

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

砂 村 継 夫*・倉 田 雄 司**

1. 実験目的

時間的に変化しない一定の特性をもつ波浪に対する砂浜の変形に関しては、既に多数の実験が行われ、かなりの成果が得られている。しかし実際の海岸では入射波の特性は時間的に絶えず変化しているので、既往の実験結果を直接現地に適用するには問題が多い。現地海岸では入射波の時間的な変化に対応して汀線位置や海浜形状の変化が生じている。そこで実験室において時間的に変化する波を砂浜に作用させた場合、どのような地形変化が生ずるのかを調べるため二次元水路実験を試みた。従来、入射波特性を時間的に変化した実験は、二、三行われている^{1)~3)}が、このような目的をもった実験はほとんど行われていないようである。

2. 実験装置・条件・方法

長さ 21m、高さ 0.7m、幅 0.5m の造波水路（筑波大学水理実験センター所属）の一端に粒径 0.2mm の標準砂で 1/10 勾配の斜面を作り、これに特性の異なる実験波をサイクリックに作用させた。一樣水深部での水深は 40cm とした。実験条件を表-1 に示す。表中 C の値は次式により求めたもので、汀線の前進・後退を示す指標（ $C \geq 8$: 後退, $C \leq 4$: 前進）である⁴⁾。

表-1 実験条件

ケース	沖波波高 H_0 (cm)	周期 T (s)	波形勾配 H_0/L_0	C^*	備 考
1	6.4	1.0	0.041	8.9	台風時の波
	3.1	2.0	0.0050	2.8	静穏時の波
2	6.4	1.0	0.041	8.9	台風時の波
	3.2	1.5	0.0091	3.4	静穏時の波
3	6.4	1.0	0.041	8.9	台風時の波
	3.2	1.0	0.021	4.6	静穏時の波
4	8.9	1.0	0.057	12.4	台風時の波
	3.1	2.0	0.0050	2.8	静穏時の波
5	11.2	2.0	0.018	9.9	台風時の波
	3.1	2.0	0.0050	2.8	静穏時の波

* $\tan \beta = \text{const.} (=0.1)$ として計算した。

* 正会員 工博 筑波大学助教授 地球科学系

** 筑波大学学生 自然科学地球科学専攻
(現在、大学院教育研究科)

$$C = (\tan \beta)^{0.27} (H_0/L_0) (D/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 : 沖波波高, L_0 : 沖波波長, D : 底質粒径, $\tan \beta$: 海底勾配である。各ケースにおいて、波形勾配の大きい方を台風時の波、小さい方を静穏時の波と便宜的に呼ぶことにする（表-1）。実験はいずれのケースにおいても、初期勾配 1/10 の海浜に静穏時の波を 1 時間作用させた後、台風時の波（作用時間: 1 時間）と静穏時の波（10 時間）とを交互に 4 サイクル作用させて、一定時間ごとに海浜プロファイル、汀線位置および碎波特性（碎波型式・波高・水深・位置）を測定・観察した。測定されたプロファイルを基にして、SWL 上の土砂量を求めた。なお、ここで 1 サイクルとは台風時の波の作用開始時から次の静穏時の波の終了時までをいう。

3. 実験結果

図-1~5 に示す。図中のプロファイルに付されている $A \sim I$ の記号は、時間軸（下側の図参照）に付されているものにそれぞれ対応し、時間を示す。

ケース 1: 初期地形に静穏時の波を 1 時間作用させると堆積が生じ berm が陸上に形成されて汀線が前進する（図-1(a)）。その後の台風時の波で berm を構成していた砂は沖へ運ばれ bar が作られ汀線は後退する。再び静穏時の波を作用させると bar は岸方向へ移動し岸に乗上げ berm が形成される。このような侵蝕・堆積の繰返しは、汀線位置（ X_s ）および SWL 上の土砂量（ V ）の時間的な変化に明瞭に表われている（図-1(b)）。台風時の波の碎波型式はほとんどの場合 plunging で、碎波点は最終サイクルに向うにつれて、岸側へ移動した。静穏時の碎波は、いずれのステージにおいても、plunging 型で始まり spilling を経て surging 型で終わった。

ケース 2: ケース 1 と同様、台風時の波によって bar が、静穏時の波によって berm が形成され、これらの特徴をもつ地形が外力の変化に応じてサイクリックに発達している（図-2(a)）。台風時の波による汀線の後退量が、静穏時の波による前進量を上まわるため、サイクルが増すごとに X_s は岸側へ移動し、 V も全体的に減少している（図-2(b)）。台風時の波の碎波型はステージ $A \rightarrow B$ で plunging, $C \rightarrow D$ で plunging と spilling, $E \rightarrow$

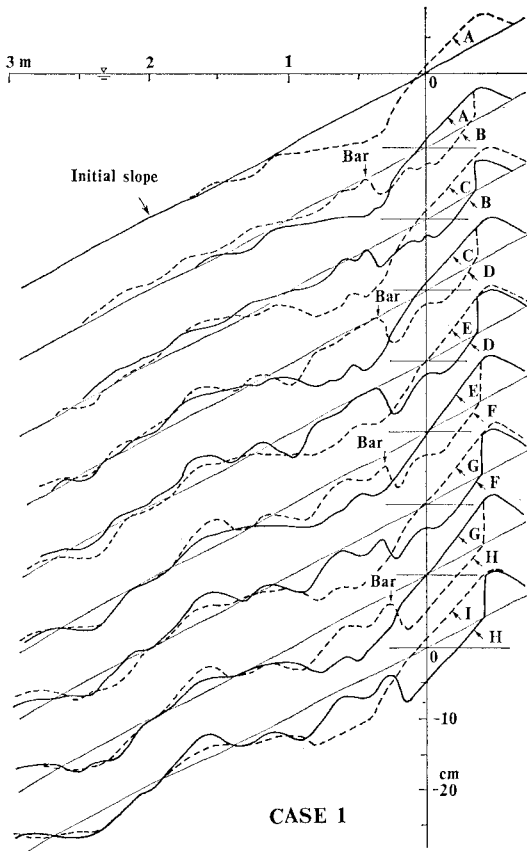


図-1(a) プロファイルの時間的変化 (ケース 1)

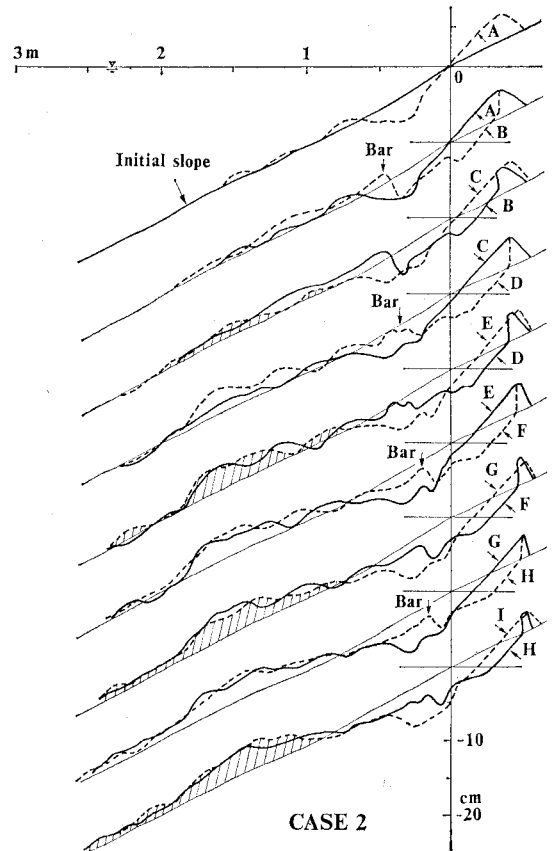


図-2(a) プロファイルの時間的変化 (ケース 2)

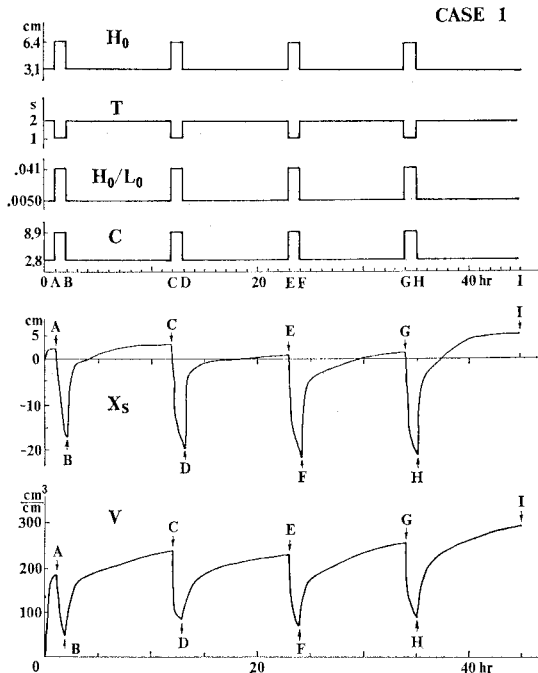


図-1(b) 波浪特性, C 値, 汀線位置 (X_s), および SWL 上の土砂量 (V) の時間的変化 (ケース 1)

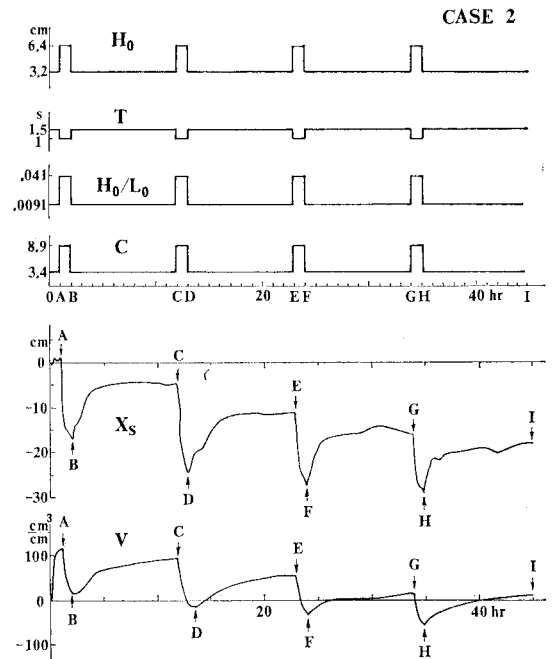


図-2(b) 波浪特性, C 値, 汀線位置 (X_s), および SWL 上の土砂量 (V) の時間的変化 (ケース 2)

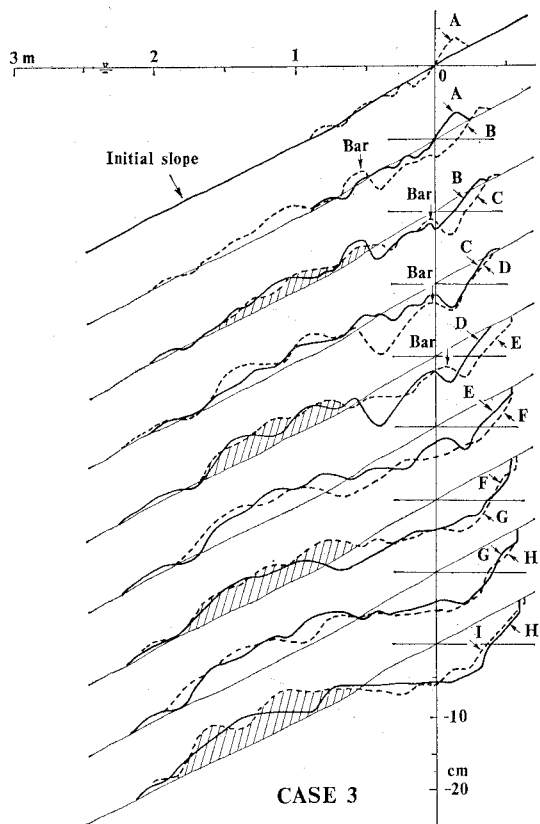


図-3(a) プロファイルの時間的変化 (ケース 3)

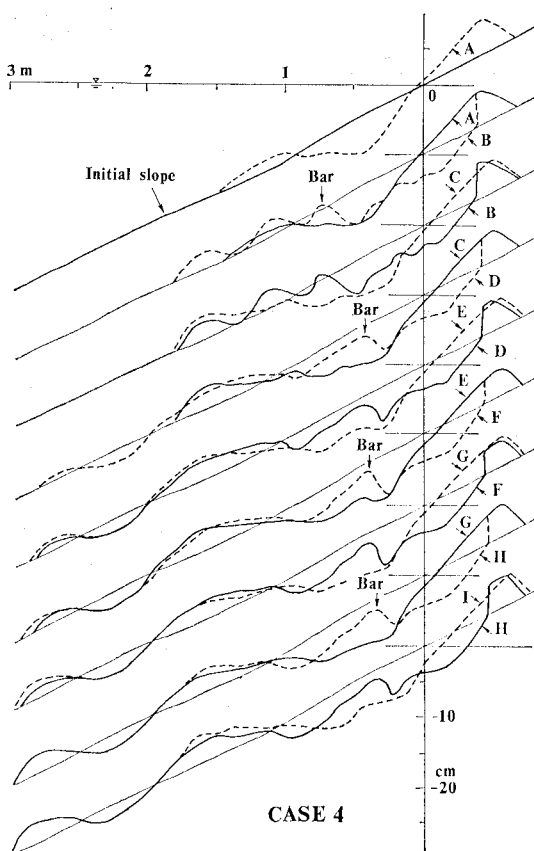
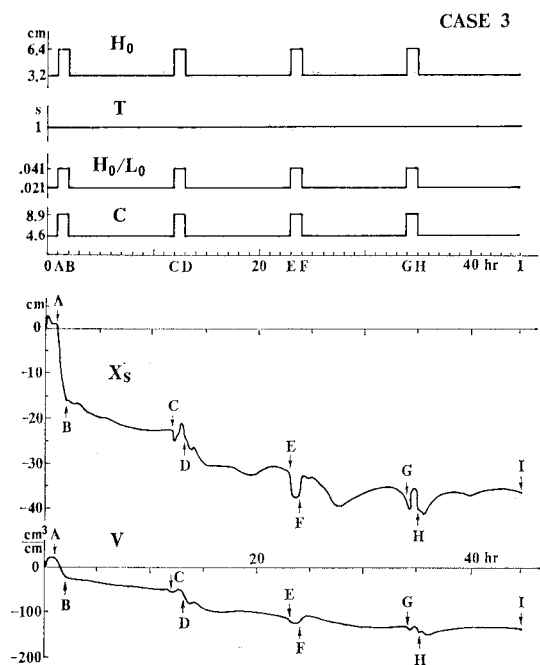
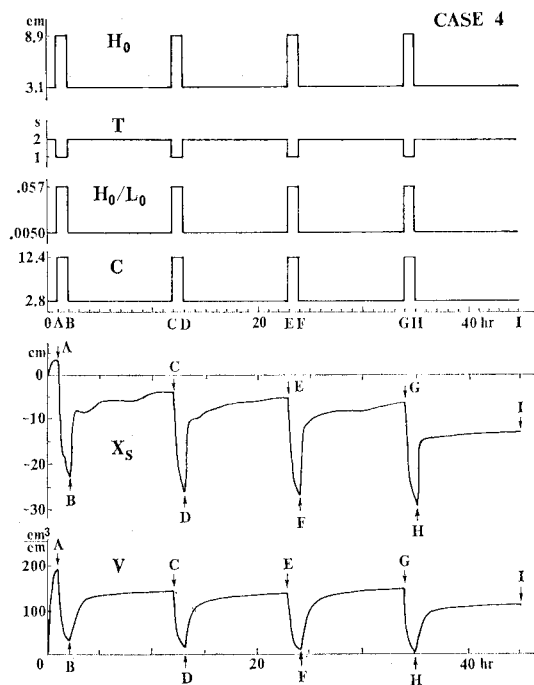


図-4(a) プロファイルの時間的変化 (ケース 4)

図-3(b) 波浪特性, C 値, 汀線位置 (X_s), および SWL 上の土砂量 (V) の時間的変化 (ケース 3)図-4(b) 波浪特性, C 値, 汀線位置 (X_s), および SWL 上の土砂量 (V) の時間的変化 (ケース 4)

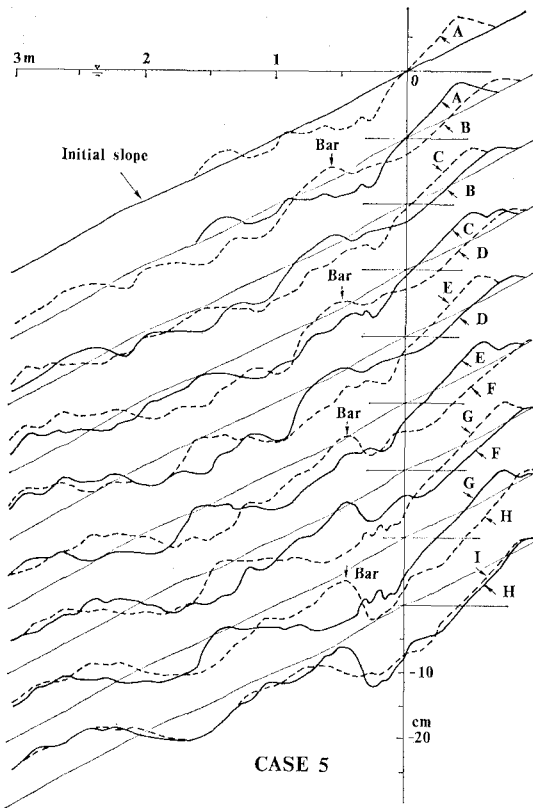
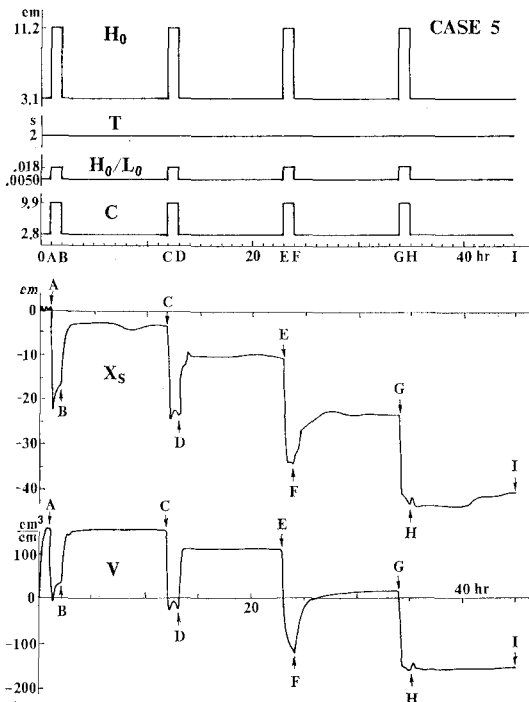


図-5(a) プロファイルの時間的変化 (ケース 5)

図-5(b) 波浪特性, C 値, 汀線位置 (X_s), および SWL 上の土砂量 (V) の時間的変化 (ケース 5)

F と $G \rightarrow H$ では spilling であり, 碎波点は最終ステージに向うにつれて沖側へ移動した. 静穏時の波の場合は, いずれのステージにおいても plunging 型碎波で始まり spilling 型に移行した (surging 型は発生していない).

ケース 3: 静穏時の波を作用させても最初のステージ ($O \rightarrow A$) を除いて岸方向への net の砂移動はほとんど行われていない (図-3(a)). 逆に汀線付近が侵蝕されて bar が作られているステージがみられる ($B \rightarrow C$; $D \rightarrow E$), 台風時の波によって作られた bar が発達しているのはステージ $A \rightarrow B$ と $C \rightarrow D$ のみで, 第 3~4 サイクル ($E \rightarrow I$) では台風時, 静穏時の波を問わず bar は発達していない. X_s および V の時間的変化は, ケース 1, 2 と比べて大きく異なり, サイクリックな変化はみられず明瞭な侵蝕傾向を示す (図-3(b)). ステージ $A \rightarrow B$ を除き, 台風時の波による汀線後退量は非常に小さい. 台風時の碎波はいずれのステージにおいても plunging 型で, 碎波点はサイクルが増すにつれて沖へ移動した. 静穏時の碎波はステージ $D \rightarrow E$ の最初の 5 分間 (plunging 型) を除き, spilling 型であった.

ケース 4: 台風時と静穏時の波とにそれぞれ対応した侵蝕型と堆積型のプロファイルが出現している (図-4(a)). X_s も V もサイクリックな変化を示しながら, 全体としてゆるやかな侵蝕傾向を示す (図-4(b)). 台風時の碎波はすべて spilling 型であり, 最終ステージに向うにつれて碎波点の沖側への移動が観察された. 静穏時の碎波型はすべてのステージにおいて plunging から surging へと変化した.

ケース 5: 台風時の波で scarp が形成されないという点と大きな地形変化が沖にまで及んでいるという点が, 他のケースと大きく異なる (図-5(a)). X_s も V もサイクリックな変化を示しながらも全体的に減少している. 特にステージ $H \rightarrow I$ における変化は他のステージと比べて非常に小さい (図-5(b)). 台風時の波の碎波型はすべて plunging であり, 碎波点はほとんど移動していない. 静穏時の碎波は, ステージ $H \rightarrow I$ を除き, すべてのステージで spilling 型で始まり surging 型へと移行した. $H \rightarrow I$ では最初から surging 型碎波が出現した.

4. 考 察

まず台風時の波浪特性が同じで, 静穏時の波が異なるケース 1, 2, 3 の結果を比較する (図-1(b), 2(b), 3(b)). 台風時の波による汀線の後退距離は, 最終ステージに向うにつれて, ケース 1 では増加する傾向があるが, ケース 2, 3 では減少している (図-6). 侵蝕土砂量の経時変化も同様の傾向を示す (図省略).

静穏時の波を作用させた場合, net として岸向きの砂移動が生ずる限界の水深 (以下に, この水深を単に「砂

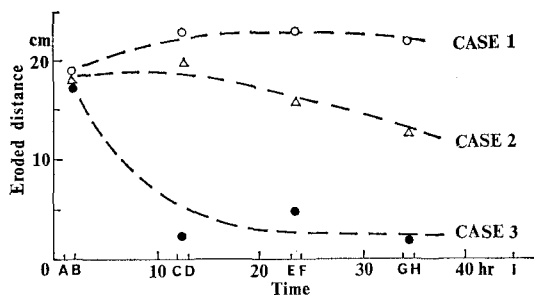


図-6 同じ特性をもつ台風時の波による汀線後退量の経時変化

移動限界水深」とよぶ)は、各ケースのプロファイル A より、ケース 1 では約 12 cm、ケース 2 では 8 cm、ケース 3 でははっきりしないが約 5 cm とみなすことができる。ケース 2, 3 では 1 と比較して、この水深が小さいため、これ以深に運搬された砂は岸に戻れず、この水深付近に上限をもつ棚状の堆積地形を形成するようになる(図-2(a), 3(a)の斜線部分)。このような地形が発達してくると、台風時の波の碎波点が沖へ移動するため碎波帯が広がる。その結果、沖波特性の時間的変化はないにもかかわらず、swash zone に入射する波のエネルギーは最終ステージに向うにつれて徐々に小さくなり、汀線の後退量や侵蝕土砂量が時間的に減少する。これは波と地形との相互作用の結果であり、negative feedback の関係である。特に棚状地形の発達のないケース 3 では、これが顕著にあらわれている(図-6)。一方、ケース 1 では静穏時の波の砂移動限界水深が大きいため、台風時の波で沖へ運ばれた砂の大部分が岸に戻され、前面水深の大きい step 地形が形成されている(図-1(a))。これに台風時の波が作用すると、碎波点が岸へ移動し碎波帯が狭くなる。このため swash zone での波のエネルギーが大きく、汀線の後退量や侵蝕土砂量が増大するようになる。これは positive feedback の結果である。

静穏時の波は同じで、台風時の波が異なるケース 1, 4, 5 の結果(図-1(b), 4(b), 5(b))を比較してみると、静穏時の波による汀線の前進距離および堆積土砂量にちがいがあることがわかる。すなわち、それらはケース 1 が最も大きく、ケース 4, 5 の順に小さくなっている。

いずれのケースにおいても台風時の波によって bar が形成されている(図-1(a), 4(a), 5(a))。ケース 1 では、他のケースと比較して、bar の頂部水深も距岸距離も小さく、かつ砂が静穏時の波の砂移動限界水深以深にはあまり運ばれていない。その結果、前述したように、静穏時の波によって大部分の砂が岸へ戻されている。一方、頂部水深も距岸距離も大きい bar が発達するケース 4 と 5 では、砂の一部が静穏時の波の砂移動限界水深以深に運搬されている。静穏時の波を作用させてもこれらの砂は岸へ戻らないので、ケース 1 と比べて、全般的に

汀線の前進量も堆積土砂量も小さくなっている。特にケース 5 の第 4 サイクル ($G \rightarrow I$) におけるこれらの量は極端に小さい(図-5(b))。図-5(a)のステージ $H \rightarrow I$ からわかるように、bar の頂部を構成している砂がわずかに岸側に運ばれているにすぎない。

bar およびその周辺の砂をかなり多量に陸上へ運搬しているケース [1, 4, 5 の第 1~3 サイクル] では、静穏時の波を作用させた場合必ず bar の頂部近傍で plunging か spilling 型の砂波が発生している。一方、上述のケース 5 の第 4 サイクルでは、ステージ $G \rightarrow H$ で作られた bar の頂部水深が大きかったため、静穏時の波が bar 付近で碎波せずに岸近くで surging 型の碎波を生じている。これらの事実は、たとえ堆積性の波であっても bar 近傍で plunging か spilling 型の碎波が発生しなければ陸上への顕著な砂移動や bar の乗上げは生じないことを示している。

ケース 1, 4, 5 の地形変化から次のことが言える。すなわち台風時の波で作られた地形の特徴(bar の頂部水深)が静穏時の碎波特性(碎波型式)を規定し、これが砂移動、さらには砂移動の結果生ずる地形変化に影響を及ぼしている。これも波と地形との相互作用である。

ケース 1 と 4 の堆積ステージには berm がよく発達している。berm は静穏時の波の作用直後から作られ始め、bar が岸へ乗上げて、その形成がほぼ終了する。同時に急な勾配をもつ前浜が発達する。このステージで碎波は plunging あるいは spilling 型から surging 型へと変化し、海浜は反射率の高い reflective beach³⁾となる。

5. おわりに

台風時の波を 1 時間、静穏時の波を 10 時間サイクルに砂浜に作用させて、その変化特性を調べた結果、入力波の特性に対応した地形変化過程がみられた。地形の形成には波と地形との相互作用が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

参考文献

- 1) Hattori, M. and R. Kawamata: Restoration of sandy beaches fronting seawalls, Coastal Structures '79, pp. 388-404, 1979.
- 2) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩石・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 329-334, 1975.
- 3) Watts, G. M.: Laboratory study of effect of varying wave period on beach profiles, Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 53, 19 p., 1954.
- 4) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 920-938, 1974.
- 5) 例えば, Wright, L. D., B. G. Thom, and J. Chappell: Morphodynamic variability of high-energy beaches, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pp. 1180-1190, 1978.