

滑らかな縦断形を予測可能な3次元モデルを利用した養浜効果検討

Investigation of Movement of Nourishment Sand of Different Grain Sizes Using Model for Predicting Bathymetric and Grain Size Changes

野志保仁¹・小林昭男²・宇多高明³・芹沢真澄⁴・熊田貴之⁵

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

A model for predicting bathymetric and grain size changes considering equilibrium slopes corresponding to the composition of grain size and each grain size was applied to predict the beach changes on the Chigasakinaka coast. 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 diffusion of colored sand with different grain sizes placed on the shoreline and at a depth of 4 m was predicted and compared with the results of a field observation using colored sand on the Chigasakinaka coast. Both results were in good agreement.

1. はじめに

防波堤が沖に建設されると、波の遮蔽域外から遮蔽域内へと向かう沿岸漂砂が発生し、結果として波の遮蔽域内では砂が堆積し、遮蔽域外では侵食が進行する。このような変化が起こる場合、堆積域である遮蔽域内では主に遮蔽域外から移動してきた細砂が堆積し、侵食域では細砂が流出した結果粗粒分が残されて砂の粗粒化が起こる。このような底質の変化は底生生物の生息にも大きな影響を及ぼすと考えられ、このため沿岸域の環境変化を考える上では、地形変化予測のみでなく底質変化予測も重要となる。一方、波の作用下での底質分級を考えると、一般に粒径の大きな砂は前浜付近で急勾配をなして堆積するのに対し、細砂は沖合で緩い勾配で堆積するという特性があるが、このような底質分級に関し、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(2005)は、この粒度組成に応じた平衡勾配を等深線変化モデルに組み込んだ。しかしこのモデルでは、波の遮蔽域において等深線の空間的振動が起こり、安定性が確保できない場合があることが課題として残された。熊田ら(2007)は、この問題の解決のために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することにより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、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予測可能なモデルを開発した。

このように粒径を考慮した地形変化モデルが多く開発されている中、現在各地では防護のみではなく環境への配慮のために養浜工を選択する事例が増えている。このような養浜では養浜後の海浜形状と粒径変化の予測が求められる。既往養浜事例を調べると、その多くは汀線よりも陸側で養浜を行う前浜養浜である。一方、前浜養浜に比べ沖合養浜はバージによる大量の土砂輸送が可能のために低コストという利点がある。このことから、沖合養浜における地形・粒径変化を精度良く予測可能とすることもまた大事である。しかし既往の沖合養浜時の予測は、沖浜を固定床扱いする方法があるのみで、実際の海浜形状と粒径分布まで考慮可能な予測法はない。本研究では、粒度組成に応じた海浜勾配の変化を考慮でき、実現象と

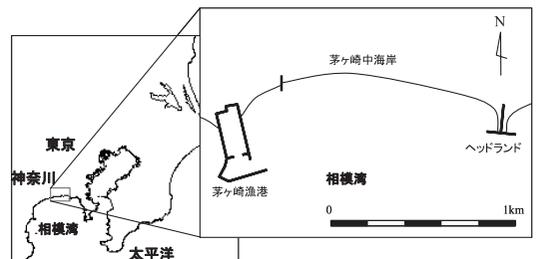


図-1 モデル海岸の神奈川県茅ヶ崎中海岸の位置

- | | | |
|-------|------|--|
| 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 | 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 |
| 3 正会員 | 工博 | (財)土木研究センター常務理事なごさ
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 | | (有)海岸研究室 |
| 5 正会員 | 博(工) | (株)水圏科学コンサルタント 技術部 |

同様、沿岸・岸沖方向の緩やかな縦断勾配の変化予測も可能な野志ら (2008) のモデルを、神奈川県茅ヶ崎中海岸 (図-1) に適用し、沖合養浜時の地形・粒径変化の予測手法について検討した。

2. モデル概要

野志ら (2008) の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 (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、水深が大き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。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 (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 (2007) 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。

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

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

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

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

ここに、 x を沿岸方向座標として、 z はある等深線の地盤高、 $q_z^{(i,k)}, i = 1, 2, \dots, NI, k = 1, 2, \dots, N$ 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 (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。

野志ら (2008) は式 (1) のように平衡勾配角 β_c を決めず、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

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

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

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、 $\varepsilon_x(z)$ 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。図-3には式 (4) の粒度組成に応じた局所縦断勾配に

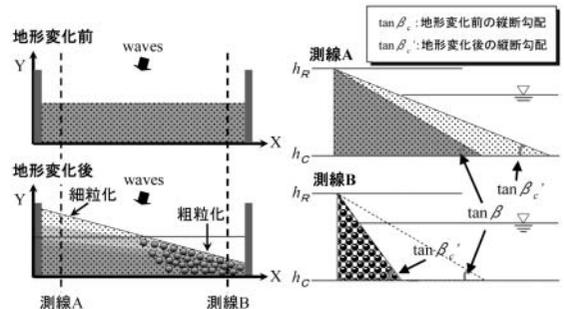


図-2 野志ら (2008) のモデルの概念図

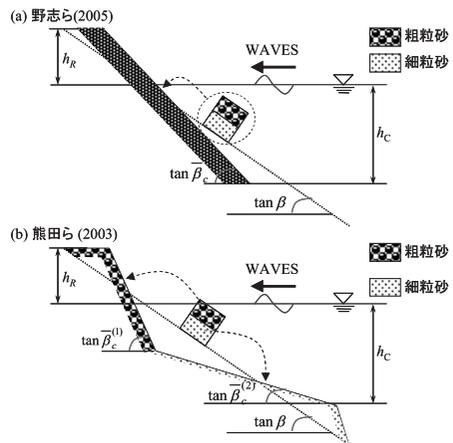


図-3 式 (4) の粒度組成に応じた局所縦断勾配に係る項と、各粒径に応じた平衡勾配に係る項の定義

係る項（野志ら，2005）と，各粒径に応じた平衡勾配に係る項（熊田ら，2005）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 $\tan \beta_c$ 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．粒径毎の土砂量保存則（連続式）は次式で与えられる．

$$\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(k)}}{\partial x} + \frac{\partial q_z^{(k)}}{\partial z}; k=1,2,\dots,N \quad \dots\dots\dots (5)$$

また，堆積時と侵食時における粒径毎の含有率変化は， B を交換層幅，全粒径成分を考慮した等深線変化量を ΔY としたとき，堆積時には次式により求める．

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left[\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(k)} \right]; k=1,2,\dots,N \quad \dots\dots\dots (6)$$

同様に，侵食時の粒径毎の含有率変化は次式より算定できる．

$$\frac{\partial \mu_B^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left[\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right]; k=1,2,\dots,N \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに， $\mu_B^{(k)}$ は，等深線位置の変化の起こる前の段階における，海底砂層のうち波の作用で底質交換が起こる層（交換層）より下層に位置する砂層の粒径含有率を示す．交換層幅 B は，鉛直方向に測った砂層厚に海浜勾配の逆数を乗じて求めるものとし，この場合の交換層は Kraus (1985) を参考に算出する．計算は以上の式を連立して解くが，防波堤などの構造物境界の処理は，芹沢ら (2002) に従った．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. 茅ヶ崎中海岸におけるカラーサンドの追跡調査結果

宇多ら (2007) は茅ヶ崎中海岸において粒径砂の異なるカラーサンドの追跡調査を行った．調査は $d_{50}=0.2\text{mm}$ と $d_{50}=2.0\text{mm}$ の砂を汀線付近と水深4mに 1m^3 投入し，投入から62日間にカラーサンドの広がり（1粒でも検出された地点）を追跡した．図-4はカラーサンド投入後62日の追跡調査結果である．図-4 (a) (b) は $d_{50}=0.2\text{mm}$ の養浜砂を汀線と-4mに投入した場合の養浜砂の分布である．汀線および-4m地点で養浜を行った場合，いずれも広く拡散していることが分かる．図-4 (c) は $d_{50}=2.0\text{mm}$ の養浜砂を汀線投入した場合の養浜砂の分布である．この場合には，投入砂は汀線付近に留まっている．図-4 (d) は同じ粒径の養浜砂を-4mに投入した場合であるが，投入砂は岸向きに移動し汀線に近づいていることが分かる．このことから，粒径の細かい砂は投入位置に関係なく海岸全域に拡散し，一方粒径の粗い砂は汀線付近に投入した場合は汀線付近に留まり，水深4mに投入した場合は岸向きに移動し汀線付近に留まることがわかった．すなわち，平衡勾配の緩やかな細かい砂は広く拡散し，平衡勾配の急な粗い砂は岸向きに移動し安定するという傾向があることがわかる．

4. 茅ヶ崎中海岸への適用

茅ヶ崎中海岸ではヘッドランド (HL) 建設後の1991年以降，毎年約 $5,000\text{m}^3$ の養浜が行われたが，HLを越えて漂砂下手側へ流出する漂砂約 $4,600\text{m}^3/\text{yr}$ と土砂収支バランスが取れていた．そこでまずHLが建設された1991年からカラーサンド投入前の2005年までの地形再現を行った．

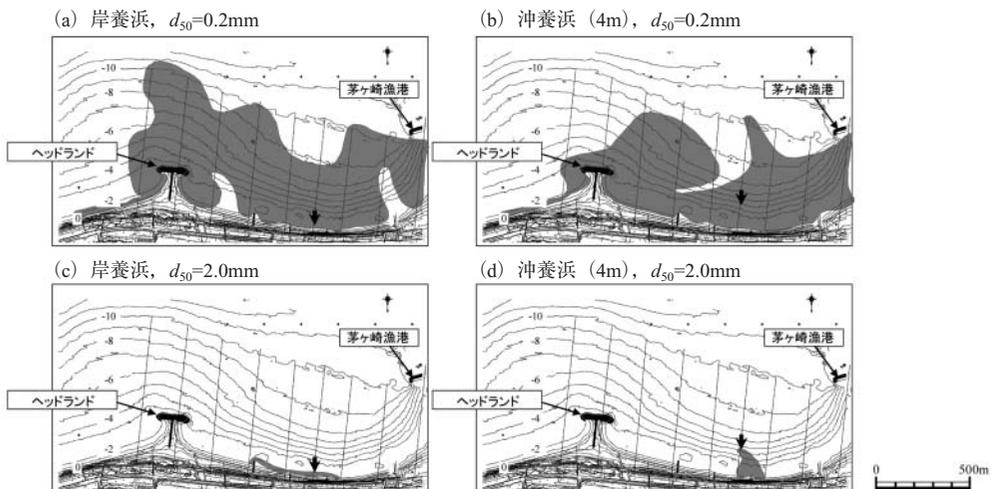


図-4 カラーサンド投入から62日後の追跡調査結果

計算条件を表-1に示す。計算での入射波は防災科学技術研究所の観測データより算出したエネルギー平均波を採用し、碎波波高 $H_0=0.83\text{m}$ 、周期 $T=6.35\text{s}$ 、波向は $S6^\circ W$ とした。地形変化の水深範囲は、実測の深浅図よりバーム (h_R) から波による地形変化の限界水深 (h_C) までとした。粒径は実測データをもとに $0.106, 0.425, 2.0\text{mm}$ の3粒径とし、それぞれの平衡勾配は $1/80, 1/30, 1/5$ とした。また粒径毎の含有率は実測値より決定した。

再現計算では実際に養浜が行われていたことを考慮し、菱沼海岸では $9,000\text{m}^3/\text{yr}$ 、中海岸では $5,000\text{m}^3/\text{yr}$ の養浜を行い、また、実態に合わせ漂砂下手側では $-14,000\text{m}^3/\text{yr}$ の境界条件を設定した。図-5は2005年の実測・計算等深線である。ヘッドランド周辺の5mよりも深い部分の等深線をほぼ再現できている。また沖に向かい緩やかになるという縦断面をよく再現できていることがわかる。図-5の測線

表-1 計算条件

初期粒径と含有率	0.106mm, 48% 0.425mm, 39% 2.0mm, 13%	
平衡勾配	0.106mm, 1/80 0.425mm, 1/20 2.0mm, 1/5	
交換層幅 B (m)	2.5	
入射波条件	碎波波高 H_0 (m)	0.8
	碎波波向 α (deg.)	-6.0
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_C (m)	9.0
	バーム高 h_R (m)	3.0
漂砂量係数	漂砂量係数 A	0.4
	小笹プランクン項の係数	1.6
	岸沖・沿岸漂砂量係数比	0.4
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2
	海域	1/3
計算範囲	沿岸方向 X (m)	3000
	鉛直方向 Z (m)	-10~5
計算メッシュ	ΔY (m)	100
	ΔZ (m)	1
計算時間間隔 Δt (hr)	4.4	
計算ステップ数	20,000	

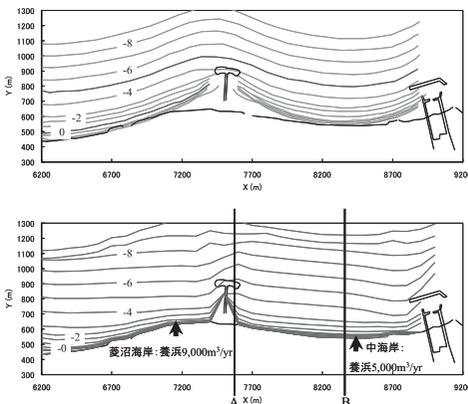


図-5 2005年の実測・計算等深線

A, Bにおける、実測と計算による縦断面形と粒度組成を図-6, 7に示す。実測縦断面形と粒度組成 (図-6) によれば、堆積域を通る測線Aは緩やかな縦断面形が形成されており、粗砂は汀線付近のみに集積し、沖は細砂で覆われている。侵食域を通る測線Bは堆積域を通る測線Aよりも勾配が急であり、全体に粗い砂の含有率が高くなっている。また、沖合の緩やかな斜面を形成している砂は測線Aと同様に細砂である。さらに、測線A, Bはいずれも沖向きに粒径が細くなる粒度組成の変化を示し、それに伴い縦断面形が次第に緩やかとなる。

計算縦断面形と粒度組成 (図-7) によれば、粗砂は主に前浜付近に集積し、沖は細砂で覆われており、また、沖向きに粒径が細くなるに伴い縦断面形が緩やかとなる実測傾向をよく再現できていることがわかる。また、堆積域 (測線A) の前浜勾配のほうが侵食域 (測線B) の前浜勾配よりも緩やかになっており、沿岸方向の粒径分級作用により地形変化も実測の傾向をよく再現できている。

次に、カラーサンドの追跡調査と同じ粒径・投入水深条件であるが、分布状況をより明確にするために投入量を $5,000\text{m}^3/\text{yr}$ と大きくした条件のもとで養浜砂の広がり予測を行った。図-8にカラーサンド投入後62日の予測結果

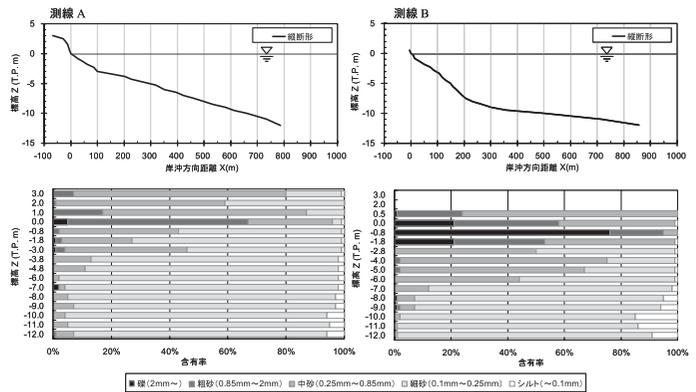


図-6 測線A, Bにおける実測縦断面形と粒度組成

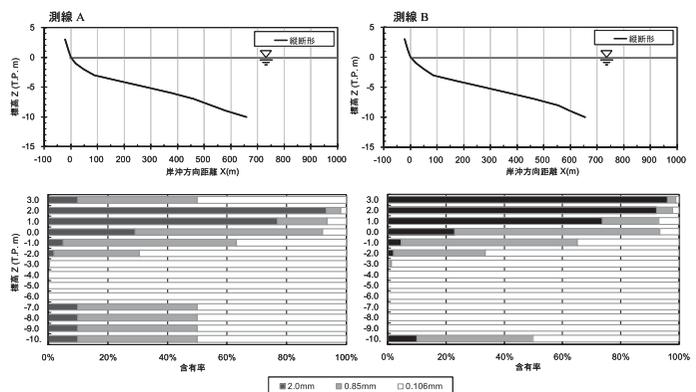


図-7 測線A, Bにおける予測縦断面形と粒度組成

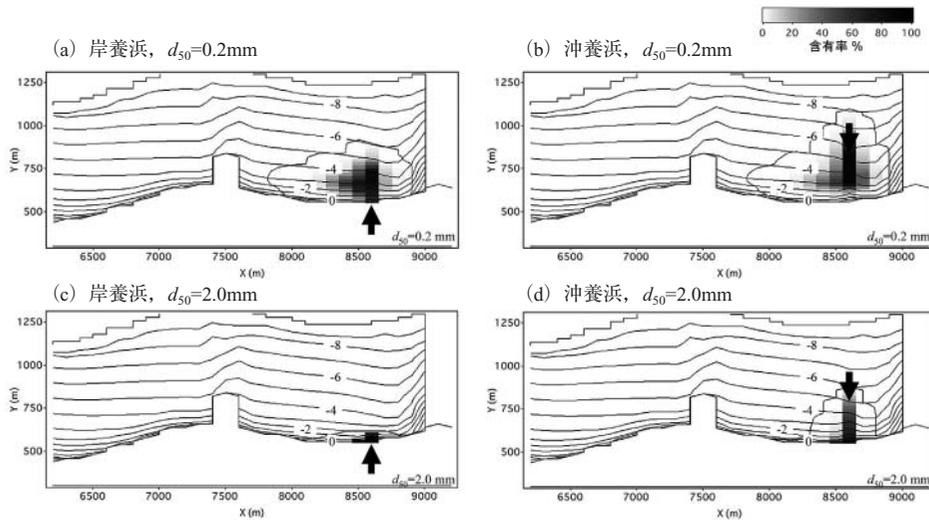


図-8 カラーサンド投入から62日後の予測結果

を示す。図-8 (a) は汀線付近に $d_{50}=0.2\text{mm}$ の砂を養浜した場合のカラーサンドの分布を示す。カラーサンドは水深-4~6m付近まで拡散しHL付近まで到達していることがわかる。図-8 (b) は水深-4mに $d_{50}=0.2\text{mm}$ の砂を養浜した場合のカラーサンドの分布を示す。図-8 (a) の汀線付近に養浜した場合と比べさらに沖の-8mまで拡散している。これは細砂の投入位置が沖であるために細砂の拡散範囲が拡大したことによると考えられる。追跡調査期間に年数回程度の波浪が4回作用したが、本計算では暴波浪を作用させていないためにどちらの予測結果も追跡調査ほどの拡散状況は再現できていない。しかし、基本的な拡散状況の傾向はよく再現されている。図-8 (c) は汀線付近に $d_{50}=2.0\text{mm}$ の砂を養浜した場合のカラーサンドの分布を示す。カラーサンドは沖に拡散することなく汀線付近に留まっており、現地実験の傾向をよく再現できている。図-8 (d) は水深-4mに $d_{50}=2.0\text{mm}$ の砂を養浜した場合のカラーサンドの分布を示す。投入されたカラーサンドは現地実験と同様に岸向きに移動し汀線付近に留まった。以上の計算結果から、野志ら (2008) のモデルは粒径が3次元的に変化する場における沖合養浜時の土砂の広がり予測にも適用可能なことが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では野志ら (2008) の地形・粒径変化予測モデルを使用し、茅ヶ崎中海岸におけるカラーサンドの追跡調査結果を再現した。計算結果から短期的な波浪を考慮すれば、野志ら (2008) のモデルが前浜養浜だけでなく沖合養浜時の投入土砂の広がり予測にも適用可能なことがわかった。これより本モデルは今後の養浜事業時に有効なツールのひとつとして使用可能と考えられる。

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・青島元次・山野 巧・吉岡 敦・三波俊郎・石川仁憲 (2007) : 神奈川県茅ヶ崎中海岸の事例にみる養浜の考え方, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1057-1062.
 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面形予測モデル, 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・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断面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・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.
 Kraus, N. C. (1985): Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol. 55, pp. 3-14.