

山地源流域を対象とした多地点観測による降雨-流出過程の評価:安定同位体比と水質分析によるアプローチ
Evaluation of rainfall-runoff processes by multi-point observations in a mountain source watershed: an approach using stable isotope ratios and water quality analysis

名古屋大学生命農学研究科 ○鯉江知樹・猪越翔大・五味高志・小谷亜由美
名古屋大学宇宙地球環境研究所 栗田直幸
地球科学研究所(株) 浅井和由
中部電力(株) 根津涼

1. はじめに

山地源流域は斜面崩壊や土石流が発生し、それらの発生には山体地下水が関連している(地頭菌, 2006)。流域面積の小さい山地源流域の流出は空間的なばらつきが大きいことが塚本(1960)で報告され、Asano and Uchida. (2010)により花崗岩小流域での流出のばらつきは岩盤を含む地下水の流出経路やその深さにより異なることが示された。また、Egusa et al. (2016)は溶存イオンを用いた混合モデル(EMMA)により、丹沢山地などの堆積岩源流域では流域面積によって浅層地下水と岩盤地下水の寄与率が変化することを報告している。このような岩盤地下水の寄与推定では、水の安定同位体比や SiO_2 などの水質指標の有効性も示されている(Asano et al. 2020)。しかし、既往研究では流域の湿潤状態を先行降雨のない時期に限定し、流域内の多地点計測から岩盤地下水の空間変動のみを評価しており、岩盤地下水の寄与に影響をおよぼす降雨履歴などを考慮した検討は行われていない。そこで本研究は、山地源流域における降雨-流出過程の評価を目的とし、(1)基底流時と出水時の空間分布の把握、その結果をふまえた(2)山地源流域における流出経路の検討を実施した。

2. 研究方法

本研究は岐阜県郡上市内ヶ谷流域内 C 流域(100ha)で実施した。流域の標高は 770~1100m、平均傾斜 37.1°である。年平均気温 11.7°Cで、年平均降水量 3167mm で、年降水量の 18%が降雪である(AMeDAS 長滝 1995~2024 年)。地質は中生代堆積岩の塊状砂岩や砂岩優勢砂岩泥岩互層で、走向傾斜は東方向に約 75 度である(産業技術総合研究所発行 5 万分の 1 地質図幅「八幡」)。調査地点は、LiDAR データから作成した 1mDEM を用い、GIS で抽出した 0.02~100ha の 138 箇所的小流域および、現地で表流水の確認された地点とし、2023 年~2024 年に 7 回の現地調査を実施した。現地調査は、流量の有無を確認し、表流水を確認した場合、流量、水温、電気伝導度を計測し、50~100ml の表流水を採取した。また、流出経路の推定のために、林外の降水、深さ 100cm の井戸の浅層地下水、斜面に露出している風化岩盤の亀裂から流出している岩盤湧水を採取した。水分析では採取した表流水の SiO_2 濃度と安定同位体比 $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。

調査地の雨量計から得られたデータをもとに 7 日間先行降雨指数 (API_7) を算出した。また、流量を流域面積で割り比流量 (mm/day) を算出した。土壌の湿潤状態の違いと流出経路への影響を評価するため、 API_7 を基に分類した電気伝導度と比流量の平均値 (Mean EC: MEC_{dry} ; MEC_{wet}) と (Mean Specific Discharge: MSD_{dry} ; MSD_{wet}) を算出した。

3. 結果

乾燥期 3 回と湿潤期 4 回の調査では、表流水の有無に大きな違いはなく、EC も同程度であった。一方、流量は API_7

が 10 倍程度の違いに対して、1~100 倍の違いがあった。 MEC_{dry} と MSD_{dry} は $11.6 \sim 55.4 (\mu\text{S/cm})$ 、 $8.9 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^1 (\text{mm/day})$ であり、 MEC_{wet} と MSD_{wet} は $9.5 \sim 51.8 (\mu\text{S/cm})$ 、 $3.8 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^2 (\text{mm/day})$ であった。小流域の MSD_{dry} と MSD_{wet} は $8.9 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^1 (\text{mm/day})$ 、 $3.8 \times 10^{-2} \sim 7.0 \times 10^1 (\text{mm/day})$ であり大きな違いがあった。一方、本流は MSD_{dry} と MSD_{wet} とともに $3.0 \times 10^0 \sim 7.5 \times 10^0$ 、 $4.2 \times 10^0 \sim 9.6 \times 10^0 (\text{mm/day})$ で大きな違いはみられなかった(図 1)。

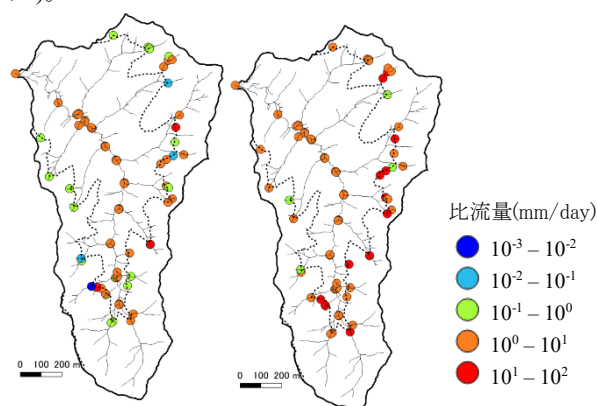


図1: 乾燥期(左)と湿潤期(右)における平均比流量 MSD_{dry} と MSD_{wet} の分布

表1: 乾燥期と湿潤期別の計測回数、流量有割合、平均 API_7 、流量幅、EC

	回数	流量有割合 (%)	平均 API_7	流量幅 (mL/s)	EC ($\mu\text{S/cm}$)
乾燥期	3	64.6	4.3	$1.9 \times 10^{-1} \sim 3.6 \times 10^4$	11.9~57.0
湿潤期	4	69.1	41.3	$5.1 \times 10^{-1} \sim 1.1 \times 10^5$	9.8~53.4

降水、表層地下水、岩盤湧水の電気伝導度は $4.2 \sim 4.6$ 、 $15.6 \sim 22.2$ 、 $33.1 \sim 57.0 (\mu\text{S/cm})$ であった。流域面積でみると、10ha 未満では EC は $9.8 \sim 57.0 (\mu\text{S/cm})$ 、比流量は $6.3 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^2 (\text{mm/day})$ の範囲にあり、 MSD_{dry} と MSD_{wet} は $8.9 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^1$ 、 $3.8 \times 10^{-2} \sim 7.0 \times 10^1 (\text{mm/day})$ であり、 MEC_{wet} と MEC_{dry} は $11.6 \sim 55.4$ 、 $9.5 \sim 45.1 (\mu\text{S/cm})$ であった。10ha 以上では EC は $24.0 \sim 48.8 (\mu\text{S/cm})$ 、比流量は $3.0 \times 10^0 \sim 1.1 \times 10^1 (\text{mm/day})$ であり、 MSD_{dry} と MSD_{wet} とともに $3.0 \times 10^0 \sim 7.5 \times$

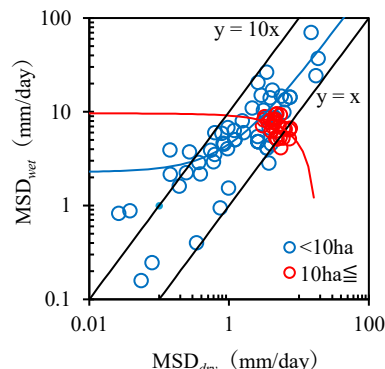


図2: MSD_{dry} と MSD_{wet} の関係

10^0 , $4.2 \times 10^0 \sim 9.6 \times 10^0$ (mm/day) であり、 MEC_{wet} と MEC_{dry} は17.9~44.1, 28.1~48.8 (μ S/cm)であった。

流域面積によらず MSD_{dry} よりも MSD_{wet} が大きくなる傾向が見られたが流域面積が10ha未満の流域では MSD_{dry} の増加に従い MSD_{wet} が増加する傾向が見られ、 MSD_{dry} よりも MSD_{wet} の方が10~30倍になる流域があるのに対し、一部の流域では MSD_{dry} と MSD_{wet} が1~2倍の流域も見られた(図2)。一方、流域面積10ha未満では MEC_{dry} の増加に従い MEC_{wet} が線形に増加する傾向が見られたが、 MEC_{dry} が増加するほど MEC_{wet} の値は MEC_{dry} よりも小さくなる傾向が見られるのに対し、流域面積10ha以上でも同様に MEC_{dry} の増加に従い MEC_{wet} が線形に増加する傾向が見られたものの、 MEC_{dry} の増加に従い MEC_{wet} が低下する傾向は見られなかった(図3)。 SiO_2 は流域面積10ha未満では2.2~12.5mg/Lでばらつきが大きく、10ha以上では9.0~10.0mg/Lで10ha未満の流域の平均値(9.4mg/L)に近い値となった。2024年6月に採取された水の δ^2H と $\delta^{18}O$ の関係は MEC_{dry} が高い流域は MEC_{dry} が低い流域よりも原点に近づく傾向が見られた。

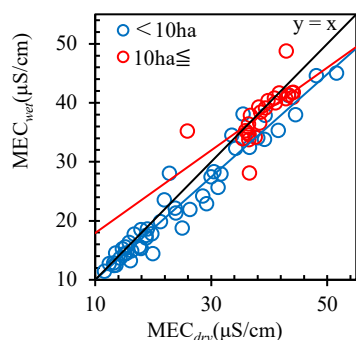


図2: MEC_{dry} と MEC_{wet} の関係

4. 考察

多地点観測から流域面積が、流出経路と流出時間に関連し、比流量や水質形成に影響していることが考えられた。流域面積10ha以上の流域の比流量やECは流域面積10ha未満と比較して湿潤状態によらず安定しており、ECや SiO_2 濃度から、流出してくる水は岩盤との接触時間が長く、岩盤地下水の寄与が大きいことが考えられた(Egusa et al., 2016)。また、湿潤期に比流量が増加しているものの、ECには増減が見られないことから、湿潤期の流出には岩盤地下水の押し出し流の寄与が大きいことが考えられる(Oda et al., 2013)。一方、流域面積10ha未満では比流量やECの乾燥期から湿潤期への増減割合は流域間で差が大きく、流出経路の違いによる流域内外への移動(Oda et al., 2024)の可能性がある。 MEC_{dry} の大きい小規模流域における MEC_{dry} の相対的な低下は浅層地下水の寄与が大きくなっていることが考えられ(Hewlett and Hibbert, 1963)、比流量の乾燥期から湿潤期への増加の小さい流域では、常時深部浸透が発生することで流域外へ流出しており、その要因として岩盤層の透水性や地質構造が影響している可能性が考えられる(Pfister et al., 2017; Inaoka et al., 2020)。地質条件が流出経路を変える要因には岩質や風化の進行度による透水性の違いが考えられ(Cherry & Freeze, 1979)、流域内の透水性の空間的不均質が、小流域における比流量や水質の空間的不均質の原因となっていることが考えられる。安定同位体比(δ^2H , $\delta^{18}O$)の分布からは、 MEC_{dry} 、 MEC_{wet} が高い流域ほど降水起源に近い同位体比を示しており、表層での蒸発影響を受けずに浸透した岩盤地下水が主流成分になっている可能性を裏付ける(McDonnell, 1990; Uchida et al., 2003)。

5. まとめ

本研究では基底流時と出水時の多地点観測から山地源流域における空間分布を把握し、流出経路の検討を行った。山地源流域では、空間的にも湿潤状態によって比流量や水質が異なる挙動を示すことが確認され、その要因として、基岩の透水性の不均質による流出経路の違いが考えられた。

参考文献

- Asano, Y., & Uchida, T. (2010). Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments?. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(5), 666-671.
- 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(9), e2019WR025658.
- Cherry & Freeze. 1979. Groundwater (p. 370). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- 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.
- Hewlett, J. D., & Hibbert, A. R. (1963). Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *Journal of geophysical research*, 68(4), 1081-1087.
- Inaoka, J., Kosugi, K. I., Masaoka, N., Itokazu, T., & Nakamura, K. (2020). Effects of geological structures on rainfall-runoff responses in headwater catchments in a sedimentary rock mountain. *Hydrological Processes*, 34(26), 5567-5579.
- 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.
- McDonnell, J. J. (1990). A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water resources research*, 26(11), 2821-2832.
- Oda, T., Suzuki, M., Egusa, T., & Uchiyama, Y. (2013). Effect of bedrock flow on catchment rainfall-runoff characteristics and the water balance in forested catchments in Tanzawa Mountains, Japan. *Hydrological Processes*, 27(26), 3864-3872.
- 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.
- Pfister, L., Martínez-Carreras, N., Hissler, C., Klaus, J., Carrer, G. E., Stewart, M. K., & McDonnell, J. J. (2017). Bedrock geology controls on catchment storage, mixing, and release: A comparative analysis of 16 nested catchments. *Hydrological Processes*, 31(10), 1828-1845.
- 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)
- 塚本良則・城戸毅(1960) 森林伐採による年流出量の増加について. *水利科学*, 28(6), 26-38.
- Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N., & Mizuyama, T. (2003). Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resources Research*, 39(1).

Keywords

mountainous watersheds, rainfall-runoff process, stable isotopes, multi-point observation, bedrock groundwater, subsurface flow