

B-10 地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究

(4)② 島しょ国での海面上昇による消波機能と侵食への影響に関する研究

研究代表者 土木研究所 宇多高明
伊藤弘之

平成3-4年度合計予算額 7,836千円

〔要旨〕熱帯地域ではサンゴ礁上に形成された標高数mの有孔虫の遺骸、サンゴや貝殻のかけらからなる洲島が高度利用されている。しかし、このような低標高の島々では地球の温暖化による海面上昇の影響が多大で島々の消失が危惧される。そこで、本研究ではサンゴ洲島の形成機構、海面上昇に伴う変形機構、侵食対策について実験的に検討した。その結果、サンゴ洲島の形成過程、海面上昇に伴う変形特性を明らかにし、サンゴ洲島の保全手法の提案を行った。

〔キーワード〕サンゴ礁、サンゴ洲島、海面上昇、保全手法。

1. まえがき

近年、地球温暖化に伴う様々な現象が問題となっている。とりわけ海面上昇は海岸保全上重要な問題であり、海面上昇量に関する将来予測や、海面が上昇した場合を想定した影響評価等が盛んに行われている。本研究も、海面上昇による影響評価を行ったものであるが、特にサンゴ洲島上に立地する島しょ国を調査対象とした。洲島とは、リーフ上に形成される海浜であり、熱帯地域では、市街化されている場合がある。将来、顕著な海面上昇が生じた場合、洲島では浸水域が増大するのみならず、島々を囲むリーフの消波機能が低下することにより、高潮や侵食助長の被害が増大することが予想される。四方を海に囲まれたこれらの地域では、沿岸地帯から撤退することができないため、場合によっては壊滅的な被害の生じる恐れがある。そこで、本研究では、2次元移動床水理模型実験によりサンゴ洲島の形成機構、海面上昇によるサンゴ洲島の変形について調べた。また、サンゴ洲島の保全手法についても実験的検討を行ったので報告する。

2. サンゴ洲島の変形事例

洲島の多くは、標高数m程度、面積が数十m～数百m四方の小さな海浜であり、リーフ礁原の満潮面より少し高い位置に形成される。洲島の構成材料は、サンゴ礁海域に生息する有孔虫の遺骸や、サンゴや貝殻のかけら(サンゴ砂,サンゴ礫)である。サンゴ砂やサンゴ礫のほとんどは、リーフ斜面上で生産されるため、これらの堆積物が、波によりリーフ礁原にうちあげられ、堆積することによって洲島が形成される。リーフ上に十分な土砂供給がある場合は、洲島は徐々に発達するが、台風などに伴う暴浪が来襲すると、洲島は著しく侵食され、場合によっては消失する。

洲島の形成に関しては、宇多(1988)がモルディブの北マレ環礁内における、新島の形成について報告している。この報告によると、1987年4月10～14日に発生した高潮により、リーフ斜面に

堆積していたサンゴ塊が、リーフ上にうちあげられ、リーフエッジに沿って2つの新島が形成された。新島の大きさは、南北、東西方向の最長投影長さで25m×18.5m、および164.5m×60.5mであり、新島の高さはMHHW+1.1mであった。この洲島はさらに発達し、現在に至っている。

また逆に、発達した洲島が高波浪により、短期間で消失する場合もある。ニューカレドニアのアイヌ洲島がサイクロンにより消失した例が、Guilcher(1968)によって報告されており、1961年のハリケーンハッチにより、ベリゼの洲島の多くが消失した例が、Stoddart(1963)によって報告されている。さらに、Stoddart(1964)はベリゼの現地調査から、天然のやぶや、下草を伴ったやしの木が発達している洲島では、ハリケーンハッチによって、植生部分が剥されたものの、それ以上は破壊されなかったことを報告している。洲島上の植生が、洲島の安定性を増大させることが分かる。

3. サンゴ洲島の形成機構に関する実験

3.1 実験方法

まず、2次元移動床水理模型実験により、サンゴ洲島の形成過程について検討した。サンゴ洲島の形成機構に関する実験は、平面水槽を用いて行った。幅20m、長さ21.7m、高さ1.2mの水槽を幅2mに仕切り、水槽の端部付近に中央粒径0.28mmの砂により図-1に示す移動床リーフ模型を製作した。リーフ模型の平坦面の岸沖方向の長さは4m、高さは40cmとした。リーフ模型の岸端には幅1mの水路

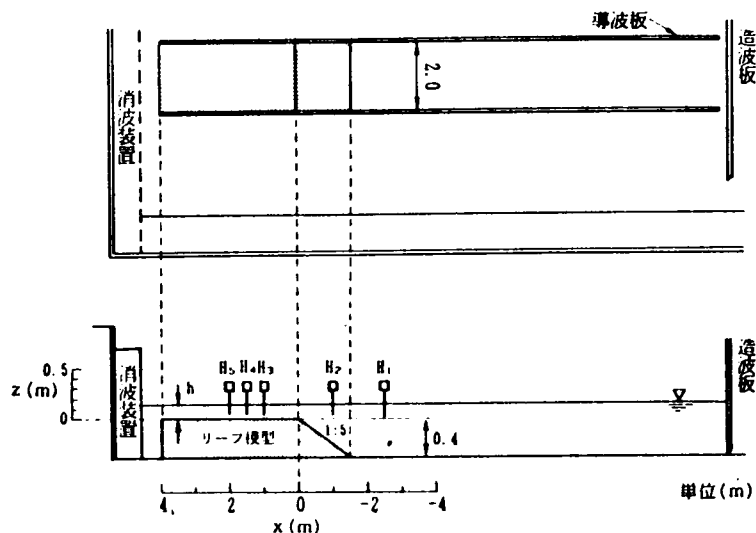


図-1

を設け、それよりリーフ面上を透過した流れが導波板の外側へ流出できるようにした。リーフの平坦面上より鉛直上方にZ軸を、そしてリーフエッジより岸向きにx軸を定めるとき、水位は $Z = -3\text{cm} \sim 6\text{cm}$ の間で16通り変えた。波浪条件は、換算沖波波高が3.2cm、周期が0.8sとし、地形が安定するまで波を作用させた。堀川ほか(1975)が提案した海浜断面変化の分類式に実験条件を代入すると、 $C \approx 5$ が得られることから、実験ではタイプII型の断面形成が予想された。この断面変化では、岸向きまたは沖向きのいずれか一方の漂砂が著しく卓越する条件とはならないため、断面変化にサンゴ礁地形の影響が明瞭に現われると考えられる。実験では、砕波点位置を測定するとともに、波の作用後、海浜地形変化と波高分布を測定した。波高分布は図-1に示す5点で測定した。

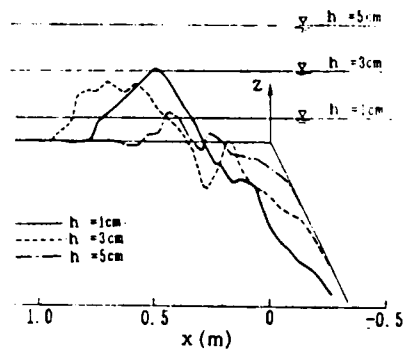


図-2

3.2 実験結果

リーフエッジ付近の海浜断面変化を図-2に示す。

$h_0 = 1\text{cm}$ の場合、リーフエッジ付近が侵食され、その

岸側に堆砂し、バームが形成された。この場合のバームの頂高は約3cmである。 $h_0 = 3\text{cm}$ の場合には越流が生じ、海面下のみ小高い部分が形成された。さらに潮位を上昇させると、地形変化量は大きく減少する。すなわち、リーフ水深が増加するにしたいが、リーフエッジの侵食量は減少し、リーフ上の土砂の堆積量も大きく減少する。

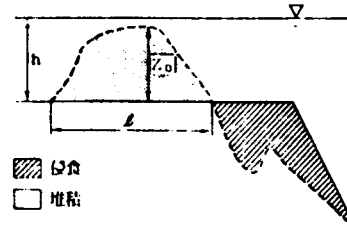


図-3

次に、図-3に示すようにリーフ上の堆積域のリーフ面上の高さ Z_0 と堆積域の幅 l を定めた。そして Z_0 、 l とリーフの相対水深との関係を図-4に、同じく Z_0/l と相対水深の関係を図-5に示す。また、堆積域の標高が高くなり、水面上に表われてバームとなる場合は、洲島の形成を意味することから、 Z_0 のデータを黒塗で区別した。 Z_0/H_0' は、 $h/H_0' \approx 0.6$ で極大値を示し、この時 l/L_0 もほぼ極大値をとる。

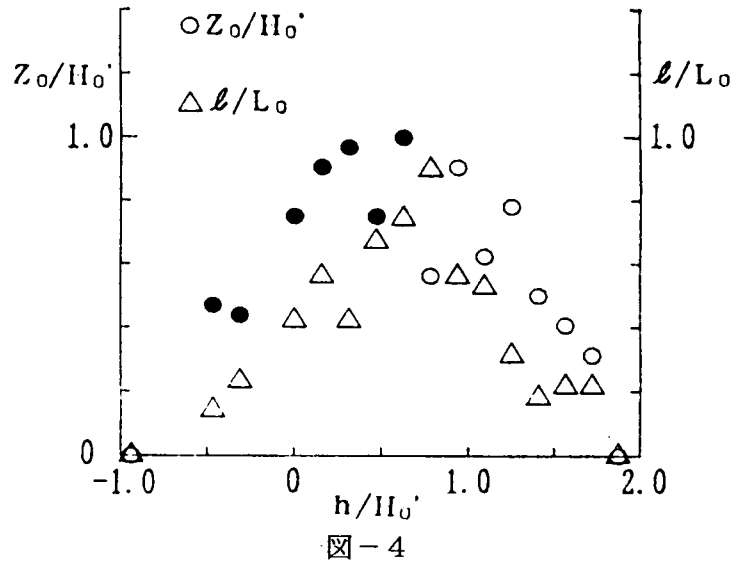


図-4

図-4では $h/H_0' > 2.0$ のデータがないが、 h/H_0' の増大とともに Z_0/H_0' および l/L_0 が単調に減少していること、また海底面に及ぼす波の作用は波高が一定の場合水深とともに減少することから、リーフエッジより岸側で土砂の堆積が生じるかどうかの限界条件は、ほぼ $h/H_0' < 2$ で与えられると言える。一方、 Z_0/l は Z_0 や l が最大となる $h/H_0' \approx 0.6$ では極小値を示す。図-4,5によると堆積域が形成される場合、その堆積域の高さおよび幅は h/H_0' に鋭敏に反応するものの、ピーク付近においては、高さ比べ幅のほうがより急激に増加すると言える。また、堆積量が増えると、 Z_0/l が減少することから、堆積域はより平坦になることが分かる。

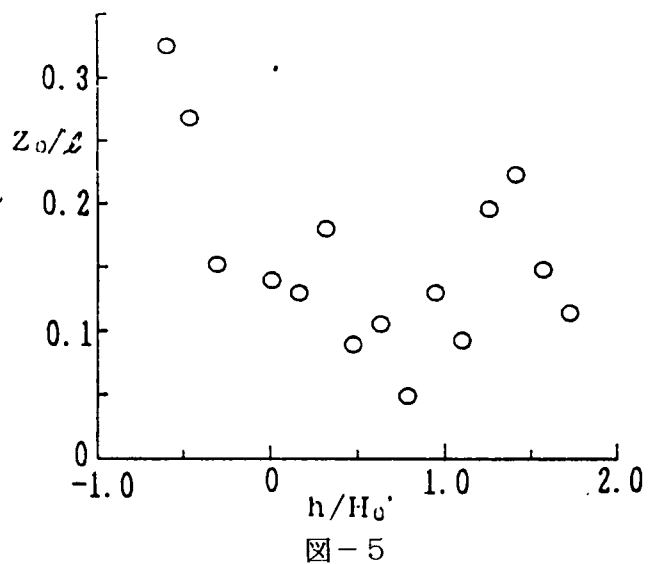


図-5

4. 海面上昇に伴うサンゴ洲島の変形機構に関する実験

4.1 実験方法

次に、海面上昇に伴うサンゴ洲島の変形機構を実験的に検討した。実験には幅16m,長さ23

m,高さ0.6mの平面水槽を用いた。この水槽を幅4mに仕切り、その中に高さ0.4m、天端幅10m、海底勾配1/3の固定床リーフ模型を製作した(図-6参照)。実験では、サンゴ洲島の3次元変形も調べられるように、半円形の等高線をもつサンゴ洲島の端部模型を造った。この条件は、洲島間の開口部をモデル化したものに等しく、リーフ上へ運ばれた海水が開口部を經由して島の裏側へ流れ出ることができる。実験ではリーフ上に中

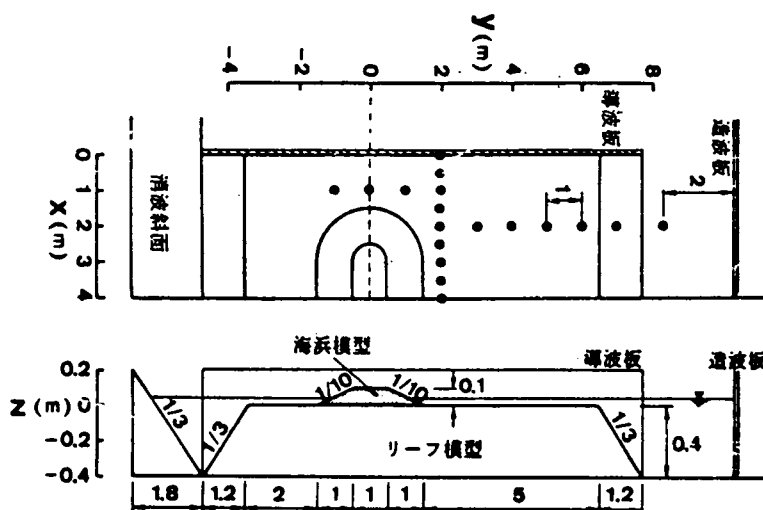


図-6

央粒径0.28mmの砂を敷いて洲島模型を造った。そして洲島の中央を横断する基準線を設け、この基準線と導波板の交点に原点を定め、ここより沖向きを正としてy軸を、また横断方向にx軸を定めた。またリーフの平坦面を基準として鉛直上方にz軸を定めた(図-6参照)。洲島の前浜高さは $z=10\text{cm}$ であって、 $3\text{m} \leq x$ の範囲ではx方向に一樣な台形断面とし、洲島の先端部は1/10勾配斜面とした。実験では入射波高を約4.3cm、周期を1.4sと一定に保ち、潮位を $z=6\text{cm}$ (ケース①)と $z=10\text{cm}$ (ケース②)の2通り設定した。ケース①は現況条件であり、またケース②は海面が上昇し、洲島の前浜がちょうど水没する条件である。測定項目は波高、海浜流の流況および海浜形状である。波高は造波開始直後、図-6に黒丸印で示す測点で測定した。海浜流の流況はフロートの移動をビデオで追跡して測定した。洲島の海浜形状は沿岸方向に0.25m間隔の測線上で測定した。

4.2 実験結果

ケース①,②について、洲島周辺の花浜流の流況を図-7, 8に示す。ケース①($z=6\text{cm}$)の場合は、洲島前面の $3\text{m} \leq x \leq 4\text{m}$ では流れは弱く、逆に洲島先端と導波板の間では非常に強い流れが生じた。また洲島先端部の $x=2\text{m}$ で流れが剥離し、洲島の背後には弱い沿岸流が生じたことが分かる。一方、ケース②($z=10\text{cm}$)の場合は洲島上で越流が生じ、洲島先端部と導波板の間の流速が減少した。水位上昇に伴ってリーフ上の波高減衰率が小さくなり、radiation stressのy

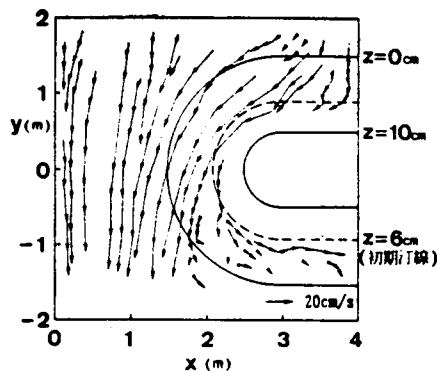


図-7

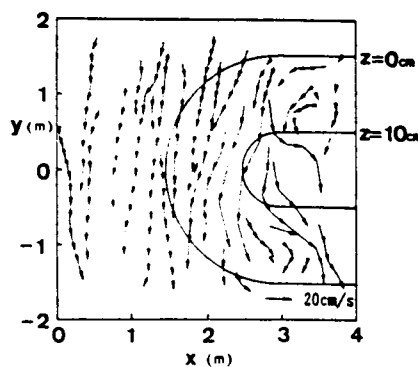


図-8

軸方向勾配が小さくなったこと、および水位の増加や越流の発生により通水断面が増加したことが、洲島先端部と導波板の間の流速が減少した原因と考えられる。

洲島の初期地形(ケース①)を図-9に、ケース①,②の造波2時間後の等深線図をそれぞれ図-10,11に示す。ケース①では、洲島先端部下流側に砂嘴が形成された。また、洲島前面の $2\text{m} \leq x \leq 3\text{m}$ の範囲では、 $4\text{cm} \leq z \leq 8\text{cm}$ の等高線が汀線とほぼ平行に後退したのに対し、 $z = 2\text{cm}$ の等高線はほぼ初期状態を保っている。このことは、波によって顕著な地形変化の生じる限界水深がほぼ 4cm ($z = 2\text{cm}$)にあったことになる。またケース②の場合は、洲島の先端の一部が砂嘴状に突出するとともに、洲島前面の土砂が下流側に堆積して洲島が波の進行方向へ平行移動したように見える。特に $z = 6\text{cm}$ の等高線が洲島前面で大きく湾入しており、この付近の土砂がうちあげられたことが分かる。

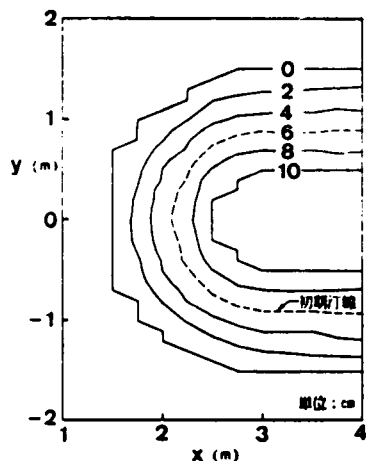


図-9

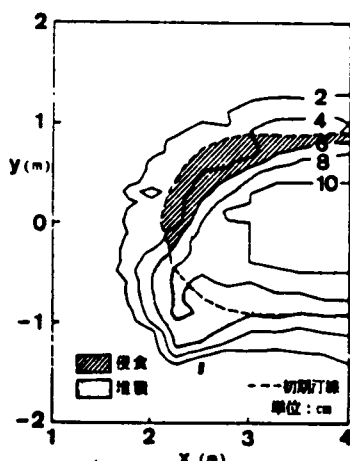


図-10

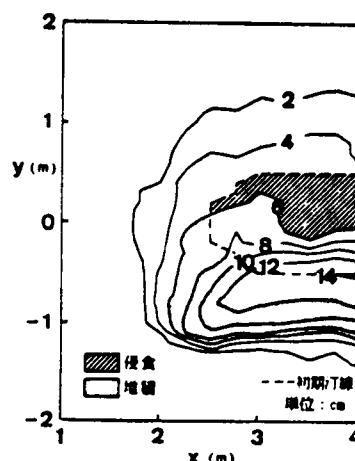


図-11

海浜断面変化を詳細に調べるために、ケース①,②の断面変化をそれぞれ図-12,13に示す。ケース①の場合は洲島前面が侵食され、この砂が洲島背後へ回り込み $x \geq 2.75\text{m}$ の範囲に堆積した。 $x = 2\text{m}, 2.25\text{m}$ の断面変化は越流により生じたと考えられるが、 $x = 2.5\text{m}, 2.75\text{m}$ 断面では、洲

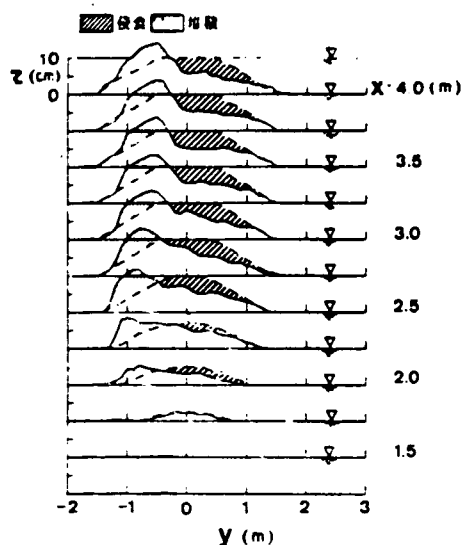


図-12

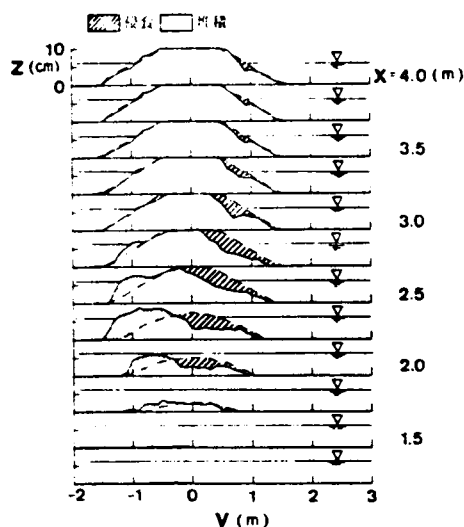


図-13

島上に越波が生じた形跡がないため、洲島先端部を回り込んだ沿岸漂砂により海浜変形が生じたと言える。これに対し、ケース②の場合は、洲島前面の $2.75\text{ m} \leq x \leq 4\text{ m}$ が侵食されて平坦面が形成され、逆にその背後では土砂が堆積して急勾配となった。また、いずれの断面の変形も互いに非常に良く似ており、高い2次元性を有している。また、洲島先端部の $x = 1.75\text{ m}$ 断面は変形していないが、これについては洲島先端部が水没し、波の作用を受けなかったこと、および洲島上に越流が生じ洲島周りの流速が小さくなったことなどが考えられる。

5. サング洲島の保全手法に関する実験

5.1 実験方法

最後に4節の実験結果を踏まえて、サング洲島の侵食対策手法について検討した。実験装置と実験模型は4節と同一とし(図-6参照)、波浪条件は $H_o' = 4\text{ cm}$, $T = 1.4\text{ s}$ 、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-14)。 $z = 6\text{ cm}$ 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

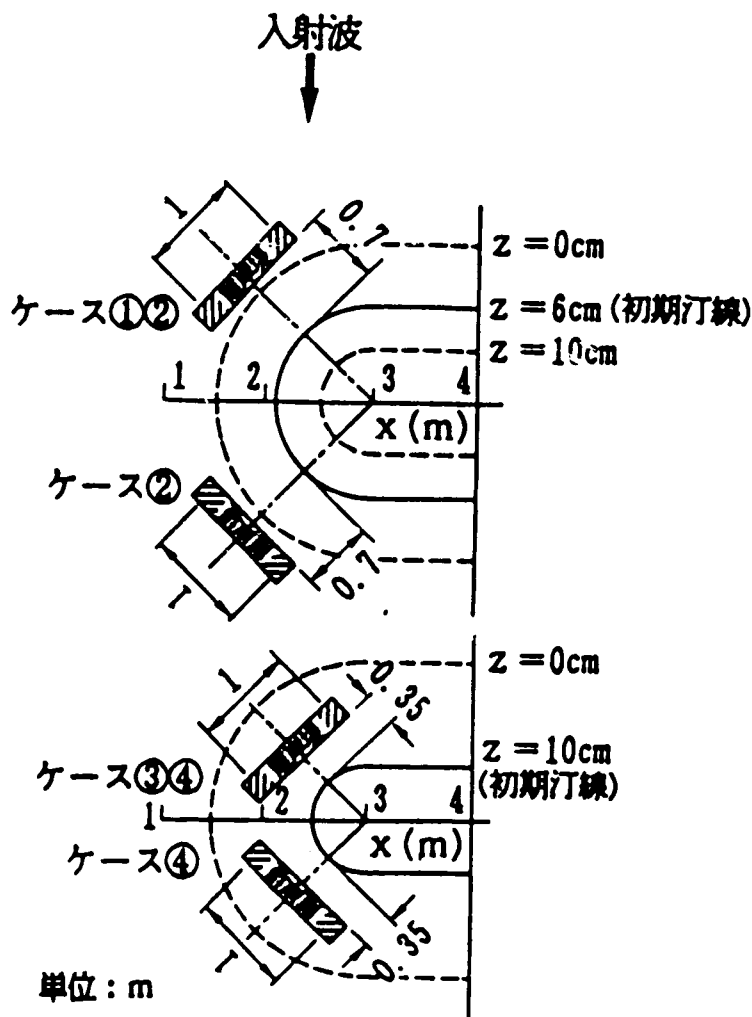


図-14

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。サング洲島模型に波を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-6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。

5.2 実験結果

水位条件 $z = 6\text{ cm}$ 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-15, 16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剥離し、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、離岸堤背後には一对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剥離は見られず、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-16参照)。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 $z = 10\text{cm}$ 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-17,18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。

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-19,20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侵入が著しく、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

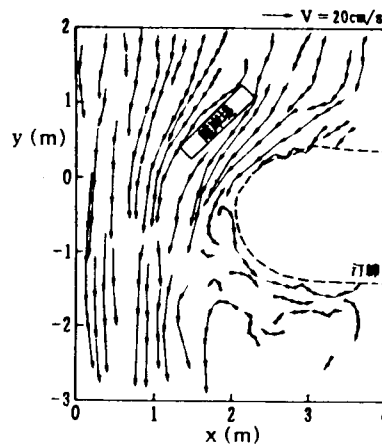


図-15

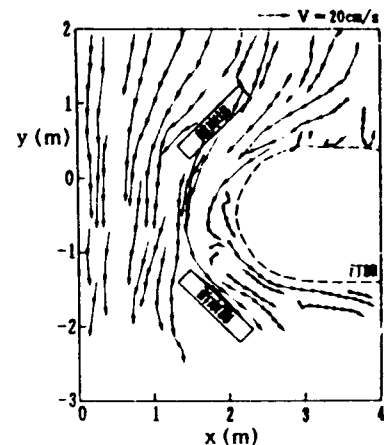


図-16

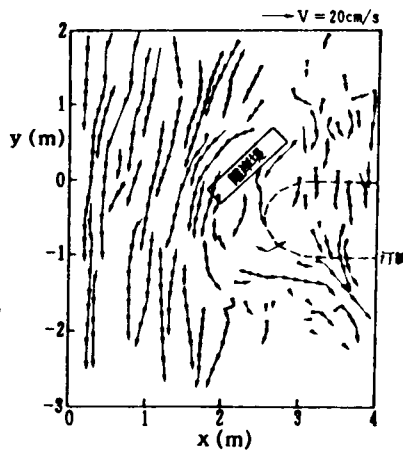


図-17

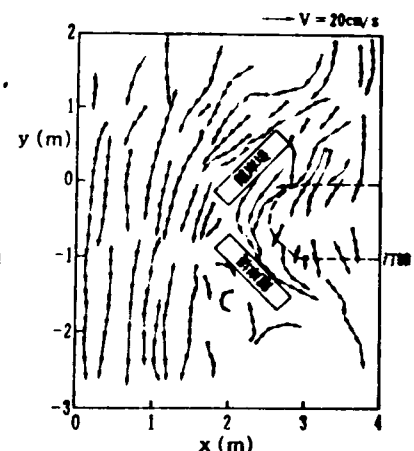


図-18

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海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。

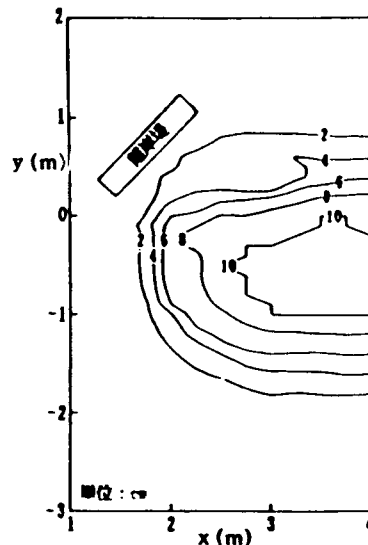


図-19

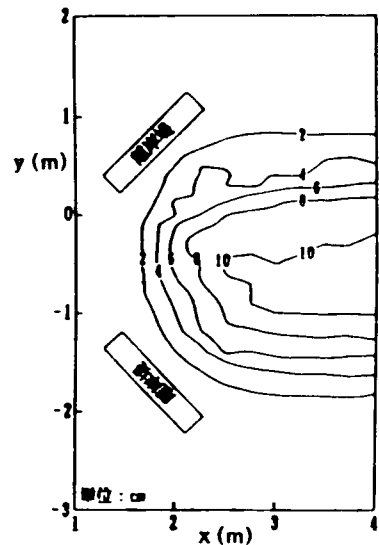


図-20

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-21,22に示す。ケース③の離岸堤の設置水深は6cm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、 $z = 12\text{cm}$ 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。

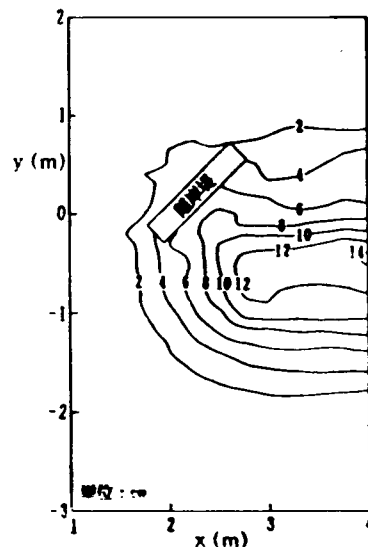


図-21

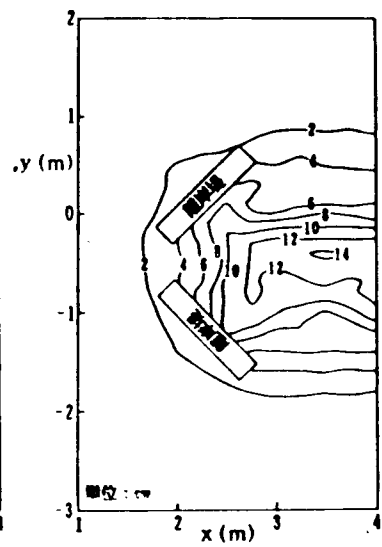


図-22

6. 結論

本報では紙面の都合上、実験結果のみについて述べたが、平成3～4年度に行った研究の成果（宇多ほか，1992a；1992b；1993）は以下に要約される。

①沖波条件を一定として、リーフ上の岸向最大流速を算定したところ、岸向最大流速はリーフ上の相対水深 h/H_0 に対して極大値を持つことが分かった。この水深は、バームが最も発達する水深とほぼ等しいことが示された。

②水位上昇に伴う洲島の断面変形に関する水理模型実験によると、洲島の断面変形は波のうちあげや越流の発達状況により強く影響された。また、単位時間当りの侵食断面積は、換算沖波波高に対するリーフの相対水深により定まることが見い出された。そして単位時間当りの侵食量を予測する式を導いた。これより、リーフ水深がある限界値を越えると、侵食量が急激に増大することを示すことができた。

③リーフ上の洲島周辺の波浪および海浜流の再現計算を行った。波高分布に関しては、潮位が低い場合には実験値と計算値はよく一致した。しかし、洲島が水没する場合には、洲島周辺の波の屈折、回折および碎波変形の精度良い再現は困難であった。一方、海浜流に関しては、越流が生じる場合と生じない場合の特徴を良く再現できた。

④水位上昇に伴い洲島の変形量は著しく増加し、また洲島の変形機構も変化する。水位が低い場合は沿岸漂砂による地形変化が卓越し、洲島先端より背後へと砂が輸送され、砂嘴状に砂が堆積するのに対し、水位が上昇して越流が生じると、越流による2次元的な地形変化が卓越するようになる。またこれらの実験結果は、それぞれモルディブのリーフ上の洲島変形、および久米島ハテノハマ洲島の台風による変形と一致することが見出された。

⑤実験値が現地海岸の状況をよく説明し得たことは、サンゴ洲島を国土の一部とする島しょ国においては、海面上昇が深刻な問題となることを示している。その意味において今後の海面変動について十分注意を払う必要があると言える。

⑥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。

⑦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。

⑧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、離岸堤の設置に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（1988）：モルディブにおける高潮災害の現地調査，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 212～216.

宇多高明・小菅 晋・伊藤弘之・山崎順一（1992a）：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.

- 宇多高明・伊藤弘之・小菅 晋 (1992b) : 海面上昇がサンゴ洲島の変形に及ぼすインパクト, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.381~385.
- 宇多高明・小菅 晋・伊藤弘之 (1993) : サンゴ洲島の保全手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.461~465.
- Guilcher, A. (1968) : Les eaux dessalees du Golfe de Guinee. *Nororis*, 15, pp.133~134.
- Stoddart, D.R. (1963) : Effects of Hurricane Hattie on the British Honduras reefs and cays, October 30-31, 1961. *ARB*, 95, 142p.
- Stoddart, D.R. (1964) : Catastrophic storm effects on the British Honduras reefs and cays. *Nature*, 196.4854, pp.512-515.