生じると考えるものであり、等深線変化モデル⁶⁾で用いられた漂砂式と同じ物理的意味を有する。ただ BG モデルでは等深線を追跡することによって海浜変形を求めるのではなく、 x - y メッシュ上に配分された計算点において地形変化量が求められる点に違いがある。BG モデルの漂砂量式を、岸沖方向の 1 次元の式 (岸沖漂砂量 q : 符号は岸向きを正) として書くと次式となる。

$$q = \frac{G}{\tan \beta_c} [\tan \beta_c - \tan \beta] \quad (1)$$

$$G = C_0 K_1 \Phi = C_0 K_1 \varepsilon(Z) (EC_g)_b \tan \beta_c \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-p)} \quad (3)$$

$$\int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(Z) dZ = 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon(Z) = \begin{cases} \frac{1}{h_c + h_R} & (-h_c \leq Z \leq h_R) \\ 0 & (Z < -h_c, h_R < Z) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 x は岸向き座標、 $Z(x, t)$ は地盤高であり解くべき変数である。 $\tan \beta = \partial Z / \partial x$ は岸向きに測った海底勾配。 Φ は単位時間単位長さ当りの波のエネルギー逸散率、 $(EC_g)_b$ は碎波点におけるエネルギーフラックス、 K_1 は漂砂量係数、 C_0 は水中重量表示と砂の堆積表示での漂砂量係数の比、 ρ_s と ρ は砂と海水の比重、 g は重力加速度である。また p は砂の空隙率、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R は波の打ち上げ高に対応するバーム高である。 $\varepsilon(Z)$ は沿岸漂砂量強度の水深方向分布で、

表-1 計算条件

計算ケース		1	2	3	4
初期地形		Y=150mまで養浜	Y=110mまで養浜	Y=70mまで養浜	Y=140mで湧き出しを設定
平衡勾配		1/15			
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	0.04			
	碎波波向 α (deg.)	0.0			
	潮位条件 M.S.L.(m)	0.0			
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	0.06			
	バーム高 h_R (m)	0.023			
漂砂量係数 K_I		0.2			
土砂落ち込みの限界勾配		1/2			
計算メッシュ Δx (m)		0.1			
計算時間間隔 Δt (hr)		0.0002			
計算ステップ数		20,000			

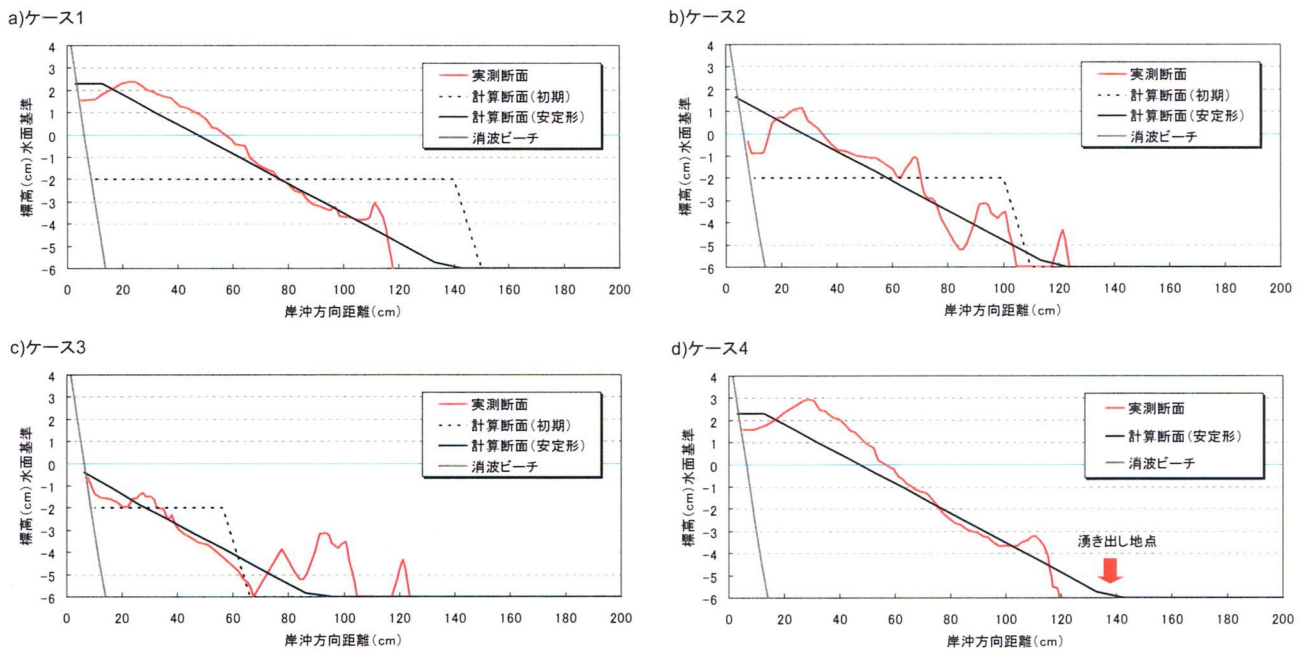


図-8 計算と実験の比較

本研究では一様分布とし、 h_c から h_R までの積分値が 1 となるよう式 (5) で与える。 $\tan \beta_c$ は平衡勾配であり、直角入射条件下で、岸沖漂砂がバランスして 0 となるときの海底勾配であり、計算ではこれは実験で得られた実測値を与えた。 海浜変形は次の連続式を解いて求める。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + S \quad (6)$$

ここに、 S は湧き出し項であり、ケース 4 (連続的供給) に対して使用するものでリーフエッジ付近からの砂の供給量を計算時間で割った量を与える。 一方、他のケースでは $S=0$ とおき、土砂供給はリーフ (固定床) 上の盛土を初期地形として与えた。 計算領域は Δx のメッシュで分割する。 Z と漂砂量 q の計算点は $1/2$ メッシュずつずらして配置し、式 (6) を陽形式差分法で解く。 初期地形と碎波波高

H_b , h_c , h_R 平衡勾配を与えると漂砂量 q が式 (1) で計算され、 Δt 後の地形変化量が式 (6) で求められる。 これらの計算が繰り返し行われる。 境界条件としては構造物境界では漂砂量を 0 と置く。 リーフ (固定床) の扱い方は、芹沢ら⁷⁾の方法を用いた。 数値計算では表-1 に示す計算条件を設定した。 ここに平衡勾配には実験値をそのまま与えた。

図-8 は各ケースの計算と実験との比較である。 ケース 1 では計算結果は実験とよく一致した縦断形が予測された。 砂量が少なくなるとケース 2, 3 のように縦断形の変動量が大きくなったが、消波ビーチ近傍の縦断形は予測できた。 また、砂量が少ないために砂浜が発達しきれていない実測の傾向を再現できていることがわかる。 さらにリーフエッジ付近から砂の供給を砂の湧き出しを考慮することによって与えたケース 4 ではケース 1 と同様、最終縦断形が再現された。 ただし現在のモデルでは図-7 (d) に示したように、塊をなした砂が岸端に安息勾配を

持って岸向きに進む現象は再現できていない。これについては砂州上の越流による地形変化を取り込む必要があると考えられるが、これは今後の課題である。

5. 考察

本研究で検討したようなリーフの平坦面上における砂州形成の実例としては、Bali 島の Sanur Beach の例がある。この海岸では、リーフの掘削後、水深の増加に伴って波浪強度が増加した結果、急速な岸向き漂砂が生じて新たにバリアーが形成された⁸⁾。このようなバリアーの形成が本研究の機構で説明できると考えられる。その場合、現地の砂の粒径は 1-2mm, 入射波高は 1-2m のオーダーであるので、代表的に粒径を 2mm, 波高を 2m と仮定すると、現地での粒径波高比は 1.0×10^{-3} となる。これに対して本研究の実験での粒径波高比は 5.0×10^{-3} であり、実験は掃流砂が卓越する条件で行われたことになる。しかし上記 Sanur Beach の場合も、前浜の平衡勾配は 1/5~1/10 であって⁸⁾、砂の移動過程は別として少なくとも最終形状については現地と実験とでよい対応を示している。

なお、ケース 4 では大量の砂を供給したため、岸向きに運ばれる土砂量が多すぎ、結果的に砂州の陸側端が急勾配で残されつつ砂が岸方向に移動することになった。現実にはリーフエッジからの有孔虫の死骸や砂礫の供給は少しずつ長い時間をかけて行われる。従って実験条件は現地海岸の条件と異なり、あたかも大量の砂礫を養浜した場合の結果に近い。このような場合には、砂州周辺での局所的な波高計算が必要となるが、本研究は最終形状の予測に主眼をおいており、主旨が異なる。このような局所的な地形変化予測は今後の課題である。

6. まとめ

従来のサンゴ洲島の形成機構に関する研究では、リーフエッジから岸側に運び込まれたサンゴ片や有孔虫の遺骸がリーフ上の岸向き流れによって運ばれ、

それが集積して海浜が形成されると考えられていた。リーフエッジ付近から岸へと向かうこのような流れは重要ではあるが、この流れはいずれリーフギャップから沖へと流出するので、流れの作用のみで砂浜ができる考えることには無理がある。この点に関し、本研究では単に砂はそれが持つ平衡勾配を保とうとすれば波浪作用のみで砂浜ができることになり、流れの作用がなくても砂浜が発達し、かつ安定な姿に至ることになる。Coral reef の砂浜が、波の強弱に伴う変形はあるものの、長期的に見て安定的に存在するという事実は、砂浜が砂の粒径に応じた平衡勾配を保とうとするこのような機構が強く働いていることに起因すると考えられる。また河川や海蝕崖など砂の供給源がないにもかかわらずリーフを起源とする砂浜が存在することも上記の機構による砂移動が卓越しなければならぬ理由を与えている。

参考文献

- 1) サンゴ礁地域研究グループ:熱い自然サンゴ礁の環境誌, 古今書院, p.372, 1990.
- 2) 宇多高明・伊藤弘之・小菅 晋・山崎順一: サンゴ洲島の形成・消失機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.376-380, 1992.
- 3) 宇多高明・谷本修志・坂野 章・高木利光: リーフ上およびリーフギャップ周辺におけるサンゴ砂の移動機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.215-219, 1990.
- 4) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼: Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集 B, Vol. 62, No.4, pp.330-347, 2006.
- 5) Bagnold, R. A.: 'Mechanics of Marine Sedimentation', in The Sea, M. N. Hill (editor), Vol.3, pp.507-528, New York, Wiley, 1963.
- 6) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之: 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.496-500, 2002.
- 7) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼: 等深線変化モデルの拡張による x-y メッシュ上の水深変化の計算法, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.476-480, 2003.
- 8) 宇多高明・大須賀 豊・大中 晋・石見和久・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼: リーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と海岸侵食, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.1356-1360, 2003.