

# 波の遮蔽域形成に伴う 3次元地形・粒径変化の予測法

A MODEL FOR PREDICTING THREE-DIMENSIONAL BEACH CHANGES AND  
GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF BED MATERIALS  
AROUND WAVE SHADOW ZONE

熊田貴之<sup>1</sup>・宇多高明<sup>2</sup>・芹沢真澄<sup>3</sup>・三浦正寛<sup>4</sup>

Takayuki KUMADA, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA and Masahiro MIURA

<sup>1</sup>正会員 博(工) (株)水圏科学コンサルタント 技術部

(〒145-0064 東京都大田区上池台1-14-1 明伸ビル)

<sup>2</sup>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

(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

<sup>3</sup>正会員 海岸研究室(有)(〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ロイヤル若葉208)

<sup>4</sup>正会員 修(工) (株)水域ネットワーク(〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-16-7 第2白子ビル302)

A model for predicting not only three-dimensional beach changes but also grain size distribution of bed materials was developed by applying the contour line change model. In this model, selective movement of fine and coarse sediments is taken into account, while assuming an equilibrium beach slope. The model was applied to the beach changes around Shimohara fishing port in Chiba Prefecture. Predicted contents of several grain sizes well agreed with measured values.

**Key Words :** Contour line change model, grain size, equilibrium slope, Shimohara fishing port, sand recycling

## 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。現地海岸において、とくに顕著な粒径分級が見られるケースとして、漁港・港湾防波堤の建設に伴って形成される波の遮蔽域内における細粒底質の選択的堆積と、周辺海岸における底質粗粒化が挙げられる。これは結果として周辺海域の生態系へ大きな影響を及ぼす可能性がある。この種の問題に関して、酒井ら<sup>1)</sup>は離岸堤設置下における汀線に沿った粒度組成変化の予測モデルを開発し、さらに熊田ら<sup>2)</sup>は、粒度組成の平面変化を考慮した等深線変化モデルを開発した。しかし、いずれのモデルも波の遮蔽域内外での粒度組成の平面変化を十分な精度で予測するまでには至っていない。そこで、本研究では、防波堤による波の遮蔽域周辺での3次元海浜変形のみならず、粒度組成の平面変化も予測可能な海浜変形モデルを開発する。

## 2. モデルの基本構成

### (1) 粒径毎の漂砂量式

熊田ら<sup>2)</sup>の粒径毎の沿岸漂砂量式はCERC型であるため、波の遮蔽域内での回折に伴う碎波波高の変化を考慮した漂砂量が計算できない。したがって、防波堤による波の遮蔽域内の地形変化と、付随する粒径変化の計算を可能とするために、熊田ら<sup>2)</sup>のモデルに小笹・Brampton項を付加して拡張した(式(1))。本計算においては、急・緩勾配斜面の構成材料である粗・細粒径集団を1つの集団として代表させ単純化した。したがって、式中では粒径集団( $NI$ グループ,  $i=1, 2, \dots, NI$ )の表示はしていない。

$$q_s^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_s(z) \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cdot \left( \cos \alpha_{bs} \sin \alpha_{bs} - \xi \frac{1}{\tan \beta} \cdot \cos \alpha_{bs} \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad (1)$$

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

ここに、 $x$ は沿岸方向座標、 $z$ は等深線の地盤高、 $q_x^{(k)}$ は粒径毎（ $N$ 粒径）の沿岸漂砂量（ $k=1, 2, \dots, N$ ）、 $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎の含有率、 $\varepsilon_x(z)$ は宇多・河野<sup>3)</sup>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ようにした。また $\xi = K_2^{(k)}/K_1^{(k)}$ とし、 $\xi$ も $A$ 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 $K_1^{(k)}$ の関数となる。 $\alpha_{bs}$ は砕波点の波峰線が等深線となす角、 $\tan \beta$ は海底勾配、 $H_b$ は砕波波高である。

粒径毎の岸沖漂砂量式は、熊田ら<sup>2)</sup>を適用すると防波堤による波の遮蔽域内外での地形・粒径の計算において空間的な振動が発生した。そこでこの原因を検討したところ、熊田ら<sup>2)</sup>の式(3)の $(\cot \beta / \cot \bar{\beta}_c^{(i)} - 1)$ が毎ステップ、交換層内の粒度組成 $\mu^{(i,k)}$ に応じた平衡勾配 $\cot \bar{\beta}_c^{(i)}$ になろうとする原理自体に問題があることを突き止めた。

$$q_z^{(i,k)} = \mu^{(i,k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta}_c^{(i)} \cdot (\cot \beta / \cot \bar{\beta}_c^{(i)} - 1) \quad (3)$$

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

ここに、 $\varepsilon_z(z)$ は $\varepsilon_x(z)$ 同様、漂砂量の水深方向分布関数、 $\beta$ は等深線毎の勾配角、 $\gamma$ 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示す。 $\bar{\beta}_c^{(i)}$ は野志ら<sup>4)</sup>の提案する粒度組成に応じた平衡勾配角を示す。

そこで、式(3)を応用し次式とすることで、適切な等深線変化の計算に成功した。

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

具体的には、式(3)の $\bar{\beta}_c^{(i)}$ の粒度組成に応じた平衡勾配角を設定すると地形・粒径値の振動が起こるので、計算で安定性の良い芹沢ら<sup>6)</sup>の等深線変化モデルと同様、1つの平衡勾配角 $\beta_c$ のみを仮定した。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、式(3)では値が振動することを考慮し、対象海岸の平均的な海底勾配を1つ定め、それを平衡勾配角 $\beta_c$ とした。その場合、個々の粒径の動き易さは粒径に依存するという考え方はそのまま適用した。

## (2) 粒径毎の土砂量保存則

粒径毎の等深線変化量 $y^{(k)}$ は各等深線につき粒径毎の土砂量保存則（連続式）により次式で算定する。

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

ここに、 $q_i^{(k)}$ は単位幅かつ単位深さあたりの粒径毎の系外からの土砂流入量を示し、土砂の吸い込み（浚渫）と湧き出し（養浜）境界として用いる。

混合粒径（全粒径）に応じた等深線変化量 $Y$ は等深線毎に粒径毎の等深線変化量 $y^{(k)}$ を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} \quad (6)$$

## (3) 粒径毎の含有率変化の計算式

等深線毎の交換層内での粒径毎の含有率算定は、熊田ら<sup>5)</sup>の交換層内での粒径毎の土砂収支式を使用した。すなわち、堆積時での新たな粒径毎の含有率の計算式は次式となる。

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

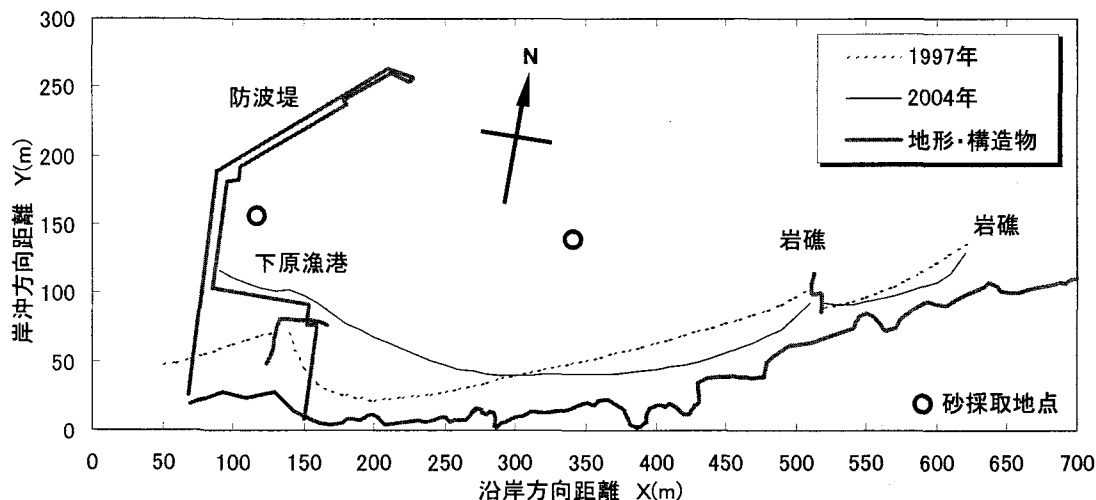


図-1 下原漁港周辺の海浜形状

侵食時での新たな粒径毎の含有率は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right\} \tag{8}$$

ここに、 $\mu_B^{(k)}$  は等深線変化前の交換層より岸側位置の含有率を示す。交換層幅 $B$ はKraus<sup>7)</sup>を参考に算出する。本モデルにおいては全等深線で交換層幅 $B$ は一定とし、時間経過によらないとする。

3. モデルの検証

(1) 計算条件

本モデルを千葉県下原漁港周辺の海浜変形に適用した。図-1に、下原漁港周辺の1997年（漁港建設前）と2004年（漁港建設後）の海浜形状を示す。当海岸では、漁港の防波堤が伸ばされたために、隣接海岸の海浜材料のうち細粒分が漁港内に多く堆積し、海岸線は約50m前進した。一方、波の遮蔽域外の海岸線は約20m後退しつつ粗粒化した。詳細な海浜変形は星上ら<sup>8)</sup>に詳しい。計算条件は、表-1に示すように初期海底勾配・平衡勾配ともに1/50、作用波浪は $H_b=1\text{m}$ 、バーム高は $h_R=1.5\text{m}$ 、波による地形変化の限界水深は $h_c=4.5\text{m}$ 、粒径は0.075, 0.25, 0.85mmとし、初期構成比は現地の2地点の平均とした（図-1参照）。詳細な条件は表-1のようである。

計算は4ケースからなる。ケース1は2004年地形・粒径の再現、ケース2は2020年の将来予測であり、現況のまま放置した場合を想定している。ケース3では航路埋没防止策としての航路浚渫を想定し、漁港内に堆積した砂を毎年1万 $\text{m}^3$ 浚渫した場合における2020年時点の将来予測を行った。浚渫は $X=105\text{m}$ 線上の水深が-1~-3m範囲で行うとし、計算では式(5)の $q_s^{(k)}$ で砂の吸い込みを設定した。ケース4は、ケース3のようにして浚渫された砂を養浜（毎年1万 $\text{m}^3$ ）に再利用した場合の2020年時点での将来予測である。養浜は $X=555\text{m}$ 線上の汀線位置で行い、計算では式(5)の $q_s^{(k)}$ で砂の湧き出し（養浜）を考慮した。

(2) 千葉県下原海岸への適用

a) 2004年地形の再現（ケース1）

ケース1の等深線予測の結果と実測汀線を図-2に示す。岩礁を境にした汀線の左右不連続と、岩礁左側での汀線前進・後退は計算と実測値とほぼ一致している。岩礁での不連続な汀線は、岩礁が漂砂の障害物となるためであり、計算はこの状況をほぼ再現できている。

図-3は、図-2に対応する平均粒径<sup>9)</sup>の平面分布である。漁港内では細粒分が選択的に多く堆積し、波の遮蔽域外では細粒分が流出するため粗粒化するという結果が得ら

表-1 計算条件

|                   |                                                                                                                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算ケース             | ・ ケース1：2004年の地形・粒径再現<br>・ ケース2：放置した場合の2020年の地形・粒径予測<br>・ ケース3：漁港内の砂を毎年1万 $\text{m}^3$ 浚渫した場合の2020年の地形・粒径予測<br>・ ケース4：ケース3の浚渫した砂を養浜（毎年1万 $\text{m}^3$ ）に再利用した場合の2020年の地形・粒径予測 |
| 初期地形              | ・ 展開座標を使用し現地地形を直線平行等深線にモデル化（縦断勾配1/50）                                                                                                                                        |
| 初期粒径              | 細砂・シルト分（0.075mm：32.5%）<br>中砂（0.25mm：54%）<br>粗砂（0.85mm：13.5%）                                                                                                                 |
| 平衡勾配              | $\tan \beta_c=1/50$                                                                                                                                                          |
| 交換層の幅             | $B=1.35\text{m}$                                                                                                                                                             |
| 入射波条件             | ・ 碎波波高 $H_b=1\text{m}$<br>・ 碎波波向 $\alpha_b=0^\circ$<br>・ 潮位条件 M.S.L. 0.0m                                                                                                    |
| 地形変化の水深範囲         | ・ 地形変化の限界水深 $h_c=4.5\text{m}$<br>・ バーム高 $h_R=1.5\text{m}$                                                                                                                    |
| 境界条件              | ・ 浚渫境界：1万 $\text{m}^3$ /年の吸い込み境界設定。<br>・ 養浜境界：1万 $\text{m}^3$ /年（細砂）の湧き出し境界設定。                                                                                               |
| 漂砂量係数             | ・ 漂砂量係数内の $A=0.3$<br>・ 小値プランプトン項の係数 $\zeta=1.5$<br>・ 岸沖・沿岸漂砂量係数比 $\gamma=0.2$                                                                                                |
| 漂砂量の水深分布          | 宇多・河野（1996）の3次式                                                                                                                                                              |
| 土砂落ち込みの限界勾配       | 陸上：1/2, 水中：1/3                                                                                                                                                               |
| 計算範囲              | 沿岸方向：500m<br>鉛直方向： $z=5\text{m}\sim-10\text{m}$                                                                                                                              |
| 計算メッシュ            | 沿岸方向 $\Delta x=10\text{m}$ 、鉛直方向 $\Delta z=1\text{m}$                                                                                                                        |
| 計算時間間隔 $\Delta t$ | $\Delta t=0.1\text{hr}$                                                                                                                                                      |
| 計算ステップ数           | 10,000steps                                                                                                                                                                  |
| 数値計算法             | 陽解法による差分法                                                                                                                                                                    |
| その他               | 波浪場の計算法：方向分散法                                                                                                                                                                |

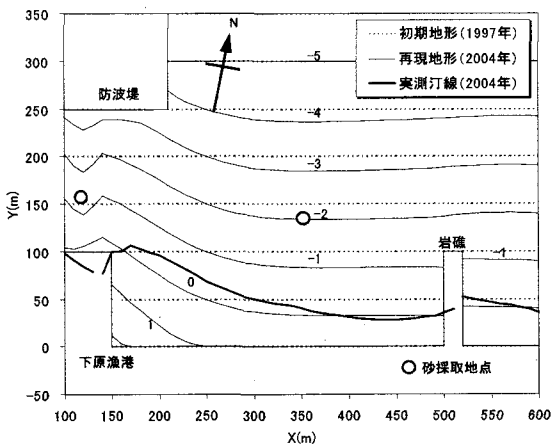


図-2 等深線の計算結果（ケース1）と実測汀線との比較

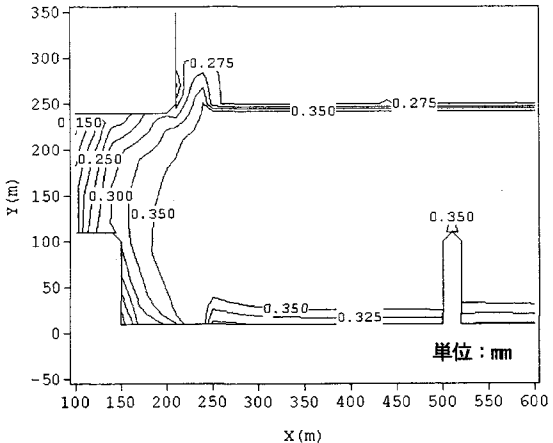


図-3 平均粒径の平面分布（ケース1）

れた。図-4は、初期粒径との差の平面分布である。実線で囲まれた区域は粗粒化域を、破線区域は細粒化域を示す。図-3と同様、初期と比べて漁港内での細粒化、波の遮蔽域外での粗粒化が顕著に現れており、広範囲で粗粒化したことが分かる。計算に対応する詳細な粒径分布は実測値として得られてはいないが、この結果は従来から言われてきている「防波堤など波の遮蔽域内では細粒分が主に堆積する」という知見とよく一致している。図-5は、図-1に○印で示す位置における実測と計算の粒度組成の比較図である。漁港内では細砂・中砂がほとんどを占め、遮蔽域外では約25%の粗砂を含む実測値を計算は良く再現しており、計算精度の高さが確認できる。

**b) 現況のまま放置した場合の2020年の将来予測（ケース2）**

現況のまま放置した場合の2020年の等深線の予測結果を図-6に示す。漁港から離れた区域の侵食域では汀線が約20m後退し、これと対照的に漁港内では100m近く汀線が前進するという結果となった。すなわち現在の海底地形はまだ変形中であり、今後さらに変形が起こることが予測された。

図-7には図-6に対応する平均粒径の平面分布を示す。前ケース同様、漁港内では細粒分が多く堆積し、波の遮蔽域外では粗粒化した。図-8は、2004年再現（ケース1）との粒径の差の平面分布である。侵食域では汀線付近が粗粒化し、堆積域では次々と細粒分が沿岸漂砂に

よって運び込まれるために汀線付近で細粒化が進んでいる。これに対し堆積域の沖合では粗粒化域が見られる。沖側では2004年の段階で細粒分が多く堆積して堆積層が形成されたが、その後その近傍の海底が砂の供給源になって侵食されたために、そこでは粗粒化が進んだと考えられる。

**c) 港内の砂を毎年1万<sup>3</sup>浚渫した場合の2020年の将来予測（ケース3）**

航路浚渫を想定し漁港内の砂を毎年1万<sup>3</sup>浚渫した場合の2020年の等深線予測結果を図-9に示す。2004年から2020年の16年間砂を浚渫しているの、合計16万<sup>3</sup>

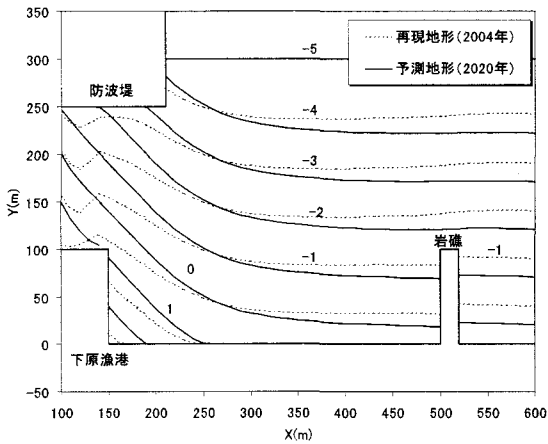


図-6 2020年の等深線形状予測（ケース2）

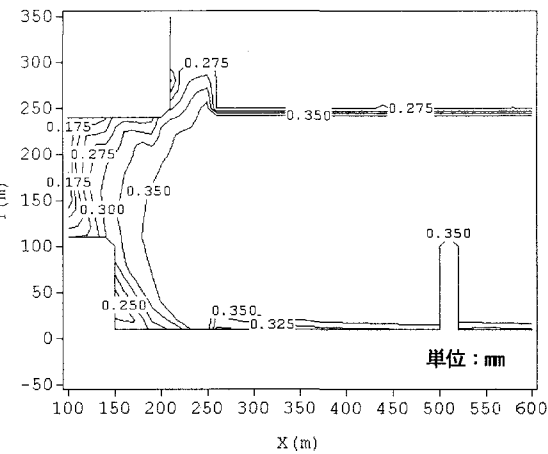


図-7 2020年の平均粒径の予測（ケース2）

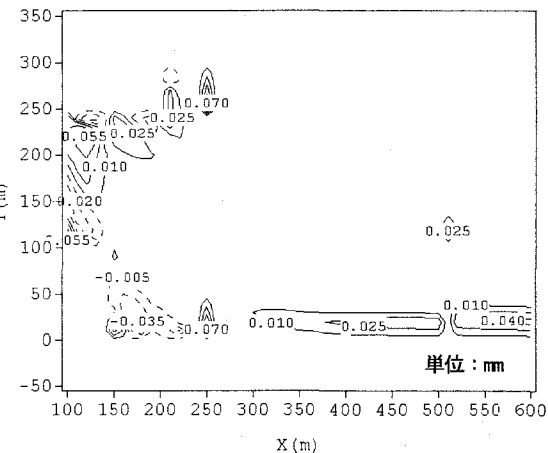


図-8 ケース1と2の平均粒径の差

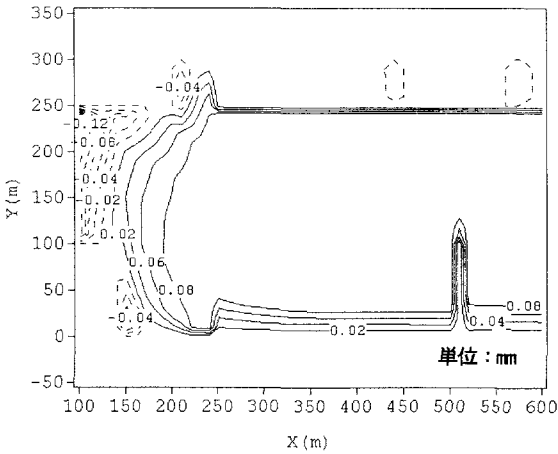


図-4 初期値とケース1の平均粒径の差

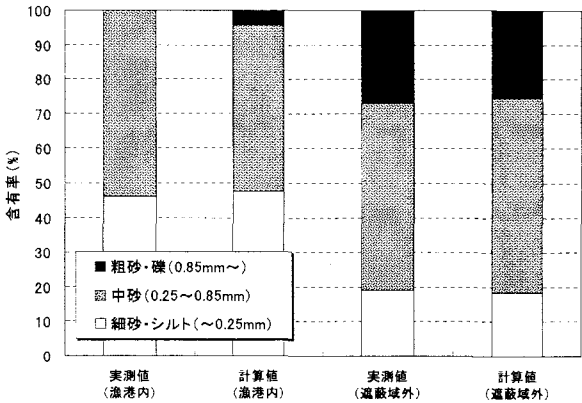


図-5 実測と計算（ケース1）の粒度組成の比較

の砂を浚渫したことになる。これによれば、漁港内での等深線が現況のまま放置したケース2と比較して約30m後退している。等深線の後退は、その原理から考えて時間経過とともに東側へと伝播していくと考えられる。

図-10には、図-9に対応する平均粒径の平面分布を示す。図-7に示したケース2の結果と比較すると、漁港内で若干の粗粒化が見られるが分かりにくい。そこで図-11にはケース2の平均粒径との差を算出し、その平面分布を示した。漁港による波の遮蔽域内で粗粒化が進んでいることが明らかである。すなわち、継続的な航路浚渫によれば隣接海岸の細粒分が次第に失われ、海岸の粗粒化を促進することが分かる。

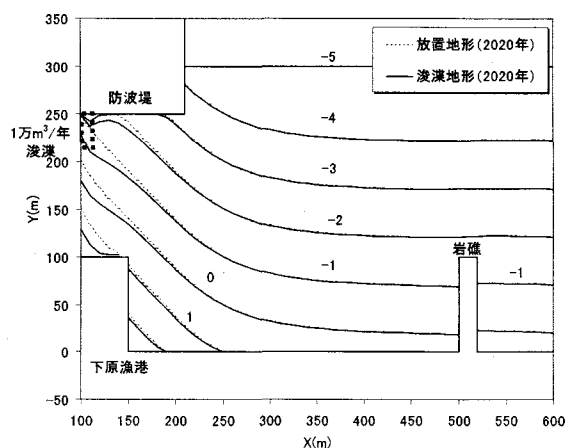


図-9 2020年の等深線形状予測 (ケース3)

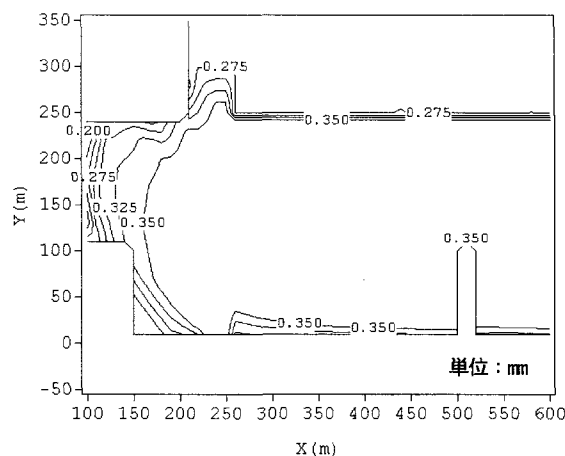


図-10 2020年の平均粒径の予測 (ケース3)

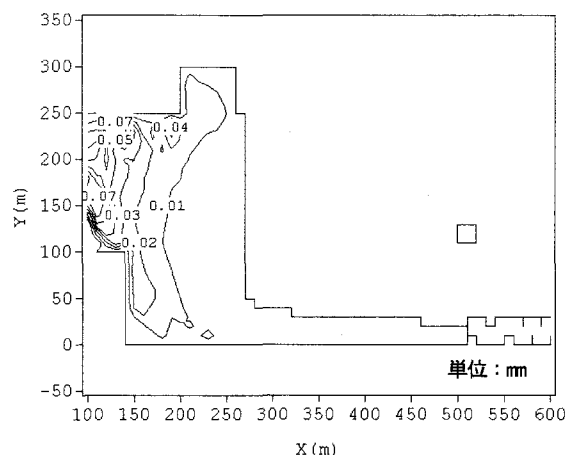


図-11 ケース2と3の平均粒径の差

#### d) 毎年1万m³のサンドリサイクルを行った場合の2020年の将来予測 (ケース4)

ケース3のようにして浚渫した砂を養浜 (毎年1万m³) に再利用した場合の2020年の等深線予測結果を図-12に示す。浚渫箇所付近では、現況のまま放置したケースと比較して依然として等深線は後退したままであるが、養浜箇所付近では等深線が沖方向に若干前進しており、全体として海浜形状は動的平衡状態に至る。

図-13には図-12に対応する平均粒径の平面分布を示す。養浜箇所から細粒分が流入し、それが緩やかに防波堤背後方向へと戻る。このため全域で細粒化しつつある。図-14には、ケース2の平均粒径の分布との差の平面分布を示すが、全域で細粒化するという結果が得られた。

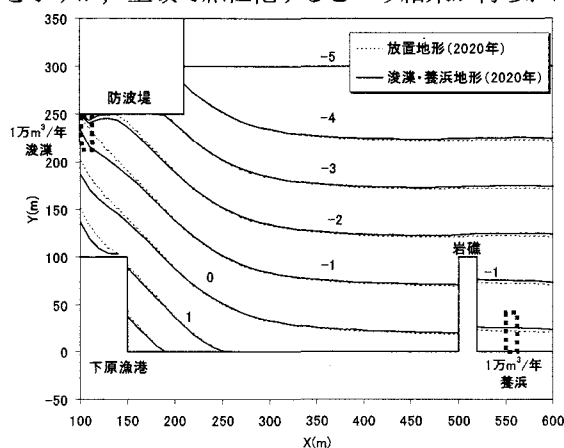


図-12 2020年の等深線形状予測 (ケース4)

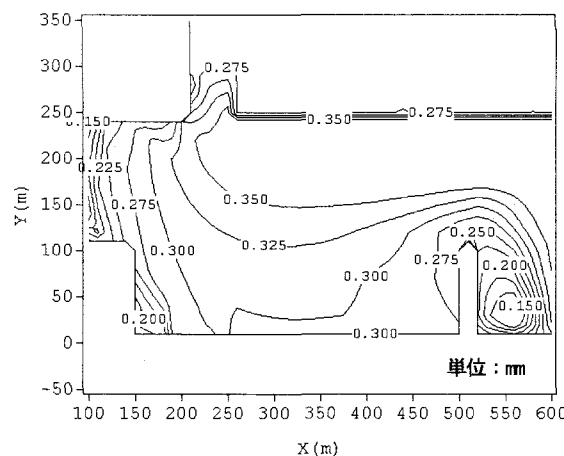


図-13 2020年の平均粒径の予測 (ケース4)

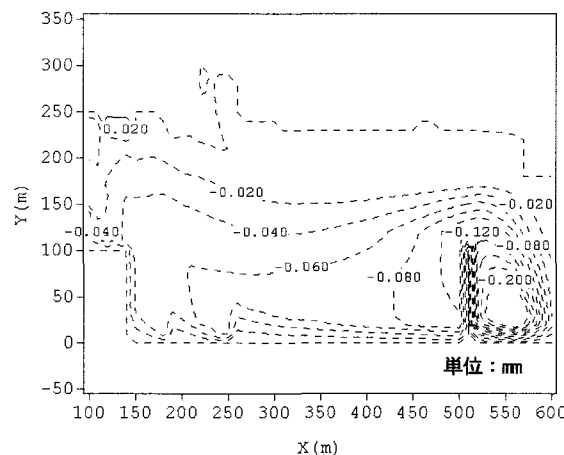


図-14 ケース2と4の平均粒径の差

すなわち、主に細粒分からなる砂の浚渫土砂をサンドリサイクルすることにより、底質環境は限りなく初期に近くなり、リサイクルを維持し続ければ底質環境が保たれることが計算より明らかとなった。

#### 4. まとめ

本研究では、防波堤による波の遮蔽域周辺での海浜変形に加えて、平面的な底質粒度組成変化の予測が可能なモデルを開発し、下原漁港周辺の粒径・地形変化予測に適用した。この結果、本モデルが実用に足るモデルであることが分かった。また、本モデルにより浚渫や養浜の効果・影響を底質粒径からも検討することが可能となり、本モデルは地形変化とともに底質環境の評価の可能なツールとなった。とくに、底質粒径は海底に生息するハマグリ等の貝類の生存を大きく左右することが知られており、魚介類の生息環境の評価にも利用可能である。このように本モデルは、防波堤による波の遮蔽域周辺の海浜変形の予測が可能であるにとどまらず、底質粒径分布まで予測可能となっていることが他の予測モデルとの決定的な違いである。

**謝辞：**本研究の実施に際し、千葉県下原漁港周辺の海岸調査に協力して頂いた、国際航業（株）河川砂防・海岸部の星上幸良氏、日本大学大学院の野志保仁氏に深い感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 酒井和也・熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁：混合粒径砂による離岸堤周辺の海浜変形の実験と計算，海岸工学論文集，第50巻，pp.486-490，2003.
- 2) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁：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.441-445，2004.
- 3) 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，No.539/Ⅱ-35，pp.121-139，1996.
- 4) 野志保仁・小林昭男・熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄：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.406-410，2004.
- 5) 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，土木学会海岸工学論文集，第50巻，pp.481-485，2003.
- 6) 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.
- 7) Kraus, N. C.: Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone, J. Sedimentary Petrology, Vol.55, pp.3-14, 1985.
- 8) 星上幸良・小林昭男・宇多高明・三浦正寛・熊田貴之・三波俊郎：波の遮蔽構造物建設に伴う周辺海岸での侵食・堆積を未然に防ぐ手法に関する考察—館山市下原漁港を例として—，海洋開発論文集，第19巻，pp.481-486，2003.
- 9) 合田良美・佐藤昭二：海岸・港湾，彰国社，pp.185-188，1972.