

【研究成果報告時/研究成果の概要】様式-2-ウ

長期観測から明らかになった
豪雨時の山地流域における流出応答東京大学 講師 浅野友子
鳥取大学 准教授 芳賀弘和

豪雨時の山地流域における流出応答を理解することは重要であるが、大雨時の観測は困難でデータが限られており不明な点が多い。東京大学の生態水文学研究所では 1920 年代から試験流域を設定し、精度の高い水文データを取得してきた。この中には複数回の記録的大雨時のデータが含まれることから、本研究ではこのデータを精査し、できる限り短い時間間隔で整理しなおして、豪雨時の流出応答を解明することを目的としている。これまで付加体堆積岩からなる流域報告されてきた、降雨の規模があるレベルを超えると、次の瞬間からは降った量と流出する量がほぼ同じになる現象が、花崗岩流域でも生じるのか、生じるとすればそのような応答が生じる閾値を明らかにすることに焦点をあてた。花崗岩からなる流域でも累加雨量が 300mm を超えると（累加雨量-200mm）が直接流出となること、この累加雨量 300mm の閾値はこれまで報告のあった付加体堆積岩の流域に比べておよそ 200mm 多いことが明らかとなった。また、データ整理を通じて、流域の規模に対して十分大きな量水堰堤を擁する生態水文学研究所の試験流域においても、豪雨時には流出量を精度高く観測できなかった場合があり、量水堰堤を用いる流量観測の限界が示された。

Key Words : 直接流出量、ひとあめ雨量、堆積岩、風化花崗岩、記録用紙、デジタル化

1. はじめに

国土の7割近くを占める山地流域は、平野の上流に位置し人口が集中する下流に水をもたらす。「流域治水」を考える時、豪雨時の山地からの流量把握が重要である。これまで主に小中規模の降雨時の観測から、山地森林流域には洪水ピークを小さくし、遅らせる働きがあることがわかっており、洪水緩和機能とされてきた。一方で、山地では大雨時の流出観測が困難で、大雨時の流出の実態や現象解明は進んでいない。限られた事例から、大雨時に降水量がある閾値を超過すると流域内の貯留量変化が小さくなり、以降は降った降雨がほぼそのまま直接流出量として流出しているように見える応答（以下では降雨強度≒流出強度と表現する）が生じ（図-1、¹⁾²⁾）降雨ピークから流出ピークまでの時間差が数分以内と極めて短くなることが観測された³⁾⁴⁾。しかし、このような時でも降雨量のピークに比べて流出量のピークは小さく、洪水調節機能が0になることはないという結果も得られている¹⁾。

また、降雨強度≒流出強度となる現象は、これまで付加体堆積岩からなる流域では報告されているが、風化花崗岩からなる流域では報告されていない⁵⁾。このことから、降雨強度≒流出強度となる現象は岩種によって発現する場合、しない場合があると考えられてきた。しかし、山地流域では大雨時の観測データが限られていることによりそのような解釈に

至っている可能性がある。

東京大学の生態水文学研究所は、1923年に愛知県瀬戸市に設立され、その当時は世界的にも事例が限られていた山地河川での流量観測方法を確立し、堅固な堰堤を用いた精度の高い観測を継続してきた⁶⁾。その結果、世界的にも希に見る長期間に及ぶ、欠測の少ない、精度の高いデータが得られてきた。観測流域は、はげ山化しやすい風化花崗岩からなり、はげ山が多かった地域で森林回復にともなう流出量の変化を定量的に明らかにするために設立された。そしてこの100年間には、日本の他の地域と同様、何度か記録的な大雨を経験しており、大雨時の貴重なデータが含まれるはずである。この記録を過去に遡って整理し、分析すれば、大雨時の情報が抽出できると考えた。

そこで本研究では100年近く続く流量観測記録の一部を整理し直し、過去の記録的な大雨時の情報を抽出して大雨時の山地流域からの洪水流出実態を明らかにすることを目的としている。本研究の作業仮説として、花崗岩からなる流域でも堆積岩流域と同様、図-1に示すような降雨強度≒流出強度となる場合があることを検証し、降雨強度≒流出強度となる降雨の閾値を明らかにする。花崗岩流域では堆積岩からなる流域に比べこの閾値が大きいいため、これまでそのような閾値を超える大雨時の観測データが得られていなかったと考えており、長期の降雨と流出データによって定量化できると考えた。

表-1 試験流域の概要、観測開始時と現在の被覆

試験流域	面積(ha)	地質	観測開始年	観測開始時の被覆	現在の被覆
穴の宮	13.92	花崗岩	1923	伐採跡地、1938年からクロマツなどを植栽	落葉広葉樹林、一部針葉樹人工林*
東山	106.7	花崗岩	1928	針闊混雑林地**	落葉広葉樹林*
白坂	88.49	花崗岩	1929	急傾斜で、赤松林、混雑林	落葉広葉樹林、一部針葉樹人工林*
*東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所 (2014) による					
**針広混交林のこと					

2. 調査地概要

観測流域は、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所の白坂、穴の宮、東山の試験流域である(図-2、表-1)。白坂の気象観測所で観測された平均年降水量は1,838mm、年平均気温は13.1℃である(東京大学演習林ウェブサイト、https://www.uf.tokyo.ac.jp/research_division/data/suimon_suishitsu/index.html)。

試験流域設定時は、東山や白坂流域は尾根筋が裸地で、穴の宮は谷筋にわずかに樹木がある程度でほぼ全山裸地だったが、今ではいずれの流域も樹冠の閉鎖した森林に覆われている^{7) 8) 9)}。1960年頃はいずれの流域も裸地面積が10%以下で、落葉広葉樹とマツが主体の森林に覆われていたと考えられる。

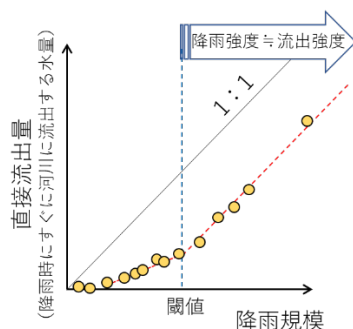


図-1 降雨規模と直接流出量の関係の概念図

3. 方法

(1) 時間雨量の整理と校正

2000年までは日降水量が貯留式雨量計を用いて毎日観測され、2001年からは転倒ます雨量計で5分間隔の雨量が記録されてきた。いずれもデータは日単位で整理・公表されている。

これとは別に、観測開始時より2001年2月まではサイフォン式の自記雨量計による観測が行われてきた。雨量は図-3に示すような記録紙に記録されている。この記録から時間雨量を読み取り、日降水量を計算したものが、ほとんどの期間について公表されている¹⁰⁾。貯留式雨量計で観測される降水量に比べて、サイフォン式の自記雨量計で観測される降水量は、系統的に過小評価の恐れがある。そこで今回は、公表されている貯留式雨量計による日雨量と、自記雨量計の記録紙から読み取った時間雨量から計算した日雨量を比較し、差があった場合には差分を降水のあった時間について降水量で按分して加算し、サイフォン式雨量計による日雨量が貯留式雨量計による公表値と同じ値になるように校正した。なお、例えばある日の1:00~2:00に降った降水量を2:00の降水量として記録している。また、2001年以降は5分間隔でデータロガーに記録する方法を採用しているため、5分間隔の降水量データがある。



図-2 白坂、穴の宮、東山各試験流域の位置と地形

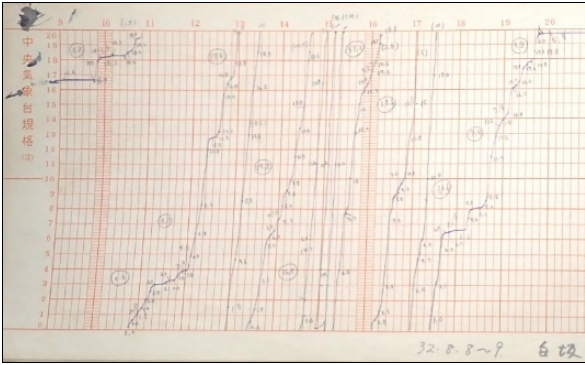


図-3 サイフォン式雨量計の磁気記録用紙（白坂1957年8月8～9日）

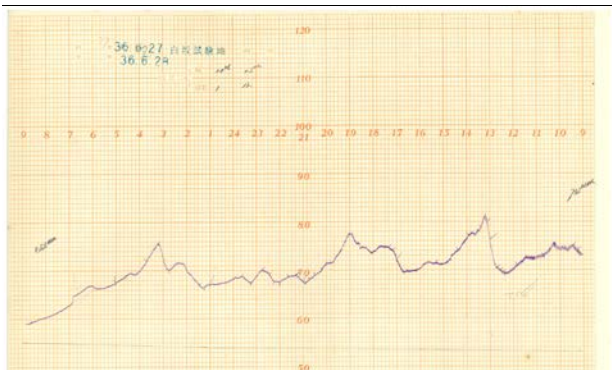


図-4 フロート式自記水位計の記録用紙（白坂1961年6月27-28日）

(2) 1分間隔流量の整理

2000年頃までは、フロート式自記水位計の水位をチャート紙にペンで記録したもの（図-4）から水位の変曲点の水位と時刻データを読み取り、変曲点間を直線で補完し、定期的に現場で観測したポイントゲージ値をもとに水位を補正したうえで流量計算を行い、日単位で整理・公表してきた。

今回は、変曲点の読み取り値をもとに、1分間隔で補完データを作成し、流量計算を行い、1分間隔の流量データを作成した。なお、例えばある日の1:00～2:00に流出した水量を2:00の流出量として記録している。

また、1分間隔流量を積算して日流量をもとめ、公表している日流量と比較し違いが無いか確認した。そのうえで、1分間隔流量から、5分間隔、1時間間隔の流量を計算した。なお、2001年以降は5分間隔でデータロガーに記録する方法を採用しているため、5分間隔の水位、流量データがある。

(3) 大雨時の観測にまつわる記録の抽出

観測期間中には数回記録的な大雨があったことがわかっている^{11) 12)}。今回特に着目しているひとあめ雨量300mm以上の大雨については、記録紙に記入されたメモや、土砂搬出の記録、既往文献を確認し、観測時の状況や、流量観測が土砂の影響をうけていた可能性等を抽出した。

(4) ハイドログラフの分離

生態水文学研究所周辺で豪雨災害が発生した年など、まとまった雨のあった年についてハイドログラフの分離を行った。Hewlett and Hibbard (1967)¹³⁾の方法で直接流出量を分離した。分離には時間雨量と時間流量を用い、12時間雨がでないタイミングでひと雨を区切るが、12時間経過後でも直接流出が消失する前に雨が降り始めた場合、その雨は一つ前の雨に組みこんでひと雨とした。

4. 結果

(1) 1時間間隔のデジタルデータ取得期間

欠測している期間はあるが、表-2の期間について時間雨量、時間流量のデータを確認・整理することができた。

表-2 時間毎の雨量と流量の確認と整理ができた期間

	時間雨量がある期間	時間流量がある期間
白坂	1929～2024年	1935～2023年
穴の宮	1923～2024年	1950～2021年
東山	1928～2024年	1950～2023年

(2) 大雨時の流出記録

長期にわたる観測期間において、雨量や流量観測値の欠測期間は極めて少ない。しかし、非常に規模が大きかった2000年の東海豪雨時には、白坂で422.0mm、東山で481.5mm、穴の宮で366.5mmの雨が降り、白坂、東山では多量の土砂が流出して堰堤が満砂し水位と流量が欠測となってしまった。それ以前にも、堰堤が土砂で埋まった記録や写真が残っている（例えば図-5）。ひとあめ雨量300mm以上の大雨については記録紙等を確認したところ、例えば1952年の大雨時には、白坂の水位記録用紙に「湛水池土砂満」「土砂堆積二依ル記録ノ不明（湛水池満）」、1957年の大雨については、白坂と東山では「ピーク直後に堰堤が完全に堆砂したと考えられるが全体に接近速度を考えないで流量式で計算した。」¹¹⁾との記録が残っていた。そして、大雨時に堰堤が土砂で埋まってしまった場合のピーク流量については「東山の場合も白坂の場合も接近速度は無視した式により最大流量の計算を行っていることより考えて、実際の最大流量より過大に見積もることはないだろう。即ちこれらの最大流量は少なくとも正しいか、小さい値を示しているだろう。」¹¹⁾とあり、ピーク流量は正しいか過小評価である可能性がある。一方で、流量逓減時には、図-5のように湛水池の出口付近、水位計設置箇所が土砂で埋まってしまうと、その影響で水位が下がりにくなり、過大評価になる可能性もある。記録から、2000年以前は土砂流出後速やかに土砂排出がなされていた。また、土砂流出量が多く、水位観測に影響があったと思われる区



図-5 昭和33（1958）年8月25～26日台風17号白坂堰堤土砂流入状況。奥の小屋に水位計が設置されている（昭和33年9月6日撮影、生態水文学研究所アーカイブス）

間のハイドログラフは記録紙上で経験的に修正されている場合もあった。このような場合は観測の誤差が他の期間に比べ大きいと考えられる。そこで、前述のように白坂の1952年と1957年の大雨時などのように、湛水池が砂でいっぱいになるほどの土砂流出・堆積があった大雨イベントについては、注意してみていくこととする。

以上のような検討を行うなかで、降雨規模が比較的大きかった1961年の大雨時は、記録紙にはハイドログラフ低減時に堰堤にたまった土砂を排出した記録はあるが、土砂出し前後も水位はなめらかにつながっていて、「満砂」のようなメモも無かった。このことからこの大雨時には、土砂流出はあったが、水位観測に大きな影響を及ぼすほどではなかったと考えられるので、次章でより詳しく見ていく。

(3) 1961年6月豪雨時の降雨流出応答

1961年6月豪雨は、白坂では6月24日3:00に降り始め、総降水量506.3mm、6月27日9:00に最大1時間雨量29.9mmを記録した雨で、愛知県内では昭和36年梅雨前線豪雨災害とよばれ死者6名、全壊流失29戸、半壊77戸、床上浸水8615戸、床下浸水71867戸、堤防決壊243箇所、山崩れ857カ所の記録がある¹²⁾。白坂、穴の宮、東山いずれの流域でも、降り始めは降水量に対して流出量の増加は小さかった（図-6）。雨が降り進むにつれ流量が顕著に増加するようになったが、26日の降雨ピーク時は降雨強度に比べるとピーク流量は半分以下と小さく、ピークのタイミングは遅れている。27日9:00前後に時間雨量29.9mm（白坂）を記録するあたりから、流量が急激に増加し、その後数時間は降雨のピークと流量のピークがほぼ同時に観察される期間があった。しかしその際も、1時間毎のデータでピーク流量がピーク雨量を超えることはなかった。

(4) ひと雨雨量と直接流出量の関係

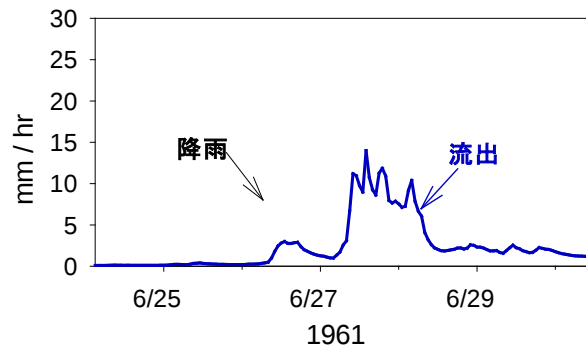


図-6 1961年6月の豪雨時の白坂流域のハイト・ハイドログラフ。1時間毎のデータによる。

ひとあめ雨量 300mm を超える大雨のあった年について、ハイドログラフ分離を行い、ひとあめ雨量と直接流出量の関係をプロットした（図-7）。記録紙等に残されたメモなどから湛水池への土砂堆積の影響で観測誤差が大きい可能性のある降雨イベントには、+マークをつけた。

ひと雨100mm程度までは、ひとあめ雨量に対する直接流出量の割合が小さいが、100mmを超えるあたりから直接流出量はほぼ〈直接流出量=0.5×ひとあめ雨量〉の関係で増加し始める。さらに、ひとあめ雨量が300mmを超えるあたりから、ばらつきはあるがひとあめ雨量と直接流出量1:1で増加するようになる。つまり、ひと雨ごとにみると、総降水量が300mmを超える大雨時、ほぼ（総降水量－200mm）と同程度の水量が直接流出量として降雨中や降雨直後に流出していたことがわかる

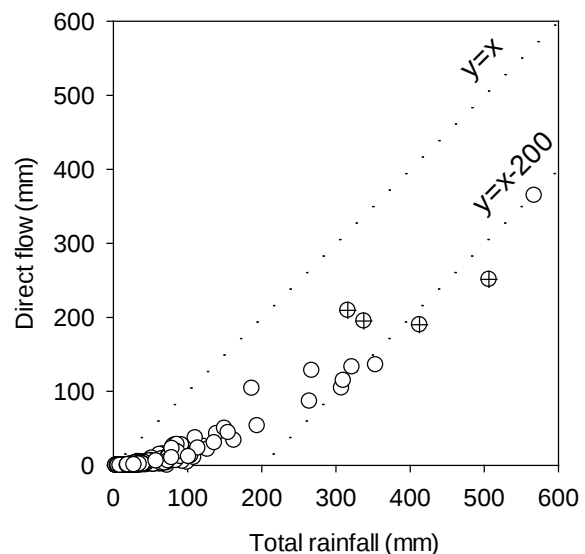


図-7 ひとあめ雨量300mmを超える大雨があった年の、白坂流域でのひとあめ雨量と直接流出量の関係。土砂の影響を大きく受けていそうなイベントは十字の印をつけた。

5. 考察

(1) 花崗岩からなる流域でも降雨強度≒流出強度となる場合がある

花崗岩からなる流域でも、ひとあめ雨量300mmを超える大雨時には(総降水量-200mm)が直接流出量となる、別の言い方をすると降雨強度≒流出強度となることが明らかとなった(図-7)。同種の花崗岩からなるが流域面積、植生回復履歴が異なる3つの流域でほぼおなじ応答が観察されたことから、この現象の発現は再現性が高く、確からしい。

本研究の対象地である花崗岩からなる流域では、降雨強度≒流出強度となる閾値がこれまで数例報告されている堆積岩からなる流域と比べると顕著に大きいことが、長期におよぶ精度の高い観測によって明らかとなった。また、200mmは、これまで損失雨量(一時的に流域内に貯留される雨量)の最大値あるいは最大流域貯留量と言われてきた量¹⁴⁾に該当すると考えられる。そして、既往研究で最大流域貯留量は、白坂では 244.1 ± 25.5 mm、東山では 178.8 ± 16.6 mmと推定されており¹⁴⁾、今回の結果とも大きく異なっていない。また、最大流域貯留量は、堆積岩・火山岩流域50~150(109.5 ± 32.2)mm、花崗岩・火山灰流域150~250(173.5 ± 48.5)mm、変成岩類流域130~200(166.5 ± 25.2)mm(総降雨量300mmのとき)と、岩種によって区分できるとしている点も、本研究結果と整合する。岩種によって異なる表土や基岩中の地下水の貯留形態、貯留量の違いが降雨強度≒流出強度となる閾値や最大流域貯留量に反映されていると考えられる。基岩の岩種による流出応答の分類は従来から指摘されてきたが^{15) 16)}、今回明らかになったような閾値の違いについての知見を蓄積し予測モデルに反映することにより、洪水予測精度向上が期待できる。

(2) 量水堰堤を用いる観測方法の限界、新たな方法の必要性

しかしこれまで、山地流域でひとあめ雨量300mmを超える大雨時の流出が観測された例は少ない¹⁷⁾。少ない理由の第一は、そのような大雨はめったにないことではあるが、そのほかにも、大雨時には、量水堰の観測可能範囲を超える流量があつて観測できなかったり、土砂により堰堤の湛水池が埋まって正確な水位の計測が不可能になったり、最悪の場合量水観測設備が壊れて観測できないこともあった¹⁷⁾。生態水文学研究所の試験流域の量水堰は、流域の規模に対して十分に大きかったことから記録に残る豪雨時にも流量を観測することができた。しかし、記録紙には、土砂で湛水池が満砂し水位が不明確になってしまったと記入されているなど、長い観測期間中、何度かあった豪雨時データが得られていても観測誤差が大きかった場合や、東海豪雨時などは観測値が得られなかったこともあった。生態水文学研究所は、はげ山の多い地域に設立されたことから、

2 カ年研究用 (R5)

ら、戦後しばらくまでは土砂流出量が多い状況であったこともあるが¹⁸⁾土砂の流れを止めてしまう量水堰堤を用いる流量観測方法には、(たとえばげ山の履歴がなくても)限界がある。量水堰堤を用いる方法は、山地流域で低水~中規模降雨時の流量を精度高く観測するに適した方法だが、湿润変動帯にあり、土砂移動が激しい日本の山地では大雨時の流出を観測するのに最適な方法とはいえない。一方で、下流の平野の河川で用いる流量観測方法をそのまま山地河川に適用するのも難しいことがわかってきた¹⁹⁾。今後、豪雨時は堰堤を用いない方法により流量をある程度の精度で観測する方法を検討する必要がある。

謝辞：本研究は生態水文学研究所の歴代の教職員の日々の積み重ねの成果によるものである。乙部みどりさん、加藤敦美さん、黒木里香さんにはデータ探索と整理を手伝っていただいた。

参考文献

- 1) 谷誠 (2013) 洪水流出のモデル化を圧力伝播の観点から捉え直す、水文・水資源学会誌26 (5) :245-257.
- 2) Asano, Y., Kawasaki, M., Saito, T., Haraguchi, R., Takatoku, K., Saiki, M., & Kimura, K. (2020). An increase in specific discharge with catchment area implies that bedrock infiltration feeds large rather than small mountain headwater streams. *Water Resources Research*, 56, e2019WR025658. <https://doi.org/10.1029/2019WR025658>
- 3) Asano Y. and Uchida T. (2018) The roles of channels and hillslopes in rainfall-runoff lag times during intense storms in a steep catchment, *Hydrological Processes*, 32 : 713-728 <https://doi.org/10.1002/hyp.11443>
- 4) Asano, Y., Uchida, T., & Tomomura, M. (2019). A novel method of quantifying catchment-wide average peak propagation speed in hillslopes: fast hillslope responses are detected during annual floods in a steep humid catchment. *Water Resources Research*, 56, e2019WR025070. <https://doi.org/10.1029/2019WR025070>
- 5) 谷 (2023) 鉛直不飽和浸透に基づく新しい洪水流出モデルの適用による山地小流域の流出機構の再検討、水文・水資源学会誌36 (1) :20-51.
- 6) 浅野友子・佐藤貴紀・水内佑輔・田中延亮 (2024) 生態水文学研究所の観測研究100年—森林水文学・砂防工学への貢献—、水利科学399 : 54-94.
- 7) 李憲浩 (1991) 林相の経年変化が水流出特性に及ぼす影響、東京大学農学部演習林報告 86: 77-178.
- 8) Ariyakanon N, Numamoto S, Suzuki M. 2000. Sixty-year decreasing trend of bare land in Shirasaka watershed, university forest in

2ヵ年研究用 (R5)

- Aichi, revealed by aerial photography. Bulletin, Tokyo University Forests. 103: 339-348.
- 9) Kuraji K, Tanaka N, Gomyo M. (2019) Long-term meteorological and hydrological observation at Ananomiya and Shirasaka Experimental Watersheds, Ecohydrology Research Institute, The University of Tokyo, In: Kamata, N., Kuraji, K., Owari, T., Guan, B.T. (eds.), Developing a Network of Long-term Research Field Stations to Monitor Environmental Changes and Ecosystem Responses in Asian Forests, 81-95, The University of Tokyo Forests Press, Tokyo.
- 10) 五名美江・五名美恵・鎌田幸子・蔵治光一郎 (2014) 生態水文学研究所白坂試験流域における自記雨量計による日降水量観測結果報告 (I) 演習林 56:1-67.
- 11) 塚本良則 (1962) 瀬戸地方水害の特性一昭和32年8月の水害の特性一、東京大学演習林56: 299-314.
- 12) 岸本光樹 (2018) 生態水文学研究所周辺の災害リストの作成、平成30年度技術職員等試験研究・研修会議報告23-28.
- 13) Hewlett JD and Hibbert AR (1967) In: Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, Pennsylvania State University, New York, pp.275-290.
- 14) 藤枝基久 (2007) 森林流域の保水容量と流域貯留量、森林総合研究所研究報告、6 (2) 101-110.
- 15) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果. 土木学会論文報告集309: 51-62.
- 16) 内田太郎・友村光秀・佐藤悠・浅野友子・蒲原潤一 (2016) 比較水文学的アプローチによる山地流域の降雨流出応答の影響因子に関する一考察、地形37.
- 17) 浅野友子 (2014) 日本の山地流域の降雨流出データー収集データの概要と観測の課題一、水文・水資源学会誌27 (1) 19-28.
- 18) Asano Y, Mizuuchi Y, Kishimoto K, Tanaka N, Bunte K, (2025) Changes in sediment discharge over the 20th century from a mountain catchment that has experienced severe anthropogenic disturbances, Earth Surface Processes and Landforms, 50 (4), e6071.
- 19) 浅野友子、内田太郎、西口幸希 (2018) 山地河川における洪水時の河道抵抗の実態、砂防学会誌、Vol. 70 (6) 12-23.