

舞鶴工業高等専門学校 ○三輪 浩  
立命館大学 理工学部 大同淳之

1. まえがき 砂礫堆の前縁部は段落ち流れであり、らせん流が形成されているため流砂はこの影響を受けて平坦部とは異なった挙動を示す。前縁部における流砂の挙動は砂礫堆の形状特性や移動特性を規定する一要因であるがその詳細に関しては不明な点が多い。そこで本文では前縁部における流砂運動をトレーサー実験によって検討するとともに、これを定量的に表現した。そして、この結果を砂礫堆の移動速度の算定に適用し、その適合性について検討した。

2. 実験概要 実験は流砂量と砂礫堆の移動速度に着目した移動床実験と、砂礫堆の前縁部での流れと流砂の分級特性に着目した固定床実験からなる。実験に用いた水路は、長さ18m、幅0.5m、高さ0.5mの側面ガラス張り鋼製可変勾配循環水路である。

まず、移動床実験は平均粒径 $d_a=0.154\text{cm}$ 、幾何標準偏差

表-1 実験条件

RUN No.	discharge $q_w$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )	mean depth $h_m$ (cm)	Froude No. Fr.	energy slope $I_e$	shear velocity $U_*$ ( $\text{cm}/\text{sec}$ )
M-3	100.0	1.94	1.18	0.014	5.2
M-4	107.0	2.10	1.12	0.014	5.3
F-1	96.0	2.02	1.08	0.014	5.3

$s d = \sqrt{(d_{0.4}/d_{1.0})} = 2.2$ の混合粒径砂を用い、全粒径が移動する条件で通水と給砂を開始して単列の砂礫堆を形成させた。

なお、表-1に実験条件および主要水理量を示す。砂礫堆の移動速度はその先端部を追跡し、走時曲線を作成して求め

た。また、流砂を水路下流端にて砂礫堆一波長もしくは半波長を適時採取して流砂量を算定した。

つぎに、固定床実験は移動床実験(Run No. M-3)によって形成された砂礫堆(波長 $L=3.8\text{m}$ 、最大波高 $\Delta=4.0\text{cm}$ )を速乾性の接着剤で固定して行った。この実験では砂礫堆の前縁部のみに着目し、そこでの流向・流速分布とトレーサー粒子を用いた分級効果の測定を行った。なお、実験条件は表-1中のRun No. F-1である。

流向および流速は内径1mmのピトー管をポイントゲージに取

表-2 トレーサー粒子の粒径

particle No.	diameter range (mm)	mean diameter (cm)
dA	4.75 - 2.36	0.33
dB	2.36 - 1.70	0.20
DC	1.70 - 1.18	0.14
DD	1.18 - 0.60	0.08
DE	0.60 - 0.30	0.04

り付け、最大流速とその水路縦断方向に対する流向偏角を全水深にわたって測定した。測定点は砂礫堆半波長を対象にその前縁に沿って約20cm間隔とし、各前縁部において流れに沿って段落ち上部と下部の2点とした。

一方、粒子の分級に関する実験は移動床実験の場合とほぼ

同じ粒度分布を有する寒水石をトレーサー粒子として用い、粒径によって $d_a$ から $d_e$ の5種類に分類した。各粒径範囲とその平均粒径を表-2に示す。実験は砂礫堆半波長に対して段落ち高が異なる3ヶ所の前縁部を着目前縁として設定し、通水中にトレーサー粒子を投入して粒子の前縁部での状況をVT R撮影した。さらに、段落ち下部での粒子の堆積量を粒径別に測定した。このとき、トレーサー粒子の堆積位置の波高も測定した。

3. 前縁部での流れと流砂の分級特性 図-1は各測定点の流速分布と流向から対数則分布を仮定して求めた、水路縦断方向の摩擦速度の砂礫堆の位相による変化を示している。深掘れ部から先端にかけ

った結果<sup>2)</sup>とも共通しており、砂礫堆の特性といえる。一方、砂礫堆の位相による平均粒径の変化は流砂量の場合ほど大きくない。変動幅は全流出土砂の平均粒径の0.8~1.3倍程度であって流砂量の場合のような周期的な変化は見られない。

つぎに、図-3は水路中央と左岸側壁付近の2ヶ所における流砂量および平均粒径の縦断変化を示したものである。右岸側については砂礫堆の形状を反映して左岸側と半波長ごとに逆位相になる<sup>2)</sup>ので省略した。流砂量の変化については、砂礫堆の背の部分に相当する位相において平均流砂量の2~3倍程度の大きな値を示し、淵の部分に相当する位相では0~0.5の小さな値を示すことがわかる。しかし、平均粒径は断面採取の場合と同様、位相による変化は小さい。ただし、流砂量が非常に少ない淵の部分の粒度分布は測定不能であったので、その平均粒径については不明である。以上のように、河道に砂礫堆が形成されるとその形状を反映して流砂量は場所的に大きく変動するが、平均粒径に関してはその場所的な変化は小さいといえる。

**4. 流砂量算定に関する検討** 先に示したように、砂礫堆形成河道の流砂量は場所的に大きく変化する。それゆえ、任意の場所の流砂量を算定することが必要となる。しかし、現在のところこのような要請に応える流砂量式は得られていない。そこで、まず、平均流砂量について既存の流砂量式の適合性を検討し、つぎに河床形状をモデル化して横断流砂量の変動についてその算定を試みる。

流砂量の検討に先立ち、砂礫堆が形成されると流水抵抗が変化するので、この特性について若干述べる。図-4は河道の全抵抗係数 $f$ と $h/d_s$ の関係を示したものである。なお、図中には $k_s/d_s = \alpha$ として $\alpha$ の値別の対数型抵抗則も示している。これによれば、 $h/d_s$ が10以上のところでは $k_s = 2 \sim 3 d_s$ 程度の値を取ることがわかる。この範囲では相当粗度は平坦床に近い値となる。しかし、 $h/d_s$ が小さくなると $\alpha$ の値は急激に大きくなり $k_s = 6 d_s$ 程度まで増加する。これは、この範囲では最も大きな規模の砂礫堆が形成される領域<sup>3)</sup>となっているためである。以上のことから、 $h/d_s$ が10程度以下の場合には河床の形状抵抗を考慮する必要があるが、大きい場合にはこの影響は小さく、平坦床と同程度と見なせる。本実験の場合は $\alpha = 3 \sim 4$ であり、また $h/d_s$ の値も14~16なので、次の芦田・道上の流砂量式<sup>4)</sup>を用いて流砂の粒度構成と粒径別流砂量について検討する。

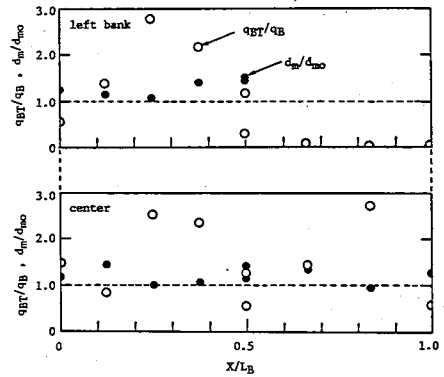


図-3 水路中央および左岸近傍の縦断方向の流砂量および平均粒径の変化

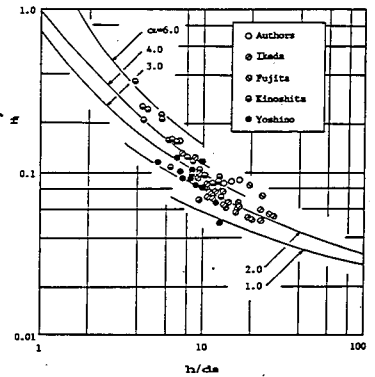


図-4 砂礫堆河道の抵抗係数と水深・粒径比の関係

$$\frac{q_{B_i}}{f_o(d_i)u_{*d_i}} = 17\tau_{*i} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}}}\right) \quad (1)$$

ここに、 $\tau_{*i} = u_{*i}^2 / s g d_i$ 、 $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2 / s g d_i$ 、 $q_{B_i}$ は粒径 $d_i$ の砂粒子の掃流砂量、 $f_o(d_i)$

は粒径  $d_i$  の砂粒子が河床表面に占める割合、 $u_{xc}$  は  $d_i$  の粒子の移動限界摩擦速度、 $s$  は砂粒子の水中比重 ( $\sigma/\rho - 1$ ) である。

図-5は水路下流端で採取した砂の粒度分布と式(1)による計算結果を示している。両者は良く一致しており、河道全体の粒度構成はこのような平坦床に対する流砂量式で表すことが可能であるといえる。なお、給砂の粒度分布はinitialとして示されている。さらに、流砂量としての評価を行うため、粒径別流砂量の整理結果を図-6に示した。粒度構成の場合と同様、流砂量についても全粒径階に対して比較的良く適合しているといえる。以上のように、 $h/d_s$  が10程度以上の砂礫堆河道における平均流砂量に関しては式(1)の適用が可能であるといえる。

図-10は砂礫堆半波長に対して、5ヶ所の位相断面の流砂量を粒径別に整理したものである。同図から分かるように平均粒径の場合とは異なり、同一粒径階でも位相断面ごとに粒径別の流砂量変動しており、この傾向は小粒子ほど強いことが分かる。また、式(1)との比較では平均粒径以上の粒径階では比較的良く適合しているが、それ以下の粒径階では実験値よりも大きい値を与えることになる。これは、流砂量式を計算する際に、給砂の粒度分布をもとにしているため、実際には砂礫堆上では場所的に粒度分布が変化しているため、このことを考慮すればより精度の高い予測が可能であるといえる。

つぎに、砂礫堆の移動特性および形状特性をもとに横断面流砂量の変化について検討する。まず、砂礫堆の位相による横断面流砂量の変化は次のように表すことができる。

$$q_{sp} = \int_0^{y(x)} (1 - \lambda) \cdot V_s \cdot z(x, y) dy \quad (2)$$

ここに、 $\lambda$  は河床の空隙率、 $V_s$  は砂礫堆の移動速度、 $y(x)$  は任意位相における砂礫堆幅、 $z(x, y)$  は砂礫堆の縦横断面形状である。

式(2)において、砂礫堆の縦横断面形状を次の関数形で与える。

$$z(x, y) = \hat{z}(y) + a \cdot \cos \pi \hat{y} \cdot \cos(2\pi \hat{x} - \phi) \quad (4)$$

ここに、 $a = \Delta_{max}$ 、 $\hat{y} = y/B$ 、 $\hat{x} = x/L_s$ 、 $z(y)$  は実験結果から得られる1波長平均した河床横断面形状、 $\phi$  は位相差 ( $3/5\pi$ ) である。

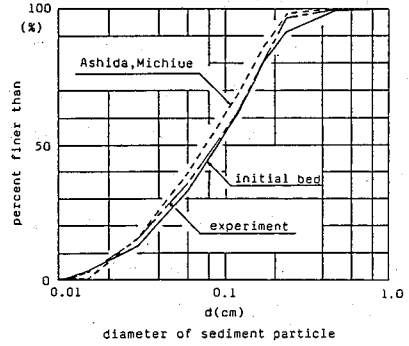


図-5 流出砂の粒度分布の流砂量式による検討

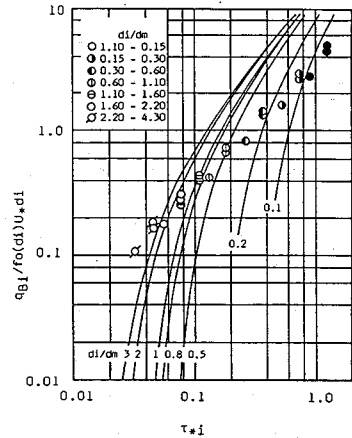


図-6 粒径別流砂量の流砂量式による検討

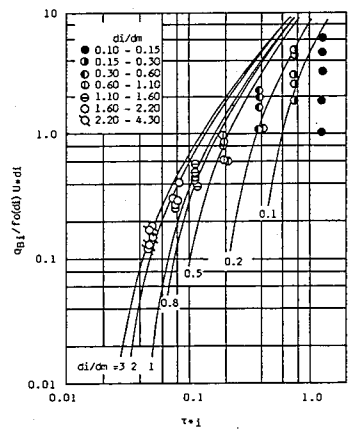


図-7 砂礫堆の位相別の粒径別流砂量の検討

一方、砂礫堆の移動速度は次式<sup>5)</sup>で与える。

$$\frac{V_B}{u_x} = \frac{51}{1-\lambda} \left\{ \sum f_o(d_i) p_{oi} \tau_{xi} \left( 1 - \frac{\tau_{xci}}{\tau_{xi}} \right) \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_{xci}}{\tau_{xi}}} \right) \left( \frac{d_i}{d_m} \right) \right\} \left( \frac{h}{d_m} \right)^{-1} \quad (3)$$

ただし、 $p_{oi} = \exp(-0.9 \hat{u}_{xi})$ 、 $\hat{u}_{xi} = u_x / w_{oi}$ である。

図-8は式(2)~(4)によって求められた横断面流砂量および平均流砂量の計算値と実験値の比較を示している。若干適正でないところもあるが、実験の性質を考えればその周期性、変動幅および流砂量の絶対値ともよく実験結果の傾向を表しているといえる。また、図-9にはトラップによって採取された左岸側縦断方向の流砂量変動の計算値と実験値の比較を示した。横断面流砂量と同様適合性はよい。

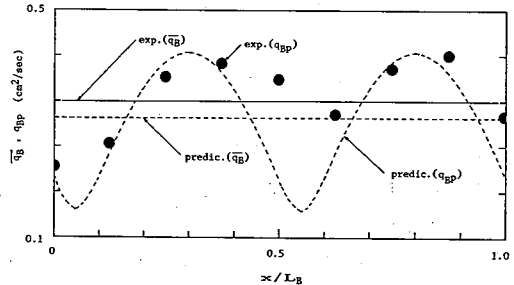


図-8 横断面流砂量変動の計算結果

5. あとがき 本文では砂礫堆河道における場所的な流砂量と河床粒度の変化特性について実験的に検討した。そして、この結果をもとに砂礫堆形状のモデルと移動速度の算定式によって流砂量変動の算定を行い良好な結果を得た。解析の精度は砂礫堆形状のモデルを改良することによって向上させることが可能である。今後は任意の場所の流砂量とその粒度分布の算定手法について検討するつもりである。

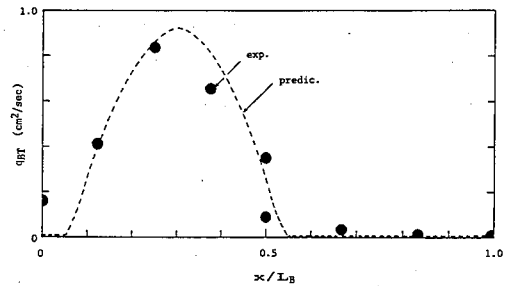


図-9 左岸側縦断流砂量の計算結果

謝辞 本実験を行うにあたり、齋藤 武氏((財)建設技術研究所)をはじめ多数の方々のご協力を得た。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 坂野 章・橋本 宏・浅野富夫：河床材料粒径の代表性について - 砂れき堆の位置と粒度分布の関連について -、土木学会第39回年次学術講演会Ⅱ、1984。
- 2) 三輪 浩・川合 茂・清野雅雄・安養寺信夫・宮本邦明：急勾配水路における交互砂州の形状特性と流砂量、昭和62年度砂防学会研究発表会、1987。
- 3) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と河床条件、第22回水理講演会論文集、1978。
- 4) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、1972。
- 5) 三輪 浩・大同淳之：砂礫堆前縁部での流砂運動の評価と移動特性への適用、平成2年度砂防学会研究発表会、1990。