

準 3 次元海浜流モデルを用いた 3 次元河口砂州形成数値シミュレーション

Numerical Simulation of 3D Morphodynamics around River-mouth using Quasi-3D Nearshore Current Model

黒岩正光¹・口石孝幸²・松原雄平³・砂川真太郎⁴

Masamitsu KUROIWA, Takayuki KUCHIISHI, Yuhei MATSUBARA and Shintaro SUNAGAWA

A numerical 3D morphodynamic model for predicting beach evolutions around river-mouth, which is based on the quasi-3D nearshore current model, was presented. The morphodynamic model takes into account the sediment transport rate in the run-up region and shoreline changes. The model applied to the formations of sand spits due to wave-induced currents, river-terrace due to river flows and off-shore sand bar in front of river-mouth under stormy wave condition. The computed results were compared with the conventional morphodynamic patterns around river-mouth. It was found that the presented model gave qualitatively agreements with the morphodynamic patterns in previous studies.

1. はじめに

これまで様々な 3 次元海浜変形モデルが提案され、構造物設置に伴う海浜変形や航路埋没などの予測に適用されてきた (例えば, 渡辺ら, 1984; 清水ら, 1996; 黒岩ら, 1999)。しかしながら, 河口付近の海浜変形については, 浅水方程式を用いた洪水による砂州のフラッシュ計算 (例えば, 佐藤ら, 1992; 桑原ら, 1995), 河口テラスの形成計算 (例えば, 永井ら, 2005) などについて多く検討されているが, 河口砂州形成に関する 3 次元海浜変形予測モデルはあまり例がない。

細山田ら (2005) がブシネスク方程式を用いて河口付近の波と流れを解き, 海浜変形計算まで行っているが明瞭な砂州の形成までは再現されていない。一方, 宇多ら (2005) は, 等深線変化モデルをベースとした河口砂州の回復計算を試みている。最近では, 黒岩ら (2007) が平面 2 次元海浜流モデルをベースに砂州の形成の計算を試みている。河口部の地形変化は波浪, 海浜流, 河川流の複合作用によって発生するものであり, また, 河口部の海浜変形は個々の河川の特徴が強く, これまで, 汎用性の高いモデルが提案されているとは言い難い。高波浪時には, 河口付近とその前面が碎波帯内に位置し, 強い戻り流れが発生し, 河川流と波浪による複雑な流動パターンが形成されることが予想され, 3 次元的な流れの取り扱いも必要とされると考えられる。

本研究では, 黒岩ら (2006) が開発した準 3 次元海浜流モデルを用いた汀線変化 3 次元モデルをベースに, 河

口砂州の形成に着目した数値シミュレーションモデルを構築することを目的としたものである。本報では, モデル開発の第一段階として, 樫木 (1991) に示されている代表的な砂州のパターンを対象に数値計算を行い, モデルの妥当性を定性的に検討する。

2. 河口砂州の形成パターン

樫木 (1991) は, 過去の研究成果に基づいて河口付近の海浜変形パターンを 11 通りに分類している。その中で, 代表的なパターンとして, 図-1 に示すように, 波浪の影響が強く河口に砂州が形成される (a, b), 河川流の影響による河口前面に形成される河口テラス形成 (c, d, e), 高波浪による河口前面の沿岸砂州形成 (f) などがある。

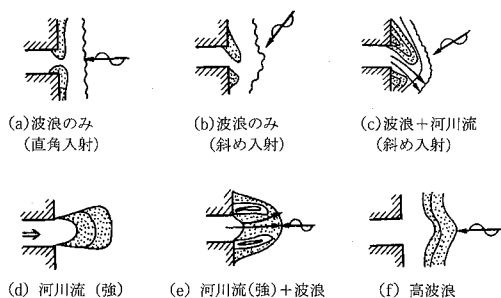


図-1 河口砂州の形成パターン例 (樫木, 1991)

3. 数値モデル

本モデルは黒岩ら (2006) のモデルをベースとしたもので, 以下に示すサブモデルから構成され, ある程度地形変化が計算された後も, 波と流れの計算にフィードバ

1 正会員 博(工) 鳥取大学准教授 工学部土木工学科
2 正会員 博(工) いであ(株)
3 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
4 非会員 鳥取大学大学院

ックできる非定常解析モデルとなっている。

(1) 波浪場及び海浜流場

波浪場は、間瀬ら（1999）の回折の影響を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。海浜流場は準3次元モデルを適用した。なお、流れと波との相互干渉については、簡単のため考慮せず、まず、波浪場のみの計算を行い、得られた結果を用いて、海浜流場の計算を行った。

(2) 漂砂量および地形変化

全漂砂量は黒岩ら（1999）と同様に、式（1）のように定義した。

$$\left. \begin{aligned} q_x &= q_{wx} + q_{cx} + q_{sx} \\ q_y &= q_{wy} + q_{cy} + q_{sy} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_{wx} と q_{wy} は波による掃流漂砂、 q_{cx} と q_{cy} は流れ（底面流速）による掃流漂砂、 q_{sx} と q_{sy} は波流れによる浮遊漂砂である。以下、 x 方向における漂砂量式のみ示す。波および流れによる掃流漂砂は渡辺ら（1984）のモデルと同じように以下のように表す。

$$q_{wx} = A_w (u_*^2 - u_{*c}^2) \hat{u}_w / g \dots\dots\dots (2)$$

$$q_{cx} = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) U_b / g \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A_w および A_c は無次元係数であり、 A_w を清水ら（1996）の粒径の関数として、式（4）のように与え、 A_c は A_w の10倍で与えた。

$$\left. \begin{aligned} B_w &= C_w (\sqrt{d_{50}} / w_f)^3 \\ A_w / B_w &= w_f \sqrt{0.5 f_{cw}} / \{(1-\lambda) s \sqrt{g d_{50}}\} \\ A_c &= 10 A_w \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

u_* は波流れ共存場における底面摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度である。 $\hat{u}_w$ は底面における波の水粒子速度の最大値である。 U_b は底面における海浜流あるいは河川流の底面流速である。 u_* の計算では、以下に示す樫木ら（1984）が河口の土砂移動に適用した波と流れ共存場におけるせん断応力を用いて計算した。

$$u_*^2 = \frac{1}{2} f_w F_b^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$F_b^2 = \frac{1}{2} \hat{u}_w^2 + \frac{2}{\pi} \hat{u}_w^2 \{ |U_b \cos \theta| + |V_b \sin \theta| \} + \frac{(U_b^2 + V_b^2)}{4} \dots\dots\dots (6)$$

浮遊漂砂は、浮遊砂濃度と定常流速の積を水深方向に積分して以下のように算定した。

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\eta} C(z) U dz \dots\dots\dots (7)$$

$C(z)$ は浮遊砂濃度で、以下の式で表される。

$$C(z) = C_s \frac{(\Psi - 0.05) v}{b \sqrt{g d_{50}}} \exp\left(-\frac{w_f z}{v_e}\right) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 C_s は無次元係数、 Ψ はシルズ数、 b は底面濃度の基準点高さが粒径の100倍としている。 v_e は砂の拡散係数である。なお、式（4）における摩擦係数は、

田中（1990）の陽形式表示の波・流れ共存場におけるモデルを適用し、式（5）は樫木ら（1984）を参考に0.02とした。

(3) 水深変化および汀線変化

本モデルでは、汀線の変化、砂州の形成など水際付近近傍の地形変化も考慮するため、波の遡上域の漂砂量も計算する必要がある。本研究では、図-2に示すように、汀線付近のある参照点における漂砂量（ q_{xs} 、 q_{ys} ）を最大遡上域まで外挿して漂砂量を算定し、海域の水深変化とともに、渡辺ら（1984）の漂砂の連続式を用いて地形変化を計算した。なお、砂州形成過程において、河口内に砂嘴が形成され始めた場合、砂州前面のみ波の遡上を考慮した。砂嘴の背後の計算においては、水深が負となった箇所を陸域として境界を変化させた。本モデルでは、洪水の発生によって砂州上をオーバーフローする流れとそれによる砂州のフラッシュ計算は考慮されていない。

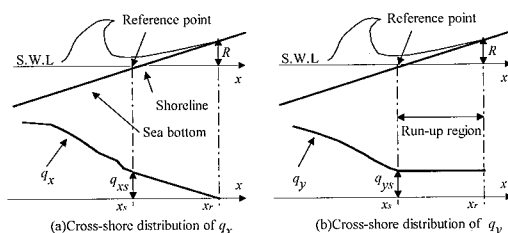


図-2 遡上域における漂砂量分布（黒岩ら，2006）

4. 数値計算結果

(1) モデル地形における計算

a) 計算条件

本研究では、図-3に示すモデル地形を用いて河口砂州形成の数値計算を試みた。計算範囲は岸沖（ x ）方向600m、沿岸（ y ）方向500mとし、海底勾配は1/50とした。河口部の川幅は100mとした。計算格子は10mを基本とし、河口および汀線付近、すなわち $x=300$ m～450mの範囲と $y=150$ m～350mの範囲を5m間隔とする不等間隔格子を用いた。計算条件は、前述した河口砂州形成パターンを参考に、表-1のように設定した。表中に示す U_{rf} は河川上流端境界における断面平均流速である。また、 C_w および C_s は式（4）および式（8）中の漂砂量係数である。Case 1, 2, および7は波浪のみ、Case 3, 4, 6および8は波浪と河川流、Case 5は河川流のみのパターンである。なお、漂砂量係数の与え方については、黒岩ら（2006）のハイブリッドモデルを参考にしており、短期における時化による地形変化計算においては、通常波浪による中長期計算のときの漂砂量係数より大きめにとる必要があることが示されている。

したがって、Case 5 および 6 においては短期に発生する豊水流を想定したもの、Case 7 および 8 は高波浪時の短期における地形変化を想定したものである。Case 5～8 に対しては、Case 1～4 の漂砂量係数に対して大きめに設定している。ただし、現地地形に適用する場合、係数の検証が必要である。

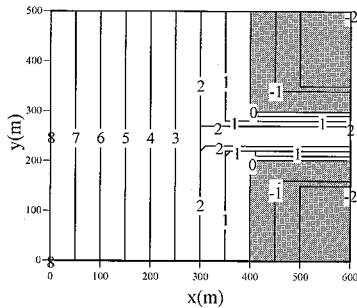


図-3 モデル地形

表-1 計算条件

Case	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	θ	U_{rf}	C_w	C_s
1	1.5	7.0	0.0	0.0	0.2	0.01
2	1.5	7.0	20.0	0.0	0.2	0.01
3	1.5	7.0	0.0	0.6	0.2	0.01
4	1.5	7.0	20.0	0.6	0.2	0.01
5	—	—	—	1.0	20.0	0.1
6	1.0	7.0	0.0	1.0	20.0	0.1
7	2.5	8.0	0.0	0.0	20.0	0.1
8	2.5	8.0	0.0	0.6	20.0	0.1

(単位: m, s)

b) 計算結果

図-4 および 5 は、Case 1 および 2 の海浜流場と 100 日後の地形変化の計算結果で、波浪の影響が大きく寄与する場合の結果である。波と流れ計算は 20 日毎に行った。これらの図から、波向が 0 の場合は、河口部の両岸に対称的な砂嘴が形成され、一方、Case 2 の斜め入射の場合は、沿岸流の発生とともに、流れの流下方向に砂嘴が発達し、非対称な河口砂州が形成されているのが明らかである。なお、紙面の都合上示していないが、計算を進めていくと河口が閉塞する場合も計算可能であることを付記しておく。図-6 および 7 は Case 3 および 4 の計算結果で、河川流も存在する場合の結果である。Case 1 と 2 の場合と同様に、波向 0 の場合は、対称的な砂嘴の形成、波向 20 度の場合は、非対称砂嘴が形成されているが、河川流の影響により、Case 1 および 2 の結果と比較して砂州の大きさは小さくなっている。また、河川流の流出方向に水深 3 m ～ 4 m の等深線が前進しており、テラス地形が形成されている。つぎに、河川流が卓越する場合(短期)の計算結果を図-8 および図-9 に示す。

以上の結果から、Case 1 および 2 はそれぞれ図-1 に示した(a)および(b)のパターンと類似している。また、Case 4 は、非対称な砂州と河口テラスが形成される(c)と類似していることが分かる。Case 5 および 6 の結果はそれぞれ(d)および(e)のパターンに類似している。

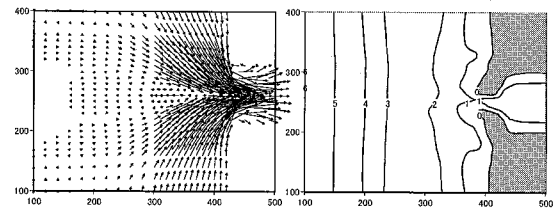


図-4 計算結果 (Case1)

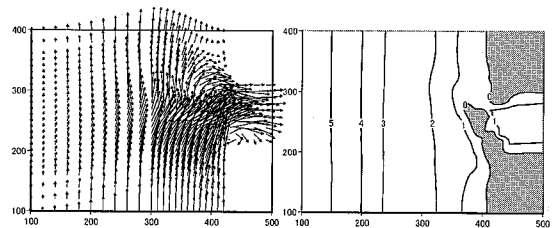


図-5 計算結果 (Case2)

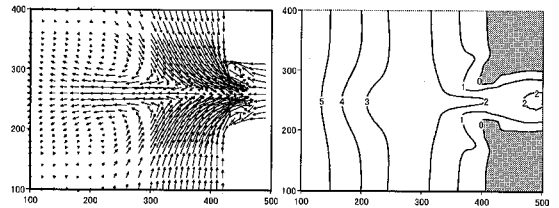


図-6 計算結果 (Case3)

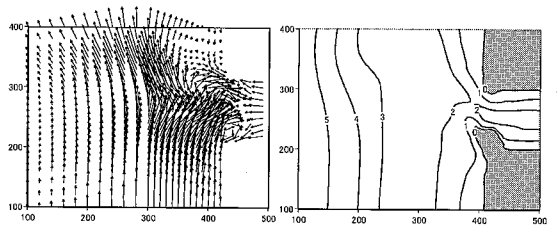


図-7 計算結果 (Case4)

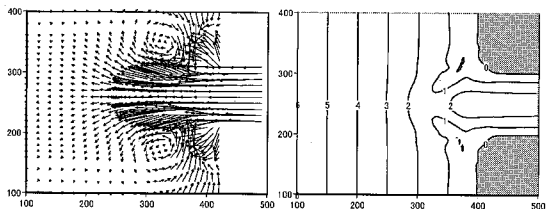


図-8 計算結果 (Case5)

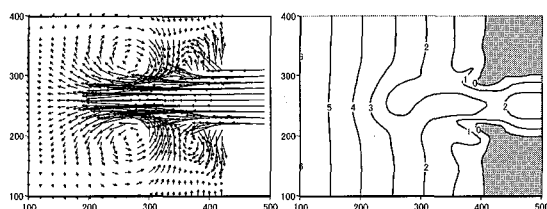


図-9 計算結果 (Case6)

最後に、高波浪時（短期）における河口周辺の地形変化の計算結果を図-10 (Case7) および 11 (Case8) に示す。また、 $y=250$ m（河口前面）と $y=400$ m の岸沖方向の断面地形を図-12 (a) および (b) に示す。これらの計算では、高波浪条件であるため、計算領域を広く取っている。高波浪時には、戻り流れが顕著であることから、河口以外の海浜では、バー地形が形成されている。あるいはステップ型の地形が形成される。これらの結果は、図-1 中の (f) のパターンと類似していることが分かる。

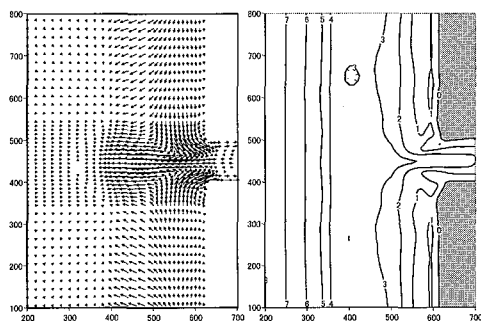


図-10 計算結果 (Case7)

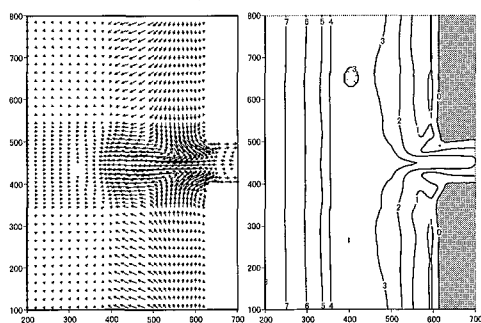


図-11 計算結果 (Case8)

以上の計算結果から、1.5 m 程度の通常波浪が卓越する場合、河口に砂州が形成される。2.5 m 程度の高波浪時には、河口砂州の形成とともに、沿岸砂州も形成されることが示された。河川流が伴う場合は、河口砂州は小さく、河口前面にテラス状の地形が形成される。概ね河

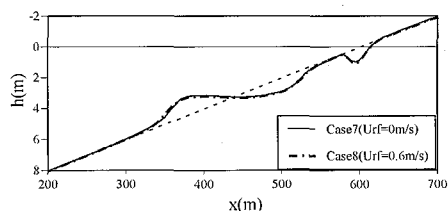
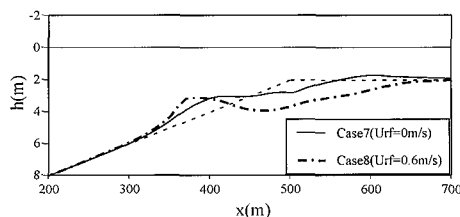
(a) 自然海浜部($y=200$ m)(b) 河口部($y=450$ m)

図-12 Case7 と 8 の縦断面地形の比較

口砂州の形成パターンが再現できることが確認できた。

(2) 直線上砂州地形の数値計算

前述したように、モデル地形において概ね河口砂州の形成パターンが再現できることが確認できた。しかしながら実際の砂州地形の形成が再現可能であるかは不確かである。最後に、宇多ら (1994, 1996) が示した富士川、安部川や天竜川の直線上砂州のような砂州形成のシミュレーションを試みた。

a) 計算条件

モデル地形は、現地の地形を参考に作成した。地形は簡単のため、平行等深線としてモデル化したものであるが、水深 3 m までは急勾配 1/20 でそれ以深は 1/50 とした。計算範囲は岸沖方向 600 m、沿岸方向 900 m、川幅 200 m とした。波浪条件は前述の Case 2 と同じで、有義波波高 1.5 m、周期 7 s で、波向きは 20 度である。漂砂量係数は $C_w=0.2$ 、 $C_s=0.01$ である。波と流れ計算へのフィードバックは 25 日毎に行い、250 日後の計算を試みた。

b) 計算結果

図-13(a)～(d) は数値計算による河口砂州の時間的变化を示したものである。それぞれ、50 日後、100 日、150 日および 250 日後の地形変化を表している。これらの図から、時間の経過とともに、砂嘴が伸長しているのがわかる。本計算はモデル化された地形における計算例で、この結果から定量的にモデルの適用性を検討することは困難であるが、定性的に砂嘴の発達過程を計算することが可能であることを示唆している。なお、本計算における砂嘴の伸長速度は 18 m / 月である。実際の現地では、例えば、天竜川河口部の砂嘴の伸長速度は、観測

期間によって異なるが、約 10 ~ 20 m/月である (宇多ら, 1994)。実際の波浪, 流量, 底質, 地形などの条件とは異なるが, 概ね現地の傾向を現すことが可能であると考えられる。

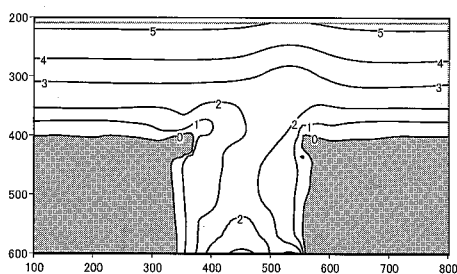


図-13(a) 河口砂州計算結果 (50日後)

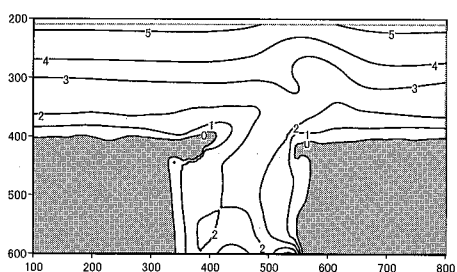


図-13(b) 河口砂州計算結果 (100日後)

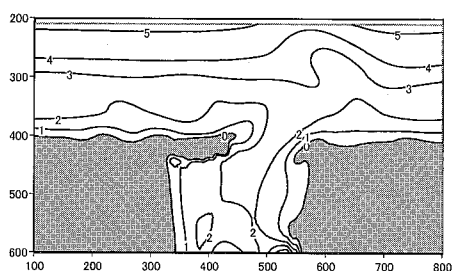


図-13(c) 河口砂州計算結果 (150日後)

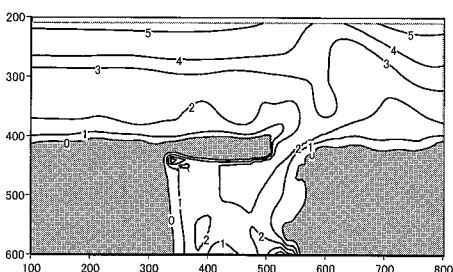


図-13(d) 河口砂州計算結果 (250日後)

5. おわりに

本研究では, 準 3 次元海浜流モデルに基づく河口砂州形成に関する 3 次元海浜変形モデルを構築した。比較的簡単なモデルであるが, 河口における砂州の形成, 河口テラスなどの海浜変形が計算できることが確認され, その結果は既往の砂州形成パターンとほぼ同じ傾向を示すことがわかった。しかしながら, 実験結果や現地データの詳細な比較を行っておらず, 定性的な結果を示しただけである。今後の課題として, 模型実験あるいは実際の現地への適用を試み, モデルの再構築を行う必要がある。

最後に, 波浪場の計算には, 間瀬ら (1999) のモデルを使用させていただいた。また, 不等間隔格子の導入にあたりプログラミングに協力していただいた岡山市山田哲史氏 (当時, 大学院博士前期課程学生) に感謝の意を表す。

参考文献

- 佐藤勝弘・首藤信夫(1992): 洪水による河口砂州崩壊過程の数値計算, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 396-400.
- 宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本雅彦・大谷靖郎(1994): 天竜川河口砂州の伸長に伴う河岸侵食と海浜変形, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 596-600.
- 宇多高明・松田英明・山形 宙(1996): 全国 17 河川のデータによる河口砂州形状のタイプ分類, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 596-600.
- 宇多高明・清田雄司・前川隆海・古池 鋼・芹沢真澄・三波俊郎(2005): 等深線変化モデルによる河口砂州の変形の再現と予測, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 576-580.
- 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・口石孝幸・松原雄平(2006): 平面 2 次元と準 3 次元海浜流モデルによるハイブリッド型 3 次元海浜変形予測システム, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 486-490.
- 黒岩正光・口石孝幸・松原雄平(2007): 河口周辺の 3 次元海浜変形数値シミュレーションに関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 23, pp. 1177-1182.
- 細山田得三・張瑞瑾・星野雄亮(2005): 河口砂州の生成に及ぼす河川水と海岸波動の影響に関する基礎的数値実験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 561-565.
- 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.
- 樫木 亨・李宗燮・出口一郎(1984): 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 411-415.
- 樫木 亨(1991): 波と漂砂と構造物, 技報堂出版, 482p.
- 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, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 571-580.
- 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, 土木学会論文集, 第 417 号, II-13, pp. 285-288.
- 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.