

5. 1-5 気候変動によるサクラマスの越夏環境に与える影響調査

5.1. 概要

山形県の県魚であるサクラマスは冷水性魚類の一種であり、春に河川遡上後、流れの穏やかな「淵」で夏を過ごす（越夏）という特徴を持つ。将来的には、気温上昇に伴う河川水温の上昇が予想されることから、水温をはじめとするサクラマスの越夏環境に影響を与えることが懸念される。本調査では、山形県の二級河川である五十川を対象に、気候変動が進行した場合における将来水温の予測、及び越夏環境への影響予測を実施した。

影響予測の結果、21世紀末の五十川では、特に下流域においてサクラマスが選好しないと考えられる水温（25°C）を超える日が増加し、河口付近ではその日数が現在の約5倍に増加することが予測された。このことから、下流域を中心に越夏適地が縮小するものの、上流域においては将来も越夏適地が残存することが予測された。

5.1.1. 背景・目的

気候変動による影響のひとつに、気温上昇に伴う河川の高水温化が挙げられる。温度はあらゆる生物の生育・生息の制限要因として働くが、中でも高水温に弱い冷水性魚類はその影響を最も受けやすいと考えられる（内藤他, 2012）。冷水性サケ科魚類の一種であるサクラマス (*Oncorhynchus masou*) は日本海、オホーツク海、及び北西太平洋に分布する貴重な漁業資源であり、山形県では県魚に制定されている。サクラマスは、3年の寿命のうち約2年を河川で過ごすため、シロザケ等を含む他の遡河性回遊魚よりも河川に依存する期間が長期に及ぶ。また、成魚は春ごろから河川に遡上し、産卵期を待つ夏の間、水深が深く流れの穏やかな「淵」と呼ばれる場所において夏を越す（以下、越夏）という生態的特徴を有する。これらのことから、河川環境の変化の中でも、水温上昇がサクラマスの生態系に大きな影響を与えることが予想される。

本調査では、サクラマスが遡上する河川のひとつで、山形県の二級河川である五十川（流路延長：27.6km（山形県国土整備部, 2017））を対象に、気候変動が進行した場合の五十川における将来水温の予測及びサクラマスの越夏環境への影響予測を実施する。また、本影響予測の結果から、将来の五十川において優先的に保全・造成すべき淵の形態を特定する等、サクラマスの越夏環境の保全に繋がる適応策の検討を行った。

5.1.2. 実施体制

本調査の実施者：山形県内水面水産試験場、日本エヌ・ユー・エス株式会社

アドバイザー：山形大学 教授 半澤 直人、室蘭工業大学 教授 中津川 誠

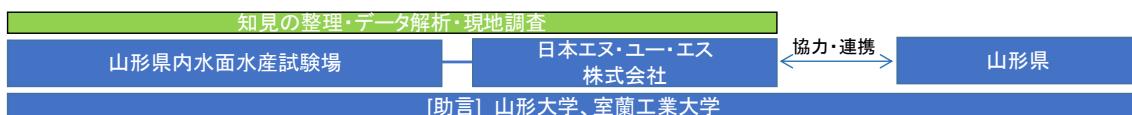


図 5-1 本調査の実施体制図

5.1.3. 実施スケジュール（実績）

2ヶ年の実施スケジュールを図 5-2 に示す。

平成 30 年度は、サクラマスの越夏環境に関する情報収集、及び高水温化を含む河川環境の変化がサクラマスに与える影響について文献調査を行った。また、五十川の将来水温の予測に向け、河川水温予測手法の検討及び予測に必要な水温データ等を現地において測定する（以下、定点観測）とともに、サクラマスの越夏環境に関するデータを収集するための野外調査（以下、生息環境調査）を行った（図 5-2）。

平成 31 年度においても、平成 30 年度に引き続き定点観測及び生息環境調査を実施し、定点観測によって取得した夏季の水温データ及びアメダス（肘折地点）で観測されている気温データを用いて、21 世紀末における五十川の水温予測を実施し、気候変動がサクラマスの越夏環境に与える影響を調査した。また、影響評価の結果及び生息環境調査の結果を併せて検討し、サクラマスの越夏環境の保全につながる適応策の検討を行った（図 5-2）。

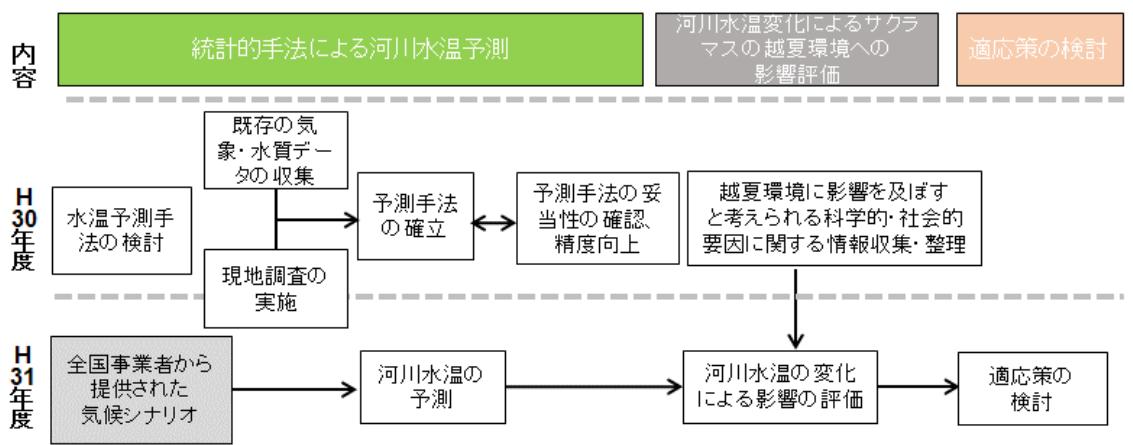


図 5-2 調査実施スケジュール

5.1.4. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 5-1 のとおりである。

表 5-1 気候シナリオ基本情報

項目	五十川の将来水温予測
気候シナリオ名	気象研究所 2 km 力学的 DS データ by 創生プログラム
気候モデル	MRI-NHRCM02
気候パラメータ	日最高気温
排出シナリオ	RCP8.5
予測期間	21 世紀末
バイアス補正の有無	あり（地域）

5.1.5. 気候変動影響予測結果の概要

文献調査の結果、以下のことが分かった。

- ・ サクラマスの遡上期における適水温域は 5.5~20°C であり、おおよそ 25°C でより冷涼な上流側に移動する習性があることが判明した。また、サクラマスは遡上時に淵やワンドを利用しており、その中でも、大型の岩石で形成される隠れ穴や、ブロック等の水中カバーがあり、水深が深く、流速が小さい淵を好むことが判明した。
- ・ 人工構造物や河川の直線化等によりサクラマスの生態や分布に影響があること、また、サクラマスの遡上には、溪畔林によるカバーや照度、流量、流速等が影響することが判明した。

ヒアリングの結果、以下のことが分かった。

- ・ 河川水温の変化には、気温だけでなく、水位・流量等の要因が複合的に関連していることが判明した。
- ・ 影響評価に日最高気温を用いるのであれば、バイアス補正には、極値統計を用いることが適当であることが判明した。

影響評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ 21 世紀末の五十川では、特に下流域においてサクラマスが選好しないと考えられる水温 (25°C) を超える日が増加し、河口付近ではその日数が現在の約 5 倍に増加することが予測された。このことから、下流域を中心に越夏適地が縮小するものの、上流域においては将来も越夏適地が残存することが予測された。

5.1.5.1. 五十川の将来水温の予測

平成 30 年度及び平成 31 年度の夏季（7 月から 9 月）、五十川において取得した水温データ（図 5-3）及びアメダス（肘折地点）にて観測されている気温データを用いて日最高水温予測式を作成し、日最高水温予測式と 21 世紀末における日最高気温を用いて 21 世紀末における五十川の日最高水温を予測した（図 5-4）。本予測結果から、定点観測地点①、②、⑥では、サクラマスが選好しないと考えられる水温 (25°C) を超える日が増加し、地点①ではその日数が現在の約 5 倍に増加することが予測された（図 5-5）。また、いずれの地点においても、遡上時における適水温の上限 (20°C) を超える日数が現在の 2~3 倍に増加することが予測された（図 5-5）。これらの結果から、21 世紀末の五十川では、下流域を中心に越夏適地が縮小するものの、上流域においては将来も越夏適地が残存することが予想される。



図 5-3 五十川における定点観測地点図

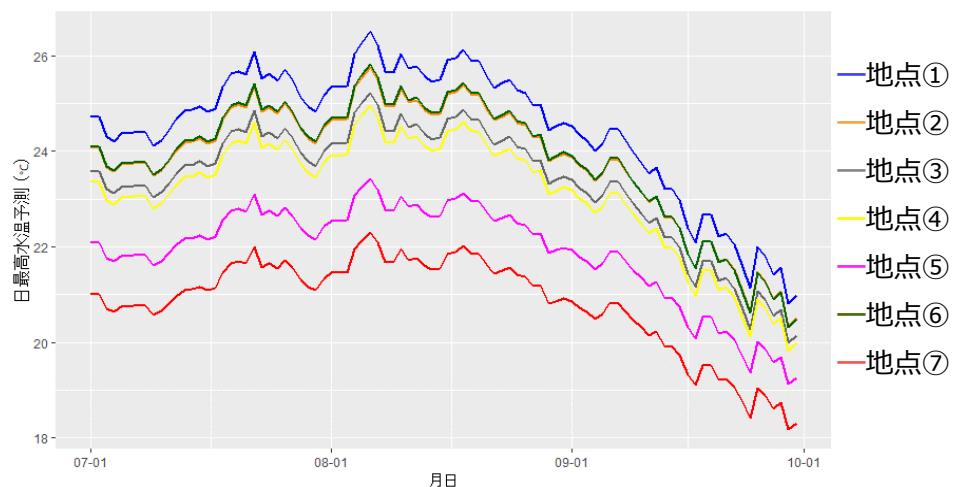


図 5-4 各定点観測地点における 21 世紀末の日最高水温の予測結果（気候モデル：MRI-NHRCM02、RCP8.5）

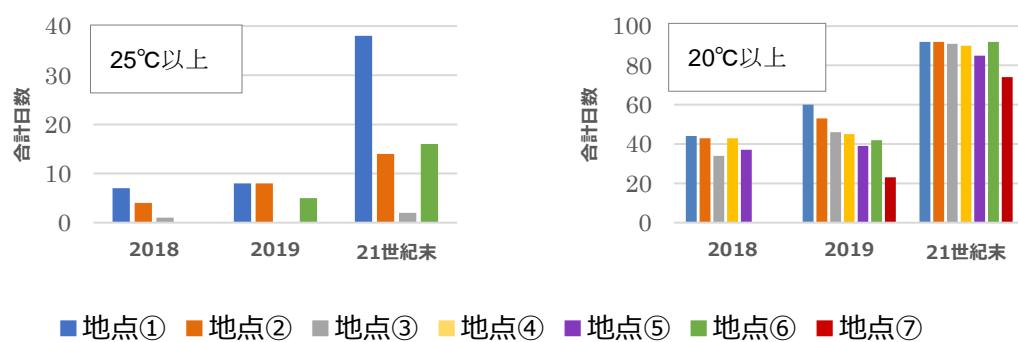


図 5-5 21 世紀末の夏季（7～9 月）における水温別の出現頻度（気候モデル：MRI-NHRCM02、RCP8.5）

5.1.6. 活用上の留意点

本調査では五十川のみを対象に将来水温の予測式を導出しているため、手法や考え方を他の河川に応用することは可能であるが、予測式自体を他の河川にあてはめることはできない。他の河川への応用を検討する際には、対象とする河川のデータを用いて予測式を導出し、予測を行う必要がある。また、本調査で行った将来予測は20年平均の結果であるため、経年的な影響予測を行っていない点にも留意する必要がある。

5.1.6.1. 本調査の将来予測対象とした事項

本調査では、気候変動に伴う河川水温の変化が、サクラマスの越夏環境に与える影響を調査の対象とした。調査は、山形県の二級河川である五十川を対象とし、影響予測を実施した。

5.1.6.2. 本調査の将来予測の対象外とした事項

河川水温の変化には、下記の要素が影響すると考えられるが、本調査において気候変動影響予測を実施するに当たり、これらの影響は考慮していないことに留意が必要である。

- ・ 水位の変化による影響
- ・ 流量の変化による影響
- ・ 降水量の変化による影響
- ・ 日射量の変化による影響

5.1.6.3. その他、成果を活用するまでの制限事項

本調査では、定点観測地点①から⑦における将来水温の予測を行ったが、地点⑥及び⑦については、単年度分（平成31年度）のデータのみを用いた結果であることに加え、水温上昇と五十川に遡上するサクラマスの個体数や遡上距離の関係は検討していない点に留意する必要がある。

5.1.7. 適応オプション

本調査において検討した適応オプション及びその考え方を表5-2～表5-3に示す。

表 5-2 適応オプションの概要

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業 者	個 人	現状		実現可能性				効果	
				普及状 況	課題	人 的 側 面	物 的 側 面	コス ト面	情 報 面	効果 発現 まで の時 間	期待 され る効 果の 程度
五十川において サクラマスの親 魚が確認された 淵の保全	●	●	●	—	継続的な調査や普 及啓発が必要	△	◎	◎	△	N/A	—
サクラマスが選 好する淵の整備	●	●			他セクターとの合 意形成が不可欠	△	○	△	◎	短期	高
堰堤等のスリッ ト化及び魚道の 設置	●	●		—	他セクターとの合 意形成が不可欠	△	○	△	◎	短期	高
五十川における 菅野代頭首工水 制門を利用した 流量調節	●			—	他セクターとの合 意形成に加え、水 位・流量等の影響 を考慮する必要が ある	△	○	N/A	△	N/A	—
貯水池・ダム等か らの冷水放流	●	●		—	他セクターとの合 意形成に加え、他 の生物への影響も 考慮する必要があ る	△	○	△	◎	短期	—
源流部や河川周 辺部の溪畔林、湿 地の維持・造成	●			—	他セクターとの合 意形成が不可欠	△	△	△	◎	N/A	—
陸上養殖施設に による親魚の保護	●			—	施設整備や飼育等 にコストがかかる	△	△	△	◎	N/A	—

表 5-3 適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
五十川においてサクラマスの親魚が確認された淵の保全	<ul style="list-style-type: none"> サクラマスの休息場所等として機能する淵を確保することで、こうす音化による体力消耗を軽減し、将来も越夏適地が残存する上流域への遡上を促すことができる。
サクラマスが選好する淵の整備	<ul style="list-style-type: none"> 本調査において特定した越夏適地の条件を備えた淵を整備することで、一時的な休息場所等を確保でき、高水温化による体力消耗の低減が期待できる。 既存の研究により、人為的な淵の造成による効果が示されている。
堰堤等のスリット化及び魚道の設置	<ul style="list-style-type: none"> 山形県内で砂防ダムのスリット化が行われた実績があり、サクラマスの遡上範囲の拡大に寄与することが示されている。 ダムの満砂や重機を用いた浚渫作業の労力・コスト軽減も期待できる。
五十川における菅野代頭首工水制門を利用した流量調節	<ul style="list-style-type: none"> 本調査の簡易的な解析結果から、五十川河口の日最低水位が 10 cm 上昇すると、定点観測地点①から⑤における日最高水温が 0.4 から 0.7°C 低下することが示唆された。
貯水池・ダム等からの冷水放流	<ul style="list-style-type: none"> 既存の研究では、発電所からの放水水温に変化がないとの仮定の下では、サクラマスの生息に適する水温が保持されることが示唆されている。
源流部や河川周辺部の溪畔林、湿地の維持・造成	<ul style="list-style-type: none"> 既存の研究では、植生の違いや、草地区間の長さ等により平均水温等が異なることが示されているが、河川ごとにその条件が異なるため、効果の予測は難しい。
陸上養殖施設による親魚の保護	<ul style="list-style-type: none"> 試験飼育等の事例はあるが、コストの増大、魚病等の被害も懸念される。

5.2. 気候シナリオに関する情報

5.2.1. 気候シナリオ基本情報

本調査で使用した気候シナリオの基本情報は、表 5-4 のとおりである。

表 5-4 気候シナリオの基本情報

項目	五十川の将来水温予測
気候シナリオ名	気象研究所 2 km力学的 DS データ by 創生プログラム
気候モデル	MRI-NHRCM02
気候パラメータ	日最高気温
排出シナリオ	RCP8.5
予測期間	21 世紀末
バイアス補正の有無	あり (地域)

5.2.2. 使用した気候パラメータに関する情報

本調査では、気候モデル (MRI-NHRCM02) を採用し、排出シナリオ RCP8.5 の日最高気温を気候パラメータとして用いた (表 5-1)。この気候パラメータにおける、時折アメダス近傍の 21 世紀末の日最高気温と、現在の比較を図 5-6 に示す。21 世紀末の日最高気温は、現在と比較して、約 2~3°C 上昇するとされている。

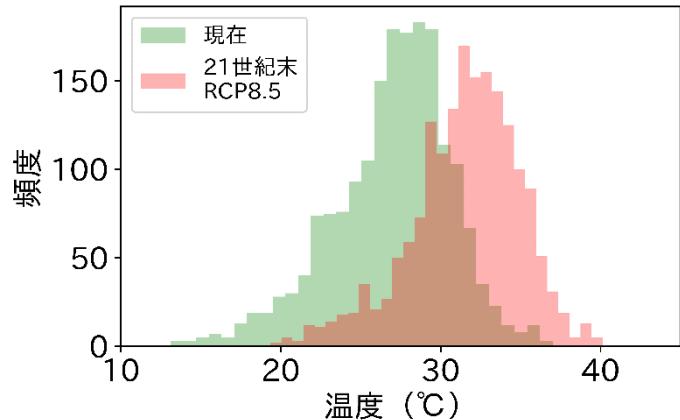


図 5-6 現在及び 21 世紀末の日最高気温値の比較 (気候モデル : MRI-NHRCM02)

5.2.3. 気候シナリオに関する留意事項

本調査は、山形県五十川付近を対象に、日最高水温を指標として予測を行ったため、対象地域の解像度が高い力学的ダウンスケーリング (DS) を行った気候シナリオである MRI-NHRCM02 を用いた。広域で本気候シナリオを用いる際には、上記気候シナリオの特性に留意する必要がある。

5.2.4. バイアス補正に関する情報

未補正の気候シナリオ (MRI-NHRCM02) と観測データの現在を比較した結果、MRI-NHRCM02 では、7~9 月の日最高気温は 20°C 付近を中心に分布しており、観測値と比較すると全体的に低い傾向が確認された (図 5-7)。

バイアス補正として、1980 年から 1999 年の 7 月から 9 月のアメダス (肘折地点) にて測定された日最高気温 (y) を、同期間の MRI-NHRCM02 の肘折アメダス付近の日最高気温 (x) から導出する補正式を作成した。評価指標に日最高水温を用いたため、気温が高くなった際の分布がバイアス補正に反映されるよう、Piani ら (2010) の用いた補正後の分布の両端の分布が観測値に近く補正されることとした。

バイアス補正済み・未補正の気候シナリオ、及び観測値を比較した結果は、以下の図 5-7 に示すとおりである。バイアス補正済みの気温分布の両端は、観測値に近い値を示しており、平均二乗平方根誤差 (Mean Root Squared Error; RMSE) も、バイアス補正後は、より小さい値を示している (図 5-8、表 5-5)。

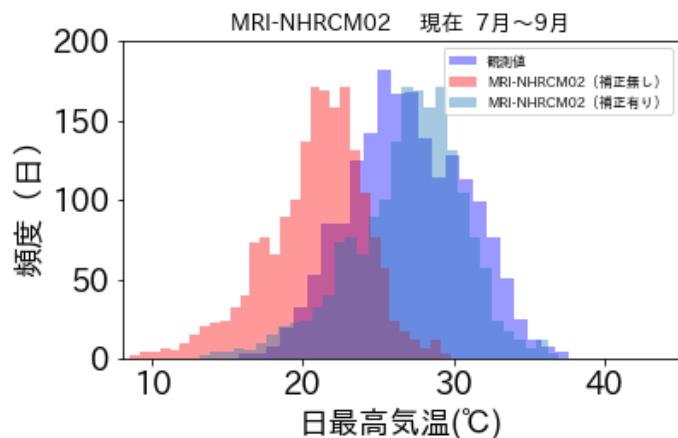


図 5-7 観測値及び気候モデルの現在 (補正有・無) の日最高気温の分布

表 5-5 バイアス補正前後の RMSE 値

観測値と気候モデル(補正前後)	補正前	補正後
RMSE 値(℃)	8.01	5.51

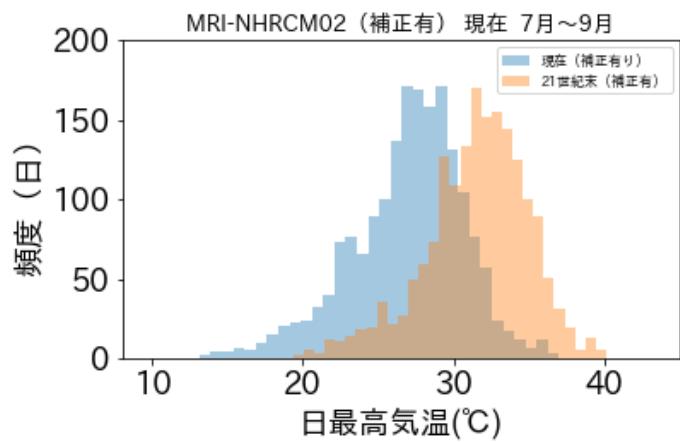


図 5-8 バイアス補正後の日最高気温の分布

5.2.5. 気候シナリオ選択の理由

本調査は、山形県五十川付近を対象としており、対象地域における解像度が高い力学的ダウンスケーリング (DS) を行った気候シナリオを選択した。

5.3. 気候変動影響に関する調査手法

5.3.1. 手順

調査手法は以下の図 5-9 に示すとおりである。

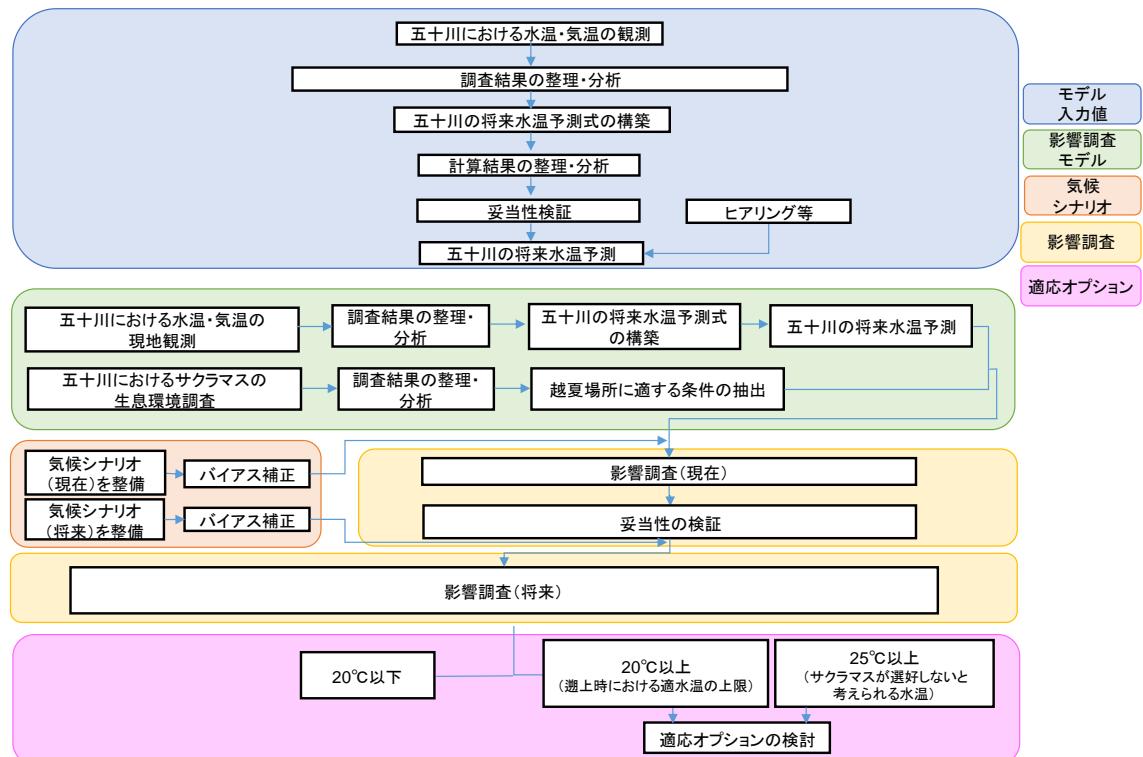


図 5-9 調査の作業フロー

5.3.2. 使用したデータ・文献

本調査において使用したデータ・文献は以下の表 5-6 及び表 5-7 に示すとおりである。そのほか、収集したデータや文献については収集データリスト及び参考文献リストを参照。

表 5-6 使用したデータの一覧

データ：アメダスデータ 取得元：気象庁ホームページ 「過去の気象のダウンロード」 https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsl/index.php データ概要：山形県 五十川周辺のアメダス（肘折、大井沢、鶴岡、鼠ヶ関、狩川、酒田）の日最高気温、日最低気温、日平均気温 対象期間：1981 年から 2001 年 7 月、8 月、9 月	データ：「五十川の水位観測所の水位観測データ」 取得元：山形県県土整備部河川課 データ概要：五十川（測定局所在地：鶴岡市五十川）における毎時の推移データ 対象期間：(2018 年 6 月 1 日から 2018 年 10 月 31 日、2019 年 6 月 1 日から 2019 年 10 月 1 日
---	--

表 5-7 使用した文献の一覧

可児藤吉（1944）渓流性昆虫の生態学, 可児藤吉全集, 思索社, 3-91
国土交通省 河川環境課（2013）河川における外来種対策の事例集 資料編, 171-173
水生生物生態資料（1980）社団法人日本水産資源保護協会, 23-25
宮内康行（2011）越夏環境の保全・改善及び造成技術の開発, 河川の適用利用による本州日本海域サクラマス資源管理技術の開発報告書, 独立行政法人水産総合研究センター さけますセンター, 33-54
Piani, C., Haerter, J. O. and Coppola, E. (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 99, 187-192

5.3.3. 有識者ヒアリング

有識者ヒアリングの概要を、表 5-8 に示す。

表 5-8 有識者ヒアリングの要旨一覧

NO.	1
ヒアリング対象者	山形大学 教授 半澤 直人氏
日付	2018年4月11日 14:30～15:30
場所	山形大学理学部 会議室
概要	河川環境への影響は、気候変動だけでなく社会的・人為的要因が複合的に関連しているため、このような要因も含めて調査を行い、予測結果に反映できれば良いとのご意見をいただいた。また、モデルを構築する場合には、水温だけでなく、土砂の流入、底質、泥の堆積等も考慮する必要があるとのご助言をいただいた。
NO.	2
ヒアリング対象者	山形県内水面水産試験場 副場長 荒木 康男氏 研究員 鈴木 悠斗氏
日付	2018年5月18日 14:00～15:30
場所	山形県内水面水産試験場 会議室
概要	五十川で調査を行う場合、上流の堰堤（サクラマスの遡上限界）よりも下流地点で観測地点を設置すべきであるとのご助言をいただいた。また、越夏環境への影響調査という観点では、隠れ穴の有無、その奥行きや隙間の広さ、照度、水質データであればSSや濁度が重要な指標であるとのご意見もいただいた。
NO.	3
ヒアリング対象者	山形大学 教授 半澤 直人氏
日付	2018年11月19日 13:00～14:30
場所	山形大学理学部 会議室
概要	平成30年度は、20年来ともいえる河川の高水温が確認され、一級河川においても干ばつが起こり、河川が分断される箇所も見られたとのことであった。五十川も同様に、例年よりも水温が高い状態であったと思われるため、データの扱いには注意が必要であるとのご助言をいただいた。
NO.	4
ヒアリング対象者	山形県内水面水産試験場 研究員 鈴木 悠斗氏
日付	2018年11月20日 10:00～11:30
場所	山形県内水面水産試験場 会議室
概要	サクラマスの越夏環境としての上限水温（25°C以上）について、文献調査の結果から、上限を25°Cとするのであれば問題ないこと、また、現場の感覚としても妥当な数字であるとの意見であった。ただし、サクラマスが1日中25°C以上の水温に曝されるのか、朝晩だけでも水温が低下するのかでその影響は異なるとのご指摘も受けた。

NO.	5
ヒアリング対象者	室蘭工業大学 教授 中津川 誠氏
日付	2019年1月30日 13:00～14:00
場所	TKP 札幌ビジネスセンター赤レンガ前 コスモス
概要	五十川の将来水温予測に、統計的手法を用いることは問題ないとのご意見であった。しかし、気候変動の影響は夏季には限らないため、生活史全体（通年）の脆弱性評価の実施も検討すべきとのご意見をいただいた。また、一定の水温を超過して直ちにサクラマスに影響があるとは考えにくいため、影響予測結果のまとめ方を工夫する必要があるとのご助言も受けた。
NO.	6
ヒアリング対象者	JAMSTEC 付加価値情報創生部門 情報エンジニアリングプログラム プログラム長 石川 洋一氏
日付	2020年8月30日 16:00～17:30
場所	日本エヌ・ユー・エス株式会社 会議室
概要	使用する気候モデルには、気温のピークを合わせるバイアス補正を行う必要があり、本調査の場合には力学的 DS データではなく、極値統計を用いたバイアス補正が適切であるとのご助言をいただいた。現地調査では、極端に高温であった年（平成 30 年度）とそうでない年のどちらのデータも取得でき、2 年間調査を継続したことに意義があったとのご意見もいただいた。
NO.	7
ヒアリング対象者	室蘭工業大学 教授 中津川 誠氏
日付	2019年11月12日 13:30～15:00
場所	室蘭工業大学 教授 中津川 誠氏
概要	気温は標高に大きく依存するため、検討した全てのアメダス地点と併せて気候モデルの標高も確認すること、また、検討した全アメダス地点で予測式を作成し、実測値との整合性を確認するべきであるとのご意見をいただいた。 地点⑥の水温予測値が高い点についても、考えうる要因を整理すべきであるとのご助言を受けた。

5.3.4. 観測及び実証実験

将来水温の予測に必要なデータを取得するため、五十川において水温及び気温の定点観測を行った（図 5-3）。使用機器や観測期間等は、表 5-9 のとおりである。水温計は、末端におもりをつけたロープに取り付け、河岸または護岸上の樹木から水中に垂下させ（図 5-10）、温度計は、水温計を設置した付近の樹木に直接取り付けて観測を行った（図 5-11）。なお、月に一度のデータ回収作業に伴い、機器の回収から観測再開までの約 1～2 日はデータが欠損している。加えて、表 5-9 のとおり、平成 30 年の 8 月には台風・降雨

の影響で水位が大幅に上昇した影響で水温計が空気中に露出したため、データが欠損している。

表 5-9 定点観測の概要

年度	平成 30 年度		平成 31 年度	
項目	水温	気温	水温	気温
観測地点	地点①から⑤		地点①から⑦	
観測機器	DEFI2-T (JFE アドバンテック)	ペンダントロガー (Onset 社)	MX ペンダント (Onset 社)	ペンダントロガー (Onset 社)
観測期間	7/13～10/10		6/12～10/3	
測定間隔	15 分毎		15 分毎	
欠測期間*	8/15～11、8/16～22、8/28～31		無し	

*データ回収に伴う短期間のデータ欠測は含まない



図 5-10 水温計の設置方法（平成 30 年度）



図 5-11 気温計の設置方法（平成 30・31 年度）

前述の定点観測に加え、五十川においてサクラマスが越夏場所として利用している環境の特性を把握するため、平成 30 年度及び平成 31 年度に越夏場所に適すると考えられた淵において、生息環境調査を行った（28 地点を 1～2 回調査、延べ 39 回）。調査項目及び調査手法は、宮内（2011）を参考とし、山形内水試と協議のうえ決定した（表 5-10、図 5-12）。調査対象区間は、五十川におけるサクラマスの遡上限界となる堰堤直下から下流側へ約 12km までの範囲とし、調査当日の天候、河川状況、水深、入渓の容易さ、及び安全性を考慮し調査地点を選定した。なお、生息環境調査で得られたデータは、プログラミング言語 R を用いて解析を行い、サクラマスが確認された淵と確認されなかった淵で、その特徴がどのように異なるかを把握した。

また、平成 31 年度には、サクラマスが越夏場所として利用している淵の水温を把握するため、平成 30 年度にサクラマスが確認された淵のうち、3 地点において水温の連続観測を行った。観測条件については、平成 31 年度の定点観測と同様である（表 5-9）。

表 5-10 生息環境調査の項目及び調査手法

調査項目	調査手法
淵の最大水深(m)	河岸から測深機を投げ込み水深を測定
最大水深部の水面幅(m)	最深地点をはさんだ両岸までの長さを測定
淵頭の水面幅 (m)	両岸までの水面幅を測定
淵頭の表面水温 (°C)	淵頭の中心点付近において水表面の水温を測定
淵尻の水面幅 (m)	両岸までの水面幅を測定
淵尻の表面水温 (°C)	淵尻の中心点付近において水表面の水温を測定
淵の長さ(m)	淵頭・淵尻それぞれの中間点を直線で結んだ距離を測定
淵の平均流速 (m/sec)	浮子測法により水表面流速を測定
淵の面積(m ²)	「最大水深部の幅×淵の長さ÷2」の式で、およそのひし形の面積を算出
隠れ穴の有無	潜水目視観察にて、親魚が隠れられる形状・サイズの穴の有無を確認
隠れ穴／滞留場所の水温 (°C) *	隠れ穴、または滞留場所付近の水温を測定
河床材料	潜水目視観察にて、観察場所付近で最も優先する河床材料を、岩盤、岩、石、砂利、砂から 2 種特定
淵のカバー率 (%)	淵全体を被覆する水面上の樹冠を水平面へ投影した際のカバー率を 0～100% で推定
河川形態	可児（1944）の提唱する河川形態に基づき分類
淵の形態	国土交通省 河川環境課（2013）に基づき分類
水位 (m)	山形県砂防課が五十川の河口付近で取得しているテレメトリーデータを記録
親魚の在・不在	潜水目視にて、サクラマスの親魚の在・不在を確認

*平成 31 年度調査のみ実施した項目

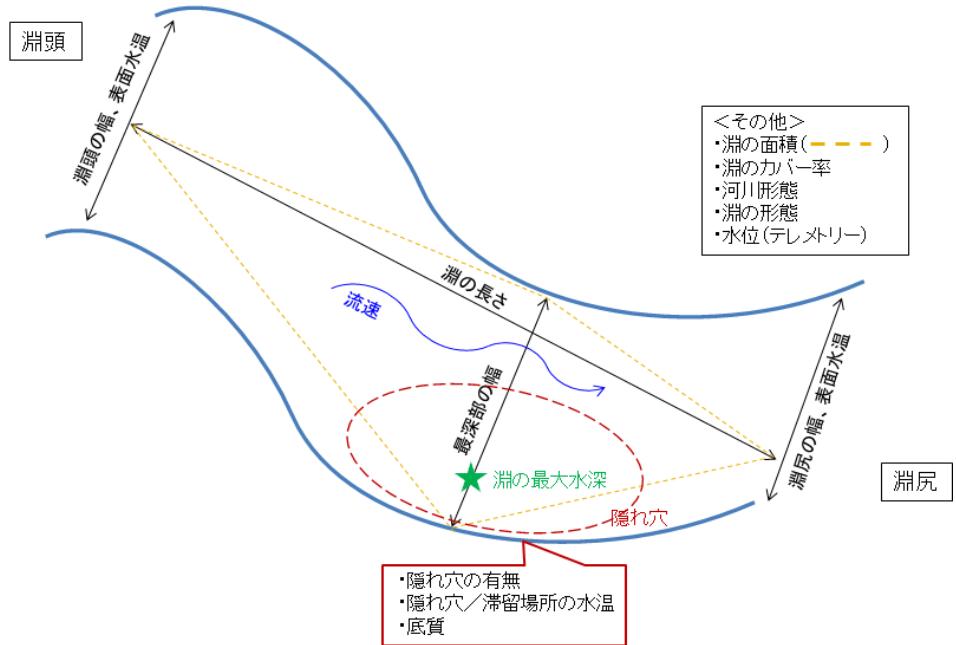


図 5-12 生息環境調査の概略図

5.3.5. 気候変動影響予測手法の検討

五十川の将来水温の予測手法として、平成 30 年度及び平成 31 年度に実施した定点観測で得られた 7 地点分の水温・気温データの関係から、各観測地点における水温予測式を構築することを検討していた。しかし、モデル内で各地点間の標高差と気温差の関係（上流で気温が低く、下流に向けて上昇する傾向）が適切に再現できないことに加え、バイアス補正に 20 年分の観測データが必要であったことから、五十川で観測した水温と相關の高いアメダス 1 地点を選定し、同アメダスの気温データから、五十川の 7 地点における将来水温を予測する式を導出することとした。この予測式から、五十川における 7 地点の 21 世紀末の日最高水温を予測し、サクラマスが選好しないと考えられる水温(25°C)、及び遡上時の適水温の上限とされる水温(20°C)を超える日数を集計した。影響予測の結果が過小評価とならないよう、将来水温の予測は「日最高水温」を対象とした。

5.3.6. 影響予測モデルに関する情報

5.3.6.1. 五十川の将来水温の予測手法

五十川の日最高水温を予測する回帰式を作成するにあたり、使用する日最高気温を取得するアメダスの選定を下記の方法で行った。

- i. 各アメダスの日最高気温と五十川の各地点における日最高水温の相関係数を比較
- ii. 実際に各アメダスより取得した日最高気温を用いて、五十川の日最高水温を求める回帰式を作成し、実際の測定値と比較

各アメダス（図 5-13）から取得した日最高気温と、五十川における各観測地点の日最

高水温の相関を表 5-11 に示す。いずれの組み合わせにおいても、相関係数が 0.8 を超えており、特に 2 年間の観測データがある地点①から⑤については、肘折、大井沢、狩川、鶴岡アメダスが相関係数 0.85 前後の良好な相関関係を示した（表 5-11、図 5-14）。

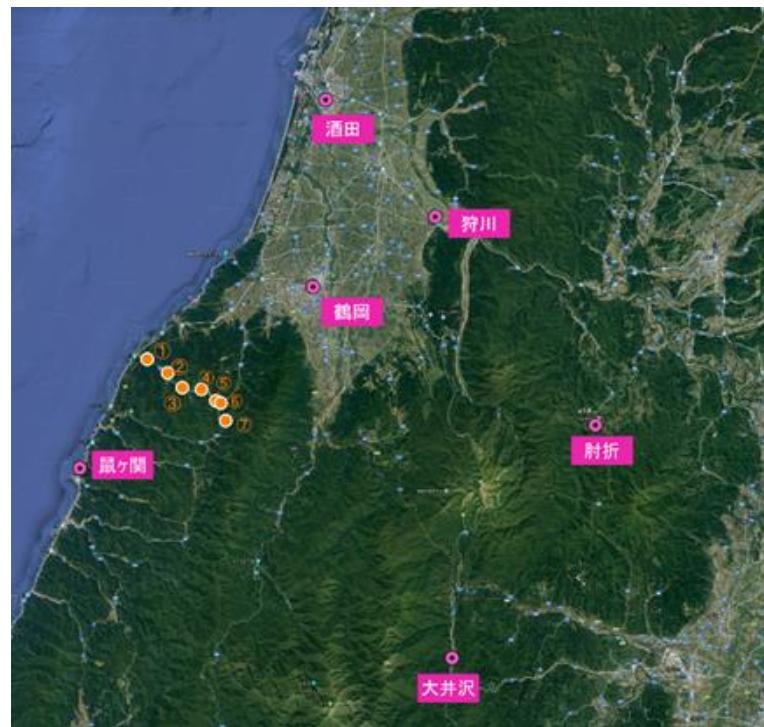


図 5-13 五十川近傍のアメダス地点

表 5-11 五十川近傍のアメダスの日最高気温と五十川の日最高水温の相関係数

測定地点	アメダス					
	肘折	大井沢	狩川	鶴岡	酒田	鼠ヶ関
地点 1	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84	0.81
地点 2	0.85	0.84	0.84	0.84	0.83	0.81
地点 3	0.87	0.87	0.86	0.86	0.85	0.83
地点 4	0.86	0.86	0.84	0.85	0.84	0.83
地点 5	0.85	0.83	0.83	0.85	0.83	0.84
(地点 6)	0.84	0.82	0.82	0.85	0.85	0.84
(地点 7)	0.84	0.81	0.82	0.85	0.85	0.85

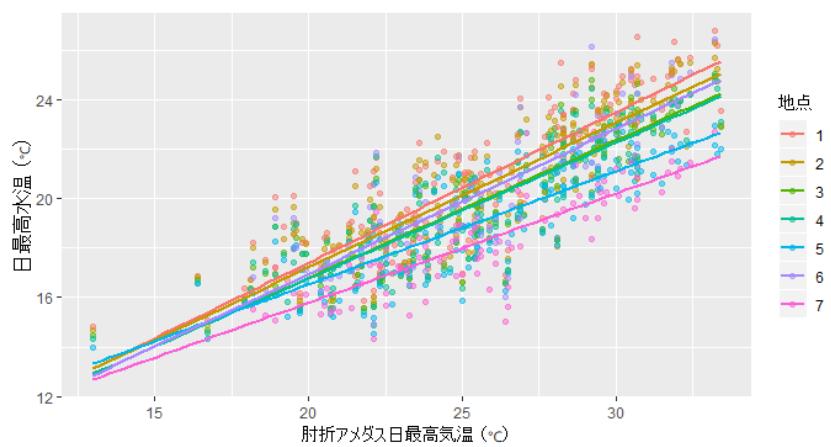


図 5-14 五十川の各観測地点における日最高水温と肘折アメダスにおける日最高気温の関係

五十川近傍のアメダス 6 地点の日最高気温を用いて、五十川の各観測地点の日最高水温を予測する式を作成した。予測した五十川の地点別日最高水温の予測値と、実測値の比較を図 5-15 から図 5-16 に示す。実測値は、平成 30 年 9 月初旬に大きく下がり、いずれのアメダスデータを使った予測値も実測値との差が大きくなる傾向であった。平成 31 年は、鼠ヶ関のデータを使った場合に、実測値や他のアメダスと比較して日最高水温が突発的に上がる傾向がみられた。

2 年間の観測データがある地点①から地点⑤について、実測値が高い 8 月を中心に検討すると、比較的良好な結果が得られるアメダスは、肘折、大井沢、酒田、狩川であった。

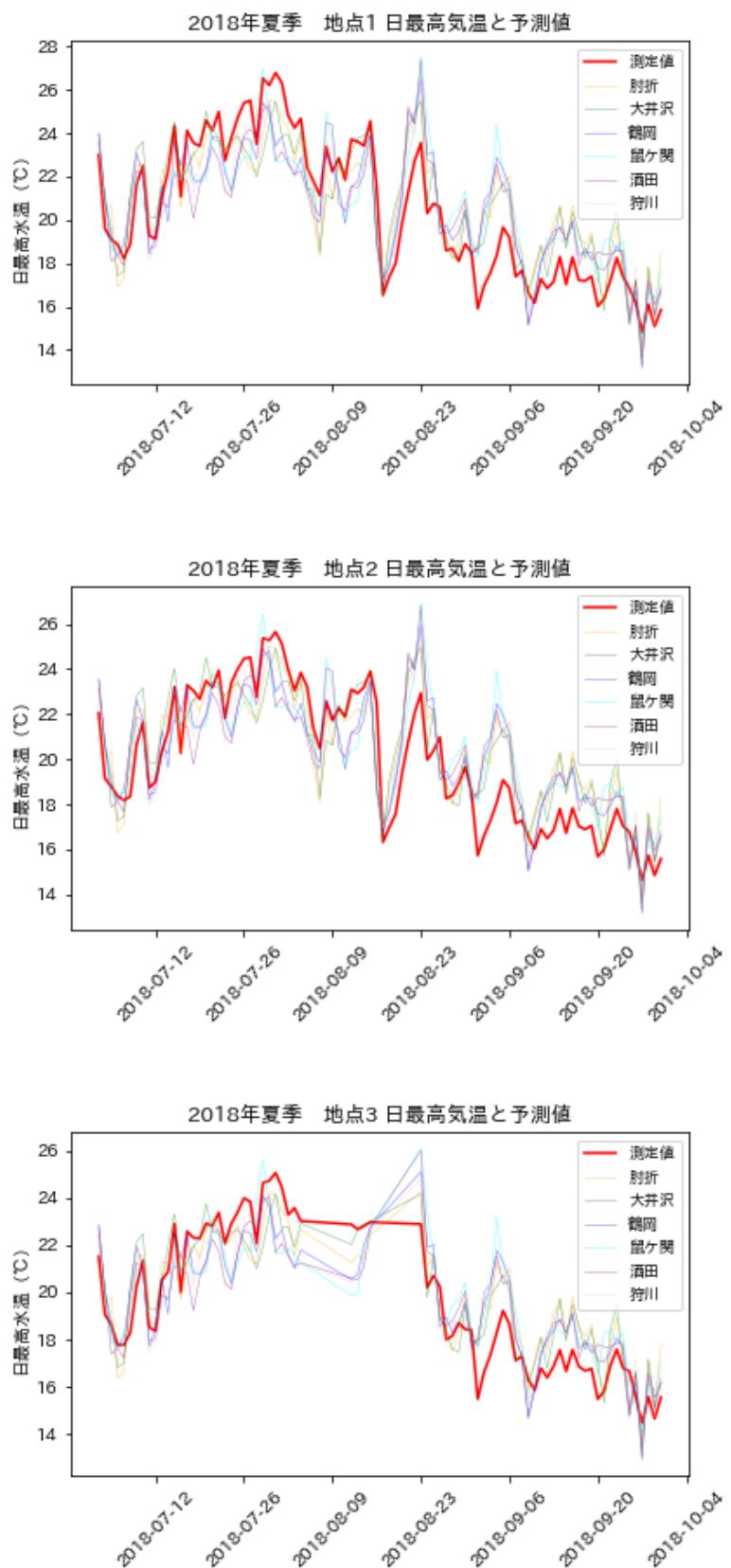


図 5-15(1) 平成 30 年度夏季の各観測地点における日最高水温測定地と五十川近傍のアメダスを用いた予測値の比較（上から地点①から地点⑤）

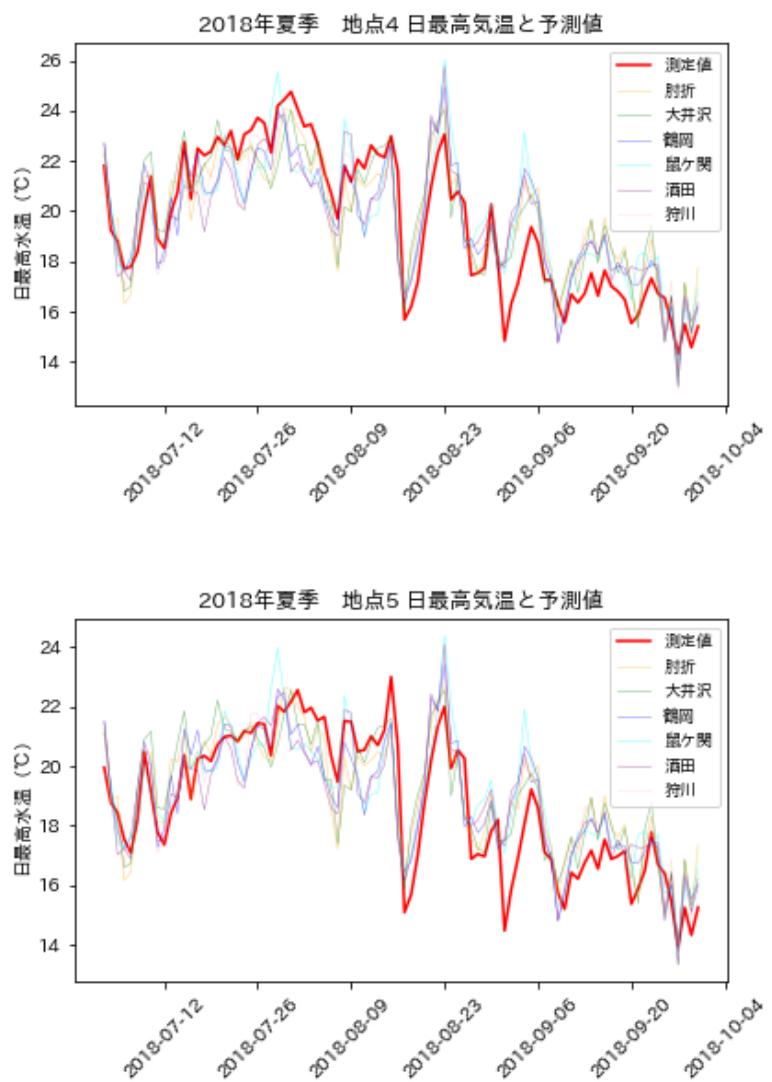


図 5-15(2) 平成 30 年度夏季の各観測地点における日最高水温測定地と五十川近傍のアメダスを用いた予測値の比較（上から地点①から地点⑤）

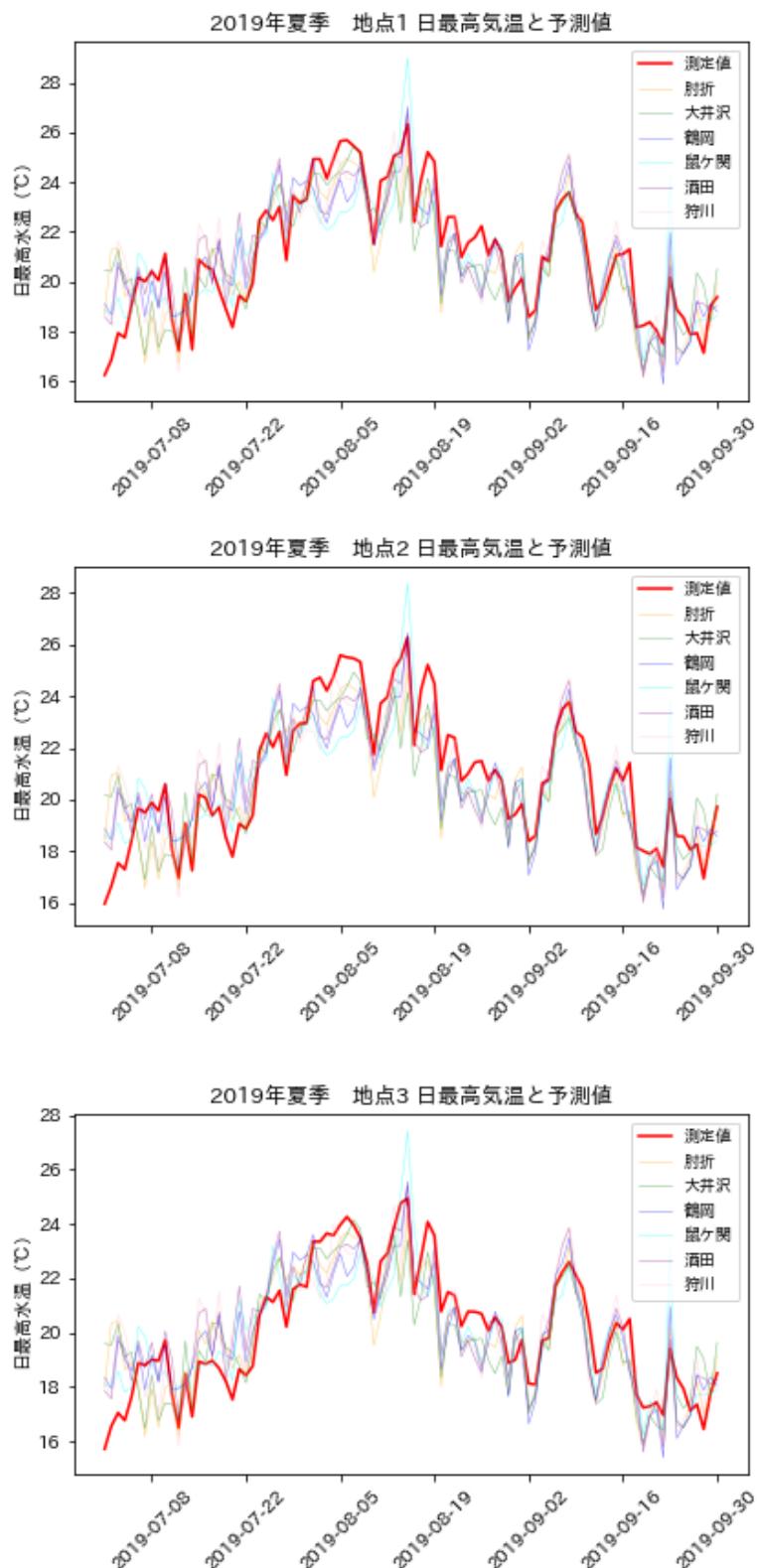


図 5-16(1) 平成 31 年度夏季の各観測地点における日最高水温測定地と五十川近傍のアメダスを用いた予測値の比較（上から地点①から地点⑦）

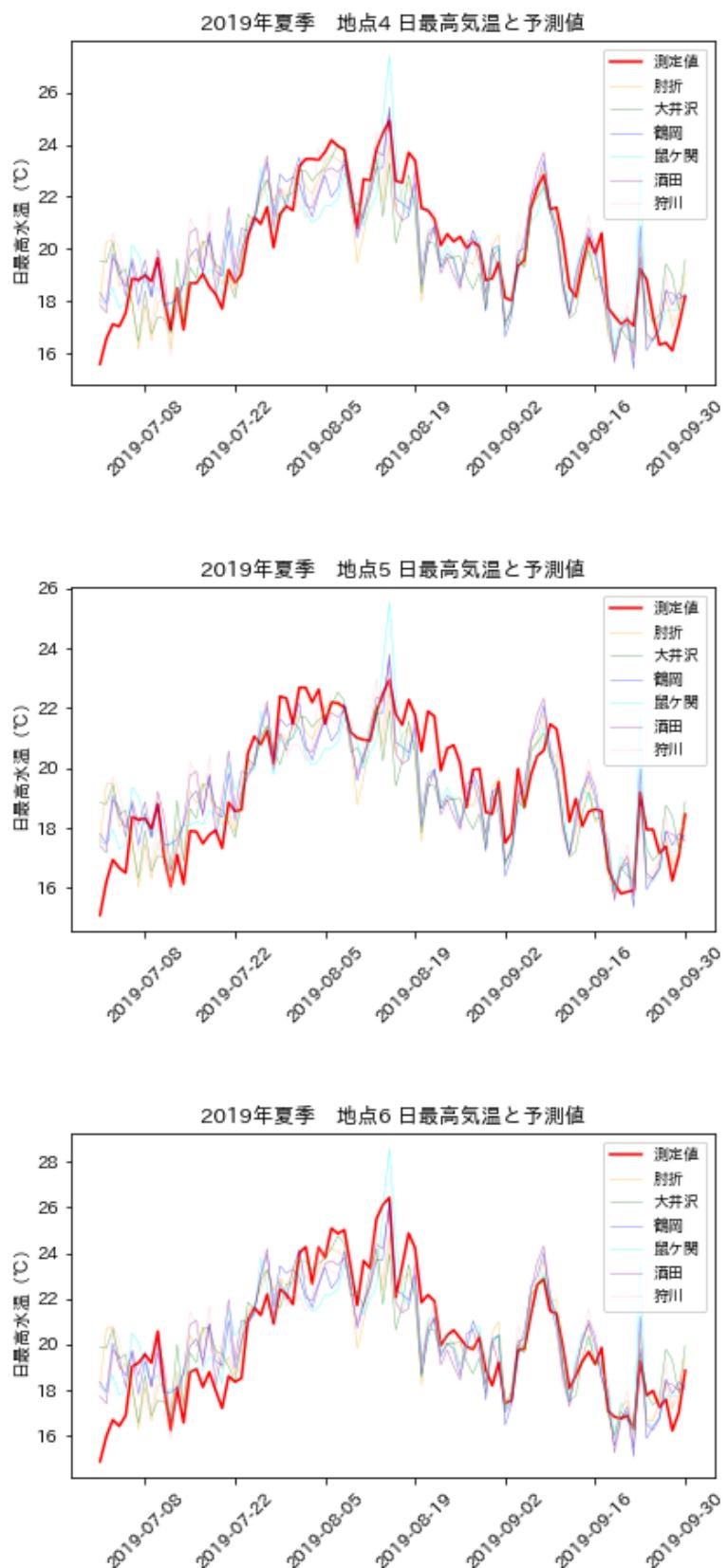


図 5-16(2) 平成 31 年度夏季の各観測地点における日最高水温測定地と五十川近傍のアメダスを用いた予測値の比較（上から地点①から地点⑦）

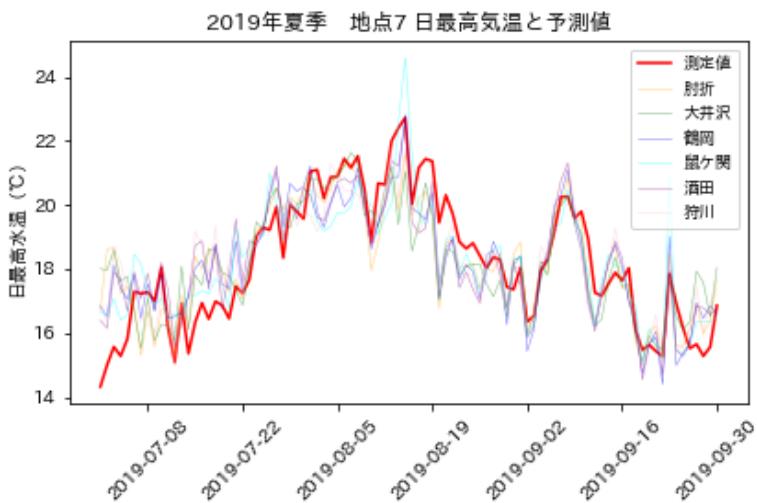


図 5-16(3) 平成 31 年度夏季の各観測地点における日最高水温測定地と五十川近傍のアメダスを用いた予測値の比較（上から地点①から地点⑦）

以上の検討結果から、①日最高気温と五十川の日最高水温の相関係数が高いこと（表 5-11）、②予測値と実測値が比較的合致していること（図 5-15、図 5-16）、③標高等の地理的条件、を考慮し、肘折アメダスを選定することとした。鶴岡アメダスや大井沢アメダスにおいても①・②の結果は良好と考えられるが、鶴岡は都市部であり五十川周辺とは環境が異なると考えられる点、及び大井沢アメダスは標高が 400m と高い点から、五十川の将来の日最高気温を予測する式には、肘折アメダスのデータの利用が適切であると考えた。

5.3.7. 影響予測に必要な入力パラメータ

本調査と同様の影響評価を行う際には、調査対象河川の夏季における日最高水温及び対象河川近傍の日最高気温（最低 2 ケ年分）に加え、バイアス補正に必要となる 20 年分の日最高気温のデータが必要となる。

5.3.8. 影響予測における留意事項（制限事項）

本調査における将来水温の予測について、地点①から⑤は 2 年分のデータ、地点⑥及び⑦では 1 年分のデータのみを用いた解析結果であることに加え、水温変化に影響する要因である水位・流量等は、五十川全域で連続して取得されているデータがなく、また、本調査における現地調査でも取得することができなかったために検討の対象外とした点に留意する必要がある。

5.4. 調査結果

5.4.1. 文献調査結果

サクラマス成魚の遡上期における適水温域は、5.5～20°Cであることが知られていることに加え（日本水産資源保護協会, 1980）、井上ら（2010）が神通川においてサクラマスの追跡調査を行った結果、日最高気温の上昇に伴い、おおむね 25°Cより水温が低い上流側へ移動する習性を有することが確認されている。また、サクラマスの幼魚を対象とした実験や野外調査では、水温が 24°Cを超えると摂食活動が停滞し、26°C以上でその活動が停止すること等が報告されている（佐藤, 2001）。

サクラマスの生態や分布に影響があると考えられる物理的環境変化として、人工構造物の建設や河川の直線化等が挙げられる。福島・亀山他（2006）は、ダムによる流域分断がサクラマスの分布に与える影響について調査し、ダムの建設から 30 年以上経過している場合にはサクラマスの生息確率が著しく低下することが報告されている。30 年以上前に建設された旧式ダムには魚道がなく、あるいは設置されていても適切に機能しておらず、ダムの建設により生息地が分断されたうえ、長期間回遊行動が阻害されたことが原因と示唆された。このような人工構造物による生息域の分断が生じた場合、人工構造物の上流側では長い年月をかけて陸封型の個体群が優勢となり、個体数の減少から遺伝的多様性が喪失され、感染症等による局所的な絶滅等が増加することが危惧される。

また、河川の直線化が、河道全体の早瀬化や流速・河床材料等の物理環境を単調化させ、魚類相の構成や生息密度に影響を及ぼすことが指摘されている（島谷他, 1994）。河口ら（2005）では、人為的に直線化された河川を再蛇行化したことで、河道平面形状が多様化し、魚類の個体数が増加したことが報告されている。再蛇行化された河川では、蛇行化前には確認されなかったサクラマスの成魚等も確認されたことから、蛇行化による深掘れの形成、倒流木のカバー等局所的な流速の低下等の効果により、サクラマスが選好する環境が形成されたと考えられる（河口他, 2005）。

サクラマスの生態に影響する環境的要因として、溪畔林（樹冠）による被覆率が挙げられる（柳井, 1996；佐藤他, 2010；長坂・杉山（杉本）, 2010；阿部, 2007）。夏季における河川水温の上昇は、水面に到達する日射量の増加に伴い生じるが、溪畔林の被覆による日射遮断の効果で低水温が保持されることから、夏季を河川で過ごし、高水温に弱いサクラマスにとっては、溪畔林の存在が必要不可欠である。例えば、溪畔林の伐採により流路の解放区間が増大すると、サクラマスの成長停滞水温とされる 24°Cを超過する日が増加し、成長率の低下、及びそれに伴う生息密度の低下が予想される（柳井, 1996；佐藤他, 2001）。さらに、溪畔林から河川に供給される倒流木が生育場所や外敵からの隠れ場所等を形成し、落葉・落下昆虫が稚魚のエネルギー源として利用されること等を考慮すると、溪畔林の有無がサクラマスの生態系全体に多大な影響を及ぼすことが分かる（河口他, 2005；長坂・杉山（杉本）, 2010）。環境変化はサクラマスの遡上活動にも作用しており、その中でも特に照度や流量（流速）の影響が大きいと考えられている（眞山, 2004）。

5.4.2. 有識者ヒアリングの結果

有識者ヒアリングの結果、以下のことが判明した。

- ・ 河川水温の変化には、気温だけでなく、水位・流量等の要因が複合的に関係している。
- ・ 平成 30 年度は山形県内における河川の高水温化が著しい年であった。一級河川でも干ばつが起こり、河川が分断される場所もあったことから、五十川も同様に、例年よりも水温が高い状態であった可能性がある。
- ・ サクラマスが越夏場所として選好しない水温は、文献調査結果及び現場の感覚からも 25°C が妥当である。
- ・ 現地にて観測するデータ及び全国事業者から提供されるデータの種類・数からも、河川水温の予測に統計的手法を用いることは妥当である。予測精度向上のためには、継続した観測、及び水位・流量等の他の要因も含めた検討が必要である。
- ・ 気候モデルのバイアス補正が必要であり、本調査の場合には、一定の水温を超える日数を集計する影響予測手法を採用しているため、気温の分布の裾を合わせた極値統計の実施が適当である。

5.4.3. 観測や実証実験の結果

平成 30 年度及び平成 31 年度に五十川の定点観測において取得した水温データを以下の図 5-17、及び図 5-18 に示す。

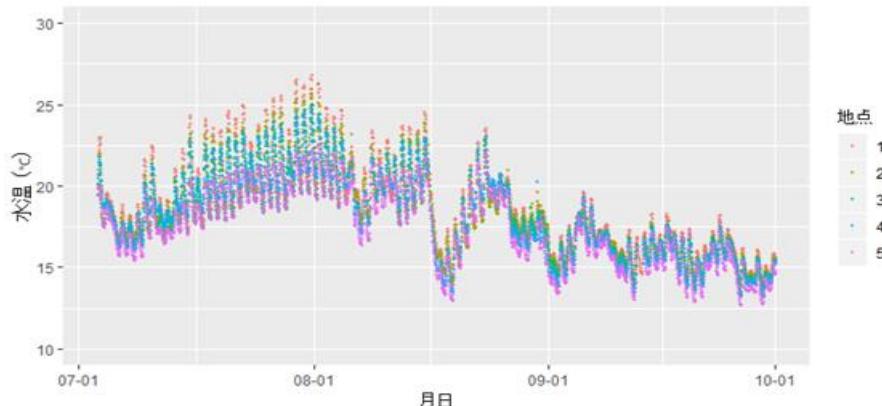


図 5-17 平成 30 年度夏季における各観測地点の水温（毎正時）

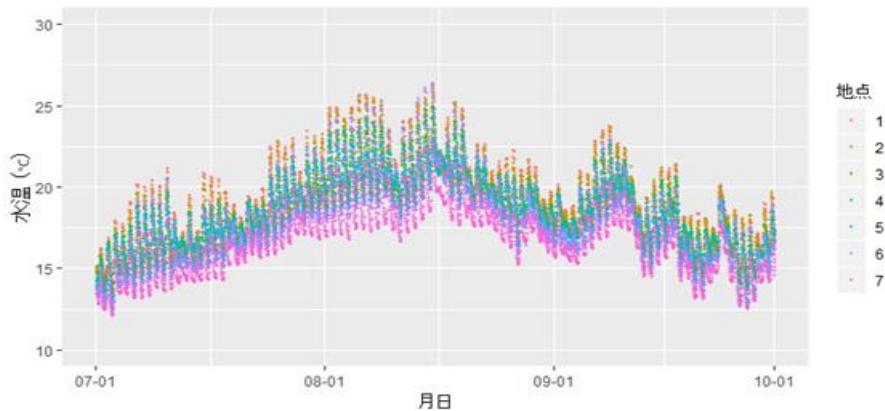
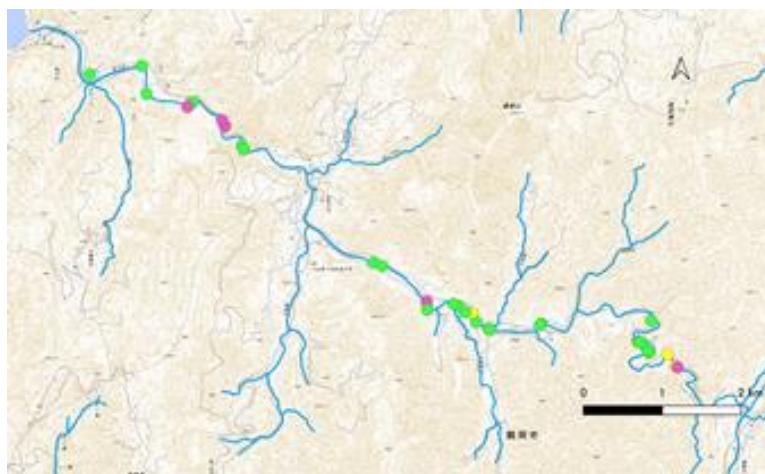


図 5-18 平成 31 年度夏季における各観測地点の水温（毎正時）

平成 30 年度及び平成 31 年度に実施した生息環境調査において、サクラマスの在・不在を確認した結果は図 5-19 のとおりであり、12 地点でサクラマスが確認された。また、全調査地点における環境調査の結果を表 5-12 に示す。なお、平成 30 年度にサクラマスが確認された淵 3 地点において、15 分間隔で水温の連続測定を行った結果は表 5-13 のとおりである。



- : 平成 30 年度年及び平成 31 年度にサクラマスが確認された地点
- : 平成 30 年度または平成 31 年度のいずれかでサクラマスが確認された地点
- : サクラマスが確認されなかった地点

図 5-19 サクラマスの在・不在調査の結果

表 5-12 生息環境調査の結果

項目 番号	淵の最大 水深(m)	最大水深 部の幅 (m)	淵頭の幅 (m)	淵頭の水 温(°C)	淵尻の幅 (m)	淵尻の水 温(°C)	淵の長さ (m)	平均流速 (m/秒)	淵の面積 (m ²)	埋れ穴の 有無	埋れ穴/淵 頭場所の水 温(°C)	河床材料	淵のカ バー率 (%)	河川形態	淵の形態	水位 (m)	親魚の在 ／不在
1	2.3	7.0	37.0	NA	NA	NA	0.5	129.5	なし	NA	岩盤、砂	NA	NA	NA	-0.24	不在	
2	1.0	8.1	13.2	26.3	10.3	26.1	42.6	0.3	172.5	あり	NA	砂利	0	Bb	M	-0.29	不在
3	1.8	10.8	5.4	25.7	18.9	28.4	36.2	0.3	195.5	あり	NA	岩盤、砂利	0	Bb	M	-0.29	不在
4	1.7	7.2	9.3	26.3	16.9	26.1	60.0	0.5	279.0	あり	NA	砂利	80	Aa-Bb 移行型	M	-0.29	不在
5	2.6	3.3	11.0	25.2	16.2	25.2	36.5	0.3	60.2	あり	NA	岩盤	40	Bb	S	-0.29	在
6	1.9	8.0	6.1	25.8	15.6	25.8	43.0	0.2	172.0	あり	NA	砂、岩盤	90	Aa-Bb 移行型	M	-0.3	在
7	1.1	6.8	6.2	21.8	2.9	20.9	15.5	0.2	52.7	あり	NA	砂、石	10	Aa-Bb 移行型	S	-0.29	在
8	1.2	5.1	4.6	22.4	9.5	22.5	18.0	0.4	45.9	なし	NA	砂、岩盤	0	Aa-Bb 移行型	NA	-0.29	不在
9	1.0	3.7	3.7	22.2	5.4	22.6	9.0	0.4	16.7	なし	NA	砂利、岩盤	0	Aa-Bb 移行型	NA	-0.29	不在
10	1.3	5.5	10.2	23.2	7.8	23.6	28.4	0.2	78.1	あり	NA	砂、岩盤	20	Aa-Bb 移行型	M	-0.29	不在
11	2.2	11.3	3.4	22.1	2.7	22.0	27.0	0.4	152.3	あり	NA	砂	50	Aa	M	-0.29	在
12	1.4	3.8	5.2	22.9	8.3	22.4	32.4	0.1	62.0	なし	NA	砂、岩盤	90	Aa	S	-0.29	不在
13	1.2	8.1	6.6	11.4	9.4	10.8	13.3	1.2	53.9	なし	NA	砂、砂利	30	Aa-Bb 移行型	R	-0.01	不在
14	1.9	9.0	11.0	11.4	18.8	11.4	38.5	0.5	173.3	あり	NA	砂、岩	10	Aa-Bb 移行型	M	-0.01	不在
15	1.3	6.0	11.8	11.4	9.9	11.4	38.0	1.3	114.0	あり	NA	砂、岩	80	Aa-Bb 移行型	M	-0.02	在
16	1.6	8.5	12.4	14.8	15.4	10.9	43.5	0.8	184.9	なし	NA	砂利、砂	90	Aa-Bb 移行型	M	-0.03	在
17	1.5	14.5	10.5	15.5	8.9	15.5	38.0	0.4	275.5	あり	NA	砂利、岩盤	80	Aa-Bb 移行型	M	-0.03	在
18	1.1	4.8	6.2	15.6	11.4	15.5	55.0	0.7	132.0	なし	NA	岩盤	20	Aa-Bb 移行型	M	-0.03	不在
19	1.5	12.0	8.8	15.7	15.0	15.7	17.0	0.6	102.0	なし	NA	岩盤	70	Aa-Bb 移行型	M	-0.03	不在
21	1.0	11.7	4.9	20.7	11.7	20.7	48.3	0.19	282.6	あり	20.7	岩、砂	65	Aa-Bb移 行型	D	-0.16	不在
22	1.1	9.5	8.3	20.8	9.4	20.8	20.1	0.43	95.5	あり	20.8	岩盤、砂	15	Aa-Bb移 行型	S	-0.17	不在
23	1.6	8.7	7.3	20.7	13.1	20.7	35.3	0.37	153.6	あり	20.6	岩、砂	90	Aa-Bb移 行型	M	-0.17	不在
24	2.1	14.6	17.6	18.6	15.2	18.8	43.3	0.32	316.1	あり	21.2	砂利、砂	60	Aa-Bb移 行型	S	-0.18	不在
25	1.9	9.9	10.1	19.9	5.6	19.5	43.0	0.25	212.9	なし	19.6	NA	60	Aa-Bb移 行型	M	-0.19	不在
26	1.8	6.3	4.3	19.9	12.9	19.9	74.0	0.59	233.1	なし	20.0	岩、砂	60	Aa-Bb移 行型	M	-0.18	不在
27	1.2	9.7	13.2	24.9	15.5	24.8	32.5	0.33	157.6	なし	25.8	石、砂	60	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	不在
28	2.1	7.6	13.6	24.8	13.1	24.8	41.5	0.79	157.7	あり	24.8	岩、砂	90	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	在
29	1.7	7.2	9.0	23.0	10.6	22.7	39.0	0.12	140.4	あり	22.8	砂	90	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	在
30	1.9	6.9	12.2	23.5	6.3	23.4	47.5	0.28	163.9	なし	23.7	砂利、砂	90	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	不在
31	1.3	5.1	13.4	24.3	8.3	24.3	54.0	0.53	137.7	あり	24.3	石	60	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	不在
32	1.9	8.1	8.8	24.4	16.0	24.4	41.0	0.39	166.1	なし	24.4	砂利、砂	80	Aa-Bb移 行型	M	-0.23	不在
33	1.3	5.2	11.1	19.3	9.2	19.4	45.0	0.16	117.0	なし	19.3	岩盤、砂	90	Aa-Bb移 行型	M	-0.21	不在
34	1.6	6.0	8.9	19.2	6.5	19.2	38.0	0.07	114.0	あり	19.2	砂	50	Aa-Bb移 行型	M	-0.21	不在
35	1.4	6.2	2.3	18.8	9.1	19.0	72.6	0.12	225.1	なし	19.0	岩、砂	5	Aa-Bb移 行型	M	-0.21	不在
36	1.5	9.1	8.1	18.5	5.0	18.6	26.0	0.23	118.3	なし	18.6	砂	80	Aa-Bb移 行型	M	-0.21	不在
37	1.6	5.7	3.7	15.8	7.7	15.8	43.0	0.23	122.6	あり	15.7	砂	80	Aa-Bb移 行型	M	-0.22	在
38	2.0	2.8	2.8	15.9	5.2	15.9	32.0	0.20	44.8	あり	15.9	砂	40	Aa-Bb移 行型	M	-0.22	在
39	1.2	4.8	2.3	16.0	5.5	16.1	32.5	0.10	78.0	あり	16.1	岩、砂	80	Aa-Bb移 行型	S	-0.22	在

表 5-13 サクラマスが確認された淵の水温の平均 (°C)

期間	淵①	淵②	淵③
7~9月	18.686208	18.78202	18.838188
7月	17.32258	17.563304	19.611141
8月	20.788494	20.824081	20.005905
9月	17.922399	17.930641	17.487291

以上の結果を解析した結果、サクラマスが確認された多くの淵は、隠れ穴があり、淵の最大水深が 1.7m 以上、淵の面積 172m² 未満、樹冠によるカバー率が 80% 以上であることが判明した。また、サクラマスが実際に越夏場所として利用している淵では、夏季（7~9月）の平均水温が 19°C 以下に保たれていることが判明した。

5.4.4. 気候変動影響予測結果

平成 30 年度及び平成 31 年度の夏季（7 月から 9 月）、五十川において取得した水温データ及びアメダス（肘折地点）において観測されている気温データを用いて日最高水温予測式を作成し、日最高水温予測式と 21 世紀末における日最高気温を用いて 21 世紀末における五十川の日最高水温を予測した（図 5-20）。予測結果から、定点観測地点①、②、⑥では、サクラマスが選好しないと考えられる水温（25°C）を超える日が増加し、地点①ではその日数が現在の約 5 倍に増加することが予測された（図 5-21）。また、いずれの地点においても、遡上時における適水温の上限（20°C）を超える日数が現在の 2~3 倍に増加することが予測された（図 5-21）。これらの結果から、21 世紀末の五十川では、下流域を中心に越夏適地が縮小するものの、上流域においては将来も越夏適地が残存することが予想される。

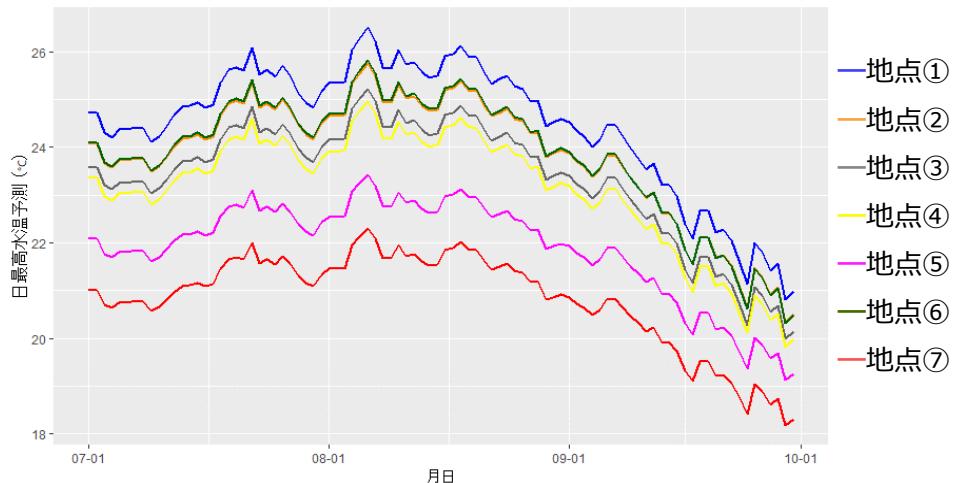


図 5-20 各定点観測地点における 21 世紀末の日最高水温の予測結果（気候モデル：MRI-NHRCM02、RCP8.5）

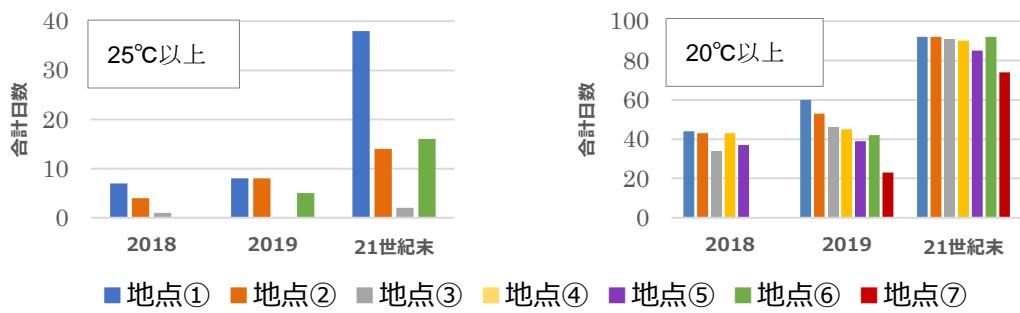


図 5-21 21世紀末の夏季（7～9月）における水温別の出現頻度（気候モデル：MRI-NHRCM02、RCP8.5）

5.4.5. 結果を活用するまでの留意点・制限事項

本調査では、五十川にて実施した現地調査から得たデータを用いて、将来水温予測手法の検討を行ったため、導出された予測式は五十川に特化している。他の河川を対象に同様の影響予測を行う場合、本調査において構築した手法や考え方を応用することは可能であるが、予測式自体をそのまま利用することはできない点に注意する必要がある。他の河川へ応用を検討する際には、対象河川のデータを用いた独自の予測式を導出する必要がある。また、本調査で行った将来予測は20年平均の結果であるため、サクラマスが選好しない水温（25°C）や遡上時における適水温の上限（20°C）を超える日数がどのように変化しているかを経年的に評価していない点に注意する必要がある。さらに、水温上昇とサクラマスの遡上数や遡上距離の関係も明らかになっていないため、さらなるデータ取得や検証が必要であると考えられる。

5.5. 適応オプション

5.5.1. 手順

本調査における適応オプションの検討フローを図 5-22 に示す。

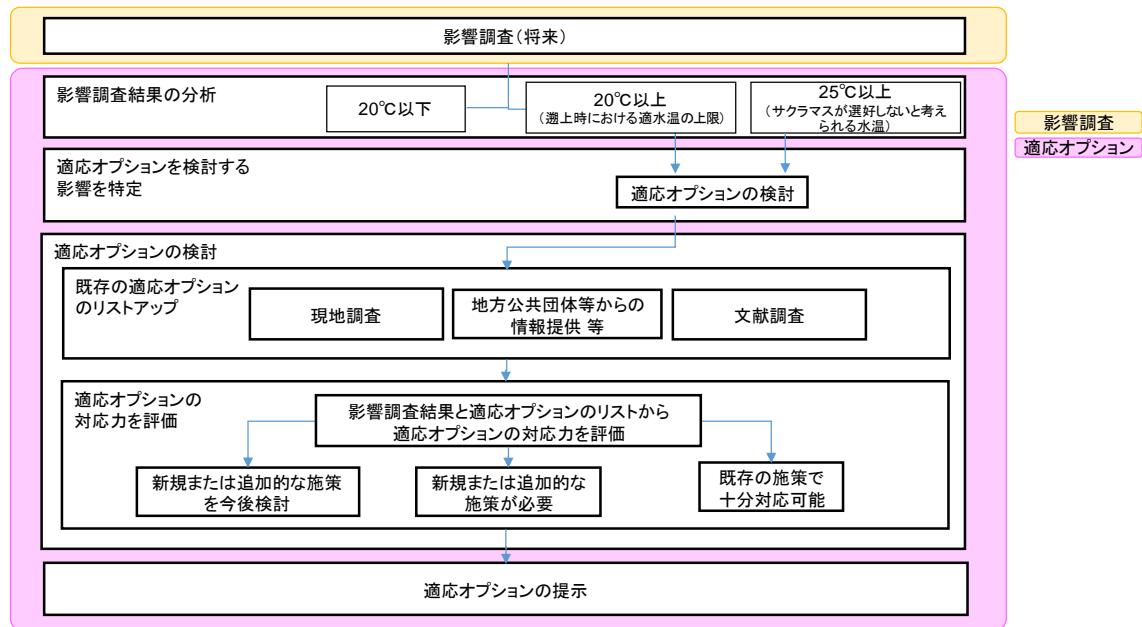


図 5-22 適応オプションの検討フロー図

5.5.2. 概要

本調査において検討した適応オプション及びその考え方を表 5-14 及び表 5-15 に示す。

表 5-14 適応オプション

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性			効果		
				普及状況	課題	人 的 側 面	物 的 側 面	コス ト面	情報 面	効果 発現 まで の時 間	期待 され る効 果の 程度
五十川において サクラマスの親 魚が確認された 淵の保全	●	●	●	—	継続的な調査や普 及啓発が必要	△	◎	◎	△	N/A	—
サクラマスが選 好する淵の整備	●	●			他セクターとの合 意形成が不可欠	△	○	△	◎	短期	高
堰堤等のスリッ ト化及び魚道の 設置	●	●		—	他セクターとの合 意形成が不可欠	△	○	△	◎	短期	高
五十川における 菅野代頭首工水 制門を利用した 流量調節	●			—	他セクターとの合 意形成に加え、水 位・流量等の影響 を考慮する必要が ある	△	○	N/A	△	N/A	—
貯水池・ダム等か らの冷水放流	●	●		—	他セクターとの合 意形成に加え、他 の生物への影響も 考慮する必要があ る	△	○	△	◎	短期	—
源流部や河川周 辺部の渓畔林、湿 地の維持・造成	●			—	他セクターとの合 意形成が不可欠	△	△	△	◎	N/A	—
陸上養殖施設に による親魚の保護	●			—	施設整備や飼育等 にコストがかかる	△	△	△	◎	N/A	—

表 5-15 適応オプションの考え方

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
五十川においてサクラマスの親魚が確認された淵の保全	<ul style="list-style-type: none"> サクラマスの休息場所等として機能する淵を確保することで、高水温化による体力消耗を軽減し、将来も越夏適地が残存する上流域への遡上を促すことができる。
サクラマスが選好する淵の整備	<ul style="list-style-type: none"> 本調査において特定した越夏適地の条件を備えた淵を整備することで、一時的な休息場所等を確保でき、高水温化による体力消耗の低減が期待できる。 既存の研究により、人為的な淵の造成による効果が示されている。
堰堤等のスリット化及び魚道の設置	<ul style="list-style-type: none"> 山形県内で砂防ダムのスリット化が行われた実績があり、サクラマスの遡上範囲の拡大に寄与することが示されている。 ダムの満砂や重機を用いた浚渫作業の労力・コスト軽減も期待できる。
五十川における菅野代頭首工水制門を利用した流量調節	<ul style="list-style-type: none"> 本調査の簡易的な解析結果から、五十川河口の日最低水位が 10 cm 上昇すると、定点観測地点①から⑤における日最高水温が 0.4 から 0.7°C 低下することが示唆された。
貯水池・ダム等からの冷水放流	<ul style="list-style-type: none"> 既存の研究では、発電所からの放水水温に変化がないとの仮定の下では、サクラマスの生息に適する水温が保持されることが示唆されている。
源流部や河川周辺部の溪畔林、湿地の維持・造成	<ul style="list-style-type: none"> 既存の研究では、植生の違いや、草地区間の長さ等により平均水温等が異なることが示されているが、河川ごとにその条件が異なるため、効果の予測は難しい。
陸上養殖施設による親魚の保護	<ul style="list-style-type: none"> 試験飼育等の事例はあるが、コストの増大、魚病等の被害も懸念される。

5.5.3. 個々の適応オプションに関する説明

① 五十川においてサクラマスの親魚が確認された淵の保全

サクラマスの休息場所として機能する淵を断続的に確保することで、高水温化による体力消耗を軽減し、将来も越夏適地が残存する上流域への遡上を促すことができる。本調査において生息環境調査を行った計 39 地点のうち、12 地点においてサクラマスが確認されたが、台風や大雨等の影響により、河床や淵の形状が大きく変化するため、生息環境の実態把握にはさらなる調査が必要である。また、釣り人等を含む河川利用者を対象とした普及啓発を行う必要がある。

② サクラマスが選好する淵の整備

サクラマスが越夏場所として選好する環境を人為的に造成・整備することで、水温上昇が予想される環境下でも遡上時に必要な休息場所を確保することができ、高水温による体力消耗を低減し、より冷涼な上流域への遡上を促すことができる。また、樹冠によるカバー率の増加等による水温上昇抑制効果も期待できる。

生息環境調査においてサクラマスが確認された淵の多くは、隠れ穴があり、最大水深 1.7m 以上、淵の面積 172m²、樹冠によるカバー率 80%以上、7 月から 9 月の平均水温が 19°C 以下に保持されていることが判明した。これに加え、越夏適地に関する既存の研究結果（山崎ら, 2008 ; 謙佐ら, 2019）を活用することができるが、未だ十分な情報量であるとは言えない。また、人為的に淵を造成するには、土木・防災・農業・漁業等を含む多くのセクターの合意を得る必要もある。さらに、新しく整備した淵が台風等の影響で埋没する可能性もあり、本オプションの適用には慎重な議論が必要であると考えられる。

③ 堤等のスリット化及び魚道の設置

現在の五十川では、定点観測地点④と⑤の中間に存在する魚止めの堰堤がサクラマスの遡上限界となっているが、この堰堤のスリット化により、将来にも越夏適地が残存する上流域まで遡上域が拡大することが期待される。山形県の早田川にある砂防ダムで実際にスリット化が行われた事例があり、遡上域が倍以上拡大したことが報告されている（山形県内水面水産試験場, 2010 ; 佐々木ら, 2013）また、スリット化により河川の連続性が確保されることで、水温上昇の抑制効果が期待できることに加え、満砂を防ぎ、重機を用いた浚渫作業にかかる労力・コストが軽減される利点も考えられる。しかし、スリット化による泥や土砂の流出により、産卵床の造成に必須である浮き石の埋没や水質汚染等の問題が考えられることから、他セクターとの協議、河川環境全体を考慮した包括的な検討が重要である。

④ 五十川における菅野代頭首工水制門を利用した流量調整

定点観測地点⑤の上流にある菅野代頭首工では、農業用水通水のため、5 月から 8 月終盤まで水制門が閉じられており（大雨の日等を除く）、頭首工よりも下流側では水位が低下する。夏季、水門を利用した流量調整を行うことで、水位上昇による水温低下（低水温の保持）が期待できる。なお、本調査の解析結果から、五十川の河口において日最低水位

が10cm上昇すると、定点観測地点①から⑤の日最高水温が0.4°Cから0.7°C低下することが予想された。

本適応オプションを導入する場合には、水温・水位・流量等の関係を詳細に把握する必要があり、また、サクラマス以外の生物種や河川の物理的環境への影響も考慮する必要がある。また、流量調整による農業用水の減少や、その影響に関する議論についても、他セクターを交えて慎重に行う必要があると考えられる。

⑤ 貯水池・ダム等からの冷水放流

夏季に成層化したダム水等から低水温の水塊を選択的に放流することで、河川全体の水温上昇を抑制し、サクラマスの越夏に適する水温を保持することが期待できるが、本適応オプションは、貯水池やダム等が存在する大規模な河川のみが対象となる。課題として、選択取水設備の導入コストや、他セクターとの合意形成に加え、土砂・濁り・栄養塩等の流出や青潮の発生等が考えられ、他の条件も含めた包括的な検討の必要性等が挙げられる。

⑥ 源流部や河川周辺部の溪畔林、草地、湿地の維持・造成

河川源流部や流域周辺の溪畔林、草地、湿地の維持・造成により、河川や帶水層の保水力を維持することができる。適切な水量を確保することで、河川の高水温化や水質を維持し、夏季におけるサクラマスの生息条件の悪化を防ぐことができる。本適応オプションの実現には、大きな枠組みでの取り組みが必要であるとともに、地元や他セクターの協力が不可欠である。

⑦ 陸上養殖施設による親魚の保護

気候変動の進行に伴う河川の水温上昇により、サクラマスの遡上が困難となり、個体数が大幅に減少する場合に有効な適応オプションである。遡上開始前、河口で親魚を捕獲後、陸上養殖施設に輸送し、採卵期まで人工的に飼育することで生存させることができ、採卵・孵化後、春季に稚魚を放流し、個体数を維持することができる。少数ではあるが、陸上養殖に成功している事例も見られ、既存の知見を活用することができる。しかし、設備建設用用地や設備整備に係るイニシャルコスト、電気使用料等のランニングコストが高額であるために負担が大きいこと、また、魚病や酸欠事故等の被害も懸念される。

引用文献一覧

- ・ 阿部俊夫 (2007) 小流域における渓畔林の喪失とサクラマス幼魚の生息環境悪化, 日林誌 89 (2), 85-91
- ・ 井上創・千田庸哉・仮谷伏竜・稻葉修一・坂本健太郎・宮島茂保・山崎憲斗・立野祐輔 (2010) 神通川におけるサクラマスの越夏場所の特性について, 応用生態工学会研究発表会講演集
- ・ 可児藤吉 (1944) 溪流性昆虫の生態学, 可児藤吉全集, 思索社, 3-91
- ・ 河口洋一・中村太士・萱場祐一 (2005) 標津川下流域で行った試験的な川の再蛇行化に伴う魚類と生息環境の変化, 応用生態学 7 (2), 187-199
- ・ 国土交通省 河川環境課 (2013) 河川における外来種対策の事例集 資料編, 171-173
- ・ 佐藤弘和・永田光博・鷹見達也・柳井清治 (2001) 河畔林の被陰がサクラマスの成長に及ぼす影響—夏期河川水温と指標とした解析—, 日林誌 83 (1), 22-29
- ・ 島谷幸宏・小栗幸雄・萱場祐一 (1994) 中小河川改修前後の生物生息空間と魚類相の変化, 水工学論文集 38, 337-344
- ・ 水生生物生態資料 (1980) 社団法人日本水産資源保護協会, 23-25
- ・ 諏佐晃一・尾関哲史・佐藤利行・星野康弘 (2019) 神通川におけるサクラマス *Oncorhynchus masou* の越夏場所—自然再生により創出した淵の利用—, 応用生態工学 22 (1), 61-71
- ・ 内藤淳也, 角哲也, 竹門康弘 (2012) 冷水性淡水魚類生態に適した河川水温環境に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 55 号
- ・ 長坂晶子・杉山 (杉本) 幸穂 (2010) 北海道内の小河川における夏季最高水温の推定と河畔林の効果, 北海道林業試験場研究報告, 第 47 号
- ・ 福島路生・亀山哲 (2006) サクラマスとイトウの生息適地モデルに基づいたダムの影響と保全地域の評価, 応用生態工学 8 (2), 233-244
- ・ 真山紘 (2004) さけ・ます類の河川遡上生態と魚道, さけ・ます資源管理センターニュース No.13, 1-7
- ・ 宮内康行 (2011) 越夏環境の保全・改善及び造成技術の開発, 河川の適用利用による本州日本海域サクラマス資源管理技術の開発報告書, 独立行政法人水産総合研究センターさけますセンター, 33-54
- ・ 柳井清治 (1996) サケ科魚類の生息と水辺林の機能—水辺環境の再生への取り組み—, 森林科学 26
- ・ 山形県県土整備部 (2017) 平成 29 年度山形県の県土整備
- ・ 山崎憲人・宮島重保・藤田幸雄・仮谷伏竜・坂本健太郎・田子泰彦 (2009), サクラマスが増える河川環境を目指す神通川自然再生への検討, 河川技術論文集, 第 15 卷
- ・ Piani, C., Haerter, J. O. and Coppola, E. (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 99, 187-192, 2010