

山地河川における土砂流出の数値計算

高橋 保・沢田 豊明・里深 好文

NUMERICAL SIMULATION ON SEDIMENT RUNOFF FROM A MOUNTAIN WATERSHED

By *Tamotsu* TAKAHASHI, *Toyoaki* SAWADA and *Yoshifumi* SATOFUKA

Synopsis

In this paper, a new numerical simulation model is proposed, which can predict the sediment runoff from a mountain watershed. In the model, the watershed is composed of some units of slopes and a network of stream channels. The runoff process from each slope unit is calculated by the kinematic wave method. The process of water runoff in the channel network is calculated by one dimensional simulation model using the water discharges from the slopes. The bed variation and sediment discharge in each stream channel can be predicted by a bed-load formula. The bank erosion is considered as the main cause of the sediment supply.

1. 緒 言

山地流域からの土砂の流出を予測することは、河道の維持・管理を行う上で重要な課題の一つとなっている。これまで土砂流出の予測に関しては、比較的マクロな方法が用いられる場合が多かった。その理由としては、地形や地質、植生といった土砂流出に影響を及ぼす要因の場所的な変化が激しいために、細かな検討を行おうとすると、取り扱う情報量が巨大になることが挙げられる。しかし、近年、計算機の能力が飛躍的に向上するとともに、地図上のデータを数値化するツールが充実してきたこともあり、土砂流出予測に関してよりミクロな取り扱いが可能な状況となっている。

本研究ではより詳細な土砂流出予測を行うことを目的として、その基礎となる数値モデルの開発を行っている。モデルは流域を斜面部と河道部とによって表し、雨水の流出及び土砂の流出を計算するものである。斜面からの雨水の流出に関しては kinematic wave を用い、河道部に関しては、斜面からの雨水の流入を考慮した1次元の河床変動計算を行う。このモデルを仮想の小流域に適用し、降雨の条件を与えた場合に、下流端における流砂量・流量がどの程度予測されるかを検討している。

2. 雨水と土砂の流出に関する数値モデル

2.1 土砂流出予測モデルの概要

本モデルは、対象となる流域が複数の斜面部とそれに接続する河道網で構成されていると考えられる場合に、降雨の条件を与えた時、流域下流端において流出する土砂量を予測するものである。まず、Fig. 1 に示すように流域を河道部と斜面部とに分割する。斜面部は斜面長・等価粗度・斜面勾配が一様とみなせ

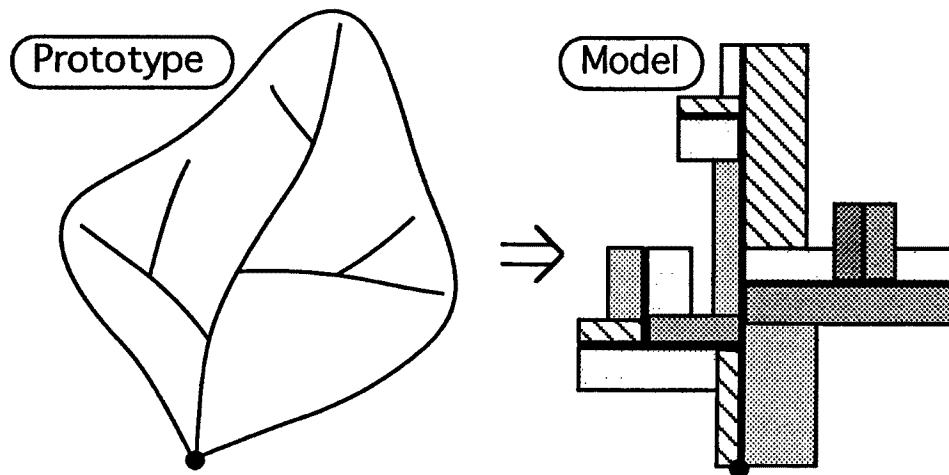


Fig. 1. Transformation of a watershed into the model which is composed of slope units and a network of stream channels.

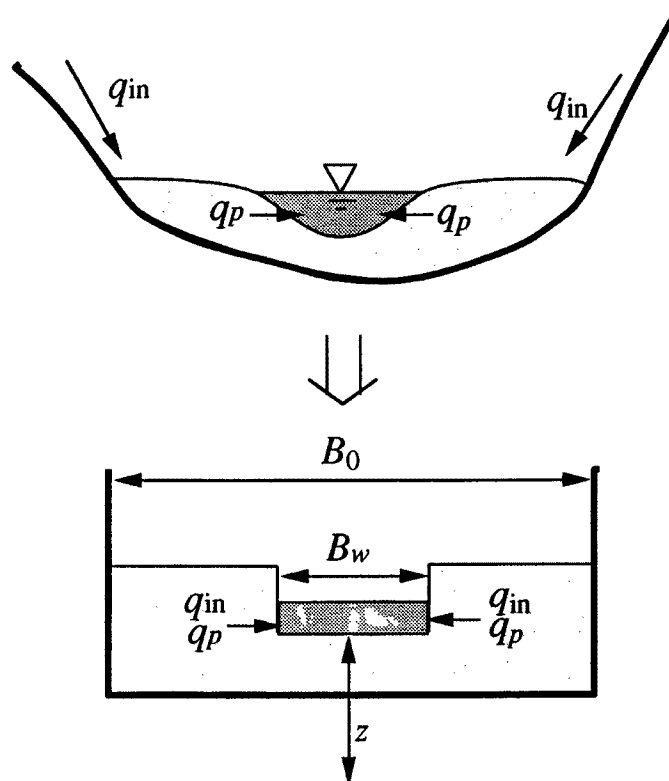


Fig. 2. Schematic of a channel section.

る程度に分割し、与えられた降雨条件をもとに kinematic wave 法により、斜面下端における流量を計算する。このとき、地下への浸透、蒸発散などは考慮していない。

河道部は、斜面部から流水の供給を受け河床変動するものとし、その計算には一次元の河床変動モデルを用いている。ただし、合流部の流れの計算に際しては、主流側の計算時に支流の流量を横流入として与えている。河道の断面形は Fig. 2 に示すように、堆砂域の幅 B_0 と水みちの幅 B_w を用いてモデル化する。

流水の運動を計算する際には、水みち幅を用い、河床変動の計算の際には、堆砂域全体が均等に河床変動をおこすものとする。土砂の粒径に関しては一様砂を対象としており、土砂の移動形態としては掃流砂を考えている。

斜面からの雨水の流入 (Fig. 2 の q_{in}) は、斜面下端において計算された流量がそのまま水みちに流入すると考えている。土砂の供給に関しては、河道部の堆砂域に堆積している土砂が、側岸侵食に伴って水みち内へ供給される (Fig. 2 の q_p) もとしている。現モデルでは簡単のため、斜面部の土砂の生産過程ならびに土砂堆積域への供給は考慮していない。

2.2 基礎方程式

斜面部の流出に関しては kinematic wave 法を用いて計算を行う。基礎式は、

$$q = \alpha h^m \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = (\sin \theta_s)^{1/2} / n \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \dots\dots\dots (3)$$

としている。ここに、 q ：単位幅流量、 θ_s ：斜面勾配、 n ：等価粗度、 h ：水深、 r_e ：雨量強度である。係数 m は $5/3$ である。

河道部における流水の連続式と運動方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_w} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{q_{in}}{B_w} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{u q_{in}}{B_w h} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h ：水深、 Q ：流量、 q_{in} ：横流入流量、 u ：断面平均流速、 P ：水圧、 τ ：河床せん断力、 ρ ：水の単位体積重量である。圧力は静水圧近似により計算し、河床せん断力 τ は Manning 則を用いて、

$$\tau = \frac{\rho g n_m^2 u^2}{h^{1/3}} \dots\dots\dots (6)$$

と表される。ここに、 g ：重力加速度、 n_m ：Manning の粗度係数である。

河床の連続式は

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{B_0} \left\{ \frac{\partial q_b B_w}{\partial x} - q_p \right\} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 z ：河床位、 λ ：空隙率、 q_b ：単位幅掃流砂量、 q_p ：側方からの土砂の供給量である。 q_b の計算には芦田・道上の式¹⁾を用い、 q_p は次のような側岸侵食量に関する芦田・江頭らの式²⁾を用いて算定している。

$$q_p = F_{0*} \sqrt{s g d^3} \tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*sc}}{\varepsilon^2 \tau_*} \right)^3 \left(\frac{h}{d \sin \theta} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_{*sc} = \tau_{*c} \cos \theta \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\mu} \right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

としている。ここに、 s ：砂粒子の水中比重、 d ：砂粒子の粒径、 τ_* ：無次元掃流力、 τ_{*sc} ：側岸斜面上の粒

子の限界掃流力, τ_{*c} : 限界掃流力, θ : 水みち側岸の勾配である。係数 F_{0*} は 0.02, ε^2 は 0.5, μ は 0.765 としている。

2.3 基礎式の差分化と境界条件

河道部における基礎方程式を次のように差分化した。Fig. 3 には各計算点の配置とコントロールボリュームが示されている。流れの運動方程式 ((5)式) の差分に関しては、移流項は風上差分、それ以外は中央差分を用いている。河床位方程式 ((7)式) の差分には後退差分を用いている。

各河道網の上流端の境界条件として、流速 u を 0 としている。下流端の境界条件は Fig. 4 に示されるように、水面勾配、河床勾配ともに 0 としている。

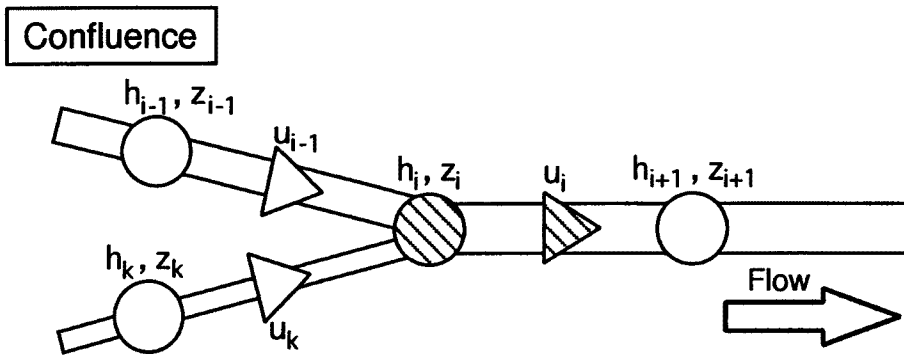
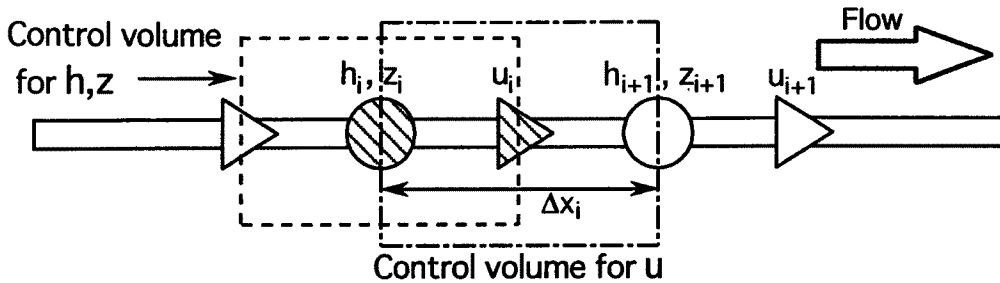


Fig. 3. Arrangement of the calculating points for flow velocity, depth and bed height.

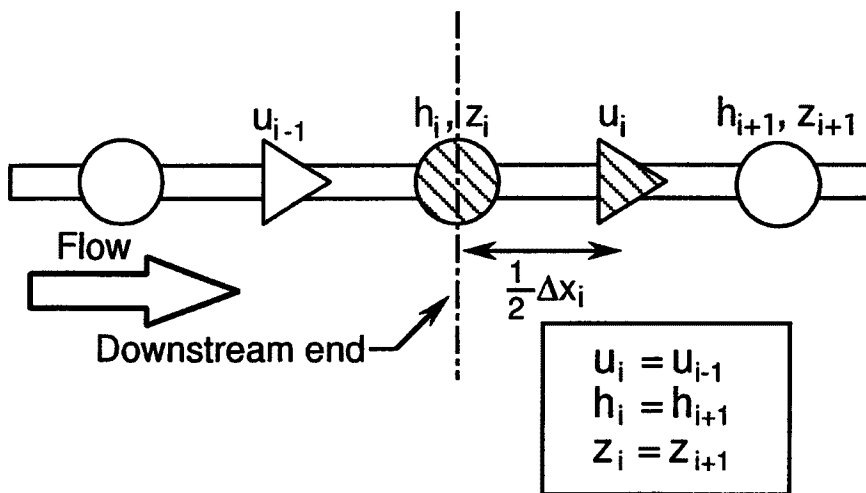


Fig. 4. Boundary conditions at the downstream end.

3. 計算の適用結果と考察

上述のモデルを検証するために、Fig. 5 に示すような仮想流域への適用を試みた。図示のように流域は17の斜面とそれにつながる河道網からなっている。各斜面の等価粗度・斜面長・勾配は Fig. 5 に示されている。河道網は Fig. 6 に示すように115のノードで構成され、各河道の勾配、堆砂域の幅 B_0 は図示の

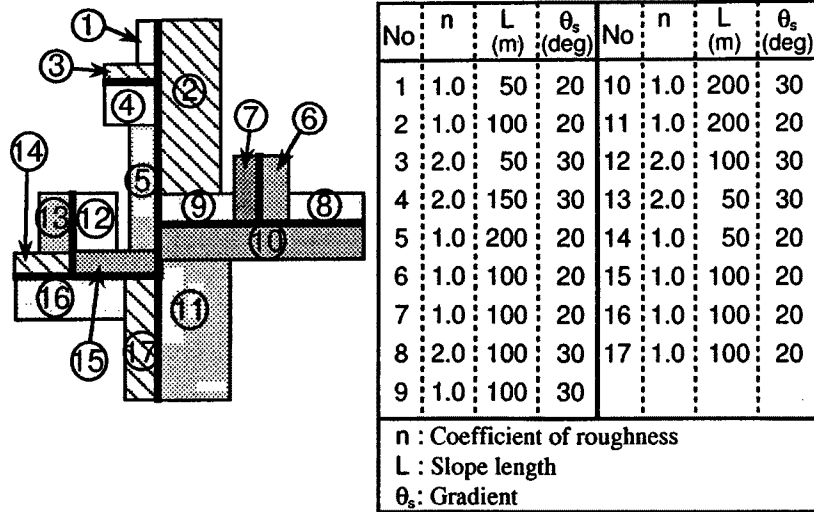


Fig. 5. Roughness, length and gradient of slope units employed in the calculation.

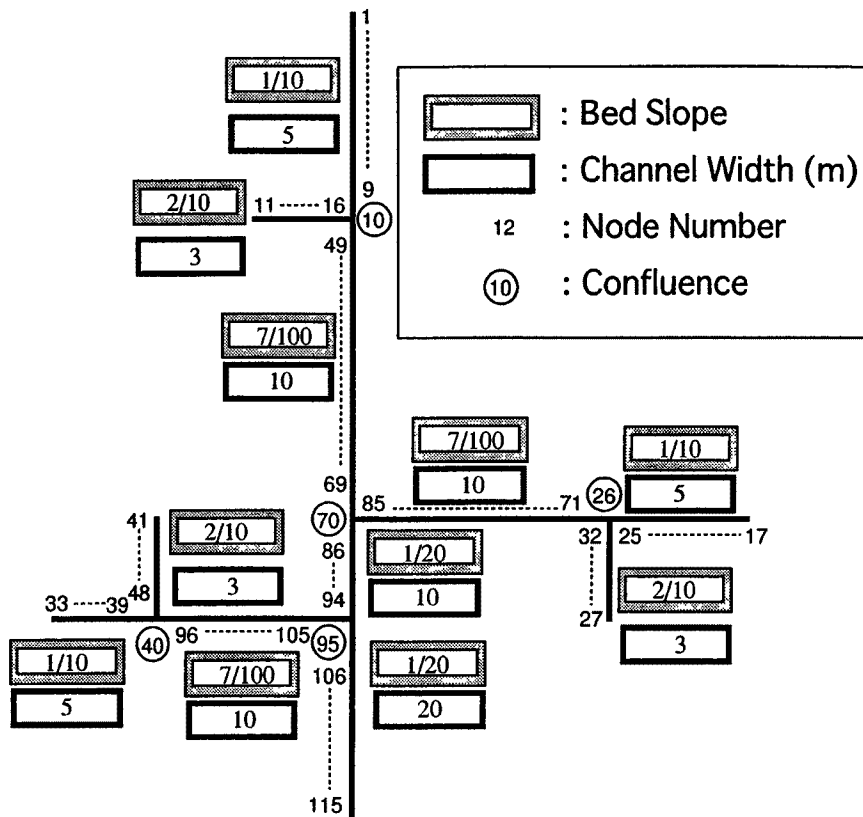


Fig. 6. Bed slope and channel width of the stream channels network.

とおりである。水みち幅 B_w は当初レゾーム則を用いて与えようとしたが、流量の変動が大きくなるためか計算が不安定になった。そこで、

$$B_w = 0.25 B_0 \dots \dots (10)$$

としている。

その他の計算条件は以下のである。河床砂の粒径 d は 5 cm, その水中比重 s は 1.65, 空隙率は 0.4 としている。限界掃流力 τ_{*c} は 0.05, 水みち側岸の勾配 θ は 30° である。

Fig. 7 には与えた降雨の条件と下流端における流量・流砂量の計算結果が示されている。これをみると、降雨に伴う雨水及び流砂の流出がある程度計算できていることがわかる。ただし、より現実的な予測を行うには、斜面部や河道部における地下水の問題をモデルに組み込む必要がある。また、流砂形態や砂礫の粒度分布についても考慮していかねばならない。そのうえで実際の流域への適用を図れば、詳細な土砂流出の予測に役立つものと考えられる。

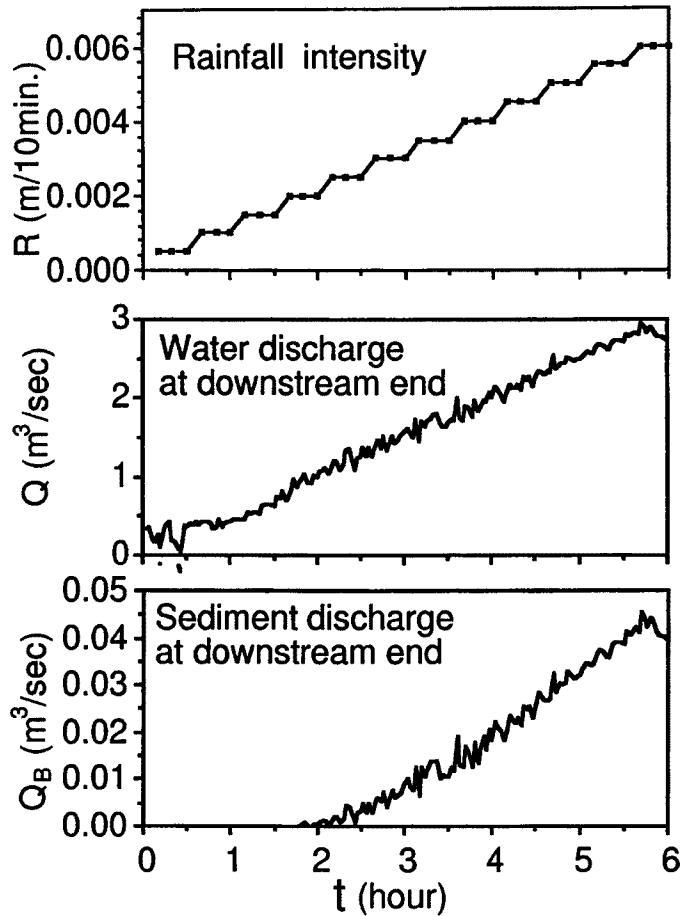


Fig. 7. Water discharge and sediment discharge at the downstream end of the channels network predicted by the present model.

4. 結 語

本研究では、山地流域からの土砂流出を予測するための数値モデルの開発を行った。このモデルは流域を斜面部と河道網とに分割し、斜面部下端において計算される流量を河道部の横流入として与えることにより、流域下流端での流出流量ならびに流出土砂量を計算するものである。本研究によって得られた成果と今後検討すべき課題を要約すると、以下の通りである。

- (1) 斜面部からの雨水の流出に関しては、等価粗度、斜面長、斜面勾配を与えて kinematic wave 法により計算を行い、河道部においては、斜面からの流入を考慮した一次元の河床変動計算を行う。このモデルを用いて、仮想の流域からの土砂流出に関する検討を行った結果、降雨が与えられた場合の雨水および土砂の流出過程を計算可能であることがわかった。
- (2) 現モデルでは雨水の地下への浸透および河道堆積物中の流れは考慮されていない。比較的粗い粒子が多く存在する山地流域においては、これらはぜひともモデルに組み込むべき問題である。
- (3) 斜面から河道堆積部への土砂の供給は、降雨期に限らず一年を通じて起こっていると考えられる。斜面長や斜面勾配、あるいは植生といった斜面の条件、および外力としての降雨や積雪、気温変動等の条件をもとに、土砂の生産量を定量的に評価することが必要である。
- (4) 山地河川においては土砂が広い粒度分布をもっている場合が多いので、混合砂を対象としたモデル

にしてゆく必要がある。また、土石流の発生などの問題もあるため、掃流砂以外の土砂の輸送形態に関しても検討しなければならない。

モデルの妥当性の検証には、過去の豊富な実測データのある神通川流域足洗谷への適用を図ることが有効であると考えられるので、今後、地理情報システム等を利用して流域のモデル化を進めてゆく。

参 考 文 献

- 1) 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，206号，1972，pp.59-69.
- 2) 芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究（2），京都大学防災研究所年報，第26号，1983.