

# 浮遊砂の粒度組成に関する現地観測

西 隆一郎・佐藤 道郎・浅野 敏之  
中村 和夫・小脇 博文・浜島 一也  
(受理 平成 3 年 5 月 31 日)

## A Field Observation on the Grain-Size Distributions of Suspended Sediments

Ryuichiro NISHI, Michio SATO, Toshiyuki ASANO, Kazuo NAKAMURA  
Hirofumi KOWAKI and Kazuya HAMASHIMA

A field observation on the grain-size distributions of suspended sediments in a surf zone was carried out at Fukiage beach for three days. In this observation, a suction pump was used to sample sufficient amount of suspended sediments for grain size analysis. The method was devised for the observation, and worked successfully. Vertical distributions of sediment concentration for several grain sizes which compose suspended sediments were obtained. This enabled us to do numerical simulations of beach evolution taking the composite character of suspended sediments into consideration. Results are compared with the ones obtained by a conventional simulation method which assumes single grain size composition of beach materials, and discussed. The vertical distribution profiles of the concentration of suspended sediments are also compared with existing models and discussed.

### 1. ま え が き

海岸は主に砂質海岸と岩石海岸に分けられる。このうち砂質海岸では暴風時の時に伴う高波浪により汀線付近の前浜や後浜が侵食をうけて、底質が沖へ運ばれ沈降しその結果、沿岸砂州の発達で特徴付けられる冬型海浜あるいはバー型海浜と呼ばれる海浜形状が現れ、また、通常の穏やかな波浪の作用のもとで沿岸砂州付近の底質が徐々に岸側に移動して行き、汀線上部に堆積し汀線前部に棚状の地形 (step 地形) を形成しこのような海浜を夏型海浜あるいは step 海浜と呼ぶ。

このように海浜を構成している底質は外力である波浪条件により季節的に岸向き、沖向きに移動をくりかえし、ビーチサイクルと呼ばれる海浜の季節的な変形過程を繰り返す。

上記したような海浜変形を取り扱う場合、波浪や流れの影響を受ける海浜底質については、通常、底質の

粒径加積曲線より読み取った中央粒径 $d_{50}$ が代表粒径として用いられ、この $d_{50}$ に等しい一様粒径の底質でできた海岸として漂砂量の連続式等が海浜変形の計算に用いられる。ところで、現地海岸は混合粒径の底質よりなっており、この底質の粒度については、Bascom<sup>(1)</sup>や、最近では加藤ら<sup>(2)</sup>による岸沖方向の粒度分布についての調査がある。また、波作用下での浮遊砂の濃度と粒度についてもいくつかの観測 (例えば島田ら<sup>(3)</sup>、入江ら<sup>(4)</sup>) が外浜帯を対象として行われている。さらに、沿岸方向についても底質の粒度分析を行い、海浜への砂の供給源や漂砂の卓越方向の特定などが行われている。

さて、岸沖方向で場所毎に底質の粒度組成が異なっているため海浜変形の計算を行う場合に、岸沖方向のどの地点での中央粒径を採用すべきか、また、浮遊している砂の粒度組成が水深方向にどうなっているのかさらに海底面上の底質の粒度組成とどういう関係にあるのかについて検討する必要性がある。また、鉛直方

向の浮遊砂濃度分布について、海底面を構成している混合粒径の底質それぞれについて通常用いられる指数濃度分布を仮定した場合、各粒径毎の濃度分布のトータルとしての全濃度分布と、中央粒径 $d_{50}$ に等しい一様粒径で出来た海浜底質による指数濃度分布とでは、どんな関係にありどちらが実際の自然海浜上での浮遊砂機構を良く表現し得るのか、といったことがらを調べるために鹿児島県吹上町入来浜で3日間の現地観測を行った。現地観測に当たり、浮遊砂の粒度組成を調べるためにポンプを用いた吸引型の補砂器を製作し、短時間に浮遊砂の粒度分布が調べられる程度のサンプルを得よう試みた。

本論文では、砕波帯内の浮遊砂の粒度分布特性と水深方向の濃度分布について現地観測データに基づき考察を加え、さらに、現地観測で得られたような結果を考慮して、中央粒径 $d_{50}$ で表されるような単一粒径と中央粒径が等しい粒度分布を持つ混合粒径の底質よりなるモデル海浜の変形についても数値計算を行い、海浜変形に与える混合粒径の影響を検討する。

## 2. 現地観測

砕波帯内の浮遊砂の濃度分布と粒度分布を調べることを目的として、図1に示すような鹿児島県吹上町入来浜で、1990年10月18日から20日の3日間現地観測を行った。観測時期は、3週間続いて来襲した台風のため汀線付近には多量の流木や竹等が打ち寄せられており、写真1に示すような状況であり、まずはこれらを

除去した後に計測用の信号線等を敷設することにした。

浮遊砂計測を行うに当たり、通常用いられる光学式浮遊砂濃度計やポリ瓶等による浮遊砂トラップ(Kana<sup>(5)</sup>)では浮遊砂の粒度解析を行うだけのサンプルや記録は得られず、また竹竿式補砂器のような方法(福島<sup>(6)</sup>)では砕波帯内で波浪条件が変わらないほど短時間に、浮遊砂の鉛直方向の粒度分布を調べるほどのサンプルを得ることは難しいので、パイプの先端に水中ポンプを取り付けた浮遊砂の吸引システムを設計し組み立てた。類似の方法としては、入江ら<sup>(4)</sup>、Bosmanら<sup>(7)</sup>、Antsyferovら<sup>(8)</sup>のものがある。

浮遊砂のサンプリングは写真2、3に示すように工事用の足場パイプを用いて砕波帯に立てた全高5.4mの計測ステージで行うことにした。この足場パイプ等は短時間内に組立ができ、非常に作業し易いものであった。ポンプによる吸引速度は浮遊砂の沈降速度を充分上回るように吸い込み口等の形状に工夫がしてあり、それを写真4に示す。

波高の計測は、容量式波高計を4台と、今回新たに製作した水圧式波高計4台を用いて行った。観測期間中は台風が3週続けて来襲した後であったが、波は穏やかでありSpilling型の砕波が見られた。計測時の波浪条件は表1に示すが、図2に示すような波であり、今回は様々な砕波条件に渡る観測を行うことはできなかった。各計測器の設置状況は写真5に示す。海浜の縦断面測量は浮遊砂計測直前の干潮時に行い、沖の一

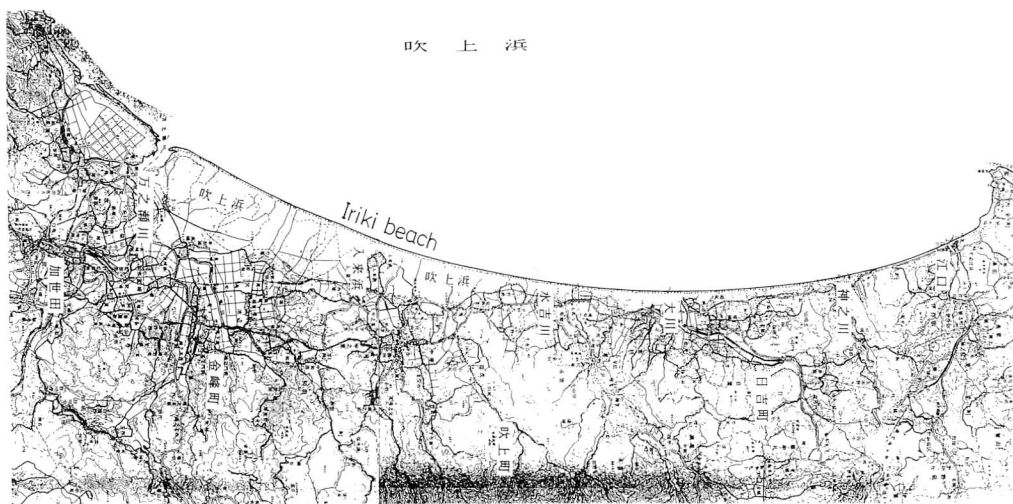


図1 現地海岸地図

Table 1 Wave condition

Hmax (cm)	33.7	Tmax (sec)	6.2
H <sub>1/10</sub>	23.0	T <sub>1/10</sub>	6.28
H <sub>1/5</sub>	18.3	T <sub>1/5</sub>	5.6
Hmean	11.4	Tmean	4.0
UNIT	(cm)		(sec)



写真1 汀線付近の様子



写真2 計測ステージ



写真3 計測ステージ

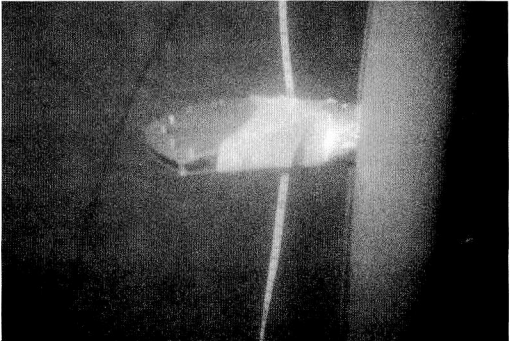


写真4 吸い込み口

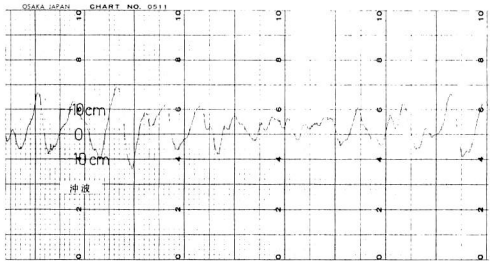


図2 波浪の記録例

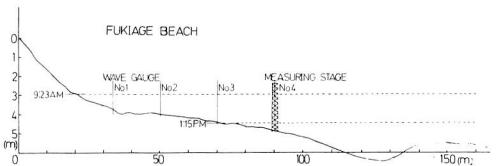


図3 海浜縦断面図と計測器位置



写真5 計測機器の設置状況

段目のバー頂部付近までスタッフにより測量可能であった。海浜縦断面図を図3に示す。また、同時に海浜底質についても岸沖10m間隔でサンプリングを行い

粒度分析を行うことにした。ポンプを用いた浮遊砂の計測は計4回行ったが、ここでは主に3回目と4回目の計測について述べることにする。3回目の計測は水深150cmのもとで、10月19日11時23分より底面から5cm, 10cm, 15cm, 30cmの高さで行い、ふるいを用いた粒度分析に必要なふるい握りこぶし大の浮遊砂試料を得るのに1-15分程度ポンプによる吸い込みが必要であった。吸い込み時間は予想されるように底面から離れるにしたがい長くなる傾向がある。50cm以上の位置においても浮遊砂のポンプを用いた吸い込みによるサンプリングを試みたが、ふるい分けが行えるほどの試料を得ることができず、ポンプの能力等を含めて改良の必要性があった。4回目の計測は10月19日12時13分で水深が30cmのもと、底面から5cm, 10cm, 15cmの位置で計測を行った。

さらに、濃度分布については、観測中1回ダイバーによる2000ccのポリ瓶を用いた直接サンプリングも行い、ポンプを用いて吸引した試料より得られた数分間の平均浮遊砂濃度分布との比較も行った。

### 3. データ解析

データ解析は、まず、鉛直方向にサンプリングした浮遊砂の粒度分布をふるい分けにより調べた。また、計測位置の海底面の底質も併せてふるい分けを行い、海底面を構成する底質と浮遊している底質の組成を図4に示すように求めた。図4(a)中、粒度分布曲線の右端のものが海底面を構成する底質の粒度分布でありこの時には底質の粒度組成と、浮遊している底質の粒度組成が異なっていることがわかる。例えば、波浪条件が大きければ、底面を構成する砂全体が巻き上げ等により浮遊し底面近傍の浮遊砂と組成が同じになり小さい波浪が作用する時には底面を構成する砂全体が浮遊するのではなく、細かいものが選択的に浮遊することになると考えられるが、図4に示したデータはそ

の後者に対応するものと言えよう。

図4(b)にはそれぞれの水深で得られた粒度曲線より読み取った $d_{16}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{84}$ の各代表粒径を水深を縦横にプロットしてある。このデータでは、底面から離れ水深が高くなるにつれ各代表粒径の値が細くなることが分かり、波浪条件が大きくないときは底面を構成する砂の組成が、必ずしも直接浮遊している局所漂砂の組成を代表するものでないことが分かる。ただし、ここで行った観測の波浪条件は数10cmのオーダーであり、たとえば、砕波帯内ではspilling型とplunging型の砕波で浮遊砂の濃度に10倍以上の開きがある(Kanaら)との指摘もあり、より多くの砕波条件に対して今後観測を行うべきであると考えている。

次いで、得られた浮遊砂の試料をふるい分けして求めた各粒径毎の濃度分布を、それぞれ図5に示す。但し、ここでは、粒径としてふるいを用いたために、各ふるいの中央値を採用して図示してある。底面近傍の5cmの位置では、中央粒径に近い0.34mmの粒径のものが一番多く含まれ、ついで0.18mm, 0.63mm, 0.09mmの順になっている。濃度組成のこの順は上層においても同じである。

次いで、各粒径毎の浮遊砂濃度を Dally ら<sup>(9)</sup> になり、指数濃度分布と仮定して次式を用いて計算した。

$$C = C_a \cdot \exp \{F(Z - Z_a)\} \quad (1)$$

$$F = -15w/h \cdot \sqrt{(\tau/\rho)} \quad (2)$$

ここで、 $c$ は各高さにおける浮遊砂濃度、 $c_a$ は基準点濃度、 $z$ は底面からの高さ、 $z_a$ は基準点高さであり、摩擦速度 $\sqrt{(\tau/\rho)}$ の評価については、次式に示す野田らの方法<sup>(10)</sup>と Dally 等の方法の2種類を用いて観測値と比較した。

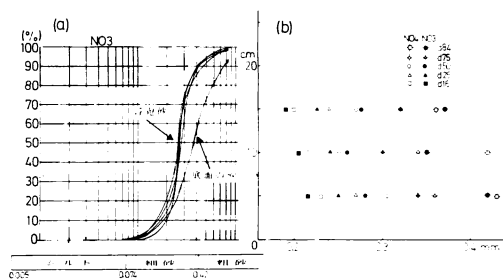


図4 粒径加積曲線

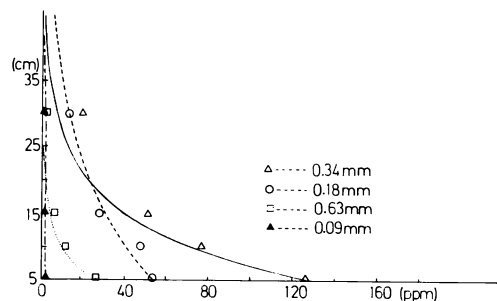


図5 各粒径の濃度分布

$$\sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{2\pi\nu/T} \cdot \pi H / \tanh(kh) \quad (3)$$

$$\sqrt{\tau/\rho} = (fH^2g/16h)^{1/2} \quad (4)$$

ただし、 $\rho$ は水の密度、 $T$ は波周期、 $H$ は波高であり動粘性係数 $\nu$ は $0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ を用いた。

今回の観測値については(4)式を用いて計算した値の方が比較的合っており、図5中には(4)式による算定曲線だけが載せてある。計算値は、実測値を比較的良く表現しているようである。しかし、指数曲線の傾きの違いにより計算値では $0.34\text{mm}$ と $0.18\text{mm}$ の曲線は途中で濃度の値が逆転しているが、実測値ではこの点が顕著に現れていないようである。

そして、このようにして求めた各粒径毎の濃度分布の和として、(5)式により求めた浮遊砂のトータル濃度分布と、粒径加積曲線より得られる中央粒径 $d_{50}$ を用いてトータルとしての全濃度分布の計算を行い図6にそれぞれ実線と波線で示す。ただし、 $C_{ai}$ 、 $F_i$ は $i$ 番目の粒径に対する各値を示す。図中3回目の計測値を黒丸で示す。ここでは(3)、(4)式を用いて計算を行ってあるが、(4)式を用いて計算した値の方が今回の計測値には対応しているようである。さてそれぞれの粒径毎の和としての濃度分布と $d_{50}$ を用いて計算した濃度分布では下層において $d_{50}$ によるものの方が若干大きめの値を与え、上層においてはそれが逆になることが分かる。ここで用いた計算の波高が高々 $20\text{cm}$ 程度であることを考えると、波高が数mのオーダーのものに対してはこの差異がよりはっきり現れるのではないと思われる。

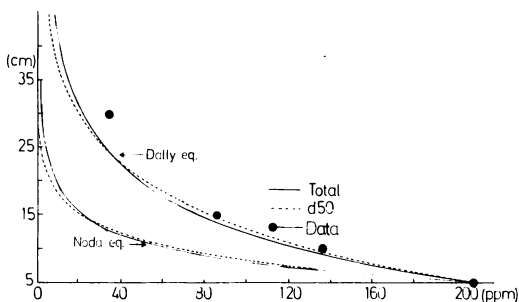


図6 全濃度分布の計算例

さて、以上述べたデータは今回製作したポンプにより1-10分程度の平均濃度値として得られた結果であるが、通常の瞬間的な浮遊砂濃度との関係を見るためにダイバーによる浮遊砂の直接サンプリングも行っており、比較のために図7に示す。

$$C_{\text{total}} = \sum C_{ai} \cdot \exp \{F_i(Z=Z_a)\} \quad (5)$$

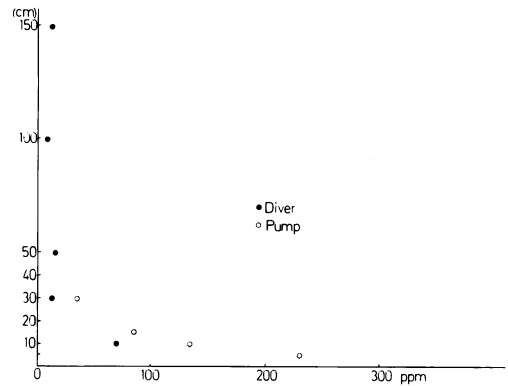


図7 ダイバー直接サンプリングによる濃度分布

#### 4. 数値計算

前述したように混合粒径の底質よりなる自然海浜の浮遊砂の粒度組成について現地観測を行ったわけであるが、ここでは、底質の中央粒径 $d_{50}$ に等しい単一粒径の底質よりなる海浜と、それに等しい中央粒径を持つ混合粒径底質の海浜を対象にして海浜変形の数値実験を行い、その差異について調べた。実験では、バー型海浜と、ステップ型海浜の両方を対象とするようにした。計算に用いた粒度分布は図8に示す通りであり計6ケースの数値計算を行った。

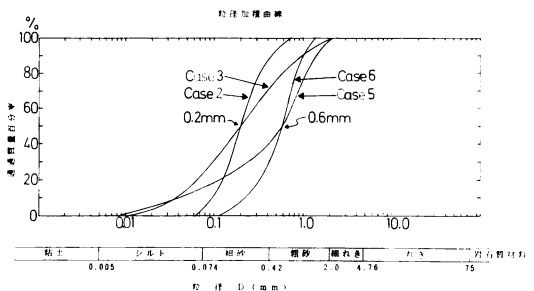


図8 計算に用いた粒度分布

##### 4.1 基礎式

用いた数値海浜変形のモデルはDally等により開発されたものを基礎式として用いることにする。

簡単に彼らのモデルを示せば、浮遊砂量式は次式の

ように与えられる。

$$Q_{ss} = \int_{-h}^0 u(z) \cdot C(z) dz \quad (6)$$

ここで、 $u(z)$ が底質粒子の平均水平方向速度で、(i) 振動流成分による波一周期間の砂粒の平均水平方向速度と(ii)平均流による砂粒の速度の両方を考慮し、 $C(z)$ は(1)式で評価されるような底質濃度分布である。最終的に、浮遊漂砂量は $D_F = WT$ なる高さを基準にして下層上層に水中を分け、それぞれ(i)下層中の振動流による浮遊漂砂量、(ii)下層中での平均流による浮遊漂砂量、(iii)上層中での平均流による浮遊漂砂量の和として求められる。このようにして全浮遊砂量を求めた後、以下に示す連続の式を用いて海底地形の変化量が計算され、そして、新しい海底地形が求まる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial Q_{ss}}{\partial x} \quad (7)$$

ただし、底質の沈降速度 $W$ については次に示すRubeyの式を用いた。

$$W = \sqrt{\left( \frac{2(\rho_s - \rho)}{3\rho} g d + \frac{36\nu^2}{d^2} \right) + \frac{6\nu}{d}} \quad (8)$$

ここに、 $\rho_s$ は底質の密度、 $g$ は重力加速度、 $d$ は粒径である。ここでは、これらの基礎式に図8に示されるような粒度分布を持つ底質モデルを与え、粒度分布(淘汰係数 $S_0$ をパラメータに採用する)による違いがあるかどうかについて数値実験を行った。

ケース1では0.2mmの単一粒径、ケース2, 3ではそれぞれ中央粒径は等しいが淘汰係数 $S_0$ がそれぞれ1.47, 2.40の場合でバー型プロファイルを対象とする。また、ケース4では中央粒径が0.6mmの粗砂の単一粒径、ケース5, 6では中央粒径が等しいがそれぞれ淘汰係数 $S_0$ が1.45, 2.36の場合でステップ型プロファイルを対象とする場合の実験である。

実際、図8に示すような粒度組成の浮遊砂を対象として数値計算を行う場合、まず各10%毎の粒径を粒径加積曲線上で読み取り、それぞれの粒径に対して浮遊漂砂量を計算し、それらの合計として全浮遊漂砂量を求めて、それを(7)式で示される底質の連続式に代入して地形変化量を求めて、新しい海底地形を求めた。ただし、計算においてはシルトに相当する粒径の底質については除外して計算を行っている。

#### 4. 2 数値実験の結果

図9にそれぞれ中央粒径が0.2mmのシリーズと、0.6mmのシリーズの数値計算結果を示す。

この計算例では、図9がバー型海浜断面を、図10が

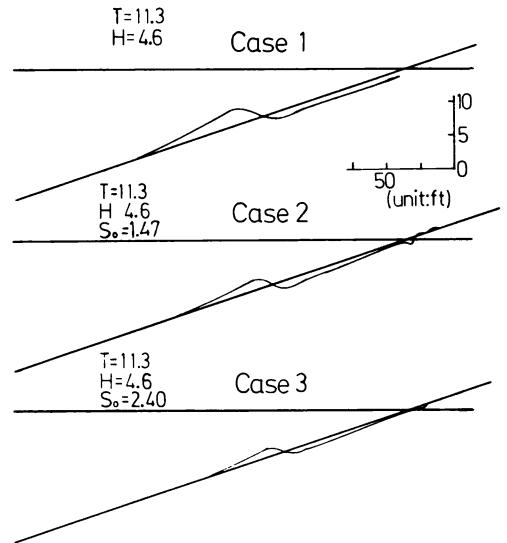


図9 数値海浜変形の計算例 (バー型)

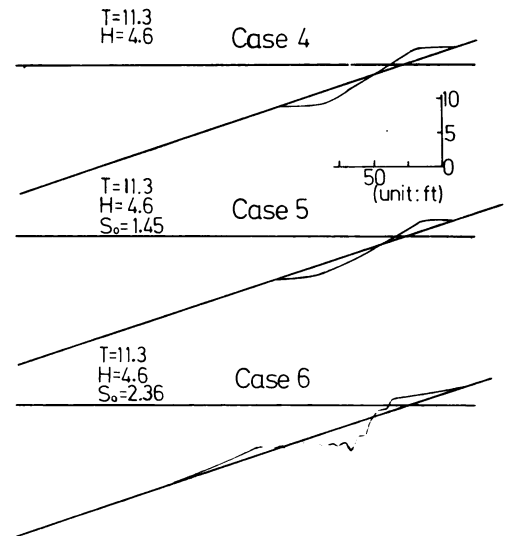


図10 数値海浜変形の計算例 (ステップ型)

ステップ型海浜断面を再現したものである。中央粒径が0.2mmで、淘汰係数 $S_0=1.47$ の場合は、0.2mmの単一粒径の底質の海浜変形に比べて若干小さい計算値を与えている。淘汰係数 $S_0=2.40$ と粒度分布の広いものは、単一粒径の海浜変形に対してかなり小さな変形量を与えている。底質の淘汰が悪くなると、単一粒径の底質をもとに計算したバー型海浜地形の変形の差異

が大きくなることが分かる。

つぎに、中央粒径が $0.6\text{mm}$ で、淘汰係数 $S_0=1.45$ の場合は、 $0.6\text{mm}$ の単一粒径の底質の海浜変形に比べて前のケースと同様に、若干小さめの値を与えているが地形はほぼ相似な形状をしている。淘汰係数 $S_0=2.36$ と粒径分布の広いものは、単一粒径の底質の海浜変形に比べて碎波帯の形状が異なり碎波帯沖合に砂の堆積が現れている。

以上、バー型地形、ステップ型地形ともに底質の淘汰係数が大きくなるにつれて、単一粒径海浜との地形変化の差異が大きくなる。ここで行った数値計算にはまだ改良されるべき点もあるが、混合粒径底質の粒度分布の効果を巨視的に示すものと考えられる。

## 5. 結 論

碎波帯内の浮遊砂を対象として鹿児島県吹上町入来浜で3日間に渡り現地観測を行い、混合底質より成る自然海浜の浮遊濃度と粒度分布等について調べた。

その結果、今回製作したポンプを用いた吸い込みシステムが、若干の改良の必要性があるものの、局所浮遊砂砂量を調べる上で有効であることが示された。また浮遊砂の各代表粒径については、海底面を構成する底質に比べ、底面から離れ高さが高くなるにつれ細くなることが分かった。各粒径毎の濃度分布はDallyらの表示を用いて計算した結果と実測値が比較的良く一致していた。トータルの濃度分布については、中央粒径だけでもとづいて計算した値は混合底質のそれぞれの粒径の濃度分布の和として計算したものに比べ、底面近くの下層で大きくなり、上層で過小評価されることが分かった。しかし、その差異はここで用いたような小さな波浪条件のもとでは大きなものではない。

つぎに、混合粒径の海浜モデルを対象として海浜変形の計算を行った結果、バー型の海浜断面、ステップ型の海浜断面ともに大体、淘汰係数が1に近い場合は中央粒径だけに基づいた海浜変形と混合粒径の底質の粒度分布に基づいた数値海浜変形は類似しているが、淘汰係数が1よりかなり大きくなる場合には、両者ともに中央粒径だけに基づいた計算結果と混合粒径に基づいた計算結果とはかなり異なり、断面形状のパターン自体も異なる可能性があることが示された。

以上、碎波帯内の浮遊砂を対象とした現地観測と数値海浜変形計算の結果について述べてきたが、観測に

おいてはデータ数が少なかったり、様々な碎波形状をカバーしていない等の問題も残されており、今後、引き続き観測を行っていく予定である。

## 謝 辞

現地観測に同行し寒中テントに泊まりながら観測の手伝いをしていただいた、海工学講座の当時4年生の皆様にお礼を申し上げます。

さらに、観測に当たりテントの使用を許可していただいた太陽テント工業株式会社の皆様にお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Bascom, W.: 海洋の科学, 海面と海岸の科学, 吉田耕造・内尾高保訳, 河出書房, 1970
- 2) 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田誠: 碎波帯内の底質粒度の変動特性—波崎海洋研究施設における現地調査—港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp37-61, 1991
- 3) 島田米男・吉高益男: 波による底質の濃度測定について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp215-218, 1976
- 4) 入江功: 現地海岸での浮遊砂量について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp313-317, 1977
- 5) Kana, T.W.: Surf zone measurement of suspended sediment, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., Hamburg, 1978
- 6) 福島久雄・溝口裕: 漂砂とその測定について, 第2回海岸工学講演会論文集, pp155-162, 1955
- 7) Bosman, J.J., van der Velden, E.T.J.M. and Hulsbergen, C.H.: Sediment concentration measurement by transverse suction. Coastal Eng., 2, pp353-370, 1987
- 8) Antsyferov, S.M., Basinski, T. and Pykhov, N.V.: Measurements of coastal suspended sediment concentrations, Coastal Eng., 7, pp145-166
- 9) Dally, W.R.: A numerical model for beach profile evolution, Thesis for the degree of Master of Civil Engineering, University of Delaware, 1980
- 10) 野田英明: 波による海底砂の初期移動について, 第13回海岸工学講演会論文集, pp135-141, 1968