

報告書概要

①技術研究開発テーマ名	高原流域における豪雨による土砂災害軽減に関する研究
②研究代表者	
氏名	所属・役職
堤大三	京都大学防災研究所・准教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
藤田正治	京都大学防災研究所・教授
酒井英男	富山大学理学部・教授
竹林洋史	京都大学防災研究所・准教授
宮田秀介	京都大学防災研究所・助教
④背景・課題	
<p>本研究は、神通川水系高原川流域を対象とし、豪雨によって引き起こされるフラッシュフラッドや急激な土砂流出等の災害現象に関して、現地モニタリング、数値シミュレーション の手法を用いてその軽減、防止に資する対策を検討するものである。</p> <p>本研究の背景に関して以下に述べる。これまで国および地方自治体の精力的な砂防事業が行われてきたが、たびたび豪雨によって大小の土砂災害が発生している。神通川水系高原川においても、1979年8月に豪雨により洞谷において土石流が発生し人的・物的被害が起こるなど、多くの土砂災害が発生してきた。高原川流域は北アルプスを源流に持つため、急峻なだけでなく、複雑な山岳地形により、降雨の空間的不均一性が高いと考えられる。また近年では「ゲリラ豪雨」と称される非常に局地的な集中豪雨の存在が注目されている。局地的な豪雨はフラッシュフラッド（以下、FF）や急激な土砂流出の発生要因となることもあるため、既存対策に加えてこれらへの対策は新たな課題となっている。しかしながら、FFについては研究例が非常に少なく、現象の把握も進んでいない。また、急激な土砂流出をもたらす斜面崩壊および土石流についても発生現象が完全に解明されるには至っていない。</p> <p>豪雨に伴う土砂災害の防止、軽減のためには、レーダ雨量計による計測雨量を入力値としたリアルタイムシミュレーションを行い、FFや急激な土砂流出現象の予測・警報を実施するシステムが非常に有効になると考えられる。FFの発生機構はほとんど未解明であることや、斜面崩壊とそれに伴う土石流発生機構に関しても、地下構造の複雑性を考慮しなければならない事などから、現在の解析手法では十分な精度を満足する予測は難しいと考えられる。研究期間内で、これらの課題を克服して、実用化に耐える精度を満足する解析手法まで発展させる事は簡単ではない。しかしながら、FFについては、重点的に実施するモニタリング結果から、発生機構が明らかになれば、比較的实现可能性が高いと考えられる。また、急激な土砂流出現象に関しては、シミュレーションによる予測と平行して、流砂観測システムと降雨計測によるモニタリング自体からリアルタイム予測を行う事が非常に有効であると考えられる。これらの観点も含めて、近い将来の実用化を視野に入れ、解析手法の効率化、高精度化を目指すものである。</p>	
⑤技術研究開発の目的	
<p>本研究では、(1) 山岳帯を含めた山地流域全体での降雨分布特性を把握し、(2) FF現象および(3) 土砂生産から河道への土砂供給と続く一連の土砂流出現象のモニタリングや数値シミュレーションに基づいて、これらの災害現象に対する対策を整理、検討することを目的とする。山地流域である高原川流域全体での降雨分布およびその特性を明らかにするために、既存のCバンドレーダ情報を有効活用する。また、FFおよび土砂流出現象についてはそれぞれ、高原川支川の双六川流域、足洗谷流域において詳細な現地モニタリングを行う。モニタリング結果をもとにシミュレーションを行い、今後の対策方</p>	

法を検討する。

⑥技術研究開発の内容・成果

ここではまず研究期間である H23 年度から H25 年度までの実施内容について簡単にまとめ、その後、それらにより得られた成果概要を示す。

H23 年度は、高原川支流の双六谷流域上流部である金木戸川流域を対象とした現地観測と数値解析を重点的に実施した。現地観測では、設置した観測システムが、実際の降雨流出による出水イベントに対して耐久性が十分でなく、目的とする観測データを獲得十分には取得できなかった。一方で、フラッシュフラッドの発生についてのシミュレーションモデルを高度化させ、いくつかの異なる発生機構による急激な出水を表現することが可能となった。急激な土砂流出現象に関しての検討では、高原川流域の内、焼岳を源流とする足洗谷流域を対象として、ハイドロフォンを用いた掃流砂の連続観測を実施し、定量的な掃流砂観測を連続的に実施する手法の確立を行った。

H24 年度は、フラッシュフラッドに関しては、金木戸川流域を対象とした現地観測に重点を置き、観測システムを修正して、確実なフラッシュフラッド現象のデータ取得を試みた。土砂流出に関しては、昨年度同様に観測を継続し、ハイドロフォンによる音響波形の積分値（音圧）とピット流砂量計による掃流砂量のキャリブレーションデータの蓄積を行い、より正確な掃流砂量観測の構築を行った。

H25 年度は、フラッシュフラッドの現地観測を継続するとともに流出シミュレーションによるフラッシュフラッドの再現と河川利用者の避難への活用についての検討を実施した。また、足洗谷流域を対象とした土砂生産と流出を結合したシミュレーションモデルを開発し、年間を通しての土砂生産・流出解析が可能となる手法を構築し、この結果と実測土砂流出量との比較を行う事で検証を行った。さらに、同土砂生産・流出モデルの蒲田川流域に対する適用も試みた。

以下に、フラッシュフラッドに関する検討、土砂流出モニタリング、土砂生産・流出統合モデルの構築について、それぞれその内容・成果を示す。

「フラッシュフラッドに関する検討」

フラッシュフラッド研究の背景

我が国は、世界有数の自然災害の多発国である。地震、豪雨、土石流、斜面崩壊、洪水、高潮やその他異常気象などの災害は毎年のように報道されている。そのような自然災害の一つとして、近年、記録的な短時間豪雨が多発するとともに、フラッシュフラッド（鉄砲水）と報道される災害事例が報告されるようになってきている（図-1）。

フラッシュフラッドとは、山地流域において発生する土砂濃度の比較的低い急激な出水現象である¹⁾。フラッシュフラッドの発生要因としては、局所的な集中豪雨、集水性の高い地形、大量の地下水湧出、短時間で決壊する小規模河道閉塞（天然ダム）などが指摘されているが、それぞれの発生要因がどの程度影響があるのかについては不明な点が多い。フラッシュフラッドが発生しやすい場所の推定やその河道における避難計画の策定のためであったり、短時間で予測が容易なのか可能なのかどうかといった防災計画のためにも、フラッシュフラッドの発生要因の影響規模について研究することは重要である。

現地観測

①対象流域の概要

神通川水系金木戸川は、図-2に示すように、北アルプス双六岳・樺沢岳等を源流とし、岐阜県上宝町を流れ、神通川右支川高原川に合流する、流域面積 60.9km²、河川延長 12.3km、平均河床勾配約 1/10 の有数の急流河川である。金木戸川（双六川）の詳細を見ると、高原川の合流部から約 6km 上流には双六ダムがあり、これより上流は双六川から金木戸川へと名前を変える。さらに上流へ 8km 弱で中ノ俣川と谷を大きく分けた後も、小倉谷と打込谷と谷が分かれ、双六本谷となり双六岳・樺沢岳へと至る（図-3）。金木戸川流域は非常に険しくなり、広河原から上流の蓮華谷に至るまでの両岸はゴルジュ帯と呼ばれる標高差 1000m 以上の断崖を形成している。高原川に合流したのちは、岐阜県と富山県の県境で宮川と合流し神通川となり、日本海に注ぐ。双六川を含む北西部は役場や集落が点在し、東部は奥穂高岳や日本有数の活火山である焼岳を望み、麓には奥飛騨温泉郷と呼ばれる平湯・新平湯・福地・

栃尾・新穂高温泉などが点在し、観光地として賑わっている。また、中部山岳国立公園に指定されるように豊かな自然環境が残されている。高原川流域の10年間(1976~1985年)の年降雨量は、流域平均で1700~2500mm、上流の山岳地帯では3000~3200mmであり、多雨・豪雪地域であるため、急峻な地形と豊かな水を利用した水力発電地帯としても知られる。このように高原川流域の治水・利水・環境についての意義は大きい¹⁴⁾。双六川は、以上に述べたように豊かな自然ゆえキャンプ場・釣り場として賑わい、その源流部の美しい沢や滝は、北アルプス有数の沢として多くの登山家が目指す。しかし、先に述べたように急峻な地形であったり、山岳地域特有の気候のために、鉄砲水災害の多発地点として、地元住民や沢登りを目的とした登山家にはよく知られ、近年では、2005年8月に合宿を行っていた大阪大学の学生3名が鉄砲水と思われる増水に遭遇し、1名が亡くなっている。

②現地観測の結果

2012年7月20~23日における水位観測結果を図-4に示す。いずれの観測点においても7月20日12:00から12:30の30分間において急激な水位上昇がみられた。S1, 4ともに川幅が30m以上あり、30分間で0.5m以上という水位の急上昇は急激な流量増加を意味する。また、河道からの避難を考えると、このような急激な水位上昇は非常に危険といえる。このときのS2においてインターバルカメラで撮影された画像を図-5に示す。S2では12:30には河道の端ではかろうじて立つことのできるが、13:00には河道全幅で激しい流れがみられ、13:30には河道内で人が避難する場所が完全に失われている。段波のような洪水流ではないものの、非常に人的災害につながりやすい現象といえる。

ここで、特に8月18日の短期間降雨イベントに注目する。降雨イベントは総降雨量36.8mm、1時間最大降雨量28.9mmであり、短時間に降雨が集中していた。下流側のS1において、上流側のS2よりも早いタイミングで水位が上昇した(図-6中矢印)。また、この10分間での水位上昇は0.15mであり、観測地点の川幅が広いいため変化幅は小さいものの流量変動は急激であり、S2には見られない水位変動であった。最大水位上昇率はS1, S2でそれぞれ0.15, 0.06 m/10minであり、下流のS1においてより水位上昇が激しいことがわかる。Cバンドレーダ雨量による降雨分布をみると、5分間最大降雨強度Rmaxが流域南部の小流域(小倉谷)において150mm/hの非常に高い範囲が存在した(図-7)。小倉谷はS1~S2間で本流と合流しており、小倉谷における非常に強い降雨がS1における急激な水位上昇の要因と考えられた。

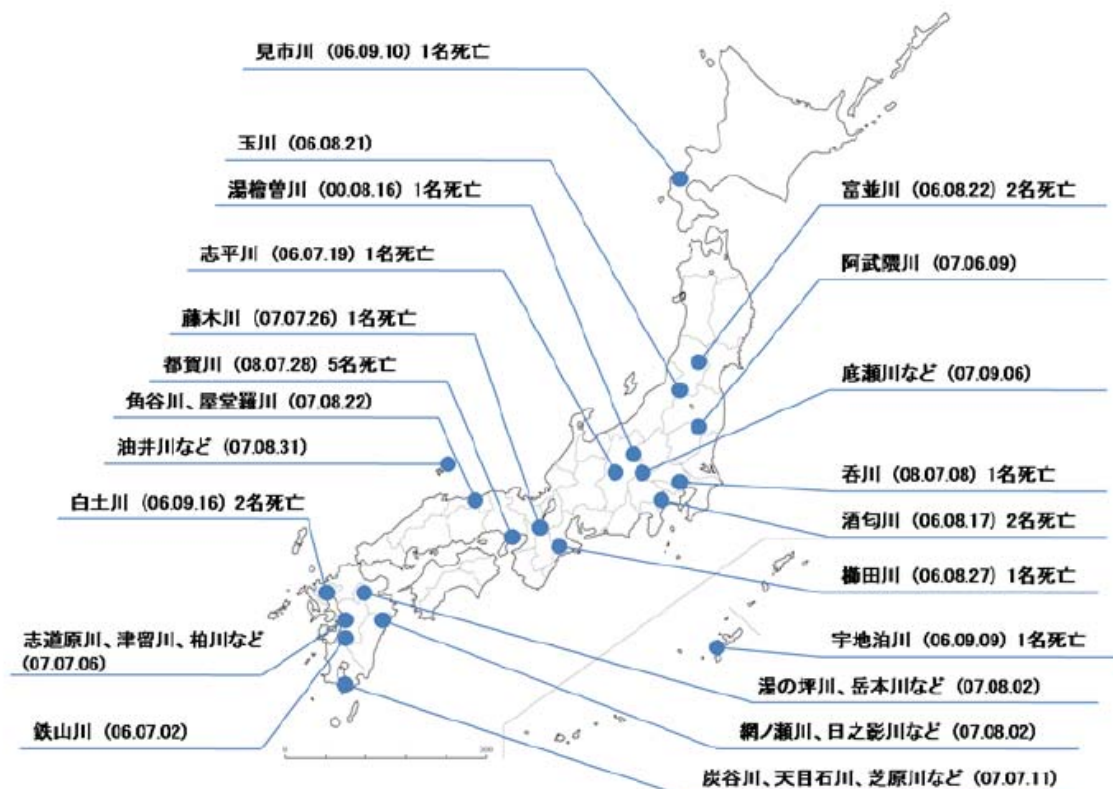


図-1 近年発生したフラッシュフラッド災害

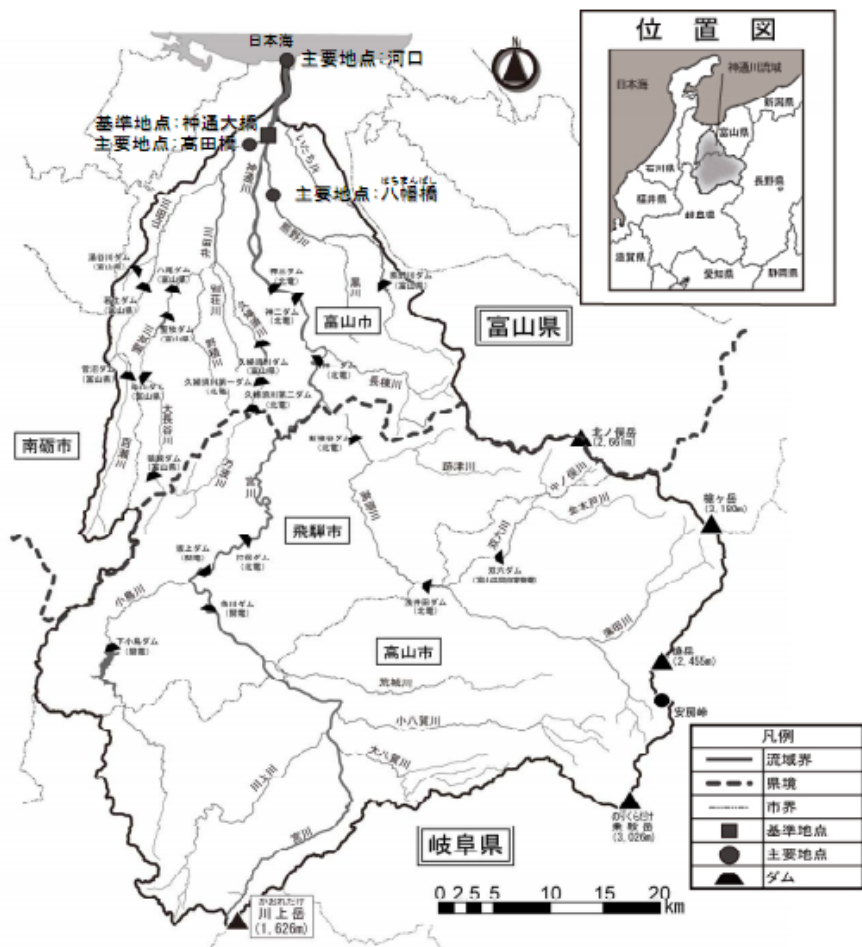


図-2 神通川水系金木戸川

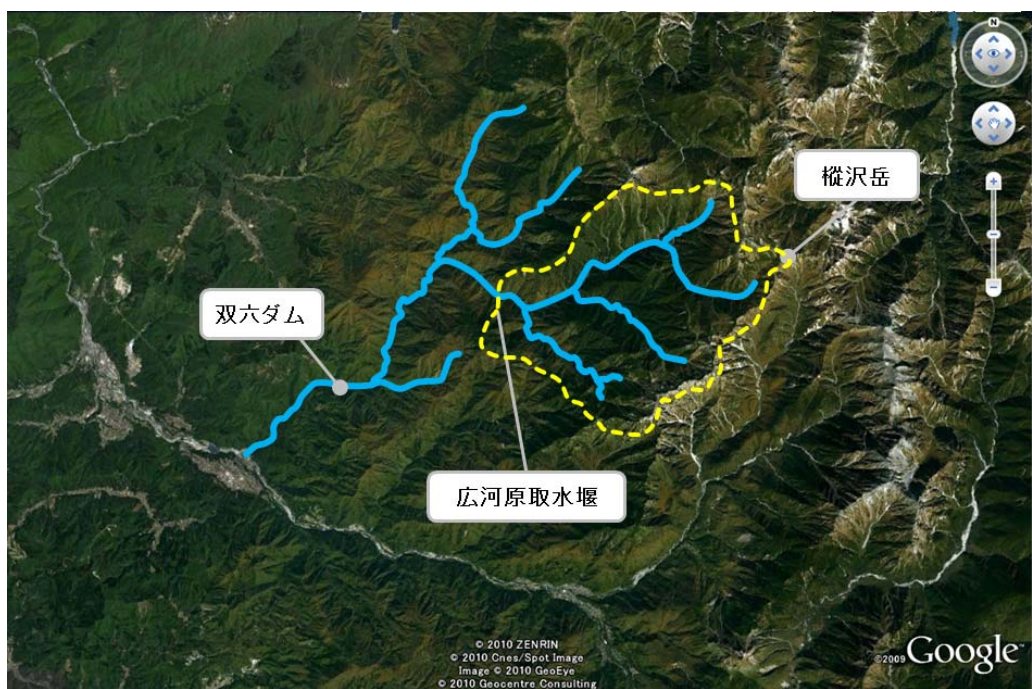


図-3 神通川水系双六川～金木戸川流域

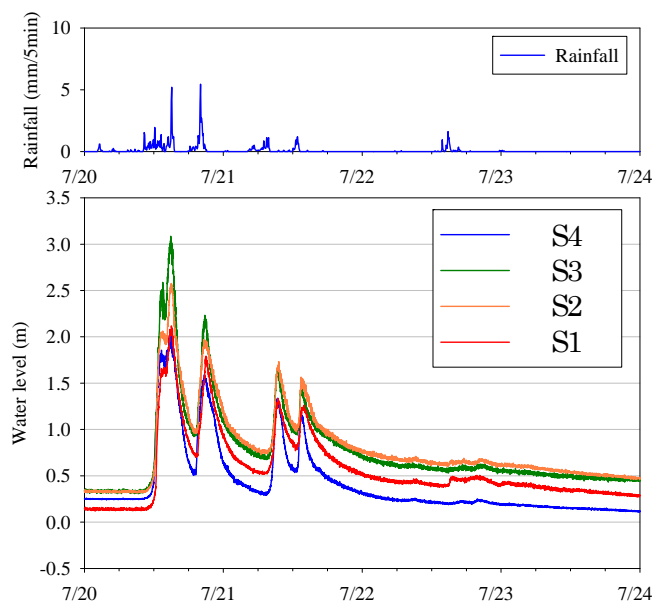


図-4 2012年7月20～23日の水位観測結果



図-5 2012年7月20日のPoint 3における水位変動の様子

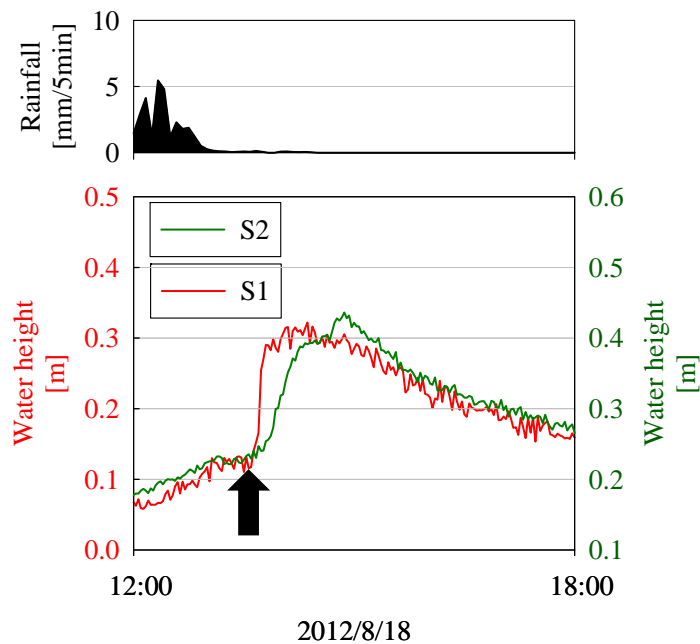


図-6 2012年8月18日のS1およびS2におけるレーダ雨量および水位観測結果

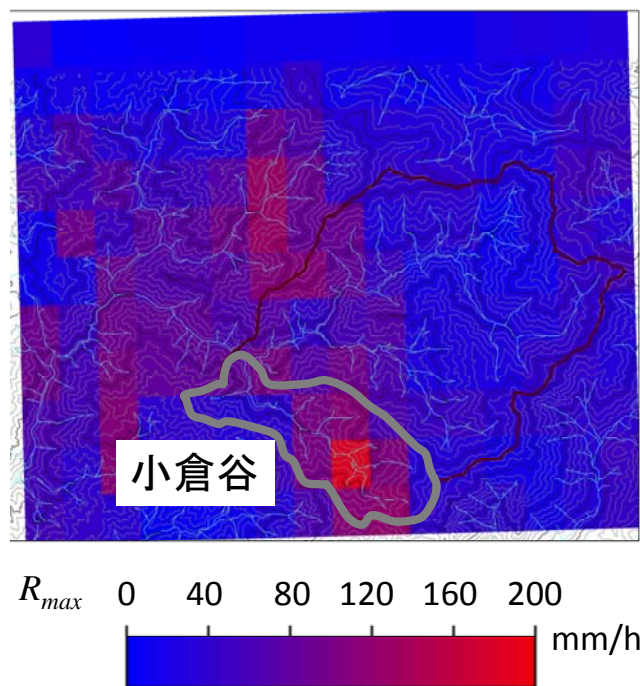
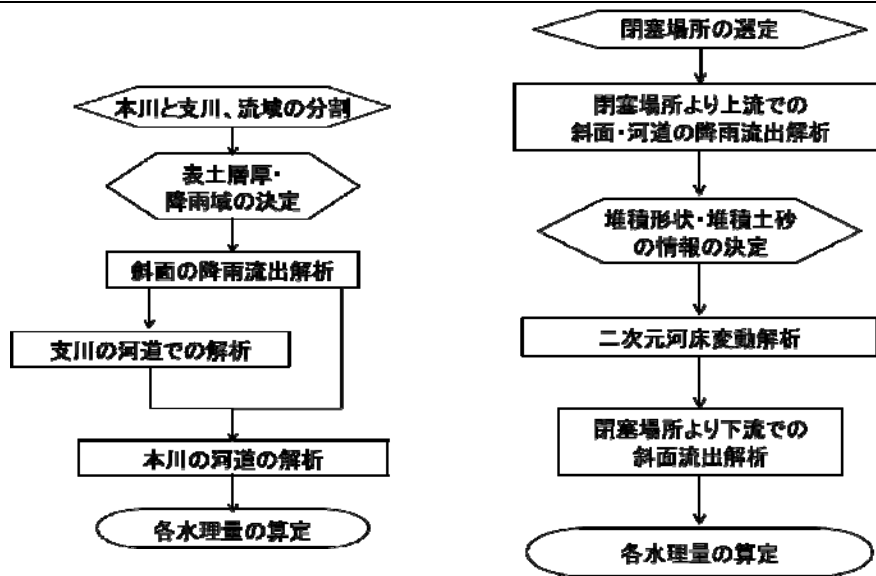


図-7 2012年8月18日イベントにおける5分間最大降雨強度 R_{max} の空間分布

数値シミュレーションモデルの概要

本研究で用いた数値シミュレーション方法について説明する。本研究では、土砂移動を考慮しない水文学的要因と、土砂移動を考慮する土砂水文学的要因（例：河道閉塞の形成・決壊）というように、フラッシュフラッドの発生要因を大きく2つのグループに分け、数値シミュレーションを用いて検討を行った。また、流域を斜面部と河道部とで分割してシミュレーションを行った。

計算の流れは、図-8(a)に示すように、①各斜面の地形情報、土層の透水性および降雨に関するデータを入力する。②降雨流出解析により斜面末端からの流出量を計算する。③計算過程②で得られた流出量を流入量として、河道部において kinematic wave 方を用いた流出解析を行い、各地点における水量を算出する。斜面部の流出解析のモデルは、高橋・中川を参考にした。また、パラメータは山地流域



(a) 水文学的要因についての数値解析 (b) 河道閉塞を伴う数値解析

図-8 数値シミュレーションの計算フロー

で一般的な値を元に、実測値と適合するように試行錯誤的に決定した。

本研究では土砂水文学的な要因として、短時間河道閉塞の決壊を検討した。河道閉塞部分は側岸侵食を考慮した2次元の河床変動モデルを用いた。計算の流れは、図-8(b)に示すように、①河道閉塞の発生を仮定する地点を選定し、計画区間を設定する。②河道閉塞した堆積地形情報、堆積土砂の特性および、計画区間への流入ハイドログラフを入力する。③河床変動解析を行い、河床変動、水位、下流端での流砂量および流量を算出する。④計算過程②で得られた流出量を流入量として閉塞地点より下流の流出解析を行い、最下流端での水理量を算出する。

モデル計算の適用例（危険度指標の提案）

ここでは、フラッシュフラッド発生によって河川利用者が被災する事を避ける事を目的とし、数値シミュレーションを用いたフラッシュフラッドの危険度指標を提案する。シミュレーションは2012年8月18日の降雨イベントに対して行った。土壌内飽和帯水位などの初期条件は、降雨開始前約2週間のシミュレーション結果を用いた。シミュレーションは異なる降雨を与えた以下の2条件について行った。

Case 1：下流域におけるCバンドレーダ雨量を均一に流域に与える（降雨の空間分布なし）

Case 2：レーダ雨量を適用（降雨の空間分布あり）

この2条件の結果を比較することで、降雨の空間分布による流出への影響を検討する。加えて下流域の河川利用者が想定する水位変動（Case 1）と実際の水位変動（Case 2）の違いから避難に向けた危険度の指標を検討する。

(1) 急激な水位上昇の要因

図-9にS1における水位変動シミュレーション結果を示す。均一な降雨を与えたCase 1に比べて降雨分布を考慮したCase 2では約40分早く水位上昇が始まった。またシミュレーションでは河道を矩形で仮定していることもあり絶対値は再現できていないが、Case 2では観測結果でみられた水位上昇の停滞（13:00～13:34）およびその直後の急激な水位上昇を定性的に再現することができた。この結果からも山岳地域における降雨分布がフラッシュフラッド発生機構に影響を及ぼしていることがわかる。

次に、シミュレーションを用いた河川利用者に向けたフラッシュフラッドの危険度指標について考察する。河川利用者は基本的には現在地での降雨の状況から河川水位の変化を推定する。したがって、上流域のみで集中的な降雨が発生した場合には下流の河川利用者は水位上昇を予想できず避難が遅れることとなる。そこで、避難できない「危険水位」と「現在水位」の差を「危険水位到達までの時間」で除した値をフラッシュフラッド危険度指標（単位：m/min）とした。

$$\text{フラッシュフラッド危険度指標} = \frac{(\text{危険水位}) - (\text{現在水位})}{(\text{危険水位到達時刻}) - (\text{現在時刻})}$$

したがって、短い時間で危険水位まで到達するほど、もしくは危険水位と現在水位の差が大きいほどこの指標は大きく計算される。

Case 2 のシミュレーション結果を用いて下流域におけるフラッシュフラッド危険度指標の時間変化を求めた (図-10)。ここでは便宜的に危険水位を 0.65 m とした。その結果、降雨開始から危険度指標は徐々に増加し、水位上昇が停滞しはじめとともに一旦は降雨前の値まで減少する。その後、時間の経過とともに急激に 0.0095 m/min まで上昇し、危険水位に到達する。

ここで提案した危険度指標は河川水位の予測結果から求めることで、河川利用者の避難に有効活用できる。また、本研究で対象とした山岳流域では特に降雨の空間分布が大きく、先に示したように流域の一部に供給された降雨が水位の急激な上昇をもたらす可能性があるため、水位予測の入力降雨には予想降雨の分布を用いるべきであろう。このような予測に基づく情報は、河川利用者の予想しない急激な水位上昇による被害の軽減に貢献すると期待される。

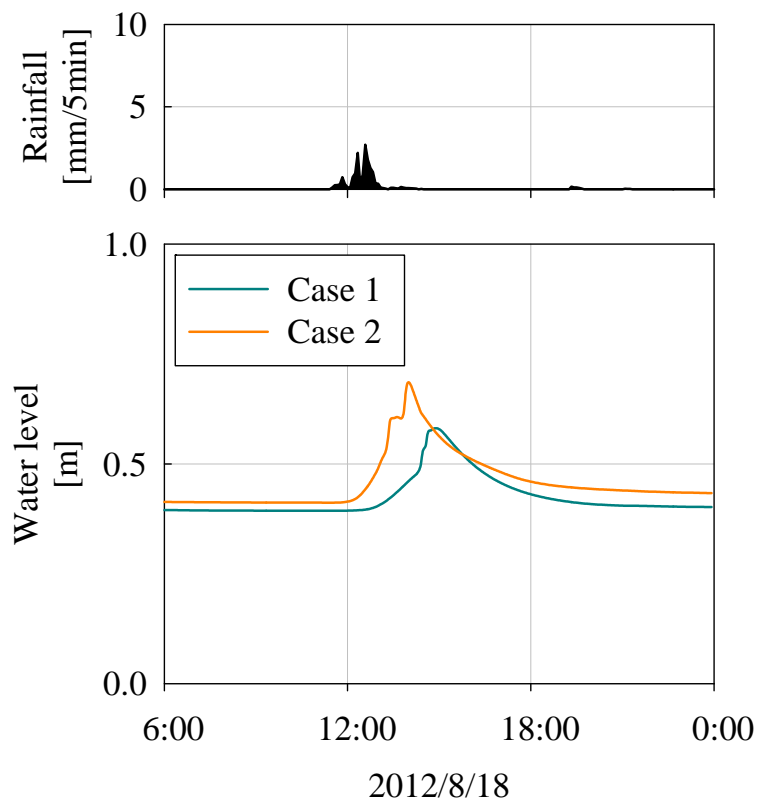


図-9 S1 における水位シミュレーション結果

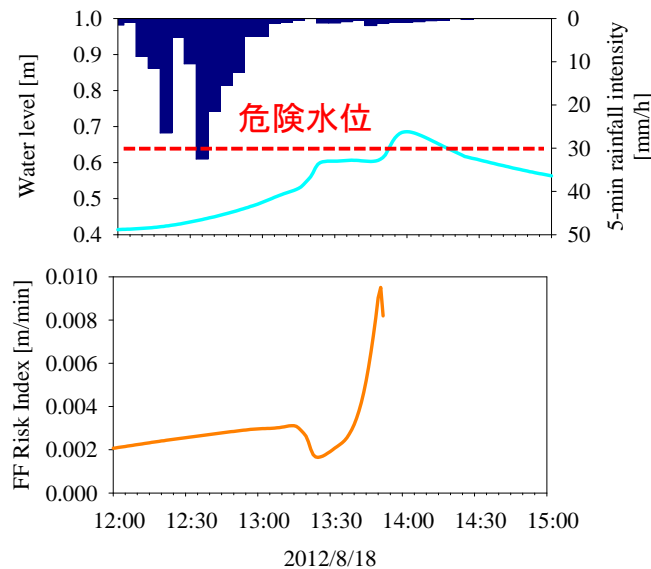


図-10 (上) Case2 による水位シミュレーション結果および
(下) フラッシュフラッド危険度指標

「土砂生産・流出統合モデルの構築」

土砂生産・流出現象に関する背景

流域全体における土砂動態を把握し予測することは、治水・利水だけでなく、望ましい流砂環境を構築するために、極めて重要である。例えば、流域内の土砂移動が巻き起こす現象および諸問題として、ダム堆砂による貯水容量の減少、河床上昇による流下能力の低減および洪水危険度の増大、河床低下による橋梁基礎の不安定化などがある。また沿岸部では、流砂量の減少による海岸侵食が生じ、国土の減少のみならず様々な防災上の問題も生じている。さらに生態系の観点からは、河道内の土砂は生物の生息場や産卵場と深く関係があり、河道に到達する土砂量が減少することは生物にとっても大きなインパクトとなることが従来から指摘されている。さらに、海岸においても砂浜の減少が産卵場や繁殖場にダメージをもたらしている。

このような状況の中で、1990年代頃までは砂防、ダム、河川、海岸の個々の領域で生じる問題に対しては、各領域で個別に対応されてきた。しかし、土砂の移動は本来流域を一貫するものであり、流域内の土砂移動特性の変化が生じさせる問題に対しては、個々の領域の対処のみでは不十分であることから、現在では「総合的な土砂管理」が叫ばれている。これは、流域全体を流砂系として捉え、上流域での土砂生産から中下流部および沿岸への土砂の移動までを総合的に管理しようとするものである。総合的な土砂管理の達成に向け、これまで多様な取り組みや研究がされてきた。これまで中下流部の河道内の土砂の移動についてはある程度の成果が得られている。しかしながら、中下流部の土砂移動の予測を立てるには、上流部からどれだけの土砂が流入するか、という境界条件を知ることが必要不可欠である。この境界条件についてはさまざまな検討が行われており、ダム堆砂量や雨量・地質を基にした統計的な手法、ハイドロフォン等を用いた観測的な手法、または数値解析的手法のいずれかに大別される。この中でも、流域の特性に依存せず、将来予測を行うことや大規模現象後の対応が可能である数値解析手法は、極めて重要であると考えられる。しかしながら、上流部の土砂の生産・移動過程は存在する土砂量に支配され、流砂量式では予測できないため、これまで精度の高い解析手法は確立されていない。本研究は、山地流域における土砂の移動過程を再現できる数値解析モデルについて検討を行うものである。

土砂生産・流出統合モデルの概要

土砂生産、土砂供給、土砂輸送過程のモデルを結合した、統合モデルの開発を目的とする。この時、それぞれの過程の実際のプロセスを表現できるよう、個々の現象に対して新たにモデルを構築、または

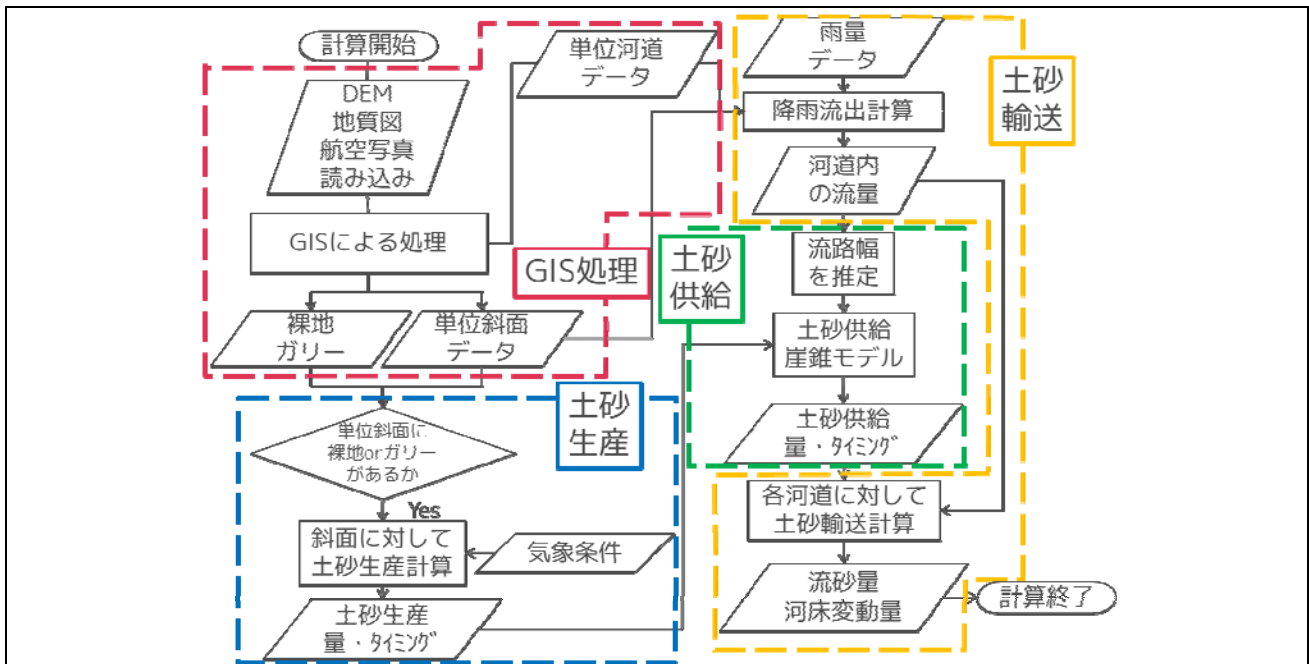


図-11 土砂生産・流出統合モデルの全体構成を表わすフロー

既存のものを改良して用いるものとする。ここでは、定常的な土砂生産を扱うものとし、土砂生産現象としては裸地における基岩の凍結融解による土砂化と、火砕流堆積物域におけるガリ壁面の侵食を対象とする。これには、泉山らの凍結融解基岩土砂化モデルと、芦田らのガリ侵食深推定式を用い、さらに本研究では土砂生産のタイミングも推定するものとする。土砂供給過程については、川幅変動に伴う崖錐の侵食モデルを構築する。その後、これらを江頭松木による土砂流出（輸送堆積）モデルに結合することで、土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積の統合モデルを提案する。

モデルは図-11に示したフローに従うものとする。まず、土砂生産モデルによって各単位斜面の土砂生産量および生産タイミングを推定する。その後、このデータを基に供給モデルと輸送モデルを同時に用いるものとする。GISを用いた処理が必要な部分に関してはGRASS-GIS上で動作するプログラムを構築した。

統合モデルによる計算結果（足洗谷に対する適用）

流量の本川観測地点における計算結果を、図-12に示す。この図に、本川観測水路に設置された水位計から求められた流量の観測結果を併記した。ここでは、マンニング式を用い、粗度係数を $0.017 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ として流量を求めている。図-13には、本川（深谷）と各支川（黒谷、割谷、白水谷）における流出した掃流砂量の累積値を示している。ここでは計算値に加えて、ハイドロフォン（音響波形法）を用いた観測結果を併記した。

この図より、本川（深谷）では年間の土砂流出量に関しては、ある程度の定量的な精度が確認された。しかし、各支川では計算が過大評価となったもの（黒谷および白水谷）と、過小評価となったもの（割谷）が確認された。この原因としては、ハイドロフォンの観測の精度が十分でないことが考えられる。ハイドロフォンを用いた掃流砂量の推定方法は、土砂礫のパイプへの衝突音を観測し、衝突音の回数を計測する方法と、衝突音の音響波形の積分値を計測する方法が存在している。ここでは、音響波形法を用いた流砂量の観測結果を用いている。これまで、音響波形の積分値の測定結果と掃流砂量の関係性については、大流量時に衝突率が減少すること、粒径ごとに生じる音圧値が異なる影響などにより、単純な線形関係にはないことが明らかとなっている。しかし、ここではこの観測結果に関する詳細な考察は困難であるため、ピット流砂量とハイドロフォン間を用いたキャリブレーション実験の結果から線形関係を仮定した。現在のところ本流域では本川観測地点においてしかキャリブレーションは実施されていないため、他の支川地点にも本川でのキャリブレーション関係を用いて推定を行なったが、本流域は多様な地質から構成されているため、掃流砂の特性が各支川で異なると推定され、各観測点周辺の水理特性も異なることが考えられる。このため、支川のハイドロフォンへの適用性には限度があると考えられ

る。ここでは観測結果と計算結果の双方について流出率を累積掃流砂量を年間の累積量で除したのとして定義し、各支川において比較を行うものとする。その結果が図-14である。融雪出水を考慮していないために春期の土砂流出量が過小評価となっているものの、概ね年間のグラフ形状は一致しており、本モデルによって流域内の土砂の流出特性がある程度表現できていることが分かる。なお、この検討の際、計算値が hidroフォンによる観測値と比較して最も過大評価となったのは黒谷であった。この原因の一つは hidroフォン の粒径による検出特性の差異にあると考えられる。図-15は本川および各支川の流砂量のうち、代表的な粒径成分の代表粒径とその累積流砂量を示したものである。これによると最も量の多い成分の代表粒径が黒谷では他の支川と比べて小さい事が分かる。さらに黒谷における掃流砂の平均粒径を求めると 0.0069 m であり、割谷 0.027 m、深谷（本川） 0.014 m、白水谷 0.022 m と比較しても特に小さい。 hidroフォン による掃流砂観測における既存の知見として、粒径が小さい成分の実験では 1~2 mm 以下程度) に対しては、流水の音との区別が困難であることから検出率が低くなる事が知られている。また、小さい粒径の粒子は転動、滑動、小躍動とある掃流砂の運動形態の中でも、小躍動となる粒子の比率が上昇するため、 hidroフォン 本体へ接触しないものの割合が増加すると考えられる。したがって、同システムで異なる場所に設置した hidroフォン による観測結果を、同じ式で掃流砂量に変換した場合、平均粒径の小さいものほど過小評価となる可能性がある。これが黒谷において観測値と計算値に大きな開きが生じた一因であると考えられる。

蒲田川に対する適用

蒲田川流域全体に統合モデルを適用し、各支流域からの年間土砂流出量等の解析を行った。流域全体の土砂生産量は 73,787m³/year となり、単位面積あたりに換算すると、770m³/km²/year となった。10km² 程度以上の流域については、年間の平均的な流出土砂量を表す比流砂量と流域面積は、土砂生産の強度に応じて、図のような線形関係があることが知られている。本モデルで算出された土砂生産量は、定常的な現象である凍結融解とガリー壁面侵食を対象としていることから、単位面積あたりの値はおおよそ比流砂量に等しくなると考えられる。そこでこの値を図中にプロットすると、赤丸で示ようになる。これによると、神通川で予想される直線（赤色の点線）よりもやや小さい結果となった。この原因としては、他の土砂生産の要因である斜面崩壊を考慮していないことが考えられる。しかし、オーダー的には近い値が得られており、計算結果は比較的妥当な値であると考えられる。

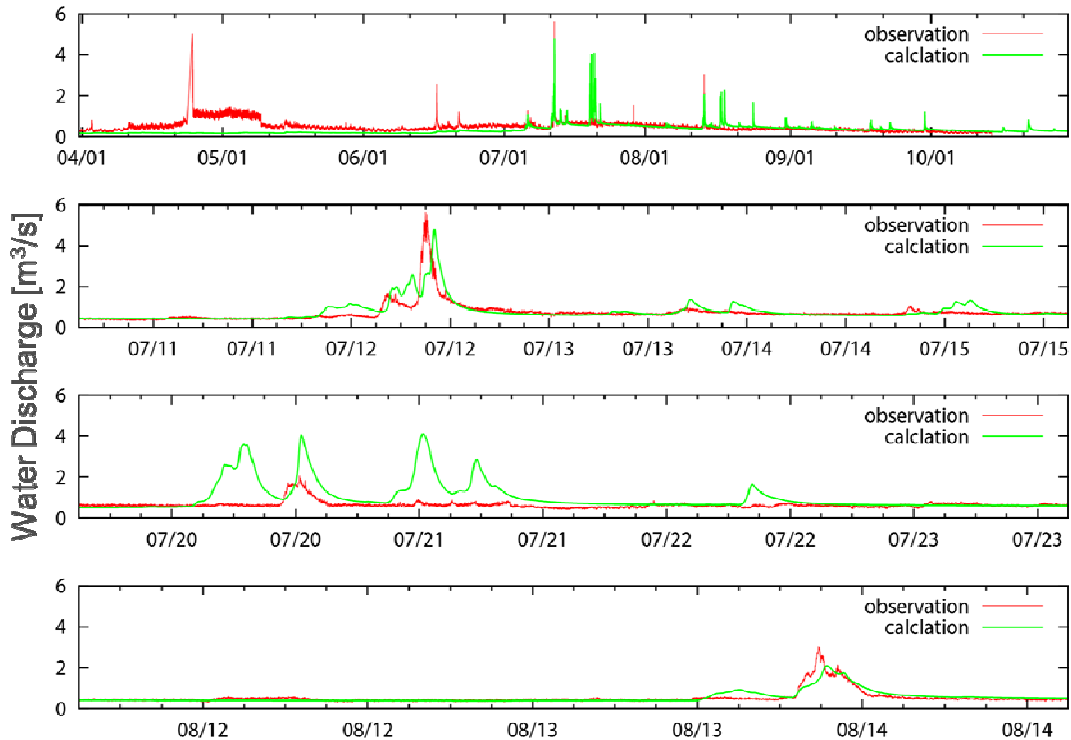


図-12 深谷（本川）における流量の計算結果と観測結果の比較
（全期間および3流出イベント）

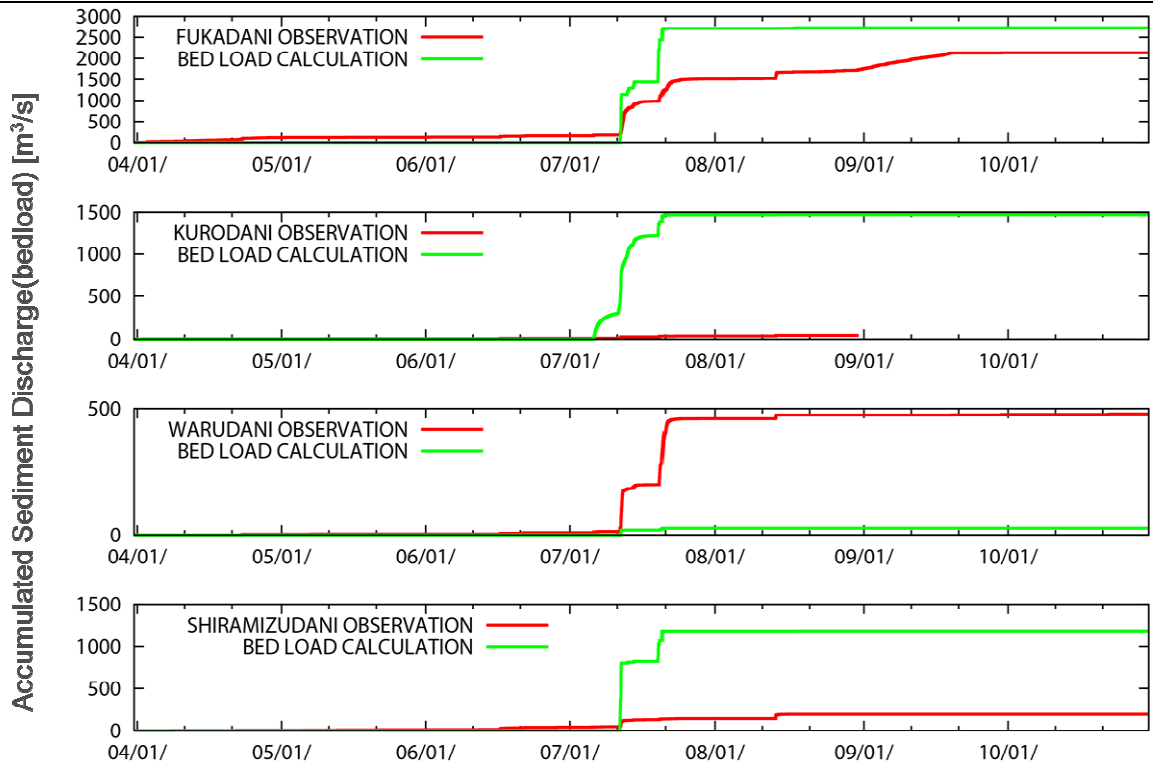


図 - 1 3 各支川における年間の累積掃流砂量 (計算およびハイドロフォンによる観測)

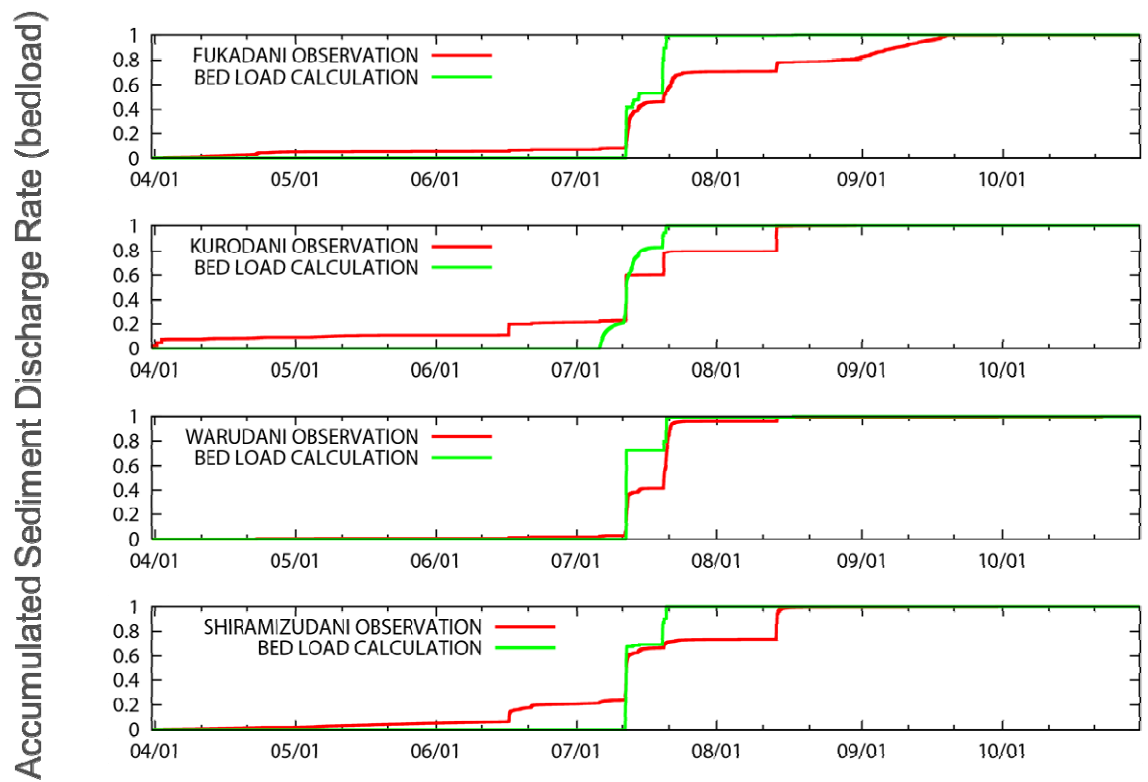


図 - 1 4 各支川における年間の累積掃流砂流出率 (計算およびハイドロフォンによる観測)

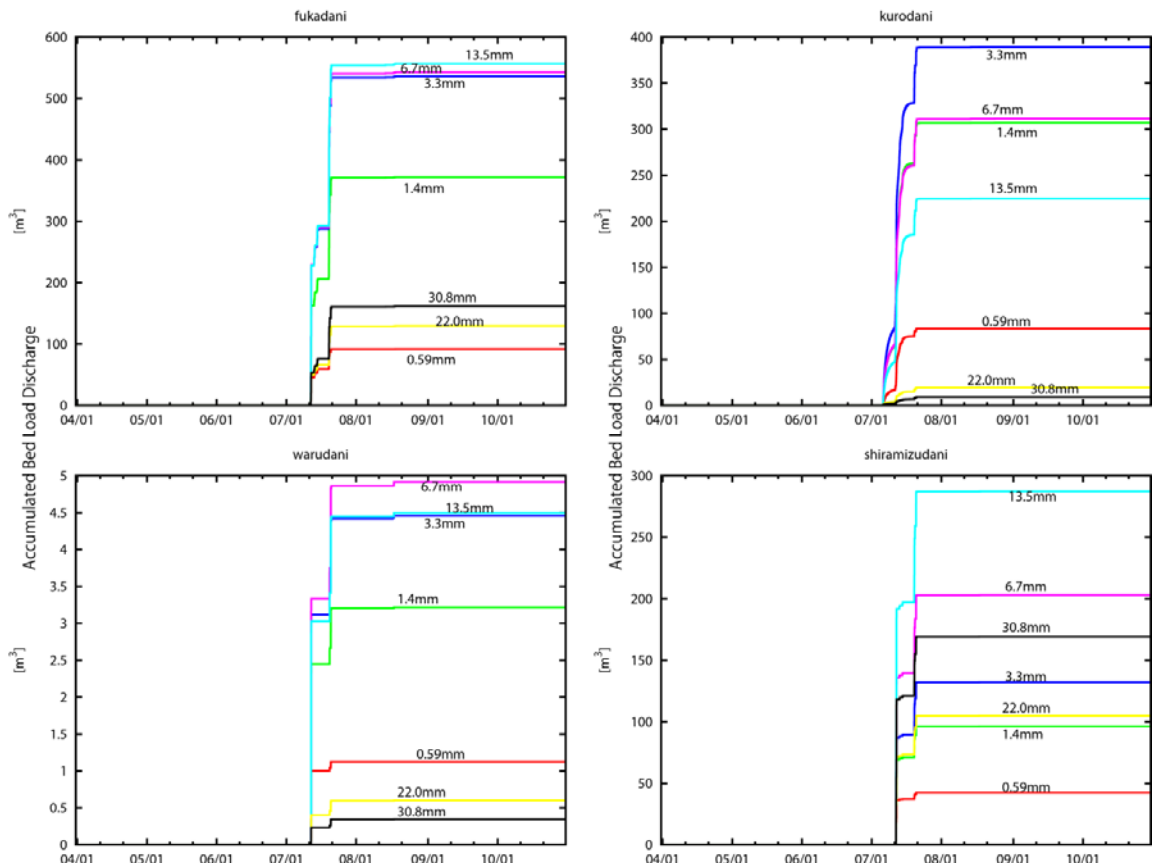


図-15 本川および各支川における累積掃流砂量の各粒形成分（代表的な7粒径を抜粋）

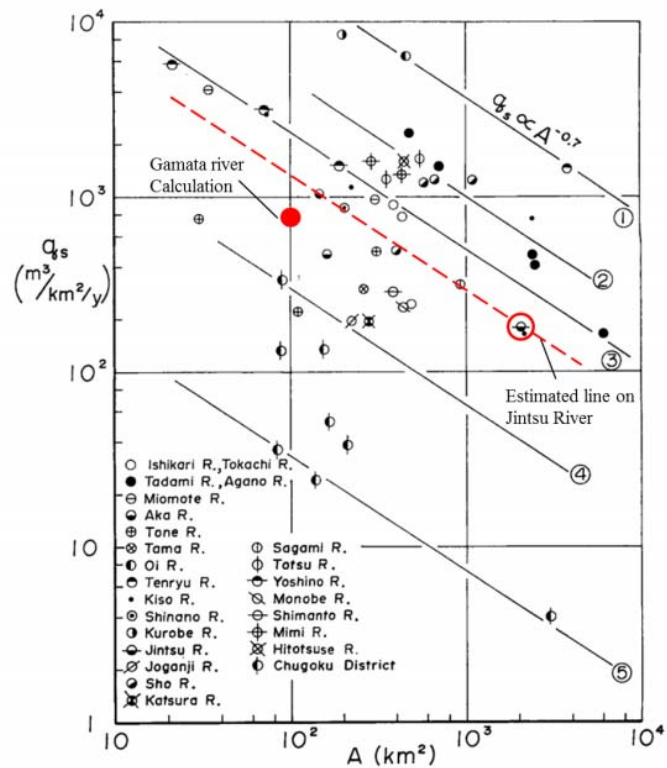


Fig. 2 Relation between specific sediment yield and catchment area in Japan.

図-16 比流砂量および流域面積を基にした計算結果の検証（芦田らに加筆）累積掃流砂流出率（計算およびハイドロフォンによる観測）

⑦今後の課題・展望（本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や砂防行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください）

本研究では、高原川流域の金木戸川（双六川）、足洗谷（蒲田川）流域をそれぞれ対象として、豪雨によって発生する1）フラッシュフラッド現象と、2）土砂流出現象を取り上げて、現地モニタリングの実施と数値シミュレーションモデルの構築によって、現象の把握、メカニズムの理解を試みた。それらの結果から、これら現象によって引き起こされる恐れのある災害現象の防止・軽減に向けた取り組みを試みる。以下に、それぞれの現象に関連して、さらなる発展に向けて残された課題、砂防行政への活用に向けた展望を述べる。

1. フラッシュフラッド現象

1) 数値シミュレーションモデルによる計算において、地上雨量データとCバンドレーダー雨量のデータを用いた場合には、時間分解能の細かいレーダー雨量によるデータの方が、流出は降雨に対して鋭敏に反応し、さらに空間分解能の高い雨量データを用いることで、流域内での局地的な豪雨によるフラッシュフラッドが発生することを捉えることができた。このことから、フラッシュフラッド発生の予測、警戒避難情報の発信のためには、山岳地域における空間解像度と時間分解能の高い降雨分布の予測が要求される。リアルタイムシミュレーションに関しては、実測降雨をそのまま利用することが必要となるが、その場合においても空間解像度・時間分解能の十分に高い降雨分布計測値が必要となる。現時点では、高原川流域においてCバンドレーダ解析雨量が利用可能であるが、さらに高精度のリアルタイム予測が要求される場合はXバンドMPレーダ雨量計による降雨分布計測が望ましい。

2) 流域の地形、地質特性に関しては、数値シミュレーションモデルによる検討によって、流域での斜面の表土層厚が薄くなることがフラッシュフラッドの発生につながるようになった。これは土層による降雨貯留量が貧弱な斜面を有する流域においては降雨流出過程の特性から、急激な出水に寄与する割合が大きいためである。ただし、本研究においては、表土層厚の空間分布を植生分布図と根系深さから推定したものであり、厳密な土層厚分布を採用したわけではなく、実際の降雨流出過程を再現できたかどうかは疑問が残る。斜面崩壊予測の際の降雨浸透・流出予測においても共通する課題であるが、流域における斜面土層厚分布のより正確な評価がフラッシュフラッド発生予測の精度向上に大きく関係するものであり、技術的なブレイクスルーが期待される。

3) いくつかのフラッシュフラッド発生要因について多角的に検討した結果、短時間河道閉塞の決壊がもたらす流量増加が他の要因によるフラッシュフラッドに比べて最も急激な挙動を示し、閉塞場所よりもある程度下流であっても、決壊時の流量増加の影響を強く受けることがわかった。このため、短時間河道閉塞に起因するフラッシュフラッド現象は災害危険度の観点からも最も危険性が高く、その予測、警戒避難が必要とされる。しかしながら、土砂移動による河道閉塞現象を伴うため、実際にはその予測が最も困難な現象でもあるため、豪雨や地震発生時に流域全体を対象とした河道閉塞箇所の早期発見が重要課題となる。このためには、気象条件が許せば、UAVを活用した流域の警戒態勢の充実も一案であろう。また、各支流における水位や流砂量のリアルタイムモニタリングも有効な手段のひとつと考えられる。

本研究においては、数値シミュレーションモデルを活用し、避難できない「危険水位」と「現在水位」の差を「危険水位到達までの時間」で除した値を「フラッシュフラッド危険度指標」を提案した。これは、水位上昇速度の程度を表わす指標であり、高空間解像度・高時間分解能の降雨分布観測（予測）とリアルタイムシミュレーションによって現象の到達前に、警戒情報として発信する事が可能となるものである。実際の降雨とフラッシュフラッド現象によって検証を積み重ねて、予測精度と危険度指標の有効性が確認されれば、この危険度指標を実用化する事も可能であると考えられる。

2. 土砂生産・流出現象

1) 土砂生産量と凍結融解履歴の現地における直接的な関係性が明らかとなっているのは、白水谷堰堤直上および滋賀県田上山地の風化花崗岩のみであり、その他の岩種に関しては泉山らの実験をもとに推定している。今後は、現地における多種の岩種の土砂生産について観測を行い、知見を収集する必要がある。

ある。

2) 土砂生産後に河道に土砂が供給される過程のモデル化において、崖錐が河道の水位上昇によって侵食されるモデルを提案したが、その際の侵食過程を現実的な現象として取り扱っていないため、土砂流出の時間的な進行が正確に再現されていない。この過程をより詳細にモデル化することによって、さらに精度の高い土砂流出予測が可能になると期待される。

3) 土砂供給量については川幅と谷幅のみから推定しているが、流速、掃流力、雨量強度等からも影響を受けると推定されるため、今後は詳細な検討が必要である。

4) 流域によっては斜面崩壊による土砂生産が卓越する事が多く、このような場に適用する場合には斜面崩壊モデルとの統合を図る必要がある。

5) 土砂流出の予測をより実測値に近付けるために、河道形態にステッププールモデルの導入を試みたが、今後さらにステッププールモデルの近似式の精度について検証を行う必要があること、およびプール空き容量の回復を考慮する必要がある。

また、本研究では GIS を用いた統合手法によって、多様な土砂移動現象の時間的および空間的な分布が解析可能であることが示唆された。この特徴から、本手法を応用して斜面崩壊モデル等を組み込むことによって、流域内の土砂移動の予測のみならず、土砂災害時のさまざまな土砂移動現象に対しても適用できると考えられる。これにより、災害時の比較的小規模なハザードの分布や避難経路の安全性について、時空間的な分布までを考慮した考察が可能となる。すなわち、総合的土砂管理を目指した長期スケールの考察から、災害時の警戒避難の改善を目指した短期スケールのものまでを、同様のモデルで考察することが可能となると期待される。