

# 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

## N-LINE MODEL CONSIDERING ADVECTION AND DIFFUSION OF NOURISHED SAND

澁谷容子<sup>1</sup>・黒岩正光<sup>2</sup>・松原雄平<sup>3</sup>

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA and Yuhei MATSUBARA

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

Coastal erosions in sandy beaches have been serious problems for decades. In general, in order to evaluate the environmental changes in the future, beach evolution model is often used. Although the one-line model is used as a simple practical tool to predict the shoreline changes, the one-line model can not apply the beach nourishments in the offshore region. Therefore contour line change (N-line) model is needed. In this study, a numerical beach evolution model, which can predict depth contour line changes due to beach nourishment, was proposed. The effect of beach nourishment was taken into account by solving two-dimensional advection diffusion equation for nourished sand material. Some model tests of beach evolution due to nourishment were performed. Furthermore, the new N-line model was applied to preservation of eroded beach using a sand recycle method measures, and then the performance of the model was investigated.

**Key Words :** Beach nourishment, N-line model

### 1. はじめに

近年, 海岸侵食対策として, 養浜やサンドリサイクルといった, ソフト的対策に注目が集まっている。海岸侵食対策を行う際, 対策後の周辺海域の海浜変形予測を行うことが必要不可欠であるが, ソフト的対策を行った際も同様である。実務においては, 比較的簡単な汀線変化モデルがよく用いられる。養浜などを行った場合も, 汀線変化モデルは適用され, 水谷ら<sup>1)</sup>によってその評価が行われている。しかし, 汀線変化モデルでは, 沖合投入を表現できないなどの問題があることから, 最近では, 住谷ら<sup>2)</sup>や, 宇多ら<sup>3)</sup>によって, 等深線変化モデルをベースとした養浜効果の計算も試みられている。このように, さまざまな汀線変化モデル, 等深線変化モデルが提案され, これらは, 実用レベルにあるものの, 養浜による土砂投入を行った場合の手法は未だ確立されていない。また, 養浜後の土砂移動特性の把握はされておらず, 養浜された土砂の挙動は明らかにされていない。そこで, 著者ら<sup>4)</sup>は養浜土砂の移動特性を1次元の移流拡散方程式で表すことによって養浜後の汀線変化を予測する新たな汀線変化モデルを提案した。

本研究では, 著者ら<sup>4)</sup>が構築した養浜土砂の移流拡散を考慮した汀線変化モデルを, 等深線変化モデルへと拡張し, 養浜効果を予測可能な新たな等深線変化モデルを提案する。さらに本モデルを現地適用し, モデルの妥当性を検証する。

### 2. モデルの概要

本モデルは, 宇多ら<sup>5)</sup>の等深線変化モデルに投入土砂の影響を考慮したものである。図-1 に示すように 1) 波浪場, 2) 沿岸漂砂量, 3) 投入土砂の移流拡散計算および, 4) 等深線変化の4つのサブモデルから構築される。波浪場は間瀬ら<sup>6)</sup>の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。

#### (1) 等深線変化の計算

$y$  軸を沿岸方向に  $x$  軸を岸沖方向にとると, 等深線変化計算の基礎式は次式で表される。

$$\frac{\partial x_m}{\partial t} + \frac{1}{h_m} \left( \frac{\partial Q_m}{\partial y} - q \right) = 0 \quad (m=1 \dots N) \quad (1)$$

ここに、 $x_m$  は  $m$  番目の等深線位置(m) ,  $Q_m$  は  $m$  番目の等深線の沿岸漂砂量( $m^3/s$ ) ,  $h_m$  は  $m$  番目の等深線の移動高さ(m) ,  $m$  は等深線番号,  $N$  は等深線の本数である.  $q$  は養浜土砂による寄与分である.

実際の計算では、陽的有限差分法を適用し数値計算を行った.

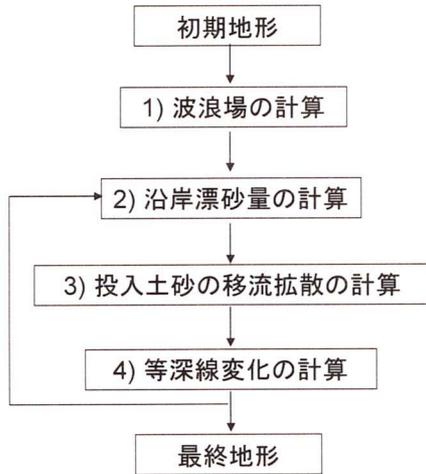


図-1 モデルの概要

## (2) 沿岸漂砂量の計算

沿岸漂砂量は小笹・Brampton 公式<sup>7)</sup>を適用するが、Kamphuis ら<sup>8)</sup>による粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入した. さらに、各水深毎に漂砂量を与える比例定数を導入し、砕波点における有義波高  $H_{bs}$  を用いた場合の式を以下に示す.

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

ここに、 $C_{gb}$  および  $\alpha_{bs}$  は砕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.  $A$  は Kamphuis ら<sup>8)</sup>による粒径に関する係数であり、次式より求めた.

$$A = \frac{A_d}{d_{50}} \quad (3)$$

ここに、 $A_d$  は粒径の大きさに関する係数、 $d_{50}$  は平均粒径である. また、式(2)中の  $\hat{K}_1$  および  $\hat{K}_2$  はそれぞれ以下で表わされる.

$$\hat{K}_1 = K_1 / \{16(\rho_s / \rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}\} \quad (4)$$

$$\hat{K}_2 = K_2 / \{8(\rho_s / \rho - 1)(1 - \lambda)1.416^{5/2}\} \quad (5)$$

ここに、 $\rho$ 、 $\rho_s$  は海水と砂の密度、 $\lambda$  は空隙率、 $K_1$  および  $K_2$  は無次元係数である.

また、 $\mu_m$  は各水深ごとに漂砂量を与える比例定数であり、水深方向の沿岸漂砂量分布関数  $\xi(z)$  を設定することで、次式により求めることができる.

$$\mu_m = \frac{\int_{z_m}^{z_{m+1}} \xi(z) dz}{\int_{h_c}^{z_m} \xi(z) dz} \quad (6)$$

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.

$\xi(z)$  は、次のよう求めた.

$$\xi(z^*) = \begin{cases} (2/h_c^{*3})(h_c^*/2 - z^*)(z^* + h_c^*)^2 & -h_c \leq z \leq h_R \\ 0 & z \leq -h_c, z \geq h_R \end{cases} \quad (7)$$

であり、ここに、

$$z^* = z / H_{bs} \quad (8)$$

$$h_c^* = h_c / H_{bs} \quad (9)$$

である.

## (3) 養浜土砂の考慮

養浜による投入土砂は沿岸方向と岸沖方向に拡散するとともに、沿岸流と波の作用によって輸送されるものと考え、投入土砂の挙動を2次元の移流拡散方程式を解くことで表す. 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.

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + U_s \frac{\partial q_n}{\partial x} + V_s \frac{\partial q_n}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 q_n}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2} - \lambda_n q_n \quad (10)$$

ここに、 $q_n$  は投入された土砂量である.  $U_s$ 、 $V_s$  は投入土砂の岸沖方向ならびに、沿岸方向移動速度、 $K_x$ 、 $K_y$  は投入土砂の岸沖方向ならびに、沿岸方向の拡散係数である.  $\lambda_n$  は土砂の減衰係数で、等深線に寄与しない土砂を表すパラメータである. 実際の計算では、式(10)中の  $q_n$  は体積量であるため、式(1)中の  $q$  の単位時間、単位長さ当たりの土砂量に変換する必要がある. そこで以下のような関係を適用した.

$$q = K_p q_n \quad (11)$$

$$K_p = 1/(\Delta t \cdot \Delta y) \quad (12)$$

ここに、 $\Delta t$  は計算時間間隔、 $\Delta y$  は格子間隔である.

### a) 投入土砂の移動速度

$U_s$  の値は試行錯誤的に求めたが、土砂の移動方向 ( $U_s$  の正負) については、砂村<sup>9)</sup>による汀線の前進・後退を分類するパラメータ

$$C_s = \frac{H_0 / L_0 (\tan \beta)^{0.27}}{(d_{50} / L_0)^{0.67}} \quad (13)$$

を用いて判断する。ここに、 $H_0$  は沖波波高、 $L_0$  は沖波波長、 $\tan \beta$  は初期勾配、 $d_{50}$  粒径である。砂村<sup>9)</sup>は  $C_s > 18$  ならば後退、それ以外ならば前進することを明らかにしており、これにより、 $C_s > 18$  ならば、投入土砂は沖向き、それ以外ならば、岸向きに移動するものとする。 $V_s$  は灘岡ら<sup>10)</sup>より  $V_s = 0.01V$  とし、 $V$  は沿岸流速であり、沿岸流速実用公式 Inman・Quinn<sup>11)</sup>を用いて算定した。

$$V = \left[ \left\{ \frac{1}{4X^2} + Y \right\}^{1/2} - \frac{1}{2X} \right]^2 \quad (14)$$

$$X = 646 H_{bs} \tan \beta_b \cos \theta_{bs} / T_s \quad (15)$$

$$Y = C_{bs} \sin \theta_{bs} \quad (16)$$

ここに、 $V$  は沿岸流速、 $H_{bs}$  は砕波点での有義波高、 $T_s$  は有義波周期、 $\tan \beta_b$  は砕波帯における海底勾配、 $c_{bs} = \sqrt{2028gH_{bs}}$ 、 $\theta_{bs}$  は砕波点における入射角である。 $g$  は重力加速度である。なお、波向きが負の値をとる場合、 $V$  は負で表される。

### b) 投入土砂の拡散係数

拡散係数は、Kuroiwa ら<sup>12)</sup>の蛍光砂による漂砂調査結果から、図-2 に示す波浪特性と蛍光砂の岸沖方向ならびに沿岸方向における拡散係数との関係から評価した。 $H_s$  は有義波高である。

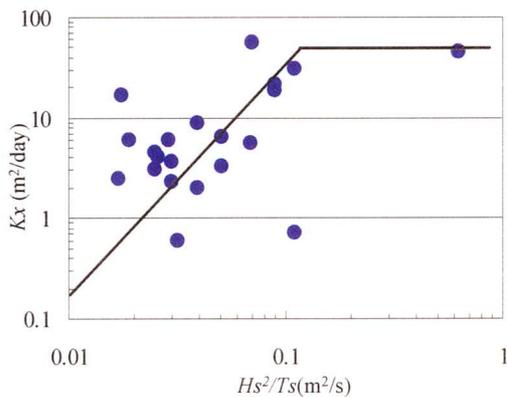


図-2 (a) 岸沖方向の拡散係数  $K_x$  と波浪特性との関係

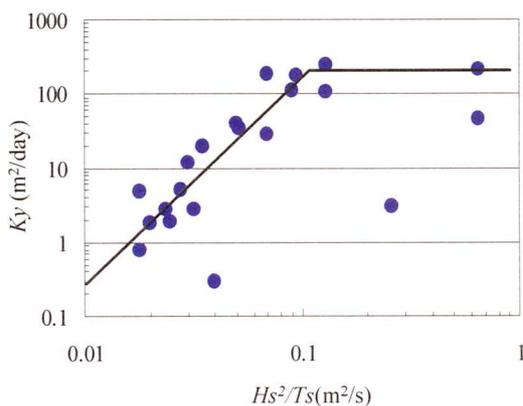


図-2 (b) 沿岸方向の拡散係数  $K_y$  と波浪特性との関係

### 3. モデルテスト

ここでは、沿岸方向 2000m、岸沖方向 1000m、海底勾配 1/50 の砂浜海岸において、両端に突堤のような大型構造物が設置され、沿岸漂砂によって上手側で侵食、下手側で堆積された場合を想定し、モデル計算を行った。養浜土砂は 20,000m<sup>3</sup> とし、土砂投入位置は、Case1 (汀線付近)、Case2 (水深 6m)、Case3 (移動限界水深付近) の 3 ケース行った。計算に用いた初期地形を図-3 に、計算条件ならびに各係数を表-1 にそれぞれ示す。

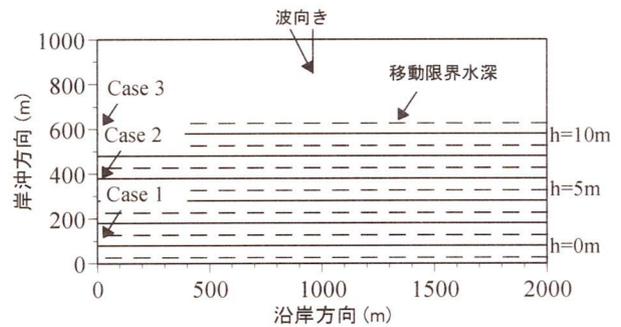


図-3 初期地形

表-1 計算条件

$H_s$ (m)	$T_s$ (s)	$A_d$ (m <sup>0.5</sup> )	$\alpha$ (°)	$d_{50}$ (mm)	$\lambda$
1.20	7.0	0.016	5.0	0.25	$1.0 \times 10^{-6}$
$K_1$	$K_2$	$U_s$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$Kx$ (m <sup>2</sup> /s)	$Ky$ (m <sup>2</sup> /s)
0.2	0.324	-0.006	0.001	0.00057	0.0023

図-4 および図-5 は Case1 において、土砂投入を行った際の、投入土砂ならびに等深線の時間的変化を示したものである。図-4 の凡例は単位幅当たり換算した土砂量である。図-4 (a)、図-4 (b) および図-4 (c) より時間の経過と共に、投入土砂が移流拡散していく様子が見られる。また、図-5 より、土砂投入後、等深線が一時的に前進し、その後、徐々に後退している様子が見られる。図-6 は、1年後の Case1 の養浜による土砂投入を行った場合と、行わなかった場合の差をグラフにしたものである。図-6 より、養浜を行った場合、侵食域において、土砂投入付近で、等深線が前進していることが確認できる。

図-7 および図-8 は Case2 および Case3 の結果である。図-6 同様、養浜を行った場合と行わなかった場合の差を示す。いずれも、侵食域において、土砂投入付近で等深線が回復している。また、図-6、図-7 および図-8 より、岸側に養浜を行うほど、投入土砂は等深線により寄与することが確認できた。

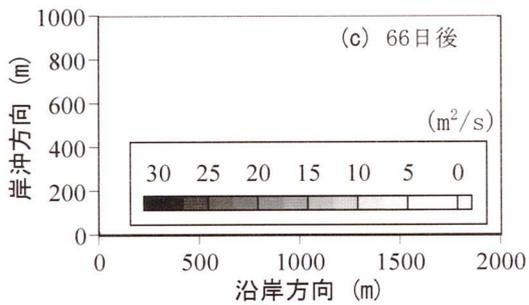
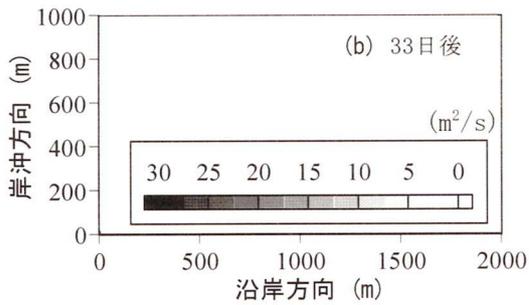
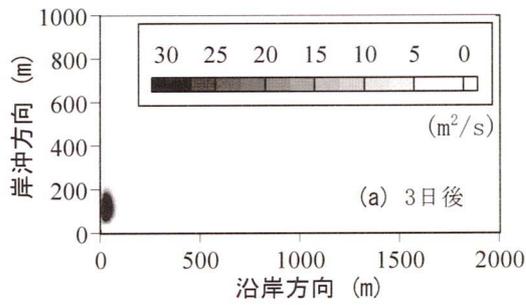


図-4 投入土砂の移流拡散の様子(Case1)

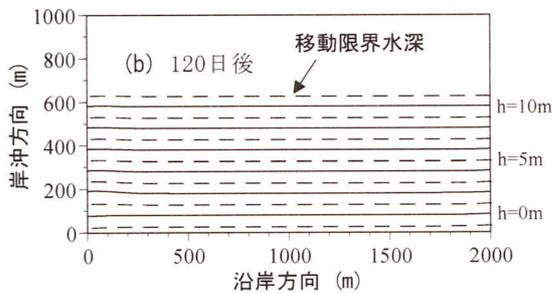
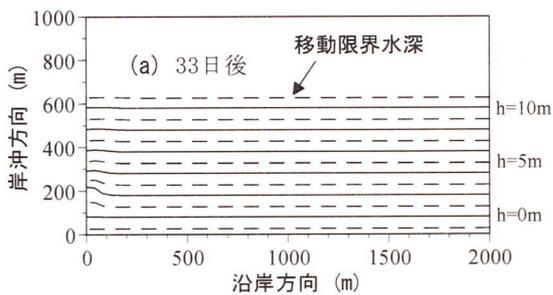


図-5 等深線の時間的変化(Case1)

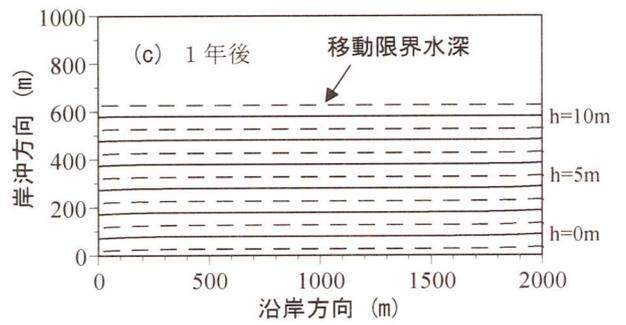


図-5 続き (等深線の時間的変化(Case1))

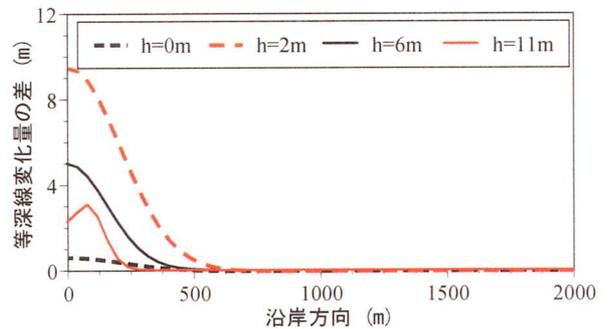


図-6 養浜の有無による等深線変化の違い(Case1)

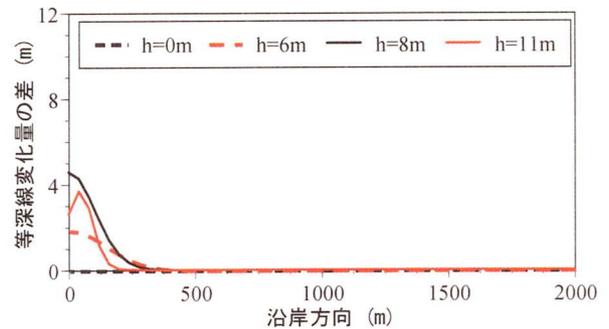


図-7 養浜の有無による等深線変化の違い(Case2)

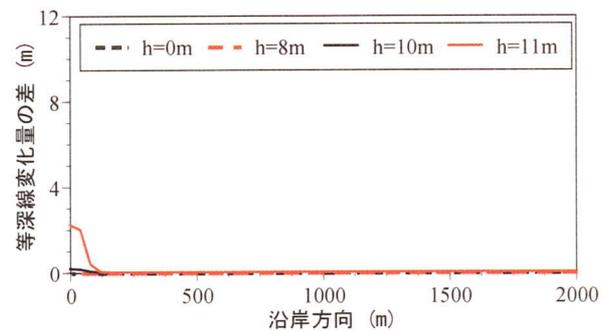


図-8 養浜の有無による等深線変化の違い(Case3)

#### 4. 皆生海岸における現地適用

##### (1) 再現計算

皆生海岸のサンドリサイクル<sup>13)</sup>を例として、現地への適用を試みた。皆生海岸は日野川からの供給土砂の減少により侵食が進行し、構造物などでさまざまな対策がなされてきたが、1994年よりサンドリサイクルが実施されている。まず、サンドリサイクルが行われる以前の1989年から1994年までの5年間を対象に等深線変化モデルの適用性の検討を行った。計算領域はサンドリサイクルが行われている約3kmの海岸とし、図-9に1989年の初期地形を、表-2に用いた波浪条件ならびに各係数を示す。

表-2 計算条件

$H_s(m)$	$T_s(s)$	$A_d(m^{0.5})$	$\alpha(^{\circ})$	$d_{50}(mm)$	$\lambda$
1.12	7.6	0.016	-10.0	0.25	$4.0 \times 10^{-5}$
$K_1$	$K_2$	$U_s(m/s)$	$V_s(m/s)$	$K_x(m^2/s)$	$K_y(m^2/s)$
0.1	0.0	-0.009	-0.0009	0.00057	0.0023

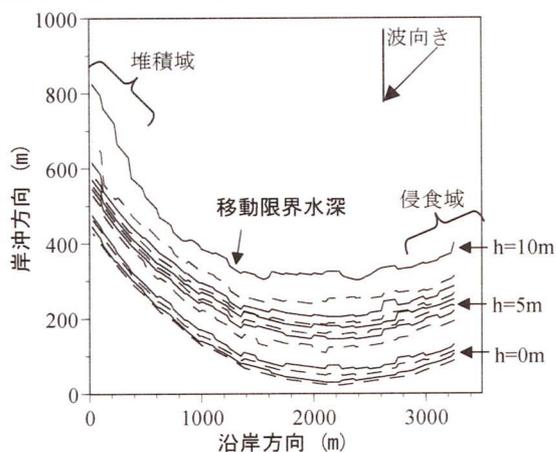


図-9 皆生海岸初期地形(1989)

図-10は1989年を基準として、養浜による土砂投入を行わないで、計算を行った5年後の結果を示す。堆積域ではあまり変化は見られないが、侵食域でより侵食されるという結果となった。図-11は汀線と、水深5mの等深線をそれぞれ、実測値と比較したものである。計算結果は、実測値とよく一致しており、計算結果は良好であった。これをもとに、サンドリサイクル後の等深線変化の計算を行う。図-12に、サンドリサイクルによる土砂投入に用いた初期等深線を示す。サンドリサイクルは堆積域の土砂を浚渫し、侵食域へ投入するため、浚渫した土砂を沿岸方向3200m付近に投入する。図-12の黒ラインが計算によって得られた1994年の等深線であり、グレーラインがサンドリサイクルを行う際の初期等深線である。投入土砂は佐藤ら<sup>13)</sup>を参考に $30,000m^3$ とした。図-13はサンドリサイクルによる土砂投入を行った、2年後の計算結果である。土砂

投入を行った場合、行わなかった場合と比べて、等深線が数メートルから、十数メートル前進する結果となった。佐藤<sup>13)</sup>によると、養浜を行った場合汀線が10m程度前進することから、この結果はほぼ同様の傾向を示しており、モデルの妥当性が確認できた。

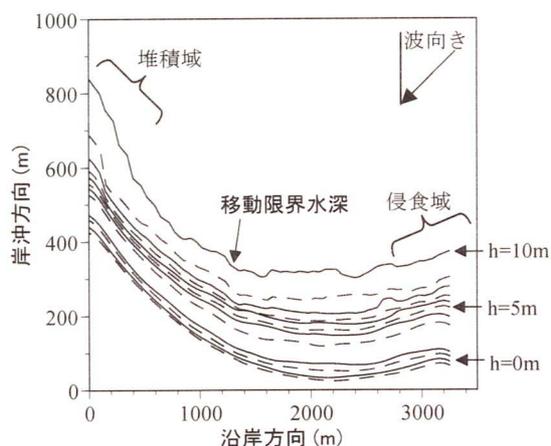


図-10 5年後再現計算結果(1994)

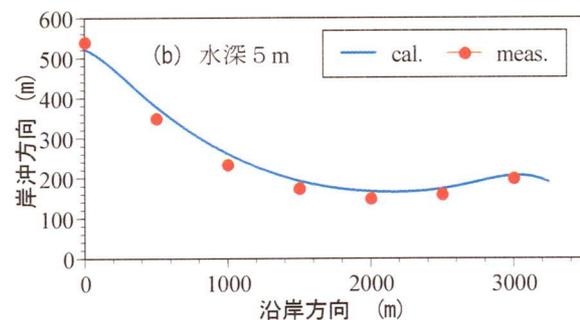
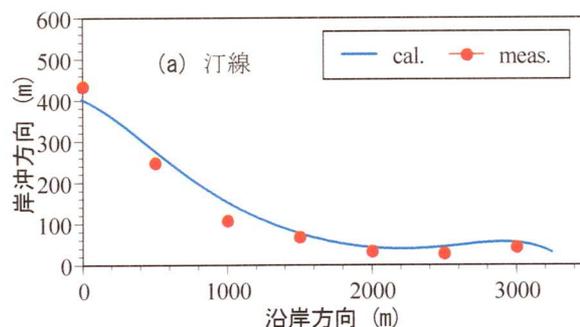


図-11 再現等深線と実測値との比較

#### 5. おわりに

本研究では養浜効果を予測可能な等深線変化モデルを提案した。モデル地形における計算結果から、養浜土砂は、侵食域の等深線を回復させることが確認できた。また、岸側に養浜を行うほど、その効果が高いことが再現された。現地適用においては、佐藤ら<sup>13)</sup>と同様の傾向を示すことができ、本モデルの妥当性を確認することができた。しかしながら、

今後の課題として、沖合土砂投入による現地適用性を検討する必要がある。

謝辞：本研究における波浪場の計算において、間瀬ら<sup>6)</sup>を参考にさせていただきました。ここに記して謝意を表します。

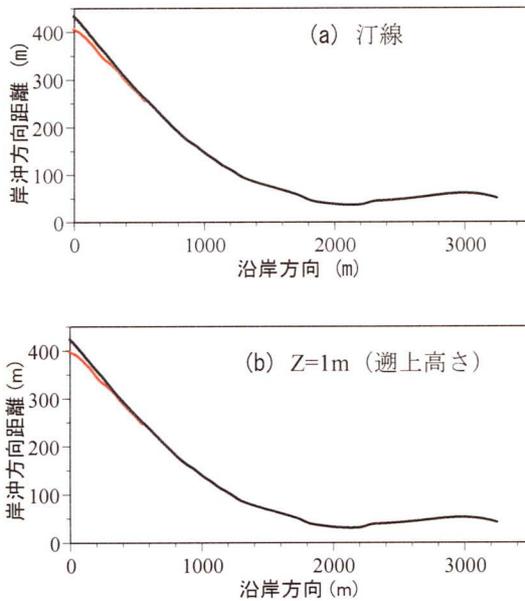


図-12 浚渫後の等深線

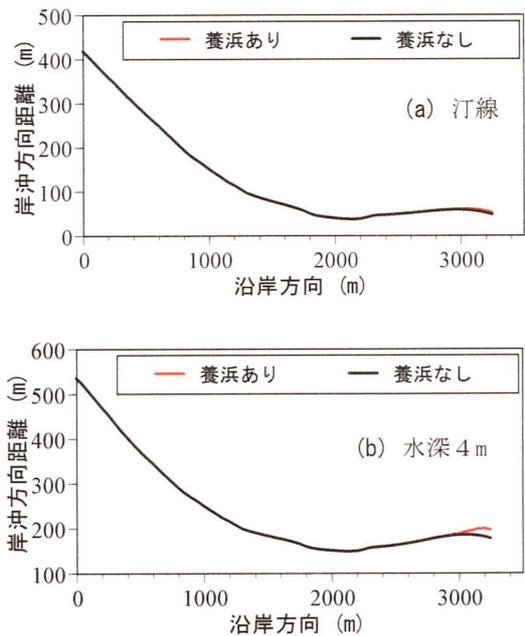


図-13 サンドリサイクル後の等深線変化

### 参考文献

- 1) 水谷法美, 許東秀, 上運天陽次, 神谷篤史: 人工リーフと養浜による磯浜海岸の汀線変化の現地調査とその予測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.581-585, 2003.
- 2) 住谷勉夫, 松浦健郎, 宇多高明, 高橋功, 大木康弘, 熊田貴之, 芹沢真澄: 粒度組成の平面変化を考慮した等深線変化モデルの鹿島灘海岸への適用, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.546-550, 2005.
- 3) 宇多高明, 清野聡子, 大矢忠一, 安田武夫, 高橋功, 古池鋼, 星上幸良: 沖合投入土砂の養浜効果夜予測手法の開発, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.641-645, 2005.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 砂村継夫: 自然海浜における汀線位置の時間的变化に関する予測モデル, 第 27 回海岸工学論文集, pp.225-259, 1980.
- 10) 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.
- 11) Inman, D.L. and W.H.Quinn: Currents in the surf zone, Proc, 2nd Conf. on Coastal Engineering, 1951.
- 12) Kuroiwa, M. and H.Moda.: Field investigation of sand drift using fluorescent tracer, proceedings of the international symposium: waves-physical and numerical modeling, pp.1483-1490, 1994.
- 13) 佐藤慎司, 古屋隆男, 坂根博吉, 山本幸次, 田子洋一, 牧野一正: 弓ヶ浜におけるサンドリサイクルシステムの有用性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.686-690, 1999.