

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

秋山 浩一¹・青木 慎弥²・鶴田 芳昭³・石川 忠晴⁴・高橋 大地⁵

¹非会員 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非会員 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:aoki-shi@tokencon.co.jp

³正会員 株式会社 東京建設コンサルタント 地域環境部（〒812-0016 福岡市博多区博多駅南二丁目 12-3）

E-mail:turuta-y@tokencon.co.jp

⁴正会員 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

⁵非会員 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

気候変動による豪雨頻度の増加とともに、土砂流入の確率的側面の評価が長期貯水池管理において重要となってきた。本研究では表記流域における崩壊地面積の変化を 40 年間に得られている 9 セットの航空写真の解析から求め、短時間豪雨および貯水池土砂堆積との関係を検討した。相対輝度の閾値を設定して各セットの写真に対して崩壊地面積を推定し、 $Z_i = Z_{i-1} \cdot \exp(-\alpha \Delta t) + \beta R_i$ 、という関係を仮定した数値モデルを組み立てた。ここに Δt : 時間増分、 i : 計算ステップ、 Z : 崩壊地面積、 R : 閾値以上の雨量、 α と β は定数である。計算値と観測値の比較から、3 時間 80~90mm という閾値が崩壊地面積の変動をよく説明すること、その計算結果は 40 年間にわたる貯水池内土砂堆積量の時系列とよい相関を示すことが示された。

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

1. はじめに

貯水池の治水・利水機能は流入土砂の堆積によって減少していく。そこで我が国のダム計画では、建設に先立ち平均年流入土砂量を何らかの方法で推算し、100 年分の堆砂量を死水容量として見込むこととされている¹⁾。ただし流入土砂量の将来推定は非常に難しい問題であり、普遍的な手法があるわけではない²⁾。既往のダムにおいては各種の地形・地質・水文項目を指標とした多数の貯水池の堆砂実績の統計解析や、それに基づく地域ごとの比堆砂量を根拠に定められている場合が多い³⁾。

しかし流出土砂量に関する資料はダム建設前には限られているため、100 年にわたる堆砂量の推定精度を確保するのは容易でない²⁾。加えて流域斜面および溪流における流下性土砂（地盤から遊離した土砂）の発生は比較的稀な豪雨によるため、貯水池への流入土砂量は変動性が高い⁴⁾。このため使用できるデータの期間が短かった時代に建設されたダムの計画堆砂量は大きな誤差を含んでいる恐れもある。実際、1996 年現在の総貯水容量 100

万 m^3 以上の 786 ダムの堆砂データの解析結果によれば、完成後の経過年数が長いダムほど、年平均堆砂容量損失率（年平均堆砂量／堆砂容量×100%）が大きい傾向が見られ、完成後 40 年以上経過したダムの約半数が 2% 以上の損失率（50 年で堆砂容量が満杯となることを意味する）となっている⁵⁾。

一方、100 年堆砂量を見込んだダム計画が行われるようになってから既に 60 年が経過しており、100 年以降の貯水池機能を担保するための再開発や貯水容量配分変更を考える必要が遠からず生じるであろう⁶⁾。その際、ダム建設後のデータを用いて当初の計画堆砂量を改定することも考えられる。加えて、近年の全地球的気候変動に伴い集中豪雨の頻度増加が懸念されていることから⁷⁾、貯水池堆砂量の今後の検討においては降雨特性の経年変化を考慮する必要があるかもしれない。

集中豪雨による流出土砂量の増加は、新規崩壊や既往崩壊地の拡大による崩壊地面積の増加という物理プロセスを経ていると考えられている²⁾。そこで本研究では、短時間降雨による崩壊地面積拡大傾向に関する数理モデ

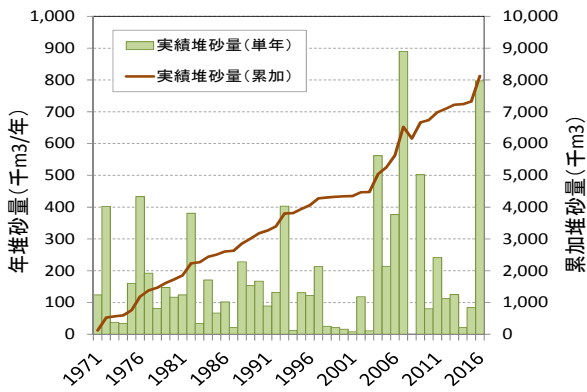


図-1 緑川ダム堆砂量

ルを構成し、上記の物理プロセスを評価することで、今後の貯水池堆砂量の予測等に有効となると考えた。具体的には、建設後 45 年を経過した一級河川緑川水系緑川ダム上流域における崩壊地面積の時間変化を航空写真解析から算定した。続いて解析対象流域の降雨データに基づき、種々の閾値で定義される豪雨時系列を求め、豪雨事象と崩壊地面積変動の関係について経験的モデルを構築した。最後に、崩壊地面積の計算値と実測値の比較から最適な閾値を推定し、それから得られる崩壊地面積の時系列と緑川貯水池実測堆砂量の時系列を比較した。

2. 対象流域の概要

(1) 緑川ダムの堆砂量

緑川ダムは熊本県を流れる緑川の本川に 1971 年に竣工した堤高 76.5m、総貯水容量 4600 万 m³の重力式コンクリートダムであり、洪水調節、河川維持用水、灌漑用水の確保、発電を目的とした国土交通省管理の多目的ダムである。標高 1000m 級の九州山地を上流域とし、集水面積は 359.0km²となっている。

図-1 にダム建設後の各年実績堆砂量と累積堆砂量を示す。年ごとの堆砂量の変動は大きく、最大は 890,000m³ (2007)、最小は 8,000m³ (2001)である。なお 2012 年から測深方法が変更されたために同年の堆砂量がマイナスとなったので図から省いている。累加堆積量のグラフから以下のような経年変化が見て取れる。1997 年までの 27 年間の堆砂速度は 158,000m³/年と大きく、1998 年～2003 年の 6 年間の堆砂量速度は 33,000m³/年と小さい。2004 年以降は再び増加傾向を示し、特に 2004 年～2009 年の 5 年間は堆砂速度は 364,000m³/年と、過去の 2 倍を超えている。なお 2016 年の急激な堆砂増は同年 4 月に発生した熊本地震による斜面崩壊の影響と考えられる。

(2) 地質

図-2 に流域地形と主要な支川流域を、図-3 に地質分

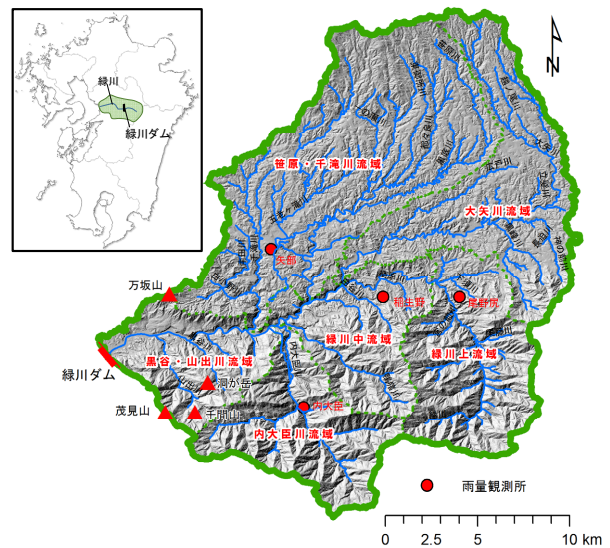


図-2 対象流域

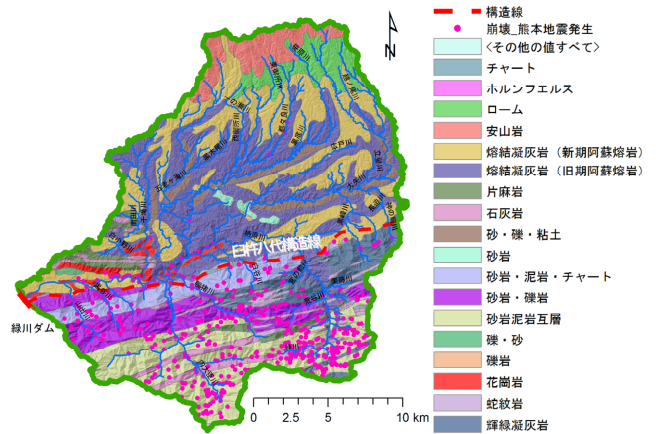


図-3 対象流域の地質

布を示す。流域は東西に走る臼杵八代構造線 (図-3: 赤破線) によって二分されている。構造線以北の流域は全体的に開析の進んだ丸みを帯びた阿蘇火山帯の山麓地を呈し、最高峰は万坂山の 663m である。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 10°～15°の範囲にある。これに対して構造線以南の流域は洞が岳 (997m)、茂見山 (1,156m)、千間山 (1,067m) 等に代表される 1,000m 級の九州山地が連なり、斜面勾配は 25°～30°と急峻で、各所に表層地質断層 (図-3: 紫線) が存在する。図-3 中の赤点は 2016 年撮影の航空写真で確認された崩壊地の位置であり、構造線以南の流域で圧倒的に多いことがわかる。

3. 航空写真解析

(1) 解析対象

崩壊地の多い構造線以南の流域を解析対象としたが、全区域が同時に撮影されていたのは 1976 年と 1987 年の 2 セットだけであった (いずれも国土地理院)。しかし

2セットだけであった（いずれも国土地理院）。しかし内大臣川流域（図-2 参照）については国土地理院と林野関係機関（林野庁，都道府県）により 1976, 1979, 1983, 1987, 1992, 1994, 2002, 2006, 2013, 2016 年の 10 セットの画像が得られていた。そこで内大臣川流域を中心として崩壊地分布の時間変化を解析した。なお 1976, 2013, 2016 年の画像はカラーであり，他はモノクロであった。また全領域については，同時ではないものの比較的近い時期に撮影された画像で全流域をカバーできる組み合わせが 2 セットあり（1992 年と 1994 年，2002 年と 2003 年および 2006 年），さらに 2016 年撮影の画像が概ね構造線以南流域の全区域をカバーしていたことから，これらも解析に使用した。

(2) 崩壊地面積の算出方法

既往文献¹⁰⁾に記されている方法に従い，全ての航空写真について幾何補正を行い，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。以上の前処理を行った画像から，以下の手順で崩壊地面積を算定した。

a) 解析領域の設定

一般に崩壊地は植生が乏しいので周囲と比較して明るく映る。そこでモノクロ画像における輝度値に閾値を設けて判別することとした。ただし人工構造物や河床等砂礫面，林道，耕作地，伐採地などを崩壊地として誤読する恐れがあるので，全ての画像についてそれらを目視により除外した。続いて，全画像上で崩壊地と見られる区域を全て抽出し，それらを包括するように共通の解析サブ領域を設定して崩壊地面積の変化を求めた。

b) 画像解析方法

緑川上流域が全て撮影されている 2016 年 8 月の航空写真を教師データとして，種々の輝度閾値を用いた画像解析により得られた崩壊・非崩壊の判別結果と目視判読による結果を比較し，「真陽性率」と「偽陽性率」を算定した。真陽性率とは目視判読で崩壊ありと推定した領域における画像解析で崩壊ありと推定したピクセルの割合である。偽陽性率は目視判読で崩壊なしと推定した領域の中で，画像処理で崩壊ありと推定したピクセルの割合である。その結果を図-4 の ROC 曲線に示す。縦軸は真陽性率で，この値が大きいほど目視判読で推定したピクセルを画像解析で適切に崩壊地として評価している。横軸は偽陽性率でこの値が大きいほど目視判読で推定したピクセルを画像解析で誤評価している傾向を示す。これより図の左上隅との距離が最小となる相対輝度の閾値 1.6 を採用した。以上の解析手順を図-5 にまとめている。

(3) 解析結果

画像処理による崩壊地抽出の一例を図-6 に示す。図

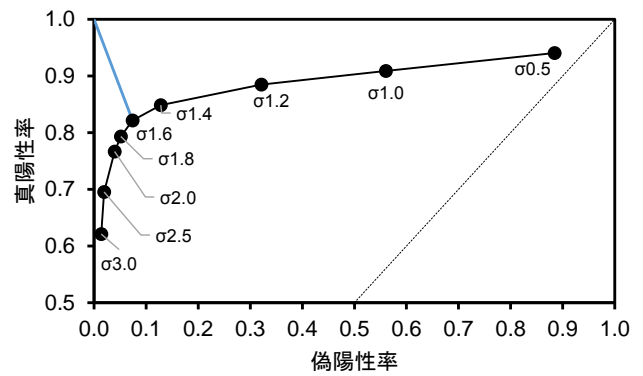


図-4 ROC曲線による相対輝度閾値の設定

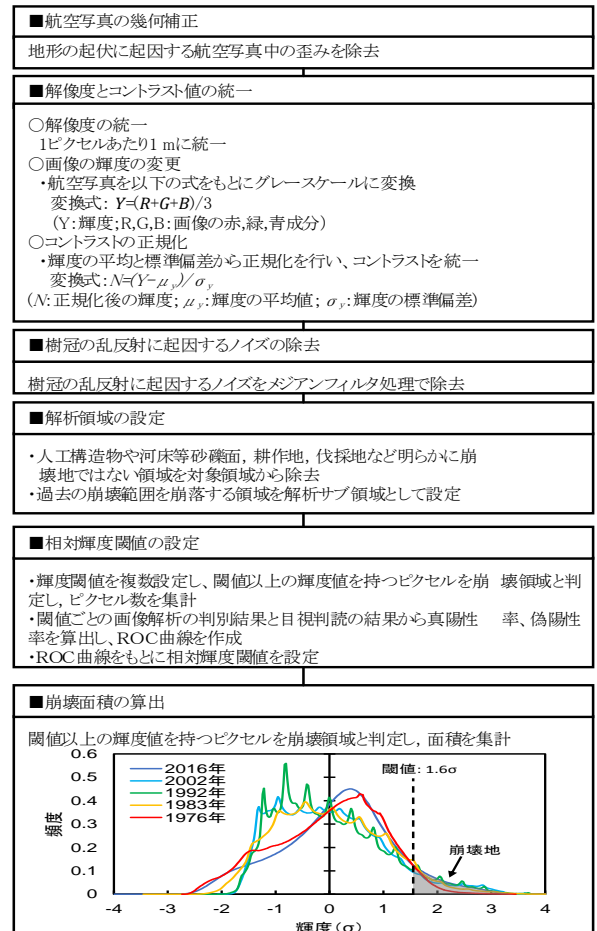
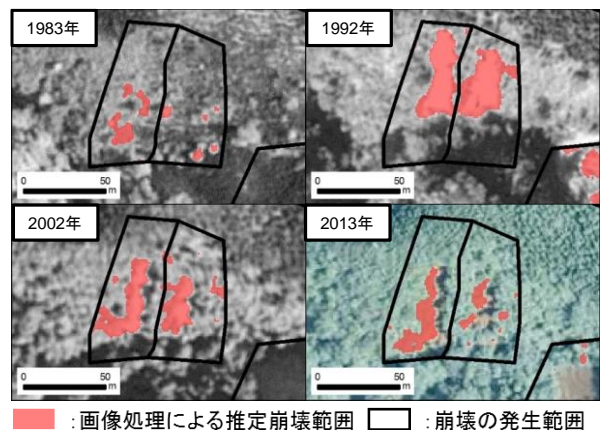


図-5 崩壊面積の推定フロー



■ : 画像処理による推定崩壊範囲 □ : 崩壊の発生範囲

図-6 崩壊面積の拡大・縮小例

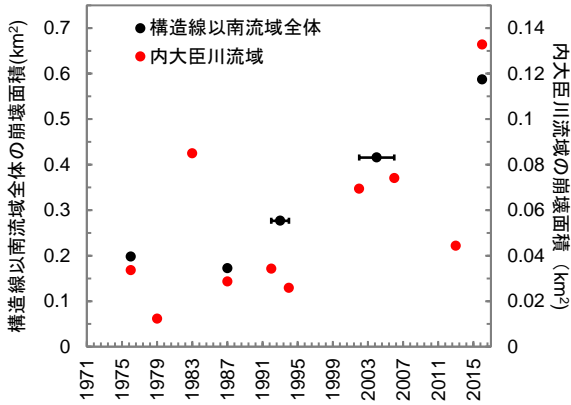


図-7 崩壊面積の経年変化

中の黒線は、解析対象とした全ての画像に共通して設定した解析サブ領域である。また赤は各サブ領域内で崩壊地と判定された区域である。1983年には崩壊地面積は小さかったが、1992年には大規模な2つの崩壊地となり、2002年には縮小し、2013年には右側の崩壊地はほぼ消失している。なお、崩壊地の縮小と消失は植生の回復によっていると考えられるが、写真撮影の時間間隔が大きいため、その間にも崩壊地拡大の可能性がある。したがって、これらの写真のみから植生回復速度を求めることはできない。

画像解析から得られた緑川ダム上流左岸流域（黒点）と内大臣川流域（赤点）における崩壊面積を図-7に示す。黒点に付している横線は、年代が近い複数の画像を合成して集計した場合の時間範囲を示している。なお内大臣川の流域面積は左岸流域全体の約1/5であることから、前者の縦軸スケールを5倍にしている。両者の変動特性は類似しているため、内大臣川のデータの変動が流域全体の崩壊地変動の特性を概ね代表している可能性が高いと考えられる。内大臣川の崩壊地面積は、1979、1984、2013年に見られるように、数年の間に大きな拡大・縮小を示しており、豪雨等の外力の変動に敏感に反応していると考えられる。また、この崩壊地の変動性が図-1に示した貯水池堆砂の変動を引き起こしている可能性がある。そこで以下では降雨記録と崩壊地面積との関係を解析し、その後に貯水堆砂量との関係を考察する。なお2016年のデータは同年4月の熊本地震の影響を受けている可能性があるため、以下の解析から除外した。

4. 降雨データと斜面崩壊地面積の相関

(1) 降雨解析

内大臣川流域のほぼ中央に位置する国土交通省所管の内大臣川観測所（熊本県上益城郡山都町菅字菅内大臣国有林43ソ小班；標高580m）において収集された1971年から2016年の46年間の1時間雨量記録を解析した。

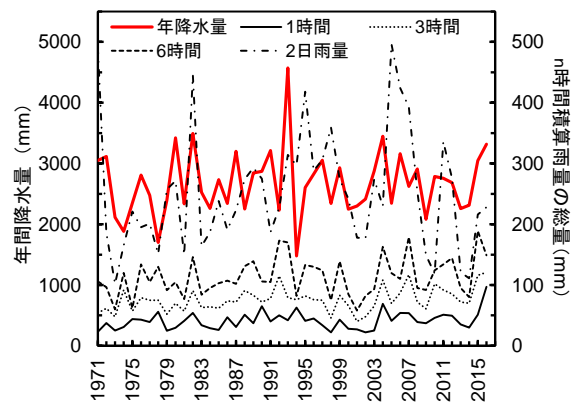


図-8 年降水量、年最大時間雨量の経年変化

集中豪雨の影響を調べる目的で、まず連続時間雨量が50mm以上となる293の降雨事象を抽出し、それぞれについて1時間、3時間および6時間雨量の最大値を求め、短時間降雨時系列 $R_1(t)$ 、 $R_3(t)$ 、 $R_6(t)$ （添え字は時間）を求めた。これに2日雨量の時系列 $R_{2d}(t)$ を加えた4種類の降雨データを用いて以下の解析を実施した。それらを年降水量とともに図-8に示す。

年降水量（赤線）は2000mm～3500mmの間で推移し、1993年に4500mmを記録している。一方、2日雨量 $R_{2d}(t)$ は1982、1996、2005年に大きな値を示している。また短時間雨量 $R_1(t)$ 、 $R_3(t)$ 、 $R_6(t)$ は変動が激しいが、大きなピークの頻度は観測期間の後半に増えている。このように降雨時間の取り方によって変動傾向は異なる。

ところで、降雨データは毎年存在するのに対し、図-7に示した崩壊地面積データの時間間隔は平均5年であることから、単純な相関解析で結論を得るのは難しい。そこで次節に示す概念モデルに基づいて、降雨と崩壊地面積の推移との関係を考察した。

(2) 解析モデル

ある規模以上の豪雨時に崩壊地面積は拡大し、それ以外の期間には植生の回復により崩壊地は縮小すると仮定する。それぞれの降雨時系列 $R_j(t)$ に対して閾値 R_{jp} を設定し、時系列を以下のように修正し、閾値以下の降雨は崩壊地に影響を及ぼさないとする。なお、 $j=1, 3, 6$ または48である。

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

次に崩壊地面積の変動を以下のように仮定する。

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

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（式(1)）である。また α は植生回復に伴う崩壊地の縮小

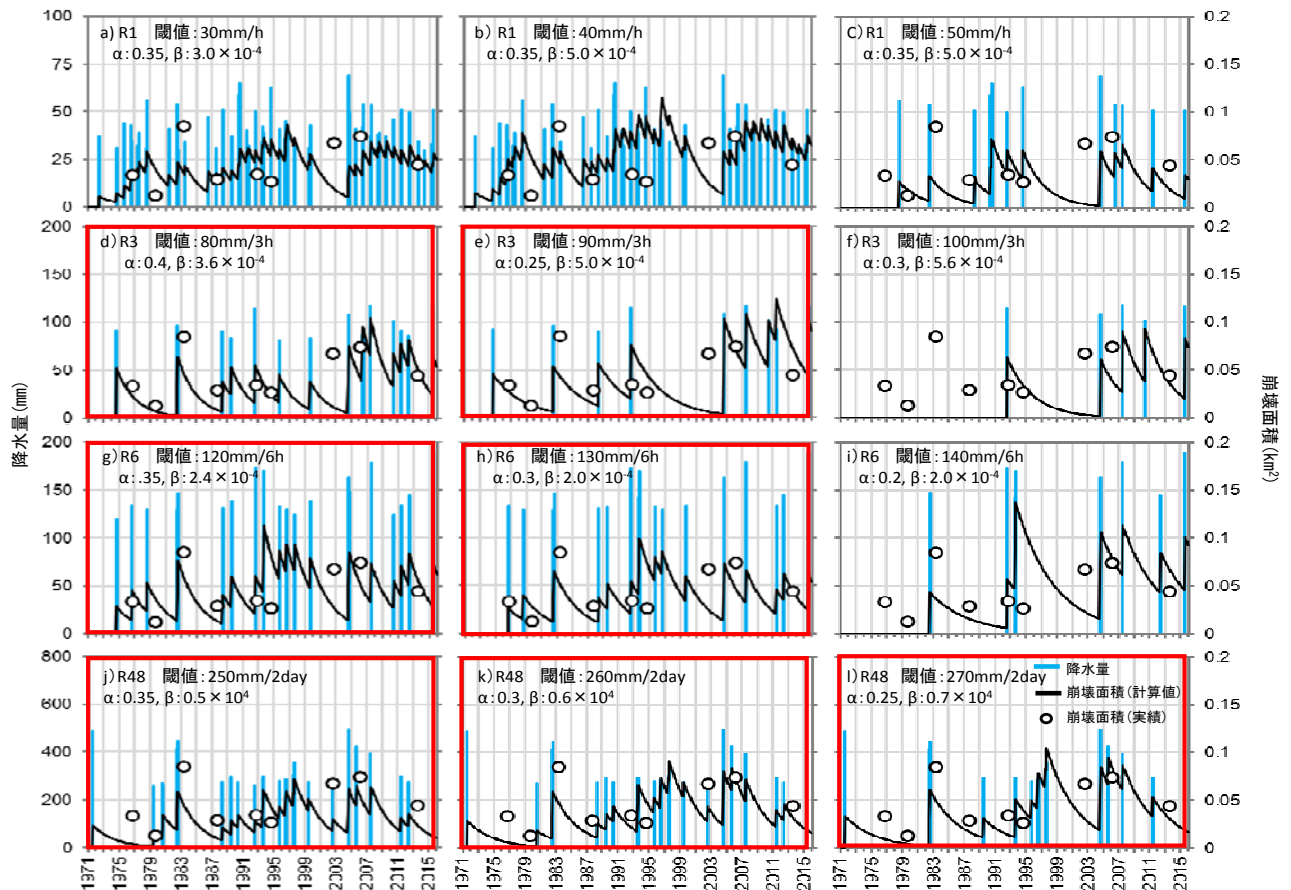


図-9 解析モデルによる斜面崩壊面積の再現計算結果

係数, β は豪雨により拡大する崩壊地面積量である。

(3) 解析結果

$R_1(t)$, $R_3(t)$, $R_6(t)$, $R_{48}(t)$ について数種類の閾値を与えて式(1)を計算した後、航空写真から得られた崩壊地面積との比較から、式(2)の α と β の最適値を定めた。その結果得られた $Z(t)$ の時系列を計測値とともに図-9に示す。黒の実線が推定された崩壊地面積、白丸が航空写真から得られた崩壊地面積である。図-9 a) d) g) j) のように小さい閾値では変動が小刻みになり、図-9 c) f) i) l) のような大きい閾値では増加の間隔が開く。 $R_1(t)$ ではどの場合も一致度は低い。これから、新たな崩壊が生じるためには豪雨が数時間は継続する必要があることが示唆される。一方 $R_3(t)$, $R_6(t)$, $R_{48}(t)$ では赤くマークしたケースは計算値と計測値の変動具合が類似しており、これらのグラフのみからは優劣が付けがたい。そこで次に緑川貯水池で計測された堆砂量波形との比較を試みた。

(4) 貯水池堆砂量と崩壊地面積の関係

既往研究²⁾に述べられているように、貯水池への流入土砂量の変動は上流域崩壊地面積の増減に関係していると考えられる。崩壊地における年間平均侵食速度が一定値で近似されると仮定すると、両者の間には比例関係が

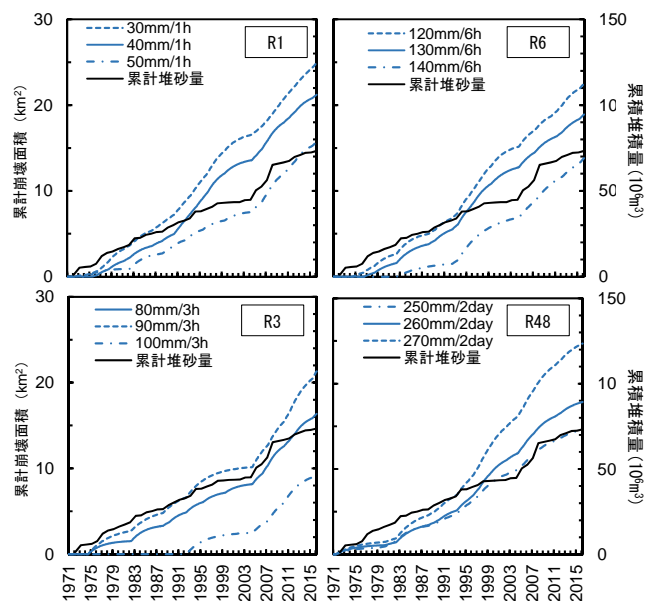


図-10 崩壊モデルと緑川ダム堆砂量の関係

期待される。そこで実績累加堆砂量と図-9に示した推定崩壊地面積の累計値を図-10に比較した。両者は単位が異なっているので、絶対値ではなく波形の類似性に注目すると、ダム建設後45年間の前半と後半の堆積速度の変化を比較的好く表しているのは、3時間雨量で80mmないし90mmであるように思われる。

5. おわりに

貯水池への流入土砂量は、一般的には、豪雨、地震、雪崩などの自然外力や、森林伐採による裸地化などの人為的外力によって発生した山腹斜面崩壊が降雨により溪流に輸送され、河道流によって下流に運ばれた結果である。その物理過程は複雑であり、数式で一般的に記述するのは不可能に近いと思われる。また従来から検討されてきた多数の河川のデータから共通的な回帰式を求める試みも、個々の貯水池への適用精度という観点からは限界があるように思われる。

しかし、水文流出解析におけるタンクモデルのように、「概念的数理モデル」を用意し、それぞれの貯水池ごとに蓄積されたデータに基づきパラメータをキャリブレーションすることにより、各貯水池の将来堆砂量のある程度の精度で予測する経験式を導出できる可能性はありと筆者らは考えた。

本研究では、航空写真解析により緑川貯水池上流域の崩壊地面積の経年変化を推定した上で、短時間降雨による崩壊地面積拡大が貯水池堆砂量の増加を引き起こすという仮定のもとに簡易な数理モデルを構成した。その結果、3時間雨量が80~90mm以上で斜面崩壊面積の経年変化傾向と対応関係が良かった。その結果は、緑川貯水池で計測されている堆砂量の累加波形をある程度説明していた。そこで、このようなモデル開発をそれぞれの貯水池について試みることにより、今後の全地球的気候変動を考慮に入れた堆砂量予測の精度向上と堆砂対策の立案が可能になるのではないかと考えられた。

謝辞：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頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山海堂：国土交通省 河川砂防技術基準 同解説 計画編 国土交通省河川局監修 社団法人日本河川協会編、pp165, 2005.
- 2) 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, pp1027-1032, 1998.
- 3) 財団法人 ダム技術センター：多目的ダムの建設平成17年版 第3巻 調査II編, pp202-204, 2005.
- 4) 鏡原聖史, 植田允教, 沖村孝：近年の強雨による斜面崩壊の発生メカニズムに関する一考察, 建設工学研究所論文報告集, 57, pp. 37-56, 2015.
- 5) 箱石憲昭：ダム堆砂対策の現状と今後の展望, 第4回 土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp161-165, 2008.
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局：ダム再生ビジョン, pp6-11, 2017.
- 7) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申), pp. 13-25, 2008.
- 8) 国土交通省九州地方整備局緑川ダム管理所 提供資料
- 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) 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], pp.58-87, 2015.
- 11) 川谷逸樹, 加藤宏基：排砂バイパスの設計体系に関する研究 -中間報告- 平成25年度 水源地環境技術研究所 所報 pp36-42, 2014.

(2017.9.29 受付)

Estimation of landslide area in the Naidaijin Valley, an upstream region of the Midorikawa Dam Reservoir, by aerial photograph analysis

Koichi AKIYAMA, Shinya AOKI, Yoshiaki TURUTA, Tadaharu ISHIKAWA and Daichi TAKAHASHI

Understanding and modeling the stochastic feature of sediment influx becomes important for long-term reservoir management and restoration program of old reservoirs with the increase of intense rainfall frequency due to recent climate change. In this study, we obtained the variation of landslide area in a sediment yielding valley upstream from the Midorikawa Reservoir for about 40 years using nine sets of aerial photographs, and discussed its correlation with short-duration intense rainfalls as well as the sediment deposition in the reservoir. After distinguishing landslide sites from manmade bright colored parts such as roads, buildings and etc. by eyes, the landslide area was estimated for each set of photographs by assuming relative brightness threshold determined from comparison of actual and estimated values obtained from the photograph in 2016. A numerical model was built by assuming the equation $Z_i = Z_{i-1} \cdot \exp(-\alpha \Delta t) + \beta Ri$, where Δt is time increment of calculation, i is calculation step, Z is landslide area, R is rainfall amount above the threshold, and α and β are some constants. The comparison of calculation and observed $Z(t)$ suggested that the result for the threshold of 80~90mm of rainfall during three hours explained the variation of landslide area very well. In addition, the calculated $Z(t)$ had a good correlation with the sediment deposition amount measured in the reservoir for 40 years.