

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

A Distributed Rainfall and Sediment Runoff Model Considering
Slope Failure Processes During a Large-Scale Flood Event

永谷 言¹・高田 康史²・小澤 和也³・寶 馨⁴・佐山 敬洋⁵

Gen NAGATANI, Yasufumi TAKATA, Kazuya OZAWA, Kaoru TAKARA and Takahiro SAYAMA

¹正会員 工修 株式会社 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)

²正会員 博(工) 株式会社 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)

³正会員 工修 株式会社 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)

⁴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)

⁵正会員 博(工) 京都大学防災研究所助教 社会防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The objective of this research is to improve the accuracy of a distributed rainfall and sediment runoff model for better reservoir sediment management. This paper describes an advanced distributed-parameter rainfall and sediment runoff model, which considers sediment materials with mixed grain sizes in riverbeds and slope-failure processes on hill slopes. Applied to the Tokai severe storm event in September 2000, the model constructed here shows very good prediction results of slope failures at 382 grid-cells and yielded sediment of 1,528,000 m³, which is in good agreement with the observed slope failures at 405 locations and sediment of 1,620,000 m³ in the Yahagi Dam catchment (504.5 km²) in Chubu, Japan, during the event.

Key Words : distributed sediment runoff model, mixed grain size, slope failure process,
large-scale flood event, Yahagi Dam catchment

1. はじめに

現在、我が国では、戦後多数設置されたダム貯水池を中心に、年数の経過とともに土砂堆積が進行し、貯水池機能(治水・利水機能)の低下が懸念される状況にある。

特に、我が国を含むアジアモンスーン地域では、堆砂進行による長期的かつ経年的な貯水池機能低下のみならず、集中豪雨に起因する大規模洪水により、1洪水期間に貯水池機能を著しく低下させるような急激な堆砂進行が発生することが問題となる。そのため、今後のダム貯水池管理においては、リスクマネジメントのみならずアセットマネジメントの観点からも、精度良く、かつ短期的な土砂流出現象についても推定が可能となる流入土砂用量の予測手法の確立が望まれる。

このような背景の下、従来からダム貯水池への流入土砂量の予測方法としては様々な手法が考案されており、現在では、地形・地質条件が類似した近傍ダムにおける平均年間堆砂量データを参考に、確率処理等により長期的かつ平均的な堆砂量として推定する手法が一般的であ

る。しかし当手法は、洪水時の流入土砂ハイドロは言うに及ばず、短期間に貯水池内に流入する土砂の量と質についても、把握できないなどの課題を有している。

一方、近年では、流域からの土砂流出過程を物理的に取り扱った解析モデルが開発されつつある。たとえば、江頭ら¹⁾は、単位河道の概念を導入し、粒径別に河道貯留土砂の流出現象を表現するモデルを提案している。佐山ら²⁾³⁾⁴⁾は、流域内の空間分布情報を取り扱い、任意の地点で水の挙動を把握することが可能である分布型洪水流出モデルに、土砂生産・流出過程を組み込んだモデルを提案している。また、筆者ら⁵⁾はインドネシアでの流域のみで適用されていた佐山らのモデルを日本国内の矢作ダム流域に適用し、このような物理的な解析モデルを用いて大規模出水時における貯水池内への土砂流入量を予測することの有効性を示している。

しかしながら、これらの解析モデルにおいても、豪雨時の大規模土砂流入量を推定する上で、非常に大きな影響を与えると考えられる、崩壊土砂の生産・移動過程までは取り扱えていない。

本研究では、佐山らが提案する「分布型降雨土砂流出

モデル」を基本として、豪雨時の斜面崩壊過程を考慮した土砂流出モデルを開発するとともに、矢作ダム流域への適用により開発モデルの有効性を検証した。

2. 分布型降雨土砂流出モデルの改良

流出モデルは、児島ら⁶⁾が開発したセル分布型流出モデルを基本とする。このモデルは、国土地理院刊行の数値地図50mメッシュ（標高）データをもとに、最急勾配方向に雨水が流れると考える落水線図を作成し、流域を落水線（矩形斜面）の集合体として表現する。その後、各矩形斜面に下記に述べる降雨流出モデル、土砂流出モデルを適用し、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ものである。

(1) 降雨流出モデル

降雨流出モデルとしては、立川ら⁷⁾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。このモデルはマトリックス部を流れる不飽和流、大空隙部を流れる飽和中間流、地表部を流れる表面流の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。流れの連続式および運動方程式はそれぞれ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による欠損を考慮するために導入した流出係数、 $R(t)$ ：観測雨量、 v_c, v_a ：それぞれマトリックス部（不飽和流）および大空隙部（飽和流）での平均流速であり、それぞれ以下のように表せる。

$$v_c = k_c i, \quad v_a = k_a i \quad (3)$$

ここに、 k_c, k_a ：それぞれマトリックス部の飽和透水係数および大空隙での飽和透水係数、 i ：斜面勾配である。さらに、(2)式において、 d_c, d_a ：それぞれマトリックス部の層厚および大空隙に相当する層厚、 $\alpha = \sqrt{i/n}$ 、 n ：粗度係数、 $\beta = k_a/k_c$ 、 m ：定数、 t ：時間、 x ：距離である。

(2) 混合粒径を対象とした土砂流出モデル

本モデルのように水の流れにより土砂輸送を予測するモデルにおいて、ダム貯水池への流入土砂量を精度良く予測するためには、混合粒径を対象とすることがある。また、一般的に、ダム流入土砂は、流入量が同一であっても、流出経路上の土砂の堆積状況により、その量と質

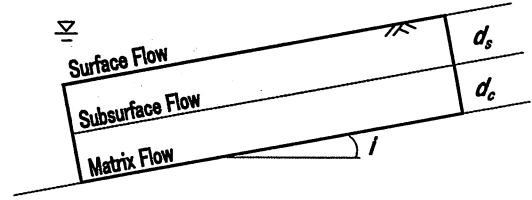


図-1 土層構造の概念図

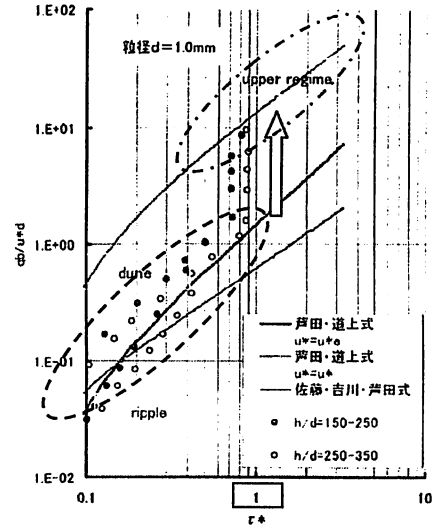


図-2 無次元掃流力と流砂量の関係⁸⁾

は異なるといわれており、河道内土砂の堆積履歴を考慮することが有効であると考えられる。

以上をふまえ、本研究では、単一粒径のみを取り扱っていた佐山らのモデル（以降「従来モデル」と称す）に、混合粒径および河道内土砂堆積・侵食現象の機構を取り込む改良を行った。

a) 流砂量式

掃流砂量の算定式には芦田・道上の流砂量式を採用した。なお、既往の流砂量の観測実験結果⁸⁾によると、無次元掃流力の変化に伴い流砂量が不連続に増加することが報告されている（図-2参照）。そこで、大規模出水時を対象としている本モデルでの掃流砂量の算定は、掃流力1.0を閾値として、(4)式に示す関係を使用した。

また、平均粒径 d_m の無次元限界掃流力 τ_{*cm} 、摩擦速度 u_{*cm} は岩垣式を用いるものとした。

$$Q_{bj}(x_i) = \begin{cases} 17B\sqrt{sgd_j^3} p_j \tau_{*cj}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}}\right) \left(1 - \frac{u_{*cj}}{u_{*j}}\right), & (\tau_{*j} \leq 1.0) \\ 17B\sqrt{sgd_j^3} p_j \tau_{*cj}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*cj}}{\tau_{*j}}\right) \left(1 - \frac{u_{*cj}}{u_{*j}}\right), & (\tau_{*j} > 1.0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_{*j} = u_{*j}^2 / sgd_j, \quad \tau_{*cj} = u_{*cj}^2 / sgd_j$$

$$\tau_{*cj} = u_{*cj}^2 / sgd_j, \quad u_{*j} = \sqrt{gRI}$$

$$u_{*cj} = v \left(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{d(1 + 2\tau_{*j})} \right)$$

ここに、 $Q_b(x_i)$ ：セルから流出する粒径別掃流砂量， s ：土砂の水中における比重， g ：重力加速度， d_f ：粒径， p_f ：粒径 d_f の粒子の含有率， u_* ：摩擦速度， u_{*c} ， u_{*y} ：それぞれ粒径 d_f の粒子の限界摩擦速度，有効無次元摩擦速度， τ_{*f} ， τ_{*y} ：それぞれ粒径 d_f の粒子の無次元掃流力，有効無次元掃流力， τ_{*y} ：粒径 d_f の粒子の無次元限界掃流力， R ：径深（＝表面流の水深）である。

浮遊砂量については，平衡浮遊砂量式を適用する．セルから流出する粒径別浮遊砂量 $Q_y(x_i)$ は，フラックスの水深方向積分値として，次式のように書き表される．

$$Q_y = \int_a^h C(z)u(z)dz \quad (5)$$

ここに， $Q_y(x_i)$ ：セルから流出する粒径別浮遊砂量， a ：河床から浮遊砂濃度の基準面までの高さ（ $a=0.05h$ ）， z ：河床からの距離， $C(z)$ ： z における浮遊砂濃度， $u(z)$ ： z における流速である．

なお，式中の濃度分布 $C(z)$ についてはRouseの濃度分布式を適用し，基準面濃度式としては，Garcia and Parkerの式に従うものとした．

ただし，実際の自然現象で解析対象とする流れ場が平衡状態にあることは稀であり，そのまま平衡浮遊砂量式を用いた場合には，浮遊砂量を過大に評価することになる．そのため，本研究では，平衡浮遊砂量式から算出された浮遊砂量に一定の低減率を乗じたものを，解析上の浮遊砂量として取り扱うものとした．

b) 河床変動過程のモデル化

従来モデルでは，土砂の移動過程はセル内の土砂収支のみを取り扱っており，河道内土砂の移動が生じた場合においても，堆積土砂厚や河床勾配は一定として，取り扱っている．これに対し，本研究では，土砂流出モデルに，以下の河床変動過程の組み込みを行った．

まず，土砂の移動に伴う堆積土砂厚の変化については，下記の連続式に従うものとした．

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)BL} (Q_{B_in} - Q_{B_out}) \quad (6)$$

ここに， Z_b ：セルの河床位， λ ：河道堆積物の間隙率， Q_{B_in} ：セルへの流入掃流砂量， Q_{B_out} ：セルからの流出掃流砂量である．

堆積層内の粒度分布については，平野の式を適用した．ここで，河床勾配を一定として土砂移動を計算した場合，勾配の緩いセルでは常に土砂が堆積し，勾配が急なセルでは常に土砂が侵食されるという問題が生じることが想定される．そこで，本研究では図-3に示すとおり，土砂の堆積・侵食に応じ，堆積厚増加時には河道勾配増加，堆積厚減少時には河道勾配が減少するよう，河道勾配を逐次変化させるものとした．

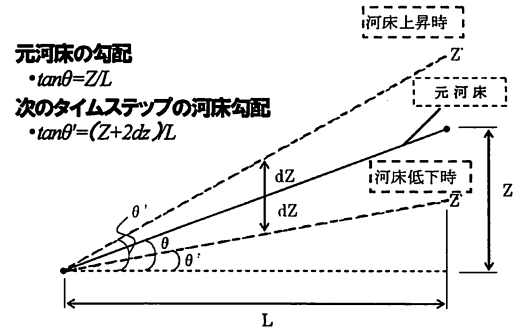


図-3 河床勾配計算方法の概念図

3. 斜面崩壊による土砂生産過程のモデル化

大規模洪水時の生産土砂量は，斜面崩壊の発生の有無に大きく影響を受けるものと考えられ，大規模土砂流入現象を取り扱う上で，土砂流出モデルに斜面崩壊過程を組み込むことは非常に重要となる．そこで，本研究では土砂生産過程として，斜面崩壊による土砂生産機構のモデル化を行い，前章で述べた土砂流出モデルに組み込むことにより，斜面崩壊過程も考慮した新たな土砂流出モデルを構築した．

(1) 崩壊発生条件

a) 斜面の安全率 (F_s)

斜面の安定計算式としては，次式に示す無限長斜面式を用い，安全率 (F_s) < 1.0 の場合に崩壊が発生すると判定することを基本とした．

$$F_s = \frac{C + (w - u) \tan \varphi}{w \sin S} \quad (7)$$

$$w = \rho \times c \times D$$

$$u = \rho_w \times h_w \quad (h_w \leq D)$$

ここに， S ：斜面勾配， F_s ：安全率， w ：土塊の自重， C ：土の粘着力， φ ：土の内部摩擦角， u ：間隙水圧， ρ ：土粒子の密度， c ：土粒子の容積濃度， D ：土塊の厚さ， ρ_w ：水の密度， h_w ：降雨流出計算過程で算出される中間流の水深である．

b) 降雨条件 (R')

一般的に，斜面の崩壊発生条件として先行降雨の影響を考慮すべきと考えられている．このため，本検討における崩壊発生条件としては，前述の無限長斜面式の安全率 (F_s) による判定に加え，下記の雨量指標 (R') を用いるものとし， $F_s < 1.0$ ，かつ R' が斜面崩壊の判断基準 R'_c を上回った場合 ($R' > R'_c$) に崩壊が発生するものとする．

$$R' = R_{jw0} - R_{jw} \quad (8)$$

$$R_{jw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2 (r_1 - r_w)^2}$$

$$R_w = \sum \alpha \times R, \quad \alpha = 0.5^{t/T}$$

$$r_w = \sum \alpha \times r, \quad \beta = 0.5^{t/T}$$

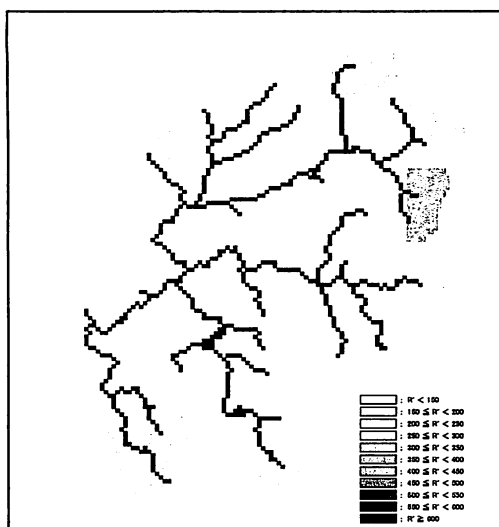


図-4 平成11年洪水における最大 R' の空間分布

ここに、 R_w ：長期実効雨量， r_w ：短期実効雨量， R_1 (=450mm)， r_1 (=150mm)， a ：重み係数 (=5)， R_{fwo} ：原点 (0mm)， α ， β ：減少係数， t ：発生降雨前の時間数， T ：半減期 (72時間，1.5時間)。

なお， R_1 ， r_1 ，および a の値については，既往の広島災害 (1999) での調査事例⁹⁾を参考に設定した。

(2) 土砂流出モデルへの反映

時々刻々変化する中間流の水深および雨量指標 R' をもとに，セル毎に斜面の崩壊条件を判定する。崩壊すると判定された場合の崩壊土砂は，流域モデルの落水線方向に従い全量河道部まで流下して河道内に堆積すると考え，堆積土砂厚の増加分として取り扱うことにより，土砂流出計算過程に取り込むものとした。なお，斜面からの崩壊 (流出) 土砂量は，発生した崩壊地の面積と崩壊土砂の厚さの積によって算定した。

4. 検討対象流域および検討条件

(1) 検討対象流域

本研究では，従来モデルでの検討⁵⁾と同様に国土交通省中部地方整備局管内の矢作ダム流域 (流域面積 504.5km²) を対象とし，降雨土砂流出計算を実施することにより，改良モデルの有効性を検証する。

(2) 検討条件

a) 検証対象洪水

本モデルの有効性検証の対象とする洪水は，未曾有の大豪雨であり，大規模な土砂流入のあった東海豪雨 (1洪水で約 280 万 m³ が堆積) とした。雨量データとしては，レーダー・アメダス解析雨量，流量データとしては矢作ダムの実測流入量を用いた。

また，降雨流出計算のモデルパラメータは，従来モデルでの検討⁵⁾と同じ値を使用する。

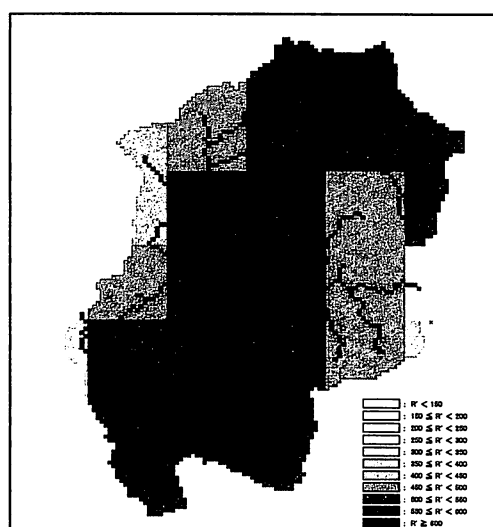


図-5 東海豪雨における最大 R' の空間分布

b) 流域のモデル化

本研究で用いる流域モデルは，従来モデルでの検討と同様に，空間分解能を250mとしたモデルを使用する。

5. 斜面崩壊条件の設定

本研究で構築した斜面崩壊モデルを用いて，流域の斜面崩壊特性を表現するには，①雨量指標の判定基準 (R'_c)，②斜面の土質定数の2種類の斜面崩壊条件を流域の特性に応じて，適切に設定する必要がある。本研究においては，以下の手法で矢作ダム流域における斜面崩壊条件を設定した。

(1) 基本方針

矢作ダムでは，東海豪雨 (平成 12 年度) において，約 280 万 m³ の土砂が貯水池に堆積しており，一方，それ以前の平成元年から平成 11 年までの期間については，年間に平均約 5 万 m³ 程度しか貯水池に堆積していない。これは，平成元年から平成 11 年までに数回発生しているピーク流量 1,000m³～1,500m³ 程度の出水では斜面崩壊に起因するような流域からの土砂生産がほとんどなく，未曾有の大出水 (ピーク流量約 3,200m³) であった東海豪雨においては，堆積土砂量に匹敵する土砂が斜面崩壊により生産されたことによるものと考えられる。

以上より，本研究では，矢作ダム流域における斜面崩壊特性として，東海豪雨での実績崩壊地分布，堆積土砂量，および東海豪雨前年出水 (平成 11 年出水) における実績の堆積土砂量と出水規模の関係から推測される出水規模の違いによる斜面崩壊の発生傾向について着目して，矢作ダム流域における斜面崩壊の再現計算を実施し，矢作ダム流域の斜面崩壊特性を適切に表現可能な斜面崩壊条件を設定した。

(2) 雨量指標の判断基準 (R'_c) の設定

平成 11 年出水 (中規模出水) および東海豪雨について，最大 R' を整理した結果を図-4，図-5 に示す。これ

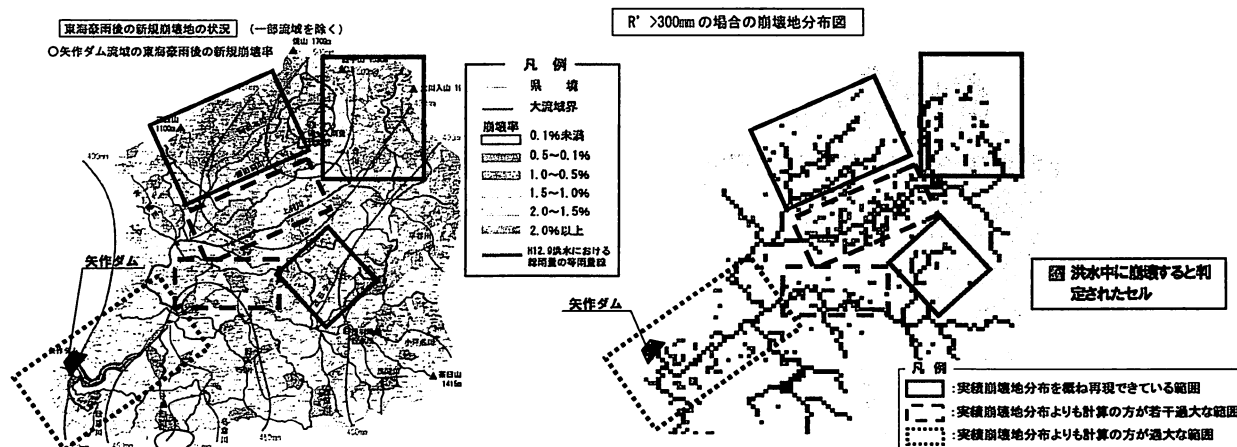


図-6 崩壊地分布の比較（左：実績調査結果¹⁰⁾，右：計算結果）

表-1 矢作ダム流域の東海豪雨前後の崩壊地面積

崩壊地	流域面積	崩壊箇所数	災害後 (H12.9)		
			①新規崩壊地	②継続崩壊地	①+②
面積 (㎡)	504, 500, 000	645, 000	848, 500	159, 950	1, 008, 450
面積率 (%)	—	0.125	0.165	0.031	0.196
箇所数	—	309	405	69	474
平均崩壊地面積 (㎡)	—	2, 087	2, 095	2, 318	2, 128

表-2 斜面崩壊計算結果

対象洪水	崩壊箇所数	崩壊土砂※ (㎡)
H11洪水(計算結果)	28セル	112, 000
東海豪雨(計算結果)	382セル	1, 528, 000
東海豪雨(実績)	405箇所	1, 620, 000

※ 1箇所(セル)あたりの崩壊土砂の層厚2.0m, 崩壊面積2, 000㎡として算出

より、斜面崩壊がほとんど発生しなかったと想定されるH11年出水においては、流域の大部分で最大 R' は200mm～300mmの間の値を示し、大規模な斜面崩壊が発生した東海豪雨においては、流域の大部分で最大 R' は400mm～600mmの間である。以上より、各出水における斜面崩壊発生特性から、本研究においては矢作ダム流域の雨量指標の判断基準(R'_c)を300mmと設定した。なお、広島災害(1999)についての検討結果⁹⁾では、まさ土を対象とする場合の R'_c は200mm～250mm程度とされており、矢作ダム流域に適用する場合は、これより若干大きめの値となっている。

(3) 土質定数の設定

既往資料¹⁰⁾より東海豪雨により発生した新規崩壊地面積と箇所数を整理した結果を表-1に示す。新規崩壊箇所数は405箇所であり、また、その分布は図-6に示すとおりである。これらの東海豪雨での崩壊地発生実績をもとに、先で設定した $R'_c=300$ mmとした場合について、斜面崩壊の再現計算を実施し、土質定数を設定した。このとき、崩壊土砂の層厚を2.0m、土粒子の密度は一般的な値である、 $\rho=2.65\text{g/cm}^3$ 、空隙率は降雨流出計算で使用している30%で固定した上で、崩壊土砂の粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を試行錯誤的に同定した。その結果、粘

着力 $c=5\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ とすることにより、表-2、図-6に示すような崩壊地数、崩壊土砂量および崩壊地分布となった。同図より、崩壊地の分布については、東海豪雨における実績新規崩壊地分布と比較すると、部分的に崩壊地分布が過大となる範囲が見受けられるものの、崩壊地発生数および崩壊地分布は概ね傾向は再現できている。

6. 土砂流出計算

(1) 計算条件

a) 生産土砂量

本研究においては、洪水時の流域からの土砂生産は斜面崩壊によるものが卓越するものと想定し、斜面崩壊による土砂生産のみを対象とする。

b) 河道堆積物の初期条件

本モデルは河道内土砂堆積の履歴を考慮できるモデルであることから、河道堆積物の初期条件は計算結果に影響を与える。しかしながら、現時点では、河道内堆積物の初期条件を決定論的に設定することが困難なため、下記の方法で初期条件を設定した。

①河道全域に一律2.0mの堆積土層厚を与える。②上記の河道を初期河道とし、中小規模の出水である平成11年出水を複数回計算する(本研究では2回とした)。③計算が終了した時点での堆積土の分布を初期河道として、再現計算を実施する。

c) 堆積土砂の粒度分布

計算に用いる粒度分布は、昭和54年、平成10年に実施されている貯水池内ボーリング調査結果を基に、粒度分布を10区分にモデル化して使用した。

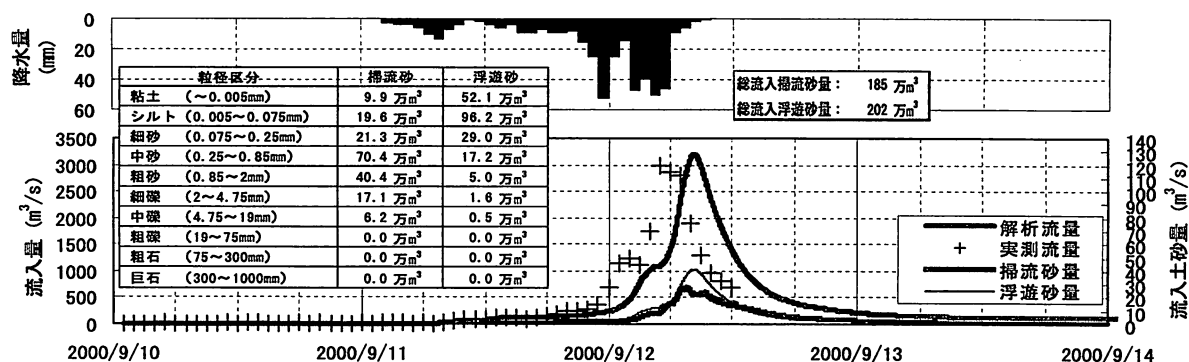


図-7 再現計算結果 (平成12年：東海豪雨)

(2) 土砂流出計算結果

東海豪雨を対象として、土砂流出計算を実施した結果を図-7に示す。これより、東海豪雨における総流入掃流砂は約185万m³、総流入浮遊砂量 (平衡浮遊砂量式からの低減率=0.2) は約202万m³と算出される。掃流砂と浮遊砂の矢作ダムでの捕捉率をそれぞれ100%、50%と仮定すると、総堆砂量は約286万m³となり、東海豪雨における実績約280万m³と合致する結果となった。また、土砂流出計算における $Q \sim Q_s$ 関係を図-8に示す。同図より、流入水量増加時と減少時にはその形状が異なり、流入水量と流出土砂量の関係が必ずしも線形ではない。これは、洪水初期の流量増加時には初期河道に堆積していた土砂が多く流出し、流量減少時には、降雨のピークから流量のピーク生起時刻付近で発生した斜面崩壊による土砂が流出したことを表しているものと考えられる。

7. おわりに

本研究では、従来の単一粒径のみを取り扱っていた分布型土砂流出モデルに、混合粒径および河道内土砂堆積・侵食現象の機構を取り込む改良を行い、さらに土砂生産過程として斜面崩壊過程を組み込んだモデルを構築した。当モデルを用いて、矢作ダム流域における東海豪雨時の再現計算を行った結果、「洪水初期の河道内堆積物の流出～斜面崩壊発生～崩壊土砂の流出」といった、物理的な過程を説明可能な結果を得ることができた。

なお、本モデルの精度をより向上させるための今後の課題として、以下のような改良点を挙げるができる。

- ① 計算初期の河道内堆積土砂の合理的な設定方法の確立する。
- ② 規模の異なる出水で検証を行う。
- ③ 浮遊砂の非平衡性の考慮する。
- ④ 他流域を対象として土砂流出計算を実施する。

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。

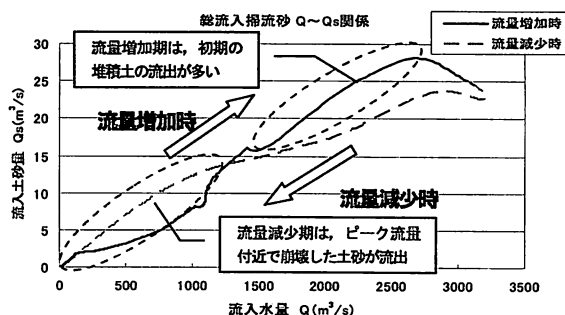


図-8 掃流砂の $Q \sim Q_s$ 関係 (全粒径の合計)

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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：プ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。
- 4) 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, 2008.2。
- 5) 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。
- 6) 児島利治・寶 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスタ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。
- 7) 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。
- 8) 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
- 9) (社)地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズム及び危険度予測
- 10) 国土交通省 中部地方整備局 豊橋河川事務所：矢作川の環境を考える懇談会 懇談会資料

(2009.4.9受付)