

混合粒径砂の分級と汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形予測モデル

黒岩正光* ・ 口石孝幸** ・ 加藤憲一**
松原雄平*** ・ 野田英明**** ・ 中本良平*****

汀線変化と混合粒径砂の粒度変化を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルを開発した。海浜流場は戻り流れも考慮できる準 3 次元モデルを適用し、漂砂量は掃流砂と浮遊砂の総和で定義した。混合砂の分級過程は、平野 (1971) による「交換層」の概念に基づいた、粒径毎の底質の含有率変化式で計算した。侵食型波浪条件下における縦断地形変化の実験結果および沿岸漂砂による平面地形変化に関する実験結果と比較しモデルの適用性を検討した。さらに、現地レベルにおける離岸堤周辺の地形変化計算を試みた。計算結果から、比較的簡単な手法で、汀線変化と粒度変化を表すことが確認できた。

1. はじめに

海岸法の改正により、「防護」だけでなく、「環境」と「利用」の面を考慮して、海岸の保全を進めていくことが必要となってきた。砂浜海岸の保全を考えていく上では、単に地形変化だけを議論するのではなく、生態系にとって良い底質環境、あるいは利用面、例えば、養浜による海水浴場の造成などの観点から、底質の変化を考慮した海浜変形予測が必要不可欠である。

熊田ら (2002) は、沿岸漂砂に基づく、混合砂の分級過程を考慮した等深線変化モデルを提案している。一方、波と流れによる漂砂移動機構を考慮できる 3 次元海浜変形モデルにおいては、汀線変化 (清水ら, 1994)、混合砂の分級過程 (田中ら, 1989, 本田ら, 2003)、流れの 3 次元性などを考慮したモデル (黒岩ら, 2002) が提案されているが、あらゆる条件に適用できるモデルが確立されているとは言い難い。口石ら (2004) は、波の多方向性、流れの 3 次元性および汀線変化を考慮したモデルを提案しているが、単一粒径砂の条件のもので、地形変化に伴う底質の粒度変化は再現できない。本研究では、汀線変化と混合粒径砂の粒度変化を考慮した新たな 3 次元海浜変形モデルを提案し、モデルの適用性を実験結果と比較し検討する。

2. 海浜変形モデル

(1) 波浪場および海浜流場

波浪場および海浜流場はそれぞれ間瀬ら (1999) の回折の影響を考慮できるエネルギー平衡方程式に基づく多方向不規則波浪モデルおよび黒岩ら (2002) の準 3 次元海浜流モデルを用いて算定する。なお、後述する規則波浪場の実験結果との比較では、線形波理論を適用する。

(2) 漂砂量および水深変化

a) 全漂砂量

全漂砂量は、黒岩ら (1999) と同様に、波による掃流砂、底面定常流速 (海浜流) による掃流砂、波と流れによる浮遊漂砂の総和として定義し、本研究では、混合砂を考慮するため、粒径毎に各漂砂量を算定する。

波および流れによる掃流漂砂量は渡辺ら (1984) のモデルをベースとして、以下のように表す。

$$\vec{q}_w^{(k)} = \mu^{(k)} A_w^{(k)} Q^{(k)} \vec{u}_{wb} \dots\dots\dots (1)$$

$$\vec{q}_c^{(k)} = \mu^{(k)} A_c^{(k)} Q^{(k)} \vec{U}_b \dots\dots\dots (2)$$

$$Q^{(k)} = \{ (u_*^{(k)})^2 - (u_{*c}^{(k)})^2 \} / g \dots\dots\dots (3)$$

ここに、上付き k は粒度の種類の数 (ランク) を表し、 μ は体積含有率、 A_w および A_c は漂砂量係数で、粒径の影響を考慮するため、清水ら (1996) による次式より求める。

$$B_w = C_w (\sqrt{d^{(k)}} / w_f^{(k)})^3 \dots\dots\dots (4)$$

$$A_w^{(k)} / B_w = w_f^{(k)} \sqrt{0.5 f_{cw}^{(k)}} / \{ (1 - \lambda) s \sqrt{sgd^{(k)}} \} \dots\dots (5)$$

ここに、 $w_f^{(k)}$ は沈降速度、 C_w は無次元係数である。流れによる掃流漂砂量係数 $A_c^{(k)}$ は $A_w^{(k)}$ の定数倍として表され、清水ら (1996) によると 10 倍である。 f_{cw} は底面摩擦係数で、田中 (1990) の波流れ共存場の陽形式近似式を用いる。

浮遊漂砂は鉛直一次元浮遊砂濃度分布と海浜流の鉛直分布との積を底面から平均水位面まで積分することによって算定する。浮遊砂濃度分布は簡単のため、

$$c^{(k)} = c_b \exp \left[\frac{w_f(h+z)}{\nu_s} \right] \dots\dots\dots (6)$$

で表す。 ν_s は砂の拡散係数、 c_b は底面における濃度で柴山・Rattanapitikon (1993) のモデルを参考に、シールズの関数で表す。

$$c_b^{(k)} = C_s \frac{(\phi - 0.05) \nu}{b \sqrt{sgd}} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 C_s は無次元係数、 ϕ はシールズ数、 ν は動粘性係数、 b は中央粒径の $100d$ で表される。

* 正会員 博(工) 鳥取大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 日本建設コンサルタント(株)
*** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
**** 正会員 工博 鳥取環境大学顧問
***** 正会員 修(工) 杉本建設(株)

b) 遡上域における漂砂量

遡上域における漂砂量は、口石ら (2004) と同様に、Larson・Kraus (1989) を参考に、図-1 に示すように、汀線付近の漂砂量を最大遡上高さまで外挿して算定する。岸沖漂砂量 q_{xr} は

$$q_{xr} = q_{xs} \left(\frac{x_r - x}{x_r - x_s} \right)^\alpha \quad (8)$$

から算定し、 q_{xs} は汀線付近の基準点 x_s における漂砂量、 x_r は最大遡上高の位置である。 α は無次元係数である。沿岸漂砂量 q_{yr} は、 x_s における沿岸漂砂 q_{ys} を用いて

$$q_{yr} = q_{ys} \quad (9)$$

とする。最大遡上高さ R は Larson・Kraus (1989) に基づき

$$\frac{R}{H_o} = 1.46 \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{H_b/L_o}} \right)^{0.76} \quad (10)$$

で算定した。ここに、 $\tan \beta$ は海底勾配、 H_b は碎波波高である。

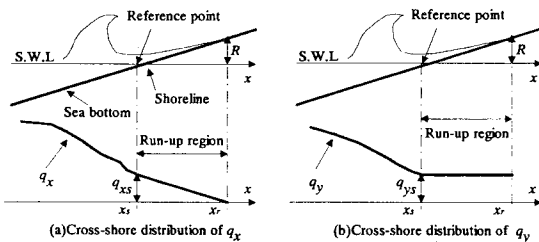


図-1 遡上域の漂砂量の岸沖分布

c) 粒径毎の水深変化

渡辺ら (1984) の漂砂の連続式を用いるが、粒径毎の水深変化を求め、それらを総和し、全漂砂による水深変化とする。粒径毎の漂砂の連続式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^{(k)}}{\partial t} = & \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x^{(k)} + \varepsilon_s \left| q_x^{(k)} \right| \frac{\partial h^{(k)}}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y^{(k)} + \varepsilon_s \left| q_y^{(k)} \right| \frac{\partial h^{(k)}}{\partial y} \right) \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

よって全漂砂量による水深変化は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial h^{(k)}}{\partial t} \quad (12)$$

で表すことができる。

d) 体積含有率変化の計算

粒径の分級作用を考慮するため、平野 (1971) の「交換層」の概念をもとに、粒径毎の体積含有率を計算する。平野は、粒度の変化はある厚みをもつ交換層内で生じるとしている。以下に示す含有率の変化式を用いて分級の影響を考慮する。堆積域では

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = -\frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial h^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \mu^{(k)} \right\} \quad (13)$$

より含有率を算定する。一方、侵食域では、

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = -\frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial h^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right\} \quad (14)$$

より算定する。ここに、 $\mu^{(k)}$ は体積含有率、 $\mu_B^{(k)}$ は地形変化が起こる前の含有率で、本モデルでは初期含有率とした。 B は交換層厚で、平野 (1971) は最大粒径にとり、田中ら (1989) は底質の90%粒径に等しいものとしている。熊田ら (2003) は3 mm としており、概ね数 mm ～ 数 cm 程度である。式 (13) および (14) の安定性は漂砂量の大きさと計算の時間間隔、 B に依存する。本モデルでの与え方については後述する。

3. 計算結果

(1) 岸沖漂砂による地形変化

まず、侵食型の波浪による縦断面地形変化に対するモデルの適用性を検討した。検証用データとして、長さ23 m、幅0.6 m、高さ0.6 m の鉛直2次元規則波波動水槽を用いた移動床実験の結果を用いた。波浪は、海底勾配1/10縦断面地形上に侵食型の規則波（沖波波高 $H_o = 8.5$ cm、周期 $T = 1.0$ s）を作用させ、20時間後の地形を測定した。実験に用いた底質は中央粒径0.3 mm と0.7 mm の砂を7 : 3 で混合されたものである。

計算での漂砂量に関する式 (4) および (6) 中の無次元係数 C_w および C_s はそれぞれ0.01および0.1とした。波と流れ計算へのフィードバックは8回、すなわち2.5時間毎に波と流れの計算を行った。漂砂の連続式および含有率の変化式の計算における時間間隔は0.1 s とした。交換層厚 B は、試行錯誤計算の結果、粗粒砂の中央粒径の50倍とした。計算格子間隔は10 cm とした。

図-2(a) は初期における表層の底質の粒度分布および20時間後の粒度分布を示したものである。図-2(b) は初期地形とほぼ平衡状態に至った20時間後の縦断面地形の測定結果を示したものである。これらの図から、バーの形成によりバー付近は細粒化され、汀線付近は侵食され粗粒化している。図-3 は本モデルによる5時間毎の計算結果を示したもので、図(a) は地形変化、(b) は含有率の時間的变化を示したものである。バーの形成とともに、0.3 mm の細粒分が沖へ移動し、含有率が大きくなっている様子が計算されている。一方、0.7 mm の粗粒分は汀線付近で大きくなっていることがわかる。図-4 は計算結果と実験結果を比較したもので、図(a) は20時間後の含有率の岸沖分布、図(b) および (c) はそれぞれ10時間後および20時間後の地形変化の計算結果と実験結果を比較したものである。この図からバー形成付近では0.3 mm の粒径の含有率が増加し、一方、汀線付近では、0.7 mm の含有率が増加しており、バー形成に伴う細粒化と汀線後退による粗粒化が再現され、実験結果とほぼ

一致することがわかる。つぎに、本モデルによって計算された初期地形上における粒径別の各漂砂量の岸沖分布を図-5に示す。図(a)および(b)はそれぞれ細粒砂および粗粒砂によるもので、図中の q_w 、 q_c および q_s はそれぞれ波による掃流砂、流れによる掃流砂および浮遊砂を表す。細粒分については、戻り流れに起因する沖向きの浮遊砂が大きく、粗粒分については、戻り流れによる掃流砂が浮遊砂に比較して大きくなっていることがわかる。

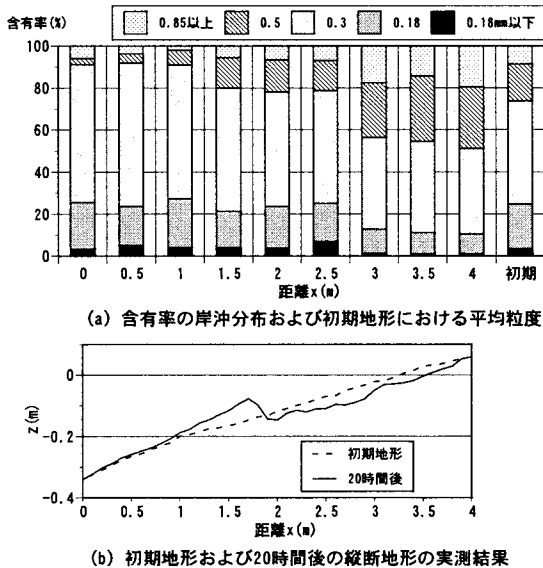


図-2 実験による20時間後の含有率の分布と縦断地形

(2) 沿岸漂砂による地形変化

つぎに、熊田ら(2003)による沿岸漂砂が卓越する場の混合粒径砂の移動床実験結果と比較する。底質は0.2 mmの細砂と2.0 mmの粗砂を1:1で混合されたもので、初期海底勾配は1/10である。波浪は、沖波波高4.0 cm、周期0.8 sの規則波で、入射角は18 deg.に設定されている。波の作用時間はほぼ平衡状態に至る10時間である。計算の格子間隔 Δx および Δy は10 cm、式(11)~(14)を解くときの計算の時間間隔 Δt は0.1 s、交換層厚 B は10 cm(粗砂の中央粒径の50倍)とした。式(4)および(6)中の無次元係数 C_w および C_s はそれぞれ0.01および0.1とした。波と流れ計算へのフィードバックは、2.5時間毎に、すなわち4回行った。図-6は本モデルによる10時間後の海底地形の計算結果である。図中に示す太い実線は初期汀線である。この図から、漂砂の上手側における汀線の後退、下手側における汀線の前進が計算されている。図-7は侵食域($y = 50$ m)における縦断地形および粒度分布の計算結果と実験結果を比較したものである。

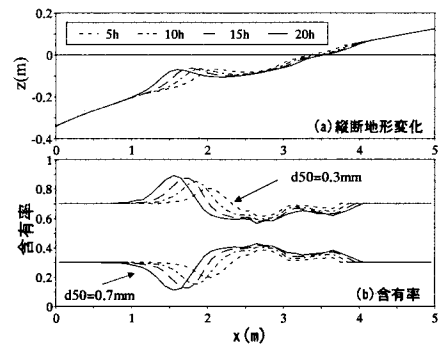


図-3 縦断地形と含有率の計算結果

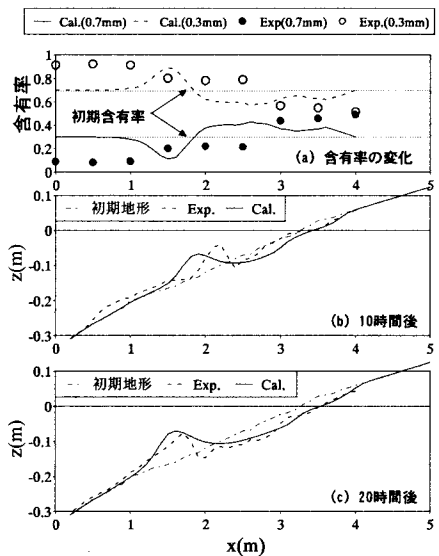


図-4 縦断地形変化の実験結果と計算結果の比較

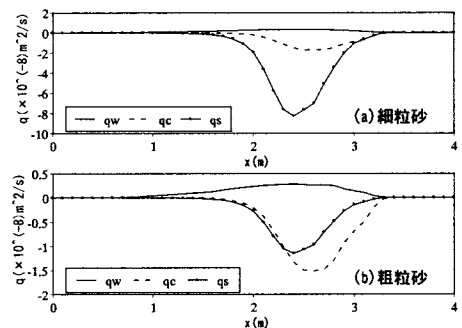


図-5 初期地形における各漂砂量の岸沖分布

図-8は堆積域($y = 350$ m)における同様の結果を示したものである。これらの図から、 $y = 50$ mでは、粒度の粗粒化と汀線の後退が計算され、計算結果は実測結果と良く一致することがわかる。 $y = 350$ mでは、堆積域における細粒化と汀線の前進が計算されている。断面

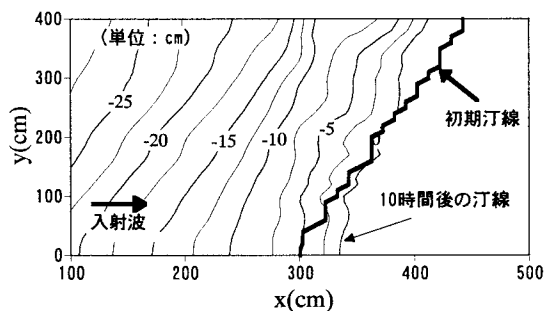
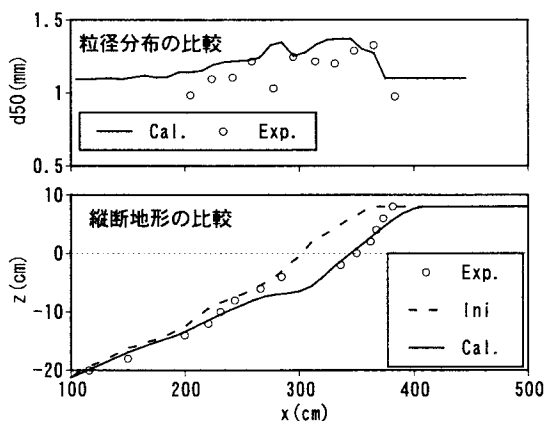
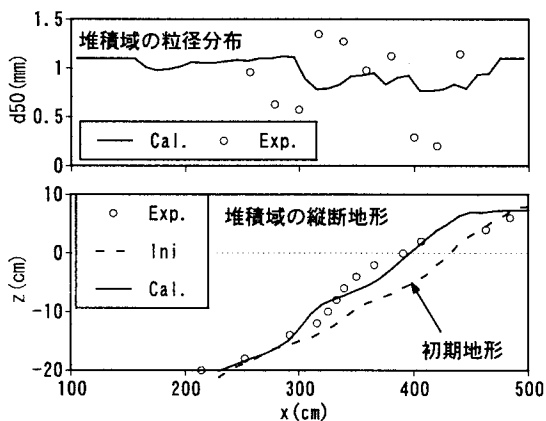


図-6 沿岸漂砂による地形変化の計算結果

図-7 侵食域 ($y = 50$ m) における実験結果との比較図-8 堆積域 ($y = 350$ m) における実験結果との比較

地形は良く再現されているが、粒度分布はあまり一致していない。しかしながら、本モデルは定性的に実験結果を良く再現できることがわかる。

(3) 現地スケールの離岸堤周辺の地形変化

最後に、現地スケールの離岸堤周辺における地形変化計算を試みた。波浪場計算には、間瀬ら (1999) の多方向不規則波のエネルギー平衡方程式を用いた。ここでは、

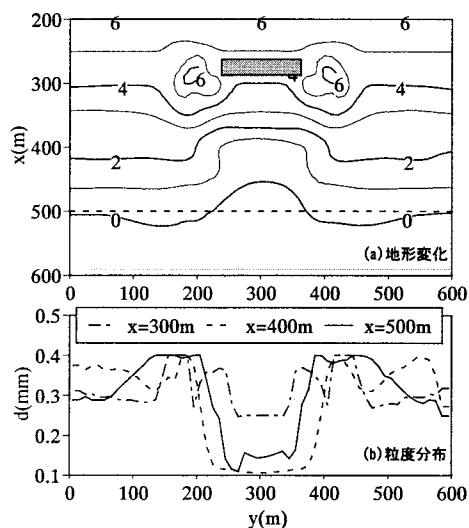


図-9 離岸堤周辺の地形変化と粒度変化 (堤長150 m)

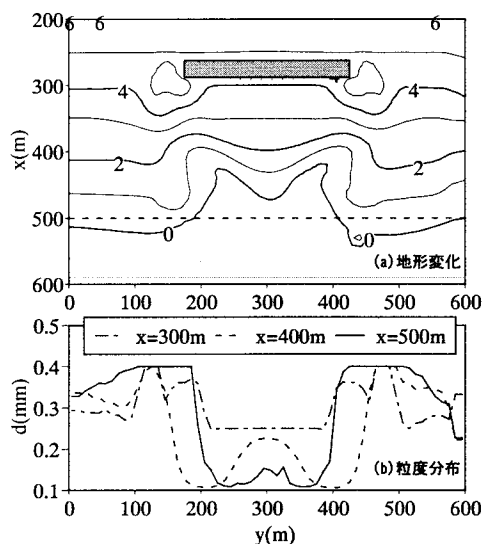


図-10 離岸堤周辺の地形変化と粒度変化 (堤長250 m)

離岸堤長の異なる2ケースの計算を試みた。波浪条件として、有義波波高2.0 m、周期7.0sのJONSWAP型周波数スペクトルを、 $S_{max}=25$ の光島型方向スペクトルを用いた。混合砂は中央粒径0.1 mmと0.4 mmの2粒径を1:1で混合した底質を初期値とした。計算の格子間隔は10 m、式(11)~(14)の計算の時間間隔 Δt は1 s、 B は粗砂の中央粒径の1000倍とした。式(4)および(6)中の無次元係数 C_w および C_s はそれぞれ0.1および0.01とした。波と流れ計算へのフィードバックは2回行った。図-9は離岸堤長150 mの場合の結果で、波作用10日後の地形変化と $x=300$ m、400 mおよび500 mの位置における粒径の沿岸分布を示したものである。図

-10は離岸堤長250mの同様の結果である。図-9から離岸堤背後には舌状砂州の形成と離岸堤端部近傍の洗掘が計算されていること、砂州が形成された堆積域では粒径が細くなり、離岸堤端部付近の侵食域では粒度が粗くなっていることがわかる。図-10からも地形変化に伴う粒度の変化が計算されていることがわかる。しかし、Nicolsonら(1997)やGoda(2001)が示しているdouble salients型となっており実現象とは異なっている。堤長と離堤設置距離の関係で数値計算上現れる3次元海浜変形モデルの問題点の一つである。今後、波浪と流れの計算精度と、波、流れと地形変化との相互作用(非定常性)をどのように取り扱うべきかを再検討する必要があることを示唆する結果である。

4. おわりに

本研究では、混合粒径砂の分級過程と汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルを提案した。縦断地形変化および沿岸漂砂による地形変化に関する実験結果との比較から、汀線の後退および前進、パーの形成などが再現できること、地形変化に伴う粒度の変化が計算できることが確認できた。さらに、現地スケールの離岸堤周辺の地形変化計算結果から、離岸堤背後の舌状砂州の形成と粒度変化が計算できることがわかった。

以上のことから、比較的単純なモデルではあるが、混合粒径砂の粒度変化と汀線変化を含めた3次元海浜変形計算が可能であることを示した。しかしながら、堆積型波浪に対する適用や、現地における中長期予測への適用はまだ困難であり、漂砂量係数や交換層厚の与え方、波と流れ計算へのフィードバックの仕方などを検討する必要がある。

参 考 文 献

口石孝幸・黒岩正光・加藤憲一・松原雄平・野田英明(2004): 構造物周辺における汀線変化を考慮した3次元海浜変形予測に関する研究, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 503-508.
熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・星上幸良・増田光一

(2002): 混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発, 海工論文集, 第49巻, pp. 476-480.
熊田貴之・小林昭男・酒井和也・柴崎 誠・宇多高明・芹沢真澄(2003): 沿岸漂砂卓越場における混合粒径砂の3次元分級に関する実験と計算, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 905-910.
黒岩正光・野田英明・孫 彰培・加藤憲一・谷口 丞(1999): 準3次元海浜流モデルを用いた構造物周辺の3次元海浜変形予測に関する研究, 海工論文集, 第46巻, pp. 616-620.
黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明(2002): 多方向不規則波浪場における準3次元海浜流場と海浜変形予測に関する研究, 海工論文集, 第49巻, pp. 491-495.
柴山知也・W. Rattanapitikon(1993): 砕波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価, 海工論文集, 第40巻, pp. 306-310.
清水琢三・熊谷隆宏・三村信男・渡辺 晃(1994): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形長期予測モデル, 海工論文集, 第42巻, pp. 406-410.
清水琢三・山田晶子・渡辺 晃(1996): 沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 海工論文集, 第43巻, pp. 571-575.
田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫(1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海工論文集, 第36巻, pp. 264-268.
田中 仁(1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp. 285-288.
平野宗夫(1971): Armoringをとまう河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp. 56-65.
本田隆英・佐藤慎司・渡辺 晃・磯部雅彦(2003): 週上域を含む混合粒径底質海浜の三次元海浜変形モデル, 海工論文集, 第50巻, pp. 511-515.
間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第628号, II-48, pp. 177-187.
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.
Goda,Y(2001): A new approach to beach morphology with the focus on suspended sediment transport. The proceedings of the 1st Asian and Pacific Coastal Engineering Conference, Vol.-1, pp 1-24.
Larson,M. and N. C. Kraus, N. C. (1989): SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1, Empirical foundation and model development, Technical Report CERC-89-9, US Army Engineering Waterways Experiment Station, CERC
Nicolson,J., I. Broker, J.A. Roelvink, D.Price, J.M.Tanguy and L. Moreno(1997): Intercomparison of coastal area morphodynamic models, Coastal Engineering, Vol.31, pp. 97-12