

論文

貯水池堆砂量推定モデルの構築と気候変動に伴う堆砂速度増大率の推定
—熊本県緑川ダム貯水池を対象として—高橋 大地¹ 石川 忠晴² 道奥 康治³

Construction of a Numerical Model Reproducing Dam Sedimentation and Estimating of the Sedimentation Rate Increase with Climate Change in the Midorikawa Dam Reservoir, Kumamoto Prefecture

Daichi TAKAHASHI Tadaharu ISHIKAWA Kohji MICHIOKU

全球的気候変動に伴う豪雨増大によるダム堆砂量の増加が懸念されている。そこで本研究では熊本県にある緑川ダム貯水池を対象として降雨等の水文時系列データから貯水池堆砂量を推定するモデルを構築し、実測データと比較して再現性を検証した。続いて、21世紀末の降雨および流量倍率の推定値から堆砂量の倍率を推定したところ、RCP2.6に対して1.9倍、RCP8.5に対して3.2倍という結果を得た。このように大きな倍率の原因は、降雨強度の増大による崩壊地拡大と溪流における粗礫移動の活発化によると考えられた。

キーワード: ダム堆砂, 土砂生産, 溪床堆積物, 粗粒化, 気候変動

1. はじめに

わが国のダム計画では100年間の堆砂量を推計して水平堆砂の仮定の下に堆砂容量を確保することになっているが¹⁾、それを超えた後のことは想定されていない。実際、100年堆砂の原則に基づくダム計画が始まってからすでに60年以上が経過した現在、堆砂量がすでに計画値を上回るダムが少なからず出現している²⁾。

近年は堤体嵩上げによる貯水容量の増加³⁾、貯砂ダム設置による貯水池への土砂流入抑止⁴⁾、排砂バイパス⁴⁾や排砂ゲート⁵⁾による下流への土砂放流など、貯水容量の維持・回復のための試みがなされているものの、それらは恒久的な対策とはなり得ない。中谷⁶⁾が指摘したように、「ダム貯水池の堆砂問題は、医学がいくら進歩しても不老不死の法は見付からないのと同じ」であり、結局、延命治療の努力を継続するほかはないと言える。堆砂対策を必要とするダム貯水池は今後も増加すると考えられ、河川管理財源に占めるダムの維持管理費の割合は必然的に増加すると考えられる。そこ

で、国の財源の制約を踏まえて今後の堆砂対策の可能性と限界を確認する時期に至っていると思われる⁷⁾。

長期的視点からダム堆砂対策を講ずる際の最も重要な課題として、将来の気候変動の影響評価があげられる。IPCCの全球平均気温の上昇量予測（今世紀末で1.0～3.7℃）に基づく降雨量の増加倍率は1.1～1.3倍と考えられており⁸⁾、土砂生産に関わる一定規模以上の豪雨の発生頻度は確実に増加し、現状よりもさらに多くのダムで堆砂量が計画値を超える可能性がある。国土交通省では気候変動の影響を砂防計画や土砂管理に反映するために「気候変動を踏まえた砂防技術検討会」⁹⁾を令和2年1月に発足させ、気候変動が深層崩壊や崩壊性地すべりの規模・頻度に及ぼす影響や対策技術の検討を開始した。しかし、現状では気候変動が土砂の生産・輸送量に及ぼす影響に関する科学的知見は限定的であり、今後のダム管理や堆砂対策に適用するための技術開発が急がれる。

本研究では、過去の堆砂量の経年変動と各年の実績

¹株式会社東京建設コンサルタント 東京本社流域施設本部砂防部（法政大学大学院デザイン工学科 博士後期課程）

²東京工業大学 名誉教授（元法政大学客員教授）

³法政大学 デザイン工学部教授

降雨および貯水池流入量との関係を整理し、水文条件に対する堆砂量の依存性を再現する数値モデルを構築したうえで、将来の水文条件における堆砂量の変化を推定する。具体的には、IPCCの報告に基づく倍率で実績降雨を引き延ばし、気候変動がもたらす堆砂量の増分を試算した。本研究の対象は国直轄管理の緑川ダム貯水池（熊本県）であり、建設後すでに50年が経過しているが、現在までの堆砂量はすでに100年計画堆砂量の75%にまで達している。水文資料と堆砂量データは十分に蓄積されており、上流崩壊地面積の変動に関する資料分析事例もある¹⁰⁾。本研究では、まず、航空写真解析から得られた崩壊地面積の変動と降雨事象との相関性を明らかにしたうえで、崩壊地から生産される土砂量を推測する。次に、土砂生産源から緑川ダムに至るまでの溪流区間における土砂堆積・流下の過程をモデル化することにより、水文量と貯水池堆砂量との関係を定量的に表現する数値モデルを構築した。最後に、将来気候を想定して実績降雨時系列を引き延ばして土砂収支解析を実施し、気候変動が貯水池堆砂に及ぼす影響のオーダーを推定した。

2. 対象流域の概要

2.1 緑川ダムの諸元

緑川ダムは洪水調節、河川維持・灌漑用水の確保および発電を目的として熊本県の緑川水系緑川に1971年に完成した直轄管理の多目的ダムで、堤高76.5m、総貯水容量 $46 \times 10^6 \text{ m}^3$ の重力式コンクリートダムである。水源は北部の阿蘇カルデラ外輪山と南部の九州山地に拡がり、流域面積は 359.0 km^2 である。

2.2 地形、地質状況

国土地理院の10mメッシュ基盤地図情報数値標高モデル¹¹⁾を基に作成した傾斜量の分布を図-1に、国土数値情報¹²⁾を基に作成した緑川ダム流域における表層地質分布を図-2に示す。図-2には航空写真から判読された崩壊地箇所を●で示している。なお、最新の航空写真は2016年（熊本地震後）に撮影されているが、本流域では熊本地震により降雨以外の誘因で崩壊地が一時的に増加したので、2013年の写真を使用した。

本流域は東西方向に走る臼杵八代構造線によって南北方向に二分されている。構造線以北は全体的に開析

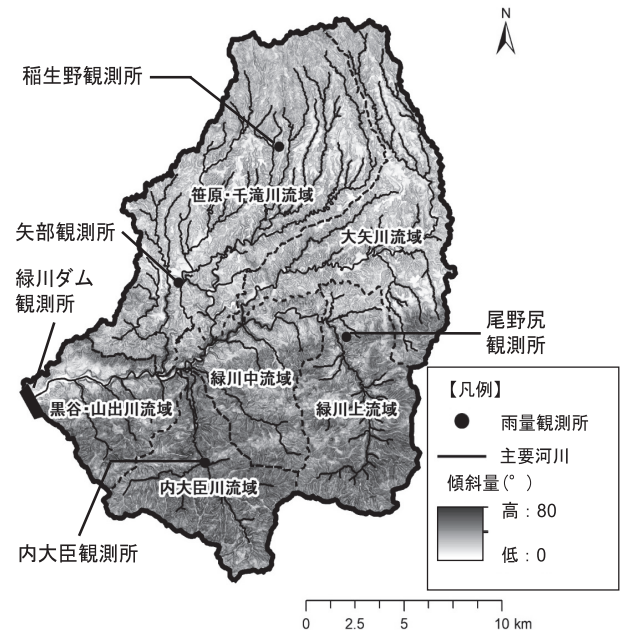


図-1 緑川ダム流域における傾斜量の分布

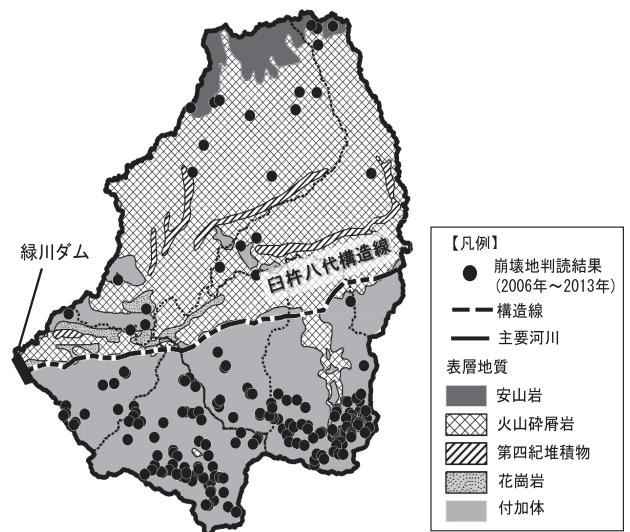


図-2 緑川ダム流域の表層地質分布

が進み、丸みを帯びた火成岩からなる阿蘇火山帯の山麓地である。傾斜量はおおむね $10^\circ \sim 15^\circ$ で、なだらかな地形となっている。一方、構造線以南にはジュラ紀付加体（海底の堆積物等が海洋プレートの沈み込みにより大陸に付加された地質体）が拡がり、 30° 以上の傾斜量の急峻地形が大部分を占めている。

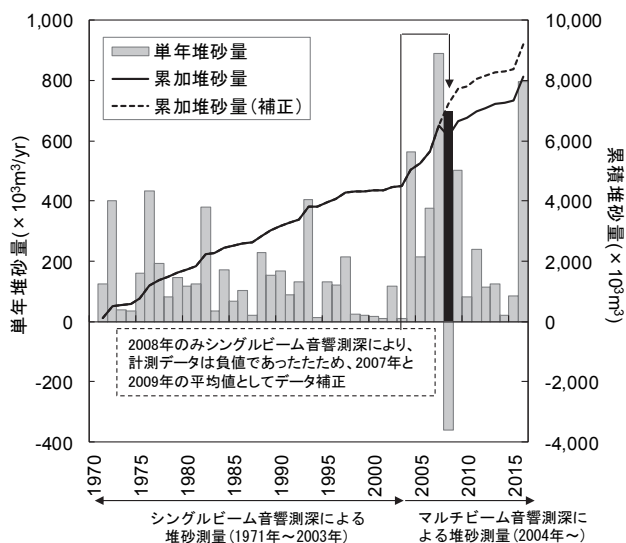


図-3 緑川ダム貯水池における実績堆砂量の推移

2.3 緑川ダム貯水池の堆砂状況

図-3 に緑川ダム竣工後の各年堆砂量実績値を灰色の棒グラフで表し、その経年累積値を実線で示している。2008年の堆砂量が負値を示しているが、貯水池内での採石・浚渫の実績はなく堆砂量の減少は考えにくいことから、次に述べる深浅測量方法の変更に起因している可能性が高いと思われる¹³⁾。ダム竣工後から2003年まではシングルビームの音響測深により堆砂量を推定していたのに対し、2004年以降ではマルチビームを用いる測深法に変更された。ところが2008年だけは再びシングルビーム測深法が一時的に採用されている。その理由は明確でない。また2つの測深法の誤差については検討されていない。そこでやや便宜的だが、本研究では2008年の堆砂量を2007年と2009年の堆砂量の平均値と仮定して、同図の黒塗りの棒グラフのように修正した。その結果、2008年以降の累積堆砂量は点線のように変更された。以下の解析ではこれらを実績データとみなして用いた。

緑川ダム貯水池の計画堆砂量は $10.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ とされている。一方、竣工後46年を経た2016年までの累積堆砂量は $8.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ となっており、すでに計画堆砂量の75.0%に達している。1年あたりの堆砂量は、最大 $890 \times 10^3 \text{ m}^3$ (2007年) から最小 $8.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ (2001年) まで100倍以上の幅で変動している。この大きな変動幅から、年ごとの豪雨イベントの大小・多寡が土砂生

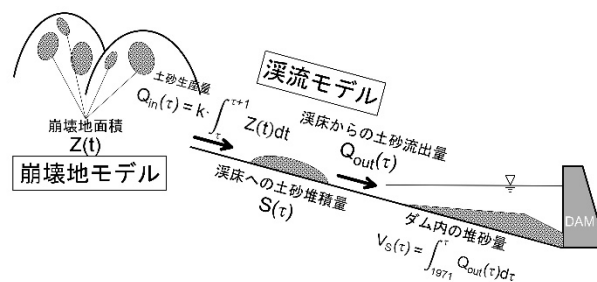


図-4 ダム堆砂量を予測するための崩壊地モデルと溪流モデル

産量および溪流での輸送量に大きな影響を及ぼしていると推察される。

3. 貯水池土砂流入モデルの構成

3.1 モデルの概要

河川流域における土砂生産の起源は主に上流山地の崩壊地であり¹⁴⁾、溪流における堆積・再移動を繰り返した後に¹⁵⁾、貯水池に流入すると考えられる。しかし土砂生産の活発な流域には崩壊地が分散して多数存在し、また溪流も高次の分岐から構成されている。このような土砂の生産と移動に介在する複雑な土砂動態を記述するために、高秀ら¹⁶⁾や江頭ら¹⁵⁾は分布型あるいは水理学的な土砂流送モデルを開発し、それらの研究成果が流域の土砂管理計画等に反映されている。これらは流砂過程の力学原理に基づき土砂収支が精緻に記述される点で優れている一方、河道諸元や流域土壌・河床材料の粒度分布等に関する詳細な調査と豊富な測量データを要するため、ダム流域の管理環境が必ずしも十分ではない多くの流域へ広く適用するためには課題が残る。そこで本研究では、水文流出解析における単位図法¹⁷⁾や貯留関数法¹⁸⁾に代表される集中定数型モデルを用いることとし、図-4に示すように、崩壊地面積の変動を表す「崩壊地モデル」と、渓床での堆積と移動を表す「溪流モデル」を直列配置する土砂流出モデルを構築した。

崩壊地モデルは、個々の崩壊地の拡大・縮小を記述するのではなく、流域内崩壊地の総面積の増減を表現する。つまり流域での土砂生産速度が崩壊地総面積に比例すると仮定する。秋山ら^{10,19)}は、緑川ダム流域と山形県の寒河江ダム流域を対象にして、航空写真解析

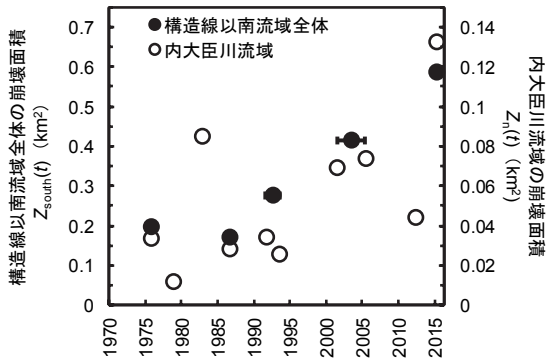


図-5 崩壊地面積の経年変化 (秋山ら¹⁰⁾)

から崩壊地面積変動を推定し、降雨時系列との関係をモデル化している。本研究では寒河江ダム流域における彼らの検討結果¹⁹⁾を参考にして崩壊地モデルを構築した。

溪流モデルは、溪床での堆積・流動過程を貯留関数の概念に基づき表し、崩壊地モデルから得られる生産土砂量の時系列を入力として貯水池への流入土砂量を出力するモデルである。ただし溪床堆積土砂の粒度変化が土砂輸送の律速因子となることが知られているので²⁰⁾、その効果を貯留関数法の流出関数の設定において考慮することとした。

3.2 崩壊地モデル

(1) 緑川ダム流域の崩壊地面積の推移

緑川ダム流域の航空写真撮影は不定期であり、また地域的に偏りがある。そこで秋山ら¹⁰⁾は、まず撮影頻度の比較的高い白杵八代構造線以南の流域の崩壊地面積の推移を検討した。図-5は、彼らが推測した構造線以南の崩壊地面積 Z_{South} と、その一部である内大臣川流域における崩壊地面積 Z_n の変化を示している。なお図の左右の縦軸は、両流域の面積比が5:1であることを考慮して設定している。

内大臣川流域では撮影頻度が特に高く、崩壊地の増減の様子が読み取れる。一方、構造線以南の流域全体では変動の詳細は読み取れない。しかし Z_{South} の増加傾向は Z_n とほぼ一致することから、 $5 \times Z_n \Rightarrow$ 構造線以南の崩壊地面積 Z_{South} とみなして差し支えないと思われる。

一方、前述のように、構造線以北では南側より地質・地形が安定であるため、崩壊箇所数は南側の約1/6にとどまっている(図-2参照)。仮に個々の崩壊地の面積が

南北で同程度であるとすれば、構造線以北の崩壊地面積は $Z_{North} = Z_{South} / 6$ と概算できる。以上から、緑川ダム流域の崩壊地総面積の変化 $Z(t)$ を内大臣川流域の航空写真から得られた崩壊地面積の変化 $Z_n(t)$ から次式で推算することとした。

$$Z(t) = \frac{7}{6} \{5 \times Z_n(t)\} \approx 5.8 \cdot Z_n(t) \quad (1)$$

(2) 崩壊地モデルとその再現性

秋山ら¹⁹⁾は、崩壊地の発生・拡大を規定する降雨因子として、表層地盤が飽和に至る降雨量(飽和雨量)と、斜面崩壊の発生・拡大を引き起こす時間雨量強度(斜面崩壊雨量強度)の2つを考えた。以下、それぞれについて、緑川ダム貯水池流域のデータを用いて考察する。

a) 表層地盤の飽和雨量

一般に、流域飽和雨量は降雨イベントごとの累積雨量とそれに対応する累積流出高(流量÷流域面積)との相関関係から推定される。すなわち、降雨初期には損失雨量のために[雨量-流出高]曲線の傾きが1より小さく、地盤が飽和状態に至ると[雨量]=[流出高]となって曲線の傾きが1になることを利用し、[雨量-流出高]曲線の変曲点から飽和雨量が推定される。

そこでまず、緑川ダム竣工後の45年間において、ダム流入量のピーク値が500 m³/s以上の出水イベントのうち降雨波形と流量波形の対応が明確な28イベントを抽出した。続いて6, 9, 12, 24, 48時間に対する累積降雨量と累積流出高との相関性を調べた結果、図-6に示すように12時間雨量の場合に最も高い相関性が見られた。同図より、飽和雨量を $R_{sa} = 160 \text{ mm}$ と定め、

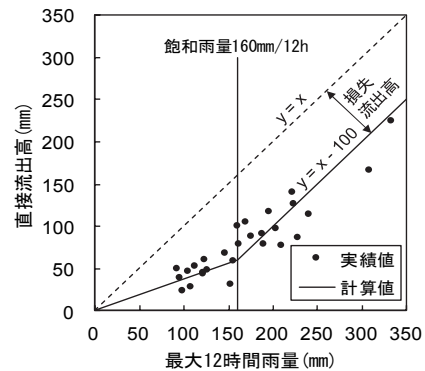


図-6 飽和雨量の検討結果

崩壊地面積拡大の生起条件量を $R_{12}(t) > 160 \text{ mm}$ と設定した。添え字の 12 は 12 時間雨量であることを示している。

b) 斜面崩壊雨量強度および崩壊地面積との相関

斜面崩壊は比較的短時間の豪雨がトリガーとなって発生すると考えられるが、その時間スケールと強度の閾値は未知数である。そこで前述の 28 の降雨イベントの降雨時系列 $R_j(t)$ から、崩壊地の拡大を規定する j 時間雨量強度の時系列 $\overline{R_j(t)}$ を多数生成し、計算から得られる崩壊地面積と実績崩壊地面積との相関を調べることにした。

$$\begin{aligned} \overline{R_j(t)} &= R_j(t) && \text{if } R_j(t) \geq R_{jc} \\ \overline{R_j(t)} &= 0 && \text{if } R_j(t) < R_{jc} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに R_{jc} は、崩壊地面積拡大の j 時間降雨の閾値である。

秋山ら¹⁹⁾と同様に、崩壊地面積の時間変化を以下の式で表す。

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) \cdot e^{-\alpha \Delta t} + \beta \cdot \overline{R_j(t)} \quad (3)$$

ここに Δt は計算時間ステップ、 $Z(t)$ は時間 t における崩壊地面積である。また α は植生回復による崩壊地面積縮小速度を表す係数、 β は崩壊地面積増大速度を表す係数である。

次に、式(2)の j を 1, 3, 6, 9, 12 hr とし、それぞれについて R_{jc} と式(3)の α および β を系統的に変化させて $Z(t)$ の再現性を調べたところ、最適な組み合わせとして $j = 6 \text{ hr}$, $R_{jc} = 90 \text{ mm}$, $\alpha = 3.7 \times 10^{-3}$, $\beta = 5.0 \times 10^{-4}$ が得られた。これらを用いて再現した緑川ダム流域の崩壊地面

積 $Z(t)$ を実績値とともに図-7 に示す。森林植生の回復に関する代表的な調査例として、塚本ら²¹⁾は植生回復速度を図-7 よりもかなり小さく評価している。塚本ら²¹⁾は約 10 年の比較的長い撮影間隔で収集された空中写真に基づいて植生回復を評価しているのに対し、本研究では空中写真の撮影間隔が 2 年~7 年と短く、しかも崩壊地の変動実績に対応するように日単位の時間分解能で森林植生の消長をモデルにより再現した。すなわち、塚本ら²¹⁾が示した植生回復速度は 10 年オーダーの移動平均値から推算されるのに対し、本モデルでは植生回復を日単位であらわし塚本ら²¹⁾よりも植生回復速度の瞬間値が必然的に大きく評価される取り扱いとなっている。

4. 溪流モデル

4.1 モデルの考え方

土砂は崩壊地で生産され、溪流区間で移動・堆積を繰り返しながらダム貯水池へ輸送される。溪流区間においては、一次~二次~三次谷等々の分合流、瀬・淵など流れの緩急、斜面や流路内の倒木・夾雑物、河床・側岸侵食による流路変動など、きわめて複雑な流送・流砂過程から構成される。これら全てを水理学的にモデル化した複雑系では、大量パラメータ群の全てを物理的根拠に基づいて客観的に同定することはきわめて困難である。溪流区間の土砂移動を検討した代表的な研究としては、先述の高秀ら¹⁶⁾、江頭ら¹⁵⁾や高橋ら²²⁾などが挙げられる。いずれも流出・流路系のモデル化により対象流域の土砂生産を再現することに成功している。しかし、河道諸元・土砂粒度などに関する詳細な情報を得るためには集中的な特定観測を要し、さまざまな管理環境にあるダム流域に必ずしも広く適用できないことが懸念される。

本研究では、流砂管理という実務課題を念頭において流砂現象の精緻な記述に拘泥することなく実用性を重視し、溪流区間の事象を 1 つのコントロール・ボリューム内で包括的に捉えてパラメータを集中化することにより予測モデルの簡素化を図った。まず、溪流区間の流砂過程に関して、溪流コントロール・ボリューム内の土砂貯留量が大きいほどコントロール・ボリュームから貯水池へ流出する土砂量は増加すると仮定し、

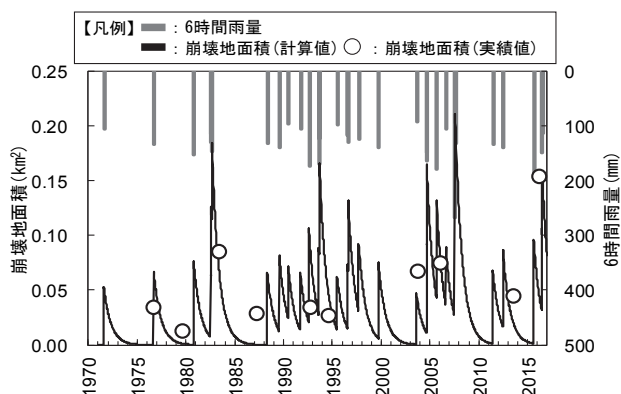


図-7 崩壊地モデルによる再現性検証

貯留関数法のアナロジーを用いて貯留量と流出量を単調増加の関係であらわす土砂貯留関数を導入した。次に、溪流コントロール・ボリュームから流出する土砂量は堆積土砂の粒度組成に規定されると考え、堆積土砂の粗粒度（本文では「粗粒化指数」と記す）の概念を導入した。すなわち、降雨強度（または流量）が所定の上限値を越える場合には堆積土砂の Armor coat が崩壊して土砂流出量が急増すること、さらに降雨強度（または流量）が所定の下限値を下回る場合には堆積土砂の細粒成分が選択的に流出して堆積層の粗粒化が進み、土砂流出が抑制されることを記述できるように土砂貯留関数パラメータを設定した。

4.2 土砂貯留関数

上述したように、溪流における複雑な土砂輸送過程を表現するため、本研究では、図-4 に示したように、土砂貯留機能を有する一つの空間として包括的に捉え、土砂収支を貯留関数で表現することにする。

$$\frac{d}{dt}S(\tau) = Q_{in}(\tau) - Q_{out}(\tau) \quad (4)$$

ここに τ は土砂収支を記述する時間で年単位、 $S(\tau)$ は第 τ 年における溪流空間での土砂堆積量、 $Q_{in}(\tau)$ は第 τ 年において崩壊地から溪流空間に流入する土砂量、 $Q_{out}(\tau)$ は第 τ 年に貯水池に流入する土砂量である。解析時間単位を1年とするのは、貯水池堆砂量の測量間隔が1年だからである。

したがって、貯水池内の堆砂量 $V_s(\tau)$ は溪流からの流出土砂量 $Q_{out}(\tau)$ を用いて次式で表される。

$$V_s(\tau) = \int_{1971}^{\tau} Q_{out}(t) dt \quad (5)$$

積分の開始時間（1971）は緑川ダムの竣工年である。また $Q_{in}(\tau)$ は式(3)で得られる崩壊地面積 $Z(t)$ の1年あたりの累積値に比例するとして次式で表す。

$$Q_{in}(\tau) = k \cdot \int_{\tau}^{\tau+1} Z(t) dt \quad (6)$$

ここに k は崩壊地面積 $Z(t)$ を土砂量に換算するための係数で、年間土砂流入高 [m/year] と定義する。

貯留関数の概念に基づき、 $Q_{out}(\tau)$ を次式で表す。

$$Q_{out}(\tau) = C \cdot S(\tau)^p \quad (7)$$

ここに C と p はモデルパラメータである。通常の降

雨流出の貯留関数法では C を一定とするが、土砂流出においては溪流区間の流量に依存して変化すると考え、以下のように設定する。

$$C = C_1 \cdot f(\tau) \quad (8)$$

ここに C_1 は定数、 $f(\tau)$ はその年の流量と堆積土砂の状況に応じて 0~1 の間で変化するものとする。大きな出水が発生する年、あるいは堆積土砂が細粒径からなる年には $f(\tau)$ は 1 に近くなり、顕著な出水がない年、あるいは堆積土砂が粗粒径からなる年には 0 に近い値をとるものとする。

まず $f(\tau)$ が各年の大きな出水イベントの有無に依存すると考え、その指標として式(2)で設定した崩壊地面積拡大を規定する降雨時系列と同じ形式の $\widetilde{R}_j^*(t)$ を用いる。

$$\begin{aligned} \widetilde{R}_j^*(t) &= R_j(t) && \text{if } R_j(t) \geq R_{jc}^* \\ \widetilde{R}_j^*(t) &= 0 && \text{if } R_j(t) < R_{jc}^* \end{aligned} \quad (9)$$

ここに j は雨量強度算定時間、 R_{jc}^* は j 時間降雨の閾値である。後に述べる溪流モデルのパラメータ同定の結果、 $j=3$ hr、 $R_{jc}^*=20$ mm となった。 $\widetilde{R}_j^*(t)$ の1年積算値を $r_1(\tau)$ とし、 $r_1(\tau)$ が大きくなると $f(\tau)$ は 1 に漸近し、 $r_1(\tau)$ が小さいと 0 に漸近する。そのような関数形として次式を仮定する。

$$r_1(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+1} \widetilde{R}_j^*(t) dt \quad (10)$$

上記のように、 $f(\tau)$ は 0~1 の範囲で降雨量 $r_1(\tau)$ とともに単調に増加する関数であることが望ましい。ここではパラメータ数を最小限に抑えるために、 $r_1(\tau)$ が小さい場合に $f(\tau) \rightarrow 0$ へ、 $r_1(\tau)$ が大きい場合に $f(\tau) \rightarrow 1$ へ、それぞれ $f(\tau)$ が漸近する最も簡単な関数形として次式を使用する。

$$f(\tau) = \frac{\tanh\{a(r_1(\tau) - r_c(\tau))\} + 1}{2} \quad (11)$$

ここに a は関数の幅を規定するパラメータである。また $r_c(\tau)$ は $f(\tau) = 0.5$ となる $r_1(\tau)$ であり、以降では限界積算雨量という。

図-8 に式(11)の関数形を示す。これからわかるように、 $r_1(\tau) = r_c(\tau)$ で $f(\tau)$ の増加率は最大となり、その両側で 0 および 1 に漸近する。式(7)~式(11)より、 $r_1(\tau) > r_c(\tau)$ となる年には貯水池への土砂流入量が大きく、 $r_1(\tau) < r_c(\tau)$

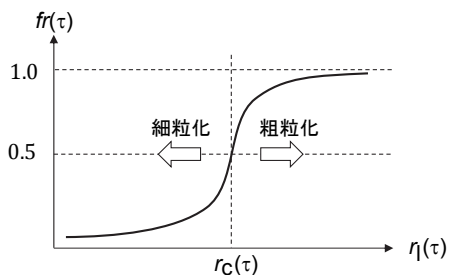


図-8 $f_r(\tau)$ と $r_c(\tau)$ の関係

となる年には小さくなるのがわかる。

4.3 限界積算雨量 $r_c(\tau)$

前述の $r_c(\tau)$ は、溪床の堆積土砂の粒度によって変化すると考えられる。つまり溪床が粗い土砂で覆われると動きにくくなるため $r_c(\tau)$ は増加し、細かい土砂の場合は減少する。なお粗い土砂で覆われることを Armor coat 化という。そこで第 τ 年における Armor coat 化の指標を $A_r(\tau)$ と書き、以降では粗粒化指数と呼ぶ。

$A_r(\tau)$ の増減によって $r_c(\tau)$ は増加または減少するが、その変動範囲は限られていると考えられるので、次の関係式を仮定する。

$$r_c(\tau) = (r_{c,max} - r_{c,min}) \{1 - e^{-A_r(\tau)}\} + r_{c,min} \quad (12)$$

ここに $r_{c,min}$ と $r_{c,max}$ は $r_c(\tau)$ の下限値と上限値である。

さて、 $A_r(\tau)$ はその年の出水状況によって変化すると考えられる。貯水池への流入量のうち土砂移動を引き起こすと思われる $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の時系列 $Q(t)_{>100}$ の年間積算値 $V_Q(\tau)$ を指標として $A_r(\tau)$ の変化を検討することとした。

$$V_Q(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+1} Q(t)_{>100} dt \quad (13)$$

$V_Q(\tau)$ による $A_r(\tau)$ の変化は定性的には図-9 のようであると考えられる。すなわち、 $V_Q(\tau)$ が非常に小さい年には溪床粒度に変化がなく、ある程度大きくなると細粒分のみが洗い流されて Armor coat 化が進むため $A_r(\tau)$ が増加し、さらに大きくなると Armor coat が破壊されるので $A_r(\tau)$ は減少する。この3領域を区分する $V_Q(\tau)$ の値を図-9 では V_{Q1} , V_{Q2} と書いている。以上の変化を差分式で表現すると表-1 のようになる。ここで γ_1 と γ_2 は溪床堆積土砂の粗粒化および細粒化における $A_r(\tau)$ の変化倍率である。

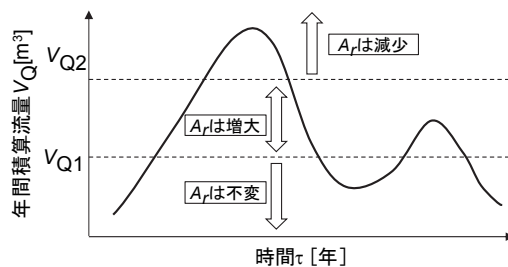


図-9 年間流量積算値 V_Q と粗粒化指数 A_r の変化

表-1 年間流量積算値 $V_Q(\tau)$ に伴う $A_r(\tau)$ の変化の仮定

条件	A_r 値の変化	数式
$V_Q(\tau-1) < V_{Q1}$	A_r 不変	$A_r(\tau) = A_r(\tau-1)$
$V_{Q1} < V_Q(\tau-1) < V_{Q2}$	A_r 増加	$A_r(\tau) = \gamma_1 A_r(\tau-1) \quad \gamma_1 > 1$
$V_{Q2} < V_Q(\tau-1)$	A_r 減少	$A_r(\tau) = \gamma_2 A_r(\tau-1) \quad 0 < \gamma_2 < 1$

4.4 モデル・パラメータの同定手順と同定結果

前節までに述べてきた溪流モデルは多数のモデルパラメータを含んでおり、それらの組み合わせを決定することは容易でない。そこで以下では、観測データと物理的考察に基づき各パラメータの数値範囲を仮定したうえで、適当なパラメータの刻み幅で多数のシミュレーションを行い、パラメータの最適な組み合わせを求めた。

(1) 崩壊地の年間土砂流入高 k

本研究で対象とする土砂生産は表層崩壊によるものであり、このモデルパラメータは年間の崩壊土砂、既崩壊地からの侵食高に相当する。溪流堆積土砂量 $S(\tau)$ は時間的に変化するが、長期的に見れば総流入土砂量（崩壊地生産土砂量）は総流出土砂量（貯水池流入土砂量）におおむね等しいと思われる。さもないと長期間で溪床の上昇・下降が顕著になってしまうからである。そこで次式を仮定する。

$$\begin{aligned} [VS_{in} = \sum_{1971}^{2015} Q_{in}(\tau) = k \cdot \sum_{1971}^{2015} Z(\tau)] \\ \approx [VS_{out} = \sum_{1971}^{2015} Q_{out}(\tau) = 8.4 \times 10^6 \text{ m}^3] \end{aligned} \quad (14)$$

以上から $k \approx 0.003 \text{ m}$ となる。

(2) 溪床土砂堆積土砂量の初期値 (S_{1971}) および土砂貯留関数のパラメータ (C, p)

ダム建設時点においても溪床には一定厚さの堆積層がすでに形成されている。これに対応する S_{1971} を過少に設定すると、条件によっては式(4)において $Q_{out}(\tau) > S(\tau)$

となる瞬間が生じ、溪床が地山よりも低下するという非現実的な事象をあらわすことになる。この点を踏まえ、 $S_{1971}=1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の下で予備解析を行ったところ、 $C=0.001$ の場合に $1.0 \leq p \leq 1.4$ 、 $C=0.01$ の場合には $1.0 \leq p \leq 1.3$ でなければならないことがわかった。なお、 S_{1971} の妥当性を以下のようにチェックした。緑川ダム貯水池流域の1~3次谷の総延長は1,420 kmなので、上記の S_{1971} をこの距離で除すと $850 \text{ m}^3/\text{km}$ となり、平均溪床幅を2.0 mと仮定すれば、溪床での平均堆積層厚は40 cmとなる。したがって上記のように設定された S_{1971} は現実的なオーダーにあると判断される。

一方、式(8)より、 C は $f_r(\tau)$ にも依存することがわかる。本モデルでは $f_r(\tau)$ の変動幅が大きいほど粒度が $Q_{out}(\tau)$ に及ぼす影響が大きくなりあらわれるため、 $f_r(\tau)$ は可能な限り大きい値を取り得るように設定されるべきである。したがって、 $f_r(\tau)=1$ としたときの C_1 をパラメータ範囲とした。以降では $0.001 \leq C_1 \leq 0.01$ 、 $1.1 \leq p \leq 1.4$ の範囲でパラメータ同定作業を進めた。

(3) 堆積土砂の粒度変化に係る積算流量の閾値 (V_{Q1}, V_{Q2})

図-3の実績堆砂量のグラフで特に大きな変動がみられる1990~2010年の貯水池堆砂量 $V_s(\text{m}^3/\text{yr})$ のデータを拡大し、年間積算流量 $V_Q(\text{m}^3/\text{yr})$ とともに図-10に示す。1997~2003年には V_Q が小さく、 V_s は増加していない。図-7の実線が示すように、この期間の崩壊地面積は多少小さいものの一定規模に維持されていた。このことから、同期間の前半に溪床堆積土砂の粗粒化が進み、

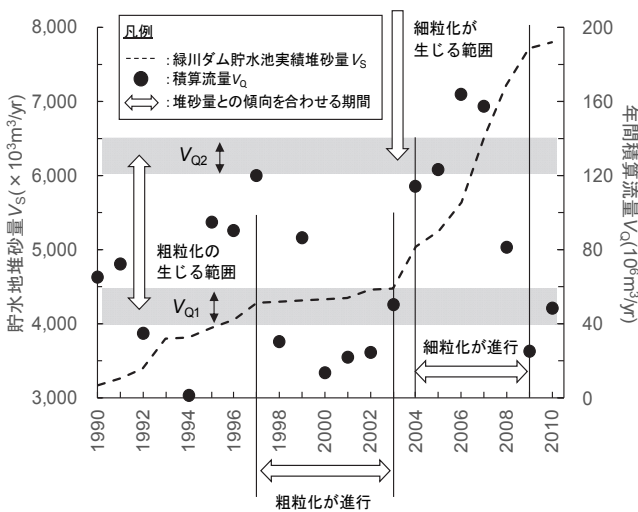


図-10 積算流量 (V_{Q1}, V_{Q2}) 閾値の検討条件

表-2 同定されたモデルパラメータ

パラメータ	検討範囲	刻み	最終値
k	0.003	0.001	0.003[m]
C_1	0.001 ~ 0.010	0.001	0.008
p	1.1 ~ 1.4	0.1	1.4
V_{Q1}	40×10^6 ~ 60×10^6	10×10^6	$60 \times 10^6 [\text{m}^3/\text{yr}]$
V_{Q2}	120×10^6 ~ 140×10^6	10×10^6	$140 \times 10^6 [\text{m}^3/\text{yr}]$
γ_1	1.1 ~ 1.3	0.1	1.3
γ_2	0.1 ~ 0.9	0.1	0.4
a	0.001 ~ 0.010	0.001	0.004
$r_{c \cdot \max}$	800 ~ 1200	50	1100[mm]
$r_{c \cdot \min}$	0 ~ 300	50	250[mm]

その後は粗粒状態が維持され、土砂流出が抑制されていた可能性が高い。

これに対し、2004~2009年には V_Q が大きく、 V_s が急増している。このことから同期間にはArmor Coatが破壊され、大量の土砂が短期間に貯水池へ流入した可能性が高いと考えられる。そこで、同図に示すように $V_{Q1} = 40 \sim 60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、 $V_{Q2} = 120 \sim 140 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ の範囲に設定することとした。

5. パラメータの最終同定結果および考察

表-2に示す範囲と変動幅でパラメータの値を変化させ、式(6)~(13)に基づく感度解析を実施し、貯水池堆砂量の経年変化 $V_s(\tau)$ を最も良く説明する値の組み合わせを求めた。パラメータ調整の最終結果を表-2の右端に示している。これらの値を用いてシミュレーションを実施した結果と実績堆砂量を図-11に比較している。なお、溪流堆積土砂量と粗粒化指標 A_r の初期値は、 $S_{1971} = 1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $A_{r1971} = 1.1$ としている。シミュレーション結果は実測結果をよく再現していることがわかる。

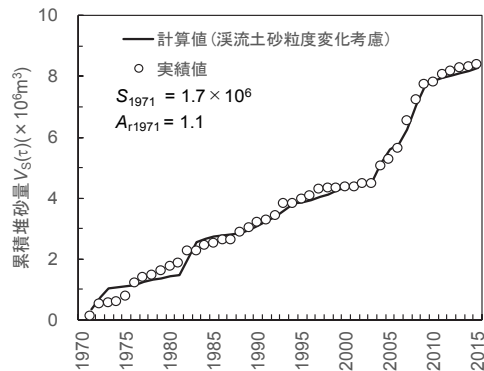


図-11 累積堆砂量 $V_s(\tau)$ の解析結果と実測値の比較

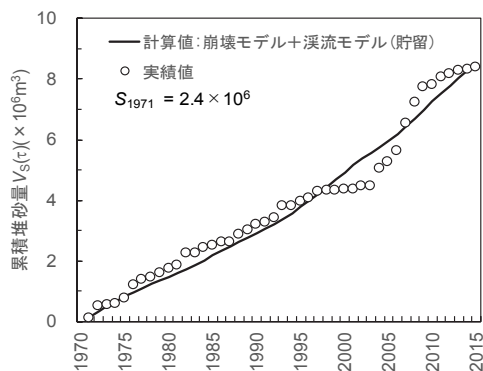


図-12 溪流モデルの貯留関数のみを考慮した解析結果

しかし以上のモデルは多数のパラメータを含み複雑であり、特に Armor coat の影響評価に関する部分（式(8)および図-8以降）については仮定の妥当性の精査が今後必要とされる。そこで、この部分を省略し、以下の2つの簡略モデルでもシミュレーションを行い、実績堆砂量と比較した。

一つは式(8)において貯留関数の係数Cを一定としてキャリブレーションし、パラメータの最適な組み合わせを定めた場合で、その結果を図-12に示す。1990年以降の細かな脈動は表現できないものの、1993年を境にして堆砂速度が増加している傾向は表されている。いま一つは貯留関数法を用いず、 $Q_{out}(t) \equiv Q_{in}(t)$ とした場合で、要するに崩壊地生産土砂量のみから貯水池堆砂量を求める方法である。その結果を図-13に示す。定係数の貯留関数を挿入した場合（図-12）よりも短期間変動が顕著であり、降雨による崩壊地変動の影響が強く表れている。一方、定係数の貯留関数法では堆砂量の変動が平滑化されているようである。

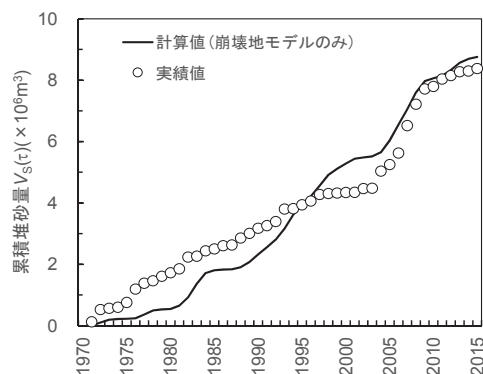


図-13 $Q_{out}(t) \equiv Q_{in}(t)$ とした場合の解析結果

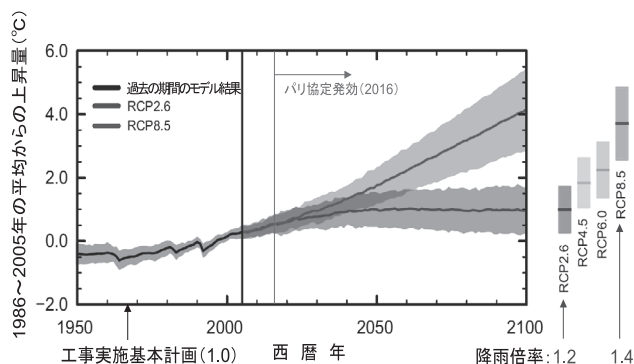


図-14 IPCC-AR5による全球平均気温の将来予測²³⁾

表-3 引き伸ばし倍率

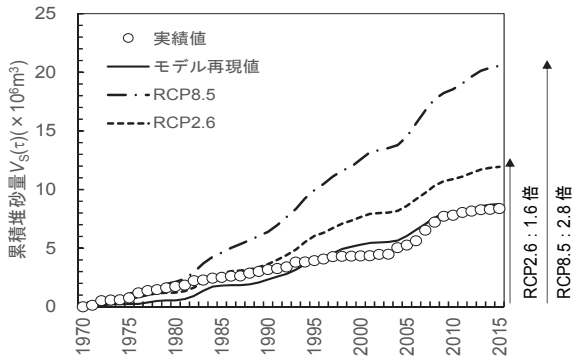
シナリオ	RCP2.6	RCP8.5
雨量強度	1.1	1.3
流量	1.2	1.4

6. 気候変動が貯水池堆砂量に及ぼす影響

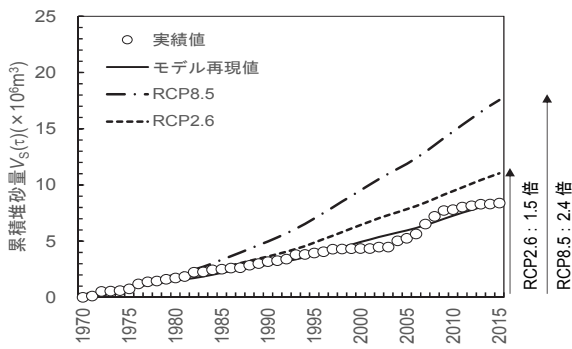
図-14はIPCC第5次報告書に記載される全球平均気温の将来予測結果²³⁾を示している。4つの温暖化ガス排出シナリオに基づく21世紀末の気温は2005年から1.0~3.7°C上昇するとされている。図中の2本のグラフにおいて、RCP2.6はパリ協定批准国が予定通りCO₂の排出規制を実現した状況に相当し、RCP8.5は排出規制を実施しない場合の温暖化シナリオに相当する。現実には両者の中間値をとると考えられている。海洋に囲まれているわが国では海水面の上昇により降雨量が増加すると考えられ、国土交通省は表-3に示す降雨変化倍率と流量変化倍率の予測に基づく治水計画の改定を検討中である。しかし本稿で述べているように、ダム貯水池の堆砂速度は降雨および流量によって変化するので、貯水池容量の減少も同時に見込む必要がある。

そこで本章では、緑川ダム貯水池における雨量および流量の実績時系列に表-3に示す倍率を乗じてシミュレーションを実施し、気候変動に伴うダム堆砂速度の増加倍率を検討した。なお、近年の実績雨量にはすでに気候変動の影響が含まれている可能性を否定できない²⁴⁾が、本研究では便宜的な全感度分析として対象期間内に降雨倍率を乗じることにより堆砂量に及ぼす降雨量の変化を評価した。

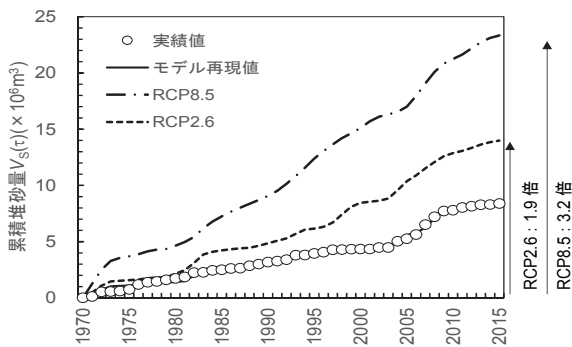
解析結果を図-15に示す。図-15(a)は貯留関数法を用



(a) $Q_{out}(\tau) \equiv Q_{in}(\tau)$ とした場合 (Case(1))



(b) 貯留関数のみを考慮した場合 (Case(2))



(c) 溪床粒度変化まで考慮に入れた場合 (Case(3))

図-15 気候変動を考慮した累積堆砂量 $V_s(\tau)$ の推定

表-4 計算最終年の貯水池堆砂量増加倍率

ケース	RCP2.6		RCP8.5	
	累積堆砂量 (10^6 m^3)	倍率	累積堆砂量 (10^6 m^3)	倍率
Case(1)	11.9	1.6	20.5	2.8
Case(2)	11.0	1.5	17.6	2.4
Case(3)	14.0	1.9	23.3	3.2

いずれに $Q_{out}(\tau) \equiv Q_{in}(\tau)$ とおいた場合、図-15(b)は溪床粒度変化を考慮せずに定係数の貯留関数を用いた場合、図-15(c)は粒度変化まで考慮に入れた場合である。以降では Case(1)~(3)という。各ケースについての計算最終

年の貯水池堆砂量の増加倍率を表-4 にまとめている。いずれの場合も、表-3 に示した降雨および流量倍率よりかなり大きくなっていることがわかる。この原因は、降雨の増大により式(2)に示した崩壊地面積拡大の閾値を超える頻度が高くなり、流入土砂量が増加することにある。また、Case(3)の変化倍率が特に大きい原因は、流量増加に伴い Armor coat の破壊される頻度が高まり、流出土砂量が増加することにある。溪流モデルでは流出土砂量が大きいほど、式(4)により土砂貯留量が減少するが、それよりも Armor coat の破壊にともなう $f(\tau)$ の増加の影響が大きいため、Case(3)の方が Case(2)よりも累積堆砂量は大きく評価されている。

RCP8.5 と RCP2.6 の堆砂量増加倍率の中間値は、Case(1), Case(2), Case(3)でそれぞれ 2.2 倍, 2.0 倍, 2.6 倍となる。緑川ダムにおける現在の堆砂量は竣工後約 50 年で 100 年計画堆砂量の 75% に達していることから、ダム計画時に想定された堆砂速度に対する倍率は、それぞれ 3.3 倍, 3.0 倍, 3.9 倍となる。逆数をとれば、以前は 100 年と考えられた時間が 25 年~33 年になるわけである。したがって、今後の治水計画およびダム運用計画においては、堆砂量の増加に伴う有効貯水容量の見直しを行う必要があると思われる。

7. おわりに

気候変動による豪雨増大により貯水池堆砂速度の増大が懸念されるが、そのオーダーを確認するには降雨と堆砂量の関係性を定式化する必要がある。そこで本研究では、秋山ら^{10,19)}が示した上流域崩壊地面積の降雨依存性のモデルに溪流での堆積・流動モデルを加えて、貯水池流入土砂量を降雨および流量時系列から推算できるようにした。その結果は、緑川ダム貯水池での堆砂量時系列をかなりの精度で再現した。

続いて、国交省が提示している 21 世紀末の降雨および流量倍率⁸⁾を仮定して堆砂速度の増加倍率を推定したところ、RCP2.6 に対して 1.9 倍、RCP8.5 に対して 3.2 倍という結果を得た。この大きな増加の原因の一つは、飽和雨量および斜面崩壊雨量強度の雨量閾値を超える降雨の増加にある。また、これらの値は崩壊地モデルのみの Case(1)からも 1.6~2.8 倍になっているが、その原因は降雨および流量の増大により溪流に堆積する粗

礫の移動が活発化するためにあると考えられる。なお、平成30年3月に国土交通省が提示したダム貯水池土砂管理の手引き(案)¹³⁾では、「応急的な対策」と「恒常的な対策」に区別して堆砂対策を講ずるべきであることが記載されている。前者はおおむね深層崩壊や地震による大規模崩壊などがもたらす異常堆砂への対策と考えられる。一方、本研究では、降雨による表層崩壊土砂の溪流・河道への流送、溪流堆積土砂の細粒化や粗礫層の破壊にともなう「想定内」の堆砂を対象としており、異常堆砂を対象とするものではない。すなわち、本研究は堆積土砂の定期掘削や貯砂ダムの設置など「恒常的な対策」に供し得るものであり、「応急的な対策」に適用できるものではない。現時点で科学的予測が困難な「異常堆砂」に関しては、発災後の集中観測などに基づく個別で特別な管理が必要であると考えている。

本研究では、降雨時系列から土砂生産量を推定する「崩壊地モデル」と河道区間の土砂の貯留・輸送過程を記述する「溪流モデル」を組み合わせ、一定の広がりを持つ流域内の土砂収支から堆砂量を予測する手法を提案した。特に、できるだけ多くのダム流域へ適用することを念頭におき、パラメータ数を必要最小限に抑えながらも水文・地形・地質の諸特性を反映できることをモデルの基本要件とした。分布型流出モデルや流砂現象の精緻な再現を目指す土砂水理モデルの場合には、多数のパラメータ群の正確な同定と稠密な観測情報を要するため、高度な理論体系に基づきながらも十分な予測性能を達成することは難しく、さまざまな管理条件にあるダム流域全てに適用できる方法であるとは言いがたい。本研究では特に予測モデルの実用性を重視し、パラメータの集中化を図ることによりモデルの構成を簡素化することに傾注した。しかしながら、本モデルにも流砂現象に関わる諸仮説や流域ごとに設定すべきパラメータが少なからず含まれており、今後さらに多くのダム流域での適用実績を重ね、モデルの汎用性・実用性を向上することが課題として残っていると考えている。

本研究を行うにあたり国土交通省九州地方整備局緑川ダム管理所から資料を提供していただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局監修 社団法人日本河川協会編：国土交通省 河川砂防技術基準 同解説 計画編，山海堂，p.134-135，2005
- 2) 国土交通省：全国のダム堆砂状況について（平成30年度末現在）
- 3) 川崎秀明，宮野 岳，岩崎 敏，萩原康之：笠堀ダム堤体嵩上げに関する技術的解決策，大ダム，**240**，48-50，2019
- 4) 鈴木 勝：美和ダム恒久堆砂対策の概要と試験運用，建設の施工企画，p.20-25，2008
- 5) 鈴木航平，福岡捷二，内堀伸吾，大坪祐介：出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂時の土砂動態に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），**75**(2)，I_835-I_840，2019
- 6) 中谷宇吉郎：ダムの埋没—これは日本の埋没にもなり得る—，ダイヤモンド，経済雑誌，**40**(20)，1758-1763
- 7) 松下智祥，佐藤弘行，金銅将史：中長期的な効用・費用の推計に基づくダム貯水池堆砂対策の新たな評価法，NILIM2019 国総研レポート2019，p.100，2019
- 8) 石田卓也，前田裕太：気候変動を踏まえた計画・基準類の見直しに向けた検討，河川，**890**，15-19，2020
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局 気候変動を踏まえた砂防技術検討会：https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo.html，（参照 2022-06-04）
- 10) 秋山浩一，青木慎弥，鶴田芳昭，石川忠晴，高橋大地：緑川ダム貯水池上流の内大臣河谷における崩壊地変動の航空写真解析による推定，土木学会論文集 B1（水工学），**74**(4)，I_907-I_912，2018
- 11) 基盤地図情報 ダウンロードサービス：<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>，（参照 2022-03-20）
- 12) 国土数値地図情報ダウンロードサービス：<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，（参照 2022-03-20）
- 13) 国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課：ダム貯水池土砂管理の手引き(案)，2018
- 14) 国土交通省河川局監修 社団法人日本河川協会編：国土交通省 河川砂防技術基準 同解説 調査編，p.250，2005
- 15) 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，735-740，1999
- 16) 高秀秀信，九津見生哲，藤沢 寛：水系における土砂動態システムについて，第27回水理講演会論文集，767-772，1983
- 17) 国土交通省河川局監修 社団法人日本河川協会編：国土交通省 河川砂防技術基準 同解説 調査編，p.89-90，2005
- 18) 土木学会編：2018年版水理公式集，p.219，2018
- 19) 秋山浩一，高橋大地，石川忠晴，道典康治：豪雨イベントおよび土壌の湿潤性を考慮したダム貯水池上

- 流域の崩壊地面積予測モデルの構築, 土木学会論文
集 B1 (水工学), 75(2), I_823-I_828, 2019
- 20) 芦田和男, 江頭進治, 中川一著: 21 世紀の河川学,
p.169-170, 2008
- 21) 塚本良則, 小坂 泉, 滝沢英紀, 石垣逸朗, 大越真
澄, 福田 喬: 表層崩壊の発生と崩壊裸地の消滅過
程, 砂防学会誌, 54(4), 63-72, 2001
- 22) 高橋 保, 井上素行, 中川 一, 里深好文: 山岳流
域からの土砂流出モデルを用いた貯水池堆砂の予測,
水工学論文集, 45, 841-846, 2001
- 23) IPCC : Summary for Policymakers, Climate Change
2013, p.3-29
- 24) 国土交通省水管理・国土保全局 気候変動を踏まえた
治水計画に係る技術検討会: 気候変動を踏まえた治
水計画の在り方提言, 2019
- (2022 年 4 月 6 日 受理)

From the concern about the acceleration of dam sedimentation due to the global climate change, a numerical model was constructed, using the time series data of heavy rainfall and sedimentation in the Midorikawa Dam Reservoir. The model reproducibility was successfully verified. Next, using this model, the sedimentation rate increase was estimated based on the rainfall increase proposed by MLIT for the end of this century. The results of the numerical simulation showed that the sedimentation rate will become 1.9 to 3.2 times. The reason for such a large amount of sedimentation was considered to be the expansion of the collapsed area by the rainfall intensity increase and to be the activation of coarse gravel movement in the upstream valleys.

Key words : dam sedimentation, sediment yield, bed materials, armoring, climate change