

バー地形周辺の戻り流れと地形変化予測に関する研究

黒岩 正光*・野田 英明**・孫 彰 培***

1. はじめに

近年, 流れの 3 次元性が重要視され, 流れの 3 次元性を考慮した海底地形変化モデル (DeVriend ら, 1988; Briand ら, 1993; 原田ら, 1997) が提案されているが, 現地海浜に十分な精度で適用できるモデルは確立されていない。黒岩ら (1999) も, 準 3 次元海浜流モデル (黒岩ら, 1997, 1998) を用いた 3 次元海浜変形モデルを構築し, 現地海浜への適用を試みた。しかしながら, 波の不規則性, 浮遊漂砂や海底地形の影響などの取り扱いが不十分で, バーやトラフ地形を有する現地海浜における海浜流場および海底地形変化を十分な精度で計算できるとは言い難くモデルを再検討する必要がある。本研究では, 任意海底地形上における海浜流および地形変化を精度良く再現できるように準 3 次元海浜流モデルを修正し, 浮遊砂の移流を考慮した地形変化予測モデルを構築することを目的としている。本報は, その第一段階としてバー周辺の戻り流れと地形変化を対象とし, 電力中央研究所所有する大型波動水路 (丸山ら, 1986) および運輸省港湾技術研究所所有する波崎海洋研究施設 (以下 HORS) で実測された結果 (Kuriyama ら, 1999) と比較し提案されたモデルの適用性を検討しようとするものである。

2. 海浜変形予測モデル

2.1 波 浪 場

本研究で対象とする海岸は沿岸方向にほぼ一様な海底地形を有し, 波, 流れおよび漂砂量の沿岸方向における場所的变化は無いものとする。岸沖方向 (x 方向) のみについて考えれば良い。

波浪場は砕波後の波の再生および 2 次砕波を計算できる Dally ら (1984) の砕波によるエネルギー逸散率 D_b を付加したエネルギー平衡方程式, すなわち次式を用いて算定する。

$$\frac{\partial EC_g \cos \alpha}{\partial x} = -D_b = -\frac{K}{h} C_g (E - E_s) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, C_g は群速度, h は静水深, E は波のエネルギー, α は波向きを表す。右辺における K は無次元定数で, 0.15 から 0.2 程度の値である。 E_s は次式で表される安定波 H_s によるエネルギーである。

$$E_s = \frac{1}{8} \rho g (H_s)^2 = \frac{1}{8} \rho g (\Gamma h)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに, Γ は無次元定数で, 砕波した波が再生する位置での波高水深比を表し, $\Gamma=0.4$ である。現地に適用する場合, 波の不規則性や多方向性を考慮する必要があるが, 本研究では一方向不規則波とする。波高分布の計算については, Kuriyama ら (1999) と同様に, まず沖側境界において JONSWAP 型周波数スペクトルを持つ約 20 程度の水面変動の時系列を計算する。つぎに, ゼロダウンクロス法を用いて個々の波に分割し, 式 (1) を用いて波別に波高分布を計算し, 有義波波高 $H_{1/3}$ および自乗平均平方根波高 H_{rms} を算定する。砕波点は合田 (1975) の砕波指標

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right] \right\} \dots\dots (3)$$

を用いる。 A は無次元定数であり, 不規則波の場合は 0.1, 規則波の場合, 0.14 とした。

2.2 戻り 流 れ

戻り流れは黒岩ら (1997) の準 3 次元海浜流モデルを適用して計算するが, バーが存在する場合は, バー付近で一旦砕波した波が再生し 2 次砕波を起こすため, その影響を考慮する必要がある。本研究ではその波の再生および 2 次砕波の影響を海浜流モデルに取り入れるため, 黒岩ら (1997) のモデルにおける水面の境界条件に, 砕波によるエネルギー逸散率の関数で表されるせん断応力を与え, 準 3 次元モデルの修正を行う (以下, 修正 Q-3D モデル)。岸沖方向における砕波に起因する平均水面のせん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_{sx} = A_{sx} \rho^{1/3} D_b^{2/3} (h/L) \cos \alpha \dots\dots\dots (4)$$

ここに, A_{sx} は無次元定数で 2.0~4.0 程度の値をとる。モデルの詳細は黒岩ら (1997) を参照されたい。不規則波を取り扱う場合, 修正 Q-3D モデル中に含まれる渦動粘性係数, 過剰運動量フラックスなどは, H_{rms} およびスペクトルのピーク周期 T_p を用いて計算する。なお, 式

* 正 会 員 博(工) 鳥取大学助手 工学部土木工学科
** フェロー 工 博 鳥取県立大学設立準備財団
*** 正 会 員 博(工) 韓国海洋大学校講師

(4) 中の $\cos$ を $\sin$ に置き換えたせん断応力を沿岸方向に与えることによって、沿岸流速も同時に計算可能であり、その結果については Kuroiwa ら (2000) に譲る。

2.3 漂砂量と地形変化

本研究では、黒岩ら (1999) と同様に岸沖方向における正味の漂砂量 q_x を以下のように定義する。

$$q_x = q_w + q_{cb} + q_s \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここに、 q_w は波による掃流漂砂量、 q_{cb} は流れによる掃流漂砂量 (修正 Q-3D モデルから算定される底面定常流速を用いた漂砂量)、 q_s は波と流れによる浮遊漂砂量である。波および流れによる掃流漂砂量は渡辺ら (1984) のモデルに基づいて算定する。すなわち、波による掃流漂砂量は、

$$q_w = A_w(u_*^2 - u_{*c})\bar{u}_w/g \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

ここに、 A_w は無次元定数、 u_* は波と流れ共存場における底面摩擦速度 (田中, 1990)、 u_{*c} は限界摩擦速度、 $\bar{u}_w$ は底面における波の水粒子速度である。底面定常流速による掃流漂砂量は、

$$q_{cb} = A_c(u_*^2 - u_{*c})U_b/g \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここに、 A_c は無次元定数、 U_b は岸沖方向における底面定常流速である。浮遊漂砂量 q_s は、3 次元の移流拡散方程式を鉛直 2 次元面内に適用して算定される浮遊砂濃度と海浜流速から算定する。移流拡散方程式は

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial Uc}{\partial x} + \frac{\partial Wc}{\partial z} \\ & = + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_f \frac{\partial c}{\partial z} \quad \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

ここに、 w_f は浮遊砂の沈降速度で Rubey の式による、 ϵ_x および ϵ_z は浮遊砂濃度の拡散係数で簡単のため土屋ら (1986) の渦動粘性係数を用いて計算する。

$$\epsilon_x = A_h CH \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

$$\epsilon_z = A_v CH \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

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 0.01~0.1 程度の値である。式 (8) は、複雑な海底地形にも適用できるように σ 座標変換して陽の有限差分法を用いて離散化する。水面、底面、沖側および岸側に境界条件を施して濃度 c が定常状態になるまで計算する。

水面の境界条件は、水面を通過するフラックスが無いものとし、次式で与える。

$$\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial z} + w_f c = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

一方、底面では、底質の巻き上げ率 P を考慮した勾配型で与える。すなわち、

$$\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial z} = -P \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

P は沼野ら (1989) を参考にシールズ数 ϕ の関数で与える。

$$P = A_P w_f (\phi - 0.05)^3 \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

沖側境界は濃度 c を 0、岸側境界は濃度勾配を 0 とする。

実際の地形変化は底質の巻き上げフラックスと沈降フラックスとの差によって生じる (非平衡状態によって生じる) が、簡単のため、辻本 (1998) と同様に得られた浮遊砂濃度の鉛直分布と定常流速のそれとの積を底面から平均水位面まで積分して算定することにする。すなわち、岸沖方向における浮遊漂砂量は

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\bar{\eta}} \bar{c}(x, y, z) U(x, y, z) dz \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

である。ここに、 $\bar{\eta}$ および h はそれぞれ平均水位および水深、 U は岸沖方向の定常流速である。 $\bar{c}$ は定常状態における浮遊砂濃度である。

各漂砂量を計算する場合、式 (6)、(7) および式 (13) に含まれる係数 A_w 、 A_c および A_P は、漂砂量および浮遊砂濃度の実測値から決定する必要があるが、ここでは簡単のため、海浜変形を実際に計算し、実測値と最も適合する係数を与えることにする。

水深変化は渡辺ら (1984) の底勾配の影響を考慮した漂砂の連続式を用いて計算する。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x + E_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

ここに、 E_s は無次元定数である。

3. 計算結果

3.1 大型波動水槽内におけるバー地形変化

a) 計算条件

まず、電力中央研究所所有する大型造波水路において実施された規則波浪下における実験結果を用いて地形変化の計算を試みモデルの妥当性を検討する。計算の対象は丸山ら (1986) に示されている暴風海浜型のケースであり、波浪条件、底質条件は表-1 に示すとおりである。計算は岸沖方向 110 m の範囲で行い、波浪場、海浜流場及び地形変化計算の差分格子間隔は 2 m、海浜流場の計算における水深方向分割数は 5 等分割である。

b) 定常流速と波高分布

図-1(a) および (b) は初期地形に対する波高分布および戻り流れの計算結果と実験値を比較したものである。なお、式 (1) 中の K は 0.2、式 (2) 中の A_s は 2.8 とした。これらの図から波高分布の計算結果は実測値と良

表-1 計算条件

CASE	T (s)	H_0 (m)	H_0/L_0	$\tan \beta$	d_{50} (mm)
3-4	3.10	1.62	0.1081	1/20	0.27

表-2 各時間毎の各種係数

	A_c	A_w	A_p	E_s
初期地形	0.5	0.1	0.001	2
7時間後	0.5	0.1	0.0005	5
15時間後	0.5	0.1	0.0005	5

く一致する。一方、戻り流れの計算結果は実測値を過小評価するところがあるが、戻り流れのピーク位置はほぼ一致し、戻り流れの分布形状は実測値と良く一致する。

c) 地形変化と漂砂量

図-2は波作用7時間、15時間および30時間後のバー地形の変形計算結果と実験結果を比較したものである。計算に用いた漂砂量係数は表-2に示すとおりで、計算結果が実測値に一致するように係数を設定した。図-2から概ねバーの形成ならび移動が再現されているが、表-2に示したように、 A_p および E_s の与え方が異なっており、係数を何らかのパラメータと関連づけて再検討する必要がある。つぎに、各漂砂量が地形変化に与える影響を調べた結果を示したのが図-3で、初期地形に対する各漂砂量分布とそれらを用いて計算した水深変化量を示したものである。図-3(a)から浮遊漂砂 q_s がピーク値を取る位置は流れによる掃流漂砂 q_{cb} のそれより沖側であり、浮遊砂と掃流砂量の岸沖分布の形状は、明らかに異なっている。図-3(b)からそれぞれの漂砂量で計算した地形変化も分布形状が異なっている。 q_s のみによる計算結果は全漂砂量 q で計算した結果と海底地形形状が類似しており、浮遊砂がバー形成に大きく寄与しているものと考えられる。以上のことから移流拡散方程式を用いて浮遊砂濃度分布を求めて浮遊砂量を算定することによりバー地形変化予測が精度良く行えることがわかる。

3.2 現地におけるバー地形周辺の戻り流れと地形変化

a) 計算条件

1997年1月30日～2月3日の期間にHORSで実測された14ケースの内代表的な5ケースに対して修正準3次元モデルの適用性を検討した。

表-3は本研究で用いた波浪条件を示したもので、表中に示す有義波高 $H_{1/3}$ 、波向 α はD.L. level-6 mの位置における値を示している。 T_p はJONSWAP型スペクトルのピーク周期である。沖波高 H_0 および沖波向 α_0 は線形理論を用いて推定したものである。計算は岸沖方向600 mの範囲で行い、差分格子間隔は5 m、水深方向は5等分割した。式(1)中の K は0.15、式(4)の A_{sr} は2.8とした。

b) 波高分布と戻り流れ

図-4は波高および底層における戻り流れの計算結果

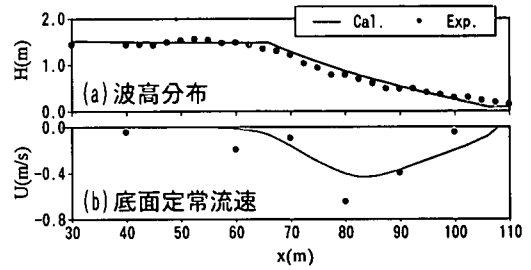


図-1 波高および底面定常流速の計算結果(規則波)

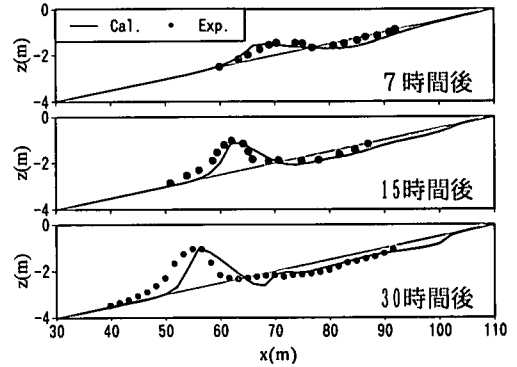


図-2 地形変化の計算結果と実験結果との比較

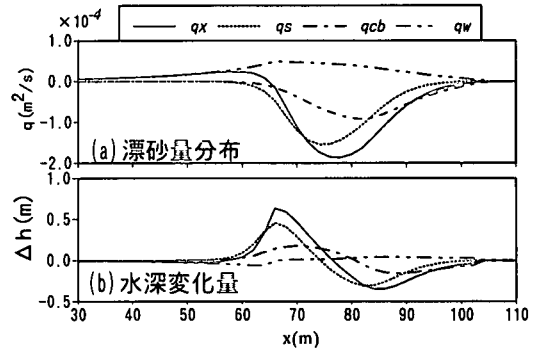


図-3 各漂砂量が地形変化に与える影響

と実験結果を比較した一例であり、各図はそれぞれCase 2, Case 4およびCase 7の結果を示している。この図から波高分布については概ね全ケースとも実測値と一致している。一方、Case 2および4の戻り流れの計算結果は実測値と良く一致するが、Case 7の場合、バー近傍において、本モデルによる戻り流れのピーク位置は実測によるそれと若干異なっている。図-5はCase 2およびCase 4のバー頂部(離岸距離260 m地点)における戻り流れの鉛直分布の計算結果と実測値を比較したものである。図-6は5ケース分の有義波高、戻り流れの実測値に対する計算値をプロットしたものである。この図から実測値に対する有義波高の計算における相対誤差は約8%程

表-3 波浪条件 (HORS)

Case	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	α	α_0	H_0 (m)	H_0/L_0	T_p (s)
1	2.00	9.69	24.50	54.30	2.41	0.0165	10.37
2	2.11	9.63	16.50	33.90	2.18	0.0151	10.31
4	2.91	11.81	19.00	48.60	3.13	0.0144	12.64
5	2.50	11.56	7.00	16.50	2.28	0.0109	12.37
7	2.37	12.16	6.00	14.67	2.12	0.0092	13.01

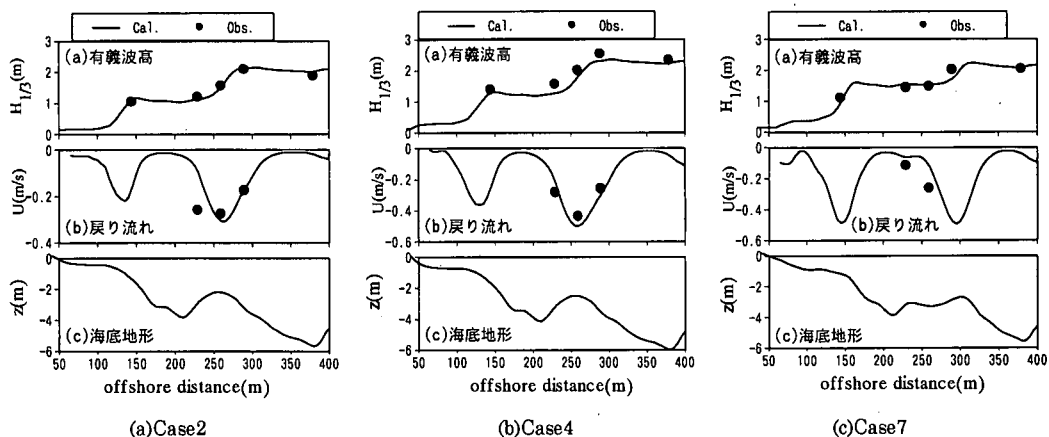


図-4 波高および戻り流れの計算結果と実測結果の比較

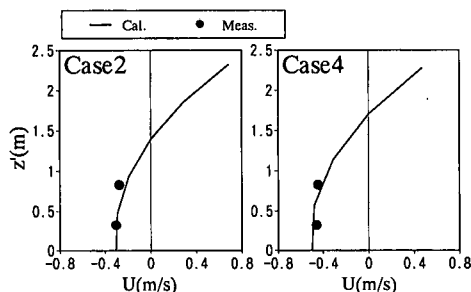


図-5 バー頂部の戻り流れの鉛直分布の計算結果

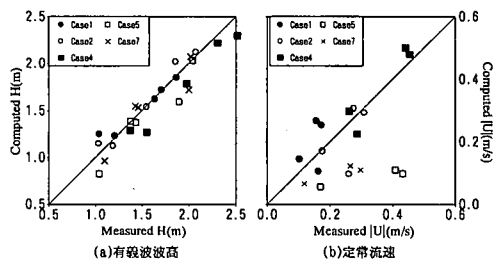


図-6 波高および戻り流れの計算結果と実測値の比較

度であり、本モデルは実測値を良く再現できることがわかる。一方、戻り流れの場合、相対誤差は40%以上で精度はあまり良くないが、定性的には良い結果が得られている。

c) 地形変化

Kuriyama ら (1999) によると、1月31日から2月1日にかけて発生した高波浪によってバーが沖側へ移動した。この観測結果を用いて地形変化モデルの検証を行う。実際に、地形変化に寄与した波浪がどの程度の大きさで、波作用時間がどの程度であったかは厳密に明かではない。そこで、本計算では Kuriyama ら (1999) によって1月31日に実測された Case 1 から4までの4ケース分の波浪条件を平均した沖波有義波高 ($H_{01/3}=2.5$ m)

および周期 ($T_{1/3}=10.47$ s) を用いて波と戻り流れを計算し、24時間後の地形変化計算を試みた。図-7は有義波高、戻り流れ、地形変化、浮遊砂濃度分布および漂砂量分布の計算結果を示したものである。なお、地形変化計算における漂砂量係数 A_c および A_w はそれぞれ0.1および0.01、巻き上げ率の A_p は0.0001とし、漂砂の連続式の E_s は5とした。地形変化の計算結果(c)から汀線付近に多少不一致が見られるがバーの変形は良く再現されていることがわかる。また、図-7(d)および(e)からバー頂部より沖側で高濃度の浮遊砂が存在し、前述した規則波の場合と同様に、浮遊漂砂量のピーク位置は流れによる掃流漂砂量分布のそれと異なることが明かで、浮遊漂砂がバー地形の変化に大きく寄与していることがわかる。

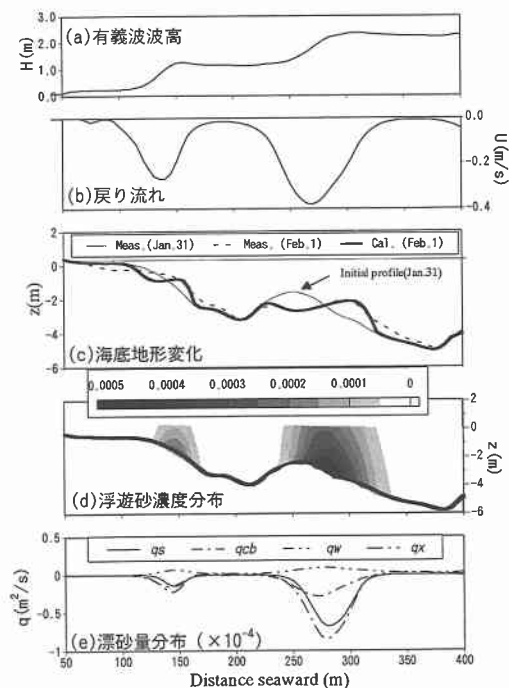


図-7 バー周辺の波, 流れ, 地形変化, 浮遊砂濃度および漂砂量分布の計算結果 (HORS)

4. おわりに

本研究では、バーなどの複雑な地形にも適用できる準3次元海浜流モデルおよび移流拡散方程式を用いた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適用性を検討した。その結果、準3次元モデルに波の不規則性、波の再生および2次碎波の影響を取り入れることにより現地におけるバー地形上の戻り流れが計算できることがわかった。また、移流拡散方程式を用いて浮遊砂を計算することによりバーの形成ならびに移動を精度良く再現できることがわかった。

なお、本研究では、浮遊砂濃度および汀線近傍の地形変化に関して十分な検討がなされていないので、モデルの再検討が必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、快く現地観測データを提供していただいた港湾技術研究所環境部漂砂研究

室室長栗山善昭氏に感謝の意を表する。また、不規則波の計算方法について助言していただいた鳥取大学工学部社会開発システム工学科の太田隆夫助手に感謝の意を表する。

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・中島孝昌 (1998): 構造物周辺における準3次元海浜流モデルの適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 196-200.
- 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, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 616-620.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 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.
- 沼野裕二・佐藤慎司・柴山知也 (1986): 海浜変形数値シミュレーションにおける浮遊砂の移流過程と undertow の効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 394-398.
- 辻本剛三 (1998): 浮遊砂濃度フラックスによる2次元海浜変形の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 496-500.
- 原田智弘・柴山知也・栗原明夫 (1997): 浮遊砂を考慮した準3次元海浜変形過程モデルの提案, 土木学会第52回年報概要集第2部, pp. 146-147.
- 丸山康樹・清水隆夫 (1986): 岸沖地形変化予測モデルの開発と検証, 電力中央研究所報告, No. U 86014, 44 p.
- 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回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Briand, M.-H. G. and J. W. Kamphuis (1993): Sediment transport in the surf zone: a quasi 3-D numerical model, Coastal Engineering, Vol. 20, pp. 135-156.
- Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1984): A Model for Breaker Decay on Beaches, Proc. 19th ICCE, pp. 82-97.
- De Vriend, H. J. and J. S. Ribberink (1988): A quasi-3D mathematical model of coastal morphology, Proc. 21th ICCE, pp. 1689-1703.
- Kuriyama, Y. and T. Nakatsukasa (1999): Undertow and Longshore current on a Bar-Trough Beach, —Field Measurements at HORS and Modeling—, Rep. Port and Harbor Res. Inst., Vol. 38, No. 1.
- Kuroiwa, M., H. Noda and C. B. Son (1999): A quasi-three dimensional of nearshore currents on a barred beach, 4th Int. Conference on Hydrosience and Engineering (in print).