

# 波の前傾化と混合粒径底質の分級を考慮した 3次元海浜変形シミュレーション

小林 博<sup>1</sup>・本田隆英<sup>2</sup>・佐藤慎司<sup>3</sup>・渡辺 晃<sup>3</sup>・磯部雅彦<sup>4</sup>・石井敏雅<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 東電設計(株)第二土木本部(〒110-0015 台東区東上野三丁目3-3)

<sup>2</sup>学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 文京区本郷七丁目3-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤工学専攻(同上)

<sup>4</sup>フェロー 工博 東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科環境学専攻(同上)

<sup>5</sup>正会員 博士(工学) 東京電力(株)技術開発研究所(〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

本研究では碎波帯における波の非線形変形と混合粒径底質の分級を考慮した3次元海浜変形モデルを構築することを目的とした。まずはじめに混合粒径底質を用いた室内平面海浜変形実験を行い、実験結果より離岸堤および突堤周辺の平面的な地形変化と底質粒径分布の変化を把握した。次に混合粒径砂の粒径別漂砂量と表層内混合率変化を表現できる断面地形変化の計算モデルを構築するとともにこれを平面場に拡張し、実験結果と比較することにより同モデルの妥当性を検証した。特に混合砂漂砂量モデルについては、大型断面実験に対する再現計算の結果から、波の前傾化を考慮した本モデルの適用性が高いことを確認した。

**Key Words :** *graded sediment, three-dimensional beach evolution model, atilt waves, sediment sorting*

## 1. はじめに

1997年に制定された環境影響評価法や1999年に部分改正された海岸法を受けて、沿岸域の環境問題を検討する事例が増えてきている。沿岸域の生態系は海岸地形だけでなく底質粒径とも密接に関係しており、さらに近年導入例が増えている養浜工の施工を考えた場合には、混合粒径で構成される海浜の変形現象を精度良く評価することが必要不可欠である。

以上の経緯をふまえて、混合粒径底質を扱った研究が近年活発に行われている。佐藤ら<sup>1)</sup>は一樣粒径に対する漂砂量算定式を、各粒径階毎に漂砂量を算出できる粒径別漂砂量算定式に改良した。用いられている漂砂量算定式は、Dibajnia・Watanabe<sup>2)</sup>により提案された波・流れ共存下のシートフロー漂砂量算定式である。渡辺ら<sup>3)</sup>は広範な条件下で混合砂シートフロー実験を行い、Dibajnia・Watanabeの式<sup>2)</sup>を

改良し、細粗底質間の相互作用や戻り流れを考慮した漂砂量算定式を提案した。Dibajniaら<sup>4)</sup>もDibajnia・Watanabe式<sup>2)</sup>の改良を試み、漂砂量表示式の線形化を行うとともに、不完全なシートフロー条件にも適用可能な混合砂漂砂量算定式を提案した。田中ら<sup>5)</sup>は田中ら<sup>6)</sup>が2粒径混合砂を用いて実施した大型水路実験に対して、佐藤ら<sup>1)</sup>の粒径別漂砂量算定式を用いて底質の混合率および移動層厚に着目した海浜変形数値計算手法を提案した。高地ら<sup>7)</sup>はDibajniaら<sup>4)</sup>の式を改良し、波の前傾化を考慮したシートフロー漂砂量算定式を提案している。中村ら<sup>8)</sup>は中型造波水路を用いた侵食性不規則波条件下での海浜断面実験を行い、混合率の違いによる侵食量の低減効果、底質の移動特性および混合率分布を報告している。後藤ら<sup>9)</sup>は粒状体モデルを用いたシミュレーションと振動流実験により、鉛直分級進行過程について粒子レベルでの力学的機構を考察して

いる。しかしながら、これまでの混合粒径に関する研究は振動流あるいは海浜断面変形に関するものが多く、平面波浪場を対象とした実験あるいは計算がなされた前例は数少ない。

そこで本研究では、まず構造物周辺における海浜変形と底質分級機構を平面実験により解明した。次に田中ら<sup>3)</sup>の断面変形数値モデルにおいて漂砂量モデルを改良し、大型断面実験に対する再現性の向上を図った。さらに同モデルを平面波浪場に拡張し、海浜変形ならびに底質粒径の表層平面分布・鉛直分布を精度良く計算する数値モデルを構築した。

## 2. 混合粒径底質を用いた平面水槽実験

### (1) 実験方法

幅11m、長さ6.5m、勾配1/20の平面造波水槽を用い、海岸構造物として離岸堤と突堤を設置した2ケースの実験を実施した。混合粒径底質には図-1に示す粒度分布をもつ相馬珪砂を使用した。中央粒径 $d_{50}$ は0.36mm、淘汰係数 $S_0=(d_{75}/d_{25})^{0.5}$ は1.35である。用いた底質は図-1に示す様に比較的広い粒度分布を持つものであるが、本研究のいくつかの解析では細粗2成分の代表粒径を考えることにした。中央粒径0.36mmを境界として細粗砂に分け、それぞれの平均粒径を求めると、細砂は0.21mm、粗砂は0.58mmとなった。現象を単純化するため規則波を用い、波浪条件は、 $H_0=4.4\text{cm}$ 、 $T=1.0\text{s}$ 、沖合一様水深部の水深23.0cmとした。また、入射角は初期汀線の法線方向に対して離岸堤では0度、突堤では30度とした。

実験では、まず構造物を設置した固定床にて約200地点(15cm間隔)における水位・底層流速を計測し波浪・海浜流場の特性を把握した。次に移動床実験を行うため、構造物を設置した状態で混合粒径底質を4cmの一樣厚さに敷き均した。水槽に注水し

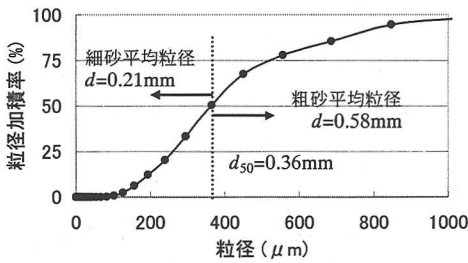


図-1 底質の粒度分布

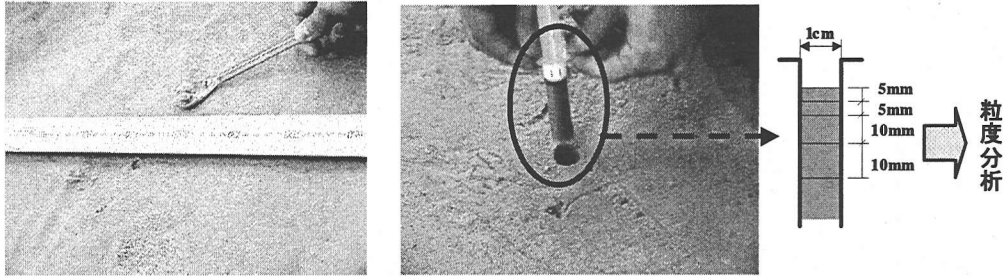


写真-1 底質採取の様子(左:表層,右:柱状コア)

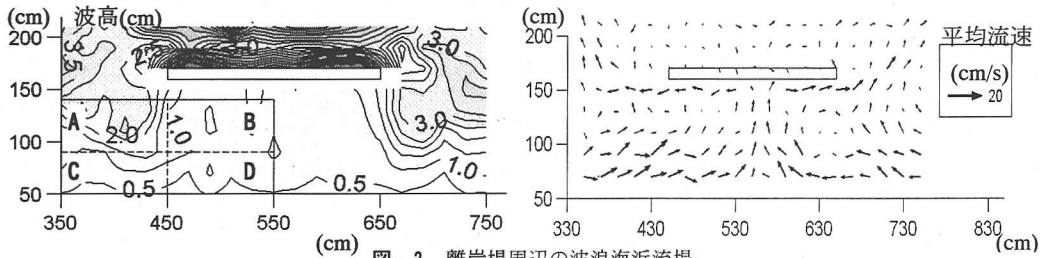


図-2 離岸堤周辺の波浪海浜流場

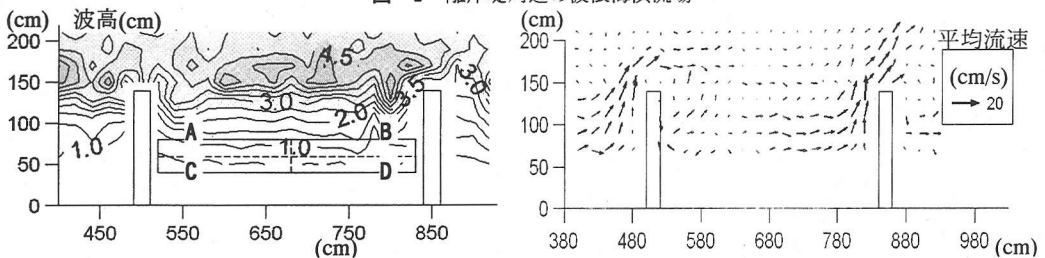


図-3 突堤周辺の波浪海浜流場

た後波を1時間作用させて排水し、砂面高を計測するとともに底質を表層(66点)と厚さ3cmの柱状コア(12点)で採取した(写真-1)。海浜形状がほぼ平衡状態に達した5時間後まで1時間ごとに以上の作業を繰り返した。柱状コアサンプラーはプラスチック製注射器の先端部を切り取ることにより作製した。これにより直径1cm程度の柱状コア底質を乱さずに採取し、同試料を表層から厚さ5,5,10,10mmの4層にスライスした。採取した底質は、レーザー回折式粒度分布測定装置を用いてその粒度分布を測定した。

## (2) 固定床実験結果と底質条件

固定床条件における、波高・海浜流分布を図-2、図-3に示す。回折による波高減衰ならびに離岸堤による循環流と突堤による沿岸流の遮断が明確に捉えられている。波高分布図の図中A~Dの領域は、地形・分級特性を検討する際の小領域を表している。本実験の条件に対して、中央粒径( $d_{50}=0.36\text{mm}$ )に対するシールズ数を計算すると大きいところでも0.06となり、これは全体的に底質が移動し難い状態であり、掃流が卓越することを示している。また、中央粒径を用いてSunamura・Horikawa<sup>10)</sup>のC値を計算すると、 $C=3.5$ の堆積型海浜である。粗砂成分に対しては $C=2.5$ 、細砂成分に対しては $C=4.9$ となり、実験室レベルでは $C<4$ で堆積型海浜になること<sup>10)</sup>から、本実験海浜モデルは堆積型海浜であり特に粗砂成分が掃流状態で岸に運ばれ堆積する特徴を持つことが予想される。

## (3) 離岸堤周辺の地形変化

図-4は、地形変化、表層の中央粒径分布および淘汰係数の分布を離岸堤中心線より左側の領域に対して示したものである。中央粒径分布および淘汰係数分布の表示領域は、地形変化中の点線枠に一致している。さらに地形変化量、中央粒径、淘汰係数の場所ごとの変化特性の傾向を把握するために、図-2に示したA~Dの小領域に対して、これらの平均量を計算し、その時間変化を図-5に示した。また、領域内の12点で採取した底質コアのなかで図-4に示す岸側堆積域の3点(B1,5,9)について地形変化と粒径の鉛直分布の時間変化を示したものが図-6である。

図-4より、沖合が侵食され離岸堤背後に堆積する地形変化が発達するとともに、沖側が細粒化し岸に粗砂が選択的に堆積していることが分かる。ただし、離岸堤背後の堆積域表層には細砂成分が堆積しており、これは離岸堤背後に発達する循環流により、主として細砂成分で構成される底質の輸送が影響し

ているものと考えられる。また、図-4の地形変化と淘汰係数を合わせ見ると、特に侵食・堆積が活発な領域で、底質の分級が急激に進行していることが分かる。

地形・分級特性を図-5の4領域について検討してみると、侵食が著しいA領域では細粒化と分級が著しく進行している。C領域では、同領域が堆積に転じる頃(2時間後)から粗粒化と分級が進む。D領域では、2時間後から舌状砂州が形成され堆積と粗粒化が進む。B領域では、細粒化の傾向にあるものの2時間後から4時間後にかけて粗粒化も見られる。ただし、このとき淘汰係数がやや大きいことから細砂と粗砂が混合していることがうかがえる。

全体的な傾向として図-5を見ると、地形変化は、左側のA,C領域が侵食域となり、右側のB,D領域が堆積域となっている。すなわち、大局的には離岸堤で遮へいされていない領域から遮へい域へと向かう沿岸方向の地形変化が生じている。これに対し粒径は、沿岸方向の変化も見られるもののA,Bが細粒化し、C,Dが粗粒化するという岸沖方向の変化が卓越している。淘汰係数は時間とともに減少しており、分級がほぼ単調に進んでいることが分かる。

図-6のB1,5,9は岸側堆積域でのコア採取点であるが、いずれも堆積域では粗砂が多く見られることが分かる。特に離岸堤遮へい域の堆積域に当たるB5,9では、厚さ5mmの表層が細粒化したまま、その下に粗砂が堆積していく様子が明確に捉えられている。これは、掃流により輸送堆積した粗砂層の上に沖から岸に輸送されてきた細砂が循環流によってさらに運ばれ、流れが弱くなる離岸堤背後で堆積するためと考えられる。

## (4) 突堤周辺の地形変化

離岸堤の場合と同様に、突堤の実験結果を図-7,8,9に示す。図-7の地形変化を見ると、沿岸漂砂の遮断により左突堤下手側が侵食して右突堤基部に堆積している様子が確認できる。淘汰係数については突堤においても離岸堤の場合と同様、底質採取領域で粒径の均一化がよく表れており、侵食・堆積域で特に底質の分級が進んでいることが分かる。

図-3の小領域ごとの平均量の時間変化を示した図-8を見ると、2時間後まではほぼ全領域で堆積と粗粒化が見られるのに対し、2時間後からは上手側に当たるA,Cと下手側のB,Dでは変化特性が異なる。これは、2時間後までの移動は主として岸沖方向のものが卓越し、汀線近傍の小領域ではほぼ様な堆積と粗粒化が見られるのに対し、それ以降の土砂移動は沿岸方向のものが卓越し、上手側で侵食、下手

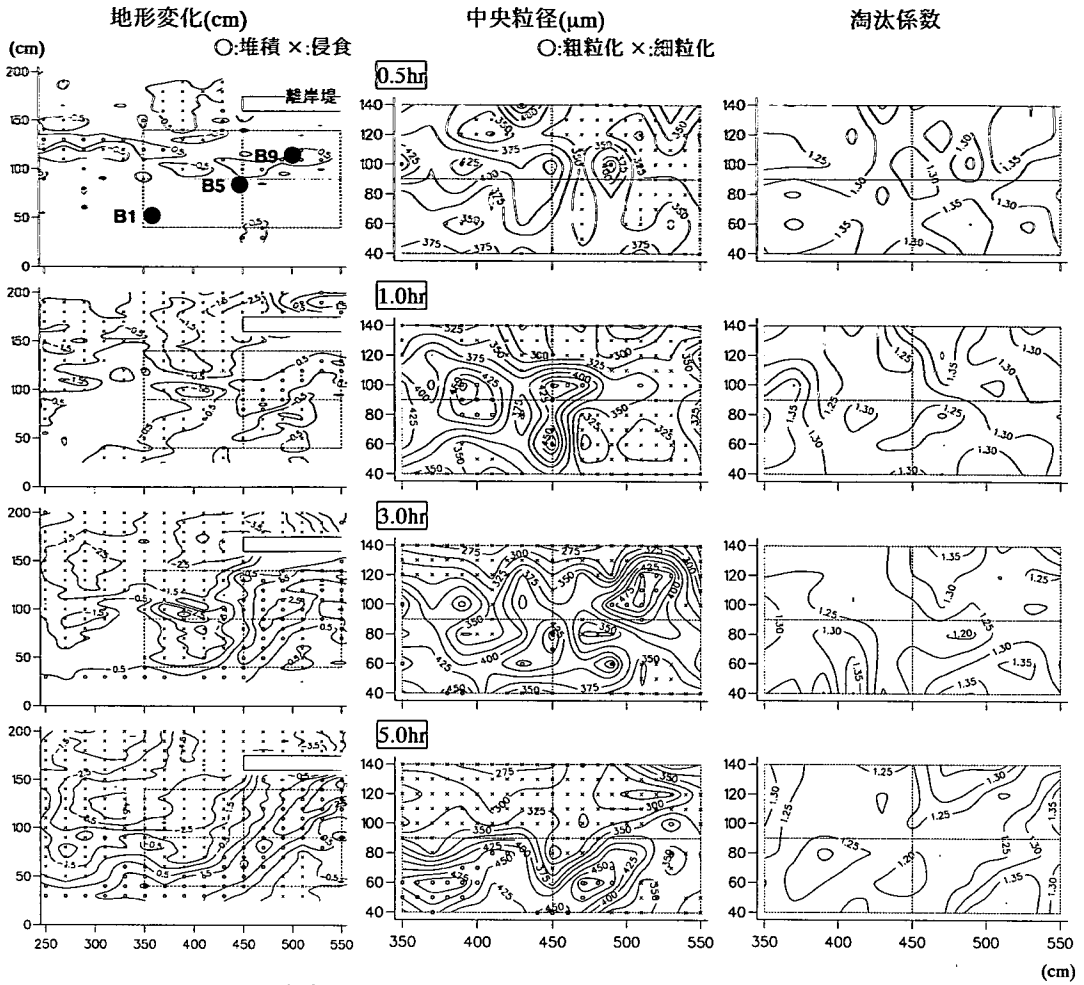


図-4 離岸堤周辺における地形変化・中央粒径・淘汰係数の時系列変化

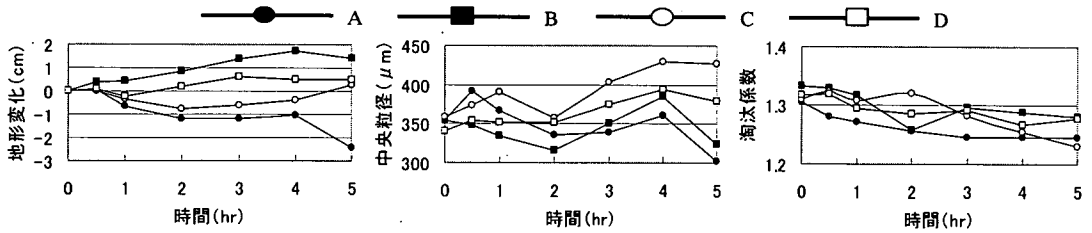


図-5 離岸堤周辺の領域ごとの地形変化と分級過程の時系列変化

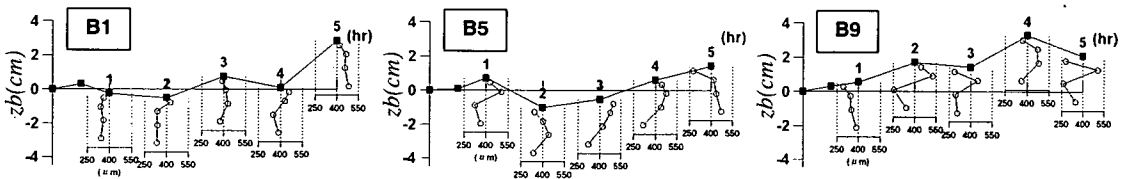
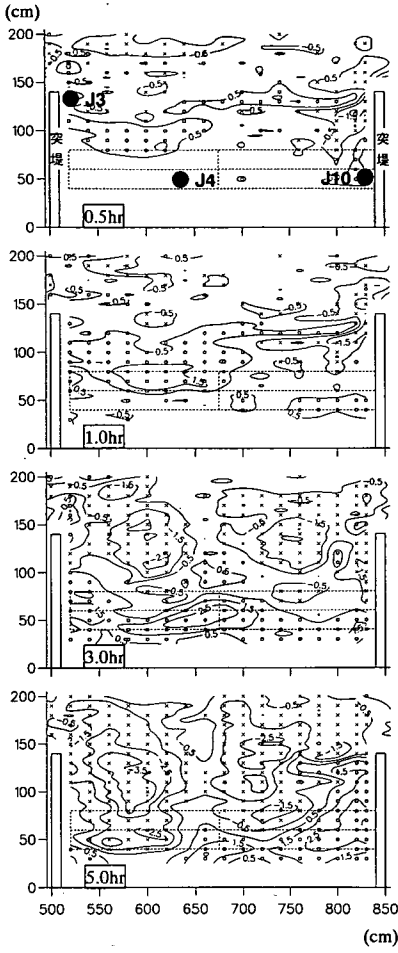


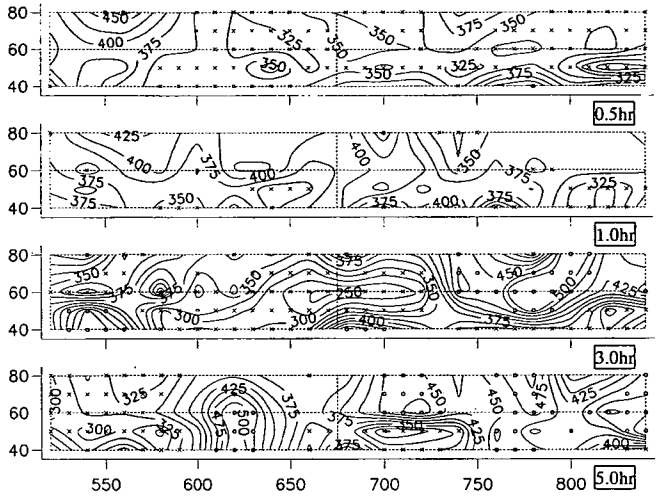
図-6 離岸堤周辺の地形変化と鉛直粒径分布の様子の時系列変化

地形変化(cm)

○:堆積 ×:侵食



中央粒径( $\mu\text{m}$ ) ○:粗粒化 ×:細粒化



淘汰係数

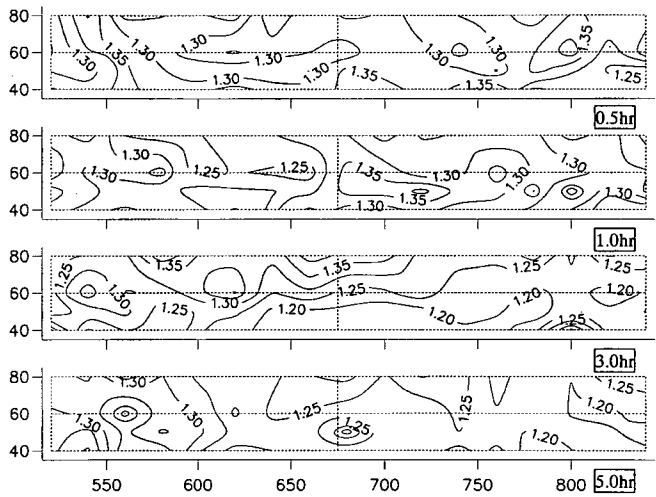


図-7 突堤周辺における地形変化・中央粒径・淘汰係数の時系列変化

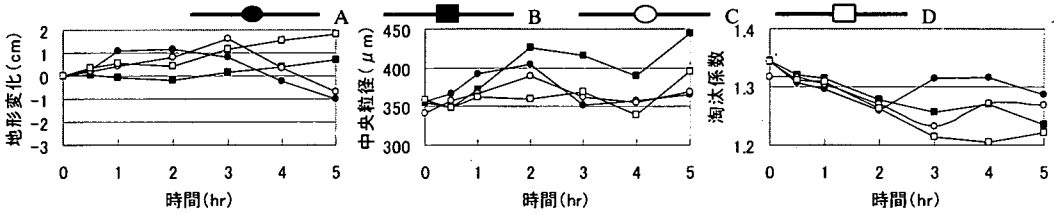


図-8 突堤周辺の領域ごとの地形変化と分級過程の時系列変化

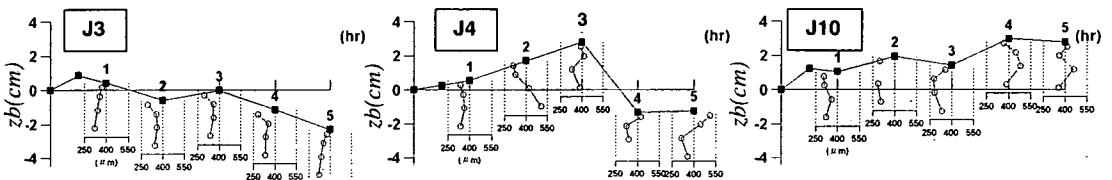


図-9 突堤周辺の地形変化と鉛直粒径分布の様子の時系列変化

側で堆積が進む傾向にあるためと考えられる。すなわち 2 時間後以降では、A,C 領域では侵食が進むとともに細粒化が進み、B,D 領域では堆積と粗粒化がさらに進んでいる。下手側の B,D 領域では、淘汰係数がさらに小さくなっていることから、時間の経過とともに汀線近傍には粗砂のみが選択的に堆積していることが分かる。これに対し、上手側の A,C 領域では、淘汰係数が増加していることから、侵食が進んで分級が進行していない初期地盤が再び露出したと考えられる。

これらの地形変化・分級特性は、コア試料の粒度分布を示した図-9 により詳細を確認できる。上手側沖合いの J3 地点では、ほぼ単調な侵食が見られ、粒度分布も初期状態に近い様な分布が残っている。下手側汀線近傍の J10 地点では、ほぼ単調に堆積しながらやや粗粒化していく過程が捉えられている。これらに対し、汀線中央付近に位置する J4 地点では 3 時間後までは堆積が見られるが、それ以降は急激な侵食が進んでおり、これは、前半では主として堆積型海浜の形成にともなう岸沖方向の漂砂が卓越し、後半で沿岸方向の漂砂が卓越した結果と考えられる。

### (5) 離岸堤条件と突堤条件の比較

離岸堤のケースと突堤のケースを比較すると、突堤では、岸沖漂砂の影響と沿岸漂砂の影響が約2時間後を境にして分離して現れているのに対し、離岸堤では初期段階から循環流による沿岸漂砂の影響が強く現れている。これは、図-2、図-3に示した海浜流場の強さの違いに起因するものと考えられる。す

なわち、離岸堤条件では、汀線近傍の海浜流の流速が強いため、約2時間後までに卓越する岸向き漂砂量が強い海浜流によって遮へい域へ向かうものと考えられる。また、図-4、図-7や図-6、図-9をさらに詳細に見ると、どちらの条件においても地形変化と中央粒径の変化は場所的な変動が大きい。これに対応して、海浜の変形とともに表層底質はパッチ状に細粒化と粗粒化を繰り返しながら分級されていく。

## 3. 平面場へ拡張した混合粒径砂海浜の地形変化の数値モデル

### (1) 波浪・海浜流場の計算

海岸構造物周辺の波・流れを精度よく計算できるモデルとして、Nwogu<sup>11)</sup>の修正 Boussinesq 方程式に碎波にともなう運動量拡散項と底面摩擦項を付加した小林ら<sup>12)</sup>のモデルがある。このモデルは多方向不規則波に対して構築されたものであるが、規則波に対しても十分適用可能であると考えられる。本研究では、平面計算においては小林ら<sup>12)</sup>のモデルをそのまま用いることとしたが、断面計算においては、その地形変化が碎波点のわずかな変動や戻り流れの発達の影響を大きく受けるため、碎波と戻り流れについて以下のように改良した。Boussinesq 方程式による計算結果が実験結果を十分再現できている(図-10、図-11)とみなし、さらにパーの発達にともなう碎波点の移動を合理的に表現するためにパー頂部の海底勾配を用いて、合田<sup>13)</sup>の碎波指標を適用した。また、碎波帯内の流速場の再現性を向上させるため

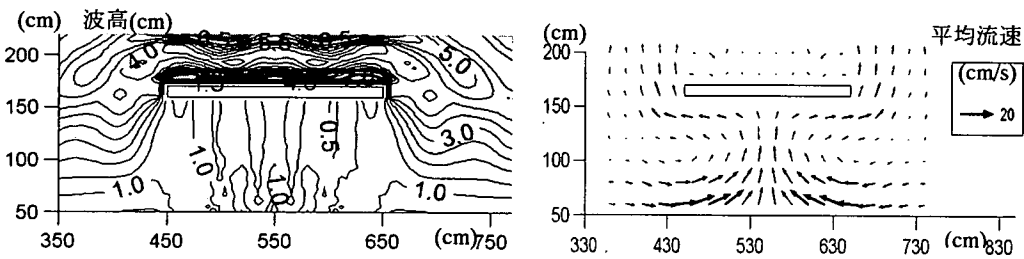


図-10 計算による離岸堤周辺の波浪海浜流場 (左:波高,右:平均流速)

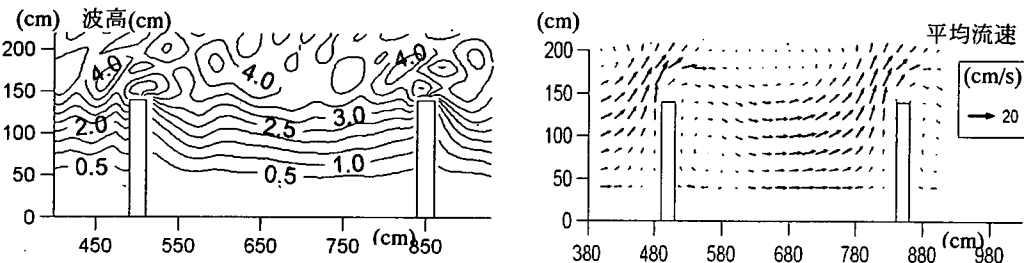


図-11 計算による突堤周辺の波浪海浜流場 (左:波高,右:平均流速)

に、芝ら<sup>14)</sup>のモデルにより戻り流れを考慮した。

平面・断面計算とも透水性を考慮する (Kennedyら<sup>15)</sup>) ことにより、汀線部における波の遡上計算を行った。また、突堤を用いた実験では構造物の周囲に捨石を用いた消波工を設けて突堤基部の局所侵食を防止したが、計算においては突堤周辺に実験と同等な反射率を有する薄いスポンジ層を配置することによりこの消波工を模擬した。

以上のモデルにより断面実験・平面実験に対する波浪・海浜流場ならびに戻り流れが精度良く計算できることを確認した。本研究では地形変化が進んだ段階で変形後の地形を用いて波浪・海浜流場を再計算することとしている。

## (2) 粒径別漂砂量の計算

粒径別漂砂量を算出する混合砂漂砂量算定式として佐藤ら<sup>1)</sup>のモデルと高地ら<sup>7)</sup>のモデルを組合わせて用いる。佐藤ら<sup>1)</sup>のモデルは、Dibajnia・Watanabe<sup>2)</sup>のシートフロー漂砂量算定式をベースに、異粒径間の干渉機構をモデル化したもので、複数の粒径階に対しそれぞれの漂砂量を算出することができる。一方、砕波帯内で加速度波形が非対称となる条件にも適用可能な漂砂量算定式としてDibajniaら<sup>4)</sup>の式に加速度非対称の効果を取入れた高地ら<sup>7)</sup>のモデルが提案されている。このモデルに佐藤ら<sup>1)</sup>による異粒径間の干渉機構を組み込むと、一次元振動流場における粒径別の無次元漂砂量は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \frac{Q_i}{w_i d_i} \\ &= p_i \cdot 0.019 \frac{u_c' T_c \{ \Omega_c + 2(1 - \alpha_c) \Omega_c' \} - u_i' T_i \{ \Omega_i + 2(1 - \alpha_i) \Omega_c' \}}{(T_c + T_i) \sqrt{sgd_i}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_j \cdot f_{2i} \leq \omega_c \\ \omega_j \cdot f_{2i} > \omega_c \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d_i}} \frac{1}{2\alpha_j} \cdot f_{1i} \\ \Omega_j = 0 \\ \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d_i}} \frac{1}{2\alpha_j} \frac{\omega_c}{\omega_j \cdot f_{2i}} \cdot f_{1i} \\ \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d_i}} \frac{1}{2\alpha_j} \left( 1 - \frac{\omega_c}{\omega_j \cdot f_{2i}} \right) \cdot f_{1i} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$f_{1i} = \left( \frac{d_i}{d_m} \right)^{0.5}, \quad f_{2i} = \left( \frac{d_i}{d_m} \right)^{0.7}, \quad d_m = \sum_{i=1}^n p_i \cdot d_i \quad (3)$$

ここで、添え字*i*は粒径*d<sub>i</sub>*の底質に対する諸量である

ことを示し、 $\Phi_i$ は無次元漂砂量、 $Q_i$ は漂砂量フラックス、 $w_i$ は底質の沈降速度、 $d_m$ は混合粒径砂の平均粒径、 $p_i$ は混合率、 $n$ は粒径階の数である。 $u_j$ 、 $T_j$ はそれぞれ流速の代表値、継続時間であり、添え字*j*は*c*または*t*を表し、それぞれ岸向き流速、沖向き流速に対応している。また、 $s$ は砂の水中比重、 $g$ は重力加速度である。さらに、 $\omega_j$ 、 $\theta_j$ は次式で表される底質の移動しやすさを規定するパラメーターで、 $\omega_{cr}$ はその臨界値である。なお、本研究では $\omega_{cr}$ の値はシートフローに対してはDibajniaら<sup>3)</sup>にならない1.2、掃流移動に対しては試行計算結果から0.5を用いた。

$$\omega_j = (\theta_j - \theta_{cr}) \frac{d_i}{w_i T_j} \quad (4)$$

$$\theta_j = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{sgd_i} \quad (5)$$

また、 $\alpha_j$ は流速波形の前傾度であり、流速波形のゼロクロス点から最大点 (または最小点) までの時間  $T_{ju}$  を用いて次式で表される。

$$\alpha_j = \frac{T_{ju}}{T_j} \quad (6)$$

さらに、 $\omega_j'$ 、 $u_j'$ は加速度の非対称性を考慮することによりあらわれた変数であり、それぞれ $\alpha_j$ を用いて以下のように表される。

$$\omega_j' = (\theta_j' - \theta_{cr}) \frac{d_i}{w_i 2(1 - \alpha_j) T_j} \quad (7)$$

$$\theta_j' = \frac{u_j'^2}{2sgd_i \sqrt{2(1 - \alpha_j)}} \quad (8)$$

$$u_j' = \frac{u_j}{\sqrt{2\alpha_j}} \quad (9)$$

ここに、 $\theta_{cr}$ は底質の移動限界流速に対する $\theta_j$ の値であり、芦田・道上<sup>16)</sup>の粒径依存性を考慮した限界掃流力に基づき評価する。

また、式(3)において、 $f_{1i}$ 、 $f_{2i}$ はそれぞれ異粒径間の干渉により半周期間の移動量が変化する効果、浮遊砂の巻き上げ高さが変化する効果を表す係数である。

以上が一次元振動流に対する漂砂量モデルである

が、波と海浜流が共存する平面場への適用に際しては、振動流の方向を波向にとるとともに海浜流を波向方向とその法線方向に分解することにより代表流速を定義するDibajnia・渡辺<sup>17)</sup>の方法と、波・流れを含む底面流速が描く軌道の長軸方向を漂砂方向とする小林ら<sup>12)</sup>の方法がある。高地ら<sup>7)</sup>のモデルにおける漂砂方向に小林ら<sup>12)</sup>の方法を用いると、汀線付近で波動成分により増大した漂砂が海浜流方向に卓越し再現性が悪いいため、本研究ではDibajnia・渡辺<sup>17)</sup>の方法を採択した。

### (3) 平面場へ拡張した表層混合率を考慮した地形変化の計算

混合粒径砂の粒径別漂砂量と表層混合率変化を表現できる田中ら<sup>4)</sup>の断面地形変化の計算法を平面場に拡張した。表層の混合率変化を計算するために、計算領域を岸沖方向  $dx$ 、沿岸方向  $dy$ 、鉛直方向  $dz$  に分割する。そして各微小要素における粒径毎の混合率  $p_i(x,y,z)$  を定義する。1回の地形変化計算で、砂面  $z_b$  から厚さ  $\Delta$  の混合層内で各粒径砂の混合が生じると仮定する。各粒径の実際の漂砂量は砂の存在率を考慮して次式で表すことができる。

$$Q_i(x,y) = \Phi_i(x,y) \cdot w_i \cdot d_i \quad (10)$$

ここで、 $Q_i$  の評価には混合層内の平均混合率  $\bar{p}_i(x,y)$  を用いている。 $\bar{p}_i(x,y)$  および平均粒径  $d_m(x,y)$  はそれぞれ以下のようになる。

$$\bar{p}_i(x,y) = \frac{1}{\Delta} \int_{z_b-\Delta}^{z_b} p_i(x,y,z) \quad (11)$$

$$d_m(x,y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \bar{p}_i(x,y) \cdot d_i \right\} \quad (12)$$

なお、混合層厚さ  $\Delta$  は、細粗砂2粒径砂に対しては、Dibajnia ら<sup>18)</sup>を参考に次式により決めることができ、小規模平面実験では  $\Delta=5$  mm 程度となる。

$$\frac{\Delta}{d_c} = 21.7 \cdot p_c^{0.45} \cdot \Psi_c \quad (13)$$

ここに  $d_c, p_c, \Psi_c$  はそれぞれ粗砂に対する粒径、混合率、シールズ数である。

地形変化の計算についても縦断モデルと同様に各粒径ごとの相当砂層厚の考え方を踏襲する方法を用いる。すなわち混合層内における  $d_i$  の粒径砂の相当

砂層厚さ  $h_i$  を次式で与える。

$$h_i(x,y) = \Delta \cdot \bar{p}_i(x,y) \quad (14)$$

各粒径の砂の移動にともなう地形変化は底質の連続式である式(15)から計算することができ、全地形変化量  $\Delta h$  は、それぞれの地形変化量  $\Delta h_i$  を足し合わせるにより式(16)で評価できる。

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( Q_{xi} - \varepsilon_x | Q_{xi} | \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( Q_{yi} - \varepsilon_y | Q_{yi} | \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad (15)$$

$$\Delta h(x,y) = \sum_{i=1}^n \Delta h_i(x,y) \quad (16)$$

ここに、 $Q_{xi}, Q_{yi}$  は漂砂量フラックス  $Q_i$  の  $x,y$  方向成分、 $z_b$  は砂面高、 $\varepsilon_x$  は海底勾配の影響を表す無次元定数であり、本研究では2とした。地形変化後の混合率  $p_i(x,y,z)$  は、混合層内については計算時間ステップ  $dt$  ごとに、各粒径砂成分の収支を考慮したうえで、混合層内で一様になるとして置き換えた。

## 4. 縦断実験結果と計算結果の比較

### (1) 縦断実験概要と計算条件

田中ら<sup>5)</sup>により屋外大型水路を用いて混合砂海浜の縦断地形変化実験が行われている。2で示した平面水槽実験に対する3次元再現計算を行う前段階として、まずこの断面地形変化実験に対する2次元再現計算を行った。これについては田中ら<sup>4)</sup>により既に試みられているが、実験の初期段階であるバーの形成までしか再現されていない。本研究では波浪・流速場の計算法を改良するとともに漂砂量モデルに波の前傾化を考慮したモデルを用い、再現性の向上を図った。

実験では、幅3.4m、長さ205mの大型造波水路に中央粒径0.27mmの細砂と0.84mmの粗砂を7:3の割合で混合した砂で勾配1/30の海浜断面を作り、沖側の水深を4.5mとして縦断地形と粒径分布の変化を追跡している。入射波は規則波で、堆積性波浪 ( $H_0=0.34\text{m}, T=3.5\text{s}$ ) を38時間作用させた実験条件に対して再現計算を行った。波浪場の計算格子間隔は0.2m、計算時間間隔は0.035sとした。混合層厚さ  $\Delta$  は式(13)を参考に4cmとし、 $dz=1\text{mm}, dt=60\text{s}$ 、底質



移動状態はシートフロー状態であったことから  $\theta_{cr}=0$ とした。地形変化にともなう外力の変化は1時間毎に更新した。計算対象時間は30時間である。

## (2) 計算結果と考察

地形変化および底質の分級の様子を図-12に、碎波点の変化を図-13に示す。縦断実験結果の詳細については田中ら<sup>9)</sup>の報告を参照されたい。実験結果に関して特徴のみ簡単に記述しておく。地形変化は1時間後 $X=15m$ で高さ20cm程度のバーが発生して岸側へ移動し、汀線付近に表層を粗砂で覆われたバームが形成される。碎波に関しては、地形変化の進行にともない碎波点が岸へ移動し、碎波帯内の底層では約0.1m/s程度の沖向き流れが発達している。この沖向き流れは、バーが発達するにつれて弱くなり、バーが十分に発達した後は有意な定常流は見られない。これは、バーの発達により、碎波形式が変化し、碎波ポアの形成による岸向きの質量輸送量が減少するためと考えられる。芝ら<sup>14)</sup>の戻り流れモデルではこのような碎波形式の変化が考慮されていないことと田中ら<sup>9)</sup>の報告を受けて、本研究ではバーが十分に発達した8時間後以降では、戻り流れはまったく発生しなくなるものと仮定して計算を進めることにした。

図-12を見ると、再現計算においては8時間後に $X=10m$ 付近で高さ20cm程度のバーが発生している。前述の通りこの時点から定常流成分をゼロとして計算を進めたところ、粗砂が先行しつつバーが徐々に岸へ移動し30時間後にはバームが形成された。さらに $X=10m$ 付近の表層下に粗砂が確認できるが、砂層内に粗砂層が残される現象は、田中ら<sup>9)</sup>による縦断実験でも報告されている。また、海浜変形が進むとバー沖側斜面の傾斜が急になり、碎波が遅れる傾向も図-13に明確に捉えられている。以上から、本モデルにより碎波帯内の岸向き漂砂量が精度よく算定され、底質の分級まで含めた地形変化計算が再現できた。しかしながら、計算ではバーの発達する位置が実験より岸側に生じており、これにはバー発生の主要因と考えられる戻り流れのモデル化に改善の余地がある。また、漂砂機構が十分解明されていない遡上域に対してシートフロー漂砂量算定式を用いており、結果として遡上域(30時間後では $X=-3\sim 13m$ )における岸向き漂砂量を過小評価しているため、バームの形成は完全ではない。碎波形式の変化を考慮した戻り流れの計算法の改良とともに今後の課題である。

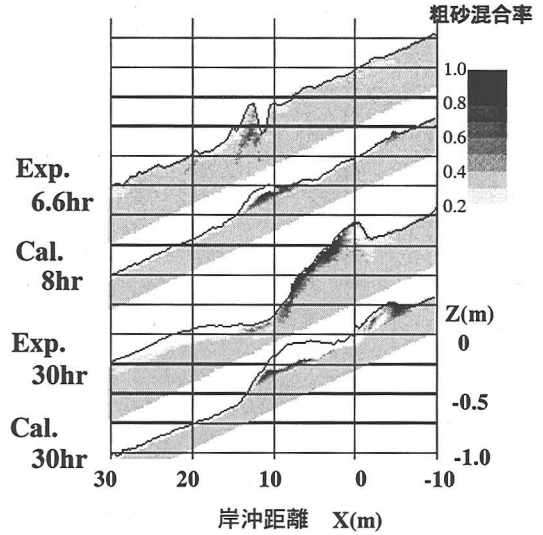


図-12 縦断地形変化実験再現計算結果

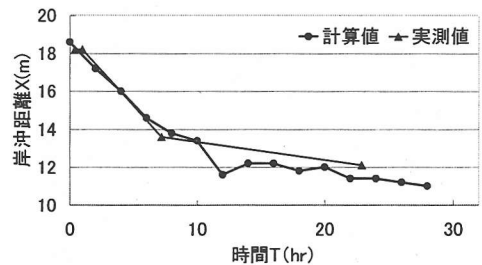


図-13 碎波点変化の様子

## 5. 平面実験結果と計算結果の比較

### (1) 計算条件

2.で解説した平面水槽実験で用いた混合粒径砂を細粗2種粒径砂(細砂粒径, 粗砂粒径, 混合率)として扱うことにより再現計算を実施した。この場合、初期平均粒径 $d_m$ は0.4mmとなる。波浪場の計算格子間隔は5cm, 計算時間間隔は0.01sとした。なお、予備計算の結果によれば粒径数を増やしても地形ならびに粒度の計算結果の特性に有意な差異は見られなかった。

地形変化の計算においては、 $\Delta=5mm$ ,  $dz=1mm$ ,  $dt=3.6s$ とし、地形変化にともなう外力の変化は1時間毎に更新した。また、実験はシールズ数が小さい掃流移動状態であったため、 $\theta_{cr}$ は実験結果より限界シールズ数を0.01として設定した。

### (2) 計算結果

図-14, 図-16 はそれぞれ離岸堤・突堤実験に対する1,3,5時間後の地形変化と表層平均粒径分布の計算結果である。また、図-15, 図-17 は実験と同

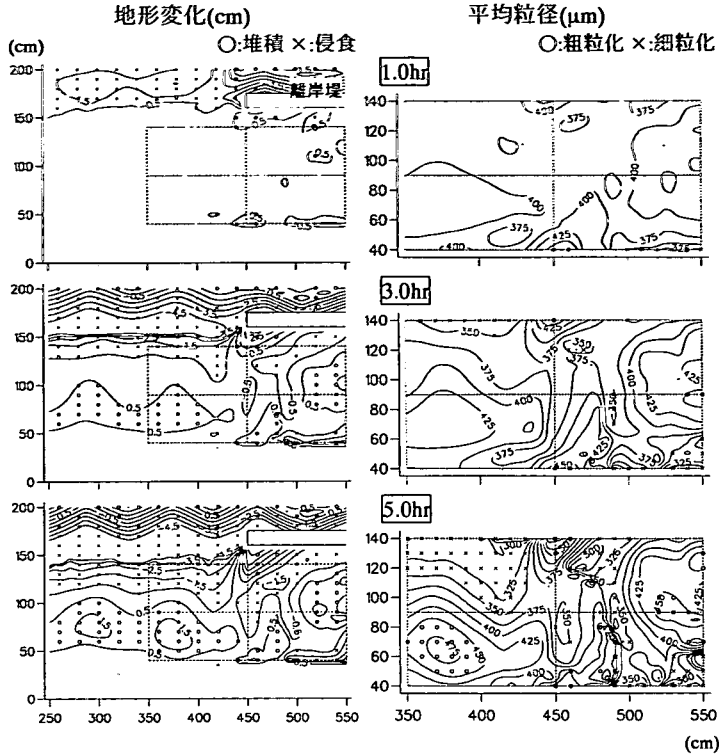


図-14 計算による離岸堤周辺における地形変化・平均粒径の時系列変化

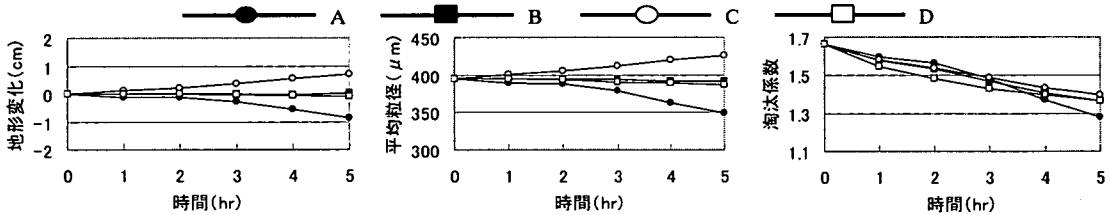


図-15 計算による領域ごとの地形変化・平均粒径・淘汰係数の時系列変化 (離岸堤)

じ小領域平均の地形変化・表層平均粒径・淘汰係数の経時変化を示したものである。なお、計算における淘汰係数は、細粗どちらかの成分が25%以下の場合には  $d_{25}$  と  $d_{75}$  が一致するので、定義より1であり、初期状態である50%のときは1.66になる。この間の状態では成分比に応じて線形的に変化するものとして計算した。以下に、地形変化ならびに粒度変化について、実験値と計算値の比較を行い、モデルの妥当性について検討する。

#### a) 離岸堤

地形変化の計算結果を見ると、1時間後に離岸堤左の位置でのトラフの形成にともなう侵食、ならびに離岸堤背後の堆積が生じはじめ、3.5時間後にはそれらが発達するとともに、汀線部での堆積が顕著になる。平均粒径は、この地形変化に対応し、離岸

堤背後と汀線部で粗粒化、ならびに離岸堤左で細粒化している。

これと実験値(図-4)を比較する。計算値は、離岸堤左の侵食がやや沖側になるとともに、侵食量を過大評価している。これは碎波点変動の再現精度が十分でないためである。また、汀線部での堆積は実験ではバームへと進行するが、計算では岸向き漂砂量が小さいため、バームが形成されるまでにはいたらず、汀線よりもやや沖側の堆積となった。これは、図-12に示した断面変形実験の再現でも得られた結果と同じである。離岸堤背後に堆積域は再現されているが、舌状砂州の発達までには至っていない。粒径分布については、実験ではバームが形成された汀線部での岸沖方向の若干のずれを除けば計算値と実験値とよく対応していると思われる。

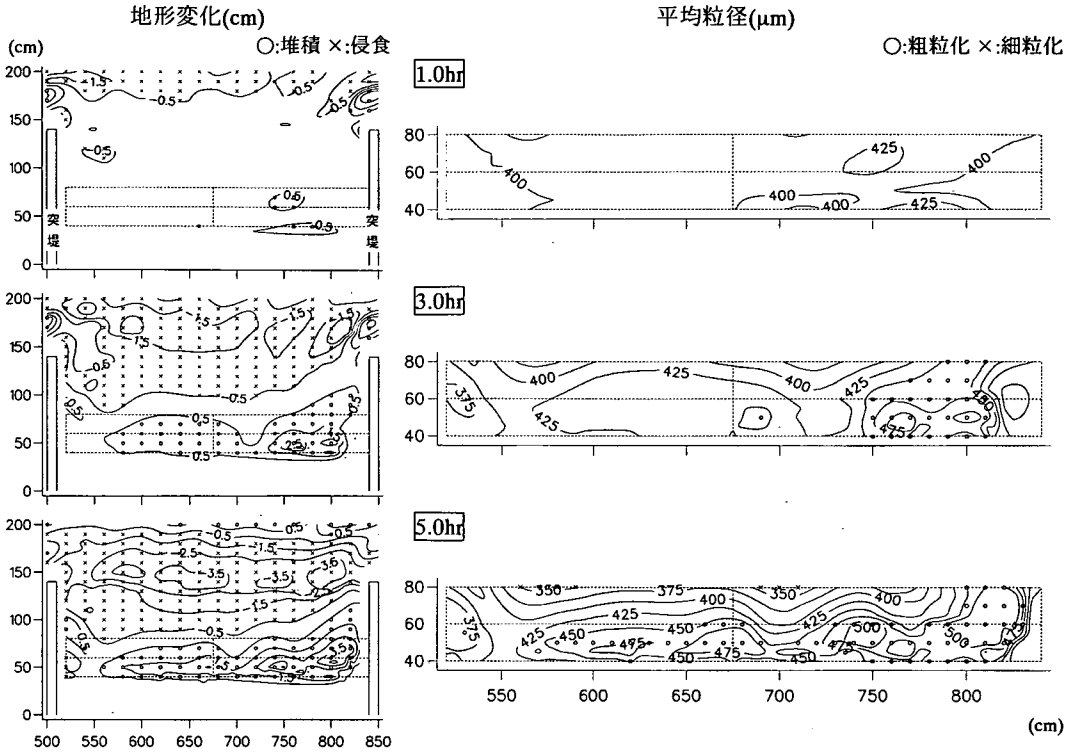


図-16 計算による突堤周辺における地形変化・平均粒径の時系列変化

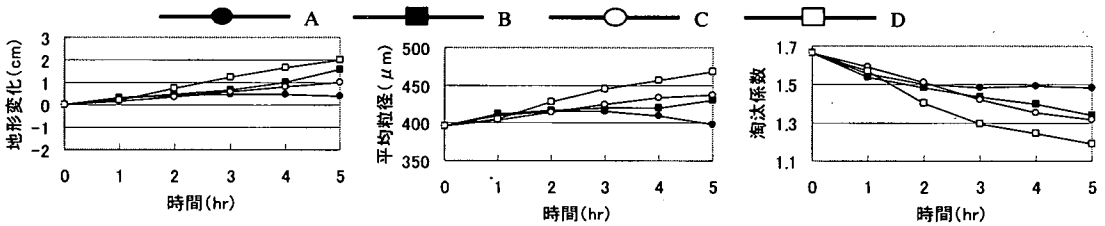


図-17 計算による領域ごとの地形変化・平均粒径・淘汰係数の時系列変化 (突堤)

領域ごとの平均粒径・淘汰係数の時系列変化について実験値(図-5)と比較する。離岸堤背後である領域B,Dでの粒径変化をやや過小評価しているものの、淘汰係数の減少は分級がほぼ単調に進むことを示しており、実験値と計算値の粒度変化特性は比較的一致していると言える。

#### b) 突堤

図-16によれば、沿岸漂砂の阻止にともなう突堤上手側の堆積ならびに回折域の堆積、下手側の侵食が計算結果に現れており、実験結果(図-7)との対応は良好である。平均粒径分布については、突堤回折域での細粒化ならびに突堤上手側での顕著な粗粒化が概ね再現できている。汀線部については、細粒化の位置は必ずしも一致していないが、突堤間の沿岸方向では、粗粒化した領域がパッチ状に見られ、実際の分級機構を適切にモデル化していると考えら

れる。

領域ごとの平均粒径と淘汰係数の時系列変化について図-17を見ると、計算では全領域とも粗粒化・均一化する傾向にあるが、領域Aのみ3時間後以降やや細粒化に転じて最終的に初期平均粒径程度となるのに加え、淘汰係数の減少が見られない。これも実験で見られた初期地盤の露出によるものと考えられる。

実験値(図-8)と比較すると、計算では岸側の領域C,D内に堆積のピークが見れるため、実験値に比べて粗粒化・均一化を過大評価しているものの、沖側A,Bでの実験値との対応はよく、全体的に見てモデルの底質分級に対する再現性が確認できたと考えられる。

## 6. 結論

本研究では混合粒径底質を用いた室内平面海浜変形実験を実施し、地形変化と分級の特性を把握した。そして、混合粒径底質を考慮した3次元海浜変形シミュレーションモデルを構築し、大型水路における断面変形実験を含む実験結果と比較することによりモデルの適用性について検討した。本研究により得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 突堤では、岸沖漂砂の影響と沿岸漂砂の影響が約2時間後を境にして分離して現れているのに対し、離岸堤では初期段階から沿岸漂砂の影響が強く現れることが分かった。また、海浜の変形とともに表層底質は、パッチ状に細粒化と粗粒化を繰り返しながら分級されていくことが明らかになった。

(2) 加速度非対称性と底質の分級を考慮した漂砂量モデルにより、堆積性波浪条件におけるバーの岸向き移動を含めた地形ならびに断面混合率分布を概ね良好に再現できることを示した。

(3) 底質の分級を考慮した三次元海浜変形モデルを構築し、混合粒径砂海浜の地形ならびに粒径別混合率の平面・鉛直分布の計算が可能となった。混合粒径砂を用いた海浜変形実験に対して、実験砂を二種粒径砂として計算した結果、構築したモデルにより海岸構造物周辺での地形変化および底質の分級にともなう粗粒化・細粒化現象をある程度再現できることを示した。

なお、現地養浜工を対象として平面的な底質粒径分布を観測し、モデルの現地適用性を検討することが今後の課題である。

謝辞：平面実験ならびに底質粒度分析に際しては、(元)東京大学大学院修士課程海岸・沿岸環境研究室村田啓之君の協力を得た。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 佐藤慎司, 田中正博, 樋川直樹, 渡辺 晃, 磯部雅彦: 混合粒径砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 486-490, 2000.
- 2) Dibajnia, M. and Watanabe, A.: A transport rate formula for mixed-size sands, *Proc. 25th Conf. on Coastal Engineering*, pp. 3791-3804, 1996.
- 3) 渡辺 晃, 佐藤慎司, 二宮 宗, 高地 潤: 波・流れ共存場における混合砂シートフロー漂砂量の算定式, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 496-500, 2001.

- 4) Dibajnia, M., 橋村嘉之, 喜岡 渉: 混合粒径漂砂量算定式の新たな提案, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 501-505, 2001.
- 5) 田中正博, 小林 博, 佐藤慎司, 渡辺 晃, 磯部雅彦: 断面地形表層粗細混合率を考慮した海浜変化計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 506-510, 2001.
- 6) 田中正博, 井上 亮, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 池野正明, 清水隆夫: 2 粒径混合砂を用いた大型海浜変形断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 551-555, 2000.
- 7) 高地 潤, 佐藤慎司, 渡辺 晃: 前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 426-430, 2002.
- 8) 中村昭男, 依田 眞, 橋川正男, 早瀬松一: 断面地形表層粗細混合率を考慮した海浜変形, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 571-575, 2001.
- 9) 後藤仁志, 原田英治, 酒井哲郎: 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程, 土木学会論文集, No.691/II-57, pp. 133-142, 2001.
- 10) Sunamura, T. and Horikawa, K.: Two-dimensional beach transformation due to waves, *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 920-938, 1974.
- 11) Nwogu, O.: Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, Vol.119, No.6, pp. 618-638, 1993.
- 12) 小林 博, 渡辺 晃, 磯部雅彦, 佐藤慎司, 石井敏雅: 多方向不規則波による各種海岸構造物周辺の海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 566-570, 2001.
- 13) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文集, No.180, pp. 39-49, 1970.
- 14) 芝 和彦, 磯部雅彦, 渡辺 晃: 波浪場と海浜縦断地形変化の非線形数値計算法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 376-380, 1993.
- 15) Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., and Dalrymple, R.A.: Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol.126, pp. 39-47, 2000.
- 16) 芦田和夫, 道上正規: 混合砂礫の流砂量と河床変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 14 号 B, pp. 259-273, 1971.
- 17) Dibajnia, M., 渡辺 晃: シートフロー漂砂量式の波・流れ交差場への拡張と沿岸漂砂量の検討, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 366-370, 1994.
- 18) Dibajnia, M., 高沢大志, 渡辺 晃: 混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 481-485, 1998.

(2002.10.15受付)

**A NUMERICAL MODEL OF THREE-DIMENSIONAL BEACH DEFORMATION  
DUE TO GRADED SEDIMENT TRANSPORT  
UNDER ATILT WAVES**

**Hiroshi KOBAYASHI, Takahide HONDA, Shinji SATO, Akira WATANABE,  
Masahiko ISOBE and Toshimasa ISHII**

Laboratory experiments were performed on beach evolution and sediment sorting around coastal structures on a initially plane 1/20 sloping beach of uniformly graded sand. One experiment was for a detached breakwater, and the other for groins. Spatial and temporal variations of beach topographies and grain size distribution of surface sediments were described. A numerical model was developed on the basis of the enhanced Boussinesq equation and a sand transport model for mixed-grain size sands under atilt waves. The validity of the model was verified with experimental data.