

波・流れ共存場における砂漣形状と漂砂量

渡辺 晃*・先灘正成**・磯部雅彦***

1. 緒 言

漂砂や海浜変形に関する研究は従来から活発になされており、近年では海浜変形の数値モデルも開発利用されている。しかしながら、モデルの基礎となるべき一般的な条件に適用可能な漂砂量算定式はまだ確立されたものとはいえない。波・流れ共存場の漂砂についての研究もいくつかなされているが、適用範囲のより広い漂砂量算定式を導くためには、更に実験データを蓄積する必要があると思われる。

本研究では、波に相当する振動流と定常流とが互いに平行に共存する場を対象に、従来の実験よりも振動流周期の長い条件下での砂漣諸元と漂砂量の実験データを得、それらと底質特性や水理量との関係を調べることを目的としている。

2. 実験方法

実験には還流装置付き任意波形振動流水槽を用いた。観測部は、長さ2 m、幅24 cm、高さ31 cmである。振動流としては、正（岸向き）の流速振幅 u_c と流速全振幅 u_T （図-1）との比で定義される非対称性 u_c/u_T を0.5、0.6、0.7の3種類、全振幅 u_T を54~86 cm/sの範囲、周

期 T を3 sと6 sの2種類に変化させた。 $u_c/u_T=0.5$ は正弦振動流であり、0.6と0.7の場合の流速変化は流れ関数法で定めた。また振動流に重合する定常流の流速 U も正・0・負の範囲で数段階変化させた。

用いた底質は中央粒径 $D=0.18$ mmの細砂と0.87 mmの粗砂である。各条件に対して底面を水平に均し、600 T 相当の間振動流と定常流を作用させ動的平衡に達した底面形状を測定した後、再び流れを10~60分作用させてから、最終地形を測定するとともに観測部両端の捕砂器にたまった底質の量を計測した。底面形状は10測線について連続式砂面計で測定した。これらのデータから砂漣の諸元と観測部区間中央断面でのネットの漂砂量を求めた。

また砂の運動の様子をVTRで記録した。更に、それぞれの流れの条件に対して、底面を平坦固定床にした状態でレーザ・ドップラー流速計で流速を測定した。以下の解析には底面より10 cmの高さでの流速を用いる。

3. 実験結果と考察

(1) 水粒子軌道径とシールズ数

流速波形や砂漣形状に関係する量の定義を図-1に示す。流速波形の代表量としては、 u_c 、 u_T 、 T の他、定常流流速 U 、ならびに合成流速 u が正または負である時間 T_+ 、 T_- 等がある。波による漂砂に関する従来の研究によれば、砂漣諸元や漂砂量に関係する水理量にはこの他に底面近傍の水粒子の水平軌道径 d_0 やシールズ数 Ψ があるので、振動流・定常流共存場に対してもこれらの量を定義しておく必要がある。

まず水平軌道径 d_0 に相当する量として、合成流速 u が正または負である時間内の水粒子変位量 d_{0+} と d_{0-} を次式で定義算定する。

$$d_{0+} = \int_{T_+} u \, dt, \quad d_{0-} = - \int_{T_-} u \, dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

次に無次元掃流力であるシールズ数 Ψ は、田中・首藤(1984)の波・流れ共存場に対する摩擦則を用いて算定する。ただし本実験では振動流が正負非対称の条件も含んでいるので、1周期中の正・負の流速時のそれぞれに対してシールズ数 Ψ_+ と Ψ_- を導入し、次のように近

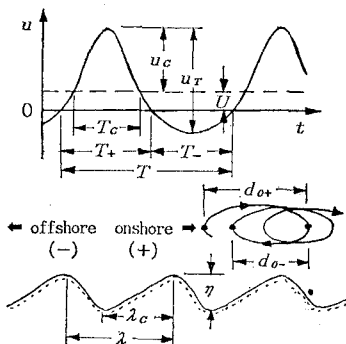


図-1 水粒子運動と砂漣の諸元

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 工修 安田生命保険相互会社

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

似的に評価することにする。すなわち Ψ_+ については、振動流成分を、流速振幅 u_c 、周期 $2T_c$ (図-1) の正弦波で近似し、この正弦波と定常流 ($u > 0$ のとき順流) の共存場の摩擦係数 f_{CW+} から式 (2) で計算する。同様に Ψ_- については、流速振幅 ($u_T - u_c$)、周期 $2(T - T_c)$ の正弦波と定常流 ($U > 0$ のとき逆流) の共存場の摩擦係数 f_{CW-} を用いて式 (3) で計算する。

$$\Psi_+ = \frac{f_{CW+} u_c^2}{2 s g D} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Psi_- = \frac{f_{CW-} (u_T - u_c)^2}{2 s g D} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 s は底質の水中比重であり、 $s = 1.64$ とする。

(2) 砂漣の形状と諸元

本実験ではいずれの条件でも砂漣が形成された。図-1 のように砂漣の波高 η 、波長 λ 、沖側斜面水平長 $\lambda\sigma$ を定義する。図-2 は粒径 D で無次元化した砂漣波長 λ と水粒子軌道径 d_0 との関係を示してものである。 d_0 とし

ては、式 (1) で計算される d_{0+} と d_{0-} のうち、 $\Psi_+ > \Psi_-$ のときは d_{0+} 、逆のときは d_{0-} を用いた。図中の実線は佐藤・堀川(1984)が振動流中の細砂の砂漣に対して求めた実験式を示す。本実験のデータは、ばらつきはあるものの、2次元砂漣(図中黒記号)については粗砂も含めこの実験式の関係を保ち満ち、3次元砂漣(白記号)の波長はやや小さくなっている。なお以下の図-3~6 中の記号は図-2 中のものと共通である。

佐藤ら(1986)にならい λ/d_0 と $(d_0/D) \cdot \Psi^{1/2}$ の関係で整理すると図-3を得る。ただし Ψ_+ と Ψ_- のうち大きい方の Ψ およびそれに対応する d_0 を用いた。図中の実線は振動流中の砂漣に対する佐藤ら(1986)による実験式を表すが、2次元砂漣についてはむしろ現地データに対して Sato(1987) が求めた関係に類似の図中破線の方が適合度がよい。

砂漣の波形勾配 η/λ と大きい方の Ψ の関係を、佐藤ら(1986)の実験式とともに図-4に示す。3次元砂漣については振動流中の砂漣に対するこの実験式と傾向があっているものの、2次元砂漣の η/λ は Ψ の小さいところでは実験式より小さく、 Ψ の大きいところでは逆に大きくなっている。 Ψ の小さいところのデータは $D = 0.87 \text{ mm}$ の粗砂に対するものであり、 Ψ の大きいところでずれが目立つのは $D = 0.18 \text{ mm}$ の細砂で特に定常流流速 U が大きい条件に対するものである。

佐藤ら(1985)によれば、 Ψ および d_0/D が大きい条件では3次元砂漣が形成される。図-5 は本実験の砂漣の2次元性を Ψ および d_0/D との関係で整理したものである。図中の破線は佐藤ら(1986)による3次元砂漣の形成限界を示す。本実験の3次元砂漣もこの限界を満たした条件範囲で形成されているが、細砂で合成流速の非対称性が大きい場合にはこの条件範囲でも2次元砂漣が生じている。粗砂の場合は常に2

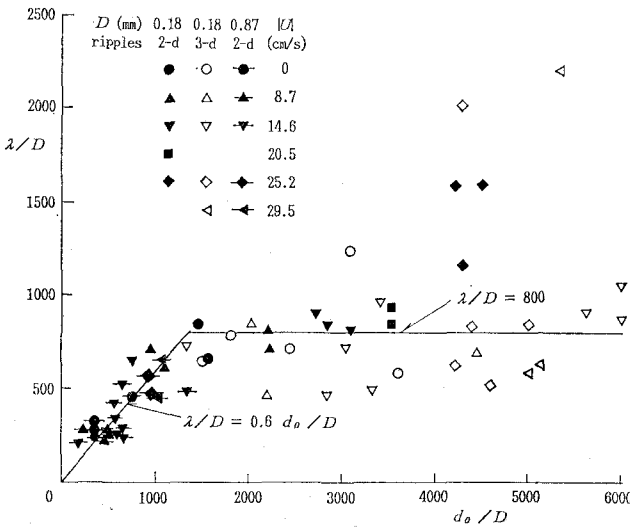


図-2 砂漣の波長と水粒子軌道径の関係

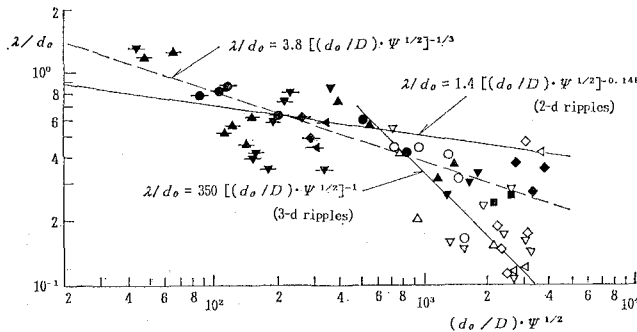


図-3 砂漣の波長と軌道径・シールズ数の関係

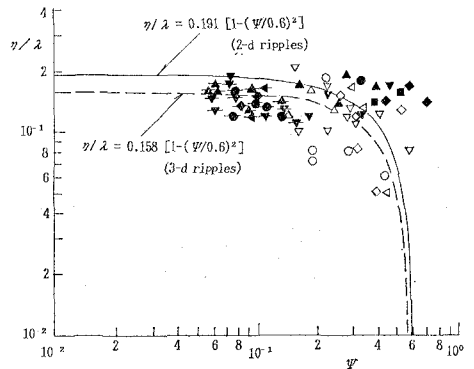


図-4 砂漣の波形勾配とシールズ数の関係

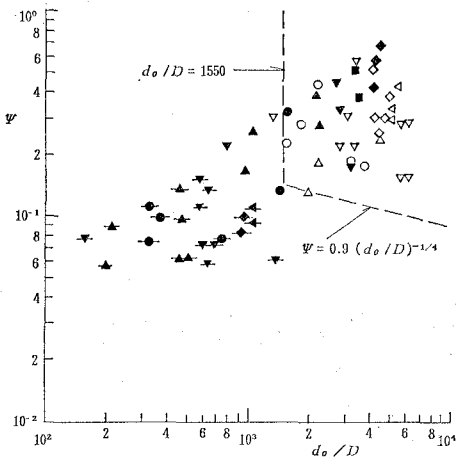


図-5 2次元砂漣と3次元砂漣の形成限界

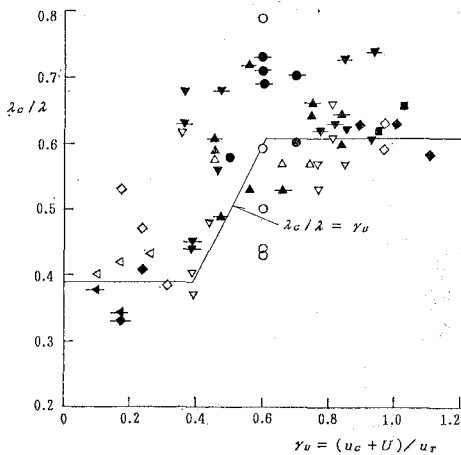


図-6 砂漣と流速の非対称性の関係

次元砂漣が形成されており、振動流のみに対するこの限界条件とは矛盾しない。

図-6 は砂漣の非対称性 λ_c/λ と合成流速の非対称性 $\gamma_u = (u_c + U)/u_T$ との関係を示す。 λ_c/λ と γ_u はともに 0.5 のときにほぼ対称であることを意味し、 $\gamma_u > 0.5$ では正の合成流速が卓越する。データのばらつきは大きい、 γ_u の増加につれて λ_c/λ も増加する傾向が認められる。なお図中の実線は、 λ_c/λ の上限が 0.61 (Sato, 1987)、下限が 0.39 であると仮定し、その間を $\lambda_c/\lambda = \gamma_u$ としたものである。

(3) 漂砂量

実験で得られた単位幅・単位時間当たりのネットの漂砂量 q から、次式により無次元漂砂量 Φ を計算した。

$$\Phi = \frac{(1 - \varepsilon_v) q}{w_0 D} \quad (4)$$

ε_v と w_0 は砂の空隙率と沈降速度であり、細砂 ($D =$

0.18 mm) に対して、 $\varepsilon_v = 0.44$ 、 $w_0 = 2.1$ cm/s、粗砂 ($D = 0.87$ mm) に対して $\varepsilon_v = 0.47$ 、 $w_0 = 8.2$ cm/s である。なお漂砂量は流速と同じく岸向きを正とする。

流れの条件による Φ の変化を図-7 と図-8 に示す。横軸に定常流速をとり、振動流の条件ごとに記号を変えてある。一見して漂砂量に及ぼす振動流・定常流の重合効果が複雑であることが分かる。この複雑な関係を 1 つの式で表現するのは当面は無理であると考えられるので、いくつかのタイプに分けて検討することにする。

図-7, 8 の結果および VTR による観察に基づき、共存場の漂砂形態を以下の 7 タイプに分類する。細砂については、 $T = 3$ s、 $|U| < 20$ cm/s の場合で正 (岸向き) の流速時に砂漣の沖側斜面に沿って生じた掃流砂が剝離渦に取り込まれて浮遊砂となり負の流速で冲向きに輸送さ

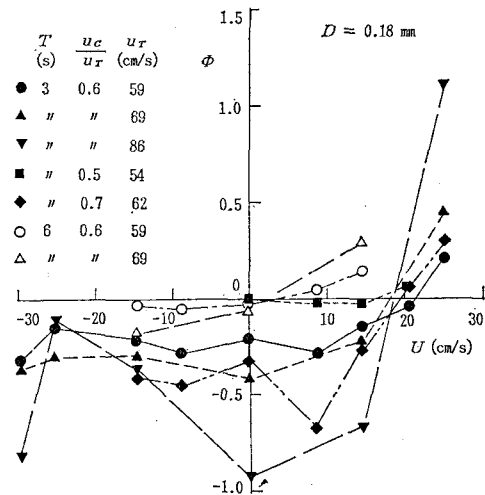


図-7 漂砂量と流れの諸元の関係 (細砂)

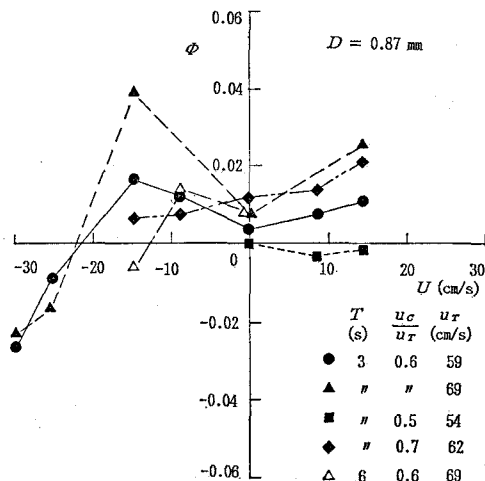


図-8 漂砂量と流れの諸元の関係 (粗砂)

れるタイプ I, $|U| > 20 \text{ cm/s}$ の場合で正 (または負) の流速で渦に取り込まれた浮遊砂が強い流れに乗ってそのままその方向に輸送されるタイプ II (またはタイプ III), $T=6 \text{ s}$ の場合でタイプ I に比して浮遊砂の舞上がり高さが大きいために定常流の方向に輸送されるタイプ IV に分ける. 粗砂については, $U \geq 0$ の場合で掃流砂が卓越し主に正の流速で岸側に輸送されるタイプ V, $U < -20 \text{ cm/s}$ の場合で主に掃流砂が大きな負の流速により沖向きに輸送されるタイプ VI, $-20 \text{ cm/s} < U < 0$ の場合で正の流速時に生じる岸向きの掃流砂に加え負の流速時の沖向き掃流砂を砂漣沖側斜面の剝離渦が取り込んで流速逆転時に岸側斜面に落とすために岸向きの漂砂が卓越するタイプ VII からなる. 以下ではタイプ別の漂砂形態に着目し, 各タイプに対する無次元漂砂量と共存場流れの特性量との関係を, パワーモデル的考え方をを用いて調べる.

a) タイプ I

正の流速時 (T_+ の間) に砂漣沖側斜面に沿って掃流移動し剝離渦に取り込まれる砂の単位面積当たり重量が $(\tau_+ - \tau_0) (T_+/T)$ に比例し, その沖側への移動距離が水粒子の沖向き変位量 d_{0+} に比例すると仮定すると, この結果生じる単位幅当たりの 1 周期平均沖向き漂砂量 q_+ は $(\tau_+ - \tau_0) (T_+/T) (d_{0+}/T)$ に比例する. ただし $\tau_+ = \rho s g D \Psi_+$ は正の流速時の底面摩擦応力の振幅で, τ_0 は砂の全面移動限界摩擦応力である. 岸向き漂砂量 q_+ についても同様に考え, ネットの漂砂量 $q = (q_+ - q_-)$ を式 (4) で無次元漂砂量 Φ に換算すると, Φ は次式で定義される流れの 1 種の無次元パワー P_I に比例することになる.

$$P_I = (\Psi_- - \Psi_0) \frac{T_-}{T} \frac{d_{0+}}{w_0 T} - (\Psi_+ - \Psi_0) \frac{T_+}{T} \frac{d_{0-}}{w_0 T} \dots (5)$$

図-9 にタイプ I に対する Ψ と P_I の関係を示す. すべて細砂であるので限界シールズ数 Ψ_0 は 0.11 (渡辺, 1979) とした. 両者は正の相関を有し近似的に次式の関係がある.

$$\Psi = 1.5 P_I \dots (6)$$

b) タイプ II, III, V, VI

この 4 種のタイプは, 移動形態はそれぞれ若干異なるものの, 岸向きまたは沖向きの流速時に移動状態におかれた底質がそのままその方向に輸送されるという点では共通しており, タイプ I とはちょうど逆になっている. 従ってこれらのタイプについては, 次式で定義される無次元パワー P_{II} が Φ と関係するものと予想される.

$$P_{II} = (\Psi_+ - \Psi_0) \frac{T_+}{T} \frac{d_{0+}}{w_0 T} - (\Psi_- - \Psi_0) \frac{T_-}{T} \frac{d_{0-}}{w_0 T} \dots (7)$$

図-10 に示す結果によれば, タイプ II のデータのばらつきが大きく, 他のタイプと若干傾向が異なるものの, 次式の関係がほぼ成立している.

$$\Phi = 0.15 P_{II} \dots (8)$$

ただし粗砂に対する Ψ_0 は渡辺 (1979) によれば 0.06 程度の値となるが, 本実験ではこれ以下の Ψ でも有意な漂砂

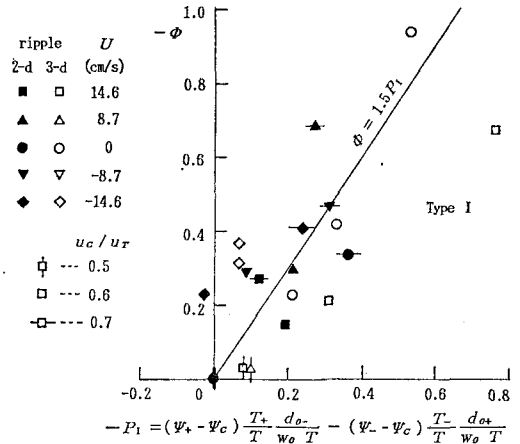


図-9 漂砂量と流れのパワー (タイプ I)

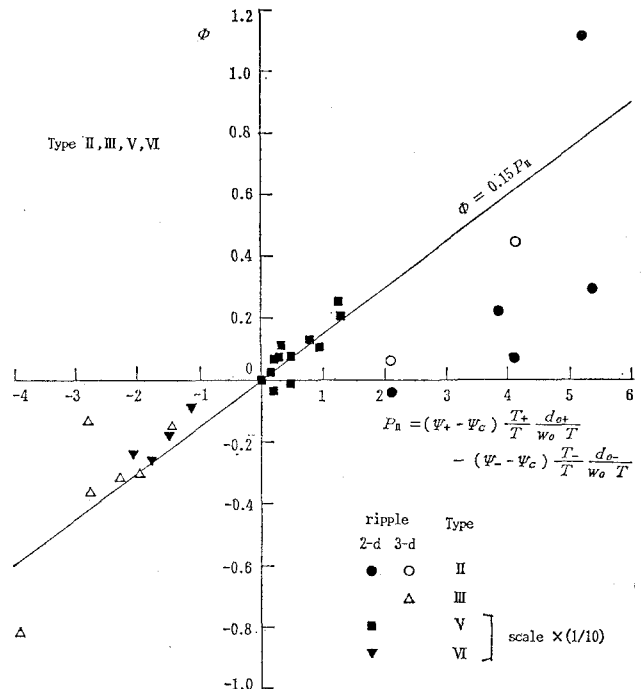


図-10 漂砂量と流れのパワー (タイプ II, III, V, VI)

量が認められたので粗砂の Ψ_0 は 0.04 とした。

c) タイプVII

このタイプでは、正の流速時に生じる岸向きの掃流砂に加え、負の流速時の沖向き掃流砂も渦に取り込まれたのち岸向き漂砂に寄与する。従って、 P_I と P_{II} それぞれの岸向き寄与分をとり、式 (6), (8) の係数比も考慮して、次式で有効無次元パワー P_{III} を定義する。

$$P_{III} = (\Psi_- - \Psi_0) \frac{T_-}{T} \frac{d_{0+}}{w_0 T} + 0.1(\Psi_+ - \Psi_0) \frac{T_+}{T} \frac{d_{0+}}{w_0 T} \quad (9)$$

図-11によれば、タイプVIIの実験データに対しては、 $\Phi = 2.7 P_{III}$ (10)

なる関係が近似的に成り立っている。なお本実験でタイプVIIの砂移動が生じるときの砂漣は常に2次元的であった。

d) タイプIV

細砂で $T=6$ s の場合に現われるこのタイプでは、図

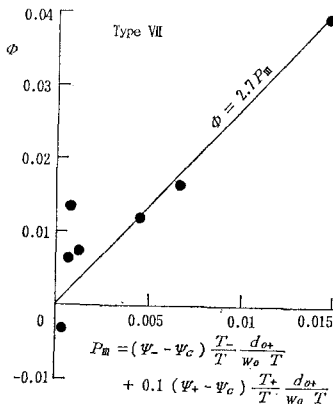


図-11 漂砂量と流れのパワー (タイプVII)

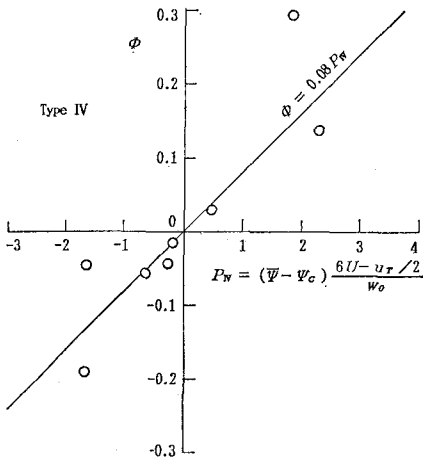


図-12 漂砂量と流れのパワー (タイプIV)

—7 (白記号) において定常流の正負に応じてネットの漂砂の向きも反転していることから、渡辺ら(1984)による漂砂量式のように振動流による成分と定常流による成分の和でネットの漂砂量が与えられるものと思われる。よって次式で有効無次元パワー P_{IV} を定義する。

$$P_{IV} = (\bar{\Psi} - \Psi_0) \frac{6U - u_T/2}{w_0} \quad (11)$$

$\bar{\Psi}$ は次式で計算される1周期間代表シールズ数である。

$$\bar{\Psi} = \frac{\Psi_+ T_+ + \Psi_- T_-}{T} \quad (12)$$

図-12に示されるように、 Φ と P_{IV} の相関は良好で、 $\Phi = 0.08 P_{IV}$ (13)

の関係がある。なおこのタイプの時は3次元砂漣が形成されていた。

4. 結 語

還流装置付き任意波形振動流水槽での移動床実験データに基づき、波(振動流)・流れ(定常流)共存場における砂漣形状と漂砂量について検討した。共存場に対する水粒子変位量とシールズ数ならびに合成流速の非対称性を定義し、それらを用いると共存場の砂漣の特性量がかんり統一的に整理されることが示された。また漂砂の移動形態を7タイプに分類し、各タイプに対する漂砂量と共存場流れのパワーを代表する量の関係を見出した。ただし本研究で得られた漂砂量と流れのパワーの関係式には、砂漣の特性量は直接は現われない。漂砂機構に更に深く立ち入った検討を進めるとともに、実験データを蓄積することによって、より普遍的な漂砂量算定式を導くことが今後の課題である。

最後に、本研究は文部省科学研究費による研究成果の一部であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃 (1985): 非対称振動流下における砂の移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 283~287.
- 佐藤慎司・堀川清司 (1984): 非対称振動流下における砂漣上の砂移動に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 286~290.
- 佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃 (1986): 不規則振動流下における砂漣形状と漂砂量, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232.
- 田中 仁・首藤伸夫 (1984): 波・流れ共存場の抵抗則と境界層の区分, 土木学会論文報告集, No. 342, pp. 10~25.
- 渡辺 晃 (1979): 振動流境界層と海浜過程, 第15回水工学研究修会講義集, pp. B-3-1-B-3-13.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406~410.
- Sato, S. (1987): Oscillatory Boundary Layer Flow and Sand Movement over Ripples, Doctoral Dissertation, Univ. of Tokyo, 138p.