

滑らかな縦断形を予測可能な 地形・粒径変化予測モデルによる養浜効果検討

MODEL FOR PREDICTING BATHYMETRIC AND GRAIN SIZE CHANGES AND ITS APPLICATIONS TO BEACH NOURISHMENT

野志保仁¹・小林昭男²・宇多高明³・熊田貴之⁴・芹沢真澄⁵

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

¹正会員 博(工) (有) アイコムネット

(〒100-0014 東京都千代田区永田町2-10-2 永田町TBRビルUCF-201)

²正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

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 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

⁴正会員 博(工) (株) 水圏科学コンサルタント (〒145-0064 東京都大田区上池台1-14-1 明伸ビル)

⁵正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

A model for predicting the bathymetric and grain size changes, taking account of the equilibrium slope corresponding to the composition of grain size and each grain size, was applied to predict beach changes at Kemigawa Beach. In the model, the effect of the grain size sorting due to cross-shore sand transport is incorporated. Accumulation of coarser material near the shoreline and gradual changes in the longitudinal morphology in the longshore direction were well predicted. Beach changes can be predicted by the present model when beach nourishment using sand with different grain sizes was carried out.

Key Words : equilibrium slope, predictive model, grain size, Kemigawa Beach

1. はじめに

わが国沿岸域では、防波堤など波の遮蔽構造物の建設に伴い、波の遮蔽域外から遮蔽域内へと向かう沿岸漂砂が誘起され、その結果波の遮蔽域外での侵食と、遮蔽域内での堆積がほぼ同時に起こる例が数多く見られる。このような海浜変形では、波の遮蔽域内では細粒分が選択的に堆積し、遮蔽域外では粗粒化が進むのが一般的特徴である^{1) 2) 3)}。底質粒径の変化は、海底に生息する生物にも大きな影響をもたらす⁴⁾。すなわち、沿岸域生態系まで含めた環境影響の評価においては、海浜地形変化予測のみでなく、それに伴う底質変化をも予測する必要がある。海浜材料が均一粒径で構成される場合の海浜変形については、芹沢ら⁵⁾による等深線変化モデルが実用レベルに達しており、例えば、静岡・清水海岸での観測が示すような多数の離岸堤が設置された条件下での sand body の移動も予測可能となっている⁶⁾。混合粒径砂を考慮した海浜変形については、熊田ら⁷⁾が、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、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^{8) 9)}。しかし、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

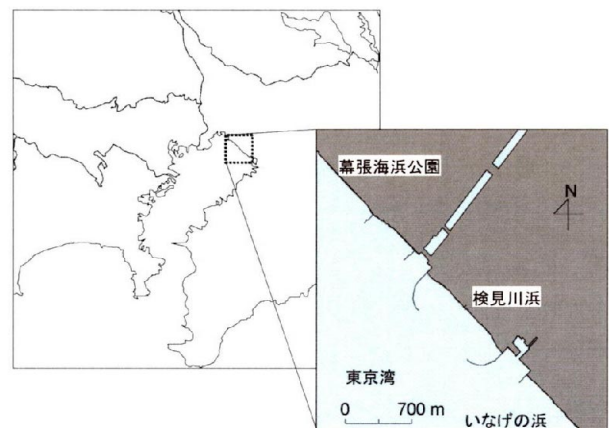


図-1 千葉県検見川浜の位置

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¹⁰⁾はこの点を改良し、粒度組成に応じた海浜勾配の変化を考慮でき、実際の現象と同様、沿岸・岸沖方向の緩やかな縦断勾配の変化を予測可能なモデルを開発した。本研究では野志ら¹⁰⁾のモデルを図-1に示す検見川浜に適用し、様々な養浜ケースの将来予測をすることで養浜効果を検討した。

2. モデル概要

野志ら¹⁰⁾によるモデルの概念図を図-2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結果的に粗粒化する。地形変化後、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¹¹⁾。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¹²⁾。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¹²⁾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。この式は漂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¹²⁾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⁷⁾は岸沖漂砂量式を式(1)のように定め、粒径集団毎の平衡勾配角 $\bar{\beta}_c^{(i)}$ 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のではなく、対象海岸の粒径集団毎の平均的な海底勾配を定め、それを平衡勾配角 $\bar{\beta}_c^{(i)}$ としている。

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

$i=1,2,\dots,NI, k=1,2,\dots,N$

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

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

ここに、 x を沿岸方向座標として、 z はある等深線

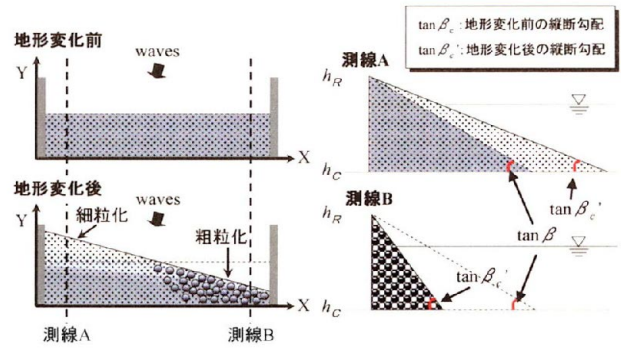


図-2 モデルの概念図

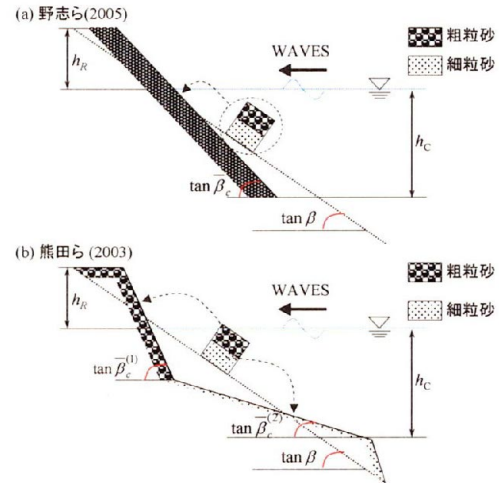


図-3 粒度組成に応じた局所縦断勾配に係る項と各粒径に応じた平衡勾配に係る項の定義

の地盤高、 $q_z^{(i,k)}$ 、 $i=1,2,\dots,NI, k=1,2,\dots,N$ は粒径集団 (i グループ) 内の粒径毎 (k 番目の粒径) の岸沖漂砂量、 $\mu^{(i,k)}$ 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¹³⁾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} は砕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。

野志ら¹⁰⁾は式(1)のように平衡勾配角 β_c を決めず、野志ら¹²⁾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モデルに取り入れることで式(1)を式(4)のように拡張した。

$$q_z^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot \{r \cdot (\cot \beta / \cot \bar{\beta}_c - 1) + (1-r) \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c^{(k)} - 1)\} \quad (4)$$

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

図-3には式(4)の粒度組成に応じた局所縦断勾配に係る項¹²⁾と、各粒径に応じた平衡勾配に係る項¹⁴⁾の定義を示す。式(4)の第1項は複数の粒度組成に応じた平衡勾配 $\tan \bar{\beta}_c$ に、第2項は粒径それぞれが単体として持つ平衡勾配 $\tan \beta_c^{(k)}$ に近づこうとするとき生じる岸沖漂砂である。これにより、粒度組成に応じた平衡勾配を考慮しつつ、沖方向の細粒

化も予測可能となる。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す。本研究では重み r は等しく0.5とした。粒径毎の沿岸漂砂量式、粒径毎の土砂量保存則、粒径毎の含有率変化の計算法は野志ら¹⁵⁾と同一である。

3. 千葉県検見川浜への適用

(1) 再現計算

実海岸での3次元的な粒径分級の再現性を確認するために、野志ら¹⁰⁾の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(1991年)。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¹⁰⁾。図-4は2004年測量による検見川浜の深浅図である。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-5には図-4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-6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-5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。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分布し、一方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代表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。粒径毎の含有率および粒径毎の平衡勾配は35%、1/60(0.106mm)、50%、1/40(0.425mm)、15%、1/7(0.85mm)とした。これらの粒径別含有率は、現地調査より平均的な粒径含有比を明らかにするとともに、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

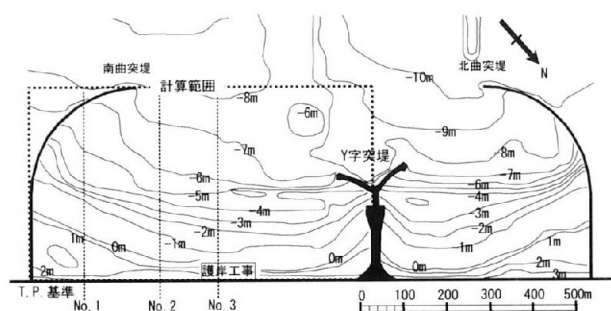


図-4 2004年測量による検見川浜の深浅図

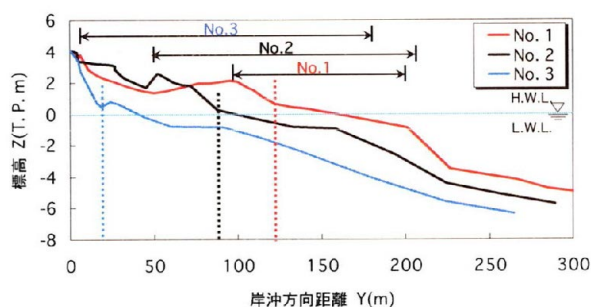


図-5 図-4に示す3測線の海浜縦断面形

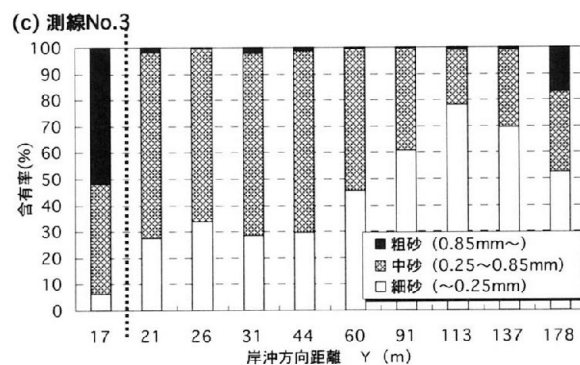
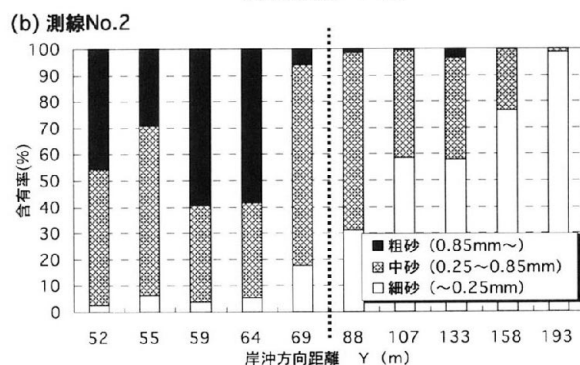
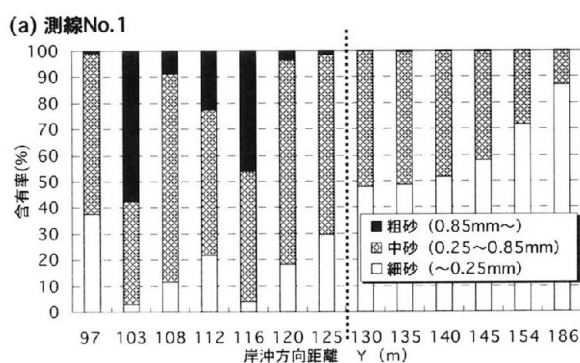


図-6 3測線に沿う底質の含有率

$H_b=1$ m の波を直角入射させた。計算条件を表-1 に示す。

初期等深線と 2004 年の再現等深線を図-7 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、野志ら¹⁵⁾の計算結果より精度よく予測できた。また岸付近では等深線間隔が密で急勾配であり、沖では勾配が緩やかになるという粒径集団としての勾配変化も再現できている。さらに、熊田ら⁷⁾では再現できなかった前浜勾配の沿岸方向の

表-1 計算条件

計算ケース		再現計算
初期勾配		1/20
初期粒径と含有率		0.106mm, 35% 0.425mm, 50% 0.85mm, 15%
平衡勾配		0.106mm, 1/60 0.425mm, 1/40 0.85mm, 1/7
交換層幅 B(m)		1.35
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	1.0
	碎波波向 α (deg.)	0.0
	潮位条件 M.S.L.(m)	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
	バーム高 h_B (m)	2.0
漂砂量係数	漂砂量係数 A	0.3
	小笠プラントン項の係数	1.0
	岸沖・沿岸漂砂量係数比	0.2
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2
	海域	1/20
計算範囲	沿岸方向 X(m)	800
	鉛直方向 Z(m)	-10~5
計算メッシュ	ΔY (m)	10
	ΔZ (m)	1
計算時間間隔 Δt (hr)		0.1
計算ステップ数		20,000

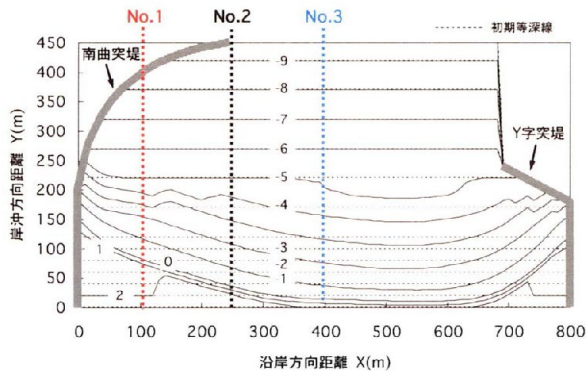


図-7 2004年の再現等深線

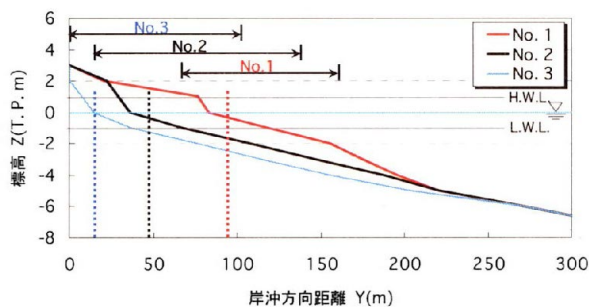
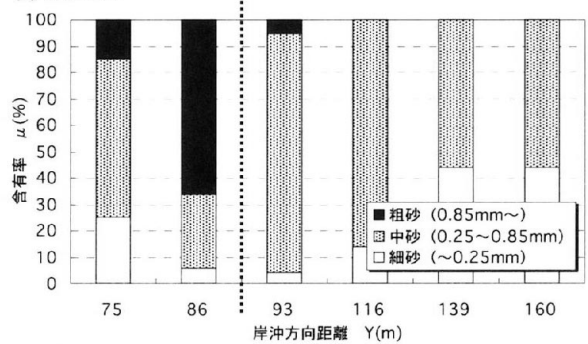


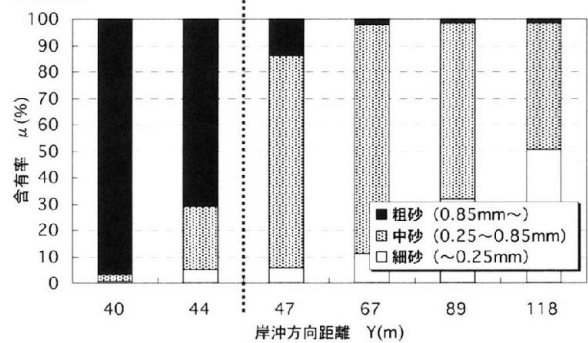
図-8 実測断面形に対応する3測線の計算結果

変化(ゆがみ)もうまく再現できている。図-5 の実測断面形に対応する 3 測線の計算結果を図-8 に示す。また、現地調査結果と同様に粒度組成の大きく変化する地点を破線で示した。侵食側の測線 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、実測縦断面形の特徴がうまく計算されている。従来モデルでは図-8 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-9 は各測線の粒径含有率の計算結果である。図中の破線は粒度組成が多く変化する地点を示している。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のがわかる。また、図-8 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。

(a) 測線No.1



(b) 測線No.2



(c) 測線No.3

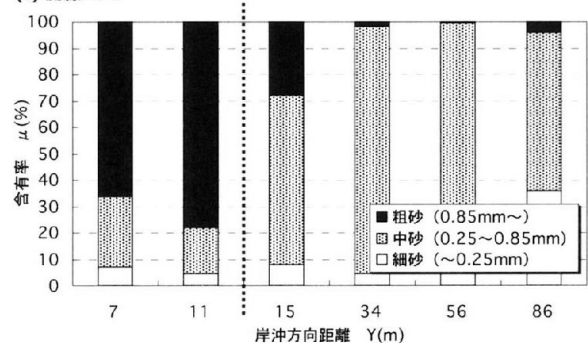


図-9 3測線に沿う底質の含有率

(2) 将来予測

図-10 は現況から 10 年後における検見川浜の予測等深線と水深変化量を示す。南曲突堤背後の遮蔽域では堆積がさらに進行し、沿岸方向距離 $X=300 \sim 650$ m の区域では侵食が進むことがわかる。人工海浜としての機能を回復させるためには $X=300 \sim 650$ m の侵食域で前浜を復元させることが必要である。そこで粒度組成の異なる養浜砂を養浜した場合の将来予測を行った。図-11 は 0.85 mm の砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量である。現況に比べると前浜が回復し、最も前浜幅の狭い場所でも浜幅が 20 m となる。図-12 は 0.25

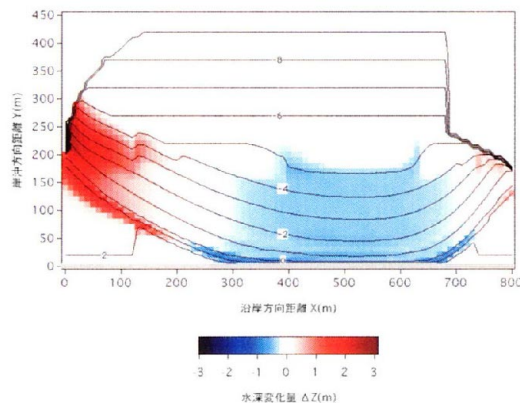


図-10 現況から10年後における検見川浜の予測等深線と水深変化量

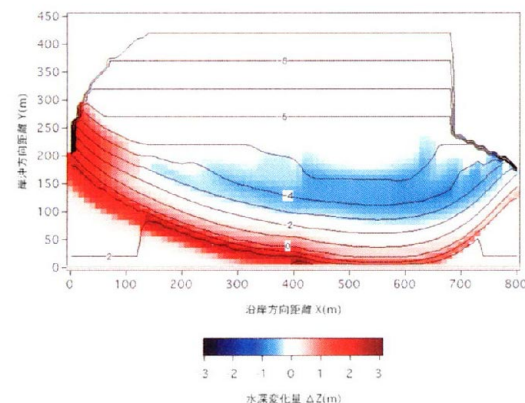


図-11 0.85 mmの砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量

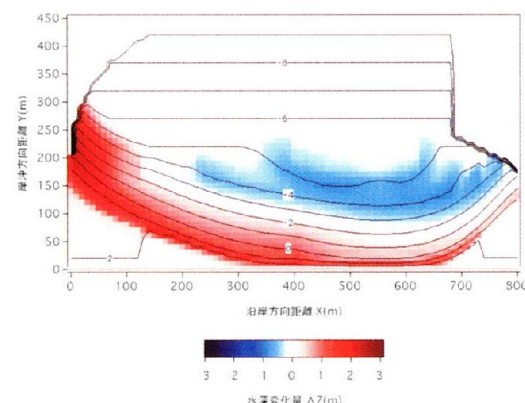


図-12 0.25 mmの砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量

mm の砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量である。0.85 mm の砂を養浜した場合と比べ、養浜砂の粒径が小さくなったため前浜勾配は緩やかになり、標高 $Z=2 \sim 3$ m の広い範囲で地盤が上昇していることがわかる。

図-13 は砂の粒径を 0.106 mm とさらに小さくして養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) を行った場合の予測等深線と水深変化量である。粒径が非常に小さくなったため養浜砂は沖に流出し、0.85 mm あるいは 0.25 mm の砂を養浜した場合と比べ前浜の回復は少ない。このことから、全体的に地盤を上昇させつつ前浜を回復させるためには、粒径が 0.85 mm と 0.25 mm の養浜砂を混合した状態に入れることが好ましいと考えられる。そこで、0.85 mm と 0.25 mm の砂を 1 : 1 の割合で混合した養浜砂を養浜した場合の予測を行った。図-14 は 0.85 mm と 0.25 mm の混合砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量である。相対的に粒径の大きな 0.85 mm の養浜砂の効果により陸上部の地盤が大きく上昇し、同時に 0.25 mm の養浜砂の効果により全体的な地盤高の上昇も起きていることから、この手法はかなり効果的なことがわかる。

一方、野志ら¹⁰⁾のモデルは人工海浜を造成する場合にも応用可能である。そこで検見川浜を対象とし、造成時に投入した養浜砂の粒度組成を変えた場合の予測を行った。図-15 は 0.85 mm の砂が 60%、

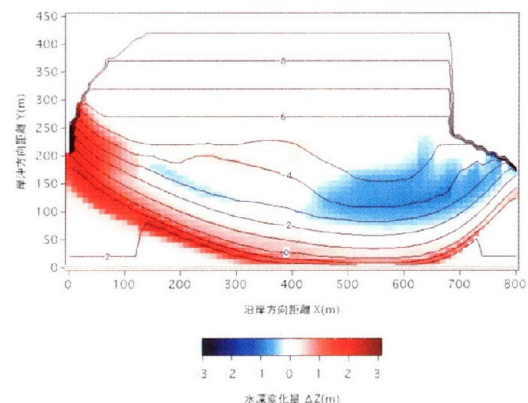


図-13 0.106 mmの砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量

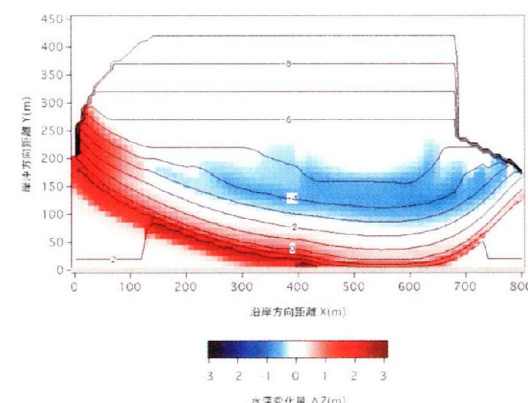


図-14 0.85 mmと0.25 mmの混合砂を養浜 ($10,000 \text{ m}^3/\text{yr}$) した場合の予測等深線と水深変化量

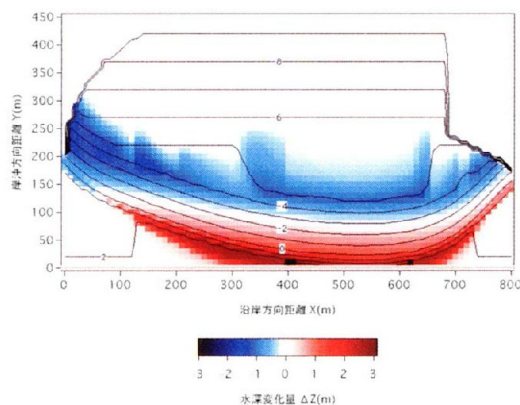


図-15 0.85 mmの砂が60%, 0.25 mmの砂が40%の混合砂を養浜砂として使用した場合の予測等深線と、現況の将来予測との差分

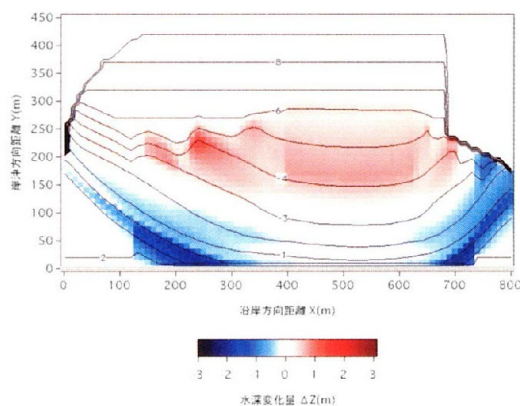


図-16 0.106 mmの砂が60%, 0.25 mmの砂が40%の混合砂を養浜砂として使用した場合の予測等深線と、現況の将来予測との差分

0.25 mm の砂が 40%の混合砂を養浜砂として使用した場合の予測等深線と、現況の将来予測との差分を示したものである。前浜が維持され、遮蔽域に堆積する砂の量も減少していることがわかる。図-16は0.106 mmの砂が60%, 0.25 mmの砂が40%の混合砂を養浜砂として使用した場合の予測等深線と現況の将来予測との差分を示したものである。0.106 mmの砂が沖に流出するため前浜は全体的に侵食傾向となっていることがわかる。

4. まとめ

野志ら¹⁰⁾のモデルによれば、粒径毎の砂の移動を評価することで従来予測ができなかった粒度組成変化の予測が可能となった。すなわち、検見川浜を対象として遮蔽域形成に伴う海浜変形、および養浜時海浜変形について検討した結果、粒径による養浜砂の移動状況の差異を明らかにすることが可能となった。本研究では養浜効果の実証までには至っていないが、今後各地の様々な条件のもとでの養浜の将来予測に適用を図り、実測データとの比較を行うこと

により、モデルの予測精度の向上を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸侵食，山海堂，p.442, 1997.
- 2) 宇多高明・清野聡子・熊田貴之・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎：波の遮蔽構造物建設に起因して阿字ヶ浦・那珂海岸で進みつつある大規模侵食，海洋開発論文集，第19巻，pp.363-368, 2003.
- 3) 宇多高明：「海岸侵食の実態と解決策」，山海堂，p.304, 2004.
- 4) 日向野純也・木元克則・安永義暢：潜砂行動と物理環境の関係からみたチョウセンハマグリとコタマガイの特性，水工研研報，pp.65-87, 1993.
- 5) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：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, 2002.
- 6) 宇多高明・西谷 誠・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲：等深線変化モデルによる sand body 移動の数値解析，地形，第28巻，pp.399-414, 2007.
- 7) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄：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, 2007.
- 8) 勝山 均・松浦健郎・宇多高明・熊田貴之・長山英樹・住谷勉夫：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, 2007.
- 9) 宇多高明・勝山 均・松浦健郎・熊田貴之・長山英樹・太木康弘：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, 2007.
- 10) 野志保仁・小林昭男・宇多高明：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, 2008.
- 11) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男：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, 2003.
- 12) 野志保仁・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之：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, 2005.
- 13) 宇多高明・河野茂樹：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, 1996.
- 14) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛：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, 2005.
- 15) 野志保仁・小林昭男・宇多高明・熊田貴之・芹沢真澄：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，海岸工学論文集，第54巻，pp.426-430, 2007.