

粒度組成を考慮した平衡勾配概念およびBagnold概念に基づいた 地形・粒径変化予測モデル

Model for Predicting Bathymetric and Grain Size Changes Based on Bagnold's Concept and Equilibrium Slope Corresponding to Grain Size Composition

野志保仁¹・宇多高明²・芹沢真澄³・熊田貴之⁴・小林昭男⁵

Yasuhito NOSHI, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA, Takayuki KUMADA and Akio KOBAYASHI

A model for predicting bathymetric and grain size changes considering equilibrium slopes corresponding to the composition of grain size and each grain size was incorporated with the BG model proposed by Serizawa et al. (2006). The model was applied to the beach changes on Kemigawa Beach. The cross-shore sorting of sand, in which the grain size gradually decreases with increasing depth, and the formation of a gradually changing longitudinal slope were reproduced well. The model was further applied to predict sand accumulation in the navigation channel and their impact to the nearby coast.

1. はじめに

沿岸部における人工的改変の影響は海浜変形として現れるのみではなく、浅海域の底質粒径の変化を通じて沿岸域生態系にも影響を及ぼす可能性がある。このことから、海浜変形のみならず底質の質的変化の予測を可能とすることは重要な課題となっている。熊田ら(2003)は、粒径に応じた平衡勾配を考慮することにより混合粒径砂の縦断分級を予測するモデルを提案した。さらに平衡勾配は底質粒度組成と密接な関係を有すること(野志ら, 2004, 2005)から、熊田ら(2007)は、海岸にはいくつかの粒径集団が存在し、その集団ごとに平衡勾配が存在すると仮定して3次元地形・粒径変化の予測モデルを開発した。このモデルの実用性はかなり高く、各地の海岸での地形・粒径変化予測に用いられている(勝山ら, 2007; 宇多ら, 2007)が、このモデルでは、ある粒径集団内で砂の含有率がわずかに変化しても、それに伴う縦断勾配の変化は起こらないとしている。現地海岸では、波の遮蔽域などにおいて細粒分の含有率が高まると海底勾配が次第に緩くなるが、このような縦断形の沿岸方向変化は上記モデルでは予測できない。野志ら(2008)はこの点を改良し、等深線変化モデルをもとに、粒度組成に応じた局所縦断勾配を考慮でき、実現象と同様、沿岸・岸沖方向の緩やかな縦断勾配の変化をも予測可能な

モデルを開発した。一方、芹沢ら(2006)はBagnoldの概念に基づいた漂砂量式を誘導し、新しい粒径変化予測モデルを構築した。本研究では芹沢ら(2006)のBagnoldの概念に基づいた漂砂量式に、野志ら(2008)の粒度組成に応じて平衡勾配が変化するという概念を組み込むことにより、構造物周辺での詳細な海浜変形予測に優れたBGモデルをさらに発展させた地形・粒径変化予測モデルを開発する。

2. モデルの概要

波による底面付近の流体運動は岸向き・沖向きの往復運動となるが、これに伴い底質は岸向き・沖向きの往復移動を繰り返す。Innman・Bagnold(1963)は、こうした波作用下での漂砂を、寄せ波時の岸向き漂砂と引き波時の沖向き漂砂の2成分からなると考え、それぞれエネルギー保存則に基づき、かつ海底勾配を含む形式の漂砂量式から平衡勾配の概念を示した(Bagnold, 1963)。芹沢ら(2006)は、この考えをもとに単一粒径を対象として碎波点の波浪条件のみを用いた漂砂量Flux式を誘導した(式(1), (2))。

$$\vec{q} = \frac{G}{\tan \beta_c} \left[\tan \beta_c \vec{e}_w - \nabla Z \right] \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$G = C_0 K_1 \varepsilon(Z) (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \tan \beta_c \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $\beta_c^{(k)}$: 平衡勾配角、 $\nabla Z = (\partial Z / \partial x, \partial Z / \partial y)$: 地形の勾配ベクトル、 \vec{e}_w : 波向の単位ベクトル、 K_1 : 沿岸漂砂量係数、 α_b : 碎波角(碎波点における波向と各点の等深線直角方向のなす角)、 C_0 : 水中重量表示から体積表示への変換係数である。また、 $\varepsilon(Z)$ は土砂の移動範囲 $Z = -h_c \sim -h_R$ 以外では0で、その積分値が1となるように定

1 正会員	博(工)	(有) アイコムネット	環境コンサルテ ィング部
2 正会員	工博	(財) 土木研究センター常務理事なぎさ 総合研究室長兼日本大学客員教授理工学 部海洋建築工学科	
3 正会員		(有) 海岸研究室	
4 正会員	博(工)	(株) 水圏科学コンサルタント	技術部
5 正会員	工博	日本大学教授	理工学部海洋建築工学科

義するが、芹沢ら (2006) は従来の等深線変化モデルと同様、 $\varepsilon(Z)$ として宇多・河野 (1996) による沿岸漂砂量の鉛直分布関数を用いた。

さらに芹沢ら (2006) は、熊田ら (2003) にならって式 (1) を混合粒径 (N 粒径) の場合に拡張し、海浜変形・粒径変化の予測モデルを構築した。まず土砂の代表粒径数を N とし、平野 (1971) と同様に交換層の概念を導入し、交換層内の各粒径 $d^{(K)}(K=1 \sim N)$ の体積含有率 $\mu^{(K)}$ を解くべき変数に加えた。粒径毎の漂砂量式は、式 (1) にエネルギー逸散の分配率を評価するため含有率を乗じ、さらに粒径毎の平衡勾配を導入し式 (3)、(4) とした。また、粒径別の漂砂量式は、熊田ら (2003) と同様 Kamphis ら (1986) にならい、粒径の平方根に逆比例すると仮定した (式 (5))。地形変化は、粒径毎の連続式 (式 (6)) を解いて計算される各粒径の地形変化成分の総和として定めた (式 (7))。また含有率は交換層内の連続式を解いて計算するもととしている (式 (8))。

$$\bar{q}^{(K)} = \frac{G^{(K)}}{\tan \beta_c^{(K)}} \left[\tan \beta_c^{(K)} e_w - \nabla Z \right] \quad (K=1 \sim N) \quad \dots (3)$$

$$G^{(K)} = \mu^{(K)} \cdot C_0 K_1^{(K)} \varepsilon(Z) (EC_g)_b \cos^2 \alpha_b \tan \bar{\beta} \quad \dots (4)$$

$$K_1^{(K)} = \frac{A_1}{\sqrt{d^{(K)}}} \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial z^{(K)}}{\partial t} = -\nabla \cdot \bar{q}^{(K)} \quad \dots (6)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \sum_{K=1}^N \frac{\partial z^{(K)}}{\partial t} \quad \dots (7)$$

$$\frac{\partial \mu^{(K)}}{\partial t} = \begin{cases} \frac{1}{B_h} \left(\frac{\partial z^{(K)}}{\partial t} - \mu^{(K)} \frac{\partial Z}{\partial t} \right) & \frac{\partial Z}{\partial t} \geq 0 \\ \frac{1}{B_h} \left(\frac{\partial z^{(K)}}{\partial t} - \mu_B^{(K)} \frac{\partial Z}{\partial t} \right) & \frac{\partial Z}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad \dots (8)$$

ここに、 N : 粒径数、 B_h : 交換層厚、 $\mu^{(K)}:K=1, 2, \dots, N$ は交換層内の粒径毎 (N 粒径) の体積含有率、 $\mu_B^{(K)}:K=1, 2, \dots, N$ は交換層の下 の粒径毎 (N 粒径) の体積含有率、 $\tan \beta_c^{(K)}$: 粒径毎の平衡勾配、 $K_1^{(K)}$: 粒径毎の沿岸漂砂量係数、 $\tan \bar{\beta}$: $Z=h_C \sim h_R$ での初期断面の平均勾配、 A_1 : 対象海岸の変形過程に応じて設定する定数である。

実海岸では、沿岸方向の粒径分級にとどまらず、岸沖方向の粒径分級も観察される (宇多, 1997 ; 熊田ら, 2003)。粒径の岸沖分級により標高の高い場所には粗粒砂が堆積するが、標高が低くなるに従い細粒となり、粒度組成に応じた勾配が形成される (野志ら, 2005)。この結果等深線にはゆがみが生じ、侵食域から堆積域に近づくに従い勾配が緩くなる現象が起こる。このような現象は現地海岸においてもしばしば観測される。

野志ら (2005) は、底質粒径と平衡勾配の経験式をもとに、粒径含有率 $\mu^{(K)}$ と粒径毎の平衡勾配 $\tan \beta_c^{(K)}$ から局所縦断勾配 $\tan \beta_c$ を算定する式を示した。野志ら (2008)

はこの粒度組成に応じた局所縦断勾配の算定法の概念をモデルに取り入れた漂砂量式を提案している (式 (9))。

$$q_z^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot \{r \cdot (\cot \beta / \cot \bar{\beta}_c - 1) + (1-r) \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c^{(k)} - 1)\}; \quad \dots (9)$$

$$k=1, 2, \dots, N \quad 0 \leq r \leq 1$$

ここに、 x は沿岸座標、 $q_z^{(k)}$, $k=1, 2, \dots, N$ は粒径毎の沿岸漂砂量、 $\varepsilon_z(z)$ は $\varepsilon_z(z)$ と同様、漂砂量の水深分布関数を示す。 $\zeta = K_2^{(k)} / K_1^{(k)}$ とし、 ζ は A と同様、対象海岸の変形過程に応じて設定する定数とした。すなわち $K_2^{(k)}$ は $K_1^{(k)}$ の関数であり、碎波波高の沿岸方向分布がある場合に付け加わる沿岸漂砂を表す。 $\tan \beta$ は碎波点での海底勾配、 H_b は碎波波高である。全岸沖漂砂量をこれら2つの特性を有する漂砂量の加重平均で表し、重み r は等しく0.5としている。

本研究では、野志ら (2008) の概念をもとに、芹沢ら (2006) の提案する粒径毎の漂砂量式 (式 (3)) を次のように拡張した。

$$\bar{q}^{(K)} = \frac{G^{(K)}}{\tan \beta_c^{(K)}} \left[\tan \beta_c e_w - \nabla Z \right] \quad (K=1 \sim N) \quad \dots (10)$$

$$\tan \beta_c = \tan \beta_c^{(K)} \cdot r + \tan \bar{\beta}_c \cdot (1-r) \quad \dots (11)$$

$$\ln[\tan \bar{\beta}_c] = \sum_{k=1}^N \mu^{(k)} \ln[\tan \beta_c^{(k)}] \quad \dots (12)$$

なお、粒径毎の連続式および含有率、交換層内の連続式は芹沢ら (2006) と同様である。また、沖合に防波堤や離岸堤が設置されると、その背後には波の遮蔽域が形成される。そのような場合には、酒井ら (2003) の方向分散法を用いて遮蔽域内外の回折係数、回折波向の分布を求め、さらにこの結果より、防波堤がない場合の碎波波高に回折係数を乗じて波高を低減させた。また波向分布については回折波向をそのまま与えた。

3. 千葉県検見川浜への適用

モデルの検証のために図-1に示す千葉県検見川浜における海浜変形に本モデルを適用した。図-2は2004年測量による検見川浜の深浅図である。検見川浜では両端に曲突堤が伸ばされるとともに、ほぼ中央部にY字突堤が造られた結果、これらの施設の周辺では波の遮蔽域が形成され、そこに砂が堆積して等深線が前進している。検証計算の範囲は、南北曲突堤に挟まれた沿岸方向に1,300m、岸沖方向450mの区域である。図-3には図-2に示す3測線の海浜縦断形を示す。3測線のうち測線No.1は波の遮蔽域内に位置し、No.3は遮蔽域外にある。またNo.2はそれらの中間に位置する。また図-4にはこれら3測線に沿う底質の粒度組成を示す。

測線No.1では、満潮時汀線より陸側では粗粒の土砂が

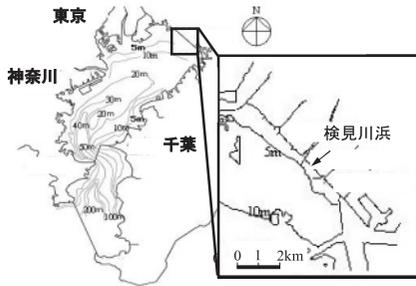


図-1 千葉県検見川浜の位置

堆積して前浜勾配が1/17と急なのに対し、汀線沖では主に細砂が堆積し海底勾配が1/50と緩くなっている。No.2でも同様な特徴が読み取れる。No.3では他の測線ほど顕

著ではないが、汀線近傍には粗砂が大量に堆積している。粒度組成で見ると、相対的に急勾配の斜面を構成している主な底質は粗砂と中砂であり、緩勾配斜面では粗砂はほとんどなく細砂と中砂が主である。岸沖方向の粒径分級と同時に、沿岸漂砂によって砂が運ばれる際、細粒分は粗粒分よりも運ばれ易いので、漂砂の下手端に近い曲突堤近傍では細粒分が多く分布し、遮蔽域外では細粒分が抜け出した結果、粗粒分の含有率が高まったと考えられる。

検見川浜での計算条件として、-4m以浅は1/20、-4mより沖では原地形の平均勾配として1/50を設定した。調査結果より粒径数は3とし、細砂・シルト(0.25mm以下)、中砂(0.25~0.85mm)、粗砂(0.85mm以上)の代表粒径

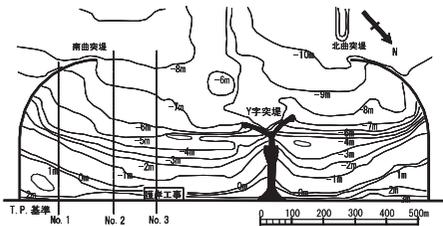


図-2 検見川浜の深淺図(2004年)

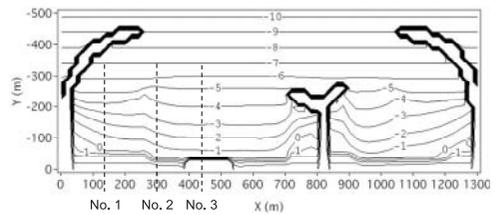


図-5 予測された等深線(計算)

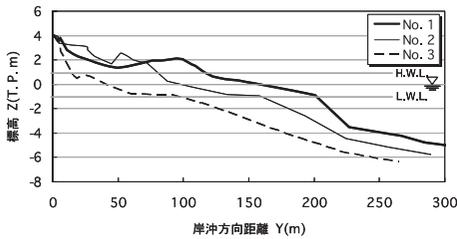


図-3 検見川浜の3測線に沿った縦断面

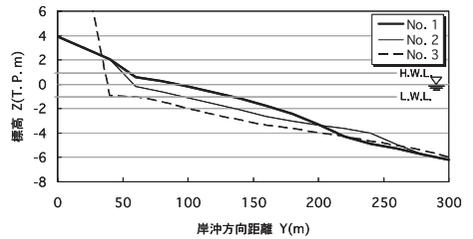


図-6 測線No.1,2,3の縦断面形(計算)

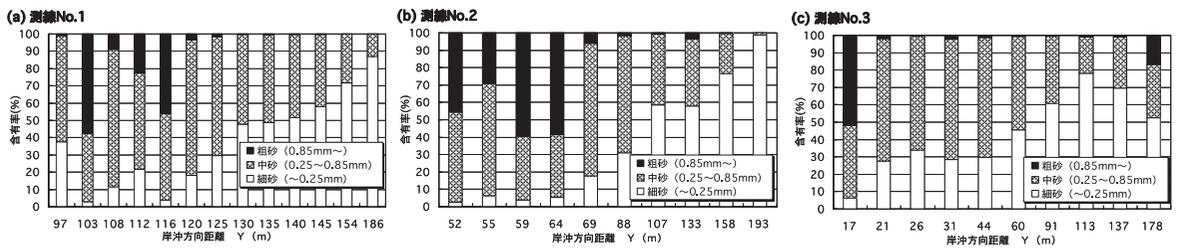


図-4 検見川浜の測線No.1,2,3における粒度組成(実測)

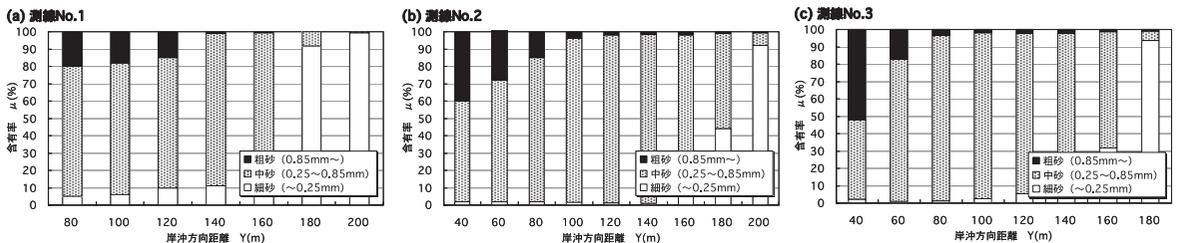


図-7 検見川浜の測線No.1,2,3における粒度組成(計算)

表-1 計算条件

計算ケース		検見川浜	航路埋没
初期勾配		1/50	1/20
初期粒径と含有率		0.106mm, 35%	0.106mm, 33%
		0.425mm, 50%	0.425mm, 33%
		0.85mm, 15%	0.85mm, 34%
平衡勾配		0.106mm, 1/60	0.106mm, 1/50
		0.425mm, 1/40	0.425mm, 1/15
		0.85mm, 1/7	0.85mm, 1/3
交換層厚B(m)		0.054	0.150
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	1.0	3.0
	碎波波向 α (deg.)	0.0	0.0
	潮位条件M.S.L.(m)	0.0	0.0
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	5.0	10.0
	バーム高 h_b (m)	2.0	3.0
漂砂量係数	漂砂量係数A	0.3	0.3
	小籠プラントン頂の係数	1.62	1.62
	岸沖-沿岸漂砂量係数比	0.2	0.2
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2	1/2
	海域	1/20	1/3
計算範囲	沿岸方向X(m)	1300	1000
	岸沖方向Y(m)	500	500
計算メッシュ	ΔX (m)	20	10
	ΔY (m)	20	20
計算時間間隔 Δt (hr)		0.1	0.1
計算ステップ数		20,000	5,000

を、0.106, 0.425, 0.85mmとした。粒径毎の含有率は35% (0.106mm), 50% (0.425mm), 15% (0.85mm)とし、それぞれの粒径毎の平衡勾配は、1/60 (0.106mm), 1/40 (0.425mm), 1/7 (0.85mm)とした。計算における各粒径別含有率は、粒径含有率の測定値をもとに定めた。まず、侵食、中立、堆積域に定めた3測線上における30点から採取した底質の篩い分け分析を行い、それぞれの粒径レンジの含有率を求めた。さらにこれら3測線の平均値を平均含有率とした。次に、両端の曲突堤に囲まれた区域

に平行等深線を設定し、この初期等深線に検見川浜への平均的な作用波浪として $H_b=1m$ の波を直角入射させた。粒径 $d^{(k)}$ に対応する平衡勾配 $\tan\beta_c^{(k)}$ は検見川浜の調査結果に対応するa, bを算出して決定し、平衡勾配 $\tan\beta_c^{(k)}$ を与えた。計算条件を表-1に示す。

2004年の再現等深線を図-5に示す。曲突堤近傍での沖への等深線の前進や、波の遮蔽域外で浜崖を形成しつつ等深線が岸側に後退するという実測結果がほぼ再現できている。また汀線付近では等深線間隔が密になっていることから分かるように急勾配であり、沖では勾配が緩やかになるという勾配変化も再現可能となった。さらに、前浜勾配の沿岸方向の変化もうまく予測できている。

図-3の実測断面形状に対応する3測線の縦断面形の予測結果を図-6に示す。侵食側に位置する測線No.3では、汀線付近から急勾配で落ち込む結果、全体として凹状の縦断面形となり、逆に堆積域に位置するNo.1では前浜は急勾配となるが、その沖では海底勾配がやや小さくなる点など、実測縦断面形の特徴がうまく計算されている。

図-7は各測線の粒径含有率の計算結果であるが、遮蔽域に向かうにつれて粒径の細砂の含有率が高まり、粒径の大きい砂の含有率が低くなるのがわかる。また、図-4と比較してもそれぞれの地点の粒度組成と縦断面勾配が対応している、このように本モデルにより観測結果がかなりよく説明できた。

4. 航路埋没を想定したケース計算

本モデルは粒径毎の漂砂の予測に利点を有している。このことから港内堆砂による航路埋没を想定したケース計算を行った。計算は3粒径で行い、粒径 d と含有率 μ は $d=0.106mm, 0.425mm, 2.0mm, \mu=33\%, 33\%$,

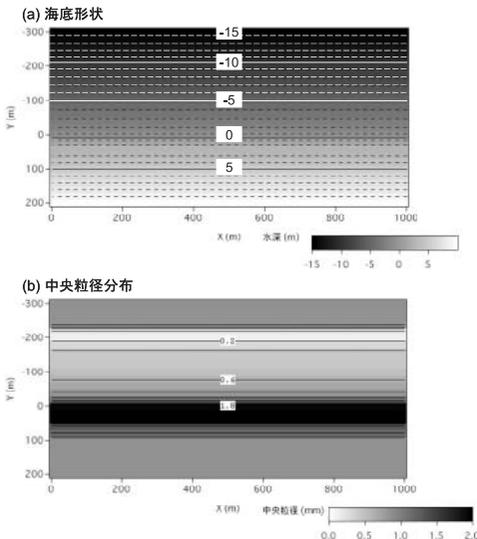


図-8 防波堤および防砂突堤設置前

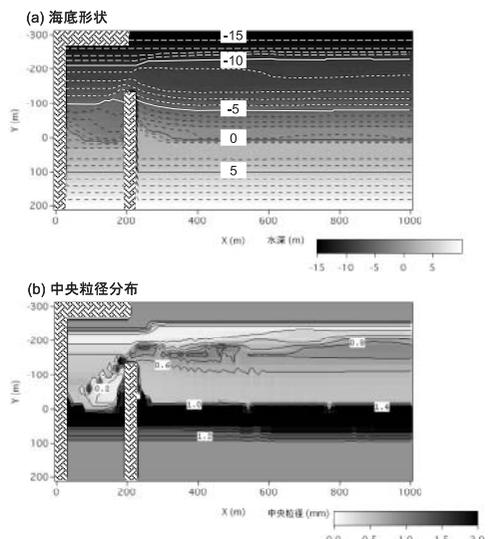


図-9 構造物設置から20,000step後

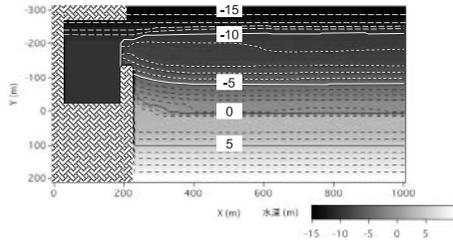


図-10 浚渫直後の海底形状

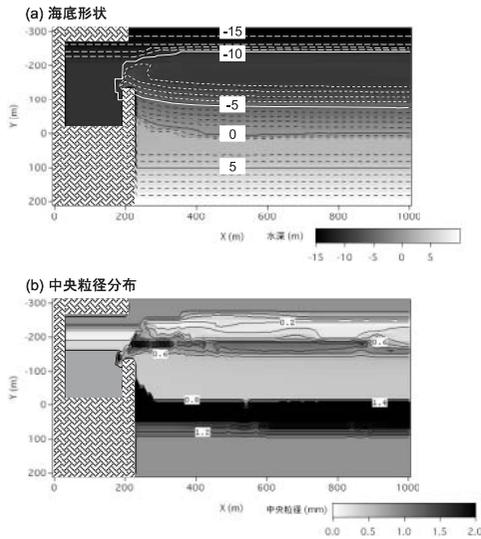


図-11 浚渫から20,000step後の予測

34%とした(表-1)。沿岸延長は1000mとし、碎波波高 $H_b=3.0\text{m}$ の波を直角入射した際の安定地形を防波堤および防砂突堤設置前の海底形状とした(図-8(a))。図-8(a)に対応した中央粒径の分布を図-8(b)に示す。

図-9(a)は構造物設置から20,000step後の予測地形を示す。防砂突堤を越えて遮蔽域内へ砂が移動する現象が予測され、また防砂突堤の内側では局所的に侵食が起き、そこから発生した土砂が港奥へと移動していることが分かる。図-9(b)には図-9(a)に対応する中央粒径の分布を示す。図から遮蔽域内へ堆砂した砂は主に細砂であることがわかる。また、細砂が選択的に遮蔽域内へ移動した結果、防砂突堤の沖合では粗粒化が進んでいる。また前浜付近が粗粒化したことで構造物設置前と比べ前浜勾配が急になった。図-10は港を建設し航路を確保するために浚渫を行った直後の海底形状を示す。この状態から計算を開始し浚渫から20,000step経過後の海底地形を図-11(a)に示す。防砂突堤の先端を回り込むように砂が港内へと入り込む現象が予測されている。図-11(b)には図-11(a)に対応した中央粒径の分布を示す。防砂突堤近傍の沖合ではさらに粗粒化が進んでいることが分かる。

5. まとめ

本研究では、粒度組成を考慮した平衡勾配概念をBagnold概念に基づく地形・粒径変化予測モデルに取り入れた新しい海浜変形・粒径の予測モデルを構築し、千葉県検見川浜に適用することでモデルの妥当性をほぼ確認した。さらに港内堆砂による航路埋没を想定したケース計算を行い、港内堆砂による航路埋没と同時に、周辺海岸の沖合海域から細粒土砂が波の遮蔽域へと吸い込まれる結果周辺海域では粗粒化が起こるという現象の予測が可能となった。

参考文献

- 宇多高明(1997):日本の海岸侵食,山海堂,442p.
- 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,539/II-35,pp.121-139.
- 宇多高明・勝山均・松浦健郎・熊田貴之・長山英樹・大木康弘(2007):利根川からの土砂流入のある波崎漁港周辺の海浜変形の実態と予測,海岸工学論文集,第54巻,pp.586-590.
- 勝山均・松浦健郎・宇多高明・熊田貴之・長山英樹・住谷勉夫(2007):鹿島灘海岸の侵食の実態と変形予測,海岸工学論文集,第54巻,pp.576-580.
- 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.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛(2005):波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法:海洋開発論文集,第21巻,pp.1029-1034.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄(2007):卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル,土木学会論文集B,第63巻, No. 2, pp.154-167.
- 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003):波の遮蔽域構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル,海岸工学論文集,第50巻,pp.496-500.
- 芹沢真澄・宇多高明・熊田貴之・三波俊郎・古池鋼・石川仁憲・野志保仁(2006):Bagnold概念に基づく混合粒径海浜の予測変化モデル,海岸工学論文集,第53巻,pp.626-630.
- 野志保仁・小林昭男・熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄(2004):底質粒度構成に応じた局所縦断勾配の算定法,海岸工学論文集,第51巻,pp.406-410.
- 野志保仁・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2005):局所勾配算定式の適用範囲と底質特性の新しい評価指標,海岸工学論文集,第52巻,pp.406-410.
- 野志保仁・小林昭男・宇多高明(2008):粒度組成と個々の粒径に対応した複合平衡勾配を考慮した海浜地形・粒径変化予測モデル,地形,第29巻,第4号,pp.399-419.
- 平野宗夫(1971):Armoringを伴う河床低下について,土木学会論文集,第195号,pp.56-65.
- Bagnold, R. A. (1963): Mechanics of Marine Sedimentation, in The Sea, M. N. Hill(editor), Vol. 3, pp. 507-528, New York, Wiley.
- Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Narim, R. B. And Sayao, O. J. (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.
- Inman, D. L. and Bagnold, R. A. (1963): Littoral Processes, in The Sea, M. N. Hill(editor), Vol. 3, pp. 529-533, New York, Wiley.