

混合粒径砂による分級と移流拡散による 土砂投入を考慮した等深線変化モデル

N-LINE MODEL TO PREDICT MOVEMENT OF THE BEACH NOURISHED
SAND WITH MIXED GRAIN SIZES

澁谷容子¹・黒岩正光²・松原雄平³

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA and Yuhei MATSUBARA

¹学生会員 修(工) 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²正会員 博(工) 鳥取大学准教授 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工博 鳥取大学教授 大学院工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

The sand fill projects have been accepted as one of the effective beach management program. It is very important to estimate the influences of sand fill placements on shoreline changes for the long term. In the actual beach nourishment it is often that the characteristics of injected sands are different from those of local sands of eroded area. In this study, a numerical model that takes into account the effects of sand with mixed grain size was suggested. The behavior of the sand materials after beach nourishment was estimated by solving the two-dimensional advection diffusion equations. The change of content rate of each grain size was calculated by Kumada *et al.* (2006). In this paper, model tests were carried out to investigate the performance of mixed grain size sands. And the presented model was compared the experimental data in order to investigate the applicability of the model.

Key Words : Beach nourishment, N-line model, Mixed grain sand, Sorting of beach materials

1. はじめに

我が国では海岸侵食対策としてヘッドランドや離岸堤などの構造物を用いた工法が長年にわたって採用されてきたが、浸食域に直接土砂投入を行う養浜工も効果的な対策法として実施に移されるようになってきた。こうした養浜を経年的に実施する際には、投入土砂が現地海浜の長期的変化にどのように寄与しているかを見極めることが重要になる。このため、投入土砂と現地土砂が混合し移動する過程をモデル化し、養浜海浜地形の変化を予測しようとする試みが行われてきている。澁谷ら^{1),2)}はこれまで、養浜効果を予測可能な汀線変化および等深線変化モデルを提案してきた。しかし、養浜事業による土砂投入を行う場合、投入土砂と現地の砂の粒径あるいは粒度分布に違いが見られることがある。よって、混合粒径の概念を取り入れ、粒径の違いが養浜効果に及ぼす影響を検討することが非常に重要となっている。混合粒径砂による分級を考慮したモデルは、これまでもいくつか提案されている。例えば、熊田ら^{3),4)}は、平野⁵⁾の「交換層」の概念を用いた汀線変化モデルおよび等深線変化モデルを提案している。また、養浜時においても、熊田ら⁶⁾は固定床の考えに基づき土砂の吸い込みおよび湧き出し項を付加

しているが、等深線変化との相互作用は考慮されていない。養浜による侵食対策が注目されている昨今、養浜および混合粒径による分級を考慮することが必要不可欠と考える。

そこで、本研究では、熊田ら³⁾の混合粒径砂の考えをもとに、澁谷ら²⁾の等深線変化モデルに混合粒径砂を考慮しつつ養浜効果を予測可能な新たな予測モデルへと拡張することを目的とする。

2. N-Line モデルと混合粒径砂の概念

本論文では、宇多・河野⁷⁾の等深線変化モデルに、2次元移流拡散方程式を用いて土砂投入の影響を考慮し、さらに熊田ら³⁾の混合粒径の考えを導入した新たな等深線変化モデルを提案する。図-1は、地形変化計算のプロセスをフローにしたものである。なお波浪場の計算では間瀬ら⁸⁾の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。

(1) 沿岸漂砂量の計算

熊田ら³⁾は混合粒径砂の分級過程を考慮し、Kamphuis *et al.*⁹⁾にならい、粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入している。本論文では澁谷ら¹⁰⁾

と同様に、沿岸漂砂量公式として回折の影響を考慮した小笹・Brampton¹¹⁾公式を用いた。式(1)に分級過程を組み込んだ漂砂量算定式を示す。

$$Q^{(L)} = \mu^{(L)} A^{(L)} H_{bs}^2 C_{gb} \left(\hat{K}_1 \sin 2\alpha_{bs} - \hat{K}_2 \cos \alpha_{bs} \cot \beta \frac{\partial H_{bs}^2}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 C_{gb} および α_{bs} は碎波点における群速度および波向きを表す。 $\cot \beta$ は海底勾配の逆数である。 $\mu^{(L)}$ は交換層内の粒径毎の体積含有率 ($L=1..NN$)、 $A^{(L)}$ は Kamphuis *et al.*⁹⁾ による粒径に関する係数で、次式より求めた。

$$A^{(L)} = A_d / d_{50}^{(L)} \quad (2)$$

ここに、 A_d は粒径の大きさに関する係数、 $d_{50}^{(L)}$ は粒径毎の中央粒径である。

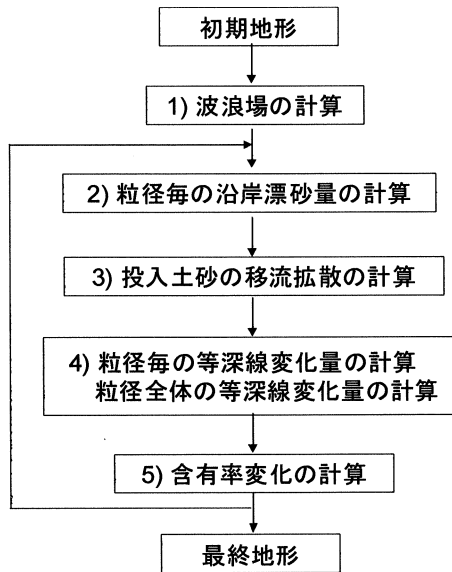


図-1 計算フロー

(2) 投入土砂の移流拡散の考慮

澁谷ら¹⁰⁾では、養浜砂は現地土砂と同一粒径を想定していた。本論文では現地土砂は混合粒径砂から成るものとし、さらに投入土砂はそれに含まれる単一粒径砂から成るものとして、投入土砂の挙動を移流拡散により算定する。つまり養浜砂は単一粒径とした上で、沿岸・岸沖方向に拡散しつつ、沿岸流と波の作用によって輸送されるものと考え、投入土砂の挙動に関する2次元移流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + C_1 U_s \frac{\partial q_n}{\partial x} + C_2 V_s \frac{\partial q_n}{\partial y} = C_3 K_x \frac{\partial^2 q_n}{\partial x^2} + C_4 K_y \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2} \quad (3)$$

ここに、 q_n は投入された土砂量(m^3)である。 U_s 、 V_s は投入土砂の岸沖・沿岸方向の移動速度、 K_x 、 K_y は投入土砂の岸沖・沿岸方向の拡散係数である。投入土砂の拡散係数は、Kuroiwa ら¹²⁾の蛍光砂による漂砂調査結果から導かれるもので澁谷ら¹⁰⁾と同様である。また、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 は粒径の大きさを考慮するための係数であり、式(1)同様 Kamphuis *et al.*⁹⁾ にならいう式で表す。

$$C_l = C_{ld} / \sqrt{dd_{50}} \quad (l=1-4) \quad (4)$$

C_{ld} は養浜砂の粒径の大きさに関する係数で、 dd_{50} は養浜砂の中央粒径である。 C_{ld} については、調査海岸の砂の中央粒径が 0.2mm の場合を基準としており、 $dd_{50}=0.2mm$ のときに C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 が 1 となるよう決定した。投入土砂の岸沖方向の移動速度 V_s は、灘岡ら¹³⁾より $V_s=0.01V$ とし、 V は沿岸流速で、Inman・Quinn¹⁴⁾より求めた。岸沖方向の移動速度 U_s は、底面水粒子速度の最大値の関数として以下で与える。

$$U_s = U_A \times U \quad (5)$$

ここに、 U_A は移動方向を考慮した投入土砂の移動速度に関する漂砂量係数で、移動方向は、砂村¹⁵⁾のアーセル数 (図-2) により判断した。図中の横軸はアーセル数 $U_r = HL^2/h^3$ 、縦軸は $\psi' = (d_0 \sigma)^2 / sgd$ で定義される軌道流強度を与える無次元パラメータである。 d_0 は水粒子軌道長径、 σ は角周波数、 d は底質粒径、 s は底質の水中比重である。図-2 より $U_r \leq 50$ の領域では、岸向き漂砂は存在せず、 $\psi' \geq 17$ で沖向き漂砂となることがわかる。一方、 $U_r > 50$ の領域では $\psi' = 0.048 U_r^{1.5}$ の直線を境にして漂砂の移動方向が変わる。すなわち $17 \leq \psi' \leq 0.048 U_r^{1.5}$ では岸向き、 $\psi' \geq 0.048 U_r^{1.5}$ では沖向きである。また、 U は底面水粒子速度の最大値であり以下に示す。

$$U = \frac{\pi H_{sh}}{T_s} \frac{1}{\sinh kh} \quad (6)$$

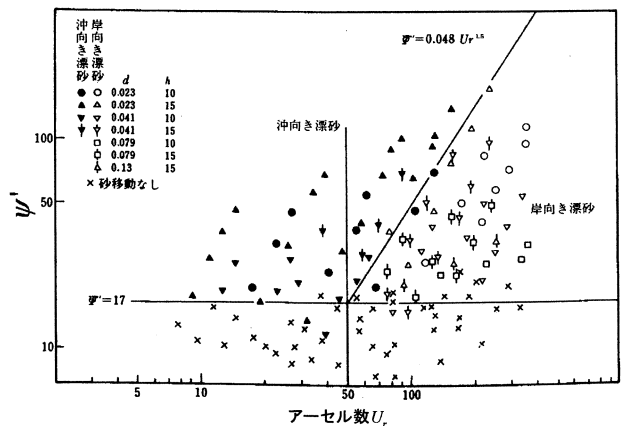


図-2 漂砂の方向 (砂村, 1982)

ここに、 H_{sh} は水深 h に対する有義波高、 T_s は有義波周期、 k は波数である。

(3) 等深線変化の計算

粒径毎の等深線変化量は、土砂量保存則により次式で表されるが、等深線の算定において移流拡散方程式による供給土砂の効果が考慮されている点に注意が必要である。

$$\frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} + \frac{1}{h_m} \left(\frac{\partial Q_m^{(L)}}{\partial y} - q^{(L)} \right) = 0 \quad \begin{matrix} (m=1 \dots N) \\ (L=1 \dots NN) \end{matrix} \quad (7)$$

ここに、 m は等深線番号、 N は等深線の本数、 NN は粒径数である。 $y_m^{(L)}$ は m 番目の粒径毎の等深線位置(m)、 h_m は m 番目の等深線における砂の移動高さ(m)、 $Q_m^{(L)}$ は m 番目の粒径毎の等深線の沿岸漂砂量(m^3/s)であり、宇多・河野⁷⁾の沿岸漂砂量の水深方向分布 $\xi(z)$ を用い、次式で求める。

$$Q_m^{(L)} = \varepsilon_m Q^{(L)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_m = \int_{z_m}^{z_{m+1}} \xi(z) dz / \int_{h_c}^{h_R} \xi(z) dz \quad (9)$$

ここに、 z は静水面を基準とした鉛直上方距離、 h_R は陸上部において波による土砂移動が生じる限界高さ、 h_c は沖側の移動限界水深である。

また、 $q^{(L)}$ は式(3)より得られた養浜土砂による寄与分であり、養浜砂の粒径と、計算する等深線の粒径が等しい時に付加される。しかし、式(3)中の q_n は体積量[L³]であり、式(7)中の $q^{(L)}$ は単位時間、単位長さ当たりの土砂量[L²/T]であるため、以下の関係を適用する。

$$q^{(L)} = K_p q_n \quad (10)$$

$$K_p = 1/(\Delta t \cdot \Delta y) \quad (11)$$

ここに、 Δt は計算時間間隔、 Δy は格子間隔である。全粒径の等深線変化量 Y_m は粒径毎の変化量を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y_m}{\partial t} = \sum_{L=1}^{NN} \frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} \quad \begin{matrix} (m=1 \dots N) \\ (L=1 \dots NN) \end{matrix} \quad (12)$$

(4) 含有率変化の計算

粒径の分級作用を考慮するため、交換層内での粒径毎の体積含有率を計算する。熊田ら³⁾の粒径毎の土砂収支式を用い、堆積域では

$$\frac{\partial \mu^{(L)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial Y_m^{(L)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_m}{\partial t} \cdot \mu^{(L)} \right\} \quad (L=1 \dots NN) \quad (13)$$

侵食域では

$$\frac{\partial \mu^{(L)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_m}{\partial t} \cdot \mu_B^{(L)} \right\} \quad (L=1 \dots NN) \quad (14)$$

より算定する。ここに、 $\mu_B^{(L)}$ は地形変化が起こる前の含有率であり、ここでは初期含有率とする。また、 B は交換層幅である。

3. モデルの検証

(1) モデル海岸への適用

モデルの基本特性を確認するため、図-3のように、沿岸方向2000m、岸沖方向1000m、初期勾配1/50、両端を突堤に囲まれたモデル海岸への適用を行った。波を斜め入射させ、流れの上手側で侵食、下手側で堆積する状態を想定している。底質は中央粒径0.2mmと0.4mmの2粒径を1:1の割合で混合した。計算条件ならびに各係数を表-1に示す。

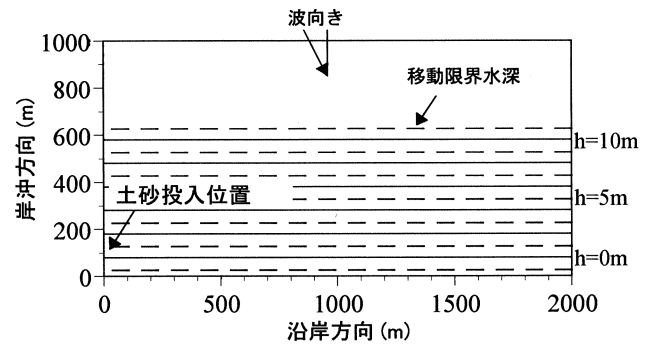


図-3 初期地形 (モデル海岸)

表-1 計算条件

H_s (m)	T_s (s)	A_d ($m^{0.5}$)	α ($^\circ$)	d_{50} (mm)
1.20	7.0	0.016	5.0	0.2, 0.4
K_1	K_2	Vs (m/s)	Kx (m^2/s)	Ky (m^2/s)
0.2	0.324	0.00123	0.00057	0.0023
U_s (m/s)	C_{id}	B (m)		
-0.023	0.014	5		

図-4は土砂投入を行わずに計算を行った1年後の等深線変化ならびに粒径分布の計算結果である。図-4(a)より、波を斜め入射させたことで、流れの上手側で侵食、下手側で堆積している様子が確認できる。また図-4(b)より、侵食域では細粒分が流出し中央粒径が粗くなり、堆積域では逆に細粒化し、分級が起きている様子がわかる。

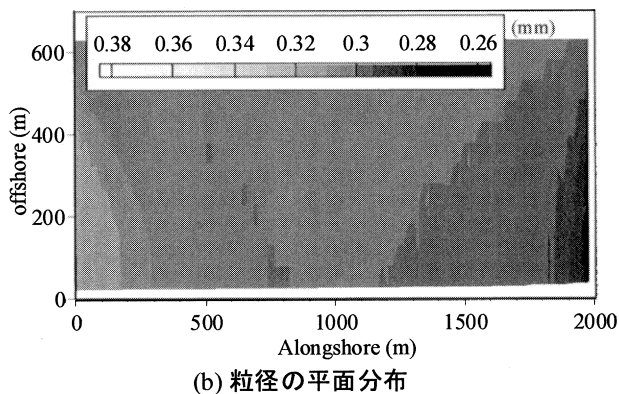
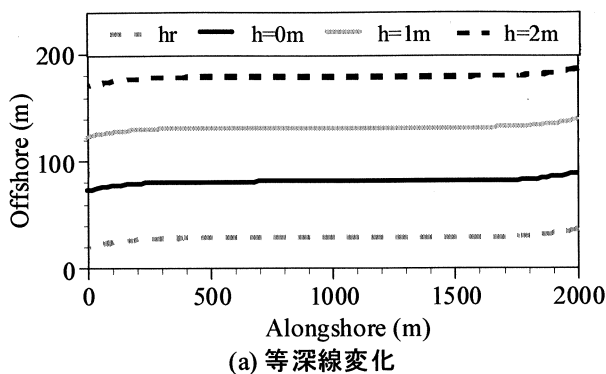


図-4 1年後の計算結果（養浜なし）

次に、同様のモデル地形において、中央粒径 0.4mm の砂を5日間で $20,000\text{m}^3$ 投入した結果が、図-5 である。養浜を行った場合、土砂投入付近において、等深線が前進し、中央粒径が粗くなっている。このことは、投入した土砂が、投入付近に留まり等深線の前進に寄与したことを示している。図-6 は投入土砂の移流拡散の様子である。図中の凡例は単位幅当たりに換算した土砂量を示す。同図より、投入された土砂は時間の経過とともに拡散すること、土砂量のピークが複数見られる連続投入の状況を示していることなどがわかる。また、図-7(a)および(b)は中央粒径 0.2mm の砂を5日間で $20,000\text{m}^3$ 投入した結果である。等深線の前進量はごく僅かであり、投入された土砂は沿岸流と波の作用により流され、等深線変化にほとんど寄与していないことがわかる。

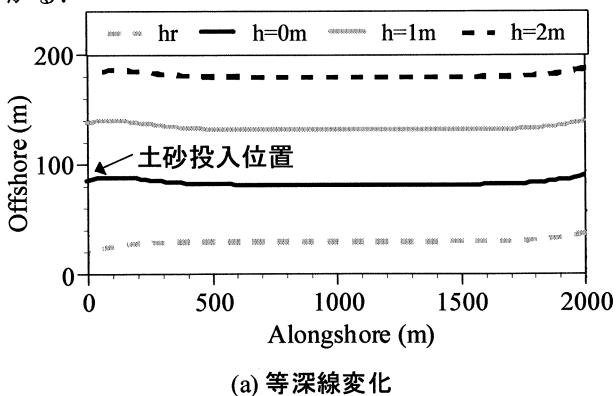


図-5 1年後の計算結果（養浜砂 0.4mm）

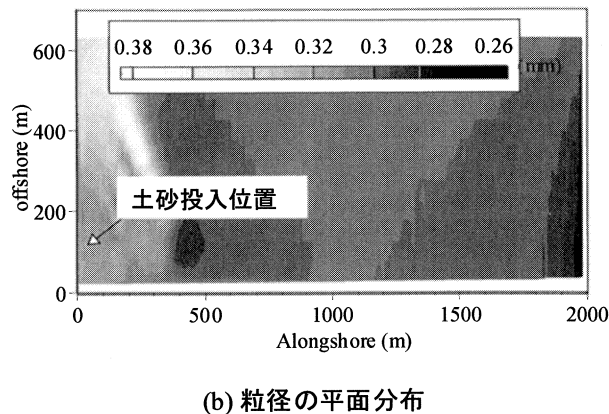


図-5 続き 1年後の計算結果（養浜砂 0.4mm）

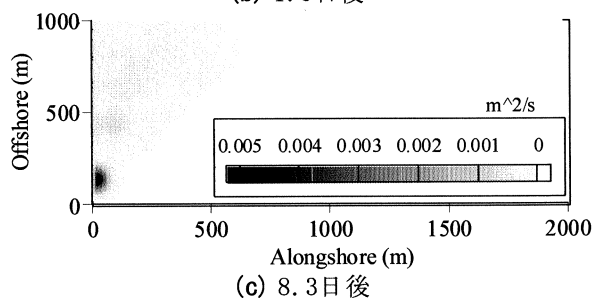
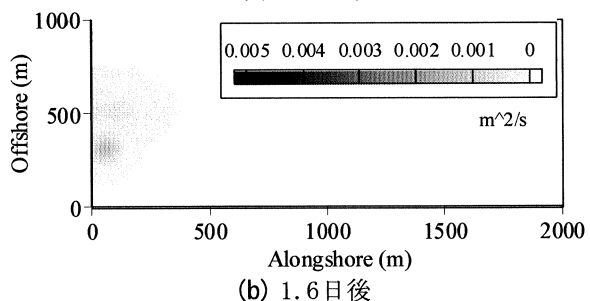
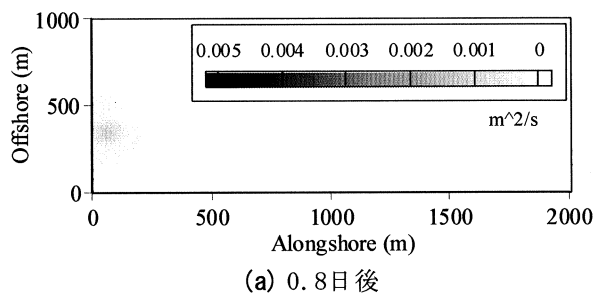


図-6 投入土砂の移流拡散の様子

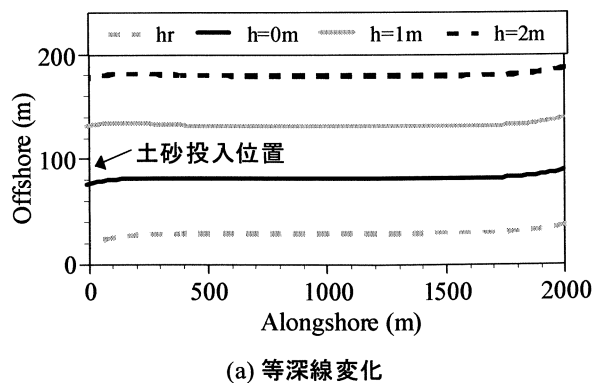
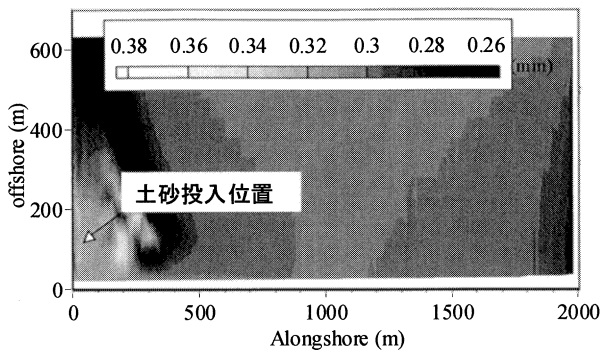


図-7 1年後の計算結果（養浜砂 0.2mm）



(b) 粒径の平面分布

図-7 続き 1年後の計算結果 (養浜砂 0.2mm)

(2) 移動床模型実験への適用

本モデルの適用性を検証するため、沿岸漂砂が卓越する場における熊田ら¹⁶⁾の移動床模型実験結果と比較した。実験では、幅 4 m、海浜勾配 1/10 の直線状海岸を混合砂 (0.2mm の細砂と 2.0mm の粗砂を 1 : 1 で混合) で造り、碎波波向き 10° の沿岸漂砂を発生させるため、波の入射方向に対して海岸線を 18° 傾けて整形している。入射波は波高 4.0cm、周期 0.8s の規則波を用い、作用時間は、地形がほぼ平衡状態に至る 10 時間としている。計算に用いた波浪条件ならびに各係数を表-2 に示す。

表-2 計算条件

$H_s(\text{cm})$	$T_s(\text{s})$	$A_d(\text{m}^{0.5})$	$\alpha(^{\circ})$	$\tan \theta$
4.0	0.8	0.2	0	1/10
K_1	K_2	$B(\text{cm})$	$d_{50}(\text{mm})$	
0.2	0.324	30	0.2, 2.0	

図-8 は、計算開始時の初期等深線ならびに 10 時間後における等深線の計算結果を示している。標高 4cm から水深 6cm 付近の等深線に変化が見られることから、図-9 に、標高 8cm から水深 12cm までを抽出し実験結果と比較した。実験では、初期状態では互いに平行であった等深線が、標高 4cm から水深 6cm あたりにかけて等深線間隔が広がっており、地形変化が生じていること、実験結果とほぼ一致した傾向となっていることがわかる。

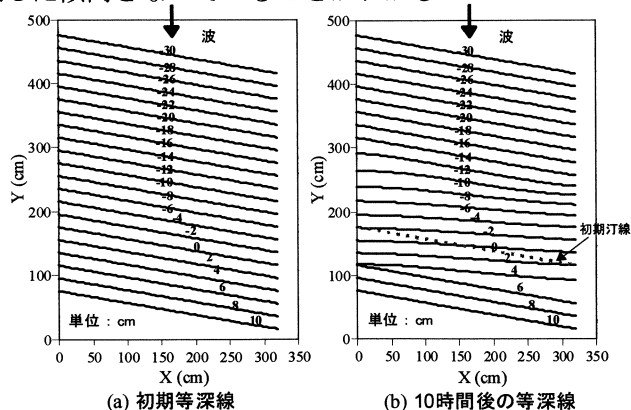


図-8 初期等深線と 10 時間後の等深線の計算結果

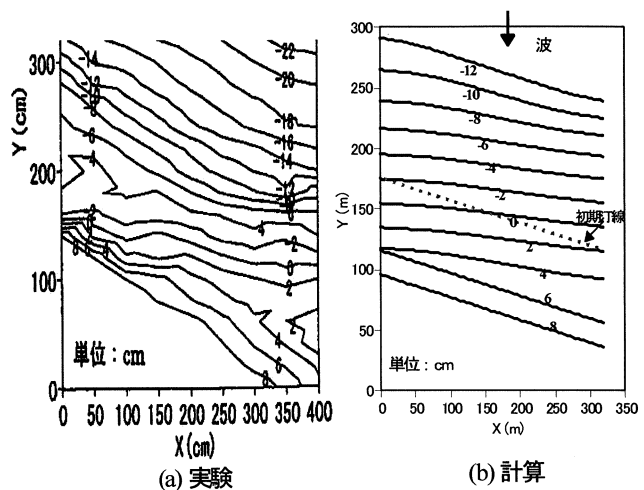


図-9 10 時間後等深線の検証

図-10 は、侵食域である $X=50\text{cm}$ と堆積域である $X=350\text{cm}$ 断面における中央粒径の岸沖分布の計算結果と実験結果を比較したものである。図-10(a) より、水深の深い領域および陸域では初期状態での中央粒径 $d_{50}=1.1\text{mm}$ (0.2mm の細砂と 2.0mm の粗砂を 1 : 1 で混合したため) が保持されていること、土砂移動が活発な $80 < y < 240$ の水深帯では、粒径の粗粒化が生じていることが計算結果からわかる。実験結果においても、ばらつきはあるものの、ほぼ同様の傾向が認められる。一方、堆積断面である図-10(b) では、水深の深い領域および陸域ではほとんど粒径の変化はみられないが、土砂移動域において粒径が細粒化することが計算結果から認められる。実験結果と比較すると $y=100\text{m}$ および 200m 付近でやや差異はあるものの、土砂が堆積する領域の細粒化という傾向が再現されている。

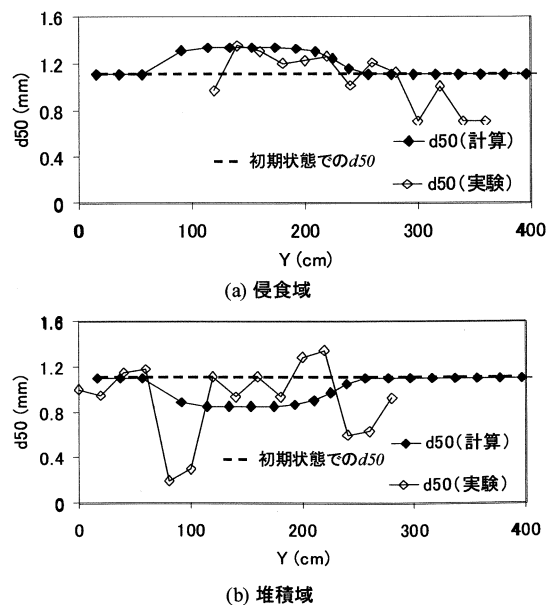


図-10 10 時間後の粒径の岸沖分布

熊田ら¹⁵⁾は、実験から、粗砂分によるアーミング効果が地形変化過程に影響することを述べている。今回の計算結果と実験結果との違いは、これらを考慮していないこと、および岸沖漂砂が考慮されていないことによるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、混合粒径を考慮した養浜効果を予測可能な等深線変化モデルを提案した。モデル海岸での計算より、侵食域での粗粒化および堆積域での細粒化が確認できた。さらに、計算条件内の粒径では、粒径の大きな砂を養浜に用いた方が効果的であり、投入土砂が投入地点付近に留まり、等深線の回復に寄与することがわかった。また熊田ら¹⁶⁾の実験結果との比較により、本モデルは実験結果をよく再現しており、モデルの適用性が確認できた。

今後、更なるケーススタディーを重ね各係数を同定するとともに、現地データとの比較を行いモデルの妥当性を検証必要がある。

謝辞：本研究では波浪場の計算において、間瀬ら⁷⁾の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を参考にさせていただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 澁谷容子，黒岩正光，松原雄平：養浜土砂の移流拡散を考慮した汀線変化予測モデルに関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp. 646-650，2007。
- 2) 澁谷容子，黒岩正光，松原雄平：養浜土砂の移流拡散を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp. 761-765，2008。
- 3) 熊田貴之，小林昭男，宇多高明，芹沢真澄，星上幸良，増田光一：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. 476-480，2002。
- 4) 熊田貴之，小林昭男，宇多高明，芹沢真澄：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，海岸工学論文集，第50巻，pp. 481-485，2003。
- 5) 平野宗夫：Armoringをともなう河床低下について，土木学会論文集，第195号，pp. 56-65，1971。
- 6) 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・粒径変化の予測法，海洋開発論文集，第21巻，pp. 1029-1034，2005。
- 7) 宇多高明，河野茂樹：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，No539/II-35，pp. 121-139，1996。
- 8) 間瀬肇，高山知司，国富将嗣，三島豊秋：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第628号，II-48，pp. 177-187，1999。
- 9) Kamphuis, J. W.H.Devies, R.B.Narin and O.J.Syao: Calculation of littoral sand transport rate, Coastal Engineering, Vol.10, pp.1-12, 1986。
- 10) 澁谷容子，黒岩正光，松原雄平：移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究，海洋開発論文集，第24巻，pp. 1249-1254。
- 11) 小笹博昭，A.H.Brampton：護岸のある海浜のてい線変化計算，港湾技術研究所報告，第18巻，第4号，pp. 77-104，1980。考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第628号，II-48，pp. 177-187，1999。
- 12) Kuroiwa,M. and H.Moda.: Field investigation of sand drift using fluorescent tracer, proceedings of the international symposium: waves-phsical and numerical modeling, pp.1483-1490,1994。
- 13) 灘岡和夫，田中則男，加藤一正：蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的移動の観測，港湾技術研究所報告第20巻，第2号，pp. 75-126。1981。
- 14) Inman, D.L. and W.H.Quinn: Currents in the surf zone, Proc, 2nd Conf. on Coastal Engineering, 1951。
- 15) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究，第29回海岸工学論文集，pp. 239-243，1982。
- 16) 熊田貴之，小林昭男，酒井和也，柴崎誠，宇多高明，芹沢真澄：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. 905-910，2003。