

### 降雨による斜面崩壊と河道区間の土砂収支を 考慮したダム堆砂量の推定

高橋, 大地 / TAKAHASHI, Daichi

---

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

241

(発行年 / Year)

2023-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第578号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2023-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026669>

博士学位論文  
論文内容の要旨および審査結果の要旨

氏名	高橋 大地
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	第 833 号
学位授与の日付	2023 年 3 月 24 日
学位授与の要件	本学学位規則第 5 条第 1 項(1)該当者(甲)
論文審査委員	主査 教授 道奥 康治 副査 教授 酒井 久和 副査 教授 鈴木 善晴 副査 (学外) 東京工業大学名誉教授 石川 忠晴

降雨による斜面崩壊と河道区間の土砂収支を考慮したダム堆砂量の推定

1. 論文内容の要旨

我が国のダム計画は、100 年間の堆砂量を類似地域における既設ダムの実績値等から推計し水平堆砂の仮定の下に堆砂容量を確保するように策定されるが、計画値を超えた後のダム管理は想定されていない。このような 100 年堆砂の原則に基づくダム計画が始まってから既に 60 年以上が経過した現在、堆砂量が既に計画値を上回るダムが少なからず出現している。さらに、地球温暖化にともなう豪雨頻度や雨量の増加を背景に土砂生産と河川流量の増大が懸念されており、ダム貯水池における堆砂量にも気候変動が大きく影響すると考えられる。

ダム貯水池における堆砂量の再現・予測を目的とする研究はこれまでも複数例が実施されている。最新の科学的知見を導入した代表的事例としては、ダム流域の土砂生産を表現するための分布型流出モデルと河道区間における流砂現象を記述するための土砂水理モデルを組み合わせた堆砂予測モデルなどが挙げられる。しかし、ダム流域の土砂動態は多くの素過程からなる複雑系であり、流域時空間を補間する観測情報を収集して多数のモデル・パラメータを同定することは容易ではない。本研究ではこれまでに提案されてきた物理的モデルよりもダム管理への実装可能性を高めることに留意し、モデル構造を簡素化するためにモデル・パラメータの数を必要最小限に抑えてダム流域の土砂収支を包括的かつ的確に捉える集中定数型モデルの開発を試みた。本研究で開発するモデルは崩壊地の消長を降雨時系列から再現して土砂生産量を推定する崩壊地モデルと、溪流区間の土砂収支を土砂貯留関数で記述する溪流モデルから構成され、熊本県緑川ダム貯水池と山形県寒河江ダム貯水池に適用してその妥当性を検証した。

対象流域として選定された二つのダム貯水池ではすでに実績堆砂量が計画値を上回っており、早急に何らかの堆砂対策を講ずる必要がある。緑川ダム流域は臼杵八代構造線によって流域が東西に二分されている地質的特徴を呈し、特に九州山地に属する南側流域からの土砂生産が活発である。一方、寒河江ダム流域は東北地方の豪雪地帯に指定されており、降雨起因の他にも雪崩起因の斜面崩壊や地すべりの被害も発生している比較的土砂生産が顕著な流域である。

崩壊地モデルの検証に必要な崩壊地情報は複数時期の航空写真解析により収集され、画像処理技術を用いて崩壊地面積を推算した。航空写真画像は国土地理院の公開データベースから取得し、画像処理には実務でもよく使われる画像処理ソフトや GIS ソフトの技術を採用し汎用的な画像解析工程となるように工夫した。崩壊地モデルにおいては土壌を湿潤状態にする飽和雨量と表層崩壊のトリガーとなる雨量強度を説明変数として用いて降雨にともなう崩壊地の拡大をあらわし、所定降雨以外の期間には植生の回復とともに崩壊地が縮小することを説明できる崩壊地面積の推定方法を提案した。崩壊地モデルに用いる飽和雨量は、所定規模以上の出水時におけるハイドログラフの成分分離から得られる直接流出高と出水イベントごとの最大時間雨量との相関関係から求められ、斜面崩壊を引き起こす雨量強度の閾値は崩壊地面積の変動が最も良好に再現される植生回復率と崩壊地面積拡大率とともに最適なモデル・パラメータの組合せとして同定された。

溪流モデルでは、溪流区間に存在する 1 次～2 次～3 次谷等々の分合流や流れの緩急、河床・側岸侵食による流路変動など様々な事象について、それらを 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の集中化を図った。溪流区間の流砂過程を表現するために、貯留関数法のアナロジーを援用して“生産土砂量”“土砂貯留量”“流出土砂量”から構成される「土砂貯留関数」を提案し、そのパラメータには堆積土砂の粗粒度の概念を導入した。このようなモデル化により、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流砂過程が適切に再現された。崩壊地モデルに比べて溪流モデルにはモデル・パラメータが多く含まれるため、現実の堆砂現象が再現されるように溪流区間で発生する流砂過程を勘案しながら、パラメータを適正に絞り込めるようにパラメータ同定のアルゴリズムを整理した。なお、堆積土砂の粗粒度は出水履歴に応じて変化するため降雨時系列と流量時系列の双方を用いて推定している。しかし、ダム流域の流量時系列が必ずしも多くのダムで収集・整理されていない現状、ならびにダム流域の降雨－流出過程に介在するバイアスが水系全体ほど大きくないことを考慮して、降雨量だけで堆積土砂の粗粒化・細粒化を記述できるように溪流モデルの一部を改良し、降雨・流量データがともに豊富な緑川ダム貯水池を対象としてその妥当性を検証した。溪流モデルについても崩壊地モデルと合わせて堆砂量実績値に基づく感度分析・検証を進め、両ダム貯水池の堆砂量が適切に再現されるようなパラメータの組合せを抽出できた。溪流モデルには土砂貯留関数と堆積土砂の粗粒度など複数の流砂特性を反映したサブモデルが含まれているため、それらの有効性も個別に検証し、貯水池堆砂量を再現する上で必要なサブモデルであることを確

認した。

崩壊地モデル及び溪流モデルの感度分析においては、複数のパラメータを一定の刻み幅で変更しながら実績値との誤差を最小化する工程が自動的に進められるが、これらの回帰分析には全て Microsoft Excel に標準装備された機能のみを用いており、高度な計算プログラムの技術や特殊なアプリケーションを必要としないため、これまでの研究で開発されてきた堆砂量推定モデルよりも汎用性・実用性は高いと考えられる。

また、構築した貯水池堆砂量推定モデルを用いて将来計算を実施し、気候変動がダム堆砂に及ぼす影響を推算した。将来計算は実績降雨時系列を追加して行うが、追加する際にそのまま追加するケース、国土交通省が降雨倍率を提示している RCP2.6 及び RCP8.5 をそれぞれ考慮したうえで追加するケースの合計 3 ケースとした。各シナリオで将来気候下における貯水池堆砂量を推定した結果、将来発生する降雨が RCP8.5 のシナリオ下で増加するとすれば、計画堆砂年として設定された 100 年が緑川ダムで 51 年、寒河江ダムで 44 年にまで短縮されることが明らかとなった。

本研究では貯水池堆砂量を推定するための実用可能性の高いモデルを提案し、流域特性が異なる緑川ダムと寒河江ダムに適用して、堆砂量が合理的に再現された。さらに、将来気候の影響を受けた降雨に対するダム堆砂量を推定した結果、いずれのダムにおいても堆砂の進行が実績より顕著に加速することが確認された。今後、さらに多くのダム流域で適用実績を重ね、汎用性及び実用性を向上させる必要はあるものの、本研究で提案するダム堆砂量推定モデルは、今後のダム管理戦略（堆砂対策、弾力的管理、ハイブリッド化、維持管理費削減等）や砂防事業を総合的に進める上で必要な情報を提供できる有力な技術手段となると考えている。

## 2. 審査結果の要旨

堆砂によるダム貯水容量の減少はダムの洪水調節・水資源供給機能を著しく低下させる。現在のダム計画では、流域の降雨や地形・地質と近隣ダムの堆砂実績に基づいて堆砂量を経験的に推測し 100 年で堆砂する土砂容量を見込んでいるが、その科学的根拠は希薄である。本研究ではまず、全国のダム貯水池から収集した堆砂資料に基づき、半数以上のダムで想定以上の早い速度で堆砂が進行していることを実証した。このことは現行の堆砂量予測手法が不十分であることを明示している。気候変動にともなう豪雨の規模・頻度の増加にともない今後さらにダム流域の土砂生産が加速し、堆砂が促進されることは確実である。一方、洪水災害を抑止・緩和するためにはダムの機能低下を絶対に回避しなければならない。そのため、科学的根拠に基づいてダム堆砂の経年進行を的確に予測し、その知見をダム管理に供することが不可避である。

本研究では流域からの土砂生産と流送過程を考慮したダム堆砂量の推定方法が提案されている。理屈上は、過去約半世紀にわたり積み上げられた流砂水理学と流域水文学の知見を

利用して土砂の生産・輸送過程を数式化することは可能ではあるが、ダム流域が様々な地形・植生・地質から構成される複雑系であることを鑑みれば、流砂水理学に基づいて堆砂量を予測することは現実的には困難である。気候変動下においてはダム堆砂の軽減が喫緊の課題であり、一刻も早くダム管理へ適用できる実用的な堆砂量予測手法の開発が求められている。そのため、流域の水文・地文特性を包括的にモデル化し必要最小限のパラメータと堆砂資料に基づいて堆砂現象を帰納法的に推定する本研究の考え方はきわめて現実的で有効である。

提案された堆砂量予測モデルは降水がもたらす流域斜面からの土砂生産量を推算する崩壊地モデルと生産土砂がダム貯水池に到達するまでの溪流河道における土砂の供給・堆積・再輸送を定式化する溪流モデルから構成され、ダム堆砂量は溪流河道からの流出土砂量の累積値として推定される。本研究で提案された堆砂量予測モデルは、流域特性が異なる熊本県の緑川ダムと山形県の寒河江ダムに適用され、いずれの場合にも堆砂量の経年変化を高精度で予測することに成功した。集中定数モデルの場合に陥りがちな現象のブラックボックス化は予測手法の汎用性を損なう恐れがあるが、ここで提案する手法においては、土砂生産の律速条件である土壌飽和度と降雨強度を説明変数として取り入れていること、溪流区間の土砂収支を規定する河床材料の粗粒化・細粒化を考慮していることなど、流砂現象の本質をたくみに取り入れており、モデルのブラックボックス化が排除されている。

本研究成果の適用は二つのダムに留まっているが、本モデルは客観性・汎用性を備えた様々な創意・工夫がなされ、今後、国内外の多くのダムに展開することが十分に可能である。

冒頭に記したように、将来気候においてはダム堆砂の加速が懸念されている。近似的な取り扱いではあるが、本研究では提案モデルを用いて気候変動がダムの堆砂に及ぼす影響も定量的に推算し、今後のダム管理が直面する課題を位置づけている。治水・利水の両面からはもちろんのこと、河川・沿岸環境の保全に果たすダムの役割は将来益々高まることから、ダムの長寿命化・適正管理を実現するために本研究で得られた科学的知見が有効に活かされるものと考えられる。

審査小委員会では三回に渡り学位請求論文の審査を実施し、また学位請求者の外国語能力や専門分野に関する学識確認試問を実施した。その結果、本研究が学位論文として所定の水準を有し、学位請求者が博士に相当する能力を備えていることを確認した。

よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。