

沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル

熊田 貴之*・小林 昭男**・宇多 高明***・芹沢 真澄****

筆者ら (2002) の混合粒径砂を考慮した汀線変化モデルをさらに発展させ、海浜変形とともに粒度組成の 3 次元的变化を予測可能なモデルを開発した。すなわち、粒径に応じた平衡勾配の概念を組み込むことで 3 次元的な粒径分布と、粒径に対応した等深線形状の予測を可能にした。本報では、モデルの基礎式を導くとともに数値計算によって実海岸の諸現象を解く方式を示した。その上で仮想海岸、混合砂からなる移動床模型実験の結果、および東播海岸での礫発生時の海浜変形にこの計算方式を適用し、いずれもほぼ妥当な計算結果を得ることができた。

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する。すなわち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。筆者ら (2002) は、沿岸方向の底質淘汰過程に着目し、汀線変化モデルと組み合わせて沿岸方向の粒径変化を予測するモデルを構築した。しかし、実海岸での海浜変形は 3 次元的に起こるため、混合粒径砂の分級もまた 3 次元的である。さらに、粒径に応じて安定する海浜縦断勾配は異なると考えられるため、最終的な海浜形状は粒径に大きく依存するはずである。したがって、海浜変形とともに粒度組成の 3 次元的变化を予測する意義は大きい。本研究では、筆者ら (2002) の混合粒径砂を考慮した汀線変化モデルを発展させ、粒径に応じた平衡勾配の概念 (熊田ら, 2003a) を組み込むことで、3 次元的な粒径分布および粒径に応じた等深線変化を予測可能な実用モデルを開発した。

2. モデルの基本構成

(1) 基礎方程式

a) 粒径毎の漂砂量式

等深線毎の沿岸漂砂および岸沖漂砂による粒径の分級過程を考慮するためには、混合粒径砂中の粒径毎の沿岸漂砂量および岸沖漂砂量の算定が等深線毎に必要である。粒径毎の沿岸漂砂量は単位深さあたりの沿岸漂砂量 $q_x^{(K)}(x, z, t)$ 、粒径毎の岸沖漂砂量は沿岸方向単位幅あたりの岸沖漂砂量 $q_z^{(K)}(x, z, t)$ を示す。ここに、 x は沿岸方向の座標、 z は等深線の地盤高を示す。本研究では、筆者ら (2002) の粒径毎の沿岸漂砂量式に宇多・河野 (1996)

の沿岸漂砂量の水深方向分布関数 $\varepsilon_x(z)$ を乗じて各等深線における粒径毎の沿岸漂砂量式 (1) を考案した。

$$q_x^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot K_x^{(K)} \cdot F_x, K=1, 2, \dots, N \dots (1)$$

$$F_x = (EC_g)_b \cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} \dots (2)$$

$$K_x^{(K)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(K)}}} \dots (3)$$

ここに、 $\mu^{(K)}$; $K=1, 2, \dots, N$ は交換層内の粒径毎 (N 粒径) の含有率を示す。 F_x は、等深線単位幅あたりに作用する碎波点での波エネルギーフラックスの沿岸方向成分であり、 α_{bs} は碎波点の波峰線が等深線となす角である。 A は未知数とし、対象海岸の変形過程に応じて設定できるようにした。

粒径毎の岸沖漂砂量は、芹沢ら (2002) の海浜縦断面の安定化機構を考慮した岸沖漂砂量式に、沿岸漂砂量の場合と同様な考え方より筆者ら (2002) の手法にならない Kamphuis (1986) の粒径に応じた漂砂量係数 ($K_z^{(K)} = A/\sqrt{d^{(K)}}$) および交換層内の粒径毎の含有率 $\mu^{(K)}$; $K=1, 2, \dots, N$ を組み込み、次式を考案した。

$$q_z^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot K_z^{(K)} \cdot F_y \sin \bar{\beta} \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c^{(K)}} - 1 \right), K=1, 2, \dots, N \dots (4)$$

$$F_y = (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \dots (5)$$

$$K_z^{(K)} = \frac{\gamma \cdot A}{\sqrt{d^{(K)}}} \dots (6)$$

ここに、 β は等深線毎の勾配とし、 $\bar{\beta}$ はバーム高 h_R から地形変化の限界水深 h_c までの初期断面の平均勾配とする。 $\beta_c^{(K)}$ は粒径毎の平衡 (安定) 勾配を示し、便宜上 1 つの代表粒径に 1 つの平衡勾配が存在すると仮定している。 γ は、漂砂量係数の比率であり沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを示している。 $\varepsilon_z(z)$ は、岸沖漂砂の強度分布関数であり、芹沢ら (2002) と同様、宇多・河野 (1996) の沿岸漂砂量の水深方向分布 $\varepsilon_x(z)$ と等しくした。 F_y は等深線の単位幅あたりに作用する碎波点での波エネルギーフラックスの岸向き成分を示す。粒径毎の岸沖漂砂量式の詳細は、熊田ら (2003a) を参照されたい。

b) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の等深線変化量 $y^{(K)}$ は各等深線につき粒径毎

* 学生会員 修 (工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正会員 工 博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科
*** 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
**** 正会員 海岸研究室 (有)

の土砂量保存則(連続式)により次式で算定する。

$$\frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(K)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(K)}}{\partial z}, K=1, 2, \dots, N \dots (7)$$

混合粒径(全粒径)に応じた等深線変化量 Y は等深線毎に粒径毎の等深線変化量 $y^{(K)}$ を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} \dots (8)$$

c) 粒径毎の含有率変化の計算式

等深線毎の交換層内での粒径毎の含有率算定は、熊田ら(2002, 2003a)の交換層内での粒径毎の土砂収支式を使用した。すなわち、堆積時での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(K)} \right\}, K=1, 2, \dots, N \dots (9)$$

侵食時での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(K)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_b^{(K)} \right\} \dots (10)$$

ここに、 $\mu_b^{(K)}$ は等深線変化前の交換層より岸側位置の含有率を示す。交換層幅 B はKraus(1985)を参考に算出する。厳密には交換層の幅は等深線毎に異なり、毎時刻変化すると考えられるが、本モデルにおいては全等深線で交換層幅 B は一定とし、時間経過によらないとする。

計算は以上の式を連立して解いた。その場合、式(1)、(4)の粒径毎の漂砂量算定には漂砂上手側の含有率を使用する風上差分を用いた。またバーム高より高い領域と限界水深で深の領域での重力による海底斜面の崩壊と、その時の土砂落ち込みによる粒径変化の扱いは熊田ら(2003a)に従った。

3. モデルの検証

(1) 仮想海岸への適用

モデルの基本特性を確認するため、両端を突堤に囲まれた仮想海岸へモデルを適用した。粒径0.1mmと1mmの2粒径で均一に養浜された初期勾配1/10の海岸に入射角10°、 $H_0=2$ mの波を作用させた。0.1mmの平衡勾配は1/16、1mmは1/5とした。この計算ケースにおいては、式(6)の沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを表す係数 γ を0.1(ケース1)および0.0001(ケース2)とし、動き易さが著しく異なる場合を対象とした。

図-1, 2にケース1の等深線変化と粒径変化を示す。図-1(a), 2(a)の20.8日後の等深線および粒径変化では、まず岸沖漂砂が強く生じて岸沖分級が顕著に表れ、標高の高い部分では粗粒砂が多く分布して急勾配(1/5)となり、水深の大きい部分では細粒砂が多く分布して緩勾配(1/16)となった。顕著な岸沖方向の粒径分級が生じつつ、沿岸漂砂による海浜変形が徐々に生じ、最終的

には標高の高い場所では沿岸方向に粗粒砂が堆積して急勾配となり、水深の大きい場所では沿岸方向に一般に細粒砂が堆積して緩勾配となった(図-1(b), 2(b))。最終的に各等深線は碎波波向と直角になって安定した。

図-3, 4には γ を小さくしたケース2の等深線変化と粒径変化を示す。ケース1と比較すると、図-3(a), 4(a)の20.8日後では岸沖漂砂による粒径分級および海浜勾配変化はほとんど起こらず、沿岸漂砂による粒径分級および等深線変化が顕著となった。侵食域では粒径が粗粒化し、堆積域では細粒化する沿岸分級が計算された。図-3(b)の最終形状に到達するには、岸沖漂砂量が小さいためケース1と比較して約10倍の時間がかかり、波の作用で変化する等深線は碎波波向に直角となった。また、海浜勾配の変化点より岸側では粗粒砂が堆積して急勾配となり、それより沖では細粒砂が堆積して緩勾配となって安定した。しかし、海浜勾配の変化点の水深がケース1より深くなった。図-2(b)と図-4(b)に示す図は、安定状態における粒径分布に対応しているが、沿岸・岸沖漂砂量の違いにより粒径分級過程が異なることに起因して、ある粒径の堆積範囲が異なり、これによって海浜勾配の変化点の位置の相違が出たと考えられる。図-4(b)の堆積域では、早い時間に堆積した細粒砂の履歴が多く残されており、侵食域から大量の細粒砂が流出したことを示している。したがって、ケース1より漂砂供給源から多くの細粒分が流出したため、沿岸漂砂より変化の遅い岸沖漂砂による粒径分級時に細粒砂が少なくなり、結果として勾配変化点位置の差が出たと考えられる。

(2) 移動床模型実験への適用

筆者ら(2003b)が行った移動床模型実験によりモデルの検証を行った。実験では、幅4m、海浜勾配1/10の直線状海岸を混合砂で造り、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、Snell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、 $H_0=4$ cm、 $T=0.8$ sの規則波を安定形に至るまで10時間作用させた。海浜砂は、中央粒径(d_{50})が0.2mmと2mmの砂を体積比1:1で混合した砂である。計算諸元として初期粒径・含有率は、初期にサンプリングした全ての砂の平均値を海浜一様に与えた。碎波波高・波向は、実験で計測された値の平均値を与えた。式(3)、(6)の A は2.8、式(6)の γ は沿岸漂砂を卓越させた実験であることを考慮し0とした。式(9)、(10)の B は3mmとした。

図-5に、波作用10時間後における実験の等深線形状を示す。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。図-6に計算による等深線形状を示す。図-5と同様、侵食域($X=0\sim 200$ cm)では地形変化の限界

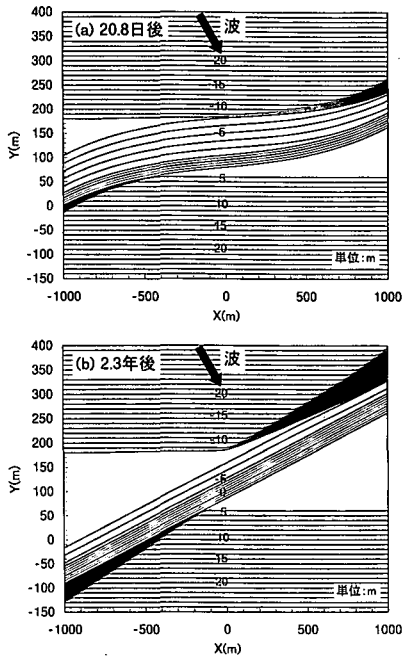


図-1 ケース1の等深線変化

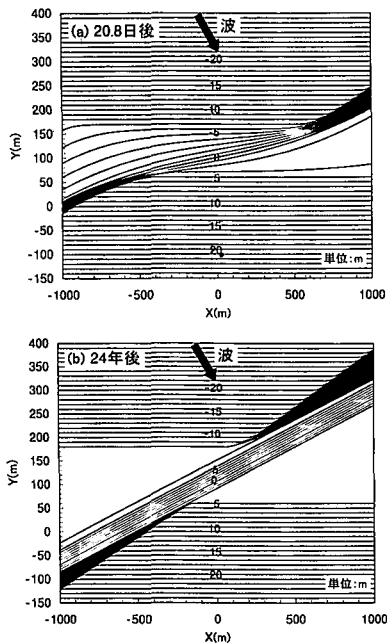


図-3 ケース2の等深線変化

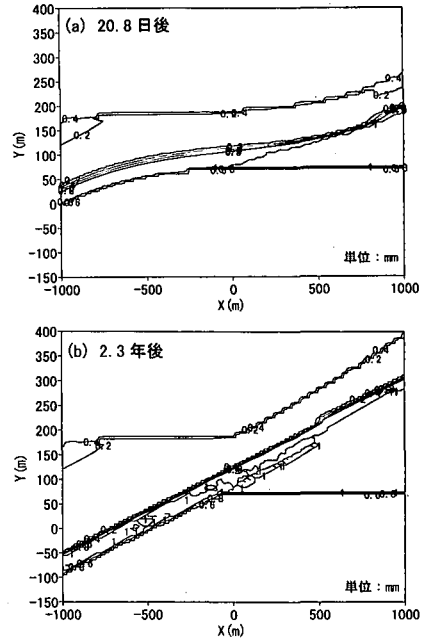


図-2 ケース1の粒径変化

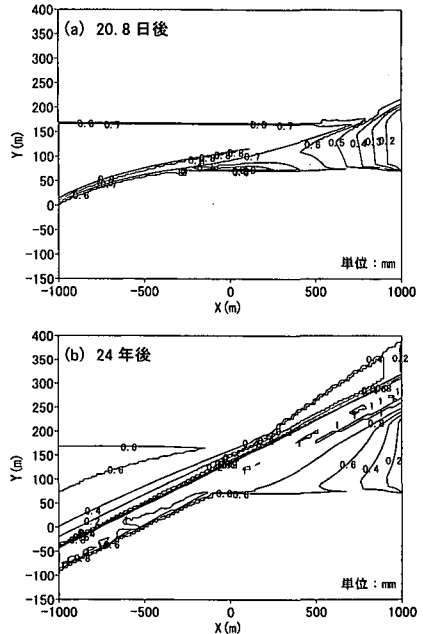


図-4 ケース2の粒径変化

水深である水深6 cmより深い領域の等深線には有意な地形変化が生じず、水深6 cm以浅の領域では侵食されて緩斜面が形成されていることが良く再現されている。堆積域($X=200\sim400$ 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がり、限界水深以深での沖合への土砂の落ち込み現象が再現された。

図-7に計算による粒径の平面分布を、初期および変

化後の汀線とともに示す。本計算では、岸沖漂砂は特に考慮せず、沿岸漂砂のみを対象としたために、侵食域では細粒砂が流出して粗くなり、堆積域ではその細粒砂が堆積するという沿岸漂砂による粒径分級が顕著に表れている。粒径分級の平面分布の予測計算結果が示されたのはこれが初めてである。

図-8は侵食域の代表である $X=50$ cm断面におけ

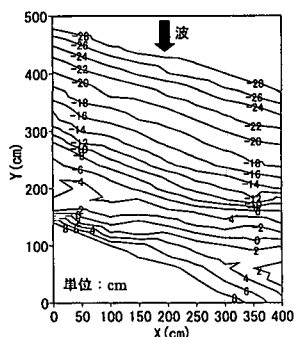


図-5 等深線図 (実験)

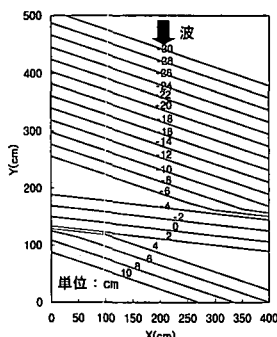


図-6 等深線図 (計算)

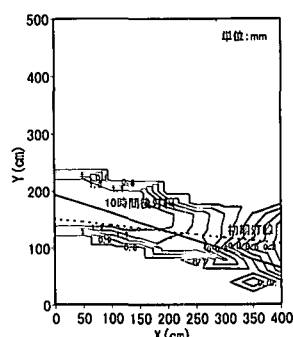


図-7 粒径の平面分布 (計算)

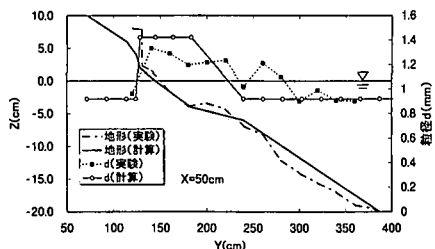


図-8 侵食断面と粒径の岸沖分布 (実験と計算)

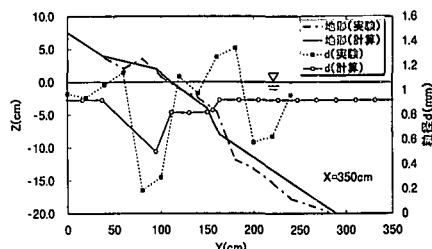


図-9 堆積断面と粒径の岸沖分布 (実験と計算)

る、実験と計算による海浜縦断面形と粒径の岸沖分布を示す。計算結果は、実験で得られた陸上部の浜崖・沖合の侵食緩斜面を含む侵食地形を良く再現している。また、侵食断面の粒径は粗粒化し、浜崖 ($Z=8$ cm) より岸側と波による地形変化の限界水深 ($Z=-6$ cm) より深い領域ではほぼ初期粒径が保たれていることも良く再現された。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。

図-9の $X=350$ cm 断面は堆積域の断面である。計算結果は、バームの形成・沖合への土砂落込みという実験結果をほぼ再現している。計算粒径は実験で明らかに土砂が堆積した汀線近傍 ($Y=80\sim 100$ cm) の細粒化をほぼ再現できている。実験値と計算値にはまだ開きがあるが、堆積領域での細粒化という基本特性は計算可能である。本計算では γ を 0 とおいているが、 γ を変えた計算も多く行った。その結果、実験のスケールにおいては、 γ を小さくとも岸沖分級が沿岸分級より顕著となり再現の難しさに課題が残された。これは今後の課題である。

(3) 実海岸への適用

本モデルを兵庫県東播磨海岸西島地区に適用した。西島地区では、1990年9月に自然状態とは2桁オーダーの異なる25 mmの礫で養浜が行われた。初期勾配は1/10で整形され、養浜区間の沖合には図-10に示すように捨石による潜堤が設けられた。養浜後、いずれの断面も直ちに-3.5 m～汀線の間に侵食され、侵食された底質が前浜へ打ち上げられた。この結果、初期勾配は約1/3と急勾

配に変形した。これは、主に波による岸沖漂砂に起因する(門松ら, 1991)。しかし、1991年9月13日、台風9119号の来襲により海岸線の法線に対して反時計回りの方向から波が入射したため、沿岸漂砂による著しい地形変化が生じた。図-10に、1991年10月の高波浪作用後の海浜形状を示す。通常波浪時と比較すると等深線間隔はほとんど変化しないが、各等深線は西向きに沿岸漂砂により西突堤付近では沖に前進し、東突堤付近では岸側に後退した。さらに縦断面変化は、標高3 mのバームが3.5 mと高くなった。これは、台風により高波浪が作用するとともに、満潮時が最大波の出現時刻と重なり、高い標高まで波が作用し、岸向漂砂が生じたためである。したがって、台風時の海浜変形は沿岸漂砂および岸向漂砂が同時に発生したと言える。

計算は通常波浪時(1991年3月)と台風来襲後(1991年10月)の2ケースである。初期粒径は0.8 mmと25 mmの2粒径とした。粒度構成比すなわち粒径毎の土砂量は不明なので、急勾配と緩勾配の変化点が一致する粒度構成比を海浜に一様に与えた。初期勾配は1/10とし、粒径に応じた平衡勾配は、測量結果に基づきそれぞれ1/20, 1/3とした。通常波浪は、 $H_b=1.17$ m、波向は -3° とし、暴風波浪は、 $H_b=2.5$ m、波向は 6° とした。台風来襲後の再現に関しては、初期地形および初期粒径、粒度構成比は通常波浪時の再現結果の値を用いた。なお、東突堤付近は、通常波浪により堆積後、暴風波浪により侵食域に変化するが岸側の粒度構成比は、初期交換層内の構成比を維持すると仮定して計算した。

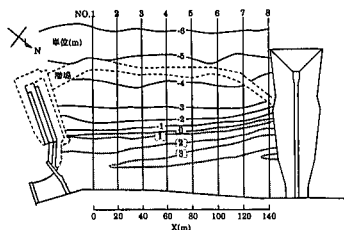


図-10 東播海岸西島地区の等深線図 (実測: 91年10月)

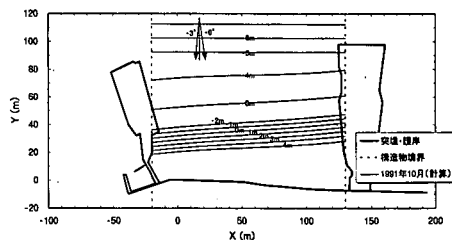


図-12 東播海岸西島地区の等深線図 (計算: 91年10月)

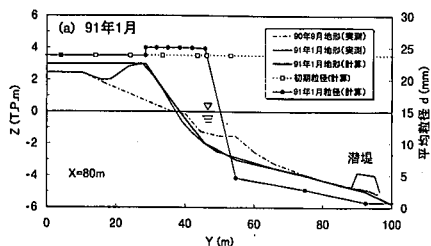
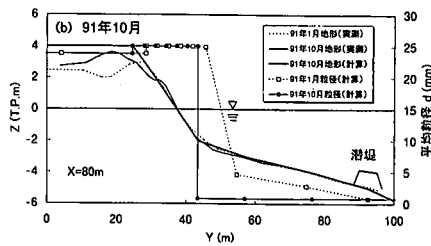
図-11 海浜中央部 ($x=80$ m) の海浜縦断形と粒径の岸沖分布 (実測と計算)

図-11(a)に、通常波浪時の海浜中央部 ($x=80$ m) の縦断形および粒径の計算と実測結果を示す。高さ3mのバーム、 $-2\sim 3$ mでの急勾配礫斜面、 -2 m以深での自然状態での緩勾配砂斜面の形成など、計算と実測値の対応はかなり良好である。粒径は実測値がないため検証はできないが、縦断形に応じた粒径分級は再現できた。

台風来襲後の等深線の再現結果を図-12に示す。図-10に示したように暴風波浪のため岸向漂砂によりバームが高くなっており、 -2 m以深は、前ケース同様細粒砂による緩勾配となっていることが再現されている。また、 -2 m ~ 4 mの等深線が急勾配を維持しながら、主に沿岸漂砂により反時計回りに変形していることが良く再現された。細粒砂は礫よりも動きやすいにもかかわらず、水深が大きい部分での漂砂量は汀線付近より小さいため、 -2 m以深の海浜変形が遅れていることは測量および計算結果ともに注目される。図-11(b)に、暴風時の $x=80$ mの海浜縦断形・粒径の計算および実測結果の比較を示す。基本的に海浜中央部であるため、測量および計算結果ともに沿岸漂砂による堆積・侵食は起こらず、暴風波浪に応じた高いバームが岸向漂砂により形成され、粒径分級が進行する状況もよく再現できた。

4. おわりに

本研究では、混合粒径砂を考慮した汀線変化モデルを發展させ、粒径に応じた平衡勾配の概念を組み込むことで、3次元的な粒径分布および粒径に応じた等深線変化を予測可能な実用モデルを開発した。仮想海岸へ適用した結果、沿岸漂砂量と岸沖漂砂量の違いによって、等深

線および粒径変化が異なることが確認された。移動床模型実験で検証した結果、精度良く等深線変化と粒径分級が再現された。また、東播海岸へ適用した結果、現地の等深線形状予測が可能であることが示された。今後、本モデルを実海岸へ適用する際、精度の高い予測を可能とするためにも深浅測量と平行して砂のサンプリングを定期的に行うことが必要である。

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モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 門松 武・宇多高明・大杉広徳・伊藤弘之 (1991): 東播海岸の西島地区における礫浜の現地実験, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 301-305.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一 (2002): 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.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男 (2003a): 混合砂による浜浜時縦断形予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 596-600.
- 熊田貴之・小林昭男・酒井和也・柴崎 誠・宇多高明・芹沢真澄 (2003b): 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, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 905-910.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- Kamphuis, J. W., M. H. Davies, R. B. Narim and O. J. Sayao (1986): Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol. 10, pp. 1-12.
- Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.