

# 混合粒径砂を用いた大型水路実験による縦断形変化の再現と予測

福濱方哉<sup>1</sup>・山本幸次<sup>2</sup>・宇多高明<sup>3</sup>  
芹沢真澄<sup>4</sup>・石川仁憲<sup>5</sup>

混合粒径砂からなる海浜の縦断形変化に関する大型水路実験結果に対し、粒径分級を考慮した等深線変化モデルを適用し縦断形変化の再現を行った。この結果混合粒径砂が細粒砂と粗粒砂に分級し、粗粒砂が岸向きに移動してバームを形成する一方、細粒砂は沖向きに移動し、波による地形変化の限界水深  $h_c$  以深に落ち込むという特性がモデルによりよく再現された。バームの形成は急速に進むが、沖での細粒砂による地形変化はなかなか安定に至らないという特性も再現された。含有率を変化させた計算によれば、粗粒砂量を増やすとバームの形成により前浜が増大して汀線の前進に寄与し、逆に細粒砂量を増やすと  $h_c$  以深への流出が増えるという結果が得られた。

## 1. まえがき

小規模な水路に細粒砂を敷き詰めて模型海浜を造り、そこに実験波を作用させると、砂は波の作用により変形し、現地海岸と似た変形が起こることは古くから知られており、それをもとに波浪条件と汀線の前進後退を C 値により判定する方法が堀川ら (1975) によって示された。その後、この手法は広く用いられたが、現地海岸への適合性については問題点が残されている。最も大きな問題は、漂砂現象の相似則が確立していないため、実験で観察された現象と、現地との対応関係が不明であることによる。この障害を少しでも軽減するために、最近では大型水路実験も行われているが、現象の本質は依然として把握されていないままである。問題の解決には、海浜縦断形の変化に関して、そもそも海浜縦断形がいかなる機構によって安定形に向かうかについての研究が必要である。最近では平衡断面の形成に関して混合粒径砂を用いた実験も行われているが、結果の物理解釈はあまり進んでいない。一方、熊田ら (2003) は最近、等深線変化モデルにおいて粒径分級効果を取り込むことにより混合粒径砂で構成される海浜の縦断形変化の予測モデルを構築した。本研究では、このモデルを大型水路実験に対して適用し、混合粒径砂からなる海浜の縦断形変化の機構を明らかにする。

## 2. 混合粒径砂を用いた大型水路実験

目黒ら (2005) は、中礫からシルトまで幅広い粒径レンジで構成された混合粒径砂を、長さ 135 m、幅 2 m、

深さ 5 m の大型水路に敷き詰めて移動床実験を行い、平衡海浜の形成過程と砂浜形成に寄与する砂の粒径を調べた。実験に用いた海浜材料は中央粒径  $d_{50}=0.62$  mm で、初期海底勾配は 1/20 とし、そこに波高  $H=0.6$  m、周期  $T=3.5$  s の規則波を 78 時間作用させた。図-1 がその縦断形変化と表層底質の  $d_{50}$  の岸沖分布である。時間経過とともに初期の一樣勾配斜面の、水深 1.3 m 付近に侵食平坦面が形成されると同時に、前浜勾配が 1/6 と急になった。また底質は、水深 1.3 m 付近の平坦面上が細粒砂で覆われているのに対し、前浜には粗粒砂が集中的に堆積した。これより混合粒径砂は波の作用で分級され、粗粒砂はバームを形成して岸側に急勾配をなして堆積し、細粒砂は沖合へと運ばれ緩勾配で堆積することが明らかである。またここでは省略するが、前浜上 ( $x=0.4$  m) と、沖浜部 ( $x=30.4$  m) の表層底質の粒径加積曲線も示されており、前浜と沖浜の土砂がほぼ 1 mm 以上と 1 mm 以下にきれいに分かれることも明らかにした。このような実験結果は、次のように要約できる。以下、粒径 1 mm 以下で構成された砂を「細粒砂」、粒径 1 mm 以上で構成された砂を「粗粒砂」と呼ぶ。

① 侵食はほぼ波による地形変化の限界水深  $h_c=1.3$  m

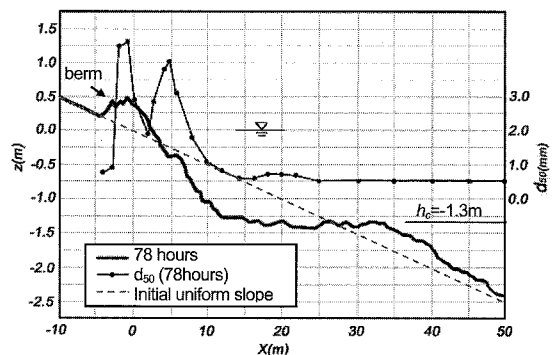


図-1 混合粒径砂を用いた二次元大型水路実験による縦断形変化と表層底質の中央粒径の岸沖分布  
原典 (目黒ら, 2005) を一部修正

- |       |      |                                 |
|-------|------|---------------------------------|
| 1 正会員 | 工修   | 国土交通省国土技術政策総合研究所<br>河川研究部海岸研究室長 |
| 2 正会員 | 博(工) | 国土交通省九州地方整備局<br>川内川河川事務所        |
| 3 正会員 | 工博   | (財) 土木研究センター理事<br>なぎさ総合研究室長     |
| 4 正会員 |      | 海岸研究室(有)                        |
| 5     | 工修   | (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室            |

以浅で生じた。

②侵食土砂のうち粒径 1 mm 以上の砂は岸向きに運ばれ高さ 0.5 m のバームを形成した。その際前浜勾配は約 1/6 となった。

③侵食域に含まれる粗粒砂量には上限があり、バームの発達はこの粗粒砂量に依存する。バーム高は波浪条件に依存するがバームの発達のためには粗粒砂が必要である。

④沖合の  $h_c$  以深には細粒砂が運ばれ約 1/10 と初期勾配より急な勾配で堆積が進んだ。

⑤バームが十分発達した後では前浜勾配と粒径とが対応するので安定となった。 $h_c$  付近の平坦面もそれ以上削れないのでこの部分も安定となった。このため  $h_c$  以深への砂の流出も止まる。よってバームが十分発達した場合においてのみほぼ平衡海浜となると推定できる。

### 3. 計算モデル

目黒ら(2005)の示した混合粒径砂を用いた実験結果に対し、熊田ら(2003)の等深線・粒径変化モデルを適用した。このモデルは、海浜変形だけでなく、底質粒径の相違に基づく分級効果による粒径変化をも予測可能なモデルである。モデルの基本は既に既発表論文に記載されているが、実際に水路実験での海浜縦断形変化との比較が行われていなかったことから、この種の実験結果に対するモデルの適用性は課題として残されており、基本的考え方の妥当性の検討が必要とされていた。今回の計算は実験による海浜縦断形変化を対象とするため、沿岸漂砂の作用は無視し、岸沖漂砂のみによる海浜変形が再現対象となる。基礎式は、岸沖漂砂量式(式(1)~(3))、等深線変化量の計算式(粒径毎の土砂量保存則)(式(4)~(5))および粒径毎の含有率変化の計算式(式(6)、(7))からなる。

岸沖漂砂量式

$$q_z^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot K_z^{(K)} \cdot (EC_g)_b \sin \bar{\beta} \cdot \left( \frac{\cot \beta}{\cot \beta_c^{(K)}} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_z^{(K)} = \frac{\gamma \cdot A}{\sqrt{d^{(K)}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon_z(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^2} \left( \frac{h_c}{2} - z \right) (z + h_c)^2 \dots\dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 \dots\dots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

等深線変化量の計算式 (粒径毎の土砂量保存則)

$$\frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} = - \frac{\partial q_z^{(K)}}{\partial z} \quad (K=1 \sim N) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

粒径毎の含有率変化の計算式

$$\text{堆積時: } \frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\} \quad (K=1 \sim N) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{侵食時: } \frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\} \quad (K=1 \sim N) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $N$  は代表粒径数、 $K$  は各粒径に付けた番号 ( $1 \sim N$ )、 $\mu^{(K)}$ ;  $k=1, 2, \dots, N$  は交換層内の粒径毎 ( $N$  粒径) の含有率を示す。 $z$  は鉛直座標 (地盤高)、 $t$  は時間、 $Y$  は等深線位置、 $(EC_g)_b$  は碎波点のエネルギーフラックス、 $\beta_c^{(K)}$  は粒径毎の平衡勾配角、 $\bar{\beta}$  はバーム高  $h_R$  から  $h_c$  までの初期断面の平均勾配角、 $\beta$  は海底勾配角、 $\varepsilon_z(z)$  は岸沖漂砂の強度分布関数であり、宇多・河野(1996)の沿岸漂砂量の水深方向分布として式(3)の3次式で与えた。 $d^{(K)}$  は粒径 (mm)、 $K_z^{(K)}$  は粒径毎の岸沖漂砂量係数、 $\gamma$  は沿岸漂砂量係数に対する岸沖漂砂量係数の比、 $B$  は交換層幅であり、混合層厚を海底勾配で割ったものであるが、Kraus (1985) を参考に混合層厚を碎波波高の 3% として評価して与えた。 $\mu^{(K)}$  は等深線変化前の交換層より岸側位置の含有率である。

計算は、粒径毎の岸沖漂砂量  $q_z$  を式(1)~(3)で計算し、これを用いて連続式(4)、(5)を解くことで等深線変化量が計算され、さらに交換層内の含有率の変化が式(6)、(7)より計算される。これを繰り返すことで海浜変形および交換層内の含有率の経時変化が計算される。限界水深以深への重力による土砂の落ち込み、および陸上の浜崖の形成による地形変化の計算方法は熊田ら(2003)を用いた。実験で細粒砂が  $h_c$  以深に落ち込む現象は前者の作用によるものと考え、細粒砂の安息勾配には実験で観察された勾配を与えた。数値計算にはスタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法を用いた。計算条件の設定は、以下のとおりである。

粒径の設定は、実験結果が粒径 1 mm を境に明瞭に分級したことから  $N=2$  とし、代表粒径は、 $d^{(1)}=0.45$  mm (細粒砂: 粒径 1 mm 以下を代表)、 $d^{(2)}=3$  mm (粗粒砂: 粒径 1 mm 以上を代表) とした。これらの粒径値は、実験による混合砂の粒径加積曲線に基づき、粒径 1 mm 以下と 1 mm 以上の砂の  $d_{50}$  と同じ程度とし、かつ、全体の平均粒径  $d_m$  が実験砂と同じ  $d_m=1.21$  mm となるように設定した。初期含有率は、実験条件と同様、細粒砂  $\mu^{(1)}=0.7$ 、粗粒砂  $\mu^{(2)}=0.3$  とした。初期地形は、実験条件と同じ勾配 1/20 の一様勾配斜面とし、 $h_R$ 、 $h_c$  は、実験結果より  $h_R=0.5$  m、 $h_c=1.3$  m とした。

平衡勾配は、実験結果より、沖の細粒砂で構成された緩斜面の縦断勾配、岸側の粗粒砂からなる急勾配区間の

縦断勾配を与え、 $\tan \beta_c^{(1)}=1/100$ ,  $\tan \beta_c^{(2)}=1/6$ とした。交換層幅  $B$  は、混合層厚を海底勾配で割ったものである。計算対象は大規模模型実験であることから、現地海岸での観測結果にもとづく Kraus (1985) を参考にして、混合層厚を碎波波高 ( $H_b=0.75$  m) の3%で与えて0.02 mとし、これを初期海底勾配 (1/20) で割って、 $B=0.4$  mと与えた。

土砂落ち込みの限界勾配は、熊田ら (2003) と同様、粒径毎、水中、陸上で区別して与える。本研究の計算では、前述のように  $h_c$  以深への細粒砂の落ち込みを重力による土砂落ち込みとして扱うことにし、水中部の細粒砂に対しては実験で観察された  $h_c$  以深の勾配 1/10 を与えた。他は、熊田ら (2003) と同じく陸上部 1/2, 水中部 1/3 を与えた。

地形変化の速度を規定する漂砂量係数  $A$  については、計算対象の実験は沿岸漂砂の関与がないことから煩雑さを避けるため式(2)で  $\gamma=1$  と置いた上で、最初の20時間でバームが十分発達したという実験結果を目安に試行計算より、 $A=0.2$  とした。また、漂砂量の水深分布は、本来は岸沖漂砂に対する分布を何らかの形で与えるべきであると考えられるが、本研究では、式(3)の宇多・河野(1996)の沿岸漂砂量の水深分布で代用した。さらに、波浪条件は、実験での波浪計測結果の時間平均値で与え、碎波波高  $H_b=0.75$  m (一定値) を与えた。計算メッシュ、時間ピッチなど他の計算条件は表-1 に示すとおりである。

4. 計算結果

(1) 細粒砂・粗粒砂の初期含有率  $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$

最初に、第2節で述べた大型水路実験と同一条件を設定して再現計算を行った。計算された海浜縦断形の時間変化が図-2 である。浅い場所から侵食が始まり、一部の砂が打ち上げられてバームを形成し、同時に沖合に小高い砂の山を作りながら沖へと砂が移動していく。図-3 は実験と計算による各々の最終形状を重ねて比較したものであるが、縦断形変化の特徴が計算によりほぼ再現されたことが分かる。また、目黒ら (2005) の実験ではバームの形成は急速に進むが沖での細粒砂による地形変化が収束するには時間がかかるという特性も見られたが、図-2 によればこの特性も再現されている。

図-2 に対応した細粒砂・粗粒砂の含有率  $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$  の変化を図-4 (a), (b) に示す。時間経過とともに前浜は粗粒砂のみ ( $\mu^{(1)}=0$ ,  $\mu^{(2)}=1.0$ ) で構成され、沖合の斜面を含む緩勾配斜面上は細粒砂のみ ( $\mu^{(1)}=1.0$ ,  $\mu^{(2)}=0$ ) で覆われる。図-5 は平均粒径の岸沖分布を示すが、前浜の急勾配部分とバーム部分は粒径が3.0 mmと大きく、一方沖の海底面では0.5 mmと細くなる。

この結果は、図-1 に示した中央粒径の岸沖分布とよい対応を示している。

以上より、大型水路実験に適用した数値計算で得られた海浜縦断形変化は、「2. 混合粒径砂を用いた大型水路実験」の①~⑤で述べたとおりの現象として記述され、

表-1 計算条件

計算ケース	再現計算： $\mu^{(1)}=0.7$ , $\mu^{(2)}=0.3$ 予測計算： Case 1) $\mu^{(1)}=0.1$ , $\mu^{(2)}=0.9$ Case 2) $\mu^{(1)}=0.3$ , $\mu^{(2)}=0.7$ Case 3) $\mu^{(1)}=0.5$ , $\mu^{(2)}=0.5$ Case 4) $\mu^{(1)}=0.9$ , $\mu^{(2)}=0.1$
初期地形	一様勾配斜面 ( $\tan \beta=1/20$ )
粒径構成	粒径構成数： $N=2$ 粒径 代表粒径： 細粒砂 $d^{(1)}=0.45$ mm ( $\leq 1$ mm を代表) 粗粒砂 $d^{(2)}=3$ mm ( $1$ mm < を代表) 初期含有率： $\mu_1=0.7$ , $\mu_2=0.3$
交換層の幅	$B=0.4$ m
入射波条件	碎波波高： $H_b=0.75$ m ( $H_s=0.6$ m, $T=3.5$ s) 碎波角： $\alpha_b=0^\circ$ 潮位： $M.S.L.=0.0$ m
限界水深	$h_c=1.3$ m
バーム高	$h_R=0.5$ m
漂砂量係数	$A=0.2$ , $\gamma=1.0$
漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
平衡勾配	$\tan \beta_c^{(1)}=1/100$ (細粒) $\tan \beta_c^{(2)}=1/6$ (粗粒)
土砂落ち込みの限界勾配	細粒：陸上 1/2, 水中 1/10 粗粒：陸上 1/2, 水中 1/3
計算範囲・メッシュ	$z=+1.0$ m ~ -3.0 m $\Delta z=0.1$ m
計算時間間隔	$\Delta t=0.01$ hr
計算時間	$t=200$ hr (計算ステップ数=20,000 steps)
境界条件	岸沖端境界： $q_s=0$ (漂砂の流出入なし)
数値計算法	陽解法による差分法

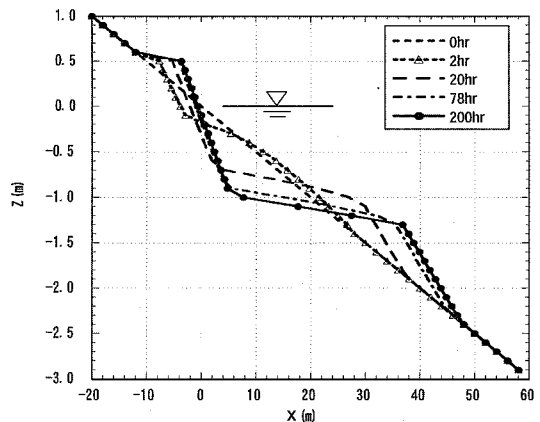


図-2 計算による海浜縦断形の経時変化 (再現計算, 初期  $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$ )

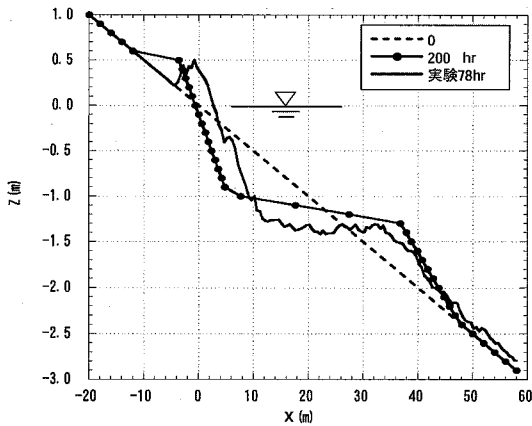


図-3 最終縦断形の実験と計算の比較

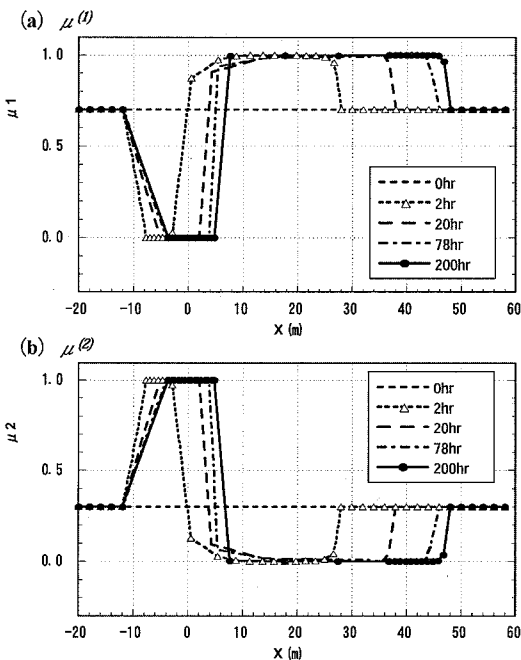


図-4  $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$ の岸沖分布の変化  
(再現計算, 初期  $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$ )

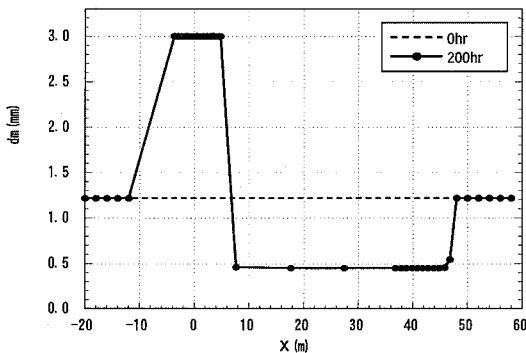


図-5 平均粒径の岸沖分布  
(再現計算, 初期  $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$ )

混合砂から構成される模型海浜において、粗粒砂と細粒砂とがそれぞれ分級され、粗粒砂は岸向きに運ばれ、細粒砂は沖向きに移動してそれぞれの砂の持つ平衡勾配に依存して安定形に達することが分かる。

(2) 細粒砂・粗粒砂の初期含有率  $\mu^{(1)}=0.3$ ,  $\mu^{(2)}=0.7$

実験では細粒砂・粗粒砂の初期含有率を、 $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$ として縦断形の変化が調べられた。ここで初期の粒径の含有率の相違が最終形状に及ぼす影響を調べるために、実験条件と逆に、細粒砂・粗粒砂の初期含有率を  $\mu^{(1)}=0.3$ ,  $\mu^{(2)}=0.7$ として同様に縦断形変化を調べた。図-6が縦断形の計算結果である。粗粒砂の含有率が增大した結果、図-2の場合と比較して岸方向に打ち上げられる砂量が増大し、バームの発達が非常に顕著となった。これと対照的に、沖方向へ移動した砂は少量となった。図-7(a), (b)は図-4(a), (b)と同様、粗粒砂・細粒砂の含有率  $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$ の時間的変化を示したものである。 $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$ の分布パターンは両者でよく似ているが、粗粒砂の含有率が0.7と大きくなった結果、岸向き漂砂が卓越し、沖向きに運ばれる細粒砂が大きく減少した結果、地形変化が相対的に浅い区域でのみ生じた。

(3) 初期含有率の変化と最終縦断形

粗粒砂・粗粒砂の初期含有率 ( $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$ ) を、(0.9, 0.1), (0.5, 0.5), (0.3, 0.7), (0.1, 0.9)と変化した場合の最終縦断形を再現計算 ( $\mu^{(1)}=0.7$ ,  $\mu^{(2)}=0.3$ )の結果と併せて示したのが図-8である。粗粒砂の含有率 ( $\mu^{(2)}$ )が増大すればするほどバームの発達がよくなる。対照的に、細粒砂の含有率 ( $\mu^{(1)}$ )が増大するとバームは発達しなくなり、沖向きの漂砂が著しくなると砂は主に沖合に運ばれ堆積する。このように海浜縦断形変化においては底質の粒径が決定的に重要な役割を果たす。細粒砂ばかりで構成される場合、初期海浜からの沖向き漂砂は収束することなく続く。このため平衡勾配に達することなく変形が続く。平衡断面が形成される

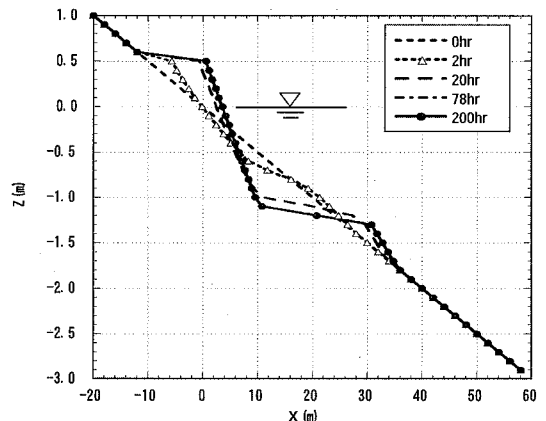


図-6 計算による海浜縦断形の経時変化  
(case2, 初期  $\mu^{(1)}=0.3$ ,  $\mu^{(2)}=0.7$ )

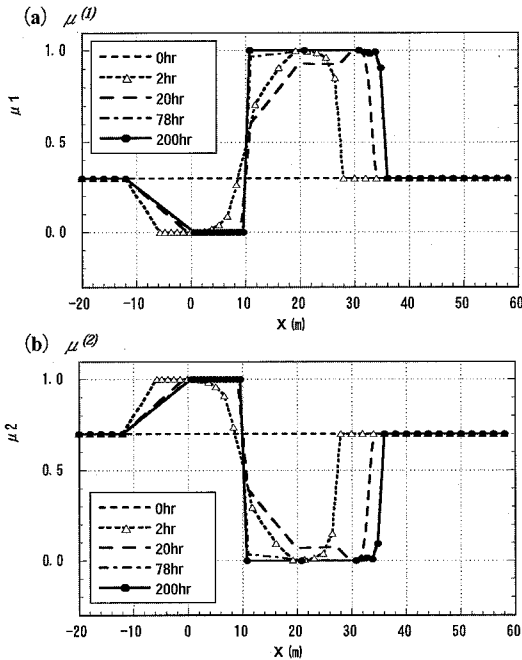


図-7  $\mu^{(1)}$ ,  $\mu^{(2)}$ の岸沖分布の変化 (case2, 初期  $\mu^{(1)}=0.3$ ,  $\mu^{(2)}=0.7$ )

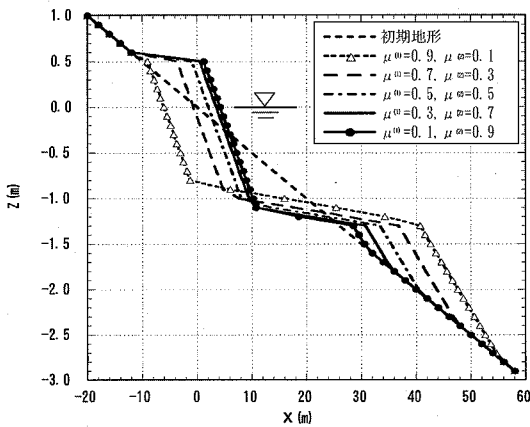


図-8 4 ケースの縦断形変化の比較

のは、前浜を覆いバームを形成する粗粒砂が豊富にある場合のみとなる。

5. 結 論

混合砂が細粒砂と粗粒砂に分級し、粗粒砂が岸向きに移動してバームを形成すること、細粒砂は沖向きに移動し  $h_c$  以深に落ち込むという特性がモデルによりよく再現された。バームの形成は急速に進むが、沖での細粒砂による地形変化はなかなか安定に至らないという特性も

再現された。含有率を変化させた計算によれば、粗粒砂分を増やすとバームの形成により前浜が増大し、汀線の前進に寄与し、逆に細粒砂分を増やすと  $h_c$  以深への流出が増える。初期含有率によってはバームを構成するとともに汀線付近に急勾配をなして堆積する粗粒分に限りがある場合も多い。この条件は自然海浜というよりも養浜時に生じるが、そのような場合、養浜砂は沖向きに移動して安定に達することがないという結果となる。これは養浜時に十分注意すべき点である。また本研究で明らかにしたように、海浜縦断形の変化において最も本質的なパラメータは粒径に応じた平衡勾配であり、これと含有率によって海浜縦断形変化が起こることを考慮すれば、汀線変化量などの指標は物理的意味に乏しいと考えられる。なお、本研究では、目黒ら (2005) の実験結果の再現を主目的にしているから、他の実験や現地海岸へ適用する場合、本研究の諸係数値は普遍性を有していないので、個別検討が必要である。現地海岸へ適用する場合には、海岸毎に、バーム高、波による地形変化の限界水深、粒径別の平衡勾配を対象海岸の縦断測量結果および粒径および粒度組成の岸沖方向分布などを参照して個々に設定する必要がある。

なお、等深線変化モデルでは、等深線が標高の一価関数を前提としているため、バー地形をそのまま表現することは原理的にできない。目黒ら (2005) の実験では初期段階でバー地形の発達が見られたが、本研究の計算ではそこまでは再現できなかった。

本研究は、大型二次元水路実験の結果に対してモデルの適用性を調べたものであるが、これにより実験結果がよく説明でき、その信頼性が確認された。今後、本モデルを、実海岸において混合粒径砂で養浜を行う場合へ適用することにより、岸沖方向での土砂の広がり予測や、粒径に応じた汀線への歩留まりの検討に役立つと考えられる。

参 考 文 献

宇多高明・河野茂樹(1996)：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.  
 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男(2003)：混合砂による養浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.596-600.  
 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋(1975)：波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp.329-334.  
 目黒嗣樹・山本幸次・福濱方哉(2005)：平衡海浜の形成過程と養浜材の粒径に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.501-505.  
 Kraus, N. C.(1985)：Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp.3-14.