

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：80122

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18221

研究課題名（和文）温暖化に対する河川生態系の頑強性評価：微気象と連結性を考慮した適応策の構築

研究課題名（英文）Role of geology in creating climate-change refugia in stream ecosystems

研究代表者

石山 信雄（Ishiyama, Nobuo）

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・森林研究本部 林業試験場・研究主任

研究者番号：50780821

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地質（流域の火山岩率）と気候、およびそれらの相互作用が山地河川の夏季水温を形成する主要因であることを示した。現在と将来の好適な生息地間の連結性の保全・再生し、種・個体群の存続をサポートすることは重要な適応策の一つである。本研究成果は、より生物多様性保全に対する効果の高い河川ネットワーク管理を実現するには、気候変動下での冷水性種にとっての生息適地が高標高域だけでなく、地質と気候条件によってより複雑に流域内にパッチ上に形成され得ることを認識し、それら要因と堰堤分布を考慮しつつ Climate Change Refugiaの特定とそれに基づく再生箇所の選定を行っていく必要があることを強調している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、温暖化下での冷水性種の生息適地の把握において、冷たい地下水の涵養量と関連する流域地質が重要であること、またその重要度が気候条件（降水量、気温）によって変化することを定量的に示した初めての研究である。日本の河川上流域には数十万基に及ぶ治山ダムがあるとされ、生息地の分断化を引き起こしてきた。しかし、老朽化や管理費の問題から維持できなくなるダムも今後増す可能性があり、こうした状況は、河川ネットワークの再生上は好機とも言える。本研究成果は、こうした今後の河川ネットワーク再生の際に、流域地質や気候を考慮して将来の生息適地を把握することで、より効果的な生物多様性保全が行えることを示している。

研究成果の概要（英文）：Using statistical models, we explored the relationship between watershed geology and the mean summer water temperature of mountain streams along climate gradients in the Japanese archipelago. Summer water temperature was explained by the interaction between the watershed geology and climate in addition to independent effects. The cooling effect associated with volcanic rocks was more pronounced in streams with less summer precipitation or lower air temperatures. Scenario analyses revealed a geology-related pattern of thermal habitat loss for cold-water species. Non-volcanic streams rapidly declined in thermally suitable habitats for lotic sculpins even under the lowest emission scenario (RCP 2.6). In contrast, most volcanic streams will be sustained below the thermal threshold. Our findings highlight that watershed geology, climate variability, and their interaction should be considered simultaneously for effective management of climate-change refugia in mountain streams.

研究分野：流域管理学

キーワード：温暖化 河川 生物多様性 気候変動 地質

## 1. 研究開始当初の背景

Climate Change Refugia は、大気候の変化の影響を受けづらい特異な微気象を有するエリアを指し、気候変動下における個体群の存続、また不適な生息環境から生息適地への分散サポート等、生物多様性保全上で重要な役割を担うとされている。近年、陸域生態系では Climate Change Refugia の重要性が認識されはじめており、標高、土地利用等を考慮し粗い空間解像度の気温予測シナリオをダウンスケーリングすることで、多様な空間スケールの気温の空間的異質性を評価・予測する試みが始まっている。

一方、水域での Climate Change Refugia 予測では、陸域とは異なるプロセスも考慮する必要がある。特に本研究が着目するのが“地下水（湧水）”である。河川水は、地表近くを短期間に流れる表流水と、長い期間をかけて地層等を介してくる地下水によって主に構成される。特にこの地下水は、外気の影響を受けづらく年間を通じて低い温度を示すため、温暖化に伴う河川水温上昇を抑制する可能性が近年指摘されている。これはつまり、地下水の考慮不足が Climate Change Refugia を含む将来の生息適地の誤推定につながる可能性を示唆している（図1）。

気候変動への生態系の頑強性を高めるには、影響予測に加え、影響を最小化する適応策を事前に実施していく必要がある。分断化が進行する淡水生態系において、長期的な生物多様性維持に欠かせないのが“連結性の再生”である。今後より効果的な温暖化適応策の立案のためには、前述した地下水を考慮した流域内でのより正確な Climate Change Refugia の分布と堰堤を考慮した連結再生箇所を優先順位付けが必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、河川生態系での効果的な温暖化適応策の発展を目指し、以下を目的とした。

地質構造に着目し、地下水を考慮した夏季水温の予測手法を明らかにする。

で作成した水温予測モデルを用い、地質間での現在および将来の夏季水温の違い、それにもとづく冷水性魚類の生息適地の変化の違い、を明らかにする。

上記の結果から、「地下水の影響を考慮した冷水性魚類の生息適地」と「流域内の堰堤分布」に基づく河川ネットワーク再生の重要性を提示する。尚、については Suzuki et al. (2021)を、については Ishiyama et al. (2022)を詳しくは参照頂きたい。

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(7), 975.

Ishiyama, N., Sueyoshi, M., Molinos, J. G., Iwasaki, K., Negishi, J. N., Koizumi, I., ... & Nakamura, F. (2022). The role of geology in creating stream climate-change refugia along climate gradients. *bioRxiv*.

## 3. 研究の方法

地下水流入に着目した夏季水温の予測

調査地

北海道のオホーツク、空知、渡島、および本州の関東、中部の計5地域の森林河川で2018～2021年に水温および気温の観測を行った。尚、調査地に設定した河川は、流域の大部分が森林に覆われており人間活動の影響を極力排除するように選定した（流域森林率 > 80%、流域面積 < 100 km<sup>2</sup>）。各地域での調査河川数はそれぞれ、22、44、11、27、30である。観測時期は7～8

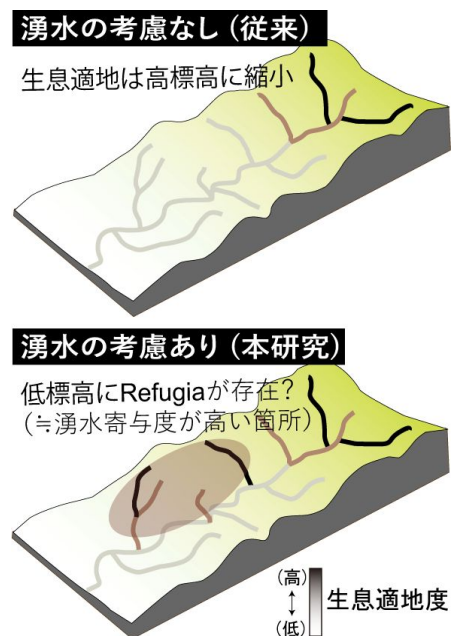


図1 本研究が目指す温暖化影響予測

月とし、ロガーを用いて1時間単位で温度を記録した。回収した水温・気温データから各年の夏季平均水温と平均気温を算出した。

#### 環境要因の算出

我が国は世界有数の火山大国であり、狭い国土に世界の活火山の約7%があるとされている。湧水保全・復活ガイドライン(環境省2010)では、湧水は地形地質の特性に応じて分類することができ、火山活動が湧水分布に強く関係することが報告されている(火山タイプ:溶岩流の積層や岩盤の割れ目を通る裂か水や被圧地下水が湧き出るタイプ)。そこで本研究では、火山活動により形成される地質構造が地下水分布の代替指標となり得ると考えた。流域の火山岩率が多い程地下水涵養量が豊富だと仮定し、流域地質(火山岩率:%)を夏季水温予測モデルに説明変数として用いた。他の要因として、既往文献を参考に農地率(%),流域面積(km<sup>2</sup>),河川勾配(%),標高(m),夏季平均気温( ),夏季総降水量(mm)を用いた。さらに、地下水流入の影響が水温に与える影響力が気候条件によって異なるか検証するため、地質×気温、地質×降水量の交互作用項も解析に用いた。尚、流域内の地質割合の算出には、シームレス地質図V2(産業技術総合研究所地質調査総合センター)を使用した。他の変数の算出には、ArcGIS Pro( Esri, version 2.4.0)およびR(R Development Core Team, version 4.1.1)を用いた。

#### 統計解析

複数年観測を行っている時間的な反復、さらに同一流域で複数の河川を対象とする空間的な反復を考慮し、河川/流域のネストしたランダム要因を採用したGLMM(一般化線形混合モデル、誤差構造=正規分布)による解析を行った。解析単位は、各夏データである。流失や機器故障などでの欠損値が多いデータ(計10日以上欠損)は解析から除外し、結果として140の河川から290の夏データを得た。目的変数は夏季平均水温とした。説明変数は流域火山岩率(%),流域農地率(%),流域面積(km<sup>2</sup>),河川勾配(%),標高(m),夏季平均気温( ),夏季総降水量(mm),地質×気温、地質×降水量の計9つである。AICcを基準として、総当たり法でモデル選択を行い、全てのモデルの中で最もAICが小さいモデルをベストモデルとした。但し、ベストモデルと拮抗するAICc<2以下のモデルが複数存在する場合は、それらをモデル平均し、各変数の係数の推定値の95%信頼区間が0を含むか否かでその影響の有無を判断した。

#### 地質間での夏季水温およびハナカジカの生息適地の変化の違い

##### 調査地

気象庁の報告書においても、北日本は今後より顕著な温暖化影響が予測されている。そこで本研究では、流域地質のClimate Change Refugia形成上の重要性を検証するにあたり、北海道の観測河川を解析対象とした。

#### ハナカジカの温度閾値の算出

北海道における冷水性魚類の代表的な種として、ハナカジカ *Cottus nozawae* を対象とした。北海道の空知、千歳、十勝の3地域で得た本種の在・不在データを解析に用いた。各地域の採集年は2018、2011および2012年である。調査河川数は計40である(空知:20、千歳:10、十勝:20)。電気ショッカーにより下流から上流にかけて各河川に設定した調査プロットで1回採捕を行った。得た在・不在データを目的変数、夏季平均水温( )を説明変数としたGLM(一般化線形モデル、誤差構造=二項分布)により、温度閾値の解析を行った。さらに、他の環境要因の影響も考慮して、河川勾配(%),流域面積(km<sup>2</sup>),流域農地率(%),調査プロット面積(m<sup>2</sup>)も説明変数として採用した。AICを基準として、総当たり法でモデル選択を行い、全てのモデルの中で最もAICが小さいモデルをベストモデルとした。但し、ベストモデルと拮抗するAIC<2以下のモデルが複数存在する場合は、それらをモデル平均し、各変数の係数の推定値の95%信頼区間が0を含むか否かでその影響の有無を判断した。

#### 夏季水温の将来予測

目的 で作成した夏季平均水温の予測モデルを用い、現在および将来の夏季水温を地質タイプごと(火山岩 vs 非火山岩)に予測した。気候モデルには、MIROC5、MPI-ESM-MR、CESM1-CAM5、IPSL-CM5A-MR、MRI-CGCM3の計5つを用い、3段階のRCP(2.6、4.5、8.5)について予測を行った。各気候モデルの将来気候値(夏季気温、降水量)は、CHELSA(<https://chelsa-climate.org/>)より取得し、2041-2060年、2061-2080年の2時期について夏季平均水温の予測を行った。予測した現在および将来の夏季平均水温と上記のモデルで得たハナカジカの生息可能な夏季の温度閾値を比較し、気候変動下での本種の生息適地の割合の消失度が地質間でどのように異なるかを検証した。

## 4. 研究成果

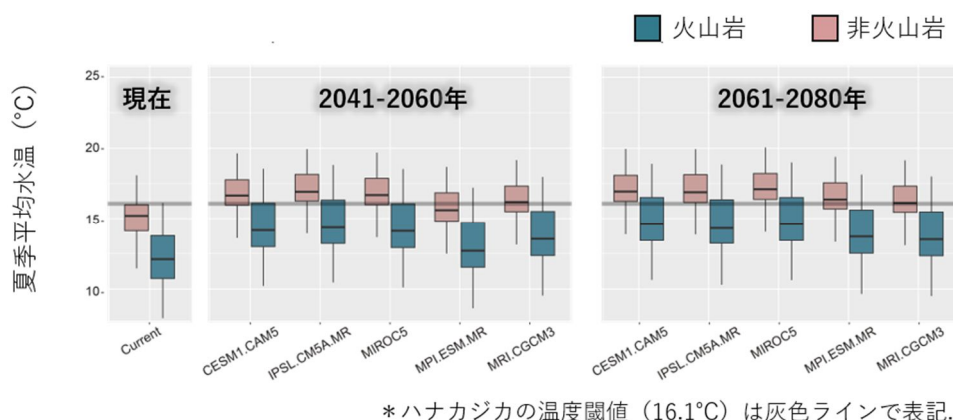
### 地下水流入に着目した夏季水温の予測

観測した夏季平均水温、夏季平均気温、夏季総降水量のレンジは、7.7-22.2、16.2-25.2、76-1,910mmであった。夏季平均気温を予測したモデルのR<sup>2</sup>およびRMSEは0.62と0.36で

あり、中部から北海道にかけての広範囲の山地河川において夏季平均水温を精度良く予測することが可能となった。最終モデルで選択された説明変数は、夏季平均気温(+)、流域火山岩率(-)、流域火山岩率×夏季総降水量(+)、夏季総降水量(-)、標高(-)、流域農地率(+)、流域火山岩率×夏季平均気温(+ )であった。各変数の標準化回帰係数は、0.472、-0.317、0.161、-0.149、-0.143、0.124、0.059である。影響力の高い上位3つの変数は夏季平均気温、流域火山岩率、流域火山岩率×夏季総降水量であり、夏季平均水温は、夏季平均気温が低くなるほど、また流域の火山岩率が高くなる程、低くなった。また、火山岩(地下水流入)による河川水温の冷却効果は、夏季総降水量が増すにつれて弱くなることが明らかとなった。尚、影響力は強くないものの流域火山岩率×夏季平均気温の交互作用も選ばれており、火山岩による水温の冷却効果は、夏季平均気温が高くなるにつれて弱くなるも示された。これらの結果は、山地溪流の夏季水温を把握・予測する上で、地下水の冷却効果を考慮することが重要であること、その指標として流域地質が利用可能であること、さらに、その際に気候条件による影響度の違い(交互作用)を考慮することで、より正確な予測ができることを示している。

#### 地質間での夏季水温およびハナカジカの生息適地の変化の違い

調査した北海道内の50河川の内、37河川においてハナカジカの生息が確認された。本種の在・不在をモデリングした結果、夏季平均水温のみが有意な影響として選ばれた。最終モデルのR<sup>2</sup>およびAUCは0.45、0.89と比較的精度良く予測できたといえる。得た生息確率と夏季平均水温の関係式から本種の生息確率0.5以上を保証する温度閾値は16.1と推定された。各気候モデルの将来気候値に基づき地質間での夏季平均水温の変化の違いを検証したところ、両地質とも現在から将来にかけて水温は上昇するものの、火山岩流域についてはその多くがハナカジカの温度閾値である16.1以下に維持されることが予測された(図2:RCP4.5の例)。尚、どの気候モデルを用いてもその傾向は一貫していた。これらの結果は、複雑に地質が入り混じる我が国の山地域の中でも、特に火山岩が卓越する河川において本種の生息適地の持続性が高く、温暖下においてClimate Change Refugiaとして機能しうることを示している。



\*ハナカジカの温度閾値(16.1°C)は灰色ラインで表記。

図2 北海道における地質毎と夏季平均水温の変化傾向とハナカジカの生息適地との関係(RCP4.5の例)。

#### 効果的な気候変動下での河川ネットワーク再生に向けて

上流への河川生物の分布域のシフトは、河川生態系における温暖化ストレスの増加に対する主要な生物応答であり、これまでに多くの研究がこの標高由来のClimate Change Refugiaの重要性を指摘してきた。本研究においても、夏季平均水温と標高には負の相関があったことから、従来のClimate Change Refugiaの重要性も支持している。さらに本研究では、地下景観(地質)と気候、およびそれらの相互作用が地球温暖化下において河川ネットワーク内のClimate Change Refugiaを形成する主要因であることを示した。地球温暖化と生息地の分断が淡水生態系に与える影響を考えると、現在と将来の好適な生息地間の連結性の保全・再生し、種・個体群の存続をサポートすることは重要な適応策の一つである。特に本研究成果は、気候変動下での河川ネットワーク再生において、流域地質を考慮することの重要性を示唆している。気候変動にさらされる山地河川において、より生物多様性保全に対する効果の高い連結性管理を実現するには、冷水性種にとっての生息適地が高標高域だけでなく、地質と気候条件によってより複雑に流域内にパッチ上に形成され得ることを認識し、それら要因と堰堤分布を考慮しつつClimate Change Refugiaの特定とそれに基づく再生箇所を選定を行っていく必要があるだろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suzuki K, Ishiyama N, Koizumi I, Nakamura F.	4. 巻 13
2. 論文標題 Combined Effects of Summer Water Temperature and Current Velocity on the Distribution of a Cold-Water-Adapted Sculpin ( <i>Cottus nozawae</i> )	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 975-985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13070975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawajiri K, Ishiyama N, Miura K, Terui A, Sueyoshi M, Nakamura F.	4. 巻 13
2. 論文標題 The Relative Effects of Biotic and Abiotic Factors on the Recruitment of Freshwater Mussels ( <i>Margaritifera laevis</i> )	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1289-1299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13091289	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishiyama Nobuo, Sueyoshi Masanao, Jorge Garc?a Molinos, Iwasaki Kenta, Negishi N Junjiro, Koizumi Itsuro, Nagayama Shigeya, Nagasaka Akiko, Nagasaka Yu, Nakamura Futoshi	4. 巻 non
2. 論文標題 The role of geology in creating stream climate-change refugia along climate gradients	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 biorxiv	6. 最初と最後の頁 non
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2022.05.02.490355	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石山信雄、中田康隆、末吉正尚	4. 巻 11月
2. 論文標題 気候変動下での河川ネットワーク管理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 河川	6. 最初と最後の頁 non
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HAYAMIZU Masato, ISHIYAMA Nobuo, MIZUMOTO Hiroki, KANBE Takashi, SHIMODA Kazutaka, MISAKA Naoyuki, URABE Hirokazu, NAGASAKA Akiko, NAGASAKA Yu, ONO Satoru, ARAKI Hitoshi, NAKAJIMA Nobuyoshi, FUKUSHIMA Michio	4. 巻 24
2. 論文標題 Effectiveness of check-dam improvement on freshwater fishes: assessment based on long-term monitoring and environmental DNA applicability.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ecology and Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 61~73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3825/ece.20-00043	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石山信雄、末吉正尚、Jorge Garcia MOLINOS、鈴木開士、小泉逸郎、中村太士
2. 発表標題 流域地質が冷水性種のClimate-change refugia形成に果たす役割
3. 学会等名 日本生態学会第68回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石山信雄・鈴木開士・小泉逸郎・中村太士
2. 発表標題 流域地質が河川上流域の水温および冷水性魚類の分布・生活史に与える影響
3. 学会等名 第 27回応用生態工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石山信雄・鈴木開士・末吉正尚・小泉逸郎・中村太士
2. 発表標題 森林溪流の水温レジームと魚類分布：流域地質が果たす役割
3. 学会等名 第68 回北方森林学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	末吉 正尚  (Sueyoshi Masanao)		
研究協力者	モリノス ガルシア ホルヘ  (Molinos G Jorge)		
研究協力者	中村 太士  (Nakamura Futoshi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------