

# 波高，水位の変化する条件下での緩勾配海岸の変形に関する 実験的研究

田中茂信\*・張 達平\*\*・山本幸次\*\*\*

## 1. まえがき

沿岸部には沿岸砂州（バー）がしばしば形成されるが、その主要因は砕波現象にあると考えられる。例えば、Sunamura (1989) はバーの各諸元と砕波波高との間に比例関係が成り立つことを示している。また、緩勾配海岸においては多段バーの発達が見られ、各バーの規模は沖合に向かって大きくなる（例えば、石田ほか，1984）。すなわち、緩勾配海岸の沖合には、通常時の波浪の砕波に伴い形成されるバーよりも大規模なものが形成されている。この大規模バー（多段バー）の形成要因としては、高波浪時の1次および2次砕波の影響（Sunamura, 1989）、長周期波の影響、反射定常波の影響（Katoh, 1984）などが考えられているが、まだ定説はないようである。一方、このような大規模なバー（多段バー）が沿岸部に見られることから、海底のバーが相対的海水面低下とともに陸化し、バリアアイランド（バリア）へと発達するとの地形学的な説がある。このバリアの背後には豊富な生態系を有するラグーンが形成されるから、バリアの形成過程を明らかにすることは、近年高まりつつある地球環境の保全の観点から重要な課題と言える。

そこで、本研究では緩勾配海岸における大規模バー（多段バー）の形成過程と、海水面変動に伴う変形特性（バリアへと発達するか否か）について検討した。具体的には高波浪や海水面の変動を想定し、波高および水位を時間的に変化させた条件下での1/100の緩勾配海岸の2次元変形に関する移動床模型実験を行った。ところで、波浪が時間的に変化する場合の2次元海浜変形については砂村・倉田（1981）が、平均水位変動下での2次元海浜変形については服部・井崎（1981）が実験的検討を行っている。しかし、両者の研究は海底勾配1/10、1/20の海岸の2次元変形を対象としたものであり、波高および水位変動下での緩勾配海岸の変形についての研究はほとんどなされていない。本研究では波浪および水位の時間変化と1/100の緩勾配海岸の地形変化を対象としており、

大規模バー（多段バー）の形成過程やバリアの発達過程に関する新しい知見が得られたのでここに報告する。

## 2. 実験方法

実験は幅0.6 m、高さ1.5 m、長さ150 mの2次元水路内で行った。まず、水路底面からの高さ1 mを基準とし（ $Z=0$  cm）、鉛直上方を正とした $Z$ 軸を設定した。そして $Z=30\sim 0$  cmが1/10、 $Z=0\sim -30$  cmが1/100、 $Z=-30\sim -100$  cmが1/10の模型海浜を中央粒径 $d_{50}=0.3$  mmの実験砂を用いて整形した（図-1）。岸沖方向には $Z=0$  cmの位置を基準とし（ $Y=0$  m）、沖側が正となる $Y$ 軸を設定した。ここで、 $Z=0\sim -30$  cmの海底勾配を1/100に設定したのは、石田ほか（1984）が示した押水羽咋海岸において多段バーの形成位置の海底勾配がほぼ1/100であることによる。また、実験の制約上、水面下に海底勾配が1/100から1/10へと変化する点を設けたが、この影響が緩勾配斜面（1/100）の変形に生じないように、勾配変化点の水深を $Z=-30$  cmとしてある。水面下に勾配変化点がある海底地形の変形として、勾配変化点の沖側が侵食されて緩勾配斜面上へ堆積する場合がある。この現象が生じるか否かについては、勾配変化点の水深 $h$ と換算沖波波高 $H_0$ の比によって分類でき、 $h/H_0 < 2$ であれば、緩勾配斜面上への土砂の堆積が生じるとされている（宇多ほか，1992）。言い換えれば、 $H_0$ が $h/2$ より小さいと緩勾配斜面への土砂の堆積は生じないことになる。したがって、本実験では勾配変化点が緩勾配斜面に及ぼす影響の小さい $H_0 < 15$  cmの波浪を実験波として選択できる。そこで、水位を $Z=-5\sim 10$  cmの範囲で4条件、波高を $H_0=5\sim 15$  cmの範囲で3条件を設定し、それらの組み合わせで4ケースの実験を行った。ケース①、

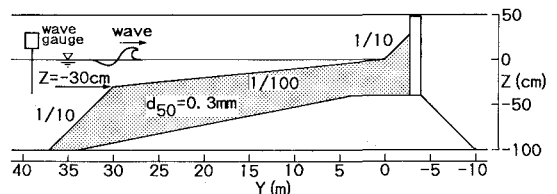


図-1 模型海浜

\* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室長  
 \*\* 正会員 理博 建設省土木研究所海岸研究室 受け入れ研究員  
 \*\*\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

②では波高をほぼ一定とし水位を時間的に変化させ、ケース③では水位を一定とし波高を時間的に変化させた。また、ケース④では波高および水位を時間的に変化させた。なお、各ケースの波高および水位は実験装置の制約上、連続的にはなく段階的に変化させた。また、入射波高は  $Y=39\text{ m}$  ( $Z=-100\text{ cm}$ ) に設置した容量式波高計で測定した。

3. 実験結果

波高を  $10\text{ cm}$ 、周期を  $T=1.76\text{ s}$  と一定に設定し、水位を時間的に変化させた場合 (ケース①) の波高および水位の測定値と、 $t=0\sim 28\text{ hr}$  の地形変化を図-2に示す。水位を  $Z=-5\text{ cm}$  に設定した  $t=0\sim 4\text{ hr}$  では  $Y=24\sim 27\text{ m}$  で侵食され、 $Y=22\sim 24\text{ m}$  に土砂が堆積しバーが形成された。バーの頂部の位置は碎波位置よりやや岸側にあり、形成されたバーは碎波に起因すると考えられる。水位を  $Z=0\text{ cm}$  とした  $t=4\sim 8\text{ hr}$  では  $t=4\text{ hr}$  に形成されたバーの規模がやや大きくなった。水位を  $5\text{ cm}$  上昇させたため碎波位置は  $Y=16\text{ m}$  と岸側へ移動したが、その碎波による顕著な地形変化は見られず、砂漣が消失しなだらかな断面形となった。水位を  $Z=5\text{ cm}$  に上昇させた  $t=8\sim 12\text{ hr}$  では  $Y=23\text{ m}$  のバーが発達するとともに、 $Y=16\text{ m}$  に新しいバーが形成された。この位置は  $t=4\sim 8\text{ hr}$  の碎波位置と一致しているが、 $t=8\sim 12\text{ hr}$  の碎波位置は  $Y=10\text{ m}$  にある。また、この時間帯では砂漣が形成された。水位を  $Z=10\text{ cm}$  まで上昇させた  $t=12\sim 16\text{ hr}$  では  $Y=23\text{ m}$  のバーはほとんど変化していないが、 $Y=16\text{ m}$  のバーがやや発達し、 $Y=11\text{ m}$  に新しいバーが形成された。この新しいバーの位置は  $t=8\sim 12\text{ hr}$  の碎波位置とほぼ等しく、前 stage と同様の地形変化が生じた。また、 $t=12\sim 16\text{ hr}$  の碎波位置は  $Y=4\text{ m}$  にあり、その岸側には砂漣が見られ、 $Y=5\text{ m}$  には比高の小さいバーが形成された。 $t=0\sim 16\text{ hr}$  で段階的に水位を  $Z=-5\sim 10\text{ cm}$  へと上昇させた結果、低水位のもとで碎波位置にバーが形成され、水位が上昇すると前水位のもとで形成されたバーが発達し規模が大きくなり、上昇した水位に対応する碎波位置にバーが形成される地形変化の繰り返しとなり、最終的には  $Y=23, 16, 11, 4\text{ m}$  にバーが形成された。

水位を  $Z=10\text{ cm}$  から  $Z=5\text{ cm}$  に下げた  $t=16\sim 20\text{ hr}$  では、 $Y=17\text{ m}$  で碎波し、その結果として  $Y=16\text{ m}$  のバーが発達した。また、沖側の  $Y=23\text{ m}$  のバーの規模もやや大きくなった。水位が同じ  $t=8\sim 12\text{ hr}$  の碎波位置よりも、この時間帯の碎波位置はかなり沖側になったが、これは  $t=16\text{ hr}$  までに発達した  $Y=16\text{ m}$  のバーの影響によると考えられる。水位を  $Z=0\text{ cm}$  に下げた  $t=20\sim 24\text{ hr}$  では  $Y=23\text{ m}$  で碎波し  $Y=23\text{ m}$  のバー

が大きくなった。また、 $Y=16\text{ m}$  のバーはやや尖った形状となり、その頂部はやや陸側に移動した。水位を  $Z=-5\text{ cm}$  に下げた  $t=24\sim 28\text{ hr}$  では  $Y=28\text{ m}$  で碎波し  $Y=23\text{ m}$  のバーの規模が大きくなるとともに、その頂部は陸側 ( $Y=21\text{ m}$ ) に移動した。 $Y=15\text{ m}$  のバーの頂部は水面すれすれにあり、見方によってはバリアで、その岸側の閉鎖水域はラグーンとも言える。しかし、実際には2次および3次碎波した小さい波が  $Y=15\text{ m}$  のバーを越えていることが観察され、厳密な意味ではバリアとは言えず、 $t=0\sim 28\text{ hr}$  の水位変動に伴う地形変化ではバリアの形成過程を再現できなかったことになる。

そこで、水位を  $Z=-5\text{ cm}$  から  $Z=10\text{ cm}$  まで上昇させて波を作用させた  $t=28\sim 36\text{ hr}$  では  $Y=15\text{ m}$  で碎波し、その影響で  $Y=21, 15\text{ m}$  のバーの形状がややなだらかになり、 $Y=9\text{ m}$  のバーの規模が大きくなるとともに尖った形状になった (図-3)。しかし、バーが陸化するには至らなかった。水位を  $Z=10\text{ cm}$  から  $Z=-5\text{ cm}$

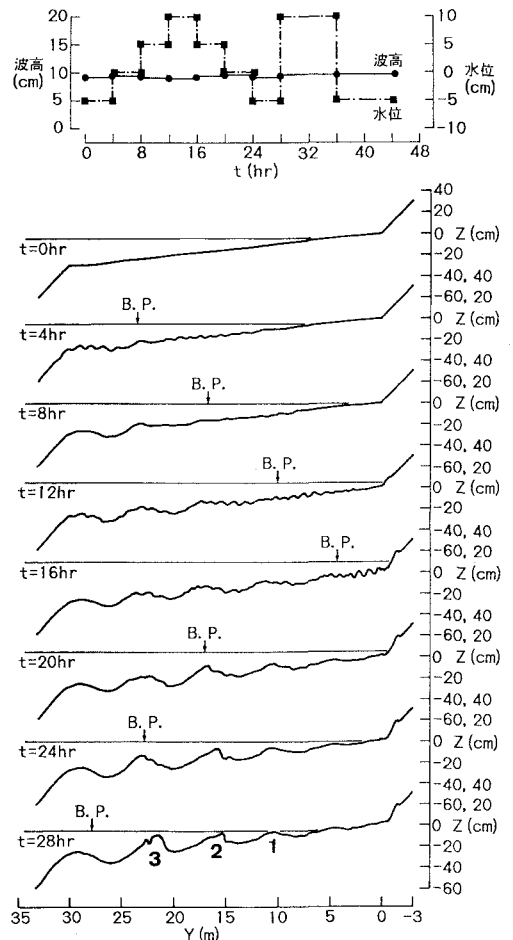


図-2 実験結果 (ケース①,  $t=0\sim 28\text{ hr}$ )

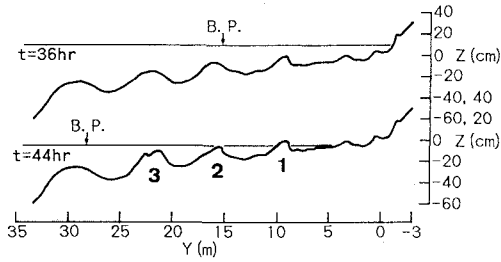


図-3 実験結果 (ケース①,  $t=32\sim 44$  hr)

に下げた  $t=36\sim 44$  hr では  $Y=28$  m で碎波し  $Y=21$  m および  $Y=15$  m のバーが再び尖った形状になるとともに規模が大きくなった。このため、 $Y=21$  m より岸側では小さい波が作用する条件となり、 $Y=15$  m のバーはほぼ水面で、 $Y=9$  m のバーは水面上に突出した状態で安定した地形となった。結果的には  $Y=9$  m のバーとその岸側に水域が見られることから、 $Y=10\sim 4$  m にバリアとラグーンが形成されたことになる。このことから、波の作用しない条件下で海水面の急激な相対的低下が生じれば、海水面変動下で徐々に発達した大規模バーが陸化し、ラグーンを背後に有するバリアになりうると考えられる。

波高を  $H_0=10$  cm, 周期を  $T=1.46$  s と一定に設定し、水位を  $Z=5\sim -5$  cm の間で変化させた場合(ケース②)の波高および水位の測定値と、 $t=0\sim 40$  hr の地形変化を図-4 に示す。ケース①では水位を段階的に上げて、その後下げる条件としたが、ケース②では水位を段階的に下げて、その後上げる条件とした。水位が  $Z=5$  cm の  $t=0\sim 8$  hr では  $Y=10$  m で碎波し、 $Y=13$  m に小さいトラフが形成されているが、ほとんど地形変化は生じていない。水位を  $Z=0$  cm に下げた  $t=8\sim 16$  hr では  $Y=16$  m で碎波し、 $Y=19, 15$  m にバーが形成されたが、沖側のバーほど規模が大きい。さらに  $Z=5$  cm と水位を下げた  $t=16\sim 24$  hr では  $Y=23$  m で碎波し、 $Y=21$  m にバーが形成された。前 stage と比較すると  $Y=19$  m のバーが発達しつつ沖側へと移動したような地形変化となった。水位を再び  $Z=0$  に上げた  $t=24\sim 32$  hr では  $Y=20$  m で碎波し、 $Y=21$  m のバーの頂部が侵食されてしまったが、 $Y=28, 24, 18$  m のトラフが顕著になった。この地形変化からバーが形成されても碎波位置との関係から、バーは侵食されてしまう不安定な地形であることが分かる。水位を  $Z=5$  cm まで上昇させた  $t=32\sim 40$  hr では  $Y=16$  m で碎波し、 $Y=14$  m に比較的大規模なバーが形成された。 $Y=24$  m より沖側の地形はほとんど変化していないが、 $Y=20$  m にトラフが形成された。これは  $Y=14$  m のバーによる反射波の影響と推定される。

水位を  $Z=0$  cm, 周期を  $T=1.76$  s と一定にして波高

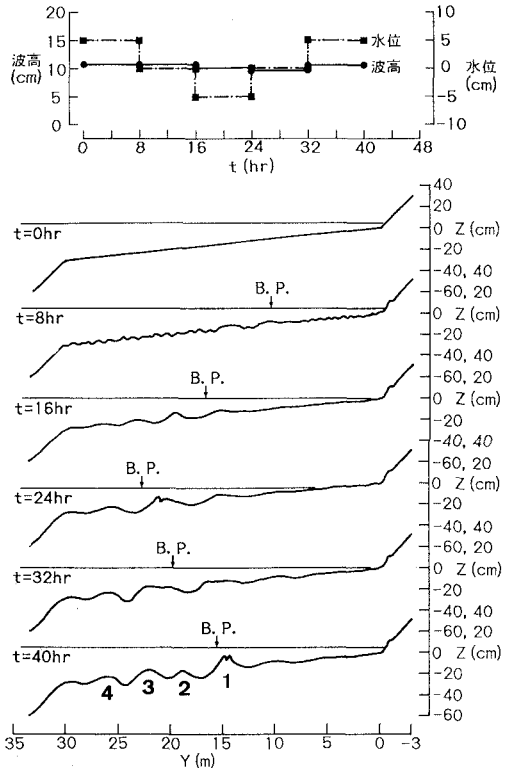


図-4 実験結果 (ケース②)

を時間的に変化させた場合 (ケース③) の波高および水位の測定値と、 $t=0\sim 40$  hr の地形変化を図-5 に示す。約 5 cm と波高の小さい波浪を作用させた  $t=0\sim 8$  hr では  $Y=10$  m で碎波し、地形変化はそれほど生じておらず砂堆の形成が見られるのみである。波高を約 10 cm と高くした  $t=8\sim 16$  hr では  $Y=11$  m で碎波し  $Y=18$  m 付近にバーが形成された。さらに、約 15 cm と波高を高くした  $t=16\sim 24$  hr では  $Y=29$  m で碎波し  $Y=18$  m に形成されたバーの沖側が侵食され、その土砂が岸側に堆積してバーはやや大きくなり  $Y=16$  m へと陸側に移動した。このときバー頂部の高さは  $Z=-5$  cm であり陸化することはなかった。 $t=24\sim 32$  hr に波高約 10 cm の波を作用させたところ、 $t=24$  hr までに形成されたバーにより部分重複波が生じて、バーを岸側の起点としてその沖合にトラフ間の距離が約 7 m で、高さが約 20 cm の大規模バーが形成された。さらに波高 5 cm の波を 8 時間 ( $t=32\sim 40$  hr) 作用させたがほとんど変化は生じず、結果的には 2 つのバーが形成された。

周期を  $T=1.76$  s と一定にし、波高と水位を時間的に変化させた場合 (ケース④) の波高および水位の測定値と、 $t=0\sim 48$  hr の地形変化を図-6 に示す。水位を  $Z=10$  cm, 波高を約 20 cm とした  $t=0\sim 8$  hr では  $Y=22$  m

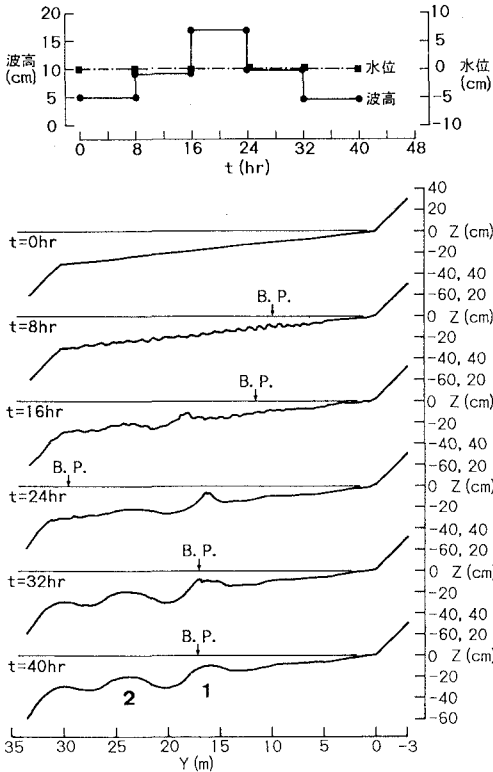


図-5 実験結果 (ケース③)

で碎波し  $Y=24$  m で堆積が、 $Y=21$  m で侵食がわずかに生じたのみであった。水位を  $Z=5$  cm, 波高を 10 cm に設定した  $t=8\sim 16$  hr では  $Y=10$  m で碎波し  $Y=10, 17, 23$  m にバーが形成された。碎波位置は同じ水位と波高の条件であったケース①の  $t=8\sim 12$  hr のそれ ( $Y=9$  m) とほぼ一致する。水位を  $Z=0$  cm, 波高を 5 cm に設定した  $t=16\sim 24$  hr では  $Y=16$  m で碎波し  $Y=17$  m のバーがやや大きくなった。また、 $Y=23$  m のバーはほとんど変化しなかったが、 $Y=10$  m のバーは消失した。前 stage と同じ水位、波高に設定した  $t=24\sim 32$  hr では  $Y=16$  m のバーが鋭角になったが顕著な地形変化は見られない。水位を 5 cm, 波高を 10 cm に設定した  $t=32\sim 40$  hr では碎波位置が  $Y=17$  m へと沖側に移動し、その前後のトラフが深くなり  $Y=16$  m のバーが大きくなった。また、 $Y=23$  m のバーは大きくなったが、 $Y < 10$  m では地形変化はほとんど生じていない。水位を 10 cm, 波高を 15 cm に設定した  $t=40\sim 48$  hr では  $Y=23$  m で碎波し、その位置のバーがやや侵食されたが、 $Y=16$  m のバーはさらに大きくなった。このケースでは水位、波高の変動とともにバーが徐々に発達する過程が得られた。

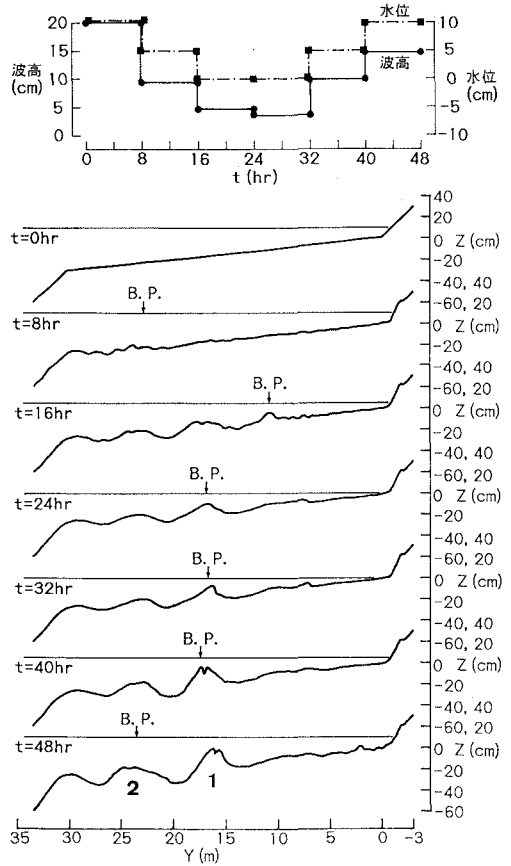


図-6 実験結果 (ケース④)

#### 4. 考 察

波高、水位を時間的に変動させることによって、1/100 の緩勾配海岸においては多段バーが形成されることが実験により明らかになった。そこで、多段バーの諸元の定義を試みる。Sunamura (1989) はバーの諸元を図-7 のように定義している。この場合、碎波位置と碎波波高が重要なパラメータとなる。しかし、本実験では波高、水位を時間的に変動させたため、碎波位置と碎波波高が時間的に変動し、それらと最終的に形成された多段バーとの関係が見出せない。そこで、最終的な多段バーの形状のみから図-8 のように 1 つのバーの諸元を定義する。これによると  $r_{B1} = h_t - h_c, l_B$  に相当するのが  $l (l_B \geq l_t)$  となり、 $r_{B2}$  に相当するパラメータは図-7 にはない。Sunamura (1989) は  $h_t = H_b, h_c = 0.59H_b$  の関係が成り立つとしているから  $r_{B1} = 0.41H_b$  となる。そこで、各ケースの多段バーの  $r_{B1}$  の値からそれらのバー形成に必要と考えられる碎波波高を推定し表-1 に示す。表-1 には各ケースで測定された碎波波高の最大値も示した。波高のみを変化させたケース③は測定値と推定値が同じ程度とな

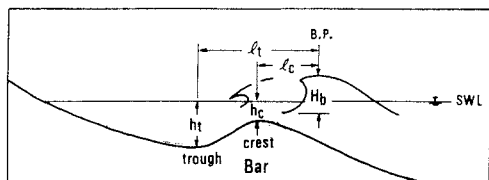


図-7 Sunamura (1989) によるバーの定義

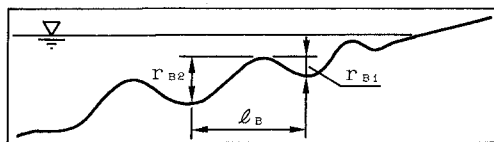


図-8 多段バーの諸元の定義

表-1 多段バーの諸元と碎波波高の推定値

ケース	波高 $H$ (cm)	波長 $L_0$ (m)	バー 番号	$l_B$ (m)	$r_{B1}$ (cm)	$r_{B2}$ (cm)	碎波波高 $H_b$ (cm)	
							測定値	推定値
①	9.1~ 9.7	4.8	1	5.4	10.0	17.5	14.7	24.4
			2	6.3	12.5	18.8		30.5
			3	6.5	15.0	28.8		36.6
②	8.5~ 10.7	3.3	1	4.5	11.3	22.5	12.0	27.6
			2	3.1	8.8	8.8		21.5
			3	4.0	8.8	16.3		21.5
③	4.7~ 17.0	4.8	1	6.8	6.3	22.5	22.9	15.4
			2	7.5	11.3	13.8		27.6
④	3.5~ 20.8	4.8	1	6.0	18.8	33.8	22.7	45.9
			2	7.5	16.3	18.8		39.8

っており、この場合の多段バーは碎波によって形成されたとの推定が成り立つ。しかし、ケース①, ②, ④では推定値が測定値の約2倍となり、これらのケースで形成された多段バーは碎波とは別の要因で形成されたバーと推定される。この複数の大規模バーの形成過程としては、ケース①のバー3 (図-2)、およびケース④のバー1の経時変化から、ある条件下での碎波現象によって形成されたバーが、波高および水位変動に伴って徐々に発達し、作用波の何倍かの波で形成される規模のバーになると考えられる。この場合、波高および水位変動の履歴が形成された大規模バーに残されているため、小さい波浪に対しては比較的安定な地形になると考えられる。したがって、この大規模バーは急激な相対的海水面低下が生じればバリアへと発達すると考えられる(図-3参照)。また、

ケース②, ③の比較から緩勾配海岸における複数の大規模バーの形成には波高変動よりも、水位変動の影響が大きいと指摘できる。

### 5. あとがき

緩勾配海岸においては水位、波高の変動する条件下での海浜変形により複数の大規模バーが形成されることが実験により分かった。この大規模バーは、ある条件下での碎波現象によって形成されたバーが、波高および水位変動に伴って徐々に発達し、作用波の何倍かの波で形成されるバーの規模と同程度までに成長する。したがって、最終的な大規模バーは作用波に対し比較的安定な地形となり、急激な相対的海水面低下が生じれば岸側にラグーンを有するバリアへと発達する可能性が実験により示された。また、実験では緩勾配海岸では水位変動に伴い多段バーが形成された。このことは、従来議論されている多段バーの形成要因(例えば、Sunamura, 1989, Katoh, 1984)とは別に、水位変動による水理現象の変化なども多段バーの形成要因として考慮しなければならないことを示唆している。しかし、実験ではその機構まで明らかにすることはできなかった。この意味からも現地データの解析や実験的検討を進め、多段バー(複数の大規模バー)の形成機構を明らかにする必要がある。

### 参考文献

石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一 (1984): 渚ドライブウェーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 355-359.

宇多高明・小菅 晋・伊藤弘之・山崎順一 (1992): 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.

砂村継夫・倉田雄司 (1981): 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 222-226.

服部昌太郎・井崎嘉幸 (1981): 平均水位変動下での岸沖漂砂と海浜地形, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 202-206.

Katoh, K. (1984): Multiple longshore bars formed by long period standing waves, 港湾技術研究所報告, Vol. 23, No. 3, pp. 3-46.

Sunamura, T. (1989): Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling, V. C. Lakhan and A. S. Trenhaile (Editor), Applications in Coastal Modeling, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-213.