

森林源流域を対象とした水流出特性の時空間的変動性とその支配的な条件

Spatiotemporal variability of steam runoff characteristics and its dominant conditions for forested headwater catchments.

名古屋大学生命農学研究科 ○鯉江知樹・五味高志・小谷亜由美・田中隆文・猪越翔大
中部電力 中瀬孝・津田その子・根津涼

1. はじめに

山地流域へ浸透した雨水は、土壌や岩盤のさまざまな流出経路 (Sidle et al., 2000) を経て、その一部は流出するとともに、岩盤や土壌への貯留、さらには深部浸透をもたらす (Oda et al., 2013)。土壌や岩盤への水の貯留は、崩壊や土石流の発生にも関連している。たとえば、松澤 (2019) は、平成 29 年 7 月九州北部豪雨で、土壌中へ水を貯留しやすい地質構造では大規模崩壊が発生することを報告している。さらには、内田・岡本 (2012) は、48 時間雨量 600mm で複数の深層崩壊が発生したと報告し、地頭蘭ら (2006) は岩盤への水の貯留が深層崩壊の発生要因の一つであると報告している。

既往研究から森林源流域の水流出量は地質や地形などにより、隣接流域でも流出量が異なり不均質である。たとえば、Asano and Uchida (2012) では多地点における水質調査から流出に影響を与える土壌や岩盤層が表面地形や滞留時間と関連があることを示した。Egusa et al. (2013) は多地点の水質調査から複数の地質が存在する流域において代表的な流域面積 (REA) が存在することを示した。このようなことは表面地形や地質と流出プロセスを研究することの重要性を示している。

流出量は時間的にも変動することが示されており、それらは地質や地形条件により異なる。たとえば、地頭蘭ら (2004) は地質調査と水文観測から 100mm 程度の降雨に対する直接流出率は 6% 未満であり、逓減の減衰が小さいことを示している。Katsuyama et al. (2008) は花崗岩流域と堆積岩流域のハイドログラフの比較から、堆積岩流域における逓減は大きく、貯留量が小さいことを示した。

これらの点から、空間的にも多様な地形や地質において、降雨量の季節変化等により流量が時間的にどのように変化するかを検討が重要であることが示されている。そこで本研究では森林源流域での水流出プロセスの空間変動時間変動を把握し、その要因を検討することを目的とした。

2. 研究方法

調査は岐阜県郡上市の木曽川水系長良川支流亀尾島川上流内ヶ谷流域内に位置する山地流域 (C 流域: 面積 100 ha, 緯度経度追加) を対象とした。C 流域は標高 770 m から 1100 m であり、斜面の平均傾斜は 37.8° である。主な森林植生は、52~103 年生のスギやヒノキ人工林および、ナラなどの広葉樹林で構成されている。流域内には、標高 900~960 m の斜面中腹に幅 3 m の林道が設置されている。AMeDAS 長滝 (調査地から北に 13 km) における 1993~2022 年の年平均降水量は 3131 mm であ

り、11~4 月には平均 540 mm (年降雨の 18%) の降雪があり、年平均気温は 12°C である。流域の地質は中生代堆積岩による砂岩泥岩互層であり、流域の層向傾斜は一様であり東に約 75° 傾斜している (5 万分の 1 地質図幅「八幡」1984)。

C 流域内に位置する源流域の抽出には航空機 LiDAR (点密度 1.00 点/m², 2013 年取得) による 1 m DEM を用い、QGIS でおこなった。1 m DEM から林道の流路を抽出し、その中から調査流域 80 地点を選定した。現地踏査において流路の存在、流水の有無、湧水点を確認し、緯度・経度を記録した。流水が有る場合は流量、電気伝導度 (EC)、水温を計測するとともに、50 ml の水サンプルを採取した。流量が少ない場合、パテとメスシリンダーを用いて水を集め、ストップウォッチによる計測を行った。流量が 500 cm³/s 以上の場合は、川幅を計測し水深・流速を 1~9 点計測し流量を算出した (志水, 1999)。流域の水流出に関連する地形指標として、流域面積、最高標高、傾斜、標高差、流路長、谷密度、形状比、など 17 点 (横尾&沖, 2010; 横尾&有働, 2007) を算出した。これらの空間特性の把握とともに、源流域の季節変動を把握するため、2023 年 5 月、6 月、7 月、9 月、10 月で調査を実施した。

3. 結果

(1) 流量の時空間分布特性

ここでは、流域が比較的乾燥していた 7 月と湿潤であった 9 月の結果報告する。7 月の平均気温は 24.0°C、平均 API₇ は 0.5 mm であった。流水ありが 24 箇所、流水なしが 56 箇所であった。流水あり流域の流量は 1.12~2.34×10³ cm³/s、比流量は 3.45×10⁻²~17.4 mm/day、EC は 12.2~52.0 μS/cm、水温は 10.8~23.4°C であった。流水あり流域は C 流域東側流域 (右岸側) 35%、西側流域 (左岸側) 21% であった。また、EC が >15 μS/cm は右岸側 94%、左岸側 33% であった。水温が <16°C は右岸側 47%、左岸側 17% であった。

9 月の平均気温は 20.4°C で、平均 API₇ は 41.0 mm であった。流水ありが 35 箇所、流水なしが 45 箇所であった。流水あり流域の流量は 2.37~5.86×10³ cm³/s、比流量は 4.52×10⁻²~34.4 mm/day、EC 10.4~53.3 μS/cm、水温 11.0~21.2°C であった。流出割合が右岸側で 48% に、左岸側で 36% に増加したが、それ以外の EC の高い箇所の割合や水温の低いところの割合は 7 月の調査結果との違いは見られなかった。

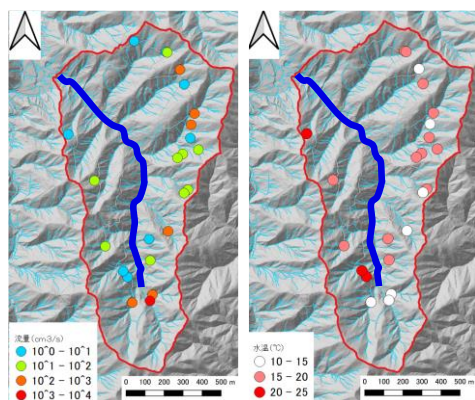


図1 7月の流量と水温の空間分布

(2) 流域地形特性

流域面積は 2.22×10^{-2} から 6.71 ha であった。流域標高差 $25 \sim 179 \text{ m}$ 、谷密度 $7.2 \sim 1.5 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$ 、流路長 $12 \sim 5.7 \times 10^3 \text{ m}$ であった。右岸側と左岸側との間で流域面積や標高差などの地形指標の明瞭な差は見られなかった。7月の流量を右岸側と左岸側で流域面積毎に検討した結果、流域面積が増加すると流量は増加していた。また、流域面積によらず右岸側の流量が左岸側よりも約5倍大きくなる関係性が見られた(図2)。9月では7月のような流域面積の増加により流量が増加する関係性はみられなかった。

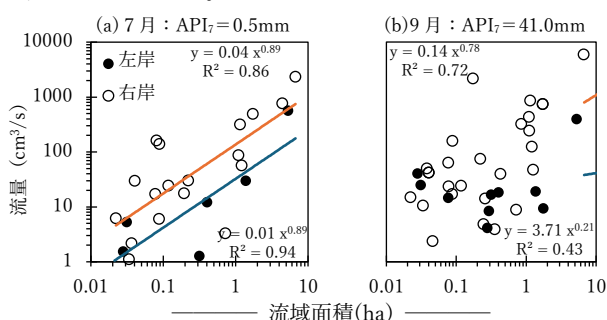


図2 流域面積と流量の関係

4. 考察

対象とする森林源流域では流水がある流域と流水がない流域が存在し、それらの割合が計測を行った時期により変動することが確認された。Costigan et al. (2015)は地形や湿潤状態などの流域の局所的な特徴により、流水の有無が時空間的に変動すると報告している。本研究でも個々の流域の特徴により流水の有無が決定され、湿潤度 (API_t) の増加により9月に水ありの地点が増加した。変動した流域は、降雨により閾値を超えた流域であり、湿潤な9月であっても流水がなかった流域はさらに流域が湿っている状態もしくは降雨時のみの一時流路であることが考えられた。

一方で、7月と9月のECや水温には変動が見られなかった。このことは土壌層や岩盤などの流出経路や滞留時間などの、水流出プロセスには、2時期に変化がなく、直前の降水による流出への寄与は小さいと考えられた。堆積岩流域では、岩盤への浸透量が多く (Oda et al., 2013)、それがすでに岩盤内に存在した貯留水を押し出すことで、7月と9月の流水あり地点の数や、流量の変動に影響したと考えられた。

水あり流域における流出が、右岸と左岸で異なった点が、亀裂や走向傾斜などの岩盤構造が影響していると考えられた。堆積岩流域では、層理面や節理面に沿った水の移動が確認されている (Inaoka et al., 2020)。走向傾斜は一様であっても、堆積岩の層構造の傾斜方位および層に形成される亀裂の有無により、水の移動方向は異なる可能性がある。一般的に、堆積岩の亀裂は層方向に対して鉛直形成され、調査流域では左岸側に傾いている。そのことから、右岸側では堆積岩の層に形成された地下水は亀裂を伝い最終的に斜面下部に流出することとなり、結果として比較的高いECと低い水温の流出となったと考えられた。一方で左岸側では、層に到達した雨水は亀裂を伝うと、斜面下部ではなく流域外に出ていくこととなり、流水のない河川の増加や流量が少なくなったと考えられた。

5. まとめ

本研究結果は、岩盤構造により源流域の流出の時空間変動がみられることを確認した。このような流出プロセスの違いは、崩壊発生の脆弱性を判断する指標ともなと考えられ、流域湿潤度の違いと流出の違いについてより詳細に検討する必要もある。

引用文献

- Asano & Uchida (2012) Flow path depth is the main controller of mean base flow transit times in a mountainous catchment. *Water Resources Research*, 48(3).
- Costigan et al., (2015) Fundamental spatial and temporal disconnections in the hydrology of an intermittent prairie headwater network. *Journal of Hydrology*, 522, 305-316.
- Egusa et al., (2013) Relationship between catchment scale and the spatial variability of stream discharge and chemistry in a catchment with multiple geologies. *Hydrological Research Letters*, 7(2), 12-17.
- Inaoka et al., (2020) Effects of geological structures on rainfall-runoff responses in headwater catchments in a sedimentary rock mountain. *Hydrological Processes*, 34(26), 5567-5579.
- 地頭蘭ら, (2004). 鹿児島県出水市針原川流域の水文地形的特性と深層崩壊. *砂防学会誌*, 56(5), 15-26.
- 地頭蘭ら, (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 et al., (2008). Comparison of rainfall-runoff characteristics in forested catchments underlain by granitic and sedimentary rock with various forest age. *Hydrological Research Letters*, 2, 14-17.
- 松澤 (2019). ある火山岩地域で発生した崩壊の地質構造とタイミング—平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害の事例—. *応用地質*, 59(6), 466-471.
- 虫明ら(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*, 1981(309), 51-62.
- Oda et al., (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.
- 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 et al., (2000). Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrological Processes*, 14(3), 369-385.
- 志水 (1999) 水環境と水移動 河川流量 森林立地調査法編集委員会 (編) 森林立地法 森の環境を測る 博友社 pp.176-179
- 内田 & 岡本, (2012). 深層崩壊を引き起こした降雨の特徴. *土木技術資料= Civil engineering journal: 土木技術の総合情報誌*, 54(11), 32-35.
- Uchida et al., (2003). Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resources Research*, 39(1).
- 横尾・有働, (2007). 流域の地理条件が流況曲線形状に与える影響. *水工学論文集*, 51, 373-378.
- 横尾・沖 (2010) 流域の気候・地形・土壌・地質・土地利用が河川の流況に与える影響.

Keywords: Headwater, Runoff, Geology, Spatial and temporal variation