

長期間平均の沿岸漂砂量の岸沖分布

Cross-shore Distribution of Long-Term Average Longshore Sediment Transport Rate

栗山善昭¹・坂本 光²

Yoshiaki KURIYAMA and Hikari SAKAMOTO

Cross-shore distributions of longshore sediment transport rate at the Hasaki Coast of Japan for 15 years from 1987 to 2001 were estimated with a one-dimensional numerical model and the cross-shore distribution of the long-term average longshore sediment transport rate was examined. The model was calibrated with longshore current velocities measured with a spherical float once a day at about 50-m intervals along a 427-meter-long pier at the study site. Numerical simulations showed that the average longshore sediment transport rate was northward near the shore, but southward away from the shore.

1. はじめに

長期間平均の沿岸漂砂（以下、平均沿岸漂砂）は、長期地形変化の原因となることから、その把握は土砂収支検討あるいは海岸管理において重要である。汀線近傍の平均沿岸漂砂の方向は構造物周辺の地形変化より把握することが可能である。構造物の漂砂上手側で堆積が生じ、下手側で侵食が生ずる。しかし、汀線近傍よりも沖の平均沿岸漂砂については情報が少なく、Sato (1996) によって岸と沖では平均沿岸漂砂の方向が異なる可能性が示されているものの、平均沿岸漂砂の岸沖分布に関しては不明な点が多い。そこで、本研究では、茨城県波崎海岸を対象とし、沿岸漂砂量の岸沖分布を 2 時間ごとに 15 年間分計算し、それらを平均することにより平均沿岸漂砂量の岸沖分布を求め、その特性を検討した。

2. 沿岸漂砂量推定数値シミュレーションモデル

本研究で用いたモデルは、沿岸方向に地形が一様であるとの仮定の下での波の変形と波の谷の位置より下方における鉛直方向平均の沿岸流速、および沿岸漂砂量を推定する 1 次元モデルであり、波浪変形サブモデル、沿岸流速推定サブモデル、沿岸漂砂量推定サブモデルの 3 つのサブモデルより構成されている。沿岸漂砂量の計算では、まず、栗山・中官 (1999) によって開発された波浪変形サブモデルと沿岸流速推定サブモデルを用いて一つの不規則波群を構成する個々波の変形および個々波毎の沿岸流速を計算し、その計算結果を基に、一つの不規則波群の有義波高と時間平均の沿岸流速を求める。続いて、時間平均の波浪特性、沿岸流速を用いて沿岸漂砂量サブモデルから沿岸漂砂量を計算する。波浪変形サブモデルについては栗山・中官 (1999) に詳述されているので、

本章では、残りの二つのサブモデルの概要を説明する。

(1) 沿岸流速推定サブモデル

個々波の時間平均の沿岸流速 U_{ind} は、以下の運動量方程式、すなわち摩擦項 F_x と radiation stress 項 R_x 、風応力項 W_x 、surface roller による運動量フラックス項 M_x 、水平拡散項 L_x の釣り合い式によって求める。

$$F_x + R_x - W_x + M_x - L_x = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

Radiation stress 項としては微小振幅波理論より求まる式を用い、風応力項は以下の式で推定する。

$$W_x = C_d \rho_a W_v^2 \sin \alpha_w / (\rho_w h) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 C_d は無次元係数、 ρ_a は空気の密度、 W_v は風速、 α_w は風向、 ρ_w は海水の密度、 h は水深である。係数 C_d は栗山ら (2005) にならい、0.0022 とした。

Surface roller 項 M_x は、波のトラフより上方の時間平均の岸沖流速分布として三角形分布、すなわち surface roller の底面で 0、頂部で波速 C となる速度分布を仮定したときの surface roller の運動量フラックス M_r を使って次式で評価する。

$$M_x = \frac{1}{\rho_w h} \left(\frac{\partial M_r}{\partial y} \right), \quad M_r = -\frac{1}{3} \rho_w C^2 \frac{A_r}{L} \cos \theta \sin \theta \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 y は沖方向距離、 L は波長、 θ は波向、 A_r は surface roller の面積であり、以下の方法で求める。

(a) Surface roller の面積は波高の 2 乗に比例すると仮定する。この仮定を基にして得られる surface roller の面積 A_{r1} は無次元係数 C_A と波高 H を使って次式で表される。

$$A_{r1} = C_A H^2 \quad \cdots \cdots (4)$$

無次元係数 C_A は、イリバーレン数 ξ_b の関数として次式で表される。

$$C_A = 17.0 \log \xi_b + 24.7 \dots (5)$$

$$\xi_b = \tan \beta / \sqrt{H_{1/3,b}/L_{1/3,0}}$$

ここで, $\tan \beta$ は海底勾配, $H_{1/3,b}$ は碎波有義波高, $L_{1/3,0}$ は有義波周期に対応した沖波波長である.

(b) ただし, surface roller の面積は surface roller のエネルギー減衰を 0 とした以下のエネルギー変換式 (6) より得られる surface roller の面積 A_{r2} より大きくならない.

$$\frac{\partial(E_w C_g)}{\partial y} + \frac{\partial W_r}{\partial y} = 0, \dots (6)$$

$$W_r = \frac{1}{8} \rho_w C^3 \frac{A_{r2}}{L}$$

ここで, E_w は波のエネルギー, C_g は群速度, W_r は波のトラフより上方の流速分布として三角形分布を仮定したときの surface roller のエネルギーフラックスを表している.

(c) Surface roller は波が再生した地点で消滅する.

実際の計算では, 碎波してから波が再生するまでの区間において, 仮定 (a) を基に得られる surface roller の面積 A_{r1} と仮定 (b) を基に得られる A_{r2} の小さい方をその地点の surface roller の面積とする.

水平拡散項は式 (7) より求め, 水平拡散係数 ε は Battjes (1975) と同様に波のエネルギー減衰, ここでは個々波の surface roller のエネルギー減衰を基に推定する.

$$L_x = \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U_{ind}}{\partial y} \right),$$

$$\varepsilon = Mh \left(\frac{D}{\rho_w} \right)^{1/3}, \dots (7)$$

$$D = \frac{\partial(E_w C_g)}{\partial y} + \frac{\partial W_r}{\partial y}$$

ここで, M は無次元係数であり, Kuriyama・Ozaki (1996) が $M=5 \sim 10$ とすると実測値と計算値とがよく一致することを示していることから, ここでは $M=5$ とした.

摩擦項 F_x は, 西村 (1982) によって示された波と流れを考慮した次式より求める.

$$F_x = \frac{C_f}{h} \left(W + \frac{w_b^2}{W} \sin^2 \theta \right) U_{ind},$$

$$W = (\sqrt{U_{ind}^2 + w_b^2} + 2U_{ind}w_b \sin \theta + \dots) (8)$$

$$\sqrt{U_{ind}^2 + w_b^2} - 2U_{ind}w_b \sin \theta / 2,$$

$$w_b = 2v_m/\pi, v_m = \pi H / (T \sinh(2\pi h/L))$$

ここで, C_f は無次元係数, w_b は底面における波による水粒子速度の振幅, T は周期である.

無次元係数 C_f に関しては, 栗山・中官 (1999) が,

$C_f = 0.005$ とした本モデルが沿岸砂州周辺の沿岸流速を精度良く再現することを確認している. しかし, Garcez-Faria ら (1998) は現地観測データを基に摩擦係数は岸沖方向に一定ではないことを報告しており, さらに, 波崎海岸においても, その後の検討で摩擦係数を一定とすると碎波帯外における沿岸流速を過小評価してしまうことが明らかとなった.

そこで, Garcez-Faria ら (1998) や Ruessink ら (2001) の研究にならい, 摩擦係数を水深の関数 (式 (9)) と仮定し, 計算値と実測値との誤差が最も小さくなるように粗度係数 k_a と無次元係数 α とを求めた. 検討結果は 3. で述べる.

$$C_f = 0.011 \left(\frac{k_a}{h} \right)^{1/\alpha} \dots (9)$$

(2) 沿岸漂砂量推定サブモデル

沿岸漂砂量の推定では, 渡辺ら (1984) の三次元海浜変形予測モデルにおいて流れによる漂砂量の推定に用いられている次式を使用した.

$$Q = A(\tau_b - \tau_{cr})U / (\rho_w g)$$

$$\tau_b = \rho_w h F_x \dots (10)$$

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho_w) g d \Psi_{cr}$$

ここで, Q は沿岸漂砂量, A は係数, τ_b は底面せん断力, τ_{cr} は移動限界せん断力, U は時間平均の沿岸流速, g は重力加速度, d は粒径, ρ_s は底質の密度, Ψ_{cr} は限界シールズ数である. 底面せん断力を推定する際に用いる F_x は, 波と流れの両方の影響を考慮している前述の式 (8) である.

3. 沿岸流速推定サブモデルのキャリブレーション

波崎海洋研究施設 (Hazaki Oceanographical Research Station, 以下 HORS; 位置は図-1 参照) において 1987 年 1 月 ~ 2001 年 12 月にかけて取得された沿岸流速データを用いてモデルのキャリブレーションを行った. HORS では, 長さ約 400 m の観測栈橋に沿って, 休日を除く 1 日 1 回, 浮き (フロート) によって沿岸流速を観測している (栗山ら, 2005). 観測地点は, 汀線近傍の基準点からの沖方向距離 (後述の図-2 参照) が 115 m, 145 m, 190 m, 240 m, 285 m, 330 m, 380 m の地点である. フロートによる沿岸流速の観測は簡単な方法であるけれども, 本方法によって沿岸流速を精度良く測定できることは栗山ら (1992) が電磁流速計による観測結果と本方法による観測結果とを比較することにより確認している.

図-2 は 1 日 1 回の断面測量結果および年 1, 2 回の深淺測量結果を基にした観測期間中の平均断面を示したものである. 以下, 観測栈橋上の位置は図-2 の座標を基

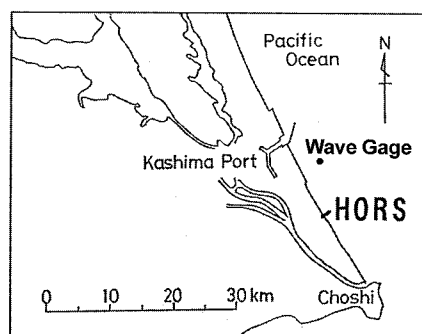


図-1 波崎海岸研究施設と沖波波高計の位置

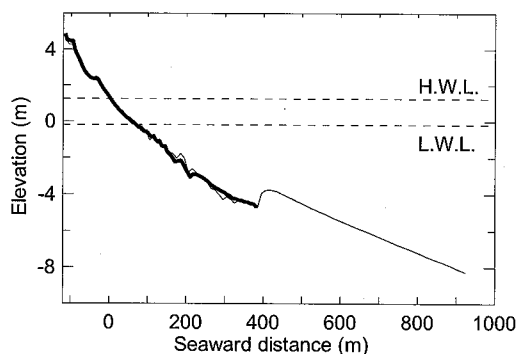


図-2 観測期間中の平均断面（波崎工事基準面基準）。太い実線は断面測量結果を、細い実線は深浅測量結果を基にしている。

に示す（例えば、沖方向距離 115 m の地点は P115 m と表す）。平均断面の海底勾配は汀線近傍では約 1/40 であるものの沖へ向かうほど緩やかになり、P300 m 付近では約 1/100、観測栈橋よりも沖（P400 m よりも沖）では約 1/120 となっている。底質粒径は岸沖方向にはほぼ一様であり、中央粒径は 0.18 mm である（加藤ら, 1990）。1986 年～1998 年に取得された 17 枚の深浅図を基にすると、HORS 周辺の地形は沿岸方向にはほぼ一様である（Kuriyama, 2002）。

沿岸流のほかには、観測栈橋先端で風向・風速を 1 時間に 10 分間観測している。沖波波高・周期は、鹿島港沖の水深約 24 m の地点（図-1）において 2 時間間隔で 20 分間観測されている。同観測地点では波向観測も行われているものの、キャリブレーション期間には欠測が比較的多かったことから、沖波波向として、橋本ら（1999）が、広範囲の風データを入力データとし、非線形相互作用による波浪エネルギー伝達を定式化した WAM と呼ばれる第三世代波浪推算モデルを用いて推定した値を用いる。ただし、沖波波向は沿岸流速に大きな影響を与えるものの、推算された沖波波向の精度が十分に検討されているわけではない。そこで、本研究では

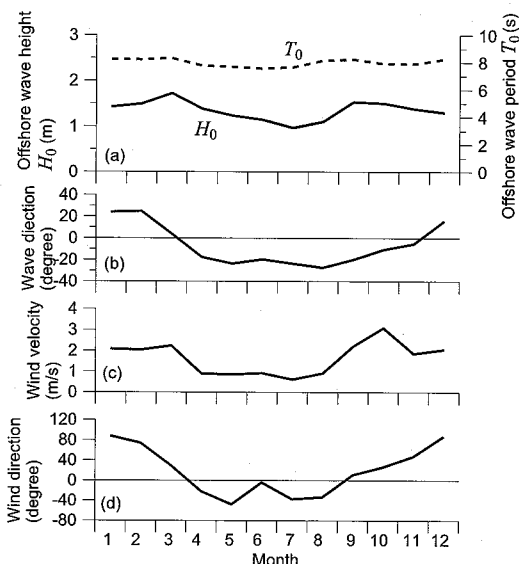


図-3 (a) 沖波波高・周期, (b) 沖波波向, (c) 風速, (d) 風向の月平均

沖波波向に一律、補正角度 θ_c を加えることとし、この値は沿岸流速の実測値と計算値との差が最小となるように設定した。その結果は後述する。

沖波波高・周期・波向、および観測栈橋先端における風速、風向の月平均を図-3 に示す。沖波波高は 1～3 月および 9～10 月にかけて大きく、6～8 月にかけて小さい。沖波周期は約 8 s で、季節的にほぼ一定である。波向に関しては、12～2 月には北からの入射が多く、5～9 月には南からの入射が多くなっている。風況としては、10～2 月にかけては強い風が北から入射するのに対して、5～8 月にかけては弱い風が南から入射することが多い。

計算の沖側境界は P925 m 地点（地盤高さ D.L. -8.28 m）に設定し、格子間隔は 10 m とした。断面地形としては、栈橋先端の P385 m 地点より岸側では毎日の観測データを用い、P445 m より沖側では年 1～2 回実施している栈橋先端より沖の深浅測量結果の平均値を用いる。P445 m～P385 m の領域では、P445 m と P385 m の地盤高さを用いて線形補間した値を用いる。平均水位としては沿岸流速観測時の潮位を与え、境界条件としては、沖側境界と汀線において沿岸流速値を 0 と設定した。

各観測値点における沿岸流速の実測値と計算値との誤差の二乗の総和が最小となるように試行錯誤によって得られた係数は $k_a = 1.09$ m, $\alpha = 1.4$ であり、補正角度 θ_c は北側に 3° であった。また、そのときの誤差の二乗平均平方根値は 0.22 m/s であった。

以上の値を用いて求めた P380 m 地点と P115 m 地点における沿岸流速の計算値と実測値とを比較したものが

図-4, 長期間平均した沿岸流速の岸沖分布の計算値と実測値とを比較したものが図-5である。図-4より, 計算値に多少のパラツキはあるものの, 岸, 沖ともに計算値は実測値を比較的精度良く再現している。また, 長期平均の沿岸流速に関しては (図-5), 計算値は, 岸では北

向き, 沖では南向きの沿岸流が卓越するという現地の長期平均沿岸流の特徴を定性的にも定量的にも良く表現している。なお, 長期の沿岸流速の方向が岸と沖で異なる原因は, 北向き, 南向きの沿岸流が生じた場合の波浪と風の特性が異なっていたことにあり, その詳細な検討は栗山ら (2005) によって行われている。

4. 沿岸漂砂量の推定および考察

沿岸漂砂量の計算期間は沿岸流速推定サブモデルのキャリブレーション期間と同様の 1987 年 1 月～2001 年 12 月までの 15 年間であり, 計算の時間間隔は 2 時間である。粒径は 0.2 mm とし, 係数 A の値は, 清水 (1996) に示されている漂砂量係数に関する既往の研究例を参考に 2.0 とした。限界シールズ数としては, 粒径 0.2 mm とすると Madsen・Grant (1976) によって示されている定常流に対する限界シールズ数曲線からは 0.05 , 土屋 (1986) からは 0.07 が求まることから, 本研究では $\tau_{cr}=0.06$ とした。図-6 は P115m 地点での沿岸漂砂量の計算値の向きが北向き, 南向きであった場合のそれぞれの沿岸漂砂量を計算期間累積した値を基に求めた, 1 年当たりの北向き, 南向きの沿岸漂砂量の絶対値の岸沖分布を示したものであり, 図-7 は平均沿岸漂砂量の岸沖分布を示したものである。

図-6 に示されている計算値を基に, 汀線から水深 7 m の地点 (P735 m 地点) まで積分した北向き, 南向きの 1 年当たりの沿岸漂砂量の値は, それぞれ $469,000, 596,000\text{ m}^3/\text{year}$ であり, Sato・Tanaka (1966) が深浅図を基に求めた水深 7 m までの北向き, 南向きの 1 年当たりの沿岸漂砂量 約 $600,000\text{ m}^3/\text{year}$ とほぼ一致した。この結果は, 本研究で用いたモデルの妥当性を示している。

一方, 平均沿岸漂砂量の岸沖分布 (図-7) を見てみると, 波崎海岸では岸と沖とで平均沿岸漂砂量の向きが異

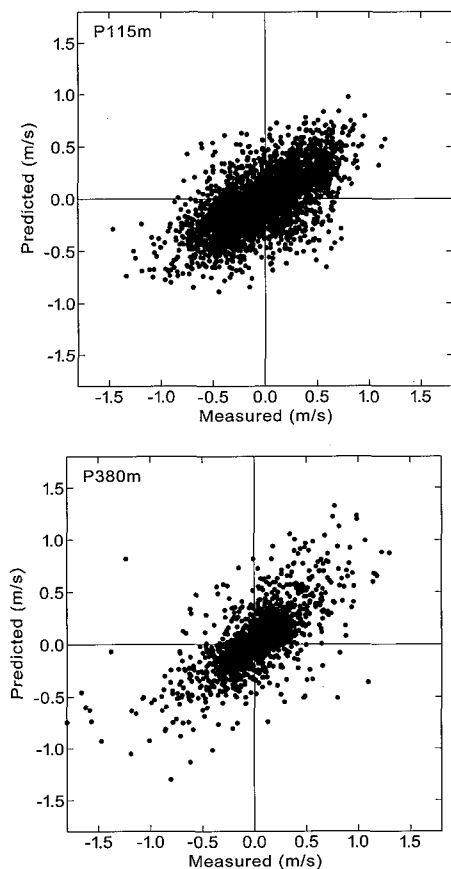


図-4 P115m 地点 (上図, 汀線近傍の基準点より 115m 沖側の地点) および P380m 地点 (下図) における沿岸流速の実測値と計算値との比較

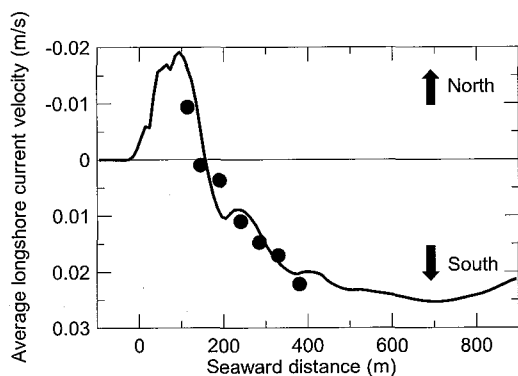


図-5 長期間平均の沿岸流速の岸沖分布の実測値 (黒丸印) と計算値 (実線) との比較

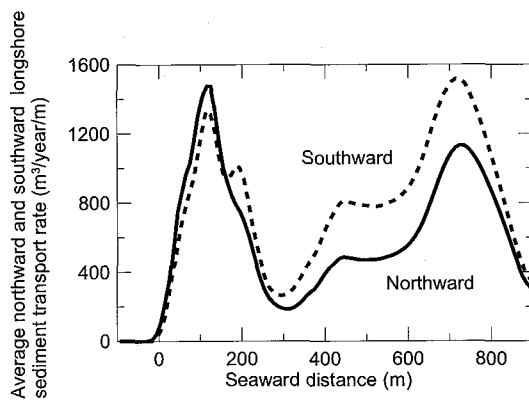


図-6 北向き, 南向きの 1 年当たりの沿岸漂砂量の絶対値の岸沖分布

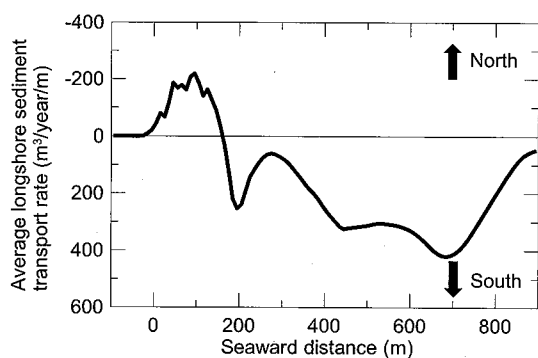


図-7 平均沿岸漂砂量の岸沖分布

なっていた。すなわち、岸では北向き漂砂が卓越していたのに対して、汀線から約 150 m 沖の地点よりも沖側では南向き漂砂が卓越していた。汀線近傍の平均沿岸漂砂の向きは、航空写真を基にした汀線変動より推定された沿岸漂砂の向き（例えば、田中ら, 1980）と一致しており、この結果も本研究における結論の妥当性を示していると言える。

本研究の成果は、異なる向きの沿岸流が生じたときの波浪や風の特性が異なっている場合には、Sato (1996) が示唆したように卓越沿岸漂砂の向きが岸と沖で異なる可能性があることを示している。構造物の漂砂下手側の汀線近傍において沿岸漂砂の不均衡による海岸侵食が生じており、岸の沿岸漂砂の卓越方向と沖のそれとが異なっている場合には、沖の砂をサンドバイパスの供給源として利用することが可能かもしれない。

今後は、本モデルの特に碎波帯外の沿岸漂砂量に対する現地適用性をより詳細に検討するとともに、他海岸における長期平均沿岸漂砂量の岸沖分布を検討する予定である。

5. 結 論

本研究では、茨城県波崎海岸で取得した沿岸流速データを用いてキャリブレーションした沿岸漂砂量推定モデルを基に、沿岸漂砂量の岸沖分布を 2 時間ごとに 15 年間分計算し、それらを平均することにより平均沿岸漂砂量の岸沖分布を求めた。その結果、平均沿岸漂砂量の向きは岸と沖で異なっており、岸では北向き漂砂が卓越していたのに対して、汀線から約 150 m 沖の地点よりも沖側では南向き漂砂が卓越していたことが明らかとなった。

本研究の結論は、波浪や風の条件によっては、沖の砂を海岸保全のためのサンドバイパスの供給源として利用することが可能であることを示唆している。

謝辞：本研究で使用した沖波データは国土交通省鹿島港湾・空港整備事務所と当所海象情報研究室より提供されたものである。また、本研究で使用した地形データは、波崎海洋研究施設に常駐した当所漂砂研究員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。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): 碎波帯内の底質粒径の変動特性—波崎海洋研究施設における現地調査—, 港研報告, 29 巻, 2 号, pp. 37-61.
- 栗山善昭・加藤一正・尾崎 靖(1992): 沿岸流速分布の類型化と支配要因の検討, 海岸工学論文集, 39 巻, pp. 196-200.
- 栗山善昭・中官利之(1999): 沿岸砂州周辺の戻り流れ・沿岸流推定モデル, 土木学会論文集, No. 635, pp. 97-111.
- 栗山善昭・伊東啓勝・柳嶋慎一(2005): 長期現地観測データに基づく卓越沿岸流の岸沖分布の検討, 土木学会論文集, No. 803/II-73, pp. 145-153.
- 清水琢三(1996): 海浜変形シミュレーション, 1996 年度(第 32 回)水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, pp. B-5-1-B-5-26.
- 田中則男・小山内英雄・夷塚葉子(1980): 我が主要海浜の特性について, 港湾技研資料, No. 356, 67p.
- 土屋義人(1986): 漂砂量則について, 第 22 回水工学に関する夏期研修会講義集, pp. 1-22.
- 西村仁嗣(1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第 29 回海講論文集, pp. 333-337.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦(1999): 第 3 世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討, 港研報告, 第 38 巻, 第 4 号, pp. 3-47.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海講論文集, pp. 406-410.
- Battjes, J.A. (1975): Modeling of turbulence in the surf zone, Symp. on Modeling Techniques, pp. 1050-1061.
- Garcez-Faria, A.F., E.B. Thornton, T.P. Stanton, C.V. Soares, and T.C. Lippmann (1998): Vertical profiles of longshore currents and related bed shear stress and bottom roughness, J. Geophysical Res., Vol. 103, No. C2, pp. 3217-3232.
- 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.
- Kuriyama, Y. (2002): Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, J. Geophysical Res., Vol. 107, No. C9, 3132, doi:10.1029/2001JC000899.
- Madsen, O.S. and W.D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th ICCE, pp. 1093-1112.
- Ruessink, B.G., J.R. Miles, F. Feddersen, R.T. Guza and S. Elgar (2001): Modeling the alongshore current on barred beaches, J. Geophysical Res., Vol. 106, No. C10, pp. 22451-22463.
- Sato, S. and N. Tanaka(1966): Field investigation on sand drift at Port Kashima facing the Pacific Ocean, Proc. 10th ICCE, pp. 595-614.
- Sato, S. (1996): Effects of winds and breaking waves on large-scale coastal currents developed by winter storms in Japan Sea, Coastal Eng. in Japan, Vol. 39, No. 2, pp. 129-144.