

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

鈴木高二朗*・渡辺 晃**・磯部 雅彦**・Mohammad Dibajnia***

1. はじめに

現地の海岸では波によるふるい分け作用を受けて局所的な砂の粒径は均一化する傾向にあるが、養浜や人工海浜造成などの人為的要因や、季節的な波浪場の変化などの自然的要因によって、分級の程度が低い混合粒径となる場合も多い。

従来までに均一砂に対する漂砂の研究は多数行われているが、混合粒径の砂の移動現象についての研究は数例しかない。掃流状態での混合砂の漂砂については田中ら(1988)により実験が行われ、粒径別移動限界や粒径別漂砂量式が得られている。また、砂漣上の浮遊・掃流状態での混合砂の漂砂については砂村(1984)により、混合砂にすると細砂の沖向き漂砂量が激減することが確かめられている。しかし、砂漣の形状や砂漣上での混合砂の漂砂の移動形態についてはほとんど解明されていないし、さらに流速が大きい場合に起こるシートフロー状態での漂砂移動についての研究は皆無である。

そこで本研究では振動流装置を用いて流速の大きな条件での実験を行い、混合砂の砂漣形状、漂砂の移動形態、漂砂の方向、漂砂量について調べることを目的とした。

2. 実験方法

実験には任意波形振動流水槽を用いた。観測部は長さ2 m、幅12 cm、高さ20 cmである。観測部の両端には捕砂器を設置し、砂の流失を防止している。振動流の周期 T は3 sで、流速の時間波形の非対称性については、その程度を表すパラメータである U_c/U (図-1)の値で0.5(対称)、0.7の2種類を選び、全振幅 U は0.44~1.51 m/sの範囲で変化させた。なお、流速の時間波形は、クノイド波理論第1次近似解により決定した。

本実験で使用した底質は、中央粒径 $d=0.18$ mm、沈降速度 $w_0=2.1$ cm/sの細砂と $d=0.87$ mm、 $w_0=10.0$ cm/sの粗砂である。まず、仕切り板によって観測部を2分し、混合砂を岸側、沖側に同量ずつ、厚さ5.5 cmに敷

き均した。その後振動流を作用させ、漂砂移動の様子を8 mmビデオで撮影した。さらに、安定な砂漣が形成された後で砂面計によって砂面形状を計測した。

従来、漂砂量の測定には、(1)観測部端部に捕砂器を設置し捕砂器にたまる量で漂砂量を求める方法、(2)地形変化から逆算する方法、(3)観測部を2分し両側の砂の重量を測定する方法などが用いられてきた。

混合砂は非対称振動流を作用させると岸沖方向に分級し各場所での混合比が変化するため、(2)の方法では細砂・粗砂それぞれの漂砂量を計測することはできない。また、沖方向に細砂、岸方向に粗砂が移動するような場合、観測部端部付近では混合比が一定に保たれないため、

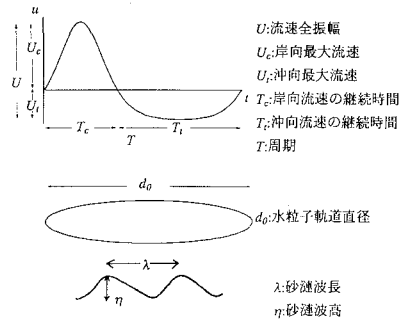


図-1 水粒子運動と砂漣の諸元

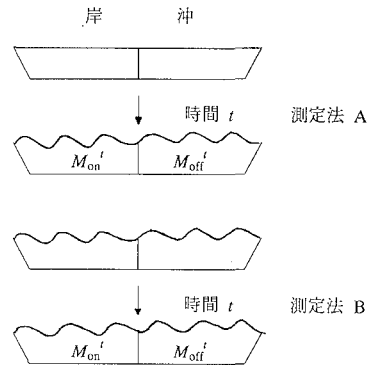


図-2 漂砂量測定法

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
 ** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

所定の混合比に対する漂砂量を求める場合、(1)の方法も不十分である。

以上の理由から本研究では(3)の方法を応用し、以下に示すような方法で漂砂量を求めた(図-2)。

A) 初期平坦床から実験を開始して安定砂面が形成された後、更に振動流を作用させ、しばらく時間がたった後で観測部を中央で2分して混合砂を採取する。その後120°Cで6~12時間程度乾燥させた後ふるい分けして細砂、粗砂それぞれの重量を測定し、初期平坦床からの漂砂量を求める。

しかし、この測定法Aでは定常状態の砂面ができるまでに長い時間がかかるため、結果の解釈には注意が必要となる。そこで安定砂面形成後の正確な漂砂量を得るため、安定砂面形成後から最終地形までの時間を変えて、Aの方法で2回漂砂量を測り、その差をとって安定砂面形成後の漂砂量を求めてみた。しかし、結果としては砂漣の再現性が悪く、砂漣が発生するまでの時間や砂漣の発生する位置によって影響を受け、実際には岸向きに移動した粗砂が差引すると見かけ上沖向きの移動になってしまったり、沖向きのはずの細砂が見かけ上岸向き移動になってしまうことがあり、データの信頼性が逆に低くなった。

B) そこで、事前に行なった各条件での砂漣形状の計測結果を参照して人工的に砂漣を作り、振動流を作用させて砂漣上の漂砂量を求める方法を試みた。

$$Q = \left(\frac{M_{on}^t - M_{off}^t}{2} \right) / (t \cdot B) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 M_{on}^t は時刻 t に観測断面岸側にある砂の量であり、 M_{off}^t は同様に時刻 t に観測断面沖側にある砂の量である。また、 B は観測断面の幅を示している。

3. 砂面形状

3.1 シートフロー状態の発生

均一砂の砂面形状は作用流速が大きくなるに従い、掃流状態での平坦床、砂漣、シートフロー状態での平坦床という様に変化する。今回の実験では混合砂を平坦に敷き均した後で振動流を作用させたが、その結果図-3に示されるように、シートフローが均一砂の場合より小さ

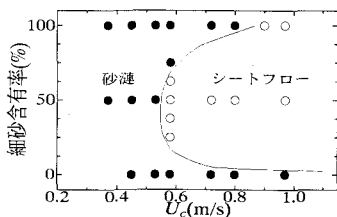


図-3 砂面形状の区分図

な流速で発生し、混合比で比較すると細砂含有率が50%の時に最もシートフローになりやすいことが分かった。

ただし、本研究での混合砂のシートフローは後に述べるように均一砂のシートフローとは若干異なっている。しかし、簡単のためここではシートフローと呼ぶことにする。また、シートフローの発生条件も実験開始前の地形が平坦か砂漣かで異なっているため注意を要する。

3.2 砂漣形状

図-1のように砂漣波長 λ 、砂漣波高 η を定義する。また、水粒子軌道直径 d_0 は波の半周期間に水粒子が移動する距離である。図-4は正弦振動流作用下における砂漣波長 λ と d_0 の関係を佐藤ら(1986)の実験式とともに示したものであり、図-5は砂漣波形状配 η/λ と d_0 との関係を示したものである。ただし、佐藤らの式を用いるに当たっては本実験の条件での d_0 と水粒子流速の自乗平均平方根 u_{rms} との関係を用いて、式中のシールズ数 τ_{rms} を d_0 に変換した。

d_0 がある値よりも大きくなると細砂(均一砂)の砂漣波長 λ は小さくなる傾向にあるが、混合砂では細砂含有率が75%の場合でも砂漣波長は大きくなり続けた。また、砂漣波形状配 η/λ も粗砂(均一砂)の砂漣波形状配の線にのっている。これらのことから混合砂の砂漣形状は粗砂の影響を強く受けていることが分かる。

非対称振動流作用下における砂漣波長 λ と d_0 の関係では、ある水粒子軌道直径 d_0 までは混合砂の砂漣波長は細砂と粗砂の中間値をとっていたが、 d_0 が大きくなると

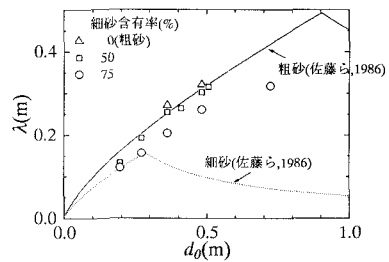


図-4 正弦振動流作用下の砂漣波長 λ

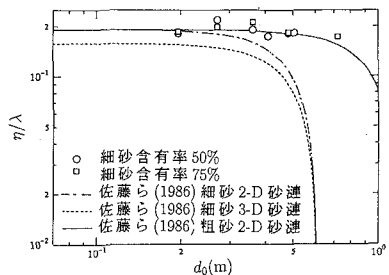


図-5 正弦振動流作用下の砂漣波形状配 η/λ

シートフローになり、地形は平坦であった。

4. 漂砂の移動形態

以下に目視によって観察された漂砂の移動形態について述べる。

4.1 砂漣上漂砂移動形態

非対称振動流作用下では図-6に示されるような漂砂の様子が見られた。

- 1) 岸向き流速時には沖側斜面の砂が掃流砂として移動し、砂漣の頂部に達すると渦に巻き込まれて浮遊する。
- 2) 浮遊した砂は一部が砂漣の岸側斜面に沈降し堆積するが、主に粗砂が堆積する。
- 3) 渦に巻き込まれたまま浮遊し続けた砂は流速が沖側に反転すると砂漣の沖側に運ばれる。
- 4) 粗砂はすぐに堆積するが、細砂は粗砂よりも沈降速度が小さいため浮遊し易く、粗砂より2~3倍程度沖側へ運ばれて堆積する。

こうして一般に砂漣の岸側斜面から頂部にかけては粗砂が、沖側斜面にかけては細砂が多く集まる。また、混合砂内の細砂・粗砂の移動方向は細砂が沖向き、粗砂が岸向きであり、時間とともに分級する。

一方、正弦振動流作用下では砂漣頂部での粗砂の移動が顕著で、砂漣頂部は粗砂によって被覆される。図-8は砂漣頂部に粗砂が集まっていることを示しており、砂漣頂部は粗砂が重なりあいその間に細砂が入り込むことによって形成されていることが分かる。

細砂では砂漣波長が増加しなくなるような流速の条件でも、混合砂にすると砂漣が大きくなり続けるのは、この様に粗砂がアーミング効果により砂漣の安定性を高めているためであると考えられる。

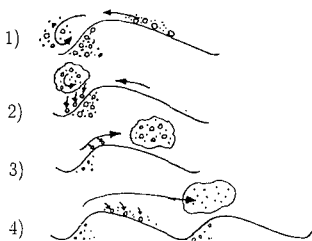


図-6 非対称振動流作用下混合砂砂漣上の漂砂移動形態

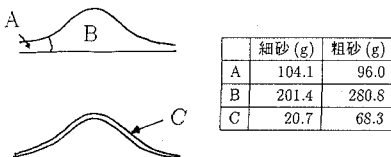


図-7 正弦振動流作用下混合砂砂漣上の粒度分布

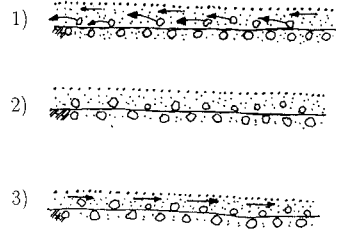


図-8 シートフロー状態

4.2 シートフロー状態

図-8に示されるように、1) 岸向き流速時には粗砂は掃流移動形態をとり、細砂は5mm程度の層を成して浮遊して岸向きに移動する。2) 流速が沖向きに反転すると粗砂は堆積して移動が止まる。3) 一方、細砂は粗砂より浮遊している時間が長く、沖向き流速時に沖方向に運ばれ粗砂より沖側に堆積する。しかし、細砂でも岸向き流速時の方がより大きく移動するため、ネットの漂砂量は岸向きになる。

5. 漂砂量

5.1 初期平坦床から最終地形までの平均漂砂量(測定法A)

図-9は細砂含有率が50%の場合の図で、岸向き最大流速 u_c を用いて計算したシールズ数 Ψ_c と安定砂面形成後の漂砂量 Q の関係を示している。参考のため均一砂に対する渡辺(1981)の式をのせた。本論文ではこれ以降、 Q は混合砂内の細砂、粗砂の漂砂量にそれぞれの混合率の逆数を乗じて求めている。

一見して混合砂の細砂、粗砂は渡辺の式に類似した傾向を示している。また、定量的にみると渡辺式の1/5~1/10程度と小さい値をとっており、若干粗砂の方が細砂よりも移動量が多い傾向にある。

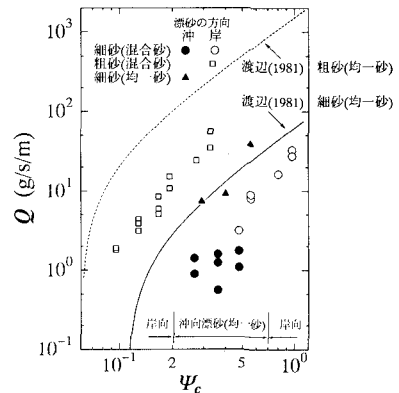


図-9 シールズ数と混合砂の漂砂量(細砂含有率50%)

漂砂の移動方向に関しては、一般に均一砂ではシールド数が大きくなるに従って漂砂の方向が変化する。流速が小さいうちは掃流状態で岸向き漂砂であり、流速が大きくなり砂漣上での浮遊砂が卓越するようになると沖向き漂砂になる。さらに流速が大きくなるとシートフロー状態になり、岸向漂砂、沖向漂砂の両方の場合がある。今回、 $U_c/U=0.70$ の条件で均一砂の実験を行ったところ、おおよそ図-9の下部に示したように漂砂の方向が変化する。

一方、混合砂の漂砂の方向は粗砂の場合はすべて岸向きで、細砂の場合は砂漣ができた場合に沖向き、シートフロー状態で岸向きになっており、細砂・粗砂共に沖向漂砂の領域が減少していることが分かる。

5.2 Dibajnia・Watanabe (1992) の式による混合砂漂砂量の評価

混合砂の漂砂の方向は、流速だけでなく混合比によっても変化する(図-10)。Dibajnia・Watanabeの式は均一砂の漂砂の方向も評価できるが、今回混合比を表すパラメータを追加することで混合砂の漂砂量を漂砂の方向も含めて評価した。すなわち、ネットの無次元漂砂量 Φ_s を次式で与える。

$$\Phi_s = Q/w_0 d = a \cdot \text{sign}(\Gamma) |\Gamma|^{0.55} \dots \dots \dots (2)$$

$$\Gamma = \frac{u_c T_c (\Omega_c^3 + \Omega_i^3) - u_i T_i (\Omega_c^3 + \Omega_i^3)}{(u_c + u_i) T} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 T : 波の周期、 T_c 、 T_i は岸向きおよび沖向き流速の継続時間であり、 Q は前述したように混合砂内の細砂、粗砂の漂砂量に混合率の逆数を乗じたものである。また、 Ω_c 、 Ω_i 、 Ω_t 、 Ω_b 、 u_c 、 u_i は以下に示す通りである。

$$\begin{cases} \text{if } \omega_c \leq \omega_{\text{critical}} & \begin{cases} \Omega_c = \omega_c \cdot 2w_0 T_c / d \\ \Omega_i = 0 \end{cases} \\ \text{if } \omega_c > \omega_{\text{critical}} & \begin{cases} \Omega_c = 2w_0 T_c / d \\ \Omega_i = (\omega_c - \omega_{\text{critical}}) \cdot 2w_0 T_c / d \end{cases} \\ \text{if } \omega_t \leq \omega_{\text{critical}} & \begin{cases} \Omega_t = \omega_t \cdot 2w_0 T_t / d \\ \Omega_b = 0 \end{cases} \\ \text{if } \omega_t > \omega_{\text{critical}} & \begin{cases} \Omega_t = 2w_0 T_t / d \\ \Omega_b = (\omega_t - \omega_{\text{critical}}) \cdot 2w_0 T_t / d \end{cases} \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

$$u_c^2 = \frac{2}{T_c} \int_0^{T_c} u^2 dt, \quad u_i^2 = \frac{2}{T_i} \int_{T_c}^{T_i} u^2 dt \dots \dots \dots (5)$$

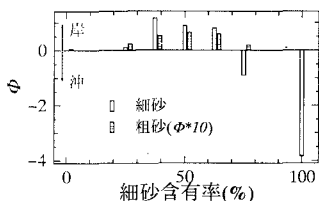


図-10 細砂含有率と漂砂量 ($U_c=0.57$ (m/s), $U_c/U=0.70$)

$$\omega_c = \frac{T_{\text{fall}}}{T_c} = \frac{1}{2} \frac{u_c^2}{sgw_0 T_c} \cdot C, \quad \omega_t = \frac{T_{\text{fall}}}{T_t} = \frac{1}{2} \frac{u_t^2}{sgw_0 T_t} \cdot C \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 d : 粒径、 w_0 : 沈降速度、 $s=(\rho_s-\rho)/\rho$ 、 ρ_s 、 ρ : 砂と水の密度である。詳細は、Dibajnia・Watanabe (1992) に示されている。

また、 C : 細砂・粗砂それぞれの含有率であり、混合砂の影響は式(6)中の C で表現されている。計算では細砂・粗砂それぞれについて C を与えて漂砂量を求める。 ω_c 、 ω_t は底質の舞上がり強度あるいは浮遊濃度に関わる指標であり、小さいほど砂が舞上がりにくい。ここでは、混合砂にすると細砂・粗砂それぞれが互いの舞上がりを妨げるものと考えて C を導入した。

一方、 ω_{critical} は砂漣上漂砂の場合には0.03をシートフローでは1.00というように区別して用いて計算した。

ところで、式中 a はDibajnia・Watanabe (1992)において砂村 (1982)、佐藤ら (1985)、渡辺ら (1989)のデータを用いて決定され、 $a=0.001$ とされている。しかし、

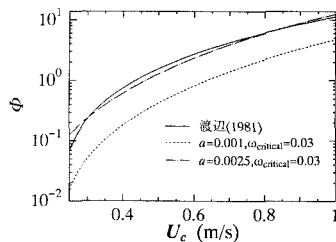


図-11 渡辺式とDibajnia・Watanabe式との比較 ($U_c/U=0.70$)

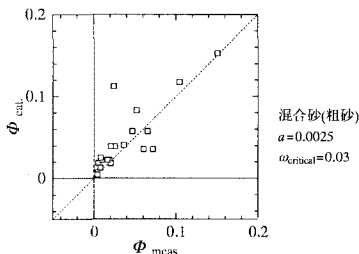
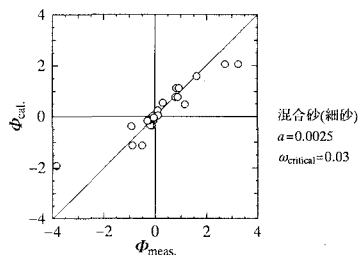


図-12 混合砂の漂砂量の実験値と計算値

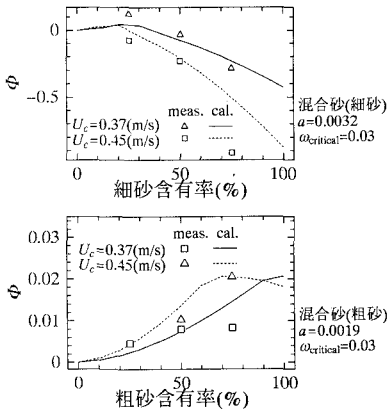


図-13 細・粗砂の含有率と漂砂量

3者の実験データはそれぞれ異なった傾向を示しており、 a 値は佐藤らのデータでは大きく、渡辺らのデータでは小さくなる傾向にある。また、従来の渡辺 (1981) の式と Dibajnia・Watanabe の式を比較すると、 $U_c/U = 0.70$ の場合、 a が 0.001 より大きい場合に両式が一致するようである (図-11)。

図-12 は $a = 0.0025$ として混合砂の漂砂量を細砂・粗砂に分けて評価したものである。実験値と計算式は概ねよく一致する。

5.3 安定砂面形成後の漂砂量 (測定法 B)

図-13 は測定法 B によって得た細砂・粗砂含有率と漂砂量の関係である。 a 値は細砂で 0.0032、粗砂で 0.0019 の時に一致度が良い。 $a = 0.0025$ と異なる理由としては以下のことが考えられる。

1) 砂漣内部の粒度分布が実験 A での砂漣内部より均一化していて、砂漣岸側斜面から頂部にかけて粗砂が覆っているということがなく細・粗砂の浮遊が実験 A の場合より卓越していた。

2) 実験 A では砂漣発生前の漂砂の方向が岸向きで細砂の場合には逆のため、平均漂砂量が砂漣発生後の漂砂量より細砂で小さく、粗砂で大きくなっている可能性がある。

6. 結 論

本研究では振動流装置を用いて流速の大きな条件での混合砂の漂砂について調べ以下の結果を得た。

- 1) 混合砂では均一砂より小さな流速でシートフローになり、細砂含有率 50% の場合に最もなりやすい。
- 2) 混合砂の砂漣は粗砂の影響を強く受ける。正弦振動流作用下では粗砂が砂漣の安定性を高めることから、細砂の均一砂では大きな砂漣ができないほど大きな流速の条件でも砂漣が大きくなる。
- 3) 混合砂の漂砂量は渡辺 (1981) の均一砂の式と似た傾向を示し、定量的には 1/5~1/10 と小さい値をとる。また、混合砂にすると細砂・粗砂ともに漂砂の方向は岸向きになりやすくなる。
- 4) Dibajnia・Watanabe (1992) の式に細砂含有率を加味することで混合砂の漂砂量を評価した。その結果、実験値と計算値でよい一致が得られた。

参 考 文 献

佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃 (1984): 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, 海岸工学講演会論文集, Vol. 32, pp. 283-287.

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, 海岸工学講演会論文集, Vol. 33, pp. 228-232.

砂村継夫 (1982): 浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, Vol. 29, pp. 239-243.

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, 5. 新工法文部省科学研究費 自然災害特別研究研究成果, No. A-5-1, pp. 75-91.

田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀堯三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 海岸工学講演会論文集, Vol. 35, pp. 307-311.

渡辺 晃 (1981): 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 海岸工学講演会論文集, Vol. 28, pp. 285-289.

渡辺 晃・先灘正成・磯部雅彦 (1989): 波・流れ共存場における砂漣形状と漂砂量, 海岸工学講演会論文集, Vol. 36, pp. 299-303.

Dibajnia, M. and A. Watanabe (1992): Sheet Flow under nonlinear waves and currents. Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 2015-2028.