

サンゴ洲島の保全手法に関する研究

宇多高明*・小 菅 晋**・伊藤弘之***

1. ま え が き

近年、地球温暖化に伴う海面上昇が問題となっており、海面上昇量の将来予測や、その影響評価、さらには対応策などについて盛んに研究が行われている。筆者らは海岸保全面において、海面上昇の影響はサンゴ礁海岸で特に顕著に現われると考え、サンゴ礁上に形成される堆積地形（サンゴ洲島）を対象として研究を進めてきた。そして、海面上昇が生じた場合のリーフ上の波・流れの変化、およびそれに伴うサンゴ洲島の变形について移動床実験を行い、洲島先端部の变形機構や、海面上昇に伴い洲島上に越流が生じると侵食が著しく助長されることを実験的に明らかにした（宇多ほか、1992；以下前報と呼ぶ）。

本研究は、前報の実験結果を基礎として、サンゴ洲島の侵食対策手法について検討するものである。海面上昇の前後を想定した2種類の水位条件において、サンゴ洲島の先端部に離岸堤を設置し、離岸堤による土砂流出防止効果を評価するとともに、サンゴ洲島の侵食機構や離岸堤の漂砂制御効果を数値計算により検討する。

2. 実験方法

実験装置と実験模型は前報と同一とし（図-1参照）、波浪条件は $H_0=4\text{ cm}$ 、 $T=1.4\text{ s}$ 、水位条件はリーフ面を基準として $z=6\text{ cm}$ と $z=10\text{ cm}$ の2種類とした。洲島

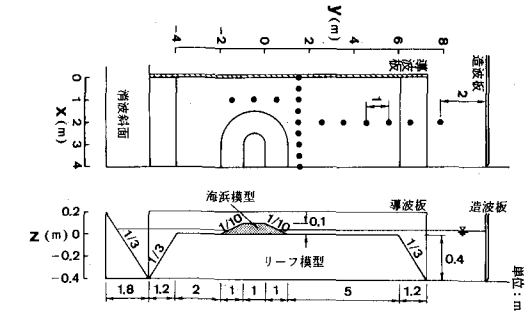


図-1 リーフ模型とサンゴ洲島模型

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長
** 正会員 東海大学海洋学部土木工学科助教授
*** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員

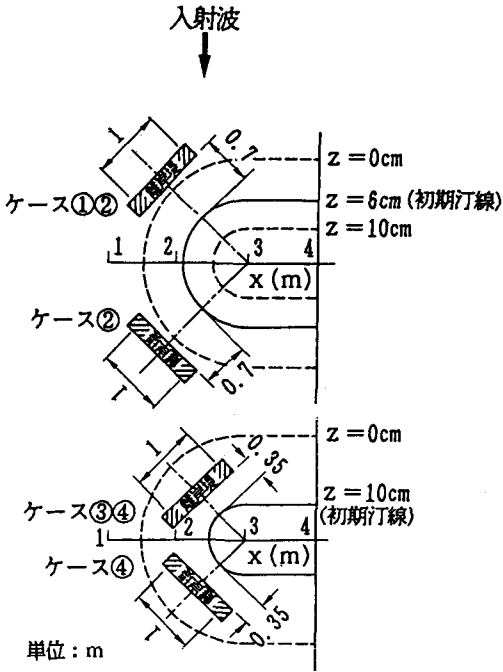


図-2 離岸堤の配置図

模型の先端部周辺には侵食防止施設として離岸堤を設置した。離岸堤配置は、洲島先端部の波の入射側にのみ設置する場合と、波の入射側とその反対側に2基の離岸堤を配置する場合の2ケースとからなる（図-2）。 $z=6\text{ cm}$ の水位条件の場合には離岸堤を洲島の外側に設置したが、 $z=10\text{ cm}$ の場合は離岸距離が大きくなり過ぎ、漂砂制御効果が著しく低下すると考えられたため、離岸堤は洲島模型上に設置した。離岸堤はテトラポッドの層積みであり、堤長は1 m、天端高は10 cm、天端幅は5 cmである。考察の便宜上、水位条件が $z=6\text{ cm}$ で、離岸堤を波の入射側にのみ設置した場合をケース①、2基の離岸堤を設置した場合をケース②とし、水位条件 $z=10\text{ cm}$ についても同様にケース③、④とした。

サンゴ洲島模型に波を2時間作用させた後、波高、流況測定および地形測量を行った。流況は図-1に示す範囲で造波開始直後に、また洲島の地形は造波終了直後に測線間隔0.25 mで測定した。

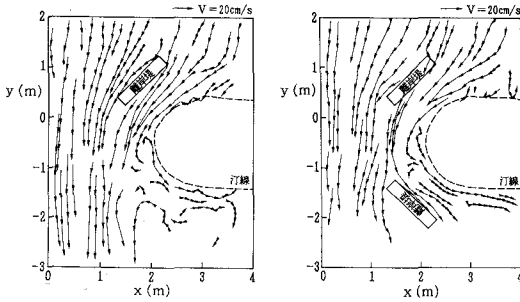


図-3 流況図 (ケース①)

図-4 流況図 (ケース②)

3. 実験結果

(1) 海浜流の流況

水位条件 $z=6$ cm のケース①, ②について, 造波開始直後の海浜流の流況をそれぞれ図-3, 4 に示す。ケース①では, 離岸堤は海浜流の阻止効果を有しており, $1.5 \text{ m} \leq x \leq 2.2 \text{ m}$ の範囲から実験領域へと流入した流れは離岸堤の外側を通過することにより, 洲島に作用することなく下手方向へ流出した。また, $x \geq 2.2 \text{ m}$ の範囲から流入した流れは離岸堤と洲島の間を通過した後, 一部は洲島の先端部で剝離し, 洲島先端部の下流側には流れの停滞域が形成された。通常, 離岸堤背後には一対の循環流が形成されるが, このケースでは離岸堤の法線が斜めに傾いているとともに, 汀線に対する入射角が大きいため, 離岸堤と洲島の間では強い沿岸流が発達している。下手側にも離岸堤を設置したケース②では, 洲島先端部における流れの剝離は見られず, 流れは洲島先端を回り込んで離岸堤と洲島の間を流下した (図-4 参照)。このように, 下手側への離岸堤の設置は, 下手方向への海浜流の一部をとらえ, 洲島の下流側汀線に沿う流れを形成させることになる。

同様に, 水位条件 $z=10$ cm のケース③, ④について, 造波開始直後の海浜流の流況をそれぞれ図-5, 6 に示す。これらは洲島上で越流の生じる条件である。前報の離岸堤なしのケースでは, 洲島先端部の $2 \text{ m} \leq x \leq 3 \text{ m}$ の

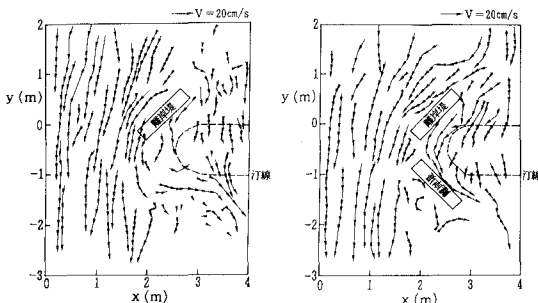


図-5 流況図 (ケース③)

図-6 流況図 (ケース④)

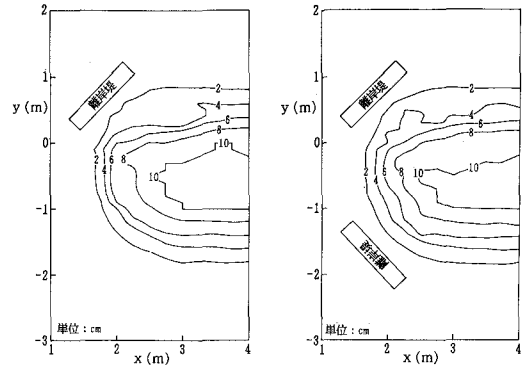


図-7 洲島形状 (ケース①)

図-8 洲島形状 (ケース②)

範囲で強い越流が見られたが, ケース③では離岸堤により海浜流が阻止され, 離岸堤の右端と導波板の間から流入する流れは平面的に広がりつつ流下するため, 洲島の先端部に流れの弱い領域が広く形成された。一方, 下手側にも離岸堤を設置したケース④では, 上手側の離岸堤と洲島の間を流下した流れに対し, 下手側の離岸堤が直角方向に設置された形となっているため, 離岸堤により流れが塞ぎ止められた。このことは, 下流側の離岸堤がかなりの土砂流出防止効果を有することを示唆している。

(2) 地形変化

ケース①, ②について, 造波2時間後の海浜形状をそれぞれ図-7, 8 に示す。ケース①では, 平行等深線であったサンゴ洲島は波の作用で変形したが, 前報で述べた対策工なしの場合にはサンゴ洲島先端部下流側に砂嘴を形成させつつ砂が流出したのに対し, 本実験のケース①の場合, 下手方向への砂の大量の流出は防がれている。波の入射方向に対し離岸堤が斜めに設置されたから, 離岸堤の右端側からの波および流れの進入が著しく, このため右端部を中心に顕著な海浜変形が起きている。すなわち, $x \approx 3 \text{ m}$ 測線上の $z=3 \text{ cm}$ 以上の等深線が凹状となり, 逆に背後の $x \approx 2 \text{ m}$ 測線上では舌状砂州が突出することになった。舌状砂州は波の入射方向へと突出したことになり, 下手側への砂の流出を防いでいる。このことから, 同心円状の等深線をもったサンゴ洲島の先端部において, 中心線が 45° の方向に離岸堤を伸ばすことにより, 洲島の砂が下手方向へ流出するのをかなりよく防止することができることが分かる。

また, 離岸堤を2基設置したケース②では, 波の入射側の離岸堤周辺の花浜変形は良く似ているが, 離岸堤の右側の区域での汀線 ($z=6 \text{ cm}$) の後退量が小さく, 全体に等深線の形状がなだらかである。ケース①では洲島の先端部の $-1 \text{ m} \leq y \leq 0 \text{ m}$ の範囲に土砂が堆積し, 海浜勾配が急となったが, ケース②ではこの範囲の堆積域が小

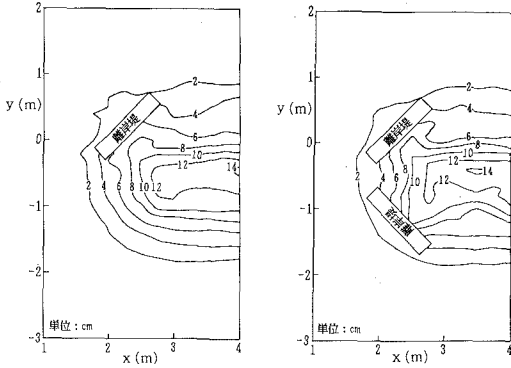


図-9 洲島形状 (ケース③) 図-10 洲島形状 (ケース④)

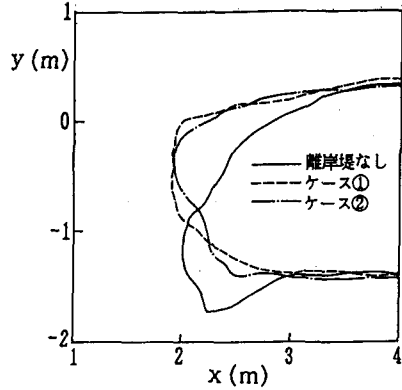


図-11 洲島模型の汀線形状

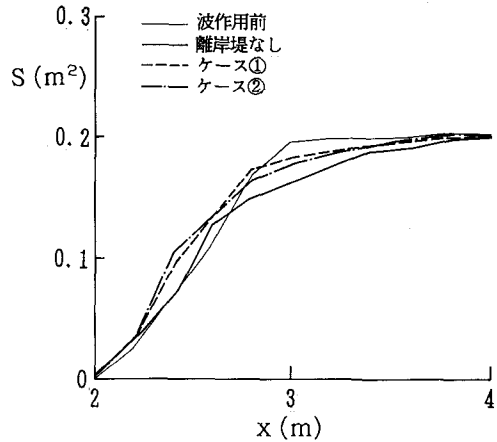


図-12 断面積の沿岸方向分布 (水位条件 $z=6$ cm)

さくなるとともに下手側離岸堤の背後に小規模な舌状砂州が形成されており、土砂の一部が下手側離岸堤の背後に吸い寄せられたことが分かる。また、洲島背後の等深線はいくぶん前進しており、わずかではあるが土砂が洲島の背後まで回り込んだことが分かる。

洲島上で越流が生じる場合における離岸堤の設置効果として、ケース③、④の造波2時間後の海浜地形をそれぞれ図-9、10に示す。ケース③の離岸堤の設置水深は6 cmであってケース①と同一であるが、ケース③では離岸堤背後の舌状砂州の突出度がケース①の場合より大きい。ケース①、③とも、離岸堤は洲島先端を回り込む下流側への土砂流出を防止する効果を有するが、ケース①ではサンゴ洲島先端部の下流側の等深線間隔が密になっていることから、かなりの土砂が洲島先端部を回り込んで堆積したのに対し、ケース③では下手側の等深線にほとんど変化が見られないことから、ケース①に比べて侵食防止効果が高いと考えられる。ケース④の場合、それぞれの離岸堤の背後に舌状砂州が形成され、洲島先端が2方向に伸びた。ただし、下手側の離岸堤背後の舌状砂州の方がよく発達しており、 $z=12$ cmの等高線の形状から、バームを斜めに回り込みつつ洲島の先端方向に流出しようとした流れが下手側離岸堤に遮られ、堆砂が生じたものと考えられる。

4. 漂砂制御効果

地形変化量をもとに離岸堤の漂砂制御効果の評価を試みる。ケース①、②および前報の離岸堤のないケースの波作用2時間後の汀線形状を図-11に示す。離岸堤を設置しない場合、波の入射側で著しく汀線が後退し、逆に洲島の先端部は下流側に大きく突出した。これと比較すると、ケース①、②における洲島先端部の汀線変化量ははるかに小さい。また、ケース①、②の比較では、ケース②の洲島先端部で2つの舌状砂州の形成に伴って汀線が波うっている以外顕著な違いはないことから、汀線比

較で見ると、下手側に設置した離岸堤の漂砂制御効果はそれほど高くはないと考えられる。

ケース①、②および離岸堤のないケースについて、洲島断面積の x 軸方向分布を図-12に示す。波作用前を基準としたとき、離岸堤がない場合の断面積は $x \leq 2.7$ mで増加、 $x > 2.7$ mで減少する傾向を示し、断面積の増加量に比べて減少量ははるかに大きいことから、かなりの土砂が流出したことが分かる。これに対し、ケース①、②では侵食土砂量と堆積土砂量とがほぼ均衡しており、土砂流出が阻止されている。詳細に見ると、初期地形からの断面積変化量はケース②の方が大きく、下手側に離岸堤を設置することにより洲島の断面積変化量が大きくなっている。

次に、水位条件 $z=10$ cmのケース③、④および構造物のないケースについて図-12とまったく同様に整理したのが図-13である。離岸堤なしの場合、断面積は x 軸方向にほぼ一様に減少しており、大量の土砂が流失したことが明らかである。これに対し、ケース③、④では断面積の減少はほとんど見られない。このことから、洲島先端部付近に離岸堤を設置することにより、洲島平坦面

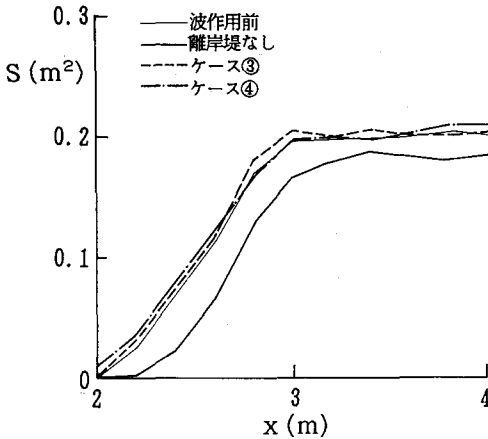


図-13 断面積の沿岸方向分布 (水位条件 $z=10$ cm)

上の土砂流出も阻止されうることが分かる。

以上、洲島先端部の離岸堤は洲島からの土砂流出を効果的に阻止することが分かったが、下手側の離岸堤に関してはそれほど効果は高くなく、 $z=6$ cm の場合には逆に地形変化をいくぶん助長する効果が見られた。このことは、対策工としての離岸堤は卓越波の入射側に設置すべきことを示している。しかしながら、外洋に位置するサンゴ礁では互いに逆方向より波が入射することも多いから、このような場合には洲島先端部の両側に離岸堤を設置することもある有効である。

5. 地形変化の再現計算

ここでは水位条件 $z=6$ cm の離岸堤がない場合、およびケース①を対象として、洲島周辺の地形変化および離岸堤の侵食防止効果について再現計算を試みる。海浜地形変化に関しては one-line モデル、渡辺ほか (1984) の 3 次元地形変化モデル、宇多ほか (1990) の等深線変化モデル等種々の計算手法が開発されているが、本研究で対象とするサンゴ洲島地形のように汀線形の曲率が大きく、波・流れが複雑に変化する場合、3 次元地形変化モデルの適用が有効である。以下では、このモデルを用いて実験で得られた洲島変形の再現計算を行う。計算は波、流れ、地形変化の順に行い、地形変化に伴う波、流れの変化は考慮しない。

洲島周辺の波浪計算については、洲島地形により生じる屈折、回折、砕波減衰および離岸堤の効果を考慮するため、非定常緩勾配方程式 (渡辺・丸山, 1984) を用いた。離岸堤の効果は近藤・武田 (1983) に従い、抗力、慣性力の生じる空隙率 λ の透水層としてモデル化し、砕波減衰に関しては Dibajnia・渡辺 (1987) に従った。以上より、波浪計算の基礎方程式は次式となる。ただし、慣性力項については非線形項を省略してある。

$$\lambda \frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{c^2}{n} (n\zeta) + \left(\alpha + \beta \frac{|Q_x|}{h} + f_b \right) Q_x = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{c^2}{n} (n\zeta) + \left(\alpha + \beta \frac{|Q_y|}{h} + f_b \right) Q_y = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ζ : 水位、 Q_x , Q_y : x , y 軸方向の単位幅流量、 c : 波速、 n : 屈折係数、 λ : 空隙率、 f_b : 砕波減衰係数であり、 α , β は離岸堤による抗力に関わる係数、 τ はブロックの付加質量係数 x を用いて、 $1 + (1+x)(1-\lambda)$ で与えられる。本研究では離岸堤をテトラポッドで製作しているので、この空隙率は 0.6、付加質量係数は 1、 α , β はそれぞれ 0.04, 41 とした。また、砕波減衰項は式 (4) で与えられる。

$$f_b = \alpha_0 \tan \beta \sqrt{\frac{g(\bar{Q}/ch - \gamma_r)}{h(\gamma_s - \gamma_r)}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{Q} = \sqrt{\bar{Q}_x^2 + \bar{Q}_y^2}$, $\gamma_s = 0.4(0.57 + \tan \theta)$, $\gamma_r = 0.4(\xi/h)_0$ であり、砕波減衰項を求める際の海底勾配は波方向方向の海底勾配とした。計算範囲は図-14 に示すとおりであり、沖側境界位置において測定された波高をもとに、 x 軸方向に一樣な入射波高を与えた。

流況計算には西村ほか (1984) のモデルを用いた。ただし、本計算領域には顕著な砕波が生じるリーフエッジ部分が含まれておらず、これに伴う流れの発生が表現できない。このため、沖側境界条件として単位幅流量を強制的に与えた。境界位置の流量分布に関しては実験結果を参考に図-12 に示す流量分布を仮定し、 $x=0$ m 地点における単位幅流量 Q_0 は流況図より判断して、 $Q_0 =$

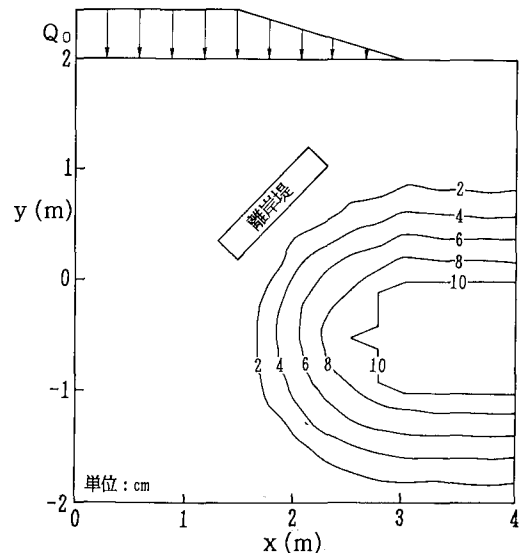


図-14 数値計算の対象範囲

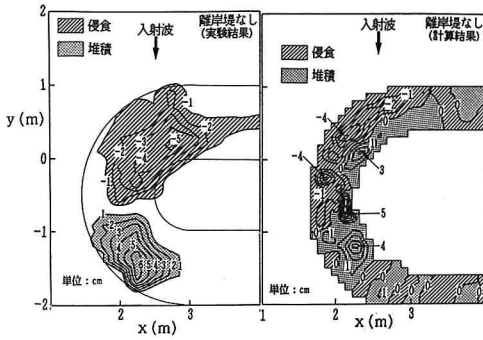


図-15 地形に関する計算結果と実験結果（離岸堤なし）

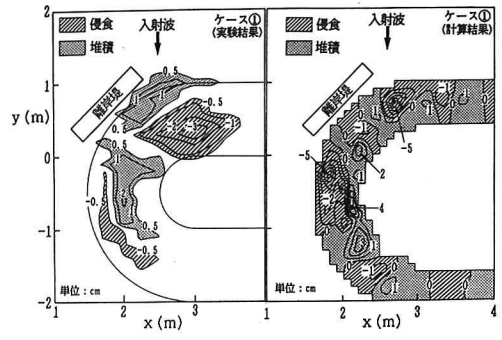


図-16 地形に関する計算結果と実験結果（ケース①）

0.006 m²/s とした。

漂砂量フラックス q_x , q_y は渡辺ほか（1984）に従い、波による漂砂と流れによる漂砂の和として求めた。この時、波と流れによる底面せん断力は田中（1990）をもとに算定し、底質の移動限界は $u_* = 0.2$ cm/s とした。以上より、波と流れによる漂砂量が算定できるが、さらに海底勾配の影響を考慮し、連続式（5）より地形変化量が求められる。ここで、 $\varepsilon_s = 10$ とした。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z}{\partial y} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

5. 計算結果

水位条件 $z = 6$ cm で離岸堤がない場合およびケース①の波作用 2 時間後の地形変化量について、計算結果と実験結果を図-15 に示す。離岸堤がない場合の計算結果は洲島先端部の沖側で侵食、岸側で堆積が生じる傾向やその範囲などをよく再現している。ただし、実験結果と比べて地形変化領域が小さいことや、侵食域と初期汀線位置の間に堆積域が生じるなどの相違点も見られる。地形変化領域が過小評価される原因としては、波のうちあげ帯における漂砂を考慮していないこと、および侵食域では波の作用域が地形変化とともに岸側に拡大することを考慮していないためである。また、計算結果において洲島の上手側の汀線付近に集中的に表われている堆積は、岸向き漂砂によるものであるが、実験では侵食域が拡大することにより、このような一時的な堆積は侵食されて消失したと見られる。

次に、ケース①について計算結果と実験結果を図-16 に示す。ケース①の計算結果に関しては、離岸堤がない場合には著しい侵食が生じた離岸堤背後の領域が堆積傾向に転じたことが再現されている。計算で求められた堆積域は実験結果に比べてかなり小さいが、地形変化を考慮していないためトンボロの形成に伴う堆砂の助長効果が表されていないためと見られる。

6. 結 論

① サンゴ洲島上に越流が生じない条件では、洲島周辺において沿岸漂砂が卓越し、これによる土砂流出が生じるが、洲島先端部上手側に離岸堤を設置すれば土砂流出は効果的に防止できる。この方式はサンゴ洲島の侵食対策として非常に有効なことが分かった。

② サンゴ洲島上に越流が生じる条件では、越流に伴う漂砂により地形変化が生じるが、この場合も洲島先端部に設置した離岸堤はサンゴ洲島の侵食防止を図る上で有効である。結局、現海水準においても、また海水準が上昇した場合にもサンゴ洲島の侵食防止対策としては、サンゴ洲島の先端部、卓越波の入射方向側に 1 基の離岸堤を設置すればよいと言える。

③ サンゴ洲島上を波が越流しない条件において、サンゴ洲島の地形変化および離岸堤の設置効果について 3 次元地形変化モデルによる再現を試みた。これにより、洲島先端部の波の入射側が侵食され、下手側に堆積が生じる傾向や、離岸堤の設置の伴い離岸堤背後に堆積が生じる傾向などが良好に再現された。

参 考 文 献

- 宇多高明・伊藤弘之・小菅 晋（1992）：海面上昇がサンゴ洲島の変形に及ぼすインパクト，海岸論文集，第 39 巻，pp. 381-385.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹（1990）：沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮した海浜変形モデル，海岸論文集，第 37 巻，pp. 304-308.
- 近藤俊郎・武田英章（1983）：消波構造物，森北出版，275 p.
- 田中 仁（1990）：波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式，土木学会論文集，第 417 号/II-13，pp. 285-288.
- 西村仁嗣・丸山康樹・桜井 力（1984）：海浜流の数値計算法について，第 31 回海講論文集，pp. 396-400.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉（1984）：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第 31 回海講論文集，pp. 406-410.
- 渡辺 晃・丸山康樹（1984）：屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法，第 31 回海講論文集，pp. 103-107.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃（1987）：波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル，第 34 回海講論文集，pp. 291-295.