

研究成果報告書

研究題目		集水域内の土砂生産時空間分布及び粒径別輸送過程に基づくダム貯水池堆砂モデルの構築	実施年度 2022～2023年度
代表研究者	所属	鳥取大学 工学部 社会システム土木系学科	
	氏名	和田 孝志	印
<p>1. 研究の目的・背景</p> <p>(研究の背景)</p> <p>ダムの水力発電機能を長期にわたり有効かつ持続的に活用していくためには、より効果的・効率的な貯水池堆砂対策が必要不可欠であり、その前提としてダム貯水池の量的・質的な堆砂状況、集水域内の土砂生産・流下特性に関する的確な把握および予測が必要となる。ダム貯水池の堆砂予測では、高橋ら（<i>水工学論文集, Vol.44, 2000</i>）による高瀬ダム貯水池を対象とした堆砂予測モデルをはじめ、多くの予測モデルが開発されている。しかし、これらの堆砂予測モデルでは、豪雨時の集水域内の斜面崩壊発生による土砂生産と、谷筋内の流砂の集合運搬（土石流等）による大小砂礫の土砂流下が考慮されていない。</p> <p>近年の集中豪雨の発生頻度増大により、中国地方で斜面崩壊の発生頻度が増大していることを勘案すると、集水域内の崩壊発生（土砂生産）の時空間的な予測を組み入れた土砂の生産～流下～堆積過程を一貫して扱う堆砂予測モデルを確立する必要がある。加えて、既往の堆砂予測モデルでは、谷筋での土砂流下において、アーマコート河床上の粒径別流砂量の評価や、土石流流下時に発生する粒度偏析過程が十分考慮されていない。崩壊土砂や土石流の内部には数 mm から数 m の多様な粒径を持つ砂礫が混在しており、多様なサイズの砂礫それぞれの流下特性や堆積特性を考慮することで、貯水池に流入する土砂の粒度特性が推定可能となり、それを踏まえた効率的な堆砂対策が可能となる。</p> <p>(研究の目的)</p> <p>本研究では、集水域内の降雨データをもとに崩壊発生を含めた谷筋内への降雨・土砂の流出過程と、谷筋内の多様なサイズの砂礫の選択的土砂輸送を考慮した集合運搬・括弧運搬による流下過程を統合した数値解析モデルを開発する。開発モデルの骨子は以下のようなものである。</p> <p>(1)開発モデルの基礎となるモデルは、「<u>土石流洪水流複数流入モデル</u>」（<i>Wada et al., Int. J. Erosion Control Engineering, 2021</i>）とする。</p> <p>(2)基礎モデルの1次元部分に、梶川ら（<i>第10回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2020</i>）が開発した「<u>セル分布型降雨流出解析に基づく表層崩壊予測モデル</u>」による算定流出量・崩壊土砂量を1次元部分の横流入として付加することで考慮する。</p> <p>(3)基礎モデルの1次元部分をさらに「<u>土石流内部の小粒子の落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積モデル</u>」（<i>和田ら, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.76, 2020</i>）に改良する。</p> <p>上記の開発モデルにより、集水域内の崩壊発生（土砂生産）と土砂輸送の時空間的な把握、貯水池堆砂の量および質（粒度分布）のきめ細やかな予測が可能となり、崩壊発生から貯水池到達までの中長期的な土砂移動サイクルに対応した効率的な堆砂対策が確立可能となる。</p>			

2. 研究成果及び考察 (申請時の計画に対する達成度合を織込む)

開発モデルは、「1. 研究の目的・背景」に示した(2)(3)に加え、(4)水路実験による多様な粒度構成・勾配条件下での土石流粒度偏析過程の把握とモデル妥当性検証、(5)実績データを用いたモデル妥当性検証の5つのステップに基づいて実施した。以下に(2)~(5)各項目の研究成果を示す。

【集水域内の土砂生産時空間分布及び粒径別輸送過程に基づくダム貯水池堆砂モデルの開発】(2)(3)に関連、90%達成

開発モデルの基礎となるモデルは、図-1に示す「土石流洪水流複数流入モデル」である。基礎となるモデルは複数の1次元計算部分(谷筋部に対応)と2次元計算部分(貯水池部に対応)から成り、複数の土砂移動形態(土石流、土砂流、掃流砂)による流動~堆積過程を解析可能である。この基礎モデルの1次元部分に、梶川らの「セル分布型降雨流出解析に基づく表層崩壊予測モデル」による算定流出量・崩壊土砂量を横流入として付加することで考慮した(図-2)。梶川らのモデルは、3段タンクの分布型流出モデルであり、平成21年9月豪雨時の山口県佐波川流域の降雨流出実績を良好に再現できている。さらに、開発モデルでは1次元部分を「土石流内部の小粒子の落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積モデル」(図-3)に改良している。

開発モデルの構築は本研究期間に概ね達成されたが、(4)(5)の実験結果および貯水池堆砂量実績と計算流出土砂量が一部合わない部分があるため、今後更なる実績値と計算値の比較を行い、計算パラメータの見直し等を進める必要がある。

【多様な粒度構成・勾配条件下での土石流粒度偏析過程の把握とモデル妥当性検証】(4)に関連、70%達成

本研究の開発モデルは一定勾配直線水路での土石流粒度偏析に対する再現性は確認されているが、実際に見られるような河床勾配が変化する場合や土石流構成材料に流動深の0.01倍オーダーの粒径成分が混入した場合などにおいて再現性が確認されていない。そこで、当該部分の妥当性検証として、2段可変勾配水路および多様なサイズの砂礫(平均粒径10.7mm, 7.1mm, 3.0mm, 1.4mmおよび0.6mmの砂礫から2~3つを混合)を混合させた実験材料を用いた水路実験を行った(図-4)。

河床勾配が変化する場合の実験結果として、7.1mmと

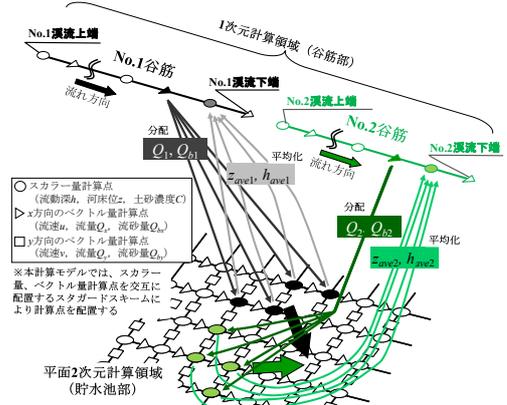


図-1 土石流洪水流複数流入モデル (開発モデルの基礎となるモデル)

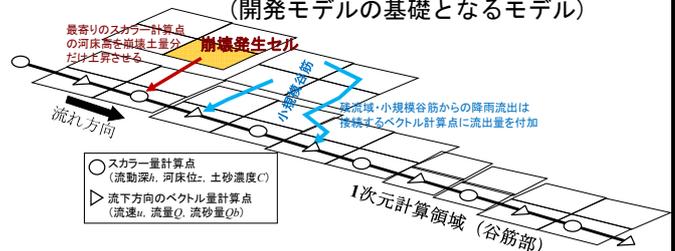


図-2 開発モデル1次元部分における 梶川らのモデル解析結果の接続

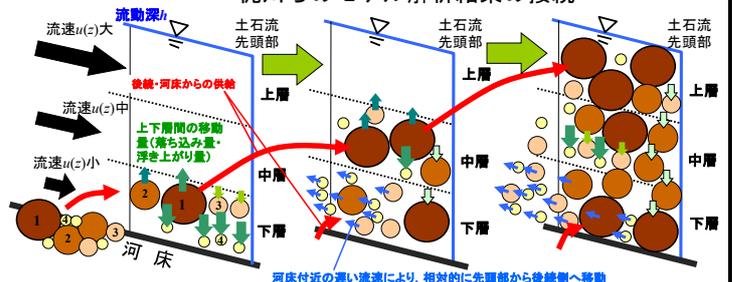


図-3 小粒子落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積モデル

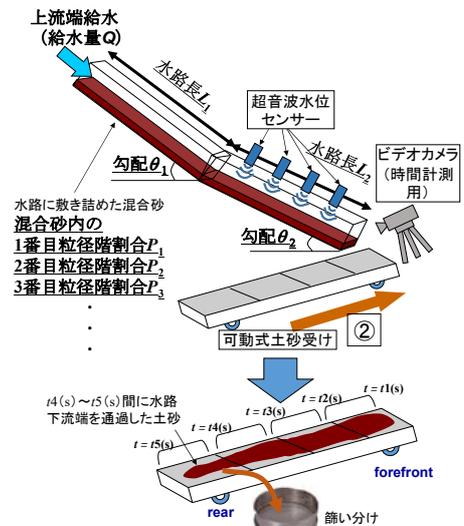


図-4 勾配変化・多様な粒度構成条件下の水路実験概要

3.0 mm を 1 : 4 で配合した土石流に対する勾配変化点下流での大きい砂礫の先頭部存在割合の推移を図-5 に示す。この図より、勾配変化に伴う大きい砂礫の存在割合の変化は勾配変化点から少し下流に進んだ段階で発現することがわかる。この傾向は土石流の輸送土砂濃度や流動深とは異なっており、勾配変化に伴う土石流水理量の変化傾向は水理量ごとに異なることが明らかとなった。

図-6 は勾配変化点下流部の先頭部存在割合に関する実験結果と(3)の開発モデルで再現した計算結果を示している。この図より、実験結果では勾配変化点から離れるほど大きい方の砂礫の割合が増加、小さい方の砂礫の割合が減少し、粒度偏析が顕著になっているのに対し、計算結果では勾配変化点から離れるほど粒度偏析が減少し、計算結果の再現性が十分とは言えなかった。この点については今後モデル内の大粒子集積機構(「小粒子の選択的落ち込み」以外)にもあるかどうかを見直す等の対応を行う必要がある。

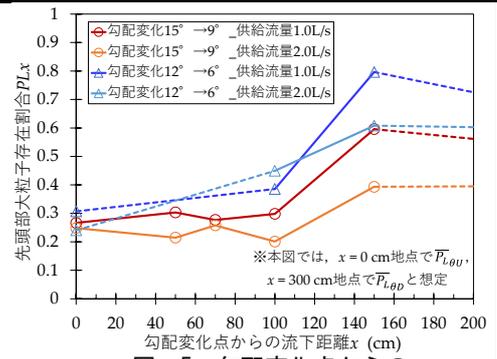


図-5 勾配変化点からの流下距離別の先頭部大粒子存在割合

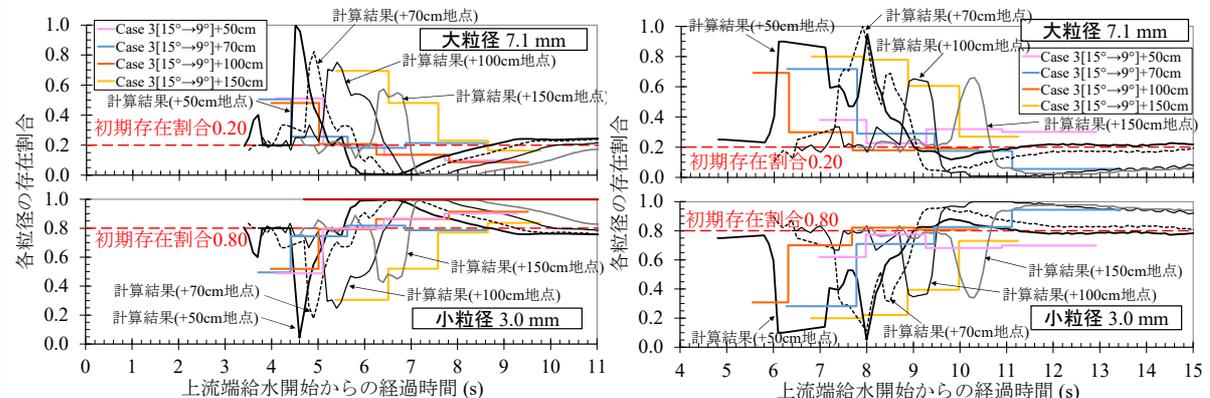


図-6 勾配変化点からの流下距離別の先頭部大粒子存在割合に関する実験結果と計算結果

土石流構成材料に流動深の 0.01 倍オーダーの粒径成分が混入した場合の実験結果として、無次元掃流力 τ^* と先頭部最大粒子存在割合 P_L の関係を図-7 に示す。この図より、0.01 倍オーダー粒径成分混入の有無によらず、 τ^* と P_L に良好な反比例関係が確認できた。 τ^* は土石流を含む様々な流砂現象を取り扱うための主要なパラメータであることを考慮すると、流砂現象の一つとして土石流の先頭部大礫集積も τ^* で整理可能であることが示された。

図-8 は流動深 0.01 倍オーダー粒径成分混入時の先頭部存在割合に関する実験結果と(3)の開発モデルで再現した計算結果を示している(7.1mm : 3.0mm : 0.6mm = 1 : 4 : 1.25 の材料を用いた場合)。この図より、開発モデルによる解析でも実験結果の各成分の存在割合変化の傾向が良好に再現されていることがわかる。すなわち、土石流最先頭部には最大粒径成分の割合が最も多く、そのすぐ後方では中間粒径成分の割合が、最後方では最小粒径成分がそれぞれ卓越する傾向が計算でも表現されていた。このことから、開発モデルは一様勾配上での多様な粒度構成から成る土石流の粒度偏析現象について再現可能であることが示された。

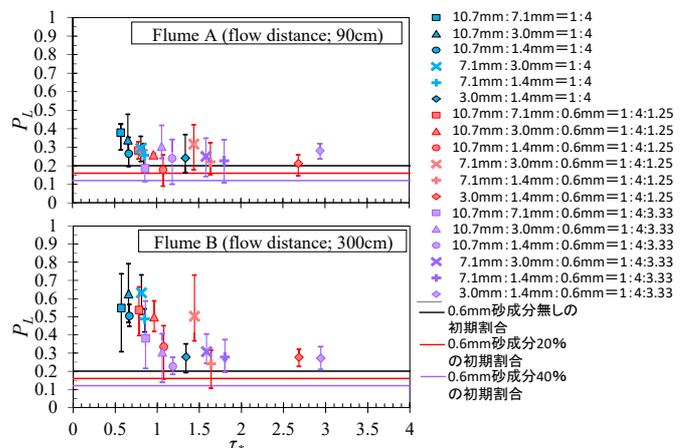


図-7 無次元掃流力 τ^* と先頭部大粒子含有割合 P_L との関係

【実績データを用いたモデル妥当性検証】(5)に関連, 70%達成)

(1)混合粒径対応基礎モデルを用いた再現解析:

Wada et al.(2021)の基礎モデルを混合粒径対応とした改良モデルを用いて, 和歌山県那智川流域の土石流災害を再現し, 改良モデルの妥当性を検証した. 図-9に, 最大浸水深および土砂堆積厚の平面分布について改良モデルによる計算結果と実績の比較を示す. これらの図に示されるように, 最大浸水深分布については災害後計測された痕跡水深と良好に一致しており, 災害後の土砂堆積厚分布については, 1 m以上の堆積厚が発生すると算定された地点は概ね実際の土石流流下痕跡内に含まれており, これらのことから改良モデルが概ね妥当であることを確認した.

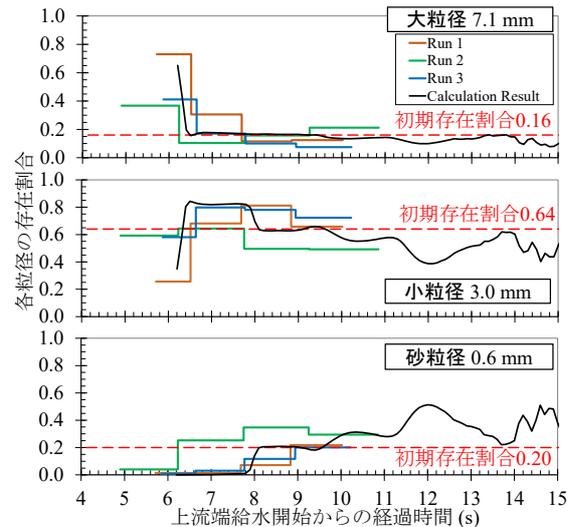


図-8 流動深 0.01 倍オーダー粒径成分混入時の先頭部大粒子存在割合に関する実験結果と計算結果 (7.1mm : 3.0mm : 0.6mm = 1 : 4 : 1.25 の材料を用いた場合)

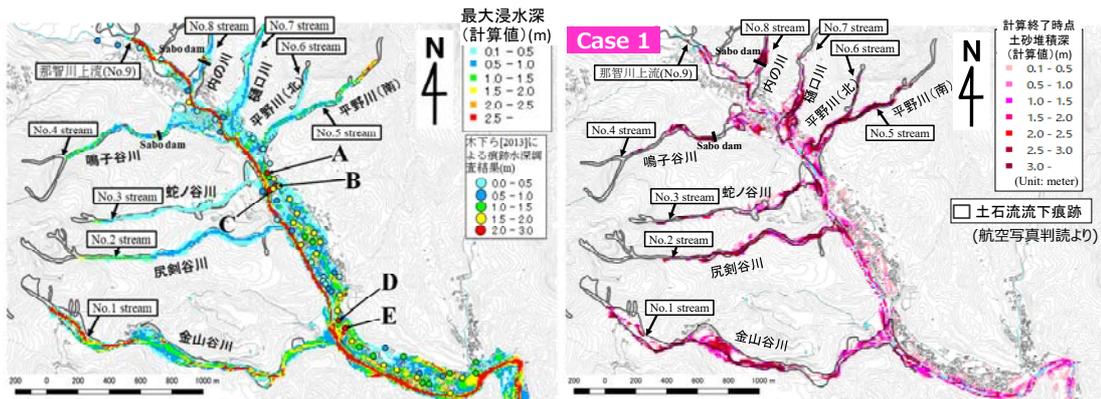


図-9 土石流洪水複数流入モデル(混合粒径)による計算結果と実績値の比較 (H23 那智川土石流) (左: 最大浸水深平面分布解析結果と痕跡水深, 右: 災害後土砂堆積深と土石流流下痕跡)

(2)(3)「セル分布型降雨流出解析に基づく表層崩壊予測モデル」+「土石流内部の小粒子の落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積モデル」の統合モデルによる再現解析:

「セル分布型流出解析に基づく表層崩壊予測モデル」(梶川ら, 2020)と「土石流内部の小粒子の落ち込みを考慮した先頭部大粒子集積モデル」の統合モデルを用いて, 鳥取県東部・殿ダムの平成 29 (2017) 年の年間流入量・年間流入土砂量の再現を試みた. 図-10に期間内で最大出水となった2017年9月18日0時前後の殿ダム流入量に関する計算結果と実績の比較を示す. 両者は良好に一致しており, 本モデルが妥当であることを確認した. 図-11は9月18日0時の殿ダム上流域の斜面安全率 F_s の分布を示している. この図より, 当該出水時には袋川上流域や大石川流域の東方(上流側)の溪流沿いで斜面崩壊の危険度が高く, これらの箇所からの土砂生産が顕著であったことが推察される. 図-12は平成 29 (2017) 年の流域別年間流入土砂量の計算結果を示している. この図に示されるように, 殿ダム

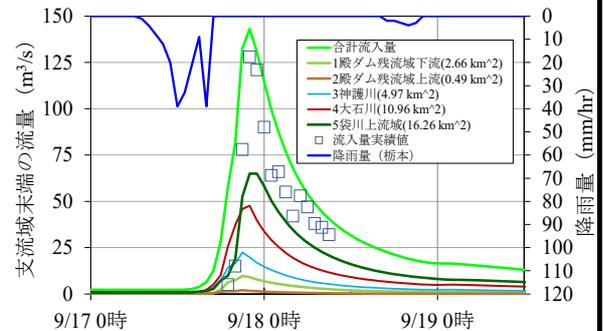


図-10 2017/9/17~19の殿ダム流入量に関する計算結果と実績値

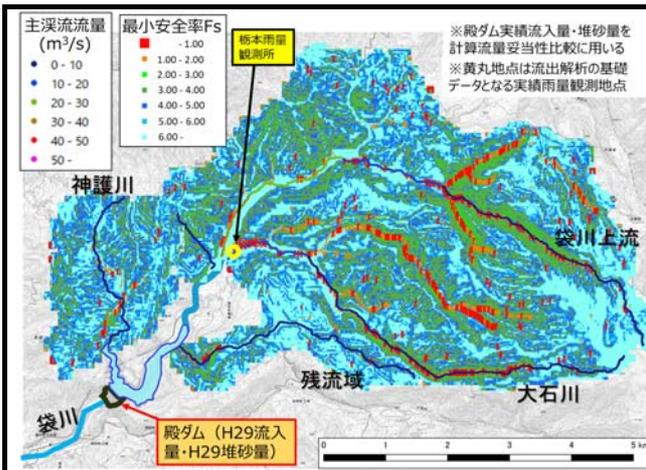


図-11 開発モデルによる主溪流流量と斜面安全率分布に関する計算結果 (2017/9/18_0時_殿ダム上流域)

の殿ダム流入土砂量実績 10.9 千 m³ よりも小さい結果となった。これは本解析モデルでは掃流砂のみを対象としており浮遊砂成分を考慮できていないこと、流域内の河床材料粒度分布設定、溪流内の大礫移動限界条件に起因していると考えられる。これらの点は土砂流出量算定の妥当性向上において重要な課題であるため、今後検討していく必要がある。

また、本統合モデルを用いて、鳥取県天神川西方流域（小鴨川流域）の 2018 年の土砂流出傾向についても把握を試みた。図-13 に比較的大きな出水期間であった 2018 年 7 月～11 月の小鴨 4 号砂防堰堤流量に関する計算結果と実績の比較を示しているが、小鴨川流域においても両者は良好に一致しており、流量解析においては本モデルが十分妥当であることを確認した。図-14 には 10 月 1 日 0 時の小鴨川上流各支流域の斜面安全率 F_s の分布を示しているが、殿ダム上流域の解析と同様、流域によって斜面崩壊危険度の高低が大きく異なった。これは、各支流域の解析に用いるデータを最寄りの雨量観測所データとしたことで、降雨の空間分布が反映されたことも一因であると考えられる。以上の解析から、広瀬川、矢送川、福原・赤谷川の溪流沿いからの土砂生産が顕著であったことが推察される。しかし一方で、図-15 に示される土砂流出量をみると、前述の流域からの土砂流出は顕著ではないことがわかる。これは、活発な土砂生産と十分な溪流流量が合わさることではじめて流出土砂量が増大することを示唆している。なお、大山近傍の西鴨谷・泉谷・小泉谷流域の流出土砂量が顕著に算定されたが、これは本計算の初期溪流堆積厚が過大であったことが原因と考えられる。

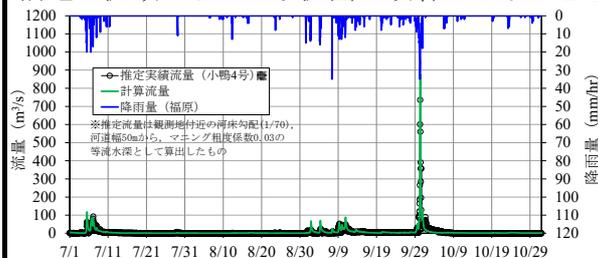


図-13 小鴨 4 号砂防堰堤地点の流量を対象とした計算結果と実績データの比較

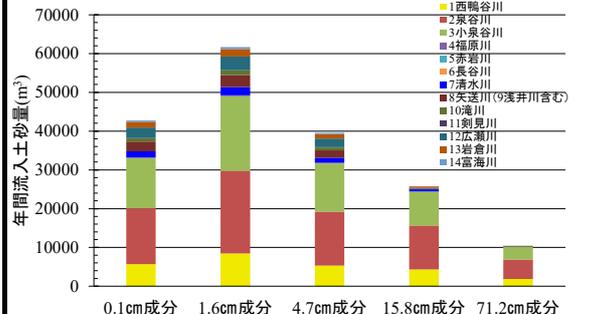


図-15 2018 年の小鴨川上流の流域別年間流入土砂量計算値 (※掃流砂のみ考慮)

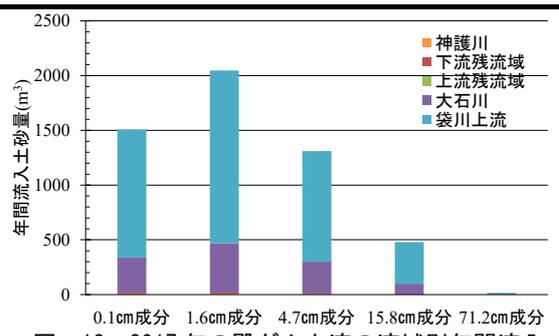


図-12 2017 年の殿ダム上流の流域別年間流入土砂量計算値 (※掃流砂のみ考慮)

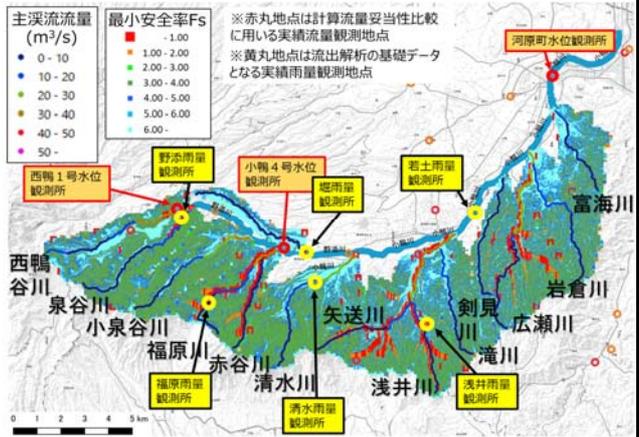


図-14 開発モデルによる主溪流流量と斜面安全率分布に関する計算結果 (2018/10/1_0時_小鴨川上流)

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

	計画額	実績額（単位:円）
設備備品費	650,000	892,870
消耗品費	490,000	457,458
借料損料	0	0
資料費	0	0
印刷費	100,000	87,680
旅費	150,000	176,992
謝礼金	225,000	0
その他（間接経費）	250,000	285,000
合計	1,900,000	1,900,000

「設備備品費」については、超音波式簡易流量計や給水装置の設置費が増大し、当初計画より増額となったが、「謝礼金」などに申請者の委任経理金などの予算を割り当てることで予算計画の範囲内に収まり、研究計画に支障はなかった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では、集水域内の崩壊発生（土砂生産）と土砂輸送の時空間的な把握に基づく貯水池堆砂の量的・質的予測に資するため、集水域内の降雨データをもとに崩壊発生を含めた谷筋内への降雨・土砂の流出過程と、谷筋内の多様なサイズを考慮した集合運搬・括弧運搬による流下過程を統合した数値解析モデルの開発を試みた。

開発モデルの構築は本研究期間に概ね達成され、土石流流動深 0.01 倍オーダーの細粒砂を含めた多様な粒度構成から成る土石流（集合運搬）の粒度偏析過程、同時多発的な土石流・洪水流の流入による最大浸水深・堆積厚分布について実現象を概ね再現可能となった。さらに、降雨データに基づく斜面崩壊の時空間分布と土石流（集合運搬）の粒度偏析を含む土砂輸送を組み合わせたモデルにより、実洪水の流出ハイドロの再現が可能となるとともに、各支流域の斜面崩壊危険度（土砂生産ポテンシャル）と土砂輸送ポテンシャルが表現可能となり、両ポテンシャルの組み合わせに基づく支流域単位の時空間的な土砂流出予測のスキームが構築された。今後、これらの各モデルを統合することで、豪雨に伴う崩壊発生から粒径別土砂輸送、貯水池内堆積までのダム上流域の土砂移動サイクルを統一的に予測するシステムの確立に繋がると考えられる。

しかしながら、本システム確立において解決すべきいくつかの課題も見出された。本システムの更なる精度向上のための課題を以下に列挙する。

- (1) 溪流勾配変化に伴う土石流内部の粒度偏析変化において再現性が十分でない。このことから、数値解析で取り入れている大粒子集積モデル（「小粒子の選択的落ち込み」以外にもあるかどうか）を見直す等の対応が必要である。
- (2) 貯水池堆砂量実績に対する再現性が十分でない。これは、①掃流砂のみを対象としており浮遊砂成分を考慮できていないこと、②流域内の河床材料粒度分布設定、③溪流内の大礫移動限界条件を十分に反映できていないことなどが原因と考えられ、今後対応策を検討する必要がある。

本研究で構築したスキームを用いて他のダム堆砂実績の再現を行い、(1)(2)の課題の解決方策を検討するとともに、スキームの更なる妥当性向上を進めていきたい。当該スキームを用いたダム貯水池への流入土砂予測から、支流域別の効率的対策(浚渫・貯砂ダム)が可能となる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

（学術誌への投稿）

- 1)和田孝志, 虫明寛人, 三輪 浩 ; 石礫型土石流に含まれる砂成分が先頭部大粒子集積過程に及ぼす影響, 土木学会論文集特集号 (水工学), Vol.80(16), 2024 年 2 月.
- 2)T., Wada, H., Mishima, J., Takemura, K., Kobayashi and H., Miwa; Transition Indices of Sediment-Transport Modes on a Debris Flow Resulting from Changing Streambed Gradients, *Water*, Vol.14(11), 1810, 2022 年 6 月.

（学会での発表）

- 1)三島大侃, 大山翔矢, 和田孝志, 三輪 浩 ; 異なる勾配変化条件下における土石流の流動形態遷移過程, 令和 6 年度土木学会中国支部研究発表会, 2024 年 6 月.
- 2)大山翔矢, 三島大侃, 和田孝志, 三輪 浩 ; 勾配変化が 2 粒径混合土石流の先頭部水量に及ぼす影響, 令和 6 年度砂防学会研究発表会, 2024 年 5 月.
- 3)T., Wada, H., Mushiake and H., Miwa; Effect of Including Sand Component in a Debris Flow on Concentration of Coarser Particles at the Flow Front, *Proc. of 8th International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation, Turin, Italy*, 2023 年 6 月.
- 4)大山翔矢, 三島大侃, 和田孝志, 三輪 浩 ; 粒度構成が異なる土石流の勾配変化に伴う流動特性遷移, 令和 5 年度砂防学会研究発表会, 2023 年 5 月.
- 5)虫明寛人, 和田孝志, 三輪 浩 ; 砂含有割合が土石流の先頭部粒度偏析に及ぼす影響, 令和 5 年度砂防学会研究発表, 2023 年 5 月
- 6)虫明寛人, 和田孝志, 三輪 浩 ; 土石流構成材料の粒径区分と先頭部粒度偏析との関係 令和 4 年度砂防学会研究発表会, 2022 年 5 月.
- 7)三島大侃, 和田孝志, 三輪 浩 ; 流路勾配変化に伴う土石流流動特性の段階的遷移過程, 令和 4 年度砂防学会研究発表会, 2022 年 5 月.