

海面上昇・下降時におけるバーム形状の変化予測モデル

Model for Predicting Formation of Berm during Sea Level Rise and Fall Periods

下山陽平¹・小林昭男²・宇多高明³・芹沢真澄⁴・野志保仁⁵

Youhei SHIMOYAMA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Masumi SERIZAWA and Yasuhito NOSHI

A model for predicting the formation of a berm including the back slope landward of the berm top was developed on the basis of the contour-line-change model (Serizawa et al., 2003) which solves the beach changes on the x-y plane. The validity of the model was tested by the comparison with the experimental results. The experimental and predicted changes in longitudinal profile were in good agreement. The model was further applied to predict the berm formation during the sea level rise and fall periods.

1. まえがき

各地で行われている養浜では、養浜砂の有効利用のため養浜形状の変化も含んで土砂量変化を正確に把握する必要に迫られる。しかし、一般に汀線付近にはバームが形成されるので、その部分の変形を正確に把握しないと土砂収支に狂いが生じる。また将来予想されている海面上昇では、汀線が単に平行移動するのではなく、バームが陸側にずれながら発達するという過程をたどると考えられる。このようなバームの形成に関する既往研究として、例えばLarsonら(2004)は平衡勾配概念を導入し、波崎海洋観測施設での観測結果に対し、波の観測時系列より観測断面変化を予測するモデルを開発した。また鈴木ら(2008)は、同じ波崎海岸での観測データをもとに岸沖漂砂量分布を算出し、これによりバームの陸側斜面の計算も可能なことを示した。これらはいずれも現象を物理的に忠実に表現することに主眼をおいている。一方、筆者らは海浜変形の実用的モデルの開発を進め、等深線変化モデル(芹沢ら, 2002)やBGモデル(芹沢ら, 2006)を開発し、様々な現実の問題への応用を試みてきているが、これらのモデルでは前浜勾配に対して逆勾配で落ち込むバームの陸側斜面を含めたバームの形成予測ができず、このため上記の課題に十分答えられなかった。そこで本研究では、芹沢ら(2003)のx-yメッシュで解く等深線変化モデルを基礎に、バームの形成予測の実用モデルを構築し、実験結果と比較して妥当性を確認し、その上で海面上昇・下降時におけるバームの変形予測に応用した。

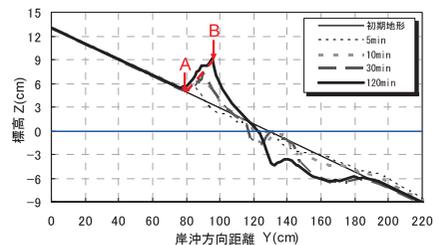


図-1 移動床模型実験におけるバームの発達状況

2. バーム形成に関する実験

バームの形成予測モデルを構築するために、まずバーム形成に関する移動床模型実験を行った。実験では中央粒径1.3mmの砂で構成された初期勾配1/10の一樣斜面に、 $H_0 = 4.0\text{cm}$, $T = 1.1\text{s}$ の波を地形が安定するまで2時間作用させた。図-1には波作用後2時間までのバームの発達状況を示す。波作用開始後5minから安定なバームが形成される2時間まで遡上限界は $Y=80\text{cm}$ と一定位置にあるが、バーム高と海浜勾配は時間経過とともに大きくなっている。また各測定時刻におけるバーム頂の陸側は一樣勾配で落ちていることが分かる。さらに実験開始直後にあっては波の遡上高をバーム高と等しいとみなして遡上点と汀線を結ぶ線の勾配を $\tan\beta$ とする一方、波作用2時間後には計測されたバーム頂と汀線を結ぶ線の勾配を $\tan\beta$ とし、さらにHunt (1959)の式を考え合わせると、式(1)の関係が得られた。

$$R = 25.5 \tan \beta - 0.5 \quad \dots\dots\dots (1)$$

3. モデルの基本

モデルの構築には芹沢ら(2003)を参照し、バームの形成を二次元問題として扱う。基礎式は岸沖漂砂量式と土砂量保存則からなる。岸沖漂砂量には、同一波浪条件での粒径毎の漂砂量の違いを考慮できるように粒径に応じた漂砂量係数 K_p を組み込んだ。岸沖漂砂の生じる範囲

1	修(工)	鹿島建設(株)
2	正会員	工博 日本大学教授理工学部海洋建築工学科
3	正会員	工博 (財)土木研究センター常務理事なぎ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
4	正会員	海岸研究室(有)
5	正会員	博(工) (有)アイコムネット

は、波による地形変化の限界水深 h_c と安定状態に達した場合のバーム高 h_R とし、漂砂強度が碎波点での波エネルギーフラックス $(EC_g)_b$ を h_c から h_R の底面長で割った単位底面長当りに換算した波エネルギー逸散量に比例すると考える。以上より岸沖漂砂量 q_y (正値が岸向き) は式(2)で表される。

$$q_y = K_y \cdot \frac{(EC_g)_b}{h_R + h_c} \cdot \sin \beta_0 \cdot \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \beta_c}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$K_y = \frac{A}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots (3)$$

また土砂量保存則は地盤高 Z を用いて式(4)で表される。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial q_y}{\partial y} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A は海浜の変形過程に応じた定数、 d は粒径(mm)を示す。 β_0 は初期断面の平均勾配角とし、 $\tan \beta$ は海浜の局所勾配、 $\tan \beta_c$ は平衡勾配を示す。なお y は岸沖距離(岸向きに正)、 t は時間を示す。数値計算は、計算領域をスタッガードメッシュで分割し、式(2)を陽形式差分法で解く。岸沖漂砂量 q_y を式(2)、(3)で算出し、これを用いて連続式(4)を解くことで水深変化量が計算される。この操作を繰り返すことによって海浜縦断面の経時変化が計算される。なお計算過程で、波の作用により堆積が進んで発達過程にあるバーム高 R を超えて地盤高が上昇する場合や、逆に侵食が進んで限界水深 h_c 以下に深まで地盤高が低下することがないように芹沢ら(2003)の構造物境界処理法を応用し、地盤高 Z が上限値(R)または下限値(h_c)に接近した場合、低減率 μ を乗じて漂砂量を低減させた。

バームの形成に関しては、芹沢ら(2003)による岸沖漂砂式(式(2))を基礎として発達過程にあるバーム高(R)の与え方を工夫した。図-1に示したバーム形成に関する移動床模型実験の結果では、バームの発達が進む過程において波の遡上点は波作用開始時の点Aから安定なバームが形成された場合の点Bまで移動しており、前浜の急勾配化が進むとともに波の遡上高も高まっている。これより①前浜勾配と発達過程にあるバームの高さ(R)は比例関係にあること、②バーム頂の陸側は前浜勾配と逆のよう勾配で落ち込むことが確認できる。計算のモデル化においては、これらの特徴を組み込んだ。

まずバームの発達過程において、各時刻におけるバーム高を決めるために、沖から岸に向かい各場所の海底勾配を与えて式(1)より R を算出し、最も陸側の R の最大値(極大値)を地形変化の上限高さとする。 R が最大値となる点より沖側では R の最大値を全点で与える。次にバーム背面の岸向きに下り勾配となる場所では、地形変化の上限高さを図-1の点BとAを結ぶ直線で与えられる高さを越えないとし、背面勾配 $\tan \beta_R$ を与えて式(5)により算出する。

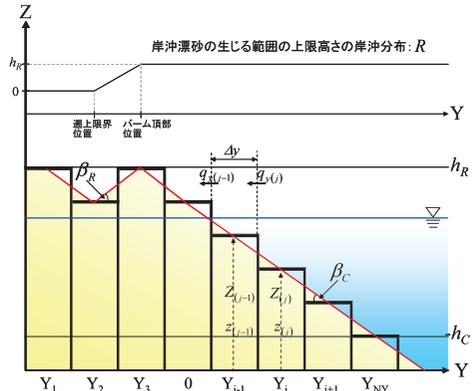


図-2 メッシュ区切り方式の模式図

$$\frac{dR_B}{dy} = -\tan \beta_R \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 R_B はバーム陸側斜面における岸沖漂砂の生じる範囲の上限高、 $\tan \beta_R$ はバームの陸側斜面の勾配を示す。

バーム背面での地形変化計算では、通常の等深線変化モデルのように深さ方向に海浜を分割するとバーム背後では等深線が2価(1つの水深値に対して2つの等深線が存在すること)となり計算できなくなる。そこで本研究では図-2に示すように鉛直方向のメッシュで分割し、各地点の標高を $Z_{(j)}$ 、メッシュ間を通過する岸沖漂砂量を $q_{y,(j)}$ とする。 j の変域は1~NYである。計算は沖から岸へ行うものとする。まず上り勾配($\partial z / \partial y > 0$)の時、すなわちバーム頂部より沖側では式(1)を用いて岸沖漂砂の発生する上限高さ R を各計算メッシュで計算する。一方、バーム頂より陸側の下り勾配($\partial z / \partial y < 0$)部分での計算では、式(5)により $\tan \beta_R$ の勾配角で一様に落とし、バーム陸側斜面で岸沖漂砂の発生する上限高さ R_B の計算を行う。ただし R_B が初期海浜地盤高以下に達した場合には岸沖漂砂を0とする。なお、海面上昇時の計算には式(1)に水位上昇量を加算して計算する。

4. 移動床模型実験と計算の比較

(1) 水位一定時のバーム形成

本研究モデルを移動床模型実験へ適用した。実験諸元は図-1に示す結果が得られたときと同様であり、計算条件は表-1に示すとおりである。なお実験スケールが小さいため計算条件を100倍にして計算した。

図-3は、実験によって得られた安定バーム形状と予測縦断面を示す。実験結果からは、 $Y=120\sim 190\text{cm}$ の範囲が侵食され、砂が岸向きに移動して前浜勾配約1/3のバームが形成された。バーム高は $Z=9\text{cm}$ に達するとともに、バーム頂部から約1/5斜面勾配で遡上限界位置 $Y=80\text{cm}$ へと低下するバームが形成された。計算でも $Y=125\sim 190\text{cm}$ が侵食され、砂が岸向きに移動して前浜勾配は約1/4となり、

表-1 模型実験再現の計算条件

計算ケース		模型実験再現
初期地形		1/10
粒径 d と平衡勾配 $\tan\beta_c$		1.3mm, 2/7
バームの陸側斜面 $\tan\beta_R$		1/5
漂砂量係数 A		0.2
交換層幅 B (m)		0.3
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	1.0
	潮位条件 $M.S.L.$ (m)	0.0
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	-6.0
	バーム高 h_R (m)	+9.0
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2
	海域	1/3
計算範囲	岸沖方向 Y (m)	0~250
	鉛直方向 Z (m)	-12~13
計算メッシュ	ΔY (m)	5.0
	ΔZ (m)	0.5
計算時間間隔 Δt (hr)		0.001
計算ステップ数		1.0×10^6 Steps

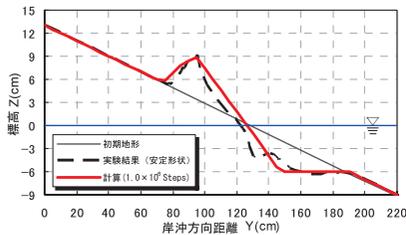


図-3 計算結果と実験結果の安定形状の比較

バーム高は $Z=9\text{cm}$ となった。またバーム頂部から約1/5斜面向配で遡上境界位置 $Y=75\text{cm}$ へと落ち込む縦断形となった。このように計算と実験はよく一致し、バーム形状や沖の侵食域の形成が精度よく再現できた。

図-4は各測定時間（10, 30, 120min）におけるバームの発達状況に関する実験と計算の比較である。実験結果に見られるように、時間経過とともに海浜砂のもつ平衡勾配へと近づきつつ前浜勾配が大きくなり、同時に遡上高も高まっているが、計算でも同様な傾向が再現できた。

(2) 水位上昇時のバーム形成

水位上昇条件でのバーム形成に関する模型実験も行い、本モデルによる海面上昇時のバーム形成予測について検討した。図-5に実験結果を示す。実験諸元は水位変化以外において他の実験と同一であり、地形が安定するまで3時間波を作用させた。ケース1の水位は平均海面におき、平均海面からの水位を3cmおよび6cmと上げた実験をケース2, 3とした。水位を3cmに高めたケース2では沖合の凹状の海底形状はそのまま残される一方、初期に形成されたバームを含んで $X=80\sim 120\text{cm}$ が侵食されて土砂が岸向きに運ばれ、高さ13cmに新しいバームが形成された。この変形に伴い汀線位置も $Y=125\text{cm}$ から 105cm へと後退し、さらにバーム頂部の位置も $Y=95\text{cm}$ から 70cm へとほぼ平行に移動した。またバーム高は $Z=9\text{cm}$ から 13cm へと高まり、遡上境界位置は $Y=80\text{cm}$ から 45cm へと後退した。ケース2の状態より水面をさらに3cm上

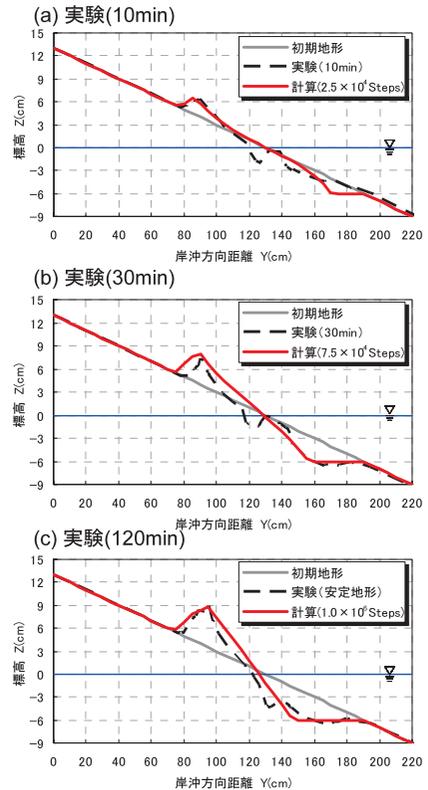


図-4 各測定時間におけるバームの発達状況に関する計算と実験の比較

昇させたケース3でもほぼ同様な地形変化が起こり、沖合部が侵食され、その砂が打ち上げられて汀線位置、バーム頂部および遡上境界位置が後退したことが分かる。

以上の実験結果について再現計算を行った。計算条件を表-2に示す。海面上昇時のケース2, 3には水位上昇量を式(1)に加算して計算した。図-6は水位上昇を伴う場合におけるバームの形成の予測結果である。水位を3cm上げたケース2の計算では、バームの沖側斜面の $Y=120\sim 135\text{cm}$ が侵食され、そこからの侵食土砂が岸向きに運ばれ、新しいバームが形成された。水位の上昇とともに、バームはほぼ平行移動するようにして高さが高まりつつ陸向きに移動する。この結果、汀線位置は $Y=125$ から 110cm へと、バーム頂部位置も $Y=95\text{cm}$ から 80cm へと後退した。またバーム高は $Z=6\text{cm}$ から 11cm へと高まり、遡上境界位置は $Y=75\text{cm}$ から 60cm へと後退した。ケース3でもケース2と同様な特徴が見られ、計算により実験結果がほぼ再現された。

次に海面上昇を伴う3ケースにおけるバーム形成過程の計算結果を図-7に示す。ケース2の安定なバーム形状から水位を3cm上昇させたケース3では、ケース2のバームの沖側斜面の基部が削られるとともに、そこから削られた砂が陸側へと打ち込まれた。計算ステップ数が大き

表-2 計算条件

計算ケース		1	2	3	4	5
		M.S.L. ±0.0	M.S.L. +3.0	M.S.L. +6.0	M.S.L. +3.0	M.S.L. ±0.0
初期地形		1/10	ケース1 安定形状	ケース2 安定形状	ケース3 安定形状	ケース4 安定形状
粒径 d と平衡勾配 $\tan \beta_c$		1.3 mm, 2/7				
バームの陸側斜面 $\tan \beta_R$		1/5				
漂砂量係数 A		0.2				
交換層幅 B (m)		0.3				
入射波条件	碎波波高 H_b (m)	1.0				
	潮位条件 $M.S.L.$ (m)	±0.0	+3.0	+6.0	+3.0	±0.0
地形変化の水深範囲	地形変化の限界水深 h_c (m)	-6.0	-3.0	0.0	-3.0	-6.0
	バーム高 h_R (m)	+9.0	+12.0	+15.0	+14.0	+11.0
土砂落ち込みの限界勾配	陸域	1/2				
	海域	1/3				
計算範囲	岸沖方向 Y (m)	0 ~ 250				
	鉛直方向 Z (m)	-12 ~ 18				
計算メッシュ	ΔY (m)	5.0				
	ΔZ (m)	0.5				
計算時間間隔 Δt (hr)		0.001				
計算ステップ数		1.0×10^6 Steps				

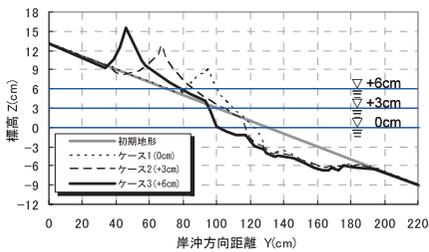


図-5 水位上昇時のバーム形成実験の結果

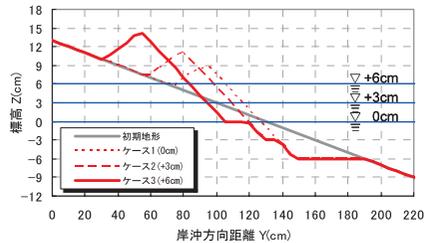


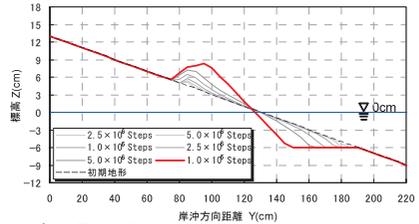
図-6 水位上昇時のバーム形成の計算結果

くなるにしたがい岸側へと砂が打ち込まれ、 $Z=14.5\text{cm}$ の高さを有するバームが形成された。また前浜勾配が海浜砂のもつ平衡勾配に等しくなると安定状態に至った。これは実験結果をうまく説明している。

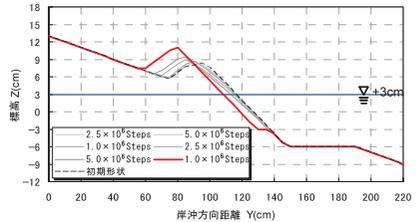
(3) 水位下降時のバーム形成

水位上昇時におけるバーム形成に続いて、ケース3の安定形状から出発して水位を3cmずつ低下させた場合のバームの形成についても実験も行った。実験はケース3(水位+6cm)を基本とし、水位を3cm, 6cm下げた場合をケース4, 5とする。水位低下時のバーム形成実験の結果を図-8に示す。水位を3cm低下させたケース4では、水位下降に伴い汀線近傍が掘られ、その砂が岸側に堆積するためケース3において標高の高い場所に形成された上位のバームが残されつつ、その海側斜面に新たなバーム

(a) ケース1 (0cm)



(b) ケース2 (+3cm)



(c) ケース3 (+6cm)

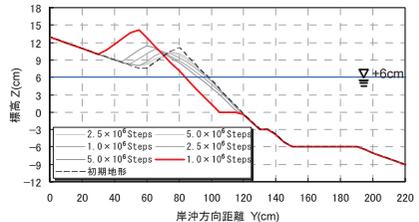


図-7 水位上昇時におけるバーム形成過程の計算結果

が載るようにして形成された。侵食して運ばれる土砂量が少ないため、バーム高は $Z=14.5\text{cm}$ とケース3のバーム高(16cm)より1.5cm低くなった。さらに水位を3cm低下させたケース5でも同様に沖が侵食され、汀線やバーム頂部の位置が前進した。

同様にして水位を低下させた実験の結果についても再計算を行った。計算条件を表-2に示す。図-9は水位下降時のバーム形成の計算結果である。水位を3cm低下させたケース4では沖合の $Y=110\sim 130\text{cm}$ が侵食され、侵食

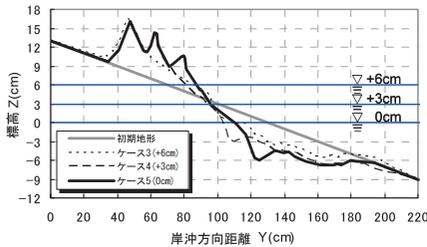


図-8 水位下降時のバーム形成実験の結果

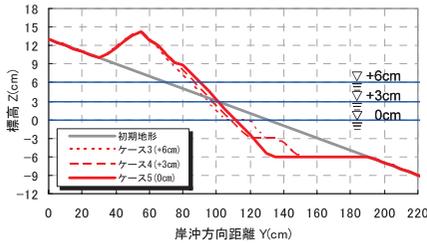


図-9 水位下降時のバーム形成の計算結果

土砂が岸側に堆積し、ケース3の計算結果のバームが履歴として残りつつ新たなバームが薄く形成された。ケース5でも同様な特徴が確認できる。図-10には、水位下降時におけるバーム形成過程の計算結果を示す。ケース3の安定形状から水位を3cm下降させたことで、ケース4における波による地形変化の限界水深 h_c も3cm下降したため沖合部が徐々に侵食され、ケース3のバームが履歴として残りつつ薄く砂が堆積して小規模なバーム形成された。ケース5でも同様に侵食されケース4に形成されたバームに新たなバームが形成された。実験によれば、水位下降時のバーム形成は、バーム沖が侵食されてその砂が岸側に堆積し、新たなバームが形成されつつ汀線やバーム頂部の位置が前進するという過程を経る。計算でもこれと同様な特徴が予測されたが、水位下降時に新たに形成されるバームを実験と比較するとバームの堆積土砂量が不足しており、バームの形成位置はよいとしてもバーム高の予測は過小な結果となった。

5. 結論

既存の等深線変化モデルおよびBGモデルでは、前浜勾配に対して逆の勾配で落ちるバームの陸側斜面を計算することはできなかったが、本研究では、芹沢ら(2003)を基礎としてバームの陸側斜面の計算も可能な実用モデルを構築した。バームの形成に関する移動床実験の結果と比較したところ、計算結果により実験結果がうまく説明できた。このことからさらに海面上昇・海面下降時におけるバームの形成予測を行ったところ、本モデルによりその種の現象が再現可能なことが分かった。ただし海面下降時の再現性は不十分であり、今後の改良課題であ

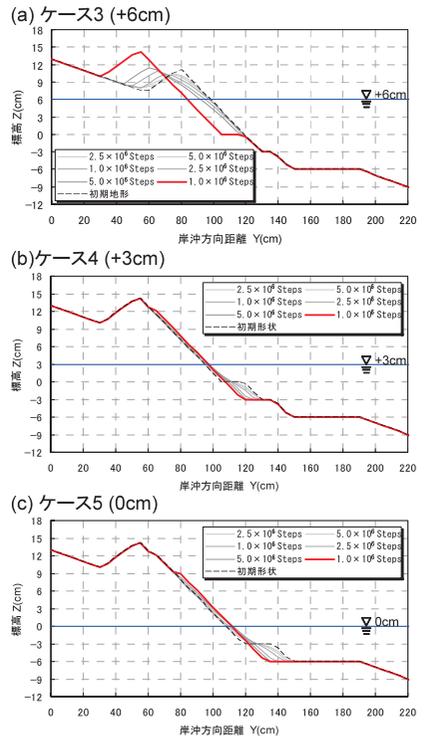


図-10 水位下降時におけるバーム形成過程の計算結果

る。また、本研究で示したバーム形成の計算方法は、陸上での遡上波の減衰やバーム上の越流現象などの物理機構には立ち入らない便宜的手法であるため、適用は比較的単純な地形条件(一様勾配斜面)に限られる。この点については、今後さらなる改良が必要である。

謝辞: 本研究のとりまとめにおいては日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻の遠藤将利氏からの助力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

鈴木崇之・栗山善昭(2008):バーム形成・侵食時の岸沖漂砂量分布の簡易モデル, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.471-475.
 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.496-500.
 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼(2003): 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.
 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼(2006): 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.
 Hunt, I.A. (1959): Design of seawall and breakwaters, Proc. ASCE, Vol.94, No. WW1, pp.72-92.
 Larson, M., S. Kubota and L. Erikson (2004): Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling, Marine Geology, 212, pp. 61-79.