

河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法

A METHOD FOR PREDICTING SEDIMENT RUNOFF CAUSED BY EROSION OF STREAM CHANNEL BED

江頭進治¹・松木 敬²

Shinji EGASHIRA and Kei MATSUKI

¹正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 (財) 砂防・地すべり技術センター 砂防技術研究所(〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-8-21 山脇ビル)

The present study describes a method for predicting sediment runoff caused by erosion of sediment stored in river channels. The method is developed by combining a newly developed channel model, a rain-fall runoff model and a storage-type sediment runoff model. The channel model, which is based on a unit channel having two inflow points and one outflow point, can easily reproduce stream channels distributed in a drainage basin. A kinematic wave runoff method is employed in rainfall runoff prediction, and the sediment runoff model is developed by integrating partial differential equations for water and sediment with respect to the reach of unit channel. The present method can predict temporal and spatial change of water discharge, sediment discharge, sediment storage and sediment size when rainfall data are given as in-put. It is applied to the upper basin of Kumano river, and its applicability is verified by comparing the predicted results and reservoir sedimentation data.

Key Words :sediment runoff, rainfall runoff, bed-load, wash load

1. 緒言

流域における土砂管理の重要性が高まる中、河道の任意の地点における時々刻々、および長期にわたる流出土砂量の予測を合理的に、しかも容易に行う方法の開発が強く望まれている。ところが、実際の流域においては土砂生産現象の間欠性や非連続性のため、また土石流や掃流など、多様な流砂形態があり、しかも河道は樹枝状に分布していて複雑なため、土砂水文学の支配方程式に基づく流出土砂量の予測は困難を極めている。

上述のような状況にあっても、土砂流出予測は、目的とする時間・空間スケール、あるいは流砂形態に着目しながら種々の方法で行われている。たとえば、ダム貯水池が存在する $10^2 \sim 10^3 \text{ km}^2$ の流域規模を対象として、ダム堆砂データに基づいた年平均比流出土砂量に関するいくつかの経験則^{1)~3)}が提案されている。しかし、この種の方法に限ったことではないが、このような方法は流域条件が変化するようなところでは適用が難しい。また、近年の地理情報システムやリモートセンシング技術の進展に伴い、これらを用いた土砂動態モデル^{4)~5)}が開発されつつある。これらは、流域における土砂移動現象を大雑把に理解するためには有効であるが、土砂流出量が河幅、河床勾配、河床材料など、河道特性に大きく依存することを考慮すると、現状においては流域における土砂管理のための有用な手法となるには至っていない。

流砂形態のうち、ウオッシュロードに着目した研究もいくつか提案されている。村本・道上・下島⁶⁾は Kinematic wave 法による降雨流出解析を行い、ウオッシュロードの流出量を表面流の関数として扱う方法を提案した。金屋敷・芦田・江頭⁷⁾は、土砂生産の場合として河道貯留土砂と山腹裸地とを考え、河岸浸食モデルおよびガリー浸食モデルを用いるとともに、村本らと同様の降雨流出解析法を用いた方法を提案した。このようなウオッシュロードの解析法は、当時少し複雑すぎたのか、その後あまり進展をみていない。その後いくつかの興味ある観測研究が行われている^{8)~9)}。

掃流砂や浮遊砂からなる流出土砂量は、原理的には流水と流砂に関する支配方程式を用いて予測することも可能である。この方法は、上流端の境界条件が容易に設定できるような単一の河道を対象にする場合には威力を発揮するものの、方程式系の非線形性が強いいため、無数の河道が樹枝状に組み合わせられた領域の土砂流出問題を扱うには適切とはいえない。

上述のような状況にあって、次のような着想に基づけば、土砂流出現象の時空間スケールの巨視化と方程式系の準線形化が出来るばかりでなく、これと降雨流出モデルとを組み合わせた土砂流出モデルの構築が容易になる。すなわち、河道と河道との合流点に着目し、上流側の合流点を含み、下流側の合流点を除く区間を単位河道とし、流水・流砂の支配方程式を単位河道にわたって積分して平均化すれば、支配方程式は貯留形のものに変換される。本研究は、

先の江頭¹⁰⁾の研究を基礎として、上述の方法から導かれる流水・流砂に関する貯留型の支配方程式と Kinematic wave 法に関する降雨流出モデルとを組み合わせた土砂流出予測法について検討するものである。

2. 予測モデル

(1) 土砂生産源、河道および流域斜面のモデル化

$10^2 \sim 10^3 \text{ km}^2$ の流域を対象として、流域に分布する任意の河道における流出土砂量を扱うものとし、土砂流出形態として掃流砂量式で扱える流砂、およびウオッシュロードを対象とする。

土石流堆積物は一般に勾配 $4^\circ \sim 10^\circ$ 程度の溪床に存在する。この事を考慮して、河道貯留土砂は勾配 10° 以下の領域に存在するとして扱えるものとし、ウオッシュロードは、河道貯留土砂のうち、土石流堆積物のように水流の作用をあまり受けていない、勾配 $4^\circ \sim 10^\circ$ の領域の堆積物の浸食によって流出するものとして扱う。

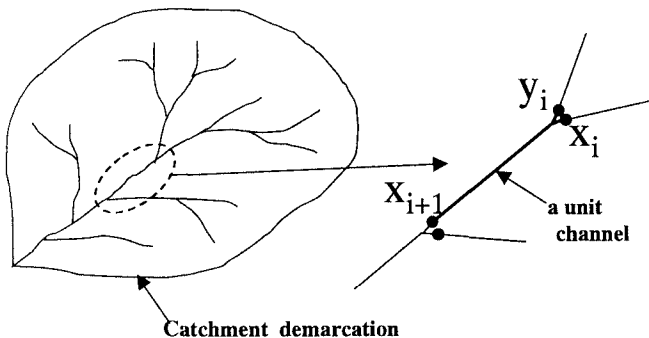


図-1 河道の分布および単位河道

図-1は流域に分布する河道、および単位河道の模式図である。図のように、各河道の合流点から次の合流点に着目し、上流側の合流点を含み、下流側の合流点を除く区間、すなわち二つの流入点と一つの流出点を持つ区間を単位河道とする。単位河道を直列および並列に連結することによって実際の樹枝状に分布する河道を表現できる。このとき最上流あるいは流域界にもっとも近い単位河道は、貯留土砂との関係を考慮して勾配 10° のところに配置する。

各单位河道の左右岸に接続する山腹斜面は、降雨流出解析を容易にするため、単位河道の長さを共通の一边とする平行四辺形状の二つの斜面で近似する。降雨流出成分として土砂移動に直接関係する表面流と中間流を対象にし、斜面土層は厚さ D の表層とその下層から構成されるものとする。表面流は、Kinematic wave 法により、中間流は連続式とダルシー則を用いて算定するものとする¹¹⁾。

(2) 支配方程式

前述のように、流水・流砂に関する支配方程式は、非線形の偏微分方程式で記述され、単純な場を対象とするときには直接数値積分することによって解が求められる。ところが、本研究が対象にするような

場において数値解を求めるのは困難である。そこで、これらを各单位河道にわたって積分して平均化するとともに、流れに対する Kinematic wave などの近似を行えば、以下のような貯留型の支配方程式が得られる。

流れの連続式および運動方程式は、河道を矩形断面で近似すれば、次のように与えられる。

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

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

ここに、 h 、 B 、 L 、 I および n は、それぞれ単位河道 i における水深、河幅、河道長、河床勾配およびマニングの粗度係数である。 $Q(x_{i+1})$ は単位河道 i からの流出流量、 $Q(x_i)$ および $Q(y_i)$ は、単位河道 i への流入流量、 q は降雨流出に伴う単位河道 i の両岸における単位長さ当たりの流入流量であり、前述の降雨流出解析によって与えられる。

流砂の連続式（貯留土砂の質量保存式あるいは貯留高の式）、流砂量式および貯留土砂の粒度分布式は次のように与えられる。

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

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

$$\frac{\partial p_j}{\partial t} = \frac{1}{\Delta BL} \{Q_{sj}(x_i) + Q_{sj}(y_i) - Q_{sj}(x_{i+1})\} - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{f_j}{\Delta} \quad (5)$$

$$\text{ただし、} f_j = p_{j0} \left(\frac{\partial z}{\partial t} \leq 0 \right), \quad f_j = p_j \left(\frac{\partial z}{\partial t} > 0 \right)$$

ここに、 z 、 λ 、 Q_s 、 p_j 、 p_{j0} 、 Δ はそれぞれ河床高あるいは貯留高、堆積物の間隙率、流砂量、河床表層における粒径 d_j の含有率、下層における含有率、および交換層の厚さであって、いずれも単位河道 i における値である。 Q_{sj} は粒径 d_j の流砂量である。 Q_{sj} の算定には、芦田・道上式を用いる。その際対数則から推定される有効掃流力を用いる。

Q_{sw} は、単位河道 i において生産される単位時間当たりのウオッシュロードである。これは、 4° から 10° の領域に位置する単位河道において、堆積物が浸食されると同時に流出するものとすれば、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{sw} &= -(1-\lambda)BL p_w \frac{\partial z}{\partial t}, & \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right) \leq 0 \\ Q_{sw} &= 0, & \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right) > 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 p_w は河道貯留土砂におけるウオッシュロードの含有率であり、江頭らの研究¹²⁾を参考にして、粒径 0.1 mm 以下をウオッシュロードとして扱う。ウオッシュロードの流下過程において、それが河床に

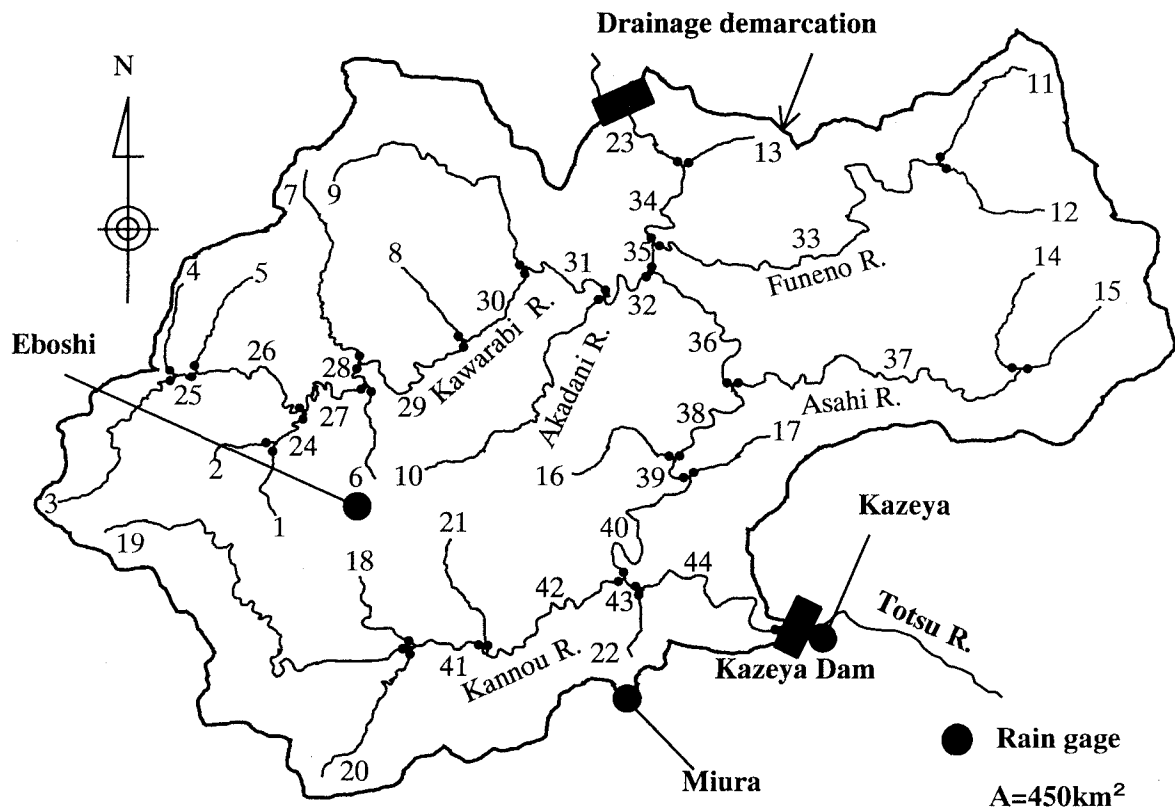


図-2 風屋ダム流域および単位河道

取り込まれないものとする。単位河道 i における流水中のウオッシュロードの濃度 c は次式によって与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{BLh} \{ Q_{sw} + c(x_i)Q(x_i) + c(y_i)Q(y_i) - c(x_{i+1})Q(x_{i+1}) \} \quad (7)$$

以上が、河道貯留土砂の浸食による土砂流出予測法である。河道堆積物の供給は、土石流、河岸崩壊および河岸浸食などによってなされる。これらは後の課題として残し、ここでは考慮していない。このような土砂生産は組み込まれていないものの、河道堆積物が無限の深さに存在するとして本モデルによる計算を行えば、流出土砂量は、河道の土砂輸送能力に対応する値になるので、任意の地点で極大値に近い値になる。

3. 予測法の適用

(1) 計算条件

熊野川右支川十津川上流の風屋ダム流域を対象とする。流域面積は約 450km²である。図-2 は流域の概要である。図中の番号は単位河道であって、当該流域の河道は、前述の方法に従うと、44 本の単位河道に分割される。各単位河道に連なる両側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 の地形図を用いて設定した。斜面の等価粗度は最上流の単位河道に連なる斜面において 0.7 [m-s] とし、それ以外の斜面では 0.4 とした。斜面表土層の厚さ D は 40cm、透水係数 0.05m/s、浸透能は Horton の式¹³⁾において、

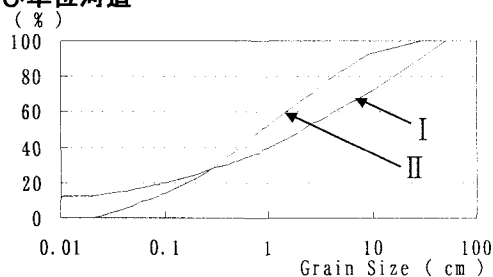


図-3 初期河床材料の粒度分布

初期値 16mm/hr、最終値 10mm/hr としている。下層の浸透能は 0.16mm/hr とした。なお、これらの値は、金屋敷らの研究⁷⁾を参考にして決定されている。

各単位河道については長さ、勾配を 1/25000 の地形図より決定し、土砂の浸食・堆積に伴う河床勾配の変化は考慮していない。マニングの粗度係数は最上流の単位河道において 0.07 [m-s]、それ以外で 0.035 [m-s] とした。

各単位河道の河幅 B は次のように設定した。対象流域最下流端の流量を Q 、流域面積を A とし、各単位河道の上流端の二つの流入点における流域面積を A' とし、 $B = 5\sqrt{QA'/A}$ により算定した。ただし、河幅が流量によって変化すると、それに伴う流出土砂量の変動があり、各地点における流出土砂量はこれらが複合した結果として現われる。そのため計算結果の解釈が難しくなるので、ここでは、 $Q = 200\text{m}^3/\text{s}$ を与えて算定された河幅を採用している。

流砂の交換層厚は 40cm、初期河床材料の粒度分布には若干の現地調査を行い、それを参考にして図-3 のようなものを与え、粒径階として 14 分割した。

4°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には分布形Ⅱを用いた。また、各々の単位河道における貯留土砂は、このような分布形を持つ材料が無限の深さ存在しているものとしている。

降雨量として、図-2に示す三つの雨量観測点の毎時雨量データを用い、各単位流域の斜面には、そこに最も近い観測点のデータを与えた。図-4は、一例として1975年8月18日～24日の降雨のうち、8月21日～8月24日の降雨データを示している。

流出土砂量の計算は、1974年～1978年（1977年は欠測）、1991年～1994年の2期間における風屋ダムの堆砂量に着目し、それぞれの堆砂量とその年の最も大きい洪水によりもたらされたと見なし、各年において最も大きい一つの連続した降雨について行った。

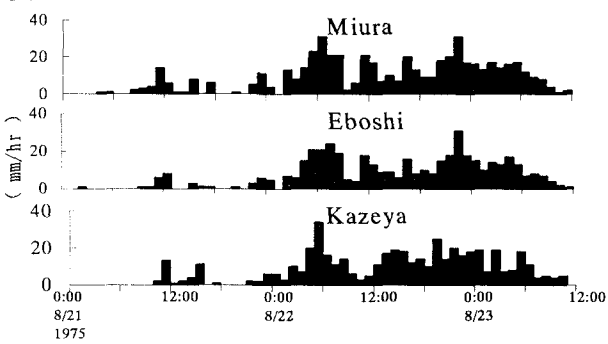


図-4 1975年8月降雨の一例

(2)計算結果

図-5は、風屋地点（図-2の単位河道44の流出点）における1974～1978年（1977年は欠測）の降雨に対する流出流量に関する実測値と計算値であり、図-6は、同じ地点における流出土砂量（掃流砂 V_s とウオッシュロード V_w の和）に関する計算値である。同図には流出土砂量の積算値も示されている。降雨流出についてみると改良すべき点はあるものの、本研究の目的には十分ではないと思われる。流出土砂量は、流量波形に対応して流出しているのが分かる。

図-7は、年堆砂量に関する実測値と計算値の比較であり、計算値は掃流砂（ V_s ）とウオッシュロード（ V_w ）のものを分けて示している。前述したように、計算では一年のうち最も規模の大きい一つの出水を対象としており、これ以外にも出水があることを考慮すれば、少なめに算定されることが予想された。しかし、計算値と実測値とは、かなりよく一致している。これは、初期粒度分布が小さめに設定されているためと推察される。

図-8は、1978年の出水が終了した時点の河原樋川における単位河道6、32、36における河床表層の粒度分布である。これによれば、最上流に位置する単位河道6においては粗粒化が進み、河原樋川の下流端の32および十津川本川の単位河道36においては顕著な変化はみられない。

図-9は、ウオッシュロードの濃度と流量の関係をみたもので、図-4の降雨に対する計算結果であ

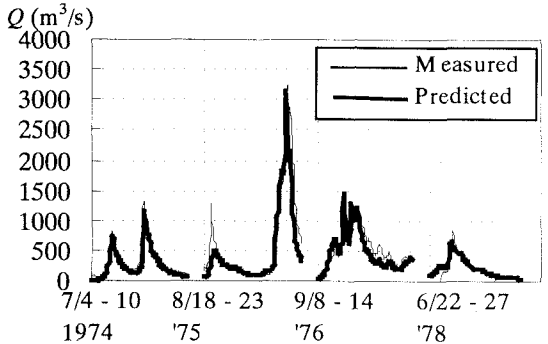


図-5 風屋地点における降雨流出に関する計算例

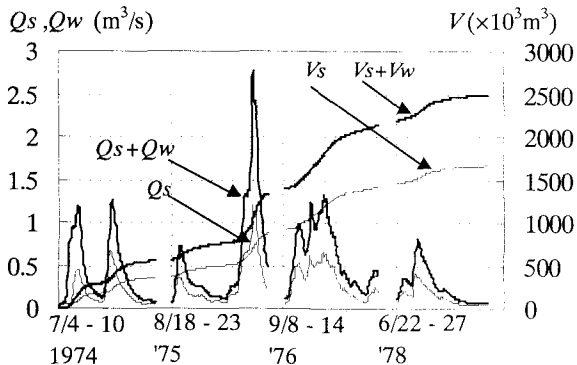


図-6 風屋地点における流出土砂量の計算例
（ V_s :掃流砂, V_w :ウオッシュロード）

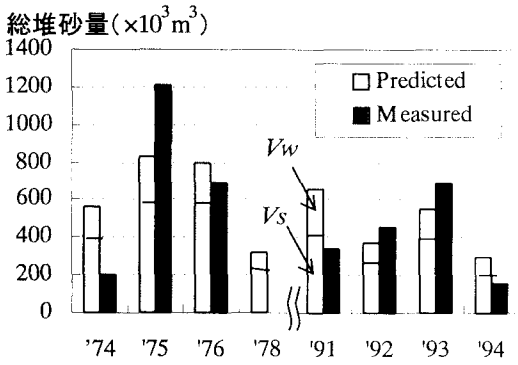


図-7 風屋ダムにおける年堆砂量に関する計算値と実測値の比較（ V_s :掃流砂, V_w :ウオッシュロード）

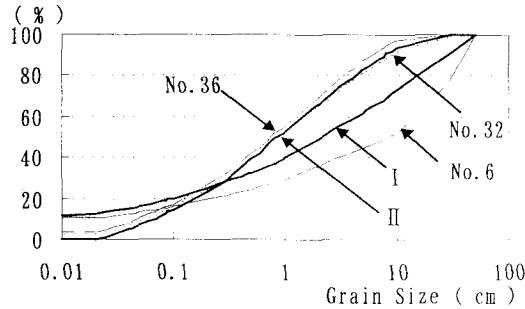


図-8 河床表層の粒度分布に関する計算例
（数字は単位河道の番号）

る。各曲線は単位河道10（河原樋川の最上流）、32（上述の地点）、42（神納川下流端）および44（風屋地点）のものである。単位河道10にはウオッシュ

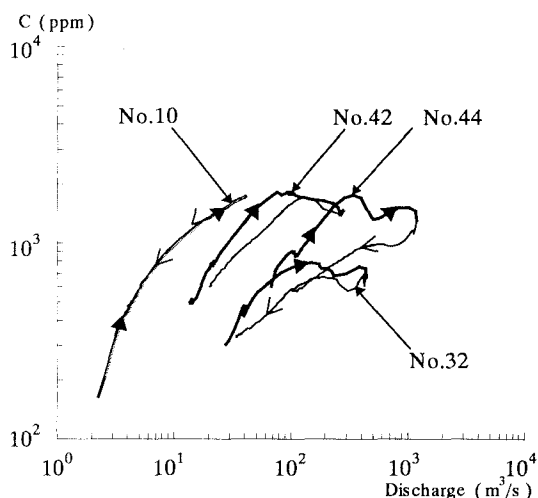


図-9 各単位河道において算定された流量とウオッシュロードの濃度の関係(1975年8月出水)

ロードの生産源があり、流域も小さく、河床浸食に応じて、ウオッシュロードが流出し、流量と濃度は一意に定まっている。これは、この洪水において、アーサーコートが発達していないことを意味している。単位河道32および42はいずれも代表的な二つの支川の下流端であり、これらの濃度・流量曲線には、多くの単位河道におけるウオッシュロードの生産の影響が現れている。さらに、最下流の44の濃度・流量曲線は32および42における水流出およびウオッシュロードの流出特性に支配されている。

4. 土砂流出モデルの特性および課題

上流域から土砂がどのように輸送されているかを調べるため、各単位河道の流出点における通過土砂量を各出水ごとに求め、その地点の流域面積で除した比流出土砂量と、その地点の流域面積との関係を見ると図-10のようになる。図の最右列のデータは風屋地点のものである。出水は、各年1つで、1974～1976、1978年、および1991年～1994年における期間のもので、図には全部の単位河道について示されている。図に示されるように、流域面積が大きくなると比流出土砂量は減少する傾向を示している。比流出土砂量は、ほぼ年比流出土砂量に対応していることを考慮して、芦田ら¹⁾の年平均比流出土砂量

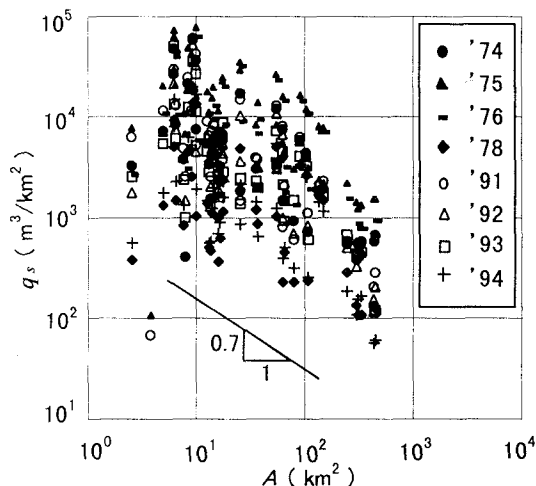


図-10 比流出土砂量と流域面積の関係

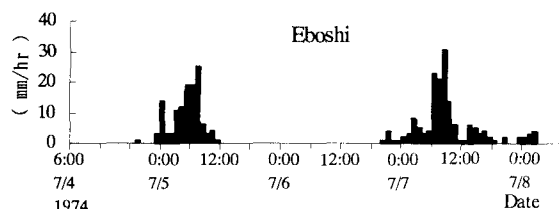
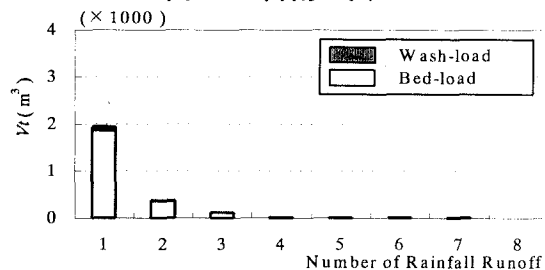
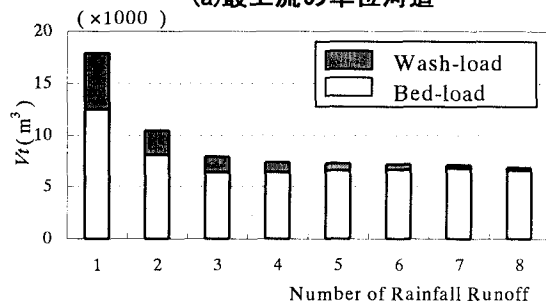


図-11 降雨モデル

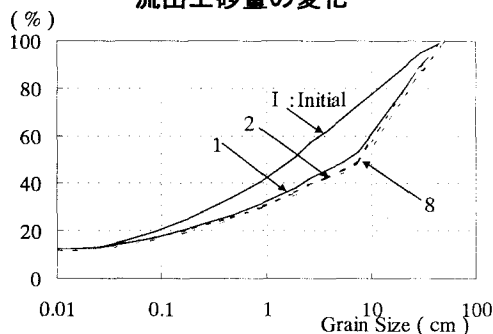


(a)最上流の単位河道

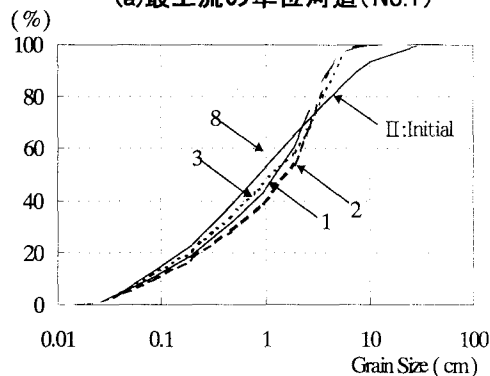


(b)風屋地点の単位河道

図-12 降雨回数(出水回数)による流出土砂量の変化



(a)最上流の単位河道(No.1)



(b)風屋地点の単位河道(No.44)

図-13 降雨回数(出水回数)による粒度分布の変化

に関する経験則と比較すると、計算結果は、芦田らの経験則の傾向に一致しているのが分かる。

1974 年 7 月の降雨を 0.7 倍した降雨を用いて、これを繰り返し 8 回与えて、風屋地点および最上流の単位河道における流出土砂量の変化をみる。降雨を 0.7 倍にしたのは、元の降雨条件を用いると、出水ピーク時に最上流の単位河道において河床材料全体が移動する条件になり、予測法の特性が見えにくいからである。図-11 は、計算に用いた降雨である。

図-12(a), (b)は、それぞれ最上流の単位河道 (No.1) および風屋地点 (No.44) において、1 回目から 8 回目の降雨に対する流出土砂量を掃流砂とウォッシュロードを分けて示したもので、図-13(a), (b)は、それぞれ二つの地点におけるピーク流量時の河床表層の粒度分布である。図-12 の横軸は与えたモデル降雨の回数で、図-13 の中の数字は、モデル降雨の回数である。

最上流の単位河道のものについてみると、流出土砂は急激に減少し、4 回目の降雨以後においては有意な流出土砂はみられない。これは、図-13 (a)の粒度分布の結果にもみられるように、河床表面にアーマコートが発達し、砂礫の移動が停止する条件になっているからである。

次に、最下流端の風屋地点における流出土砂量についてみると、出水回数とともに、ウォッシュロードの流出が減少すること、および図-13 (b)にみられるように、掃流砂量は、中央粒径近傍の材料が粗粒化することの影響を受けて、3 回目の降雨までは比較的顕著に減少する。それ以後、全流出土砂量における顕著な変化はみられない。これは、河床材料の粒度分布変化にみられるように、一旦粗粒化した河床表面が、上流側からの影響によって細粒化するような現象が起こるからである。

この予測法は、一般に認知されている比流出土砂量と流域面積との関係や、流域が荒廃して流出土砂が増加した後、比較的早い段階に減少するなどの特性を評価できる。しかし、本手法においては、河道貯留土砂の増減にかかわらず、河床勾配を一定として扱うとともに、河床材料の粒度分布の変化は交換層だけを対象にしているなど、これらが結果に対してどのような影響を与えるか検討する必要がある。

5. 結語

本研究は、土砂流出と降雨流出とを同じ時空間スケールで取り扱い、しかも、単純な方法でなるべく現象の本質が評価できるような予測法の開発を目指したものである。ここでは、とりあえず、河道貯留土砂の浸食による土砂流出を対象として検討し、次のような成果を得ている。

- (1) 河道の合流点に着目し、二つの流入点と一つの流出点から構成される単位河道の概念を用いた河道のモデル化手法を提案した。これによれば、流域における実際の河道を容易に再現でき、しかも河道モデルと降雨流出解析との整合も容易である。
- (2) 準線形の貯留型方程式から構成される土砂流出モデルを提案した。これによれば、解析は容易であ

り、準線形方程式であることから数値解析法の違いによって結果が左右されることは起こりにくい。

- (3) 本予測法を熊野川上流の風屋ダム流域に適用し、良好な結果が得られるとともに、本予測法は、比流出土砂量や荒廃流域からの土砂流出が経年的に減少することなど、従来から認知されている現象を評価できることなども示された。

以上のような成果が得られたが、前述した課題ばかりでなく、本手法をより一般化するための課題も残されている。ここで扱っていない浮遊砂や河岸浸食現象は、本モデルの中へ容易に取り込めるものの、河岸崩壊や土石流などによる非連続的な土砂生産の取り扱いについて、今後検討を深めたい。

謝辞：本研究は、一部、砂防・地すべり技術センター研究開発助成事業の補助を受けて進めている。雨量データや堆砂資料などの収集に当たり、電源開発株式会社および関西電力株式会社の諸兄に御協力頂いた。また、立命館大学大学院学生上妻由拓君には、本研究を通じてご協力いただいた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 芦田和男・奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京大防災研究所年報，17 号 B，555-570，1974。
- 2) 江崎一博：貯水池の堆砂量の予測に関する研究，土木学会論文報告集，第 262 号，67-78，1977。
- 3) 堀江克也・山本 徹・黒木幹男・板倉忠興：滝里ダム流域の土砂生産量について，水工学論文集，第 43 巻，575-580，1999。
- 4) 砂田憲吾・長谷川 登：国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み，土木学会論文集，No. 485/II-26，37-44，1994。
- 5) Takara, K., K. Notsumata and R. Uesaka : A Distributed Model for Flood Runoff and Sediment Yield Based on Remote Sensing and GIS, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, September 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, 373-384, 1998。
- 6) 村本嘉雄・道上正規・下島栄一：大戸川における微細砂の流送過程について，京大防災研究所年報，16 号 B，433-447，1973。
- 7) 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，143-149，1980。
- 8) 坊野聡子・清水康行・斉藤大作・吉田義一：ダムを含む沖積河川の土砂輸送について，水工学論文集，第 43 巻，581-586，1999。
- 9) 杉本基泰・真野 明：阿武隈川における細粒土砂の観測と時空間分布，水工学論文集，第 41 巻，783-788，1997。
- 10) Egashira, S. : Research Related to Prediction of Sediment Yield and Runoff, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, September 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, 373-384, 1998。
- 11) 水理公式集，第 1 編 2 章，平成 11 年度版。
- 12) 江頭進治・芦田和男・金屋敷忠儀：微細土砂の流出解析法とその適用に関する研究，第 25 回水理講演会論文集，481-487，1981。

(1999. 9. 30 受付)