

令和5年度 研究開発助成成果報告会 開催報告

(一財) 砂防・地すべり技術センター 企画部

令和6年7月5日(金)および7月10日(水)に砂防会館別館3階「立山」などにおいて「研究開発助成成果報告会(令和5年度分)」を開催しました*。本報告会では例年、当センターの公益事業の一環である研究開発助成による研究の成果を発表し、関連事業及び今後の各方面での研究活動に役立てていただくことを目的として実施しているものです。本年度は砂防の関係機関や当センターの職員など52名が会場やオンラインで参加しました。今回の報告会では、砂防や地すべりに関する8つの助成テーマについて、それぞれの研究者に発表していただきました。研究概要についてここで紹介します。

*7月5日(金)についてはオンラインで実施

発表
1

電極版を用いた土砂移動観測法の 現地適用による検証

つつみ だいそう
堤 大三
信州大学

1. はじめに

山地河川における土砂移動を把握するためには、流砂量の実測が必要不可欠である。流砂量の観測手法としてパイプハイドロフォンが用いられてきたが、大規模土砂災害の際に石礫の衝撃によりパイプが変形し、土砂移動現象を計測できない等の問題があった。

そこで、直接的に砂礫が衝突しない、電気的な原理を用いた新たな計測手法の開発を進め、現地河川へ適用した。

2. 電気伝導度による土砂移動計測手法の原理

河川の左右岸に電極版を設置し、電圧をかけることで水に電流が流れるが、そこに不導体である土砂が通過すると電流値が低下する。電流値の挙動を計測することで土砂濃度の推定が可能だが、電流値は電圧値や現地状況に依存することから、それらの要因を排除した電気伝導度を利用した。本手法では既往の実験から確認された土砂濃度 C_s [m^3/m^3]、電流値等より算出した電気伝導度 σ [mS/m]、および電気伝導度計で別途計測される河川水の電気伝導度 σ_m [mS/m] の関係式(1) から土砂濃度を算出する。

$$C_s = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_m} \quad \dots (1)$$

3. 現地河川への適用

室内水路実験により計測手法の有効性を確認した上で、山地河川での実証実験を行った。

2022年11月13日の降雨(最大降雨強度8.5mm/h、総雨量27mm)における観測値を図-1に示す。電気伝導度および上式(1)で算出された土砂濃度が水位の変動に伴い、増減を示している。パイプハイドロフォンの観測値と比較すると、土砂移動開始のタイミングやピークの時刻等が近似し、電気伝導度による土砂移動計測が良好に実施できていることが確認できた。一方、2023年9月21日の降

雨(最大降雨強度31mm/h、総雨量40.5mm)では土砂移動開始のタイミングやピーク時刻が良好に観測されたが、土砂濃度が過大評価され、降雨後の土砂移動が観測できていなかった。この降雨では大規模な土砂移動があったとみられ、観測水路に土砂が堆積したことが影響したと考えられる。

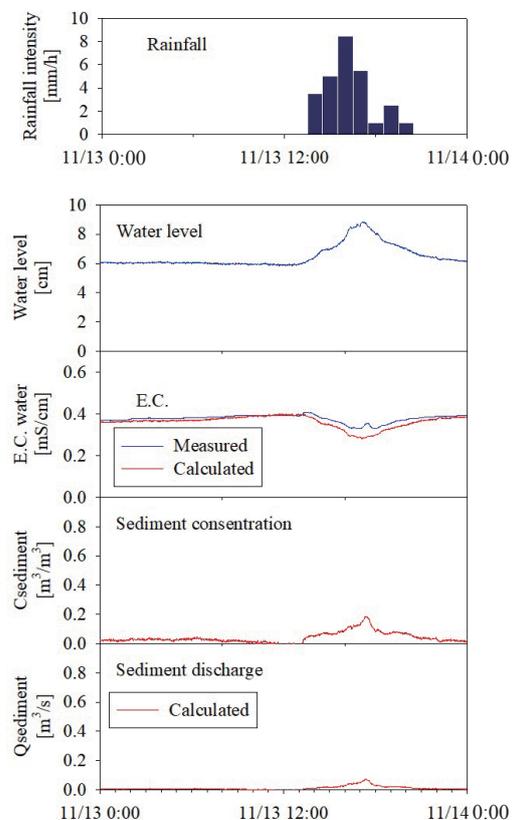


図-1 降雨イベント(2022年11月13日)とその際に電極板法により計測された各データの経時変化(上段から、降雨ハイトグラフ、水位、電気伝導度(計測値 σ_m と計算値 σ)、土砂濃度、移動土砂量)

4. おわりに

いくつかの降雨を対象に、電気的な原理で流砂量を計測する手法で土砂移動現象を記録した。比較的小規模な

土砂移動現象では正常に計測できたが、大規模な土砂移動現象では計測結果に課題がみられた。今後は課題解決に向けて検討を続ける必要がある。

発表
2

デジタルツインを活用した土砂災害のソフト対策に関する研究

ハザリカ ヘマンタ
九州大学

1. はじめに

近年、我が国では気候変動に伴う降雨の激甚化により土砂災害が頻発化している。

本研究では降雨により発生する斜面崩壊のソフト対策として、低コストで有用な早期警戒避難情報システム (Early Warning System:以下、「EWS」とする) を構築することを目的とし、開発したEWSの検証のため模型実験と実証実験を行った。

2. EWSに関する模型実験

EWSの有効性評価のため、標準砂と現地土 (2018年7月豪雨により北九州市内で発生した斜面崩壊現場より採取) を用いた斜面の模型実験において、リスク分析を行った。標準砂を用いた実験では降雨強度を45、70、100mm/hの3パターン、現地土の実験では70mm/hとし、斜面の土層内には土壌水分計、間隙水圧計、加速度計を設置した。データ通信はWi-Fiを使用した。計測の結果、含水比は降水後上昇したのち一時的に安定し、その後崩壊が発生した。間隙水圧は土壌水分の上昇に伴い急激に上昇し、その後崩壊に至っている。地盤の変位角は崩壊発生前に大きな変化が見られなかった。これらの結果から、土壌水分の増加が警報の指標として有効であり、評価指標の変化に伴い斜面の状態を「安定」「アラート」「崩壊」に分類できるとした。

3. 実際の斜面へのEWSの適用

実際の斜面へのEWS有効性検証のため、九州大学伊都キャンパス内にて実証実験を行った。斜面の高さは3m、傾斜角度を約33.7°とし、土壌水分計 (設置深は3

つのグループに分けた) や雨量計、加速度計を設置し、2023年2月より1年間計測した。データ通信にはWi-Fiが使用できない条件下を考慮、一部LPWAを用いた。センサーが適切に作動した際は、降雨の発生に伴って含水比に変化がみられた (図-1)。しかし、いずれのグループでもセンサーの部分に水が浸透したことによる過度な値が確認されており、設置時の機械的な課題が確認された。異常値はセンサーの交換により改善され、通信に関してはWi-FiとLPWAで差異がなく、LPWAの通信の有効性も確認された。

4. まとめ

本研究ではEWSを構築し、模型実験、実証実験を行った。模型実験によるリスク分析から、警報システムでは土壌水分が重要な役割を果たすことが確認された。また実証実験により、本EWSによる継続的なデータ通信が可能であることが確認された。一方で、実証実験では一部異常値やノイズが記録されたことから、今後はセンサーの適切な設置方法の確立や周囲の影響を考慮した補正式の構築が必要である。

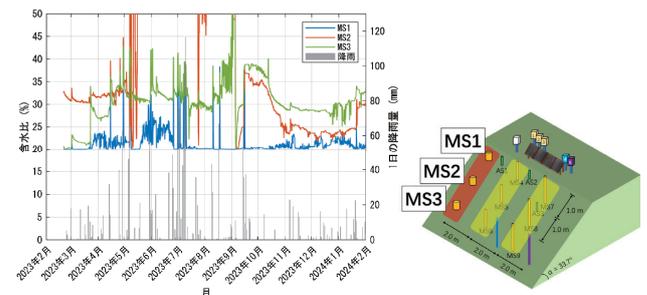


図-1 土壌水分データ (グループ1:設置深さ0.5m)

発表
3

山地流域の土砂流出量予測の高精度化に向けた土壌侵食モデル適用手法の開発

ほった のりふみ
堀田 紀文
東京大学

1. はじめに

土壌侵食モデルは気象や土地の条件に基づいて評価・予測するもので、世界中で開発、利活用されている。日本でも土砂・洪水氾濫計算への援用や流域監視に用いることが考えられるが、山地や森林域への適用性が低いことや、地形変化が反映されないため、長期計算への適用が難しい。

本研究では土壌侵食モデルを用い、山地森林流域から土砂流出の推定を試みた。

2. モデルの概要

土壌侵食モデルにはGeoWEPPを採用し、斜面と流域を表現可能なものとした。リル侵食は物理的に評価することから、経験パラメータを極力使用していない。

3. 流域への適用

本研究では以下の2つの流域を対象地とした。

3.1 白坂流域

愛知県瀬戸市に位置する白坂は1930年から各種データを取得しており、植生の変化とそれに伴って生じる長期的な水・土砂流出量変化を捉えることが可能な流域である。

3.2 大洞流域

愛知県豊田市に位置する大洞は斜面からの土砂生産とSS流出を観測しており、詳細な土砂動態が検討可能な流域である。また2015年からは森林施業効果の検証のため、モニタリングが実施されている。

4. 結果と考察

低水時を除き、流出量の計算結果は良好な再現が得られた。また土砂流出量の計算結果も良好な再現が得られた。長期を対象とした計算では崩壊地判読の結果を反映させたが、裸地の変遷をそのまま入力しても観測値は再現できなかった。理由として裸地の直下で堆積が発生し、土砂が河道まで到達しないことが考えられたため、堆積域も裸地として取り扱い、観測値と比較したところ、良好な再現が得られた。

土壌侵食モデルの構築において、河道の取り扱いや河床の侵食可能深などが計算結果に大きく影響し、表面流と侵食量の相関が低いことが確認されたことから、本モ

デルを対象としていないプロセスによって侵食が生じる可能性も確認された。

さらに、土砂収支を確認したところ、流域全体の土砂流出量に対して斜面からの土砂生産が少ないことから、対象地における土砂生産源は河道で、河道に堆積している土砂が徐々に下流へ侵食されている可能性が高いことが分かった(表-1)。

表-1 大洞流域の土砂収支

集計期間	流域全体の土砂流出量 (流域面積2.27ha)		斜面部分の生産量 (河道を除く)	
	堰堤堆積 土砂量(kg)	SS流出量(kg)	流域全体の 計算値(kg)	斜面の 計算値(kg)
2016.12-2017.10	5501.8	384.6	6232.7	0.0
2017.11-2018.09	4401.5	412.6	5042.6	51.2
2018.10-2019.09	3301.1	359.2	3479.4	98.1
2019.10-2020.09	4951.6	694.0	4137.2	0.0
2020.10-2021.09	6052	776.4	4953	274.1

観測結果からの推定値

流域からの土砂流出量の総量 斜面における土砂生産量は小さい

5. まとめ

GeoWEPPの適用により良好な再現が得られ、森林流域への適用が期待される。一方で、斜面と河道の接続や河床材料、侵食可能深等の取り扱いが注意すべき点である。今後は異なる地質を持つ流域や崩壊地における土砂流出の再現など、検討事例を蓄積していく必要がある。

発表
4

斜面崩壊後の経過年数や植生回復が土層厚に与える影響評価

しのはら よしのり
篠原 慶規
宮崎大学

1. はじめに

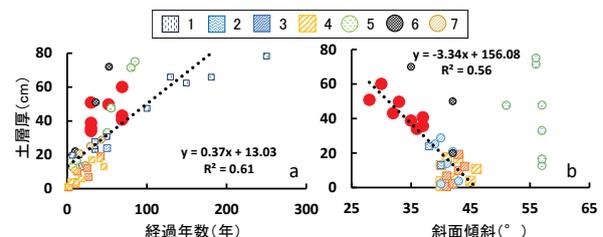
日本では毎年多くの土砂災害が発生している。崩壊が起こりうる斜面は無数にあり、全ての斜面に対し構造物を設置して被害を無くすのは現実的に不可能である。このため、ハザードが適切に評価され、構造物によってリスクを下げる、もしくは斜面のハザードが精密に評価されることで、効果的な避難行動に繋がる可能性が高い。一方、斜面の表層崩壊は免疫性があることが知られ、免疫性が斜面の素因の評価に繋がると良いが、現状においては科学的知見が十分に蓄積されていない。

本研究では経過年数の異なる崩壊地において土層厚を計測し、斜面安定の決定要因を明らかにすることを試みた。

2. 斜面の安定化要因の解明

調査地は宮崎県一ツ瀬川流域上流部とした。調査はオルソ画像6セットから崩壊地を抽出し、植生の個体群密度が最大となると思われる20年程度で植生被覆率80%以上を超えたものを植生回復ありと定義し、崩壊地を整理した。崩壊後の植生が回復した斜面の割合は41%であり、

自然状態で回復する斜面と回復しない斜面が確認された。植生の回復について、地質・崩壊地面積・斜面傾斜との相関を確認したところ、地質への影響は不明瞭であった。しかし、崩壊地面積が小さく、斜面傾斜の緩い方が植生回復率は大きかった。植生回復率の低い箇所はシカの生息が影響している可能性があり、今後の調査で明らかにする。



No.	経過年数 (年)	斜面傾斜 (°)	土層厚 (cm)	地質	文献
1	6-250	-	20-78	花崗閃緑岩	下川(1991)
2	19-50	38-40	13-24	花崗岩	若月ら(2017)
3	2-42	41-44	1-19	花崗岩	寺本ら(2019)
4	1-46	40-46	1-18	花崗岩	寺本ら(2021)
5	7-85	51-57	13-75	しらす	松本ら(1999)
6	10-53	35-42	20-70	泥岩	市川・松倉(2001)
7	5-43	39-43	2-29	砂岩・頁岩	寺本ら(2016)

図-1 土層厚と経過年数・斜面傾斜との関係

3. 土層の回復速度を決める要因

植生が回復された場所について、土層厚が要因か調査を行った。調査地の地質は付加体堆積岩・四万十層群で、調査地は斜面崩壊の経過年数や勾配、植生回復等の条件が異なる12箇所を抽出した。同じ斜面内でも土層厚に大きなバラツキがあり、統計的には有意でなかった。一方、斜面傾斜の大きい方が、土層厚が小さかった。このことから、調査地毎、経過年数だけでなく、斜面傾斜が大きく影響している可能性が示唆された(図-1)。

4. まとめ

本研究では斜面の崩壊地面積が小さく傾斜の緩い方が、植生回復しやすい傾向にあった。植生の回復には経過年数と土層厚に相関がみられ、土層や植生の発達には傾斜が大きく影響していた。一方、崩壊後の土層厚の分布は不均一であり、崩壊時の地形の落ち残りや枯死しなかった植生が影響していた。今後は崩壊直後からの長期モニタリングのほか、免疫性の解明だけでなく、活用方法についても検討していきたい。

発表
5

多様な側方流入条件を考慮した崩壊土砂による河道閉塞形成と河川流水変化に関する予測モデルの開発

わた たかし
和田 孝志
鳥取大学

1. はじめに

大規模崩壊(河道閉塞)による二次被害の緊急的対策を行うためには、大規模崩壊による被害範囲をより早く的確に導き出す必要がある。これに対し、被害範囲に大きく作用する崩壊土塊の挙動および河川への流入による河床変動に対する数値シミュレーション予測が有効である。

本研究では、完全閉塞・部分閉塞といった河道閉塞の形態や早期決壊の有無を事前に予測するため、崩壊発生後の崩壊土塊の挙動と、崩壊土塊流入が河道の洪水氾濫に及ぼす影響を同時に考慮可能な数値シミュレーションモデルの開発を実施した。

2. 開発モデル「崩壊土塊ブロック+複数流入モデル」の概要

本研究で開発したモデルは、Wadaら(2021)が開発した「土石流洪水流複数流入モデル」に、里深・高橋(2003)や里深(2004)が開発した崩壊土塊円柱ブロックモデルによる「2次元ハイブリッド土石流モデル」を組み込むことによって構築したものである(図-1)。

「土石流洪水流複数流入モデル」は、大規模豪雨時に本川および支川からの洪水流・土石流の同時多発的流入とそれに伴う氾濫過程を正確に考慮するために開発した数値モデルである。また「2次元ハイブリッド土石流モデル」は、大規模崩壊による崩壊土砂の流動化と土石流の到達する範囲を予測するために、崩壊斜面からの土塊移動と氾濫場内の流動・堆積過程を一体的に解析可能とした数値モデルである。

本研究でこのモデルを開発したことにより、2次元計算平面上で複数の土石流や河川流に及ぼす崩壊土塊の影響(土塊による流向変化や閉塞等)を評価することが可能になった。

3. 既往大規模崩壊の再現による開発モデルの妥当性検証

開発したモデルの妥当性検証のため、平成30年7月豪雨で発生した兵庫県宍粟市小原地区の大規模崩壊、平成16年9月台風21号豪雨で発生した鳥取県智頭町市瀬地区の大規模崩壊を対象に再現解析を実施し、パラメータ(土塊の底面侵食に係る係数、移動停止判定速度、土塊の粘着力)の設定値の汎用性を確認した。これにより、一部モデル改良の余地は残されているものの、開発したモデルを用いることで、崩壊土塊の移動、河川への流入と閉塞過程を定性的に表現し得ることが確認された。

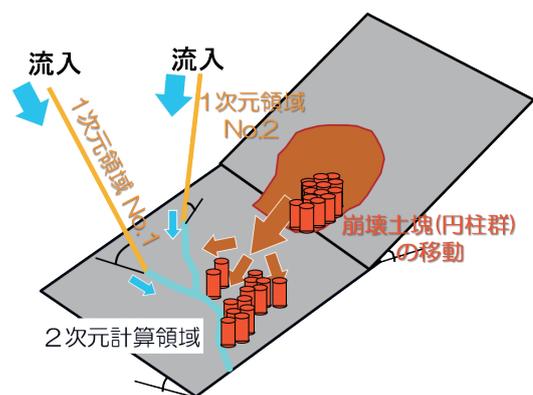


図-1 開発モデル「崩壊土塊ブロック+複数流入モデル」の概略

1. はじめに

山地小河川を含む流域全体で生じ得る土砂災害の防止・軽減や流域一貫の土砂管理を実現する上で、流域全体の土砂動態を予測することは重要だが、そのためには河道外での土砂生産モデルの導入が必要である。これに対し、山野井・藤田(2014)は凍結融解による土砂生産モデルと気象条件・裸地空間分布から土砂生産量を予測するモデルを導入し、山野井・藤田(2016)は土砂生産量を予測可能な斜面崩壊予測モデルを導入することにより高度化を図った。

一方で、これらのモデルには、河床材料の粒径分布、凍結融解の履歴と土砂生産量の関係、土中の水分量と斜面崩壊発生との関係などを表現した多数のパラメータの設定が必要であり、これらに関する直接的な観測がなされていない地域における地質や降雨特性等の影響を反映したパラメータ値の設定手法は未だ確立されていない。

本研究では、上述のような土砂動態シミュレーション(SiMHIS)に対して、ハイドロフォンによる掃流砂量観測データからシミュレーションのパラメータを自動的に推定する数理最適化手法の開発を目的とする。

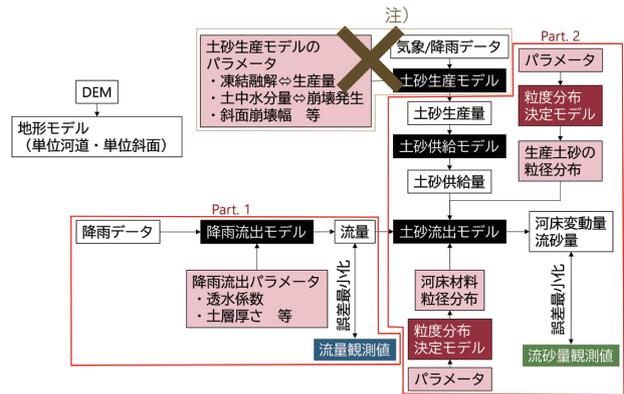
2. パラメータ組み合わせ推定のための最適化手法と
実流域への適用

土砂生産・土砂供給統合型の土砂流出シミュレーションを対象に、流量と掃流砂量の観測値の再現性を示すNSE(評価関数)を最大化するパラメータの組み合わせを推定する最適化計算を、PythonのライブラリOptunaを用いることで実装した(図-1)。流量を支配する降雨流出

パラメータを流量の観測結果をもとに先に決定し(Part.1)、その後流砂量を支配する河床材料と土砂生産・供給に関するパラメータを推定する方法(Part.2)をとることで、流量と流砂量の双方に対し、観測値をある程度再現した計算結果を得ることに成功した。

また、人工的に1イベントの掃流砂量を増加した観測データに対しては、推定される土砂生産・供給量パラメータの値や重要度が大きくなることを示し、掃流砂量への土砂生産・供給の寄与が大きくなるのが自動的に判定されることを確認した。

さらに、再現性が上位になるパラメータセットのヒストグラムと、これから得られる確率密度関数形状から、各パラメータ推定結果の不確実性を近似的に定量化した。この不確実性を加味しても、掃流砂量を増加させたケースでは土砂生産量が、増加させないケースと比べて大きいことが確認された。



注)土砂生産モデルのパラメータもPart.2から推定する
図-1 数理最適化の設計概要

1. はじめに

計画流出土砂量の算出のために数値解析手法を用いることが標準化されているが、急勾配溪流における地形変化は未解明部分が多く、流出土砂量の予測が難しい。20度以上の急勾配溪流では流れの上流部や河床堆積物において不飽和状態が発生し、活発な水の移動が発生していると考えられるが、詳細は不明である。

本研究では急勾配溪流における土石流の発達過程を明らかにし、それを表現できる数値モデルの開発を目的に、土石流の観測、および開発した数値モデルと水路実験の比較を行った。

2. 土石流の観測

毎年土石流が発生している安倍川最上流の大谷崩一ノ沢の上流U地点と下流D地点を観測地点とし、土石流検知時に作動するビデオカメラ等を設置した。

設置後、2023年8月3日と14日に土石流が観測された。8月3日は雨がやや強まった段階で水位が急激に変動し、侵食と堆積に伴う河床変動があった。これ以降は3m以上の水位が維持され、U地点に土砂が堆積した。14日はU地点で水位の低下、D地点で水位の上昇がみられ、U地点に堆積していた土砂がD地点まで到達し堆積した。観測結果から土石流が停止と再移動を繰り返しながら流下したことが示唆された。

また8月3日U地点と14日D地点における土石流通過時

のDEMの差分から、土石流の流動深は先端部で小さく、時間経過に伴って大きくなった。14日のD地点で観測された堆積過程は、堆積開始から4秒後まで先端付近に礫が堆積、その後20秒まで堆積週上がみられた(図-1)。

観測期間中最大規模であった土石流の横断形状は先頭部で凸状がみられ、その後平滑になった。縦断形状は先頭部がローブ状で、その後徐々に水位が上昇した。確

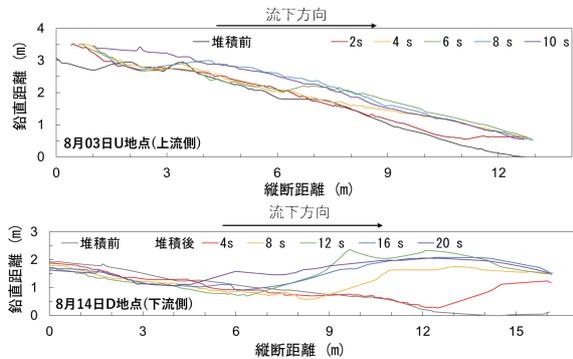


図-1 土石流の堆積過程

認された凸状は全て不飽和流であった。

3. 予測手法の開発

数値モデルは地表面流を表す浅水流方程式と地下水流を表す深さ平均されたRichards方程式を連成するもので、モデルの妥当性検証のため、不飽和流が発達するプロセスを模擬する水路実験を行った。計算水位は実験の計測値と一致し、数値モデルは土石流の表面位と間隙水位の時間変化を再現でき、感度分析により土石流の流速が河床面を介する水の浸透により低下することも分かった。

4. おわりに

急勾配溪流における土石流の発達プロセスの解明には、観測結果を蓄積する必要がある。今後の課題として、変勾配水路を用いた実験結果や実溪流での観測結果を用いたモデルの妥当性を検証する必要がある。

発表
8

付加体堆積岩山地流域における 大規模出水の流出解析手法の開発

やまかわ ようすけ
山川 陽祐
筑波大学

1. はじめに

近年、長大な降雨イベントの増加に伴う土砂・洪水氾濫の発生リスクが高まっている。一方で、急勾配かつ水・土砂流出の激しい大起伏の中規模流域(10⁰~10⁴km²)では水文データが極めて乏しい状況にある。

本研究では、静岡県大井川水系上流の東河内沢流域(流域面積約9km²)における洪水イベントを対象に、付加体堆積岩山地における貯留関数法を用いた流出解析の適用性を検討した。

2. 研究手法

対象流域では降水と水位に関する観測データを収集し、観測された水位から流量への変換には北本(2020)の求めた水位・流量曲線を適用した。また各出水イベントの総降雨量と総洪水流出量の関係を把握するため、Hewlett and Hibbert(1967)の方法に基づき、洪水流出と基底流出に分離した。本解析では観測期間の出水イベントのうちピーク流量が2.0mm/h以上の規模の出水を対象とした。

パラメータの同定においては、既往研究結果に倣い初期貯留量を設定せず、流出量の変化から貯留量の変化を求める手法を適用した。低流量のデータ数が相対的に多いことがパラメータ同定に影響すると考えられる。このため、各逓減期間の流量データについて、流量の最大値と最小値の幅に応じた小区分幅から流量データの一つ採用する形でのデータ間引き処理を行った上で解析を実施した。ここで、小区分の幅は便宜的に各逓減期間の流量

の最大値・最小値の差を50で割った値とした。

3. 結果と考察

図-1より、低流量データの影響を考慮して観測期間全体を通じた期間(c)について行ったパラメータpの同定結果は、山地河川で一般的とされる0.3に近い値となった。また、比較的規模の大きい期間(iv)のp値が期間(c)に最も近い値となった。一方で、比較的小規模の期間(i)(ii)および中規模の(vi)では、期間(c)の傾向から顕著に外れる傾向となった。これらから、貯留関数法パラメータ同定結果は比較的大きな出水イベントでは観測期間を通じた平均的な値に近く、小さなイベントではイベント毎にパラメータが大きく変動する傾向がみられた。大規模な出水(特にピーク流量)に対する貯留関数法の適用性は本試験地でも一定程度ものと考えられる(表-1)。

今後は、より長期や多地点での出水時を含む流量データの取得によって、さらに検討を進めるとともに、イベント規模による水文プロセスの違いについて実証的な検討を進めることが重要であると考えている。

表-1 貯留関数法のパラメータ(p,k)同定結果

イベント期間	p	k
(b) 全ての流量逓減期間	0.42	71.47
(c) ピーク流量が2.0 mm/h以上の無降雨条件下の流量逓減期間	0.25	120.06
(c) ピーク流量が2.0 mm/h以上の無降雨条件下の流量逓減期間・間引きデータ	0.34	59.37
(i) 2017/9/18 出水規模【小】	-0.24	-57.70
(ii) 2018/4/25 出水規模【小】	-0.20	-91.55
(iii) 2018/8/25 出水規模【中】	0.77	33.99
(iv) 2018/10/1 出水規模【大】	0.20	146.47
(v) 2019/10/12 出水規模【大】	0.63	15.40
(vi) 2019/10/19 出水規模【中】	-1.32	-24.91