

粒度組成に応じた局所縦断勾配を考慮した等深線変化モデル

Contour-Line-Change Model Considering Local Longitudinal Slope
Corresponding to Grain Size Composition

野志保仁¹・小林昭男²・宇多高明³・熊田貴之⁴・芹澤真澄⁵

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

On the basis of the concept given by Noshi *et al.* (2005), a contour-line change model considering longitudinal slope corresponding to the grain size composition was developed, while improving the model given by Kumada *et al.* (2005). It is assumed that the equilibrium slope changes in response to the change in composition of grain size of bed materials, but the change is slow, and it gradually approaches an equilibrium slope with time. The model was applied to three coasts, and the applicability was confirmed. Longshore changes in foreshore slope, which was difficult to predict in the previous model, were able to predict in the model. Furthermore, the formation of the concave and convex profiles in the eroded and accreted zones became capable to predict.

1. はじめに

生態系を含む海岸環境への各種開発の影響予測においては、海浜変形だけではなく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る。熊田ら(2005)は、3次元的地形・粒径変化の予測モデルを開発した。このモデルでは、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ことを仮定しているが、ある粒径集団内で砂の含有率にわずかな変化があっても平衡勾配は不変としているため、同じ集団内の粒度組成変化に伴う縦断勾配の変化を予測することはできなかった。実海岸では、波の遮蔽域などにおいて細粒分の含有率が高まれば縦断形は次第に緩勾配となるが、このような沿岸方向での勾配変化は熊田ら(2005)のモデルでは再現できない。そこで、本研究ではこの点を改良し、粒度組成に応じた局所縦断勾配を考慮でき、実現象同様、沿岸・岸沖方向の緩やかな縦断勾配変化を安定して予測可能なモデルを開発する。

2. モデルの基本

本モデルの概念図を図-1に示す。混合粒径砂からなる海浜に波が斜め入射した場合、堆積域にある測線 A では粒径の細かい砂が選択的に堆積し細粒化する。一方、侵食域にある測線 B では粒径の細かい砂が流出し粗粒

化する。地形変化後、図-2に示すように、A の縦断勾配は初期縦断勾配 $\tan \beta$ よりも緩くなり、B では急になる。さらに実海岸では、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, 2004)。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し標高が低くなるに従い細粒化し、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接近する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。

熊田ら(2005)のモデルでは、混合粒径砂は粒径の小さいものほど動き易いと仮定している。これは河川でも見られる一般的現象であり、また多くの実海岸でも観察される。このことは海浜変形のモデル化において、少なくとも沿岸漂砂による海浜変形を表す上で熊田らの基本的考え方が有効なことを意味する。一方、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。この式の適用範囲はバーム高 h_R から波による地形変化の限界水深 h_c までであり、粒径含有率 $\mu^{(k)}$ から平衡勾配が算定できる。この式は漂

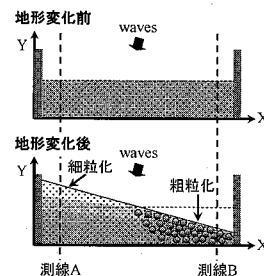


図-1 沿岸分級の概念図

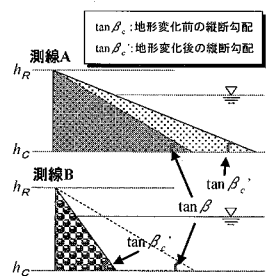


図-2 沖岸分級の概念図

- | | | |
|--------|------|--|
| 1 学正会員 | 修(工) | 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 |
| 2 正会員 | 工博 | 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 |
| 3 正会員 | 工博 | (財)土木研究センター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 |
| 4 正会員 | 博(工) | (株)水圏科学コンサルタント |
| 5 正会員 | | 海岸研究室(有) |

砂機構を踏まえた因果律を含んでいないため、結果的にある安定した局所勾配になったことを示すのみである。しかし定性的意味では合理性を有し、粒径が粗ければ勾配は急であり、粒径が細かければ勾配は緩いという観察結果をよく説明している。そこで本研究では、野志ら(2005)の考え方をモデルに取り込み、粒度組成に応じて勾配が変化するモデルを構築する。

熊田ら(2005)は岸沖漂砂量式を式(1)のように定めた。式(1)では芹沢ら(2002)の等深線変化モデルと同様、1つの平衡勾配角 β_c のみを仮定している。すなわち個々の粒径毎に海底勾配の応答が起こると考えるのではなく、対象海岸の平均的な海底勾配を定め、それを平衡勾配角 β_c としている。

$$q_s^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_s)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \beta_c \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c - 1) \cdots (1)$$

$$; k=1, 2, \dots, N$$

$$K_1^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}} \cdots (2)$$

$$\varepsilon_z(z) = \begin{cases} (2/h_c^3)(h_c/2 - z)(z + h_c)^2, & -h_c \leq z \leq h_R \\ 0, & z \leq -h_c, z \geq h_R \end{cases} \cdots (3)$$

ここに、 z はある等深線の地盤高、 $q_s^{(k)}$ 、 $k=1, 2, \dots, N$ は粒径毎(k 番目の粒径)の岸沖漂砂量、 $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎(k 番目の粒径)の含有率、 $\varepsilon_z(z)$ は宇多・河野(1996)の漂砂量の水深方向分布関数、 $d^{(k)}$ は底質粒径を示す。 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。 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表す。 α_{bs} は碎波点において波峰線が等深線となす角、 β は等深線毎の勾配角である。

本研究の目的は粒度組成に応じて勾配の変化するモデルを作成することにあるため、式(1)のように平衡勾配角 β_c を1つに決めず、粒度組成に応じた岸沖漂砂量式に拡張する必要がある。野志ら(2004, 2005)は粒度組成に応じた局所縦断勾配を次のように示した。

まず、対象海岸の縦断測量と岸沖方向の各点で底質採取を行い、粒度分析を行う。粒度分析の結果から、水深別の粒径加積曲線が得られ、ふるい目(例えばJIS規格： $d=0.075, 0.11, 0.25, 0.425, 0.85, 2\text{ mm}$)毎の粒径を有する砂の含有率が得られる。従来の研究(野志ら；2004, 2005)から、海浜勾配は粒径のべき乗に比例することが明らかにされているので、ふるい目の粒径を $d^{(k)}$ とすると、 $d^{(k)}$ に対応する平衡勾配 $\tan \beta_c^{(k)}$ は式(4)と仮定できる。対数表示では式(5)となる。次に、砂の粒度組成を考慮するために、ふるい目毎の粒径 $d^{(k)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta_c^{(k)}$ への寄与を粒径毎の含有率 $\mu^{(k)}$ によって考慮する。すなわち、式(5)の粒径 $d^{(k)}$ に対応する平衡勾配 $\tan \beta_c^{(k)}$ の平均値を、サンプリ

ング位置での平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c$ と考える(式(6))。

$$\tan \beta_c^{(k)} = a(d^{(k)})^b \cdots (4)$$

$$\ln[\tan \beta_c^{(k)}] = \ln a + b \ln[d^{(k)}] \cdots (5)$$

$$\ln[\tan \bar{\beta}_c] = \sum_{k=1}^N \mu^{(k)} \ln[\tan \beta_c^{(k)}] \cdots (6)$$

$$R = (\ln[\tan \bar{\beta}_c] - \ln[\tan \bar{\beta}_R])^2 \cdots (7)$$

具体的な計算方法として、まず式(5)の未知数 a と b を最小自乗法により求める。実測海浜勾配 $\tan \bar{\beta}_R$ と、計算で算出した平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c$ の差の自乗である残差 R が最小となる a, b を算定する。次に、ふるい目毎の粒径 $d^{(k)}$ に対する平衡勾配 $\tan \beta_c^{(k)}$ を式(5)によって算出し、 $d^{(k)}$ に対する $\tan \beta_c^{(k)}$ と $\mu^{(k)}$ を式(6)に代入し、海浜底質の粒度組成に応じた $\tan \bar{\beta}_c$ を算出する。

本研究では以上の野志ら(2005)の示した粒度組成に応じた局所縦断勾配の算定法の概念を熊田ら(2005)のモデルに取り入れることで式(1)を式(8)のように拡張した。

$$q_s^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_s)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c' - 1) \cdots (8)$$

$$; k=1, 2, \dots, N$$

$$\tan \beta_c' = \tan \beta + (\tan \bar{\beta}_c - \tan \beta) \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdots (9)$$

ここでの $\cot \beta_c'$ は、式(6)を用いて算出する平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c$ ではなく、式(9)から算出した漂砂発生後の縦断勾配 $\tan \beta_c'$ の逆数を使用する。ここで、式(9)の $\tan \beta$ は漂砂が生じる直前の勾配、 α は平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c$ に近づく速度を決定する係数であり、岸沖漂砂に伴って勾配は緩やかに変化し、最終的には平衡勾配に収束する。野志ら(2005)によれば、式(6)が適用可能なのは安定海浜のみである。海浜が十分安定形に達していない場合実測と計算の勾配にずれが生じるが、底質粒径の変化に追従する海底勾配の変化には時間を要するので、時間経過とともに徐々にその平衡勾配に向かうためこのようなずれが生じると考える。粒径毎の沿岸漂砂量式・土砂量保存則および含有率変化の計算式については熊田ら(2005)に従う。護岸・突堤・離岸堤などの構造物境界の処理は芹沢ら(2002)に従う。

3. モデルの検証

(1) 岡山県高島の浜への適用(岸沖分級の検証)

岸沖方向の粒径分級と縦断勾配の変化の再現性を調べるために、岸沖方向の粒径分級が顕著に起きている岡山県の高島の浜(野志ら, 2004)へ適用した(ケース1)。この海岸では風化花崗岩砂からなる急勾配の浜と、その沖の緩勾配の干潟面とがきれいに区分されている。図-3には実測縦断形を示すが、前浜には粒径の大きな砂礫が集積して1/8と急勾配斜面が形成されているのに対し、シルト・粘土でできた沖浜の海底勾配は1/50と非常に緩やかである。これを検証材料として、表-1に示す計算条件を

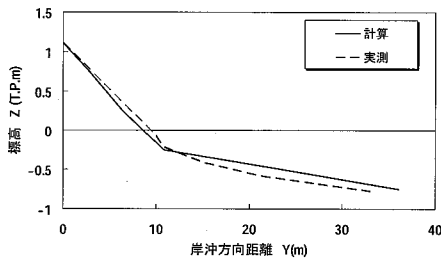


図-3 高島の浜の実測縦断面形と予測縦断面形

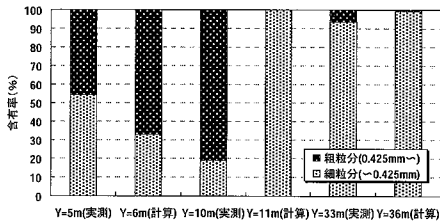


図-4 高島の浜における粒度組成の比較

設定して予測計算を行った。図-3には本モデルにより再現された縦断面形を、図-4には底質粒度の測定点にできるだけ近い地点の計算結果を示す。縦断面形は両者ほぼ一致している。また縦断面形において、 $Y=10\text{m}$ 付近では海底勾配が急変しているが、この付近での粒度組成の一致度はあまり高くないものの、前浜での粗粒材の集積と沖合の干潟上での細粒分の堆積についてはうまく再現できている。さらに $Y=0\sim 10\text{m}$ の範囲でもわずかな勾配変化が見られることから、本モデルの特徴である粒度組成に応じた縦断面勾配の変化が再現されていることが分かる。

(2) 波の遮蔽域形成に伴う地形変化予測への応用 (沿岸・岸沖分級の検証)

波の遮蔽域周辺における3次元的な粒径分級と縦断面勾配の変化の再現性を調べるために、左端部に遮蔽域を設けた仮想海岸へ適用した。沿岸方向に長さ1000m、岸沖方向に750mの矩形領域を想定し、左端に長さ200mの沖防波堤が造られたとして、これに波を直角入射させた。粒径は0.25mmと1.0mmの2粒径から構成されるとし、初期の含有率は50%、50%とし平行等深線を仮定した。計算条件は表-1に示す通りである。

図-5には 2×10^6 ステップ後の計算結果を示す。防波堤背後へと左向きの沿岸漂砂が生じて地形変化が起きたが、その際標高の高い場所では急勾配となり、沖合へと次第に緩勾配となる結果が得られた。図-6には代表4測線の海浜縦断面形を示すが、侵食域では汀線付近が急勾配で落ち込んだと沖合には緩勾配の海底面が形成される。前浜勾配は測線によらずいずれの場所でも急であるが、堆積域では沖合に緩勾配の海底面が形成される。図-7には3測線の粒度組成を示す。波の遮蔽域に向かって粒径の細かい砂の含有率が全体的に高まり、侵食域

表-1 計算条件

計算ケース	1	2	3
対象海岸	高島の浜	仮想海岸	検見川浜
初期勾配	1/35	1/50	1/50
初期粒径と含有率	0.25mm, 68% 1.0mm, 32%	0.25mm, 50% 1.0mm, 50%	0.106mm, 35% 0.425mm, 50% 0.85mm, 15%
平衡勾配	0.25mm, 1/42 1.0mm, 1/6	0.25mm, 1/50 1.0mm, 1/5	0.106mm, 1/60 0.425mm, 1/40 0.85mm, 1/7
交換層幅 $B(\text{m})$		2.00	2.50
		1.35	
入射波条件	砕波波高 $H_b(\text{m})$	1.5	1.5
	砕波波向 $\alpha(\text{deg.})$	0.0	0.0
	潮流条件 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 $h_c(\text{m})$	4.3	6.5
	バーム高 $h_b(\text{m})$	1.3	1.5
	漂砂量係数 Λ	0.2	0.3
漂砂量係数	小管ブランプントンの係数	0.0	0.5
	岸沖・沿岸漂砂量係数比	1.0	0.1
		0.2	
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2	1/2
	海域	1/3	1/3
		1/10	
計算範囲	沿岸方向 $X(\text{m})$		1000
	岸沖方向 $Z(\text{m})$	-6 ~ 3	-10 ~ 5
		-10 ~ 5	
計算メッシュ	$\Delta Y(\text{m})$	50	50
	$\Delta Z(\text{m})$	0.5	1
		1	1
計算時間間隔 $\Delta t(\text{hr})$	0.001	0.005	0.002
計算ステップ数	200,000	2,000,000	2,000,000

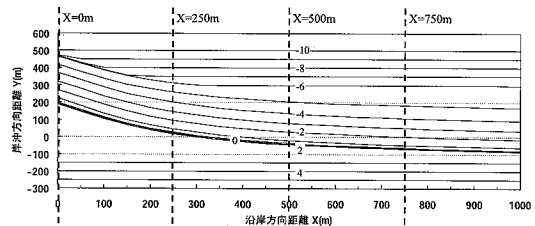


図-5 波の遮蔽域周辺での等深線変化

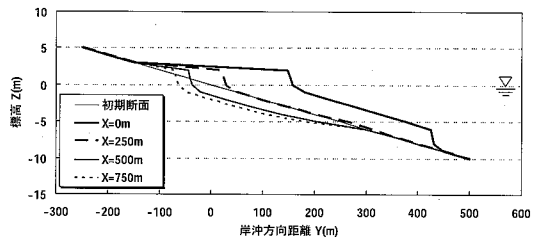


図-6 縦断面形変化

では汀線付近に粗な粒径の土砂が残されるという沿岸分級もうまく計算できている。

4. 千葉県検見川浜への適用 (沿岸・岸沖分級の検証)

実海岸での3次元的な粒径分級の再現性の確認のために、本モデルを千葉県検見川浜に適用した。千葉県検見川浜では両端に曲突堤が伸ばされ、養浜が行われた。これに伴い曲突堤による波の遮蔽効果によりポケットビーチの中央部が侵食され、侵食土砂が端部の波の遮蔽域へと運ばれ堆積した。その際、細粒の土砂が選択的に運ばれて侵食域では粗粒化が起き、堆積域では細粒分が多く堆積して沖合に緩勾配の斜面が形成された(熊田ら、

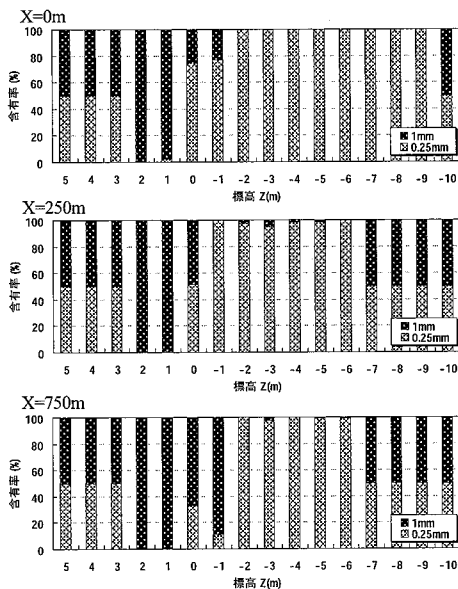


図-7 代表3測線における粒度組成の変化(計算)

2001). 図-8は2004年測量による検見川浜の深浅図である(和田, 2005). 検証計算の範囲は図に示す沿岸方向800m, 岸沖方向450mの矩形領域である. 図-9には図-8に示す3測線の海浜縦断面形を示す. 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-10には3測線に沿う底質の含有率を示す. またこれらの図において粒度組成が大きく変化する位置を読み取り, その位置を図-9に破線で示す. 測線No.1では, 汀線より陸側で粗粒の土砂が堆積して海浜勾配が1/17と急なのに対し, 汀線沖では細粒の土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, 急勾配斜面を構成している主な底質は粗砂と中砂であり, 一方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. このような粒径・縦断特性は, 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ほど細粒分が多く堆積し, 一方遮蔽域外では細粒分が抜け出した結果として粗粒分の含有率が高まったことを表している.

検見川浜での計算条件として, -4m以浅は1/20, -4mより沖では元地盤の平均勾配として1/50を設定した. 調査結果より粒径は3粒径とし, 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%

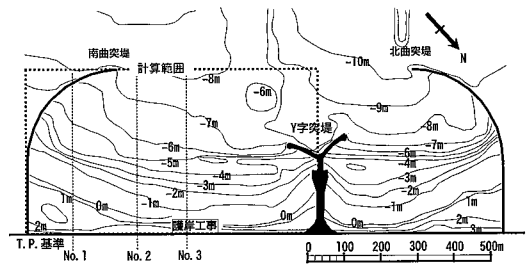


図-8 検見川浜の深浅図(2004年)

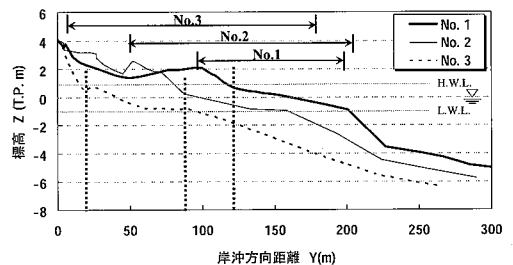


図-9 検見川浜の3測線に沿った縦断面形

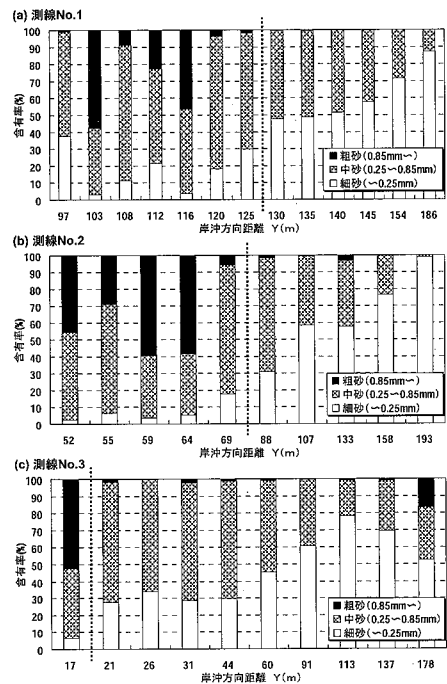


図-10 検見川浜の測線No.1,2,3における粒度組成(実測)

(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. この粒径別含有率は, 現地調査の結果からの平均的な粒径含有比を明らかにし, 実測の土砂量比より算定した. 初期地形には, 曲突堤とY字突堤に囲まれた区域に平行等深線を設定し, この海岸に $H_b=1m$ の波を直角入射させた. 詳細な計算条件を表-1に示す.

2004年の再現等深線を図-11に示す. 曲突堤近傍で等

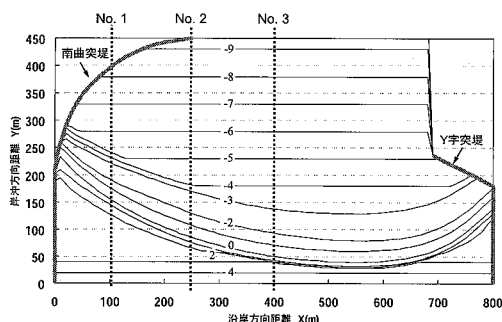


図-11 予想された等深浅図

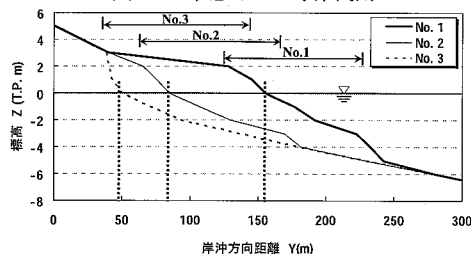


図-12 測線 No.1, 2, 3 の縦断面形 (計算)

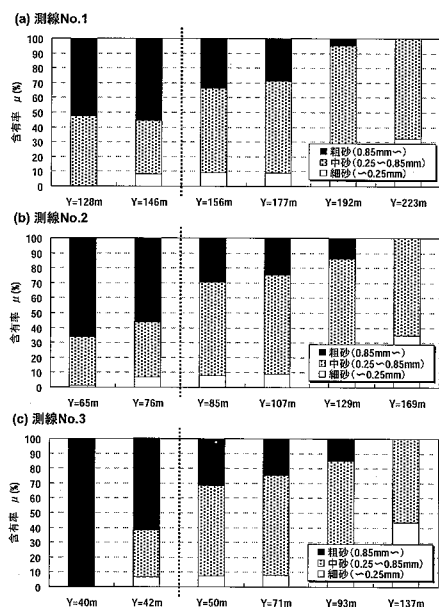


図-13 検見川浜の測線 No.1, 2, 3 における粒度組成 (計算)

深線が全体的に沖に進み、さらに沖合では土砂落ち込みに伴う急勾配化が進んでいる。また波の遮蔽域外では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をうまく再現している。また岸側の等深線間隔が密で、沖側は勾配が緩やかとなるという現地海岸の傾向もうまく再現できている。さらに、熊田ら(2005)では再現できなかった前浜勾配の沿岸方向の変化(ゆがみ)を良く再現できている。図-9の実測断面形に対応する3測線の計算結果を図-12に示す。侵食側の測線 No. 3 では汀線付近

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 ではバームが形成され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、実測縦断面の特徴がうまく計算されている。熊田ら(2005)のモデルでは図-12に示すように縦断面勾配が緩やかに変化する現象は再現できず、いくつかの直線的勾配の組み合わせによってのみしか表現できなかったことと比較すると、本研究の有用性が確認できる。図-13は各測線の粒径含有率の計算結果であるが、遮蔽域に向かい粒径の細かい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ことがわかる。また、図-12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、これは観測結果をうまく説明している。

5. まとめ

本研究では野志ら(2005)の概念に基づき、熊田ら(2005)のモデルを拡張することで、沿岸・岸沖方向の粒径分級によって生じる粒度組成変化に応じた局所縦断面勾配を考慮した等深線変化モデルを開発した。本モデルでは、平衡勾配は粒度組成の変化に応じて変化するがその変化は急激なものではなく、全体の海浜変形に連動するため粒度に応じた平衡勾配への変化に時間を要すると考え、時間経過とともに徐々にその平衡勾配に向かうと仮定した。これにより、従来モデルでは予測できなかった、沿岸方向の前浜勾配の変化(ゆがみ)や、侵食域での陸上部から滑らかな凹状縦断面形、堆積域でのバームの形成を含む滑らかな凸状縦断面形が計算可能となった。

参考文献

- 宇多高明(1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, p. 442.
- 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.
- 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・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁(2004): 粒度組成の三次元変化を考慮した等深線変化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 441-445.
- 熊田貴之・小林昭男・三波俊郎・宇多高明・芹沢真澄・古池鋼(2001): 千葉県検見川人工海浜の変形機構について, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 559-564.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池鋼・熊田貴之(2002): 海浜縦断面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.
- 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・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面勾配の算定法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 406-410.
- 和田信幸(2005): 底質特性と平衡勾配から見る漂砂特性に関する研究, 日本大学理工学部海洋建築工学科沿岸域工学研究室卒業論文集, pp. 9-1-9-18.