

地下水が育む冷水性魚類の生息環境

: 気候変動下での Climate-change refugia の重要性

石山信雄・長坂有・長坂晶子

Climate-change refugia とは？

地球温暖化の進行は、他の生態系同様に河川生態系の主要な脅威の一つとされています (Thomas et al. 2004)。現在、温暖化による世界の平均気温上昇を1.5℃以内に抑止すべく様々な緩和策が世界規模で取られています。今後10年以内にその目標値を超えるとする予想もあります (Matthews et al. 2022)。こうした状況の中、私たちは、サケ科魚類やハナカジカといった冷水性魚類の保全を目的としてその主な生息地である山地河川において「Climate-change refugia」の特定に関する研究を行ってきました。このClimate-change refugia (以下、Refugia) とは、気候変動による大気候の影響を受けづらく生物の生息にとって好適な環境条件が維持される避難場を指します (Morelli et al. 2016)。河川生態系でいえば、気温上昇が予測される将来においても他の場所より水温が低く維持され、冷水性魚類の生息地として持続しうる場所が該当します。

流域地質と地下水流出の関係

私たちはRefugiaの特徴を把握する上で流域内に広がる「地質」に着目しました。日本では以前から河川流量の特徴と流域地質との関係性の解明が試みられてきており、例えば、日本列島の複数の山地河川を解析した虫明ら (1981) は、流域内で火成岩が優占する河川では湧水流量が多く年最大流量が少ない、すなわち流量の年変動 (もしくは年較差) が少ないことを報告しています。この流量の安定性の高さを生む要因として指摘されているのが「地下水貯留能の高さ」です。特に、第四紀の噴出岩・溶岩あるいは火成砕屑物は亀裂や空隙に富んでいるため、結果として豊富な地下水を涵養できるのだろうと考えられてきました。北海道内でも羊蹄山や大雪山系等、山麓で湧き水を汲める場所がありますが、実際に湧き水を触った方はわかるように、とても冷たく感じるはずですが。私たちは、この地質 (火成岩) と地下水湧出の関係性が、先行研究で行われてきた河川流量の特性把握だけでなく、温暖化下での冷涼なRefugiaの特定・予測にも応用できると考え、研究を進めることにしました。尚、本稿で「火成岩」とは、マグマが地上近くまたは地下深くで冷え固まってできた岩石を指し、地質調査総合センターが公開している「シームレス地質図」を参照に分類を行っています。

地質と気候によって形成される河川水温の時空間的な異質性

流域地質が1年の内で最も暑い夏 (7-8月) の河川水温に与える影響を明らかにするため、私たちは本州中部地方から北海道まで計140の山地河川に気温および水温ロガーを設置し、その変動を1時間間隔で記録しました。時に出水攪乱で河川地形が大きく変化する山地河川での観測は大変苦労が多く (図-1)、データ回収率が50%を下回る時もありましたが、最長5年にわたる観測により解析に十分なデータ数を無事に取得することができました。

気候、流域地質、河川地形、土地利用など複数の環境要因を用いて夏季平均水温を予測するモデルを作成した結果、流域地質 (流域面積の内、火成岩が占める割合) の夏季平均水温に与える影響度は夏季平均気温に次いで2番目に大きいことがわかりました。私たちが予想した通り、火成岩が涵養する豊富で冷涼な地下水の影響は河川流量のみならず水温にも及んでおり、流域内

で火成岩が占める割合が増える程、夏季平均水温は低くなることが示されたのです（図-2）。さらに、その影響度は全国一律ではないということもわかりました。図-2 (a) は降水量毎に、図-2 (b) は気温毎に、火成岩割合と夏季平均水温の関係を示しており、線の傾きが急な程、流域地質が夏季平均水温に与える影響が強いことがわかります。特に各図の青い実線が示すように、夏季降水量が少ない、または気温が低い地域ほど、火成岩割合と夏季平均水温間の関係は強くなっていました。つまり、観測した地域の中でも夏季降水量が少なく気温が低い北海道は特に火成岩による冷却効果が高いこととなります。具体的には、北海道での火成岩河川（流域内で火成岩が50%以上を占める河川）とその他の河川での夏季平均水温の差は最大約3℃にまで達することもわかりました。



図-1 令和元年東日本台風前後の調査河川（群馬県・沼尾川）の様子
写真左上の橋が両写真の比較に有効な目印。Ishiyama et al. (2023b) より抜粋。

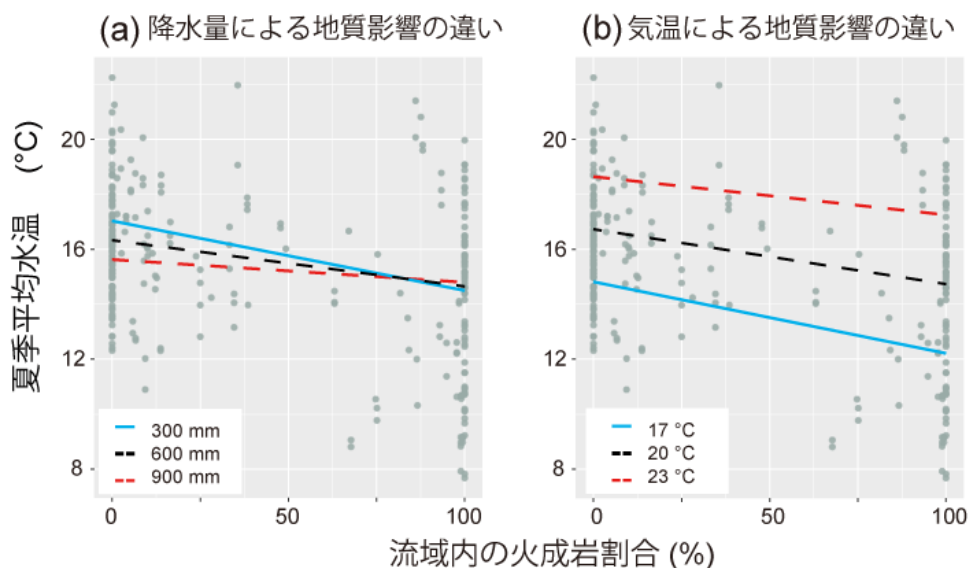


図-2 気候条件に応じた夏季平均水温（7-8月）と流域地質との関係
線の傾きが急な程、地質が水温に与える影響が強いことを示している。

流域地質と魚類群集の関係

上記の水温に関する解析から、火成岩河川が特に冷涼な環境を有することが分かってきたため、私たちは次に、流域地質が作り出す水温パターンと河川生物の分布が対応するか調査することにしました。観測地域から、気候条件の異なる本州中部（気温が高い・降水量が多い）と道央（気温が低い・降水量が少ない）の2地域を選び、魚類を採集してその群集構造を地質間（火

成 vs その他) で比較しました。前述したように、気候に応じた影響度の違いを考えると、影響度が大きい道央で、地質タイプと生物相の対応関係がより明確に見られるはずですが。群集構造解析の結果、その予想が裏付けられ、流域地質の水温への影響度が大きい道央地域では、火成岩河川において冷水性種 (図-3) がより多く生息することで地質間での群集構造の違いが明確だったのに対し、本州の中部地域では地質間で群集構造に大きな違いは認められませんでした (図-4)。

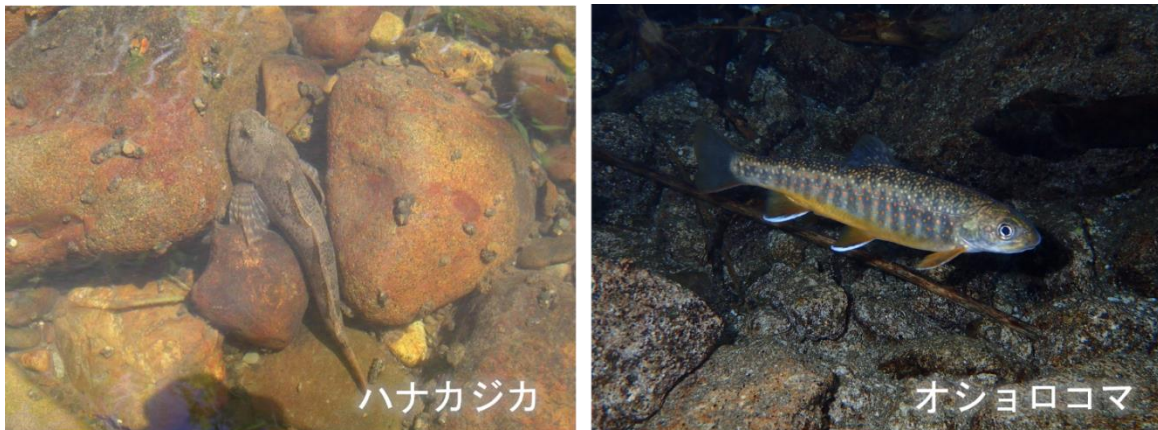


図-3 火成岩河川の代表的な冷水性魚類

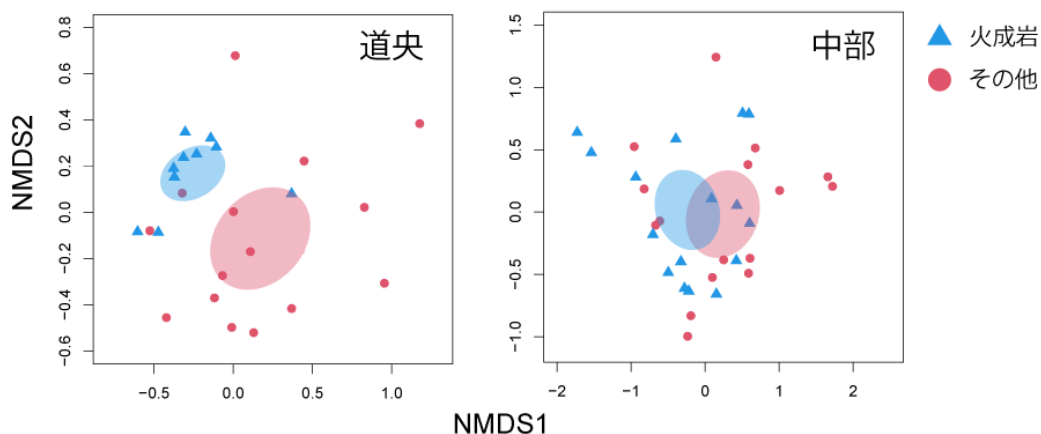


図-4 NMDS (非次元尺度構成法) による地質間での魚類群集構造の違いの可視化

図中の楕円は各地質の群集構造の95%信頼区間を示しており、その重なりが大きいほど群集構造が似ていることを示す。

火成岩河川は将来も冷水性魚類の生息地となり得るか？

これまでみてきたとおり、現在、地下水涵養の豊富な火成岩河川が冷水性魚類の生息地として重要であることを示すことができました。しかし、温暖化が進行した将来においても冷水性種の生息が可能な水温が持続しなければ、Refugiaであるとは言えません。果たして、その機能は今後も維持されるのでしょうか？北海道地域を対象に、既に報告されている複数の気候モデルの将来気候 (気温、降水量) に基づき河川水温を予測することで、その持続可能性を検証しました。今回検証対象としたのは、魚類の中でも特に火成岩河川で多く生息していたハナカジカ *Cottus nozawae* です (図-3左)。私たちの過去の研究において、本種の北海道での生息確率は夏季平均水温が上昇するとともに低くなることが明らかにされており、その温度閾値 (= 生息確率が0.5を下回る温度) は16.1°Cでした (Suzuki et al. 2021)。今回の検証では、現在から

将来にかけての夏季平均水温の変化を地質間で比較し、どの程度の河川が本種が生息可能な16.1℃以下に保たれるかを予測しました。予測にあたっては、RCP (Representative Concentration Pathways) シナリオを用いました。これは人間活動に伴う温室効果ガス等の大気中濃度が、将来どの程度になるかを想定した排出シナリオで、2.6, 4.5, 8.5の順に温暖化の度合いが深刻になることを示しています。

各年代とRCP間で火成岩河川とその他河川を比較した結果(図-5)、北海道における火成岩河川のRefugiaとしての重要性が鮮明に示されました。赤色で示した火成岩以外の河川では、現在はハナカジカが生息可能な生息地が多く存在するものの、最も軽度なRCP2.6シナリオにおいてさえ近い将来(2041~2060年)に約半数もの生息地が生息不適となる可能性が予測されました。一方、濃い青色で示した火成岩河川は中程度の排出シナリオ(RCP4.5)までは、大半の河川が温度閾値を下回り続け、Refugiaとして機能することが予測されました。但し、最も温暖化が進むRCP8.5シナリオ下では、約50年後(2061-2080年)には火成岩河川でさえ半数程度が生息不適となる可能性があることから、いかなる場合も火成岩河川がRefugiaとして万能であるわけではなく、温暖化自体の進行を緩和する努力も引き続き必要なことには変わりありません。

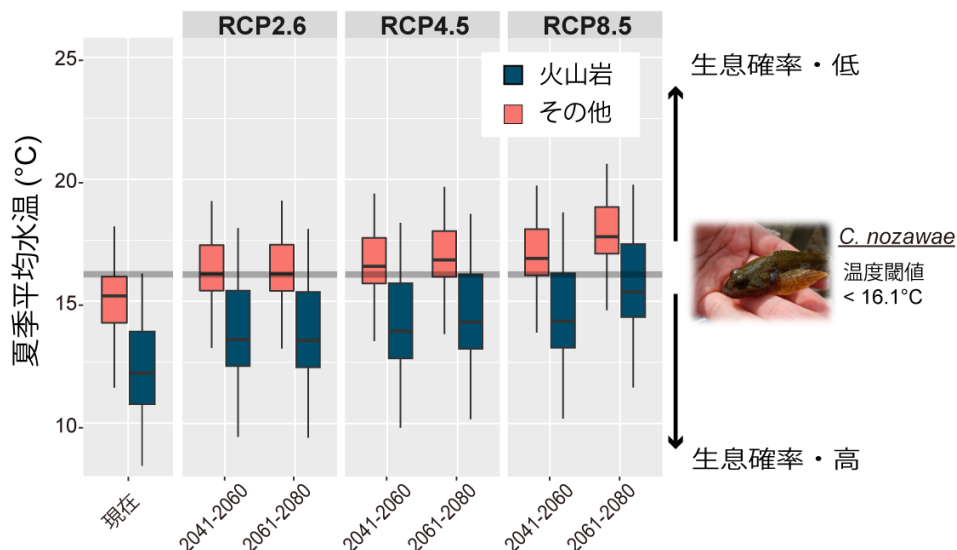


図-5 温暖化予測の程度に応じた地質ごとの水温変化予想とハナカジカの生息温度閾値との関係

太い横線がその温度閾値を示しており、この閾値より水温が低い生息地が多いほど、Refugiaとして機能する可能性が高い。

Refugiaを考慮した河川ネットワーク管理：冷水性魚類の保全に向けて

これまで示してきたように、森林に覆われ日射が遮断されている山地河川でも、河川間で夏季水温は大きく異なっており、その違いを気温だけでなく地質が生んでいることがわかりました。それでは、今回得た知見は今後の気候変動下での河川管理にどのように活かすことができるのでしょうか？特に流域の上流部である山地河川の管理において、気候変動とセットで管理者が考慮しないといけないのが河川横断工作物の存在です。山地河川には小規模な治山ダムや砂防ダムが数多く設置されており、これらによる生息地間の分断化は、将来の生息適地への個体の移動を妨げることで温暖化に伴う流域内での種や個体群の絶滅リスクを増大させている可能性が高いと言えるでしょう。

従来山地河川での温暖化に関する研究では、低標高から冷涼な高標高域への冷水性魚類の分布変化のみに焦点が当てられていました。しかし今回の研究は、地質が水温の空間的なばら

つきを生んでおり、流域内でも特に火成岩河川が温暖化時の冷水性魚類のRefugiaとして機能する可能性があることがわかりました。このことから、温暖化下での効果的な河川ネットワーク管理を行うためには、標高だけでなく地質の違いに着目することが重要だと言えるでしょう。具体的には、生息地として不適になる可能性が高い火成岩以外の河川からRefugiaとなる火成岩河川への個体の移動を再生することが望ましく、堤体への魚道設置や堤体自体の切り下げがその手法の例になります（図-6；石山ら2017；速水ら2021）。観測した地域の中でも夏季降水量が少なく気温が低い北海道は特に火成岩による冷却効果が高かったことから、こうした河川管理が有効かもしれません。

尚、本原稿はIshiyama et al. (2023a)に掲載された内容を要約したものです。詳細については、論文を併せて参照ください。また、Ishiyama et al. (2023b)では調査地や調査風景の様子を写した写真が掲載されておりますので、併せてご覧頂けると幸いです。



図-6 魚道の設置 (a)、堤体の切り下げ (b) による治山ダムの改良事例
速水ら (2021) の図を改変。

謝辞

本研究は、科研費18K18221, 19H04314, 22H03796, 国土交通省・河川技術研究開発制度（石狩・十勝川）および環境省・環境研究総合推進費（JPMEERF20202004）の助成を受けて行いました。各図は出版社の許可を得て改変・引用しています。

（森林環境部機能グループ）

引用文献

- 速水将人・石山信雄・水本寛基・神戸崇・下田和孝・三坂尚行・ト部浩一・長坂晶子・長坂有・小野理 (2021) 北海道の溪流魚を対象とした治山ダムの改良効果の検証：長期モニタリングによる検証と環境 DNA の活用可能性. 応用生態工学 24:61-73
- 石山信雄・永山滋也・岩瀬晴夫・赤坂卓美・中村太士 (2017) 河川生態系における水域ネットワーク再生手法の整理：日本における現状と課題. 応用生態工学 19:143-164
- Ishiyama N, Sueyoshi M, García Molinos J, Iwasaki K, Negishi JN, Koizumi I, Nagayama S, Nagasaka A, Nagasaka Y, Nakamura F (2023a) Underlying geology and climate interactively shape climate change refugia in mountain streams. *Ecological Monographs*, 93:e1566
- Ishiyama N, Sueyoshi M, Molinos García Jorge, Iwasaki K, Negishi JN, Koizumi I, Nagayama S, Nagasaka A, Nagasaka Yu, Nakamura F (2023b) Geology-climate interactions are key determinants of climate-change refugia in Japanese mountain streams. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 104:e02062
- Matthews HD, Wynes S (2022) Current Global Efforts are Insufficient to Limit Warming to 1.5°C. *Science*, 376:1404-9
- Morelli TL, Daly C, Dobrowski SZ, Dulen DM, Ebersole JL, Jackson ST, Lundquist JD,

Millar CI, Maher SP, Monahan WB (2016) Managing Climate Change Refugia for Climate Adaptation. PLoS One, 11:e0159909

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

Suzuki K, Ishiyama N, Koizumi I, Nakamura F (2021) Combined Effects of Summer Water Temperature and Current Velocity on the Distribution of a Cold-Water-Adapted Sculpin (*Cottus nozawae*). Water, 13:975

Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BF, De Siqueira MF, Grainger A, Hannah L (2004) Extinction Risk from Climate Change. Nature, 427:145-148