

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

A NUMERICAL MODEL FOR 3-D BEACH DEFORMATION CONSIDERING
ON-OFFSHORE SEDIMENT TRANSPORT DUE TO UNDERTOW
AND BOTTOM SLOPE

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

¹正会員 国際航業株式会社 防災情報部 (〒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 numerical model for 3-D beach deformation has been developed to evaluate the amount of sediment transport rate in the littoral drift system. The model includes the sediment transport rate formula under the coexistence of waves and currents, considering the effect of bottom slope on the sediment movement. In case of a longshore uniform beach, this model has a solution that total amount of littoral drift is proportional to the longshore component of wave energy flux, similar to existing longshore sediment transport rate formulas. Numerical calculations are conducted to estimate the trapping rates of longshore sediment transport due to a groin or detached breakwater. Furthermore, wave height distributions of irregular wave and bottom friction components in nearshore zone are calculated to evaluate the sediment transport rate vector and total longshore sediment discharge on a bar type beach with a longshore undulation.

Key Words : 3-D beach deformation, longshore sediment transport, on-offshore sediment transport, undertow, bottom slope, longshore bar, settling velocity

1. はじめに

流砂系を考慮した土砂管理を行うためには、海岸に必要な土砂量を把握する必要がある。そのためには、沖合土砂損失を含めた土砂収支を正確に評価しなければならない。砂面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^{1) 2)}、波浪や海浜流さらには吹送流等を含めた海底摩擦応力を取り入れた漂砂量算定式が必要であると考え。このため、本研究では、その第一段階として、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モデルの開発を試みる。また、戻り流れの効果や海浜の勾配の影響を取り入れた新しい漂砂量算定式を提案する。漂砂量式の諸係数は既存の漂砂量算定式および大型2次元断面水路の実験結果により検定した。さらに、本モデルの有効性を示すために、突堤、離岸堤の沿岸漂砂の捕捉率を評価し、サンドバーや交互砂州が存在するモデル海浜に本モデルを適用し、漂砂量ベクトルおよび地形変化を推定することを目的とする。

2. 3次元海浜地形変化モデルの特徴

(1) 漂砂量評価式

平面的に漂砂量を算定する手法には等深線モデルがあるが、サンドバーや交互砂州が存在する海岸では等深線が縞状となり評価が難しい。本モデルでは漂砂量ベクトル(q_x, q_y)を式(1)および式(2)に示すように、時間平均底面摩擦応力(τ_{bx}, τ_{by})、および摩擦速度 u_* と土粒子の沈降速度 w_0 との比のべき乗を用いて表し、波浪のエネルギー逸散を考慮した戻り流れの効果(τ_{rx}, τ_{ry})と海浜勾配の影響を取り入れているのが特徴的なところである。

$$q_x = K \frac{w_0}{(\rho_s - \rho)g} \left\{ \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^\alpha - \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \right)^\alpha \left(\frac{u_{*c}}{w_0} \right)^\alpha \right\} \frac{(\tau_{bx} + \tau_{rx})}{1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x}} \quad (1)$$

$$q_y = K \frac{w_0}{(\rho_s - \rho)g} \left\{ \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^\alpha - \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} \right)^\alpha \left(\frac{u_{*c}}{w_0} \right)^\alpha \right\} \frac{(\tau_{by} + \tau_{ry})}{1 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial h}{\partial y}} \quad (2)$$

ここに,

$$\tau_{bx} = \frac{\partial}{\partial x} [\rho(h+\bar{\zeta})UV] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho(h+\bar{\zeta})UV] + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \rho g(h+\bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} \quad (3)$$

$$\tau_{by} = \frac{\partial}{\partial x} [\rho(h+\bar{\zeta})UV] + \frac{\partial}{\partial y} [\rho(h+\bar{\zeta})UV] + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \rho g(h+\bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} \quad (4)$$

$$\tau_{rx} = -\rho f_r \varepsilon_d^{2/3} d^{2/3} \cos \theta \quad (5)$$

$$\tau_{ry} = -\rho f_r \varepsilon_d^{2/3} d^{2/3} \sin \theta \quad (6)$$

であり, ρ_s , ρ , g , h はそれぞれ土粒子密度, 海水密度, 重力加速度および水位, (U, V) , d , θ , $\bar{\zeta}$ 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. 座標系は, 沖から岸へ向かう方向を x 軸の正とする直交座標系 (x, y) である.

波浪場の計算は, エネルギー平衡方程式(間瀬ほか³⁾)を用いて行い, 海浜流計算を実行して波と流れ共存場の底面摩擦応力から摩擦速度 u_* を求め, 漂砂量ベクトルを算定した.

本モデル式の妥当性は, 次のように示される. 流れが小さい場合, 非線形移流項を無視できるので, 完全沿岸流系 ($\partial/\partial y = 0$) を考えると, 式(4)より

$$\tau_{by} = \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g}{c} \cos \theta \sin \theta E \right) = \frac{\sin \theta}{c} \frac{\partial}{\partial x} (Ec_g \cos \theta) \quad (7)$$

を得る. また, 漂砂量式(2)から戻り流れと海浜勾配の項を除いて,

$$q_y = K \frac{w_0}{(\rho_s - \rho)g} \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^\alpha \tau_{by} = K \frac{w_0}{(\rho_s - \rho)g} \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^\alpha \frac{\sin \theta}{c} \frac{\partial}{\partial x} (Ec_g \cos \theta) \quad (8)$$

$$Q_y = \int_{x_i}^{x_s} q_y dx = K \frac{1}{(\rho_s - \rho)g} \frac{\sin \theta}{c} \int_{x_i}^{x_s} w_0 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^\alpha \frac{\partial}{\partial x} (Ec_g \cos \theta) dx \quad (9)$$

x_i , x_s は漂砂の移動帯の下限と上限であり部分積分を実行し, $w_0(u_*/w_0)^\alpha$ の値の変化が $\partial/\partial x(Ec_g \cos \theta)$ に比べて小さいとすると, 中間値の定理より

$$Q_y \cong K \frac{1}{(\rho_s - \rho)g} \frac{\sin \theta}{c} w_0 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)_m^\alpha Ec_g \cos \theta = K \frac{1}{(\rho_s - \rho)g} \frac{w_{0m}}{c} \left(\frac{u_*}{w_0} \right)_m^\alpha Ec_g \cos \theta \sin \theta \quad (10)$$

となり, 従来より提案されている沿岸漂砂量公式と類似な表現式が得られる. したがって, 本モデルは従来の沿岸漂砂量関係式をも含蓄していると言える.

(2) 係数の設定法

底質粒径 0.2mm ($w_0 = 0.024\text{m/s}$), 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い, 係数 K , α を検定した. 計算格子間隔は 10m である. まず $K=1$ として, α を本モデル式と渡辺による漂砂量式(渡辺⁴⁾⁵⁾)により求められる沿岸漂砂量の岸沖分布の相関をとり検定した. 渡辺漂砂量式の係数は波浪による影響を除き, $A_w=0.0$, $A_c=1.0$ とした. 表-1 に α を 0.5 から 4 まで変えた場合の相関係数を示す.

表-1 本モデル式と渡辺漂砂量式で評価した沿岸漂砂量の岸沖分布の相関係数

α	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
相関係数	0.771	0.772	0.772	0.769	0.764

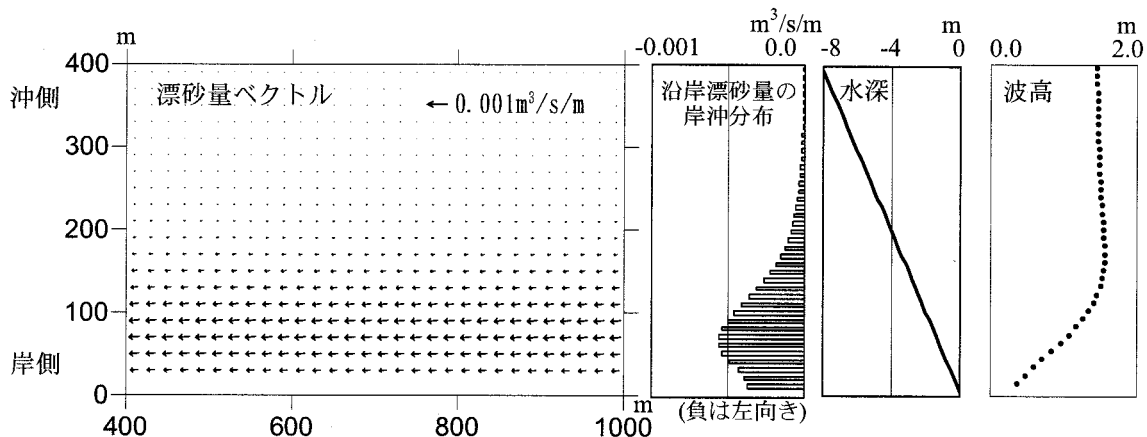


図-1 漂砂ベクトルの平面分布, 沿岸漂砂量の岸沖分布

この結果をみると、底質を均質なものとしているため、 α による相関の差異は小さく、実際には底質分布の判明した現地データで検定する必要があるが、今回はこの中で相関の高い $\alpha=2.0$ を採用した。次に、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で検定し $K=14.1$ を得た。図-1にこれらの係数で算定した漂砂量ベクトルの平面分布および沿岸漂砂量の岸沖分布を地形および波高と共に示す。

(2) 2次元断面水路による係数 f_r の検定

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から検定した(鹿島ほか⁶⁾)。表-2に実験条件を、図-2に実験結果と本モデル式による計算結果を示す。なお、数値計算の差分間隔は1mである。

表-2 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

図-2には沖向きを正とした岸沖漂砂量の岸沖分布を上から海浜勾配の効果、戻り流れの効果、全てを考慮した結果の順で示し、その下段に実験開始3.2時間後と5時間後の実験による地形を示す。最下段には実験による地形変化(実験開始5時間後の

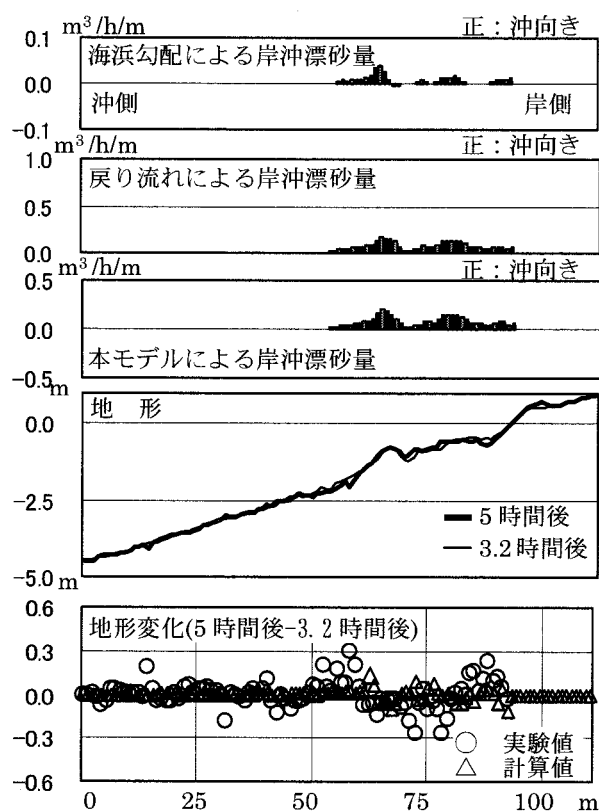


図-2 係数 f_r の検定結果

地形から3.2時間後の地形を減じた)を○で、本モデルにより係数 f_r を0.0005とした場合の計算結果を△で示すが、地形変化がよく再現できている。海浜勾配の効果を表す係数 μ は、均等で密な粒子の内部摩擦角が 35° であることから0.7とした。

3. 海岸構造物による沿岸漂砂補足率の評価

海浜勾配 1/15, 1/30, 1/50 の平行等深線地形に堤長の異なる突堤を配置し、沿岸漂砂の捕捉率を本モデルにより評価した。波浪条件は、波高 1.5m, 周期 7s, 波向きは汀線直角方向より時計回りに 20° である。図-3に堤長 170m の突堤周辺の漂砂量ベクトルおよび沿岸漂砂量分布を、図-4に突堤の堤長と捕捉率の関係を示す。堤長は本モデルにより評価した沿岸漂砂量の岸沖分布から求められる移動限界水深の離岸距離で除して無次元化している。なお、計算格子間隔は 10m である。

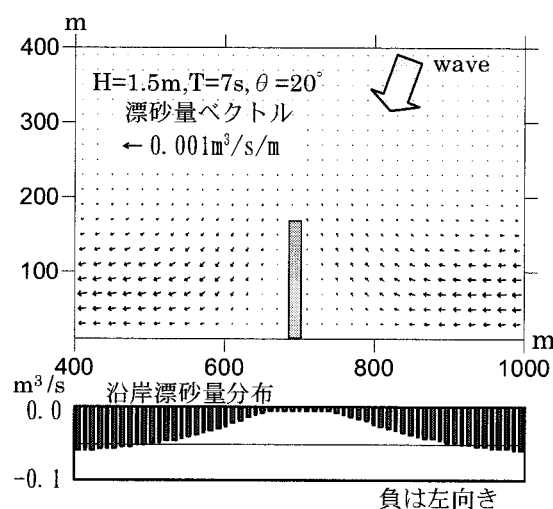


図-3 突堤周辺の漂砂量ベクトル及び沿岸漂砂量分布

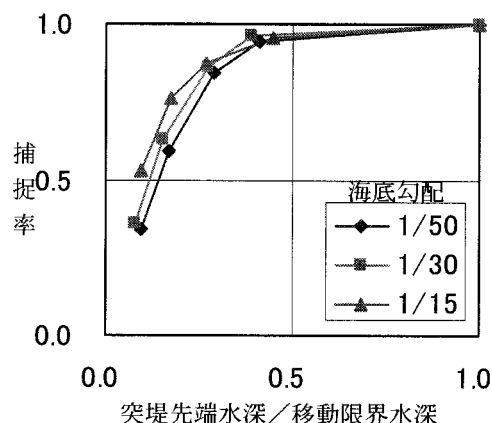


図-4 突堤長と沿岸漂砂の捕捉率の関係

次に、海浜勾配1/50の平行等深線地形において離岸距離120m, 水深2.4m地点に離岸堤を堤長180m, 150m, 120m, 90mと変えて配置し、沿岸漂砂の捕捉

率を評価した。波浪条件は、突堤の場合と同様である。図-5に堤長120mの離岸堤周辺の漂砂量ベクトルおよび沿岸漂砂量分布を、図-6に堤長離岸距離比と捕捉率との関係を示す。

これらから、本モデルで沿岸漂砂量分布および突堤や離岸堤等の構造物による沿岸漂砂の捕捉率が評価可能なことが示された。

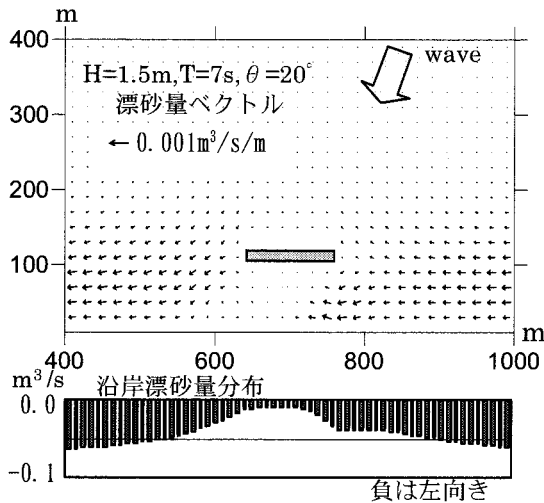


図-5 離岸堤周辺の漂砂量ベクトル及び沿岸漂砂量分布

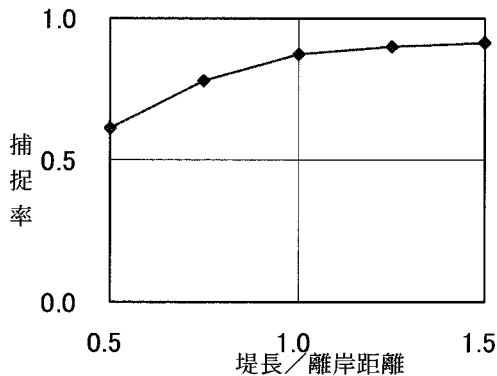


図-6 離岸距離と沿岸漂砂の捕捉率の関係

4. 任意の地形の漂砂量ベクトルと沿岸漂砂量分布の算定

NODA et al.⁷⁾によるモデル地形を用いて、サンドバーや交互砂州が存在する海浜で、漂砂量ベクトルの算定を行った。モデル地形は式(11)で表され、右辺の第1項は平行等深線、第2項はバー地形、第3項は沿岸方向に周期的な砂州を表す。 a 、 b 、 c はそれぞれの振幅、 x_s 碎波帯幅、 L_s 沿岸砂州の有効幅、 λ 砂州の沿岸方向の波長、 δ_1 は位相である。

$$h(x, y) = ax^p - b \exp \left[-\frac{(x-x_s)^2}{(x_b/2)^2} \right] + c \left(1 - \frac{x}{L_b} \right) \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (y - \delta_1 - \delta_2) \right] \quad (11)$$

モデル地形は、係数を $a=0.135$ 、 $p=0.67$ 、

$b=4.2$ 、 c を離岸距離に応じて0.0から1.0にとり、 $x_s=400\text{m}$ 、 $L_s=500\text{m}$ 、 $\lambda=1000\text{m}$ 、 $\delta_1=0$ 、 δ_2 は汀線直角方向と地形を形成する波峰とのなす角を β として $\delta_2=\tan \beta$ であり、 β を 0° と 20° として2ケース分作成した。

漂砂量ベクトルの計算は、 $K=14.1$ 、 $\alpha=2.0$ 、 $\mu=0.7$ とし、 f_r は大型造波水路による検定結果から0.0005とした。計算格子間隔は10mである。図-7に $\beta=0^\circ$ のモデル地形(等深線間隔水深4m以浅0.5m、以深1.0m)に $H=1.0\text{m}$ 、 $T=7\text{s}$ 、波向き 0° の波浪が作用した場合の漂砂量ベクトル、沿岸漂砂量分布および沿岸漂砂量の内、戻り流れの効果、地形勾配の効果を示す。これから、サンドバーや交互砂州が存在する海浜において、沿岸漂砂量の約10%程度の戻り流れの効果および約0.3%程度の海浜勾配の効果が評価できる。図-8にバー地形およびトラフ地形上の代表測線の岸沖漂砂量分布、岸沖漂砂量の内、地形勾配の効果、戻り流れの効果を地形および波高分布と共に示す。さらに、図-9に同地形で波向き 20° の波浪が入射した場合の漂砂量分布を、図-10に $\beta=20^\circ$ のモデル地形に波向き 0° の波浪が作用した場合の漂砂量分布を示す。これらの結果から、バー地形で岸向き、トラフ地形で沖向きの漂砂が確認できる。また、戻り流れが、碎波点付近で確認できること、地形が浅くなるところでは地形勾配の効果は沖向きに、深くなるところでは岸向きに作用することが確認できる。

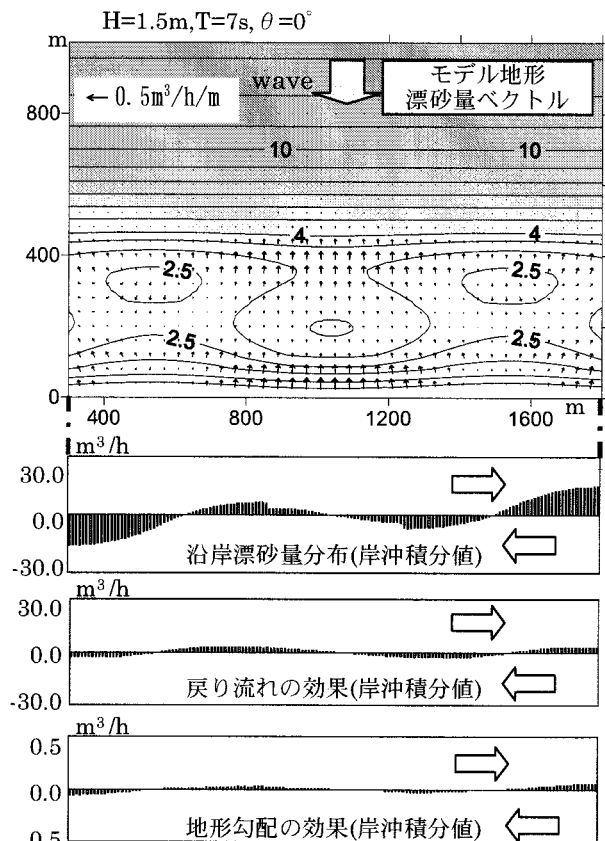
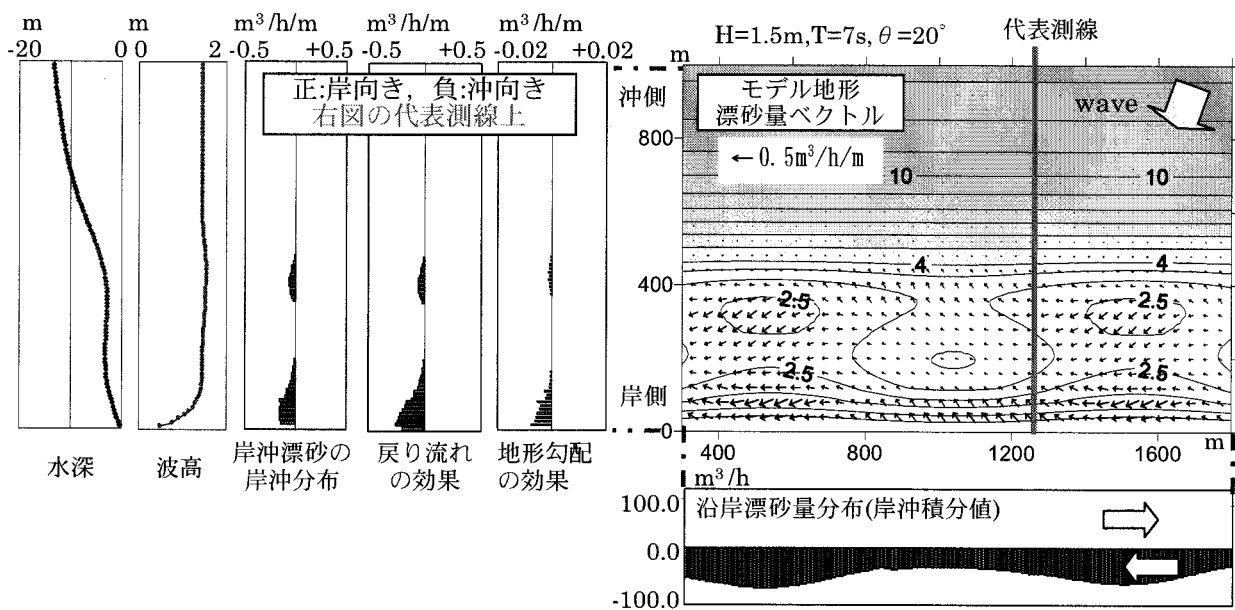
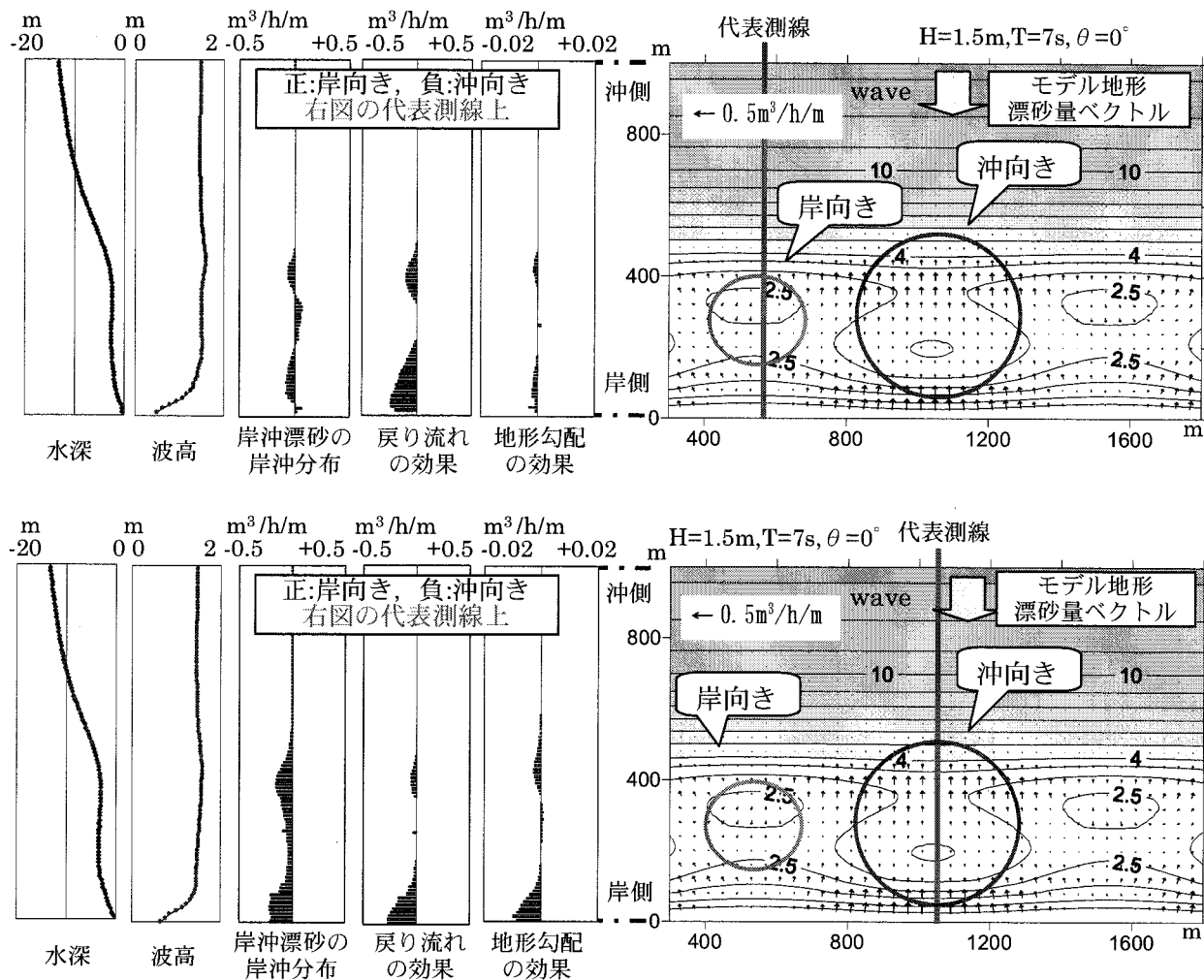


図-7 サンドバーや交互砂州が存在するモデル地形($\beta=0^\circ$ 、波浪入射角 0°)の沿岸漂砂特性



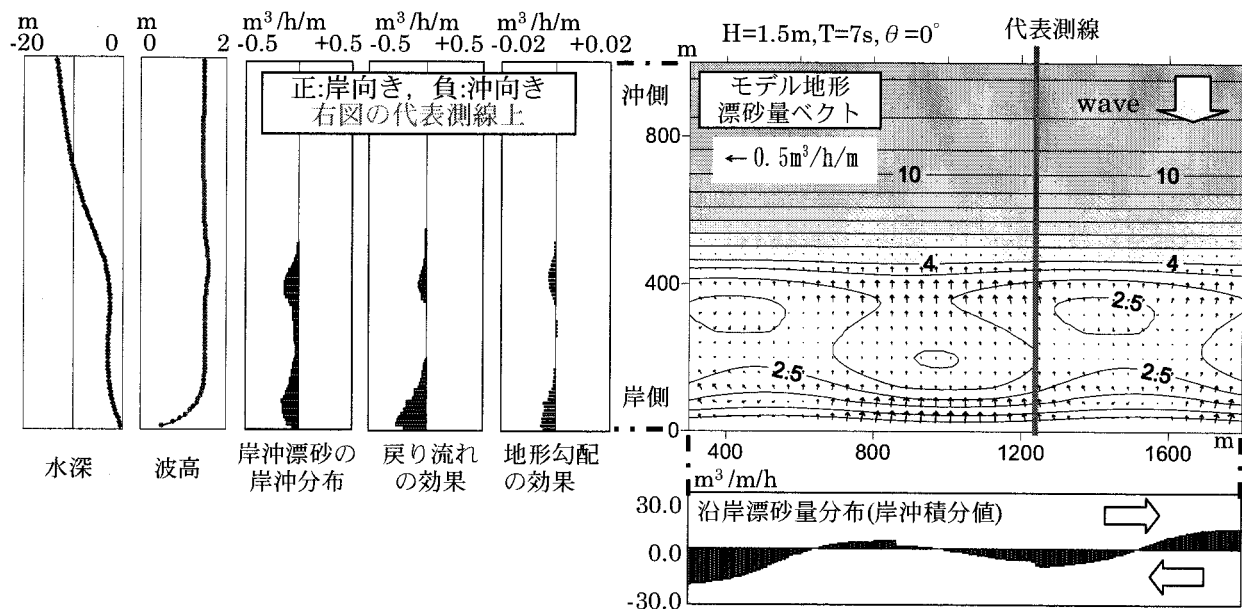


図-10 サンドバーや交互砂洲が存在するモデル地形の漂砂特性($\beta=20^\circ$, 波浪入射角 0°)

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の開発を試みた。このモデルは、海岸地形を格子化し、エネルギー平衡方程式等で波浪場の計算を行い、この結果から海浜流計算を実行して波と流れ共存場の摩擦応力から摩擦速度 u_* を求めることにより容易に漂砂量ベクトルの算定が可能である。

モデルの妥当性は、中間値の定理から従来より提案されている沿岸漂砂量公式と類似な表現式が得られることから示せた。

漂砂量算定式の係数 K および α の値は、既存の漂砂量算定式からそれぞれ 2.0 および 14.1 と評価し、戻り流れの効果を表す係数 f_r は大型造波水路による岸沖漂砂の実験結果から 0.0005 と検定した。また、海浜勾配の効果を表す係数 μ は、均等で密な粒子の内部摩擦角が 35° であることから 0.7 と設定した。これらの係数は、それぞれの現地データで検定することにより、海浜地形算定精度が上がるものと考えられる。

このモデルの有効性を示すため、平行等深線地形に突堤および離岸堤を配置して計算を行い、海岸構造物による沿岸漂砂捕捉率の評価が可能なが示せた。さらに、サンドバーや交互砂洲が存在する任意の海浜に適用し、3次元で海浜勾配、戻り流れの効果および漂砂量ベクトルの算定が可能なが示せた。これらの結果により、容易に沿岸漂砂量分布および岸沖漂砂量分布が評価できる。

本モデルは、底質粒径の違いによる評価が可能であり、潮流や吹送流等による浮遊砂等の移流をも取

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岸沖漂砂の実験データは電力中央研究所榊山 勉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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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, pp57-68, 2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Noda, E.K., C.J. Sonu, V.C. Rupert and J.I. Collins: Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf zone, Tetra Tech. No. TC-149-4, pp. 20-40, 19