

浮遊砂の移流拡散を考慮した海岸構造物周辺の 地形変化予測に関する研究

STUDY OF 3-D BEACH DEFORMATION AROUND COASTAL STRUCTURES CONSIDERING ADVECTION-DIFFUSION OF SUSPENDED SEDIMENT

泉 正寿¹・泉宮尊司²
Masatoshi IZUMI, Takashi IZUMIYA

¹正会員 工博 国際航業株式会社 防災海洋部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地)

A 3-D beach deformation model considering advection-diffusion of suspended sediment has been developed to evaluate the beach topographic changes around a coastal structure. This model includes the sediment transport rate formula under the coexistence of waves and currents, considering the effect of bottom slope and undertow on the sediment transport rate. In the case of a longshore uniform beach, this model has a solution that topographic changes are affected clearly by the grain size and are influenced widespread by the coastal structures.

This model can evaluate topographic changes in terms of grain sizes, and can be available in evaluating total longshore sediment discharge including the effect of tidal and drift currents.

Key Words : 3-D beach deformation, advection-diffusion, suspended sediment, longshore sediment transport, on-offshore sediment transport

1. はじめに

流砂系を考慮した土砂管理を行うためには、土砂収支を正確に評価した上で適切な対策を講じる必要がある。深浅測量成果による地形変化から土砂収支を評価する場合は、沿岸方向の土砂の流出入および沖合い損失量の境界条件を正確に見積もらなければならない。しかしながら、これらの境界条件は、直接測定することが難しく、評価することが困難な場合が殆どである。そのため、底面摩擦応力と砂粒子の沈降速度等から平面的に漂砂量ベクトルを算定する漂砂量算定式を泉ほか¹⁾が提案している。この漂砂量算定式は、戻り流れや海浜勾配の効果が取り入れられ、吹送流等の影響も考慮できるものである。しかしながら、砂面計、濁度計および流速計等の現地データからは、荒天時に底質が巻き上がり流れに乗って浮遊状態で輸送される現象が観測されており(田村ほか^{2) 3)}、また、泉宮ほか⁴⁾のADCP観測によると、波高1m程度の海象条件で、波浪に対応した浮遊砂が地形変化の限界水深を超える水深約10mの海域で観測されている。これらのことから、泉ほか¹⁾の漂砂量算定式に、浮遊砂の移流拡散効果を取り

入れ、海岸構造物によって波浪および流れの場が大きく変化する海岸構造物周辺の地形変化を評価できるモデルを開発することを研究目的とする。

2. 浮遊砂の移流拡散を考慮した地形変化モデルの特徴

(1) 基礎式

浮遊砂の移流拡散を取り扱った地形変化モデルには、樫木ほか⁵⁾によるフラックスモデルと灘岡ほか⁶⁾によるモデル等がある。これらのモデルは、漂砂量と水深変化の関係式(1)と、浮遊砂の移流拡散式(2)からなっており、水深の変化は、掃流砂量(q_{bx} , q_{by})の収支と底質の浮上と沈降のフラックスの差 Q_s (鉛直方向漂砂量フラックス) で求められ、浮上した底質は移流拡散沈降するとしたものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[-Q_s + \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial(Q_x\bar{C})}{\partial x} + \frac{\partial(Q_y\bar{C})}{\partial y} + \bar{C}w_f = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x h \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y h \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}\right) + F_z \quad (2)$$

ここに、 x, y ：沖から岸へ向かう方向を x 軸の正とする直交座標、 t ：時間、 h ：水深、 λ ：空隙率、 $Q_x, Q_y, \varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ線流量成分（平均流速×水深）、 x および y 方向の渦拡散係数、 $\bar{C}$ ：上層平均浮遊砂濃度、 w_f ：沈降速度、 F_z ：巻き上げ量である。

沈降のフラックスを樫木ほか⁵⁾は上層平均浮遊砂濃度から求めているのに対し、灘岡ほか⁶⁾は、底面浮遊砂濃度を簡易に求める方法を提案し、底面浮遊砂濃度から求めている。本論文では、フラックスモデルの考え方を取り入れるため、底面における砂の浮上と沈降のフラックスの差 Q_s は、樫木ほか⁵⁾による巻き上げは底面摩擦速度が砂の沈降速度以上の場合に生じるとし、巻き上げ量 F_z は移動床実験より得られた浮遊砂基準面濃度を用いて表し、沈降量は上層平均浮遊砂濃度と沈降速度の積で評価する。

$$Q_s = -F_z + \bar{C} \cdot w_f \quad (3)$$

$$F_z = (1 - \gamma)C_o w_o a \left(\frac{u_*}{w_o} - 1 \right) \quad (4)$$

ここで、 F_z ：巻き上げ量、 $\bar{C}$ ：上層平均浮遊砂濃度、 C_o ：浮遊砂基準面濃度、 a ： $0 < a < 1$ の定数である。浮遊砂基準面濃度 C_o は移動床実験より得られた次式を用いる。

$$C_o = 0.347 N_c^{1.77} \quad (5)$$

$$N_c = \frac{0.688 u_o^2}{1.13(\rho_s / \rho - 1) g w_o T} \quad (6)$$

ここで、 u_o は底面流速の最大値、 T は波の周期である。

掃流砂量 (q_{bx}, q_{by}) は、泉ほか¹⁾による式 (7) から (12) に示す波流れ共存場の摩擦速度 u_* と砂粒子の沈降速度 w_o との比をパラメータとし、エネルギー逸散を考慮した戻り流れの効果と海浜勾配の影響を取り入れた漂砂量ベクトル算定式を用いた。

$$q_x = K \frac{w_o}{(\rho_s - \rho)g} \left\{ \left(\frac{u_*}{w_o} \right)^\alpha - \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \right)^\alpha \left(\frac{u_{*c}}{w_o} \right)^\alpha \right\} \frac{(\tau_{bx} + \tau_{rx})}{1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x}} \quad (7)$$

$$q_y = K \frac{w_o}{(\rho_s - \rho)g} \left\{ \left(\frac{u_*}{w_o} \right)^\alpha - \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \right)^\alpha \left(\frac{u_{*c}}{w_o} \right)^\alpha \right\} \frac{(\tau_{by} + \tau_{ry})}{1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial y}} \quad (8)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\partial}{\partial x} [\rho(h + \bar{\zeta}) U^2] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho(h + \bar{\zeta}) UV] + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \rho g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} \quad (9)$$

$$\tau_{by} = \frac{\partial}{\partial x} [\rho(h + \bar{\zeta}) UV] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho(h + \bar{\zeta}) V^2] + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \rho g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} \quad (10)$$

$$\tau_{rx} = -\rho f_r \varepsilon_d^{2/3} d^{2/3} \cos \theta \quad (11)$$

$$\tau_{ry} = -\rho f_r \varepsilon_d^{2/3} d^{2/3} \sin \theta \quad (12)$$

ここで、 $\rho_s, \rho, g, h, u_{*c}$ はそれぞれ土粒子密度、海水密度、重力加速度、水位および移動限界摩擦速度、 $(U, V), d, \theta, \bar{\zeta}$ はそれぞれ海浜流速成分、平均水深、波向角および静水面を基準にした平均水位、 $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ はラディエーションストレス成分、 ε_d はエネルギー逸散率であり、係数 K, α および f_r の値は、沿岸漂砂量公式等と比較することにより決定した。係数 μ は、砂粒子相互の摩擦係数であり、これは砂の内部摩擦角 ϕ を使って $\mu = \tan \phi$ で表され、海浜勾配による砂の動きやすさを示している。

波浪場の計算は、エネルギー平衡方程式（間瀬ほか⁷⁾）を用い、海浜流計算を実行して、掃流砂および浮遊砂による地形変化の計算を行った。

(2) 係数の設定法

係数 α の値は、渡辺による漂砂量式（渡辺^{8) 9)}）により求められる沿岸漂砂量の岸沖分布との相関をとり決定した。計算条件は、底質粒径 0.2mm、海浜勾配 1/50 の平行等深線地形に、波高 1.5m、周期 7s の波浪を時計回りに 20° の波向きで作用させ、本モデル式の戻り流れ及び海浜勾配の効果を除いた計算を行った。渡辺漂砂量式の係数は波浪による影響を除き、 $A_w=0.0, A_c=1.0$ とし $\alpha=2.0$ を得た。係数 K は、この α の値を使って全沿岸漂砂量（沿岸漂砂量の岸沖積分値）を CERC 式 ($k=0.77$) で求められる沿岸漂砂量から算定し、 $K=14.1$ とした。

戻り流れの効果を表す係数 f_r は、電力中央研究所大型造波水路（延長 205m、幅 3.4m）による岸沖漂砂の実験結果（鹿島ほか¹⁰⁾）から決定した（泉ほか¹⁾）。実験条件を表-1に示すが、波浪作用開始から 3.2 時間経過した地形を初期地形とし、5 時間後の地形変化を再現して係数 $f_r=0.0005$ を得た。

表-1 実験条件

実験条件	波高 (m)	周期 (秒)	中央粒径 (mm)	斜面勾配	実験時間 (h)
	1.05	9.0	0.47	5/100	1.8

3. 海岸構造物周辺の地形変化

(1) 波浪, 海浜流計算

海浜勾配1/50の平行等深線地形に突堤, 離岸堤およびL字堤を配置し, 本モデルによる掃流砂, 浮遊砂による海岸構造物周辺の地形変化の検討を行った。波浪条件は, 全国港湾海洋波浪観測25ヶ年統計¹⁾の新潟沖の波浪観測データから年間のエネルギー頻度の高い表-2に示す波高0.75mから3.0mまでの3ケースを用いた。これらの波浪条件を用いてエネルギー平衡方程式による波浪場の計算, 海浜流場の計算を行い, 掃流砂, 浮遊砂による地形変化計算を行った。この内, 波浪条件波高1.5m, 周期7s, 入射波向時計回りに20°の突堤周辺の波浪ベクトル図および海浜流ベクトル図を図-1および図-2に示す。なお, 波浪ベクトル図中の等値線は波高を, 海浜流ベクトル中の等値線は水深を示す。

表-2 波浪条件

ケース	波高(m)	周期(秒)	波向き(°)
1	0.75	6.0	20.0
2	1.5	7.0	20.0
3	3.0	9.0	20.0

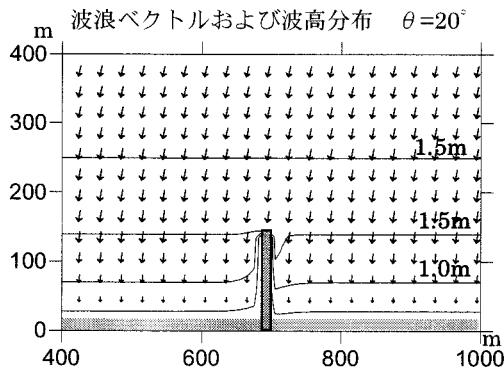


図-1 突堤周辺の波浪ベクトル図 ($H=1.5\text{m}$, $T=7\text{s}$)

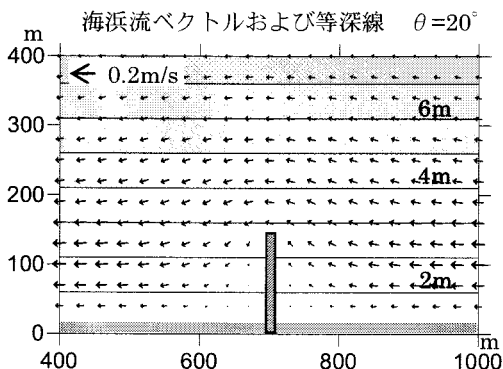


図-2 突堤周辺の海浜流ベクトル図 ($H=1.5\text{m}$, $T=7\text{s}$)

(2) 掃流砂による地形変化

波浪場, 海浜流場の結果を用いて式 (7) から (12) により突堤, 離岸堤およびL字堤周辺の掃流砂による漂砂量ベクトルを求めた。構造物の沖側設置水深

は, いずれも 2.6m, 離岸堤の堤長 120m, L字堤の横堤長 60m である。図-3 に底質粒径が 0.2mm の場合の漂砂量ベクトルを示す。それぞれの図の下段には漂砂量ベクトルの沿岸成分を岸沖に積分した沿岸漂砂量の沿岸分布を示す。

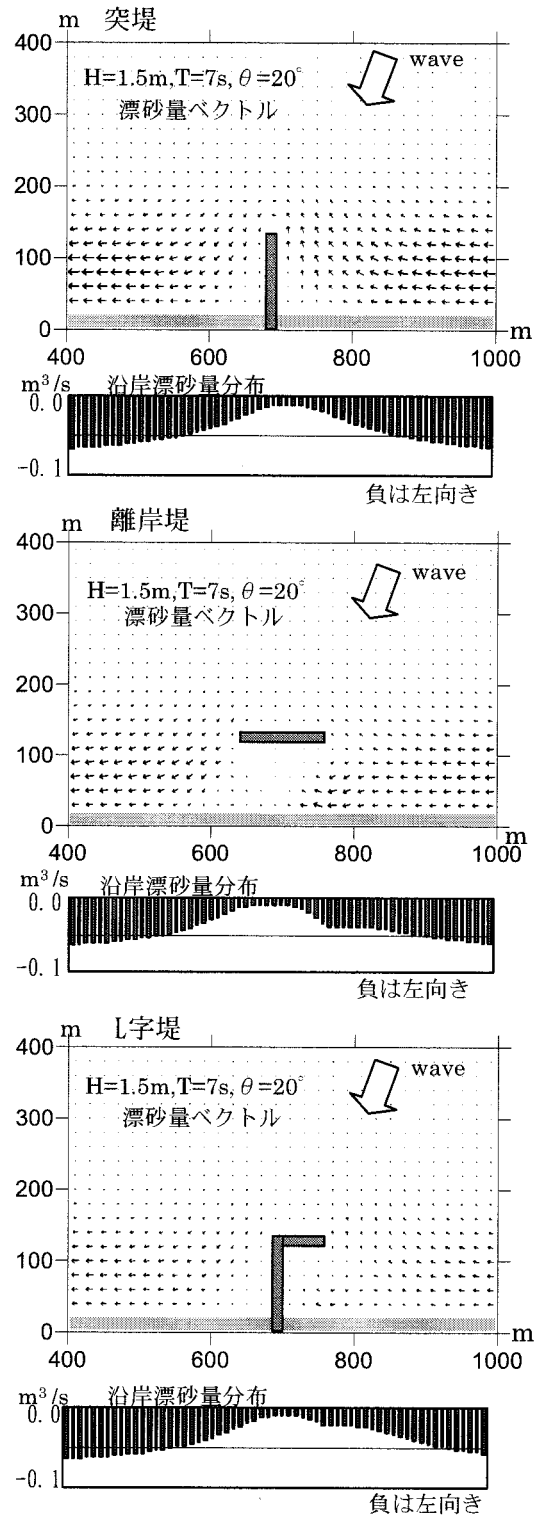


図-3 海岸構造物周辺の漂砂量ベクトル分

漂砂量ベクトルの収支から掃流砂による地形変化を求めた。波浪継続時間を 6 時間として, 突堤の場合で底質粒径 0.2mm, 波高別の結果を図-4 に, 波高

1. 5m, 粒径別の結果を図-5に示す。

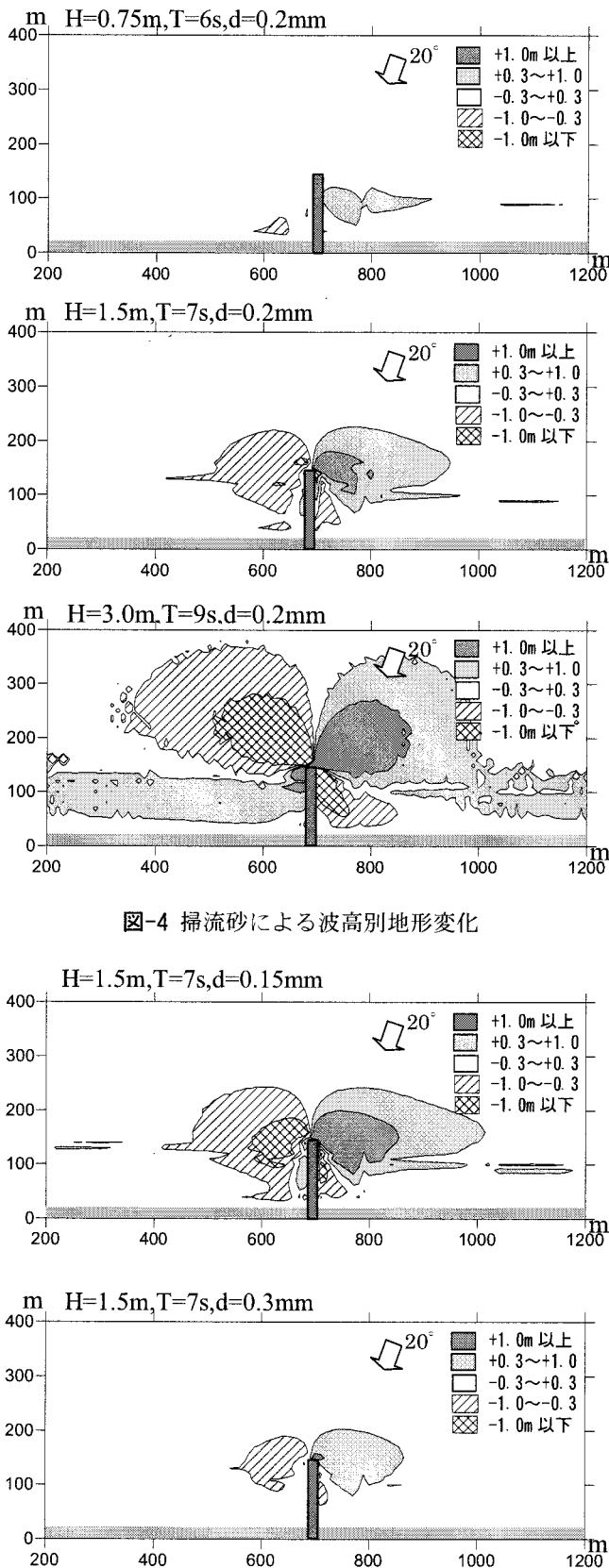


図-4 掃流砂による波高別地形変化

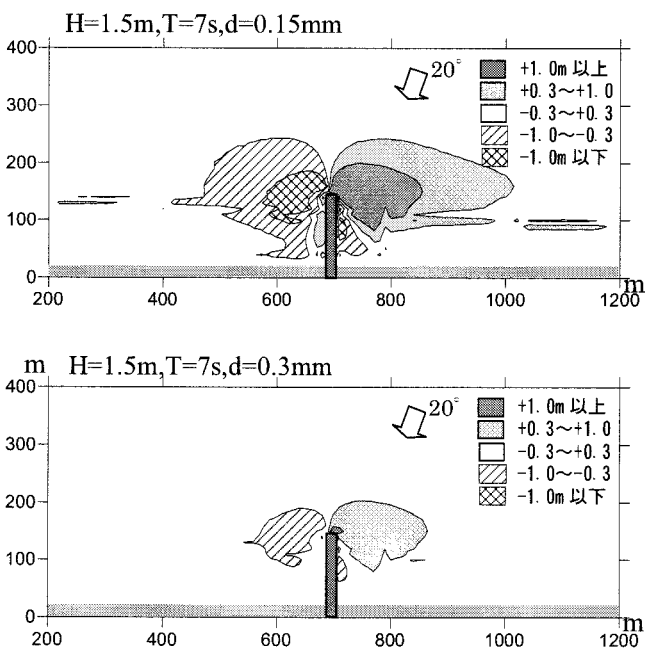


図-5 掃流砂による粒径別地形変化

これらの結果から、波高の増大に伴い、突堤の漂砂制御域が沖へ移動し、これに伴い上手側でも沖向きの土砂移動により突堤近傍で侵食が生じている。

また、粒径の違いによる効果が本モデルで明瞭に表現でき、粒径が大きくなると地形変化は小さくなるものの地形変化が生じる位置はほとんど変わらないことが分かる。

(3) 浮遊砂による地形変化

浮遊砂の移流拡散による海岸構造物周辺の地形変化計算を式(1)から(6)を用いて行った。掃流砂の場合と同様、波浪継続時間を6時間として、突堤の場合で底質粒径0.2mm、波浪別の結果を図-6に、波高1.5m、粒径別の結果を図-7に示す。計算条件は、渦拡散係数 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、空隙率0.4、側方境界条件はその法線方向に濃度勾配が0とした。浮遊砂による沿岸漂砂量の沿岸分布は、図-3に示す掃流砂による分布形状と類似したものとなったが、大きさは3分の1程度であった。ここで、図-6の波高0.75mと図-7の粒径0.3mmの結果は、地形変化が小さいため凡例の刻みを小さくしている。

これらから、浮遊砂による地形変化は、掃流砂による地形変化より小さいが、波高3.0mの場合を比較すると、浮遊砂による地形変化の影響がより沖へ広がり浮遊した底質が沖へ輸送される様子が確認できる。また、図-7からは、粒径による地形変化の違いが本モデルで明瞭に評価できていることがわかる。

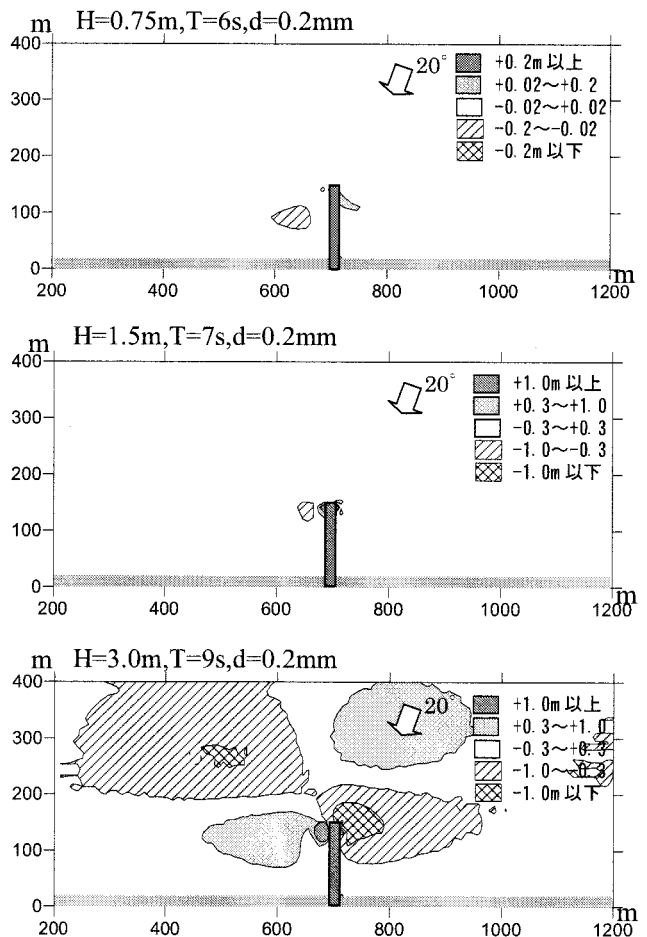


図-6 浮遊砂による突堤周辺の波高別地形変化

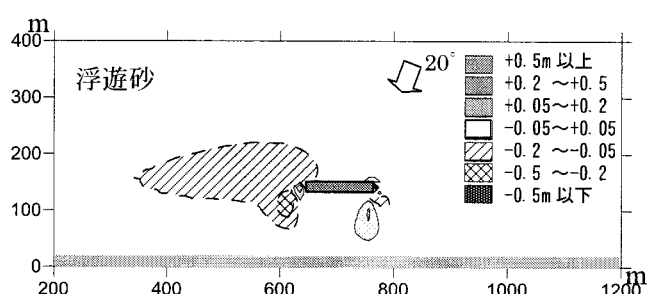
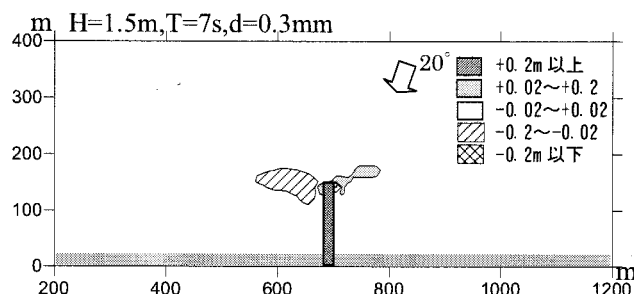
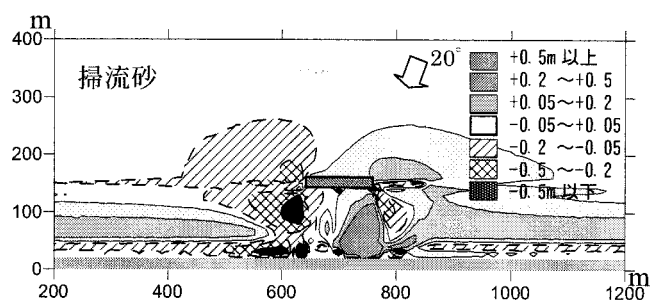
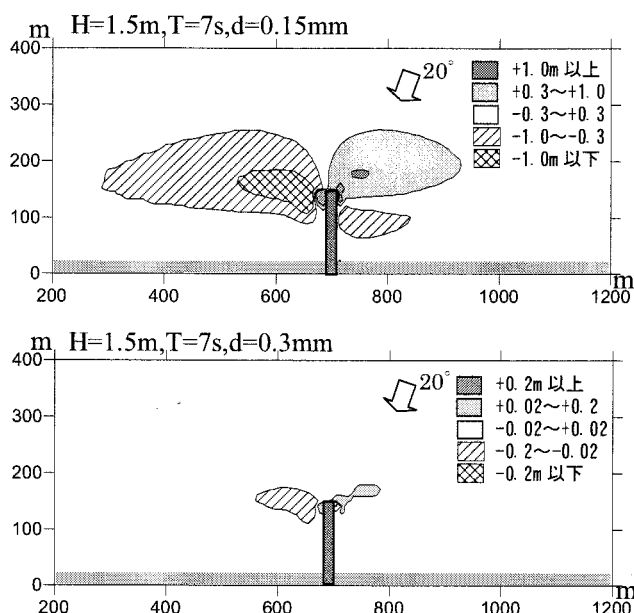


図-7 浮遊砂による突堤周辺の粒径別地形変化

(4) 掃流砂と浮遊砂を考慮した地形変化

粒径0.15mmのケースについて掃流砂，浮遊砂および掃流砂と浮遊砂を考慮した地形変化を示す．計算結果を突堤，離岸堤，L字堤の順に図-8から図-10に示す．それぞれ，上段は掃流砂のみによる地形変化，中段は浮遊砂のみによるもの，下段は両方を考慮したものである．

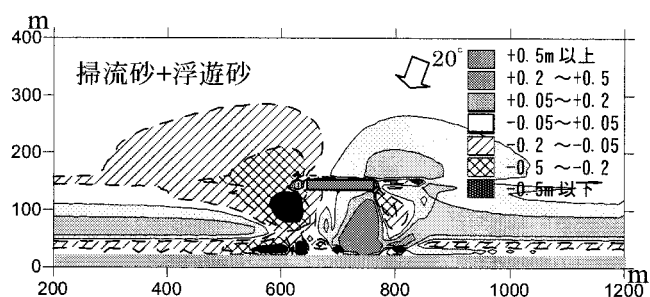


図-9 離岸堤周辺の地形変化

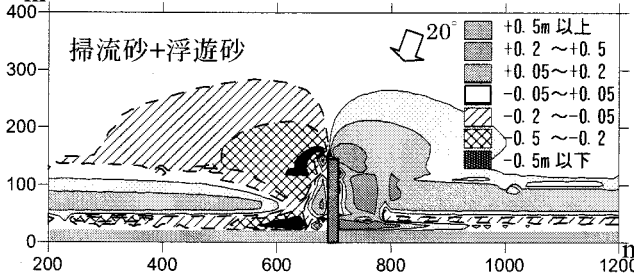
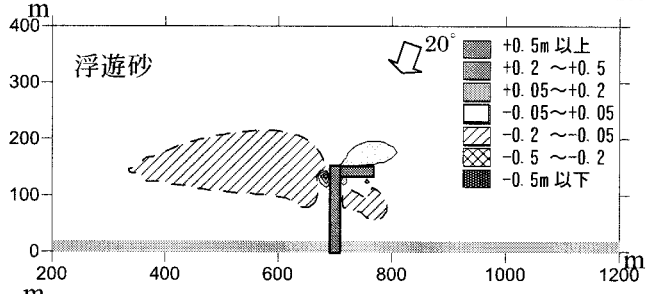
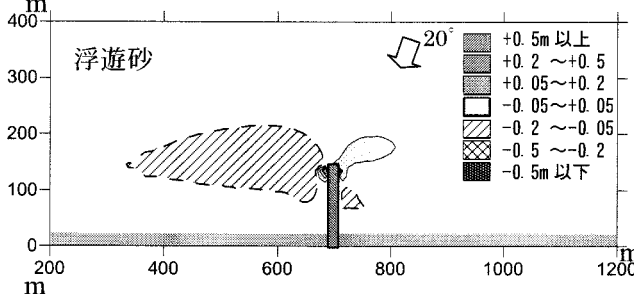
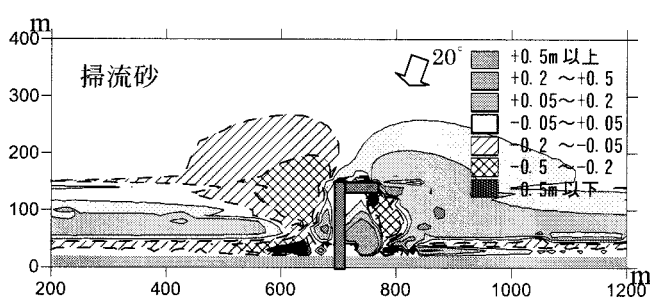
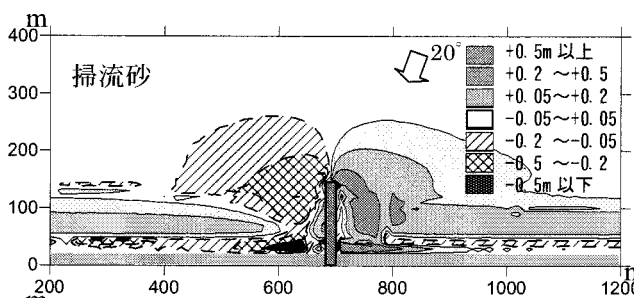


図-8 突堤周辺の地形変化

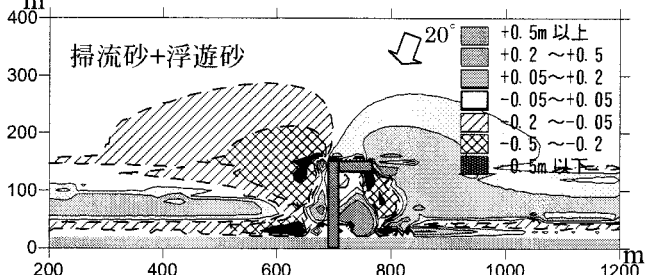


図-10 L字堤周辺の地形変化

表-3 波浪条件

ケース	波高(m)	周期(s)	波向(°)	作用時間(h)
1	1.50	7.0	20	2.0
2	0.75	6.0	20	4.6
3	0.50	4.0	20	5.4

計算は、地形変化の生じる水深は波高により異なるため、時化の発達期から最盛期、減衰期を考慮して表-3 に示す 3 ケースの波浪による計算結果を足し合わせて行った。計算条件は、浮遊砂による地形変化計算と同様、渦拡散係数 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、空隙率 0.4、側方境界条件はその法線方向に濃度勾配が 0 とした。波浪作用時間は、それぞれの代表波浪の年間の出現頻度を考慮して総計 12 時間とした。

計算結果から、海岸構造物の上手側で堆積、下手側で侵食する様子および岸から沖側 80m 付近にかけて戻り流れによるバー地形が表現できていることが分かる。浮遊砂の効果を取り入れることで、構造物による地形変化の影響が広範囲に及ぶこと、特に、構造物上手側では、底質粒径が小さい場合は沖向きの土砂輸送が助長されることが確認できる。

また、異なる波高の計算結果を重ね合わせることで、掃流砂は、波高に応じて水深の浅い岸側から沖側までの幅のある地形変化を生じさせるが、浮遊砂は、波高が小さいと発生しないため、比較的高い波浪の碎波帯付近で主な地形変化を生じさせていることが分かる。

5. 結論

底面摩擦応力と土粒子の沈降速度等から平面的に漂砂量ベクトルを算定するモデルに浮遊砂の移流拡散効果を取り入れた。このモデルは、底質粒径と波浪条件から、波浪場および海浜流計算を実行することにより、容易に平面的に底質の掃流および浮遊による地形変化の算定が可能である。

このモデルを用いて、平行等深線地形に突堤、離岸堤およびL字堤を配置して計算を行い、海岸構造物周辺の地形変化予測を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) 底質粒径が 0.2mm 以下では、浮遊砂の移流拡散の効果が相対的に大きく、沖合いに堆積する場合が見られたが、 0.3mm 以上では地形変化が急激に小さくなることが示された。
- (2) 浮遊砂の効果を取り入れることにより掃流砂だけでは把握できない広範囲におよぶ構造物の影響が評価でき、特に構造物上手側では、底質粒径が小さい場合は構造物による沖向きの土砂輸送が助長されることが示された。
- (3) 掃流砂は、波高に応じて岸側の浅い水深から沖側までの幅のある地形変化を生じさせるが、浮遊砂

は比較的高い波浪の碎波帯付近の地形変化を主に生じさせることが確かめられた。

(4) 本モデルは、底質粒径を考慮した3次元での掃流砂、浮遊砂の漂砂量の算定が可能であり、波浪の発生頻度を考慮した計算により土砂収支の正確な算定に寄与できることが期待できる。

(5) 潮流や吹送流等による移流を取り込むことにより、漂砂系における流出土砂量を定量的に評価できる可能性がある。

謝辞：大型造波水路による浮遊砂の実験データは電力中央研究所清水隆夫氏に提供いただいた。また、不規則波浪の計算プログラムは、京都大学防災研究所間瀬 肇教授より提供戴いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 泉 正寿, 泉宮尊司: 戻り流れや海浜勾配の影響を取り入れた漂砂量公式の提案, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp. 1225-1230, 2007.
- 2) 田村 進, 赤澤 勝, 和田耕造, 永松 宏, 泉 正寿: 新潟西海岸の地形変動機構の検討—VHF レーダー, ADCP の現地観測—, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 456-460, 2000.
- 3) 田村 進, 近川喜代志, 西條正輝, 高野剛光, 山谷弘幸, 泉 正寿: 風を考慮した 2 層海浜流モデルによる新潟西海岸の流況特性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 41-45, 2001.
- 4) 泉宮尊司, 國田知基, 泉 正寿, 永松 宏, 石橋邦彦: 船体取付型 ADCP によるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 576-580, 1999.
- 5) 榎木 亨, 李 宗燮, 出口一郎: 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第 31 巻, pp. 411-415, 1984.
- 6) 灘岡和夫, 蒲田浩久, 八木 宏: 非平衡性および三次元性を考慮した簡易浮遊砂計算法の提案, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 322-326, 1988.
- 7) 間瀬 肇, 沖 和哉, 高山知司, 酒井哲郎: 高精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 684/II-56, pp. 57-68, 2001.
- 8) 渡辺 晃: 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂の総量と岸沖分布の検討, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 306-311, 1992.
- 9) 渡辺 晃: 海岸環境工学, 第 3 編, 第 4 章, 地形変化の計算, pp. 272-295, 東京大学出版会, 1985.
- 10) 鹿島遼一, 清水隆夫, 丸山康樹, 齊藤昭三: 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究, 海岸工学論文集, 第 28 巻, pp. 197-201, 1981.
- 11) 全国港湾海洋波浪観測 25 ケ年統計 NOWPHAS1970~1994, (財) 沿岸開発技術研究センター, 1996.