

バーム形成・侵食時の岸沖漂砂量分布の簡易モデル

Simple Modeling of Cross-shore Sediment Transport Rate for Berm Formation and Erosion

鈴木崇之¹・栗山善昭²

Takayuki SUZUKI, Yoshiaki KURIYAMA

The spatial distributions of the cross-shore sediment transport rate for berm formation and erosion were examined using a 2.5-year data set of beach profiles. The investigation area was set from the maximum wave run-up position to the shoreline position at the mean tide level. The cross-shore sediment transport rates for berm formation and erosion were modeled with the offshore wave energy flux and the berm height, respectively. Moreover, the model was applied for the calculation of a one-month beach profile change. The results revealed that the model well predicts the beach profile change of the berm formation and erosion in a qualitative sense.

1. はじめに

波打ち帯を含む前浜の地形形状は、波の遡上や流下に伴う漂砂により変化し、これら岸向き・沖向き漂砂の割合の差により決定される。バームは干潮時の汀線位置から満潮時の波の遡上限界の領域で形成される堆積地形であり、平均海底勾配に比べて海側に急勾配、陸側に緩勾配(時には逆勾配)の斜面を持つ。バームは静穏な波が続くと形成され(例えば, Thomas・Baba, 1986; 柳嶋ら, 1990), 荒天時などのバーム頂部を超える長周期波によりそれは消失する(例えば, 加藤・柳嶋, 1992)。

波打ち帯での漂砂量についての検討は多く行われており(例えば, Masselink・Hughes, 1998; Puleoら, 2000), 著者らもバームの形成時・侵食時の漂砂量分布の違いについての検討を行っている(鈴木ら, 2007)。また, 波打ち帯の漂砂量式や地形変化モデルについても検討がなされている(例えば, 砂村, 1983; Nielsen, 2002; Larsonら, 2004)。しかし, 波打ち帯の流体運動は複雑であることから, 漂砂量やバームの形成・侵食を含む地形変化を適切に評価できるものは未だ存在しない。

本研究では波崎海岸にて取得された, 2.5年間の地形断面データから抽出されたバーム形成時および侵食時の地形断面を用いて岸沖漂砂量分布を算出し, それぞれの分布形状を沖波エネルギーフラックスおよびバーム高を用いてモデル化した。さらに, これらのモデルを用いて1ヶ月間の波打ち帯の地形変化を計算し, バーム形成と侵食の様子を観測結果と比較した。

2. 現地観測データの概要

茨城県の波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設(HORS, 図-1)では, 長さ427mの観測栈橋に沿って, 休日を除く1日1回地形断面を計測している。陸上部はスタッフとオートレベルを用いて測量し, 海域部は質量約3kgのレッドを用いて測量を行っている。また, 沖波波浪は鹿島港沖の水深約24mの地点(図-1)に設置された超音波式波高計により, 2時間毎に観測されている。

本研究では, 計測された1987年8月から1990年1月まで(2年半)の地形断面データおよび鹿島港沖にて観測された沖波波浪データを解析に使用した。

図-2に汀線付近における解析期間中の平均地形断面とその標準偏差を示す。なお, 岸沖方向位置(x)はHORS固有の座標軸である。また, 高さの基準(D.L.)は波崎港工事基準面(T.P.-0.687m)であり, 観測地点における干潮位, 平均潮位, 満潮位はそれぞれ-0.196m, 0.651m, 1.252mである。平均地形断面と平均潮位が交わる岸沖方向距離はx=9.5mである。HORS周辺の底質粒径は岸沖方向にほぼ一様であり, その中央粒径は0.18mmである(加藤ら, 1990)。図中, x=-20mから5mの範囲で標

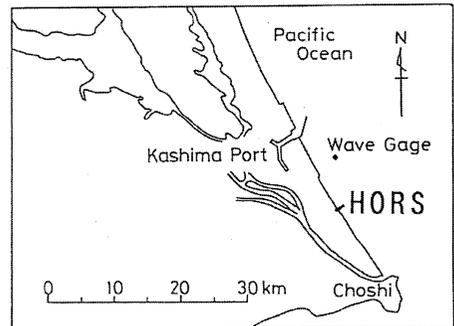


図-1 波崎海洋研究施設(HORS)の位置

1 正会員 工(博)(独)港湾空港技術研究所研究官 海洋・水工部沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム

2 正会員 工(博)(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チームリーダー

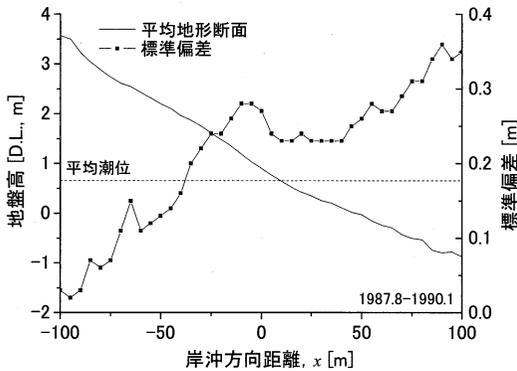


図-2 解析期間中の平均地形断面(D.L. 基準)およびその標準偏差

標準偏差がやや高くなっているけれども、これは汀線付近においてバームの形成、侵食が発生しているためである。

沖波のエネルギーフラックスは、鹿島港沖にて計測された有義波高および有義波周期を用いて算出した(例えば、栗山・伊東, 2004)。解析期間中の有義波高は0.37 mから5.66mの幅で変動し、有義波周期は4.88sから14.98 sの幅で変動していた。それぞれの平均値は1.65m, 8.51 sであった。

波の遡上高は加藤・柳嶋(1992)が提案した、汀線付近における水位上昇量、長周期波の遡上および入射波の遡上を考慮した算定式を用いて算出し、地形断面と交わる地点を遡上位置とした。なお、この提案式では、汀線位置よりもやや沖側の地点($x=22\text{m}$)において観測された水位を用いており、この水位には天文潮位、気圧偏差および風の吹き寄せによる水位上昇、wave set-upが含まれている(柳嶋ら, 1988)。本研究では、算出された遡上高のうち、日最大値を波の最大遡上高として用いた。

3. バームの形成と侵食

HORSにて観測された地形断面から、バーム形成時および侵食時のデータを抽出した。加藤・柳嶋(1992)は、1987年8月から1990年1月までの地形断面データより219ケースのバーム形成、58ケースのバーム侵食を抽出している。そこで、本研究においてもこれら抽出された地形断面データを用いて、バーム形成時、侵食時の岸沖漂砂量分布を算出すると共に、それぞれのモデル化を行った。

(1) 岸沖漂砂量分布

本研究では岸沖方向の解析範囲をバームの形成と侵食の地形変化が含まれるように設定し、解析を行った。陸側境界は波の最大遡上高と地形断面が交わる岸沖方向位置とし、沖側境界は平均潮位(D.L., 0.651m)と地形断面が交わる位置と設定した。陸側、沖側境界の位置は、

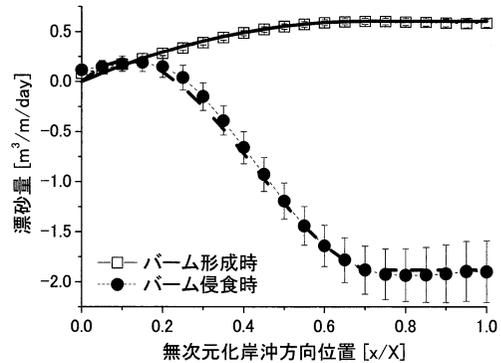


図-3 バーム形成時、侵食時の平均岸沖漂砂量分布、およびそれぞれをモデル化した岸沖漂砂量分布(太実線、太破線)

波の大きさや地形断面の変化に伴い移動することから、陸側境界から沖側境界までの距離(X)を用いて岸沖方向位置(x)を無次元化し、陸側境界を $x/X=0.0$ 、沖側境界を $x/X=1.0$ と定義して解析を行った。

岸沖漂砂量は、鈴木ら(2007)と同様に式(1)を用いて、地形測量が行われる最も陸側である海岸砂丘の杖($x=-115\text{m}$)から沖に向けて、岸向きおよび沖向きの岸沖漂砂量をそれぞれ正および負として計算した。

$$[Q(i,t) - Q(i-1,t)] = \gamma [z(i,t) - z(i,t-1)] \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 Q は単位幅当りの岸沖漂砂量、 γ は単位体積当りに占める砂の割合($\gamma=0.7$, Nielsen, 1992)、 z は地盤高さ、 Δx は岸沖方向単位長さ、 t は時間、 i は岸沖漂砂量が算出される岸沖方向位置である。HORS周辺の地盤形状はほぼ2次的であることから(Kuriyama, 1991)、沿岸漂砂による地形変化は小さいと考え、ここでは無視した。したがって、地形断面は岸沖漂砂によってのみ変化していると仮定し漂砂量を算出した。

抽出されたバーム形成時(219ケース)および侵食時(58ケース)の地形断面を用いて算出した、平均岸沖漂砂量分布を図-3に示す。図中のエラーバーは標準誤差である。それぞれの形状の特徴は、沖側境界を $x=25\text{m}$ と固定して計算した鈴木ら(2007)とはほぼ同一であった。

バーム形成時、岸沖漂砂量は $x/X=0.0$ から0.7辺りまで徐々に増加しており、これはこの範囲にバームが形成されることを示している。 $x/X=0.7$ よりも沖側での漂砂量はほぼ一定値であった。バーム侵食時は、岸向きの漂砂量が $x/X=0.15$ においてピークを持ち、 $x/X=0.0$ から0.15ではバームの侵食にも関わらず砂が堆積していた。 $x/X=0.15$ から0.26にかけてその値は減少し、 $x/X=0.26$ よりも沖側では沖向きの漂砂量となり、 $x/X=0.7$ 辺りまで増加していた。 $x/X=0.7$ よりも沖側ではほぼ一定であった。これは、遡上した波がバーム頂部を超え、頂部の砂の一

部が陸側に運ばれると共に、引き波によってバーム全体が沖側に流されていくためと解釈できる。

(2) 岸沖漂砂量分布のモデル化

次に、前節において算出したバーム形成時および侵食時の岸沖漂砂量分布(図-3)のモデル化を行う。ただし、本モデルは沖側境界とした平均潮位が位置する岸沖方向位置よりも陸側が適用範囲となる。

バームは、静穏時に浮遊砂よりも掃流砂の方が卓越し、岸向きの漂砂量が卓越することにより形成されると考えられる。したがって、バーム形成時の岸沖漂砂量は沖波エネルギーフラックスと関係があると推測される。そこで、岸沖漂砂量がほぼ一定となる $x/X=0.7$ での岸沖漂砂量と沖波エネルギーフラックスの関係を図-4に示す。ただし、バームは数日から長い場合で2週間程度かけて徐々に形成されることから、ここでは抽出されたバーム形成日を含む前3日間の平均値を用いることとした。両者の間には、沖波エネルギーフラックスが大きいかほど岸向きの漂砂量が増加する弱い関係が見られた($R=0.24$)。

$$Q_{f,0.7} = 1.15 \times 10^{-7} E_f + 0.49, \quad (2)$$

ここで、 $Q_{f,0.7}$ は $x/X=0.7$ での岸沖漂砂量、 E_f は沖波エネルギーフラックスである。

以上より、バーム形成時の岸沖漂砂量分布を次のようにモデル化した。 $x/X=0.0$ からおおむね漂砂量が一定値となる $x/X=0.7$ までは、原点($x/X=0.0, Q=0.0$)を始点として $x/X=0.7$ での漂砂量の値を頂点とする上に凸の2次関数とし、 $x/X=0.7$ から1.0までは $x/X=0.7$ における漂砂量の値で一定になるとした(図-3中の太実線)。

一方、バーム侵食後はバーム頂位置よりも陸側部分がやや堆積し、バーム部分が侵食されることで前浜地形断面はほぼ一様となり、その勾配は汀線付近の平均勾配とほぼ同一の値となる(鈴木ら, 2007)。ここで、バーム頂位置は陸側境界および沖側境界と地形断面が交わるそ

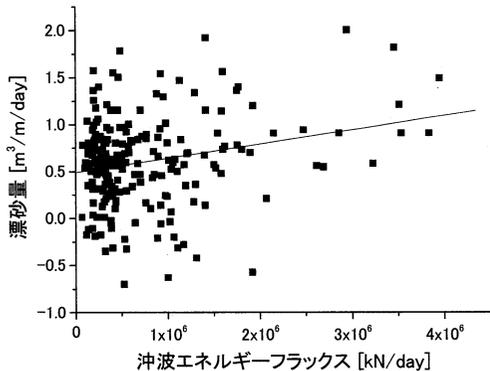


図-4 バーム形成時における $x/X=0.7$ での沖波エネルギーフラックスと岸沖漂砂量の関係

れぞれの点を結んだ直線と地形断面の距離が最大となる岸沖方向位置とし、また、その直線からバーム頂までの距離をバーム高と定義する(図-5中模式図参照)。

バーム侵食時に発生する $x/X=0.0$ から0.15での堆積および $x/X=0.15$ から0.7での侵食はバーム部分の砂の移動に伴って発生することから、それぞれの土量はバーム高と関係があると推測される。そこで、この陸側、沖側境界と地形断面が交わる点を結んだ直線と地形断面に挟まれた部分の面積のうち、直線よりも下側に位置していた部分を堆積部、上側に位置していた部分を侵食部と定義し(図-5中模式図参照)、それぞれの面積とバーム高の関係を図-5に示す。ただし、ここでのバーム高は侵食が発生した前日の地形断面より算出した。図より、堆積部、侵食部共にバーム高が大きくなるに従い、面積も増加する関係が見られた(それぞれ $R=0.78, R=0.45$)。

それぞれの部分の面積とバーム高には比例関係が見られたことから、バーム侵食時において岸向き漂砂量がピークとなる $x/X=0.15$ 、および岸向き漂砂量がおおむね一定となる $x/X=0.7$ での岸沖漂砂量はバーム高と関係があ

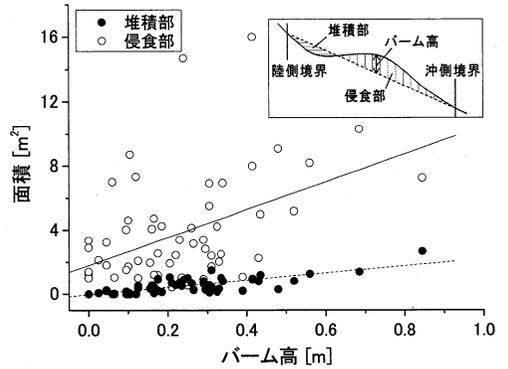


図-5 バーム高とバーム侵食時の堆積部、侵食部の面積との関係

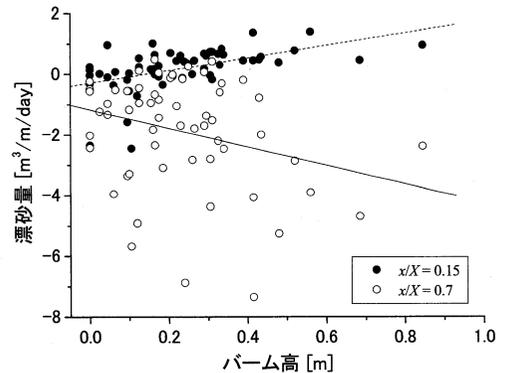


図-6 バーム侵食時における $x/X=0.15$ および $x/X=0.7$ でのバーム高と岸沖漂砂量の関係

ると推測される。そこで、 $x/X=0.15$ および 0.7 での漂砂量とバーム高との関係を図-6に示す。 $x/X=0.15$ においては、バーム高の増加と共に岸向きの漂砂量も増加する関係が見られた ($R=0.51$)。また、 $x/X=0.7$ においては、バーム高の増加と共に沖向きの漂砂量が増加する弱い相関関係が見られた ($R=-0.29$)。

$$Q_{e,0.15} = 2.06B_h - 0.29, \quad (3)$$

$$Q_{e,0.7} = -3.07B_h - 1.17, \quad (4)$$

ここで、 $Q_{e,0.15}$ および $Q_{e,0.7}$ は $x/X=0.15$ および 0.7 での岸沖漂砂量であり、 B_h はバーム高である。

以上より、バーム侵食時の岸沖漂砂量分布を次のようにモデル化した。 $x/X=0.0$ から 0.7 までは、原点 ($x/X=0.0$, $Q=0.0$) から岸向き漂砂量がピークとなる $x/X=0.15$ での漂砂量の値を通り、おおむね漂砂量が一定値となる $x/X=0.7$ での漂砂量の値に至る3次関数とし、 $x/X=0.7$ から 1.0 までは $x/X=0.7$ における漂砂量の値で一定になるとした (図-3中の太破線)。

バーム形成時および侵食時の岸沖漂砂量分布形状はそれぞれ沖波エネルギーフラックスおよびバーム高によりモデル化されたけれども、両モデルは形成時と侵食時の個別の算定式である。したがって、日々の波浪条件と地形形状からバームが形成されるか侵食されるかを判断する必要がある。

バームの侵食は、バーム頂を越えるような波が来襲した際に発生することから (加藤・柳嶋, 1992)、バーム頂の地盤高と波の遡上高の関係から両者を判別することができると考えられる。図-7にバーム形成時および侵食時のバーム頂の地盤高と波の最大遡上高の関係を示す。図中の直線は判別分析により算出したものである。

$$R_E = 0.634 B_E + 0.814, \quad (5)$$

ここで、 R_E は波の最大遡上高、 B_E はバーム頂の地盤高である。

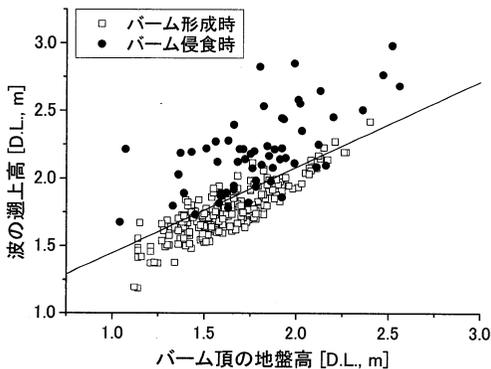


図-7 バーム形成時および侵食時のバーム頂の地盤高と波の遡上高との関係

図より、バーム侵食時は形成時よりもおおむね高い地盤高まで波が遡上しており、日々のバーム頂の地盤高と波の最大遡上高からバームの侵食が発生するかどうかを判断することができる。加藤・柳嶋 (1992) によっても同様の関係図が作成されているけれども、岸沖境界を設定せずにバーム頂位置を抽出していることから、バーム形成時において今回設定した陸側境界よりもさらに陸側の地形形状をバーム形状として抽出しているケースもあることなどから、プロット位置は多少異なるものの図-7と同様の関係を報告している。

4. 現地観測データとの比較

前章において導出されたバーム形成時、侵食時の岸沖漂砂量分布モデル、および両者の判別式を用いて地形変化の計算を行った。ここでは1988年5月1日の地形断面を初期地形とし、1ヶ月間の計算を行った。

時間間隔は1日とし、1日平均した沖波エネルギーフラックス、および波の最大遡上高を用いた。ここでは、まず式(5)によりバームが形成されるか否かを判別し、その後、それぞれの算定式により岸沖漂砂量分布を算出し、地形形状を求めた。計算範囲は、陸側境界である波の最大遡上高と地形断面が交わる位置から沖側境界である平均潮位と地形断面が交わる位置までとした。バーム形成時および侵食時の計算結果を観測結果と共にそれぞれ図-8, 9に示す。

バーム形成時はバーム高がやや過大評価され、また、バーム頂が約5m岸側に形成されているけれども、計算結果と良く一致していることがわかる。また、侵食時は22日のバーム形状の陸側 ($x=-40$ mあたり) が観測結果と合っておらず、侵食量もやや過小評価されているけれども、侵食されてゆく様子についてはおおむね良く一致している。22日のバーム陸側の地形形状に見られる相違は、計算により算出された波の最大遡上高と来襲した最大波による遡上高に誤差が生じていると考えられること、

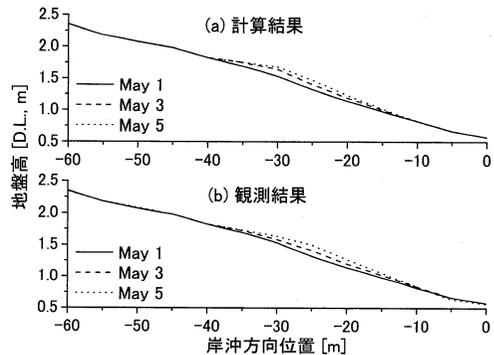


図-8 バーム形成時の地形断面変化, (a)計算結果, (b)観測結果

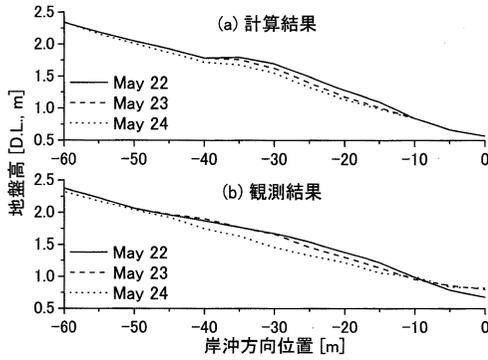


図-9 バーム侵食時の地形断面変化, (a)計算結果, (b)観測結果

また、本モデルは式(5)によるバーム頂の地盤高によって算出される波の遡上高が基準となり、その高さ以上にまで波が遡上した場合のみバームの侵食が発生するため、バーム高が高く算出された場合にはバーム侵食は発生しにくくなることなどの影響により生じた、地形断面観測結果との差が蓄積されてしまった結果であると考えられる。

5. まとめ

茨城県波崎海岸に位置する、波崎海洋研究施設(HORS)において観測された1987年8月から1990年1月までの地形断面より抽出された、219ケースのバーム形成および58ケースのバーム侵食を用いてバーム形成時および侵食時の岸沖漂砂量分布を算出し、それぞれの漂砂量分布のモデル化を行った。岸沖方向の解析範囲は、波の最大遡上位置(陸側境界)から平均潮位が位置する地点(沖側境界)までとし、岸沖方向位置(x)は境界間の距離(X)を用いて無次元化し、陸側境界を $x/X=0.0$ 、沖側境界を $x/X=1.0$ と定めた。以下に主要な結論を示す。

- (1) バーム形成時の岸向き漂砂量は $x/X=0.0$ から0.7まで増加する。バーム侵食時、岸向き漂砂量は $x/X=0.15$ でピークを持ち、その後岸向き漂砂量は減少し、 $x/X=0.26$ よりも沖側では沖向きとなり、 $x/X=0.7$ 辺りまで増加していた。両者とも $x/X=0.7$ から1.0までは $x/X=0.7$ の値でほぼ一定であった。
- (2) バーム形成時の岸沖漂砂量分布は沖波エネルギーフラックスを用いて、また、バーム侵食時の岸沖漂砂量分布はバーム高を用いてモデル化された。
- (3) 本モデルを用いて、平均潮位が位置する岸沖方向

位置よりも岸側の地形断面変化を1ヶ月間計算し観測結果と比較した結果、バームの形成および侵食も含めて定性的には良く一致した。

謝辞：本研究で使用した地形断面データは波崎海洋研究施設に常駐した当所沿岸土砂管理研究チーム(旧漂砂研究室)のメンバーならびに(株)エコーの観測補助員によって取得されたものである。また、沖波波浪データは国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所と独立行政法人港湾空港技術研究所海象情報研究チームより提供されたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田誠(1990)：砕波帯内の底質粒度の変動特性 波崎海洋観測施設における現地観測, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp.37-61.

加藤一正・柳嶋慎一(1992)：長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.41-50.

栗山善昭・伊東啓勝(2004)：波崎海洋研究施設で観測された断面変化の卓越周期の変動特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.516-520.

鈴木崇之・竹内麻衣子・友田尚貴・山口里実・栗山善昭(2007)：バーム形成時および侵食時における岸沖漂砂量分布特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.486-490.

砂村継夫(1983)：Swash zoneにおける岸沖漂砂量の算定式, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.214-218.

柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸(1988)：波による汀線付近の水位上昇量に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.123-127.

柳嶋慎一・加藤一正・村上裕幸(1990)：バーム形成に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.359-363.

Kuriyama, Y. (1991)：Investigation of cross-shore sediment transport rates and flow parameters in the surf zone using field data, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.30, No. 2, pp.3-58.

Larson, M., Kubota, S. and Erikson, L. (2004)：Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling, Marine Geology, 212, pp.61-79.

Masselink, G. and M. Hughes (1998)：Field investigation of sediment transport in the swash zone, Continental Shelf Res., Vol.18, 10, pp.1179-1199.

Nielsen, P. (1992)：Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, River Edge, N. J., 324 pp.

Nielsen, P. (2002)：Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modeling, Coastal Engineering, Vol.45, pp.53-60.

Puleo, J.A., R.A. Beach, R.A. Holman and J.S. Allen (2000)：Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore-generated turbulence, J. Geophys. Res., Vol.105, C7, pp.17021-17044.

Thomas, K.V. and M. Baba (1986)：Berm development on a monsoon-influenced microtidal beach, Sedimentology, Vol.33, 4, pp.537-546.