

細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について

乾 武 史*・Mohammad Dibajnia**・磯 部 雅 彦***・渡 辺 晃****

1. はじめに

漂砂現象については現在までに数多くの研究がなされているが、それらのうち特に基礎的研究の殆どは均一砂に対するものであり、混合砂の移動現象を直接の対象とした研究は数例しかない。しかし例えば養浜後の海浜変形などを扱う際には、粒径がかなり異なる混合砂の漂砂量を精度よく評価する必要がある。混合砂の漂砂に関しては、砂村 (1984) の実験により混合砂にすると沖向き漂砂量が激減することが確かめられており、また田中ら (1989) により粒径別漂砂量式や底質分級の数値計算法が提案されているが、いずれも掃流状態あるいは砂漣上の漂砂に関するものであり、シートフロー状態が頻繁に発生する現地海浜に適用するには問題が多い。シートフロー状態も含めた研究としては、鈴木ら (1994) が Dibajnia・Watanabe (1992) の式に混合比を表すパラメータを加味することにより混合砂の漂砂量を表せることを示したが、細砂混合率 50 % 以外の条件の実験ケースが少ないため検証が不十分であった。

そこで本研究では、混合砂の漂砂量をより多くの混合比について実測し、混合砂の漂砂量の算定式を提案することを主目的とした。また提案された漂砂量算定式を用いて、混合粒径の現地海浜を想定した地形変化および混合率変化の数値計算を行うことによって、モデルの検討を行った。

2. 漂砂量の測定および計算式との比較

(1) 漂砂量の測定方法

実験にはシートフローが発生する程度の高流速で測定を行うために任意波形振動流装置を用いた。これは外部からの電圧信号によってピストンを動かして振動流を発生させるもので、任意の流速波形を与えることができる。本実験では現地海浜と条件を近づけるためにクノイド波理論による流速波形を用いた。流速波形を図示すると図-1 のようになり、非対称性は $u_{\max}/\bar{u}=0.7$ である。

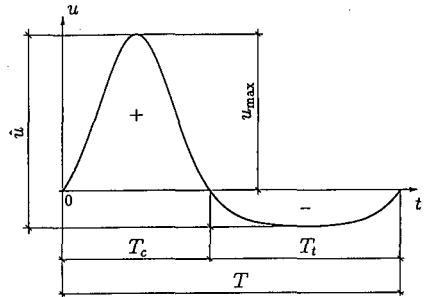


図-1 実験に用いた流速波形

漂砂量の測定法には種々の方法があるが、本実験では観測部中央断面の岸側と沖側とで振動流作用前後の砂の重量を比較することにより求める方法を用いた。具体的には漂砂量の測定は次の手順で行った。

- 1) 長さ 157 cm, 幅 12 cm の観測部に粒径 0.20 mm と 0.87 mm の 2 種類の砂を各種の混合率で混合したものを岸側と沖側で同量になるように敷き詰め、表面を平らに均す。
- 2) 次に観測部に水を満たし、振動流を一定時間作用させ、砂の移動の様子をビデオカメラに記録する。
- 3) その後、岸側と沖側の砂を別々に採取し、120°C で約 12 時間乾燥させた後ふるい分けをして、細砂・粗砂それぞれの重量を測定する。
- 4) 振動流作用前の重量との差をとることによって、岸側および沖側の砂の重量の変化量 ΔM_{on} および ΔM_{off} を細砂・粗砂のそれぞれについて求める。

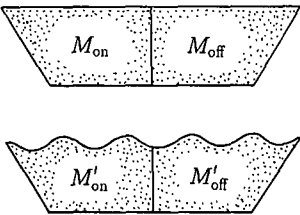
砂の混合率は主に細砂混合率 25 %, 50 %, 75 % の 3 種類について行った。振動流の周期 T は 3 s と 5 s の 2 通りを用いた。振動流の流速は、砂漣ができる低流速 ($u_0=20$ cm) から、十分にシートフローとなる高流速 ($u_0=80$ cm) まで変化させて漂砂量を測定した。ここで u_0 は水粒子軌道直径である。

砂漣ができるケースについては、平坦床から砂漣が形成されるまでの遷移時間の砂移動が誤差となるため結果の解釈には注意が必要である。本実験では誤差を一定以内に抑えるため、振動流作用時間を砂漣発生に要する時間の 5 倍以上とした。そのため振動流作用時間 T_m は、

* 埼玉県 住宅都市部下水道課

** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科



$$\Delta M_{on} = M'_{on} - M_{on} \quad \Delta M_{off} = M'_{off} - M_{off}$$

図-2 漂砂量の評価方法

$T_m=60\sim4,020$ s と、ケースごとの値を用いた。

(2) 漂砂量の評価方法

漂砂量 q は、細砂・粗砂それぞれについて、式 (1) により算定した (図-2)。

$$q = \frac{\Delta M}{B \cdot T_m} \cdot \frac{1}{\rho_s} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 q は岸向きを正とした正味の漂砂量 (単位幅・単位時間当たり) を間隙を除いた砂の体積を用いて表示したものである。 ΔM は観測部中央断面における砂の沖側から岸側への移動量、 $B=12$ cm は観測部断面幅、 T_m は振動流作用時間、 ρ_s は砂の密度 (2.65 g/cm³) である。 ΔM は岸側の砂の変化量 ΔM_{on} と沖側の砂の変化量 ΔM_{off} の絶対値の平均値すなわち $\Delta M=(\Delta M_{on}-\Delta M_{off})/2$ で評価する。

(3) 漂砂量の測定結果

漂砂量の測定を行ったもののうち、有意な結果が得られたのは 16 ケースであり、表-1 にそれを示す。

(4) Dibajnia・Watanabe の式との比較

本研究では、鈴木ら (1994) と同様 Dibajnia・Watanabe (1992) の式に混合率の影響を加味することにより漂砂量

を算定し、実測値と比較することによって、修正した漂砂量算定式を提案する。

Dibajnia・Watanabe (1992) の式によって無次元漂砂量 ϕ は次のように表せる。

$$\phi = \frac{q}{w_b d} = a \cdot \text{sign}(\Gamma) \cdot |\Gamma|^{0.55} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a は無次元係数 (0.001) で、 Γ は砂の移動のメカニズムを表すパラメーターである。

$$\Gamma = \frac{T_c(\Omega_c^3 + \Omega_t^3)u_c - T_t(\Omega_t^3 + \Omega_c^3)u_t}{(u_c + u_t)T} \dots\dots\dots (3)$$

T は周期、 T_c 、 T_t は岸向き、沖向きの継続時間であり (図-1)、 Ω_c 、 Ω_t 、 Ω_i 、 Ω_o 、 u_i 、 u_o は次式で定義される。

$$u_c^2 = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c} u^2 dt, \quad u_t^2 = \frac{2}{T_t} \int_{T_c}^T u^2 dt \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{cases} \text{if } \omega_j \leq \omega_{cr} & \begin{cases} \Omega_j = \omega_j \cdot \frac{2w_b T_j}{d} \\ \Omega'_j = 0 \end{cases} \\ \text{if } \omega_j > \omega_{cr} & \begin{cases} \Omega_j = \omega_{cr} \cdot \frac{2w_b T_j}{d} \\ \Omega'_j = (\omega_j - \omega_{cr}) \cdot \frac{2w_b T_j}{d} \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$\omega_c = \frac{1}{2} \frac{u_c^2}{sgw_b T_c}, \quad \omega_t = \frac{1}{2} \frac{u_t^2}{sgw_b T_t} \dots\dots\dots (6)$$

式 (5) 中の添字 j は c 、 t で置き換えられる。また ω の限界値 ω_{cr} としては、砂漣上では 0.03、シートフローでは 1.0 を用いる。

ω_c と ω_t は砂の舞上がりの強度を示す指標であるが、これらの指標に各砂の混合率 P を加味することによって、混合砂の漂砂量にも拡張することができる。すなわち

$$\omega_c = \frac{1}{2} \frac{u_c^2}{sgw_b T_c} \cdot P, \quad \omega_t = \frac{1}{2} \frac{u_t^2}{sgw_b T_t} \cdot P \dots\dots\dots (7)$$

とすることにより、各砂ごとの漂砂量が求まる。
この方法で計算した無次元漂砂量の値と実測値との比較を行った。比較に当たっては、鈴木ら (1994) のデータを本実験のデータとあわせて用いた。
その結果、Dibajnia・Watanabe (1992) の式では式 (2) 中の Γ の指数が 0.55 になっているが、これを 0.50 にした方が実験値とより良好な一致を示すことが分かった。また他の従来の研究によると ϕ は $\bar{u}$ の 3 乗にほぼ比例するといわれており、このことを考えても Γ の指数は 0.50 の方が合理的である。そこで本研究では、
$$\phi = a \cdot \text{sign}(\Gamma) \cdot |\Gamma|^{0.50} \dots\dots\dots (8)$$

とした方がよいと結論づけた。またこのとき、係数 a の値としては $a=0.0023$ が最もよい一致を与えた。
図-3 は、Dibajnia・Watanabe (1992) が式 (2) を求めるために使用した図で、均一砂の無次元漂砂量の実

表-1 漂砂量の測定結果

$P_{0.2}$	Δt (s)	T_c (s)	T_t (s)	u_c (cm/s)	u_t (cm/s)	$q_{0.2}$ (cm ³ /cm/s)	$q_{0.87}$ (cm ³ /cm/s)	砂面形状
0.50	310	1.12	1.88	63.44	33.92	-0.085	+0.043	平坦床
0.50	95	1.12	1.88	72.94	39.12	-0.001	+0.009	平坦床
0.50	890	1.80	3.20	60.06	25.47	+0.004	+0.020	平坦床
0.50	540	1.92	3.08	72.06	33.15	+0.009	+0.031	平坦床
0.50	300	1.92	3.08	89.87	42.13	+0.048	+0.100	平坦床
0.75	630	1.14	1.86	42.66	21.52	-0.023	+0.003	砂漣
0.75	900	1.24	1.76	52.62	22.76	-0.058	-0.007	砂漣
0.75	600	1.24	1.76	52.62	22.76	-0.092	-0.020	砂漣
0.75	305	1.12	1.88	63.44	33.92	+0.045	+0.029	平坦床
0.75	270	1.12	1.88	72.94	39.12	+0.079	+0.059	平坦床
0.75	150	1.12	1.88	72.94	39.12	+0.097	+0.077	平坦床
0.75	240	1.12	1.88	82.55	45.30	+0.131	+0.074	平坦床
0.75	195	1.18	1.82	99.25	53.91	-0.121	+0.061	平坦床
0.25	1500	1.10	1.90	31.86	16.87	-0.010	+0.005	砂漣
0.25	480	1.24	1.76	52.62	22.76	-0.062	-0.053	砂漣
0.25	60	1.18	1.82	99.25	53.91	+0.053	+0.417	平坦床

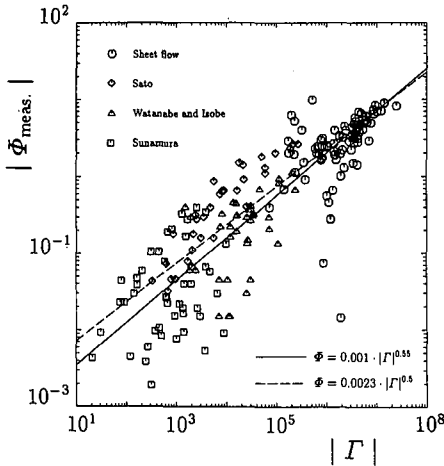


図-3 無次元漂砂量の実測値 $\Phi_{\text{meas.}}$ とパラメーター Γ の関係 (データの出典は Dibajnia・Watanabe (1992) 参照)

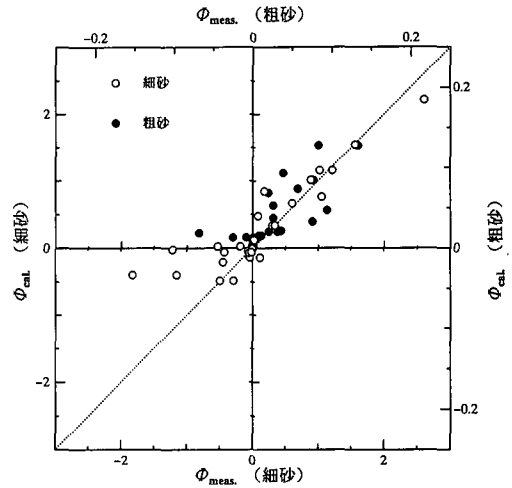


図-4 混合比に対する式 (8) による計算値と実測値の比較

測値 $\Phi_{\text{meas.}}$ とパラメーター Γ の関係を表したものである。図中の実線は式 (2) を表したもので、 $\Phi = 0.001|\Gamma|^{0.55}$ である。一方、図中の破線は本実験で得た式 (8) つまり $\Phi = 0.0023|\Gamma|^{0.50}$ を表したものであり、図中にプロットされた実測データ点とよりよく一致している。このことから式 (8) の妥当性が確認できたといえる。

次に混合砂に対して以上の方法により計算した無次元漂砂量の値と実測値を比較したものが図-4 である。これより、式 (3)~(5) および (7), (8) によって混合砂の漂砂量をもかなり精度よく算定できることが確認された。

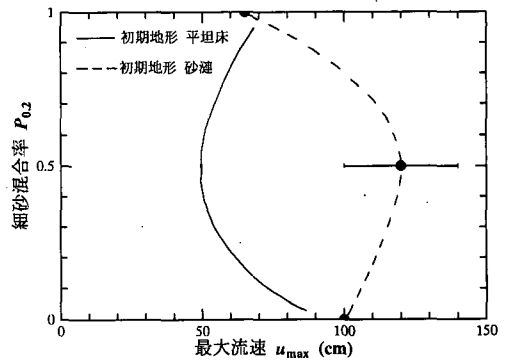


図-5 混合比に対するシートフローの発生限界

3. 混合砂に対するシートフローの発生限界

(1) 実験方法

砂面形状は砂の移動形態ひいては漂砂量に大きく関係するため、漂砂量の算定には底面流速と砂面形状の関係を明らかにすることが不可欠である。初期地形が平坦床の条件下での実験は鈴木ら (1994) により行われており、混合率 50 % の時にもっともシートフローになりやすいことが見いだされている。本研究では初期地形が平坦床ではなく砂漣が存在する条件の下で砂漣からシートフローへ遷移する限界流速を測定した。

実験は次の手順で行った。

- 1) 細砂混合率 50 % の砂を振動流装置の観測部に平らに敷き詰める。
- 2) 装置に水を満たした後、 $T=3.0$ s, $d_0=34$ cm の振動流を作用させ、砂漣を発生させる。
- 3) その後 d_0 を徐々に大きくしていき、砂漣が消滅しシートフローが発生する条件を求める。

(2) 実験結果

細砂混合率 50 % で初期地形が平坦床の時、 $d_0=34\sim38$ cm でシートフローが発生するのに対して、初期地形が砂漣の時は $d_0=70\sim90$ cm と 2 倍以上の流速を加えなければ砂漣が消滅しないことが明らかになった。なお均一砂の時の砂漣の消滅限界は既に分かっており、それらをまとめて表したものが図-5 である。これより初期地形が平坦床の時は混合砂の方が均一砂よりもシートフローができやすいが、初期地形が砂漣の時は逆にシートフローになりにくくなることが分かった。

4. 海浜断面地形と混合率変化の数値計算

以上の結果を用いて混合砂の現地海浜を想定した数値計算を行い、地形変化および混合率変化の様子を調べた。

(1) 計算方法

波浪場と底面流速波形は Dibajnia ら (1993) と同様で、まず磯部 (1986) の不規則波に対する碎波減衰項を考慮した方法を用いて波エネルギーの岸沖分布を求め、次に

磯部・堀川 (1981) による有限振幅性を考慮した流速評価法を用いて、有義波高と有義波周期から底面流速時間波形を評価した。さらに戻り流れの流速分布についても Dibajnia ら (1993) と同様の方法で扱った。

これにより流速波形が求まると、式 (3)～(5) および (7), (8) より、細砂・粗砂それぞれの漂砂量を求めることができる。ただし混合率によって砂漣の消滅限界が違ふことを表すために式 (5) 中における ω_{cr} の値は次の式による値を用いた。

$$\omega_{cr} = 1 - 0.97\sqrt{\lambda} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\lambda = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{\psi_{rms} - 0.2}{\psi_{cr} - 0.2} \right)^2 \right] \cdot \min(1, 2\lambda/d_0) & (\psi_{rms} < \psi_{cr}) \\ 0 & (\psi_{rms} \geq \psi_{cr}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これは Dibajnia ら (1993) の方法に混合率の影響を加えたものである。ここで、 λ は砂漣波長である。また、 ψ_{rms} は底面流速の自乗平均平方根に対応するシーلز数で

$$\psi_{rms} = \frac{f_w \bar{u}^2}{2sgd_m} \quad \dots\dots\dots (11)$$

で算定する。ただし f_w は Jonsson の摩擦係数、 s は砂の水中比重 (=1.65)、 g は重力加速度、 d_m は砂の粒径の加重平均である (細砂混合率 25 % ならば $d_m = (\text{細砂粒径} + 3 \times \text{粗砂粒径})/4$)。

ψ_{cr} は、初期地形が砂漣の条件の下で砂漣が消滅しシートフローが発生するときの流速に対応するシーلز数であり、図-5 から分かるように細砂混合率 $P_{0.2}$ の関数になる。実験結果に基づいて次式のように仮定した。

$$\psi_{cr} = -1.4(P_{0.2} - 0.5)^2 + 0.13P_{0.2} + 0.83 \quad \dots\dots\dots (12)$$

細砂・粗砂それぞれの漂砂量が求まると、次に地形および混合率の変化量を計算する。計算には平野 (1971) により提案された砂量の連続式および粒度の連続式を用いた。砂の間隙率 ϵ_v の時間変化を無視すれば基礎方程式は次のようになる。

底面が上昇する場合：

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{1}{(1-\epsilon_v)} \frac{dq_T}{dx} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{1}{b(1-\epsilon_v)} \left\{ \frac{dq}{dx} - P \frac{dq_T}{dx} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

底面が低下する場合：

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{1}{(1-\epsilon_0)} \frac{dq_T}{dx} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{1}{b(1-\epsilon_v)} \left\{ \frac{dq}{dx} - P_0 \frac{dq_T}{dx} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし q_T は細砂・粗砂の合計の漂砂量 (単位幅単位時間当たり)、 q は細砂・粗砂それぞれの漂砂量 (単位幅単位時間当たり)、 P は細砂・粗砂それぞれの含有率、 b は交

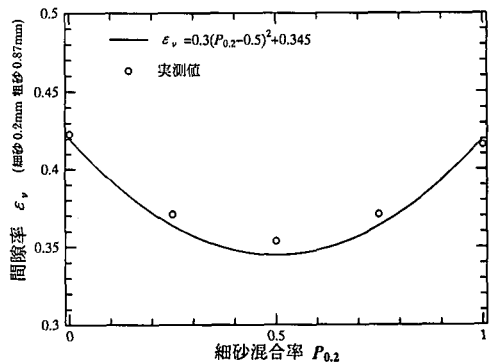


図-6 砂の混合率と間隙率の関係

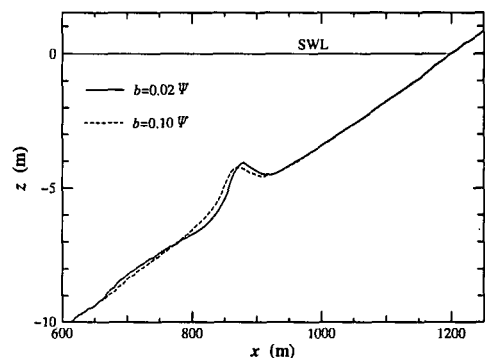


図-7 侵食型海浜での地形変化

換層厚、 ϵ_0 , P_0 は交換層よりも下の間隙率および含有率 (50 %) である。ここで交換層厚 b とは漂砂によって混合のおこる砂層の厚さのことである。本研究では b がシーلز数に比例すると仮定し、 $b=0.02\psi$ と $b=0.10\psi$ の2通りに対して計算を行った。なおシーلز数の算定においては、式 (11) を用いた。

また、間隙率 ϵ_v は図-6 のように混合率によって変化するため、実測値に基づいて式 (17) のように仮定した。

$$\epsilon_v = 0.3(P_{0.2} - 0.5)^2 + 0.345 \quad \dots\dots\dots (17)$$

これにより地形および混合率の変化量が求められるので、以上の過程を繰り返し計算することによって、最終的な地形を求めることができる。

(2) 計算結果

計算は、粒径 0.20 mm の細砂と粒径 0.87 mm の粗砂との混合砂で初期混合率が 50 % で、初期勾配が 1/60 の海浜に対し、2 種類の波浪条件を想定して行った。

図-7 と図-8 は沖波波高 $H_0=4$ m、周期 $T=8$ s の波が 72 時間作用したと仮定した場合で、侵食型の海浜に対するケースである。 $x=900$ m 付近にバーができ、そこで粗砂の混合率が大きくなっており、現地観測の結果と同じ傾向である。

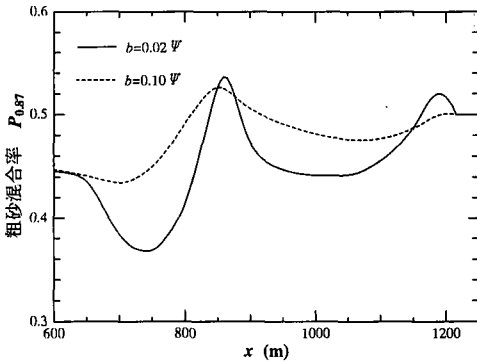


図-8 侵食型海浜での混合率変化

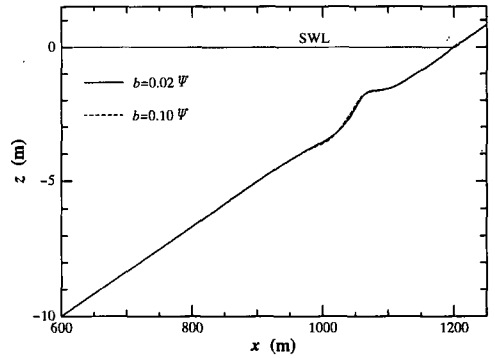


図-10 堆積型海浜での地形変化

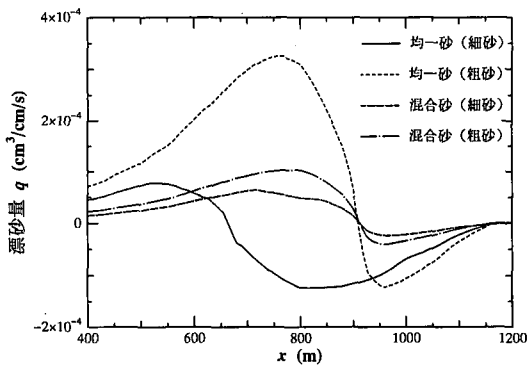


図-9 侵食型海浜での漂砂量

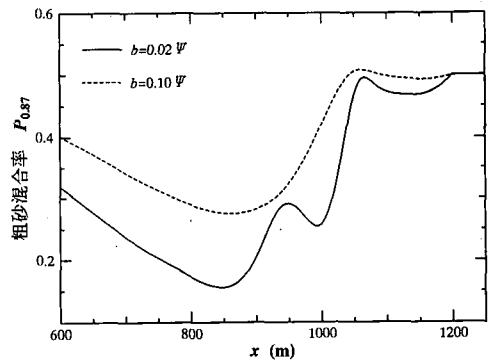


図-11 堆積型海浜での混合率変化

なお、図-9は細砂の均一砂、粗砂の均一砂および混合比50%の混合砂とで漂砂量の比較を行ったものである。この図中の曲線はすべて波浪の作用時間を4時間とした計算結果である。これより細砂の均一砂よりも混合砂の方が沖向き漂砂量が減少していることが分かる。これは砂村(1984)の実験結果と定性的に一致する。

図-10、図-11は沖波波高 $H_0=1\text{m}$ 、周期 $T=12\text{s}$ の波が40時間作用した場合で、堆積型海浜に相当する。 $x=1,100\text{m}$ 付近にステップができており、やはり粗砂の混合率が大きくなっている。ここでは遡上域の計算を行っていないため汀線極近傍の地形変化は正確に表されていないが、それを除けば汀線付近に粗砂が集まるという現地観測の結果と同じ傾向を示すといえる。

5. 結 論

混合砂の漂砂量はDibajnia・Watanabe(1992)の式に混合率を加味することによって表されることが確認された。また混合砂の場合、初期地形が平坦床か砂漣かによ

って砂連からシートフローへの遷移条件が大きく異なることが見出された。混合砂の場合の地形変化の数値計算を行ったところ、バーやステップの形成や粒径分布の点で少なくとも定性的には合理的な結果が得られた。

参 考 文 献

- 鈴木高二郎・渡辺 晃・磯部雅彦・M. Dibajnia (1994): 振動流作用下における混合粒径底質の移動現象について, 第41回海岸工学論文集, pp. 356-360.
- 砂村継夫 (1984): 砂浜決壊の防止工法とその適用性に関する研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 239-243.
- 田中 仁・吉竹豊尚・首藤伸夫 (1989): 波・流れ共存場における底質分級の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 264-268.
- 平野宗夫(1971): Armoringをとまなう河床低下について, 土木学会論文集, 第195号, pp. 55-65.
- 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, 第42回海岸工学論文集, pp. 406-410.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1992): Sheet flow under non-linear waves and currents, Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.