

# 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル

佐藤 慎 司\*・Michael B. Kabiling\*\*

## 1. はじめに

底質の移動機構に基づく合理的な海浜変形モデルを構築するためには、流速波形の非対称性や戻り流れの効果を含む非線形波浪モデルを基本とする必要がある。近年、非線形性を考慮した波浪場の計算が、工学上のさまざまな問題の解決に用いられるようになってきた。佐藤・Kabiling (1993) は、Boussinesq 方程式に運動量拡散項を導入し、構造物周辺の波浪・海浜流を計算できることを示した。彼らはさらに流れによる漂砂を評価することにより構造物背後の堆積をある程度シミュレートできることを示した。彼らのモデルでは、非線形性を含む基礎方程式を用いているため、波の計算と同時に平均水位の変化や海浜流が計算できるうえ、波による砂移動と密接に関連している岸向き流速と沖向き流速の非対称性を含んだ流速波形を評価することができる。

非線形波浪モデルを用いるもう一つの利点は、汀線近傍の諸量の評価ができることである。波打ち帯は、激しい底質移動が見られる場所であり、バームや浜崖の形成など特徴的な地形変化が生じることが多いため、海浜変形を考える上で重要である。しかし、従来の波浪の数値モデルでは、境界条件の設定を容易にするため岸側境界部分に一定水深領域を設けているものが多く、波の遡上運動は扱われていない。

本研究ではまず、Boussinesq 方程式を用いて、汀線における波の遡上運動を含めた砕波帯の波浪・海浜流場を計算する数値モデルを開発し、実験結果と比較することによりこれを検証する。さらに、掃流砂と浮遊砂に対してそれぞれ局所漂砂量モデルを提案し、計算された波浪場を用いて、侵食型、堆積型が生じる広い範囲の条件における海浜の縦断面予測を行うことにより、漂砂モデルの適用性を検証する。そして、波・流れのモデルと底質の移動モデルとを結合することにより、地形変化が激しい波打ち帯まで含めた三次元海浜変形モデルを構築することを目的とした。

## 2. 波浪・海浜流モデル

### 2.1 基礎方程式

佐藤・Kabiling (1993) は、Boussinesq 方程式に砕波による運動量拡散項を導入し、砕波変形を含めた非線形波浪・海浜流場を同時に計算できる数値モデルを提案した。基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial x \partial y \partial t} \right) \\ - \frac{f_w}{2d^2} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} + M_{Dx} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \frac{1}{3} h^2 \left( \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial y^2 \partial t} \right) \\ - \frac{f_w}{2d^2} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} + M_{Dy} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、変数の定義は図-1に示す通りで、 $\eta$  は水面変動、 $Q_x$ 、 $Q_y$  は線流量、 $h$  は静水深、 $d (= h + \eta)$  は全水深、 $f_w$  は底面摩擦係数、 $g$  は重力加速度である。また、 $M_{Dx}$ 、 $M_{Dy}$  は砕波による運動量の拡散項で、渦動粘性係数  $\nu_e$  を用いて次式のように表した。

$$M_{Dx} = \nu_e \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$M_{Dy} = \nu_e \left( \frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

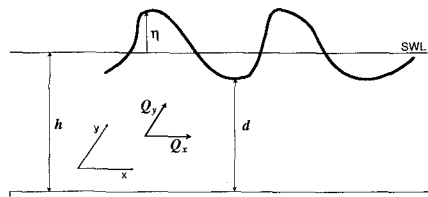


図-1 変数の定義

\* 正会員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室  
 \*\* 工博 (前)横浜国立大学大学院 工学研究科

碎波の判定は、波峰水面における水粒子速度  $u_{smax}$  と波の位相速度  $C$  との比が限界値を越えた時に碎波が起これと考えて決定し、碎波帯内については、佐藤・Kabling (1993) が用いたのと同じ渦動粘性係数を用いて計算した。

計算は ADI 法を用いて行い、静水状態から始めて波浪・海浜流場がともに平衡状態となるまで繰り返した。入射境界では 1 次近似のクノイド波を入射させ、かつ計算領域からの反射波を取り除く処理を行った。

2.2 汀線における境界条件

汀線における波の遡上運動は、岩崎・真野 (1979) にならい、汀線前後の地形を計算上の格子幅のステップで近似し、水陸境界点における水位の高低により汀線位置を移動させることにより導入した。すなわち、水陸境界点での水位が陸側格子の地盤高より低い場合は線流量を 0 とし、高い場合は線流量を運動方程式から計算してかつ境界を一格子分陸へ移動させる。この方法では、一時間ステップで一格子しか移動できないため、時間ステップを大きくとれないなどの制限を有するが、三次元条件での適用が極めて容易である。

汀線境界条件の妥当性を検証するために、まず、用いた碎波モデルで静水汀線における波高と平均水位が精度良く予測できているかどうか確認した。図-2, 3 はそれぞれ静水汀線における波高  $H_s$  と平均水位  $\bar{\eta}_s$  を、さまざまな波浪・海底勾配条件に対して計算したものである。図中、 $\tan \beta$  は海底勾配、 $H_0$  は沖波波高、 $L_0$  は沖波波長である。図中の実線は、佐々木・佐伯 (1974) や水口ら (1978) の実験結果をもとに Sunamura (1984) が導いた経験式を表している。碎波の判定指標に用いた流速波速比は、実験結果との比較から  $u_{smax}/C=0.4$  とした。波

高・平均水位ともに、Sunamura (1984) が用いた経験式とほぼ一致する計算結果となっている。ただし、波形勾配が非常に小さな領域では、波高・平均水位ともに過大評価する傾向がある。

波打ち帯への入力となる波高と平均水位が碎波モデルで妥当に計算されていることが確認できたので、次に、最大遡上高  $R_u$  を検討した。比較の対象としたのは、Hunt (1959) の式と Ogawa・Shuto (1984) の式である。ただし、Hunt (1959) の式はもともと波打ち帯の岸側境界における波高を用いて定式化されたものであるが、ここでは、沖波波高を用いて整理してある。図-4 は、勾配 1/50~1/20 の海浜に様々な条件の規則波が入射する場合に対して計算された最大遡上高  $R_u$  を示したものであ

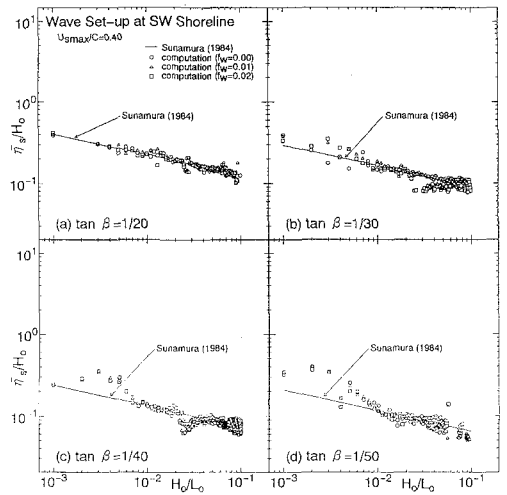


図-3 静水汀線における平均水位

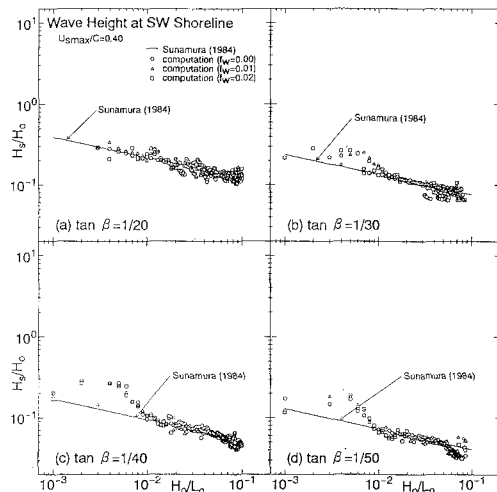


図-2 静水汀線における波高

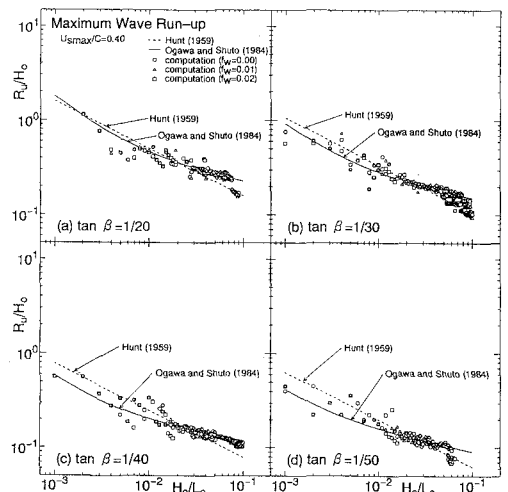


図-4 最大遡上高

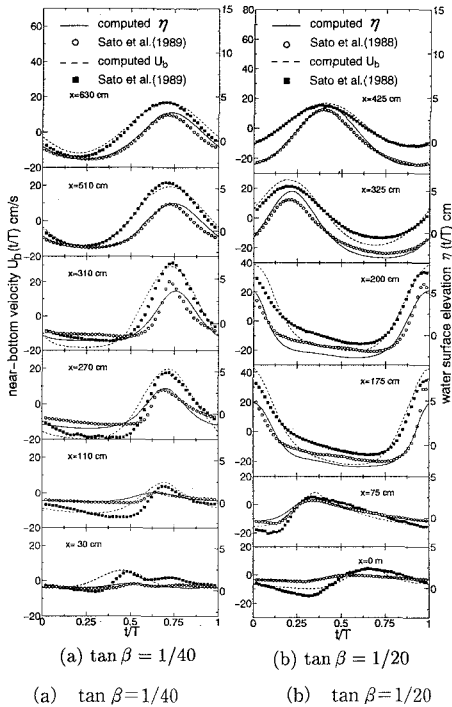


図-5 砕波帯の水面・流速波形

る。計算結果は実線と点線のほぼ中間に分布し、波形勾配の大きな領域では、Ogawa・Shuto (1984) の式と良く一致している。また、同図のみからはわかりにくいですが、同一条件の結果同士を比較すると、摩擦係数が大きいほど、最大遡上高は小さくなる傾向がある。

2.3 水位と流速の変動波形

図-5は、水位と底面流速の変動波形を示したものである。図-5(a)は斜面勾配1/40のSato et al. (1989)の実験との比較であり、(b)は斜面勾配1/20のSato et al. (1988)の実験との比較である。砕波点に近づくにつれ、振幅が増加し、その後減少している。実験結果(○, ■印)と比較すると、水位・流速ともに、砕波帯内における波形の前傾化などが再現されている。水面波形と比較すると流速波形は、振幅はほぼ妥当であるが前傾化が十分に再現されていない。砕波帯で見られる流れの鉛直構造が考慮されていないことや、砕波によって発生する複雑な乱れに対して時間的に一定の渦動粘性係数を用いているため、エネルギー減衰などのマクロ量は再現できるものの、波形の再現性にはやや問題を残していると考えられる。

3. 地形変化モデル

3.1 底質移動モデル

波浪場モデルから底面流速変動を評価し、これを用いて局所的な漂砂量を算定した。そして、底質の連続式を

数値積分することにより地形変化を計算した。二次元造波水路における海浜断面変形について様々な条件で数値実験を行い、実験と比較した結果、底面流速と底面剪断力を用いて各瞬間の掃流砂と浮遊砂を個別に計算し、それぞれの輸送方向は各瞬間における底面流速  $\tilde{u}_b(t)$  の向きと同じとするモデルの再現性が高いことがわかった。同モデルでは、掃流砂成分  $\tilde{q}_B$  は次式で計算される。

$$\frac{\tilde{q}_B(t)}{\sqrt{(\rho_s/\rho-1)gD_s^3}} = a_B |\Psi(t)|^{0.5} \max(\Psi(t) - \Psi_c, 0) \frac{\tilde{u}_b(t)}{|\tilde{u}_b(t)|} \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $D_s$  は底質の粒径、 $\rho_s, \rho$  は砂粒子と水の密度、 $\Psi(t)$  はシールズ数、 $\Psi_c$  は限界シールズ数であり、係数  $a_B$  は1.0とした。シールズ数は波の一周期内でも変化するものと考え、次式で評価した。

$$\Psi(t) = \frac{f_w}{2} \frac{\tilde{u}_b(t)^2}{(\rho_s/\rho-1)gD_s} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、摩擦係数はJonssonの評価式で算定した。また、限界シールズ数については、今回の計算で注目するような乱れの強い砕波帯については、その算定法が確立していないため、 $\Psi_c=0$  として計算した。浮遊砂成分  $\tilde{q}_s$  は次式で計算した。

$$\frac{\tilde{q}_s(t)}{w_s D_s} = a_s \max(\Psi(t) - \Psi_c, 0) \cdot \frac{\tilde{u}_b(t)}{|\tilde{u}_b(t)|} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $w_s$  は底質の沈降速度であり、係数  $a_s$  は3.5とした。各瞬間の漂砂量を(6)式と(8)式の和で評価し、これを一周期にわたって平均することにより、正味の漂砂量を評価した。ただし、波打ち帯では、引き波時には薄い水の層となって引くため、大きな流速が出現し、その流速変動をそのまま用いるとnetとして常に大きな冲向きの砂輸送が生じることになる。実際には砕波ボア前面で巻き上げられた浮遊砂が、ボアによって岸へ運ばれ、バランスしているものと思われるが、数値モデルでそのようなボアによる砂移動を再現することは困難である。そこで、本研究では、局所漂砂量モデルを適用するのは静水汀線より沖側の領域とし、それより岸側については、静水汀線と漂砂量が0となる波到達点との間で線形内挿した漂砂量を用いることにした。

3.2 海浜断面地形の再現性

底質移動モデルの妥当性を確認するために、まず一次元の波浪場に対して、海浜縦断面変化を検討した。計算の対象としたのは、Watanabe et al. (1980)の実験条件に対応するもので、堆積型から侵食型まで広い条件の波浪・底質条件に対して一時間後の地形を計算した。図-6(a), (b)は、それぞれ粒径0.2mmと0.7mmの砂を用いた条件に対して、正味の漂砂量と地形変化を比較した例である。図中、実線が計算された地形、点線、破線、

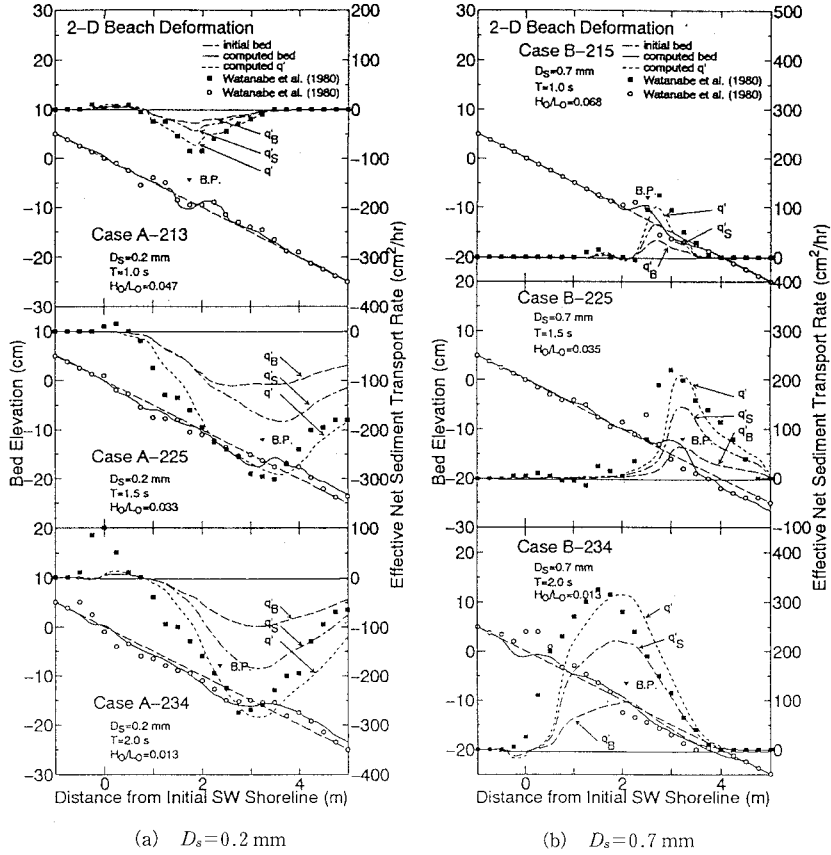


図-6 岸沖漂砂量と縦断地形の変化

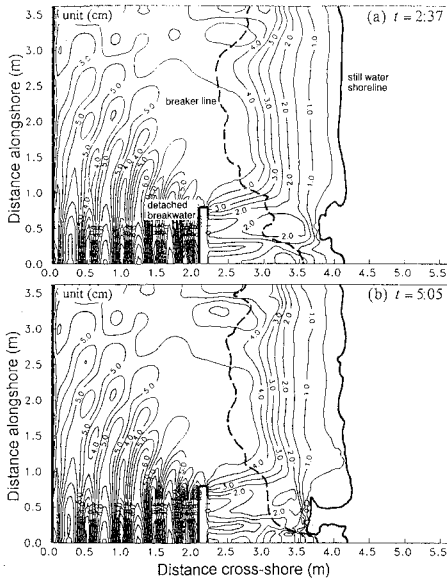


図-7 離岸堤周辺の波高分布

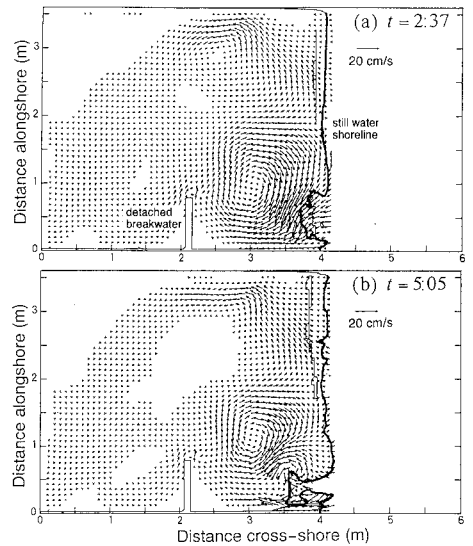


図-8 離岸堤周辺の海浜流場

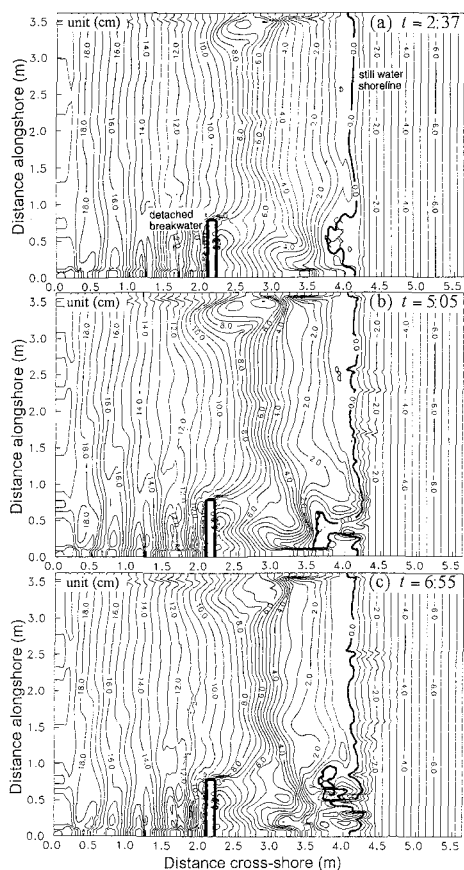


図-9 離岸堤周辺の地形変化

一点鎖線はそれぞれ計算された正味の全漂砂量、掃流砂量、浮遊砂量を表している。また、○印と■印はそれぞれ地形と漂砂量の実測値である。図より本モデルが、侵食型、堆積型それぞれの広い条件に対して適用性が高いことを確認した。ただし、粒径0.7mmの条件では、実験では掃流砂のみで浮遊砂はほとんどみられなかったのに対し、計算では浮遊砂成分の割合も高い。粗い粒径の底質に対しては浮遊砂成分の寄与についてさらに改良が必要であると考えられる。

### 3.3 離岸堤周辺の海浜変形

図-7, 8, 9は、本モデルを用いて離岸堤周辺の波浪・海浜流場と地形変化を計算したものである。各時刻における静水汀線と碎波線をそれぞれ実線と破線で示してある。時刻5時間5分後の地形は、2時間37分後の地形における波浪・海浜流場に対して底質移動モデルを適用することにより計算し、6時間55分後の地形は5時間5分後の地形におけるものを用いて計算した。同条件で実施

された清水ら(1983)の実験結果と比較すると、離岸堤背後の回折領域における波高減衰、循環流が再現されている。特に、図-8(b)をみると、地形変化に伴って汀線付近に新たな循環流が生じており、それに対応して離岸堤背後の堆積域もツノ状に伸びており興味深い。地形変化では離岸堤背後の堆積の他に、堤前面での洗掘、汀線形状の変形などが再現されている。

## 4. おわりに

非線形性と分散性を考慮した波浪モデルにより、碎波帯外から波打ち帯に至るまで高精度で計算可能な波浪・海浜流モデルを提案した。開発したモデルによれば、波形の非対称性や戻り流れが評価でき、さらに波の遡上運動を考慮することができるため、地形変化が激しい波打ち帯の漂砂を含めた合理的な砂移動量の予測が行える。また、地形変化と波・流れ場の干渉を考慮することができるため、長時間の地形変化予測が可能となった。本モデルは不規則波へ拡張することが容易なため、現地不規則波浪条件へ適用することが今後の課題である。

## 参考文献

- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
- 佐々木幹夫・佐伯 浩 (1974): 碎波後の波の変形に関する研究(2), 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 39-44.
- 佐藤慎司・M. Kabling (1993): Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 清水琢三・三村信男・渡辺 晃 (1983): 波浪・海浜流共存場における海浜変形と漂砂量モデル, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 229-233.
- 水口 優・辻岡和男・堀川清司 (1978): 碎波後の波高変化についての一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 155-159.
- Hunt, I. A. (1959): Design of seawall and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 94, No. WW1, pp. 72-92.
- Ogawa, Y. and N. Shuto (1984): Run-up of periodic waves on beaches of non-uniform slope, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., pp. 198-205.
- Sato, S., M. Fukuhama and K. Horikawa (1988): Measurements of near-bottom velocities in random waves on a constant slope, Coastal Eng. in Japan, Vol. 31, No. 2, pp. 219-229.
- Sato, S., T. Isayama and T. Shibayama (1989): Long-wave component in near-bottom velocities under random waves on a gentle slope, Coastal Eng. in Japan, Vol. 32, No. 2, pp. 149-159.
- Sunamura, T. (1982): Onshore-offshore sediment transport rate in the swash zone of laboratory beaches, Coastal Eng. in Japan, Vol. 27, pp. 205-212.
- Watanabe, A., Y. Riho and K. Horikawa (1980): Beach profiles and on-offshore sediment transport, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 1106-1121.