

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）		所 属		役 職			
		あかまつ よしひさ 赤松 良久		山口大学大学院創成科学研究科		准教授			
②研究 テーマ	名称	流域における河川水温の時空間構造変化と生態系の応答に関する研究							
	政策 領域	〔分野〕 地域課題分野（河川）			融合 技術	（リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等）			
		〔公募課題〕							
③研究経費 （単位：万円）		平成 2 8 年 度		平成 2 9 年 度		平成 年 度		総 合 計	
		332		164				496	
※端数切り捨て。									
④研究者氏名									
氏 名				所属・役職（※平成30年3月31日現在）					
乾 隆帝				山口大学大学院創成科学研究科・特命助教					
⑤研究の目的・目標 （申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 河川水温は、河川生態系の生物群集構造や、生物生産力を左右する重要な要素であり、近年の中国地方の河川におけるアユ・カジカの生息場の減少の要因となっていると考えられる。しかし、現在、日本の河川における河川水温の連続的なモニタリングは行われていないため、各河川における水温の現状は明らかにされていない。さらに、気候変動や流域における人為的環境変化が河川水温に及ぼす影響についても不明な点が多い。 そこで、本研究では、中国地方の3水系において、（1）河川水温の時空間構造モニタリング・解析を実施し、（2）環境DNAを用いた魚類量の高時空間解像度モニタリングを行うことによって、（3）河川水温変化に対する生態系の応答を明らかにすることを目的とする。									

⑥研究成果

(様式 E-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. 河川水温の時空間構造モニタリング・解析

1-1. 河川水温の時空間構造モニタリング

本年度は高津川水系、佐波川水系、小瀬川水系において、流域内に網羅的に水温系を設置し、2016年8月から計測を開始している。これらのデータに関しては2017年8月まで計測をしたのちにデータ解析をすることとし、2014年8月から水温データを継続的に調査している中国地方の10一級河川を対象とした河川水温の連続モニタリングデータに関して検討を行った。解析対象期間は2014年12月から2015年11月までの1年間とした。図-1に各河川における年平均水温の空間分布を示す。なお、白丸の地点ではデータの欠損期間が長かったため割愛した。全体的に上流から下流に向かって水温が上昇する傾向にあるが、上流域に三次市などの市街地が広がる江の川では上流で水温が高くなる現象がみられる。また、図-2に夏季(8月)における月平均水温の縦断変化と冬季(1月)における月平均水温の縦断変化を示す。冬季においては各河川の水温差が小さいのに対して、夏季においては各河川の水温変化に特徴が見られることが分かる。高津川や太田川、佐波川は夏季においても上流から下流まで水温が低い傾向にあるが、高津川において冬季に比較的水温が高くなる傾向が見られ、これは湧水や地下水の影響が考えられる。

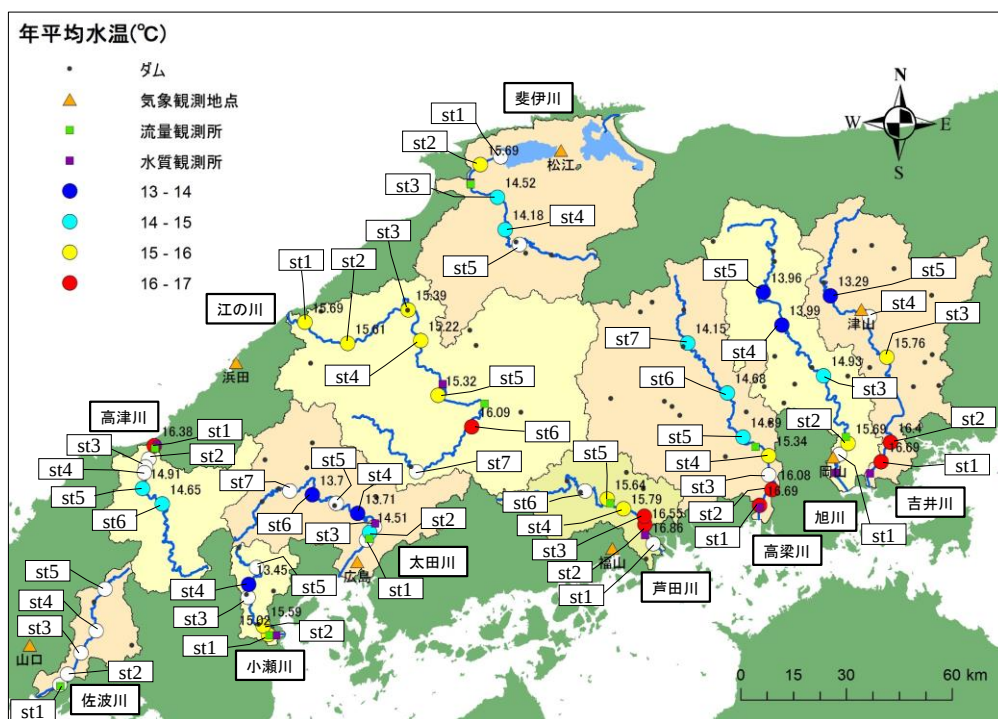


図-1 調査地点と年平均水温

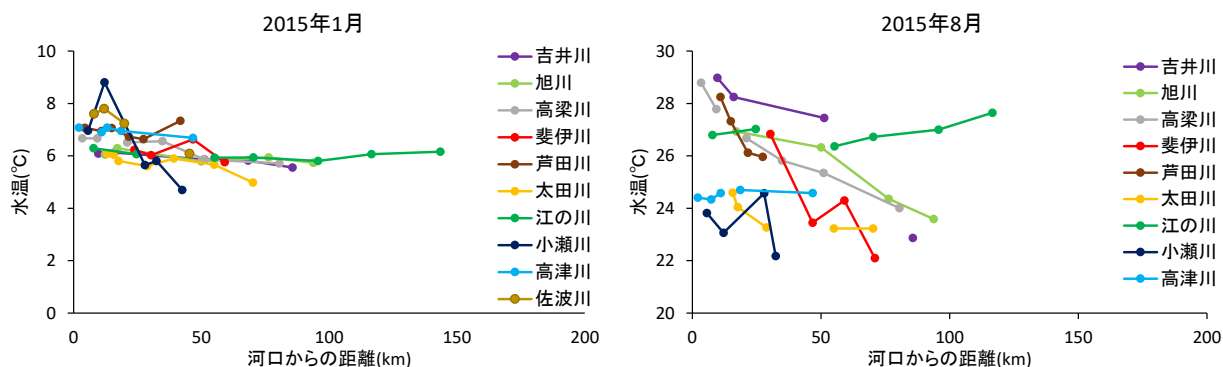


図-2 各河川の夏季(8月)・冬季(1月)における月平均水温縦断分布

⑥研究成果（つづき）

1-2 河川水温の連続モニタリングに基づく生物の応答特性

連続モニタリング結果の利用法として、中国地方においてその減少が大きな問題となっているアユを対象とした検討を行った。成魚期のアユの最適水温は14～25℃であり、28℃以上では摂餌を停止することが知られている。そこで、各水温調査地点において、一年間を通して水温が28℃以上になる期間の最大継続時間(h)および積算時間(h)を算出した（図-3）。最大継続時間が200時間を超える地点は江の川、芦田川、吉井川に集中している。江の川では近年アユの漁獲量の減少が大きな問題となっているが、江の川では上流から下流までほとんどの地点で水温28℃以上の最大継続時間が200時間を超えており、このような水温の上昇が江の川のアユの生息環境を悪化させていることが推察される。ここで、水温が年間を通して1℃上昇したときと2℃上昇したとき、1℃低下したとき、2℃低下したときの4ケースにおいて同様の検討を行った。図-4は江の川における結果を示したものである。水温が低下した場合、最大継続時間、積算時間ともに激減していることが分かる。このことから過去から現在にかけての水温上昇はアユの生息環境を大きく変化させた原因の一つと考えられる。水温が上昇した場合、最大継続時間、積算時間ともに大きく増加していることが分かる。これは今後河川水温が上昇したときにアユなどの水産資源に大きなダメージを与える可能性があることを示している。

次に、近年のアユの減少の原因の一つとして冷水病が問題視されている。冷水病菌は7月において23.6℃以上の水温で検出されなくなったという報告があることから、7月において23.6℃以下になる



図-3 一年を通して水温が28℃以上になる期間の最大継続時間(h)および積算時間(h)

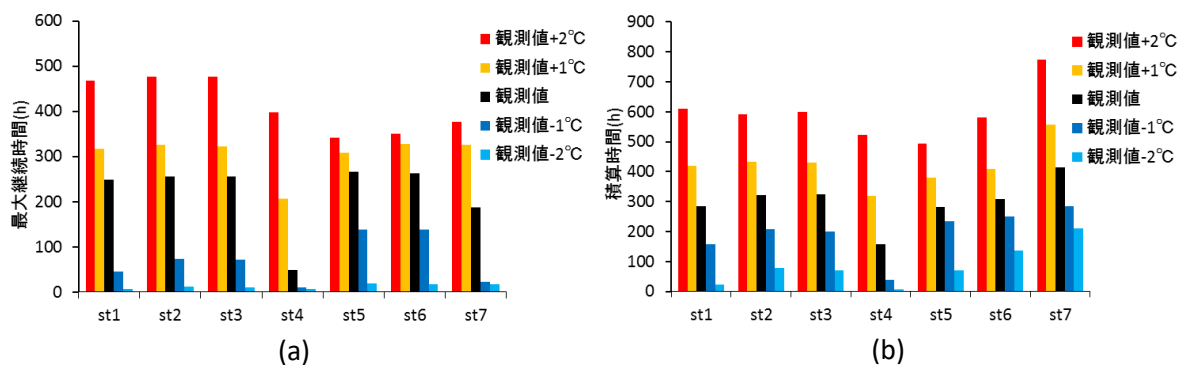


図-4 江の川における(a)最大継続時間(h)と(b)積算時間(h)の比較

期間の最大継続時間(h)および積算時間(h)を算出した。図-5 に7月において水温が23.6℃以下になる最大継続時間(h)および積算時間(h)の算出結果を示す。小瀬川や太田川において上中流域において最大継続時間が比較的高い数値を示しており、積算時間は高津川も含めて、上流から下流まで大きな値を示していることが分かる。これらの河川は年平均比流量の大きい河川であり、夏季においても水温が他河川に比べて上昇しづらいことが原因と考えられる。中下流域において高い数値を示したこれらの河川では冷水病の危険性が他河川よりも高いことが示唆された。

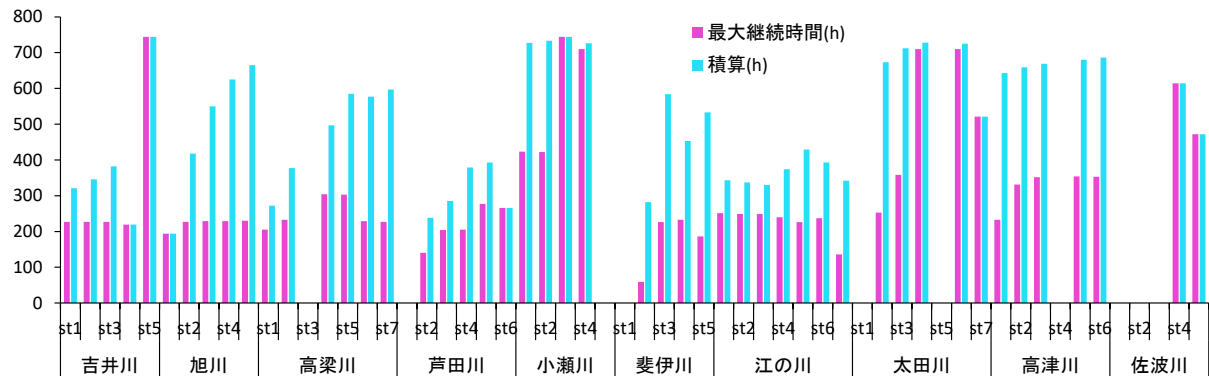


図-5 7月において水温が23.6℃以下になる最大継続時間(h)および積算時間(h)

2. 河川水温予測モデルの開発

山口県佐波川を対象として、河川水温予測モデルを構築する。ここでは、従来のモデルから河床との熱交換および横流入を正確に取り扱うことにした。

2-1 現地観測

(a) 調査概要

流域における水温変動特性を把握するために水温の広域調査を実施した。対象河川は山口県の一級河川である佐波川とし、主要な支流と本流に水温計を設置し(図-6)、2016/8/9~2017/1/6において観測を行った。なお、本流の地点に関してはアルファベット、支流及び上流端の地点については11から通し番号をつけている。

b) 支流の水温変動特性

図-7 に stB, st17 及び st18 の水温時系列の比較図を示す。支流上流端の st17 では日変動が比較的小さく水温が低い傾向にある。支流下流端の st18 と stB を比較すると、夏季は st18 の水温が高い傾向にあるが、冬季においては st18 の水温が stB よりも低い傾向にあることが分かる。

図-8 は上流端水温の対象期間内における平均水温と標高を比較したものである。単回帰分析の結果 R^2 値が0.89 であり高い相関関係が見られた。また、図-9 に支流における上流端と下流端の水温差と集水面積の関係図を示す。さらに、水温差と集水面積、高低差、市街地率、流下距離等と比較した結果、集水面積が最も高い相関を示した。

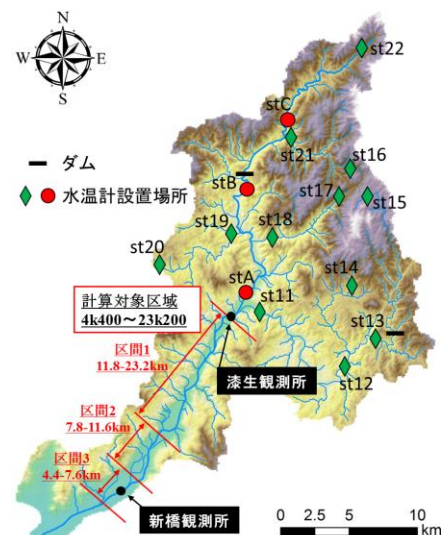


図-6 水温計設置場所と計算対象区間

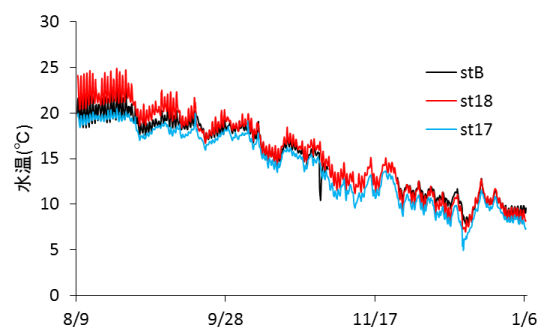


図-7 stB, st17 及び st18 の水温時系列の比較

⑥研究成果（つづき）

2-2 水温予測モデルの構築

(a) 河川流動モデル

流れ場の解析には以下の2式を用いた。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g}{2} Ah \right) - gAI_e \quad (2)$$

ここに、 A ：流水断面積[m²]、 Q ：流量[m³/s]、 z ：河床高[m]、 g ：重力加速度[m/s²]、 h ：水深[m]、 I_e ：エネルギー勾配、 q_{in} ：流れ方向の単位長さ当たり横流入量、 q_{out} ：流れ方向の単位長さ当たり取水量である。

(b) 水温予測モデル

水温 T_w [°C] は、式(3)に示す一次元移流分散方程式により求めた。

$$\frac{\partial BhT_w}{\partial t} + \frac{\partial BhT_w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (BhD_x \frac{\partial T_w}{\partial x}) + B \frac{TE}{c_w \rho_w} \quad (3)$$

$$D_x = (0.01B)^{4/3} \quad (4)$$

$$TE = Rnet - IE - H_T - G + S_h \quad (5)$$

ここに、 T_w ：河川水温、 B ：川幅、 D_x ：分散係数、 TE ：単位面積当たりの水面及び河床でのエネルギーフラックス、 h ：水深、 $c_w \rho_w$ ：水の熱容量、 x ：流下方向座標、 t ：時間座標、 $Rnet$ ：水面での正味放射量、 IE ：潜熱量、 H_T ：顕熱量、 G ：河床へ伝わる河床伝熱量、 S_h ：横流入

3-3 佐波川への適用

(a) 計算条件

対象河川は佐波川とし、対象区間は河口から4k400～23k200（図-6）、計算期間は2016/9/5～2016/12/27とした。横流入量の算出には、下流端の新橋の流量に計算区間中の合計取水量を合計したものから上流端の漆尾の流量を差し引いた流量差を各支流の面積割合によって分配した。また、佐波川は堰による取水の多い河川であるため堰による取水を考慮した。図-10に漆尾観測所の実測流量・水温、新橋観測所の実測流量及び計算区間内の合計取水量を示す。上流端には漆尾観測所で観測された流量と水温を与え、下流端は等流水深としている。また、マンニングの粗度係数は0.035を与えている。

(b) 再現性の検討

図-11に新橋地点（図-6）における実測水位と計算水位の比較を示す。実測水位と計算水位が概ね一致していることから高い再現性を持つことが分かる。

図-12 新橋地点における計算水温と実測水温の比較を示す。全体的に計算水温が過小評価となっているものの、概ね実測値と一致していることが分かる。また、計算水温の日変動が過小評価となっている。これは横流入水温の影響と考えられる。

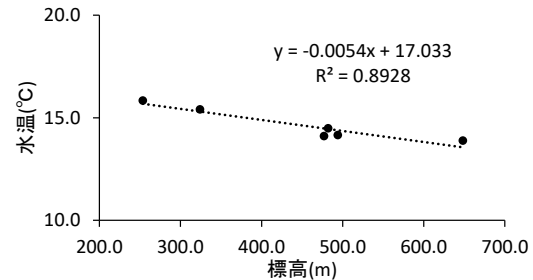


図-8 上流端水温の対象期間内における平均水温と標高の関係

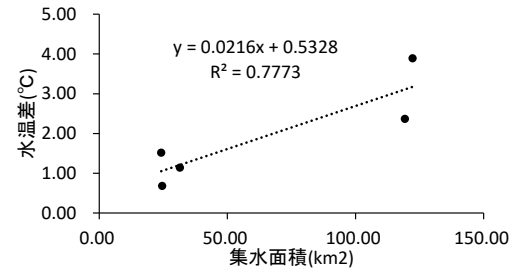


図-9 支流における上流端と下流端の水温差と集水面積の関係

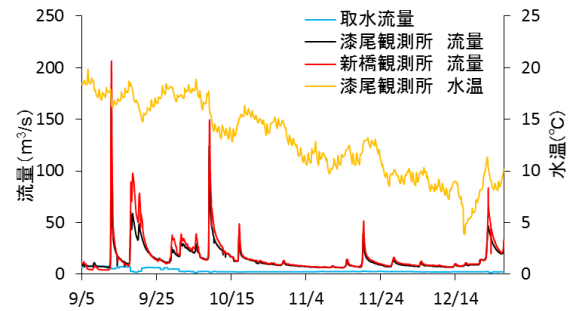


図-10 上流端流量・水温および合計取水量



図-11 新橋地点における水位の比較



図-12 新橋地点における実測水温と計算水温の比較

⑥研究成果（つづき）

3. 河川水温変化に対する魚類の応答

中国地方の1級水系である高津川、小瀬川、太田川、斐伊川を対象とし（図-13）、河川内の複数定点において設置型ロガーによる水温の連続モニタリングをおこない、さらに、それらの定点において、環境DNA分析を用いた夏季のアユの生物量モニタリングをおこなうことにより、アユの生物量と水温の関係性を明らかにすることを試みた。

図-14に、各河川における環境DNA濃度と河口からの距離との関係性について示している。高津川は、上流ほど濃度が高い傾向がみられたのに対し、小瀬川および斐伊川は、下流ほど濃度が高い傾向がみられた。太田川は河口から50km程度の中流で濃度が高くなる傾向がみられた。これらの結果から、アユの流程分布の傾向は河川により異なることが明らかとなった。また、環境DNA濃度と夏季平均水温および28℃以上の積算時間との関係性について、4河川をまとめた散布図を図-15に示す。夏季平均水温に着目した場合、河川によって濃度は異なるものの、環境DNA濃度、フラックスともに23℃付近の地点で高くなることわかる。また、28℃以上の積算時間に着目した場合、環境DNA濃度、フラックスともに、夏季平均水温に比べて明瞭な関係性がみられなかったため、アユの生物量を説明する指標としては適切ではない可能性が考えられる。

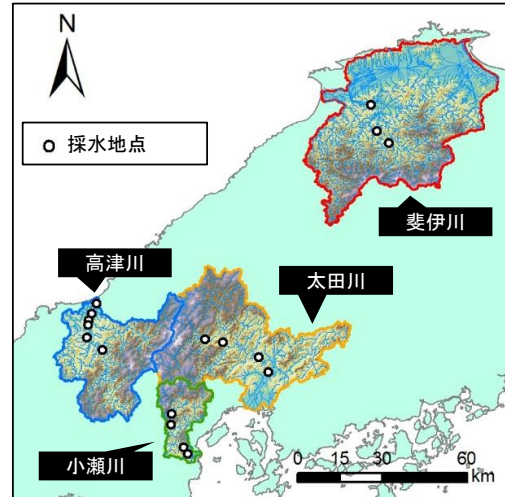


図-13 高津川、小瀬川、太田川、斐伊川の調査地点

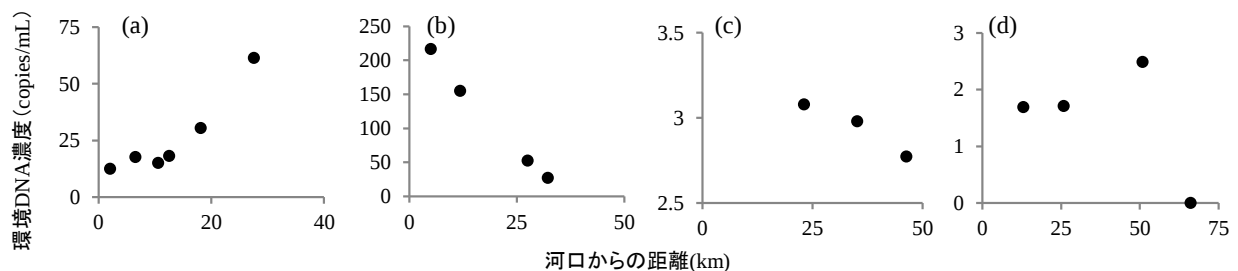


図-14 アユの環境DNA濃度と河口からの距離の関係。(a)高津川、(b)小瀬川、(c)斐伊川、(d)太田川

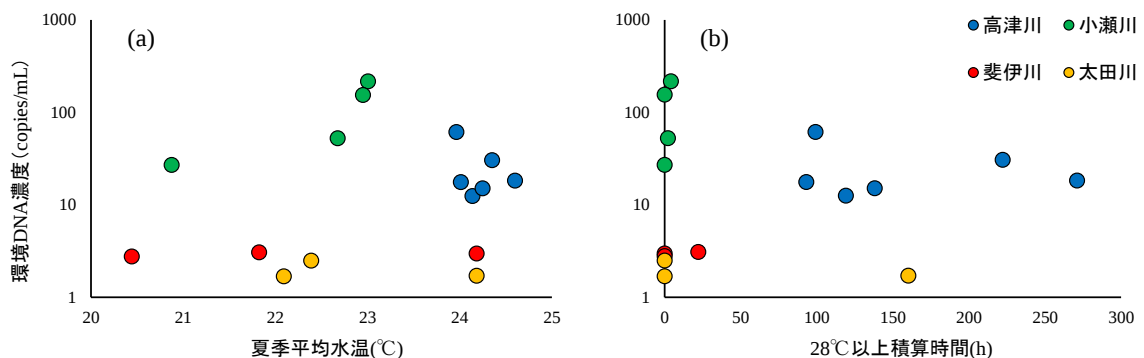


図-15 環境DNA濃度と水温（平均水温、28℃以上積算時間）の関係。(a)高津川、(b)小瀬川、(c)斐伊川、(d)太田川

⑥研究成果（つづき）

4. まとめ

本研究では中国地方の複数流域における網羅的な水温の連続モニタリングで流域水温変動特性を明らかにするとともに、環境 DNA 技術を用いた魚類の現存量モニタリングを実施した。その結果、アユはカジカといった魚類は水温に対応した生息分布をしており、魚類の資源保全を考える上で、河川ごとに水温の連続的なモニタリングをおこない、どの流程に好適生息水温環境が存在するのかを把握した上で、天然遡上アユが好適水温環境まで遡上できるような河川管理や、適切な水温環境への種苗放流等を考慮する必要があることが示された。

また、これらの結果から、魚類の資源保全を考える上で、河川ごとに水温の連続的なモニタリングをおこない、どの流程に好適生息水温環境が存在するのかを把握した上で、天然遡上アユが好適水温環境まで遡上できるような河川管理や、適切な水温環境への種苗放流等を考慮する必要があることが明らかとなった。また、先行研究により、土地利用や、ダムの操作により河川の水温が変化していることが示唆されているため、河川の状況によっては、積極的な水温管理が、アユの資源量を増加させる可能性も考えられる。本研究はアユのみに着目したものであるが、河川水温は、サケ科魚類やカジカ科魚類のような冷水性魚類の生息状況には、より大きな影響を与える可能性が考えられる。よって、今後はそれらの種を含めた複数分類群を対象に、水温と生息状況との関係性を明らかにしていくことが、河川生態系保全への課題である。

さらに、流域内の水温分布を予測するモデルと水温と生物量の関係を用いた、気候変動に対する魚類をはじめとして河川生態系の応答を明らかにすることが今後の課題である。

⑦研究成果の発表状況

・国際会議、学会等における発表状況

- 1) 乾 隆帝・赤松良久・高原輝彦・後藤益滋・一松 晃弘：流水中におけるカワムツの生物量と環境DNA量の関係性－水路実験と野外への適用－，河川技術論文集，第23巻，pp.651-656，2017.
(2017年6月 東京大学)
- 2) 乾 隆帝・赤松 良久・高原 輝彦・後藤 益滋・一松 晃弘：河川性コイ科魚類カワムツの生物量と環境DNA量の関係性，土木学会中国支部，広島大学，2017年5月
- 3) 河野誉仁，赤松良久，乾隆帝：河川水温予測モデルの開発と佐波川への適用，環境水理部会研究集会2017 in鹿児島，2017.
- 4) 河野誉仁，赤松良久，乾隆帝：佐波川における水温予測モデルの開発，平成29年度全国大会第72回年次学術講演会，II-081，2017.
- 5) 赤松良久，河野誉仁，乾 隆帝，宮本仁志：中国地方一級河川における河川水温変動特性，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73, No.4, I_1207-I_1212, 2017. (2017年3月 九州大学)

・主要雑誌・新聞等への成果発表

- 1) 乾 隆帝・赤松良久・高原輝彦・後藤益滋・一松 晃弘：流水中におけるカワムツの生物量と環境DNA量の関係性－水路実験と野外への適用－，河川技術論文集，第23巻，pp.651-656，2017.
- 2) 赤松良久，河野誉仁，乾 隆帝，宮本仁志：中国地方一級河川における河川水温変動特性，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73, No.4, I_1207-I_1212, 2017.

⑧研究成果の社会への情報発信

該当なし

⑨表彰、受領歴

該当なし

⑩研究の今後の課題・展望等

各研究項目 1) 河川水温連続モニタリング, 2) シミレーションモデルの構築, 3) 魚類量モニタリングそれぞれに関して, 今後の課題・展望を以下に示す.

1) 河川水温連続モニタリング: 2016年8月から高津川, 佐波川, 小瀬川流域における網羅的な水温モニタリングを実施している. 佐波川での結果から, 本川に流入する支流の水温は秋水面積や標高から簡易的に予測することが可能であることが示されており, この結果が他の河川にも適用可能であれば, 今後の簡易的な水温予測に大きく貢献する.

2) シミレーションモデルの構築: 佐波川を対象に, 横流入や河床との熱交換を考慮した水温予測モデルを構築した. しかし, 現在は河川測量が定期的に行われている直轄区間のみを対象としているため, 今後上流や支川も含めた予測モデルを構築する必要がある. 河川測量データの存在しない区間における河床形状の把握が今後の課題になると考えられるが, これについてはドローンによる地形測量等の導入を検討している.

3) 魚類量モニタリング: 環境DNA濃度によって, アユの現存量をとらえることが可能であり, 定期的に流域の上流から下流にわたる環境DNA濃度を計測することによって, アユの遡上や産卵期の降下という動態も明らかにすることができると考えられる. また, 成長期のアユの環境DNA濃度の増加量と河川水温の関係も明らかにすることができる.

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

環境DNA分析によりアユの現存量の定量化に関してはすでに実際の業務に適用されつつあり, 2016, 2017年度は浜田河川国道事務所から依頼を受けて, アユの産卵期に, 産卵場周辺のアユの環境DNA濃度の計測を行っている.