

山地河川の侵食過程

高橋 保・里深好文・奥村裕史*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究は、山地河川における大規模な土砂の堆積が生じた後の侵食過程と、それに伴う土砂流出を予測することを目的として、砂防ダムなどの構造物が存在する場における河床変動を再現しうる数値シミュレーションモデルを構築しようとするものである。また、砂防構造物を用いた流出土砂の制御に関して問題となることが予想される構造物下流域における顕著な土砂堆積に関しても考察している。

キーワード：山地河川の侵食，土砂流出，河床変動，砂防ダムによる土砂調節，土砂の堆積

1. はじめに

火山活動や大規模な山体の崩壊現象にともなう活発な土砂の生産があると、河川の上流域には大量の土砂が緩く堆積する。このような堆積土砂は、その後の降雨によって容易に侵食されるため、下流域への流出土砂量が急増し、河川の維持管理上大きな問題となる。山地流域からの土砂流出量を予測するためには、降雨の流出予測モデルとリンクした、山地河川の侵食過程に関する数値シミュレーションモデルを開発することが有効であると考えられる。

著者ら（1995）は、流域を小規模な斜面部とそれに接続する河道網とによって表し、流出土砂量を予測する方法を提案している。このモデルでは、側岸侵食によって河道へ土砂が供給されると考え、1次元的な河床変動計算によって河道網の侵食・堆積量および流砂量を計算している。ただし、このモデルでは砂防構造物の影響を考慮できていないという問題点があった。流域全体を対象としたモデルでは、計算点の配置間隔をあまり小さくすることができないため、砂防ダム上流域の堆砂過程を詳細に再現することは難しい。しかし、河床変動・土砂流出予測モデルを構

築する上で、このような人工構造物の影響を計算に組み込むことは重要な課題である。また、災害復旧などの目的で緊急に設置される砂防構造物の効果を合理的に評価するためにも、そのような構造物が河床変動に与える影響をシンプルな方法で数値計算に取り込むことが必要と思われる。そこで本研究では、砂防ダム上下流域の河床変動に関する水路実験を行い、このデータに基づいて、砂防ダムが河床変動に及ぼす影響を考慮した河床変動モデルを構築する。

ついで、従来、砂防ダムの機能のひとつと考えられてきた土砂調節機能、すなわち、大出水時に流送される大量の土砂の一部を砂防ダム上流域に堆積させ、その後、安全に流下させるという作用に関して、若干の検討を行っている。砂防構造物の土砂調節機能を考えるとき、これまでは砂防ダム地点における流砂量の変化を対象としてきた。しかし、ダムの堆砂量を回復するためには、大量の土砂を流量低下時にダムから排出する必要があり、場合によってはダム下流域に顕著な土砂の堆積を引き起こし、新たな問題が発生することが懸念される。これは山地河川の侵食過程を構造物によって制御しようとする場合、検討すべき課題のひとつと考えられる。そこで本研究では、

どのような条件で顕著な土砂の堆積が生じるのかについて、水路実験ならびに2次元の数値シミュレーションによる検討を行う。

2. 砂防ダムが存在する場の河床変動

砂防ダムが河道に設置された場合に、どのような河床変動が生じるのかを予測するためには、数値シミュレーションが有効であると考えられる。ここでは、非定常流れの式を用い、流砂量式として平衡流砂量の式を用いたシミュレーションモデルを採用する。流砂の形態としては土石流や泥流、浮遊砂等も考慮する必要があると思われるが、ここでは簡単のため掃流砂のみを対象とし、粒度分布の影響も考慮しない。

2.1 河床変動の一次元支配方程式

一次元場において流れの連続式は、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

と表せる。ここに、 h :水深、 B :流水幅、 Q :流量である。

流れの運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2)$$

である。ここに、 u :平均流速、 P :水圧、 τ :河床せん断力、 ρ :水の密度、 ϵ :渦動粘性係数である。河床せん断力は Manning 則から評価し、水圧は静水圧を仮定する。

河床の連続式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)B} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

である。ここに、 z :河床位、 λ :河床の空隙率、 q_b :単位幅流砂量である。単位幅掃流砂量 q_b は芦田・道上(1972)の式を用いて計算する。

2.2 支配方程式の差分化と境界条件

流れと河床変動を解くために、前述の支配方程式を差分化する。流速の評価点は水深、河床の評価点と $\Delta x/2$ だけずらして配置している。

上・下流端では様々な境界条件の設定が考えられるが、今回の計算では上・下流端とも、

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

とし、下流端の河床位は変動しないものとした。

最大の課題は砂防ダムの地点でどのような条件を設定するのかということである。砂防ダムの設置位置、高さなどをさまざまに変化させて計算することを考えると、できるだけ簡便な方法であることが望ま

しい。そこで、砂防ダムを一つの河床の評価点で表し、流れの計算においては何ら特別な操作はしない。ダム天端高を河床高とし、この点の河床変動は起こらないものとする。ただし、砂防ダム地点での流砂量、すなわち、ダムの越砂量を計算し、ダムの堆砂状況を上手く表現するために、ダム直上の移動床部の河床位を仮想の河床位とした。すなわち、ダム地点の流砂量を計算するためには、この仮想の河床位と水位との差から求められる水深で流速を再評価し、掃流力を計算する。この河床位は通常の河床評価点と同様に、後退差分で変動量が計算される。仮想の河床位がダム天端高さを越えた場合には、超過分に相当する土砂はすべて下流に流出するものとしている。すなわち、仮想河床位がダム天端より高くはならない。

2.3 砂防ダム上下流域の河床変動に関する水路実験

前述のモデルの適用性を検討するために、砂防ダムが存在する場の河床変動に関する水路実験を行った。実験水路の側面図が Fig.1 に示されている。河床の初期条件は水路床と平行に設定されている。実験条件を Table 1 に示す。表中の D は堰高さ、 d は粒径、 B_0 は水路幅である。

上流からの供給土砂量は、水路上流端において極端な河床上昇あるいは河床低下がおこらないように調節した。ただし、RUN Bの20min以降は給砂を停止し、給水のみを行った。これは、上流域の侵食過程に関する検討を行うためである。

2.4 砂防ダム上下流域の河床変動に関する計算値と実験値との比較

Fig.2 に前節で述べた砂防ダム上下流域の河床変動に関する実験結果と、同様の条件のもとで前述のシミュレーションモデルを用いて計算を行った結果を示している。RUN Aを見ると、上流からの堆砂の進行をある程度再現可能であることが分かる。ただし、堆砂の進行速度に若干の差があるので、これについては今後の検討が必要であると思われる。ダム下流部を見ると、ダム直下部の局所的な洗掘を除いて、かなり良好に再現できていると考えられる。

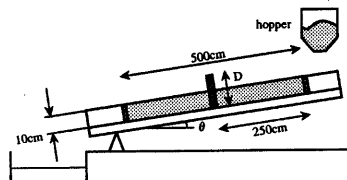


Fig. 1 Experimental flume

Table 1 Experimental condition

	$\tan \theta$	D (cm)	Q (ℓ/s)	B_0 (cm)	d (cm)
RUN A	0.01	12.0	5.24	40.0	0.188
RUN B	0.01	10.9	6.53	40.0	0.188

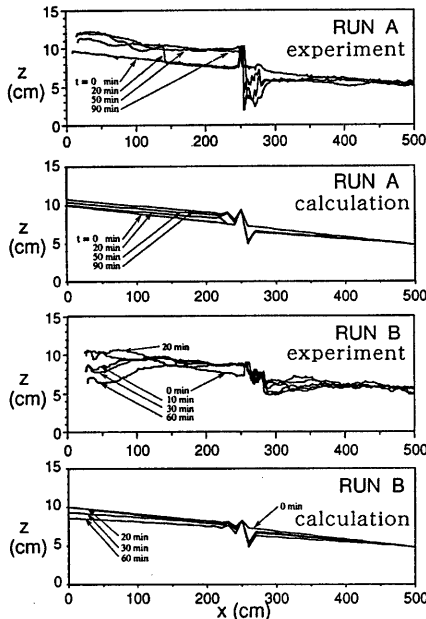


Fig. 2 Temporal variation in the bed profile

RUN Bでは実験値がかなりバラついているため、厳密な比較は行えない。ただし、上流からの土砂の供給がなくなった場合に、河床が低下してゆく過程はある程度再現できている。今後、流砂量式等に関してより一層の検討を進めることにより、より高精度の予測が可能となるはずである。

3. 砂防ダムによる土砂調節に伴うダム下流の河床変動

従来、砂防ダムを用いることにより、河床の変動を制御し、急激な土砂の流出を抑制できると考えられている。大規模な出水時に流下する大量の土砂を一時的にダム上流域に堆砂させることにより、砂防ダム下流域への土砂流出を抑制し、その後、安全に流下させるというのが土砂調節の基本的な考え方である。しかし、これまで考慮されてこなかった問題として、土砂調節を考える場合、あくまでダム地点での流砂量を対象としてきたために、ダム下流における河床変動を考えてこなかった、ということが挙げられる。

砂防ダムの調節容量の回復のためには、流量減減時、あるいは小規模な出水時において砂防ダム上流域が侵食されることが必要であるが、これは高濃度の土砂がダム下流域に供給されることを意味しており、時としてダム下流域に顕著な土砂の堆積を生じさせる可能性がある。そこで、どのような場合にそのような堆積現象が現れるのかについて、水路実験ならびに2次元の数値シミュレーションによる検討を行う。

3.1 砂防ダム下流域の土砂堆積に関する水路実験

砂防ダム下流域の土砂堆積現象がどのような場合に生じるのかを明らかにするために、Fig. 3に示すような実験水路を用いて実験を行った。実験は、ダム上流に土砂が急な勾配で堆積している状態を初期条件として、通常の流水によってその土砂が侵食され、ダム下流部に流出するような場を考えている。最も極端な場を想定して、水路上流からの給砂は行っていない。

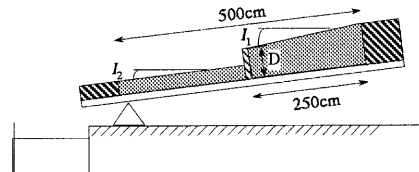


Fig. 3 Experimental flume

Table 2 Experimental condition

RUN No.	I_1	I_2	Q (cm^3/s)	D (cm)
RUN 1	1/20.3	1/30.0	505	12
RUN 2	1/20.3	1/30.0	833	12
RUN 3	1/20.3	1/51.5	538	12
RUN 4	1/20.3	1/51.5	723	12
RUN 5	1/20.4	1/76.9	483	12
RUN 6	1/20.4	1/76.9	800	12
RUN 7	1/12.4	1/78.7	438	8
RUN 8	1/14.6	1/77.5	423	10
RUN 9	1/14.2	1/99.0	433	10

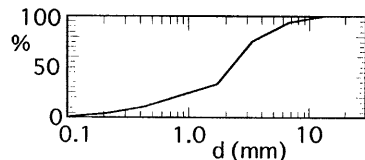


Fig. 4 Grain size distribution of sand employed for the experiment

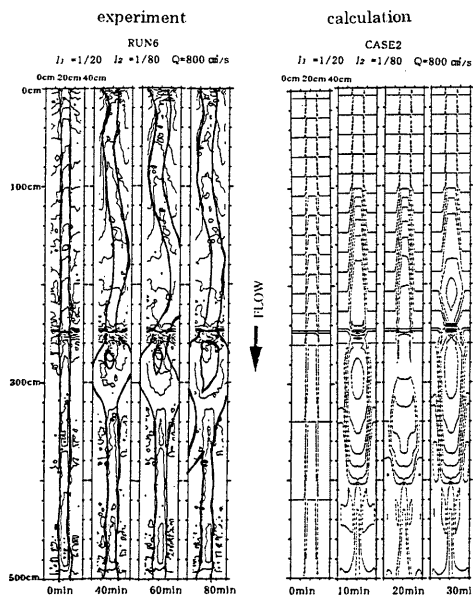


Fig. 5 Contour line of bed surface and channel pattern

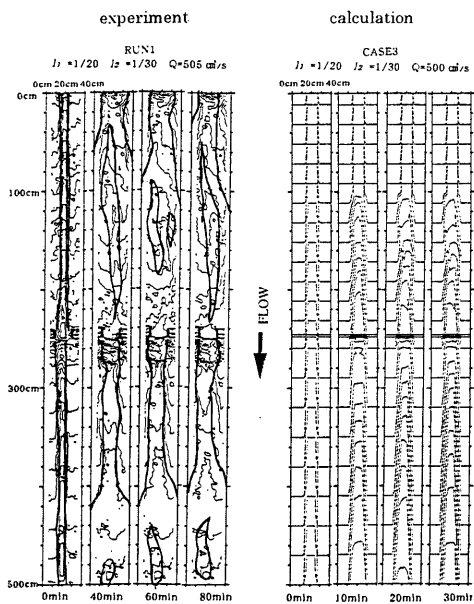


Fig. 6 Contour line of bed surface and channel pattern

実験はダム上流側と下流側の初期河床勾配をそれぞれ独立に種々設定して行った。実験条件を Table 2 に示している。使用した土砂は平均粒径2.83mm、標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=2.70$ の混合砂である。その粒度分布をFig. 4 に示す。水路幅は40cmであり、ダムの水通し幅 B_d は17cmとしている。ダム袖部は越流が生じない高さとなっている。ダム水通し天端と初期状態における下流側河床とは、いずれのケースにおいても

2cmの落差を設けている。初期状態において、ダム直上流河床はダム水通し天端と同じ高さに設定されている。初期河床には水路全域にわたって中央に深さ2cm、幅10cmの矩形の水みちを作成し、ダム直下部に局所洗掘防止を目的として直径4cm程度の礫を敷き詰めている。通水開始後20minごとに通水を中断して河床形状を測定した。

実験の結果、上下流の河床勾配の差が大きいケースでは、時としてダム下流に大きな砂州が発生することが分かった。このような砂州はいったん形成されると、通水を継続してもほとんど侵食を受けない。砂州が発生するにしたがい、水みちは側岸方向へ大きく方向を変え、側岸に衝突するような流れが生じていた。Fig. 5には顕著な土砂の堆積が生じた一例として、RUN 6の河床等高線の時間的変動を示している。図中の太線は写真から判読された水際線を示している。この図には後述する数値シミュレーションの結果も併せて示している。少し見づらいが、ダム下流の60cm程の区間で土砂の堆積が生じ、浮き州が形成されていることがわかる。これに対してFig. 6に示されたRUN 1の河床形状には顕著な土砂の堆積は確認できない。両ケースともダム下流20cmの区間で等高線が乱れているが、これは洗掘防止のために設置された礫の影響によるものである。

本実験でも見られるように、砂防ダム上流域のような比較的幅の広い領域では、通常水みちが形成され、

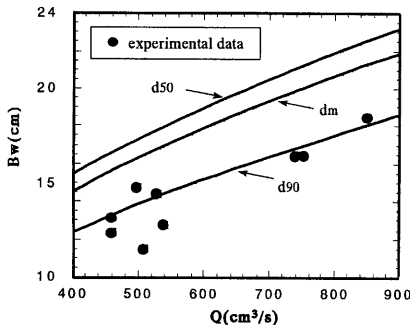


Fig. 7 Relationship between discharge and flow width predicted by eq.(5)

それが横断方向に振れることによって川幅全体にわたる河床変動が生じている場合が多い。水みちの幅を予測することは山地河川の河床変動を考える上で大きな課題のひとつである。芦田ら(1990)は、一様砂礫床における水みち幅の推定式を次のように提案している。

$$B_w = \alpha \left(\frac{Q}{\sqrt{gdI}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 α :係数(=1.4)、 g :重力加速度、 d :一様砂の粒径、 I :河床勾配である。混合砂礫床上的の水みち幅の推定に式(5)を適用できるかどうかを調べるために、本実験で計測された水みち幅と式(5)との比較を行った。Fig. 7には代表粒径として d_{50} 、 d_m 、 d_{90} をそれぞれ用いた場合の式(5)の値と実験値とが示されている。これを見ると、代表粒径として d_{50} を採用することにより、水みち幅の推定がある程度可能であることが分かる。今後より広範囲なデータを収集することによって、式(5)の妥当性を確かめられよう。

Fig. 8にダム下流域における顕著な土砂堆積の発生・非発生に関する領域区分を示している。図中の B_d は砂防ダムの水通し幅、 B_w はダム上流域の水みち幅である。砂州発生の主たる要因をとしては、ダム上下流における掃流力の差が挙げられる。いま、ダム上下流において水みち幅に大きな違いがないとすると、河床勾配の差が掃流力の差を生むと考えられる。図をみると、ダム上下流の勾配の差が大きいケースにおいて顕著な土砂の堆積が生じていることが分かる。また、河床勾配の差が比較的小さいケースにおいても、ダムの水通しによって流水幅が縮小されるとき、ダム直下部に土砂が堆積しやすくなっていることが分かる。これはダム水通し部で流水幅が狭められ、強制的に流砂の横断方向の不均衡が生じているためであると考えられる。

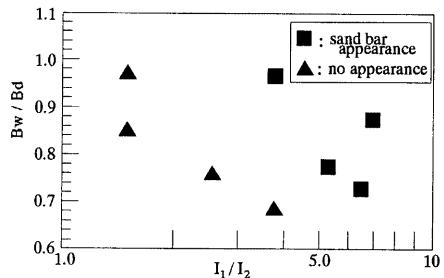


Fig. 8 An examination of the criterion for the occurrence of deposition in downstream of sabo dam.

砂防ダム上下流の河床勾配の差は、まさに従来唱えられている砂防ダムの土砂調節機能の本質である。また、砂防ダムによって流水幅を狭めることは、ダム下流の土砂の堆積に拍車をかけることになり、これはより高い土砂調節機能が期待されるスリット型の砂防ダム(芦田ら, 1987)を設置する上で大きな問題であると考えられる。

3.2 砂防ダム下流域の土砂堆積に関する数値シミュレーション

前節で述べたような砂防ダム下流域の土砂堆積現象をより一般的に調べるには、2次元河床変動シミュレーションが有効であると考えられる。そこで、著者ら(1996)による河床変動モデルを前述の水路実験へ適用してみた。計算においては河床砂は一樣粒径とし、 $d=2.8\text{mm}$ としている。河床初期条件およびその他の諸条件は水路実験の条件を与えている。河床形状の時間変化に関する計算結果がFig. 5およびFig. 6に示されている。これを見るとダム下流の砂州の発生・非発生をほぼ再現できていることが分かる。ただし、砂州の発達速度等に実験値との差異が認められるので、これに関しては流砂量式等の見直しを図る必要があると思われる。

4. おわりに

本研究では、山地河川の侵食過程ならびに土砂流出を予測することを目的として、まず、砂防ダムが存在する場における河床変動を再現しうる一次元の数値シミュレーションモデルの開発を行った。また、砂防ダムによる土砂調節に伴い発生する、ダム下流部の顕著な土砂の堆積の問題に関して、水路実験と2次元河床変動シミュレーションによる検討を行った。本研究で得られた成果と今後の課題は以下のようである。

1. 非定常の1次元河床変動モデルに対して、砂防ダム等の影響を考慮するための簡単な方法を提案した。これは、砂防ダムの天端高さをひとつの固定された河床評価点として考えるものであり、ダム越砂量の評価にはダム直上部の河床高を仮想河床位として用いている。この方法により、水路実験の結果をある程度再現できることが判明した。
2. 上記の方法では、ダム上流の堆砂の進行速度が計算値の方が実験値よりも早くなることが分かった。これは平衡流砂量の式を用いていることなどによるものと考えられ、今後の改良を必要とする点である。
3. 砂防ダムによる土砂調節に伴い、ダム上流の堆砂勾配と下流の河床勾配とに大きな差があるような場合には、ダム下流域に顕著な土砂の堆積が生じること

が分かった。このような場合、流路は側岸方向へ大きくその向きを変え、水路側岸に衝突するような流れとなる。すなわち、ダム下流周辺の土地利用のあり方によっては、河岸侵食等の対策が必要になると思われる。あるいは、人為的に砂州を取り除くことが必要となることもあり得る。これは、メンテナンスフリーでは土砂の調節は期待できないということにつながるため、今後より一層の検討を行わねばならない。

4. 一樣砂礫床の水みちの幅に対して提案されている推定式を、混合砂礫床上的ものに適用してみたところ、 d_{90} を代表粒径として用いることにより、ある程度推定可能であることが判明した。

5. 2次元の河床変動数値シミュレーションを上記の水路実験に適用した結果、砂防ダム下流における土砂の堆積過程をある程度再現可能であることが判明した。ただし、1次元の計算と同様に、砂州の発達速度等に実験値との差異が認められ、これについては今後の改良が必要である。

謝 辞

最後に本研究の水路実験や数値シミュレーションに関して、京都大学防災研究所 中川 一助教授に種々ご助言いただいた。また、京都大学防災研究所 技官 吉田義則氏、同 水災害部門 土砂流出災害分野の学生 諸君には実験の遂行ならびに資料整理に関して協力を頂いた。ことに、間組の大藤康明氏(当時京都大学工学部4回生)にはあらゆる面で多大のご協力を頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 芦田和男・江頭進治・村岡猛・里深好文(1987): 砂防ダムの流出土砂調節機能に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号, B-2, pp. 421-439.
- 芦田和男・江頭進治・里深好文・後藤隆之(1990): 網状流路の流路変動と流砂量, 京都大学防災研究所年報, 第33号, B-2, pp. 241-260.
- 芦田和男・道上正規(1972): 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, 第206号, pp.59-69.
- 高橋保・里深好文・奥村裕史(1996): 山地河川の流路変動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第39号, B-2, pp. 321-332.
- 高橋保・澤田豊明・里深好文(1995): 山地河川における土砂流出の数値計算, 京都大学防災研究所年報, 第38号, B-2, pp. 447-453.

Study on Bed Erosion Process in Mountainous River

Tamotsu TAKAHASHI, Yoshifumi SATOFUKA and Hirofumi OKUMURA*

*** Graduate school of Engineering, Kyoto University**

Synopsis

In this paper, we propose a new one-dimensional simulation method to calculate the bed variation in upstream and downstream of sabo dams. The erosion process of a mountainous river can be predicted by this model using some rainfall runoff model in slope areas.

We indicate the peril of sand bar occurrence in downstream area of sabo dams when we perform sediment control using sabo dams. In such situation, the stream channel in downstream of dam runs into side bank, and sometimes makes scour hole. It is an important problem to solve, if we utilize the downstream area of sabo dam.

Keywords: Erosion Process; Mountainous River; Sand Deposition; Sediment Control by Sabo Dams