

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

黒岩 正 光* ・ 口 石 孝 幸** ・ 加 藤 憲 一**
松 原 雄 平*** ・ 野 田 英 明****

本研究は、多方向不規則波、流れの 3 次元性および浮遊砂の移流拡散を考慮した新たな 3 次元海浜変形予測モデルを提案するものである。波浪場は多方向不規則波と構造物による回折波の影響を考慮できる間瀬ら (1999) のエネルギー平衡方程式を用い、海浜流場は準 3 次元モデルを採用した。漂砂量は掃流漂砂と浮遊砂にわけて計算した。浮遊砂については移流の効果を取り入れるため、浮遊砂濃度に関する移流拡散方程式を用いて算定した。モデルの妥当性を検討するため実規模レベルの離岸堤周辺の高浜変形計算を試み、さらに、現地への適用性も検討した。

1. はじめに

構造物設置にともなう周辺の海底地形変化や航路埋没などの予測には 3 次元海浜変形モデルが有効とされている。近年、海浜流の 3 次元性を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルがいくつか提案されている (例えば, De Vriend et al., 1993; 黒岩ら, 1999)。また、波の不規則性や非線形性を考慮でき、流れも同時に解析できる Boussinesq 方程式 (位相解析モデル) を用いた海浜変形予測モデルも提案され現地への適用も試みられている (例えば申ら, 2001)。しかしながら、波浪場の計算方法や漂砂量の算定方法はさまざまに確立されたモデルは無く、あらゆる条件下の高浜変形予測に十分対応できるモデルが確立されているとは言いがたい。例えば、Boussinesq 方程式のような位相解析モデルには、計算格子に制約があり、計算時間、計算機の記憶容量などの問題から広領域で長期における高浜変形予測には適しているとは言いがたい。長期高浜変形予測を行なう場合、ある時間経過後の地形変化を計算し、さらに波と流れ計算へフィードバックし、また地形変化を計算するといった繰り返しを行なう必要があり、計算時間短縮の観点から波浪場の計算を如何に効率良く算定するかが重要である。広領域に適用する際には、計算格子に制約をあまり受けないモデルの選択も重要である。そこで、あらゆる面において算負荷の少ないエネルギー平衡方程式のような位相平均モデルを用いる手段が有効であると考えられる。

黒岩ら (1999) は、波浪場計算に位相解析モデルのひとつである非定常緩勾配方程式を、海浜流場に準 3 次元モデルを用いた 3 次元海浜変形モデルを提案し、現地の港周辺における海浜流場と海浜変形計算を試みているが、波の不規則性や多方向性や浮遊漂砂の取り扱いなどが不十分であるため再現性があまり良くなく検討の余地が残されている。

本研究では、多方向不規則波を考慮できる計算負荷の

小さいエネルギー平衡方程式に基づく流れの 3 次元性と浮遊砂の移流効果を考慮した新たな 3 次元海浜変形予測モデルを提案し、黒岩ら (1999) による現地観測結果を用いてモデルの適用性を検討しようとするものである。

2. 海浜変形モデル

2.1 波 浪 場

波浪場は、多方向不規則波および構造物による回折波も考慮できる間瀬ら (1999) のエネルギー平衡方程式

$$\frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Sv_\theta)}{\partial \theta} = -\frac{\kappa}{2\omega} \{ (CC_\theta \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_\theta \cos \theta S_{yy} \} - \varepsilon' S \dots\dots\dots (1)$$

を用いて算定する。ここに、 x は沖から岸向きに、 y は沿岸方向に取った座標を表す。 θ は波向を表し、 x 軸から反時計回りを正に取ったものである。 S はエネルギースペクトル、 v_x 、 v_y および v_θ はそれぞれ波のエネルギー輸送速度、右辺第 1 項目は回折効果を表すもので、 x は影響係数で 2.5~3 程度である。第 2 項は碎波によるエネルギー減衰項で高山ら (1991) のモデルが適用されている。間瀬モデルは最近開発されたモデルであり、適用性についてはまだ明らかではない。本研究では、間瀬モデルの適用性についても検討する。

2.2 海 浜 流 場

海浜流場は黒岩ら (1997) の準 3 次元海浜流モデルを適用する。本研究では、多方向不規則波浪下に適用するため、radiation stress、渦動粘性係数、底面摩擦などの諸量は、黒岩ら (2000) を参考に、自乗平均平方根波高 H_{rms} と周波数スペクトルのピーク周期 T_p を用いて計算する。波向きは平均波向きを用いることにする。基礎式、境界条件等の詳細は黒岩ら (1997) を参照されたい。

2.3 漂砂量および地形変化

正味の漂砂量は、黒岩ら (1999) と同様に岸沖 (x) および沿岸 (y) 方向に分けて定義し、以下のように表す。

$$q_x = q_{wx} + q_{cbx} + q_{sx} \dots\dots\dots (2)$$

$$q_y = q_{wy} + q_{cby} + q_{sy} \dots\dots\dots (3)$$

* 正 会 員 博(工) 鳥取大学助手 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 修 日本建設コンサルタント

*** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

**** フェロー 工 博 鳥取環境大学副学長

とする。ここに、 q_{wx} および q_{wy} は波による掃流漂砂、 q_{cbx} および q_{cby} は底面定常流速から算定される流れによる掃流漂砂、 q_{sx} および q_{sy} は波と流れによる浮遊漂砂である。波および流れによる掃流漂砂は渡辺ら (1984) のモデルに基づいて算定する。計算方法については黒岩ら (1999) に譲る。浮遊漂砂は移流の影響を考慮するため、浮遊砂濃度に関する 3 次元移流拡散方程式を用いて計算する。移流拡散方程式は

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial U c}{\partial x} + \frac{\partial V c}{\partial y} + \frac{\partial W c}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ & \quad + w_f \frac{\partial c}{\partial z} \dots (4) \end{aligned}$$

で表され、ここに、 c は浮遊砂濃度、 w_f は砂の沈降速度で Rubey の式による。 ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z は砂の拡散係数で、土屋ら (1986) の渦動粘性係数の関数、すなわち

$$\epsilon_x = \epsilon_y = A_h C H \dots (5)$$

$$\epsilon_z = A_v C H \dots (6)$$

で与える (黒岩ら, 2000)。ここに C および H はそれぞれ波速および波高、 A_h および A_v は無次元定数であり、それぞれ 0.005~0.05 程度の値である。水深方向に解くため、底面および水面における境界条件を与える必要がある。水面における境界条件は水面を通過するフラックスが無いものとし、

$$\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + w_f c = 0 \dots (7)$$

で与え、底面における境界条件は底質の巻き上げ率 P を考慮した勾配型、すなわち次式で与える。

$$\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} = -P \dots (8)$$

ここに、 P は底質の巻き上げ率である。黒岩ら (2000) の碎波によるせん断応力の関数、すなわちエネルギー逸算率の関数として与える。

$$P = A_p w_f \frac{\tau_s}{s p g D_{50}} \dots (9)$$

ここに A_p は無次元定数 ($A_p = 0.007$)、 s は砂の水中比重、 D_{50} は砂の中央粒径、 τ_s は碎波による水面のせん断応力である。 D_b は碎波による波のエネルギー逸算率であり、Dally ら (1984) の式

$$\tau_s = 2.4 \rho^{1/3} D_b^{2/3} (h/L_p) \dots (10)$$

である。 D_b は碎波による波のエネルギー逸算率であり、Dally ら (1984) の式

$$D_b = \frac{K}{h} C_o (E - E_s) = \frac{K}{h} \sqrt{g h} \frac{1}{8} \rho g \{ H^2 - (\Gamma h)^2 \} \dots (11)$$

を用いる。ここに、 K および Γ は無次元定数で、与え方については後述する。なお、本研究で提案する巻き上げ率

の式 (9) は、底面におけるせん断応力のような直接底質に作用する外力を与えるのではなく、碎波による表面渦の存在が底質の巻き上げに影響を及ぼす、すなわち碎波による乱れや斜降渦などが底質の巻き上げに寄与するものと考えて定式化したもので、碎波帯内で巻き上げられた底質が浮遊し海浜流によって運搬されるという現象を容易に取り扱うことが可能である。

実際の計算では、式 (4) に σ 座標変換を施して差分陽解法を用いて離散化し、濃度 c がほぼ定常になるまで計算する。実際の海底地形変化は、巻き上げフラックスと沈降フラックスの差 (非平衡性) によって発生するものと考え、本研究では、浮遊砂量は浮遊砂濃度と海浜流速との積を底面から水面まで積分することによって浮遊砂に関する局所漂砂量として、次式により算定することにする。すなわち、

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\bar{c}} \bar{c}(x, y, z) U(x, y, z) dz \dots (12)$$

$$q_{sy} = \int_{-h}^{\bar{c}} \bar{c}(x, y, z) V(x, y, z) dz \dots (13)$$

ここに、 $\bar{c}$ は定常状態における浮遊砂濃度である。

海底地形の変化は渡辺ら (1984) の底勾配の影響を考慮した

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x + E_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y + E_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ & \dots (14) \end{aligned}$$

を用いる。ここに、 E_s は無次元定数であり、以下の計算においては 5~10 程度とする。

3. 実規模離岸堤周辺における地形変化の計算結果

3.1 計算条件

計算領域は、海底勾配 1/50 の平行等深線を有する岸沖方向および沿岸方向 1000 m の範囲とし、その領域内に離岸距離 200 m (水深 $h = 4$ m) の位置に長さ 200 m の離岸堤を設置し、その周辺の海底地形変化の計算を試みる。波浪場の計算における入射波は有義波波高 $H_{1/3} = 2.0$ m、有義波周期 $T = 8$ s、主波向は 0 度 (直角入射) とし、入射波のエネルギースペクトルは、ブレットシュナイダー光易型周波数スペクトルと $S_{msx} = 25$ の光易型方向関数との積で与える。底質の中央粒径は 0.2 mm とする。沿岸および岸沖方向における計算格子間隔は両者とも 20 m とし、海浜流および浮遊砂濃度計算における水深方向の分割数は 5 とした。なお、浮遊砂濃度の計算における時間間隔は 0.05 s とし、20000 回繰り返し計算を行った。

3.2 計算結果

図-1 および 2 は有義波の波高分布および底面におけ

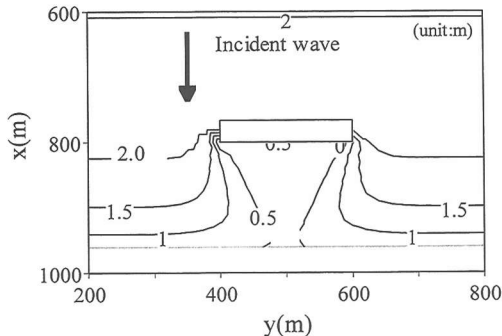


図-1 有義波波高分布の計算結果

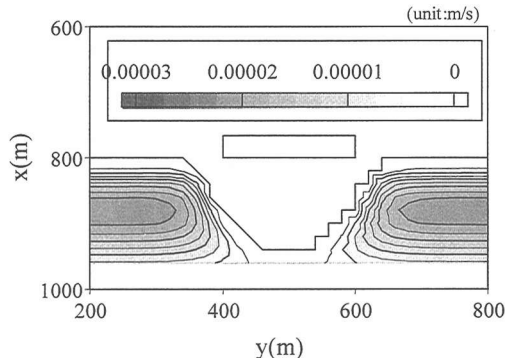


図-3 浮遊砂の巻上げ率

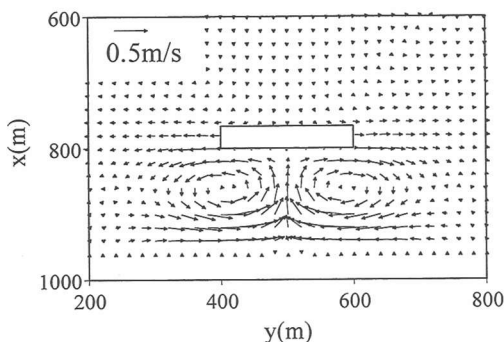


図-2 底面における海浜流ベクトル

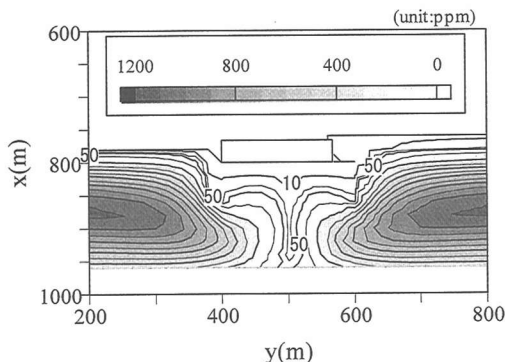


図-4 底面における浮遊砂濃度分布

る海浜流速分布を示したものである。図-3および4はそれぞれ、浮遊砂の巻上げ率および底面における浮遊砂濃度分布を示したものである。式(11)中における K および Γ はそれぞれ0.15および0.5とした。これらの図から離岸堤背後では、最大で0.5 m/s程度の循環流が発生し、離岸堤外で巻き上げられた底質が海浜流によって離岸堤背後に運ばれ沈降している様子が再現されている。図-5は2日後の等深線と侵食および堆積領域を示したものである。この図から、離岸堤両端部付近で侵食域が、離岸堤背後の汀線付近で堆積域がみられる。また、Goda (2001) の計算結果と同じような2山型のトンボロが形成されているのがわかる。現地をよく見られるようなトンボロとは異なる海底地形ではあるが、侵食域および堆積域については、定性的には妥当な結果が得られている。

4. 現地における港周辺の地形変化予測への適用

4.1 現地の概要および計算条件

本モデルの検証用データとして、鳥取県中部にある赤碕港において1997年12月から翌年4月まで実施された現地観測結果の一部を用いた(黒岩ら, 1999)。図-6は

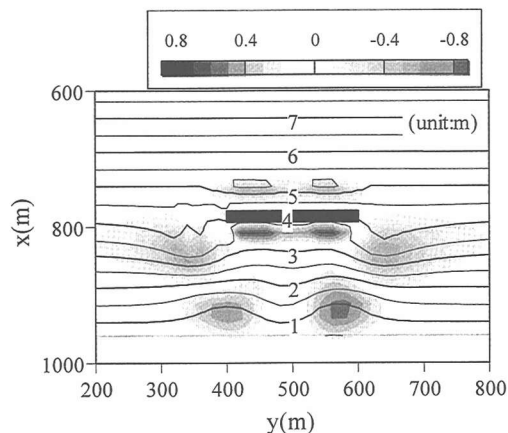


図-5 2日後の海底地形および侵食堆積領域

1997年10月に実施された赤碕港周辺の深浅測量結果を示したもので、図中に示す●印は波高および流速測定点を表す。St.AおよびBでは、波浪および海浜流速が測られている。St.Cでは、波と流れに加えて海底地盤高も測られている。

まず、間瀬モデルの妥当性の検討するため、表-1に示

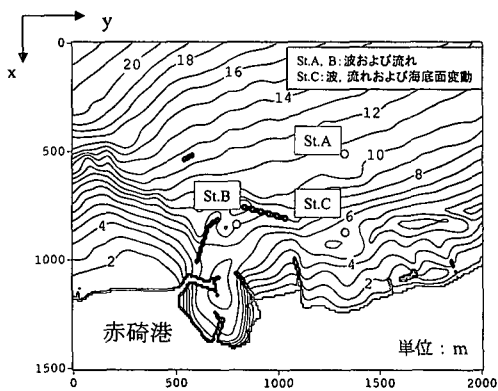


図-6 赤碕港周辺の海底地形および現地観測点

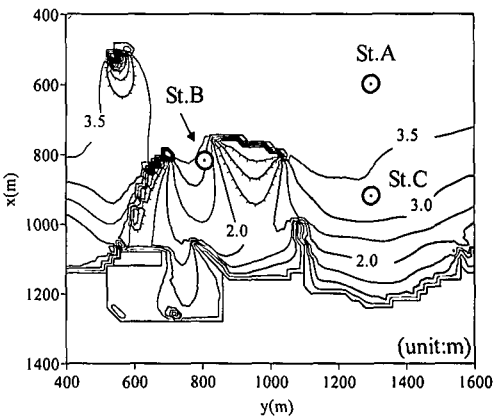


図-7 有義波高分布の数値計算例 (Case 4)

す Case 1 から 4 までの波浪条件下における同港周辺の波浪計算を試み、つぎに準 3 次元海浜流モデルと地形変化予測モデルの妥当性を検討するため、Case 5 の波浪条件下における海浜流および地形変化計算を試みる。表中に示す波浪特性は沖側境界における入射条件を示しており、St.A で実測された有義波波高と波向きに一致するように試行計算を行い決定したものである。波浪特性については、St.B および C における実測値と比較検討した。なお、波浪場の計算におけるエネルギースペクトルは、JONSWAP 型 ($\gamma=3.3$) の周波数スペクトルを採用し、 S_{max} は 25 とした。実際の計算では、図-6 に示す領域 (岸沖方向 1.5 km、沿岸方向 2 km) を計算領域とし、計算格子間隔はすべて 20 m とした。浮遊砂濃度計算における時間間隔はおよび繰り返し回数は予備計算の結果から 0.05 s および 30000 回とした。なお、底質の中央粒径は 0.2 mm とした。式 (11) 中における K および Γ はそれぞれ 0.15 および 0.55 とした。

4.2 計算結果

図-7 は波高分布の計算結果の一例で Case 4 の結果を示したものである。図-8 (a) および (b) はそれぞれ表-1 に示した 4 ケース分の有義波波高および主波向きの計算結果と実測値を比較したものである。図-8 (a) 中に示す×印は式 (1) における右辺第 2 項を無視して計算した結果 (従来のエネルギー平衡方程式相当による結果) である。図-8 (a) および (b) から St.C では波高および波向きとも実測値とよく一致する。しかしながら St.

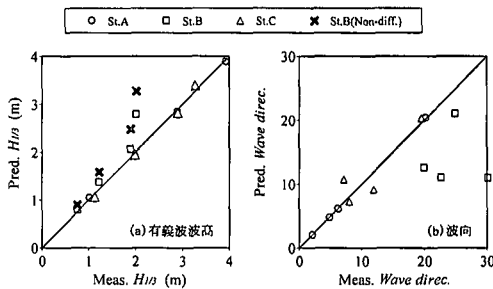


図-8 観測値と実測値との比較

B の沖防波堤近傍では、波高は若干過大評価するものの従来型のエネルギー平衡方程式による波高の計算結果と比較して実測値に近い結果が得られている。一方、St.B における波向きの計算値が実測値と異なっているが、定性的には良い結果が得られており、間瀬モデルを用いることにより、現地における構造物周辺の多方向不規則波浪場予測が概ね再現可能であることがわかる。

つぎに、海浜流モデルおよび地形変化モデルの妥当性を検討するため、Case 5 の波浪条件下における再現計算を試みる。黒岩ら (1999) によると、1 月 15 日に 3 ~ 4 m の高波浪が発生し、St.C における海底面は 1 日で約 80 cm 上昇した。図-9 は海浜流場の計算結果を示したもので、底面における流速ベクトルを示している。図中に示す矢印は観測結果を示したものである。この図からすべての観測点においてよく一致することがわかる。図-10 は底面における浮遊砂濃度分布を示したもので、この図から流れの方向に移流している様子が再現されているのがわかる。図-11 は 24 時間後の海底地形変化を計算した結果で、堆積領域のみを示したものである。先に述べたように 1 日で海底面が約 80 cm 上昇した。計算結果によると St.C 付近は明らかに堆積域にあり、St.C 付近は 50 cm 程度の上昇量であるが、近傍で最大 1.2 m 海底が

表-1 計算条件

Case	観測日時	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(m)$	θ
1	01/02/14 : 00	1.1	608	22
2	01/09/06 : 00	2.9	8.7	4
3	01/09/12 : 00	2.2	7.7	-1
4	01/15/06 : 00	4	8.6	2
5	01/15 の平均値	3.9	9.3	2

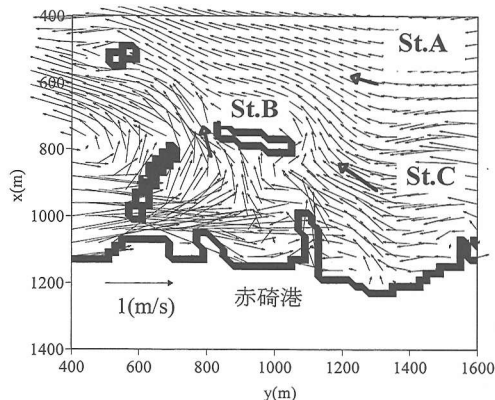


図-9 底面における海浜流速の比較

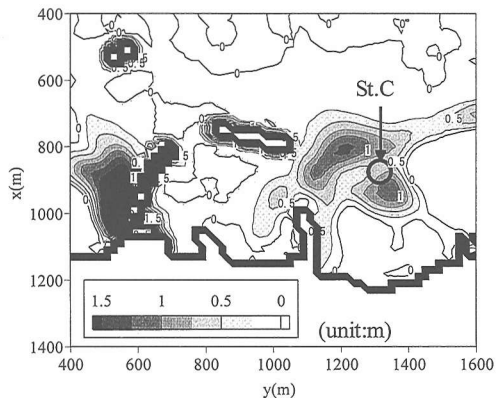


図-11 24時間後の地形変化(堆積領域)

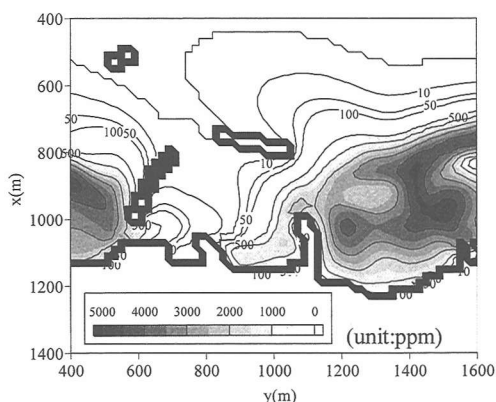


図-10 底面の浮遊砂濃度分布

上昇しており、実測結果と定性的に良く一致する結果が得られている。

以上の結果から、移流拡散方程式を用いることにより、浮遊漂砂の移流の効果を考慮でき、定性的ではあるが精度の良い海浜変形予測ができることがわかった。

5. おわりに

本研究では、多方向不規則波モデルに基づく準3次元海浜流モデルおよび海浜変形予測モデルを構築し、現地観測結果と比較しモデルの妥当性について検討した。得られた主要な結論は以下に示すとおりである。

1) 間瀬モデルを用いることにより現地における構造物周辺の波浪場を精度良く算定できること、高波浪時における準3次元海浜流場も精度良く計算できることがわかった。

2) 3次元移流拡散方程式を用いて砕波による浮遊砂の巻き上げと海浜流による移流効果を考慮することにより海浜変形を精度良く予測できることがわかった。

最後に、本研究は平成13年度文部科学省科学研究費、奨励研究(A)(課題番号:12750464,研究代表者:黒岩正光)の援助を受けて実施したものであることを付記する。また、波浪場の計算においては、間瀬ら(1999)を参考にし、京都大学防災研究所 間瀬 肇助教授には貴重な助言を戴いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 黒岩正光・野田英明・芳地康征(1997): 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 151-155.
- 黒岩正光・野田英明・加藤憲一・谷口 丞・孫 彰培(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, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 616-620.
- 黒岩正光・野田英明・孫 彰培(2000): バー地形周辺の戻り流れと地形変化予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 626-630.
- 申 承鎬・山口 洋・入江 功・一田 剛(2001): Hybrid-type 3次元海浜変形モデルの構築とその適用, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 521-525.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67.
- 土屋義人・山下隆男・植本 実(1986): 砕波帯における戻り流れについて, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- 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・神山 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回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Dally, W. R., R. G., Dean and R. A. Dalrymple (1984): A Model for Breaker Decay on Beaches, Proc. 19th ICCE, pp. 82-97.
- Goda, Y (2001): A New Approach to Beach Morphology with the Focus on Suspended Sediment Transport, Proceedings of Asian and Pacific Coastal Engineering 2001, pp. 1-24.
- De Vriend, H. J. and J. S. Ribberink (1988): A quasi-3D mathematical model of coastal morphology, Proc. 12th ICCE, pp. 1689-1703.