

(財)砂防・地すべり技術センター ○ 松木 敬\*  
 立命館大学理工学部 江頭進治\*\*  
 立命館大学大学院 上妻由拓\*\*

**はじめに** 河床変動はそれより上流域(山地部)からの土砂流出によって支配されており、その予測は河川・砂防工学上極めて重要である。ところが、実際の流域では山崩れ、土石流、掃流、浮流など様々な土砂流出形態があり、河道も樹枝状に分布しているため、土砂水理学的手法に基づく流出土砂量の予測は困難を極めている。一方において、流域の任意の地点における時々刻々の流出土砂量とともに長期、たとえば年流出土砂量を同時に、しかも合理的に予測する方法の開発が強く望まれている。そこで本研究では、一次元の流水・流砂モデルを積分することにより、現象の時空間スケールの巨視化を図り、これと kinematic wave 法による降雨流出モデルを組み合わせた土砂流出予測法<sup>1)</sup>を提案するものである。

**2. モデルの概要** 流域には無数の河道が分布しており、複雑であるものの、**図-1**に示すように上流側の合流点を含み、下流側の合流点を含まない部分を単位河道と定義すれば、単位河道を直列及び並列に連ねることによって、実流域の河道を再現できる<sup>2)</sup>。ところで、流れと河床変動に関する支配方程式は、偏微分方程式で記述される。河道が一本であれば、適切な初期境界条件のもとに、これらを数値積分することによって河道の任意の地点における流速、流砂量、河床材料などを予測することはできる。しかし、各単位河道が有機的に連なっている場合には、支配方程式を直接数値積分して結果を求めることはかなり困難である。ところが、支配方程式を単位河道にわたって積分し、流水の運動に対する kinematic wave などの近似を導入すれば、どんな複雑な流域であっても取り扱い極めて容易になる。そこで、流れの連続式、運動方程式(河床位方程式)、流砂量式、河床材料の粒度分布式を単位河道について積分すると、**図-1** 単位河道について次のように表すことが出来る。

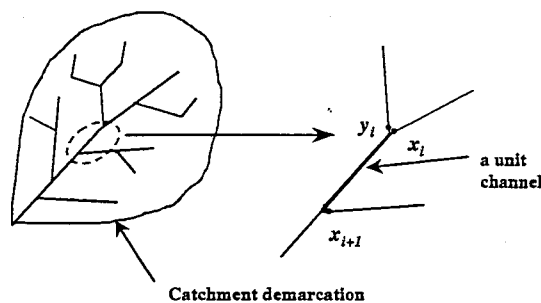


図-1 単位河道の概念図

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{BL} \{Q(x_i) + Q(y_i) - Q(x_{i+1})\} + \frac{1}{B} q \quad (1)$$

$$Q(x_{i+1}) = \frac{1}{n} BI^{1/2} h^{5/3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} \{Q_s(x_i) + Q_s(y_i) - Q_s(x_{i+1}) - q_w\} \quad (3)$$

$$Q_s(x_{i+1}) = \sum Q_{sj}(Q, I, d_j, p_j) \quad (4)$$

$$q_w = \frac{\partial z}{\partial t} (1-\lambda)BLp_w, \left(\frac{\partial z}{\partial t} \leq 0\right); q_w = 0, \left(\frac{\partial z}{\partial t} \geq 0\right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_j}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)\Delta BL} \{Q_{sj}(x_i) + Q_{sj}(y_i) - Q_{sj}(x_{i+1})\} - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{f_j}{\Delta}, f_j = p_{j0} \left(\frac{\partial z}{\partial t} \leq 0\right), f_j = p_j \left(\frac{\partial z}{\partial t} \geq 0\right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{BLh} \left\{ q_w + c(x_i)Q(x_i) + c(y_i)Q(y_i) - c(x_{i+1})Q(x_{i+1}) \right\} + \frac{1}{L} \left\{ D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x_{i+1}} - D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x_i} - D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{y_i} \right\} \quad (7)$$

ここに、 $h$ : 単位河道における平均水深、 $B$ : 河道幅、 $L$ : 河道長、 $Q$ : 流量、 $q$ : 斜面からの横流入量、 $n$ : マニングの粗度係数、 $I$ : 河道勾配、 $z$ : 河床高、 $\lambda$ : 堆積土砂の間隙率、 $Q_s$ : ウォッシュロードをのぞく流砂量、 $d_j$ : 粒径、 $p_j$ : 粒径  $d_j$  の含有率、 $\Delta$ : 交換層厚、 $q_w$ : 単位河道における単位時間あたりのウォッシュロード生産量、 $p_w$ : ウォッシュロード含有率(ウォッシュロードの生産域以外では  $p_w=0$  とする。)、 $c$ : ウォッシュロード濃度、 $D$ : 拡散係数である。これらは、**図-1**に示す単位河道についての諸量である。式(1)の横流入量  $q$  は kinematic wave 法による降雨流出解析によって求められる。なお、以下の解析においては掃流砂、ウォッシュロードを対象にする。最上流端の単位河道は土石流堆積領域の上流付近に位置するものとし、河床勾配を  $10^\circ$  のところとする。また、ウォッシュロード生産源域は土石流堆積区間に一

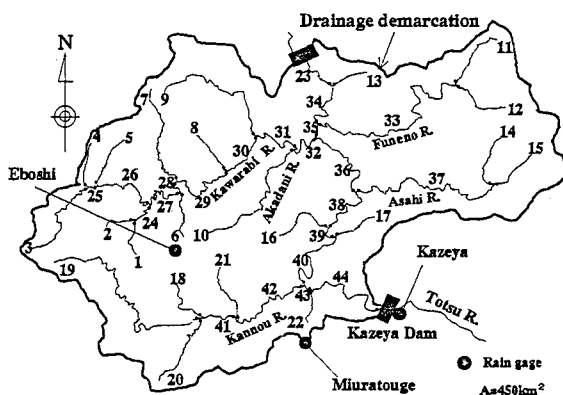


図-2 風屋ダム上流域図

**Key words**: 降雨流出, 土砂流出, 土砂流出モデル, 掃流砂

\* 〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-8-21 TEL. 03-5276-3271 FAX 03-5276-3391  
 \*\* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL. 0775-61-2732 FAX 0775-61-2667

致させ、河道勾配  $4^{\circ} \sim 10^{\circ}$  の範囲にある単位河道とし、その生産は式(5)のように河床侵食によるものとする。式(4)の流砂量式には芦田・道上式を用いる。

**3. 実流域への適用** 十津川上流の猿谷ダム流域を除く風屋ダム流域を対象とする。流域面積は約  $450\text{km}^2$  である。流域の概要を図-2に示す。図中の番号は単位河道である。今回、1974年～1978年、1991年～1994年の2期間における風屋ダムの堆砂量に着目し、それぞれの年の堆砂量がその年の最も大きい洪水によりもたらされたと見なし、各年の一つの出水について解析をした。当該流域の河道は、それらの合流点に着目すると、44本の単位河道に分割される。各単位河道に連なる両斜面については平行四辺形で近似し、斜面長、斜面勾配、傾斜角、流入角については1/25000の地形図から設定した。流出計算では表面流出と中間流出成分を考慮することとし、斜面の等価粗度は  $0.4 \sim 0.7[\text{m}\cdot\text{s}]$  の範囲で与えた。A層の浸透能は  $10 \sim 16\text{mm/hr}$ 、B層の浸透能は  $0.1 \sim 0.16\text{mm/hr}$ 、A層の厚さ  $40\text{cm}$ 、透水係数  $0.05\text{m/s}$  としている。一方、各単位河道については長さ、勾配を地形図より決定し、粗度はいずれの単位河道においても  $0.035[\text{m}\cdot\text{s}]$  とした。流砂の交換層厚は  $40\text{cm}$ 、初期河床材料には図-3のようなものを与えた。すなわち、 $4^{\circ}$  以上の単位河道においては分布形Iを与えそれより緩い勾配の単位河道は、分布形IIを用いた。河道幅  $B$  については、最下流端である風屋ダム流入量を  $Q$ 、流域面積を  $A$ 、各単位河道の上流端流域面積を  $A'$  として  $B = 5\sqrt{QA'/A}$  とする。 $Q$  には  $200\text{m}^3/\text{s}$  を与えて、 $B$  は流量によって変化させていない。降雨量については図-2に示した雨量観測点、伯母子・三浦峠・風屋のうち流域から最も近いものをその流域の降雨量として与える。

以上の条件を用いて行った計算結果を図-4から9に示す。図-4および5は風屋ダムにおける流入量に関する計算値と実測値である。図-6および7は風屋ダムへの単位時間当たりの流入土砂量として、掃流砂量( $Q_s$ )とウォッシュロード( $Q_w$ )およびそれらの積算値( $V_s, V_w$ )に関する計算値である。図-8は初期粒度分布と計算終了時の粒度分布を河原桶川沿いに比較したものである。最上流に位置する単位河道 No.6 では粗粒化が進み、中流部(No.32)、ダム流入部(No.36)ではあまり変化がない。図-9は、図-6および7の結果を各年度ごとの総流入土砂量に分割し、これと年堆砂量に関する実測値と比較したものである。ウォッシュロードを含めた計算値は、実際の堆砂量にほぼ一致しているのが分かる。図-9において  $V_w(V_s+V_w)$  の値を概算すると、'74年のものよりも'78年が減少しており、また、'91年のものよりも'94年において減少している。これは、ウォッシュロードの生産域において図-8に示すように粗粒化が進んでいるためである。

**4. おわりに** 土砂流出の予測法として新しいモデルを提案するとともに若干の計算を行ってその適用性を調べた。流域貯留土砂の問題など今後検討すべき課題は残されているものの、本モデルはかなり合理的な方法ではないかと思われる。なお、現地データの収集にあたり、建設省近畿地方建設局および電源開発株式会社の諸氏に御協力いただいた。ここに記して感謝いたします。

**参考文献** 1) Egashira, S: Research related to prediction of sediment yield and runoff, Proc. Symposium on Japan-Indonesia IDNDR. Project, 1998, Bundungpp.9-15. 2) 金屋敷・芦田・江頭: 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(1980.2).

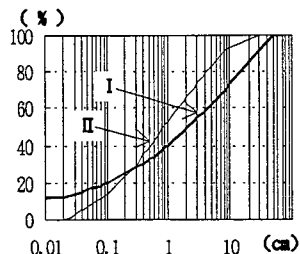


図-3 初期河床材料

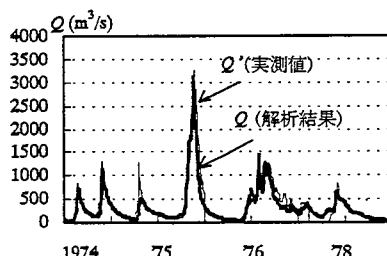


図-4 風屋地点における流入量

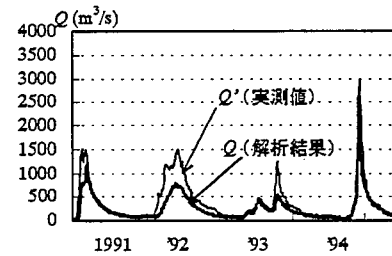


図-5 風屋地点における流入量

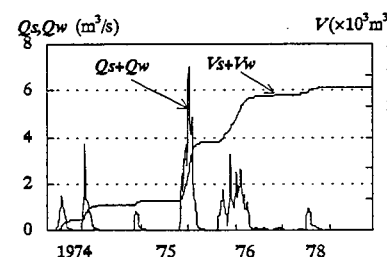


図-6 風屋ダムへの流入土砂量と総流入土砂量(s49~53)

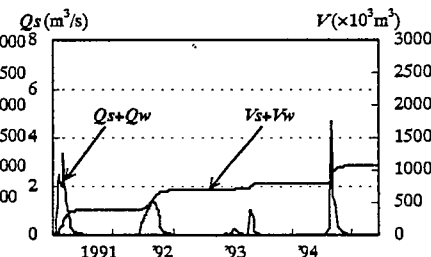


図-7 風屋ダムへの流入土砂量と総流入土砂量(s49~53)

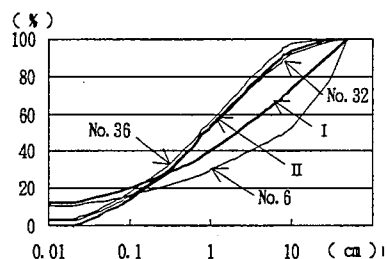


図-8 河原桶川沿いの粒度分布の変化 (s49~53)

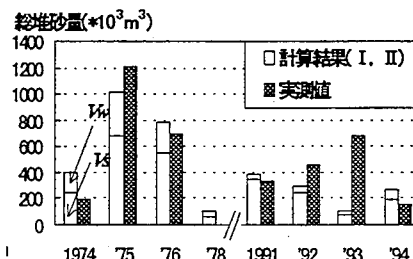


図-9 風屋ダムの年堆砂量の比較