土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 66，No.1，2010，486-490

新潟西海岸における潜堤背後の断面変化に関する数値計算

Prediction of Beach Profile Change behind Submerged Breakwater on the Niigata-West Coast

栗山善昭[1]・竹村淳一[2]・水口幸司[3]・松井康彦[4]

Yoshiaki KUIRIYAMA, Jyunichi TAKEMURA, Koji MINAKUCHI and Yasuhiko MATSUI

The numerical model for predicting the beach profile change behind a submerged breakwater on the Niigata-West coast was developed. The model estimates the beach profile change on the basis of the cross-shore gradient of cross-shore sediment transport rate consisting of suspended load due to wave breaking and bed loads due to wave nonlinearity and beach slope. The model was calibrated with the beach profile change on the Niigata-West coast during a one-year period from July 2001 to July 2002. Numerical simulations using the model shows that the increase in the crown height of the submerged breakwater is effective in reducing the foreshore erosion and in making the sediments transported seaward from the eroded foreshore remain in the inner surf zone.

1. はじめに

潜堤は景観上の優れた機能を有していることから，海岸防護においてその整備が進んでいる．その一方で，潜堤は，単位幅（岸沖方向）当たりの波浪減衰効果が小さいなどの弱点を有しており，そのため，潜堤背後の海浜は必ずしも十分に安定しているわけではない．そこで，本研究では，潜堤背後の断面変化を予測するモデルの開発を目的とし，砂州の移動を再現するために開発されたモデル（Kuriyama，2010）を新潟西海岸の潜堤背後の地形変化に適用し，その現地再現性を検討するとともに，そのモデルを用いて潜堤の天端高さが断面変化に与える影響を検討した．

2. 新潟西海岸の概要

信濃川河口の西側に位置する新潟西海岸（図-1）では，河川改修工事（1875～1903年）や導流堤建設（1897～1924年），大河津分水の通水（1922年），関屋分水の通水（1972年），地下水のくみ上げによる地盤沈下（1960年代以降）などの影響により，1900年代より海岸侵食が進行し，1948年には，1889年と比較して最大で350mの汀線の後退が生じた．

そのため，1960年代より離岸堤が整備され，離岸堤建設後は，汀線近傍の海浜は防護された．しかし，それより沖では海岸侵食が進行したため，その対策が検討され，新たに設置する構造物の沖で侵食が発生しないよう，低反射率の構造物である潜堤が採用されることとなった．

さらに，潜堤背後の沿岸方向の流れによる底質の移動量を軽減するための突堤と，砂浜によって波浪エネルギーを減衰させるとともに新たな親水空間を創出するための養浜とが海岸整備に加えられ，全体としては面的防護工法（砂浜を含む複数の海岸保全施設を組み合わせた海岸保全工法）による海岸保全が計画された．突堤，潜堤の建設はそれぞれ1988年，1989年より開始され，養浜は1994年から開始された．

以上の海岸整備により，既存離岸堤の沖側で生じていた大規模な侵食は収まったものの，潜堤より岸側において小規模な侵食が継続しており（吉田ら，2008），その値は単位沿岸幅あたり約20m^3/yearである．

3. 数値計算

（1）断面変化モデルの概要

本研究で用いる断面変化予測モデルは，主として沿岸砂州の移動を再現するために開発されたものであり，波浪・surface roller変形，戻り流れ速度推定，沿岸流速推定，岸沖方向流速の非線形性を表すパラメーター推定，断面変化の5つのサブモデルより構成されている．

波浪・surface roller変形サブプログラムにおいては，自乗平均波高H_{rms}の変形を計算する．Thornton・Guza（1983）と同様に，砕波帯内を含む計算領域全域において波高の確率密度関数としてレーリー分布を仮定するとともに，砕波波高以上の波が減衰すると仮定する．

砕波波高は合田（1970）の砕波公式を自ら取得した実験データを基に修正した木村・瀬山（1986）の式（1）より求める．

$$\frac{H_b}{h_b}=C_{br}\left[0.16\frac{L_0}{h_b}\left\{1-\exp\left[-0.8\pi\frac{h_b}{L_0}\left(1+15\tan^{4/3}\beta\right)\right]\right\}-0.96\tan\beta+0.2\right] \quad \cdots\cdots(1)$$

1 正会員　博（工）　（独法）港湾空港技術研究所 海洋・水工部
2 正会員　新潟港湾・空港整備事務所長
3　新潟港湾空港技術調査事務所長
4　新潟港湾・空港整備事務所海岸課長

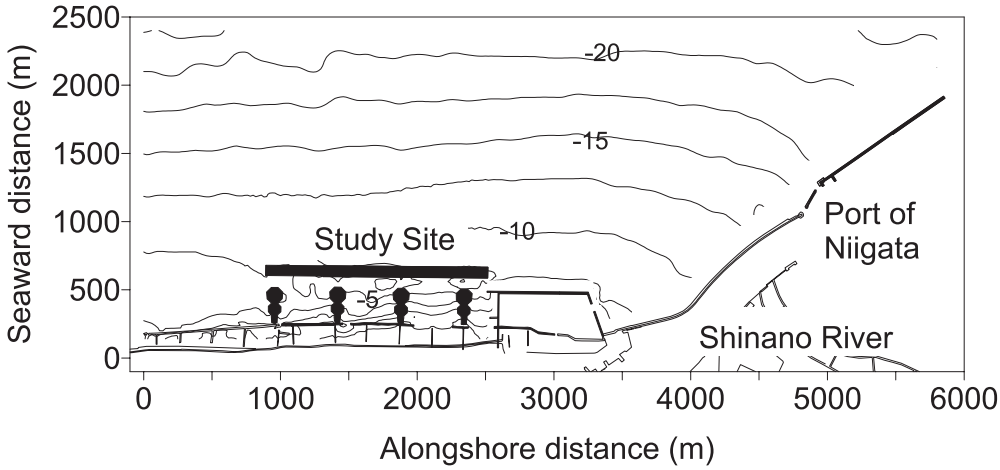

図-1　新潟西海岸の地形と構造物の位置（2008年7月）

ここで，H_b は砕波波高，h_bは砕波水深，C_{br}は無次元係数，L_0は沖波波長，tanβは海底勾配である．無次元係数C_{br} は実験データを基にしている式（1）を現地に適用するためにKuriyama・Ozaki（1996）が導入したものである．海底勾配は沖向きに水深が大きくなる傾きを正と定義するとともに，計算地点を挟む30mの区間の平均勾配とした．

砕波による波浪減衰は，式（2）に示すように，Thornton・Guza（1983）のボアモデルより求まる波浪エネルギーの減衰量$B(H)$に波高の確率密度関数$P(H)$を乗じた値の積分として求める．具体的には，H_b～$3H_b$の範囲を20区間に分割し，それぞれの区間の代表波高に対して波浪減衰量を計算する．なお，最も大きい代表波高の確率密度は，$3H_b$よりも大きい波高の出現確率も含むものとする．

$$\frac{\partial E_w C_g \cos\theta}{\partial x} = \int_{H_b}^{\infty} P(H)B(H)dH \qquad \cdots\cdots (2)$$
$$B(H) = \frac{1}{4}\rho g \frac{1}{T}\frac{(B_w H)^3}{h}$$

ここで，E_wは波浪エネルギー，C_gは群速度，xは沖方向距離，θは波向，ρは海水の密度，gは重力加速度，Tは周期，Hは波高，hは水深である．式（2）の無次元係数B_wは，Kuriyama・Ozaki（1996）が木村ら（1998）の実験データを基に式（3）のように公式化した．

$$B_w = C_B\{1.6 - 0.12\ln(H_0/L_0) + 0.28\ln(\tan\beta)\} \qquad \cdots (3)$$

ここで，H_0は沖波波高，C_Bは式（1）のC_{br}と同様に実験室データを基にした式（3）を現地に適用するための無次元係数である．

断面変化サブモデルでは，岸沖漂砂量の岸沖勾配によって断面変化が生ずると仮定しており，岸沖漂砂量は以下に示す4つの成分，すなわち，砕波によって浮遊した底質が戻り流れで沖向きに輸送される浮遊砂量Q_s，流速波形の上下の非対称性による岸向き掃流砂量$Q_{b,v}$，流速波形の前後の非対称性による岸向きの掃流砂量$Q_{b,a}$，海底勾配による漂砂量$Q_{b,slope}$，から構成されている．

浮遊砂量の計算（式（4））においては，Kobayashiら（2008）にならい，浮遊する底質の量がsurface rollerのエネルギー減衰量に比例すると仮定している．流速の上下の非対称性による掃流砂量（式（5））はBailard（1981）の式を，流速の前後の非対称性による掃流砂量（式（6））はHoefel・Elgar（2003）の式を，海底勾配による掃流砂量（式（7））はBailard（1981）の式を基にしている．

$$Q_s = \alpha_1 \frac{D_r}{\rho g(s-1)w_f} U \qquad \cdots\cdots (4)$$

$$Q_{b,v} = -\alpha_2((\sqrt{\beta_1})_u u_{b,rms}^3 \cos\theta + (u_{b,rms}^2 + u_{bl,rms}^2)V\sin\theta\cos\theta) \qquad \cdots\cdots (5)$$

$$Q_{b,a} = -\alpha_3\left((\beta_3)_u a_{b,rms} - a_{cr}\left|(\beta_3)_u\right|/(\beta_3)_u\right)\cos\theta, \quad \left|(\beta_3)_u a_{b,rms}\right| > a_{cr} \qquad \cdots (6)$$
$$Q_{b,a} = 0, \quad \left|(\beta_3)_u a_{b,rms}\right| \le a_{cr}$$

$$Q_{b,slope} = \alpha_4 \frac{\tan\beta}{\tan\phi}\left(u_{b,rms}^3 + u_{bl,rms}^3\right) \qquad \cdots\cdots (7)$$

ここで，α_1は無次元係数，D_rはsurface rollerのエネルギー減衰率，sは底質の比重，w_fは底質の沈降速度，Uは戻り流れ速度，α_2はs^2/mの次元を持った係数，$(\beta_1)^{1/2}{}_u$は流速のskewness，$u_{b,rms}$は底面流速の振幅，$u_{bl,rms}$は長周期波による底面流速の振幅，Vは沿岸流速，α_3はmsの次元を持った係数，$(\beta_3)_u$は流速のatiltness（加速度のskewness），$a_{b,rms}$は底面における加速度の振幅，a_{cr}は底質の移動限界

加速度（= 0.2 m/s^2），α_4はs^2/mの次元を持った係数，ϕは内部摩擦角（= 30 degree）である．

（2）現況再現計算

新潟西海岸における計算では，第1突堤と第2突堤とに挟まれた領域（図-**2**）において既存の離岸堤や突堤が無い領域（沿岸方向距離2000m～2060m及び2140m～2200m）の平均断面を対象とし，潜堤の天端高さは-2.5mとした．平均断面の一例として，2008年7月の断面を図-**3**に示す．

現況再現計算においては，まず，波浪・surface roller変形サブプログラムにおける式（1），（3）に含まれる係数C_{br}，C_Bを潜堤周辺での波浪観測結果を基に決定した．続いて，式（4）～（7）で表される4つの漂砂量に含まれる係数α_1～α_4を2001年7月から2002年7月までの1年間の断面変化を基に決定した．

（a）波浪変形計算

係数C_{br}，C_Bを決定する際に用いる波浪データは，2008年11月～2009年2月に新潟港湾・空港整備事務所によって潜堤の沖と岸で取得されたものである．潜堤よりも岸における観測地点（St.1とSt.2）の位置は図-**2**に示す通りであり，沖での観測地点の位置は沖方向距離 x = 1220mである．

計算における沖側境界は沖の波浪観測地点（x = 1220m）とし，計算格子幅は5m，波向は汀線に対して直角方向とした．観測地点St.1とSt.2における実測値と計算値との誤差が最小となるように決定された係数の値は，C_{br} = 0.7，C_B = 0.6であり，両者の誤差は0.166mであった．図-**4**は，両者の相関を示したものであり，両観測地点ともに実測波高が2mよりも小さいと推定値が実測値を上回り，大きいと推定値が実測値を下回る傾向があるものの，モデルは，潜堤背後の波浪変形を精度良く推定していることがこの図からうかがえる．なお，推定値と実測値との上記の誤差の原因としては，モデルでは海底面および潜堤天端での摩擦による波浪減衰を考慮していないことが考えられる．

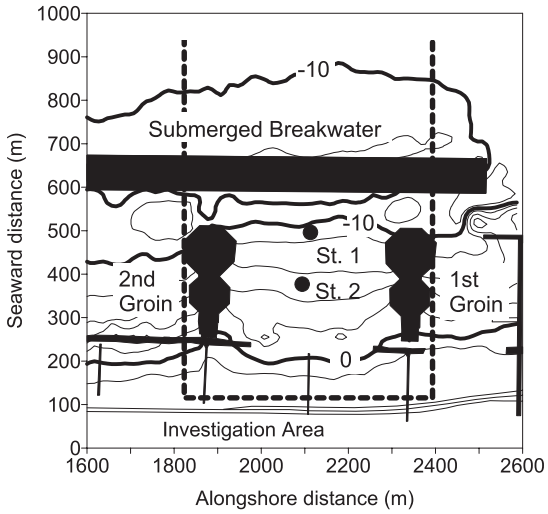

図-**2**　検討範囲における地形と構造物の位置および波浪観測地点の位置

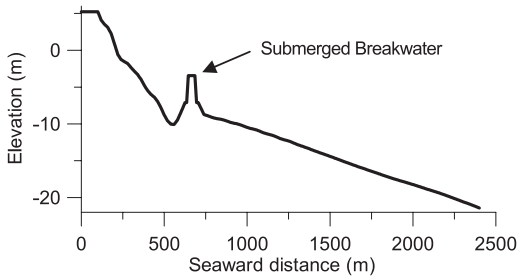

図-**3**　新潟西海岸における2008年7月の平均断面

（b）断面変化計算

式（4）～（7）で表される4つの漂砂量に含まれる係数α_1～α_4を新潟西海岸における2001年7月から2002年7月までの1年間の断面変化を基に，x = 100～400mの範囲における地盤高さの実測値と計算値との誤差が最小となるようにSCE-UA（Shuffled Complex Evolution - University of Arizona）法（Duanら，1993；土木学会，2000）を用いて決定した．

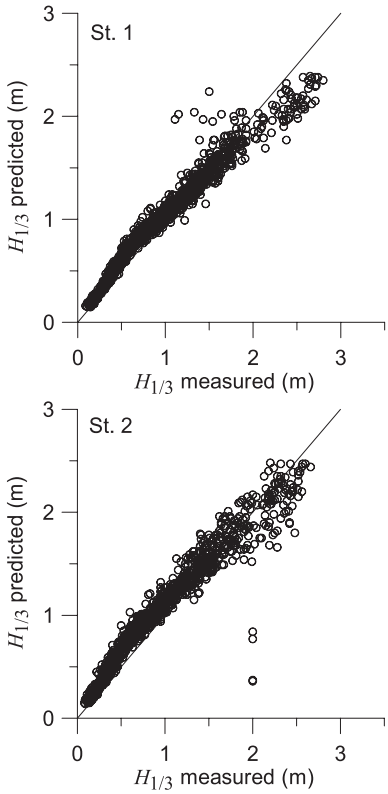

図-**4**　St.1とSt.2における有義波高の実測値と計算値との比較

計算では，沖側境界をx = 2400mの水深約22mの地点（図-**3**）に設定するとともに，格子間隔を5m，時間間隔を2時間とし，地形変化の計算は潜堤より岸側のみで行った．沖側境界の波高・周期は新潟沖の水深約35mの地点で取得されている沖波データから浅水係数を考慮して推定した値とし，波向は汀線に対して直角と仮定した．

計算の結果求まった係数の値は，$\alpha_1 = 2.0 \times 10^{-4}$，$\alpha_2 = 8.17 \times 10^{-5}$ s^2/m，$\alpha_3 = 1.42 \times 10^{-5}$ m/s，$\alpha_4 = 5.079 \times 10^{-4}$ s^2/mであった．図-**5**はキャリブレーション期間である2001年から2002年までの断面変化とその後の2008年までの断面変化を示したものであり，図-**6**は2001年から2008年までの期間の平均の岸沖漂砂量の岸沖分布を示したものである．

モデルは，x = 150～200mの領域の漂砂量を沖向きに過大評価しているものの，前浜（x = 150～220m）の侵食は良く再現している．一方，x < 150mにおける遡上波あるいは飛砂によると考えられる堆積は計算では再現できておらず，さらに，計算では，前浜から沖に輸送された土砂の一部がx = 230m付近に堆積することにより，実測には無い小さな堆積領域が生じるとともに，それより沖がやや急勾配となっている．また，図面は示さないものの，x > 300mでは，実測では沖向き漂砂量が増大し，断面が侵食されているのに対して，計算では，x = 300mから400mにかけて沖向き漂砂が減少し，堆積が生じている．

実測と計算との間には上記の差があるものの，モデルの精度を表すBrier skill score（実測と計算が一致するとscore = 1，対象モデルが初期地形から変化しないと仮定するモデルよりも精度が悪いとscore < 0）は2008年7月で0.16であり，本モデルは現地における潜堤背後の断面変化をおおむね再現していると言える．

モデルがx > 300mでの侵食を再現できなかった理由の一つとして，潜堤背後での沿岸流の発達が考えられる．潜堤背後では平均水位の上昇により沿岸流が発達しやすく，この沿岸流によって底質が移動しやすくなり，底質が戻り流れによって沖に流出した可能性がある．ただし，検討領域は岸からx = 500m付近まで延伸された突堤で囲まれているため，沿岸流の影響がx > 300mの断面変化に，どの程度影響を与えたかは不明であり，今後，流れと地形変化に関する現地データや3次元地形変化の数値シミュレーション結果による検討が必要である．

本キャリブレーションで得られた係数の値を茨城波崎海岸の砂州移動を中心とした断面変化を基に得られた係数の値（Kuriyama，2010）と比較してみると，海底勾配による漂砂量の係数α_4に関しては，本研究での値（5.079 × 10^{-4} s^2/m）は波崎での値（7.755 × 10^{-4} s^2/m）の約2/3であった．一方，それ以外の漂砂量の係数であるα_1～α_3に関しては，本研究での値（$\alpha_1 = 2.0 \times 10^{-4}$，$\alpha_2 = 8.17 \times 10^{-5}$ s^2/m，$\alpha_3 = 1.42 \times 10^{-5}$ m/s）は波崎での値（$\alpha_1 = 1.147 \times 10^{-3}$，$\alpha_2 = 7.651 \times 10^{-4}$ s^2/m，$\alpha_3 = 9.96 \times 10^{-5}$ m/s）に比べて非常に小さかった（1/6～1/9）．この原因は現段階では不明であり，この点についても今後の検討が必要である．

（3）潜堤の天端高さが断面変化に与える影響

潜堤の天端高さh_cを-2.0m，-1.5mとし，2001年7月の断面を初期断面として2008年7月までの計算を行った．図-**7**は断面変化に関する，図-**8**は岸沖漂砂量の岸沖分布に関する計算結果の比較を示したものである．潜堤の天端高さを高くすると，前浜の侵食量がやや減少するとともに，x = 200m付近から沖向き漂砂量が減少し（図-**8**），前浜で侵食された土砂がx = 230～270mの領域（地盤高さ0～-2m）に留まる結果となった（図-**7**）．ただし，現況再現時（h_c = -2.5m）におけるx > 200mの領域での沖向き漂砂量の増加量の計算値は現地の値よりも小さいので（図-**6**，**8**），x = 230～270mの領域における実際の堆積量は図-**7**に示されている計算算結果よりも小さい可能性がある．

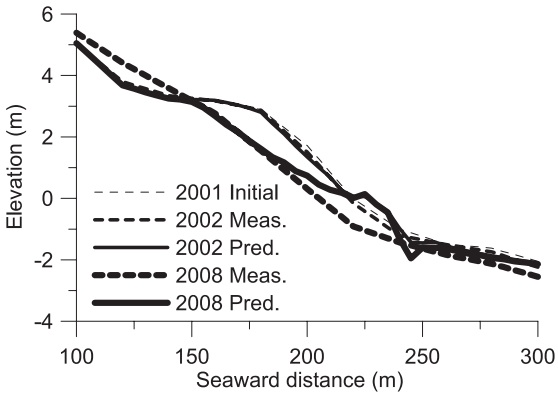

図-**5**　断面変化に関する実測値と計算値との比較

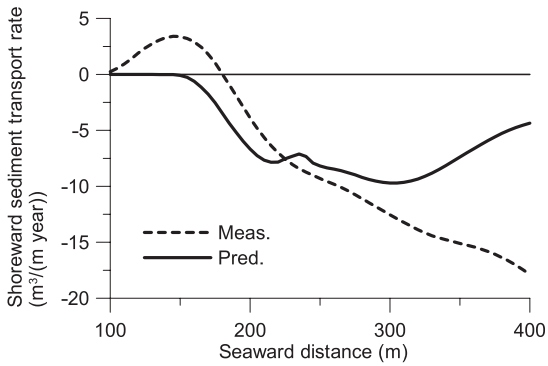

図-**6**　2001～2008年の岸沖漂砂量の岸沖分布に関する実測値と計算値との比較．岸向きが正．

4. おわりに

新潟西海岸の潜堤背後における2001年7月から2002年7月までの1年間の沖方向距離x = 100m～400mの領域（地盤高さ5～-5m）の断面変化を用いてキャリブレーションを行った断面変化モデルは，x = 150～200mの領域にける漂砂量を沖向きにやや過大評価しているものの，前浜（x = 150～220m）の侵食は良く再現した．しかし，計算では，前浜から沖に輸送された土砂の一部がx = 230m付近に堆積することにより，実測には無い小さな堆積領域が生じるとともに，それより沖がやや急勾配となった．モデルの精度を示すBrier skill scoreは2008年7月で0.16であり，本モデルは現地における潜堤背後の断面変化をおおむね再現していると言える．

このモデルを用い，潜堤の天端高さを変化させて断面変化を計算したところ，潜堤の天端高さを高くすると，前浜の侵食量がやや減少するとともに，x = 200m付近から沖向き漂砂量が減少し，前浜で侵食された土砂がx = 230～270m（地盤高さ0～-2m）に留まる結果となった．

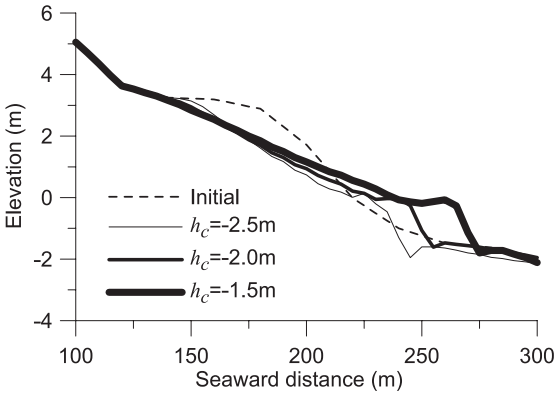

図-7　潜堤の天端高さを変化させた時の断面変化の比較

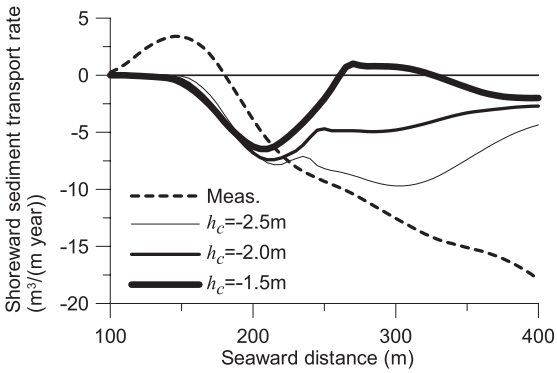

図-8　潜堤の天端高さを変化させた時の岸沖漂砂量の岸沖分布の比較．岸向きが正．

謝辞：本研究で使用した沖波データは国土交通省新潟港湾・空港整備事務所と当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

木村　晃，瀬山　明（1986）：斜面上の不規則波の砕波限界について，第33回海岸工学講演会論文集，pp.174-178.

木村　晃，後藤克史，瀬山　明（1988）：浅海域における不規則波の波高変化について，第35回海岸工学講演会論文集，pp.168-172.

合田良実（1970）：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp.39-49.

土木学会　応用力学委員会　逆問題小委員会（2000）：土木工学における逆問題入門，土木学会，158p.

吉田秀樹・清水利浩・伊部知徳・山田貴裕・片野明良（2008）：大規模潜堤背後の海浜地形の特徴と地盤沈下による断面変化，海岸工学論文集，第55巻，pp.751-755.

Bailard, J.A. (1981) : An energetics total load sediment transport model for a planar sloping beach, J. Geophys. Res, Vol.86, No.C11, pp. 10,938-10,954.

Duan, Q. Y., V. K. Gupta and S. Sorooshian (1993) : Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, J. Optimization Theory and Applications, Vol. 73, No. 3, pp. 501-521.

Hoefel, F. and S. Elgar (2003) : Wave-induced sediment transport and sandbar migration, Science, 299, pp. 1885-1887.

Kobayashi, N., A. Payao and L. Schmied (2008) : Cross-shore suspended sand and bedload transport on beaches, J. Geophys. Res., Vol.113, C07001, doi:10.1029/2007JC004203.

Kuriyama, Y. and Y. Ozaki (1996) : Wave height and fraction of breaking waves on a bar-trough beach -Field measurements at HORS and modeling-, Rep. Port and Harbour Res. Inst., Vol.35, No.1, pp.1-38, 1996.

Kuriyama, Y. (2010) : Numerical simulation of cyclic seaward bar migration, Rep. Port and Airport Res. Inst., Vol.49, No. 2. (in press)

Thornton, E. B. and R. T. Guza (1983) : Transformation of wave height distribution, J. Geophys. Res., Vol.88, No.C10, pp.5925-5938.