

分布型降雨土砂流出モデルを用いた 貯水池土砂流入量予測に関する研究

A STUDY ON PREDICTION OF SEDIMENT INTO RESERVOIRS USING A DISTRIBUTED RAINFALL AND SEDIMENT RUNOFF MODEL

永谷 言¹・高田 康史¹・寶 馨²・佐山 敬洋²

Gen NAGATANI, Yasufumi TAKATA, Kaoru TAKARA and Takahiro SAYAMA

¹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 北浜 MID ビル)

²京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Key Words: *distributed sediment runoff model, runoff prediction, reservoir sedimentation, hysteresis loop, Yahagi Dam*

1. はじめに

本研究のねらいは、貯水池管理において非常に重要となる大規模洪水時の流入土砂を、物理的基礎を持つ流出モデルを用いて流域規模で精度良く予測することである。

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（治水機能、利水機能）の低下が懸念される状況にある。

また、近年では、これら長期的かつ経年的な貯水池機能の低下のみならず、短期的にみても、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の進行事例（例えば、長野県美和ダムでは、昭和57～58年の堆砂量が約6,000千 m^3 とダム計画堆砂容量と同等の堆砂が短期的に進行した¹⁾）が発生しており、これら大規模洪水時に発生する貯水池流入土砂の特徴として、突発的かつ予測困難な点が挙げられる。

一方では、現在のダム貯水池の流入土砂量の推定は、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主流であり、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量についても、そ

の動態は把握できていない。

ここで、ダム貯水池は治水・利水の重要性より、半永久的にその機能を発揮し続ける必要があり、今後は、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、近傍類似ダムの実績値に頼らずとも精度良く、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土砂流出予測モデルの開発が望まれる。

そのような状況下において、近年、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²⁾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。また、佐山ら³⁾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。

本研究では、後者の佐山らが提案する「分布型降雨土砂流出モデル」に着目する。当モデルは空間的に任意の地点での水および土砂の挙動が把握可能であるが、これまでインドネシアの火山性土壌流域への適用事例^{4),5)}は報告されているものの、日本国内流域への適用はまだなされていない。そこで、本研究において、当モデルを日本国内の流域に適するようにモデルを改良した上で、国内での貯水池内土砂

流入量予測のケーススタディとして、矢作ダム流域（流域面積 504.5km²）を対象とした土砂流出計算を実施し、その有効性を示すとともに、今後の適用に向けた課題について考察を行った。

2. 対象流域

本研究では、国土交通省中部地方整備局管内の矢作ダム流域を対象とした。

(1) 矢作ダムの概要

矢作ダムは、昭和 46 年に完成した洪水調節、農業用水・工業用水・上水道水の供給および発電を目的とした多目的ダムである。ダム型式は放物線アーチ式コンクリートダムで、ダム高 100.0m、流域面積 504.5km²、総貯水容量 80,000 千 m³ を有している。

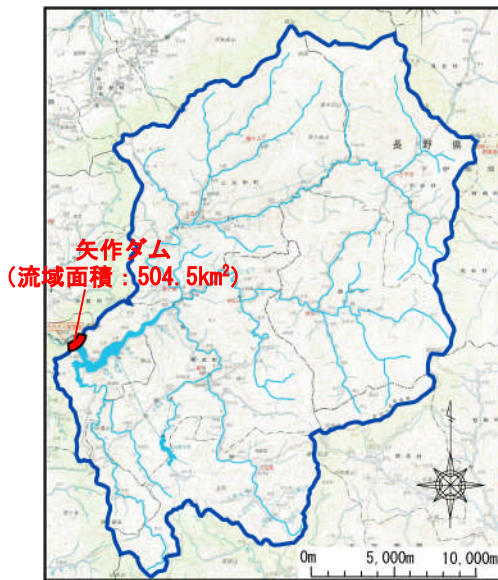


図-1 矢作ダム流域図

(2) 矢作ダムの土砂流入状況

矢作ダムは、運用開始以来 30 年以上が経過し、平成 15 年の実績堆砂量が計画堆砂容量 15,000 千 m³ を超過するなど、堆砂により著しく貯水池容量を損失している状況にある。特に平成 12 年 9 月 12 日～14 日の東海豪雨時には計画堆砂容量の約 18%に相当する 2,800 千 m³ もの土砂が堆積した(図-2 参照)。

3. 分布型降雨土砂流出モデル

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

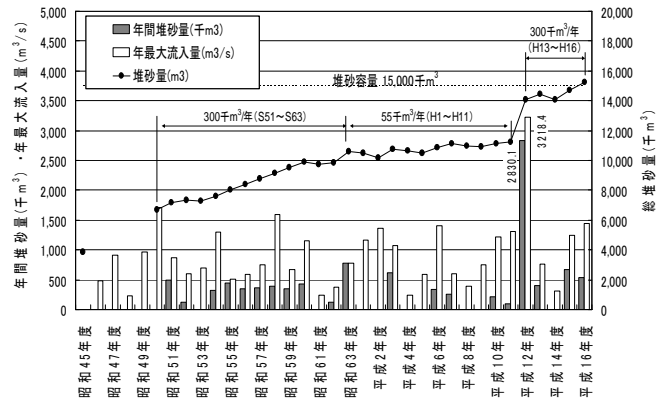


図-2 矢作ダムの堆砂実績

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、降雨・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援用する。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-3 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を流れる不飽和流の平均流速および大空隙部での飽和流の平均流速であり、それぞれ以下のように表せる。

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

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

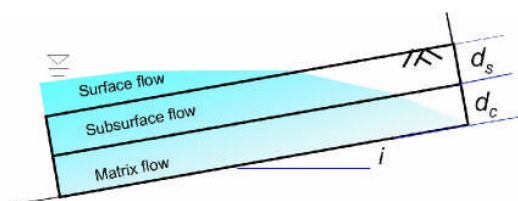


図-3 土層構造の概念図⁴⁾

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) 降雨・土砂流出モデル

降雨・土砂流出モデルとしては, 中川ら⁴⁾がインドネシア・ジャワ島の火山性土壌における土砂流出計算に適用したモデル(以下,「既往モデル」と称す)を基本とする. しかしながら, このモデルを日本国内流域における山腹斜面からの土砂流出を取り扱う際に, インドネシアで適用したモデルおよび定数をそのまま用いることには些か問題があるものと考えられる. そこで, 本研究においては, 日本国内流域の特性, 過去の研究実績等を考慮して既往モデルに若干の改良を加えたものを用いるものとする.

a) 中川らがインドネシアで適用したモデル

中川らは, 土砂の連続式において雨滴の衝撃力による表層土の侵食と表面流の底面せん断力による侵食を考慮したモデルをインドネシアの火山性土壌の土砂流出計算に適用している.

その基礎式は以下のとおりである.

$$\frac{\partial(h_s c)}{\partial t} + \frac{\partial(q_s c)}{\partial x} = e(x,t) = D_r + D_f \quad (4)$$

$$D_r = K \cdot K_e \quad (5)$$

$$D_f = \delta(c_i - c)h_s \quad (6)$$

ここで, h_s : 表面流の水深, c : 土砂濃度 (=流砂量/表面流の単位幅流量), q_s : 表面流の単位幅流量, D_r : 雨滴の衝撃力による表層土の侵食速度, D_f : 表面流の底面せん断力による表層土の侵食速度, K : 表土の侵食特性を表す係数, K_e : 雨滴衝突仕事, δ : 流砂量に関する係数, c_i : 表面流の平均流速と斜面勾配の積の関数から求められる最大土砂輸送能力である.

b) 本研究におけるモデルの改良点

上記既往モデルを, 矢作ダム流域に適用するに際して, 以下の点について改良した.

① 既往モデルではインドネシアの火山性土壌を対象としていることから, (5)式において雨滴の衝撃力による表層土の侵食を考慮している. しかしながら, 日本国内において特にダム上流域を対象とする場合には, その集水域の大部分が森林に覆われており, 雨滴の衝撃力による侵食は支配的でないものと想定される. そこで, 本研究においては表層土の侵食はすべて表面流の掃流力に起因するものとした. すなわち, (4)式において, 雨滴の衝撃による土砂侵食の考慮しないものとし, (4)式を下式のように

変更する.

$$\frac{\partial(h_s c)}{\partial t} + \frac{\partial(q_s c)}{\partial x} = e(x,t) = D_f \quad (4')$$

② また, 大規模出水時における流域内の土砂生産・輸送過程は掃流砂量式で表現できるものと仮定し,

(6)式における最大土砂輸送能力 c_i は, 日本国内の掃流砂量計算に一般的に良く用いられる芦田・道上の式をもとに算出するものとして, 下式に従うものとする.

$$c_i = \varepsilon \cdot q_{bb} / q_s \quad (7)$$

$$q_{bb} = 17 \sqrt{sgd^3 \tau_{*c}^{3/2}} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \quad (8)$$

$$\tau_* = u_*^2 / sgd$$

$$\tau_{*c} = u_{*c}^2 / sgd$$

$$\tau_{*e} = u_{*e}^2 / sgd$$

$$u_* = \sqrt{gRI}$$

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

$$s = \sigma / \rho - 1$$

ここで, q_{bb} : 芦田・道上の式から算出される掃流砂量, ε : 芦田・道上の式から算出される掃流砂量に関する割引率, σ : 砂の比重(2.65), ρ : 水の比重(1.0), g : 重力加速度(9.81), d : 砂の粒径, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 岩垣公式より算出される限界掃流力, τ_{*e} : 有効限界掃流力, u_* : 摩擦速度, u_{*c} : 限界摩擦速度, v : 表面流の平均流速, R : 径深(≒表面流の水深)である. なお, 河道部の土砂輸送過程についても, (6)式, (7)式の δ , ε を別途設定することにより上記モデルを適用する.

4. 計算手順

分布型降雨土砂流出モデルを貯水池内土砂流入量予測に用いることの有効性を検討するために, 以下の手順で流出計算を実施する.

(1) 矢作ダム流域の落水線図を作成

国土地理院刊行の数値地図 50m メッシュ (標高) データもとに空間分解能 250m とした落水線図を作成する. なお, 河道網については, 図-1の流域図における河道網を参考に, 集水面積 4km² (対象斜面の上流に 64 斜面が位置する) 以上を有する斜面を河道として取り扱うこととし, 河道幅は下式³⁾により決定する.

$$B = B_o (A/A_{\max})^l \quad (9)$$

ここで、 B ：河道幅、 B_0 ：下流端河道幅、 A ：集水面積、 A_{\max} ：下流端の集水面積、 l ：一定値(0.3)である。

(2) 降雨流出に関わるモデルパラメータの同定

過去の雨量・流量データから、斜面表層厚、表層内の空隙率、飽和浸透層厚、不飽和浸透層厚、透水係数、表面流粗度係数等の降雨流出に関わるパラメータを同定・検証する。なお、再現計算の対象とする洪水は、下表の2洪水とし、流入量予測の観点から、中規模洪水である平成11年洪水でパラメータの同定を行い、そのパラメータを用いて、未曾有の大洪水であった平成12年洪水について検証を行うものとした。また、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。

表-1 検証対象洪水

発生年月日	初期流入量 (m^3/s)	最大流入量 (m^3/s)
平成11年6月29日 ～7月2日	80	1,312
平成12年9月12日 ～9月14日	10	2,993

(3) 土砂流出計算

降雨流出に関するモデルパラメータを決定したのち、(6)式、(7)式における流砂量に関する係数 δ 、 ε をチューニングパラメータとして、各洪水における土砂流入量の再現計算を行う。

ここで、貯水池内への流入土砂量については、年間堆砂量(≒総流入土砂量)のみが把握可能であるが、この年間堆砂量のうち大部分が主要な洪水時に流入したものと想定して、「年間堆砂量=対象洪水時の流入量」として取り扱うものとする。

なお、流域内の土砂は単一粒径 $d=30\text{mm}$ (矢作川上流域の河道内土砂の平均粒径相当)として取り扱うものとし、貯水池内堆積土砂の空隙率 $\gamma=0.4$ として総流砂量から総堆積土砂量(=総流入土砂量)への変換を行った。

5. 計算結果

(1) 降雨流出に関わるモデルパラメータの同定結果

a) 平成11年洪水の再現計算(パラメータの同定)

平成11年6月29日～7月2日の間に生じた洪水に対し、流量に関わるパラメータの同定を行った。河道斜面を除くすべての斜面が森林で被覆され、同

一の表層を有しているという条件のもと、粗度係数 n_f (森林)、 n_r (河道)、マトリックス部の層厚および大空隙に相当する層厚 d_c 、 d_a 、飽和透水係数 k_a 、不飽和浸透に関するパラメータ β についてキャリブレーションを行った。

インプットデータとしては、初期流量は計算開始時刻の観測流量、雨量データについては損失雨量等を考慮せず観測降雨をそのまま与えている。試行錯誤的同定法によって、それぞれ、 $n_f=0.6$ 、 $n_r=0.05$ 、 $d_c=400(\text{mm})$ 、 $d_a=200(\text{mm})$ 、 $k_a=0.0015(\text{m/s})$ 、 $\beta=4$ を最適解とみなした(図-4参照)。なお、このときのピーク流量の相対誤差は1%以下、ピーク生起時刻の誤差は1時間程度(計算値の方が遅れている)である。

b) 平成12年洪水(東海豪雨)の再現計算

図-5は平成11年洪水において同定したパラメータをそのまま用い、平成12年9月12日～14日に生じた洪水(東海豪雨)の再現計算を行った結果である。ハイドログラフの立ち上がり部、低減部とも観測値と比較して、計算値の方が若干遅れているものの、ピーク流量はほぼ一致(相対誤差で3%程度)しており既往の研究結果⁷⁾と同様に、当モデルはパラメータの安定性が高く、初期条件および規模の異なる洪水に対しても良好な再現性を示している。

(2) 土砂流出計算

a) 総流入土砂量

図-6は、流砂量に関する係数 δ 、 ε をチューニングパラメータとした平成11年洪水における土砂流出を再現計算結果である。 $\delta=1.0$ 、河道の初期交換層厚を2,000mmと固定し、 ε を森林部、河道部についてそれぞれ試行錯誤的同定法によって、 $\varepsilon_f=0.20$ 、 $\varepsilon_r=0.012$ とした。なお、山腹斜面(森林部)の交換層厚は十分に大きな値を設定し、山腹斜面からの土砂生産が制限されないようにしている。図-7は平成11年洪水に対して同定した ε_f 、 ε_r を用いて平成12年洪水の土砂流出計算を実施した結果である。このとき、平成11年洪水時の総流入土砂量は、図-2からは50千 m^3 程度となるが、近年のトレンドからすると当該年は年最大流入量(近年10ヶ年中3位)の割に堆積土砂量が少なく、実測値の精度に問題がある可能性があることから、 ε_f 、 ε_r のチューニングの目標は近年の平均的な値である300千 m^3 程度とした。一方、平成12年洪水については、観測値に従い2,800千 m^3 程度をチューニングの目標とした。

図-6、図-7より、平成11年洪水について同定した土砂流出に関するパラメータをそのまま平成12

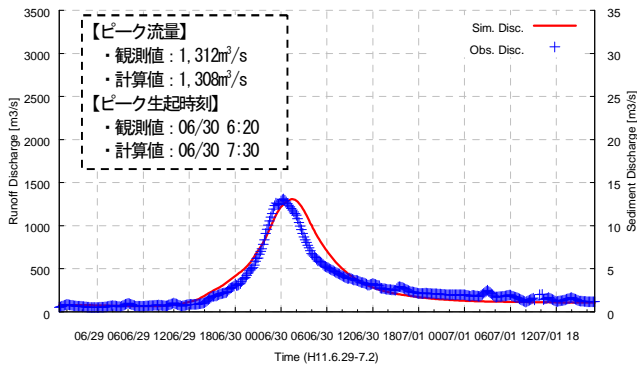
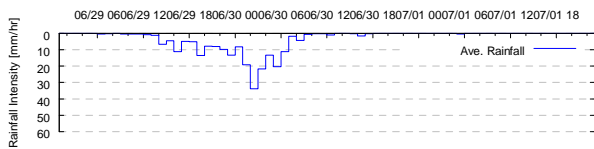


図-4 洪水流出再現計算結果 (H11. 6. 29—7. 2)

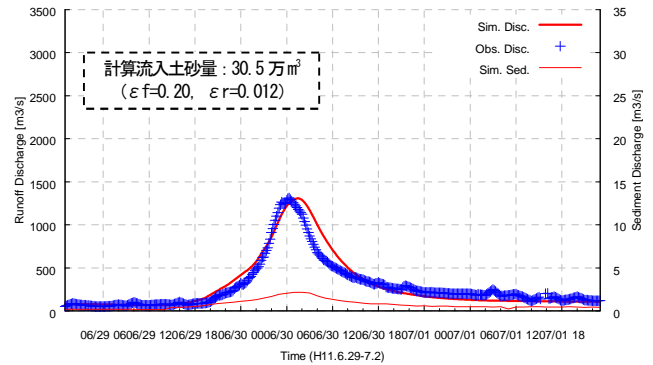
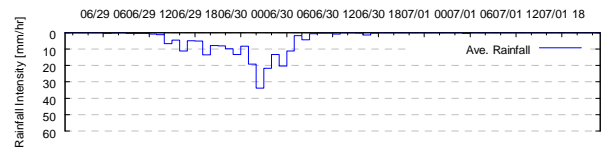


図-6 土砂流出計算結果 (H11. 6. 29—7. 2)

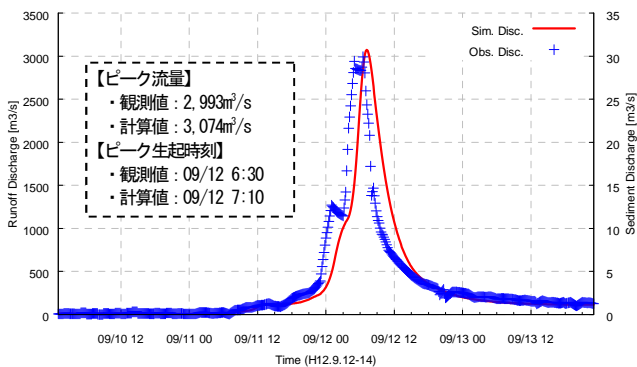
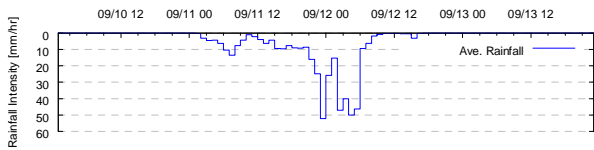


図-5 洪水流出再現計算結果 (H12. 9. 12—9. 14: 東海豪雨)

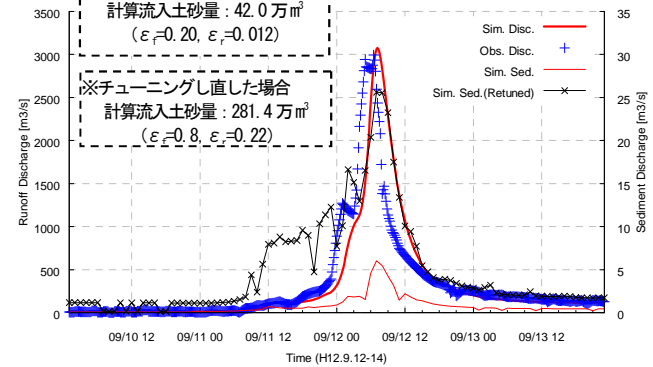
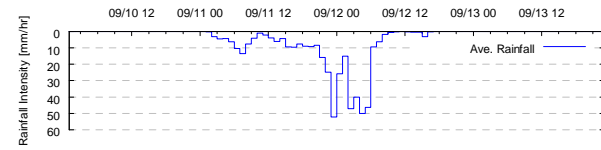


図-7 土砂流出計算結果 (H12. 9. 12—9. 14: 東海豪雨)

年洪水に用いて土砂流出計算を実施した場合は、実績堆砂量約 2,800 千 m^3 に対して、計算総流入土砂量は約 420 千 m^3 と計算値の方が過小となっている。

これは、検討対象洪水より以前の流域内土砂の生産状況の履歴、河道内の貯留土砂量、地形・地質・土地被覆等地形・地目毎の土砂生産過程等が十分考慮できていないこと等に起因するものと考えられる。

また、参考に平成 12 年洪水について、 ϵ_f 、 ϵ_r をチューニングし直して土砂流出計算を実施した結果を図-7 に併せて示す。このとき、 ϵ_f 、 ϵ_r はそれぞれ 0.8、0.22 である。この結果によると、東海豪雨発生時には、最大 25 m^3/s 相当の流入土砂が発生していたことが推定される。

b) 流入土砂量のヒステリシス

平成 11 年洪水、平成 12 年洪水(パラメータをチューニングし直した場合)における土砂流出計算結果より、矢作ダム流入地点における流入土砂量のヒステリシスを図-8、図-9 に示す。同図より、流量上昇

期の方が、流量低減期に比べて流入水量に対する流入土砂量が大きい結果となった。流量上昇時と下降時では、同じ流量であっても、異なる土砂量を示すことが知られており⁸⁾、今回の結果は、流量上昇時に河道内に貯留されていた土砂と新たに生産された土砂が流下し、一度河道内貯留土砂が流下すると、流下土砂が頭打ちになり、流量低減期には土砂が堆積するという物理現象をある程度表現できているものと考えられる。ただし、図-8、図-9 に示す流入土砂のヒステリシスは、総流入土砂量の適合のみに着目して ϵ_f 、 ϵ_r のチューニングを行った結果であり、流入土砂量の時間変化の適合を対象としたものではない。このため、 ϵ_f 、 ϵ_r の組合せにより、流入土砂の時間変化は異なる傾向を示すが、当該部分のチューニング手法については今後の課題としたい(例えば、森林部の係数 ϵ_f を大きく、河道部の係数 ϵ_r を小さく設定すると、森林部で生産された土砂が河道を通過して流出するため時間遅れが生じ、洪水初期の流入

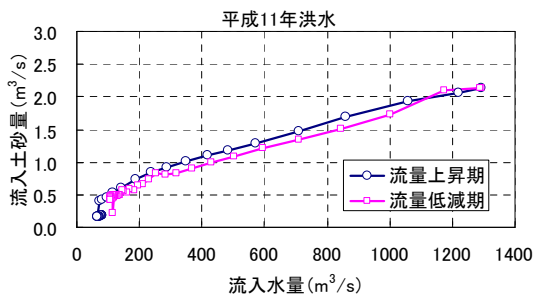


図-8 流入土砂ヒステリシス (H11. 6. 29-7. 2)

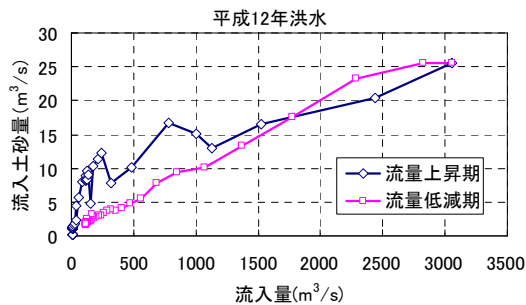


図-9 流入土砂ヒステリシス (H12. 9. 12-9. 14)

土砂量が少なく、洪水後期の流入土砂が多くなる傾向を示す)。

5. おわりに

流域規模での降雨土砂流出モデルを矢作ダム流域に適用し、土砂流出計算を実施した。当モデルは、従来行われていたような、河道を中心とした取り扱いや、経験式あるいは近隣ダムにおける堆砂実績からの予測ではなく、流域全面における土砂動態を水の流れに関連づけて表現していることから、時空間的に任意の地点での水および土砂の挙動が把握可能であり、今後、貯水池内土砂流入量予測計算に本モデルを用いることは、非常に有効であるといえる。

本研究で得られた成果を以下に整理する。

- (1) 洪水流出については、パラメータ値の安定性が高く、初期条件および規模の異なる2洪水について精度よく流出再現計算を行うことが可能であった。
- (2) 土砂流出計算については、既往検討では、貯水池上流端の水理量の関数として取り扱ってきた流入土砂ハイドロを推定することが可能となった。
- (3) 洪水規模の応じてヒステリシスループの向きが変わる計算結果を得ており、ダム貯水池へ流入してくる土砂の物理的な動態特性を概ね表現できているものと考えられる。
- (4) 貯水池内河床変動計算の際には、貯水池への流入土砂量が重要な境界条件となる。現状では適切な設定方法が課題の一つとなっており⁹⁾、本モデルはこうした場合にも極めて有用である。

本モデルの精度をさらに向上させるために、以下のような改良点を挙げるができる。① 土砂の流

下・堆積による時々刻々の地形変化を反映し、河道内貯留土砂現象を考慮する。② 混合粒径を対象としたモデルへの改良する。③ 土砂の生産過程について、流域内の地形・地質・土地被覆毎の生産過程を反映させる。また、土砂流出に関するパラメータ(δ , ε 等)と地形・地質・土地被覆との関係を把握する。④ 長期間(数十年～百年オーダー)の流入土砂量予測が可能なモデルと改良する。

いずれにせよ、このようなモデルの適用事例は少なく、今後さまざまな流域へ適用していき、データを蓄積していきたいと考える。

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) 横森源治・園原一男・福本晃久：美和ダム再開発事業における分派堰及び洪水バイパストンネルの設計, ダム技術, No. 187, pp22-38, 2002.
- 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) 例えば, Morris, G. and Fan, J.: Reservoir Sedimentation Handbook, McGraw-Hill, pp. 7.7-7.9, 1997.
- 9) 技術委員会 排砂対策分科会：ダム排砂対策の現状と課題, 大ダム, No. 176, pp. 1-49, 2001.

(2008. 5. 16 受付)