

浅海平坦面上における砂嘴の発達予測

MODEL FOR PREDICTING FORMATION OF SAND SPIT ON FLAT SHALLOW SEABED

芹沢真澄¹・宇多高明²・三波俊郎³・古池 鋼³・石川仁憲⁴

宮原志帆³・横澤 綾³・湖内真帆³

Masumi SERIZAWA, Takaaki UDA, Toshiro SAN-NAMI, Kou FURUIKE, Toshinori ISHIKAWA,
Shiho MIYAHARA, Aya YOKOSAWA and Maho KONAI

¹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)

²正会員 工博 (財) 土木研究センター常務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 東京都台東区台東1-6-4カカレビル)

³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)

⁴正会員 工修 (財) 土木研究センターなごさ総合研究室 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4カカレビル)

The formation of a sand spit elongating in the flat shallow sea was investigated using the BG model proposed by Serizawa *et al.* The experimental results of the elongation of a sand spit in the shallow sea, and the formation of a barrier and enclosed lagoon behind the barrier provided by Uda and Yamamoto (1992) were used for the validation of the model. The predicted and measured topography of a sand spit, which was formed along the marginal line between the flat shallow sea and offshore steep slope, were in good agreement. The BG model can be successfully applied for predicting the formation of sand spit.

Key Words: Sand spit, predictive model, BG model, shallow sea, lagoon

1. まえがき

極浅海域では波の作用でしばしば砂嘴が伸びる。宇多・山本¹⁾は、浅海平坦面へと沿岸漂砂が供給される場合、その外縁線に沿って砂が堆積し細長い砂嘴が発達することを移動床平面実験により明らかにした。極浅海域における砂嘴の伸長機構を理解することは、浅海平坦面上に発達した砂嘴地形(例えば、根室湾における野付崎や、宮津湾における天の橋立など)の保全を考える上で重要なことである。宇多・山本¹⁾の研究は興味深い結果を与えてはいるが、実験的研究であって砂嘴発達の物理機構を十分には説明していない。本研究では、芹沢ら²⁾の BG モデル(Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル)を上記実験結果に適用し、実験と同様な地形変化の予測が可能なることを通じて、砂嘴の形成に関して十分な理論的裏付けを有する地形変化予測モデルを構築した。

2. 浅海平坦面上における砂嘴の発達に関する模型実験

宇多・山本¹⁾の砂嘴形成に関する移動床模型実験は、幅16m、長さ21mの平面水槽を用いて行われた。模型海浜は中央粒径0.28mmの砂を用いて整形し、水

槽中央より右側には砂の供給源を造り、そこから左向きの沿岸漂砂により砂が下手側へと運ばれる条件が設定された。一方、水槽中央より左半分には水深5cmの浅海平坦面を、5cm以深では1/5勾配で急に落ち込む海底面を造った。初期汀線と波の入射方向とのなす角は20°とし、沿岸漂砂が十分発達する条件とした。また砂の供給源では、陸上の平坦面の高さを10cmとした。実験では $H_0' = 4.6\text{cm}$ 、 $T = 1.27\text{s}$ の波を8時間作用させた。

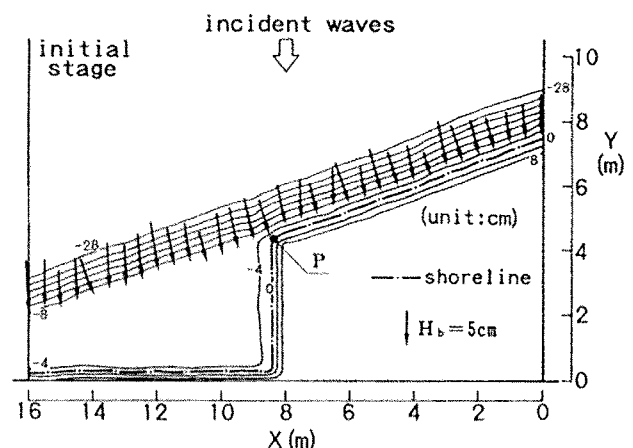


図-1 初期海浜形状と碎波波高の沿岸方向分布

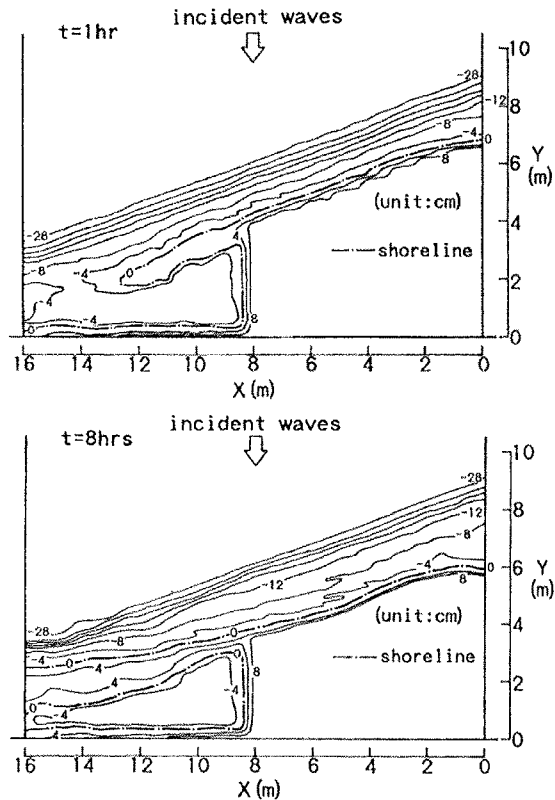


図-2 造波開始後1, 8時間後の海浜形状

図-1は初期海浜形状と碎波波高の沿岸方向分布を示す。模型に沖合から波が作用すると浅海平坦面の外縁付近で碎波が起こり、波は浅海平坦面上で急減衰し、その奥まで波のエネルギーが到達できなくなる。このため浅海平坦面の外縁付近に砂が急速に堆積し砂嘴が伸びる。砂の供給源から沿岸漂砂により砂が供給され続けるため砂嘴は発達を続ける。図-2はそれぞれ造波開始後1, 8時間後の海浜形状を示す。砂の供給源と浅海平坦面の境界の汀線が急角度で折れているためその境界から砂嘴が伸び、時間経過とともに砂嘴が発達し、8時間後では左境界壁まで砂嘴が到達しバリアーが形成された。また上手側から供給された砂の堆積が続くためバリアーの幅が左境界から上手方向へと広がった。このように砂嘴が伸張し、バリアーが形成される過程を検証データとしてBGモデルの適用を行った。

3. 予測モデル

計算には、芹沢ら²⁾のBGモデルを用いた。基本式は新たに小笹・Brampton項を付加した式(1)~(3)である。

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

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

表-1 計算条件

波浪条件	入射波： $H_I=4.6\text{m}$ (4.6cm)， $T=12.7\text{s}$ (1.27s)，波向：初期汀線に対して $\theta_I=20^\circ$
バーム高	$h_R=5\text{m}$ (5cm)
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	$\tan \beta_c=1/5$
安息勾配	$\tan \beta_g=1/2$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_s=0.045$ 小笹・Brampton項の漂砂量係数 $K_2=1.62 K_s$ ，岸沖漂砂量係数 $K_n=0.1 K_s$
計算メッシュ	$\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t=0.002\text{hr}$ (0.02 hr)
計算時間	80hrs (4×10^4 steps) (8hrs)
境界条件	岸沖端： $q_x=0$ ，左右端： $q_y=0$
波浪場の計算法	エネルギー平衡方程式 (間瀬ほか ³⁾) (碎波減衰項：Dallyほか ⁵⁾ のモデル) ・入射波スペクトル：光易型方向関数 ⁶⁾ ・周波数分割数 $N_f=1$ ・方向分割数 $N_\theta=8$ ・方向集中度 $S_{max}=75$ ・碎波係数： $K=0.17$ ， $\Gamma=0.3$ ・最小水深 $h_0=2\text{m}$ (2cm) ・最小水深 h_0 バーム高の範囲に仮想水深を設定 ・地盤高 $Z \geq$ バーム高 h_R の地点エネルギーを0とおく。
備考	()内は実験の数値，計算は実験模型の100倍スケール (時間スケールはフルード則より10倍)

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

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

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、 α 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 は小笹・Brampton項の係数、 $\partial H / \partial s = \vec{e}_s \cdot \vec{\nabla} Z$ は等深線平行方向に測った波高 H の勾配、 $\tan \beta$ 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 ($C_0 = 1 / \{(\rho_s - \rho)g(1-p)\}$ 、 ρ は海水の比重、 ρ_s は砂の比重、 p は砂の空隙率、 h は水深、 g は重力加速度)、

u_m は波の底面振動流速（ $u_m = H/2\sqrt{g/h}$ ， H は波高）， 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。

波浪場の計算は間瀬ら³⁾のエネルギー平衡方程式の数値計算方法を用いた。陸上部には芹沢・宇多²⁾と同様仮想水深を想定し，式(4)のように最小水深 h_0 からバーム高まで，仮想水深 h' を持たせて波浪計算を行った。またバーム高より標高の高い地点ではエネルギーを0とおく。波浪場は地形変化計算10ステップごとに計算し直した。

$$h' = \left(\frac{h_R - Z}{h_R + h_0} \right)^r h_0 \quad (r=1) \quad (-h_0 \leq Z \leq h_R) \quad (4)$$

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た。そして計算結果を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 $H=4.6\text{m}$ ， $T=12.7\text{s}$ ，波向は初期汀線に対して 20° 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5m，砂の平衡勾配は実験結果に基づいて1/5，安息勾配高は1/2とした。沿岸・岸沖漂砂量係数 K_s ， K_n は試行計算より経時変化を見て決定し， K_2 はOzasaら⁴⁾が用いた値をそのまま用いた。計算は沿岸方向，岸沖方向に20m間隔のメッシュで分割し， $\Delta t=2 \times 10^{-3}\text{hr}$ の時間間隔で80時間（ 4×10^4 steps）まで計算を行った。詳細な計算条件を表-1に示す。

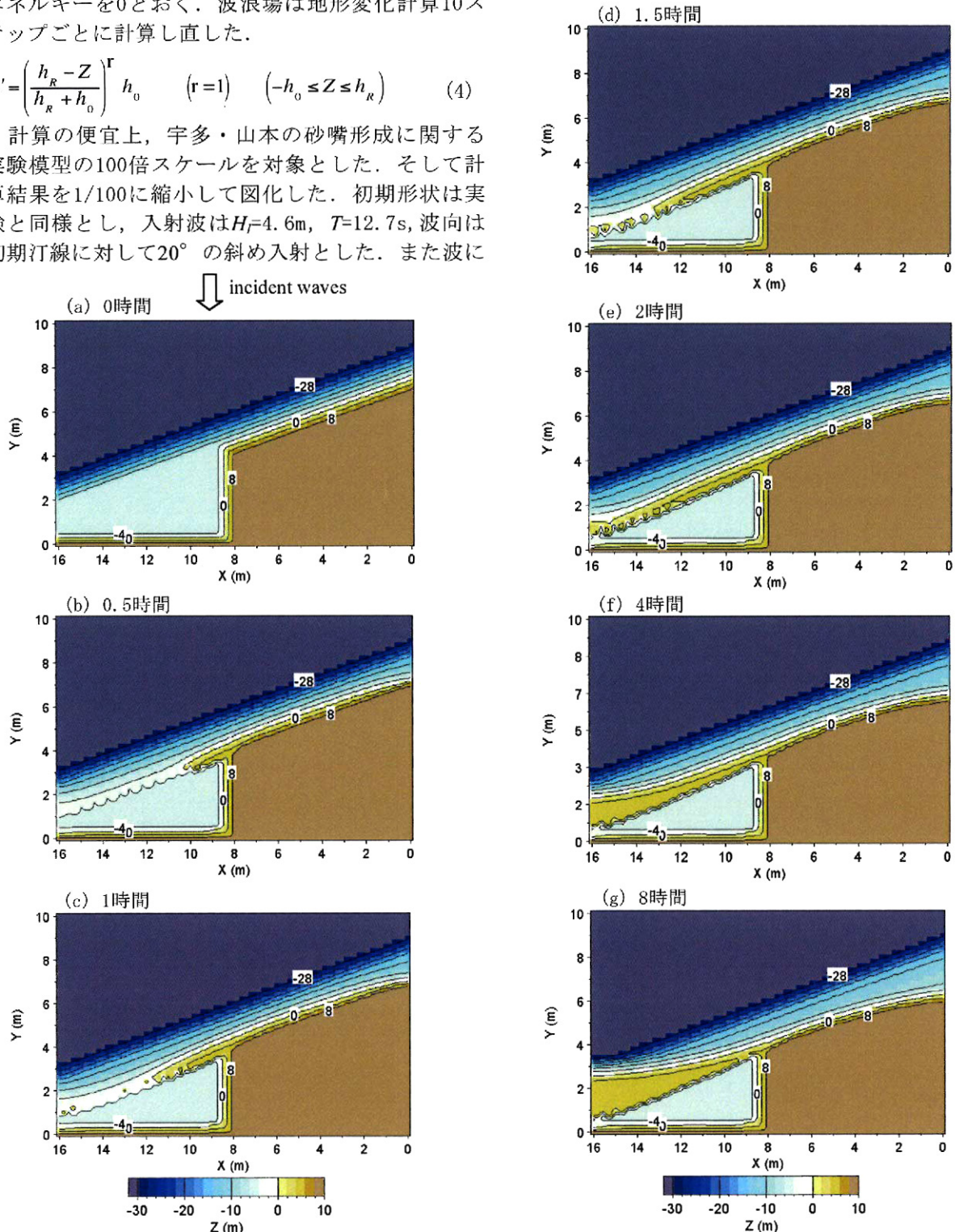


図-3 砂嘴の発達予測の結果（0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8時間後）

4. 予測計算の結果

(1) 地形変化

図-3(a)～図-3(g)は、実験と同様の条件を与えて計算した砂嘴の発達予測の結果であり、0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8時間後の計算結果を示す。地形の時間的変化を調べると、0.5時間(図-3(b))では早くも右側海浜から供給された砂が浅海平坦面の外縁付近に堆積し長さ約2m砂嘴が伸びた。同時に、浅海平坦面の外縁では海底勾配が沖合の急勾配から平坦へと急変しているため急速な岸向き漂砂が起こり、平坦面の縁には砂が堆積する一方その沖では等深線間隔が広がった。1時間(図-3(c))では、浅海平坦面の外縁に沿った砂嘴の発達が続き、砂嘴の全長が約3.5mとなった。この場合砂が浅海平坦面の外縁線付近でのみ堆積する理由は、浅海平坦面上の水深が5cmと小さく、波浪エネルギーが浅海平坦面へと侵入できないことによる。1.5時間(図-3(d))では、外縁線に沿って砂嘴が伸びるだけでなく、砂嘴先端と左境界壁の間で不連続な島状の堆積が進み、その背後のラグーンはほぼ閉じ込められた。2時間(図-3(e))では、砂嘴は左境界壁とつながってバリアーとなり、背後のラグーンは海と切り離された。2時間までの地形変化では、砂嘴は浅海平坦面の外縁線に沿って細長く直線状に伸びていたが、4時間(図-3(f))では、左境界壁による沿岸漂砂の阻止のために、境界壁の上手側に砂が堆積し、水深の大きい場所へと落ち込みつつ左境界壁に近い場所から順に上手側へと堆積域が広がった。この過程で汀線が前進し、砂嘴が左境界まで達して形成されたバリアーの幅が下端から次第に広がりを示した。8時間(図-3(g))では、左境界による沿岸漂砂の阻止の影響が上手まで大きく波及し、当初砂嘴の発達の始まった $X=9\text{m}$ 付近までバリアーの幅が広がった。

ここで同一時間における実験と計算結果の比較のために1時間後の実験結果(図-2(a))と計算結果(図-3(c))を比較すると、砂嘴先端部の位置にわずかな違いはあるものの、海岸線の変化点から浅海平坦面の外縁線に沿って細長く砂嘴が伸びる点は両者でよい一致を示す。また8時間後の実験結果(図-2(b))と計算結果(図-3(g))を比較すると、左境界壁による沿岸漂砂阻止の影響が上手側に及んでバリアーの幅が広がる状況、また右境界壁の沖合で-8cm付近に侵食緩斜面が形成される一方、陸域では浜崖の形成が進むなど、この場合も実験と計算の対応は良好である。さらに実験も計算も、バリアー背後のラグーンの汀線は初期におけるバリアー形成時の姿を保っているため、沖合の初期等深線と平行に伸びているのと対照的に、バリアーの海側汀線はこれらと斜交していることも注目される。これによれば各地のバリアーのラグーン側の汀線形状を調べれば地形変化が起こる前の沖合地形の推定がある程

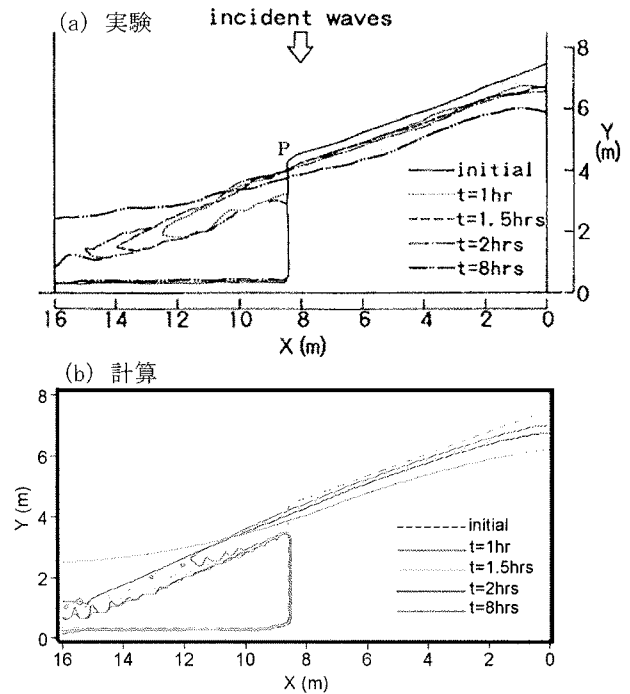


図-4 汀線比較(実験と計算)

度可能である。

(2) 汀線変化

図-4は実験と計算による汀線の比較である。計算のほうが砂嘴の伸張速度がやや小さいものの、海岸線の屈曲点Pから直線状に砂嘴が伸び、左境界壁に達したのち沿岸漂砂の阻止の影響により左境界壁から上手側へと汀線が前進する状況、さらには海岸線の屈曲点Pより上手側では初期から2時間後まで汀線はほぼ同一位置を保つが、8時間では右境界壁に近づくほど汀線後退量が大きくなる点など、計算結果は実験結果をうまく説明している。

(3) 縦断形の比較

図-5(a)～図-5(d)は、砂供給源にあって右境界壁と接する $X=0\text{m}$ 断面、浅海平坦面を横切る $X=9, 12, 14\text{m}$ 断面における縦断形変化について、実験と計算の比較を行ったものである。それぞれ同一時間における縦断形を重ねて示す。まず $X=0\text{m}$ 断面(図-5(a))では、波による地形変化の限界水深は実験と計算とも-12cmで一致しているが、浅海部の侵食量が計算ではやや過大な一方、浜崖侵食量は過小となった。しかし断面内での土砂収支はほぼ取れており、また海浜が一定勾配を保ちつつ後退していく状況はうまく計算できている。海岸線の屈曲点P近傍の $X=9\text{m}$ 断面(図-5(b))では、1時間で高さ5cmのバーム高を有する砂嘴が発達する状況は実験と計算で一致するが、砂嘴の発達位置が計算ではやや海側となった。しかし8時間後には1時間後に形成されていた砂嘴が陸側へ入り込んでバリアーとして安定的に存在しており、実験と計算でほぼ一致する。また砂嘴は急速に伸びるため浅海平坦面上では地形変化は

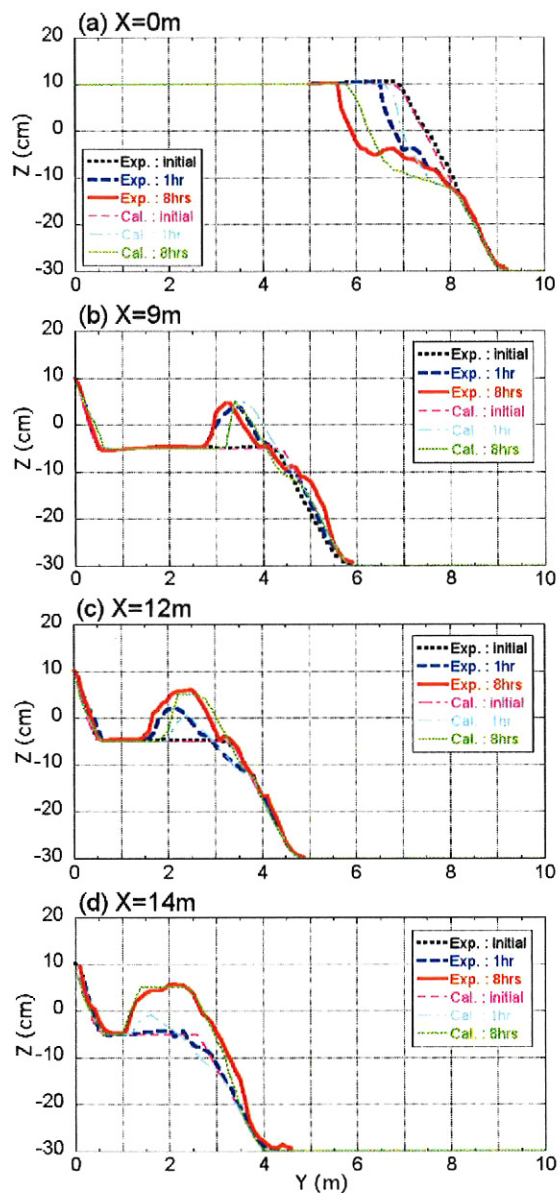


図-5 縦断形変化（実験と計算）

起こらない。同様にX=12m断面(図-5(c))では、1時間後までには砂嘴の伸張が十分でなく、バームは十分発達しない。時間経過とともにバームが発達しているが、砂州の発達位置がやや海側となった点を除けば実験と計算の一致度は高い。左境界に近いX=14m断面(図-5(d))では、1時間後までは砂州は発達していなかったが、8時間までには大量の砂が堆積し、幅1.2mのバリアーとなった。この場合砂が沖側斜面に堆積していくためその勾配が急になり、結果として重力効果により -23cm と $h_e=12\text{cm}$ の約2倍まで砂の落ち込みが生じた。

(4) 波浪場の変化

図-6(a)～図-6(e)には0, 0.5, 1, 1.5, 2時間後の波高分布を示す。砂嘴は2時間までに十分に発達するので初期状態から2時間後までの波高分布の変化を示す。初期状態では(図-6(a))、浅海平坦面上の波高はX=8mの境界線付近では突出した地形による波の

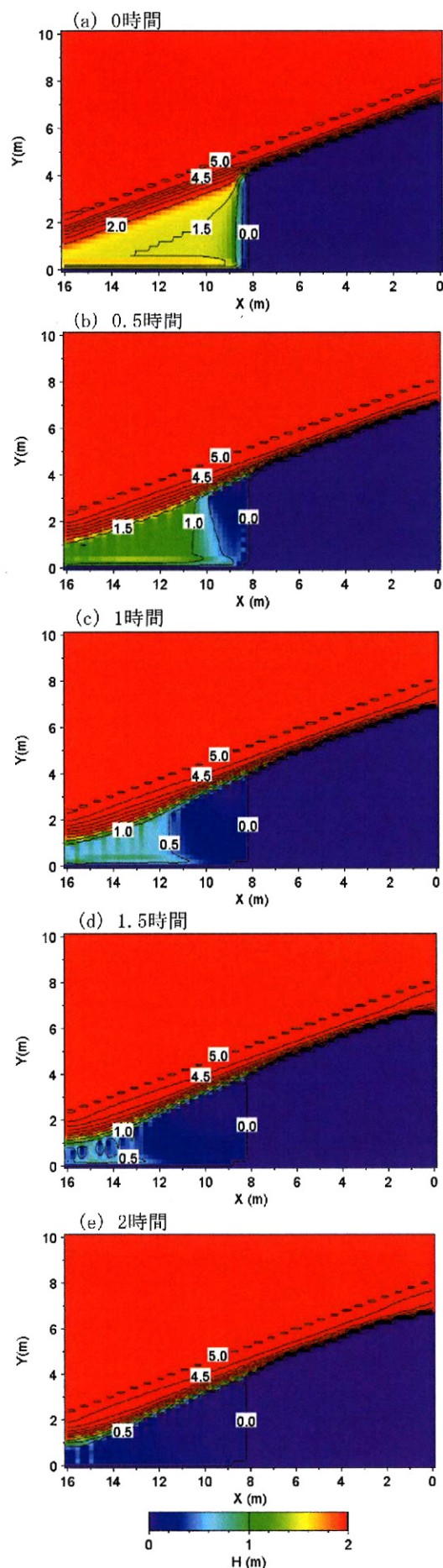


図-6 0, 0.5, 1, 1.5, 2時間後の波高分布

遮蔽を受けると同時に、浅海平坦面外縁での碎波により波高が低下する結果1.5cm程度である。0.5時間後には（図-6(b)）、砂嘴が伸び始めるためその背後では波の到達しない場所が左向きに広がり始める。1時間後では（図-6(c)）では、砂嘴背後での著しい波高低下と同時に、平坦面外縁付近における岸向き漂砂により外縁線の内側に砂が運ばれ堆積して海底地盤高が高まるため波高低下が促進される。1.5時間では（図-6(d)）、砂嘴が長く伸びるため砂嘴の陸側のほとんどの区域で波の作用が止まる。2時間後では（図-6(e)）、砂嘴が左境界壁と接続してバリアーとなり、バリアー陸側のラグーン内では波の作用が停止する。このようにバリアーの陸側のラグーンに侵入する波浪エネルギーは砂嘴の伸張とともに急激に減少するために、バリアー背後のラグーンにはバリアーの伸張後砂が運び込まれることはなく、バリアー外縁を沿岸漂砂が通過し、下手端へと急速に流れる状態となる。

5. 考察

芹沢ら²⁾は、浅海平坦面上における湾口バリアー(bay barrier)の発達に関し、宇多ら⁷⁾の実験結果を検証材料として、同じくBGモデルを用いて再現計算を行った。このbay barrierの形成実験に用いた初期海浜は、浅海平坦面を囲む海岸線が不連続点を持たずに直線状に伸びる条件であった。本研究では海岸線の方向が場所的に極端に変化する場合における浅海平坦面上における砂嘴の発達予測を行ったが、この条件では、海岸線の変化点の下手側直近に波の遮蔽域が形成されるため平坦面の外縁付近での砂嘴の伸張が急速という特徴がある。

また砂嘴が下手側の境界壁に到達するまでにバームは十分発達し、その高さが高まって越流が停止し、結果としてバリアー背後のラグーンに砂が運び込まれることがなくなる。一方、バリアーの海側斜面への堆積は次々と進むため重力効果により深海部へと安息勾配を保ちつつ砂が落ち込む。結果的にバリアーの幅は広がるものの、バリアーの広がり速度は時間経過とともに遅くなる。

宇多ら⁸⁾は、駿河湾に面した富士海岸の砂礫州の幅が西から東に向かって広がることを示し、これは砂嘴が沿岸方向に十分発達して狩野川河口まで達した後、砂嘴先端部の砂浜の幅を増すように砂嘴の堆積が進んだことに起因するとした。またこれにより富士海岸の堆積域で急な海底斜面が形成されるとともに、深い海底に非常に粒径の大きな礫が見出されたことが無理なく説明できるとした。富士海岸での深海への土砂落ち込み現象は、宇多・山本¹⁾の移動床水理模型実験でも説明されたが、本研究ではその堆積過程が数値計算により明らかにされ、またその予測も可能となった。

6. まとめ

筆者らの開発したBGモデルを、海岸線の方向が急変する場所の下手側に浅海平坦面がある場合における細長い砂嘴およびバリアーの発達予測に適用し、宇多・山本¹⁾の移動床平面実験結果を比較対象としてモデルの妥当性を調べた。この結果、計算結果は定量的意味から実験結果を再現可能なことが明らかになった。なお、この実験の砂嘴の伸張について渡辺ら⁹⁾は直交曲線座標を用いた汀線変化モデルによる再現を行ったが、本研究では砂嘴伸張後のバリアーの発達まで再現できた。従来、BGモデルは、河口砂州の発達予測¹⁰⁾、単純砂嘴の発達予測¹¹⁾や、bay barrierの発達予測²⁾に有効利用できることが明らかにされているが、本研究では海岸線の方向が急変する場所の下手側に浅海平坦面がある場合の砂嘴からバリアーへの発達予測が可能になったことから、この種の問題に対するBGモデルの適用性が一層高まったと考えられる。

参考文献

- 1) 宇多高明, 山本幸次: 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, Vol. 13, pp. 141-157, 1992.
- 2) 芹沢真澄, 宇多高明: 浅海平坦面上に発達する Bay barrier の形成予測モデル, 地形, Vol. 31, pp. 33-54, 2010.
- 3) 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, 628/II 48, pp. 177-187, 1999.
- 4) Ozasa, H. and Brampton, A. H.: Mathematical modeling of beaches backed by seawalls, Coastal Eng., Vol. 4, pp. 47-64, 1980.
- 5) Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A.: A model for breaker decay on beaches, Proc. 19th ICCE, pp. 82-97, 1984.
- 6) 合田良實: 港湾構造物の耐破設計: 鹿島出版会, pp. 303, 1990.
- 7) 宇多高明, 山本幸次, 永瀬恭一, 五十嵐竜行: バリアーの形成過程に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 551-555, 1994.
- 8) 宇多高明, 山本幸次, 張 達平: 駿河湾湾奥部に位置する富士海岸の海浜変形機構, 地形, Vol. 16, pp. 137-155, 1995.
- 9) 渡辺宗介, 芹沢真澄, 宇多高明, 小河正基: 著しく大きな海岸線曲率を持つ海岸における地形変化予測手法の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 501-505, 2002.
- 10) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼, 石川仁憲: 河口砂州復元の3次元予測モデル, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 1155-1160, 2009.
- 11) Serizawa, M., Uda, T., San-nami, T., Furuike, K. and Ishikawa, T.: Prediction of topographic changes of sand spit using BG model, Jour. Coastal Res., SI 56, pp. 1060-1064, 2009.