

## 堆積岩山地源流域を対象としたマルチトレーサによる流出把握

## Runoff characterization using multi-tracers in a sedimentary rock mountainous headwater catchment

名古屋大学大学院生命農学研究科 ○鯉江知樹(現日本工営株式会社)・猪越翔大・五味高志・小谷亜由美  
 岐阜大学応用生物科学部 大西健夫・吉岡有美  
 名古屋大学宇宙地球環境研究所 栗田直幸  
 株式会社地球科学研究所 浅井和由  
 中部電力株式会社 根津涼

## 1. はじめに

山地源流域では斜面崩壊や土石流が発生しており、気候変動が進行することで、これまで災害履歴のなかった地域においても土砂災害が発生する可能性が指摘されている(Gariano & Guzzetti, 2016)。土砂災害の発生には山体地下水が関連しており(地頭菌, 2006)、土砂災害の発生予測には降雨が地表から浸透し山体内部を移動して再び地表へ流出するまでの降雨-流出プロセスの理解が重要とされている(Sidle et al., 2000)。しかし、山地源流域の水流出は空間的に不均一であることが複数の流域で報告されているが(Asano et al., 2009; Egusa et al., 2016)、水流出空間不均一性の要因である降雨-流出プロセスの流域間の違いは十分に把握されていない。本研究では、マルチトレーサを用いて堆積岩山地源流域において水流出の空間不均一性を把握し、流域間の降雨-流出プロセスの違いを検討することを目的とした。

## 2. 研究方法

本研究は岐阜県郡上市内ヶ谷流域内の C 流域(100 ha)を対象とした。流域の標高は 770~1100 m、平均傾斜は 37.1° である。年平均降水量は 3167 mm で、そのうち 18% が降雪によるものであり、年平均降雪量は 581 cm、年平均気温は 11.8 °C である(AMeDAS 長滝; 1995-2024 年、調査地の北約 9 km)。調査年である 2023 年および 2024 年の年降水量はそれぞれ 3072 mm、3363 mm、年平均気温は 12.7 °C、13.1 °C であった。調査地域の地質は 5 万分の 1 地質図幅「八幡」(産業技術総合研究所地質調査総合センター, 1984)によると塊状砂岩、砂岩優勢砂岩泥岩互層から構成され、地質年代はジュラ紀中期である。植生は 52~103 年生のスギが 48%、103 年生のヒノキが 22% を占め、一部に広葉樹が見られる。

現地調査は積雪のない 2023 年 5 月、6 月、7 月、9 月、10 月および 2024 年 4 月、6 月、7 月、9 月、10 月に実施した。調査地点は GIS により抽出した林道と溪流の交点、現地で表流水が確認された地点および本流への支流合流点とした。表流水が確認された地点では流量、水温および電気伝導度(EC)を測定し、水質分析および安定同位体分析用の採水を行った。流量は流況に応じて容器法または断面法により測定した。複数回の調査結果を比較するため、調査時期は 7 日間先行降雨指数(API<sub>7</sub>)を用いて区分した。

水質分析では Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>をイオンクロマトグラフィー法により分析し、SiO<sub>2</sub>を ICP 発光分析法で分析した。安定同位体比(δ<sup>18</sup>O、δ<sup>2</sup>H)はキャピティリングダウン分光法(CRDS)で分析した。

## 3. 結果

## 3.1. 調査時期の先行降雨特性

全 10 回の調査のうち、大流域を含めた測定が行われた 2024 年 6 月および 9 月の API<sub>7</sub> はそれぞれ 10.6 mm および 35.1 mm であり、降雪のない 4 月から 11 月の API<sub>7</sub> 分布の中でそれぞれ 38 パーセントイルおよび 76 パーセントイルに相当し、6 月は相対的に乾燥であった。

## 3.2. 比流量の空間不均一性

本調査により 138 地点が観測地点として設定された。表流水の確認された地点は 2024 年 6 月と 2024 年 9 月でもとも 73 地点であった。観測を行ったいずれの時期においても大きなバラツキが確認された。2024 年 6 月の比流量は  $8.9 \times 10^{-3} \sim 2.9 \times 10$  mm/day であり、2024 年 9 月では  $4.2 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10$  mm/day であり、相対的に乾燥な時期、湿潤な時期いずれにおいても流域間で 1000 倍程度の違いが見られた(図 1)。流域面積 10ha 以上の流域は 10ha 未満の流域と比較し比流量が安定する傾向が見られた(面積 10ha 以上 6 月: 3.0~7.5 mm/day; 9 月: 4.5~9.4 mm/day)。

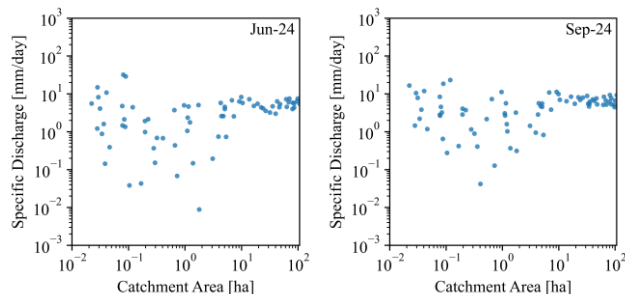


図 1 2024 年 6 月(左)と 2024 年 9 月(右)の流域面積と流量の関係。

## 3.3. 水質の空間不均一性

乾燥した時期である 2024 年 6 月では Ca<sup>2+</sup>、SiO<sub>2</sub>、Cl<sup>-</sup>の濃度の範囲はそれぞれ 0.83~118.8、48.0~189.6、11.9~64.8 μmol/L であった。湿潤な時期である 2024 年 9 月ではそれぞれ 3.5~100.5、91.6~176.3、22.1~44.3 μmol/L であった。Ca<sup>2+</sup>濃度はいずれの時期においても流域面積 10ha 以上では高く(6 月: 83.2; 9 月: 86.8 μmol/L)、10ha 未満の流域では低くなる(6 月: 33.0; 9 月: 25.8 μmol/L)傾向が見られた。SiO<sub>2</sub>では流域面積の違いによる平均値の違いは見られなかったが、バラツキは流域面積 10ha 未満の方が大きくなった。Cl<sup>-</sup>では流域面積 10ha 未満かつ 2024 年 6 月で濃度が高くなる傾向が見られた。流域面積 10ha 以上では比流量が安定しているが、流域面積 10ha 未満の流域は流域面積 10ha 以上の流域と水質が同濃度であっても比流量が安定せず、比流量が低い値をとる流域も複数確認された。

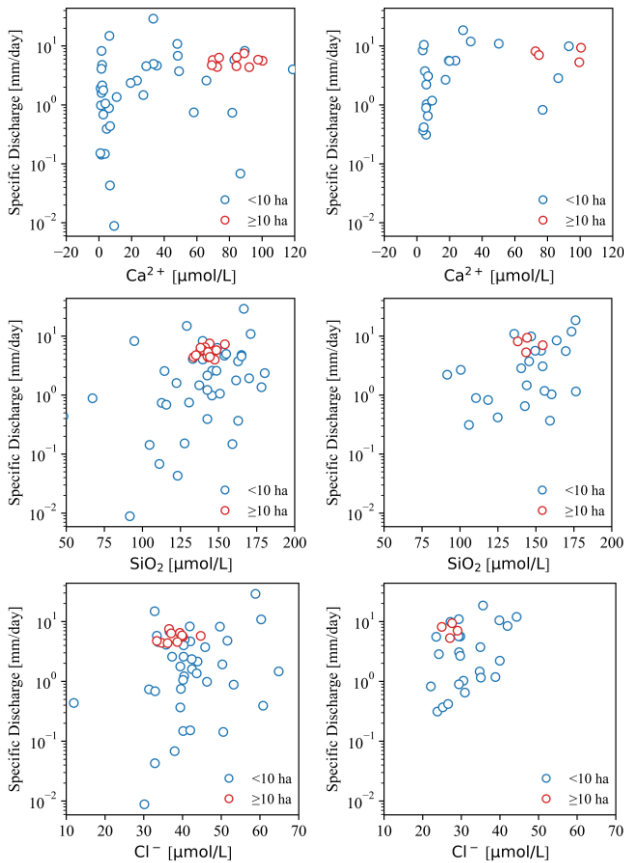


図2 二時期における水質と比流量の関係。左：2024年6月；右：2024年9月

3.4. 安定同位体比の空間不均一性

安定同位体比 ( $\delta^2\text{H}$  と  $\delta^{18}\text{O}$ ) の範囲は 2024 年 6 月にはそれぞれ  $-54.8 \sim -42.7$ 、 $-8.9 \sim -7.0$  ‰ で、2024 年 9 月にはそれぞれ  $-57.7 \sim -49.3$ 、 $-9.0 \sim -8.1$  ‰ であり、乾燥した時期である 2024 年 6 月の方がバラツキの大きくなる傾向が見られた(図3)。

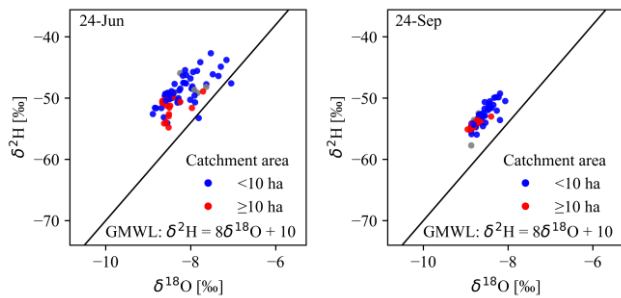


図3 2024年6月と2024年9月のδダイアグラム

4. 考察

本研究で対象とした堆積岩流域においても流量の空間不均一性が確認された。流域面積 10 ha 未満の流域の比流量分布は流域面積 10 ha 以上の分布よりも低く広がる傾向が見られており、この傾向は小流域において深部への浸透が発生し、その一部が下流側の流域で流出する地下水の流域間移動の可能性を示唆している(Oda et al., 2024)。

水質および安定同位体比も空間不均一性を示した。 $\text{Ca}^{2+}$  は岩石風化および土壌-水相互作用により供給されるイオンであり、流域面積 10 ha 以上の流域では岩盤

まで浸透した水の寄与が大きいことが示唆される。 $\text{SiO}_2$  も同様に水-岩石接触時間を反映する指標とされており (Katsuyama and Ohte, 2005)、濃度が高い流域では浅層土壌水ではなく、その下の強風化岩盤層あるいは弱風化岩盤層の寄与が大きい可能性がある。このような流域では比流量が比較的安定する傾向が見られた。一方で、 $\text{Ca}^{2+}$  とは異なり、10 ha 未満の流域であっても流域面積 10 ha 以上の流域より高濃度かつ高比流量を示す流域も見られた。これらの流域では、大流域を単純に縮小した集水メカニズムとは異なり、風化岩盤層の寄与や地下水の深部浸透を含む異なる集水メカニズムの存在が示唆される。

$\text{Cl}^-$  は主に大気沈着により供給され、生物利用や吸着の影響を受けにくい保存性トレーサである。高濃度を示す小流域では複数の流出経路からの水の混合が生じている可能性があり、降雨後に全体的な濃度低下が見られることは降水起源の水の混合による希釈の可能性を示している。

安定同位体比のばらつきが乾燥した時期から湿潤な時期にかけて減少した傾向は、乾燥期には浅層起源の水が主となる小流域において蒸発の影響を受けた水の寄与が相対的に大きく、降雨後には降水起源の水の寄与増加または流出成分の混合の進行により、同位体比の空間的ばらつきが小さくなった可能性を示している。

5. まとめ

本研究では、堆積岩山地源流域では流量および水質の空間的不均一性が確認され、小流域では深部浸透や流出経路の違いにより大流域の単純な縮小系では説明できない集水メカニズムが存在する可能性が示された。

引用文献

Asano, Y., Uchida, T., Mimasu, Y., & Ohte, N. (2009). Spatial patterns of stream solute concentrations in a steep mountainous catchment with a homogeneous landscape. *Water Resources Research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008WR007466>

Egusa, T., Ohte, N., Oda, T., & Suzuki, M. (2016). Quantifying aggregation and change in runoff source in accordance with catchment area increase in a forested headwater catchment. *Hydrological Processes*, 30(22), 4125-4138. <https://doi.org/10.1002/hyp.10916>

Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-science reviews*, 162, 227-252.

地頭菌隆, 下川悦郎, & 寺本行芳. (2006). 深層崩壊発生場予測法の提案 鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして. *砂防学会誌*, 59(2), 5-12.

Katsuyama, M., Ohte, N., & Kabeya, N. (2005). Effects of bedrock permeability on hillslope and riparian groundwater dynamics in a weathered granite catchment. *Water Resources Research*, 41(1).

Oda, T., Iwasaki, K., Egusa, T., Kubota, T., Iwagami, S., Iida, S. I., ... & Shimizu, T. (2024). Scale - dependent inter - catchment groundwater flow in forested catchments: Analysis of multi - catchment water balance observations in Japan. *Water Resources Research*, 60(7), e2024WR037161.

産業技術総合研究所 地質情報センター 5万分の1地質図幅「八幡」(1984)

Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., & Shimizu, T. (2000). Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrological Processes*, 14(3), 369-385.

Keywords

降雨-流出プロセス、堆積岩、マルチトレーサ、空間不均一性、山地源流域、深部浸透