バームの形成侵食に着目した短期地形変化モデル

Short-term Beach Profile Change Model Focusing on Berm Formation and Erosion

鈴木崇之¹·栗山善昭²

Takayuki SUZUKI and Yoshiaki KURIYAMA

A short-term beach profile change model focusing on berm formation and erosion was proposed using a 2.5-year data set of beach profiles and offshore waves. 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. The model was applied for the calculation of three months beach profile change, and the results revealed that the model well predicts the beach profile change including 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ている.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 るバームは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ことが報告されている(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), また,波打ち帯の漂砂量式や地形変化モデルについても 提案がなされている(例えば,砂村, 1983; Nielsen, 2002; Larsonら, 2004; Kobayashiら, 2009). 著者らも バームの形成時・侵食時の漂砂量分布の違いやモデル化 についての検討を行っている(鈴木・栗山, 2007, 2008). しかし,波打ち帯は遡上位置が絶えず変化し,また,流 体運動が複雑であることなどから,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、始めに対象海岸における平均潮位の岸沖 方向汀線位置の変動を沖波エネルギーフラックスによる モデル化を行った.さらに、その位置を沖側境界として 岸沖漂砂量分布モデルに組み込み、波打ち帯の短期地形 変化モデルの構築を試みた.また、3ヶ月間の地形変化 の計算を行い、観測結果との比較を行った.

1	正会員	工(博)	京都大学防災研究所助教 流域災害研究 センター 白浜海象観測所(前港湾空港
2	正会員	工(博)	技術研究所研究官) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸土砂管理研究チームリーダー

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の観測桟橋に沿って、 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.

汀線付近における1987年8月から1990年1月まで(2 年半)の平均地形断面とその標準偏差を図-2に示す.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. -0.687 m)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-0.20 m,0.65 m,1.25 m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 = 9.5 mであっ た.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0.18 mmである(加藤ら,1990).図中, x = -20 mから5 mの範囲で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.



図-1 波崎海洋研究施設(HORS)の位置



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

沖波エネルギーフラックスは,全国港湾海洋波浪情報 網 (NOWPHAS;例えば,永井,2002)の観測点の1つ である,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). 解析を行った1987年8月から1990年1月まで(2年半) の有義波高は0.37 mから5.66 mの幅で変動し,有義波周 期は4.88 sから14.98 sの幅で変動していた.それぞれの 平均値は1.65 m, 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,その時の地形 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 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,風の吹き寄せによる水位上昇,および 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 高として用いることとした.

3. 短期地形変化モデル

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 側境界は波の日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., 0.65 m)と地形断 面が交わる岸沖方向位置と設定した.

以下より,岸沖漂砂量分布モデル,汀線位置変動の予 測,および短期地形変化モデルについて示す.

(1) 岸沖漂砂量分布モデル

岸沖漂砂量分布モデルは,加藤・柳嶋(1992)により 1987年8月から1990年1月までの地形断面データから抽 出された219ケースのバーム形成,58ケースのバーム侵



図-3 沖波エネルギーフラックスと平均潮位の岸沖方向汀線 位置との関係

食を基に,鈴木・栗山 (2008) により構築された式を用 いることとした. 解析範囲となる陸側,沖側境界の位置 は,波の大きさや地形断面の変化により移動することか ら,本モデルでも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と定義して計算を行って いる.

バーム形成時の岸沖漂砂量分布形状は, x/X = 0.0から 増加した漂砂量がおおむね一定となるx/X = 0.7での漂砂 量を沖波エネルギーフラックスで評価し(式(1)), 原 点(x/X = 0.0, Q = 0.0)を始点としx/X = 0.7での漂砂量 の値を頂点とする上に凸の2次関数とした.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.

 $Q_{f_{.0.7}} = 1.15 \times 10^{-7} E_f + 0.49,$ (1) ここで, $Q_{f_{.0.7}} t_x / X = 0.7$ での岸沖漂砂量, $E_f t$ 沖波エネ ルギーフラックスである.

また,バーム侵食時については,x/X = 0.0から増加し た岸向きの漂砂量がピークとなるx/X = 0.15,およびx/X= 0.26にて沖向きとなった漂砂量がおおむね一定となる x/X = 0.7での岸沖漂砂量をバーム高で評価した(式(2), (3)).侵食時の岸沖漂砂量分布は,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.

 $Q_{e\ 0.7} = -3.07B_h - 1.17, \quad \dots \quad (3)$

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.

バーム形成と侵食の判別については波の遡上高とバー

ム頂の地盤高の関係を用いている. 詳細は鈴木・栗山 (2008) に詳しい.

(2) 汀線位置(沖側境界)の変動予測

汀線位置の変動を波のエネルギーフラックスを用いて 評価できることは,加藤ら (1987) やKench・Brander (2006) によっても報告されている.そこで,本研究に おいても3ヶ月間 (1988年5月~7月) のデータを用いて 汀線位置変動のモデル化を行った.

沖波エネルギーフラックスと平均潮位(D.L., 0.65 m) の岸沖方向汀線位置の関係を図-3に示す.両者の間には, エネルギーフラックスが増加するほど汀線位置が前進す る傾向が見られた(R = 0.58).これは,高波浪時におい て波の遡上高が高くなり,陸側にあった砂が侵食により 沖に運ばれた結果,平均潮位辺りにおいては堆積が生じ て汀線が前進したためと解釈できる.両者の関係は以下 の式で表された.



図-4 平均潮位 (D.L., 0.65 m) の岸沖方向汀線位置の時系列 変化



図-5 平均潮位 (D.L., 0.65 m)の岸沖方向汀線位置とその位 置での斜面勾配の関係

 $y_s = 8.06 \log(E_f) - 42.7,$ (4) ここで, y_s は汀線位置, E_f は沖波エネルギーフラックスである.

次に,式(4)を用いて算出した汀線位置と観測地形 断面データから求めた汀線位置の3ヶ月間の時系列変化 を図-4に示す.計算開始からの1週間,および45日から 60日の辺りにおいて両者の差が大きくなっているけれど も,全体を通してはよく一致していることがわかる.

以上より,短期地形変化モデルでは,沖波エネルギー フラックスにより推定した汀線位置を沖側境界と設定し て計算を行うこととする.陸側境界については,鈴木・ 栗山(2008)と同様に波の日最大遡上位置とし,この境 界間の地形変化の計算を行った.

(3) 短期地形変化モデルの概略

本モデルは陸側境界だけでなく,沖側境界も変動する 地形変化にも対応可能なモデルである.境界間でのバー ムの形成および侵食を含む地形変化については,既発表 の岸沖漂砂量分布モデルを用いている.岸沖漂砂量分布 モデルでは,境界間の距離で計算領域を無次元化し,岸 沖漂砂量モデルを用いて地形変化を計算し,再び次元化 するというステップを踏んで計算が行われる.

沖側境界が変動する場合については、陸側境界(波の 日最大遡上位置)を固定点として沖側境界位置(平均潮 位の位置)の変動に併せて地形断面を沖側,岸側に平行 移動させ,地形変化を表現することを試みた.つまり, 汀線位置(沖側境界)が後退する(侵食時)につれ斜面 勾配は急になり,汀線位置が前進する(堆積時)につれ 斜面勾配は緩やかになる.この汀線位置と斜面勾配の関 係は,現地対象海岸においても観察されている(図-5). ここでの斜面勾配は,汀線位置を中心とした岸沖方向に 10 mの海底勾配である.

4. 現地観測データとの比較

再現計算期間は1988年5月1日から7月31日までの3ヶ 月間(92日間)とした. 観測結果から算出した3ヶ月間 の平均地形断面とその標準偏差を図-6に示す. 平均潮位 (D.L., 0.65 m)と満潮位(D.L., 1.25 m)の岸沖方向汀線 位置,斜面勾配はそれぞれx=3.2 m, 0.025,およびx=-15.4 m, 0.037であった. 図より, x=-65 m辺りから陸側 については,地形はほとんど変化していないことがわか る.

計算を行うにあたり,初期地形は1988年5月1日の地 形断面とした.ただし,沖側境界(x=-5 m)よりも沖側 については今回の研究対象領域外となるため,その地点 よりも陸側の平均斜面勾配を用いて直線とした.

始めに,計算結果および観測結果の平均地形断面から の変位量について検討を行った.まず,計算結果,観測



図-6 再現計算期間中の平均地形断面とその標準偏差



図-7 平均地形断面とその標準偏差の計算結果および観測結果

結果それぞれの平均地形断面とその標準偏差を図-7に示 す. 平均地形断面に関しては, x = -70 mから-45 mにか けて計算結果が観測結果よりも高い値を示している.計 算では陸側境界となる日最大遡上位置を波の遡上高を基 に求めているけれども,実際にはその位置以上もしくは 未満の場合も発生している.これらの差が不一致となる 要因の1つであると考えられる.標準偏差については, 計算結果が観測結果よりもx = -45 mよりも沖側で全体的 に過小評価をしているけれども, x = -50 mあたりから沖 に向かうにつれて上昇する傾向は良く一致している.

平均地形断面からの変位量の計算結果と観測結果をそ れぞれ図-8(a),(b)に示す.ただし,沖側境界よりも沖側 は検討範囲外であるため黒色とした.両者より,その変 位量にはやや差が見られるけれども,x=0mから-40m 辺りに見られるバーム形状の形成と侵食や,x=-50mあ たりより陸側ではほとんど変化がないことなど,計算結 果は時系列的に概ね地形変化の傾向を再現していること がわかる.

次に、満潮位 (D.L., 1.25 m) の岸沖方向汀線位置の計



図-8 平均地形断面からの変位、(a)計算結果、(b)観測結果



算結果と観測結果の時系列を図-9に示す.計算結果の変動は、やや過大、過小評価をしている時期があるけれども、変動傾向は概ね一致している.

満潮位が位置する地点での斜面勾配についても計算結 果と観測結果の比較を行った(図-10).計算結果の斜面 勾配は,観測結果よりもやや緩やかになる時期が見られ るけれども,変動傾向はよく一致している.



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により算出されたバー ム形成時,侵食時の岸沖漂砂量分布を用いて遡上域の短 期地形変化モデルを構築した.さらに、3ヶ月間の地形 変化の計算を行い,観測結果との比較を行った.岸沖方 向の計算範囲は,波の日最大遡上位置(陸側境界)から 平均潮位が位置する地点(沖側境界)までとした.以下 に主要な結論を示す.

- (1) 平均潮位の岸沖方向汀線位置(沖側境界)の変動を 沖波エネルギーフラックスにより推定し,波打ち帯全 体の地形変化にも対応できる短期地形変化モデルを構 築した.
- (2) 3ヶ月間の地形変化の計算を行った結果,バーム形状の形成と侵食も含めて,時系列的に地形変化の傾向を再現することができた.
- (3)満潮位の岸沖方向汀線位置はやや変動が大きいものの、その変動傾向は定性的に一致していた.また、斜面勾配については、やや緩やかになる傾向が見られたけれども、観測結果の変動と良く一致していた.

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港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研究チ ームのメンバーならびに㈱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・村上裕幸・末次広児(1987): 汀線位 置の短期変動特性とそのモデル化の試み,港湾技術研究 所報告,第26巻,第2号, pp. 63-96.
- 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・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.
- 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.
- 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.
- 永井紀彦(2002):全国港湾海洋波浪観測30か年統計 (NOWPHAS1970-1999),港湾空港技術研究所資料,No. 1035,388p.
- 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.
- Kench, P.S. and R.W. Brander (2006) : Response of reef island shorelines to seasonal climate oscillations: South Maalhosmadulu atoll, Maldives, J. Geophys. Res. F: Earth Surface, Vol. 111, 1, F01001, doi: 10.1029/2005JF000323.
- Kobayashi, N., M. Buck, A. Payo and B.D. Johnson (2009) : Berm and dune erosion during a storm, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X (2009)135:1(1).
- 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.
- 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. (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.