

# 不規則波モデルの違いによる人工島背後海浜流の再現性比較

池野正明\* ・鹿島遼一\*\* ・定森良夫\*\*\*  
 清水琢三\*\*\*\* ・嶋飼亮行\*\*\*\* ・窪 泰浩\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

沖合い人工島式発電所を建設した場合にその背後海域の海底地形変化を引き起こす外力となり得る海浜流場の特性を適切に予測できる手法の開発が必要である。広範囲の海域を対象に海浜流を計算する手法としては、平均流に関する水平2次元のモデル方程式を解く方法が一般的であり現地への適用実績も高い。この場合、沖合いでは多方向不規則波としての性質が強くなるため、運動方程式に取り込まれる radiation stress 項を適切にモデル化する必要がある。最近では不規則波の radiation stress 項のモデル化が幾つか試みられている。しかしながら、radiation stress 項のモデル化の違いや、モデル化は同じでも radiation stress を算定する際の波浪場計算法の違いが海浜流場の計算結果へ及ぼす影響を十分検討しておく必要がある。

本研究は、複数の不規則波浪場計算法を用いて得られた radiation stress を後述する3種類の方法でモデル化して算定した場合の空間分布特性やそれを入力した場合に得られる海浜流場の特性を、多方向不規則波を用いた人工島背後の海浜流実験（池野ほか，1993）との比較により詳細に検討したものである。ついで、砕波による戻り流れの実用的な評価方法についても検討している。

## 2. 海浜流の計算法

### (1) 計算手法の概要

本研究では、丸山（1987）と同様の方法により radiation stress の勾配に比例する外力により起流力が発生すると考え、底面摩擦項と水平拡散項を考慮して水平2次元の運動方程式と連続式により海浜流場を計算する。収束計算を効率的に実施するために最近開発された西村・包（1993）の方法も援用して収束性の判断の目安にした。この際、底面摩擦係数  $C_f$  と水平拡散係数  $\epsilon$  を入力パラメータとして適切に設定する必要がある。本研究では、

田中・Thu（1993）による滑面乱流・層流の場合の波・流れ共存場の抵抗則を参考にして、底面摩擦係数  $C_f$  を 0.01 とした。また、人工島背後の比較的速い循環流を再現するため、離岸距離と水深が同じでも人工島背後の回折領域では入射波通過領域よりも水平拡散係数  $\epsilon$  の値がより小さくなるように  $\epsilon = Nl(gh)^{1/2} H_{1/3} / (0.4h)$  として取り扱った。ここに、 $h$  は水深、 $g$  は重力加速度、 $l$  は離岸距離、 $H_{1/3}$  は有義波高、 $N$  は無次元パラメータで 0.01 と設定した。なお、計算時の空間格子間隔は 20 cm、時間刻み間隔は 0.1 s、収束計算回数は 6000 回である。

### (2) 不規則波の radiation stress 項のモデル化方法

不規則波を対象とした海浜流場の計算では、水平2次元の運動方程式中に含まれる radiation stress 項に不規則性の影響を考慮する必要がある。そこで、本研究では、以下に示す3種類の方法で radiation stress 項をモデル化することにより、不規則波による radiation stress の空間分布特性やこれを水平2次元の運動方程式に取り込んだ際の海浜流場の特性を比較検討することにする。

① 不規則波の水位  $\eta$  や流速  $u, v, w$  の時系列から定義に従って式(1)により計算する方法（窪ほか，1992）。

$$S_{xx} = \rho \int_{-h}^0 \overline{u^2} dz + S_0 \dots \dots \dots (1.a)$$

$$S_{yy} = \rho \int_{-h}^0 \overline{v^2} dz + S_0 \dots \dots \dots (1.b)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho \int_{-h}^0 \overline{uv} dz \dots \dots \dots (1.c)$$

$$S_0 = \frac{1}{2} \rho g \overline{\eta^2} - \rho \int_{-h}^0 \overline{w^2} dz \dots \dots \dots (1.d)$$

ここに、 $S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}$  は radiation stress の3成分、 $\rho$  は水の密度である。

② 波浪場計算により得られた方向スペクトル  $S(f, \theta)$  の空間分布特性を考慮して式(2)により周波数・波向き成分毎にエネルギー合成する方法（Yamaguchi, 1988）。

ここに、 $n$  は成分波の群速度と波速の比である。

$$S_{xx} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho g (n \cos^2 \theta + (n-1/2)) S(f, \theta) d\theta df \dots \dots \dots (2.a)$$

\* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部  
 \*\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 参事  
 \*\*\* 正会員 (株)開発計算センター 科学システム事業部  
 \*\*\*\* 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部  
 \*\*\*\*\* 東京電力株式会社 原子力建設部

$$S_{yy} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho g \{ n \sin^2 \theta + (n-1/2) \} S(f, \theta) d\theta df \dots\dots\dots (2.b)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho g n \cos \theta \sin \theta S(f, \theta) d\theta df \dots\dots\dots (2.c)$$

③ radiation stress を不規則波浪場計算によるエネルギー平均波高, 有義波周期, 主波向きを用いて式(2)中の2重積分を省略し  $S(f, \theta)$  を  $H^2/8$  に置き換えて等価な規則波に換算する簡便法(清水ほか, 1992).

なお, radiation stress は不規則波浪場計算により算定する必要がある。本研究では, 時間領域での計算により解が不規則変動時系列として得られる非定常緩勾配不規則波動方程式(小竹ほか(1992)が断面1次元波浪場を対象として開発した2次近似モデルを平面2次元波浪場へ拡張したモデル)を対象に上記①の方法を適用した。これに対し, 周波数領域での計算により解が周波数・波向き毎に得られる, 磯部(1986)による放物型波動方程式を応用し人工島背後の両端からの各々の回折波に対する波向線座標を用いて別々に計算しエネルギー合成した結果に碎波を考慮する方法(土木学会, 1993)およびエネルギー平衡方程式に碎波減衰を考慮した方法(清水ほか, 1992)の2種類を対象に上記②と③の方法を適用し比較検討した。3種類の波浪場計算法に対する計算条件や計算結果の詳細は別の文献(池野ほか, 1994)に譲る。

### 3. radiation stress の人工島背後の空間分布特性

ここでは, 紙面の都合上沖波波形勾配  $H_o/L_o$  が 0.03 の多方向不規則波を対象として, 人工島背後の radiation stress の空間分布特性を議論する。図-1 は多方向不規則波の場合の人工島背後の radiation stress の空間分布を実験と計算とで比較したものである。池野ほか(1993)の報告によると, 規則波, 単一, 多方向不規則波とも, 人工島背後の海浜流(循環流)の鉛直分布の実験結果はほぼ一様となっていたことから, 海底面上 2 cm の高さで測定した流速が鉛直方向にほぼ一様であると仮定し, 水位と水平流速の波動成分から上記①の方法で radiation stress の実験値を算出した。この際実験では流速の鉛直方向成分は計測していないため, 窪ほか(1992)と同様に水位変動にピーク周波数における伝達関数を乗じて流速の鉛直方向成分に換算して代用した。

図(a)は上記①の方法で算出した radiation stress の実験結果であり, 図(b)は, 非定常緩勾配不規則波動方程式について上記①の方法で算出した計算結果である。ただし, 計算手法の解法上陽的に得られるのは水位変動であるため, これにピーク周波数における伝達関数を乗じて

流速値に換算して radiation stress を計算している(窪ら, 1992)。図(c)(d)は, 放物型波動方程式について, 上記②および③の方法で算定した結果である。図(e)(f)は, エネルギー平衡方程式について, 上記②および③の方法で算定した結果である。

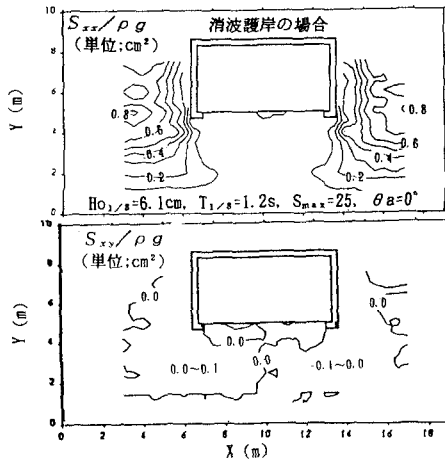
まず実験結果と非定常緩勾配不規則波動方程式による計算結果とを比較すると,  $S_{xx}$  の値に対する両者の対応は概ね良好である。 $S_{xy}$  の値は他の成分に比べて小さいため直接的な比較がむずかしいが実験値と計算値のオーダーの対応は概ね良好である。これに対し紙面の都合上図面は省略するが  $S_{yy}$  の値を比較したところ, その空間分布の定性的な傾向は再現しているものの, 計算値は実験値を過大評価していた。これは, 測定した流速データが厳密には碎波による運動量輸送分を含んでいることに起因していると推定される。つぎに, 放物型方程式による計算結果に基づく上記②および③の方法による算定結果を比較すると, 上記②の方法による計算値は  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$  とも上記③の簡便法による計算値の 7~8 割程度となっている。これに対し, エネルギー平衡方程式による計算結果に基づく上記②および③の方法による算定結果を比較すると, 上記②の方法による計算値は, 空間分布全域にわたって  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$  とも, 上記③の簡便法による計算値の 8~9 割程度となっている。ただし, 放物型方程式, エネルギー平衡方程式の両者とも, ②の方法による計算値が①の方法で求めた非定常緩勾配不規則波動方程式による計算値に必ずしもより近い結果となっていない。これは方向スペクトルの推定精度の影響が現れているためであると考えられる(池野ほか, 1994)。

以上の5種類の計算結果を比較すると, 概して人工島の沖側と側面領域では計算結果に差異が生じているが, 人工島の背後領域における  $S_{xx}$  の値では, 計算結果に顕著な差は生じていない。これに対し人工島の背後領域における  $S_{xy}$  の値では, 計算結果に顕著な差異が生じている。以降では, これらの radiation stress を用いて計算した海浜流特性を比較する。

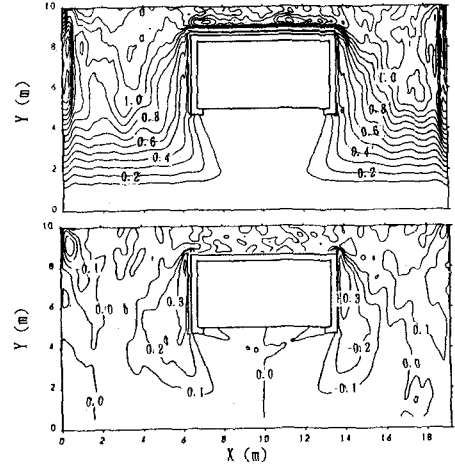
### 4. 人工島背後の海浜流の平面分布特性

#### (1) radiation stress のモデル化の違いによる影響

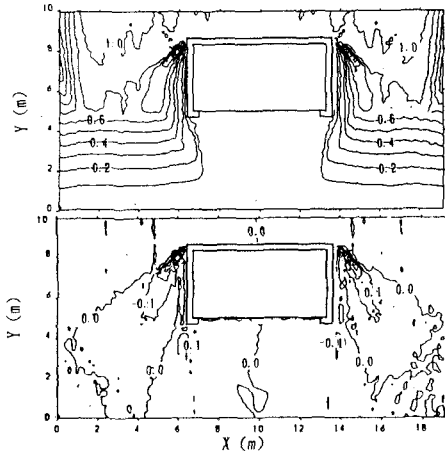
ここでは, 紙面の都合上  $H_o/L_o$  が 0.03 の多方向不規則波を対象として, 人工島背後の海浜流の平面分布の特性を議論する。図-2 は人工島の沖側と側面が直立護岸の場合である。図では, 非定常緩勾配不規則波動方程式, 放物型波動方程式, エネルギー平衡方程式による計算結果および実験結果を比較している。ただし, 海浜流場の計算への radiation stress 項の取り込みには, 放物型波動方程式とエネルギー平衡方程式については②および③, 非定常緩勾配不規則波動方程式については①の方法を用



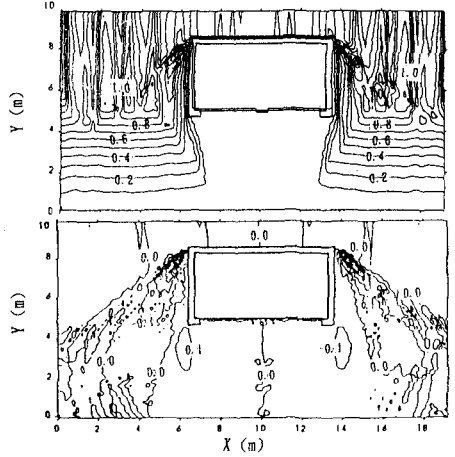
(a) 実験結果 (①の方法)



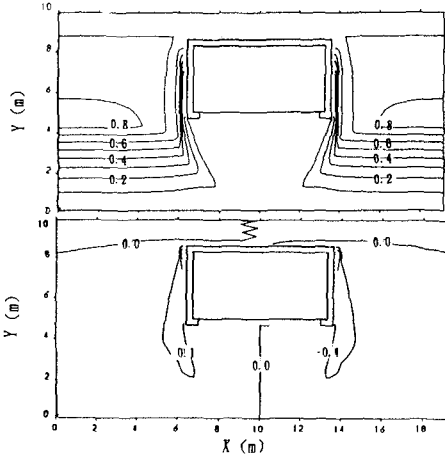
(b) ①の方法 (非定常緩勾配不規則波動方程式)



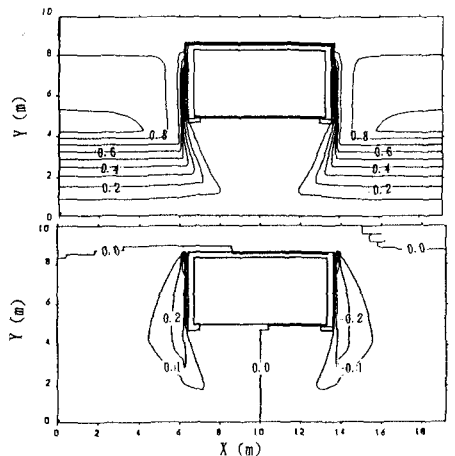
(c) ②の方法 (放物型波動方程式)



(d) ③の方法 (放物型波動方程式)



(e) ②の方法 (エネルギー平衡方程式)



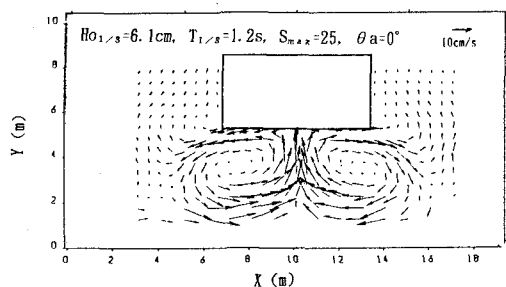
(f) ③の方法 (エネルギー平衡方程式)

上段:  $S_{xx}/\rho g$   
 下段:  $S_{xy}/\rho g$   
 (単位:  $\text{cm}^2$ )

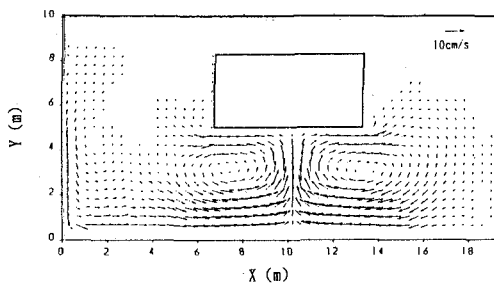
図-1 人工島背後の radiation stress の空間分布 (多方向不規則波)

いている。図-3は人工島の沖側と側面が消波護岸の場合であり、紙面の都合上計算結果は非定常緩勾配不規則波動方程式のみを載せている。図の実験結果と計算結果とを比較すると、人工島背後に生じる2つの対称な循環流の中心位置、循環流の規模、人工島背後の隅角部に消

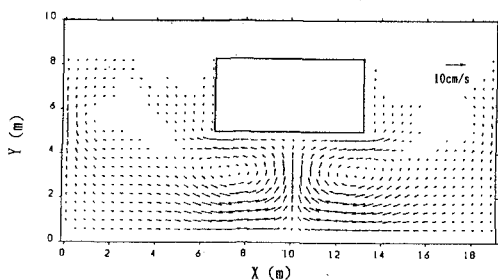
波ブロックを巻き込むことにより生じる循環流のひずみ具合等を概ね再現している。また、人工島背後の岸沖断面における沿岸流量および沿岸断面における岸沖流量の積分値に対する計算値と実験値との対応は良好であった。ただし、計算結果は、実験結果に見られるように、



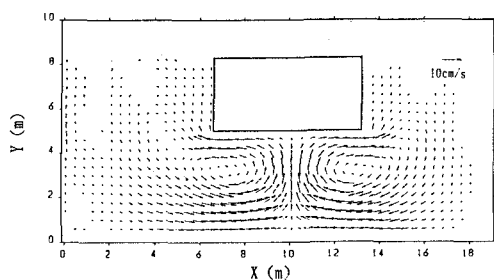
(a) 実験結果



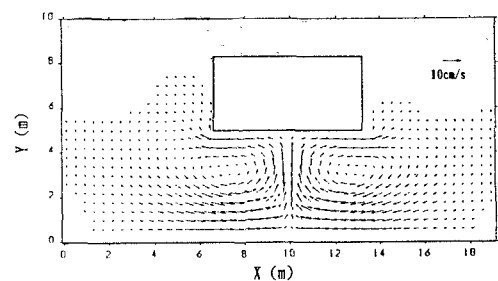
(b) ①の方法 (非定常緩勾配不規則波動方程式)



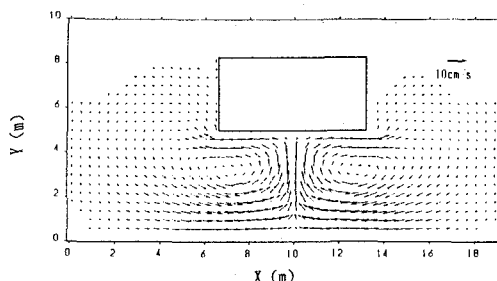
(c) ②の方法 (放物型波動方程式)



(d) ③の方法 (放物型波動方程式)

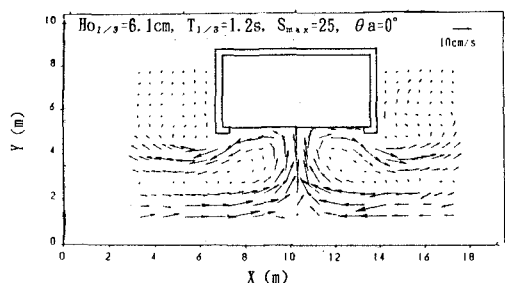


(e) ②の方法 (エネルギー平衡方程式)

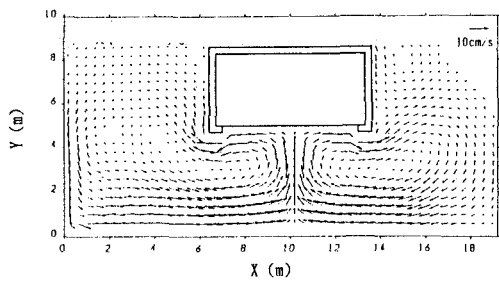


(f) ③の方法 (エネルギー平衡方程式)

図-2 直立護岸の人工島背後の海浜流の平面分布 (多方向不規則波)



(a) 実験結果



(b) ①の方法 (非定常緩勾配不規則波動方程式)

図-3 消波護岸の人工島背後の海浜流の平面分布 (多方向不規則波)

循環流の円周付近での速い流れを明確に再現できず、循環流内外で比較的強弱のない流れとなっている。底面摩擦係数  $C_f$  と水平拡散係数  $\varepsilon$  を既往の算定式(例えば、海岸環境工学, 1985)も参考にして試算したところ、前述の設定法以上の再現性は見られなかった。現状の海浜流計算法による再現性の限界であろう。つぎに、放物型波動方程式とエネルギー平衡方程式を用いた②と③の方法による計算結果を比較すると、radiation stress の空間分布にある程度の違いが生じていたにも係わらず循環流パターンに顕著な差異は認められない。非定常緩勾配不規則波動方程式による計算結果と比較してもやはり顕著な差異は認められない。この程度の radiation stress の勾配値の違いでは、海浜流の計算結果に有意な差は生じにくいと判断できる。

## (2) 砕波による戻り流れを考慮した海浜流の特性

砕波帯内における海底地形変化を精度よく予測するためには、砕波による戻り流れの推算が不可欠である。本研究では、Dibajnia ほか (1993) の実用的な評価方法を取りあげ戻り流れの評価を試みる。Dibajnia ほか(1993)は現地データを整理した結果、戻り流れの流速  $U_b$  を surf similarity パラメーター  $\xi_0 (= \tan \beta / (H_0/L_0)^{1/2})$  および波高  $H$ 、周期  $T$ 、水深  $h$  の関数として表わし式(3)のように定式化している。ここに、 $H_0/L_0$  は沖波波形勾配、 $\tan \beta$  は海底勾配である。また、 $E$  は浅水変形後に非砕波の波のエネルギー、 $E'$  は砕波せずに浅水変形した場合の仮想の波の全エネルギーである。

$$U_b = -22H_{1/3}^2 / (hT_{1/3}) \xi_0 (1 - E/E') \dots \dots \dots (3)$$

上記評価式を用いて海浜流場の計算結果に砕波による戻り流れの効果を考慮する方法を試みる。図-4は、上記評価法による戻り流れの平面分布と図-2の非定常緩勾配不規則波動方程式による直立護岸の人工島背後の海浜流の計算結果とをベクトル合成した結果と実験値を代表測線で比較したものである。ただし、波浪場の計算により求めた主波向きに対して逆方向に戻り流れを考慮して計算している。図-4によると、循環流が支配的となる人工島背後遮蔽域では両計算結果に顕著な違いは認められないが、それ以外の領域では再現性が向上している。

## 5. おわりに

以上、radiation stress のモデル化に主眼を置き、種々の検討を行った結果、モデル化の違いにより radiation stress の空間分布に違いが生じているにも係わらず海浜流の計算結果に顕著な差異は認められなかった。また、砕波による戻り流れの影響は循環流が支配的となる人工島背後遮蔽域では比較的小さいと判断できる。

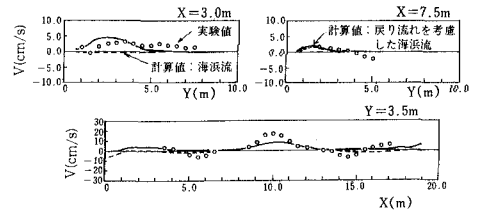


図-4 砕波による戻り流れを考慮した海浜流の断面分布(非定常緩勾配不規則波動方程式)

本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものであり、土木学会原子力土木委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授)、同耐波浪設計WG(主査 西村仁嗣筑波大学教授)の各位には多くの有益な御助言を賜りました。また、数値計算を実施するにあたり、西村仁嗣筑波大学教授には懇切丁寧な御教示を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 池野正明・鹿島遼一・鶴岡亮行・清水琢三・秋葉 徹・窪 泰浩 (1994): 多方向不規則波浪場計算法の人工島背後海域への適合性比較, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 121-125.
- 池野正明・鹿島遼一・松山昌史・榊山 勉・窪 泰浩 (1993): 人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 621-625.
- 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.
- 窪 泰浩・小竹康夫・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1992): 非定常緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪場・海浜流場・海浜地形変化の予測モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 201-205.
- 小竹康夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1992): 非定常緩勾配不規則波動方程式の高精度化, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 91-95.
- 清水琢三・水流正人・渡辺 晃 (1992): 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 416-420.
- 田中 仁・A. Thu (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, 2-23, 第467号, pp. 93-102.
- Dibajnia, M.・清水琢三・渡辺 晃 (1993): 現地海岸における縦断地形変化の再現, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 496-500.
- 土木学会海岸工学委員会編 (1993): 波・構造物・地盤の調査・設計手法調査研究報告書, pp. 4-117.
- 西村仁嗣・包 四林 (1993): 改良 Hardy-Cross 法による海浜流解析, 第7回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 日本数値流体力学学会, pp. 383-386.
- 堀川清司編 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, p. 110.
- 丸山康樹 (1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性, 電力中央研究所報告, 研究報告 U 87012, 35 p.
- Yamaguchi, M. (1988): A numerical model of nearshore currents due to irregular waves, Proc. 21st ICCE, pp. 1113-1125.