

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
A Hydraulic Model Of The Yield
Of Wash Load In Mountaineous Areas

建設省計画局 正 ○金屋敷忠儀

京都大学防災研究所 正 芦田 和男

京都大学防災研究所 正 江頭 進治

1. 緒言

ダム貯水地における土砂問題を扱う場合、貯水地上流端における土砂の供給条件を的確に把握する必要がある。bed material load としての扱いが可能な土砂については、流砂機構に関する研究成果を適用してかなりの程度推定できるようになってきたが、一般の河床材料調査でほとんど見出されないような細かい粒子の供給条件については、ほとんどの場合、流量との相関に基づいて単に経験的に処理されているのが実状である。最近、こうした経験則に加えて、降雨流出の単位図を想定した unit sediment graph method¹⁾が提案されているが、これも過去の資料に基づいた経験則であって、降雨や流水などの外力条件の変動および土砂の生産場たる流域条件の変化を考慮することが困難であり、ほとんどの場合、他流域への適用は不可能である。これに対して、土砂水理学および水文学的知見を適用した、村本・道上・下島²⁾のモデルは、前者に比べて汎用性の高い方法であるが、土砂の生産場や生産・流出機構の取り扱いに問題が残されているように思われる。

wash load に関する研究は、このような状況にあって、貯水池濁水や堆砂現象が大きな社会的問題となりつつある今日、その解明が強く望まれている。さて、河道の任意断面における wash load の輸送量や濃度を、より一般的に推定するには、上流域における降水や流水の外力条件、場の特性および土砂の生産・流出機構を考慮した方法によって行なう必要がある。本論においては、こういった観点から考察された wash load の生産・流出モデルおよびその適用例について述べる。

2. 濁度物質の生産・流出場

浮遊砂のうち、河床材料中に存在しないか、あるいは、微量にしかいないものを wash load または、目的に応じて濁度物質と呼んでいる。どの範囲の粒子が濁度物質となり得るかは、 w_0/u_* などの流水の輸送能力に応じて変化するため、粒径に対する一般的な議論は困難である。しかも、対象とする粒径範囲に何らかの基準を設けて扱うことにすれば十分であって、ここでは、濁度物質の最大粒径を d_w として、以下議論する。

二、三の流域調査²⁾³⁾を参考にすると、濁度物質のような微細粒子の生産源は次のように大別される。

1) 自然および人工の裸地斜面 2) 河道堆積物

前者は、山腹崩壊地、道路切盛面および農耕地など、雨水流によって容易に侵食を受けるような斜面である。後者は、基岩が露出している領域を除いた河道区間であって、土石流堆積物、段丘堆積物、溪岸崩壊堆積物、工事などによる巻き出し土および河床堆積物などである。

河道堆積物に含まれる濁度物質の含有量は、堆積物が過去において、どの程度水流の作用を受けたかによって左右される。これを知る大まかな目安として、出水時の河道潤辺上の土砂の移動、すなわち現存する堆積物が、側方侵食によって輸送されるか、または、上流域から輸送される土砂との交換をくり返しながら運搬されるかに着目すればよいであろう。ここで、前者を便宜的に溪岸堆積物、後者を河床堆積物と呼ぶことにすれば、前述の段丘、溪岸崩壊および巻き出しなどは溪岸堆積物の範中に入れることができる。以上の点に着目して、新たに濁度物質の生産・流出場を分類すると、つぎようになる。

1) 裸地斜面 2) 溪岸堆積物 3) 河床堆積物

それぞれの領域に、どの程度濁度物質が含まれているか、新宮川流域川原樋川支川の赤谷川流域(14.7km)において調べられた結果が図-1に示されている。かりに、 $d_{wc}=105\mu$ とすると、各領域における濁度物質の含有率は、それぞれ、10.7、6.8および2%であって、河床に含まれるものは微量であることがわ

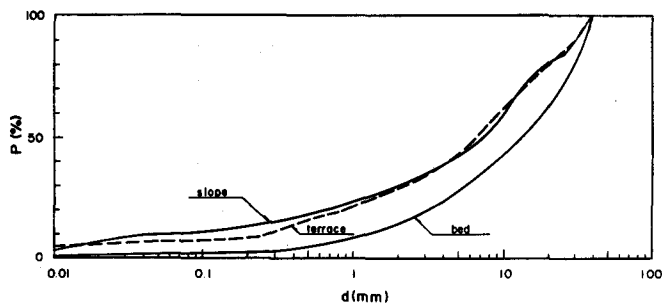


図-1 赤谷流域における粒度分布調査結果

かる。河床堆積物における含有率は小さいが、堆積物の量が多いため、出水時の河床変動を通して濁度物質の流出がどのようになっているか検討する必要がある。これを調べるため、赤谷川を含めた川原樋川流域(157km)の12地点において、出水前後の堆積物に含まれる濁度物質の含有量を調査した。その結果が図-2に示されているが、同図の結果から考えて、濁度物質の生産・流出に対して、河床堆積物は主要な生産源とはなり得ないことがわかる。したがって、濁度物質の主要な生産・流出場として、裸地斜面と溪岸堆積物を対象にすればよいことが推察される。

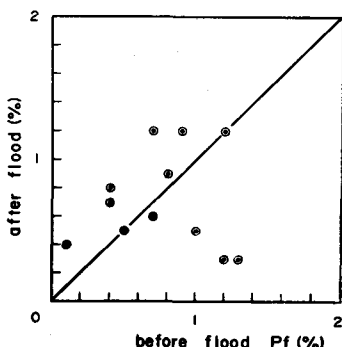


図-2 河床堆積物の含有率に関する出水前後の比較

図-3は、上述のことをさらに検討するため、一出水における赤谷川の総濁質量(Q_{sw})および濁度の最大値(C_{max})の縦断変化を生産、流出場の分布との関係調べたものである。ここに、 ΣLt は、左・右岸の溪岸堆積物長を加え合せ、これを $1/2$ 倍したものの累加分布であり、 ΣAb は裸地面積についての累加分布で、それぞれ合流点($x=0$)の値で無次元化されている。同図からも、 Q_{sw} および C_{max} の変化と上述の生産・流出場の分布との対応が明瞭であって、濁度物質の生産・流出場として、裸地斜面および溪岸堆積領域を考えればよいことがわかる。

8. 降雨流出モデル

(1) 裸地斜面における降雨流出

濁度物質の生産・流出に対して、ガリ侵食によるものが卓越すると考えられるので、ある降雨 r に対するガリの流量を知る必要がある。ここでは、一個の裸地を、長さ a_j 、幅 b_j の長方形で近似し、ここに N_j 本のガリが形成されているものとし、一本のガリの集水幅 b'_j を次式で与える。

$$b'_j = b_j / N_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに、斜面こう配 θ_b として、単位時間、単位長さ当り一本のガリへの横流入量は、次式で推定できるものとする。

$$q_g = b'_j (r - f'_g) \cos \theta_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 f'_g : 裸地斜面の浸透能である。ガリ内における流水の伝播時間を無視すると、ガリ内の流量の縦断分布は、次式で与えられる。

$$Q_g(t, x_g) = Q_{g_0} + b'_j (r - f'_g) \cos \theta_b X_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Q_{g_0} はガリ上流端における流量、 X_g は流下距離である。

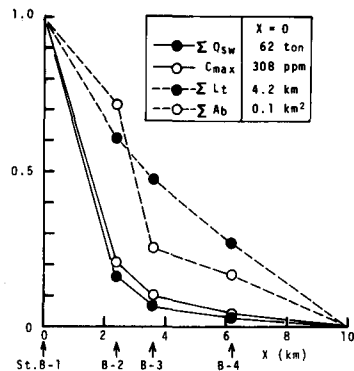


図-3 濁度物質の生産・流出場の分布と C_{max} および Q_{sw} の縦断変化

(2) 降雨流出による河道流量

表面流および中間流に関する高棹⁴⁾の解析法を適用することにすれば、これらは、つぎのようである。

$$\partial h_1 / \partial t + \partial q_1 / \partial x = (r + r_a - f') \cos \theta_s, \quad h_1 = K_1 q_1^{\beta_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_e \partial h_2 / \partial t + \partial q_2 / \partial x = (r - f') \cos \theta_s, \quad h_2 = K_2 q_2^{\beta_2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 r_a : A層から表面への浸出強度、 f' : 浸透能、 $K_1 = n'^{3/5} \sin \theta_s$ (n' : 等価相度係数)、 λ_e : A層の有効空隙率、 $K_2 = 1/k' \sin \theta_s$ (k' : 透水係数)、 θ_s : 斜面部のこう配である。河道流においても kinematic wave を用いることにすれば、流水断面積 A 、流量 Q および横流入量 $q_3 \sin \theta$ として、

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = q_3 \sin \theta_i, \quad A = K_3 Q^{\beta_3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $q_3 = q_1 + q_2$ である。

4. 濁度物質の生産・流出モデル

(1) ガリ侵食による濁度物質の生産・流出

ガリ表面が雨滴による物理的な擾乱や気温および水分変化によって常に乱された状態にあるものとすれば、乱された弱い層の侵食過程を対象にすればよい。したがって、先の論文⁵⁾によると1本のガリから流出する濁度物質は、次式で表示される。

$$G_w(t) = \rho_s (1 - \lambda_0) p_f \int_0^L E_1 S_p dx_g \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_s : 濁質の密度、 λ_0 : 空隙率、 p_f : d_w 以下の含有率、 S_p : ガリ潤辺、 E_1 : 侵食速度、 L : ガリ長である。いま、 $S_p = B$ (水面幅) として、レジーム則 $B = \alpha Q_g^{1/2}$ 、 $E_1 / u_* = k_1$ 、 $U / u_* = \varphi$ (流速係数) なる関係を用い、さらに(3)式を適用すると、ガリ下流端において流出する濁度物質量がつぎのように求められる。

$$G_w(t) = \frac{3}{5} \rho_s (1 - \lambda_0) p_f k_1 \alpha^{2/3} \left(\frac{g \sin \theta_b}{\varphi} \right)^{1/3} \frac{\{ Q_{g0} + b'_j (r - f'_b) \cos \theta_b \cdot L \}^{5/3} - Q_{g0}^{5/3}}{b'_j (r - f'_b) \cos \theta_b} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、一斜面についての量は、次式で与えられる。

$$G_{wt}^j(t) = N_j G_w(t) = b_j / b'_j \cdot G_w(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 G_{wt}^j : j 斜面における濁度物質の流出量である。なお、8 mmカメラによる裸地斜面の観測によると、表面流は、降雨が継続しているときにのみ形成されていた。この事実は、二～三の例に過ぎないが、このことが一般的に認められるとすれば、 $Q_{g0} \neq 0$ であって、 $L = a_j$ (斜面長) と置くことにより、(9)式は次のようになる。

$$G_{wt}^j(t) = \frac{3}{5} \rho_s (1 - \lambda_0) p_f k_1 \alpha^{2/3} \left(\frac{g \sin \theta_b}{\varphi} \right)^{1/3} \cdot \{ (r - f'_b) \cos \theta_b \}^{2/3} (a_j b_j)^{2/3} \frac{b_j}{b'_j} a_j \quad \dots\dots\dots (10)$$

上式は、一つの裸地斜面における濁度物質の流出量が、無次元侵食速度 k_1 、ガリ本数 $N_j (= b_j / b'_j)$ および斜面長 a_j に比例するとともに、有効雨量および裸地面積 $A_j (= a_j b_j)$ の $2/3$ 乗に比例することを示している。

なお、(7)～(9)式は、流水の輸送能力が粗粒子の供給量を上まわっている場合の議論である。一般の掃流砂量式がここで対象とする $\theta_b = 80^\circ$ 前後の急斜面に適用できるか不明であるが、(7)式で p_f を $p_c (= 1 - p_f)$ として算定されるような粗粒子の供給がある場合、これと輸送能力とが釣り合う斜面長 a_j がどの程度になるか、佐藤、吉川、芦田式を用いて求めてみる。すると、 $k_1 = 10^{-4}$ 、 $\sin \theta_b = 0.5$ 、 $\alpha = 5$ 、 $U / u_* = 3$ の条件下で $r_0 = 20, 30, 40 \text{ mm/h}$ のとき、それぞれ $a_j = 100, 150, 200 \text{ m}$ を得る。したがって、このような計算

が可能であるとすれば、後述の表-2に示すような裸地に対しては粗粒子の供給量より輸送能力が大きいものと考えてよい。

(2) 溪岸堆積物の侵食による濁度物質の生産・流出

一般の河道堆積物における濁度物質の流出を支配している機構として、さまざまなスケールの河道変動および間隙水と主流水の交換現象⁶⁾が考えられる。前述の調査の結果から、河道堆積物のうち溪岸堆積物からの流出に着目す

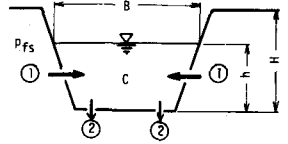


図-4 河道断面のモデルと生産・流出機構

れば十分であることがわかったので、ここでは、河道変動による流出を一樣側方侵食によるものに置き換えて考え、水流の交換現象に関しては、堆積物が側岸から移動することによって主流の濁度物質を捕獲する現象のみを評価することにする。いま、簡単のため、河道断面を図-4のように台形で近似し、水面幅B、水深h、溪岸高H、堆積物の間隙率 λ_s 、 d_w 。以下の含有率 p_{fs} とすると、拡幅速度と側岸侵食量との関係は次式で⁷⁾で示される。

$$(1 - \lambda_s) H \partial B / \partial t = q_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

側岸侵食によって、 p_{fs} のうち Δp_{fs} ($0 < \Delta \leq 1$)が流出するものとすれば、図-4の①成分は

$$q_{sw} = \rho_s q_s \Delta p_{fs} \quad \dots\dots\dots (12)$$

で示される。ここに、 q_{sw} ：側岸侵食による濁度物質の流出量である。一方、側岸から q_s が流送される際に、流水中の濁度物質が q_s の間隙に捕獲される成分(図-4の②)は、次式で表される。

$$q_{tr} = \rho q_s C \lambda_s / (1 - \lambda_s) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、C：流水の濁度物質濃度である。すると、両岸に堆積物がある場合の流水濃度は、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{q_s}{A} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \Delta p_{fs} - \frac{\lambda_s}{1 - \lambda_s} C \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

によって評価される。ここに、Q：流量、A：流水断面積である。上式の特性を知る簡単な例として、Q、Aおよび q_s が時間的・場所的に変化しないものとする、流水濃度は $X \rightarrow \infty$ で $C \doteq \Delta p_{fs} (\rho_s = 2.65)$ へ漸近することがわかる。

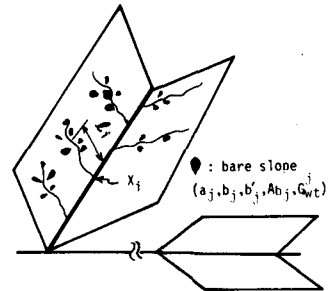


図-5 単位流域

(3) 山地流域における濁度物質の生産・流出モデル

降雨流出モデルにおいて示されたように、対象となる流域全体は、斜面と河道部とからなるいくつかの単位流域から構成されている。したがって、図-5に示すような単位流域における生産・流出を明らかにすれば、これらが合成されたものとして全流域のものが表示されるので、ここでは、単位流域についてのモデルを提示する。

さて、単位流域の斜面には、実際多数の溪流が含まれており、裸地において生産された濁度物質の流下経路は、こういった溪流沿いに流下するものと思われる。そこで、一つの溪流に流入する裸地の個数を n_1 として、その溪流は河道部の X_i 地点に合流しているものとする。すると、モデル斜面上の1本の溪流から河道部に流入する濁度物質の量は、(9)式を用いて、 $\sum_{j=1}^{n_1} G_{wt}^j(t)$ と表示される。実際は、裸地において生産されたものが河道部へ到達するまでの遅れ時間を考慮する必要がある。そこで、 n_1 個の裸地の重心から河道部までの距離 l_1 として、 $t_d = u/l_1$ (u ：横流入流速)を考慮すると、時刻 t において河道へ流入する濁度物質は $\sum_{j=1}^{n_1} G_{wt}^j(t - t_d)$ と表示される。

一方、溪岸堆積物における流出に対しては、堆積物の存在密度を $f_0(x)$ ($0 \leq f_0 \leq 1$)とすれば、(12)および(13)式の q_{sw} および q_{tr} は、それぞれ $f_0(x) q_{sw}$ および $f_0(x) q_{tr}$ となる。

以上のことを総合すると、単位流域の河道における流水濃度は、分散効果を考慮して次のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{1}{A} \left\{ \frac{\partial}{\partial X} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial X} \right) + f_c(X) q_s \left(\frac{\rho_s}{\rho} \Delta p_{rs} - \frac{\lambda_s}{1-\lambda_s} C \right) + \delta(X-X_1) \sum_{i=1}^n G_{wt}^j (t-t_d) / \rho - C q_s \sin \theta_s \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 $\delta(X-X_1)$: $X=X_1$ で $\delta=1$, $X \neq X_1$ で $\delta=0$, D_x : 分散係数である。

側岸侵食量 q_s については、これまでに二、三の推定式が提案されている。ここでは実際の流域を対象としているので最も適用しやすい芦田・村本・奈良井⁷⁾の式を用いることにすると、次のようである。

$$q_s = \alpha' N (\tau_* - \tau_{*c})^n u_* d_m \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 $\alpha' = (1 - \lambda_b) / (1 - \lambda_s)$, N : 実験定数, d_m : 平均粒径, τ_* : τ_{*c} : 無次元掃流力および限界掃流力である。しかし、一般の山地河道においては、armouring 現象が顕著にみられ、これが破壊されなければ、側岸侵食は起らないものと考えられる。したがって、実際にはこのことを考慮する必要があり、ここでは(16)式を次式的ように表示しなおしておく。

$$q_s = \frac{h-h_0}{h} \alpha' N (\tau_* - \tau_{*c})^n u_* d_m \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 h_0 : armour coat が破壊される水深である。

(4) 単位流域の大きさ

15°以上の河道こう配を有する区間に河道堆積物が存在して、この領域に表面流が生じた場合、一般に土流タイプの土砂の運搬が行なわれることが認められている。⁸⁾

したがって15°以下の河道区間を有するような流域を目安として、単位流域(図-5)は、斜面部に15°以下の長い河道区間をもつ大きな溪流が含まれないように選ばれる必要がある。

5. 濁度物質の生産・流出モデルの適用

(1) 流域のモデル化

前述した濁度物質の生産・流出モデルを新宮川水系川原樋川流域へ適用するため、種々の流域調査を行なった。図-6には、川原樋川流域の概要と雨量や流水濁度の観測点が示されている。図中の斜線で囲まれた⑩の部分が前述の赤谷川流域であり、以下、この流域に関するものを中心に述べる。

a) 流域特性と降雨流出場のモデル化

4.(4)で述べた事項に着目して川原樋川流域を

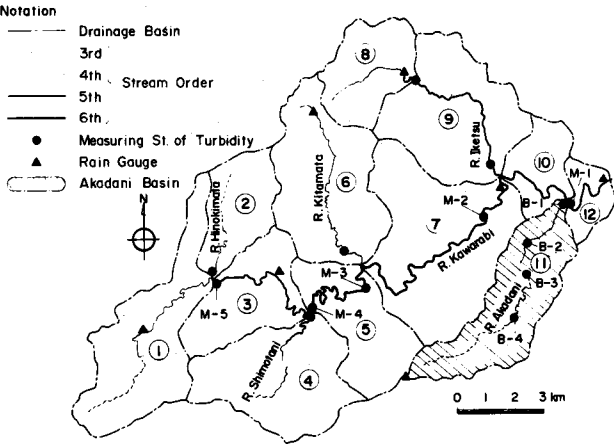


図-6 新宮川水系川原樋川流域の概要と観測点

表-1 川原樋川流域における裸地分布

Basin	CA(km ²)	Nb(個)	Ab(km ²)	Nb/CA (個/km ²)	Ab/CA (%)	Ab/Nb (m ²)
1	17.28	133	0.0499	7.7	0.29	380
2	8.00	52	0.0418	6.5	0.52	800
3	10.81	133	0.0711	12.3	0.66	530
4	16.40	136	0.0710	8.3	0.43	520
5	11.70	73	0.0327	6.2	0.28	450
6	17.97	146	0.0605	8.1	0.34	410
7	24.16	294	0.2605	12.2	1.08	890
8	9.30	152	0.0500	16.3	0.54	330
9	17.31	205	0.0713	11.8	0.41	350
10	5.77	30	0.0357	5.2	0.62	1190
11	14.70	130	0.1045	8.8	0.71	800
12	3.38	25	0.0611	7.4	1.81	2440

表-2 裸地の形状および面積に関する個数分布

A_b \ a/b	0.38~1	1~5	5~10	10~85
100~500m ²	4(0)	516(24)	486(46)	59(13)
500~1000	4(1)	94(5)	136(7)	60(19)
1000~1500	3(0)	31(3)	21(3)	15(3)
1500~2000	1(0)	9(0)	8(1)	12(2)
2000~38800	6(2)	25(2)	18(5)	1(0)

分割すると、図-6に示す計12の流域単位に分割された。それぞれの流域単位における下流部の河道次数は4～5次程度の河道になっている。この流域における2次河道は、ほとんど15°以上のこう配を有するので、単位流域における河道最上流部は3次河道の上流点に選ばれている。赤谷川流域に関する流域諸定数を示すと、河道長10km；河道こう配0.0624；左・右岸斜面の実面積7.15, 9.91km²；左・右岸の斜面長0.95, 1.21km；左・右岸の斜面こう配0.545, 0.485；左・右岸の流入角 $\sin \theta_s = 0.755, 0.819$ ；粗度係数0.085； $K_s = 0.657$ などである。また、大股地点（図-6のM-4）での流量通減特性より通減係数 0.04 hr^{-1} ， $r_s = 2.10 \text{ mm/hr}$ および $\lambda_s D_A = 58 \text{ mm}$ （ D_A ：A層の厚さ）を得た。

b) 濁度物質の生産・流出場の調査とそのモデル化

まず、裸地については、その形状、面積、こう配等を空中写真より求めた。川原樋川流域における調査結果は、表-1のとおりである。ここに、CA：流域

面積， N_b ：裸地個数， A_b ：裸地面積である。表-1の裸地について、形状特性（ a/b ）と裸地面積を指標として裸地を20タイプに分類し、各タイプに属する個数分布を調べた結果が表-2である。本表において（）内の数値は、赤谷川流域に関するものである。

川原樋川流域には、1509個の裸地が存在するが、生産・流出モデルに含まれる p_f ， N_j あるいは b'_j を定めるため、このうち5%に当たる73箇所について、裸地の粒度分布やガリ特性に関する調査を行なった。

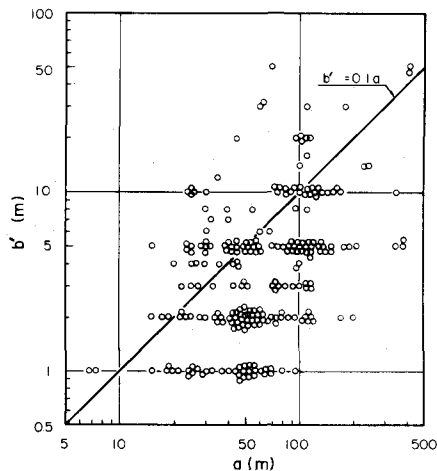


図-7 斜面長とガリ1本の集水幅の関係

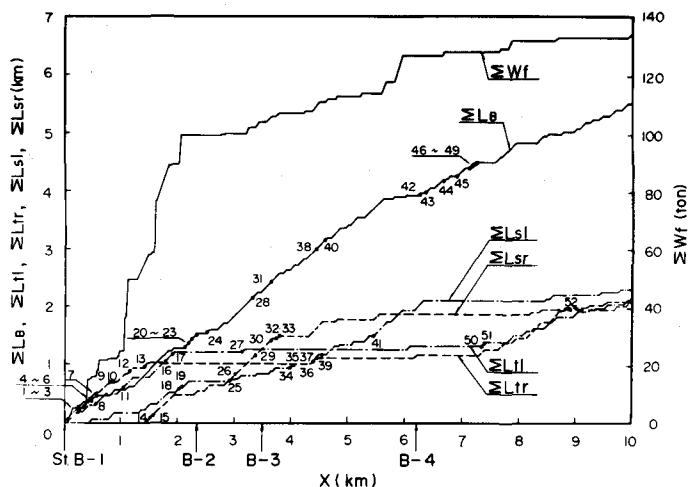


図-8 赤谷川における河道堆積物の分布状況

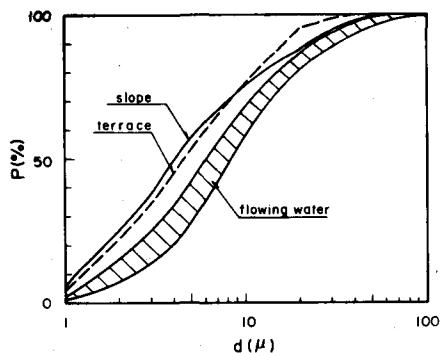


図-9 濁水中の濁質粒径および生産・流出場における105μ以下の粒度分布

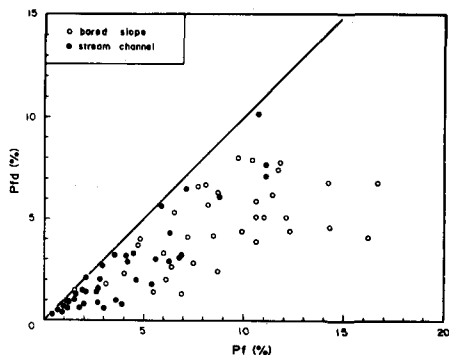


図-10 乾燥状態での篩分け（ p_{fd} ）と水洗いによる方法（ p_f ）からえられた濁度物質の含有率

図-7は、集水幅 b_j と斜面長 a_j との関係を示したものである。現在、他に b'_j を定める有効な方法がないので、ここでは、図中の $b'_j = 0.1 a_j$ なる関係を用いることにする。

一方、河道については、(15)式の $f_o(x)$ 、 P_{f_o} 、粗度係数 n 、 h_o および河道横断を決定するため、種々の調査が行なわれた。図-8には、赤谷川における段丘・右岸の累加距離 (ΣL_{t1} , ΣL_{tr}) および溪岸崩壊とまき出し区間の累加距離 (ΣL_{o1} , ΣL_{or}) を示すとともに、河床堆積物 (ΣL_B) が示されている。さらに、図-12に示す出水について、出水前後の縦横断測量と粒度分布調査に基づき、河道変動による濁度物質の流出量の累加 (ΣW_f) も示されている。同図より、溪岸堆積物の分布に応じて ΣW_f が変化し、濁度物質の流出に対する溪岸堆積物の重要性が伺える。なお、図中の折線上に示す番号は、粒度分布調査地点である。図-9には、出水時の河道表面において採水された濁質の粒度分布が示されている。流水には、 105μ より大きい粒子は存在せず、濁度物質の最大粒径として $d_{90} = 105 \mu$ 程度のものを考えればよいことがわかる。また、同図には、溪岸堆積物および裸地における 105μ 以下の粒度分布が示されているが、濁水中のものと顕著な差はない。これは、2.において述べた濁度物質の生産・流出場に関する分類の妥当性を示すものである。

図-10は、赤谷川流域で採取された河道堆積物および裸地斜面材料について、水洗いによる方法と乾燥させたものをそのまま篩う方法による 105μ 以下の含有率の比較を行ったものである。同図にお

いて、 p_f の小さい領域に集中しているデータは、ほとんどが河床堆積物のものである。さて、採取した材料を、そのまま乾燥させてふるい分析を行なった場合、粗粒子に付着した微細粒子が分離しにくいので、微細粒子の含有率は水洗い法によって得られた値の約 $\frac{1}{2}$ 程度となっている。したがって、濁度物質に関連した粒度分布調査を行う場合、必ず水洗い法による粒度分析を行なわなければならない。

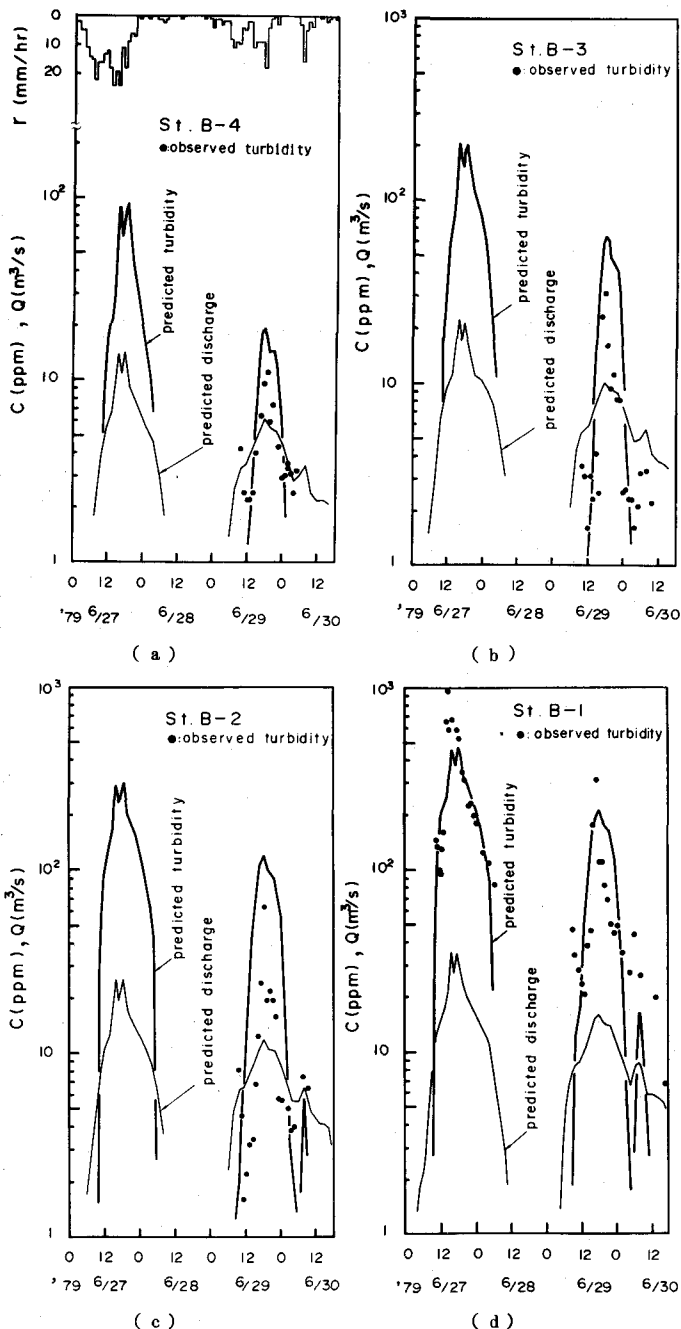


図-11 (a), (b), (c), (d) 赤谷川における流水濁度に関する計算値と観測値の比較

(2) 生産・流出モデルの適用例

河道の任意断面における河水濁度を求めるには、(10)式とその補助方程式(4)～(6)式、(10)式 ($Q_{g_0} = 0$ の場合) および(17)式が用いられる。川原樋川支川赤谷川流域における1979年梅雨出水時の河水濁度の算定に際して、これらの式に含まれる未知量は、流域調査および現地実験⁵⁾を参考にして、次のような値が採用されている。すなわち、(10)式において、 $k_1 = 3 \times 10^{-4}$ 、 $p_r = 0.1$ および $\lambda_0 = 0.4$ 、(17)式においては、 $\alpha' = 1$ 、 $N = 0.02$ 、 $n = 1$ および $d_m = 2 \text{ cm}$ が用いられるとともに、armour coat の破壊限界水深 h_c は、90%粒径 ($d_{90} = 20 \text{ cm}$) の移動限界水深から算定されている。

図-11(a),(b),(c),(d)には、赤谷川についてB-4～B-1地点(図-6)の河水濁度に関する計算値と観測値が比較されている。同図には示されていないが、流出濁度物質の総量のうち、裸地斜面の侵食によるものの比率をみると、B-4地点で1/4、B-3～B-1地点においては1/10以下である。このように、赤谷流域においては、裸地斜面における生産・流出は支配的でなく、溪岸堆積物からの流出が卓越している。さて、B-4～B-2において、計算濁度は観測値に比較して、上流域で若干大きく、最下流部(B-1)において小さくなっている。この主な原因として、 p_{rs} に一定値を用いたこと、河道断面形状のモデル化および溪岸堆積物の分布密度 $f_s(x)$ が正しく評価されていないことなどが考えられる。こうした若干の問題点はあるが、観測値と計算値の対応はよく、現時点では、

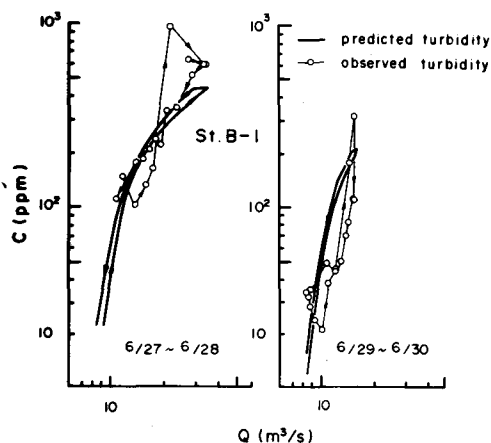


図-12 赤谷川最下流部の流量と濁度の関係

図-12は、赤谷川最下流部(B-1)において、流量と濁度の関係を調べたものである。河水が濁り始めるのは計算値および観測値とも $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ 前後であって、これはarmour coatが破壊される限界流量に対応している。つぎに、増水時と減水時における両者の傾向をみると、観測値は、数字の8を画くように変化するのに対し、計算値では、増水時に低く、減水時に高くなっており、一般に認められている傾向とは逆のループを画いている。この原因として、側方侵食による断面形の変化や側方侵食に対する水位上・下降の影響⁹⁾が考慮されていないことなどが考えられるが、さほど大きな問題ではないようである。なお、計算値において、流量が大きくなると濁度は流量に比例するようになり、従来の知見と一致する。

以上、図-11、図-12に示した観測値と計算値の比較から、本モデルの妥当性が示されたものと思われる。

6. 結語

濁度物質の生産・流出モデルを土砂水理学的観点から考察することを目的として、本論は、以下のように進められた。まず、生産・流出場を、裸地斜面と河道とに大別した。さらに、河道堆積物を、段丘、溪岸崩壊、工事のための巻き出し土砂などのように側方侵食によって流送される堆積物と、過去に流水の作用をかなりの程度受けていることが予想される河床堆積物とに分類し、調査結果に基づいて、濁度物質の生産・流出に対して後者はほとんど寄与しないことを明らかにした。このように、生産・流出場として、裸地斜面および溪岸堆積物を考えれば十分であることがわかったので、つぎに、これらの場に働く外力すなわち流量の推定法について述べた。河道部の流量の推定は、これまで得られている研究成果が適用される。しかし、この方法では、全体の流域に対して無視できるほど小さい裸地の流量を推定することはできない。そこで、8mmカメラによる観測結果を参考にして、ガリの集水幅の概念を用いた流量算定法を示した。

ついで、濁度物質の生産・流出機構について考察した。裸地斜面からの流出は、濁度物質の含有率、無次

元侵食速度、ガリ本数および斜面長に比例するとともに、有効降雨強度および裸地面積の $2/3$ 乗に比例することを推察した。河道堆積物中における濁度物質の生産・流出については、側方侵食によるものと、侵食を受けた土砂が流水中の濁度物質を捕獲する機構を考慮して定式化を計った。

以上のことを総合し、山地流域における濁度物質の生産・流出モデルを提案した。これは、(15)式で示されるが、同式から明らかなように、降雨および流域条件を与えて河道の任意断面における流水濁度を推定するものであって、流量の推定に必要な降雨流出モデル、河道堆積物の侵食モデルおよび裸地斜面の侵食モデルから構成されている。

このようにして考案された河水濁度の予測法は、川原樋川支川赤谷川流域に適用され、ほぼその妥当性が示された。崩壊や土石流が多発するような降雨時への適用については十分考察されてないが、現時点では、こういった状況下における河水濁度の推定は、困難であろう。しかし、このような降雨時を除けば、新たな流域調査を行い、生産・流出場を評価することによって、その後の降雨に対して、本手法の適用が可能であると思われる。

以上、本研究において得られた主要な結果ならびにその発展性について述べたが、今後解明すべき点も少くなく、とくに、側岸侵食量式の検討および側岸侵食を経て濁度物質がどのように流出するか検討を進める必要がある。

現地調査に際して、建設省近畿地方建設局ならびに紀南工事事務所の諸氏に御協力いただいた。また、資料整理や数値計算を行なうについて、新日本技術コンサルタント 古川整治氏に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Herrero, O.R : Estimation of Wash Load Produced on Certain Small Watersheds, Proc.ASCE, Vol.100, Hy 7, 1974.
- 2) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：ウォッシュ・ロードの流下過程に関する数値解析、第18回水理講演会論文集、1974.
- 3) 芦田和男：流域の土砂の生産と濁水源、徳島県那賀川河口養殖ヒトエグサ等被害原因調査報告書、日本水産資源保護協会、1977.
- 4) 高棹琢馬：出水現象の生起場とその変化過程、京大防災研究所年報、6号、1963.
- 5) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究、第24回水理講演会論文集、1980.
- 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、土木学会関西支部年次講演会、1978.
- 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.
- 8) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研究所年報、21号B-2、1978.
- 9) 藤田裕一郎：直線流路の側岸侵食機構、京大防災研究所年報、22号B-2、1979.