

# 沿岸環境予測評価に関する研究

—— 波浪・海浜流・海浜変形解析 ——

藤澤 康雄  
伊藤 雅保

Ivan Botev  
前田 孝久  
(本社 白子川JV  
工事事務所)

## 概要

我が国の沿岸域は、波浪・高潮・津波または沿岸域開発による海岸構造物の設置などにより、周辺海域の条件が大きく変わりその結果、防波堤・護岸の被災および全国的な問題となっている海岸浸食など海洋・海岸災害により甚大な被害を被っている。これら海洋・海岸災害に対する安全性の検討として、特に深海域から海岸構造物を含む浅海域に至る波浪の平面的変形を予測・解析することは、海浜流・海浜変形の評価および海岸構造物の耐波設計、配置計画にとって非常に重要である。本研究は、沿岸環境予測評価システムの一環として沿岸域における波浪変形・海浜流・海浜変形の予測・解析手法を開発した。

### 1. はじめに

沿岸開発を行う際には、海洋災害に対する安全性を考慮することが重要であることは言うまでもない。海洋災害に対する安全性とは、例えば、異常波浪に対する構造物の安定性の検討、津波・高潮などの異常潮位からの防護、海岸侵食からの防護といったことが挙げられるが、これらについて検討する場合には、海洋における水理現象を把握する必要がある。本研究は「沿岸環境予測評価システム」の一環として、主に沿岸域における波浪変形、海浜流、海浜変形について予測・解析手法の開発を行い、数値シミュレーションにより検証し、その妥当性を明らかにした。

### 2. 沿岸環境予測評価の解析手法

#### 2.1 波浪変形解析法

波浪の屈折、回折、反射、浅水変形を同時に扱える手法で代表的なものは、Berkhoff [1972] <sup>1)</sup> が提案した緩勾配方程式と呼ばれるもので、底面勾配が緩やかでその2次以上の項が無視できる仮定の下に導かれた。

$$\nabla \cdot (c c_g \nabla \phi) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $c$  及び  $c_g$  はそれぞれ波速、群速度、 $\sigma$  は角周波数、 $\phi(x,y)$  は水面振動の振幅を表す変数である。式 (1)

は  $\phi$  に関する楕円型方程式であり、計算の際には領域の境界上のすべての点において  $\phi$  及びその微分値を与える必要があり、沖側入射境界や部分反射・部分透過境界において困難を生じる。よって、数値的に扱いやすい水面変動量と、線流量を導入して式 (1) を次のように変形する。

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{1}{n} c^2 \frac{\partial}{\partial x} (n \zeta) + f_D Q_x + \frac{g f_n^2}{h^{3/2}} Q_x \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{1}{n} c^2 \frac{\partial}{\partial y} (n \zeta) + f_D Q_y + \frac{g f_n^2}{h^{3/2}} Q_y \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $Q_x, Q_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向の線流量、 $\zeta$  は水面変動量、 $f_D$  は碎波減衰係数、 $f_n$  は Manning の粗度係数で  $\hat{Q}_x, \hat{Q}_y$  はそれぞれ  $x, y$  方向線流量の振幅を表す。式 (2), (3) は運動方程式であり、第3項は碎波減衰項、第4項は海底摩擦項で、式 (4) は連続式に相当する。また、碎波減衰係数  $f_D$  は次式で表わせる。

$$f_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h} \left( \frac{\sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}}{\gamma' \sqrt{gh^3}} - 1 \right)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

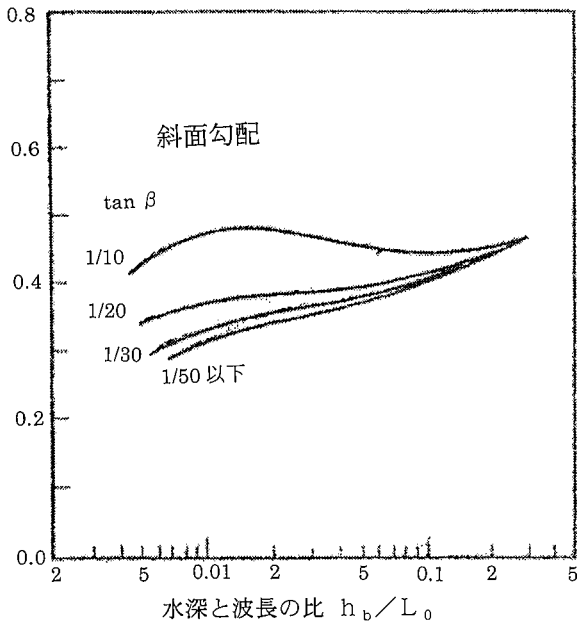


Fig. 1 流速波速比を用いた碎波指標  
Breaking Criterion Based on the Ratio of Water Particle Velocity to Wave Celerity

$\tan \beta$  は碎波線近傍の平均的な海底勾配,  $\alpha_D, \gamma'$  は無次元の係数で, 一般的には  $\alpha_D=2.5, \gamma'=0.25$  程度の値を用いる。

2.2 碎波モデル

正確な波動場を計算する場合, 碎波を考慮しなければならない。それには碎波位置の確定が重要で碎波の有無を波峰下水平流速  $U_{b0}$  と波峰伝播波速  $c'$  を計算し, その比が Fig.1 で与えられる  $U_{b0}/C_0$  と一致する点を碎波点とする。通常用いる値は,  $U_{b0}/C_0=0.35$  程度である。碎波帯外では碎波減衰項を省いたもの, 碎波帯内では碎波減衰項を考慮したものを用いて計算を行うことにより, 碎波減衰を考慮した波動場が求められる。

2.3 Radiation Stress

波動場の計算をした後, その計算結果を用いて次に海浜流を計算する場合には, その起因力となる Radiation stress を計算する必要がある。一様水深のもとで単一方向の規則波が進行する場合, Radiation stress は場所的に一様であり平均水位は静水面に一致し平均流は生じない。完全重複波の条件では Radiation stress が場所的に変化はするもののその勾配は平均水位の変化と完全に釣り合うため平均流は生じない。同様に一般の重合場においても波の重合に伴う Radiation stress の局所的变化の一部は平均水位の局所的变化と釣り合い平均流が生じない。本研究では, 重合場にも適応可能な線流量  $Q_x, Q_y$  及び水面変動量  $\zeta$  を用いて Radiation stress を次式で表す。

$$S_{xx} = \int_{-h}^{\bar{\zeta}+\zeta} (\rho u^2 + p) dz - \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$S_{yy} = \int_{-h}^{\bar{\zeta}+\zeta} (\rho v^2 + p) dz - \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_{-h}^{\bar{\zeta}+\zeta} \rho uv dz \quad \dots\dots\dots(9)$$

2.4 海浜流解析

海浜流は波の Radiation stress に起因する平均流のことであり, この流れは当然ながら水平方向のみならず鉛直方向にも分布を持っており, 時には上層と下層では逆向きの流れが生じるということもある。このような3次元的な現象を扱うことは現時点では困難であり, 平面2次元的なモデルが有効である。そこで, 平面2次元の平均流 (海浜流) を表す方程式として, 水平面内に直行座標系 (x,y) をとり, 海浜流の流速の x 及び y 成分をそれぞれ  $u, v$ , 平均水位の上昇量 (wave setup) を  $\zeta$  とすると, 海浜流に対する連続式及び運動方程式は次のようになる。

連続式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u(h+\bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{\partial v(h+\bar{\zeta})}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに,  $h$  は静水深,  $g$  は重力加速度,  $F_x, F_y$  は海底摩擦項,  $M_x, M_y$  は水平拡散項,  $R_x, R_y$  は Radiation stress 項である。

海底摩擦項

$$F_x = \frac{\tau_{bx}}{\rho h} = \frac{g}{C^2} u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$F_y = \frac{\tau_{by}}{\rho h} = \frac{g}{C^2} v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \quad \dots\dots\dots(14)$$

水平拡散項

$$M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

ここに,  $\epsilon$  は拡散係数で, 次式で表せる。

$$\epsilon = Nl \sqrt{g(h+\bar{\zeta})} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$l$  は離岸距離で, 海浜の平均勾配  $\tan \beta$  を用いて  $l = (h + \bar{\zeta}) / \tan \beta$  とする。また,  $N$  は定数で, 経験的に 0.016 以下の値をとるものとする。

2.5 海浜変形解析

波浪変形,海浜流による漂砂量をもとに海浜地形変化を予測する手法について概説する。なお,海浜変形解析は複雑なため,手法の詳細は参考文献2)を参照されたい。海浜変形解析の構成及び波・海浜流と海浜変形の関係をFig.2, Fig.3に示す。海浜変形の主因である漂砂は浅海域で発生するものが大部分である。浅海域では,波・海浜流などが複雑な場を形成しているが,このような場において何らかの方法で漂砂量を算定し,海底地形の時間的变化を見積もらなければならない。そこで,本研究では,渡辺ら[1984]<sup>3)</sup>のモデルを用いて波・流れによる漂砂量を算定し海底地形変化の予測を行う。

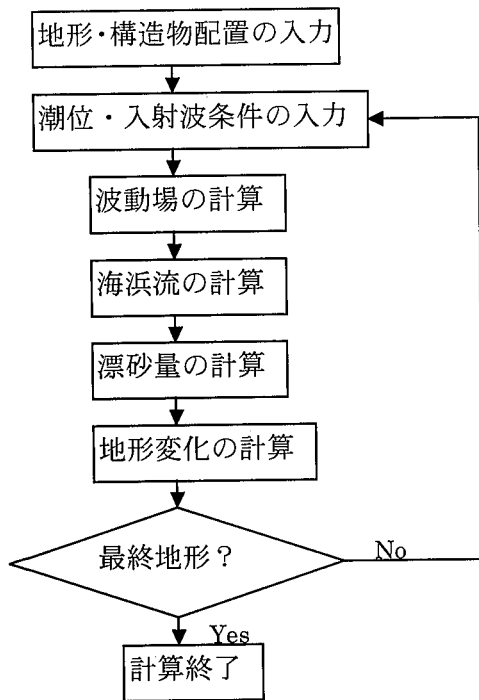


Fig. 2 海浜変形解析の構成  
Flow Chart of Coastal Processes

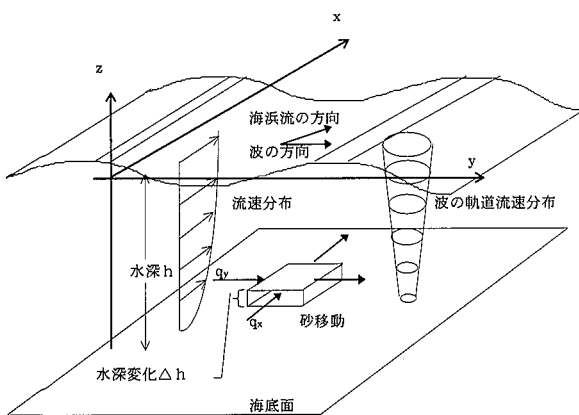


Fig. 3 波・海浜流と海浜変形の関係  
Relation of Wave, Nearshore Currents and Coastal Processes

2.5.1 漂砂量の算定手法 海浜変形を解析する上で最大の問題となるのは,漂砂量をいかにして決定するかということである。漂砂量の算定手法についてはいずれも適用範囲に何らかの仮定があり波・流れ共存場における局所的な漂砂量を正確に算定しうる手法は,未だに開発されていないのが現状である。そこで,本研究は渡辺ら [1984]<sup>3)</sup>,の波・流れ共存場における漂砂量を,波による漂砂量と流れによる漂砂量に分離することにより,単純化することを提案した。

$$(q_x, q_y) = (q_{wx}, q_{wy}) + (q_{ex}, q_{ey}) \dots\dots\dots (17)$$

上式のように,波・流れ共存場における漂砂量を線形形で表すには問題があるが,漂砂量算定式自体に検討の余地がある現状では,上式の仮定を用いて経験的に実際の現象と整合性を持たせた方が実用である。

2.5.2 底面摩擦速度 漂砂量の算定には,底面の摩擦速度及び移動限界摩擦速度を求める必要がある。まず,海底面に作用する摩擦応力の最大値  $\tau_{om}$  と境界層外縁波動流速の振幅  $\hat{u}_{cw}$  を用いて,波・流れ共存場における底面摩擦速度の関係は次式の通りである。

$$|\tau_{om}| = \rho \hat{u}_{cw}^2 = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \hat{u}_{wL}^2 \dots\dots\dots (18)$$

ここで  $\hat{u}_{wL}$  は底面軌道流速と等しいものである。次に,移動限界摩擦速度について述べる。漂砂量は底面摩擦応力の移動限界摩擦応力からの超過分に依存する。波による底質の移動限界はシールズ数  $\psi_c$  に支配されており,移動限界シールズ数は,初期移動に対して細砂(滑面)では0.07,粗砂(粗面)では0.05程度であり,全面移動に対しては細砂で0.11,粗砂で0.06程度の値をとる。一方,流れによる限界シールズ数は,波に対するよりも小さい値をとるといわれているが,ここでは同じ値を用いるものとして次式を用いる。

$$U_{*c} = \sqrt{sgd\psi_c} \dots\dots\dots (19)$$

$$\psi_c \cong 0.11 \text{ (細砂), } 0.06 \text{ (粗砂)}$$

ただし,底質が細砂か粗砂かの判定には,底質粒径  $d$  と境界層厚さの尺度  $\delta_L = \sqrt{\nu T/\pi}$  ( $\nu$  は動粘性係数,  $T$  は周期) の比を用いて次式により行う。

$$\frac{d}{\delta_L} < \frac{1}{6.5} \text{ (細砂), } \frac{d}{\delta_L} > \frac{1}{4} \text{ (粗砂) } \dots\dots\dots (20)$$

この式により底質が細砂と粗砂の遷移領域にあると判断されたときには,限界シールズ数を0.06と0.11の中間の値を内挿計算する。また,砕波帯内のように強い乱れが生じ底質の移動が活発な領域において上記のような方法を用いるには多少の問題が生じる。そこで,次のようなモデル化を行い最終的に砕波帯内,砕波帯外における移動限界摩擦速度を最終的に定める。

砕波帯内：  $U_{*c} = 0$

$$\text{砕波帯外： } U_{*c} = \sqrt{sgd\psi_c} \tanh\left(\frac{\kappa_c X_B}{X_B}\right) \dots\dots\dots (21)$$

ただし、 $X_B$  は砕波帯幅、 $\chi_B$  は砕波点より沖向きにとつた距離である。 $\kappa_c$  は無次元係数で1のオーダーの値をとる。

2.5.3 海底地形変化の計算法 波、流れに対する漂砂量を基に海底地形の変化を求めるには、次の底質に関する質量保存式を用いればよい。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 $Z_b$  は任意の高さを基準にした底面高、 $h$  は静水深である実際の海底地形を考えた場合、漂砂量は海底勾配の影響を受けるものと思われる。そこで、式 (22) の代わりに次式を用いることとする。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial Z_b}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (23)$$

$\varepsilon_s$  は海底勾配影響の係数で、経験的に定める必要があるが、渡辺ら [1984] <sup>3)</sup> の計算によると約10程度の値が妥当としている。

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1 波浪変形解析結果

Fig.4 に示すような離岸堤周辺の波動場解析を行い、解析法の妥当性を検討した。

本解析は、清水ら [1983] <sup>4)</sup> が行った水理実験と同じ条件で周期  $T=0.87$  秒、入射波高  $H=4.5$  cm である。離岸堤は、幅 150 cm、高さ 50 cm で、汀線から 1.8 m の位置に設置されている。また、離岸堤の前には  $Kr=0.45$  反射吸収帯を設けている。また、解析に用いる主な計算条件は Table 1 の通りである。はじめに、砕波帯を決定するための計算を行う必要がある。Fig.5, Fig.6 は、本解析法による計算結果及び渡辺らによる計算結果である。離岸堤周辺の波高分布は、離岸堤背後の回折波、砕波点以浅の領域における減衰が再現されている様子が分かる。

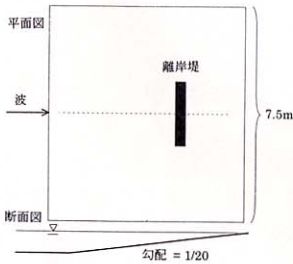


Fig. 4 解析領域 Analytical Area

Table 1 解析条件 Analytical Condition

項目	内容
格子数	70 X 150
格子長	5 cm
時間刻み	周期 / 20
計算ステップ	200
波高	0.45 m
周期	0.87 s
波向き	90°
砕波帯付近の海底勾配	1 / 20
砕波限界	$U_{bc0} / C' = 0.35$
$\alpha_D$	2.5
$\gamma'$	0.25
最低水深	5 mm

#### 3.2 海浜流解析結果

海浜流解析を行うに当たっては、前述したようにあらかじめ波動場の計算が終了している必要がある。ここでは、3.1の波浪変形解析結果を利用して離岸堤周辺の海浜流を計算した例を示す。

渡辺ら [1984] <sup>3)</sup> の結果と、本解析法により計算された結果を示す。渡辺らの計算結果 (Fig.7) では、離岸堤の背

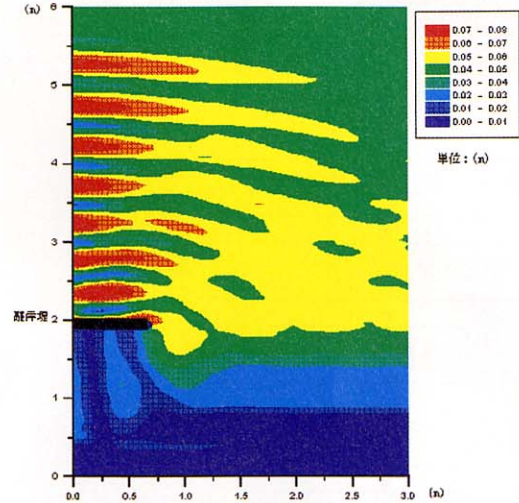


Fig. 5 波高分布 (本解析法による計算結果) Calculated Wave Height Distribution

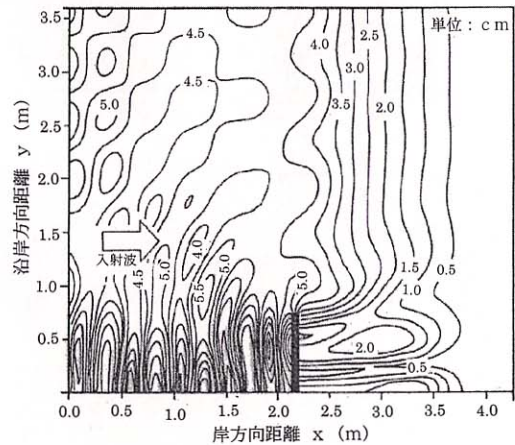


Fig. 6 波高分布 (渡辺ら [1984] の計算結果) Wave Height Distribution (Watanabe et al., 1984)

Table 2 解析条件 Analytical Condition

項目	CASE1	CASE2
格子数	70 X 150	70 X 150
格子長	5 cm	5 cm
時間刻み	0.003 s	0.003 s
$\theta$ (式(2.2.2)第1項の係数)	1.0	1.0
拡散係数(式(2.2.1)中のN)	0.016	0.003
計算ステップ	20000	20000
最低水深	1.5 cm	1.5 cm
左側側方境界上の流速値	一様流	一様流

後において最大流速が22.6cm/sとなっているが、解析結果はCASEにより異なり、CASE1 (Fig.8) では最大8.7cm/s, CASE2 (Fig.9) では最大20cm/sとなっており、解析結果に違いが見られる。

この原因としては、運動方程式 (2), (3) 中の水平拡散項の影響と考えられ、この項に含まれるN (拡散係数式に含まれる係数、経験的に0.016を用いている) 次第で、結果が大きく異なる場合がある。

この係数の定義は、いまだに試案の域を出ていないのが現状であり、決定する際には、様々な係数を用いて計算を行い、適宜良好な結果が得られるものを選定する必要がある。また、運動方程式を離散化した際に時間微分項に含まれる係数 $\theta$ は、ある格子上の流速値を周辺4つの格子に分散させるもので、これも拡散項と類似の効果をもたらす。一般的には、 $\theta$ は0.95~1.0の値を用いればよいといわれている。

### 3.3 海浜変形解析結果

離岸堤周辺の海浜変形解析結果を示す。用いた領域は、領域の対称性を考慮してFig.4の上側半分を用いた。また、漂砂量を求める際に必要となる波動流速振幅、波向き、海浜流速などは、上記の解析結果をそのまま用いることにする。

解析条件はTable 3の通りである。Fig. 10に渡辺ら[1984]の計算結果及び実験結果、Fig. 11に本解析法による解析結果を示す。一般に離岸堤背後には、波、流れなどの影響が少なく静穏となっていることと、回折波及び循環流の影響もあってトンボロが形成される。実験及び計算結果には、このような定性的な現象が再現されている。Fig. 12に渡辺らの計算結果の断面図を、Fig. 13に本解析の断面図を示す。渡辺らの結果と本解析結果は、両者ともにほぼ現象を再現している。

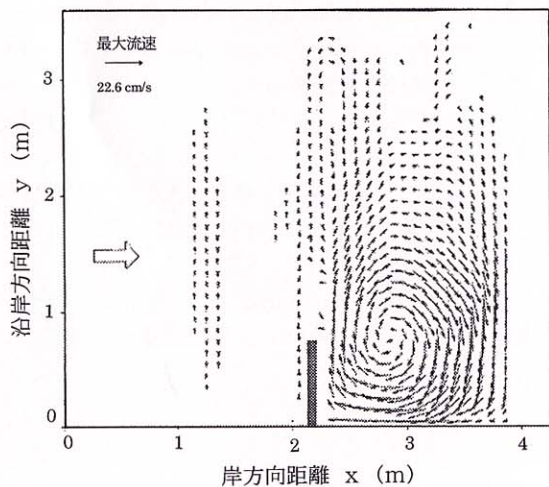


Fig. 7 海浜流計算結果 (渡辺ら [1984])  
Result of Nearshore Currents (Watanabe et al., 1984)

## 4. まとめ

海洋・海岸災害に対する安全性の検討を目的として、沿岸環境予測評価システムの一環となす波浪変形、海浜流および海浜変形の予測・解析手法を開発した。各予測・解析法の妥当性を明らかにするため、既存研究結果と本解析結果を比較し、十分な精度で実用的に活用できることを確認した。

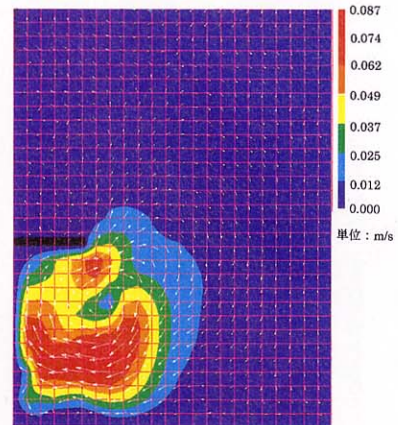


Fig. 8 海浜流計算結果 (CASE 1)  
Result of Calculated Nearshore Currents

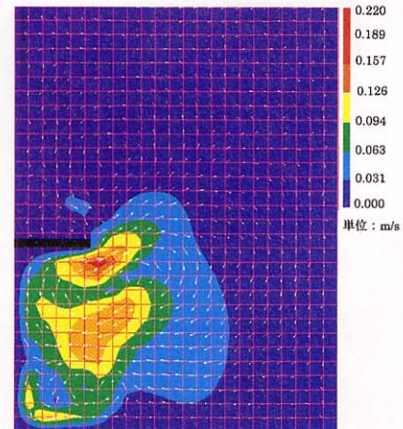


Fig. 9 海浜流計算結果 (CASE 2)  
Result of Calculated Nearshore Currents

Table 3 解析条件  
Analytical Condition

項目	内容	備考
格子数	70 X 150	
格子長	5cm	
時間刻み	1.0	
計算ステップ	900	
$\epsilon_s$	30.0	海底勾配影響係数
$k_s$	0.0002	相当粗度
$A_c$	0.1	
$A_w$	0.05	
$k_d$	2.0	
$k_c$	2.0	
$\Pi_c$	0.16	

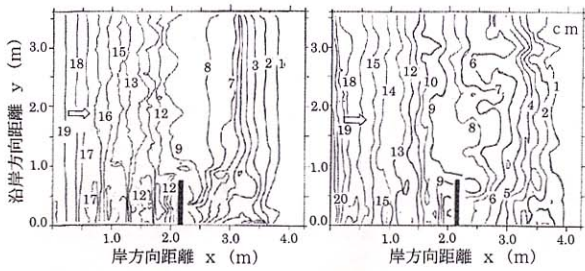


Fig. 10 実験結果及び計算結果 (渡辺ら [1984])  
Results of Experiment and Calculation (Watanabe et al., 1984)

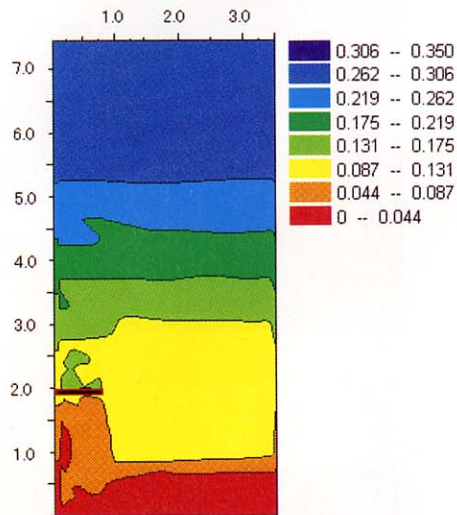


Fig. 11 2時間30分後の地形 (本システム)  
Calculated Beach Topography after 2hr. 30min

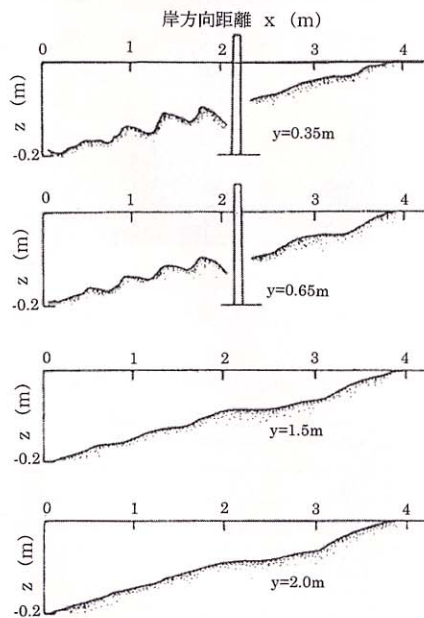


Fig. 12 断面地形 (渡辺らの計算値)  
Cross Section of Beach Topography (Watanabe, et al.)

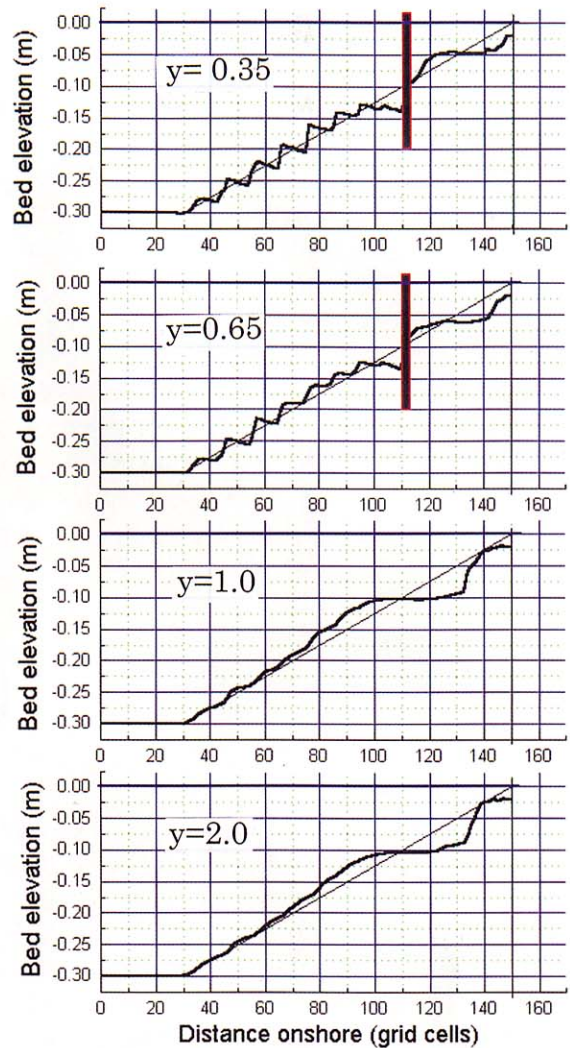


Fig. 13 断面地形 (本解析法による計算値)  
Calculated Beach Topography

参考文献

- 1) Berkhoff, J.C.W.: Computation of combined refraction - diffraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., p.471 ~ 490.
- 2) 藤澤, 前田, 他: 沿岸環境予測システム - 波浪・海浜流・海浜変形解析について -, (株) 大林組技術研究所報告書, (1996.3)
- 3) 渡辺, 丸山: 屈折・回折・碎波減衰を含む波動場の数値計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, (1984)
- 4) 清水, 三村, 他: 波浪・海浜流共存場における海浜変形と漂砂モデル, 第30回海岸工学講演会論文集, 土木学会, (1983)