

ダム貯水池への流入土砂量の把握に関する研究

A STUDY ON GRASP OF THE QUANTITY OF SEDIMENT INFLOW TO DAM REGULATING RESERVOIRS

吉武宏晃¹・吉村健¹・加来睦宏¹・池見洋明²・三谷泰浩²

H YOSHITAKE, T YOSHIMURA, M KAKU, H IKEMI and Y MITANI

¹九州電力株式会社 耳川水力整備事務所（〒883-0045 日向市北町1-112番地）

²九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡744番地）

Key Words: Mimikawa River, integrated sediment flow management, sluicing of sediment, sediment inflow, dam regulating reservoir

1. はじめに

耳川は、九州脊梁山地の1,700m級の高峰連山に源を発し、宮崎県の日向灘に注ぐ流路延長94.8km、流域面積884.1km²の二級河川である(図-1)。耳川水系には7つのダムと水力発電所(総出力34万kW)があり、九州地方有数の水力発電地域となっている¹⁾。

山地が急峻な耳川は、これまでに、多くの土砂災害が発生するとともに、河川沿いでは、しばしば浸水被害が発生してきた²⁾。特に、平成17年台風14号においては、山間部で総雨量1,000mmを超える雨により流域内で約500箇所の斜面が崩壊し、約1,000万m³に及ぶ土砂が河川に流入するとともに、甚大な浸水被害が発生した³⁾(図-2参照)。

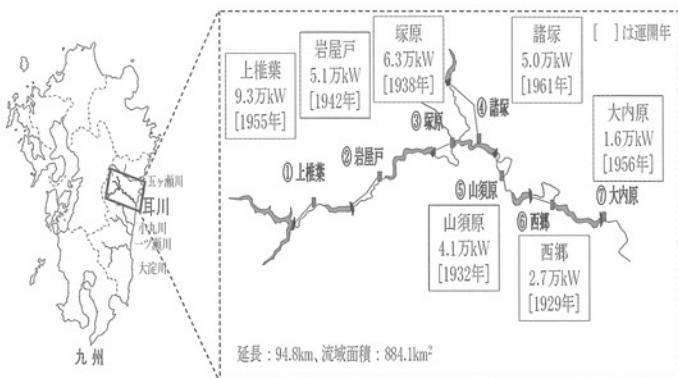


図-1 耳川水系の概要



図-2 平成17年台風14号の被害状況(一例)

平成17年台風14号による甚大な災害を契機に、河川管理者である宮崎県は、土砂に起因する様々な問題を流域全体で正しく捉え、水系一貫で土砂の流れを管理していく耳川水系総合土砂管理計画を策定した(平成23年10月)⁴⁾。九州電力㈱も、同計画の中核である、山須原、西郷及び大内原ダムによるダム通砂を平成28年度から予定している。ダム通砂とは、台風出水時にダム水位を低下させ、河川状態をつくりだすことにより、上流から流れ込む土砂をダム下流に通過させるものである(図-3参照)。

ダム通砂の実施にあたっては、ダム上下流の治水・利水・環境への影響に配慮したダム通砂を計画・実施していくとともに、運用が適切に行われたかどうかを確認・検証し、改善を図っていく必要がある。そのためには、ダム通砂による土砂動態を相応に把握していくことが求められる。

従来、ダム貯水池の土砂管理では、毎年の「堆砂量」を把握することで、貯水池周辺の治水安全度や設備等

への影響を管理してきた。これに対し、ダム通砂開始後は、土砂の移動範囲が広がり、ダム上下流に影響が及ぶことになる。また、ダムにおける捕捉量が減少し、「堆砂量」のみではダム通砂による土砂動態の把握が難しくなることから、毎年、どのくらいの「流入土砂量」があり、どのくらいの「通過土砂量」があったのかを把握した上で、ダム通砂における土砂管理を行っていく必要があると考えられる(図-4 参照)。

しかし、礫・砂・シルト成分から構成される河川内の土砂移動は複雑な形態を呈すことから、未解明な部分が多く、様々な研究が進められている分野である⁵⁾。特に、流入土砂量に関しては、河川の土砂移動量を把握する上での境界条件に相当し、重要な情報である。それにもかかわらず、対象とする山地領域が広範囲に及ぶこともあり、確立された把握手法がないのが現状である⁶⁾。

以上を踏まえ、本研究では、ダム通砂における土砂管理への適用を目的として、毎年のダム貯水池への流入土砂量を把握する手法の検討をおこなった。

[現在のダム操作におけるダム堆砂のプロセス(イメージ)]

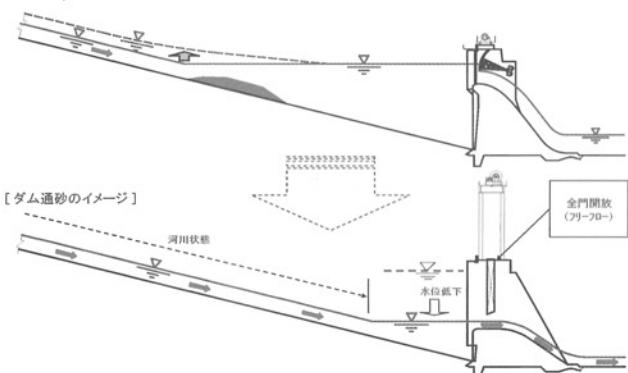


図-3 ダム通砂のイメージ

	a.流入土砂量 [貯水池へ流入していく] =b.堆砂量 + c.通過土砂量 [ダム貯水池を通過していく土砂量]	イメージ
従来	— 測量で 把握	—
通砂後	新たに必要 (操作の評価; 改善に必要) 測量で 把握	新たに必要 (操作の評価; 改善に必要 (a-bで算出))

図-4 従来とダム通砂における土砂管理イメージ

2. 研究の流れ

毎年、ダム貯水池への流入土砂量を把握するためには、毎年の出水規模や山地の状況を十分に反映可能で、利用しやすい手法が必要と考えられる。そこで、耳

川流域における流入土砂に関して支配的な素因・誘因を特定することで、流入土砂のメカニズムを明らかにするとともに、それらの素因・誘因に基づき毎年の流入土砂量を算出する手法を検討した。

図-5 に、本研究の流れを示す。まず、これまで多くの情報(流量、堆砂量・形状等)を蓄積してきたダム貯水池に着目し、河床変動計算によりダム堆砂を再現することで、逆解析的に過去の流入土砂量を算出した。

また、算出した流入土砂量と山地の素因・誘因の相関分析を行うことで、支配的な素因・誘因を特定し、山地の素因・誘因から流入土砂量を推定するモデルを構築した。

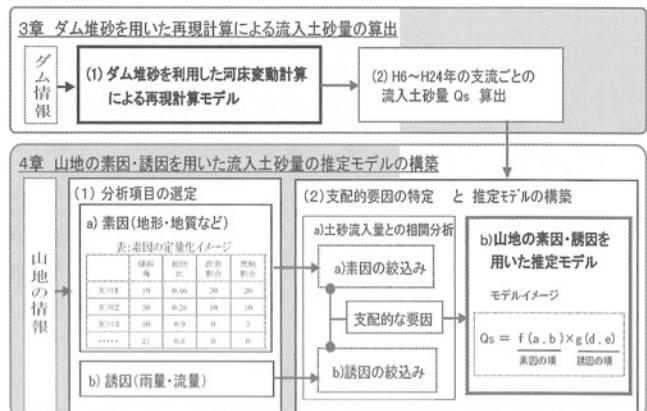


図-5 研究の流れ

3. ダム堆砂を用いた再現計算による流入土砂量の算出

通常、河床変動計算は境界条件を入力することで、河床高さの変化の予測に用いられる。しかし、ダム貯水池は過去の流入土砂を捕捉している大きな観測装置と捉え、実績洪水波形に基づく河床変動計算によりダム堆砂を再現することで、逆解析的に毎年の流入土砂量の算定を行った。

(1) 計算モデルと算出方法

本研究では、混合粒径の1次元河床変動計算を利用することとした。モデルの平面・断面イメージを図-6 に、計算条件を表-1 に示す。なお、モデルの構築にあたっては、図-7 に示すとおり、大小多様な出水規模が発生した H6~H16 年の出水波形とダム堆砂実績(堆砂形状、堆砂量、粒径)及び、近傍の最上流ダムの過去の堆砂実績から求めた 1000 年確率期待値により算出される比流入土砂量(山須原ダム: $606 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{年}$)¹⁷⁾を用いて、流入土砂の粒度分布をチューニングすることで、中長期的な視点から耳川流域に即したモデルを構築した。その上で、このモデルを用いて、各年の出水波形において、洪水後のダム堆砂実績(量、形状)を再現できる

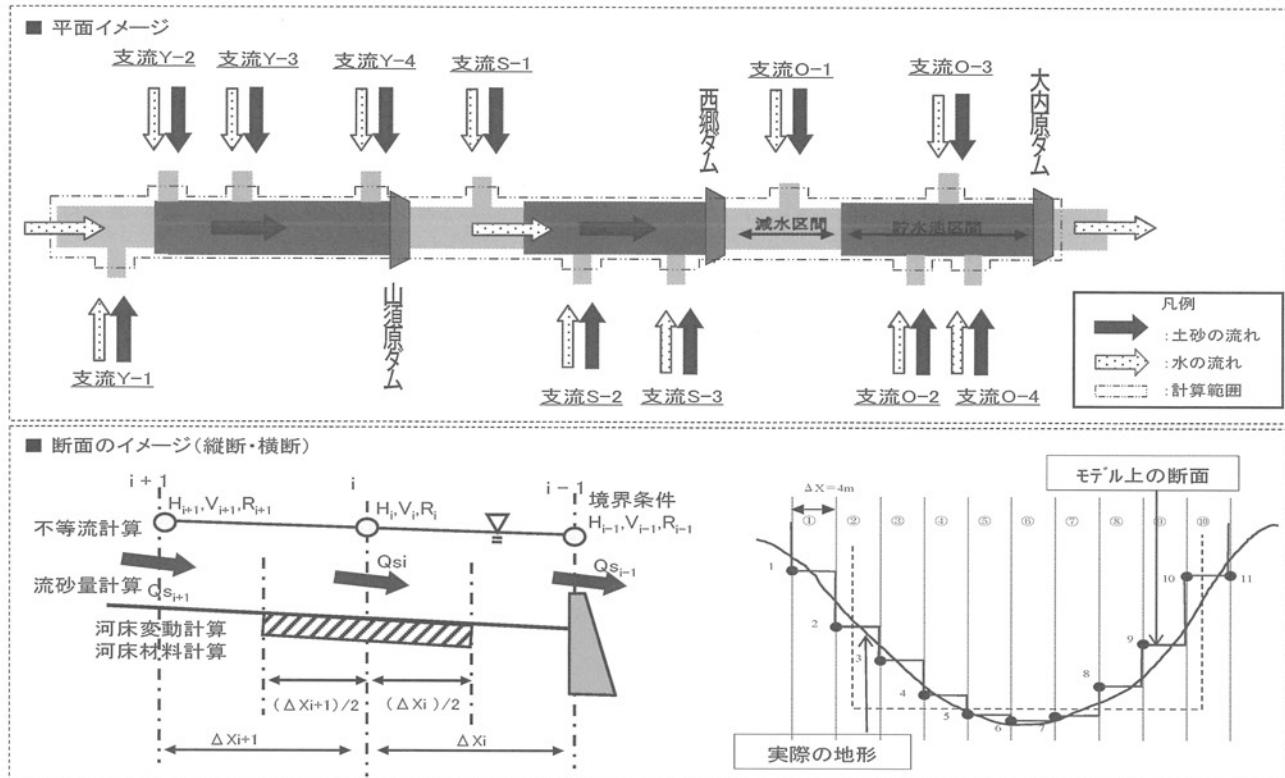


図-6 1次元河床変動計算モデルのイメージ

表-1 計算条件

項目	内容	
縦断面形状	<ul style="list-style-type: none"> 計算範囲：大内原ダム～塚原ダム（約30km） 計算ピッチ：約200m（横断方向4m） 貯水池内：深浅測量データ（H6～H24の各年データ） 減水区間：河川測量結果（H20） 	
流れ	計算ピッチ	2秒
	モデル	1次元不等流計算
	流量・水位	ダム流入量・水位実績（H6～H24）
河床変動	粗度係数	地点の河床条件に合わせて設定 0.045～0.063
	モデル	1次元河床変動モデル（混合粒径モデル）
	掃流砂量式	芦田・道上式 ⁸⁾
	浮遊砂量式	芦田・道上式 ⁸⁾
	浮遊砂濃度の連続式	浮上量：板倉・岸の式 ⁸⁾ 沈降量：基準点濃度と沈降速度 ⁸⁾ (Rubey式)
土砂条件	粒径区分	24代表粒径（0.001～200mm）
	空隙率	0.4
	砂礫密度	2,650 kg/m ³
	河床粒度	ボーリング、河床材料調査結果
	交換層厚	0.2m
土砂供給方法	供給箇所	図-6の支流
	支流の流量	ダム流入量の流域比換算
	粒度分布	土砂を十分捕捉している最上流ダム ボーリング結果から初期設定
	供給方法	0.2mm以上：平衡給砂（支流毎の断面形状・勾配に基づく等流計算と流砂量式により給砂） 0.2mm以下：Qs-q式（Qs = α Q ^β ）により給砂

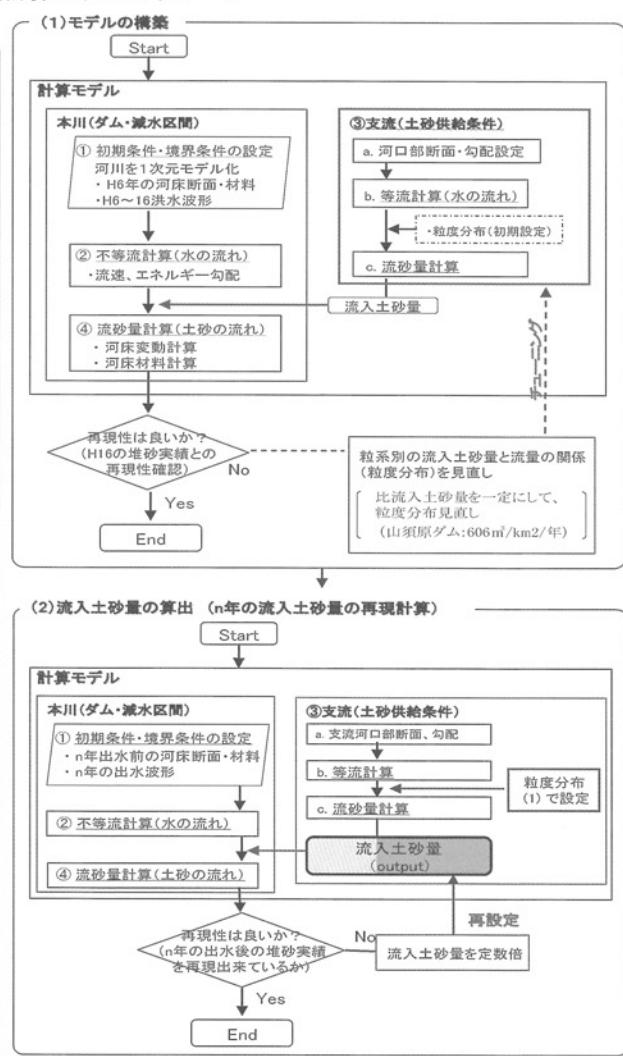


図-7 モデルの構築及び流入土砂量の算出フロー

各支流からの流入土砂量を算出した。

(2) 算出結果

以上 の方法により、支流ごとに H6～H24 の各年の流入土砂量を算出した。一例として、H24(単年)の算出結果を土砂動態マップの形で表示したものを図-9に示す。また、H6～H24 年の算出結果を支川ごとに最小値、最大値、平均値を示したもののが図-10である。この結果、支流や年ごとに、様々な要因により、流入土砂量が大きくバラツクこと、支流 Y-3、支流 S-2、支流 O-2 が、相対的に流入土砂量が多いことがわかった。また、平成 17 年は過去に例を見ないほどの流入土砂量が生じており、それ以降の約 2 年間(H18, H19)についても、平年の同規模出水に比べて、数倍の土砂が流入していたことが明らかになった。

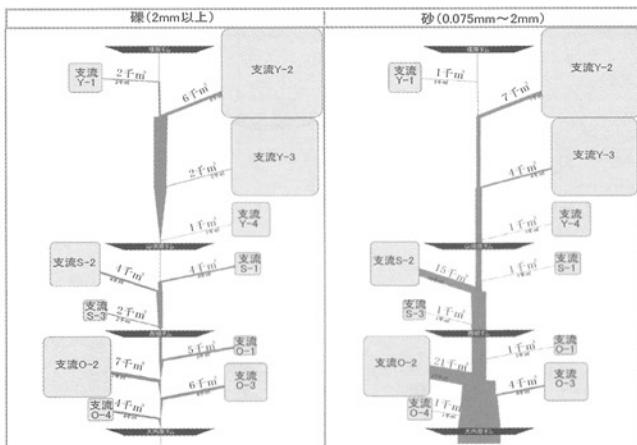


図-9 算出結果 (H24 の土砂動態マップ)

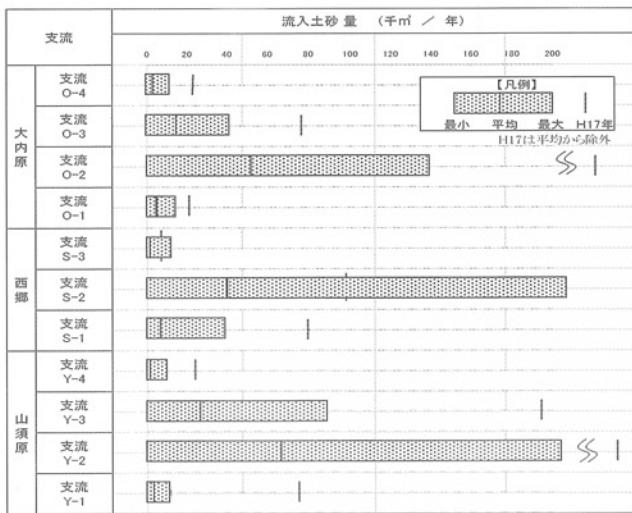


図-10 支川ごとの流入土砂量 (H6～H24 の最小、最大、平均)

4. 山地の素因・誘因を用いた流入土砂量の推定モデルの構築

土砂流入に関する要因は、多岐にわたり、相互に影響し合っている。そのため、毎年の流入土砂量を算

出する上では、流入土砂量に関して影響の大きな要因を特定するとともに、それらの要因の相互関係を反映した手法が必要と考えられる。そのため、流入土砂量の実績を用いて、高い相関性を有する要因(素因:地形・地質など、誘因:雨量・流量など)を特定し、組み合わせることで、山地の素因・誘因から流入土砂量を推定する式(以下、推定モデル)を検討した。

(1) 分析項目の選定

以下に、本研究で用いた分析項目(素因・誘因)を示す。

a) 素因

流入土砂量に影響すると考えられる素因について、地理情報システム(GIS)を用い、耳川本川に直接流入する支流を分析単位として、地形・地質及び土地利用の観点から整理した。

① 地質 (表層土壤)

宮崎県 20 万分の 1 地質図に基づき、支川ごとの地質割合を整理した(図-11)⁹⁾。耳川流域は四万十累層群の堆積岩類を主体とした付加体の地質であり、下流 3 ダムは大半が四万十南帯に位置し、一部が四万十北帯に位置する。また、表層土壤データは、国土交通省国土調査課が発行している 50 万分の 1 の土壤図データを利用した⁹⁾。

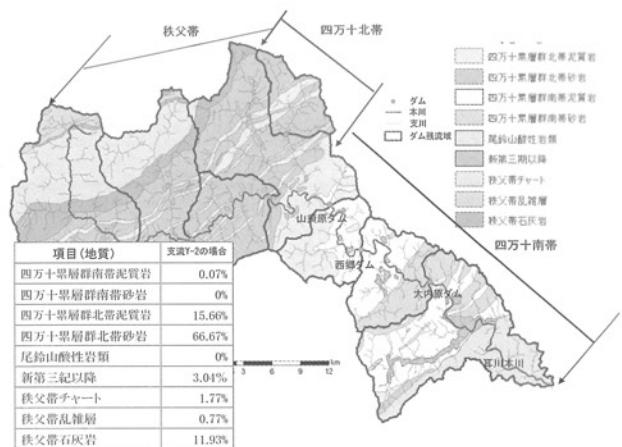


図-11 耳川流域の地質図

② 地形

国土地理院発行の 10m メッシュ標高データを使用し、支流ごとに基本地形量(傾斜角等)及びこれらを組み合わせた誘導地形量(表-2 参照)を算出した⁹⁾。図-12 に、算出した誘導地形量の一例として、曲率の結果を示す。曲率は、地形の凸凹の程度を表す指標として用いられるものである。この図から、比較的斜面勾配の緩い下流域においても高い値を示す支流が点在していることがわかる。

表-2 誘導地形量の一例⁹⁾

項目	内 容（説 明）
河川密度	河川長を流域面積で除したもの
水流密度	n 次水流の河川長を流域面積で除したもの
曲率	サーフェースの二次導関数（曲率値）の絶対値
円形度	流域面積と流域縁辺長 を基に形状の複雑さ を図る特徴量 $\text{円形度} = \frac{4 * \pi * \text{流域面積}}{\text{流域縁辺長}^2}$
伸長率	流域面積と流域末端から の最遠点距離を基に流域の 平面形状を把握するもの $\text{伸長率} = \frac{Z_{\text{流域面積}}}{\text{流域末端からの最遠点距離}}$
起伏比	最高標高と最低標高の標高差を支川流域末端から 最高標高点までの距離で除したもの
粗度数	最高標高と最低標高の標高差と河川密度を乗じて 無次元のパラメータとしたもの

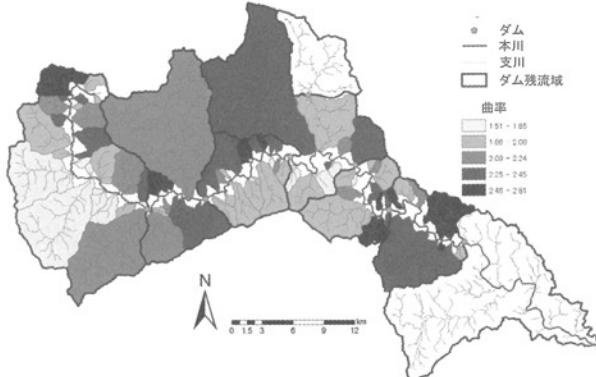


図-12 曲率の算出結果

③ 土地利用

土地利用状況については、国交省国土数値情報で公表されているデータを使用し表-3に示す項目を整理した⁹⁾。なお、耳川流域は大半が森林であり、森林の状況を把握することが重要と考えられるため、併せて、衛星画像により裸地面積(H15, H16, H17, H22, H24)を抽出した。

表-3 土地利用の分析項目

項目	支流Y-2の場合
河川池及び湖沼	0.02%
建物用地	0.21%
荒地	0.20%
森林	98.65%
人口造成地等	0.01%
田	0.54%
農用地	0.37%

b) 誘因

① 雨量

流域内に設置している14箇所の雨量観測所のデータを用いて、H6～H24の実績雨量データに基づき、ティーセン分割法により、ダム残流域及び支流ごとに、表-4に示す項目を各年で整理した。なお、長期雨量(累計雨量等)だけではなく、短期雨量(最大時間雨量等)の観点からも分析項目を選定した。

② 流量

流量については、ダムにより観測されているH6～H24の実績流量データに基づき、ダム流域及び支流ごとに、表-4に示す項目を各年で整理した。なお、支流については、全支流域で流量が観測されていないため、H6～H24年のダム流入量実績に基づき同定したタンク

モデルを利用し雨量データより算出した。

表-4 雨量・流量の分析項目

雨量	流量
累計雨量[mm]	総流入量[m ³]
最大48,24,12,6時間 雨量[mm]	〇〇m ³ /s以上の総流入量[m ³] (山須原ダムで200,400,700m ³ /s相当)
最大時間雨量[mm]	最大流量[m ³ /s]

(2) 支配的な要因の特定と流入土砂量の推定モデルの構築

a) 分析方法

支配的な要因を特定するために、選定した素因・誘因を説明変数、流入土砂量を目的変数として、相関分析をおこなった。なお、説明変数と目的変数の次元を合わせるために、比流入土砂量(流入土砂量を流域面積で除した値)を用いることとした。また、説明変数が多岐にわたるため、図-13に示す通り、推定モデル構築の前段として、素因・誘因をそれぞれ分析し、項目の絞込みを行った。

地形・地質等の素因は、比較的長期間変化しない固有の値と捉えることが出来るため、素因の絞込みにおいては、中長期間の比流入土砂量の平均値を目的変数として、単相関分析を行った。また、誘因(雨量・流量)は、素因の影響と比べると短期的な影響を及ぼすものと考えられるため、毎年の比流入土砂量を目的変数として、

〔STEP1〕 素因(X1:地形・地質等)の絞込み

流入土砂量実績と素因の相関分析を行い、素因を絞込み

目的変数	○支流ごとの比流入土砂量 (m ³ /km ² /年) ・H6年～24年の平均値
説明変数	地形、地質、土地利用データ(支流ごと)



〔STEP2〕 誘因(X2:雨量・流量)の絞込み

流入土砂量実績と誘因の相関分析を行い、誘因を絞込み

目的変数	○ダム流域ごとの比流入土砂量 (m ³ /km ²) ①H17年～19年(異常時)の各年値 ②H17年～19年以外(平常時)の各年値
説明変数	雨量・流量データ(ダム残流域ごとの各年値)



〔STEP3〕 支配的な要因の特定と比流入土砂量の推定モデルの算出

STEP1・2を踏まえて相関分析を行い、支配的な要因の特定。回帰式の算出
比流入土砂量の推定モデルを算出

$$Q_s = f(x_1, x_2)$$

目的変数	○支流ごとの比流入土砂量 (m ³ /km ²) ・H13～H24の各年値
説明変数	素因: STEP1で絞込んだ素因(支流ごと) 誘因: STEP2で絞込んだ誘因(支流ごと)

図-13 支配的要因の特定と推定モデルの構築フロー

単相関分析を実施した。その上で、支流ごとの各年の流入土砂量を目的変数として、重回帰分析を行い、比流入土砂量に影響している要因を特定するとともに、回帰式を算出した。

b) 分析結果

素因の絞込み及び誘因の絞込みを行い、比流入土砂量と一定の相関関係が見られる項目を絞込んだ。その中では、山須原ダムで $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の総流入量において高い相関（決定係数 $R^2 = 0.90$ ）があることがわかった。このことから、当該地域は、山須原ダムで $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度に達する流量から流入土砂が増加するものと推察できる。

また、絞込んだ素因・誘因を用いて、重相関分析を行った結果、以下の 5 つの要因による関係式が最も高い相関関係が得られることがわかった。また、図-14 に再現計算の結果とモデルによる推定値の関係を示す。

[比流入土砂量の推定モデル(砂礫の場合)]

$$\begin{aligned}\log Q_s &= 2.65 \times Q_{400} + 68.51 \times B + 2.26 \times C \\ &\quad + 0.001 \times R + 0.451 \times S_{\text{std}} - 14.96\end{aligned}(R^2 = 0.68)$$

ここに、 Q_s ：比流入土砂量 ($\text{m}^3/\text{k m}^2$)、 Q_{400} ： $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の比総流入量 (百万 m^3/km^2)、 B ：裸地面積比率、 C ：曲率、 R ：粗度数、 S_{std} ：傾斜角の標準偏差 (バラツキ)

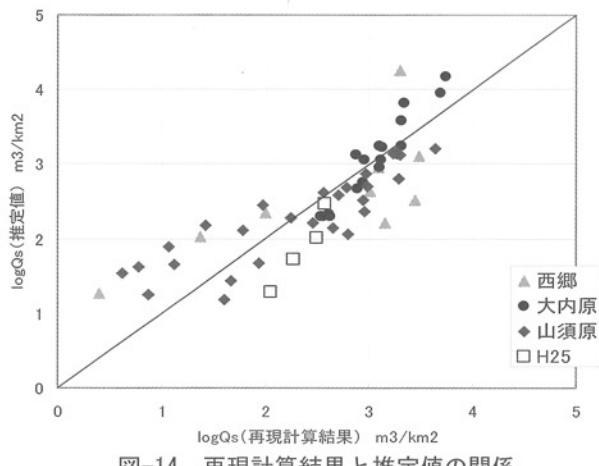


図-14 再現計算結果と推定値の関係

当該モデルの特徴を考察すると、第 1 項は毎年の出水規模、第 2 項は毎年の裸地状況（土砂生産のしやすさ）を反映している。なお、流量と裸地面積比率は、 t 値（貢献度）と P 値（有意性）の値から、流入土砂量を把握する上で重要な要因であることが明らかになった。第 3, 4, 5 項は、毎年変化するような要因ではないことから、支流ごとの固有のポテンシャルを反映している項目と考えられる。なお、当該モデルには地質的要因が含まれていないのは、

当該地域の大半が四万十累層群南帯に位置しており、地質的には大きな差異がないものと推察される。また、流入土砂量は指数関数的に増加するという非線形性を呈しており、一定規模以上の出水規模になると流入土砂が急増することを示唆している。

c) 推定モデルの確認

H25 年の山須原ダムの流量や裸地面積等のデータを入力することにより、流入土砂量を推定するとともに、再現計算結果と比較した（図-14 参照）。その結果、大きいもので $10 \text{ 千} \text{m}^3$ ほどの差が生じていたが、概ね傾向は推定できていることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、ダム貯水池を大きな観測設備と捉え、再現計算モデルにより過去の流入土砂量を算出した。また、流入土砂量と支流の素因・誘因を相関分析し、流入土砂量に影響を与えていたる素因・誘因を特定することで、山地の素因・誘因からダム貯水池への流入土砂量を推定するモデルを作成した。

今後は、流入土砂量データの算出精度の向上と蓄積、更なる素因・誘因の分析を行いながら、流入土砂のメカニズムについて検討を進めていく。その上で、より精度が高く、汎用性の高いモデルの構築を目指していきたいと考えている。また、ダム通砂への適用に向けた具体的な活用方法の検討を進めて行く所存である。

参考文献

- 1) Y Yamagami : Approaches for Integrated Sediment Flow Management at Dams In the Mimikawa River Basin , ICOLD, pp108-113, 2012
- 2) 宮崎県:耳川水系河川整備計画, 2009
- 3) 神谷誠一郎ほか:平成 17 年台風 14 号に伴う耳川水系の被害状況, 電力土木, No335, pp32-36, 2008
- 4) 宮崎県:耳川水系総合土砂管理計画, 2011.
- 5) 高橋保:土砂流出現象と土砂害対策, 近未来出版, pp10-44, 2006
- 6) 守利悟朗, 椎葉充晴, 堀智晴, 市川温:流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用, 水工学論文集, 第 47 卷, pp733-738, 2000
- 7) 九州電力株式会社 耳川水力整備事務所:耳川流域の土砂動態の概要, 第 2 回耳川水系総合土砂管理に関する技術検討会, pp1-7, 2010
- 8) 中津川誠・清水康行・荒井信行:現場のための水理学, 北海道開発局土木試験所河川研究室ホームページ ほか
- 9) 鮫島康之:河川支流における土砂流出特性に関する研究, 九州大学大学院工学研究院修士論文, 2014