

シートフロー状漂砂の移動機構と net の漂砂量

山下俊彦*・日比康生**・寺島貴志***

1. はじめに

シートフロー状態の漂砂は、多量の砂移動が生じるため、海浜変形を予測する際に重要である。しかし、シートフロー状砂移動を発生させるためには大きな底面流速の流れを用いることが必要であり、研究される様になったのは比較的最近のことである。実験的研究としては、香取ら (1980)¹⁾、著者ら (1984)²⁾、(1985)³⁾、Ahilan ら (1984)⁴⁾ 等がある。測定上最も困難なものは高濃度部分の濃度測定であり、香取ら¹⁾は抵抗線式濃度計、著者ら²⁾は水路の側壁に接している粒子を数えることにより求めている。しかし、濃度の測定例は少ないのが現状である。理論的研究としては、Ahilan ら (1984)⁴⁾、(1977)⁵⁾、榎木ら (1984)⁶⁾、香取 (1986)⁷⁾、著者ら (1987)⁸⁾、により行なわれている。一方、海浜変形計算に必要となる net の漂砂量については、実験、理論ともまったく行われていないのが現状である。

本研究では、まず、水平床上振動流場でのシートフロー状漂砂の濃度分布を含めた詳細な測定を行ない砂移動機構を明らかにする。次に、斜面床上振動流場でのシートフロー状砂移動の実験を行い、net の漂砂量を測定する。さらに、Ahilan ら (1987)⁴⁾ の理論を、斜面床上、および正弦振動流場（あるいは非対称振動流場）にまで拡張し、net の漂砂量の解析を試み、斜面勾配の影響による net の漂砂量について実験結果と比較検討する。

2. 実験装置及び方法

実験には、多層の砂移動が生じ斜面勾配の影響が調べられる任意の勾配 ($\tan \beta = 0 \sim 1/10$) に傾斜できる前報⁹⁾と同様の U 字管振動流装置を用いた。測定した諸量は、底質粒子の移動速度 u_b 、濃度 c 、移動層厚 δ_s 、net の漂砂量 Q である。 u_b 、 c 、 δ_s については、底質粒子の運動をビデオで撮影し、それを解析することによって求めた。濃度分布は、平野ら (1978)¹⁰⁾ と同様な方法で求めた。すなわち、水をポスターカラーで着色する等して側

表-1 底質粒子の特性

種類	比重 S	粒径 d (mm)	形状	沈降速度 W_0 (cm/s)
バンライト (帝人化成)	1.20	2.7	円柱状	8.4
ジュラコン (ポリプラスチックス)	1.41	2.8	球状	11.1
ジュラコン (ポリプラスチックス)	1.59	2.3	円柱状	16.2
人工真珠	1.60	3.0	球	16.6

表-2 実験条件

Case	周期 T (s)	流速振幅 U_m (cm/s)	粒径 d (mm)	比重 S	測定項目 (勾配)
1	3.08	84.9	3.0	1.60	$u_b, c, \delta_s(O)$
2	3.51	70.6	2.8	1.41	$u_b, c, \delta_s(O)$
3	3.52	79.6	2.8	1.41	$u_b, c, \delta_s(O)$
4	3.53	89.0	2.8	1.41	$u_b, c, \delta_s(O)$
5	3.56	97.5	2.8	1.41	$u_b, c, \delta_s(O)$
6	3.45	61.5	2.7	1.20	$u_b, c, (O)$
7	3.45	59.0	2.7	1.20	$Q(1/100, 1/50, 1/30, 1/20, 1/10)$
8	3.48	74.6	2.7	1.20	$Q(1/100, 1/50, 1/30, 1/20)$
9	3.53	98.0	2.3	1.59	$Q(1/50, 1/20)$

壁に接している粒子だけを数えられる様にし、鉛直方向に 5 mm あるいは 1 cm ごとに分割し、各々の高さにおいて水平方向に 5 cm の範囲に存在する粒子数より濃度分布を求めた。net の漂砂量 Q は、流れ作用前後の地形変化より求めた。

底質粒子としては、移動状況が把握しやすい様に数色に着色した表-1 に示す 4 種類を用いた。円柱状の粒子については、直径と長さは同程度であり、粒径はその体積を球に換算したときの直径とした。実験条件を表-2 に示す。Case 1~6 は水平床上、Case 7~9 は斜面床上の実験である。

3. 水平床上の砂移動

3.1 移動状況・移動層厚

底質粒子の移動状況、移動機構については、すでに前

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 鹿島建設

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ

報³⁾で報告した。ここでは、前報ではみられなかった以下の2つの現象と移動層厚について述べる。

図一1は、移動層厚 δ_s の時間変化を示したものである。 δ_s は移動している層が流れを静止した時に取る厚さで移動層下端はすぐ下の粒子を半周期の間に1個乗り越える位置とした。 t は実験開始からの時間である。移動層厚は実験開始から $t=0.5$ 分まで急激に増加し、その後1分間ほど徐々に増加し一定値を取る。しかし、それは定常状態とはならず数分後には移動層は急激に減少し、また徐々に増加し前と同じ一定値を取る。その後、このような現象がほぼ周期的に繰り返えられる。この周期的現象を底質粒子の運動から見ると、下層の高濃度の部分の運動が原因と考えられる。すなわち、移動層厚が一定値を取る初期では、下層は全体にわたってせん断的運動が起っている。しかし、時間の経過とともに最下端を除く下方で粒子どうしのかみ合せがきつくなりほぼ剛体的な運動をする様になり、その領域が時間と共に上方に増加し、その層がある厚さに達すると最下端の層も動かなくなり、移動層が急激に減少する。その後、中層からの運動量輸送が起こり徐々に移動層は増加する。この現象がどの様な条件下で発生するかは現在の所明らかではないが、今回の実験では Case 3~5 でみられた。流速振幅の大きい方が移動層厚の変化量が多く、周期は短か

った (Case 3 で 1.5 cm, 7 分, Case 4 で 2.3 cm, 22 分, Case 5 で 3.7 cm, 1.9 分)。

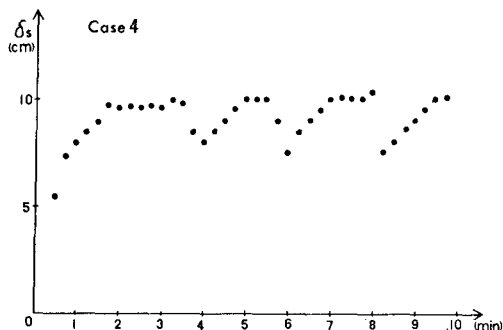
図一2に、移動層厚 δ_s とシールズ数 Ψ_m の関係を示す。 Ψ_m は、Jonson (1966)¹¹⁾ の抵抗係数を用いて計算した。図一1に示した様な δ_s の周期的変化がある場合には最大値(一定値)とした。実験値は式(1)(実線)でよく近似でき、 δ_s/d は Ψ_m の2乗に比例することがわかる。破線は前報¹²⁾で報告した式(2)である。図一1よりわかる様に

$$\frac{\delta_s}{d} = 70 \Psi_m^2 \dots\dots\dots (1)$$

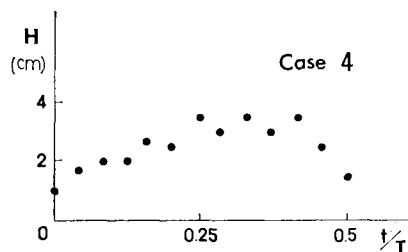
$$\frac{\delta_s}{d} = 3.7 \Psi_m^{0.75} \dots\dots\dots (2)$$

移動層厚は流れ作用後急激に増加するが、前報の場合には流れは最初の半周期しか作用させなかったため、層厚が薄くなったものと考えられる。

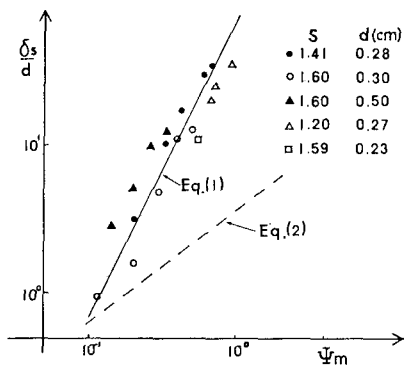
前報³⁾では、移動層内の粒子の運動は流れの方向に一樣であったが、今回の実験では上層部が波状になる場合もあった。図一3にその波高の半周期の変化の一例を示す。波高は半周期の間かなり変化し、減速時に大きくなっていることがわかる。減速時には波状の下流側に渦が発生し、流れ反転時には渦が放出される。このような現象は底質粒子の鉛直方向の巻き上げに重要な役割をはたしている。



図一1 移動層厚の時間変化



図一3 界面波高の半周期変化



図一2 移動層厚とシールズ数との関係

3.2 速度分布、濃度分布、漂砂量

図一4に、底質の速度、濃度、漂砂量各々の分布の測定結果の一例を示す。 z は流れを作用させない時の底質の上面を0、位相は主流の反転時を0とした。(a)の速度分布については、前報³⁾で詳述したが、位相 0π 付近では $z=-10$ cm 程度のかかなり深い層まで流れの圧力勾配により移動し、位相も主流よりかなり進んでいる。位相 $(1/2)\cdot\pi$ までは、移動層の上層は主流からのせん断応力を受け加速し、下層の方は徐々に静止するようになる。位相 $(3/4)\cdot\pi$ では、圧力勾配によって下層、中層で流れが逆転している。

(b)の濃度分布 c' の図中の実線は各高さにおける時間平均濃度を示す。濃度 c' は静止状態を1とした相対濃度である。時間的な濃度の変動は小さいことがわか

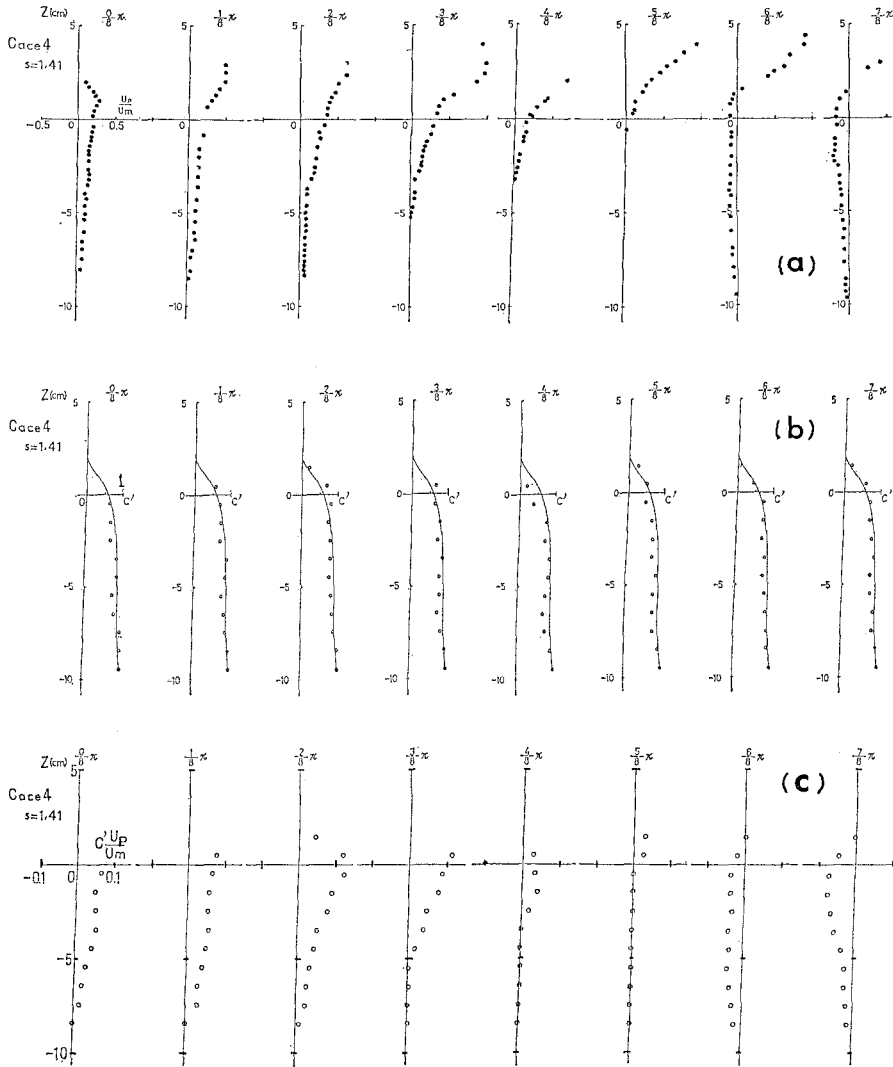


図-4 (a) 速度分布, (b) 濃度分布, (c) 漂砂量分布の位相変化

る。濃度は表層で急激に減少するが下層では高濃度（静止状態濃度 c^* の 9 割程度）ではほぼ一定である。

(c) の漂砂量分布は位相が主流よりかなり進んでいることがわかる。漂砂量は上層だけでなく、中、下層でも同程度にあることがわかる。

図-5 は、各ケースで時間平均濃度 $\bar{c}$ を比較したものである。縦軸に z を移動層厚 δ_s で無次元化した z/δ_s を取ると、どのケースもほぼ相似形になることがわかる。図-4(c) と同様に濃度は表層で急激に減少し、中、下層ではほぼ一定の高濃度になっている。

図-6 は、図-4(c) の各位相の漂砂量を積分して求めた半周期平均漂砂量 $\bar{q}$ を示している。 $\Phi = q/w_0 \cdot d$, u^* は摩擦速度である。図中の実線は前報²⁾で報告した式(2)を示し、今回のデータは ■ と ○ で示されている。

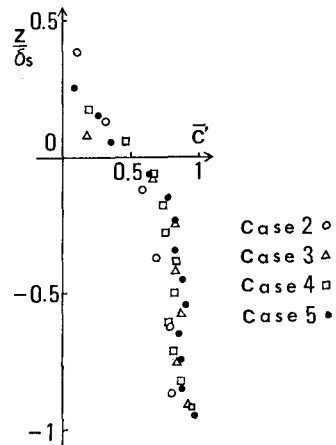


図-5 時間平均濃度の鉛直分布

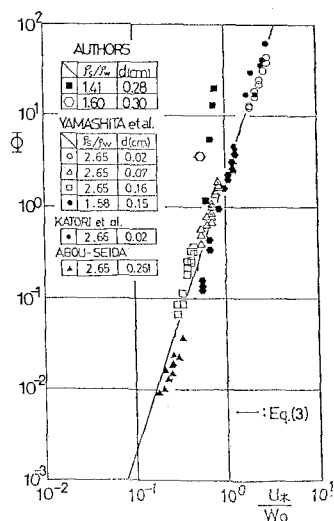


図-6 半周期平均漂砂量

本実験

$$\phi = 2.2 \left(\frac{u^*}{w_0} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

の結果は式(3)及び従来のデータよりかなり大きくなっている。この原因については、(i) 前報²⁾のデータは3.1でも述べた様に最初の半周期しか流れを作用させていないものであること、(ii) 今回のデータは比重が軽いものである等考えられるが、シートフロー状砂移動のデータ(種々の比重、粒径)が少ないため、今回はこれ以上議論をしない。

4. 斜面床上の砂移動

シートフロー状砂移動のnetの漂砂量の測定は現在のところまったく行われていない。ここでは、netの要因の1つである斜面勾配の影響について実験を行なった。図-7にnetの漂砂量 Q の測定結果を示す。測定時間は、netの砂移動が生じ平均勾配が初期の勾配の8割になる間とした。図-1に示した様に移動層厚は流れ作用後急激に増加し定常状態に達する。しかし、この測定時

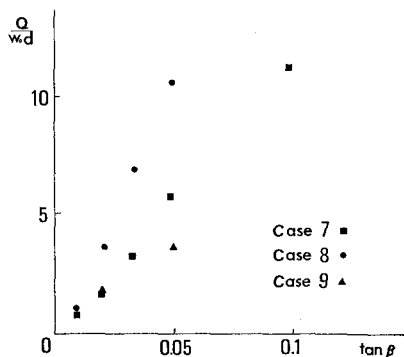


図-7 斜面勾配の影響による net の漂砂量

間では特に斜面勾配が大きい場合に定常状態に達していないこともあり、少し小さめの net の漂砂量が測定されている。この図より、どのケースについても net の漂砂量 Q は、 $\tan \beta = 1/10$ 程度までは斜面勾配 $\tan \beta$ にほぼ比例して増加することがわかる。

5. net の漂砂量の理論解析

Ahilan ら⁵⁾は、基本的な水平床・正弦振動流場のシートフロー状砂移動を、移動層を混相流(底質と水の相対速度はない)とみなし、境界層方程式を用いた解析を行なっている。濃度は時間的に一定で鉛直方向にのみ変化するとし、濃度も未知数として解析している。本研究では、Ahilan らの解析を斜面床上、非対称振動流場+一方向流れ場にまで拡張し、netの漂砂量の解析を試み、斜面勾配の影響によるnetの漂砂量について実験結果と比較検討する。

移動層の境界層方程式は式(4)となり、右辺第1項は圧力勾配、第2項は粒子相互の衝突によるせん断応力及び流体間のせん断応力、第3項が斜面勾配の影響を表わす。

$$\begin{aligned} \{ \rho(1-c) + \rho_s c \} \frac{\partial u}{\partial t} = & \rho_w U_m \cos \omega t \\ & + \left[1.2 \left\{ \frac{1}{(c^*/c)^{1/3} - 1} \right\}^2 + 1 + 2.5c \right] \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ & - (\rho_s - \rho) c g \sin \beta \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、濃度 c は時間的に一定とし、 c^* は静止状態の濃度で $c^* = 0.65$ である。境界条件は、式(5)となり、

$$\begin{aligned} z=0; \quad u=0, \quad c=c_b \\ z=\infty; \quad u=U_m \sin \omega t + U_0 - U_1 \cos \omega t, \quad c=0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

U_0 が一方向流、 U_1 が非対称振動流(ストークス波)の影響を表わす。濃度分布を決定するため、粒子相互の衝突による半周期平均のせん断応力がその位置での粒子の水中重量による応力に比例(定数 K)するという条件式(6)を

$$\frac{2}{T} \cdot 1.2 \left\{ \frac{1}{(c^*/c)^{1/3} - 1} \right\}^2 \mu \int_0^{T/2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dt$$

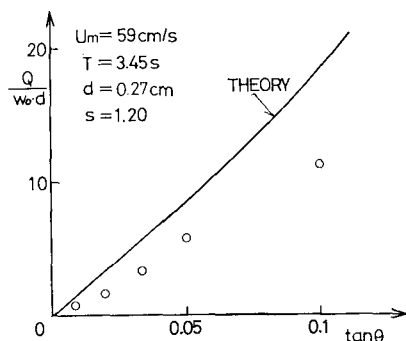


図-8 net の漂砂量についての実験値と理論値の比較

$$=-K(\rho_s-\rho)cg \cos \beta \dots\dots\dots(6)$$

用いる。式(5), (6)を数値計算することにより, 速度 u , 濃度 c を求める。移動層の最大濃度 $c_b=0.585$, $K=0.35$ とした。

図-8 に, 斜面勾配の影響による net の漂砂量 Q について理論値と実験値の比較結果の一例を示す。両者とも斜面勾配に対して Q はほぼ直線的に増加していることがわかる。実験値の方が小さめとなっているのは, 4. で述べた様に移動層が十分発達していなかったことが1つの原因として考えられる。

6. おわりに

本研究の主要な結果をまとめると以下の様である。

1) 水平床上振動流場のシートフロー状漂砂の移動速度, 濃度分布, 漂砂量分布, および移動層厚の詳細な測定を行ない砂移動機構を明らかにした。ある条件では, 移動層厚が周期的に変化する現象, 底質の鉛直方向の拡散に重要な働きをする移動層表面の波打ち現象が発生することがわかった。

2) 斜面勾配の影響による net の漂砂量 Q の測定を行ない 1/10 勾配程度までは, Q は勾配にほぼ比例して増加することがわかった。

3) Ahilan らの理論を斜面床上, + 方向流非対称振動流場にまで拡張し, net の漂砂量の解析を試み, 斜面勾配の影響による net の漂砂量については実験値をある程度説明することがわかった。

最後に, 本研究を進めるにあたり一部科学研究費奨励研究(A)の補助を受けた。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司: シート・フロー状態の底質移動に関する研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 202~206, 1980.
- 2) 山下俊彦・沢本正樹・横山博実: 非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する基礎的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 281~285, 1984.
- 3) 山下俊彦・沢本正樹・武田幸幸・横森源治: 移動床上の振動流境界層とシートフロー状砂移動に関する研究, pp. 99~103, 1985.
- 4) Ahilan, R. V. and J. F. A. Sleath: Wave induced bed load transport, Seabed Mechanics, Graham & Trotman, pp. 183~189, 1984.
- 5) Ahilan, R. V. and J. F. A. Sleath: Sediment transport in oscillatory flow over flat beds, ASCE, J.H.E., Vol. 113, No. 3, pp. 308~322, 1987.
- 6) 榎木 亨・出口一郎・松山 章: 掃流砂の移動層厚と移動速度に関する一考察, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 277~280, 1984.
- 7) 香取完和: シートフロー現象の定式化に関する研究, 第 41 回年次学術講演会講演概要集, pp. 567~568, 1986.
- 8) 日比康生・山下俊彦: シートフロー状漂砂の移動速度に関する一考察, 第 42 回年次学術講演会講演概要集, pp. 654~655, 1987.
- 9) 山下俊彦・千田洋一・佐伯 浩: 斜面勾配の影響による砂移動機構の変化と net の掃流砂量, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 221~224, 1986.
- 10) 平野宗夫・岩元 賢・猿渡裕明固: 固定床における土石流の流動特性について, 第 15 回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 483~484, 1978.
- 11) Jonsson, I. G.: Wave boundary layer and friction factors, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 127~148, 1966.
- 12) 沢本正樹・山下俊彦: 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, 第 363 号, II-4, pp. 195~204, 1985.