

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)⁷⁾ 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⁸⁾ は、縦・横断勾配の効果を検討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 τ_m と水平床上の移動限界せん断応力 τ_{c0} の関数

$$\bar{q}_0 = f(\tau_m, \tau_{c0}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる時、斜面上の掃流砂量 $\bar{q}$ は、上式で τ_m のかわりに $\tau_m + \tau'$, τ_{c0} のかわりに斜面上の移動限界せん断応力 τ_c とすれば求めることができると考える。

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

ここに、 $\tau' = \tau_{c0} \sin \beta / \mu$

$$\tau_c = \tau_{c0} \cos \beta$$

μ : 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の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

$$\frac{\bar{q}_0}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = K(\Psi_m - \Psi_{c0})^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 K : 底質特性により決まる定数、 $\Psi_m = \tau_m / (s-1) \cdot \rho g d$, $\Psi_{c0} = \tau_{c0} / (s-1) \rho g d$ である。式(3)を用いると斜面上の掃流砂量式が

$$\frac{\bar{q}}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = K \left(\Psi_m \pm \Psi_{c0} \frac{\sin \beta}{\mu} - \Psi_{c0} \cos \beta \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ただし、右辺第2項の+は流れが斜面を下る場合、-は上る場合である。

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。

$$\frac{\bar{Q}}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = \frac{3}{2} K \Psi_{c0} (\Psi_m - \Psi_{c0})^{1/2} \frac{\sin \beta}{\mu} \quad \dots\dots (5)$$

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 $\bar{q}_0$ を底質特性 $\sqrt{(s-1)gd^3}$ で無次元化したもの、横軸に $\Psi_m - \Psi_{c0}$ 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 $\Psi_m - \Psi_{c0}$ の小さい2つのデータ

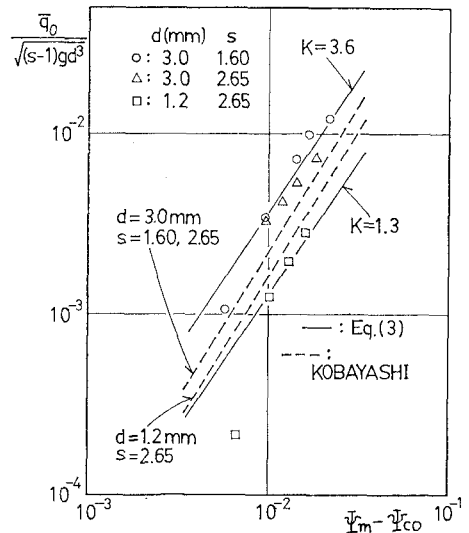


図-2 水平床上の半周期漂砂量

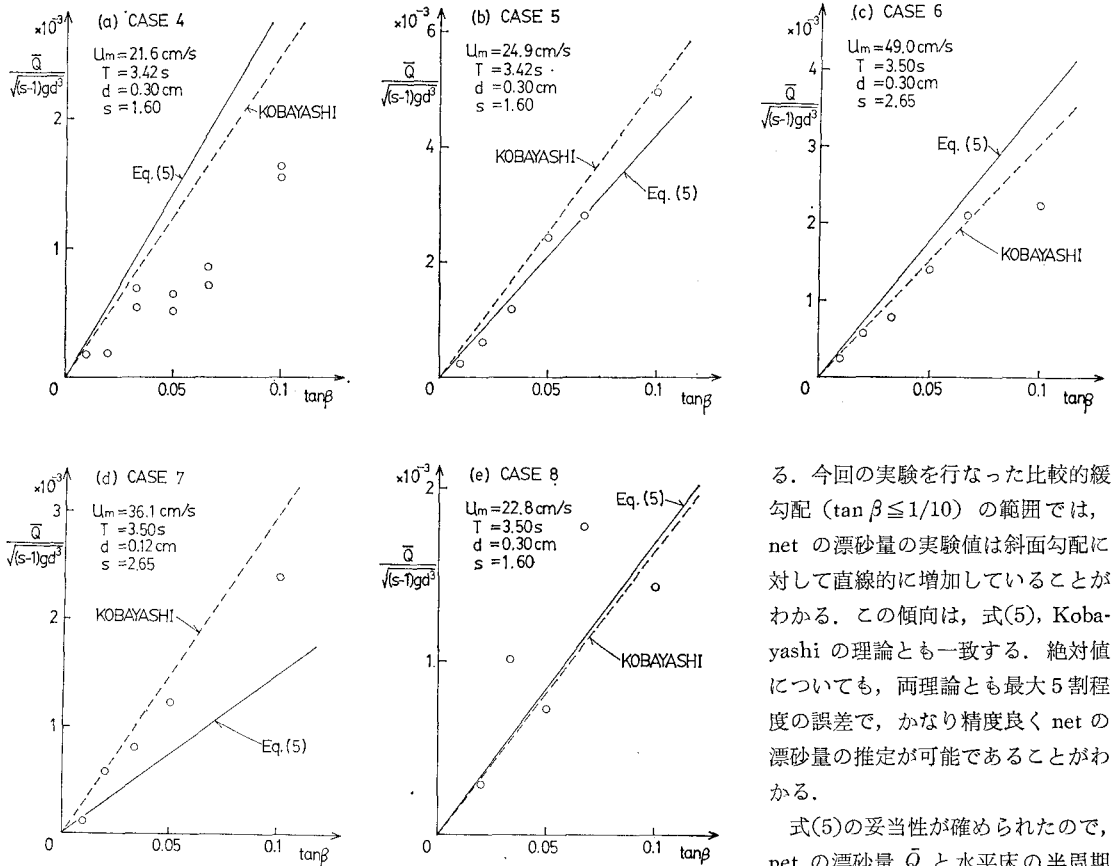


図-3 net の漂砂量

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 で実験値とは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良好に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、 β は小ゆえ $\sin \beta$

$\approx \tan \beta$ とすると

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

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 (Ψ_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 Ψ_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よう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 $\bar{q}$ は小さく $\tan \beta$ に対しては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

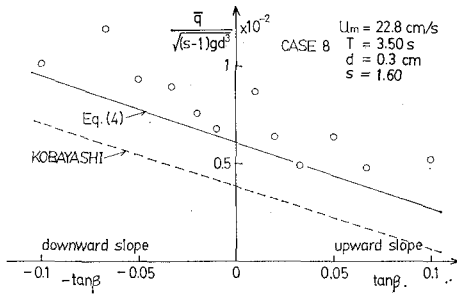


図-4 斜面上の半周期漂砂量

している。下りと上りの $\bar{q}$ の差から求める 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 (単位面積当たり $1/d^2$ 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で net の漂砂量式 (5) を誘導した。また、式 (4)、

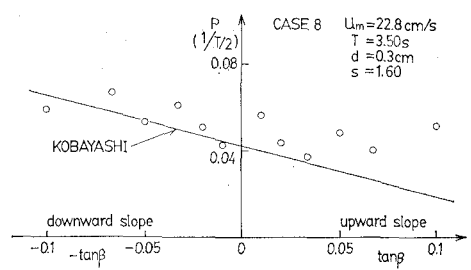


図-5 斜面上の移動確率

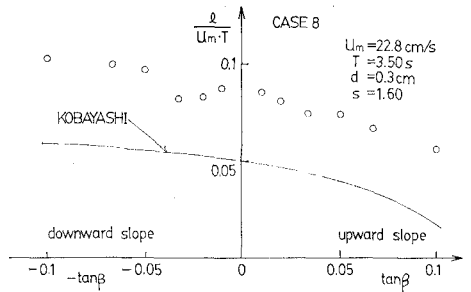


図-6 斜面上の半周期移動距離

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) 例えば 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散過程の解析, 土木学会論文集, No. 351/II-2, pp. 87~96, 1984.
- 4) 山下俊彦・沢本正樹・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: 浅海域の岸沖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.