

# 短期および長期における 3次元海浜変形予測に関する一考察

STUDY ON PREDICTION OF 3D BEACH EVOLUTION IN THE SHORT-TERM  
AND LONG-TERM BASED ON COASTAL AREA MODEL

黒岩正光<sup>1</sup>・口石孝幸<sup>2</sup>・山田哲史<sup>3</sup>・加藤憲一<sup>4</sup>・松原雄平<sup>5</sup>・野田英明<sup>6</sup>

Masamitsu KUROIWA, Takayuki KUCHIISHI, Tetsushi YAMADA,  
Kenichi KATO, Yuhei MATSUBARA and Hideaki NODA

<sup>1</sup>正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御正門ビル)

<sup>3</sup>学生員 鳥取大学大学院博士前期課程 土木工学専攻 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>4</sup>正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御正門ビル)

<sup>5</sup>正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

<sup>6</sup>正会員 工博 鳥取環境大学教授 環境デザイン学科 (〒689-1111 鳥取県鳥取市青葉台北1-1-1)

This study is concerned with the prediction method of 3D beach evolution in the long- and short term. As the first step, a 3D morphodynamic model, Q3D-CAM(Coastal Area Model based on Quasi-3D nearshore current model), is proposed. First, in order to investigate the characteristics of the presented model, model tests associated with a detached breakwater were carried out. Secondly, the applicability of the model to the prediction of sand bar movement in the short term was examined, and also the model was applied to the 3D beach evolution around a port in the field. Finally, the prediction method in the short- and long-term was discussed.

**Key Words :** 3D beach evolution model, Quasi-3D nearshore current model

## 1. はじめに

構造物設置あるいは港の拡張工事に伴う周辺の地形変化予測には、3次元海浜変形モデルが漂砂機構を考慮でき有効とされ現地にも適用されている(例えば、渡辺ら<sup>1)</sup>、清水ら<sup>2)</sup>)。しかしながら、計算における波浪条件の設定方法や海浜流の3次元性の影響、漂砂量係数の与え方など詳細な計算手法は未だ確立されていないのが現状である。

本研究では、黒岩ら<sup>3)</sup>が開発した流れの3次元性を考慮した3次元海浜変形予測モデルを波と流れの繰り返し計算が自動的に行えるように改良し、短期および長期における3次元海浜変形予測モデルを構築する。さらに、予測の際に必要な波浪条件の設定方法や再現期間内における波、流れおよび地形変化の相互干渉(波と流れ計算へのフィードバック)の影響、流れの3次元性の影響などについて考察し、3次元海浜変形予測手法を検討しようとするものである。特に、短期の計算では、高波浪時における海浜変形予測について検討する。

## 2. 数値モデル

本モデルは、準3次元海浜流モデルに基づいた波と流れの時間的变化(非定常性)、すなわち波流れ計算へのフィードバックを考慮した海底地形変化予測システムQ3D-CAM(Coastal Area Model based on Quasi-3D nearshore current model)である。

### (1) 波浪場

波浪場は、間瀬ら<sup>4)</sup>の多方向不規則波と構造物による回折波が考慮できるエネルギー平衡方程式を用いて算定する。基礎式は、

$$\frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Sv_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ \left( CC_g \cos^2 \theta S_y \right)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon S \quad (1)$$

で表される。ここに、 $x$ は沖から岸向きに、 $y$ は沿岸方向に取った座標を表す。 $\theta$ は波向を表し、 $x$ 軸から反時計回りを正に取ったものである。 $S$ は波のエネルギー

ルギースペクトル,  $v_x$ ,  $v_y$  および  $v_\theta$  はそれぞれ波のエネルギー輸送速度, 右辺第1項目は回折効果を表すもので,  $\kappa$  は影響係数で2.5~3程度である. 第2項は砕波によるエネルギー減衰項で高山ら<sup>5)</sup>のモデルが適用されている. 口石ら<sup>6)</sup>は, このモデルを用いたトラフのような逆勾配を持つ海浜断面上の波浪場計算においては再現性があまり良くないことを指摘し, 砕波減衰項の改良を行っている. しかしながら, 汀線付近で計算が不安定となる場合があり, 地形変化を計算する際, 波と流れの繰り返し計算時に汀線近傍の取り扱いが困難となる. そこで, 口石ら<sup>6)</sup>と比較して若干精度は劣るが, 間瀬ら<sup>4)</sup>の波浪モデル中の砕波計算において, 海底勾配が水平あるいは逆勾配となる場合, 海底勾配を計算領域の平均勾配で表すことで, 計算精度向上を図ることとする.

## (2) 海浜流場

海浜流場は多方向不規則波浪場における口石ら<sup>6)</sup>の準3次元モデルを適用する. Radiation stress, 水平および鉛直方向の渦動粘性係数, 底面摩擦などの諸量は, 自乗平均平方根波高  $H_{rms}$  と, 波エネルギーの周波数スペクトルのピーク周期  $T_p$  を用いて計算する. 砕波帯内における海浜流の戻り流れを精度よく再現するため, 水面での境界条件に砕波による波のエネルギー散率の関数で表されるせん断応力を与える.  $x$  方向および  $y$  方向におけるせん断応力は

$$\begin{aligned} \rho v_v \frac{\partial U}{\partial z} &= \tau_{sx} = A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left( \frac{h}{L} \right) \cos \theta \\ \rho v_v \frac{\partial V}{\partial z} &= \tau_{sy} = A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left( \frac{h}{L} \right) \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

で表される. ここに,  $A_s$  は無次元係数で戻り流れを計算する上での重要なパラメータである.  $L$  は波エネルギーの周波数スペクトルのピーク周期から算定される線形理論に基づく波長である.  $D_{bc}$  は砕波による波のエネルギー逸散率であるが, Dallyら<sup>7)</sup>の式を用いて算定する. 基礎式, 計算方法等については, 口石ら<sup>6)</sup>, 黒岩ら<sup>8)</sup>を参照されたい.

## (3) 漂砂および地形変化

### a) 漂砂

全漂砂量は黒岩ら<sup>3)</sup>を参考に,

$$(q_x, q_y) = (q_{cbx}, q_{cby}) + (q_{wbx}, q_{wby}) + (q_{sx}, q_{sy}) \quad (3)$$

で定義する. ここに  $(q_{cx}, q_{cy})$  は底面における流れによる漂砂量,

$$q_{cbx} = A_c Q U_b, \quad q_{cby} = A_c Q V_b \quad (4)$$

$$Q = (u_*^2 - u_{*c}^2) / g \quad (5)$$

ここに,  $U_b$  および  $V_b$  はそれぞれ岸沖および沿岸方向における底面定常流速であり,  $A_c$  は無次元係数である.

$(q_{wbx}, q_{wby})$  は波による漂砂量であり,

$$q_{wbx} = A_w Q \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_{wby} = A_w Q \hat{u}_b \sin \alpha \quad (6)$$

波および底面の流れによる漂砂量は渡辺ら<sup>1)</sup>のモデルに基づいたものである.

$(q_{sx}, q_{sy})$  は浮遊漂砂量で

$$q_{sx} = \int_h^{\bar{\eta}} c(z) U(x, y, z) dz \quad (7)$$

$$q_{sy} = \int_h^{\bar{\eta}} c(z) V(x, y, z) dz \quad (8)$$

$c(z)$  は

$$c(z) = c_b \exp \left( - \frac{w_f}{v_s} z \right) \quad (9)$$

ここで,  $c_b$  は底面基準点  $b$  における基準点濃度であり, 柴山ら<sup>9)</sup>の式を参考に砕波による影響を考慮するため, 次式で表す.

$$c_b = C_s \frac{10}{3} \frac{(\varphi - 0.05) \nu}{b \sqrt{sgd}} \quad (10)$$

ここで,  $C_s$  は無次元の係数であり,  $\nu$  は動粘性係数である. 底面基準点  $b$  は, 中央粒径の100倍で表される.

砂の拡散定数  $v_s$  は以下のように定める.

$$v_s = E_{k1} u_* h + E_{k2} \frac{P_b H^2 g T}{h} \quad (11)$$

ここに,  $E_{k1}$  および  $E_{k2}$  は無次元係数,  $P_b$  は砕波確率で波浪場の計算から得られる.

### b) 地形変化

海底地形(水深)変化は渡辺ら<sup>1)</sup>の漂砂の連続式を用いて計算される.

## 3. 離岸堤を用いた数値実験

ここでは, 波と流れ計算へのフィードバック回数および波浪時系列の与え方が最終地形に及ぼす影響について数値実験的に検討する.

### (1) 計算条件

計算領域は, 岸沖方向500m, 沿岸方向1000mの範囲とし, 海底勾配1/50の平衡等深線を有する海底地形上に長さ300mの離岸堤を設置した場合を計算の対象モデルとする. また, 波浪場および海浜流場の計算における格子間隔は両方向とも10mとした. 流れの計算における水深方向の分割は5等分割とし, 時間間隔は0.05s, 繰り返し回数は8000回とした. また, 流れによる漂砂量係数  $A_c=0.2$ , 波による漂砂量係数  $A_w=0.01$ , 浮遊漂砂量  $C_s=0.01$  とおく.

### (2) フィードバック回数による影響

ここでは, 3パターン of フィードバック方法を用いて20日後の地形変化計算を試みる. すなわち, 波と流れは初回のみ行い20日後の地形変化を計算(フィードバック無し: CaseA), 波と流れを5日毎に計算する(フィードバック3回: CaseB), 波流れ計算を2日毎計算する(フィードバック9回: CaseC) の3ケースである.

図-1はCaseA～Cの結果を示したものである。これらの図から、すべてのケースにおいて離岸堤背後に堆砂が発生し、水深1mの等深線が前進しているのが再現されているが、フィードバック回数が多いほど等深浅は平滑化された形状となっていることがわかる。

### (3) 波浪の時系列による影響

図-2に示すように、3パターンの波浪時系列を与え(Case1, Case2, Case3), 22日後の地形変化計算を試みた。図中に示すそれぞれの波浪時系列は、高波浪の来襲パターンは異なるが、全エネルギーは等しく設定している。この図から、水深2m以下の等深線の形状が大きく異なり、来襲する波浪の時系列、すなわち高波浪の来襲パターンの相違が最終地形に大きな影響を及ぼすことがわかる。

以上の結果は、現地計算を行う上で、短期・長期計算にかかわらず、フィードバック回数や波浪時系列による影響を十分に吟味する必要がある、特に高波浪の設定は非常に重要であることを示唆している。

## 4. 現地海浜に対する適用性

### (1) 短期における海浜変形予測

ここでは、Kuriyamaら<sup>10)</sup>によって実施された現地観測結果をもとに短期における海浜変形予測を試みた。現地観測は、1997年1月30日～2月3日まで、空港港湾技術研究所有する波崎海洋観測施設(HORS)において実施された。地形変化計算に先立ち、まず波浪および海浜流モデルの検証を行う。図-3は波浪場、海浜流場の計算結果の一例である。波浪条件はKuriyamaら<sup>10)</sup>のCase1, すなわち $H_{1/3}=2.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=9.69\text{s}$ ., 波向 $\alpha=24.5^\circ$ である。波の周波数スペクトルはJONSWAP型を、波の方向集中度 $S_{max}$ は75とした。図(a)中のOriginalは高山らのモデルをそのまま適用したもので、Modifiedは波浪減衰項を修正したものである。計算結果は改善され、岸沖および沿岸方向における定常流速も概ね再現されている。なお、式(2)における $A_s$ は2.5とした。

つぎに、1月31日から2月1にかけて来襲した高波浪によって発生した地形変化の再現を試みる。図-4の上段の図は1月31日および2月1日に実測された縦

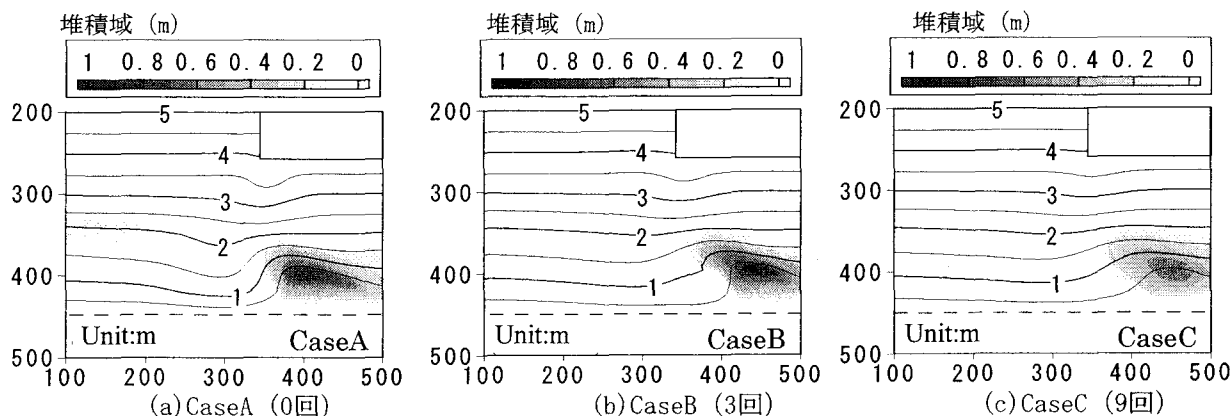


図-1 波・流れ計算へのフィードバック回数が最終地形に及ぼす影響

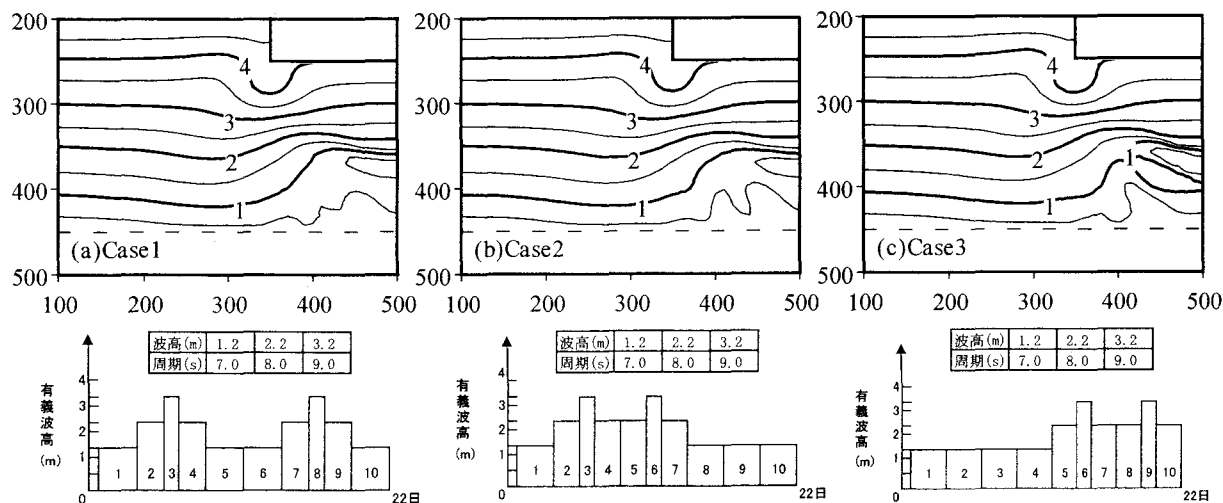


図-2 波浪の時系列が最終地形に及ぼす影響

断面地形を示したもので、 $x=400\text{m}$ 付近のバーが高波浪によって沖へ移動変形している。この短期におけるバー地形の変形計算を再現する。実際には、どの波浪に対し、地形が変形したかは明確ではないため、Kuriyamaら<sup>10)</sup>が観測した波浪を平均して計算条件とした。また、1日程度の地形変化を予測する場合の波と流れ計算へのフィードバック回数については不明確であり、本計算では、図に示すように波と流れ計算を1回（フィードバック無し）、2回および4回行った。なお、波浪条件および漂砂量係数は表-1に示すとおりである。漂砂量係数について、高波浪時、すなわち短期における海浜変形では、戻り流れに起因する浮遊砂が卓越し、バーなどの移動を起こす設定となっており、実際の現地における現象に一致している。図-4の結果から、どのケースにおいてもバーの移動は再現されているが、フィードバック2回のケースが実測値の傾向をよく表している。

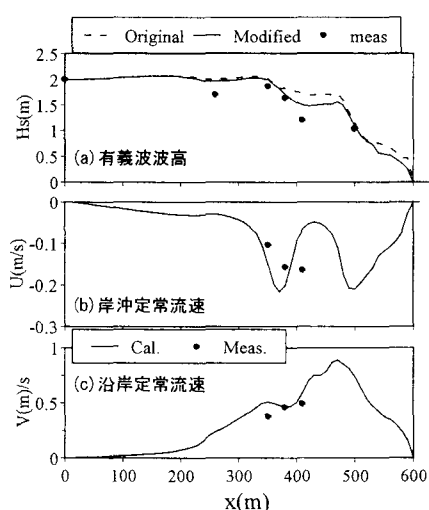


図-3 波高および海浜流の計算結果

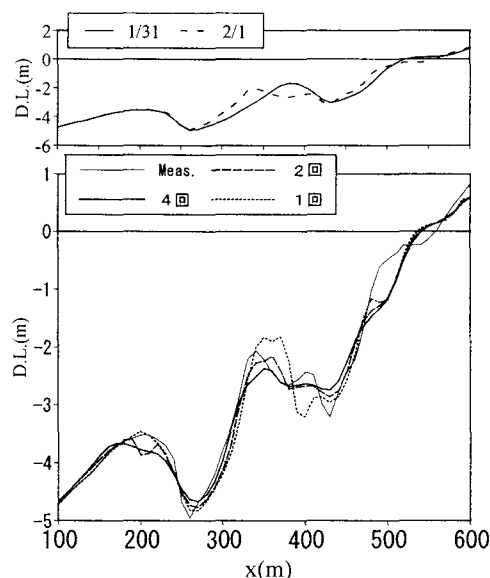


図-4 バーの地形変化の計算結果

表-1 波浪条件および漂砂量係数

| $H_{1/3}$<br>(m) | $T_{1/3}$<br>(sec) | $\alpha$ | $S_{max}$ | $A_w$ | $A_c$ | $C_s$ | $E_s$ |
|------------------|--------------------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 2.45             | 10.9               | 14.4     | 75        | 0.1   | 0.5   | 1.0   | 2.0   |

## (2) 長期における海浜変形予測

### a) 清水ら<sup>2)</sup>による港周辺の海浜変形予測

検討対象とする現地の計算領域は図-5に示すとおりで、汀線にはほぼ平行な等深線を有する海底勾配約1/30の砂浜海岸でその一端に港がある。水深10m以浅の底質は中央粒径約0.35mmの細砂である。図中に示す○は海浜流の調査地点で、電磁流速計による波向、流向および流速が実測されている。P2とP4では水圧センサーによる波高観測も併せて実施されている。まず、地形変化の長期計算を行う前に、波浪及び海浜流モデルの適用性を検討した。図-6は計算結果の一例で、沖波有義波高3.5mとした時の底面流速図を示したものである。海浜流場の流向については、P4での流向は実測値との一致が良くなかったもの他の3地点では良好な結果を示している。波浪場については、実測値よりも若干過大評価傾向を示したがほぼ良好な結果であった。

つぎに、現地調査より得られたデータを基に1年間の長期海浜変形予測を試みる。地形変化の計算に用いた波浪は、清水ら<sup>2)</sup>と同様に、地形変化に寄付すると考えられる2m以上の波浪を対象に、その年間の波エネルギーが同一になるように図-7のような4回の高波浪で代表させたモデル時系列とし、波と流れを20ステップ行う。漂砂量係数は、流れによる漂砂量係数 $A_c=0.05$ 、波による漂砂量係数 $A_w=0.01$ 、浮遊漂砂量 $C_s=0.1$ とした。なお、計算格子間隔はすべて20mとした。

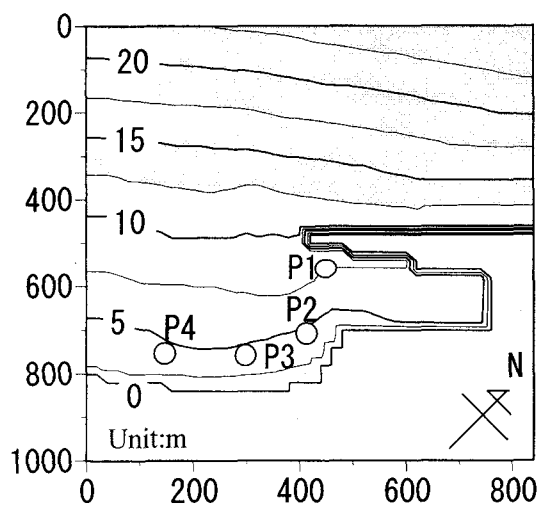


図-5 現地における港周辺の海底地形と観測点

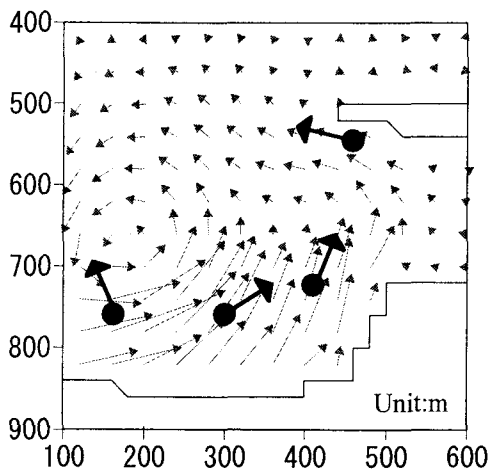
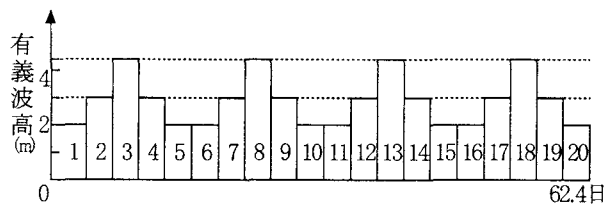


図-6 底面における海浜流速の計算結果



| step                    | 有義波高 | 有義波周期 | 波向 | 継続日数 |
|-------------------------|------|-------|----|------|
| 1,5,6,10,11<br>15,16,20 | 2m   | 7.5s  | NW | 5.5日 |
| 2,4,7,9,12<br>14,17,19  | 3m   | 8.5s  | NW | 1.6日 |
| 3,8,13,18               | 4.5m | 10.0s | NW | 1.4日 |

図-7 計算に用いた波浪時系列モデル

図-8は1年後の計算結果を示したもので、堆積域も同時に示している。この図から港口付近で最大1.5mもの堆積が計算されている。実測値では、港口付近で2mを超える堆砂が発生していた。このことから、再現計算では堆砂量が実測値より若干過小されているが、堆砂域は実測値とほぼ同じ傾向を示している。なお、試行錯誤計算により、海浜流場計算における碎波による水面せん断応力係数 $As=2.0$ と高波浪時に大きくし、戻り流れの影響を考慮した。その他の波浪条件では $As=1.0$ とした。

#### b) 鳥取県赤碕港周辺の地形変化予測

最後に、黒岩<sup>3)</sup>による1997年12月から翌年4月まで実施された鳥取県赤碕港での現地観測結果を用いて長期海浜変形予測について検討した。現地の地形データとして、観測期間中の水深データはなく、図-9に示す1997年10月に実施された深淺測量結果と、観測期間中、St.1で実測された海底面地盤高の変化だけである。黒岩<sup>3)</sup>によると、観測期間中の1月15日に4mを超える波浪が来襲し、St.1においてわずか1日で約80cmもの海底地盤の上昇が生じている。そこで、モデルの検証方法として、図に示した地形を初期地形とし、10月から翌年の1月15日の約3ヶ月半を再現期間とし計算を試みる。計算格子間隔は20mとした。計算に用いた波浪時系列は図-10に示すとおりで、鳥取港沖で観測された波浪データか

ら2m以上の高波浪を対象に波エネルギーが再現計算期間のそれと同じになるような7ステップの波浪時系列データを作成した。なお、時系列データの7ステップ目は1月15日の高波浪に相当し、6ステップ目までは、深淺測量が行われた1997年の10月から1998年1月14日までの波浪に相当する。予測結果の妥当性については、6ステップ後7ステップ後の計算結果、すなわち高波浪によって発生した地形変化計算結果と実測値との比較から検討する。各漂砂量係数は、6ステップ目までは、前述した清水らの現地計算の場合と同じものを用い、7ステップ目については、表-1に示した短期における漂砂量係数を用いた。また、海浜流場の計算における $As=2.0$ とした。図-11(a)および(b)は6ステップおよび7ステップの地形変化の計算結果で、堆積域も同時に示している。図(b)には7ステップ後と6ステップ後の計算結果の差から計算した堆積域も示してあるが、St.1に付近は堆砂域となったおり、高波浪によって堆砂が生じ、黒岩<sup>3)</sup>の現地観測結果と同様な傾向を示している。

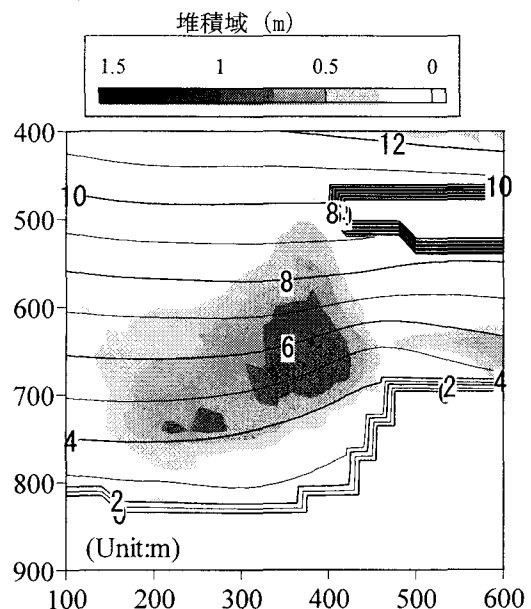


図-8 1年後の地形変化の計算結果

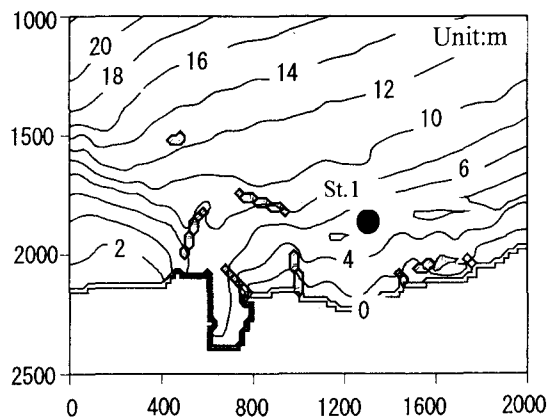


図-9 計算に用いた初期海底地形 (1997年10月)

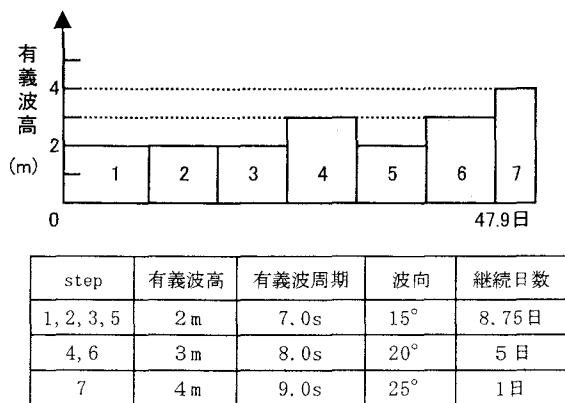


図-10 計算に用いた波浪時系列モデル（赤碕港）

以上のことから、短期（高波浪時）の海浜変形予測における漂砂量係数は長期の場合より大きく設定する必要があること、また、高波浪時には、戻り流れの影響を考慮する必要があることが明らかとなった。

## 5. おわりに

本研究では、準3次元海浜流モデルに基づいた3次元海浜変形予測手法について検討した。離岸堤模型の計算結果から波浪の時系列の与え方が最終地形に影響を及ぼすこと、短期（高波浪時）および長期における計算では、漂砂量係数の与え方が大きく異なる、短期（高波浪時）には漂砂量係数を大きくとる必要があることがわかった。また、高波浪時には戻り流れの影響を考慮する必要があることが確認できた。実測値との比較から本モデルは現地海浜の短期および長期における海浜変形の傾向を把握することが可能であることがわかった。

謝辞：本モデルを構築するにあたり、波浪場の計算には間瀬ら（参考文献4）のモデルを使用させてい

ただいた。また、現地データについて、（独法）空港港湾技術研究所、漂砂研究室栗山室長、ならびに五洋建設㈱の清水琢三氏に助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 渡辺 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊山 勉：構造物設置に伴う3次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410, 1984.
- 2) 清水琢三, 水流正人, 渡辺 晃：3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 416-420, 1992.
- 3) 黒岩正光, 野田英明, 加藤憲一, 谷口 丞, 孫 彰培：準3次元海浜流モデルを用いた構造物周辺の3次元海浜変形予測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 616-620, 1999.
- 4) 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.
- 5) 高山知司, 池田直太, 平石哲也：砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67, 1991.
- 6) 口石孝幸, 黒岩正光, 加藤憲一, 松原雄平, 野田英明：準3次元海浜流モデルの現地適用性, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 917-922, 2003.
- 7) Dally, W. R., R.G. Dean and R.A. Dalrymple(1984): A Model for Breaker Decay on Beaches, *Proc. 19th ICCE*, pp. 82-97, 1984.
- 8) 黒岩正光, 野田英明, 芳地康征：準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 151-155, 1997.
- 9) 柴山和也, Winyu Rattanapitikon, 岡安章夫：砕波帯内の浮遊漂砂量の算定モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 431-435, 1994.
- 10) Kuriyama, Y and Nakatsukasa, T. : Undertow and Longshore current on a Bar-Trough Beach Beach, Field Measurements at HORS and Modeling-, *Rep. Port and Harbor Res. Inst.*, Vol. 38, No. 1, 1999.

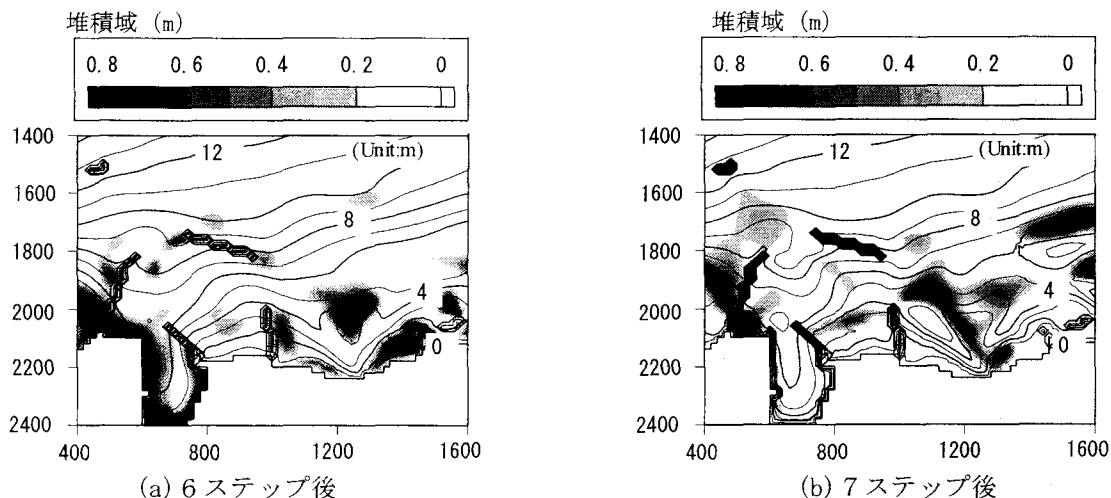


図-11 地形変化の計算結果（赤碕港）