

不規則波による海浜断面地形変化の数値計算

佐藤 慎 司*・光 信 紀 彦**

1. 序 論

現地海浜の断面地形変化を予測するためには波の不規則性を考慮した海浜変形モデルを開発する必要がある。不規則波浪条件下では、砕波変形過程が規則波とかなり異なる上、長周期変動の発達も顕著に見られるため、海浜変形モデルを構築する上でもこれら不規則波浪場の特徴を取り込んだモデル化が求められている。

海浜断面変化過程については近年、規則波のみならず不規則波に対しても実験データが蓄積されてきた。大塚ら (1984) は、不規則波を用いて二次元海浜変形実験を行うことにより、海浜の断面形状は不規則波を平均波の諸元で代表させることにより、規則波実験と同様に侵食型、中間型、堆積型の3つのタイプに分類できることを示した。入江ら (1985) はさらに大波高の実験条件で同様の実験を行ない、Shibayama・Horikawa (1985) の底質移動量モデルを用いて、漂砂量を算定し、実測値と比較検討した。その結果、砕波帯外の漂砂量については底質移動量モデルで算定できるが、砕波による底質の巻き上げや砕波帯内の沖向き定常流が顕著な領域については、さらに検討の必要があるとしている。

Roelvink・Stive (1989) は不規則波による二次元海浜変形の室内実験と数値計算を行ない、流速の非対称性、長周期成分、戻り流れ等が果たす役割について、Bailard (1982) の漂砂量式を用いて検討している。その結果、波動流速以外に、長周期成分や、戻り流れを考慮することにより実験結果に近い漂砂量を得ることができている。そして、このような流速変動を用いて漂砂量および地形変化を計算した結果、侵食域は実験結果とはほぼ一致するが、bar の位置が実験より沖側に形成されてしまうことを報告している。

これらの研究成果により、室内実験データが蓄積されるとともに不規則波浪場の数値計算法の開発が進められ、両者を組み合わせることにより、合理的な海浜変形の予測モデルを構築する段階にある。そこで、本研究で

は任意地形上の一次元の波浪場を対象として不規則波浪場の数値計算モデルを構築し、さらに海浜断面地形変化の予測モデルを提案することを目的とした。

2. 波浪・底面流速場の計算

不規則波浪場を入射波のピーク周期程度で変動する波動成分とその数倍の周期で変動する長周期成分に分け、それぞれの変形を以下に示す様に個別に計算した。

2.1 波動成分の変形計算

波動成分の計算は、不規則波を有限個の成分波の合成波で近似し、それぞれの成分波の変形を放物型方程式に基づいて計算した後これらを再合成するという手法を採った。今回の計算では入射成分波の数を40とし、その振幅と周期は Bretschneider・光易型のスペクトルに基づいて決定し、位相は乱数を用いて定めた。放物型方程式を Crank-Nicholson の差分式を用いて差分化し、砕波帯外から岸向きに数値計算を進めた。

ある計算点で計算された全成分波を再合成して、ゼロダウクロス法により個々の波を定義し、渡辺ら (1983) による流速波速比を用いた砕波指標により砕波、非砕波の判定を行う。すなわち、個々の波の流速波速比の最大値が限界値を越える場合に砕波とみなし、それ以外の場合は非砕波と判定した。限界値は渡辺ら (1983) の砕波指標を近似する磯部 (1986 b) の近似式を用いて計算した。その際、地形変化が進んで局所的に勾配が変化した状態にも対応できるように、Izumiya・Isobe (1986) による修正勾配を用いて局所的な勾配を評価した。

砕波している場合にはさらに、定義した各波に対して Dibajnia・渡辺 (1987) にならって砕波減衰係数 f_D を求める。不規則波における f_D の計算には、ピーク周波数における波数 k_p と、ゼロダウクロス法で定義された一波ごとの波の振幅を用いる。この様にして求められた f_D の値は、個々の波ごとに1つの値が求まるため、放物型方程式の計算を進めるそれぞれの成分波に対しては必ずしも一定値とならない。そこで、各成分波の計算においては渡辺ら (1988) にならい、成分波の各1周期間に対する合成不規則波の f_D の平均値 f_{Dm} を用いる

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 工修 静岡県庁

ことにする。この様に修正した碎波減衰係数 f_{Dm} を用いて各成分波の計算を行い、これらを再合成することにより、一つ岸側の計算点での波の場が計算される。

不規則波においては、水位や流速の長周期変動が著しく発達するため、長周期変動による平均水位の増減や流れが碎波に与える影響を考慮する必要がある。そこで、後述する方法で計算される水位および流速の長周期変動の計算結果を再び波動成分の計算にフィードバックして、長周期波との干渉効果を含む波動成分の計算も行なった。水位や流速の長周期変動は碎波変形に複雑な影響を及ぼすと考えられるが、ここでは長周期変動が波動成分の碎波条件に与える影響のみを取り入れることにした。碎波条件として用いる流速波速比の計算に際して、水位の変動は平均水深の変化として扱った。流速の変動は近似的に定常な流れとして扱い、流れの影響を受けた波数を用いて流速波速比を計算することで碎波条件に与える影響を取り込むことにした。その他は長周期成分の効果を含んでいない場合と同様にして計算を行なった。

図-1 は一様勾配斜面上の不規則波を計算して、平均波高 $\bar{H}$ 、平均水位 $\bar{\eta}$ 、碎波率 P_b の分布を示したものである。図-1 (a) は勾配 1/20 の佐藤ら (1987) の実験値 (以下ケース 1) との比較であり、図-1 (b) は勾配 1/40 の佐藤ら (1988) の実験 (ケース 2) との比較である。碎波帯内で波高と平均水位をやや大きく評価する傾向があるが、計算と実験との対応は良い。

図-2 はケース 1 の汀線近傍における波高分布の比較である。図-2 (a) には実測値の頻度分布とともに

Rayleigh 分布および合田 (1975) の碎波変形モデルによる計算値を示してある。図-2 (b) は放物型方程式による計算結果、図-2 (c) は放物型方程式による計算結果から長周期変動を計算し、さらにその長周期変動が碎波に与える影響を考慮した場合の結果である。図-2 (c) の計算結果は図-2 (a) の実験値と良好に対応しており、本モデルで不規則波浪場を長周期波との干渉効果を含めた形で精度良く計算できることがわかる。

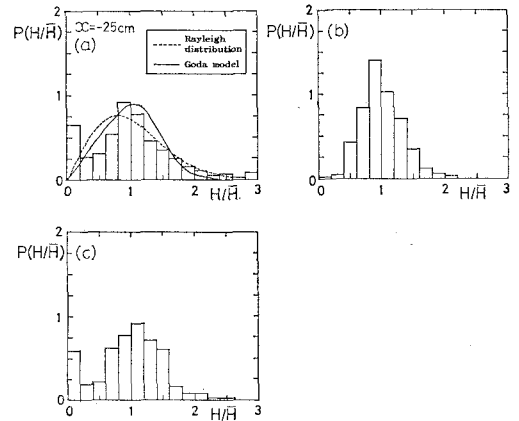


図-2 不規則波の波高分布の比較

2.2 長周期変動成分の計算

本研究では佐藤ら (1988) にない、水位と流速の長周期変動成分を平均量の方程式を用いて計算し、その結果を波浪場の計算や漂砂量の計算に取り入れることにした。平均量の方程式を差分化し、波動成分の計算結果から求められる波動エネルギーの長周期成分を入力条件とした。数値積分には、水位と流速の計算点を時間的にも空間的にも半メッシュずらした差分スキームを用いた。境界条件は沖側端で、入射波による radiation stress の長周期成分から計算される長周期波を入射波として与え、岸側からの反射波は自由に透過できるようにした。一方、静水汀線では完全反射の条件を与えた。

図-3 はケース 2 に対する水位と流速の長周期変動成分の rms 値である。汀線近傍でやや一致度が悪くなるが、本モデルにより、実際の波浪場で発達するものと同様な特性を持つ長周期変動が予測できることが確認される。図-4 は、ケース 2 における波動成分の波高と流速の長周期成分との相関係数を示したものである。碎波帯外では波群に拘束された波として、波高が大きい所で冲向きの流速が誘起されるため負の相関係数を示し、汀線近傍では逆に正となる傾向が見られる。ただし、相関係数の絶対値は全般的に小さく、この点についてはさらに改良の余地が残されている。

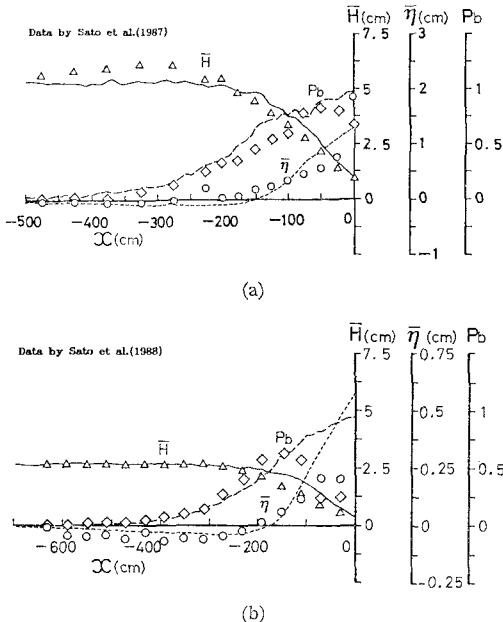


図-1 斜面上の不規則波の計算値と実測値の比較

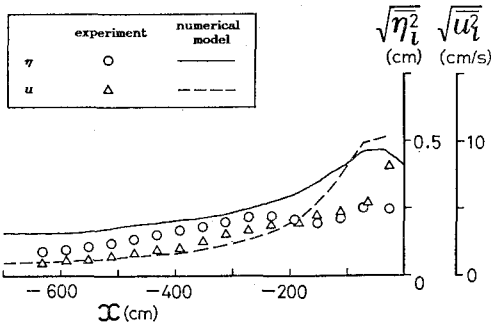


図-3 長周期成分の rms 値

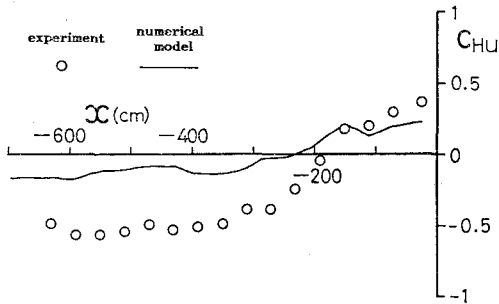


図-4 波高と長周期成分の相関係数

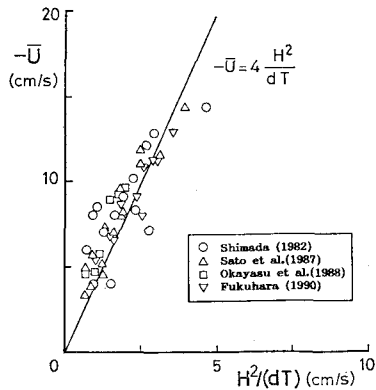


図-5 規則波における底面近傍の定常流速

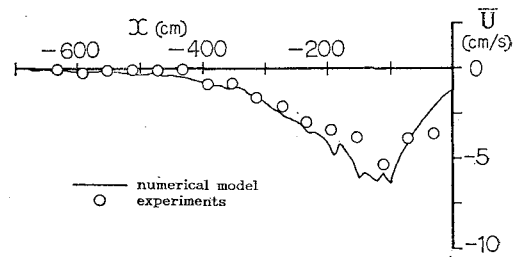


図-6 底面近傍の定常流速の分布

2.3 底面流速の評価

局所漂砂量の評価に必要な底面流速は定常成分、長周期成分および波動成分のそれぞれに対して合理的な算定法を検討して評価した。長周期成分の流速は前節の長周期変動の数値計算によって求められているので、ここでは定常成分と波動成分の計算法を述べる。

底面近傍の定常流速の大きさは、ボア状碎波によって生じる質量流束によって評価できるものとし、佐藤ら (1987) にない次式で与えた。

$$\bar{U} = -A \frac{H^2}{dT} \quad (2.1)$$

ここで、 $\bar{U}$ は戻り流れの大きさ、 H は波高、 T は周期、 d は平均水深、 A は無次元定数である。図-5 は規則波の底面流速の計測結果を示したものである。同図より、 A を 4 とすれば定常流速を精度良く計算できることがわかる。不規則波条件においては、各計算点での個々の波の波高と周期を用いて碎波している場合のみボアによる質量流束を計算し、これを全時間で除することにより各点での定常流速値とした。図-6 はケース 2 における底面流速の定常成分を示したものである。碎波帯内外において、実測値との一致度が高いことを確認した。

底面流速の波動成分は、ゼロダウンクロス法で定義した個々の波の波高と周期を用いて計算する。ただし、波が非碎波でアーセル数が 25 より大きい時はクノイド波 1

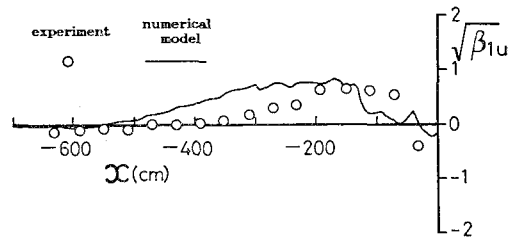


図-7 底面流速の歪み度の分布

次近似理論 [磯部 (1986 a)] を、それ以外の条件では微小振幅波理論を用いている。図-7 はこの様にして計算したケース 2 に対する底面流速の歪み度を示したものである。かなり大胆な仮定を導入しているが、実験で観察される波の非対称度をかなりの精度で再現している。

3. 海浜断面地形変化の計算

3.1 局所漂砂量則の導入

地形変化を予測する際に必要となる漂砂量は、規則波に対する既存の算定式を用いて計算した。検討した局所漂砂量モデルは、不規則波条件への適用が比較的容易なものとして、砂村 (1984)、Dibajnia・渡辺 (1987)、Baillard (1982)、柴山・堀川 (1985) によるものである。砂村の漂砂量式は、漂砂量の実測値をもとに導かれたも

のであり、Dibajnia・渡辺のものは、パワーモデルに基づき規則波の海浜変形実験結果を再現する様に定式化されたものである。Bailard および柴山・堀川の漂砂量式は底面流速変動の特性に基づくものであり、波形の非対称性や流れの効果を導入し易い形となっている。

3.2 柴山・堀川モデルの改良

柴山・堀川モデルを適用するには、まず波高、水深、周期などの波浪条件から底面流速を計算することが必要となる。しかし、砕波帯の底面流速を精度よく評価することは現段階では困難であり、それがモデルの改良を行いその結果を検証するうえでの障害となっている。そこで本研究では、モデルの改良にあたり、流速波形が任意制御できる振動流装置を用いて得られた実測値（佐藤・堀川, 1984; 渡辺ら 1989）を用いることにした。

振動流装置で漂砂量の実測値が得られている条件で柴山・堀川モデルにより漂砂量を計算した。流れが共存する条件では、流れを含めた流速変動の最大値から半周期ごとにシールズ数を計算した。計算結果を実測値と比較するとシールズ数が大きな領域で漂砂量の符号が逆転し、不合理な結果となるケースが多く見られた。このようなシートフローへの遷移領域では、砂漣が存在している状態から、次第に砂漣頂部が平坦化することにより、渦が砂漣の背後に留まることなく流されていく遷移過程が見られる。そこで本研究では、浮遊輸送からシートフローへの遷移領域における半周期間の無次元漂砂量 Φ を次式で評価することにより、モデルの改良を試みた。

$$\Phi = (1 - A) \times 19 \Psi_m^3 + A \times (-19 N \Psi_m^3) \dots (3.1)$$

ここで、 Ψ_m は半周期間の最大流速値を用いて評価されるシールズ数、 N は底面付近の水粒子の軌道全振幅と砂漣波長の比である。また、 A は遷移領域における漂砂量を求めるために新たに導入した係数であり、砂漣の波形勾配を評価する予測式を提案した Sato ら (1988) の研究を参考にして、次式で与えた。

$$A = \{1 - (\Psi_{rms}/0.6)^2\} \times \min(1, 2/N) \dots (3.2)$$

ここで、 Ψ_{rms} は底面流速変動の rms 値から求めたシールズ数である。

図-8 は、改良モデルによる計算値 Φ_c と佐藤・堀川 (1984) の実測値 Φ_m との比較である。計算値がやや小さめとなるものの、改良後のモデルでは振動流装置による佐藤・堀川 (1984) や渡辺ら (1989) の実測値と対応の良い漂砂量が計算されることを確認した。

3.3 漂砂量の分布

不規則波条件の漂砂量を計算するのに先立ち、規則波条件に対する計算を行った。放物型方程式を用いて波の場を計算し、2. で述べた方法で底面流速変動を計算した。ただし、柴山・堀川モデルで必要となる流速の極値については有限振幅波理論では過大評価となるため、磯

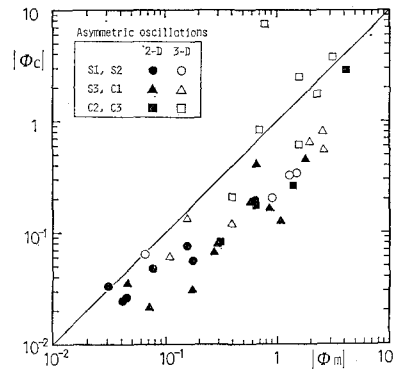


図-8 柴山・堀川モデルによる漂砂量の計算値

部・堀川 (1981) の修正式を用いた。渡辺ら (1979) の海浜変形実験の条件の全てを計算して漂砂量分布を実験値と比較した結果、実測値との対応は Dibajnia・渡辺のモデルが一番良く、柴山・堀川モデルと砂村モデルもほぼ妥当な分布を与えることがわかった。Bailard のモデルは沖浜領域で特に実験との対応が悪かった。

図-9 は不規則波条件における大塚ら (1984) のケース A-4 に対する実験値と各漂砂量モデルによる計算値との比較である。砂村, Dibajnia・渡辺, 柴山・堀川の漂砂量式は絶対値は異なるもののほぼ実験と同様の分布形状の漂砂量を与えている。Bailard のモデル波では砕波帯で岸向きの漂砂量となり、実験と合わない。

図-9 において、底面流速変動の各成分が net の漂砂量に与える寄与分を計算できるものは図中にその寄与分を示した。この図に示した条件では、各成分の寄与分はほぼ同程度であり、波動成分は砕波帯外では沖向きで、

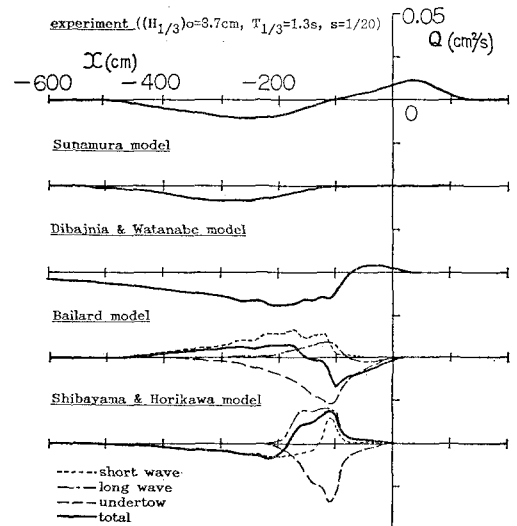


図-9 不規則波浪場における漂砂量の比較

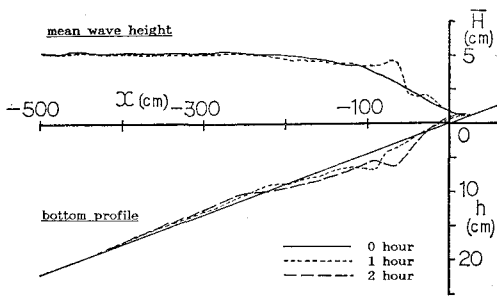


図-10 波浪場および地形の経時変化

砕波帯内では岸向きの漂砂量に貢献している。また、定常成分は沖向きの漂砂量に、長周期成分は主として岸向きの漂砂量にそれぞれ貢献しており、これらの和として、最終的な net の漂砂量が決定されていることが判る。

3.4 地形変化の計算

図-10 は Dibajnia・渡辺 (1988) の漂砂量式を用いて大塚ら (1984) のケース A-4 に対する地形変化の計算を行った一例である。地形は 1 時間後と 2 時間後の地形を示してある。2 時間後の地形は、1 時間後の地形条件で波の計算を行い、その波の場 (図-10 上段) で計算した漂砂量を用いて算定している。同図より砕波点付近の侵食域が岸方向に移動しており、実験による地形変化と同様の結果が得られた。柴山・堀川や砂村の漂砂量式でも同様の傾向が見られた。ただし、汀線近傍のいわゆる berm の形成は、いずれのモデルでも十分には再現されず、今後の課題として残されている。

4. 結 論

本研究では、一次元の波浪場を対象として放物型方程式を用いて不規則波浪場の計算を行い、岸沖漂砂量を既存の漂砂量式により求めて実験結果と比較、検討することにより、以下のような結論を得た。

1) 放物型方程式を用いた数値モデルにより、不規則波の砕波変形を簡便に計算することができる。さらに、水面変動や底面流速の長周期成分の効果を取り入れることにより、不規則波の砕波帯に特徴的な波の変形を再現することができる。

2) 計算結果をもとに、undertow や底面流速を計算し、既存の漂砂量式を用いて net の漂砂量の分布を計算した。そして既存の漂砂量式の不規則波条件への適用性を検討するとともに、不規則変動の各成分の最終的な漂砂量に対する寄与を計算した。その結果、波動成分は主に岸向きの漂砂量に、定常成分は沖向きの漂砂量に貢献していることが判った。さらに、長周期成分が漂砂量に大きく貢献していることも判った。

最後に本研究の実施にあたり、有益な議論をいただいた横浜国立大学工学部柴山知也助教授に謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・堀川清司 (1981): 砕波帯における流速場の浅水変化に関する研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 5~9.
- 磯部雅彦 (1986): クノイド波理論第 1 次近似解の数値計算法とその応用, 第 41 回土木学会年次学術講演会概要集第 2 部, pp. 535~536.
- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 134~138.
- 入江 靖・柴山知也・渡辺 晃 (1985): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 316~320.
- 大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, Vol. 14, No. 3, pp. 59~106.
- 佐藤慎司・福浜万哉・堀川清司 (1987): 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 36~40.
- 佐藤慎司・諫山太郎・柴山知也 (1986): 緩勾配斜面上における不規則波の底面流速変動特性に関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 78~82.
- 嶋田昌義 (1982): 不規則波による底面流速変動に関する研究, 東京大学工学部卒業論文, 116p.
- 砂村継夫 (1984): Swash zone を含む砕波帯の岸沖漂砂量に関する研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 316~320.
- 福原 哲 (1990): 3 次元波浪・海浜流場における undertow の評価法, 横浜国立大学工学部卒業論文, 104p.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算モデル, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 291~295.
- 渡辺晃・利穂吉彦・堀川清司 (1979): 二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176.
- 渡辺 晃・原 哲・堀川清司 (1983): 重合した波浪場における砕波について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 5~9.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・泉宮尊司・中野英樹 (1988): 非定常緩勾配方程式による不規則波の浅水砕波変形の解析, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 173~177.
- 渡辺 晃・先灘正成・磯部雅彦 (1979): 波・流れ共存場における砂渾形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 299~303.
- Bailard, J. A. (1982): Modeling on-offshore sediment transport in the surf zone, Proc. 18th ICCE, pp. 1419~1438.
- Izumiya, T. and M. Isobe (1986): Breaking criterion on nonuniformly sloping beach, Proc. 20th ICCE, pp. 318~327.
- Okayasu, A., T. Shibayama and K. Horikawa (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone, Proc. 21st Conf. on Coastal Eng., pp. 478~491.
- Roelvink, J. A. and M. J. F. Stive (1989): Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach, J. Geophys. Res., Vol. 94, No. C4, pp. 4785~4800.
- Sato, S., K. Mitani and A. Watanabe (1988): Geometry of sand ripples and net sand transport rate due to regular and irregular oscillatory flows, Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, No. 2, pp. 89~98.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1985): A numerical model for two-dimensional beach transformation, Proc. JSCE, Vol. 357/II-3, pp. 167~176.