

## 21 急勾配粗面水路における微細土砂の輸送機構と流砂量

アジア航測(株)

○ 北原 一平

建設省土木研究所 石川 芳治、井良沢 道也、小泉 豊

(財)砂防・地すべり技術センター

宮本 邦明

### 1. はじめに

山地河道をイメージして図1に示すように急勾配粗面水路に水を流し、上流から給砂を行った場合を考える。供給する砂の粒径が小さく、沈降速度 $w$ と摩擦速度 $u_*$ の比 $w/u_*$ が小さい場合、砂は粗度間に溜らずほとんど浮遊砂として流れに供給される。給砂量を増加していくと砂は徐々に粗度間に溜り始めるが掃流砂が発生するまでは砂は粗度間から直接流れに対して浮遊砂として供給される。この場合、流砂量は浮遊砂濃度分布と流速分布によって規定され、その浮遊砂の基準面高と基準面濃度は粗度間の堆積の状態によって規定される。さらに給砂量を増加すると粗度間は砂によって完全に埋め尽くされ、底面には土砂濃度の高い層が発達する。これはいわゆる掃流状集合流動であり、その境界面からは浮遊砂が上層の流れに供給される。この場合、流砂形態としては掃流砂と

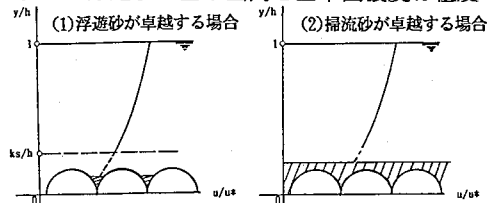


図1 急勾配粗面水路の河床模式図

浮遊砂が混在するが流砂量は主に掃流砂量によって規定されるものと考えられる。また、浮遊砂の基準面高と基準面濃度は掃流層によって規定される。そこで、以下では浮遊砂が卓越する場合と掃流砂が卓越する場合の2つの場合について土砂の輸送機構の特性を評価し、流砂量について検討を行う。

### 2. 浮遊砂が卓越する場合

図1(1)のように急勾配粗面水路において浮遊砂が卓越する場合、流れの構造は対数則で評価され、

1 2 浮遊砂拡散係数 $\epsilon$ は対数則を仮定した渦動粘性係数によって評価されることがわかっている<sup>1)</sup>。また、浮遊砂の基準面高は相当粗度 $ks$ で与えられ、 $ks$ における基準面濃度 $C_a$ と $w/u_*$ の関係は粗度間の堆積の指標である $ks/d$ によって層別されることがわかった<sup>1)</sup>。一方、浮遊砂に関する既往の実験はほとんどが $w/u_*$ が0.1以上の領域であり、山地河川においては勾配が急で、さらに $w/u_*$ が小さくなる領域があるため、これについても浮遊砂の基準面濃度を支配する要因を調べる必要がある。そこで、 $w/u_*$ が0.1以下の領域について浮遊砂実験を行った。

#### 2.1 実験方法および結果

実験装置に用いた水路は水路幅30cm、高さ50cmの可変勾配の水路である。給砂は平均粒径0.1mmの珪砂でベルトコンベアとホッパーにより定常かつ横断方向に均等になるように行った。粗度板は直径20mmのガラス玉をシリコンによってラワン材に固定した。実験はポンプによって一定量の水を流し、給砂を行い、平均水深、水深方向の土砂濃度分布、流速分布を測定した。また、流況観察のためにビデオ及び写真撮影を行った。実験は、勾配3種類(1/50, 1/20, 1/10)、流量2種類(5, 20 l/s)、給砂量4種類で計36種類の実験を行った。

基準面高を0.05hに設定して実験によって得られた土砂濃度分布とRouse式およびLane-kalinske

式を試行錯誤によって合わせ、Caを設定した(図2)。図3に  $w_0/u_*$  とCaの関係を示す。図2には平成2年度の実験結果と既往の研究の値も示す。図3を見ると同一の  $w_0/u_*$  に対して給砂量を変えたが、 $ks/d$ の違いがあまり現れていない。これは粗度間堆積による $ks$ の減少効果が小さいことを意味する。すなわちCaと $ks$ の関数関係があまり明瞭ではなく、粗度間に砂があまり堆積していない可能性が高い。しかし、 $w_0/u_*$  と $ks/d$ の関係は  $u_*$  が大きくなるときほど、すなわち勾配が緩いほどあるいは水深が小さいほど $ks$ の値が小さくなるという傾向は明確である。基準面濃度自体も傾向としては $ks/d$ が小さくなると増加することがわかる。

### 2. 2 流砂量式

$$q_B = \int_a^h u(y) \cdot c(y) dy \quad (1)$$

浮遊砂が卓越する場合の流砂量式としては流速分布として対数則を、浮遊砂量式としてはRouse 式かLane- kalinske式を用

$$q_B = Ca u_* \int_a^h \exp(6aZ/h) \int (8.5 + 1/\kappa (y/ks) \exp(-6Zy/h)) dy \quad (2)$$

ここに、 $a$ : 基準面高、 $Z = w_0/u_*$ 、 $ks$ : 相当粗度、なお、浮遊砂が卓越する場合は粗度間から直接浮遊砂として供給されるため、基準面高を一般に用いられている  $0.05h$  とし、基準面より下は流速が非常に遅いため無視して式(2) から浮遊砂量を求め、実験の全流砂量と比較した結果を図4に示す。図4を見ると式(2) の計算値は実験値と良く対応しており、急勾配粗面水路で浮遊砂が卓越する場合は式(2) を流砂量式として用いるてもよいと考えられる。比較に使用した実験は平成2年度<sup>1)</sup>のものである。

### 3. 掃流砂が卓越する場合

急勾配水路において掃流砂が卓越する流れについては既往の実験<sup>2) 3)</sup>を参考にした。この実験で使用した砂は粒径1mm, 0.4mm, 0.2mm の一様砂で、粗度は粒径( $d$ )の等倍、2倍、4倍の砂粒を水路底に貼り付けた。勾配を1/6, 7, 1/10, 1/20, 1/50, 流量を  $5 \ell / s, 10 \ell / s, 20 \ell / s, 30 \ell / s$ と変化させて、水路に堆積が生じない限界の給砂量を測定した。VTRカメラ撮影記録の解析から、粒子の移動高さ、移動速度分布を求めた。土砂濃度分布は  $5mm \times 30mm$ の取り入れ口を持つ採砂装置で測定した。この実験は給砂条件からみて固定床に近い実験であると考えられる。実験から水路底部には高濃度の流動砂層の存在が確認された。この層厚は同一粒径、同一勾配では流量、粗度に関わらず水深に対してほぼ同一の割合であった。これは江頭ら<sup>4)</sup>の主張と一致している。江頭らは掃流砂と土石流における流動砂礫層の剪断力の構造に違いがないものとして両者を統一的に扱った流速分布則、濃度分布則ならびに流砂量式を導いている。そこで、ここでは江頭らの流速分布式、流砂量式を実験に

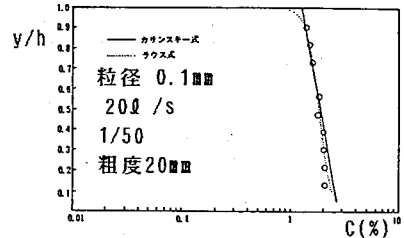


図2 浮遊砂濃度分布

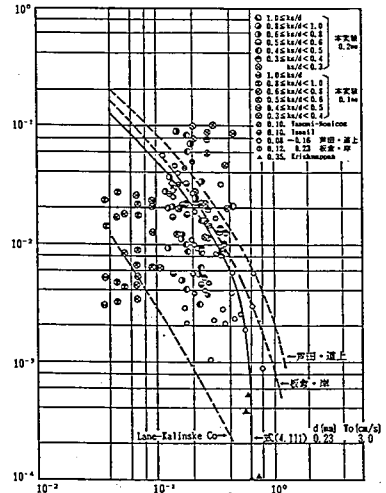


図3 基準面濃度  $W_0/U_*$

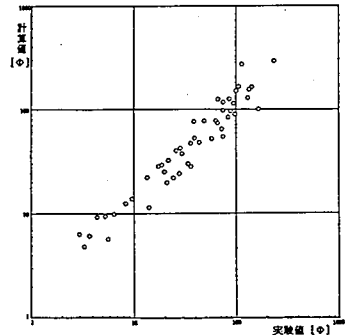


図4 流砂量の実験値と計算値の比較

対して適用し、固定床に近い状態の集合流動の流砂量式の検討を行う。図5に実験によって得られた流速分布と濃度分布の一例を示す。

### 3.1 層流状態としての検討

高濃度の流動砂層が層流か乱流かの検討を行う。江頭らの剪断力の式を用い、みかけの粘性係数 $\mu_0$ を次式のように設定する。

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \tau_f + \tau_g \\ &= \{ k_g \sigma (1-e^2) d^2 C^{1/3} (du/dy)^2 + k_f \rho d^2 (1-C)^{5/3} / C^{2/3} \} |du/dy| (du/dy) \\ &= \mu_0 (du/dy) \end{aligned} \quad (3)$$

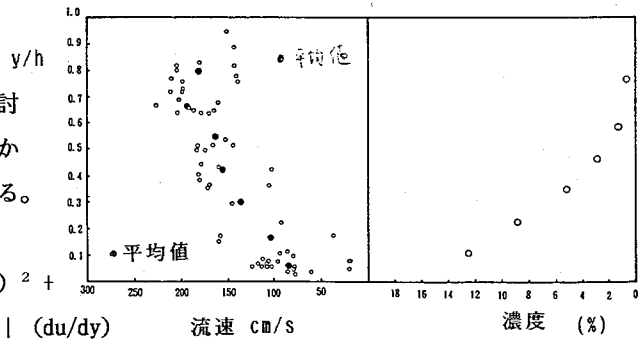


図5 実験の流速分布・濃度分布

ここに $e$ : 粒子の反発係数、 $d$ : 粒子の直径、 $k_g, k_f$ : 係数

底面より上部においては $\tau_y$ の影響は小さいものと見なし、省略している。層流層の厚さを $\delta_+$ とすると $Re_* = u_* \delta_+ / \nu_0$ で表される。また $Re = u_m h_s / \nu_0$ とすると $\delta_+ \ll h_s$ と見なせるのは $Re_* \geq 70 \sim 100$ である。なお、 $\nu_0 = \mu_0 / \rho_m$ 、 $\rho_m = C\sigma + (1-C)\rho$ である。この結果 $Re_* = 70$ の時の $\delta_+$ は濃度分布から読み取った $h_s$ より大きくなり、流動砂層は乱流ではないと考えられる。

### 3.2 流動層厚の検討

江頭らは流動砂層の厚さを推定する次式を提案している。

$$h_s / h_t = \tan \theta / (\beta + \tan \theta) \quad (4), \quad \beta = (\sigma / \rho - 1) C \tan \phi_s / (1 + \alpha) - \{ (\sigma / \rho - 1) C + 1 \} \tan \theta \quad (5)$$

式(4)を用いて実験の流動砂層の厚さを推定し、濃度分布およびビデオ画面から読み取った値と比較し、図6に示す。これを見ると式(4)の値の方が実験値より大きくなっている。また、濃度の設定方法によっても式(4)は値が影響される。実験は前述したように固定床状態に近くなるように給砂してるため、江頭らの設定とは異なっていることが実験とあまり良く一致しない原因であると考えられる。

### 3.3 流速分布

江頭らは流動砂層とその上部の水流層について

それぞれ流速分布を提案している。

$$u(\eta) = u_i + u_{*w} \ln((1_0 + \kappa) / 1_0) \quad (6)$$

ここに、 $u_i$ : 境界における流速:  $1_0 = \sqrt{k_f} \{ (1-C) / c \}^{1/3} d$

$\eta$ : 境界面を基準とした深さ

$$u^-(z^-) = -2/3 \sqrt{f_r + f_g} A^{3/2} / B \quad (7)$$

ここに、 $u^- = u / \sqrt{gh_s}$ ,  $z^- = z / h_s$

図7に式(7)による流速分布とビデオから読み取った粒子速度の比較を示す。これを見ると $u_s$ の相対流速で比較すると $h_s / h_t$ および $C$ として式から求めた値を用いたものの方は実験結果とほとんど一致していない。一方、絶対的な流速で比較すると $h_s / h_t$ および $C$ に実

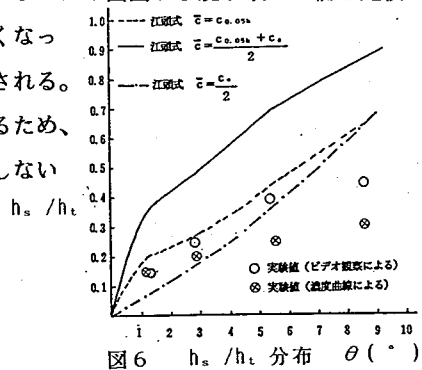


図6  $h_s / h_t$  分布  $\theta$  (°)

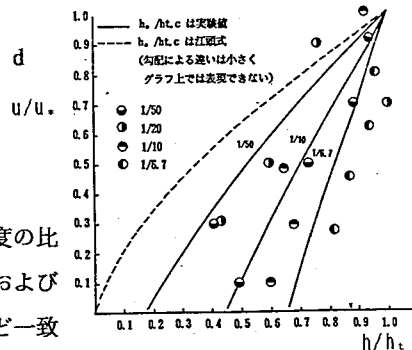


図7 土砂移動層の流速分布

験値を用いた場合の流速は実験値よりかなり大きくなる。図8に全体の流速について実験値と計算値を比較したものを示す。これを見ると計算値は流動砂礫層では実験値より小さく、水流層では実験値よりも大きくなる傾向が見られる。

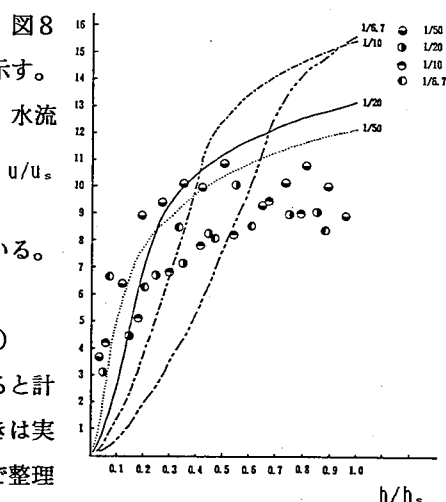


図8 流速分布

### 3.4 流砂量式

江頭らは流砂量式としてブラウン型の次式を提案している。

$$\Phi = 2/15 \sqrt{f_r + f_s} (1/\cos^2 \theta) \beta^{1/2} / (\beta + \tan \theta)^{5/2} (\sigma/\rho - 1) C_* \tau_*^{5/2} \quad (8)$$

式(8)と実験の全流砂量の比較を図9に示す。これを見ると計算値と実験値は値としては比較的近いが $\tau_*$ に対する傾きは実験値の方がもっと緩い。一方、浮遊砂量式を用い、 $\tau_*$ で整理すると式(2)より

$$\Phi = Ca \tau_*^{1/2} \exp(6aZ/h) \int_a^h (8.5 + 1/\kappa (y/ks) \cdot \exp(-6Zy/h)) dy \quad (9) \quad \Phi$$

となる。式(9)を用い、計算した値を図9に示す。これを見ると、浮遊砂量式による計算値は実験値よりも小さいが傾きはほぼ等しく、グラフ上で3/2である。式(9)の勾配は1/2であるが基準面濃度として実験値そのものを用いているため、プロットをつなぐ直線は傾きが式(9)より大きくなると思われる。実験値が移動床の集合流動の流砂量である式(8)と浮遊砂量式の間の勾配になることは現象として掃流砂と浮遊砂が混在する流れであることから見ても興味深い。

### 4. 今後の課題

固定床状態で浮遊砂が卓越する場合の基準面濃度の推定は $w_0/u_*$ の小さい範囲についてさらに検討する必要がある。一方、掃流砂が卓越する場合は既往の研究として江頭式の抵抗則を適用したが、実験精度の問題もあり、あまり良い適合性は得られなかった。ただし、流砂量としては $\tau_*$ と $\Phi$ で整理したところ、実験値が浮遊砂と掃流砂の中間的な勾配となったことは流動のメカニズムを解明する上で参考となるものであろう。今後は剪断力分布、濃度分布、流砂量式についてさらに検討していきたい。

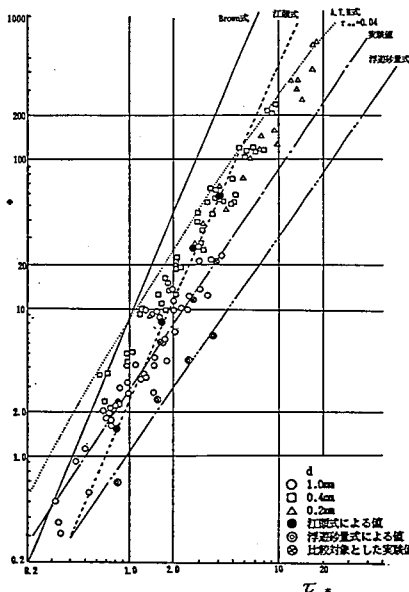


図9  $\tau_*$ と $\Phi$ の関係

参考文献

- 1) 北原一平、石川芳治、井良沢道也、宮本邦明：平成3年度砂防学会研究発表会概要集p118～p121
- 2) 水山高久、鈴木浩之、北原一平：急勾配水路の浮遊砂に関する実験的研究、昭和62年度砂防学会研究発表会概要集p194～p195
- 3) 北原一平、水山高久、井良沢道也：急勾配水路の浮遊砂量に関する研究、平成2年度砂防学会研究発表会概要集p264～p267
- 4) 江頭進治、芦田和男、高濱淳一郎、田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル、京都大学防災研究所年報第33号B-2, p293～pp306