

# 河道における微細土砂の生産・流出機構に関する研究

芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀・小川義忠

## YIELD PROCESSES OF WASH LOAD IN STREAM CHANNELS

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Tadayoshi KANAYASHIKI  
and Yoshitada OGAWA

### Synopsis

According to our field investigations and some results of wash load concentration calculated by the method presented in our preceding study, it was made clear that the yield of wash load was rather active in stream channels than in bare slopes in many drainage basins. Therefore, how to yield wash load in channels as well as in slopes should be made clear in order to develop a predictive method of wash load transport.

The purpose of the present study is to reveal the yield process and its formulation of wash load in channels. We consider both the erosion of sediments and the mixing action between the flowing water and pore water as dominant phenomena which are subject to the wash out of silts from channel sediments. It is discussed from theoretical grounds and experiments how the yield of wash load takes place through each mechanism, and then the yield processes are formulated.

### 1. 緒 言

約40年間, Einstein<sup>1)</sup>らは Enoree River における観測調査資料に基づいて, つぎのことを述べた。流砂には, 河道条件と水理条件から定まらない成分があり, これは, ある限界粒径よりも小さなものから構成されている。しかも河床には有意な量は存在しなく, その輸送量は, 上流域における供給条件, すなわち降雨, 流出, 植生などの流域要素によって規定される。そして, 彼らはこの種の流砂を wash load と定義した。

この研究が発表されて以来, 貯水池堆砂や河水濁度の問題に関連して, 実際の流域を対象とした wash load の濃度や輸送量に関する調査研究が活発に行われるようになり, 最近では, 生産場の条件, 雨水流などの外力条件および生産・流出機構を考慮した推定法<sup>2),3)</sup>が提案されている。これらの研究からも明らかなように, 汎用性のある wash load の推定法を確立するには, 対象とする流域において, 生産場, 外力および生産・流出機構といった三つの要素を的確に評価するとともに, これらをいかにモデル化するかが重要である。

著者<sup>3)</sup>らは, 生産場として裸地を考えるとともに, 従来着目されてなかった河道堆積物を考え, 十津川流域における調査結果ならびに解析結果より, 河道部からの流出が支配的になる場合が多いことを明らかにした。河道堆積物からの流出が支配的になるような流域には, 崩壊による堆積物や土石流および泥流堆積物が多く存在していることが推察される。典型的な例として, 御岳山噴火に伴う火山灰流出に関する調査結果<sup>4)</sup>がある。これによると, 御岳湖へ流入する wash load のほとんどが上流域の土石流および泥流堆積物から流送されている。

新・旧にかかわらず自然および人工的な裸地の多い流域においては, 一般に河道堆積物も多量存在することが推察されることや, 上述の結果から考えて, 河道堆積物からの流出量が全体に占める比率は高く, wash load に関する水理・水文学的解析法を確立するには, 河道における生産・流出機構の究明が必須の条件となる。本研究は, このような観点から進められたものであって, 以下, 河道における wash load の主要な生

産・流出機構として、流水と間隙水との交換および河道変動による機構を考え、これらについて理論的・実験的考察を行う。

以下、しばしば使われる「微細土砂」は、wash load と同義であり、目的に応じて限界粒径を設定できるものとし、これより小さい範囲の粒径成分を意味するものである。

## 2. 微細土砂の生産・流出機構およびそのモデル化

議論に先立って、主要な条件を示す。河道は長方形断面で置き換えることができる。このとき、底面および側壁に相当する部分を河床および側岸と呼ぶ。河道堆積物は、前述の限界粒径よりも小さい微細土砂とこれよりも大きい粗い成分から構成されている。微細土砂は、このような堆積物中において、粗い粒子に付着して存在しているものと間隙水中に浮遊しているものに分離される。また、間隙を含む堆積物の見かけ容積は、微細土砂の含有率によって変化せず、空隙率の変化も無視できるものとする。

### 2.1 河道変動による微細土砂の生産・流出

微細土砂を含む堆積物が流水の作用により侵食（洗掘）されると、侵食された堆積物に含まれる微細土砂は、侵食と同時に、かつ、粗い粒子の輸送過程において、流水中に浮遊する。逆に、掃流運搬されている粗い砂礫が堆積するとき、流水中の微細土砂をその間隙の中へ捕獲する。こういった現象を側岸と河床部に分けて考え、まず、側岸堆積物の侵食現象により流出する微細土砂の成分について考察しよう。

側岸堆積物の間隙率  $\lambda_s$ 、側岸高  $D$ 、水路幅  $B$  とし、時間的に平均化された拡張速度  $\partial B/\partial t$  を用いると、側岸侵食量  $q_s$  は次式で示される。

$$q_s = (1 - \lambda_s) D \partial B / \partial t \quad \dots\dots\dots (1)$$

側岸堆積物に含まれる微細土砂の含有率を  $p_{fs}$  とすれば、侵食を受けて側岸から離れた微細土砂は、侵食と同時に流水中へ流出する成分、粗い粒子の輸送過程において剥離流出する成分および粗い粒子に付着したまま最後まで流出しない成分に分割できる。しかし、粗い粒子に付着した成分の剥離過程に要する時間  $t_e$  が短かく、 $t_e$  時間内の  $q_s$  の変化が無視でき、 $t_e$  時間内の流水の流下距離  $t_e U$  ( $U$ : 流水の平均流速) が水路全長に較べて微小であれば、粗い粒子の輸送過程において剥離流出する成分は、侵食と同時に流出する成分に含めて扱うことができる。そこで、 $p_{fs}$  を流出する成分  $\delta_{1s}$  と流出しない成分  $\delta_{2s}$  に分割し、

$$p_{fs} = (\delta_{1s} + \delta_{2s}) p_{fs}, \quad (\delta_{1s} + \delta_{2s} = 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表示すれば、単位時間・単位河道長さ当りに流出する微細土砂量  $M_{1s}$  は、次式のように表わされる。

$$M_{1s} = \sigma \delta_{1s} p_{fs} q_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\sigma$ : 微細土砂および粗い土砂の密度である。

また、堆積物の間隙水の中には、微量かもしれないが、微細土砂が浮遊していることが考えられる。したがって、側岸侵食によってこの成分も流出する。間隙水中の微細土砂の流出量を  $M_{sc}$  とし、堆積物が水で飽和されているものとする、次式が成り立つ。

$$M_{sc} = \rho_e c_s q_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\rho_e$ 、 $c_s$  および  $c_s$ : それぞれ水の密度、間隙比 ( $= \lambda_s / (1 - \lambda_s)$ ) および間隙水に含まれる微細土砂の重量濃度である。以上が側岸侵食による微細土砂の流出である。

つきに河床における流出について考える。河床からの流出を、河床低下時 ( $\partial z/\partial t < 0$ ) と河床上昇時に分けて扱うことにすれば、前者においては、側岸侵食に伴う流出の場合と同様に考えることができ、後者においては、粗い粒子の堆積に伴う微細土砂の捕獲現象を定式化することにより扱うことができる。

まず、河床の侵食に伴う流出については、前述の議論と同様、河床堆積物に含まれる微細土砂の含有率を  $p_{fb}$  とし、これをさらに流出すると成分  $\delta_{1b} p_{fb}$  と流出しない成分  $\delta_{2b} p_{fb}$  とに分ける。すると、

$$p_{fb} = (\delta_{1b} + \delta_{2b}) p_{fb} \quad \dots\dots\dots (5)$$

であって、河床侵食によって流出する微細土砂量  $M_{1b}$  は、単位時間・単位河道長さ当りに

$$M_{1b} = -\sigma(1 - \lambda_b) \delta_{1b} p_{fb} B \partial z / \partial t, \quad (\partial z / \partial t < 0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 $\lambda_b$  および  $B$ : それぞれ河床堆積物の間隙率および河道幅である。また、間隙水中に浮遊している微細土砂の流出量  $M_{be}$  は、

$$M_{be} = -\rho c_b \lambda_b B \partial z / \partial t, \quad (\partial z / \partial t < 0) \dots\dots\dots (7)$$

のように示される。ここに、 $c_b$ : 間隙水中の微細土砂の重要濃度である。

一方、河床上昇時には、粗い粒子が堆積するとき、その間隙の中へ流水中の微細土砂が捕獲される。したがって、河道の流水中における微細土砂の重量濃度  $c$  とすれば、河床上昇によって捕獲される微細土砂量  $M_{bt}$ , つまり負の流出量は、つぎのように表示できる。

$$M_{bt} = -\rho c \lambda_b B \partial z / \partial t, \quad (\partial z / \partial t \geq 0) \dots\dots\dots (8)$$

以上が、河道変動, すなわち側岸侵食, 河床の侵食・堆積に伴う微細土砂の生産・流出機構である。

2.2 河道流水と間隙水との交換現象による微細土砂の流出

いま対象としている河道潤辺は、浸透性材料から構成されているため、潤辺を境にして運動量その他の混合現象が起る。こうした現象は、Zagni<sup>5)</sup>らの研究でも明らかにされている。

このような界面における物質の移動(輸送)は、形式的には種々の方法で記述できる。たとえば、微細土砂の輸送を gradient type で記述するとすれば、河床および側岸の単位時間・単位面積当りの流出量  $m_{eb}$  および  $m_{es}$  は、それぞれつぎのように書ける。

$$\left. \begin{aligned} m_{eb} &= -\rho(\varepsilon_b \partial c / \partial z - \omega_b c) |_{z=z_b} (= -\rho \varepsilon_b \partial c / \partial z, \omega_b = 0) \\ m_{es} &= -\rho \varepsilon_s \partial c / \partial y |_{y=0, B} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\varepsilon_b$  および  $\varepsilon_s$ : 河床および側岸の拡散係数,  $\omega_b$ : 微細土砂の沈降速度である。(9)式は、 $\varepsilon_b \partial c / \partial z |_{z=z_b}$  などの界面条件によって微細土砂の流出が規定されることを意味するものであるが、この種の水理変数を一般的に推定するには、理論的にも実験的にもかなり困難である。そこで、比較的容易に定められたパラメータによる表示法が必要であるが、(9)式に代わる方法として、交換速度<sup>6)</sup>を用いた表示法が考えられる。これは、河道潤辺から外向法線方向に乱流混合の影響を受ける交換層を考え、交換層と河道流水との間の物質輸送を交換速度  $V_e$  (LT<sup>-1</sup>) で評価しようとするものである。これによると、単位時間・単位河道長当りの微細土砂の流出量は、河床および側岸において、それぞれつぎのように表示される。

$$\begin{aligned} M_{eb} &= \rho V_{eb} (c_b - c) \lambda_b B \dots\dots\dots (10) \\ M_{es} &= 2\rho V_{es} (c_s - c) \lambda_s h \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 $V_{eb}$  および  $V_{es}$ : 河床および側岸における交換速度,  $h$ : 水深,  $c_b$  および  $c_s$ : 河床および側岸の交換層における間隙水中の微細土砂濃度で、前節で示したものと同一のものである。

上式で  $M_{eb}$  および  $M_{es}$  を知るには、 $V_{eb}$  および  $V_{es}$  を明らかにした上で、交換層の濃度  $c_b$  および  $c_s$  を知る必要がある。これらについては、つぎの方法によって議論する。Fig. 1 には、河床における交換層の微細土砂フラックスが示されている。同図において、 $ad$  は交換層の厚さであって、これは粗い土砂の粒子径の  $\alpha$  倍とみなされ、交換層に平均流がなければ、この図を参考にして、 $c_b$  に関する微分方程式がつぎのように導かれる。

$$\frac{dc_b}{dt} = -\left(\frac{V_{eb}}{\alpha d} + \frac{\omega_b}{\alpha d} + f_a\right)c_b + \frac{V_{eb}}{\alpha d} c \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $f_a$ : 吸着あるいは沈着係数である。流水濃度  $c$  が時間的に変化しなければ、 $t=0$  において  $c_b=0$  の条件下で、上式の解は、つぎようになる。

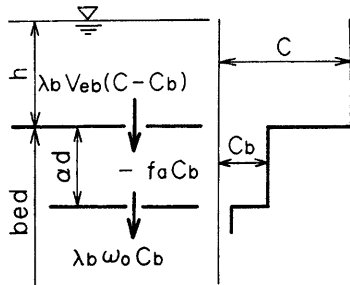


Fig. 1. Sketch of the mass transfer of wash load in the exchange layer.

$$c_b = \frac{k_2}{k_1} c (1 - e^{-k_1 t}) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、

$$k_1 = \frac{1}{\alpha d} (V_{es} + \omega_0 + \alpha d f_a), \quad k_2 = \frac{V_{es}}{\alpha d}$$

である。 $k_1$  が大きければ、上式は急速に定常状態、 $c_b = k_2/k_1 \cdot c$  に近づくことを示す。側岸における交換層の濃度  $c_s$  についても上と同様に扱うことができ、 $t=0$  において  $c_s=0$  とすると、濃度の時間変化は

$$c_s = \frac{k_2'}{k_1'} c (1 - e^{-k_1' t}) \dots\dots\dots (13)'$$

となる。ここに、

$$k_1' = \frac{1}{\alpha d h} (V_{es} h + \omega_0 \alpha d + f_a \alpha d h), \quad k_2' = \frac{V_{es}}{\alpha d}$$

である。上式の  $h$  は水深である。

交換現象による微細土砂の流出について定式化を図ったが、 $c_b, c_s$  を上述の方法から推定し、交換速度と水量との関係を知ることにより、この機構による微細土砂の流出量を知ることができる。これらについては、後述する。

2.3 河道における流水濃度の定式化

(1) 水の連続式

側岸が水で飽和されている場合は、側岸侵食に伴い間隙水が流水中へ供給される。また、河床の侵食・堆積現象を通して同様のことが起こる。降雨流出や浸透流による横流入がないものとし、河道変動による水の正・負の供給のみを考え、流水中の微細土砂の容積を無視すれば、時間  $t$  および主流の向き  $x$  軸として次式が導かれる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = e_s q_s - \lambda_b B \frac{\partial z}{\partial t} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $A$  および  $Q$ : それぞれ流水断面面積および流量である。上式は新たに導かれた連続式である。

(2) 微細土砂の連続式

2.1 および 2.2 において、河道における微細土砂の生産・流出に関する個々の機構について考察したが、これらをまとめると Fig. 2 のようになる。同図の①と③が河道変動による流出量を示すもので、①は (3) および (4) 式、③は (6), (7) および (8) 式に対応する。②と④は、交換現象による流出量であって、それぞれ (10) および (11) 式に対応するものである。さて、同図とこれらの式を参照すると、河道における微細土砂量に関する収支が次のように示される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c A) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho c Q) = (\sigma \delta_{1s} p_{fs} + \rho e_s c_s) q_s + F \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right) + 2 \rho \lambda_b h (c_s + c) V_{es} + \rho \lambda_b B (c_b - c) V_{eb} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、

$$F(\partial z / \partial t) = \begin{cases} -\{\sigma(1-\lambda_b)\delta_{1s}p_{fs} + \rho c_s \lambda_b\} B \partial z / \partial t, & (\partial z / \partial t < 0) \\ -\rho c \lambda_b B \partial z / \partial t, & (\partial z / \partial t \geq 0) \end{cases}$$

である。(14) 式を用いて上式を変形すると、流水濃度について、それぞれ次式が導かれる。

$\partial z / \partial t < 0$  (河床低下) のとき、

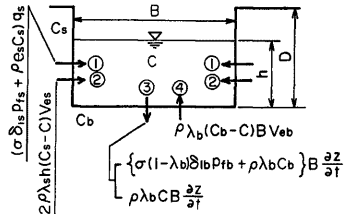


Fig. 2. Sketch of the transfer of wash load in a channel section.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \left\{ \frac{\sigma}{\rho} \delta_{1s} p_{fs} + e_s (c_s - c) \right\} q_s - \frac{B}{A} \left\{ \frac{\sigma}{\rho} (1 - \lambda_b) \delta_{1b} p_{fb} + (c_b - c) \lambda_b \right\} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{A} \{ 2\lambda_s h (c_s - c) V_{es} + \lambda_b B (c_b - c) V_{eb} \} \dots\dots\dots (16)$$

$\partial z / \partial t \geq 0$  (河床上昇) のとき、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \left\{ \frac{\sigma}{\rho} \delta_{1s} p_{fs} + e_s (c_s - c) \right\} q_s + \frac{1}{A} \{ 2\lambda_s h (c_s - c) V_{es} + \lambda_b B (c_b - c) V_{eb} \} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $U = Q/A$  である。

3) 流水濃度に関する近似式

次章で議論される交換速度や微細土砂の沈降速度を参考にすれば、交換層間隙水の濃度  $c_b$  および  $c_s$  は、河道の流水濃度に対応して急速に変化し、速やかに定常解、すなわち、

$$c_b = \frac{k_2}{k_1} c = \frac{V_{eb}}{V_{eb} + \omega_0 + \alpha d f_a} c \dots\dots\dots (18)$$

$$c_s = \frac{k_2'}{k_1'} c = \frac{V_{es}}{V_{es} + \alpha d / h \cdot \omega_0 + \alpha d f_a} c \dots\dots\dots (19)$$

に近づく。 $f_a$  に関しては、十分な情報がないが、電気化学的な吸着を無視し、微細土砂が間隙を沈降する際に粒子表面に触れることによる捕獲、つまり沈着を考えると、 $f_a$  のオーダーの推定は、つぎの方法で行うことができる。単位体積中に含まれる粗い粒子の個数を  $N$  とし、粒子を球形で近似できるものとする。粒子一個の射影面積を  $A_s$  とすれば、

$$f_a c_b = A_s N \omega_0 c_b$$

と置くことができ、これに  $A_s = \pi/4 \cdot d^2$ 、 $N = 8(1 - \lambda_i) / \pi d^3$  を代入すると、 $f_a$  は、つぎのように求まる。

$$f_a = 2(1 - \lambda_i) / d \cdot \omega_0 \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 $\lambda_i$  は  $\lambda_b$  あるいは  $\lambda_s$  を意味する。(18) および (19) 式に (20) 式を代入し、さらに、 $\alpha d / h \ll 1$  とすると、これらの式は、それぞれ、

$$c_b \doteq V_{eb} / [V_{eb} + \{1 + 2\alpha(1 - \lambda_b)\} \omega_0] \cdot c \dots\dots\dots (18)'$$

$$c_s \doteq V_{es} / [V_{es} + 2\alpha(1 - \lambda_s) \omega_0] \cdot c \dots\dots\dots (19)'$$

となる。交換層の厚さを Zagni らの研究を参考にし、粒子径の 2~3 倍 ( $\alpha = 2 \sim 3$ ) 倍程度に考え、交換速度に関する次章の結果および山地流域における wash load の粒径に関する観測結果を参考にすると、(18)' および (19)' より  $c_b$  および  $c_s$  は、

$$c_b, c_s \ll c \dots\dots\dots (21)$$

となる。この条件は、かなり普遍的な関係であることが推察される。したがって、このような条件下では、前述の (16) あよび (17) 式は、かなり単純化され、これらは次式のように書ける。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \beta_1 - \beta_2 c \dots\dots\dots (22)$$

ここに、

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{1}{A} \frac{\sigma}{\rho} \{ \delta_{1s} p_{fs} q_s - (1 - \lambda_b) \delta_{1b} p_{fb} B \frac{\partial z}{\partial t} \}, & (\frac{\partial z}{\partial t} < 0) \\ \frac{1}{A} \frac{\sigma}{\rho} \delta_{1s} p_{fs} q_s, & (\frac{\partial z}{\partial t} \geq 0) \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} 1/A \cdot (e_s q_s - \lambda_b B \partial z / \partial t + 2\lambda_s h V_{es} + \lambda_b B V_{eb}), & (\partial z / \partial t < 0) \\ 1/A \cdot (e_s q_s + 2\lambda_s h V_{es} + \lambda_b B V_{eb}), & (\partial z / \partial t \geq 0) \end{cases} \dots\dots\dots (24)$$

である。(22) 式、2.1 および 2.2 の議論からも明らかなように、 $\beta_1$  は側岸および河床の侵食に伴う微細土砂の source を表す項であって、 $\beta_2$  は、侵食に伴う交換層間隙水の流出、粗い粒子の堆積に伴う微細土砂の捕

獲, および交換現象による微細土砂の捕獲によって流水を浄化させる項である。

なお, (22) 式は,  $U, \beta_1$  および  $\beta_2$  が一定のとき,

$$c(t, x) = c_0(t - x/U)e^{-\frac{\beta_1}{U}x} + \frac{\beta_1}{\beta_2}(1 - e^{-\frac{\beta_1}{U}x}) \dots\dots\dots (25)$$

となる。ここに  $c_0(t - x/U)$  は, 上流端  $x=0$  における微細土砂濃度である。

以上, 本章では, 微細土砂の生産・流出機構について考察するとともに, これを定式化した, 河道における微細土砂濃度は, 河道変動  $q_s$  および  $\partial x/\partial t$ , 堆積物に含まれる微細土砂のうち側岸および河床侵食に伴って流出する成分  $\delta_{1s}p_{fs}$  および  $\delta_{2s}p_{fs}$ , さらに交換速度  $V_{es}$  および  $V_{eb}$  によって定められることが明確になった。次章において, これらのパラメーターのうち最も主要と思われる,  $q_s, \delta_{1s}p_{fs}$  および  $V_{eb}$  について, 実験的検討を行う。

3. 微細土砂の生産・流出に関する実験的考察

3.1 実験およびその条件

実験は, 幅 40, 深さ 15 cm の長方形断面をもつ全長 8 m のアクリル製の勾配可変水路を用いて行われた。水路への給水は 2 台のポンプを用いて行われるが, 一つは微細土砂を含まないきれいな水を, 一つは微細土砂を含んだ濁水を供給するためのものである。また, 水路下流端には, 排水用ポンプが設けられている。水路には, 種々の測定機器を搭載して水路上を流下方向 ( $x$  軸) および幅方向 ( $y$  軸) に移動させるための測定用台車が設けられていて, 台車の  $x$  および  $y$  座標はポテンシオメータによって検出できるようになっている。

測定項目は, 流量, 下流端流砂量, 水位, 河道縦横断, 流水濃度および水温などである。流量は計量升により, 流砂量(粗い成分)は, 下流端に設けられた砂捕獲容器, 水位はポイントゲージおよびサーボ式水位計, 河道縦横断はポイントゲージ, 水温はアルコール温度計を用いて測定された。また, 流水濃度は, ガリウム磁素発光ダイオードを光源, シリコンホトトランジスタを受光部にもつ光学的な測定器を用いて測定された。

実験用材料は, Fig. 3 に示すように, A~E の 5 種類であって, これらを便宜的に A, B, C, D, および E 砂と呼ぶことにすると, A 砂~D 砂の比重は 2.64, 平均粒径はそれぞれ 0.049 cm, 0.143, 0.259 および 0.557

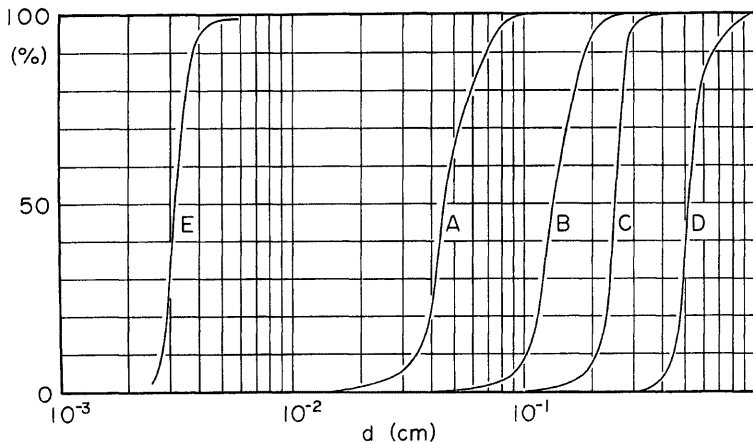


Fig. 3. Grain size accumulation curves of materials used in experiments. (E: material of wash load)

cmである。E砂は微細土砂材料として用いられたものであって、その中央粒径および比重は、それぞれ0.0032 cmおよび2.66である。

Fig. 4は、上述の材料を用いて整形された実験初期の河道横断形状であって、実験目的に応じて、(A)～(C)の形状はうち適当な断面形状が選ばれている。

実験は、大きく分けて4種類行われた。

Exp. I-1～I-2:

E砂とA砂を重量比1:19 ( $p_{fs}=p_{fs}=0.05$ )に混合し、これをFig. 4の(C)のように、アクリル製水路に敷きならし、上流端より微細土砂を含まないきれいな水(清水)を定常給水することにより、種々の測定が行われている。この実験は、河道侵食や交換現象が微細土砂の流出量に対してどのように寄与しているのか、すなわち、(22)式の妥当性を検討するために行われていたものであるが、堆積物に含まれる微細土砂が、側岸侵食量に対してどのような影響を及ぼすかについても検討されている。

Exp. II-1～II-2:

E砂とA砂を重量比1:19に混合したものを、水路右岸側の1m区間にFig. 4(B)のような断面に整形して、この区間を受食性区間とし、その上流0.5m、下流2.5m区間の右岸側にA砂を敷き、さらに流水の作用で表面が侵食されないよう表面にD砂を敷いて受食性区間と同様な断面が作られている。すなわち、微細土砂の供給が受食性区間からのみ行われるような断面に設定されている。本実験は、側岸侵食による微細土砂の生産・流出、つまり  $\delta_{1s}p_{fs}q_s$  のうち、 $p_{fs}$  および  $q_s$  を既知として、 $\delta_{1s}$  あるいは  $\delta_{2s}$  を調べるために行われている。

Exp. III-1～III-10:

A, B, C砂をそれぞれ4m区間にわたってFig. 4(A)のように敷きならし、E砂を用いて作られた濁水を上流端より定常給水して実験が行われている。ただし、Exp. III-3, III-5, III-6およびIII-10は、水路幅が20cmに狭められている。実験の初期条件の設定において特に注意すべき点は、河床に敷かれた材料を十分洗浄して微細土砂を含まないこと、および河床間隙が清水によって飽和されていることなどである。このような実験によって、流水濃度の流下方向の変化を調べ、交換速度  $V_{es}$  と水理量との関係が検討されている。

Exp. IV-1～IV-6:

実験は、A砂を4m区間にわたってFig. 4(C)断面のように敷きならし、清水を定常給水して河動変動が測定された。この実験によって、河床形態と側岸侵食量との関係や直線流路を対象として提案されている側岸食量式と実験値との検討が行われている。

以上のような実験が行われているが、それらの条件を示すとTable 1のようである。ここに、 $Q$ : 流量,  $i_b$ : 初期河床勾配,  $u_*$ : 実験初期の断面平均摩擦速度, materials: 実験用材料 (Fig. 3参照), shape: 初期河道横断形状 (Fig. 4参照),  $L$ : 移動床または受食性の側岸長,  $\lambda$ : 河床または側岸の間隙率,  $T$ : 水温である。

3.2 交換速度に関する実験的検討

まず、交換速度を支配するパラメータについて次元解析的考察をしよう。前章で述べたように、交換速度は界面における物質の移動を、一次元解析のように巨視的な観点から取り扱うために導入されたものであるから、界面近傍の乱れやそのスケールと密接な関係があり、また、水粒子の通り易さという点で、間隙の大きさおよびその個数によって支配されるものと思われる。すると、交換速度を支配するパラメータとして、水の密度  $\rho$ , 粘性  $\mu$ , 摩擦速度  $u_*$ , 水深  $h$ , 粒径  $d$  および間隙率  $\lambda$  が考えられる。これらのパラメータを用いて無次元量を作ると、交換速度は形式的につきのように書ける。

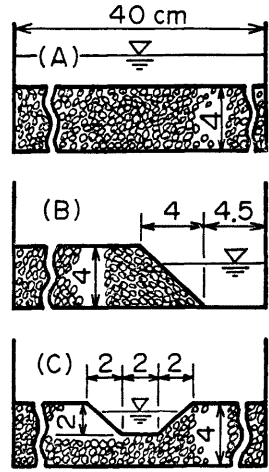


Fig. 4. Shapes of cross section in experimental flume before experiments.

Table 1. Hydraulic quantities and some factors of experiments.

Exp. No.	$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$i_b$	$u_*$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )	materials	shape	$\lambda$	$L$ ( $\text{m}$ )	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
I- 1	50	1/30	3.52	E+A	(C)	0.46	4	10.5
I- 2	124	1/100	2.43	"	"	"	"	"
II- 1	429	1/100	2.65	E+A, D	(B)	0.45	1	10.5
II- 2	796	"	3.86	"	"	"	"	"
III- 1	550	1/100	2.34	A	(A)	0.43	4	10.0
III- 2	895	"	2.63	"	"	"	"	"
III- 3	654	"	3.14	"	"	"	"	6.0
III- 4	461	"	2.46	B	"	0.42	"	10.0
III- 5	695	"	3.30	"	"	"	"	6.0
III- 6	957	"	3.66	"	"	"	"	"
III- 7	232	"	2.16	C	"	"	"	10.0
III- 8	464	"	2.65	"	"	"	"	"
III- 9	829	"	3.10	"	"	"	"	"
III-10	962	"	3.80	"	"	"	"	6.0
IV- 1	19.4	1/30		A	(C)	0.43	4	12.0
IV- 2	35.9	"		"	"	"	"	12.6
IV- 3	52.8	"		"	"	"	"	14.5
IV- 4	37.6	1/100		"	"	"	"	19.2
IV- 5	78.0	"		"	"	"	"	23.1
IV- 6	122	"		"	"	"	"	22.1

$$V_{ei}/u_* = F(u_* d/\nu, h/d, \lambda) \dots \dots \dots (26)$$

ここに、 $V_{ei}$ :  $V_{e0}$  または  $V_{es}$ ,  $\nu$ : 動粘性係数である。

以下、実験結果の一部について定性的な考察を行った後、上式の関係を実験的に検討する。なお、Exp. III のシリーズは、 $q_b=0$ ,  $\partial x/\partial t=0$  および  $V_{es}=0$  の条件下で行われた実験であり、前章の (23) 式および (24) 式より、 $\beta_1=0$ ,  $\beta_2=\lambda_b B V_{e0}/A$  となる。したがって、路上流端濃度を  $c_0$  とおくと、流下方向の濃度の変化は  $c(x)=c_0 e^{-\lambda_b B V_{e0}/Q \cdot x} \dots \dots \dots (27)$

と表示され、濃度変化を実験的に調べることににより、 $V_{e0}$  を求めることができる。

Fig. 5 は、Exp. III-7~III-10 に関して、 $x=0, 1, 2, 3, 4\text{m}$  断面で測定された流水濃度の時間的な変化を示したもので、流下距離の増加に伴って濃度が減少しているのがわかる。流下方向の濃度変化に対しては、交換現象以外に粒子沈降によるものも考えられるが、Exp. III のシリーズにおいて  $0.025 < \omega_0/u_* < 0.045$  の範囲にあって、粒子沈降による濃度変化は無視できるものと思われる。なお、これについては、再び述べる。

Fig. 6 は、Fig. 5 に示す結果について、流水濃度の  $x$  方向の変化を示したものである。図中のデータは、Fig. 5 の図中に示す時間範囲 (—) の平均値である。同図より濃度は指数遞減することが明らかであって、これは前章で示したモデルの妥当性を示すものである。

Fig. 7 は、流下方向の濃度変化より求められる河床における交換速度  $V_{e0}$  について、(26) 式の関係、すなわち  $h/d$  をパラメーターとして、交換速度の無次元量  $V_{e0}/u_*$  と粒子レイノルズ数  $u_* d/\nu$  の関係調べたものである。なお、間隙率に関しては、 $\lambda_b=0.42\sim 0.43$  の範囲にあり、本実験ケースでは一定とみなせる。したがって、ここでは、これを除外している。また、代表粒径  $d$  として平均粒径  $d_m$  がとられている。

図より明らかなように、データには若干のばらつきはあるが、 $V_{e0}/u_*$  は  $h/d$  および  $u_* d/\nu$  による顕著な変化を示さず、この実験範囲 ( $1.79 \leq h/d \leq 20.4$ ,  $8.77 \leq u_* d/\nu \leq 66.8$ ) においては、ほぼ

$$V_{e0}/u_* = \text{const.}, \quad (\text{const.} = 4.33 \times 10^{-3}, \lambda_b = 0.42 \sim 0.43) \dots \dots \dots (28)$$

なる関係が認められる。すなわち、交換速度は、粒径や水深から直接的な影響を受けず、摩擦速度にほぼ比例することがわかる。



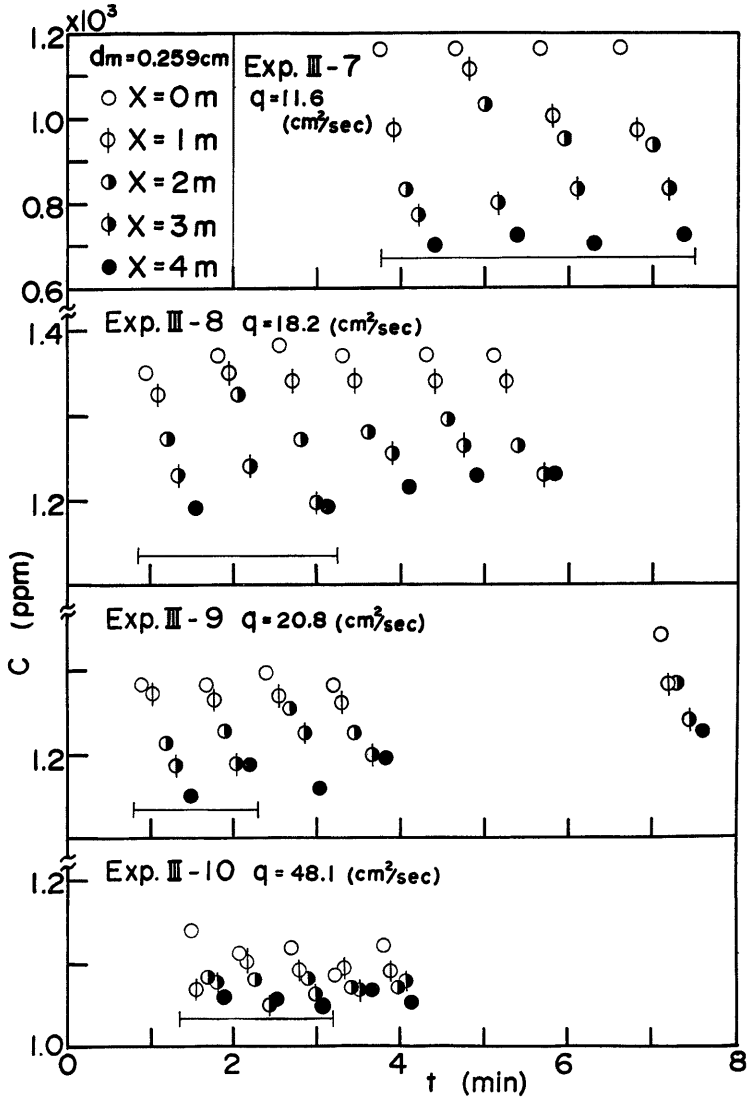


Fig. 5. The concentration of wash load in flowing water. The decreases of concentration in flow direction are subject to the mixing action between flowing water and pore water.

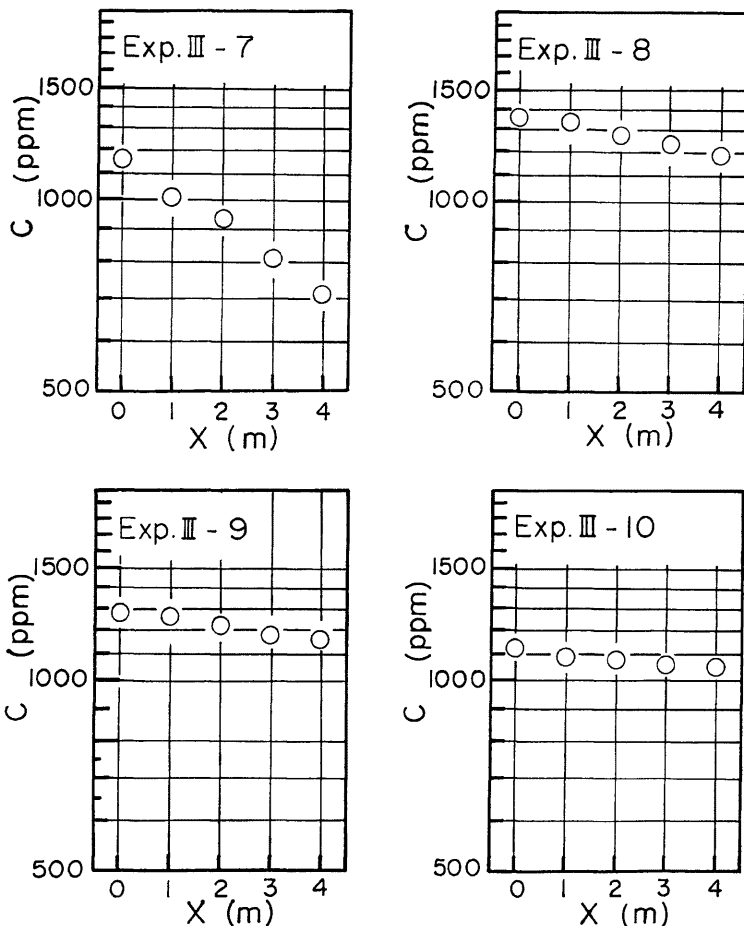


Fig. 6. Examples of the changes of wash load concentration in flow direction.

以上の結果は微細土砂の沈降を無視できるものとして議論されたものであるが、つぎのことに、このことの正しさが証明できる。もし、粒子沈降による濃度変化が卓越するものとする、流水の濃度変化は、(27)式において  $V_{eb}$  の代わりに  $a\omega_0$  ( $a \leq 1$ ,  $a=1$ : 自由沈降) と置いて表示できるはずである。したがって、濃度変化に関する実験結果は、 $a\omega_0/u_* = \text{const}$  なる関係で表示されなければならない。 $\omega_0$  は一定であるので、実験の濃度変化を説明するためには、 $a$  が  $u_*$  に比例しなければならない。実際には、自由沈降において  $a \approx 1$  程度であって、 $u_*$  が増加すると  $a$  は減少すると考えるのが一般的である。また、中央粒径の沈降速度は約  $0.1 \text{ cm/s}$  であって、 $a\omega_0/u_*$  の実験範囲は、 $0.025a \sim 0.045a$  程度の範囲にあり、 $a \approx 1$  程度の値を考えると、濃度の逓減勾配は Fig. 6 に示すものより数倍～10倍程度大きくなる必要がある。以上示し

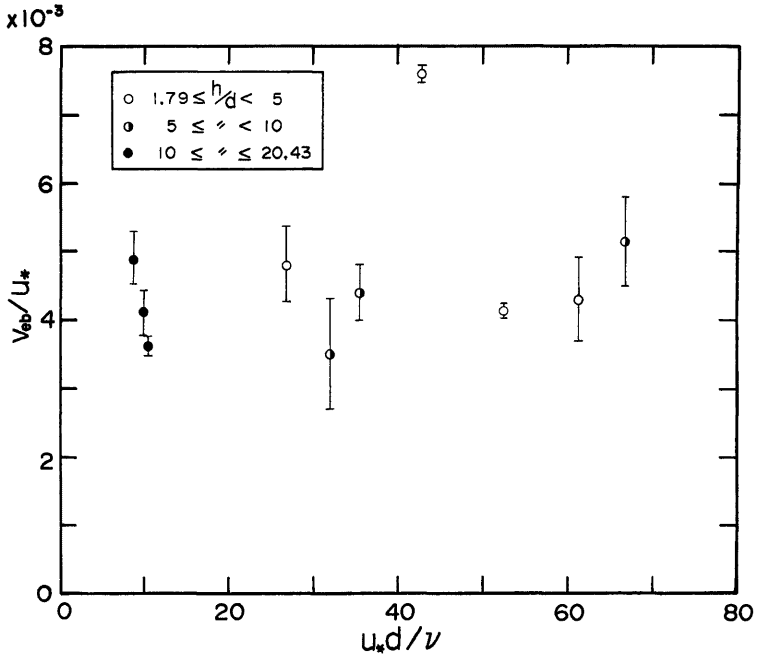


Fig. 7. Experimental results concerning the mixing or exchange velocity on bed.

たことにより、本実験においては、粒子沈降による濃度変化は殆んどなく、これを無視した扱いの妥当性が示されたものと思われる。

### 3.3 側岸侵食による微細土砂の流出に関する実験的検討

側岸侵食による微細土砂の流出は、(3)式、すなわち  $M_{s1} = \sigma \delta_{1s} p_{fs} q_s$  で表されるが、微細土砂の含有率  $p_{fs}$  は堆積物の条件から定められる。したがって、 $M_{s1}$  を知るには  $\delta_{1s}$  および  $q_s$  を経験的あるいは水理学的に評価する必要がある。 $q_s$  については 3.5 で考察するので、ここでは、 $\delta_{1s}$  について検討する。

$\delta_{1s}$  は、側岸侵食による  $p_{fs}$  の流出成分であり、流出しない成分  $\delta_{2s}$  との間に、 $\delta_{1s} + \delta_{2s} = 1$  なる関係がある。したがって、側岸侵食を受けて河床に堆積した土砂に含まれる微細土砂の含有率  $p_{fd}$  とすると、

$$\delta_{2s} = p_{fd} / p_{fs}, \quad \delta_{1s} = 1 - p_{fd} / p_{fs} \quad \dots \dots \dots (29)$$

なる関係があり、 $p_{fd}$  を調べることで、 $\delta_{1s}$  が知れる。ここでは、Exp. II-2 のデータよりこれらのことを検討しよう。

Fig. 8 には、12分18秒間通水した後、受食性区間（右岸 1m 区間）において侵食され、河床に堆積した土砂に含まれる微細土砂の含有率を流下方向に調べた結果および受食性区間の単位河道長当りの堆積量の分布が示されている。受食性側岸に含まれる微細土砂の含有率  $p_{fs}$  は 5% であり、一方  $p_{fd}$  は 1 測点を除き全区間とも 0.4% 以下であり、側岸侵食を受けた土砂は、それに含まれる微細土砂のほとんどの成分をすでに流出していることがわかる。 $p_{fd}$  の縦断分布について詳細にみると、 $p_{fd}$  は、 $p_{fd} \ll p_{fs}$  であるものの、受食性区間では直線的に増加し、この区間直下流において急激に減少し、下流端まで一定値を示している。受食性区間の増加傾向については、同図の下方に示す堆積量の分布を参考にすると、つぎのように解釈できる。

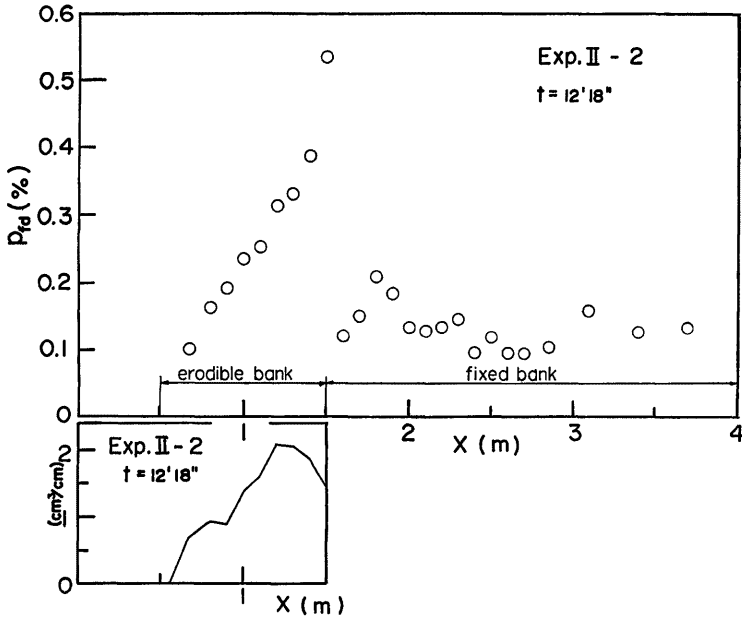


Fig. 8. The composition rate of wash load in bed materials which were transported from the erodible bank.

この区間では堆積量もほぼ直線的に増加していることから、滑落した土砂の一部が流水の作用をほとんど受けることなく堆積していることが考えられる。一方、受食区間直下流において急激に減少して、下流全域で一定値を保持する理由としては、つぎのことが考えられる。粗い粒子に付着した微細土砂が剥離するには、限界値以上の流体力が一定時間作用することが必要と思われるが、その限界値が小さい場合、作用時間は無視できるほど小さい、すなわち、流水の作用下で侵食を受けるやいなやほとんどの微細土砂が流出することが推察される。

同図の結果ならびに上の考察より、流出しない微細土砂の成分は、受食区間の下流域における微細土砂の含有率によって定められることがほぼ明らかにされた。そこで下流域の  $p_{fd}$  を平均すると、 $p_{fd}=0.135\%$  であって、これを (29) 式に適用すると、 $\delta_{1s}$  および  $\delta_{2s}$  はそれぞれつぎのような値になる。

$$\delta_{1s}=0.973, \quad \delta_{2s}=0.027$$

この種の問題における精度の面から考えて、これらの値は、 $\delta_{1s}=1$  および  $\delta_{2s}=0$  としてもさしつかえないことを意味するものであり、また、山地流域の河道部において、流水の作用を常時受けている堆積物中や、流水の作用を受けた堆積物の表面には、微細土砂がほとんど含まれていない事実に対応するものである。

### 3.4 側岸侵食量式と実験値との比較

非粘性材料から作られる直線流路の側岸侵食量式には、掃流砂量式からの類推に基づいた芦田・村本・奈良井<sup>7)</sup>の式、これを修正した村本・田中・藤田<sup>8)</sup>の式、斜面上における砂粒の運動を考察した上で導かれた平野<sup>9)</sup>、長谷川<sup>10)</sup>および藤田<sup>11)</sup>らの式がある。一方、比較の対象となる実験値は直線流路、蛇行および網状流路のものであるが、実験値を呈示する前に、Exp. IV-3 における側岸侵食の進行状況の一例を示す。

この実験は、村本・藤田<sup>13)</sup>の領域区分によると実験初期においては Alternating Bar の領域にあり、通水開始後、数分が経過した時点では Braided の領域にある。

Fig. 9 (a), (b) には、それぞれ通水開始から 2'42" までと 2'42"~5'39" までの左岸、右岸およびこれらを加えた見かけの侵食量を流下方向に累加したものが  $V_{SL}$ ,  $V_{SR}$  および  $V_{ST} (=V_{SL}+V_{SR})$  として示されている。いわゆる側岸侵食量と言われるものは  $V_{ST}$  の勾配に  $(1-\lambda_s)$  を乗じ、通水時間で除したものに相当する。さて、(a) 図は通水初期のものであって、 $V_{SL}$ ,  $V_{SR}$  とも直線的に増加しており、しかも上・下流端近傍を除いて、これらの勾配は等しく、蛇行はまだ発達しておらず、この時点においては直線流路の一樣拡幅の段階にある。(b) 図は、侵食が進み、すでに蛇行流路が形成されている時点のもので、 $V_{SL}$ ,  $V_{SR}$  には顕著な周期性がみられる。しかもこれらの位相差は  $180^\circ$  になっている。これは、流路とともに水流も蛇行し、侵食力（掃流力）が周期性をもっていることを示唆するものであって興味深い結果といえよう。左右岸の侵食には、このように周期性がみられるが、 $V_{ST}$  についてみると、左右岸における変化が相殺され、あたかも一樣拡幅の侵食状況を呈しているようにみえる。

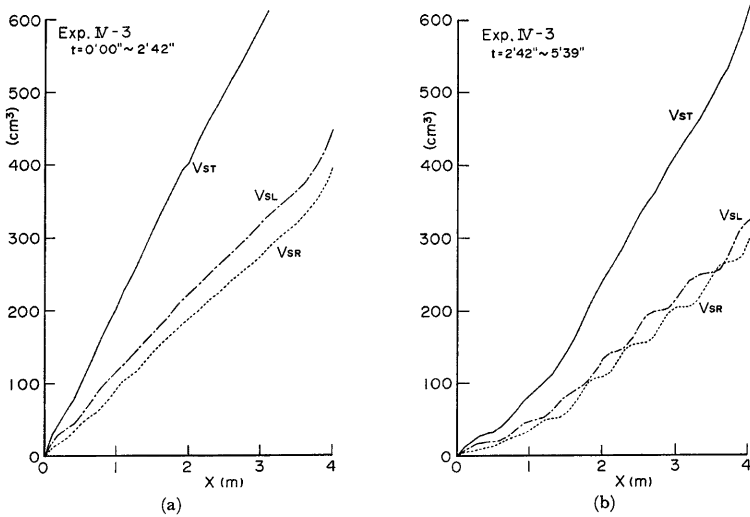


Fig. 9(a), (b). The accumulation curves of the volumes of eroded materials by bank erosion. Where  $V_{SL}$ : the volume of eroded materials at the left side bank,  $V_{SR}$ : the volume of eroded materials at the right side bank and  $V_{ST} = V_{SL} + V_{SR}$ .

以上のことより、直線流路以外の側岸侵食量は一波長あるいは数波長にわたってこれを平均することにより直線流路のものとの比較が可能であることがわかる。そこで、種々の領域の実験値と側岸侵食量式との比較を行う。なお、用いられる式は以下のものである。

芦田・村本・奈良井の式：

$$q_{s*} = N_1(1-\lambda_s)(\tau_* - \tau_{*c})^n, \quad (n=2, N_1=20) \dots\dots\dots (30)$$

ここに、 $q_{s*} = q_s / u_* d_m$ ,  $\tau_* = u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_m$ ,  $\tau_{*c} : \tau_{*c}$  の限界値,  $u_*$ : 断面平均摩擦速度,  $d_m$ : 平均粒径である。

村本・田中・藤田の式：

$$q_{s*} = N_1(\tau_* - \tau_{*c}), \quad (N_1=3\sim 5) \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 $q_{s*} = q_s / u_{*s} d_m$ ,  $\tau_{*s} = u_{*s}^2 / (\sigma / \rho - 1) g d_m$ ,  $u_{*s}$ : 側岸近傍の摩擦速度 ( $u_{*s} = \varepsilon u_*$ ,  $\varepsilon \approx 0.75$ ) である。

平野の式:

$$q_{s*} = 3.4 \frac{h_b}{b} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_{*}}} (\tau_{*c} - \tau_{*cL}) \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 $q_{s*} = q_s / u_{*s} d$ ,  $b = B/2$ ,  $h_b$ : 水路中央部水深である。

藤田の式:

$$q_{s*} = \alpha_* v'_g \left( \frac{\tau_{*c}}{\tau_{*c}} - \frac{\tau_{*cL}}{\tau_{*cL}} \right) \dots\dots\dots (33)$$

ここに、 $q_{s*} = q_s / u_{*s} d$ ,  $\tau_{*cL}$ : 限界値,  $\tau_{*cL}$ : 水平路床上の無元限界掃流力 ( $\approx \tau_{*c}$ ),  $v'_g$ : 潤辺に沿った粒子の移動速度,  $\alpha_*$ : 係数である。

Fig. 10 (a)~(d) には、それぞれこれらの式と実験値とが比較されている。実験値には、微細土砂を含んだ Exp. I-1 および I-2 の結果も含まれており、他のものと区別するため、パー付で示されている。また、図中のデータは、通水を一旦停止して縦横断面形状を測定した時点の河道形状に基づいて、直線流路、蛇行および網状流路に分類されている。ただし、側岸侵食の進行に伴い河床形態も変化するので、蛇行領域のデータは、直線流路の侵食がかなり支配的であって、網状流路に分類されているものは、蛇行流路の侵食形態が支配的であったと見なした方がよい。

これらの図において、まず実験値についてみると、同じ水理量に対して、10倍程度のばらつきがみられる。これを河道形態別にみると、網状流路における側岸侵食が一番大きく、蛇行および直線流路においては明瞭な差は認められない。また、微細土砂を含んだパー付のデータと他のものと比較しても、これらには顕著な違いは認められないことがわかる。

図中に示す種々の侵食量式と実験値を比較すると、(c) 図、すなわち、平野の式と実験値とは若干異なった傾向を示すようであるが、(a), (b) および (d) 図においては、それぞれの侵食量式と実験値との傾向はほぼ一致している。しかし、掃流力の小さい範囲においては、側岸侵食に対して限界掃流力が支配的になるため、これらの式間の違いは実験値のばらつきの範囲内であって、どの式が実験値を最もよく説明するかは、十分検討できない。

実験データのばらつきや河道形態による侵食量の違いに関しては、局所的な水理量がかかなり支配的な要因になっていることが推察される。そこで、側岸近傍の摩擦速度の縦断変化が側岸侵食量にどのような影響を及ぼすかについて、簡単な条件を設定し、村本らの式を用いて検討してみよう。水流が蛇行することにより、側岸近傍の摩擦速度も周期性を帯びることが容易に推察されるので、左岸および右岸における摩擦速度、 $u_{*sl}$  および  $u_{*sr}$  の縦断分布を周期関数を用いてつぎのように設定する。

$$u_{*sl}(x) = \bar{u}_{*s} + a \sin(2\pi x/l) \dots\dots\dots (34a)$$

$$u_{*sr}(x) = \bar{u}_{*s} + a \sin\{2\pi(x-l/2)\} \dots\dots\dots (34b)$$

ここに、 $\bar{u}_{*s}$ : 側岸近傍の摩擦速度の一波長間の平均値,  $a$ : 振幅,  $l$ : 波長である。いま、左右岸の侵食量をそれぞれ  $q_{sl}$  および  $q_{sr}$  とし、これらは (31) 式を用いてつぎのように書けるものとする。

$$q_{sl}(x) = q_{sr}(x+l/2) = q_s/2 = \frac{N_1}{2} (\tau_{*c} - \tau_{*cL}) u_{*s} d_m \dots\dots\dots (35)$$

(34a) および (34b) 式を上式に代入し、 $u_{*c} \leq u_{*sl}$ ,  $u_{*sr}$  の条件下でそれぞれ  $\int_0^l q_{sl} dx/l = \bar{q}_{sl}$  および  $\int_0^l q_{sr} dx/l = \bar{q}_{sr}$  なる演算を行い、一波長間の平均値を求めて  $\bar{q}_s = \bar{q}_{sl} + \bar{q}_{sr}$  とすると、一波長において平均された無次元側岸侵食量がつぎのように求められる。

$$\bar{q}_{s*} = N_1 \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{a}{\bar{u}_{*s}} \right)^2 \right] \bar{\tau}_{*c} - \tau_{*cL} \dots\dots\dots (36)$$

上式は、平均水理量  $\bar{u}_{*s}$  および  $\bar{\tau}_{*c}$  を用いて推定した場合に較べ、 $3/2 \cdot N_1 (a/\bar{u}_{*s})^2 \bar{\tau}_{*c}$  だけ側岸侵食量が増加することを示すものである。このことより、データのばらつきや河道形態による側岸侵食量の大小に対する側岸近傍の水理量の分布がいかに重要な要因になっているかがわかる。

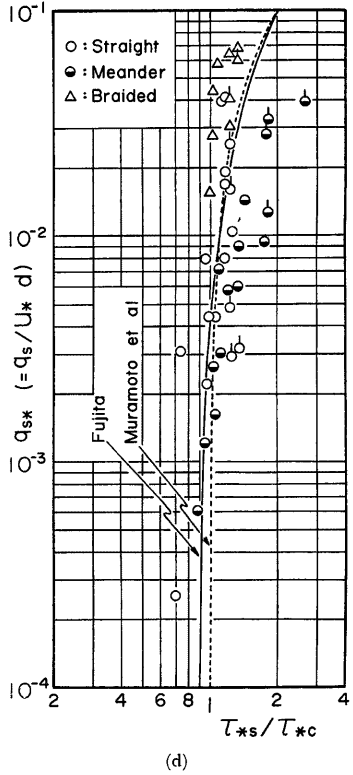
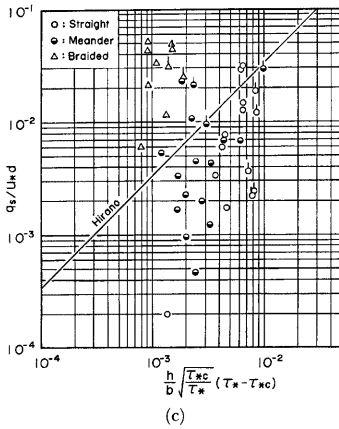
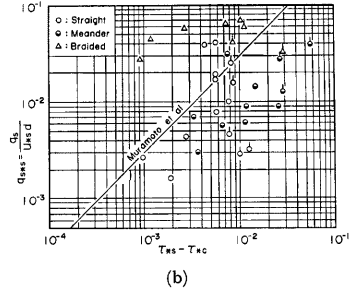
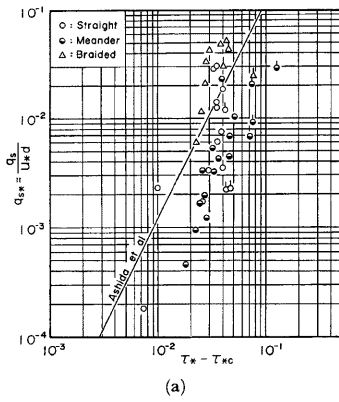


Fig. 10(a), (b), (c), (d). Comparison between some formulae and experiments for bank erosion rate.

#### 4. 微細土砂の生産・流出モデルの適用

前章において、(22)式に含まれる主要なパラメーターについて実験的検討を行った。ここでは、これらの結果を(22)式に適用して Exp. I-1 および I-2 における微細土砂の流出量を解析し、これと実験値との比較を行うとともに(22)式の特性について若干の考察を行う。

まず、(22)式の適用に当って、前章の結果より  $\delta_{1s} = 0.973$   $V_{eb}/u_* = V_{es}/u_* = 4.33 \times 10^{-3}$  とし、 $q_s$  については実験値を用いるが、河道を 1~3 区間に分けて、一つの区間においてこれを一定とみなす。また、Exp. I-1 および I-2 とも上流端のごく近傍を除いて河床上昇の傾向にあったので、河床低下区間を無視する。

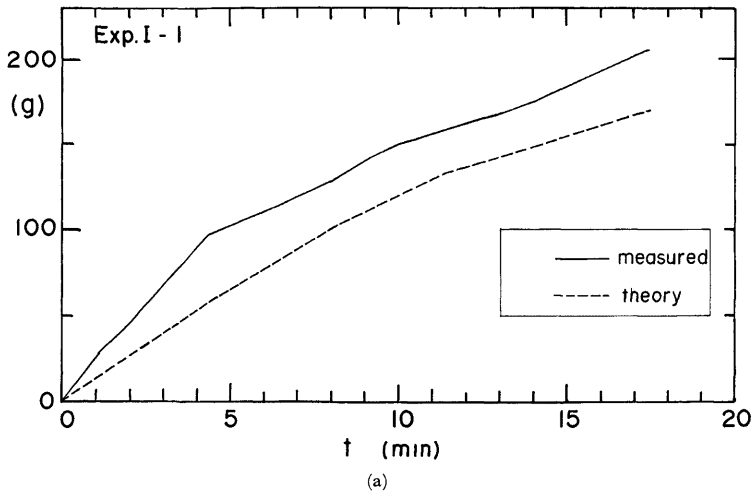
Fig. 11 (a), (b) には、水路下流端において測定された微細土砂の流出量(実線)と(22)式による推定値(破線)が示されている。ただし、流出土砂量は、時間的に累加されたものである。Fig. 11 (a) において、0~4'20" の間の実験値と計算値には大きな開きがあるが、これは下流端における流路の局所的な振幅の影響が考慮されてないことなど、側岸侵食量が正しく設定されてないことによるものである。このことを考慮して、これらの図における計算値と実験値を比較すると、両者はかなりよく一致していることが明らかである。

つぎに、これらの計算例において、微細土砂の流出量  $Q_{sw}$  に関して、交換現象による負の流出量がどの程度の比率になっているかをみるため、 $V_e/u_* = 0$  としたときの流出量  $Q'_{sw}$  とすると、

$$\text{Exp. I-1: } (Q'_{sw} - Q_{sw})/Q_{sw} \doteq 0.11 \sim 0.19$$

$$\text{Exp. I-2: } (Q'_{sw} - Q_{sw})/Q_{sw} \doteq 0.042 \sim 0.062$$

となっている。前者においては、交換現象による流水の浄化作用がかなり顕著にみられるが、後者においては、無視できる程度である。こういった交換現象の果たす役割は、(22)式の右辺をみると明らかなように、流水濃度や水路の長さおよび水理条件に応じて変化する。ここで、これらのことをさらに検討するため、実際規模の現象を念頭において、水路幅  $B = 112$  m, こう配 0.01 の水路に、上流端より微細土砂を含まない水を  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$  で定常給水したとき、 $V_{eb}/u_* = V_{es}/u_* = 4.33 \times 10^{-3}$  および  $V_{eb}/u_* = V_{es}/u_* = 0$  とした場合の流水濃度の縦断変化をみてみよう。計算に当って、側岸は一様侵食を受けるものとし、侵食量式には(31)





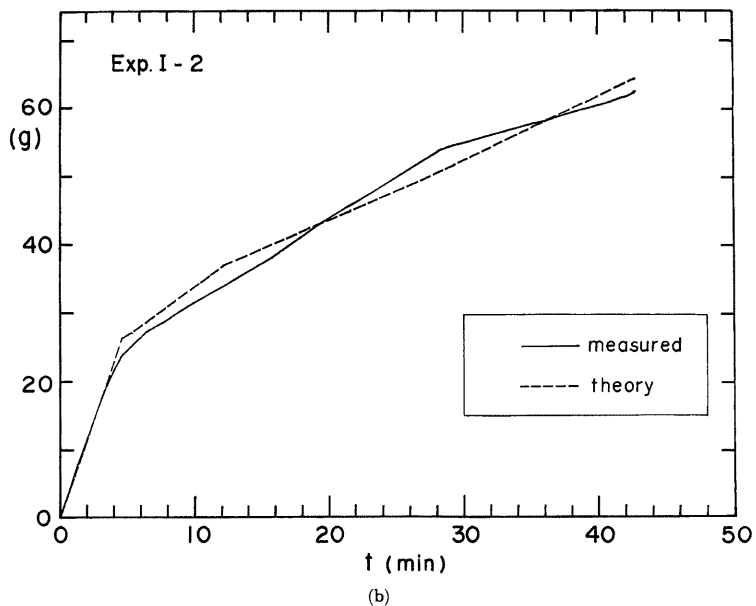


Fig. 11(a), (b). Comparison between calculated values by eq. (22) and experimental values for the accumulating weight of wash load transport at the downstream end.

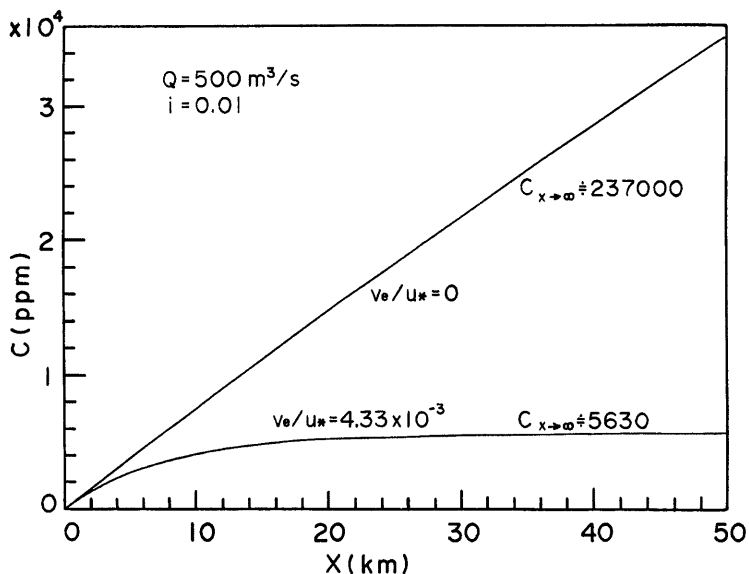


Fig. 12. The change of wash load concentration in flow direction calculated by eq. (22).

式で  $N_1=3$  と置いたものを用い、マニングの粗度係数  $n=0.03$ ,  $d=2$  cm,  $p_{f0}=0.06$ ,  $\delta_{1s}=1.0$ ,  $p_{f0}=0$ ,  $\lambda_s=\lambda_0=0.4$  とする。Fig. 12 には、このような条件のもとで計算される流水濃度の縦断変化が示されている。図から明らかなように、 $x=4$  km 程度までは、両者には顕著な差は認められないが、流下距離が増加するにつれて、交換現象による流水の浄化作用が顕著になる。これは、流下距離が小さい間は、流水濃度も小さく、側岸侵食による微細土砂の供給に対して交換現象による浄化作用が小さいためであり、流下距離の増加につれて濃度が増加すると、交換現象による微細土砂の捕獲が無視できなくなり、しだいに浄化作用が顕著になるためである。流下距離がさらに大きくなると、側岸から供給された微細土砂のほとんどは、交換現象によって河床の交換層へ捕獲され、流水濃度はほとんど変化しなくなり、交換速度を 0 とした場合の流水濃度との差が大きくなる。ちなみに、 $x$  が無限になると、交換現象を考慮しない場合は 237000 PPM となり、これを考慮した場合の約 40 倍の濃度になる。このように、流水濃度が大きい場合や、流下距離が長い場合には、交換現象による浄化作用は、流水濃度を推定する上で、かなり重要になってくる。

## 5. 結 語

本論においては、河道における微細土砂の生産・流出機構として、河道堆積物の侵食・堆積機構ならびに流水と河道表面近傍の交換層間隙水との交換機構を考え、微細土砂による流水濃度の推定式を提示し、これに含まれる主要なパラメーターについて実験的検討を行うとともに、若干の適用例と推定式の特性について考察を加えた。本研究で得られた主要な結果は以下のようである。

(1) 河道堆積物の侵食に伴って流出する微細土砂量および交換現象による微細土砂の流出量(負の流出量)を定式化した後、河道における流水濃度の推定式が(22)式のように導かれた。さらに、この式を導く過程において、河道変動を伴う場合の流水の連続式に関する新しい表示式が(14)式のように示された。

(2) 流水濃度を支配するパラメーターは  $\delta_{1s}p_{f0}$ ,  $\delta_{10}p_{f0}$ ,  $q_s$ ,  $\partial z/\partial t$ ,  $V_{es}$  および  $V_{e0}$  である。実際の河道条件を考えた場合、主要なものはこれらのうち  $\delta_{1s}p_{f0}$ ,  $q_s$  および  $V_{e0}$  であり、これらについては実験的に検討した。その結果、用いられた材料については  $\delta_{1s}=1$  となり、微細土砂のほとんどは側岸侵食に伴って流出することが明らかにされた。一般の河道においても  $p_{f0}=0$  であることが多く、 $\delta_{1s}=1$  はかなり一般性のある結果と言えよう。 $V_{e0}$  に関しては、間隙率を最も一般的と思われる値  $\lambda_0=0.4$  に設定し、流量と堆積物の粒径を種々変化した実験により、 $V_{e0}/u_*$  がほぼ一定値  $V_{e0}/u_* = 4.33 \times 10^{-3}$  になることを明らかにした。側岸侵食量に関しては、非粘性材料から構成される直線流路を対象として、これまでに提案されてきた侵食量式と実験値とを比較し、推定値の上下 5 倍程度の誤差を許容すれば、河道形態によらず推定可能なことを示した。また、水流が蛇行して、側岸近傍の摩擦速度が周期的に変化する場合の側岸侵食量は、周期性を考慮しない場合に比較して大きくなることを示し、網状流路における侵食量が他に較べて大きくなるという実験結果に対する定性的な説明を加えた。さらに、微細土砂として用いられた材料を 5% 程度含んでも、側岸侵食量は、含まない場合と比較して顕著な差が認められないことを明らかにした。

(3) (22) の妥当性を検討するには、側岸侵食量を精度よく与える必要がある。そこで、 $q_s$  には実験値を与え、その他のパラメーターについては実験から得られた関係を用い、2 ケースの実験に対して (22) 式を適用し、微細土砂の流出量に関する計算値と実験値の比較を行った。その結果、両者はよく一致することが明らかにされ、第 2 章で示した思考モデルならびに (22) 式の妥当性が示された。同式の特徴は、河道侵食による微細土砂の供給と交換現象および粗い土砂の堆積に伴う微細土砂の捕獲によって表されるが、この式によると、流水濃度が小さいとき、また、流下距離が小さいとき微細土砂の捕獲量は無視できる。一方、流下距離が増加すると、捕獲量が無視できなくなり、流水の浄化作用は顕著になる。

以上のように興味ある結果が得られたが、今後に究明すべき問題点も多い。とくに、(22) 式による流水濃度の推定精度を高めるには、任意の河道条件における側岸侵食量の推定が重要になってくる。

本研究は一部文部省科学研究費(一般 C および奨励 A)の補助を受けた。ここに記して関係、各位に感謝の意を表します。また、実験ならびに資料整理・図面作製などで御協力いただいた京都大学防災研究所技

官吉田義則氏ならびに京都大学山学部学生大槻英樹氏に感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) Einstein, H. A., A. G. Anderson and J. W. Johnson: A distinction between bed-load and suspended load in natural streams, Trans. A.G.U., 1940, pp. 628-633.
- 2) 村本嘉雄・道上正規・下島英一：大戸川における微細砂の流送過程について，京都大学防災研究所年報16号 B, 1973, pp. 433-447.
- 3) 金屋敷忠儀・芦田和男・江頭進治：山地流域における濁度物質の生産・流出モデルに関する研究，第24回水理講演会論文集，1980, pp. 143-151.
- 4) 芦田和男・江頭進治：火山灰の流出および御岳湖における土砂の挙動に関する研究，木曾御岳噴火活動および災害の総合的調査研究総合報告書，第2部，第2章，1980, pp. 115-123.
- 5) Zagni, A. F. E. and K. V. H. Smith: Channel flow over permeable beds of graded spheres, Jour. Hydraulic Div. Hy 2, Feb. 1976, pp. 207-222.
- 6) 芦田和男・江頭進治・小川義忠：河道堆積物中の微細粒子の流出特性，土木学会関西支部講演会，1978, II-59.
- 7) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二：河道の変動に関する研究(2)，京大防災研究所年報，14号B. 1971, pp. 275-297.
- 8) 村本嘉雄・田中修一・藤田裕一郎：河道の変動に関する研究(3)，京都大学防災研究所年報，15号 B, 1972, pp. 385-404.
- 9) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文報告集，210号，1973, pp. 13-20.
- 10) 長谷川和義：直線流路の側岸浸食機構に関する研究，第32回土木学会年次講演会，1977, II-224.  
同：直線流路の側岸浸食機構に関する研究(2)，第33回土木学会年次講演会，1978, II-273.  
同：非平衡性を加味した側壁浸食式に関する研究，1980年2月(未発表)
- 11) 藤田裕一郎：直線流路の側岸浸食機構，京大防災研究所年報，22号 B-2, 1979, pp. 537-552.
- 12) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態に関する研究，京都大学防災研究所年報，20号 B-2, 1977, pp. 243-258.