

山地源流域におけるサーマルイメージングによる湧水点の特定と流出量縦断分布の把握

名古屋大学大学院生命農学研究科 ○山岡祐登・五味高志・小谷垂由美・猪越翔大

1. はじめに

河川水温は、気温の影響に加えて、地表水と地下水の相互作用や流出経路を反映して形成される(Leach et al., 2023)。そのため、見えない地下水の挙動を追跡する有効なトレーサーとなる(Anderson, 2005)。近年、高解像度のサーマルカメラを用いることで、水温の不均一性を面的に可視化し、源流域における地下水の流出地点を特定することが可能となった(Iwasaki et al., 2024)。このように流出経路を追跡し、湧水箇所を可視化することは、土砂災害の発生メカニズムを解明する上で重要である。斜面崩壊や土石流の多くは、降雨に伴う地形的な窪地への局所的な地下水の集中と、それに起因する間隙水圧の急上昇を誘因として発生する(Montgomery and Dietrich, 1994; Sidle et al., 2000)。すなわち、サーマルカメラで特定される湧水箇所は、斜面内部に存在する「水みち」の出口であり、間隙水圧が上昇しやすい崩壊のホットスポットを示唆している。しかし、これまでの熱赤外画像を用いた研究の多くは、湧水が存在する位置の特定に留まっており、各湧水が河川流量にどの程度寄与しているのかという量の評価は十分にできていない(Hare et al., 2015)。斜面内における局所的な地下水流動や水抜けの特性を正しく理解し、土砂災害の発生場となり得る水文プロセスを評価するためには、湧水の場所だけでなく、その流出量を定量的に推定することが不可欠である。そこで本研究では、①サーマルカメラによる湧水点の面的把握と、②河川流量の縦断的な観測を組み合わせることにより、各湧水が河川へ及ぼす寄与量を定量化し、斜面からの降雨流出プロセスを推定することを目的とする。

2. 研究方法

本研究は、愛知県豊田市に位置する名古屋大学大学院生命農学研究科附属演習林稲武フィールド高トッケ地区のY流域(3.4ha)を対象とした(図-1)。

対象流域は本流と湧水点1箇所、3支流(支流1: 0.5ha、支流2: 0.6ha、支流3: 0.6ha)で構成される。基岩は主に先新生代の角閃雲母花崗岩からなる。植生は主に38~41年生のヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)人工林、57、58年生のカラマツ(*Larix kaempferi*)人工林、39年生のスギ(*Cryptomeria japonica*)人工林で、一部天然生のアカマツ(*Pinus densiflora*)、サワラ

(*Chamaecyparis pisifera*)が見られる。流路延長は263m、平均流路勾配は13度、平均水路幅は36cm、平均水深は2.6cmであり、下流部は瀬や淵で構成される。図-1 赤点では水温、黒点では流量の定点観測を行っている。

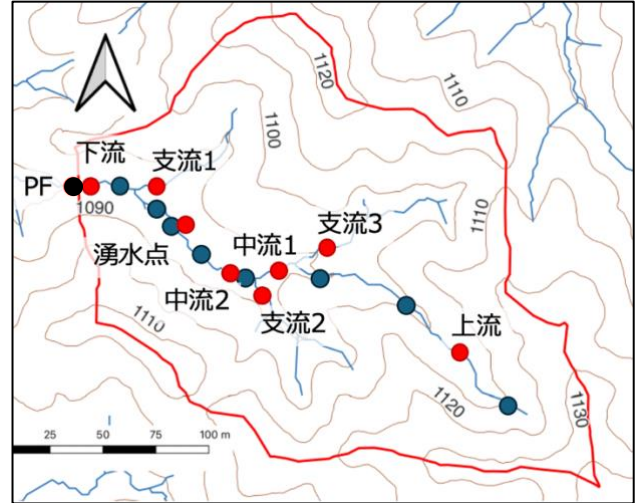


図-1 Y流域地図

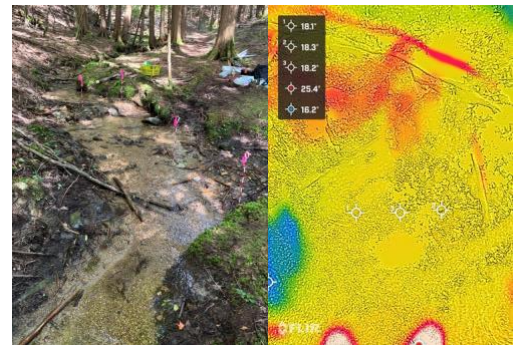


図-2 サーマルカメラによる撮影

流域内における湧水の空間分布を把握するために2025年8月8日にサーマルカメラ(FLIR ONE Edge Pro)による撮影から河川表面温度の把握を行った(Iwasaki.,2024)。また、流域内の水温と流量の空間分布を把握するために、同日に図-1 赤点、青点で示す本流上の12地点で流速、川幅、水深の測定を行い、流量を算出した(志水, 1999)。各地点のECと水温は携帯用水質測定器(WTW Multi 3510 IDS)を用いて計測した。水温、気温、流量データを用いて熱量保存の法則から流域末端における河川水中の湧水の寄与量を算出した。

$$Q_s = \frac{(T_d - T_m) \times Q_d - (T - T_m) \times R_D}{T_s - T_m} \dots (1)$$

ただし、ここでは推定湧水寄与量を Q_s 、下流流量を Q_d 、河川への直達雨を R_D 、気温を T 、湧水温を T_s 、下流水温を T_d 、中流水温を T_m とした。また、各湧水点の代表値として定点観測を行っている湧水点の水温を使用した。

3. 結果

サーマルカメラによる撮影の結果、湧水の分布には空間的な不均一性が確認された。日最高気温が 27.6°C であった 2025 年 8 月 8 日の観測では、河川中に存在する湧水の密度は、流域末端を 0m とし 0m~45m 区間で 0.20/m、45m~90m 区間で 0.07/m、90m~140m 区間で 0.12/m であった。また、湧水点間では規模、水温も異なっており、15.8°C~19.4°C であった。

同日に行った本流における流量の多地点観測から、流量変動にも空間的な不均一性が確認された(図-3)。本流全体での流量変化が、 $1.0 \times 10^{-2} \text{L/s/m}$ であるのと比較して、0m~45m 区間で $0.70 \times 10^{-2} \text{L/s/m}$ 、45m~90m 区間で $1.9 \times 10^{-2} \text{L/s/m}$ 、90m~140m 区間で $1.7 \times 10^{-2} \text{L/s/m}$ であった。

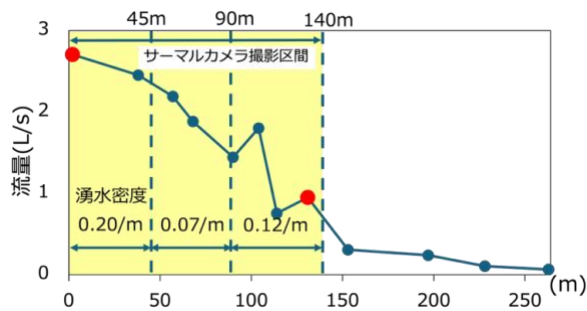


図-3 本流流程の流量変動 (2025/08/08)

水温、気温、流量定点観測データを用いた熱収支式から、本流域の河川水中における湧水の寄与量の推定を行ったところ、降雨イベントに伴い、日流量は 2.2mm から最大で 47.2mm まで増加するとともに、推定湧水寄与量も平常時の 0~3mm から最大で 17.1mm まで増加が確認された(図-4)。また、流量観測中の河川水中の湧水の寄与割合は 31% であった。

4. 考察

サーマルカメラで観測された各湧水の規模や水温に異なる特徴が生じる原因として、流出量との関係が考えられた。花崗岩流域では、湧水の流入による流量の変動が多地点で観測されており(Onda., 1994)、本研究の対象流域においても本流の縦断的な流量増加は湧水の流入が一因であると考えられた。一方で、本流流程において湧水密度が高い区間と流量増加が大

きい区間は一致していなかった。また、流程で流量が減少する地点も観測された。山地の河川では、水は地下から地上へと流出したのちに、堆積物を通じて表層水と地下水が混合するといった河床での水交換が確認されており(Tonina and Buffington., 2009)、湧水の流入による流量の増加と、河床での水交換による流量の減少が発生している可能性が示唆された。

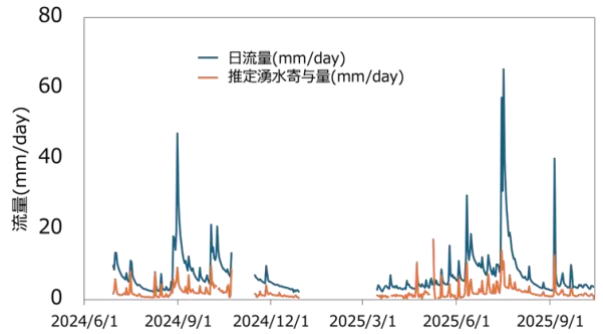


図-4 流域末端流量と推定湧水寄与量

引用文献

Anderson, M.P. (2005), Heat as a Ground Water Tracer. *Groundwater*,43:951-968.
 Hare, D.K., Briggs, M.A., Rosenberry, D.O., Boutt, D.F. and Lane, J.W. (2015), A comparison of thermal infrared to fiber-optic distributed temperature sensing for evaluation of groundwater discharge to surface water. *Journal of Hydrology*,530:153-166.
 Iwasaki, K., Nagasaka, Y., Ishiyama, N. and Nagasaka, A. (2024), Thermal imaging survey for characterizing bedrock groundwater discharge: comparison between sedimentary and volcanic catchments. *Hydrological Research Letters*,18:79-86.
 Leach, J.A., Kelleher, C., Kurylyk, B.L., Moore, R.D. and Neilson, B.T. (2023), A primer on stream temperature processes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*,10:e1643.
 Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. (1994), A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resour. Res.*,30:1153-1171.
 Onda, Y. (1994), Contrasting hydrological characteristics, slope processes and topography underlain by Paleozoic sedimentary rocks and granite. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*,15:49-65.
 Sidle, R.C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M. and Shimizu, T. (2000), Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrolog. Process.*,14:369-385.
 志水俊夫 (1999), 水環境と水移動 河川流量. 森林立地法 森の環境を測る (森林立地調査法編集委員会編) 博友社,176-179.
 Tonina, D. and Buffington, J.M. (2009), Hyporheic Exchange in Mountain Rivers I: Mechanics and Environmental Effects. *Geography Compass*,3:1063-1086.

Keywords:

水温の不均一性、サーマルカメラ、湧水、流量