

# 沿岸漂砂卓越場における混合粒径砂の 3次元分級に関する実験と計算

EXPERIMENT AND COMPUTATION OF THREE DIMENSIONAL SORTING OF  
SAND OF MIXED GRAIN SIZE ON COAST WITH DOMINANT LONGSHORE  
SAND TRANSPORT

熊田貴之<sup>1</sup>・小林昭男<sup>2</sup>・酒井和也<sup>3</sup>・柴崎 誠<sup>3</sup>・宇多高明<sup>4</sup>・芹沢真澄<sup>5</sup>  
Takayuki KUMADA, Akio KOBAYASHI, Kazuya SAKAI, Makoto SHIBASAKI,  
Takaaki UDA and Masumi SERIZAWA

<sup>1</sup>学生会員 工修 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻  
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 (同上)

<sup>4</sup>正会員 工博 (財) 土木研究センター審議役なぎさ総合研究室長  
(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 (タカラビル))

<sup>5</sup>正会員 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉208)

Sorting effect of sand of mixed grain size was investigated by a movable bed experiment under the condition with dominant longshore sand transport. In a plane wave tank of 4m width, a model beach of the slope 1/10 and composed of mixed sand,  $d_{50}$  of which are 0.2mm and 2mm, was made and waves were incident obliquely. Mixed rate of fine and coarse sand is 1:1. Sorting effect by longshore sand transport was confirmed and experimental results were compared with the numerical simulation using the one-line model considering sorting of each grain proposed by Kumada et al. Predicted results agreed with the experimental results.

**Key Words :** *Sorting, mixed grain size, movable bed experiment, numerical simulation*

## 1. はじめに

近年, 生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測, および評価に対する社会的要請が高まっている。それは単に海浜形状だけではなく底質の質的变化をも対象とし, 海浜変形予測に加え, 海浜底質の分級効果を含む粒径変化を予測可能なモデルが必要とされている。これには, 従来の均一粒径を仮定した漂砂機構ではなく, 混合粒径中での漂砂機構の解明が必要である。現在, 研究の多くは, 岸沖方向の現象分析にのみ使用できる2次元水槽実験による漂砂量算定およびそのモデル化が主流である。

しかし, 沿岸漂砂の卓越した実海岸での海浜変形は3次元的に起こるため, 混合粒径の分級(漂砂)機構も3次元的に解明する必要がある。混合粒径を考慮した3次元海浜変形実験は, 宇多ら<sup>1)</sup>, 山本ら<sup>2)</sup>により行われたが, これらの実験は混合粒径を含む海浜形状の把握が主であり, 底質の分級機構の解

明までは行われていない。そこで, 本研究では沿岸漂砂卓越場における混合粒径砂を考慮した3次元海浜変形実験を実施し, 粒径の基本的分級機構を解明する。さらに, 本実験結果を筆者らの開発した混合粒径砂を考慮した海浜変形モデル<sup>3) 4)</sup>で再現し, その妥当性について考察する。

## 2. 実験概要

本研究では, 平面水槽により細砂・粗砂の2粒径を用いた3次元海浜変形実験を行い, 細砂・粗砂で構成される海浜の変形と, 底質の分級機構を解明する。具体的には, 図-1に示すように幅4m, 海浜勾配1/10の直線状海岸とし, 波の入射方向に対して海岸線を18°傾けて整形した。これは, スネルの法則に従い碎波波向10°の沿岸漂砂を発生させるためである。波浪は,  $H_o=4\text{cm}$ ,  $T=0.8\text{sec}$ の規則波を安定形に

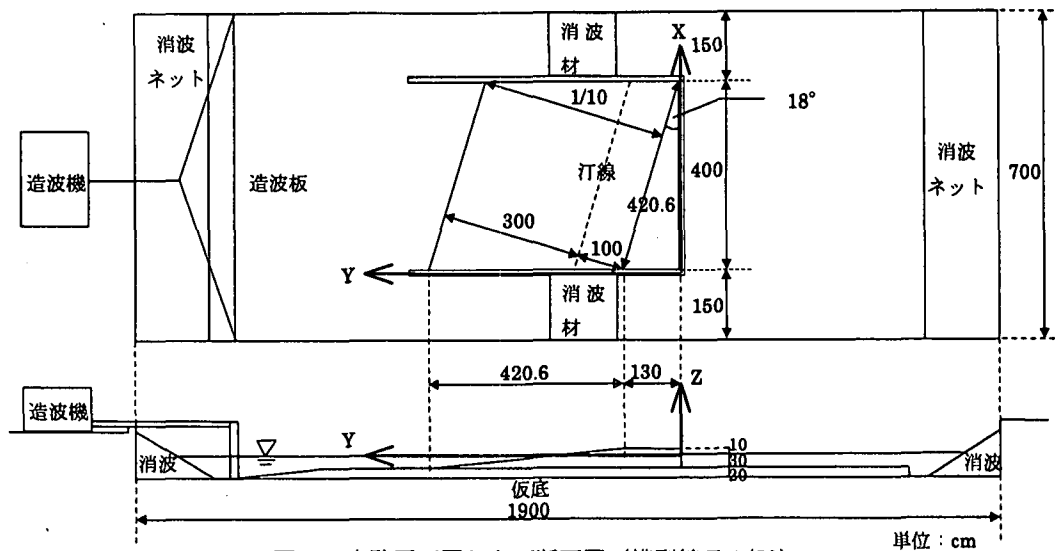


図-1 実験平面図および断面図 (模型縮尺 1/50)

至る10時間まで作用させた。海浜砂は、中央粒径 ( $d_{50}$ ) が0.2mmと2mmの砂を体積比1:1で混合した砂を用いた。また分級現象を色彩面から観察しやすくするため、 $d_{50}=0.2\text{mm}$ と2mmの砂の色を大きく変え、細粒分は白く、粗粒分は黒くした。

計測項目は、海浜形状、海浜底質、砕波波高および砕波点における入射角の分布である。海浜形状の測定は、沿岸方向に50cm、岸沖方向に20cm間隔で初期、3時間および10時間後の3回行った。海浜底質は、実験開始前と10時間後の2回底質採取を行い、粒度構成を調べた。採取は侵食・堆積・中立位置の3測線および汀線 (沿岸方向) において行き表層の砂を採取した。砕波角はビデオ・写真撮影により計測した。

### 3. 実験結果

#### (1) 海浜変形

図-2に、初期と波作用10時間後における等深線形状を示す。初期状態では、等深線は互いに平行であったが、波を作用させて10時間後、沿岸漂砂による著しい地形変化が生じた。侵食域 ( $X=0\sim 200\text{cm}$ ) では水深6cmより深い領域の等深線には有意な地形変化が生じていないが、水深0~6cmの間では等深線間隔が広がっている。これは、波による地形変化の限界水深がほぼ6cm付近にあって、それより深い領域では地形変化が生じず、それより浅い領域では砂が侵食されて緩斜面が形成されたことを示している。堆積域 ( $X=200\sim 400\text{cm}$ ) では、陸上部で土砂が堆積し、平坦面が形成されたため等高線間隔が広まった。また、水深6~12cmの範囲の等深線間隔は密になっており、実海岸で良く観察される、土砂堆積による沖合への土砂の落ち込み現象が観察された。

#### (2) 粒径変化

図-3に、初期汀線を基準とした10時間後の汀線変

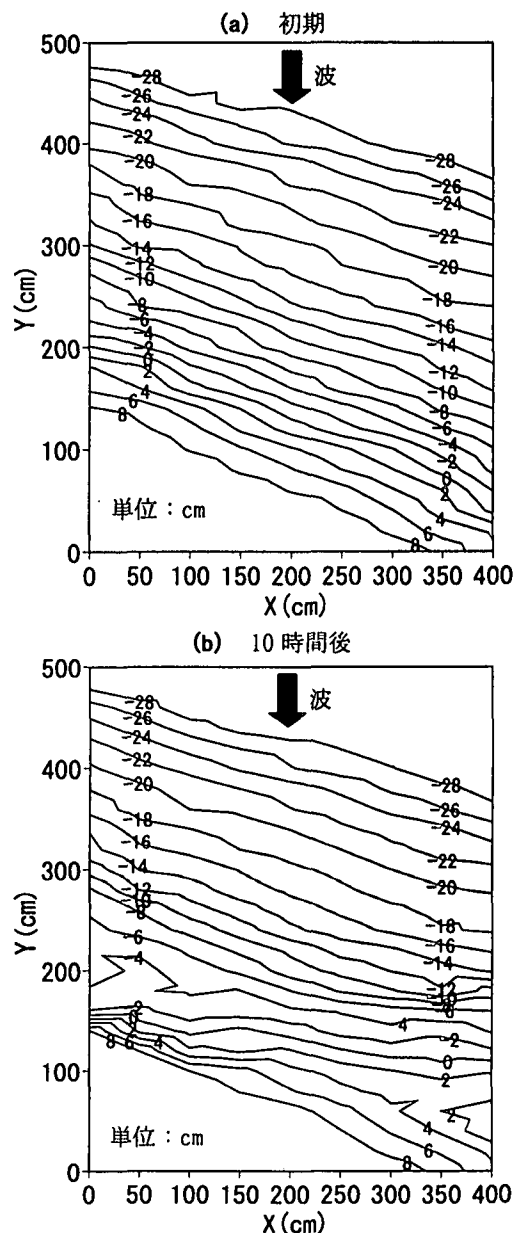


図-2 等深線図 (初期, 10時間後)

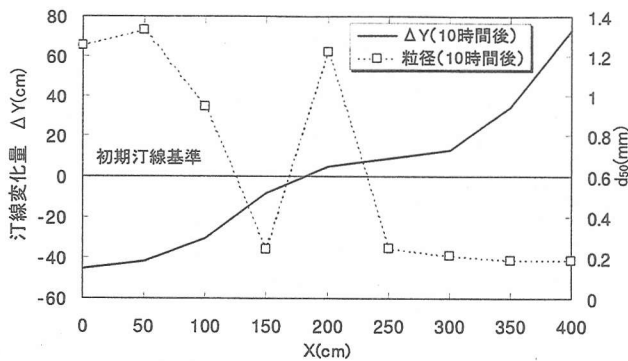


図-3 汀線変化量と粒径の沿岸分布

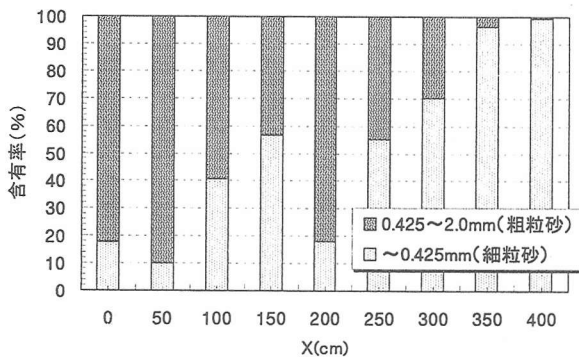


図-4 細粒砂・粗粒砂の含有率の沿岸分布

化量 ( $\Delta Y$ ) と汀線での中央粒径 ( $d_{50}$ ) の沿岸分布を示す。侵食域での汀線後退と堆積域での汀線前進は、中立位置 ( $X=200\text{cm}$ ) を境に対照的な変化として起きている。このとき、侵食域 ( $X=0\sim 200\text{cm}$ ) では粒径が粗く、堆積域 ( $X=250\sim 400\text{cm}$ ) では粒径が細くなるという粒径の分級作用が生じた。図-4には、図-3に対応した表層の細粒砂と粗粒砂の含有率の沿岸分布を示す。侵食域では、粗粒砂の含有率が約80%以上を占めるが、堆積域では含有率は徐々に減少し、例えば $X=400\text{cm}$ 断面ではほぼ全部が細粒砂で占められる。これは、沿岸漂砂により波作用下で動きやすい0.2mmの細粒砂が侵食域から先に流出し動きにくい2.0mmの粗砂が残され、堆積域では上手側から運ばれてきた細粒砂が堆積した結果、このような変化が生じたと考えられる。なお、図-3の $X=150\text{cm}$ の粒径は、侵食域であるにもかかわらず小さい。これは、実験中ある時間間隔で不規則な位置にできる離岸流が、10時間後の測定時にたまたまその位置で発生し、岸沖漂砂により細粒砂が流れ始めた状況下で砂を採取したためと考えられる。

模型実験では細粒分は白く粗粒分は黒くしたことから、粒径の分級現象が色彩の面からも観察可能であった。以下では写真をもとに分級状況の把握を行う。まず写真-1は、細粒砂と粗粒砂を突堤間で均一に敷き詰めた初期海浜の状況である。写真右側が沖、左側が岸であり、前述したように造波板に対して斜めに模型海浜が設置されている。砂は均一に混ざっているため、黒と白の中間色である灰色となっている。写真-2は、波作用10時間後の海浜状況である。

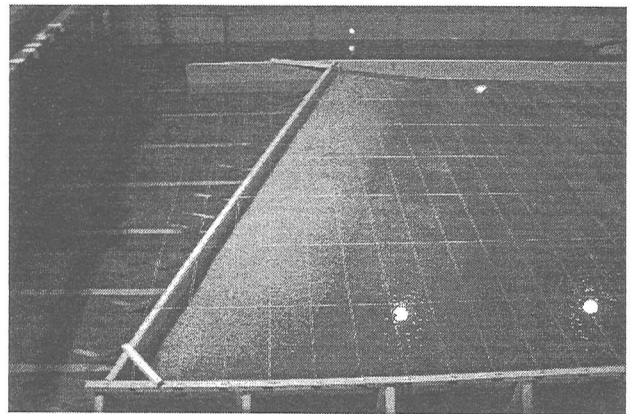


写真-1 初期地形状況

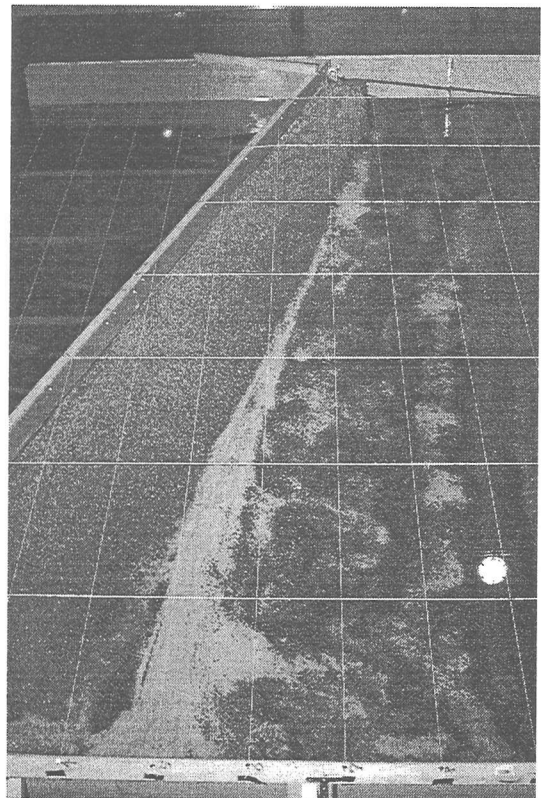


写真-2 10時間後の地形状況

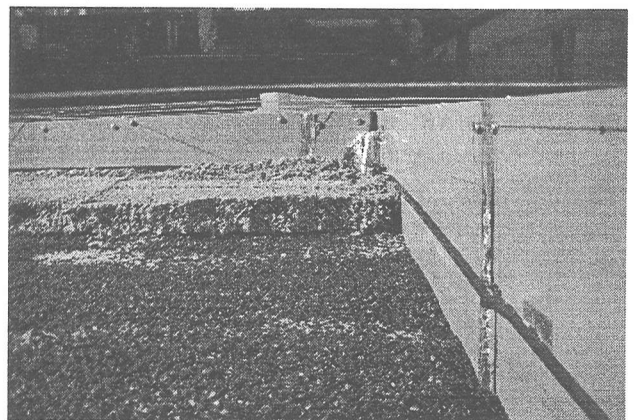


写真-3 侵食域での粗粒化

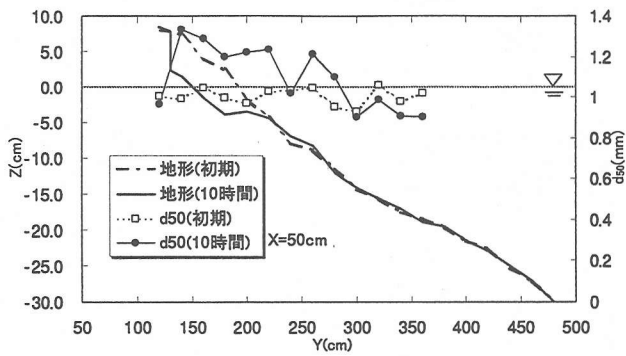


図-5 侵食断面と粒径の岸沖分布

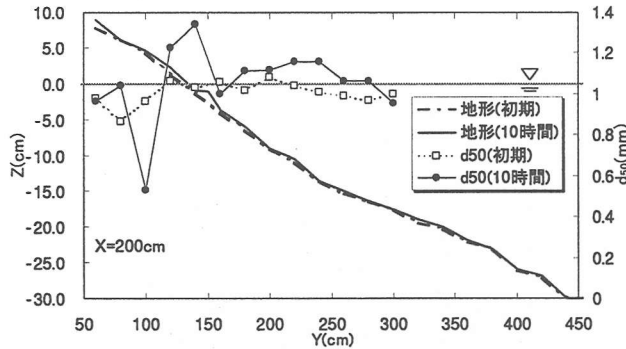


図-7 中立断面と粒径の岸沖分布

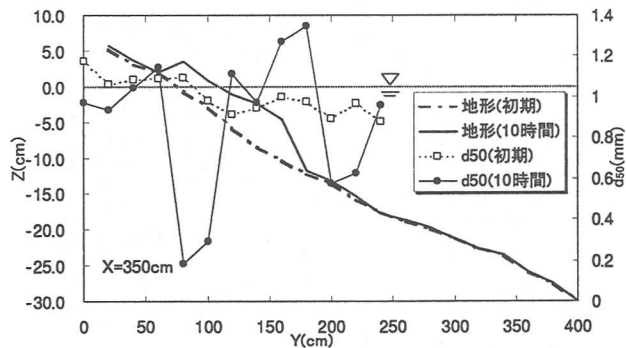


図-9 堆積断面と粒径の岸沖分布

写真-1と比較すると、写真手前の堆積域は白い砂で覆われ、汀線近傍の白い帯が手前ほど広がることが分かる。一方、写真奥に位置する侵食側では主に白い細粒砂が流出したため、全体的に粗粒砂が残り黒っぽくなっている。写真-3は、侵食域を沖から陸へ向けて撮影したものである。粒径分級を目視で確認しやすくするため、この撮影に限っては水を抜いた状態で撮影している。約5cmの浜崖が形成され、浜崖下の侵食された表層は黒い粗粒砂で覆われ、波が作用しない浜崖上の表層は初期の灰色の混合砂で覆われていることが明瞭に見てとれる。

図-5には、侵食域の代表であるX=50cm断面における、初期と10時間後の縦断形と $d_{50}$ の岸沖分布を示す。侵食断面の粒径は粗粒化し、浜崖 ( $Z=8\text{cm}$ ) より岸側と波による地形変化の限界水深 ( $Z=-6\text{cm}$ ) より深い領域ではほぼ初期粒径が保たれている。これは沿岸漂砂により細粒分が流出したこと、および侵食を

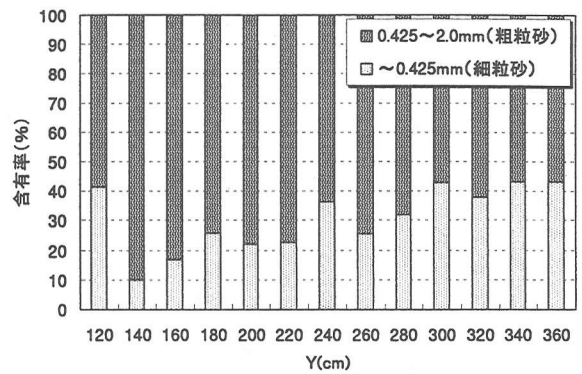


図-6 侵食域での砂の含有率の岸沖分布 (10 時間後)

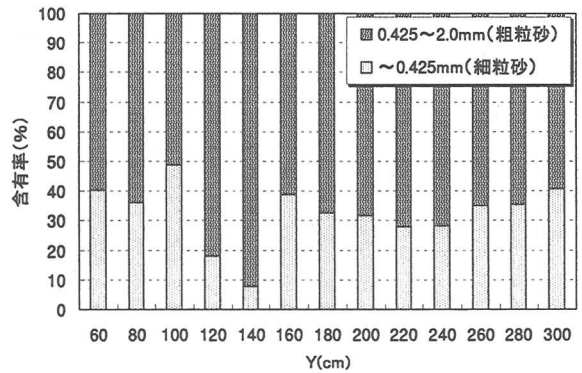


図-8 中立位置での砂の含有率の岸沖分布 (10 時間後)

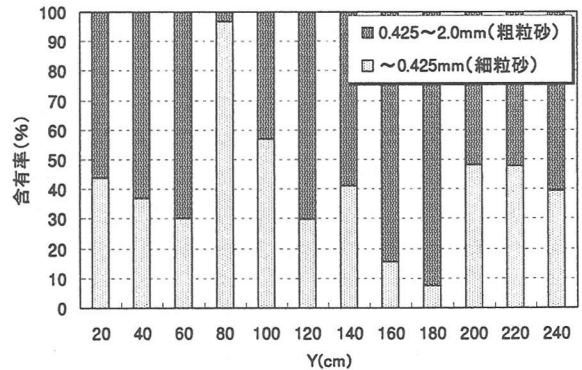


図-10 堆積域での砂の含有率の岸沖分布 (10 時間後)

受けない場所ではもとの粒径が保たれることを意味している。さらに、波作用後10時間の粒径分布は、沖方向に向けて細粒化している。図-6に、図-5に対応した表層の細粒砂と粗粒砂の含有率の岸沖分布を示す。汀線付近 ( $Y=140\text{cm}$ ) では粗粒砂の含有率が高いが、若干のばらつきを有するもの沖方向には減少し、細粒砂の含有率が増加する。これは、沿岸漂砂より影響力の弱い岸沖漂砂による粒径の分級と考えられる。波作用後、砕波帯内では沈降速度の遅い細砂は直ちに沖方向に流出し、バーを形成したからである。実験時の観察では、波浪作用後直ぐに岸沖漂砂による粒径分級が起こり、沿岸漂砂による粒径分級は緩やかに起こっていた。本実験の条件では、岸沖分級は沿岸分級より顕著ではなく、写真-2に示したようにバー付近は汀線付近ほど明瞭に白くなく、若干白く細粒砂が堆積していた。実験中、岸沖方向

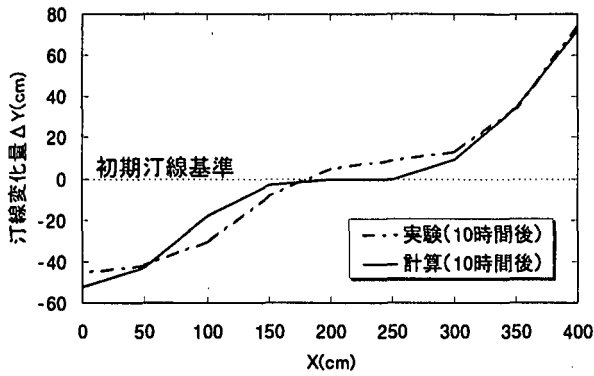


図-11 計算と実験の汀線変化量の比較

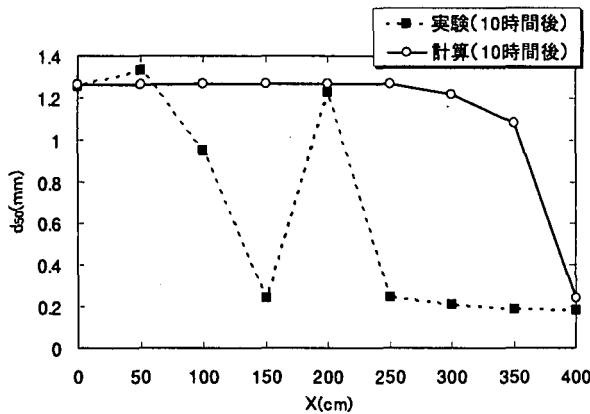


図-12 計算と実験の  $d_{50}$  の沿岸分布

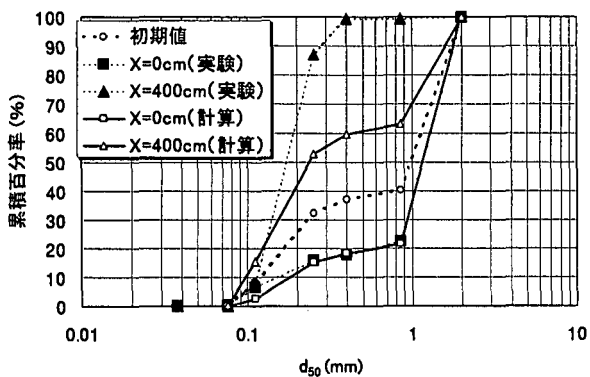


図-13 侵食・堆積域の計算と実験の粒径加積曲線

にジグザグ浮遊しながら、沿岸方向に緩やかに移動する砂が確認されたが、これも岸沖漂砂と沿岸漂砂を引き起こす波のエネルギーバランスから生じる現象と考えられる。

図-7のX=200cm断面は侵食も堆積も起こらない中立位置である。ここでは汀線を境に岸沖方向に50cm幅内において岸側では細粒化が、沖側では粗粒化が起きている。図-8の粒度構成図においても同様のことが言える。これは、侵食域から移動してきた細粒砂がまず堆積するが、時間経過とともに侵食域の交換層内では細粒砂が減少する。その結果、次に粗粒砂が流出することとなり、沿岸漂砂により運ばれた粗粒砂が細粒砂の後に中立位置に堆積したことに起因する。水面下では、侵食域同様、岸沖漂砂による粒径の分級が生じた。

図-9のX=350cm断面は堆積域の断面である。図-10に、合わせて図-9に対応した粒度構成図を示す。土砂が堆積した汀線近傍 (Y=80~100cm) は細粒化し、汀線より沖の堆積領域 (Y=120~180cm) は粗粒化し、さらにその沖 (Y=200~220cm) では細粒化した。実験開始後、初期には侵食域から移動してきた細粒砂が全体に多く堆積する。中立位置同様、時間経過とともに侵食域の交換層内では細粒砂が減少する結果、粗砂が徐々に流出することになり、堆積域にはその粗砂が細粒砂の後に堆積する。しかし粗粒分の多い土砂がさらに堆積すると沖へ安息勾配を保ちながら土砂が落ち込むので、急勾配斜面 (Y=120~180cm) では粗粒分しか残れず、沖の緩斜面 (Y=200~220cm) に相対的に細かい粒径成分が流出する。これが図-9の分布となった理由と考えられる。

#### 4. 計算結果

モデルの検証のために、前節で述べた移動床模型実験の結果と比較した。モデル<sup>3)</sup>は、基本的に粒径毎の沿岸漂砂量式と粒径毎の土砂量保存則、交換層内の粒径毎の含有率変化の計算式で構成されている。まず、粒径毎の沿岸漂砂量  $Q^{(K)}$  を式 (1) に示す。

$$Q^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot \frac{A}{\sqrt{d^{(K)}}} \cdot F_x, \quad K=1,2,\dots,N \quad (1)$$

ここに、 $d$ は初期粒径とし、 $A$ は対象海岸の変形過程に応じて設定する係数であり、本計算では $A$ は2.8とした。 $F_x$ は、海岸線単位幅あたりに作用する砕波点での波エネルギーフラックスの沿岸方向成分である。粒径毎の汀線変化量  $y_s^{(K)}$  は粒径毎に連続式で算定し、混合粒径砂の汀線変化量  $Y_s$  はこれらを合計した。次に、堆積域での粒径毎の含有率  $\mu^{(K)}$  の計算式を式 (2) に示す。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\}, \quad K=1,2,\dots,N \quad (2)$$

ここに、 $B$ は交換層幅を示し、本計算では3mmとした。侵食域での粒径毎の含有率  $\mu^{(K)}$  の計算式を式 (3) に示す。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_s^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_s}{\partial t} \cdot \mu_b^{(K)} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $\mu_b^{(K)}$ は汀線変化前の交換層より岸側位置の含有率を示し、本計算では初期の交換層内と同じ値を仮定した。計算は以上の式を連立して解いた。

計算諸元として初期粒径・含有率は、初期に沿岸方向にサンプリングした砂を与えた。漂砂の移動高および砕波波高・波向は、実験で計測された値の平均値を与えた。図-11に計算と実験の汀線変化量 ( $\Delta Y$ ) を示す。計算結果は、実験結果を高精度で再現していることが分かる。

図-12に、計算と実験の中央粒径 ( $d_{50}$ ) の沿岸方向分布を示す。計算と実験の粒径分布には若干のばらつきはあるものの、侵食域の粒径の粗粒化、およ

び堆積域の細粒化は再現され、海浜端部の値が良く再現された。図-13には、侵食域 ( $X=0\text{cm}$ )・堆積域 ( $X=400\text{cm}$ ) の実験・計算の粒径加積曲線を示す。計算初期は、粒径加積曲線は沿岸方向に同一であるが、10時間後に侵食域では細粒分が減少し粗粒分は増大する。一方、堆積域では細粒分の含有率が大きく増大し、実験結果の傾向が再現された。しかし、図-12に示したように海浜中央付近では計算および実験は異なった値を示し、モデルの課題が残された。これは、実験では変形過程において表層は粗砂で覆われ、粗砂の下に細砂が多く分布するため細砂が動きにくくなるといった粗砂のアーミング効果が生じたが、本モデルではこうした非線形現象の概念がモデルに組み込まれていないため生じたと考えられる。すなわち、本モデルは細砂の漂砂量を過大に評価し計算しているため、実験より細砂の応答が速く粒径も速く変化したと考えられる。

## 5. まとめ

本実験により、沿岸漂砂および岸沖漂砂による粒径の分級作用が確認され、海浜変形に応じた底質変化の基本的特性が明らかになった。すなわち、侵食域では粗粒化、堆積域では細粒化し、さらに堆積域を除く断面においては汀線付近で粗粒化し沖向きに細粒化することが確認された。モデルの今後の課題は、粗砂のアーミング効果や異粒径間のかみ合わせ効果など、非線形現象の概念をモデルに組み込むことである。また、岸沖漂砂による粒径分級の概念

をモデルに組み込むことも課題である。

謝辞：本研究の実施に際し、実験に関する貴重なデータを提供して頂き、さらに実験の行い方まで指導して頂いた、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室主任研究官の山本幸次氏に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 宇多高明・酒井佳治・竹淵勉：アーミングによる安定海浜の形成，海岸工学論文集，第34巻，pp. 421-425, 1987.
- 2) 山本幸次・佐藤慎司・田中茂信：海岸過程における底質の浮遊と分級に着目した実験的研究，海岸工学論文集，第44巻，pp. 471-475, 1997.
- 3) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一：混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発，海岸工学論文集，第49巻，pp. 476-480, 2002.
- 4) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・増田光一：河口デルタの汀線・粒径変化の予測モデル-沿岸漂砂による分級作用の再現-，海岸工学論文集，第49巻，pp. 481-485, 2002.
- 5) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について，土木学会論文集，第195号，pp. 55-56, 1971.
- 6) Kamphuis, J. W., Davies, M.H., Narim, R. B. and Sayao, O.J.: Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol.10, pp. 1-12, 1986.
- 7) Kraus, N. C.: Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J.Sedimentary Petrology, Vol.55, pp.3-14, 1985.