

# 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

山下俊彦\*・千田洋一\*\*・佐伯 浩\*\*\*

## 1. はじめに

海浜変形を予測する際には、net の漂砂量とその方向を把握する必要がある。その重要な要因の1つに斜面勾配の影響がある。従来、海浜の平均勾配が安定形状に与える影響等については明らかにされているものの<sup>1)</sup>、局所的な斜面勾配による net の漂砂量については、Kobayashi (1982)<sup>2)</sup> の理論的研究以外にはほとんど行なわれていないのが現状である。実験的研究が行なわれていないのは、造波水路で実験をする場合に波の非対称性、もどり流れの影響等があり、斜面勾配のみの影響による net の漂砂量を調べることが困難なためと考えられる。

本研究では、掃流砂を対象とし、まず、任意の角度に傾斜できるU字管振動流装置を用いた実験により、斜面勾配の影響による net の漂砂量およびその基本的諸量である半周期平均漂砂量、移動確率、移動距離の変化を定量的に把握する。次に、一方向流の福岡、山坂 (1984)<sup>3)</sup> と同様の方法により、水平床での半周期平均漂砂量式を斜面勾配がある場合にまで拡張し、連続した半周期の差を取ることにより斜面勾配の影響による net の漂砂量式を導く。この際、水平床の半周期平均漂砂量式は実験により経験的に求めた。さらに、今回の理論およびKobayashiの理論と実験値を比較検討した。

## 2. 実験装置および方法

実験には、斜面勾配の影響のみによる net の漂砂量を調べるために、図-1に示す任意の勾配( $\tan \beta = 0 \sim 1/10$ )に傾斜できるU字管振動流装置を用いた。この装置は、前報<sup>4)</sup>と同様のU字管装置を傾斜台の上に固定したものである。U字管は透明アクリル板製であり、管内の現象を側面および上面から観察できる様になっている。

底質粒子としては、表-1に示す3種類を用いた。表中の移動限界シールズ数は、周期  $T=3.50$  秒の実験より求めた値である。表-2に実験条件を示す。Case 1~3は水平床上の半周期漂砂量の実験で流速振幅を変化させ

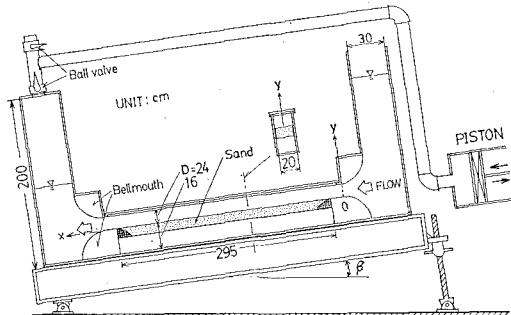


図-1 実験装置

ている。Case 4~8は、斜面勾配の影響による net の漂砂量についての実験である。勾配は緩勾配を対象とし表中に示す様に  $1/100 \sim 1/10$  の間で 6段階に変化させていく。砂漣は、全ケースを通じて少なくとも測定時間内には発生しなかった。底面せん断応力は Jonsson (1966)<sup>5)</sup> の抵抗係数  $f_w$  を用いて計算した。

測定した諸量は、表-2に示す様に、水平床で半周期平均漂砂量  $\bar{q}_0$ 、斜面上で、net の漂砂量  $\bar{Q}$ 、半周期平均漂砂量  $\bar{q}$ 、移動確率  $p$ 、底質の半周期移動距離  $L$  である。net の漂砂量は、精度が良い砂村 (1982)<sup>6)</sup> と同様の方法すなわち、ある断面を境にしてトレイの左右にあらかじめ重量を測定した底質を入れ、流れを作成した後に再びその断面の左右にある底質の重量を測定し、始めの重量との差を取ることにより求めた。半周期漂砂量、移動確率、移動距離は、底質粒子の移動状況を水路上方よりビデオで撮影し、それを解析することにより求めた。半周期漂砂量は、半周期間にある断面を通過する底質粒子の個数を、移動確率は半周期間で単位面積当たり移動を開始する粒子の個数を数えることにより求めた。なお、Case

表-1 底質粒子の特性

粒径 $d$ (mm)	比重 $s$	移動限界シールズ数 $\tau_{c0}$	水中静止摩擦係数 $\mu$
3.0	1.60	0.035	0.65
3.0	2.65	0.042	0.75
1.2	2.65	0.041	0.75

\* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 日本道路公団

\*\*\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

表-2 実験条件

Case	粒径 $d$ (mm)	比重 $s$	周期 $T$ (s)	流速振幅 $u_m$ (cm/s)	斜面勾配 $\tan \beta$	測定項目
1	3.0	1.60	3.50	20.3, 21.5 23.0, 23.8 25.2	0	$\bar{q}_0$
2	3.0	2.65	3.50	46.5, 47.7 49.0, 51.4	0	$\bar{q}_0$
3	1.2	2.65	3.50	31.3, 32.8 33.8, 35.0	0	$\bar{q}_0$
4	3.0	1.60	3.42	21.6	$1/100, 1/50$ $1/30, 1/20$ $1/15, 1/10$	$\bar{Q}$
5	3.0	1.60	3.42	24.9	$1/100, 1/50$ $1/30, 1/20$ $1/15, 1/10$	$\bar{Q}$
6	3.0	2.65	3.50	49.0	$1/100, 1/50$ $1/30, 1/20$ $1/15, 1/10$	$\bar{Q}$
7	1.2	2.65	3.50	36.1	$1/100, 1/50$ $1/30, 1/20$ $1/15, 1/10$	$\bar{Q}$
8	3.0	1.60	3.50	22.8	$1/100, 1/50$ $1/30, 1/20$ $1/15, 1/10$	$p, l, (\bar{Q}, \bar{q})$

8については、半周期漂砂量  $\bar{q}$  は  $p, l$  より net の漂砂量  $\bar{Q}$  は  $\bar{q}$  より計算して求めた。

### 3. net の漂砂量式

一方向流の場合には、平野(1973)<sup>7)</sup>が横断方向の斜面勾配の影響を考慮した掃流砂量式を導いている。縦断方向の斜面勾配の効果については、基礎方程式を導く、すなわち、砂粒子に働く外力を見積る際には古くから考慮されているが、流砂量式を導く際には通常その勾配が小さいとして省略されている。最近、福岡ら<sup>8)</sup>は、縦・横断勾配の効果を考慮した掃流砂量式を導いている。本研究では、振動流場における斜面上の半周期掃流砂量式を、福岡らと同様の方法で水平床上の掃流砂量式を基に求め、連続した半周期の差を取ることにより、net の漂砂量式を導く。

斜面の場合には、水平床と比べて、砂粒子には流れより受けける掃流力の他に粒子の水中重量の斜面方向成分による付加的な掃流力が働き、粒子のかみ合せによる抵抗力が減少し移動限界が  $\cos \beta$  倍になる。そこで水平床上の半周期平均掃流砂量  $\bar{q}_0$  が最大せん断応力  $\tau_m$  と水平床上の移動限界せん断応力  $\tau_{co}$  の関数

$$\bar{q}_0 = f(\tau_m, \tau_{co}) \quad \dots (1)$$

で表わされる時、斜面上の掃流砂量  $\bar{q}$  は、上式で  $\tau_m$  のかわりに  $\tau_m + \tau'$ 、 $\tau_{co}$  のかわりに斜面上の移動限界せん断応力  $\tau_c$  とすれば求めることができると考える。

$$\bar{q} = f(\tau_m + \tau', \tau_c) \quad \dots (2)$$

$$\text{ここで, } \tau' = \tau_{co} \sin \beta / \mu$$

$$\tau_c = \tau_{co} \cos \beta$$

$\mu$ : 底質粒子の水中静止摩擦係数である。

振動流場の水平床上の半周期平均掃流砂量式は、種々提案されているが、広い範囲の条件に対して精度良く掃流砂量を推定できるものは現在のところまだないのが現

状である。本研究では、水平床上の掃流砂量式を基に斜面勾配の影響による漂砂量を取り扱うので、水平床上の掃流砂量式はできるだけ正確なものが望ましい。そこで、水平床上の掃流砂量式は、net の漂砂量を調べるときと同じ底質を用いた4.1節で述べる実験により経験的に定めた。その結果は

$$\frac{\bar{q}_0}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = K(\Psi_m - \Psi_{co})^{3/2} \quad \dots (3)$$

ただし、 $K$ : 底質特性により決まる定数、 $\Psi_m = \tau_m / (s-1) \cdot \rho g d$ 、 $\Psi_{co} = \tau_{co} / (s-1) \rho g d$  である。式(3)を用いると斜面上の掃流砂量式が

$$\frac{\bar{q}}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = K \left( \Psi_m \pm \Psi_{co} \frac{\sin \beta}{\mu} - \Psi_{co} \cos \beta \right)^{3/2} \quad \dots (4)$$

となる。ただし、右辺第2項の+は流れが斜面を下る場合、-は上の場合である。

式(4)より連続した半周期の差を取り、緩勾配を対象としているので  $\sin \beta$  の1乗の項までとると、net の漂砂量  $\bar{Q}$  が次式の様に求まる。

$$\frac{\bar{Q}}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = \frac{3}{2} K \Psi_{co} (\Psi_m - \Psi_{co})^{1/2} \frac{\sin \beta}{\mu} \quad \dots (5)$$

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 水平床上の半周期平均掃流砂量

図-2に水平床上の半周期漂砂量  $q_0$  の実験結果を示す。座標軸としては、縦軸に  $\bar{q}_0 / \sqrt{(s-1)gd^3}$  で無次元化したもの、横軸に  $\Psi_m - \Psi_{co}$  を取った。図中、実験は式(3)、破線は Kobayashi の理論式(計算には表-1に示す底質粒子の特性値を用いた)である。実験値は、実験精度が悪い  $\Psi_m - \Psi_{co}$  の小さい2つのデータ

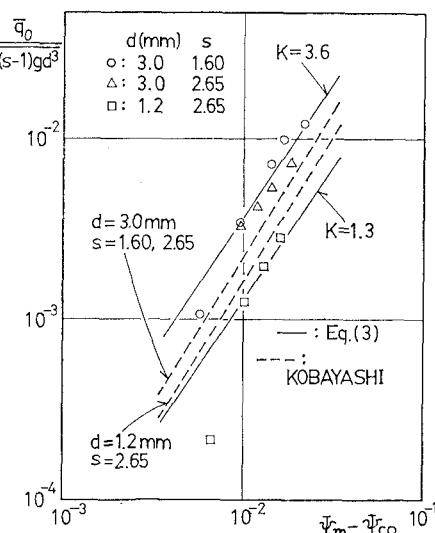


図-2 水平床上の半周期漂砂量

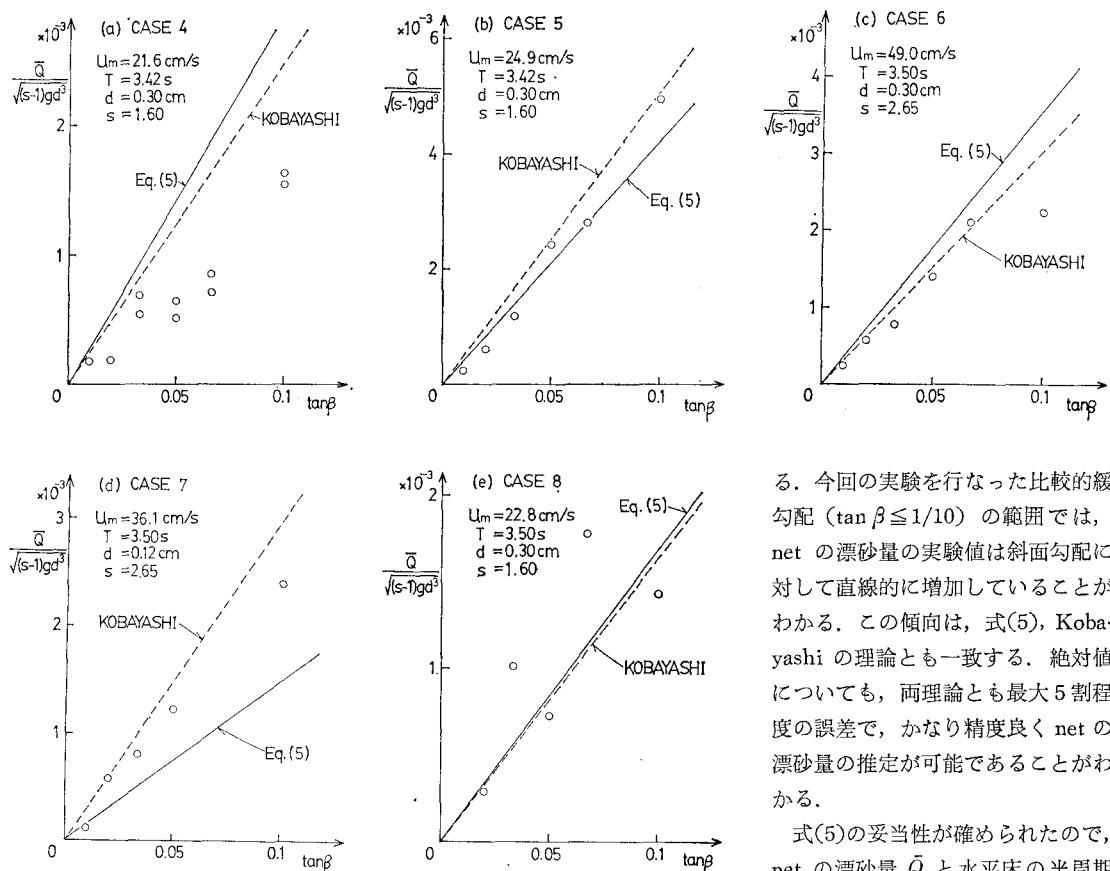


図-3 net の漂砂量

を除き、粒子ごとに絶対値は異なるが勾配が 1.5 となり、式(3)でよく表わせることがわかる。式中の比例定数  $K$  は、 $\Psi_m - \Psi_{e0} > 0.01$  の領域（斜面勾配の影響を調べる実験の流れの条件はこの領域に含まれる）で実験値と式(3)が最もよく一致する様に決定した。 $K$  の値は比重にはほとんど依存せず粒径が大きいものほど大きくなっている。その値は、 $d=0.3 \text{ cm}$  で  $K=3.6$ 、 $d=0.12 \text{ cm}$  で  $K=1.3$  である。Kobayashi の理論式は勾配が約 1.6 で実験値とほぼ同じ勾配であることがわかる。また、図-2 の様な座標軸を取ると、比重によらず粒径が大きいものほど無次元漂砂量が大きくなるという傾向も一致している。絶対値についても、実験値との差は 5 割程度であり、漂砂量式としては比較的よく実験値と一致している。

#### 4.2 net の漂砂量

図-3 (a)~(e) に、各々 Case 4~8 の net の漂砂量  $\bar{Q}$  の実験値を示す。Case 8 は、 $\bar{Q}$  を流れが下りと上りの場合の移動確率と移動距離の積の差より求めたため、実験値のばらつきが他のケースより大きくなっている。図中、実線は式(5)、破線は Kobayashi の理論式であ

る。今回の実験を行なった比較的緩勾配 ( $\tan \beta \leq 1/10$ ) の範囲では、net の漂砂量の実験値は斜面勾配に対して直線的に増加していることがわかる。この傾向は、式(5)、Kobayashi の理論とも一致する。絶対値についても、両理論とも最大 5 割程度の誤差で、かなり精度良く net の漂砂量の推定が可能であることがわかる。

式(5)の妥当性が確められたので、net の漂砂量  $\bar{Q}$  と水平床の半周期漂砂量  $\bar{q}_0$  の関係を調べてみる。式(3)、式(5)より、 $\beta$  は小ゆえ  $\sin \beta \approx \tan \beta$  すると

$$\frac{\bar{Q}}{\bar{q}_0 \cdot \tan \beta} = \frac{3}{2\mu} (\Psi_{e0} - \Psi_m)^{-1} \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる。上式より、 $\bar{Q}$  が  $\bar{q}_0 \cdot \tan \beta$  に単純に比例するのではなく、その比例定数は流れが強い ( $\Psi_m$  が大) 程小さくなることがわかる。これは、式(4)で右辺第二項の net の漂砂量を生じさせる粒子重量の斜面方向成分による付加的掃流力の項は斜面勾配が決まれば一定であるが、第一項  $\Psi_m$  は流れが強い程大きくなり半周期漂砂量が増加するためである。

#### 4.3 斜面上の半周期掃流砂量、移動確率、移動距離

前節で net の漂砂量について考察したが、ここではもう少し詳しく、斜面勾配の影響によって半周期掃流砂量、さらにはその基本的諸量である移動確率と半周期移動距離がどの様に変化するかを調べる。

図-4 に、斜面上の半周期掃流砂量  $\bar{q}$  の実験結果を示す。図中には、式(4)と Kobayashi の理論式も示してある。実験値は少しばらつきはあるものの、下りで  $\bar{q}$  は大きく上りでは小さく  $\tan \beta$  に対してほぼ直線的に変化していることがわかる。その勾配は両理論とよく一致

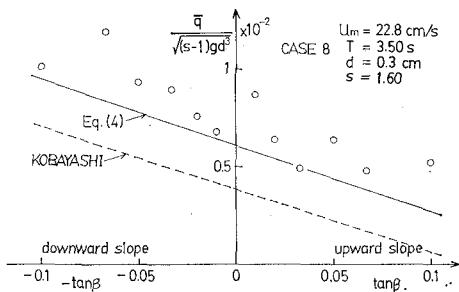


図-4 斜面上の半周期漂砂量

している。下りと上りの  $\bar{q}$  の差から求まる net の漂砂量は、すでに図-3 (e) に示した様に両理論とほぼ一致している。図-4 を見ると絶対値については、式(4)とよく一致しているが、Kobayashi の理論は 5割程度小さめになっている。これは、図-2 で示した様に Kobayashi 水平床上の半周期漂砂量の見積りが小さめになるためである。

図-5、図-6 に、各々斜面上の移動確率  $p$ 、半周期移動距離  $l$  の実験値を示す。なお、 $p$  は半周期間に表面の粒子（単位面積当り  $1/d^2$  個とした）のうち移動を開始したものの割合と定義した。Kobayashi の理論では  $p$  が計算され、 $p$  と  $\bar{q}$  より  $l$  を逆算できるので各々の図中に示す。当然のことながら、上り勾配の場合に実験、理論とも  $p$ 、 $l$  が大きくなっている。図-5 を見ると、移動確率については上り勾配で  $\tan \beta = 0.1$  のデータは少し大きめであるが他はよく一致していることがわかる。図-6 の移動距離は、Kobayashi の理論の方が 5割程度小さめとなっているが傾向はよく一致していることがわかる。

## 5. おわりに

本研究で得られた主要な結果は次の様である。

(i) 任意の角度に傾斜できる U 字管振動流装置を用いた実験により、斜面勾配の影響による net の漂砂量および半周期漂砂量、移動確率、移動距離を定量的に把握し、半周期、net の漂砂量とも斜面勾配に比例して変化することがわかった。また、水中床上の半周期漂砂量の測定を行ない、この場合の漂砂量式(3)を経験的に求めた。

(ii) 水平床上の半周期漂砂量式を基に斜面上の半周期漂砂量式(4)を求め、連続した半周期の差を取ることにより net の漂砂量式(5)を誘導した。また、式(4)、

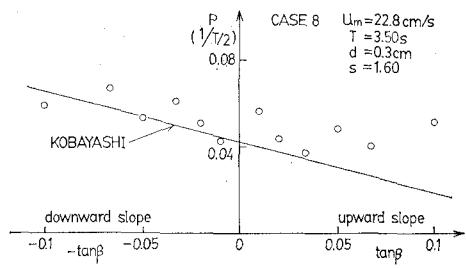


図-5 斜面上の移動確率

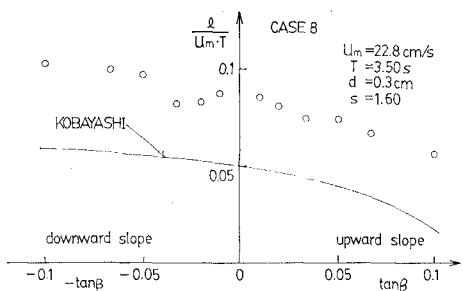


図-6 斜面上の半周期移動距離

式(5)が実験値とほぼ一致することがわかった。

(iii) Kobayashi の理論は、斜面上の net の漂砂量、半周期漂砂量、移動確率、移動距離について実験値を比較的よく説明することがわかった。

## 参考文献

- 1) 例えさ Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional Beach Transformation due to Waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920~938, 1974.
- 2) Kobayashi, N.: Sediment transport on a gently slope due to wave action, Proc. ASCE, Vol. 108, No. WW3, pp. 234~271, 1982.
- 3) 福岡捷二・山坂昌成: なめらかな横断形状をもつ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析, 土木学会論文集, No. 351/II-2, pp. 87~96, 1984.
- 4) 山下俊彦・沢木正樹・武田秀幸・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, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301, 1985.
- 5) Jonsson, I. G.: Wave boundary layer and friction factors, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 127~148, 1966.
- 6) 砂村継夫: 浅海域の岸冲漂砂量に関する実験的研究, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 239~243, 1982.
- 7) 平野宗夫: 振幅を伴う流路変動について, 土木学会論文報告集, No. 210, pp. 13~20, 1973.