

沿岸漂砂による海浜縦断形変化に及ぼす 波浪の履歴効果

EFFECT OF WAVE HISTORY TO BEACH PROFILE CHANGES DUE TO
LONGSHORE SAND TRANSPORT

宇多高明¹・加藤憲一²・口石孝幸²・赤松直博³

Takaaki UDA, Ken-ichi KATOH, Takayuki KUCHI-ISHI and Naohiro AKAMATSU

¹正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

²正会員 工修 日本建設コンサルタント (株) (〒141-0022 東京都品川区東五反田5-2-4)

³日本建設コンサルタント (株) (同上)

Effect of wave history to the beach profile changes due to longshore sand transport is investigated by the numerical simulation by using the contour line change model. The profile changes and wave climate were investigated on the Shimoni-ikawa coast. Wave history in the model simulation was selected as follows; single wave height, two wave heights (low + high and high + low), and gradually decreasing and increasing wave heights. In each case, beach profile changes were compared with the ones observed on the Shimoni-ikawa coast. Qualitative agreement was obtained.

Key words : Contour line change model, wave history, profile changes, longshore sand transport, Shimoni-ikawa coast

1. まえがき

現地海岸における海浜変形予測では、汀線変化モデルが広く用いられてきている。このモデルは、沿岸漂砂の作用下において海浜縦断形が岸沖方向に平行移動すると仮定して汀線の時間的・空間的变化を追跡するものである。しかし、モデルの扱いが容易である反面、その原理上海浜縦断形変化の計算は不可能である。また計算のための波浪条件としては、一般にエネルギー平均波高が用いられるが、現地海浜のように不規則波の作用下において、実際にいずれの波が海浜縦断形変化に最も重要な作用を及ぼすかについては十分に明らかにされていない。宇多・河野¹⁾は、沿岸漂砂の作用下において海浜縦断形の変化を予測可能な等深線変化モデルを開発したが、本研究ではこのモデルにより、汀線変化モデルでは予測が不可能な、沿岸漂砂による海浜縦断形変化に及ぼす波浪の履歴効果を数値シミュレーションによって検討しようとするものである。計算モデルの適用にあたっては、まず現地海岸の実態検討が重要と考え、富山県の下新川海岸における海浜変形を具体例として調べ、それとモデル計算結果との比較を試みる。

2. 下新川海岸における海浜縦断形の変化

沿岸漂砂の作用する場において、海浜縦断形変化に対する波浪の履歴効果を調べるには、まず沿岸漂砂の卓越する海岸の中から深淺測量データが経年的に取得された海岸を選び、波による地形変化の限界水深（定義については、文献²⁾参照）付近の海底地形変化の詳細を調べる必要がある。この種の海岸は全国にいくつもがあるが、富山県の下新川海岸もこれに属している。そこで、以下ではこの海岸を選んで検討する。

下新川海岸は、図-1 に示すように黒部川扇状地の外縁

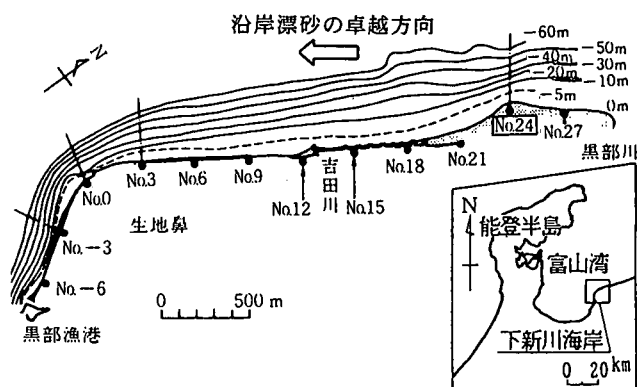


図-1 下新川海岸（黒部川河口～生地鼻）の海底地形と測線位置

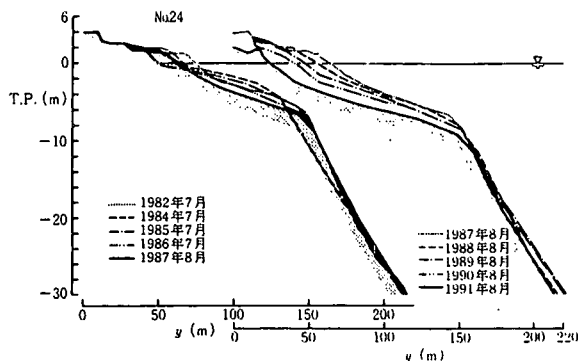


図-2 下新川海岸の測線 No.24 における海底縦断形の観測例

をなす海岸で、汀線付近の勾配は 1/10 程度と急であり、しかも南向きの沿岸漂砂が卓越することが知られている。例えば、図-1 に示すように、この海岸に流入する黒部川の河口から南側に 650m 離れた測線 No. 24 に沿う海底縦断形の変化を図-2 に示す²⁾。この測線は、砂嘴状に突出した生地鼻より見て沿岸漂砂の上手側に位置するが、ここでは -7m 付近で海底勾配が大きく変わり、-7m 以浅の 1/11 より、-7m 以深の 1/2.5 と急になる。この角度は砂礫の水中での安息角（約 30°）にかなり近いほどに急勾配である。そして、1984 年 7 月のデータを除けば、ほぼ -9m 以浅においてほぼ経年的に侵食が進み、-7m 以浅の海底勾配が緩くなって浅海部にテラス状地形が形成されていることが分かる。1984 年 7 月のデータでは、その直前の 1982 年 7 月と比較して y=150m 付近で非常に急激に地盤高が低下し、次の年の 1985 年には再び 1982 年 7 月と非常に似通った縦断形に戻っている。しかしこのような地形変化が波浪の作用で生じるとは考えにくいので、このデータは深浅測定の精度が低く、それによる見かけの地形変化が生じたと推定される。このことから、このデータは除外して考える。

沖合部の縦断形を詳細に検討すると、波の作用で削られた部分が、明らかに波の作用によって地形変化が生じていないと考えられる十分深い部分の縦断形になだらかに接続している。このようにテーパされた縦断形は、海水準が一定の場合には、単一入射波の作用では形成されることはできず、ある頻度分布を持った波浪が作用しなければならぬと考えられる。なぜなら、単一入射波条件では、ある水深を境にそれ以浅と以深の縦断形に折れ曲がり点（遷急点）が必ず形成されなければならないからである。そこで以下ではこの海岸の波浪条件について調べた。

下新川海岸の波浪特性は、宇多・野口³⁾が表-1 をまとめている。下新川海岸の田中観測所の、水深 15m 地点に設置された超音波式波高計によって得られたデータが整理されており、1983～1987 年の観測値より年間の有義波高・周期の複合頻度分布がまとめられている。これによれば、年間で最多頻度となる波浪は、有義波高が 0.26～0.5m、周期が 3～4s であるが、高波浪ほど出現頻度は低く

表-1 下新川海岸の田中観測所における有義波高・周期の出現頻度

$T_{1/3}(s)$	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11~	Sum
$H_{1/2}(m)$											
0.00~0.25	5.1	9.1	5.4	2.3	1.2	0.5	0.2	0.1			28.9
0.26~0.50	2.7	8.5	6.5	4.6	2.9	0.9	0.2				26.3
0.51~0.75	0.1	3.9	4.1	4.0	3.4	1.9	0.5	0.1			18.0
0.76~1.00		1.0	2.7	3.0	2.7	2.0	0.8	0.2			12.4
1.01~1.25			0.1	1.6	1.9	1.4	1.0	0.4	0.1		8.0
1.26~1.50				0.5	1.1	0.9	0.9	0.5	0.2		4.9
1.51~1.75				0.1	0.5	0.7	0.4	0.5	0.2	0.1	3.0
1.76~2.00					0.2	0.4	0.3	0.3	0.2		1.7
2.01~2.50					0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	1.8
2.51~							0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
Sum	7.9	22.6	20.9	17.7	18.9	8.8	4.6	2.4	0.9	0.8	109.0

なる。例えば、2.51m 以上の波高の出現頻度は 0.5% であり、その次の階級の 2.01～2.50m では 1.3% の出現頻度となる。

3. 波浪の履歴条件の設定

波浪の出現頻度が表-1 のように与えられたとき、波による地形変化の限界水深付近の縦断形を定める波浪は、常時波浪というよりも前節で述べたように高波浪時の波高であろう。一方、異常に波高は高いが、作用頻度が非常に低い波浪では、波の作用時間が短いために地形変化量はそれほど大きくないと考えられる。逆に、頻度は高くても、波高がそれほど高くない波浪では、水深の大きな海底での地形変化を引き起こすことは容易ではない。これらのことから、表-1 を参照して波浪を高い順に並べたとき、いくつかの出現確率を想定してそれを代表する波高を設定し、それらの組み合わせによって波浪変化を代表させることにした。具体的には、波高 2.51m 以上、2.50～1.76m、1.75～1.01m、1.00m 以下の 4 階級に分けると、それぞれの階級の波高出現頻度は 0.5、3.0、15.9、80.6% となり、またそれぞれの波高階級の中央値は表-2 となる。

ここに、2.51m 以上の階級については、階級幅 0.5m を考慮して、便宜上 2.75m とする。さらに、波浪の作用日数を仮に 100 日とすると、それぞれの波高階級の作用日数は表-2 に示すようになる。ここで得られた波高は、沖合の入射波高であるが、等深線変化モデルでは碎波波高を与える必要がある。したがって、厳密には浅水変形を考慮し

表-2 波浪の出現頻度と作用日数

波浪記号	波 高 (m)	割 合 (%)	作用日数 (日)
a	2.75	0.5	0.5
b	2.13	3.0	3.0
c	1.38	15.9	15.9
d	0.50	80.6	80.6

なければならないが、その変化は結果に大きな影響をもたらさないで、ここでは近似的に、各階級の波高値が砕波波高に等しいとおいて検討を進める。

4. 計算条件

等深線変化モデルによる計算は 5 ケース行った。いずれの場合も、初期勾配は現地海岸の沖合部海底勾配約 1/10 を参考とし、海底勾配の場所的変動も考慮して、これよりやや緩勾配の 1/20 を選定し、初期汀線への砕波角は 20° とした。沿岸方向に 500m 区間を計算領域とし、両端は沿岸漂砂の通過しない不透過境界とした。また、沿岸方向の格子間隔は 25m、計算時間間隔は 120s、等深線の分割は 0.25m 間隔とした。実際の計算においては、表-2 のようにして選ばれた波浪 a~d を砕波波高に等しいとし、それらを組合せて作用させた。その場合、波浪の作用日数は同一の 100 日に保つことはもちろん、作用波浪エネルギー量も同一にしなければならないので、各ケースの作用エネルギー量が同一になるよう作用波高を変えている。具体的には、ケース 1 では単一波浪を 100 日作用させるために波高は 0.93m としている。ケース 2, 3 では 2.75m の波高を 0.5 日作用させ、残りは作用エネルギー量が一定となるように、作用波高をケース 1 より 0.03m 下げている。しかし、その変化は大きくない。ケース 4, 5 では表-2 と同じ種類の波高とするが、作用順序が異なっている。表-3 および図-3 には、各ケースの波浪の作用順序をまとめて示す。

ケース 1 は、いわばエネルギー平均波を連続的に作用させたものに相当する。ケース 2 は、異常波浪 a を作用させたあと、ケース 1 と同様にエネルギー平均波を連続的に作用させたものに相当する。ケース 3 は、ケース 2 と高・低波浪の作用順序が入れ替わったものであり、波浪作用の履歴効果を調べることに主眼がある。ケース 4 は、異常波浪から低波高の順に 4 組の波浪全てを作用させたものである。ケース 5 は、ケース 4 と波浪の作用順序を逆転させたものである。

計算において、陸域の堆積限界を定める h_r は 2.75m、波による地形変化の限界水深 h_c は $2.3H_0$ と設定した。また、陸域と海面下での限界勾配は宇多・河野¹⁾と同様、60° および 30° とした。

5. 計算結果

図-4 には、5 ケースの平面等深線の計算結果をまとめて示す。各ケースとも、初期の平行等深線から 20 日おきに 100 日までの等深線の平面的変化を示している。また、図の右端には作用波高（砕波波高）の時間的变化を示す。いずれの場合にも波の入射方向は Y 軸方向からであり、

表-3 各ケースの波浪の作用順序

波浪の作用順序	ケース①		ケース②		ケース③		ケース④		ケース⑤	
	波高	日数	波高	日数	波高	日数	波高	日数	波高	日数
1	0.93	100.0	2.75	0.5	0.90	99.5	2.75	0.5	0.50	80.6
2			0.90	99.5	2.75	0.5	2.13	3.0	1.38	15.9
3							1.38	15.9	2.13	3.0
4							0.50	80.6	2.75	0.5

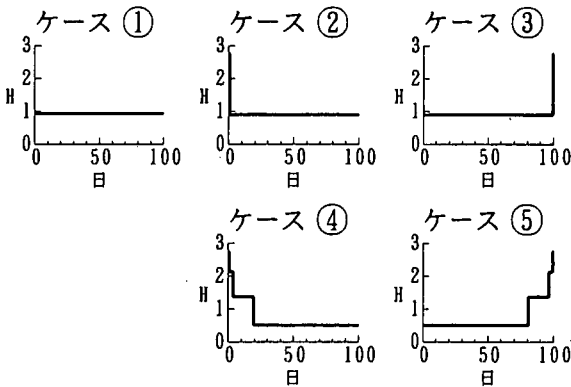


図-3 各ケースの作用波浪の履歴

これに対して 20° の角度をなした平行等深線が沿岸漂砂の作用で変形する。等深線と波の入射方向との関係から、沿岸漂砂の向きは左方向である。また、図-5 には各ケースの沿岸漂砂の下手、上手端およびそれらの中間の測線における海浜縦断形の経時変化を示す。No. 1 は漂砂の下手端、No. 21 が上手端、No. 11 は中央の測線である。図は、初期形状と 20 日おきに 100 日までの海浜縦断形の変化を示している。図-4, 5 両者を参照しつつ各ケースの計算結果の特徴について述べる。

(1) ケース 1 ($H_0=0.93\text{m}$)

H_0 が 0.93m と低いために、 h_c も 2.1m と浅く、沿岸漂砂の上手（右端）側では浜崖を形成しつつ等深線が後退するが、-3m の等深線はもとのままの平行等深線形状を保つ。下手（左端）では、土砂が沖向きに落ち込むために、汀線のすぐ沖に急勾配斜面が形成されている。このケースでは波高が一定のため、地形変化は単調に進む。図-5 の測線 No. 21 に示す侵食域の縦断形では、ごく浅い場所に侵食平坦面が形成される。この場合、沖合の原プロファイルとは明瞭な勾配変化点（遷急点）をもって地形変化が進む。一方、土砂の堆積域にある No. 1 では急勾配をなして遷急点の水深よりも深い場所まで土砂が落ち込んでいる。

(2) ケース 2 ($H_0=2.75\text{m}+0.9\text{m}$)

最初の 0.5 日分だけ 2.75m の波高が作用し、その後はケース 1 と同様低い波高が作用する場合である。波の作用直後に高波浪が作用するために、20 日の段階において、すでに -5m までの等深線に変化が見られ、上手側では等深

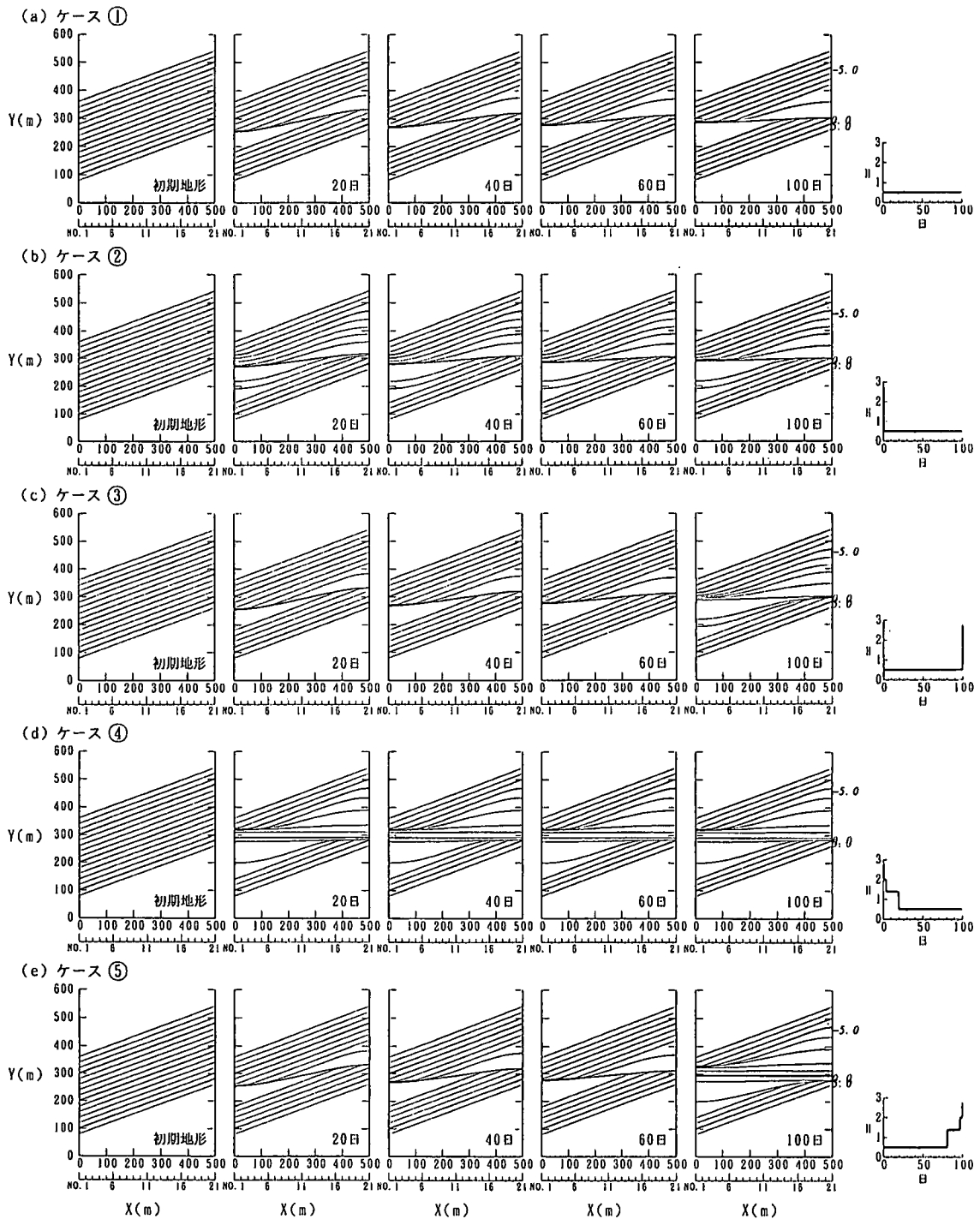


図-4 各ケースの等深線変化の比較

線が後退し、下手側では前進する。0.5 日以降は 0.9m という低波高の作用となるために、その後の等深線の変化はほぼ -2m 以浅で集中的に起こる。一方、-3m 以深の等深線は初期の高波浪直後の形状を保っている。図-4 に示す侵食域の縦断形変化では、ケース 1 の場合に見られたごく浅い領域での侵食平坦面の形成に加えて、-6m までの侵食も起きる。2 種類の波浪が作用するために、沖合には勾配の変化点が形成される。堆積域の No.1 では、前浜と沖合にまず比較的なだらかな堆積斜面が形成され、それに急勾配の海底斜面が重なりを示す。

(3) ケース 3 ($H_b=0.9m+2.75m$)

波浪の作用順序がケース 2 と逆の場合である。この場合には、60 日までの等深線の変化はケース 1 と全く同様であって、ほぼ -2m 以浅の等深線が上手側で後退し下手側では前進する。浅い部分で続いていた地形変化も、100 日の直前に高波浪の作用を受けて、最終段階で大きく変化している。ケース 2, 3 は、作用エネルギーは同一のまま、波浪の作用順序のみが変化したものである。そこで、100 日後の等深線形状を比較すると、陸上部ではケース 2 よりもケース 3 の方が等高線の後退量が大きく現れ、逆に

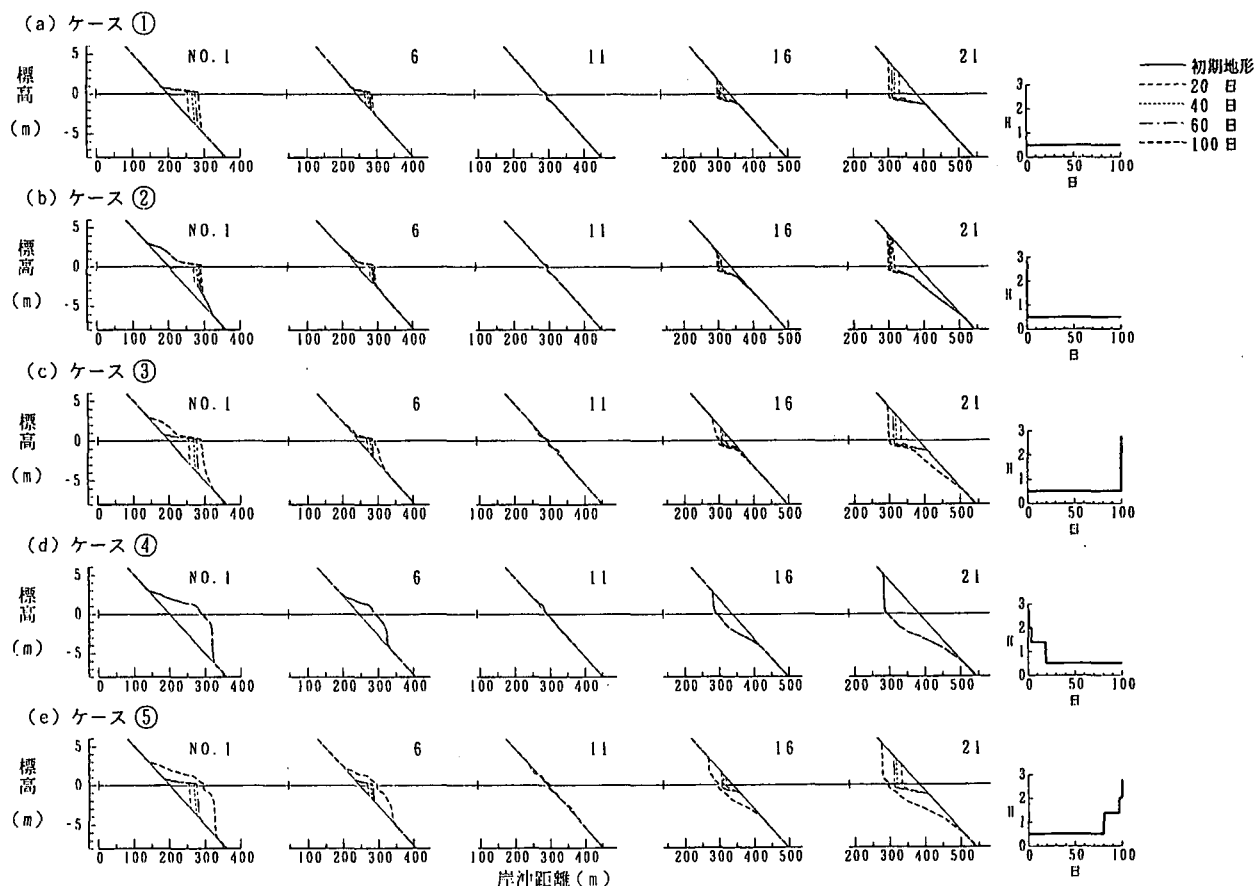


図-5 各ケースの海浜縦断形の変化

海面下では土砂が堆積する場合、より多くの土砂が落ち込んだことが密集した等深線の状況から分かる。

以上の点は、低波浪と高波浪が作用する場合、作用順序によって最終地形が異なること、そして一連の波浪の作用において、最初に高波浪が作用するよりも、最後に高波浪が作用したほうが地形変化が著しいことを意味している。その理由としては、ケース 3 では低波浪が十分長い時間作用したため、低いながらも浜崖が十分発達し、さらにその状態で高波浪が作用したため浜崖形成が著しく進んだのに対し、ケース 2 では、初期に高波浪が作用したことによって、浜崖が存在しない状態から海浜変形が進み、浜崖形成を伴う地形変化が相対的に小さくなったためと考えられる。

(4) ケース 4 ($H_0=2.75\text{m}+2.13\text{m}+1.38\text{m}+0.5\text{m}$)

初期に最も高い波高を作用させた後、次第に波高を低下させたケース 4 では、同様に初期に高波浪を作用させたケース 2 と同様、かなり深い場所まで等深線の変化が生じている。20 日までに著しい地形変化が生じているが、1~2m の等深線がほぼ汀線と平行になりつつ変化していることが特徴である。この場合にはその後の変化は大きくない。最終的に 100 日後の等深線形状をケース 1~3 と比較すると、高波浪の作用頻度が増したために、浜崖侵食が進む一方、堆積域においては冲向きの等深線の移動量が大きくなった。

(5) ケース 5 ($H_0=0.5\text{m}+1.38\text{m}+2.13\text{m}+2.75\text{m}$)

ケース 4 と波浪の作用順序を逆にしたケース 5 では、初期には波高が低いために地形変化は汀線の近傍でのみ起こり、60 日後までの地形変化量はそれほど大きくないが、100 日には等深線に大きな変化が生じ、最終的な等深線の形状はケース 4 とよく似たものとなった。ただし詳細に見ると、ケース 5 のほうがケース 4 より地形変化量がわずかに大きく出ている。この状況は、ケース 2, 3 の場合と同様である。

6. 考察

図-5 の海浜縦断形の変化によれば、単一の波高条件を与えたケース 1 では、侵食断面の測線 No. 21 において、波による地形変化の限界水深は明瞭に定められ、三角形形状に侵食された部分の沖合では、もとのプロファイルがそのまま残されている。原縦断形と変形後の縦断形では明瞭な勾配変化点（遷急点）が定義される。しかし、下新川海岸での実測縦断形はこのようなものではない。2 組の波浪条件を組合せたケース 2, 3 では同じく測線 No. 21 で調べると、沖合のプロファイルには遷急点があり、「く」の字形に折れた縦断形が形成されている。しかし、このように海底勾配が異なる斜面が「く」の字形に折れるというパターンもまた下新川海岸での実測値とは大きく異なる。これらに対して、4 組の波浪条件を組合せたケース 4, 5 の

No. 21 の海浜縦断形を調べると、沖合のプロファイルはただらかに初期形状にすり付いている。計算値では侵食範囲がやや浅い区域にずれているものの、テーパーされたプロファイル自体は図-2 に示した下新川海岸で測定された海浜縦断形の変化をよく説明している。現地海岸において、沖合の波による地形変化の限界水深付近では測量誤差に起因する海底地形変動があるために、波による地形変化の限界水深を定めるのが困難な場合もあるが、ここでの計算結果は、不規則波の作用履歴が侵食域における海浜縦断形変化に大きく影響することを意味している。しかし、ここで述べたように高波浪をいくつかの階級（本研究では 4 階級）に分け、それに基づいて各波浪をもとに予測計算を行えば、その結果は現地海岸で測定されたようなテーパーされた縦断形の計算が可能となる。このことから、例えば等深線変化モデルによって海浜変形の予測精度を高めるには、不規則波の測定データにもとづいて波高階級に分割して変形計算を行う必要がある。

7. まとめ

実測の波浪データをもとに高波浪をいくつかの階級に

分割し、分割された階級の代表波浪をもとに海浜縦断形変化の計算を行えば、現地海岸で測定されたようなテーパーされた縦断形の計算が可能である。このことから、例えば等深線変化モデルによる海浜変形予測の精度を高めるには、不規則波の測定データにもとづいて波高階級に分割して変形計算を行う必要がある。この場合、波浪の作用で浜崖を形成しつつ侵食が進む場合には、波浪の作用順序、すなわち波浪の履歴効果も重要であって、初期に相対的に低波浪が作用した後に高波浪が作用した場合、侵食が著しいことが予測されたが、この点についてはなお現地実測などにより、現象面からの検討が必要である。

参考文献

- 1) 宇多高明・河野茂樹：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，No. 539/ II 35，pp. 121-139, 1996.
- 2) 宇多高明：「日本の海岸侵食」，山海堂，p. 442, 1997.
- 3) 宇多高明・野口賢二：富山県東部宮崎・境海岸における海浜変形の実態，地形，Vol. 11，pp. 337-347, 1990.