

分布型降雨土砂流出モデルを用いた 流域規模の土砂生産・移動特性に関する研究

A Study on Sediment Yield and Transport Properties at Basin Scale
Using a Distributed Rainfall and Sediment Runoff Model

小澤 和也¹・永谷 言²・水野 直弥³・高田 康史⁴・石田 裕哉⁵・寶 馨⁶

Kazuya OZAWA, Gen NAGATANI, Naoya MIZUNO, Yasufumi TAKATA, Hiroya ISHIDA, Kaoru TAKARA

¹正会員 修(工) (株)建設技術研究所 九州支社ダム部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

²正会員 修(工) (株)建設技術研究所 大阪本社河川部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

³非会員 学(理) (株)建設技術研究所 東北支社地圏環境室 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)

⁴正会員 博(工) (株)建設技術研究所 大阪本社ダム室 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

⁵正会員 修(工) (株)建設技術研究所 東京本社ダム部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

⁶フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The purpose of this study is to predict accurately sediment yield and transport by torrential rain, using a distributed rainfall and sediment runoff model. The authors construct an analytical model for dealing with sediment yield from slope failure to transport processes, and enable to estimate sediment runoff by torrential rain. However, being strongly dependent on the initial conditions of river sediments, the model needs to understand the dynamics of each sediment origin. This paper clarifies the basin-scale dynamics of sediment during torrential rains, by improving the model to be able to identify the grain size of sediment movement due to each of the slope failure and the initial conditions of river sediments.

Key Words : distributed rainfall and sediment runoff model, dynamics of sediment,
extreme flood event, slope failure process, sediment trace

1. はじめに

ダム貯水池は、継続的な堆砂対策を実施しない限り、運用の経過とともに土砂堆積が進行していく宿命にあり、貯水池機能(治水・利水機能)の低下が懸念されている。

特に近年では、地球温暖化に起因する局地的豪雨の発生が増加傾向にあると言われており、集中豪雨に起因する大規模洪水により、一洪水期間に計画堆砂容量の25%以上の土砂が堆積している事例も報告されている¹⁾。

このような豪雨による大規模土砂流入量を予測することは、貯水池機能が損失するといったリスクに対するマネジメントや、流域・ダムが一体となった水系砂防計画あるいはアセットマネジメントなどの観点からも重要な課題の一つである。

以上の背景のもと、近年、流域からの土砂流出過程を物理的に取り扱う解析モデルが開発されつつある(例えば、江頭ら^{2),3)}、佐山ら^{4),5),6)})。しかしながら、これらは河床堆積物を起源とする土砂移動現象のみを対象とし

ており、豪雨時の土砂流出に大きく影響すると考えられる斜面崩壊による土砂生産過程までは考慮されていない。

この点の改善を目的に、筆者らは、先の佐山らが開発した分布型土砂流出モデルを基本として、豪雨時の斜面崩壊過程(表層崩壊)を考慮可能な土砂流出モデルを開発し、矢作ダム流域における東海豪雨時の土砂流出現象の再現を試みた^{7),8)}。

この結果、豪雨時の斜面崩壊量および流出土砂量の推定が可能となったものの、水系全体の適正な土砂管理の実現の観点からは、発生源別の流出土砂量の把握(斜面崩壊起源土砂と河床堆積物起源土砂の区分化)や、非平衡性の強い山地河川における平衡流砂量式の適用限界に課題を残していた。

本研究では、上記の課題を解消するために、浮遊砂の非平衡性を考慮するとともに、初期の河道堆積を起源とする流出土砂と、斜面崩壊による土砂生産を起源とする流出土砂を粒径毎に識別可能なモデルを構築した。また、今回構築したモデルを用いて、豪雨時における流域規模の土砂動態の推定を試みた。

2. 既往検討モデルの概要

流出モデルは、児島ら⁹⁾が開発したセル分布型流出モデルを基本とする。このモデルに、下記の土砂流出モデル、斜面崩壊モデルを適用し、流域地形に即して上流側の斜面から下流側の斜面へと順次流出計算を行う。

(1) 降雨流出モデル

佐山らのモデルと同様に、立川ら¹⁰⁾によって開発された飽和・不飽和流れを考慮したモデルを使用する。

このモデルは不飽和流、飽和中間流、表面流の3種類の流れを考慮したモデルであり、その概念図は図-1のように表現できる。

流れの基礎式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) = f \cdot R(t) \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta & , (0 \leq h \leq d_c) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) & , (d_c < h \leq d_s) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m & , (d_s < h) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 h ：水深、 q ：単位幅流量、 $r(t)$ ：有効降雨強度、 f ：蒸発散や樹幹遮断等を考慮した流出係数、 $R(t)$ ：観測雨量、 v_c 、 v_a ：不飽和流、飽和流の平均流速である。

(2) 土砂流出モデル

a) 掃流砂の取り扱い

掃流砂量の算定式には芦田・道上の流砂量式¹¹⁾を採用した。なお、既往の観測実験結果¹²⁾によると、無次元掃流力の値が1.0の周辺で、流砂量が不連続に増加することから、掃流砂量の算定は、以下のように取り扱った。

($\tau_{*j} \leq 1.0$ の場合)

$$Q_{bj}(x_i) = 17B \sqrt{sgd_j^3} p_j \tau_{*j}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}} \right) \left(1 - \frac{u_{*cj}}{u_*} \right) \quad (3)$$

($\tau_{*j} > 1.0$ の場合)

$$Q_{bj}(x_i) = 17B \sqrt{sgd_j^3} p_j \tau_{*ej}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}} \right) \left(1 - \frac{u_{*cj}}{u_*} \right) \quad (3')$$

ここに、 $Q_{bj}(x_i)$ ：粒径別掃流砂量、 B ：川幅、 s ：土砂の水中比重、 g ：重力加速度、 d_j ：粒径、 p_j ：粒径 d_j の粒子の含有率、 u_* ：摩擦速度、 u_{*cj} ：粒径 d_j の粒子の限界摩擦速度、 τ_{*j} ：粒径 d_j の粒子の無次元掃流力、 τ_{*ej} ：粒径 d_j の粒子の有効無次元掃流力¹¹⁾、 τ_{*cj} ：粒径 d_j の粒子の無次元限界掃流力¹¹⁾である。

b) 浮遊流砂の取り扱い

浮遊砂量は平衡状態を仮定し、流出する粒径別浮遊砂量は以下の式を適用した。

$$Q_{sj}(x_i) = \int_a^h c(z) u(z) dz \quad (4)$$

ここに、 $Q_{sj}(x_i)$ ：粒径別浮遊砂量、 a ：基準面高さ、

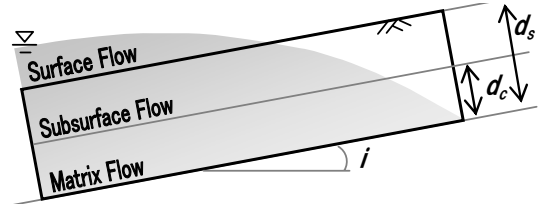


図-1 土層構造の概念図

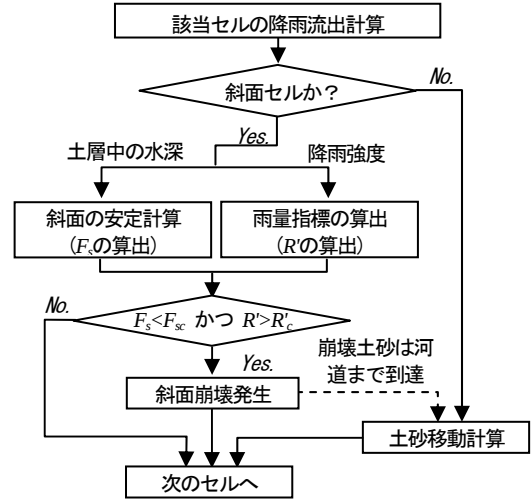


図-2 土砂生産モデルの斜面崩壊の判定フロー

z ：高さ、 $c(z)$ ：濃度分布、 $u(z)$ ：流速分布である。

なお、濃度分布はRouse式を、流速分布は対数分布則を、基準面濃度はGarcia and Parker¹³⁾の式を適用した。

c) 河床変動の計算方法

河床の連続式および堆積層内の粒度分布の基礎式は、以下に示すとおりである。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} (Q_{b_in} - Q_{b_out}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_{exj}}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)aBL} (Q_{bj_in} - Q_{bj_out}) + \frac{\partial Z_B}{\partial t} \frac{p_{*j}}{a} \quad (6)$$

$$P_{*j} = P_{exj} : \frac{\partial Z_b}{\partial t} > 0, \quad P_{*j} = P_{*0j} : \frac{\partial Z_b}{\partial t} \leq 0 \quad (7)$$

ここに、 Z_B ：河床高、 λ ：間隙率、 Q_b ：掃流砂量、 L ：セルの長さ、 p_{exj} ：交換層内の粒径 d_j の構成比率、 p_{*0j} ：交換層下方の粒径 d_j の構成比率、 a ：交換層厚である。添字 in, out はセルへの流入、流出を示す。

(3) 斜面崩壊モデル

既往検討⁸⁾においては、降雨時の斜面崩壊の危険度は、地形条件のみならず、それまでに降った降雨の総量と、降雨の強さ（降雨強度）に影響される。

このことを踏まえ、本モデルにおける崩壊発生条件としては、①地形条件（斜面の安全率）、②降雨条件（雨量指標）の2条件から斜面崩壊過程をモデル化している（図-2参照）。

なお、崩壊起源土砂は、崩壊セルの下流河道に全量堆積するように設定している。

3. 生産起源別の流入土砂追跡モデルの開発

本研究では、前述の既往検討モデルのうち、土砂流出モデルについて、浮遊砂の非平衡性を考慮するとともに、生産起源別の流出土砂量を推定可能なモデルへ改良を行った。

(1) 浮遊砂の非平衡性の導入

a) 非平衡浮遊砂量式

浮遊砂の輸送方程式は、水深平均浮遊砂濃度の輸送方程式より、以下のように設定した。

$$\frac{\partial c_{sj} h}{\partial t} = \frac{1}{BL} \left(\sum_{in} c_{sj} Q - \sum_{out} c_{sj} Q \right) + E_{sj} - D_{sj} \quad (8)$$

ここに、 c_{sj} ：水深平均濃度、 E_{sj} 、 D_{sj} ：浮遊砂の侵食率および堆積率である。本章中の添字 j は粒径別、添字無しは全粒径を示している。沈降速度 w_{sj} 、基準面濃度 c_{bej} 、底面濃度 c_{bj} を用いて以下のように示される。

$$E_{sj} = w_{sj} c_{bej}, \quad D_{sj} = w_{sj} c_{bj} \quad (9)$$

なお、沈降速度については、Rubeyの式を適用し、基準面濃度 c_{bej} は芦田・道上式¹²⁾を適用した。

また、浮遊砂の水深方向の濃度分布として指数分布を仮定することにより、水深平均濃度 c_{sj} と底面濃度 c_{bj} の関係は、下記のように示される。

$$c_{sj} = \frac{c_{bj}}{\beta} (1 - e^{-\beta}) \quad (10)$$

ここに、渦動粘性係数 $\beta = \kappa u_* h / 6$ 、 κ ：カルマン定数 (=0.4) である。

b) 河床変動の計算方法

河床変動過程については、(11)式の連続式に従い、堆積層内の粒度分布については、(12)式、(13)式に示す式を用いるものとした。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} \left(\sum_{in} Q_b - \sum_{out} Q_b \right) + D_s - E_s \quad (11)$$

$$\frac{\partial p_{exj}}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)aBL} \left(\sum_{in} Q_{bj} - \sum_{out} Q_{bj} \right) + \frac{(D_{sj} - E_{sj})}{a} + \frac{\partial Z_B}{\partial t} \frac{p_{*j}}{a} \quad (12)$$

$$P_{*j} = \begin{cases} P_{exj} : \frac{\partial Z_b}{\partial t} > 0, & \text{(河床上昇の場合)} \\ P_{*0j} : \frac{\partial Z_b}{\partial t} \leq 0, & \text{(河床低下の場合)} \end{cases} \quad (13)$$

(2) 生産起源別の流入土砂追跡モデルの開発

a) 概要

大規模洪水時には大量の土砂がダムや砂防施設等へ流入し堆積する。効率的な施設の配置計画・維持管理計画を検討する上では、流入する土砂の発生起源が河床堆積土砂か崩壊土砂かを把握し、水系全体での土砂管理計画

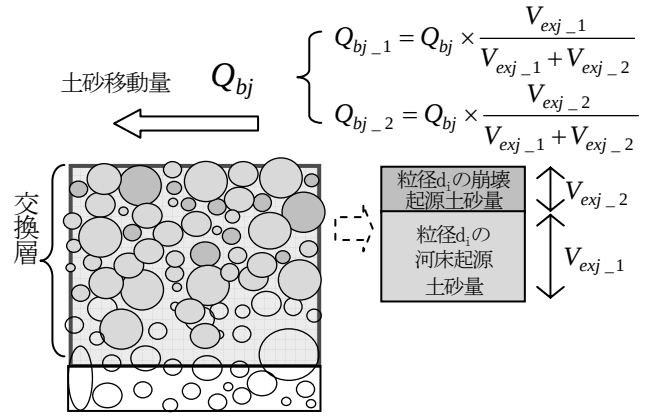


図-3 土砂移動量の概念図

へ反映させることが重要であると考えられる。

そこで、ある洪水イベント中に流出する土砂を①河床堆積物を起源とする土砂（以下、「河床起源土砂」と呼ぶ）と、②崩壊によって新たに生産された土砂（以下、「崩壊起源土砂」と呼ぶ）に区分し、上記①、②に対して個別に河床変動過程を追跡可能なモデルを構築した。

b) 発生起源別の土砂追跡方法

本モデルでは、①河床起源土砂と、②崩壊起源土砂の移動量（掃流砂量および浮遊砂の巻上げ・沈降量）は、各セルで粒径毎に全土砂移動量を計算した後、それぞれの土砂の構成比率を乗じて評価した（図-3参照）。

例えば、掃流砂の場合には下式のとおりに、河床起源土砂の掃流砂量 Q_{bj-1} 、崩壊起源土砂の掃流砂量 Q_{bj-2} は、粒径別の全土砂量を対象として算定した掃流砂量 Q_{bj} に対して、交換層内の存在率を乗じることにより表現した。

$$\begin{cases} Q_{bj-1} = Q_{bj} \times \frac{V_{exj-1}}{V_{exj-1} + V_{exj-2}} \\ Q_{bj-2} = Q_{bj} \times \frac{V_{exj-2}}{V_{exj-1} + V_{exj-2}} \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 V_{exj-1} 、 V_{exj-2} ：それぞれ、交換層内の河床起源土砂、崩壊起源土砂の存在率に交換層の体積を乗じて得られる体積を示す。

浮遊砂の侵食率は掃流砂の場合と同様に、粒径 d_j の河床起源土砂の浮遊砂の侵食率 E_{sj-1} 、崩壊起源土砂の浮遊砂の侵食率 E_{sj-2} は、粒径別の全土砂量を対象として算定した侵食率 E_{sj} に対して、その河床材料中の存在率を乗じた値で評価するものとした。

$$\begin{cases} E_{sj-1} = E_{sj} \times \frac{V_{exj-1}}{V_{exj-1} + V_{exj-2}} \\ E_{sj-2} = E_{sj} \times \frac{V_{exj-2}}{V_{exj-1} + V_{exj-2}} \end{cases} \quad (15)$$

また、浮遊砂の堆積率は、①河床起源土砂、②崩壊起源土砂それぞれの平均濃度をもとに (9)、(10) 式より算出した。浮遊砂の輸送過程は、上記に示す方法で算出した堆積率、侵食率を用いて、それぞれ、浮遊砂の輸送方程式である (8) 式を適用することで求めた。

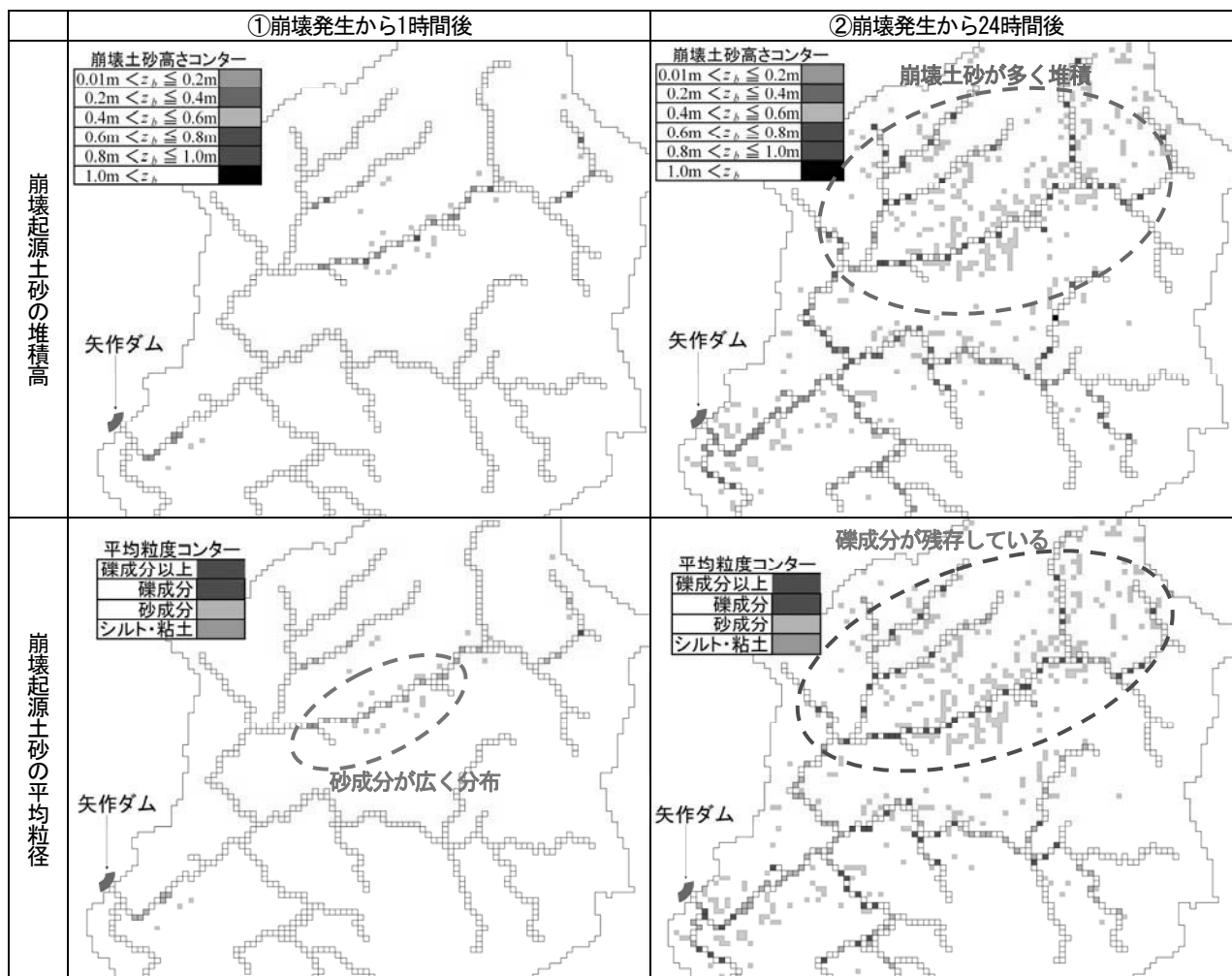


図-4 時点別の崩壊起源土砂の分布状態 (□：河道セル，■：斜面崩壊セル)

4. 矢作ダム流域への適用

今回開発したモデルを矢作ダム流域に適用し、東海豪雨（2000年9月）時の崩壊起源土砂の動態を推定した。

(1) 計算条件の設定

a) 粒度分布

河床部の粒度は、ダム建設（昭和45年）からの経過年数が少なく河床の粒度と同程度と想定される昭和54年の貯水池内ボーリング結果を、崩壊土砂の粒度は、年数がある程度経過し、崩壊土砂の影響を受けていると想定される平成10年度の貯水池内ボーリング結果を用いてモデル化した（表-1参照）。

b) 初期河床高

本検討では、東海豪雨時の崩壊起源土砂の動態把握を目標として、以下に示す方法で、ダムの流入土砂量が実績値と同程度となる状態を初期河床と設定した。

- ①河道全域に一律2.0mの堆積土層厚を与える。
- ②上記の河道に対して、中小出水を複数回計算する。
- ③ ②が終了した時点での河床状態に対して、東海豪雨の再現計算を実施し、ダムの流入土砂が実績値と同程度となる状態を初期河床と設定した。

表-1 モデル化した粒径と構成比率

分類	粒径範囲(mm)	崩壊土砂粒度	河道部粒度
粘土	～ 0.005	0.025	0.025
シルト	0.005 ～ 0.075	0.110	0.075
細砂	0.075 ～ 0.25	0.270	0.105
中砂	0.25 ～ 0.85	0.330	0.240
粗砂	0.85 ～ 2	0.170	0.295
細礫	2 ～ 4.75	0.045	0.160
中礫	4.75 ～ 19	0.030	0.074
粗礫	19 ～ 75	0.015	0.025
粗石	75 ～ 300	0.006	0.001
巨石	300 ～ 1000	0.001	0.001

c) 降雨流出パラメータ

降雨流出に関わる諸定数については、既往検討⁹⁾において同定した値を用いた。

以上の条件のもと、東海豪雨時の崩壊起源土砂の土砂動態について試算を行った。

(3) 崩壊起源土砂の移動過程の試算結果

東海豪雨時における、崩壊起源土砂の河道堆積高および平均粒径について、崩壊発生から1時間後と24時間後の状態を図化したものを図-4に示す。

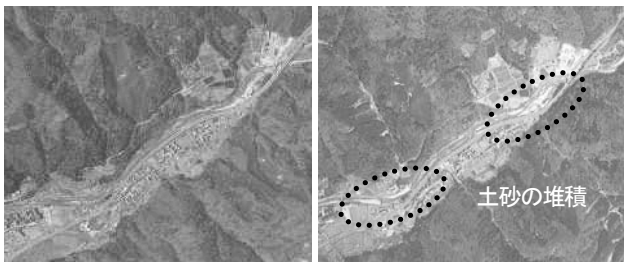


図-5 空中写真による検証 (左：平成12年，右：平成13年)

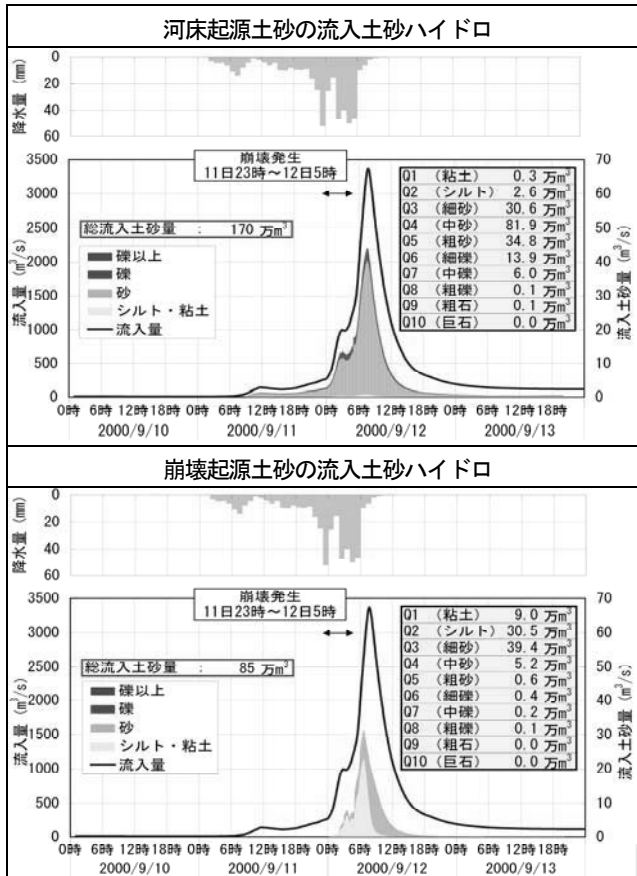


図-8 東海豪雨時の矢作ダムの流入土砂ハイドロ計算結果
(上段：河床起源土砂，下段：崩壊生産土砂)

a) 崩壊起源土砂の堆積高

崩壊起源土砂の堆積は、崩壊が多数発生している流域上流部において、多く堆積している状況が確認出来る。

なお、時間の経過とともに、崩壊起源土砂の影響範囲は下流へ拡大するが、崩壊発生から約1日以降は、崩壊起源土砂の堆積高に大きな変化は無く、河道内に残存していると推定される。また、河道内に崩壊起源土砂の残存が認められる箇所では、東海豪雨前後の平成12年、13年撮影の空中写真 (図-5) から土砂の堆積を確認しており、当該モデルは概ね妥当であると評価している。

b) 崩壊起源土砂の平均粒径

河道内に残存している崩壊起源土砂の平均粒径は、崩壊発生直後では砂成分が広く分布しているが、崩壊発生から1日後には、概ね礫成分であり比較的大きい粒径が主体となっている。そのため、残留土砂から細粒分が流出していることが想定される。

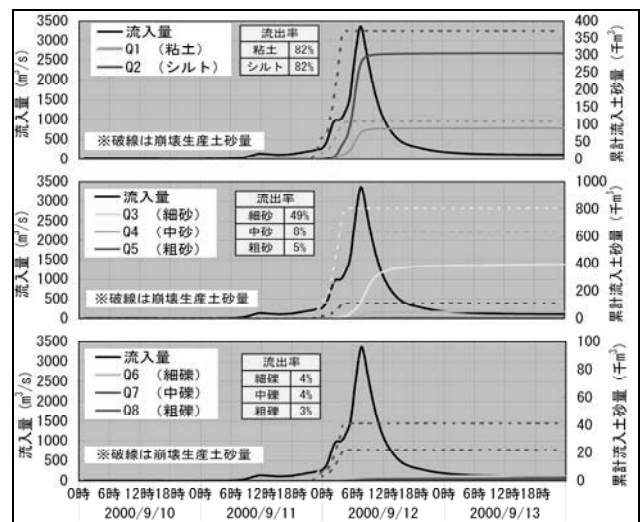


図-7 崩壊による生産土砂量と流入土砂量 (累計)



図-6 東海豪雨時の土砂収支試算結果

(2) 流入土砂量の試算結果

a) 流入土砂ハイドロ

東海豪雨時の生産起源別流入土砂ハイドロ (①河床起源土砂：上段，②崩壊起源土砂：下段) を図-8に示す。

東海豪雨時の崩壊起源土砂のうち、ダムに流入する成分のほとんどは粘土～細砂の浮遊砂成分であり、それ以外の粗粒成分はほとんど流入しておらず、大部分が河道に残存している事を示している。また、図-7に崩壊による粒径別の生産土砂量と流入土砂量の累計を示すが、これより、崩壊起源土砂に含まれるシルト・粘土、そのほぼ全量が流入するのに加え、洪水の早い段階で崩壊起源土砂の影響が現れ始めていることが確認できる。

一方で、砂以上については、発生量に対する流入量の比率は小さく、その傾向は粒径が大きくなるほど顕著になっている。

b) 土砂収支

図-6に、今回試算した東海豪雨時の土砂収支結果を示すが、崩壊による生産土砂量は約215万m³、ダム貯水池への流入土砂量は約85万m³である。したがって、本モデルによれば、崩壊起源土砂の約半分がダムへ流入し、残りの半分が河道内に残留したと推定される。

(3) 崩壊起源土砂の土砂動態

崩壊起源土砂の移動過程および流入土砂ハイドロより、崩壊起源土砂は一旦河床に堆積した後、細粒分は河床から抜け出し、速やかに流下する。一方、粗粒分は時間の経過とともに下流に伝播していくが、その大部分は一洪水の中ではダムまで到達せずに、河道内に残留しているものと推察される。

5. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、豪雨時の土砂生産過程として斜面の表層崩壊を組み込んだ分布型の土砂流出モデルを改良し、河床起源土砂と崩壊起源土砂、それぞれ生産起源の異なる土砂を粒径別に追跡可能なモデルを構築した。

本モデルを用いて、矢作ダム流域を対象に、斜面崩壊が多数発生した東海豪雨時の土砂動態を試算した結果、東海豪雨においては崩壊起源土砂のうち約半分が洪水時にダムに流入し、それ以外は河道に残存することが示唆された。

また、崩壊起源土砂のうち、ダム貯水池への流入成分の大半は細粒成分で、河道に残存している土砂の大半は粗粒分であることを示した。

以上より、矢作ダム流域には、東海豪雨時に生産された土砂の約半分が河道内に残存しており、次の大規模洪水発生時には大量の土砂が貯水池内に流入する可能性があることが予測された。

このように、短期的な洪水イベントのみならず、流域の河道内に残存している土砂量を適性に評価することにより、水系全体の適正な土砂管理が実現するものと考えられる。

(2) 今後の課題および展望

本モデルは、河床起源土砂と崩壊起源土砂それぞれを追跡可能なモデルであるが、河道内堆積土砂量の初期条件については、計算流出土砂量とダムの実績堆砂量となるように設定している。当条件の設定については、本モデルを用いて精度良く土砂動態を推定する上で、非常に重要な要素となるが、現段階では十分な検証が済んでおらず、初期の河道内堆積土砂の設定方法に課題を残している。

また、斜面崩壊により生産された土砂は直ちに河道へ到達するように仮定しており、崩壊起源土砂の河道への輸送過程・機構（一つ一つの斜面内の詳細な土砂移動過程）の取扱いについても今後の課題としたい。

以上のような課題があるものの、本モデルは、流域規模での生産起源別の土砂動態の把握や、豪雨時の斜面崩壊による大規模土砂流入現象の推定が可能であり、これは、短期的に貯水機能が損失するといった現象に対するリスクマネジメントや、流域・ダムが一体となったアセットマネジメント計画の立案、効果的な防災施策の立案に向けた有効なツールとなる可能性があると考えられる。

今後は、さらなる精度向上に向け、計算初期の河道内堆積土砂の合理的な設定方法の確立や、斜面崩壊モデルで生産された土砂の河道への流出機構を考慮するとともに、モデルの汎用性検証の観点から、規模の異なる出水

や長期間の流況を対象とした検証、さらには、流域の構成地質が異なる他流域を対象とした検証を実施していくものである。

謝辞：本研究で用いたダム流入量データおよび堆砂量データは国土交通省中部地方整備局矢作ダム管理所より提供されたものである。ここに記して、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (財)ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート, pp.23-25, 2008
- 2) 江頭進治・松木 敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740, 2000.
- 3) 木戸研太郎, 松川知三, 吉栖雅人, 西本直史, 江頭進治：高時川流砂系における丹生ダムの影響, 河川技術論文集, 第11巻, pp.279-284, 2005.
- 4) 佐山敬洋・寶 馨：斜面侵食を対象とする分布型土砂流出モデル, 土木学会論文集, No.726, II-62, 2003.
- 5) 中川 一・里深好文・大石 哲・武藤裕則・佐山敬洋・寶馨・シャルマ ラジハリ：ブランタス川の支川レスティ川流域における降雨・土砂流出に関する研究, 京都大学防災研年報, 第50号, B, pp.623-635, 2007.
- 6) APIP, Takahiro SAYAMA, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA : Lumping of a physically-based distributed model for sediment runoff prediction in a catchment scale, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, vol.52, pp.43-48, 2008.
- 7) 永谷 言・高田康史・寶 馨・佐山敬洋：分布型降雨流出モデルを用いた貯水池土砂流入予測に関する研究, 第4回土砂災害に関するシンポジウム, pp.173-178, 2008.
- 8) 永谷 言・高田康史・小澤和也・寶 馨・佐山敬洋：豪雨時の斜面崩壊過程を考慮した分布型降雨土砂流出モデルに関する研究, 河川技術論文集, 第15巻, pp.429-434, 2009.
- 9) 児島利治・寶 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスター型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響, 水工学論文集, 第42巻, pp.157-162, 1998.
- 10) 立川康人・永谷 言・寶 馨：飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp.7-12, 2004.
- 11) 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, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 12) 国土技術政策総合研究所：土砂管理施設のためのキーノート, 国土技術政策総合研究所資料, 2005.
- 13) Garcia, M. H. and Parker, G. : Entrainment of bed sediment into suspension, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.114, No.4, pp.414-435, 1991.

(2011. 5. 19受付)