

## 海岸線急変部に発達する円弧状砂州周辺に 建設された突堤による漂砂阻止の影響予測

芹沢真澄<sup>1</sup>・宇多高明<sup>2</sup>

### Prediction of Beach Changes around Cuspate Foreland Caused by Blockage of Longshore Sand Transport by a Groin

Masumi SERIZAWA<sup>1</sup> and Takaaki UDA<sup>2</sup>

#### Abstract

The development of a cusplate foreland on a coast with abrupt change in coastline orientation was investigated by a movable bed experiment using a wave basin. After 8-hour wave action, a groin was installed at the cusplate foreland and the effect of obstructing continuous longshore sand transport was also experimentally investigated. The results of the experiment were reproduced using the BG model which was proposed by the present authors. The beach changes around the cusplate foreland were successfully predicted. The experimental and numerical results were in good agreement. The installation of a groin on a coast with abrupt change in coastline orientation and a steep slope induces offshore transport of fine sediment, which results in beach erosion.

**Key words:** *Cusplate foreland, BG model, movable bed experiment, groin, beach changes*

#### 1. はじめに

汀線沖に急勾配斜面が発達し海底谷が迫るような海岸では、入射波高・波向の場所的変化が大きく、かつ入射波向の絶対値も大きくなるが多いため著しい沿岸漂砂が発達し、また急勾配斜面を経た海底谷への土砂の落ち込みも起こり得ることから、直線状海岸とは異なるパターンの海浜変形が起こる。このような条件を満足する海岸線の急変部では、しばしば波の作用により砂嘴あるいは円弧状砂州が発達するが、宇多・山本(1992)は、砂の堆積域が急深な場合における海岸線急変部での円弧状砂州の形成について移動床

---

2010年9月21日受付, 2010年10月27日受理

<sup>1</sup> 海岸研究室(有)

<sup>1</sup> Coastal Engineering Laboratory Co., Ltd., 301, 1-22 Wakaba, Shinjuku, Tokyo 160-0011, Japan

<sup>2</sup> 財団法人土木研究センター

<sup>2</sup> Public Works Research Center, 1-6-4 Taito, Taito, Tokyo 110-0016, Japan

模型実験により調べ、その発達機構を示した。このような急深海岸での円弧状砂州の発達には、下新川海岸の生地鼻（宇多・山本，1986）や駿河海岸北部の和田鼻（宇多・山本，1992；宇多ほか，1992）の発達と変形について考える上でも重要である。従来、このような場での海浜変形予測は困難であったが、芹沢ほか（2010）はBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル）を上記実験結果に適用することにより、3次元的地形変化の予測を初めて可能とした。一方、実例としてあげた駿河海岸では、南部から進んできた侵食に対して北端部の田尻地先において突堤が設置された後、その周辺で著しい地形変化が生じている。しかしその効果と影響は十分に検討されておらず、海岸保全上課題が残されている。こうした状況を受けて、本研究では芹沢ほか（2010）で提案したBGモデルを、円弧状砂州の周辺に突堤が設置された場合の海浜変形予測に適用し、急深海岸における突堤状構造物の設置が周辺海浜へ及ぼす影響について移動床実験結果を検証対象として考察し、ほぼ動的平衡状態にある円弧状砂州周辺における突堤状構造物の設置は周辺海岸に大きな影響をもたらすことを明らかにする。

## 2. 急深海岸における円弧状砂州の実例

駿河湾に流入する急流河川の大井川は、海岸線近くに扇状地を発達させている。この海岸扇状地の外縁に位置するのが駿河海岸である。Fig. 1は駿河海岸の陸上・海底地形を示す（宇多ほか，1992）。大井川河口北側の測線No. 44～No. 14区間では、-30、-40、-50 mの等深線は各々平行でその間隔はほぼ等しい。またこれらの等深線と陸上の5、10、20 m

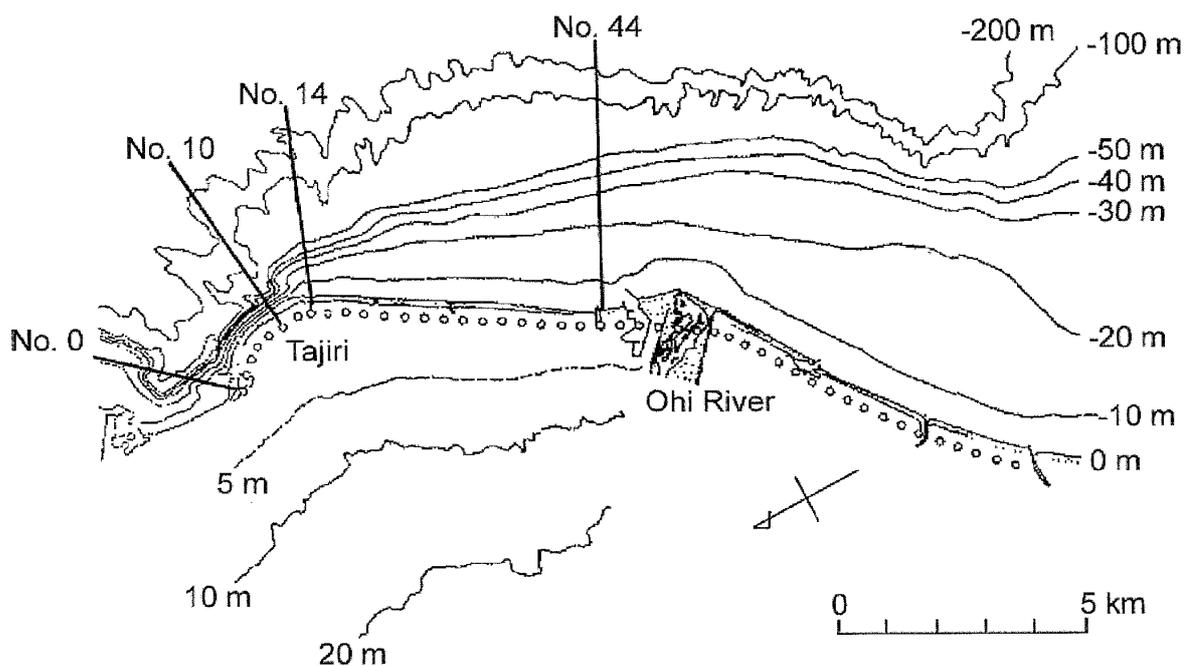


Fig. 1. Topography of Suruga coast.

の等高線もほぼ平行に延びる。しかし汀線と-10 mの等深線は、5 m以高の等高線および-30 m以深の等深線に対して斜交している。このような平行等深線・等高線地形は、海面低下期に大井川の扇状地が発達し、その後海面上昇とともに浅海域が北向きの沿岸漂砂の作用により侵食されて形成されたことを強く示唆し、No. 44付近では汀線から-10 m間の等深線が後退しNo. 14付近で突出するような地形変化が起きたことを表している。一方、田尻地先の北側に位置するNo. 10～No. 0では、汀線から-50 mの等深線間隔がNo. 44付近のそれと比較して非常に狭く急勾配で、海底谷が海岸線近傍まで迫っている。このような地形は大井川河口から北向きの沿岸漂砂によって運ばれた砂が堆積して形成されたものであるが、北端部で海底勾配が1/5と非常に急な点は、深海への土砂落ち込みが起きていることを示唆する。また北端部の急深な海底谷の陸側汀線はほぼ円弧で近似される。

駿河海岸では、大井川上流部におけるダム建設と河道からの骨材採取に伴って生じた河口からの流出土砂量の減少、および河口北側に隣接して大井川港の防波堤が伸ばされて北向きの沿岸漂砂が阻止されたことに起因して侵食が進んできた(宇多, 1997)。大井川からの土砂供給量が激減する一方、約 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の北向き沿岸漂砂によって運ばれた土砂は北端の急勾配部分を経て深海へと落ち込んでいるため、海岸の土砂収支が失われ侵食が徐々に進んできた。侵食域の広がりと同時に、侵食対策も南部から北部へと行われたため、侵食域も北側へと移ってきた。Fig. 2は、海岸線の曲率が大きく変化する田尻地先の空中写真(2006年5月21日撮影)を示す。離岸堤群の北側に突堤が造られているが、この突堤の南側では突堤による沿岸漂砂の阻止により波向とほぼ直角な汀線が形成される一



Fig. 2. Aerial photograph of Tajiri Region of Suruga coast (May 21, 2006).

方、突堤北側では汀線がフック状に大きく後退している。突堤の南北両側に点 A, B を定めて海岸線への法線方向を求めると  $N 131^{\circ}E$  (A),  $N 89^{\circ}E$  (B) となり、わずか 650 m 離れた 2 地点で汀線方向が  $42^{\circ}$  も変化している。突堤の南側にほぼ安定な汀線が形成されている点は、この海岸への卓越波の入射方向がほぼ点 A での法線方向であることを示す。この場合同じ卓越波が作用すると点 B では汀線への法線に対して右斜めに  $42^{\circ}$  と大きな角度で時計回りの方向から入射することとなり、結果として著しい北向きの沿岸漂砂を発達させる。このような条件のもとで沿岸漂砂の均衡が失われて侵食が進む場合、その影響は急速に広がり、また変形も著しい。これとほぼ同様な地形条件で侵食が著しく進んだ海岸には清水海岸の例がある (Uda, 2010)。この種の地形条件下で従来から侵食対策に用いられてきた突堤などの施設の建設は Fig. 2 に示したようにその周辺での海浜変形を助長する面があることから、海浜変形の機構解明と影響予測を十分行うことが必要とされる。海岸線曲率が大きい海岸での海浜変形予測として、宇多ほか (2009) は清水海岸を対象として展開座標を用いた検討を行ったが、デカルト座標での検討は波の場の大きな変化を伴うため従来困難であった。本研究では、まず移動床模型実験により現象を調べるとともに、実験結果を検証材料として芹沢ほか (2010) の BG モデルを適用することにより、デカルト座標を用いた海岸線急変部における海浜変形予測を行った。

### 3. 円弧状砂州の発達に関する模型実験

芹沢ほか (2010) は、宇多・山本 (1992) による幅 16 m、長さ 21 m の平面水槽を用いて行われた円弧状砂州の発達に関する移動床模型実験の結果を 4. で述べる BG モデルの検証材料として用いた。本研究でも自然状態での円弧状砂州の形成についてはこれと同じデータを用いる。この場合の模型海浜材料には中央粒径  $0.28 \text{ mm}$  の砂が用いられ、水槽中央より右側には砂の供給源を造る一方、左側には  $1/5$  の急勾配海岸を造った上で、左向きの沿岸漂砂により砂が下手側へと運ばれる条件とされた。初期汀線への法線と波の入射方向とのなす角は沿岸漂砂が十分発達する条件として  $20^{\circ}$  が選ばれた。また砂の供給源となる海浜の高さは水面上  $10 \text{ cm}$  とした。実験波は換算沖波波高が  $H_0' = 4.6 \text{ cm}$ 、周期が  $T = 1.27 \text{ s}$  の規則波、作用時間は 8 時間であった。Fig. 3 a, 3 b は初期形状と造波開始 8 時間後の海浜形状を示す。なお、Fig. 3 a には造波開始直後に測定した碎波点 (矢印の先端)、碎波波高 (矢印の大きさ) および入射方向 (矢印の向き) を示す。砂の堆積域の水深が大きいため砂が急勾配をなして堆積し、8 時間後には海岸線急変部に円弧状砂州が形成された。

宇多ほか (1992) は、上記実験結果に加え、波浪条件を同一に保ちつつ Fig. 2 に見られたと同様円弧状砂州の上手端に突堤を設置して左向きの沿岸漂砂を阻止した場合の海浜変形を調べている。自然状態で 8 時間の波の作用で形成された海浜 (Fig. 3 b) において、突堤を設置しさらに 8 時間波を作用させた結果を Fig. 3 c に示す。突堤により沿岸漂砂が阻止された結果、突堤上手側では砂が堆積して等深線が前進して汀線付近の海底勾配が増す



一方、突堤下手側では浅海域の等深線が大きく後退し侵食緩斜面が形成されている。突堤設置後の汀線の時間的变化を Fig. 4 に示す。突堤を境に汀線が不連続となり、とくに突堤下手側では当初凸状であった汀線が時間経過とともに凹状となったこと、また突堤下手では著しい汀線の後退が起きたことが分かる。汀線の変化状況は Fig. 2 の田尻地先での汀線変化の特長とよく一致している。さらに Fig. 3c に示す突堤周辺の4測線における縦断形変化を Fig. 5 に示す。突堤上手側の A-A' では堆積が起こり平坦面の沖端付近まで砂が堆積し、汀線から -10 cm まで 1/8 のほぼ一様勾配斜面が沖合の 1/5 勾配の急斜面に繋がっている。一方、突堤下手側では縦断形の後退が見られるが、とくに C-C' では砂が急深海岸に堆積して形成された 1/7 勾配の急斜面が大きく削られ侵食緩斜面が形成された。

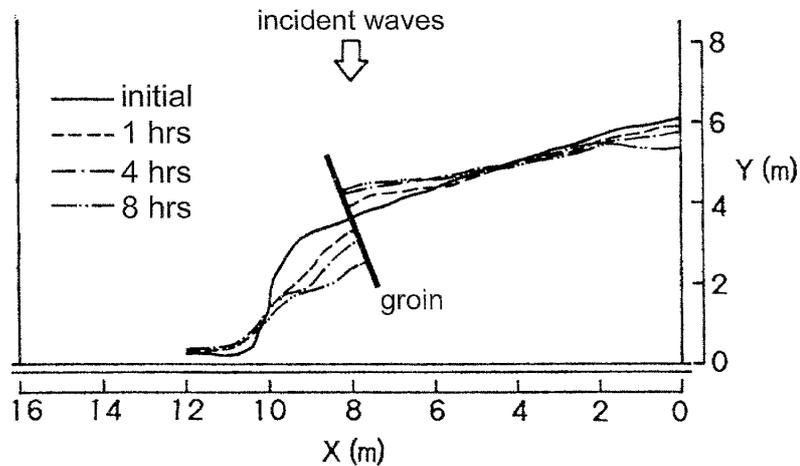


Fig. 4. Shoreline changes around a groin in experiment.

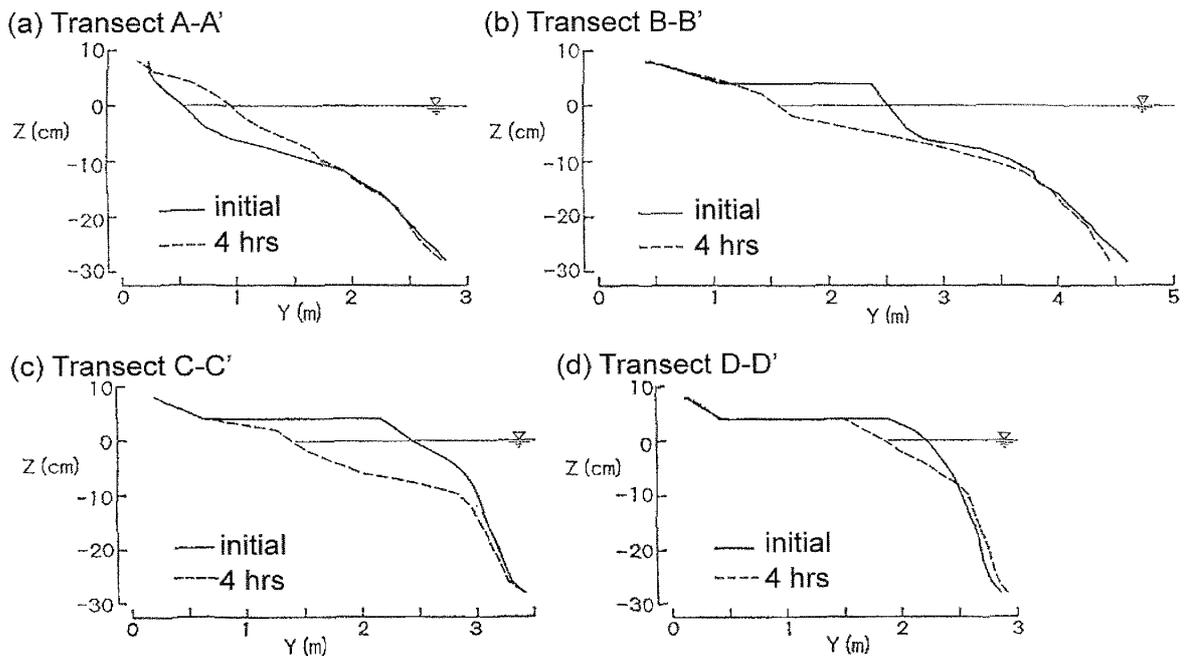


Fig. 5. Change in longitudinal profiles along four transects.

## 4. 予測モデル

芹沢ほか (2010) の BG モデルをもとに地形変化予測を行った。計算の基本式には、碎波波高の沿岸方向勾配に起因する沿岸漂砂量を考慮するための Ozasa and Brampton (1980) 項を付加した式 (1) を用いた。

$$\vec{q} = C_0 \frac{P}{\tan \beta_c} \left\{ \begin{array}{l} K_n (\tan \beta_c \vec{e}_w - |\cos \alpha| \vec{\nabla} Z) \\ + \left\{ (K_s - K_n) \sin \alpha - \frac{K_2}{\tan \bar{\beta}} \frac{\partial H}{\partial s} \right\} \tan \beta \vec{e}_s \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$(-h_c \leq Z \leq h_R)$$

$$P = \rho u_m^3 \quad (2)$$

$$u_m = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (3)$$

ここに、 $\vec{q} = (q_x, q_y)$  はネットの砂輸送フラックス、 $Z(x, y, t)$  は地盤高、 $n$  および  $s$  は等深線直角方向 (岸向き) および平行方向に取った局所座標、 $\vec{\nabla} Z = (\partial Z / \partial x, \partial Z / \partial y)$  は地形の勾配ベクトル、 $\vec{e}_w$  は波向の単位ベクトル、 $\vec{e}_s$  は等深線平行方向の単位ベクトル、 $\alpha$  は波向と等深線直角方向のなす角、 $\tan \beta = |\vec{\nabla} Z|$  は海底勾配、 $\tan \beta_c$  は平衡勾配、 $\tan \beta \vec{e}_s = (-\partial Z / \partial y, \partial Z / \partial x)$ 、 $K_s$ 、 $K_n$  はそれぞれ沿岸・岸沖漂砂量係数、 $K_2$  は Ozasa and Brampton 項の係数、 $\partial H / \partial s = \vec{e}_s \cdot \vec{\nabla} H$  は等深線平行方向に測った波高  $H$  の勾配、 $\tan \bar{\beta}$  は碎波帯の代表海底勾配である。また  $C_0$  は水中重量表示から体積表示への換算係数 ( $C_0 = 1 / \{(\rho_s - \rho)g(1 - p)\}$ ;  $\rho$  は海水の比重、 $\rho_s$  は砂の比重、 $p$  は砂の空隙率、 $g$  は重力加速度)、 $u_m$  は波の底面振動流速、 $h$  は水深、 $h_c$  は波による地形変化の限界水深、 $h_R$  はバーム高である。

波浪場の計算には、不規則波の方向スペクトル  $D(f, \theta)$  (周波数  $f$  と波向  $\theta$  に関する波エネルギー分布密度関数) を変数とする、Mase (2001) によるエネルギー平衡方程式の数値計算法を用いた (芹沢・宇多, 2010)。この方法は、波の屈折・碎波・遮蔽域での波浪減衰などを比較的小さな計算負荷で計算可能なモデルである。波の打ち上げ領域での波浪場の計算には、芹沢ほか (2010) と同様仮想水深を設定し、仮想水深  $h'$  を式 (4) で与えた。

$$h' = \left( \frac{h_R - Z}{h_R + h_0} \right) h_0 \quad (-h_0 \leq Z \leq h_R) \quad (4)$$

バーム高より標高の高い地点では波エネルギーを 0 とおいた。本研究では、地形変化に応じた波浪場変化のフィードバック計算を多数回繰り返すために、計算負荷が大きくならないよう実験での規則波を不規則波と見なしてエネルギー平衡方程式法を用いて波浪場を算出した。また波浪場は地形変化計算 10 ステップごとに計算し直した。さらに計算の便宜

上, 宇多・山本の砂嘴形成に関する実験模型の100倍スケールを対象とし, 計算結果を1/100に縮小して図化した. 初期形状は実験と同様とし, 入射波は $H_i=4.6$  m,  $T=12.7$  s, 波向は初期汀線に対して $20^\circ$ の斜め入射とした. また波による地形変化の限界水深は, 任意点の波高を $H$ として $h_c=2.5H$ で与えた. バーム高は5 m, 砂の平衡勾配は実験結果に基づいて1/5, 安息勾配は1/2とした. 計算は沿岸方向, 岸沖方向に20 m間隔のメッシュで分割し,  $\Delta t=1 \times 10^{-3}$  hrの時間間隔で80時間 ( $8 \times 10^4$  steps)まで計算を行った. 詳細な計算条件をTable 1に示す.

**Table 1.** Calculation conditions.

Wave conditions	Incident waves: $H_i=4.6$ m (4.6 cm), $T=12.7$ s (1.27s), wave direction $\theta_i=20^\circ$ relative to normal to initial shoreline
Berm height	$h_R=5$ m (5 cm)
Depth of closure	$h_c=2.5H$ ( $H$ : wave height)
Equilibrium slope	$\tan \beta_c=1/5$
Angle of repose slope	$\tan \beta_g=1/2$
Coefficients of sand transport	Coefficient of longshore sand transport $K_s=0.045$ Coefficient of Ozasa and Brampton (1980) term $K_2=1.62K_s$ Coefficient of cross-shore sand transport $K_n=0.1K_s$
Mesh size	$\Delta x=\Delta y=20$ m
Time intervals	$\Delta t=0.001$ hr (0.0001 hr)
Duration of calculation	80 hrs ( $8 \times 10^4$ steps) (8 hrs)
Boundary conditions	Shoreward and landward ends: $q_x=0$ , right and left boundaries: $q_y=0$
Calculation of wave field	Energy balance equation (Mase, 2001) <ul style="list-style-type: none"> <li>· Term of wave dissipation due to wave breaking: Dally et al. (1984) model</li> <li>· Wave spectrum of incident waves: directional wave spectrum density obtained by Goda (1985)</li> <li>· Total number of frequency components <math>N_F=1</math> and number of directional subdivisions <math>N_\theta=8</math></li> <li>· Directional spreading parameter <math>S_{\max}=75</math></li> <li>· Coefficient of wave breaking <math>K=0.17</math> and <math>\Gamma=0.3</math></li> <li>· Minimum water depth <math>h_0=2</math> m (2 cm)</li> <li>· Imaginary depth between minimum depth <math>h_0</math> and berm height <math>h_R</math></li> <li>· Wave energy =0 where <math>Z \geq h_R</math></li> <li>· Lower limit of h in terms of wave decay due to breaking <math>\Phi: 0.7</math> m (0.7 cm)</li> </ul>
Remarks	Numbers in parentheses show experimental values. Space and time scales in the calculation are 100- and 10-fold those in the experiment, respectively.

## 5. 円弧状砂州における沿岸漂砂の阻止の影響検討

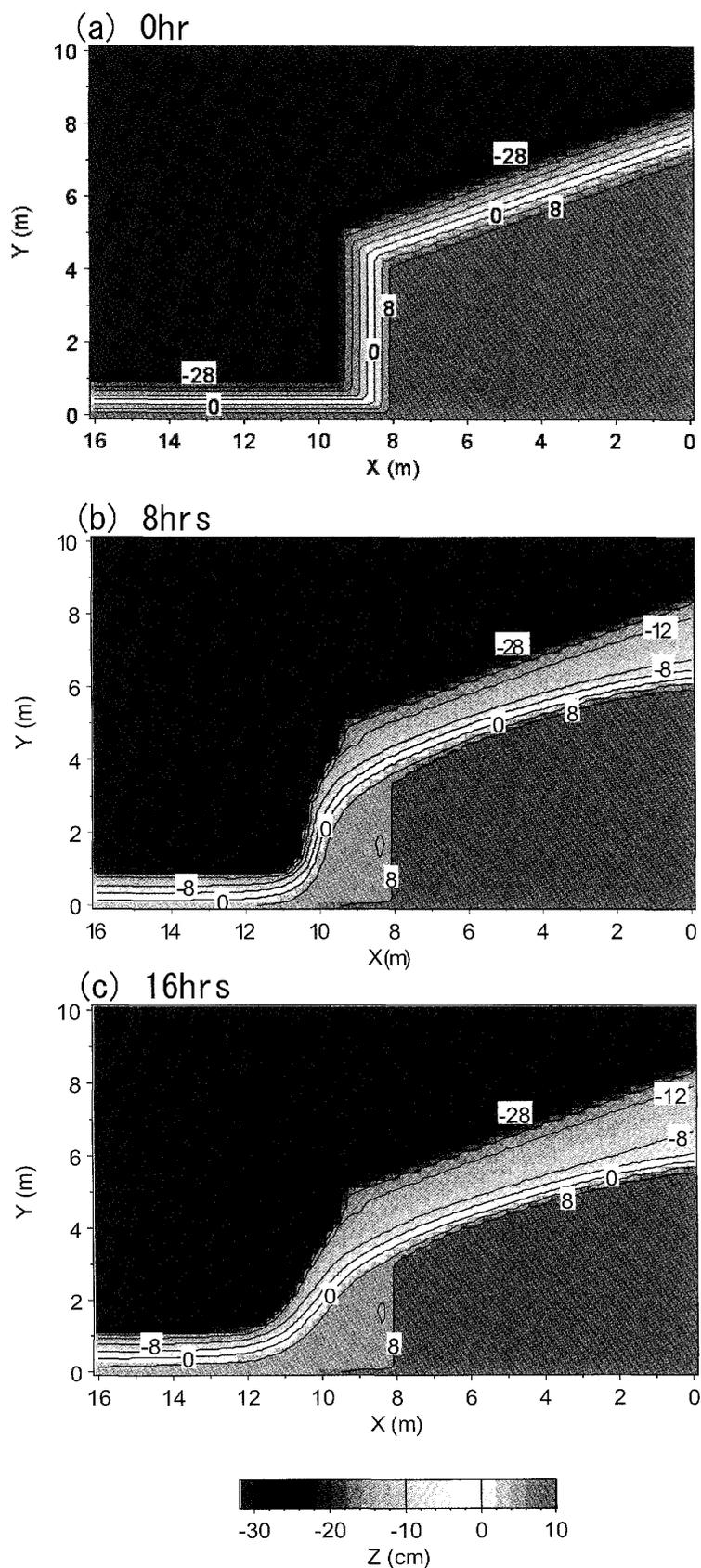
Fig. 6 は、実験と同一条件を与えて計算した急深海岸での円弧状砂州の発達予測の結果を示す。初期に海岸線急変部で平行に延びていた等深線が波の作用とともに変化し8時間後には等深線が円弧状に突出した。さらに波を8時間作用させると、円弧状の砂の堆積域の下手端付近に形成されていた等深線のくびれが消失し、沿岸方向の等深線勾配が緩くなった (Fig. 6 c)。一方、砂の供給源側では侵食されて平坦面が残された。

次に実験と同様に、Fig. 6 b の8時間後の地形において Fig. 7 a のように  $X = 8 \text{ m}$  に突堤を設置し、その後8時間波を作用させた場合の予測結果を Fig. 7 b に示す。ここに突堤は不透過の壁体として与えた。突堤が沿岸漂砂を阻止するため上手側では砂が堆積し沖合の急斜面と連続的に繋がる急斜面が形成された。これに対して突堤のすぐ下手側の海岸線曲率が大きく、沿岸漂砂量が多い場所で沿岸漂砂が遮断されるため、汀線が大きく後退し侵食緩斜面が形成された。これらの特長は Fig. 3 c の実験結果をよく説明している。

Fig. 8 は初期から8時間まで2時間間隔での汀線変化の予測結果と、初期および8時間後の実験結果を示す。計算では突堤未設置の状態での8時間波を作用させ、この条件で形成された初期地形に突堤を配置して地形変化予測を行った。この場合、計算による突堤未設置状態での汀線変化量は実験結果と比べてやや過小となったため、計算の開始時点で実験・計算の汀線形状には差異が残された。このため実験・計算の0, 8時間後両者の値を示し、それらの変化に注目した。Fig. 8 によれば突堤上手側での予測・実測汀線の変化状況はほぼ一致している。同様に下手側でも汀線が凹状に後退していく状況についても実験と計算でよい一致を示す。Fig. 9 は、Fig. 3 に示す4測線の実験・計算による縦断形変化を示す。突堤上手側の測線 A-A' では縦断形の一致度はあまり高くないが、突堤下手側の3測線ではいずれも実験と計算は高精度で一致している。

Fig. 10 は、自然状態と突堤を設置した場合における初期からの地形変化量の差、および8時間の波作用後における自然状態と突堤を設置した場合の地形の差を示す。自然状態では  $X = 8 \text{ m}$  より右側で著しい侵食が起き、そこから沿岸漂砂によって運ばれた砂が海岸線の隅角部付近に大量に堆積するという変化である。これに対し突堤が設置されると突堤上手側では砂が堆積し、汀線が安定化に向かうため上手端付近での侵食量も大きく低減する。しかし対照的に突堤の直下手の侵食は激化する一方、 $X = 11 \text{ m}$  付近での堆積量は減少している。このように突堤の設置は、その上手・下手に集中的な堆積・侵食を引き起こすことが分かる。

Fig. 10 に明らかなように円弧状砂州部分では左向きの沿岸漂砂が連続的に流れており、汀線は動的意味で保持されている。これが静的安定に近い海岸線（例えばポケットビーチなど）と根本的意味で異なる点である。このため強い沿岸漂砂を遮断する施設が造られた場合、その下手側では著しい侵食が起こる。また突堤の上手側では沖合の緩斜面上に砂が堆積して海底勾配が急になるにしたがい沖への土砂損失を招きやすくなる。例えば Fig. 9



**Fig. 6.** Results of numerical simulation on development of cusped foreland on a coast with abrupt change in coastline orientation.

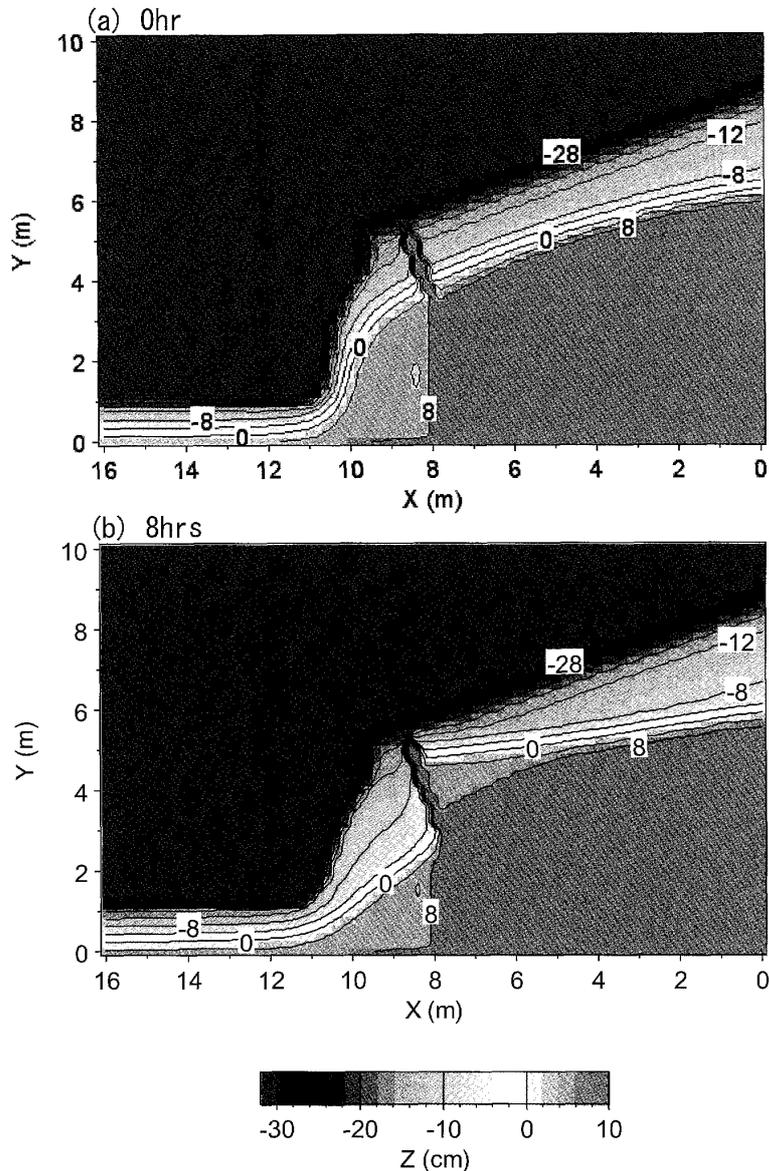


Fig. 7. Results of numerical simulation on deformation of cusped foreland on a coast with a groin.

に示した A-A' 断面における計算結果によれば、初期状態で  $-10\text{ cm}$  付近の勾配は  $1/20$  であったが、4 時間後には汀線から続く  $1/5$  の急な一様勾配斜面となり、縦断形は深海部へと連続している。縦断形における平衡勾配は粒径に対応し、粗な粒径では大きく細い粒径では小さくなること（熊田ほか，2003）を考慮すると、Fig. 9 に示す突堤上手の A-A' 断面では海底勾配が急になったことから、細い粒径成分は安定性を失い急勾配斜面を経て深海へと落ち込みやすい条件が造り出されていることが分かる。実際、この原理に基づく細砂の深海への落ち込み・損失は清水海岸の L 突堤の下手側で観測された（宇多ほか，2009）。

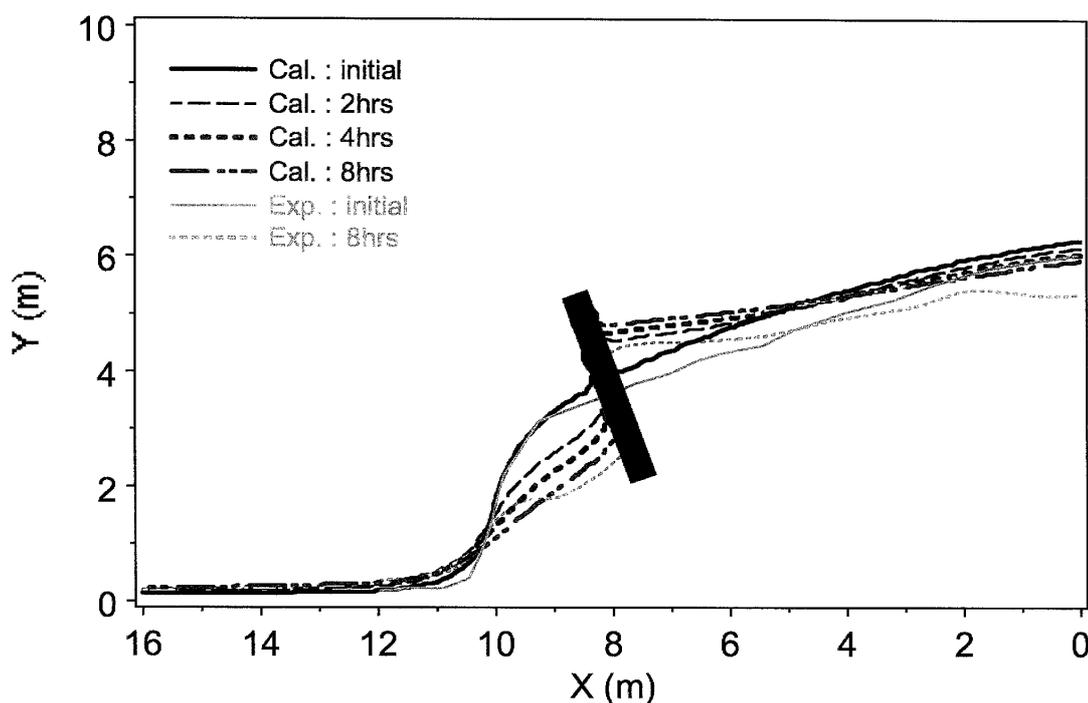


Fig. 8. Shoreline changes around a groin in numerical simulation.

## 6. 結 論

芹沢ほか (2010) で提案した BG モデルを、宇多ほか (1992) が示した急勾配海岸における円弧状砂州の形成とそこに突堤が設置された場合の海浜変形予測に応用した。この結果、数値計算により実験結果を定量的に再現できた。また急勾配海岸で海岸線の方向が急変する海岸に形成された円弧状砂州では、沿岸漂砂が常時流れつつ汀線が均衡を保っており、したがってこれに突堤を延ばすと漂砂バランスが大きく崩れ、著しい海浜変形が生じることが定量的に明らかにされた。

## 謝 辞

本研究においては、計算結果の図化やデータ整理に海岸研究室 (有) の宮原志帆さんに手伝っていただいた。ここに記して謝意を表します。

## 引 用 文 献

- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984) A model for breaker decay on beaches: Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, 82-97.  
 Goda, Y. (1985) *Random Seas and Design of Maritime Structures*: University of Tokyo Press, Tokyo, 323p.  
 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男 (2003) 混合砂による養浜時縦断形予測モデル: 土木学会

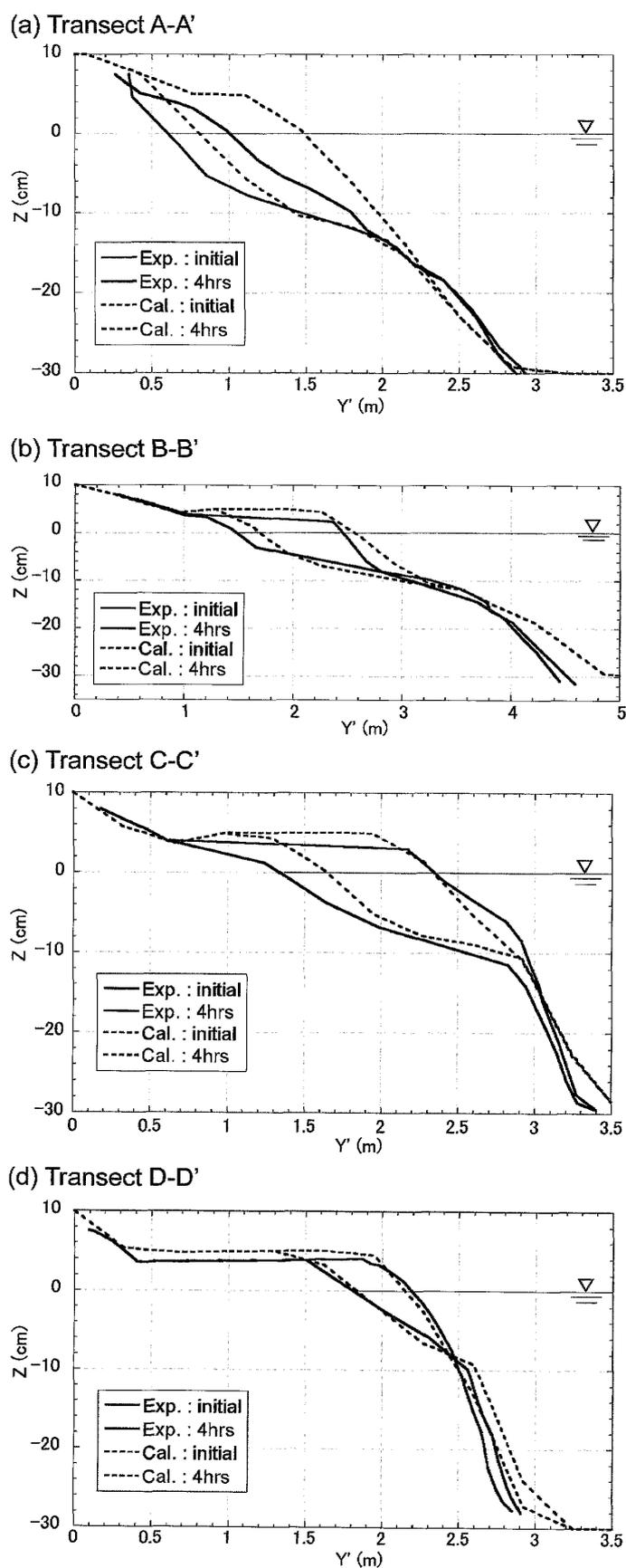


Fig. 9. Longitudinal profiles (experiment vs. numerical simulation).

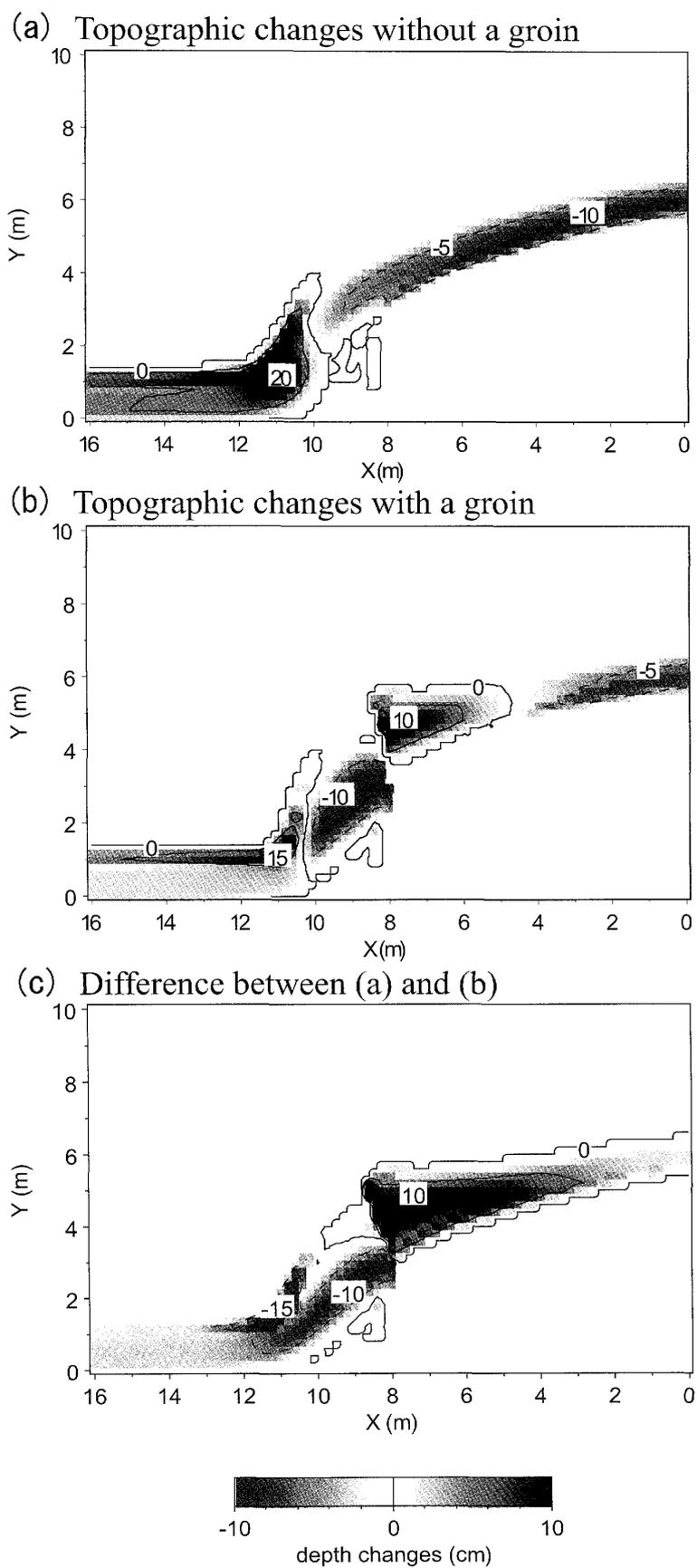


Fig. 10. Topographic changes with/without a groin.

- 海岸工学論文集, 50, 596-600.
- Mase, H. (2001) Multidirectional random wave transformation model based on energy balance equation: *Coastal Eng. J.*, 43, 317-337.
- Ozasa, H. and Brampton, A. H. (1980) Model for predicting the shoreline evolution of beaches backed by seawalls: *Coastal Eng.*, 4, 47-64.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・横澤 綾 (2010) 海岸線が急変する場での砂嘴の発達予測: *地形*, 31, 403-422.
- 宇多高明・山本幸次 (1986) 湖および湾内に発達する砂嘴地形の変形特性: *地形*, 7, 1-22.
- 宇多高明・山本幸次 (1992) 砂嘴形成海域の海底地形と砂嘴形態の関係について: *地形*, 13, 141-157.
- 宇多高明・山本幸次・佐口光明・片岡賢一 (1992) 砂嘴地形の安定化工法に関する実験的検討 - 駿河海岸の和田鼻砂嘴を例として - : *土木学会海岸工学論文集*, 39, 466-470.
- 宇多高明 (1997) 日本の海岸侵食. 山海堂, 442 p.
- 宇多高明・大橋則和・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲・宮原志帆 (2009) 清水海岸北部の侵食実態とその再現: *土木学会海岸工学論文集*, 56, 641-645.
- Uda, T. (2010) *Japan's Beach Erosion: Reality and Future Measures*: World Scientific, Singapore, 418p.