

# 河口砂州復元の3次元予測モデル

## MODEL FOR PREDICTING 3-D RECOVERY OF RIVER MOUTH BAR

芹沢真澄<sup>1</sup>・宇多高明<sup>2</sup>・三波俊郎<sup>3</sup>・古池 鋼<sup>3</sup>・石川仁憲<sup>4</sup>

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE and Toshinori ISHIKAWA

<sup>1</sup> 正会員 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

<sup>2</sup> 正会員 工博 (財) 土木研究センター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 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

<sup>3</sup> 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

<sup>4</sup> 正会員 工修 (財) 土木研究センターなごさ総合研究室 (〒110-0016 台東区台東1-6-4 タカラビル)

A model for predicting the closing process of an opening of the river mouth bar which was originally formed by flood currents was developed on the basis of the BG model proposed by Serizawa *et al.* (2006). The model was applied to the example at the Tenryu River mouth. The river mouth was eroded to form an opening during Typhoon 0704. Given the topography of the opening of the river mouth bar, subsequent beach changes owing to wave action were predicted. The process of the closing of the opening of the river mouth bar was predicted well by the present model.

**Key Words :** River mouth bar, predictive model, BG model, Tenryu River

### 1. まえがき

河口砂州が洪水流によってフラッシュされた場合、形成された開口部は洪水後の波の作用によって比較的短時間で塞がることはよく知られた事実である。砂州開口部の規模が大きいと、開口部沖から岸向き漂砂によって砂礫が運ばれると同時に、開口部両側からの沿岸漂砂によっても開口部中央へと砂礫が運ばれ砂州の復元が進む。その場合、開口部の両端部には砂嘴が形成され、それが伸びて繋がるという変化をたどる。このような海浜変形は、3次元的现象として起こり、かつ砂嘴先端は固定境界ではなく、また砂礫の堆積によって波の場も刻々と変化するた

め、その定量的予測はかなり難しい問題である。黒岩ら<sup>1)</sup>は、漂砂を掃流漂砂と浮遊漂砂の和とし、榎木ら<sup>2)</sup>の波と流れの共存場におけるせん断応力を漂砂式に組み込み、水深変化については渡辺ら<sup>3)</sup>の式を用いて砂州形成に着目した予測モデルを提案した。これにより一方向の沿岸流の卓越する場において、砂嘴が発達しつつ伸びていくことを明らかにした。しかし計算は水面下の形状変化を与えたのみであり、砂州の陸上部の地形や勾配の変化など、詳細な点の予測には課題が残されている。本研究では、芹沢ら<sup>4)</sup>のBGモデルを発展させてこの種の現象の予測モデルを開発する。

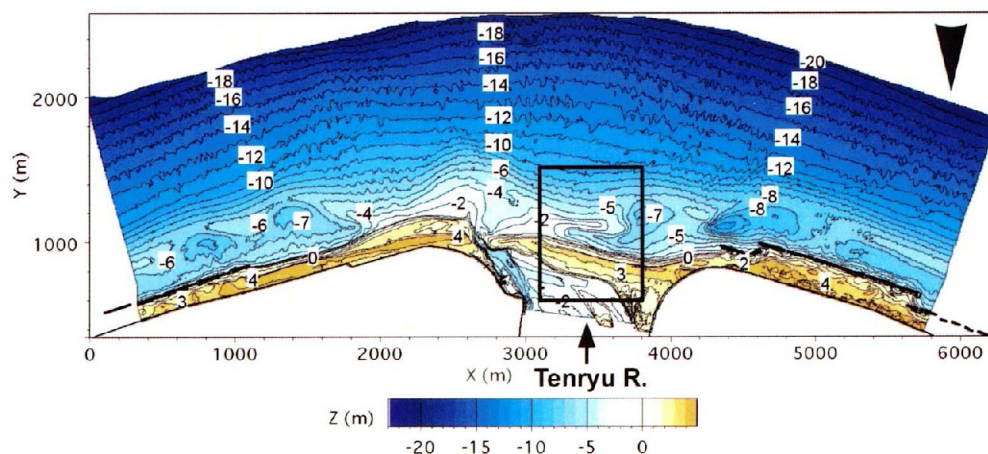


図-1 天竜川河口の全体形状 (2007年2月)

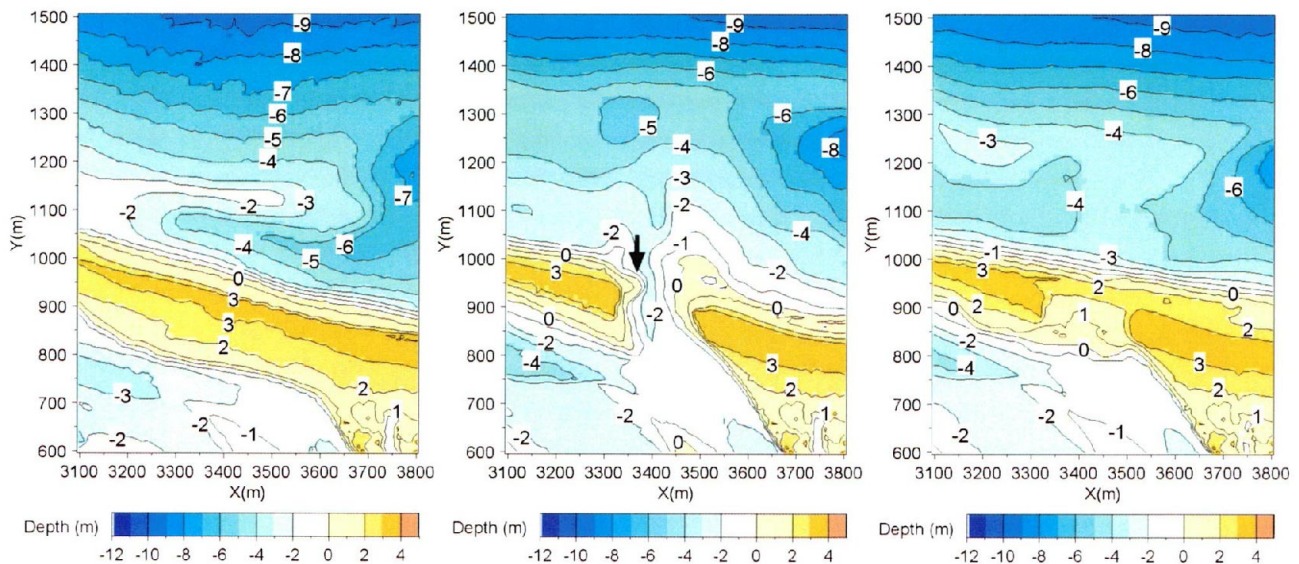


図-2 フラッシュ前の天竜川河口砂州（2007年2月）

図-3 フラッシュ直後の天竜川河口砂州（2007年8月）

図-4 フラッシュ後約3カ月における天竜川河口砂州（2007年10月）

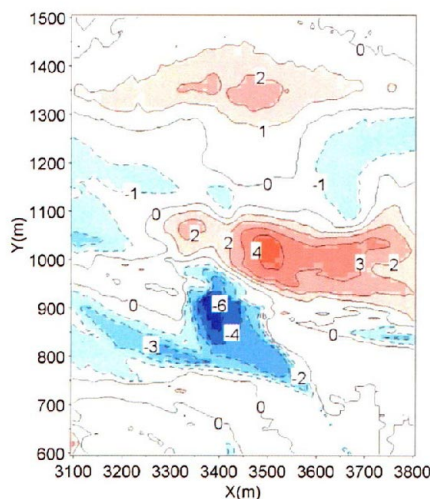


図-5 フラッシュ前後の地形変化量の平面分布

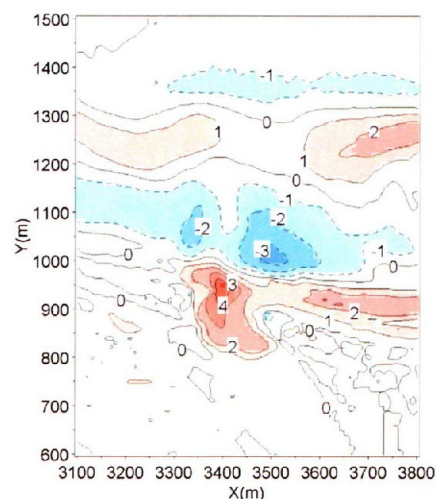


図-6 フラッシュ後の砂州復元期間における地形変化量の平面分布

## 2. フラッシュ前後の河口砂州周辺の地形

天竜川河口部では、2005年7月から2008年1月までにnarrow multi beam測深が9回行われた。これらの測深によって得られた深浅図の一例として図-1には2007年2月の深浅図を示す。この深浅図において、図の矩形領域では2007年7月14日の台風4号に伴う洪水によって砂州のフラッシュが起きた<sup>5)</sup>。本研究ではこの区域の地形変化に焦点を当てて検討を進める。

図-2は、図-1の矩形区域におけるフラッシュ前の2007年2月の深浅図である。河口砂州はほぼ直線状に延びており、砂州高はほぼ3mであった。また砂州の海側勾配は1/10と急で、-3mまで急に落ち込む縦断形を有していた。一方、砂州沖には複雑な形状の沿岸砂州が発達しているが、この付近では常時沿岸砂州が発達している。図-3は、2007年7月14日の台風4号に伴う洪水によるフラッシュ直後の2007年8月の

深浅図である。河口砂州の中央部が長さ150mにわたって切れた。形成された開口部の最大水深は平均海面基準で-2mであり、縦断方向に細長い溝が形成された。この溝の両側には冲向きに舌状の浅瀬が形成された。これらの舌状砂州の形態は左右非対称であり、右（西）側の浅瀬の規模が大きい。砂州を横切って流れた洪水流によって冲向きに砂が流出したが、明らかに等深線の突出が見られるのは-4mまでである。突出した-4mの等深線の先端の両側では水深が増大し、とくに右岸側では-8mにまで達する深みがあるが、これは砂州フラッシュ以前から恒常的に存在するものであり、規模の大きな沿岸砂州の一部である。このことから砂州フラッシュにかかわる地形変化が生じたのは-4mまでと考えてよい。なお、砂州開口部上流側の地形を調べると、右岸側では下流方向に斜めに側方侵食によると見られる崖が延びている。これに対し、左岸側ではこのような急傾斜の崖はでき

ていないことから、少なくとも砂州の上流側では開口部へ向かってやや斜めに洪水流が流下したと推定される。一方、開口部左岸には矢印で示す舌状の突起が認められるが、このような突起は洪水時には存在できないことを考慮すれば、洪水後の波の作用で砂嘴が形成されつつあったと考えられる。測量が洪水後約1ヶ月経過してから行われていることを考えれば、波の作用によって砂が開口部を埋めるように沖合から回帰した結果、砂州の突起が形成されたと考えられる。

図-4は、2007年10月の同じ区域の深浅図である。洪水によって形成された開口部と、その沖の突出地形はきれいに消失し、開口部は砂で埋まり汀線付近は直線状の等深線となった。直線状となった河口砂州の形状は洪水作用前の2007年2月の形状に近づいた。等深線形状を詳細に調べると、-3m～2m間の等深線はほぼ平行に伸びている。開口部はフラッシュ前高さ3mの砂州があったが、10月時点では砂州高は3mまでは復元しておらず、また砂州の中央ほど復元が遅くなっている。砂州の復元が進む一方、沖合では西側から斜めに沿岸砂州のトラフが岸向きに発達してきている。図-5は、フラッシュ前の2007年2月とフラッシュ後の2007年8月の地形変化量の平面分布である。砂州開口部に相当する部分では6mも地盤高が低下し、逆に開口部のすぐ海側では4m厚で土砂が堆積している。なお、この堆積域のすぐ沖では一旦侵食傾向に変わった後、再び堆積傾向を示しているが、砂州に堆積している土砂は礫が主であり、このような底質は浮遊状態で移動できないことを考慮すれば、沖合での堆積は河口砂州を構成していた土砂が落ち込んだものではなく、むしろ沿岸砂州の変動に起因するものと推定される。図-6は、2007年8月から2007年10月までの地形変化量の平面分布であり、砂州開口部が次第に埋め戻される状況を示す。砂州開口部では最大4m厚で砂が堆積する一方、開口部沖の汀線直近では最大3m厚で侵食が起きた。沿岸部の汀線に沿った帯状区域の沖合にも細長い堆積域が伸びているが、これについては開口部位置とは無関係に沿岸方向に長く発達していることから、河口砂州の復元とは独立した砂移動、例えば沿岸砂州の変動に起因すると推定される。

### 3. フラッシュ後の河口砂州の復元予測モデル

波と洪水流の作用下において、河口砂州はそれ自身の姿を大きく変え、その結果として波浪場も大きく変わる。すなわち砂州の伸長とともに背後の波の遮蔽域も刻々と姿を変える。このため波浪場の計算と地形変化の計算は繰り返し行う必要がある。本研究では、このような計算が可能な、芹沢ら<sup>4)</sup>のBGモデルを用いた。このモデルは、Inman and Bagnold<sup>6)</sup>に

よる平衡勾配の概念と、Bagnold<sup>7)</sup>による energetics approachを応用した芹沢ら<sup>8)</sup>のBGモデルを、砕波点の波浪諸元でなく局所波動流速を与えて計算できるように発展させたものである。ここではフラッシュ後の河口砂州の復元予測への適用を試みる。

いま、平面座標 $(x, y)$ を定め、時刻 $t$ における各点の地盤高 $Z(x, y, t)$ を解くべき変数とする。波が $\tan\beta$ の一樣勾配海岸に斜め入射する場合、地形変化は波による地形変化の限界水深 $h_c$ とバーム高 $h_R$ の間で起こるとして、ネットの砂輸送フラックス $\vec{q}=(q_x, q_y)$ を求めるための基礎式は式(1)～(5)で与えられる。

$$\vec{q} = C_0 \frac{P}{\tan\beta_c} \left\{ \begin{aligned} &K_n (\tan\beta_c \vec{e}_w - b \vec{\nabla} Z) \\ &+ (K_s - K_n) \sin\alpha \tan\beta \vec{e}_s \end{aligned} \right\} \quad (-h_c \leq Z \leq h_R) \quad (1)$$

$$b = \left| \vec{e}_w \cdot \vec{e}_n \right| = |\cos\alpha| \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{1}{(\rho_s - \rho)g(1-p)} \quad (3)$$

$$P = \rho u_m^3 \quad (4)$$

$$u_m = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (5)$$

ここに、 $\vec{q}=(q_x, q_y)$ : 砂輸送フラックス、 $Z(x, y, t)$ : 地盤高、 $n$ および $s$ : 等深線直角方向(岸向き)および平行方向に取った局所座標、 $\vec{e}_n$ : 等深線直角方向(岸向き)の単位ベクトル、 $\vec{e}_s$ : 等深線平行方向の単位ベクトル、 $\vec{\nabla} Z = \tan\beta \vec{e}_n = (\partial Z/\partial x, \partial Z/\partial y)$ : 地形の勾配ベクトル、 $\vec{e}_w = (\cos\theta_w, \sin\theta_w)$ : 波向の単位ベクトル、 $\theta_w$ :  $x$ 軸と波向のなす角、 $\tan\beta \vec{e}_s = (-\partial Z/\partial y, \partial Z/\partial x)$ 、 $\alpha$ : 波向と等深線直角方向のなす角、 $\tan\beta = |\vec{\nabla} Z|$ : 海底勾配、 $\tan\beta_c$ : 平衡勾配、 $K_s \cdot K_n$ : 沿岸・岸沖漂砂量係数、 $h_c$ : 波による地形変化の限界水深、 $h_R$ : バーム高、 $C_0$ : 水中重量表示から体積表示への換算係数、 $\rho$ : 海水の比重、 $\rho_s$ : 砂の比重、 $p$ : 砂の空隙率、 $h$ : 水深、 $g$ : 重力加速度、 $u_m$ : 波動流速振幅、 $H$ : 波高である。また、式(1)の漂砂強度 $P$ は、Bagnoldの energetics approachの概念より、波のエネルギー逸散率 $\Phi$ に比例すると考えることができる。本研究では、 $\Phi$ が波の底面振動流速 $u_m$ の3乗に比例すると仮定し、漂砂強度 $P$ は $u_m$ の3乗に比例させ、その比例係数は式(1)の $K_s$ と $K_n$ に含めることにして比例係数=1とおき、 $P$ を式(4)で与えた。さらに、式(4)の計算に必要な $u_m$ については、砕波も含めた平面波浪場の計算より得られた各点の波高 $H$ から微小振幅長波理論による関係式(5)より求める。

一方、平面波浪場の計算にはDallyら<sup>9)</sup>の砕波モデルを組み込んだエネルギー平衡方程式を用い、屈折・砕波変形と、砂州開口部による波の遮蔽を考慮した計算を行う。また、汀線付近および陸上部では、従

来の3Dモデル<sup>10)</sup>にならい仮想水深を設定する方法をとり、式(6)のように最小水深 $h_0$ からバーム高まで、仮想水深を持たせて波浪計算を行った。式(6)の最小水深 $h_0$ には岸近くの水深として砕波水深の1/2程度を目安として与え、また指数 $r$ は、線形( $r=1$ )としたのでは地形変化計算でのバームの発達が悪く、再現性が良くないため試行的に $r=1/3$ と与えた。またバーム高より標高の高い地点ではエネルギーを0と置く。この波浪場を用いて漂砂式・連続式で地形変化を計算するが、地形変化に伴う波浪場の変化も大きいことから、地形変化10ステップ毎に波浪場の再計算を行った。

$$h' = \left( \frac{h_R - Z}{h_R + h_0} \right)^r \quad (r=1/3) \quad (Z > -h_0) \quad (6)$$

海浜変形の数値計算は、(x, y)座標上で式(1)の漂砂式と、連続式(式(6))を解いて求める。計算領域は $\Delta x$ と $\Delta y$ のメッシュで分割し、 $Z$ と漂砂量 $\vec{q}=(q_x, q_y)$ は1/2メッシュずつずらして配置し、陽形式差分法で解く。安息勾配を越えた場合の重力による土砂の落ち込みによる海浜断面の崩壊に対する漂砂量算定法、およびバーム近傍と $h_c$ 近傍での漂砂量の扱いは片沢ら<sup>11)</sup>と同様である。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (7)$$

#### 4. 河口砂州の復元予測計算

初期地形として洪水によるフラッシュ前後の2007年2、8月および復元後の10月の3時期の深浅図より求めた最深海床を求めるとともに、砂州の基盤面を-3mとした固定床(図-7)を考え、その上に砂が載る

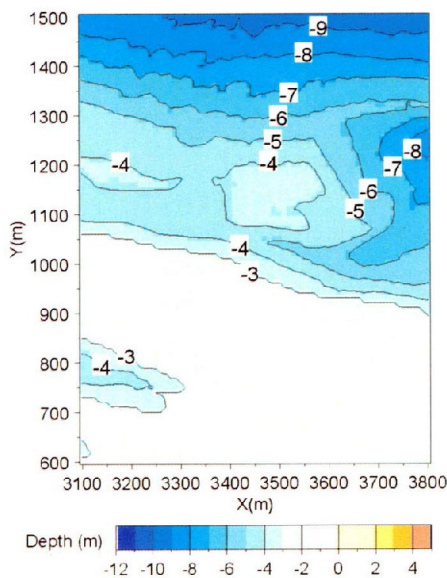


図-7 計算に用いた固定床

という条件を設定した。また平衡勾配は $\tan\beta_c=1/10$ とした。入射波条件は当海岸のエネルギー平均波(波高1.6m, 周期8s)を用い、波向は復元後の2007年10月の汀線直角方向からとした。この方向角は2007年8月の汀線に立てた法線に対して時計回りに $5^\circ$ 傾いた方向である。バーム高 $h_R$ は2.5mとし、波による地形変化の限界水深 $h_c$ は波高 $H$ に比例させて与え、宇多・河野<sup>12)</sup>による $h_c$ と砕波波高との関係式( $h_c=2.5H_b$ )を参考に、各点の波高 $H$ の2.5倍で与えた。この場合、水深5m付近が地形変化の限界水深となる。これより沖合の地形変化を許容すると、沖に発達しているバーが岸向きに移動して過剰な堆積が生じてしまう。現モデルはそのままではバーの計算ができないのでバーの変形は除外することとし、現地調査結果と一致するように-5m付近が限界水深となるようにした。計算条件を表-1に示す。

洪水後の地形(図-3)に波浪を2ヶ月(8000step)作用させて砂州の復元状況を調べた。図-8(a)~8(f)には、4000stepまでは1000stepごとに、またそれ以降については2000stepごとに計算結果を示す。1000stepでは開口部に残されていた-2mの溝が砂で埋まり、中央の開口部幅が狭まった。これと同時に沖合の-2、-3mの等深線が緩やかに後退し、-1mの等深線は旧開口部を通過して連続的につながった。また両側から河道内へと砂嘴が発達し始めた。2000stepでは、両岸からの砂州がさらに発達し、開口部中央での開口幅が非常に狭くなった。砂州の発達に要する砂は沖合に滑らかに突出した-3m以浅の区域から運び込まれたことから、それらの等深線も後退している。3000stepでは

表-1 計算条件

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計算内容          | フラッシュ後の砂州の復元計算                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 計算モデル         | BGモデル(片沢ら <sup>4)</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 初期地形          | 2007年8月深浅測量地形                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 波浪条件          | 入射波(エネルギー平均波):<br>$H=1.6\text{m}$ , $T=7\text{s}$ , 波向 $\theta_i=-10^\circ$                                                                                                                                                                                                              |
| バーム高          | $h_R=2.5\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 波による地形変化の限界水深 | $H_c=2.5H$ ( $H$ は波高)                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 平衡勾配          | $\tan\beta_c=1/10$                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 安息勾配          | $\tan\beta_g=1/2$                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 漂砂量係数         | 沿岸漂砂量係数 $K_s=0.0022$ , 岸沖漂砂量係数 $K_o=0.2K_s$                                                                                                                                                                                                                                              |
| 計算メッシュ        | $\Delta x=\Delta y=10\text{m}$                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 計算時間間隔        | $\Delta t=0.19\text{hr}$                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 計算期間          | 2ヶ月(8000ステップ)                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 境界条件          | 岸沖端: $q_x=0$ , 左右端: $dq_y/dy=0$                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 波浪場の計算法       | エネルギー平衡方程式(間瀬ら <sup>13)</sup> )<br>(砕波減衰項: Dallyら <sup>8)</sup> のモデル)<br>・入射波スペクトル: 光易型方向関数(合田 <sup>14)</sup> )<br>・周波数分割数 $N_F=1$ , 方向分割数 $N_\theta=18$<br>・方向集中度 $S_{\max}=25$<br>・砕波係数: $K=0.17$ , $\Gamma=0.5$<br>・最小水深 $h_0=2\text{m}$<br>・地盤高 $Z \geq$ バーム高 $h_R$ の地点ではエネルギーを0とおく。 |
| その他           | ・波浪計算の挿入ピッチ: 地形計算10ステップ毎。<br>・エネルギー平衡方程式の数値計算法(間瀬ら <sup>13)</sup> )                                                                                                                                                                                                                      |

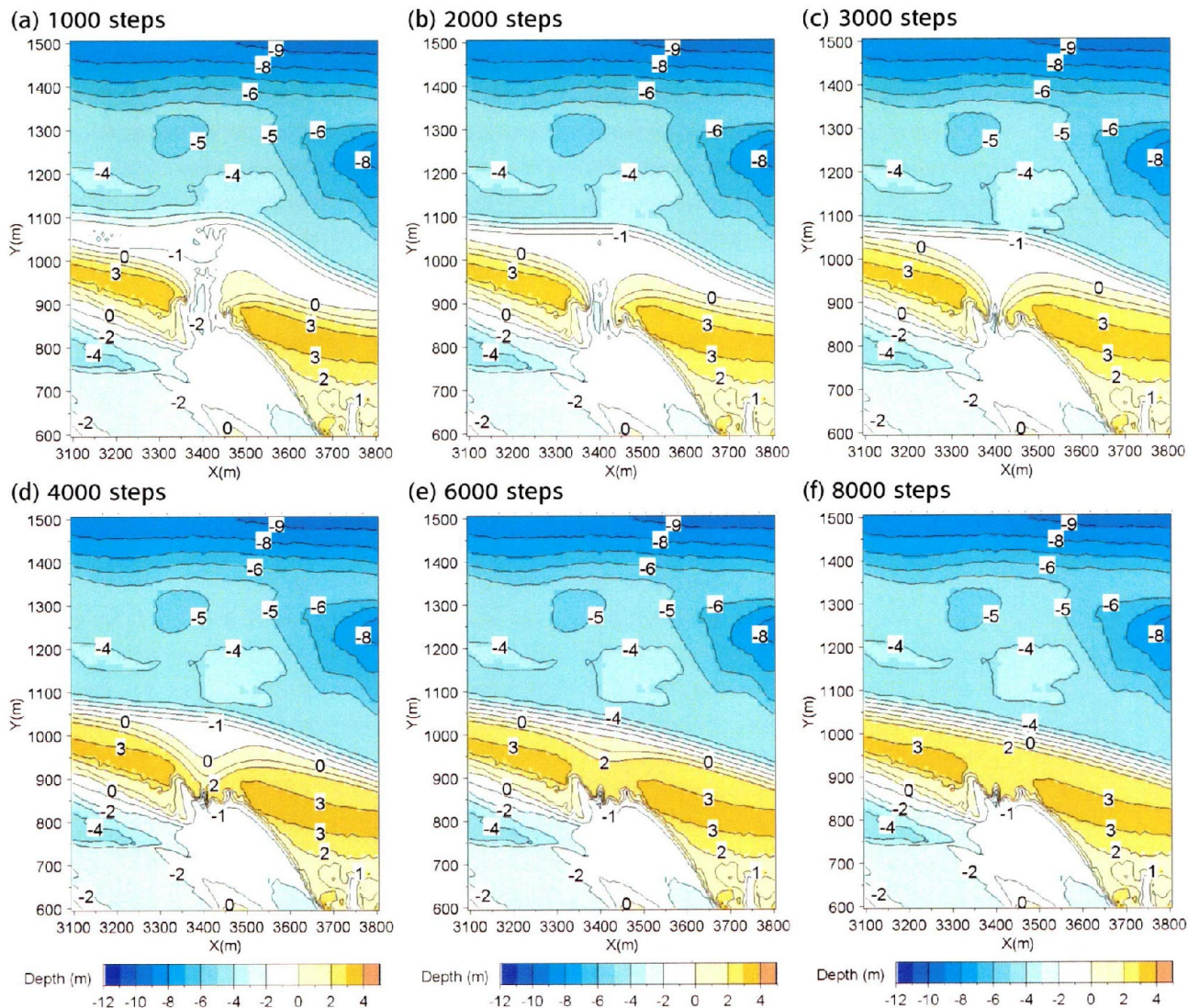


図-8 砂州の復元計算の結果

開口部はほぼ塞がり、砂州高は2mとなった。また砂で埋め戻された開口部の形状を調べると、開口部の両端部近傍ほど砂州の復元が速く、これに対して中央部には小規模な溝が残されている。4000stepでは、開口部中心に狭い溝を残して、開口部中央に向かって大きく湾入した汀線が形成された。また両側から伸びてきた汀線が中央部に凹状の窪んだ形を残したままつながった。6000stepでは、砂州開口部のほとんどの区域の標高が2mに達したことにより、開口部の上流端では砂州形状には変化が見られなくなった。また砂の堆積が進んだため、砂州開口部付近の等深線の曲率が小さくなった。最終的に8000stepでは開口部には十分砂が堆積して安定状態に達し、砂州の沖側汀線はほぼ直線となった。一連の地形変化は、実測の図-3から図-4の変化をうまく説明している。

図-9には初期から8000stepまでの地形変化量の平面分布を示す。対応する実測値は図-6に示した2007年8月から2007年10月までの地形変化量分布であるが、開口部での4m厚の堆積、開口部沖両側での一対の侵食域の形成とその最大侵食深とも実測と計算と

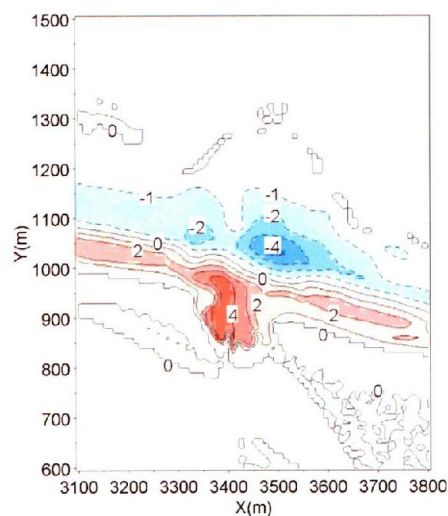


図-9 初期から8000stepまでの水深変化量

はよく一致している。図-10は、砂州開口部を横断するX=3400m断面における縦断形変化であるが、砂州がフラッシュされて初期には平坦な海底面であった

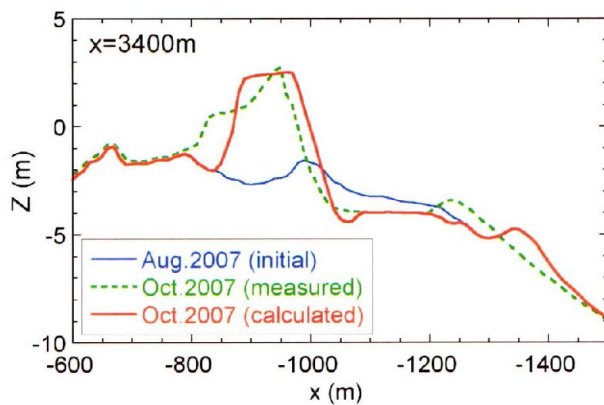


図-10 X=3,400m断面における縦断形の比較

が、波の作用で砂州の再形成が進んだ。この状況は実測結果と非常に一致を示す。

## 5. まとめ

天竜川河口部における洪水による砂州フラッシュ後の波による砂州の復元過程についてBGモデルを用いた検討を行った。この結果、洪水流によって開口部を形成しつつ沖に流出した砂礫が岸向き・沿岸漂砂によって汀線へ運ばれ、砂州が再形成される現象については実用上十分な精度で予測することが可能となった。本研究で用いたモデルは、波浪作用（およびそれによる沿岸流）のみを外力としたもので、河川流による作用は考慮していない。本研究のように洪水流に伴う砂州フラッシュ後の砂州復元過程では、河川流の作用と比較して波浪作用がはるかに卓越すると考えられるので、本モデルの適用が可能である。一方、洪水による河口砂州のフラッシュでは河川流の作用が卓越し、またフラッシュ後に河口砂州が復元しつつ河口幅が狭まり、ある河口幅が動的に維持される現象は、波と河川流による砂移動の均衡状態で決まることから、両者の作用を考慮する必要がある<sup>1)</sup>。

## 参考文献

- 1) 黒岩正光・口石孝幸・松原雄平：河口周辺の3次元海浜変形数値シミュレーションに関する研究，海洋開発論文集，第23巻，pp. 1177-1182, 2007.
- 2) 樺木 亨・李 宗燮・出口一郎：河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 411-415, 1984.
- 3) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉：構造物設置に伴う三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.
- 4) 芹沢真澄・宇多高明：BG モデルを応用した砂嘴の発達予測，海岸工学論文集，第55巻，pp. 491-495, 2008.
- 5) 田島芳満・高川智博・浅野泰史・佐藤慎司・武若 聡：特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形，海岸工学論文集，第55巻，pp. 646-650, 2008.
- 6) Inman, D. L. and Bagnold, R. A. : Littoral Processes, in The Sea, M.N. Hill, (editor), Vol. 3, pp. 529-533, New York, Wiley, 1963.
- 7) Bagnold, R. A. : Mechanics of Marine Sedimentation, in The Sea, M. N. Hill (editor), Vol. 3, pp. 507-528, New York, Wiley, 1963.
- 8) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼：Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル，土木学会論文集 B, Vol. 62, No. 4, pp. 330-347, 2006.
- 9) Dally, W. R., R.G., Dean and R. A. Dalrymple : A model for breaker decay on beaches, Proc. 19th ICCE, pp. 82-97, 1984.
- 10) 清水琢三：海浜変形シミュレーション，1996年度（第31回）水工学に関する夏期研修会講義集，pp. B-5-1- B-5-26, 1996.
- 11) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼：等深線変化モデルの拡張による  $x$ - $y$  メッシュ上の水深変化の計算法，海岸工学論文集，第50巻，pp. 476-480, 2003.
- 12) 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, No. 539/ II-35, pp. 121-139, 1996.
- 13) 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, No. 628/ II-48, pp. 177-187, 1999.
- 14) 合田良實：「港湾構造物の耐破設計」，鹿島出版会，pp. 303, 1990.