

豪雨イベントおよび地盤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

秋山 浩一¹・高橋 大地²・石川 忠晴³・道奥 康治⁴

¹正会員 株式会社 東京建設コンサルタント砂防部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚一丁目 16-5)

E-mail:akiyama-k@tokencon.co.jp

²正会員 株式会社 東京建設コンサルタント 砂防部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚一丁目 16-5)

E-mail:takahashi-d@tokencon.co.jp

³フェロー会員 東京工業大学名誉教授 (〒251-0035 神奈川県藤沢市片瀬海岸二丁目 4-15)

E-mail:workishikawa0612@yahoo.co.jp

⁴フェロー会員 法政大学教授(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: kohji.michioku.47@hosei.ac.jp

気候変動に伴う豪雨頻度の増加を背景として、長期的な土砂動態の評価がダムの維持・管理上きわめて重要となっている。本研究では、豪雨発生と植生回復の影響を考慮してダム上流域崩壊地面積の経年変化を再現するモデルを検討し、その結果と貯水池堆砂量の経年変動との相関性について考察した。崩壊地面積の実績値は航空写真の画像解析により求めた。降水による斜面崩壊が流域地盤の湿潤条件と降雨強度に規定されると考え、飽和降水量に相当する長時間降水量と短時間降雨強度の両者に対して崩壊発生の閾値を設定した。このモデルを山形県寒河江貯水池流域に適用した結果、短時間降雨強度のみを考慮する従前のモデルより高い精度で崩壊地面積が再現されるとともに、貯水池内堆砂量時系列との相関性も向上した。

Key Words: *Sediment volume, Estimation of landslide area, Rain intensity, aerial photograph analysis*

1. はじめに

100年間の堆砂容量を見込むダム計画が行われるようになってから60年が経過し、今後の貯水池容量および機能の維持が問題とされつつある。また、気候変動による豪雨頻度の増加に伴い、貯水池への土砂流入量の増加も懸念されている。そこで堆砂抑制施設の設置やダム再開が進められているが、同時に長期的な堆砂量予測の精度向上が重要な課題となっている¹⁾。

従来のダム計画では、堆砂に影響を及ぼす諸因子(地質、流域面積、起伏量など)と堆砂量の実績値を統計的に関連付けた予測式が用いられてきたが^{2),3),4)}、気候変動の影響を考慮できないという問題がある。これに対し、分布型流出モデルを拡張して斜面での土砂生産から河道での流送過程までを表現する土砂動態モデル^{5),6)}の貯水池堆砂予測への応用も考えられるが、崩壊地の発生・縮小というダイナミックな過程をモデルに含めることは容易でない。

一方、建設後数十年を経たダム貯水池では堆砂量データが蓄積されており、また航空写真により流域状況の変化を推定することも可能になった。そこで著者らは、航

空写真から得られる崩壊地面積の変動を集中豪雨事象に結び付ける経験的数理モデルを考案し、熊本県緑川ダム流域において崩壊地面積の再現性および貯水池堆砂量との相関性を検討した⁷⁾。その結果、モデルに用いる短時間雨量の時間・強度の閾値を適正に定めれば、崩壊地面積や堆砂量の経年変化をある程度説明できることを確認した。ただし他流域への同モデルの適用可能性や降雨閾値設定法の汎用性等については課題が残されている。

そこで本研究では、緑川貯水池と地形、地質、気候などの条件が異なる山形県最上川水系の寒河江ダム流域を対象とし、前報と基本的には同様の考え方でデータ解析を行うとともに、地盤の飽和性が崩壊・非崩壊に及ぼす影響を考慮できるようにモデルを改良した。また、東北地方の山岳地帯では雪崩による斜面崩壊も発生することから、その特徴と影響についても考察を加えた。

2. 対象流域の概要

(1) 寒河江ダムの堆砂量

寒河江ダムは最上川水系寒河江川に1990年に竣工した国土交通省が管理する多目的ダムで、堤高112.0m、

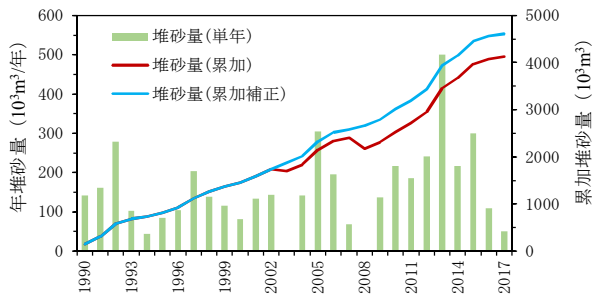


図-1 寒河江ダム堆砂量

総貯水容量 $10.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ の中央コア型ロックフィルダムである⁸⁾。計画堆砂量は $11.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ だが、竣工後 28 年を経た 2017 年時点の堆砂量は $4.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (37.5%) となっている。各年堆砂量と累加堆砂量の経年変化を図-1 に示す⁸⁾。各年堆砂量は最大 $552 \times 10^3 \text{ m}^3$ (2013 年) から最小 $43 \times 10^3 \text{ m}^3$ (1994 年) まで 10 倍以上の幅で変動している。なお、2003 年と 2008 年では測深方法の変更ともない見かけ上堆砂量が負値となっているため、その年の堆砂量はそれぞれ 2002 年および 2007 年と同じと仮定して累加堆砂量曲線を赤線から青線へと補正している。この図から 2010 年以降の堆積が加速する傾向にあるように見受けられる。

(2) 流域特性および地盤崩壊発生要因

図-2 に寒河江ダムの流域図と地質分布図を示す。流域は南北に長く、水源は北部の月山山麓と南部の朝日連峰にある。ダム地点の平均年降水量は 2,500mm と東北地方では比較的多く、気温は $-2.5^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ で、流域内積雪深が 12 月～3 月平均で 195cm となる豪雪地帯である。

流域の最高峰は月山 (標高 1984m) であるが、その山麓は全体的に開析の進んだなだらかな地形を呈し、地質的には安山岩や火山砕屑物が広く分布する。国土地理院の 10m メッシュ基盤地図情報数値標高モデル⁹⁾ から求めた斜面勾配は概ね $15^\circ \sim 25^\circ$ の範囲にある。これに対してダム以南流域 (中流域, 南流域) は急峻な朝日連峰が連なり、斜面勾配は $25^\circ \sim 35^\circ$ であり、地質的には花崗岩質が大部分である。図-2 (b) の青点は航空写真 (2014 年) から判読された崩壊地を示し、ダム以南に多く分布している。

一般に、山腹斜面崩壊の発生要因は、豪雨、地震、雪崩などの自然外力とされる¹⁰⁾。東北地方では寒河江ダム竣工以降に震度 5 強以上の地震が 11 回発生したが、寒河江ダム流域ではいずれも震度 5 未満であった。気象庁震度階級関連解説表¹¹⁾ によれば震度 5 弱以上でかけ崩れが発生し得るとされている。そこで本研究では地震に起因する斜面崩壊はないものとし、以下では豪雨と雪崩の影響のみを考慮することとした。

3. 航空写真解析

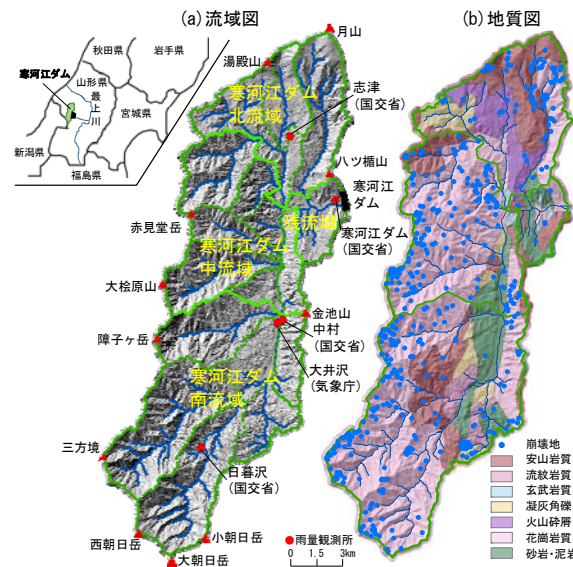


図-2 対象流域の地形と地質

(1) 解析対象

寒河江ダム流域全域を同時期に撮影した航空写真はなかった。一方、中流域 (図-2 参照) では国土地理院と林野庁により 1998, 2004, 2010, 2014 年の 4 セットの画像が得られていた。またダム流域全体についても、比較的近い時期に撮影された画像を組み合わせることにより 4 セットの画像 (1998+1996 年, 2004+2001+2003 年, 2010+2009 年, 2014+2013 年) が得られた。なお、2010, 2014 年の画像はカラーであり、他はモノクロである。これらのデータから寒河江ダム中流域および全流域の崩壊地分布の時間変化を推定した。

(2) 崩壊地面積の算出方法

既往の方法^{7) 12)}に従って画像データを幾何補正し、解像度とコントラスト値を統一した後、樹冠の乱反射に起因するノイズをメジアンフィルタ処理で除去した。以上の前処理の後、寒河江ダム中流域の 2014 年の航空写真を教師データとして、種々の輝度閾値を設定し画像解析を行った。具体的には、画像解析により判別された崩壊・非崩壊と目視判読の結果とを比較し、「真陽性率」と「偽陽性率」をもとに最適な閾値を設定した¹³⁾。真陽

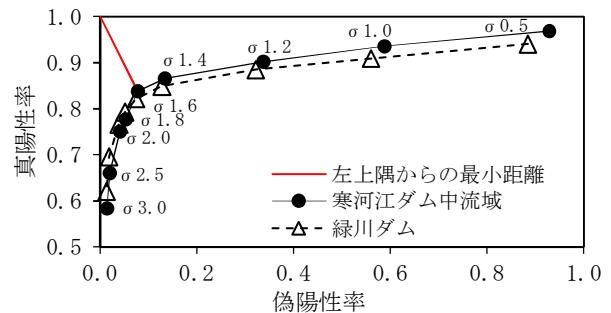


図-3 ROC 曲線による相対輝度閾値の設定

性率とは目視判読で崩壊ありと判定された領域のうち画像解析でも崩壊ありと推定されるピクセル数の比率であり、偽陽性率は逆に目視判読で崩壊なしと判定された領域のうち、画像処理では崩壊ありと推定されたピクセル数の比率である。その結果を図-3のROC曲線(Receiver Operating Characteristic curve)で示す。縦軸は真陽性率であり、この値が大きいほど目視判読で推定されたピクセルが画像解析によって崩壊地として正しく評価されていることを意味する。横軸は偽陽性率であり、大きいほど画像解析による誤評価が多いことを示す。これより、偽陽性率(横軸)が極小で真陽性率(縦軸)が極大となる組合せとして同図の左上隅との距離が最小となる相対輝度1.6を崩壊地判別の閾値として採用した。

4. 崩壊地面積の解析結果

(1) 発生要因による崩壊地の区分

上記の相対輝度閾値によって画像解析から抽出された崩壊地の一例を図-4に示す。図中の赤色部は崩壊地と判定された領域である。崩壊地の規模と場所は一定ではなく、発生/消滅および拡大/縮小を頻繁に繰り返していることがわかる。なお、崩壊地の縮小と消失は植生の回復によるものと考えられるが、写真撮影の時間間隔が大きいため、その間の崩壊地の変化はわからない。

さて、前述のように本研究では斜面崩壊の発生要因として豪雨と雪崩(全層雪崩)を考える。関口¹⁹⁾によれば、全層雪崩による侵食地形の特徴は以下のようなものである。尾根直下の傾斜角30°~50°の斜面にあり、幅3~6m、延長20~80m、深さ2~4mの筋状を呈し、縦断形状は直線的または中央部分がやや凹んで滑らかであり、横断形状は半円形またはU字型の溝が多数並行し、また同じ箇所での反復生起率が高い。また植生はほとんど生育せず、基盤が露出もしくは薄い砂礫層で覆われ土砂生産量は少

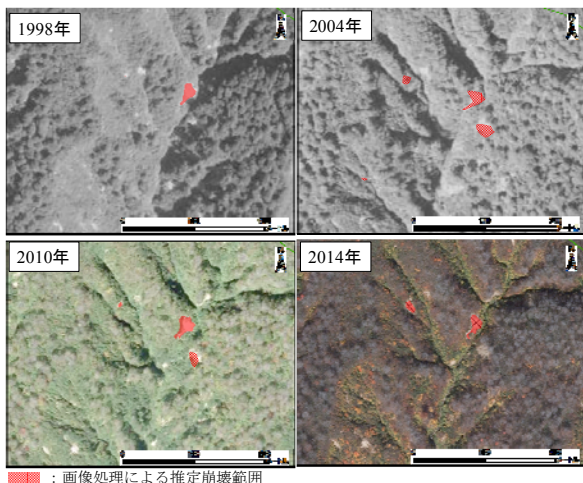


図-4 崩壊面積の拡大・縮小例(降雨期限の崩壊地)

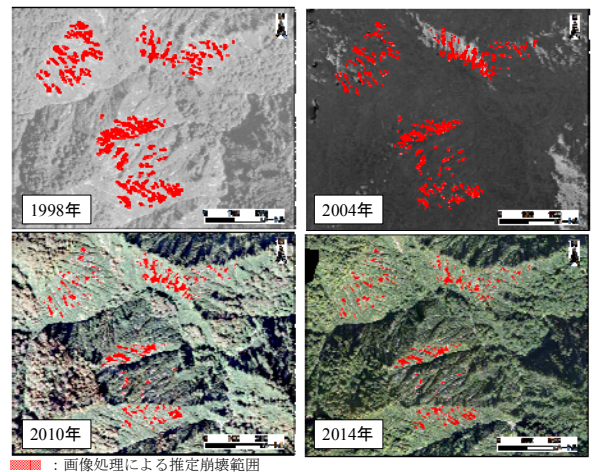


図-5 全層雪崩起源と思われる筋状崩壊地の判読結果

ない。これらの地形的特徴を考慮し、全層雪崩起因の崩壊地を抽出した結果を図-5に示す。

全層雪崩によると推定され抽出された崩壊地(以下では筋状地形という)とそれ以外の豪雨による表層崩壊地形(以下では表層崩壊という)の面積の経年変化を図-6に比較する。前述のように寒河江ダム中流域では4セットの航空写真があるが、連続する2セットずつの崩壊地面積を図中の各枠内に比較している。青色部分は両年で共通している崩壊地の面積、緑色は以前に崩壊地であったがその後に消失した面積、赤色は後年に新たに発生した崩壊地の面積である。

筋状地形の面積は表層崩壊に比較して小さく、また変動が小さいことがわかる。一方、豪雨がもたらすと考えられる表層崩壊地は年ごとに縮小・拡大を繰り返していることから、そこでの土砂生産量が寒河江ダム堆砂量に対して支配的に貢献していると唆される。以上のことから本研究では、筋状地形を除外し、表層崩壊地の面積の変動特性に着目して解析を進めた。

(2) 全流域と中流域の崩壊地面積変化の比較

前述のように、寒河江ダム中流域では同一年度の画像が4セット収録されていたが、全流域をカバーするデー

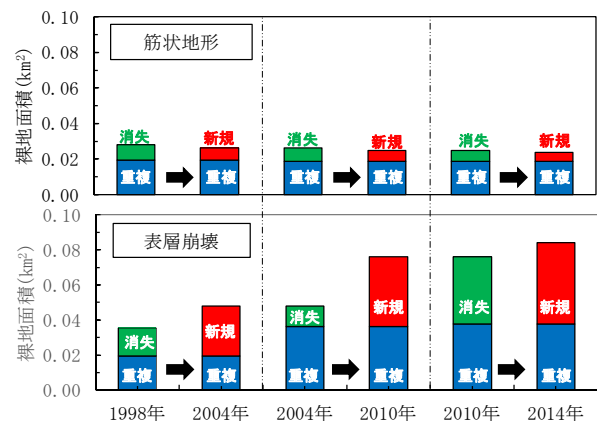


図-6 雪崩地形面積と表層崩壊面積の比較

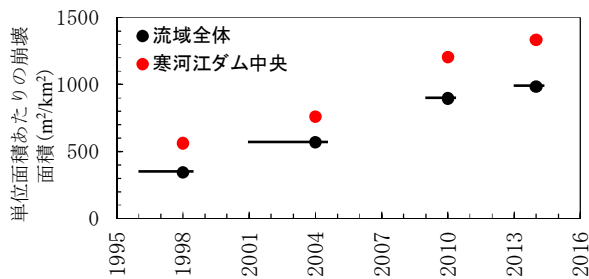


図-7 崩壊地面積の経年変化

タは 2~4 年の時差をともなう画像の組み合わせである。そこで両者の解析結果において有意な差異の有無を調べた。図-7 は両流域における崩壊地面積率を示しているが、いずれにおいても時間とともに増加傾向にあることがわかる。地形が急峻な中流域では全流域よりも大きな崩壊地面積率を示すが、その時間的増加傾向は両者でほぼ同一である。したがって、中流域の崩壊地変動から全流域での崩壊地変動の特徴を推定できると考えられる。また、中流域は寒河江ダムに近接していることからダム崩壊地面積と堆砂量との相関性も高いことが期待できる。以下では、中流域を対象として降雨時系列と崩壊地面積の変化との関係を解析する。

5. 降雨時系列に基づく崩壊地変動の解析

(1) 解析モデル

前報⁷⁾において筆者らは長期間降雨資料から短時間集中豪雨を抽出して崩壊地面積変動を表現したが、本研究では土壌の湿潤状態も崩壊・非崩壊に影響を与えるという仮定のもとに以下のようにモデルを改良した。

総雨量と総流出高の関係は一般に次のような傾向を示すと考えられる。総雨量が少ない場合には損失降雨の比率が高く総流出高と総雨量との相関線の勾配は 1 よりかなり小さい。しかし、総雨量がある程度以上に達し地盤が飽和すると相関線の勾配が 1 に近づくため、その勾配変化点から飽和雨量 (R_{sa}) が推定される。国土交通省水文水質データベース¹⁵⁾に公開されている水文データを用いて寒河江ダム流域と緑川ダム流域についての 48 時間雨量と総流出高との関係を図-8 に示す。これより、寒河江ダム流域では $R_{sa}=100\text{mm}/48\text{hr}$ 、緑川ダム流域では $R_{sa}=180\text{mm}/48\text{hr}$ を得た。

そこで本解析では 48 時間雨量が R_{sa} を超過した降雨事象を抽出した上で、短時間雨量強度の影響を前報と同様に評価することとした。本モデルは式(1)で表される。

$$\begin{aligned} R_{48}(t) \geq R_{sa} \cap R_j(t) \geq R_{jp} : R_j(t) \Rightarrow R_j(t) \\ R_{48}(t) < R_{sa} \cup R_j(t) < R_{jp} : R_j(t) \Rightarrow 0 \end{aligned} \quad (1)$$

各式の論理記号の左側は 48 時間降雨 $R_{48}(t)$ が飽和雨量 R_{sa} を超えるか否かを表し、右側は j 時間降雨量 $R_j(t)$ が崩

壊発生雨量強度 R_p を超えるか否かを表している。いずれか一方、または両方の条件が満足されない場合には、当該の短時間降雨が斜面崩壊の誘因にならないと考える。

一方、崩壊地は経年的な植生回復にともない裸地面積が概ね一定の速度で縮小するという塚本ら¹⁶⁾の知見に基づき、崩壊に有効な降雨が発生しない期間は崩壊地面積が指数関数的に減少するものとする。その結果、崩壊地面積の時間変動は次式で表される。

$$Z(i) = Z(i-1) \cdot \exp(-\alpha \Delta t) + \beta \cdot R_j(i) \quad (2)$$

ここに $Z(i)$ は計算ステップ i における崩壊地面積、 Δt は計算時間間隔、 $R_j(i)$ は Δt の間に生じた閾値以上の降雨(前述の式(1))である。 α は植生回復に伴う崩壊地の縮小係数、 β は豪雨により拡大する崩壊地増加係数である。

本モデルでは崩壊地の縮小・消失は植生回復によると考えているが、写真撮影の間隔が大きいので、その間の豪雨によって崩壊地が拡大した可能性もあるため、航空写真解析のみから α を推定することはできない。そこで式(2)中の崩壊地面積の縮小に関するパラメータ α に関しては、崩壊地の回復に要する期間が 3 年から 30 年程度に相当する $\alpha=4.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ の範囲で 9 種類の値を仮定してシミュレーションを行い、崩壊地面積の再現性が高い最適値を求めた。降雨強度の影響を規定するパラメータ β は、前報⁷⁾を参考に $\beta=2.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ の範囲でのシミュレーションから最適値を求めた。

(2) 降雨データ

解析に用いた降雨データは、寒河江ダム中流域近傍の大井沢観測所(気象庁)における 1989 年から 2017 年の 29 年間の 1 時間雨量記録¹⁷⁾である。

集中豪雨の影響に着目するため、4 月~10 月に発生した 1142 回の降雨事象から、2 日雨量 $R_{48}(t)$ が R_{sa} を超える降雨事象を抽出した。続いて短時間雨量の時間 j を 1 時間、3 時間、6 時間および 9 時間とし、各 j 時間に対応する $R_j(t)$ の降雨時系列を作成した。

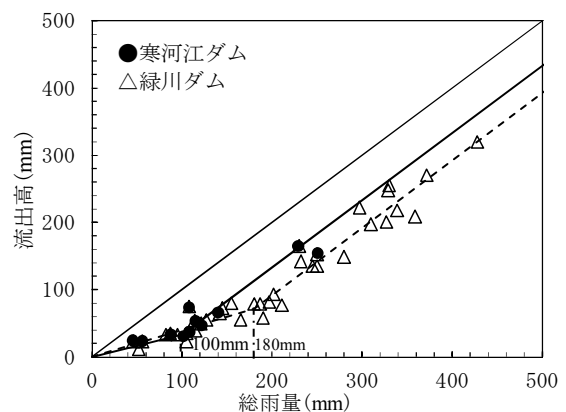


図-8 寒河江ダム上流域の総雨量と総流出高の関係

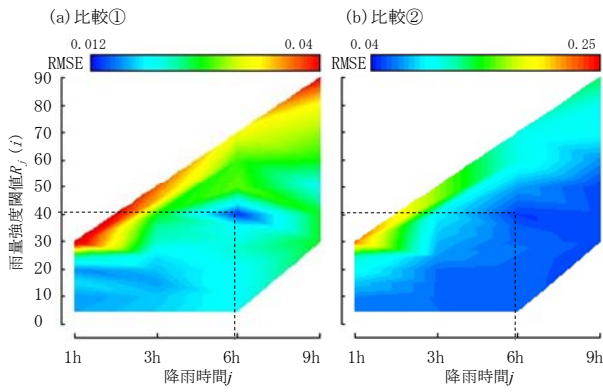


図-9 比較①と比較②の RMSE コンター

(3) パラメータの同定結果

全てのパラメータと閾値の組み合わせに対して崩壊地面積時系列を解析した。次に、航空写真解析と本モデルから推定された崩壊地面積と解析による推定値との相関性（比較①）と、推定された崩壊地面積の時間累積値と貯水池堆砂量の時間変化との相関性（比較②）を検討した。

まず各降雨時間 j と雨量強度閾値 $R_i(t)$ の下で α と β を前述の範囲で変化させ、比較①と比較②について次式で平均平方二乗誤差 (RMSE) を算出し、RMSE の平方根が最小となる組合せを求めた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_0 - y_1)^2} \quad (3)$$

ここに y_0 は崩壊地面積もしくは貯水池堆砂量累積値、 y_1 は計算ステップ i におけるそれぞれの解析値、 n はデータ数である。

続いて降雨時間 j と雨量強度閾値 $R_i(t)$ を座標軸として各条件での最小の RMSE を図-9(a) (b) のようにプロットした。その結果、最適パラメータとして 40mm/6hr, $\alpha=0.0030$, $\beta=4.0 \times 10^4$ を得た。

同定されたパラメータを用いて再現された崩壊地面積の変動時系列を図-10 に示す。また、比較のために土壤の湿潤性を省略し、前報と⁷⁾と同様に短期降雨のみを用いて同様の手順で最適化した結果 (20mm/3hr ; $\alpha=0.0030$, $\beta=2.0 \times 10^4$) を点線で示した。土壤の湿潤性を考慮した本モデルの適合性が優れていることがわかる。

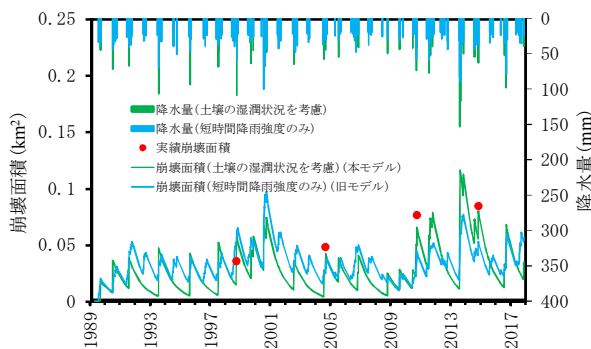


図-10 崩壊地面積変動の時系列(寒河江ダム)

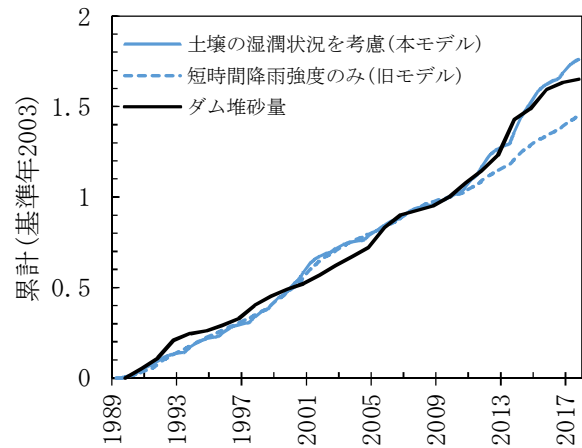


図-11 崩壊モデルと寒河江ダム堆砂量の関係

(4) 貯水池堆砂量と崩壊地面積の関係

崩壊による生産土砂量は崩壊地面積と浸食深度に依存するが、後者についての情報はない。しかし河田・植本によれば崩壊地面積の増減が支配的な因子である¹⁰⁾。そこで、浸食深度が一定で、生産土砂量は崩壊地面積に比例すると仮定する。累加堆砂量の実績値と上記で得られた推定崩壊地面積の累計値を図-11 に比較した。同図には土壤の湿潤性を考慮しない場合の結果も点線で示している。本モデルは旧モデルと比較して 2010 年以降の堆積土砂量の上昇を適切に表していることがわかる。

前報⁷⁾で示した緑川貯水池についても同様の解析を実施し、その結果を図-12 に示す。この場合には 2 つのモデルに明確な差は現れなかった。その原因として、緑川ダム流域で大きな崩壊を引き起こした集中豪雨においては $R_{\text{実}}(t)$ が R_{α} を超えていたことが挙げられる。その結果として両者に大きな差がみられなかったものと思われる。

6. おわりに

本研究で提案した崩壊地モデルは、その簡単な定式化にも関わらず、降雨の閾値を適切に定めれば、崩壊地面

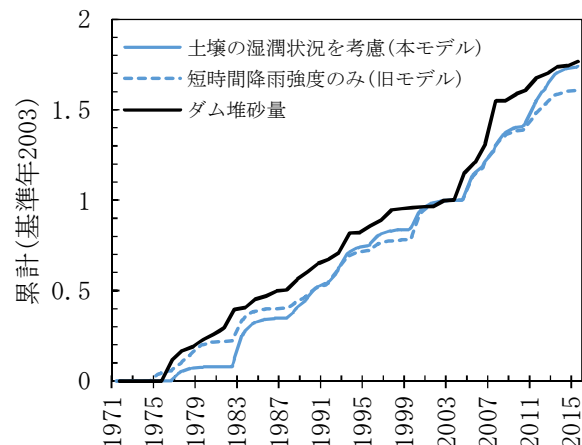


図-12 崩壊モデルと緑川ダム堆砂量の関係

積の変化をある程度再現できることがわかった。寒河江ダム流域では崩壊地面積が増加傾向にあり(図-7), また貯水池での堆砂が特に 2010 年以降に加速している。本モデルによりその特徴が概ね再現された。

我が国では竣工後に数十年を経たダムが増え, 長期の堆砂データが蓄積されつつある。また, 国土地理院や林野庁の航空写真を活用すれば, 踏査困難なダム上流山間部でも航空写真画像を複数セット得ることが可能である。本研究で提案する手法を発展させれば, 気象変動に伴う今後の降雨特性変化を考慮したダム流入土砂量の推定精度向上が可能になるとと思われる。

なお, 本研究では崩壊地からの土砂が遅滞なくダム貯水池に流入すると仮定しているが, 河道区間が長い場合には溪床に一旦堆積した後に時間差を持って貯水池に流入するであろう。これについては今後の課題としたい。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 国土交通省東北地方整備局から資料を提供して頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局: ダム再生ビジョン, p14, 2017.
- 2) 鶴見一之, 貯水池堆砂量の一算法, 土木学会誌, 39-3, 1954
- 3) 田中治雄, 我国における貯水池の埋没に関する応用地学的研究, 電力中央研究報告, 土木 57011, 1957
- 4) 吉良八郎, 貯水池の堆砂に関する水理学的研究, 香川大学農学部紀要, 第 12 号, 1963
- 5) 砂田憲吾・長谷川登: 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, 485/II-26, p37-44, 1994

- 6) 佐山敬洋, 寶馨, 立川康人, 中山大地: インドネシア・プランタス川上流域における分布型土砂流出モデルの構築, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.56, p108-109, 2001
- 7) 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 巻 4 号, p. I_907-I_912, 2018
- 8) 国土交通省 東北地方整備局, 寒河江ダム 定期報告書 (概要版), p1-35, 2015.
- 9) 基盤地図情報 ダウンロードサービス (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)
- 10) 河田恵昭, 植本実: ダム堆砂の支配的要因について, 水工学論文集, p1027-1032, 1998.
- 11) 気象庁: 気象庁震度階級関連解説表, p4, 2009.
- 12) 公益財団法人画像情報教育振興協会: デジタル画像処理編集委員会 デジタル画像処理[改訂新盤], p58-87, 2015.
- 13) 桂川 茂彦, ROC 解析による画像の正しい主観的評価 (ランチョンフレッシュャーズ)(第 59 回総会学術大会), 日本放射線技術学会雑誌, 2004, 60 巻, 3 号, p309-316
- 14) 関口辰夫, 全層雪崩発生斜面における筋状地形の特徴, 日本雪氷学会誌 雪氷 56 巻 2 号, p145-157, 1994
- 15) 国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp>)
- 16) 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, 2001-2002, 54 巻, 4 号, p63-72
- 17) 気象庁ホームページ (<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>)

(受付)

Modelling for landslide area prediction in consideration of heavy rainfall event and soil water content in upstream catchment of dam reservoir

Koichi AKIYAMA, Daichi TAKAHASHI, Tadaharu ISHIKAWA
and Kohji MICHIOKU

With increasing frequency of heavy rainfall events as a result of climate change, the long term assessment of sediment dynamics becomes a critical issue in maintenance and management of dam reservoirs. This paper discusses how heavy rainfall events in the upper basin affects sedimentation in a dam reservoir. A mathematical model was proposed in order to reproduce long-term changes of shallow landslide area in the test basin. The dataset of landslide area was obtained by aerial image analysis. It was assumed in the model that governing parameters of shallow landslide were intensities of the short- and long-duration precipitation, where the latter is deeply concerned with ground water content in the catchment. A threshold of shallow landslide occurrence was determined in consideration both of the short- and long-duration rainfall events. Applying the model to the Sagae Reservoir basin area in Yamagata Prefecture, the historical change of shallow landslide area was successfully reproduced by the model with higher accuracy than by the previous model⁷⁾ in which the long-duration rainfall event was not considered. In addition, it was shown that the landslide area predicted by the present model was better correlated with the bottom sediment volume in the dam reservoir than the previous model.