

徳島県日和佐川における可搬魚道の設置がアユ の河川内分布におよぼす効果

EVALUATING EFFECT OF PORTABLE FISHWAY INSTALLATION ON THE IN-STREAM DISTRIBUTION OF *PLECOGLOSSUS ALTIVELIS ALTIVELIS* IN THE HIWASA RIVER, TOKUSHIMA PREFECTURE

齋藤 稔^{1,2}, 高橋直己³, 小部博正⁴, 米澤隆志⁵, 米澤孝康⁶, 赤松良久⁷, 中尾
遼平⁸, 岡 直宏⁹, 浜野龍夫¹⁰

Minoru SAITO, Naoki TAKAHASHI, Masahiro KOBE, Takashi YONEZAWA,
Takayasu YONEZAWA, Yoshihisa AKAMATSU, Ryohei NAKAO, Naohiro OKA and
Tatsuo HAMANO

¹正会員 学術博 山口大学大学院学術研究員 創成科学研究科 (〒755-0097
山口県宇部市常盤台2-16-1)

²四国の右下生き物研究会 (〒770-0861 徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り 壱96-14)

³正会員 農博 香川高等専門学校講師 建設環境工学科 (〒761-8058 香川県高松市勅使町355)

⁴非会員 NPO法人ひわさ町おこし隊 (〒779-2305 徳島県海部郡美波町奥河内字弁才天139-2)

⁵非会員 NPO法人ひわさ町おこし隊 (〒779-2305 徳島県海部郡美波町奥河内字弁才天139-2)

⁶非会員 学術修 四国の右下生き物研究会 (〒770-0861 徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り 壱96-14)

⁷正会員 工博 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁸正会員 農博 山口大学大学院特任助教 創成科学研究科 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁹非会員 学術博 徳島大学大学院講師 生物資源産業学部附属水圏教育研究センター (〒770-0861
徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り 壱96-14)

¹⁰非会員 農博 徳島大学大学院教授 生物資源産業学部附属水圏教育研究センター (〒770-0861
徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り 壱96-14)

We tested the effects of portable fishway installation in restoring upstream population of the Ayu *Plecoglossus altivelis altivelis* in the Hiwasa River, Japan. Roughly 60000 and 350 Ayu ascended through the portable fishway in 2018 and 2019, respectively. Density of Ayu in 2018 compared to those in 2017 was higher in the upper reaches while lower in the lower reaches, insisting that the portable fishway installation helped restoring the longitudinal connectivity for the fish species. In contrast, fishway installation of the same type in 2019 did not assist upstream migration of the fish as in 2018, partly due to the lower number of recruitments in the year and difficulty in gathering fish around the fishway entrance. Results of environmental DNA analysis correlated with snorkel counts in May 2019 but not in September 2019 in the river. Continued surveys are needed to clarify the effects of portable fishway installation in rehabilitating longitudinal connectivity in the river, as the recruitment of the fish change annually.

Key Words : stream, rehabilitation, diadromy, upstream migration, snorkel counting, eDNA

1. はじめに

徳島県南部の日和佐川は、自然の河床や河岸が残された太平洋に注ぐ中規模河川で、海と川とを行き来する通し回遊性の魚類、エビ・カニ類が多い。しかし、中・下流には魚道が設置されていない、もしくは設置されていても河床低下や隔壁破損により魚道が機能していない農

業用堰堤が存在する。堰堤の下には遡上が阻害されたアユやハゼ類が滞留していることも多く、本河川の生態系を健全に保つ上での大きな課題となっている。そこで、これら通し回遊種の遡上経路を復元可能な魚道^{1) 2)}を設置することとした。日本国内において、魚道の設置効果の評価は魚道での遡上状況の調査が中心であり³⁾、通し回遊性生物を網羅した調査事例も存在する⁴⁾。しかし、

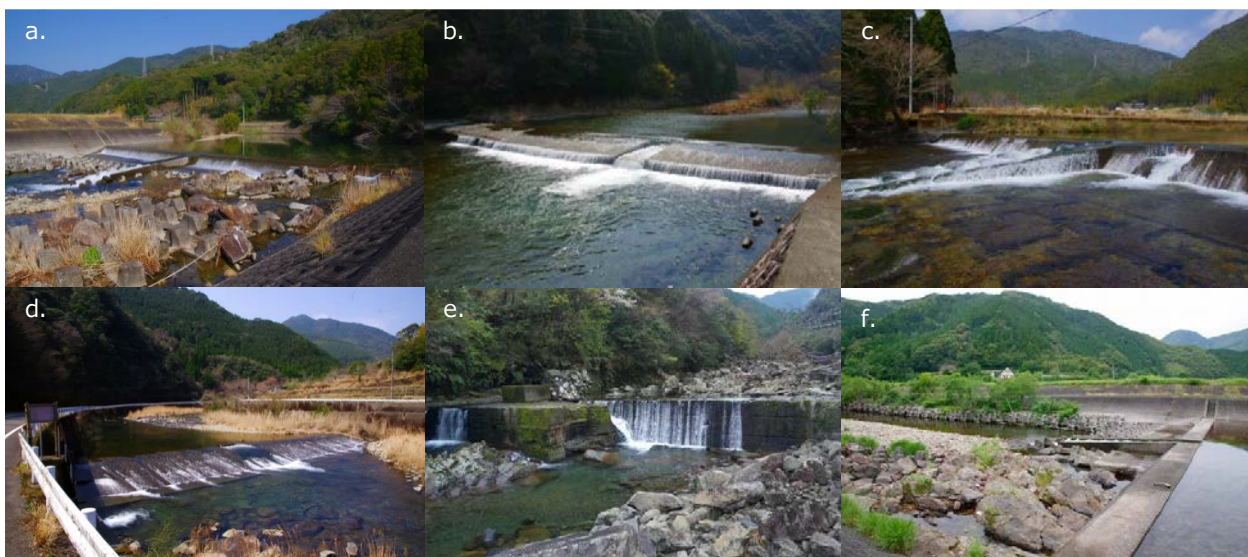


図-1 日和佐川の中下流域とアユ遡上上限の堰堤。a：庄瀬落差工；b：虎見堰；c：中村堰；d：落合堰；e：アユ遡上上限の落差工；f：平水時の堰堤 a. 堰堤aでは水が堰堤の下を伏流しており，平水時には堰を越流しない。

魚道での遡上状況に加えて河川内分布の変化を追跡調査し，魚道設置による生態系復元効果を推定した事例は極めて限られている⁵⁾。

本研究では，アユ*Plecoglossus altivelis altivelis*を対象として，魚道設置がアユの河川内分布におよぼす効果の評価を試みた。本種は年魚であり⁶⁾，遡上阻害緩和がその年の分布に反映される。また，調査方法や生態に関する知見が蓄積されており⁶⁾，⁷⁾ 評価対象種として適している。まず，アユの河川内分布を調べて遡上阻害の影響が大きい堰堤を特定し，魚道への通水のしやすさを考慮して魚道の設置箇所を選定した。続いて，人力で容易に設置・撤収が行え，流況に応じて運用方法を調整可能な木製可搬魚道²⁾を設置し，魚道でのアユの遡上個体数を計数した。同時に，魚道設置前と同様にアユの河川内分布を調査した。

2. 材料と方法

(1) 魚道設置前における堰堤によるアユの遡上阻害

堰堤によるアユの遡上阻害の現状を把握するため，魚道設置前の2017年5月，7月，9月にそれぞれ1回ずつ，潜水目視調査を行った。調査定点は，中・下流域にある4箇所(図-2；下流側から順にa～d；河口からの距離：順に4.1, 5.3, 6.4, 9.7 km)の影響を網羅し，かつ堰堤直下に滞留した個体が調査範囲内に入らない6～8箇所とした(図-2；下流から順に定点1～9)。調査範囲はそれぞれの定点で1瀬・淵ユニット以上，かつ河道縦断方向で50m以上とし，アユの生息密度を河床型単位で記録した。アユの遡上が完了する7月⁶⁾には，投網や刺網にて潜水目視を行った定点の一部と堰堤直下(堰堤dのみ堰堤の上流側)にて1地点当り10個体以上を目安として採集を行った。標準体長と体重を記録した後，次の式(肥

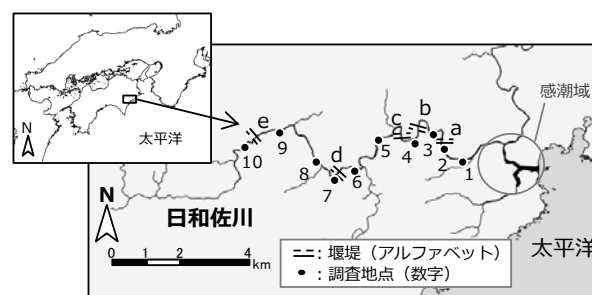


図-2 日和佐川における中・下流域の堰堤と調査定点。

満度 $=(\text{体重}/\text{体長}^3) \times 1000$)にて肥満度を求めた⁷⁾。加えて，人工種苗では下顎孔列の配列に8割程度の高確率で異常が発生すること⁸⁾を利用して天然遡上個体と人工種苗由来の個体を簡易的に判別し，海からの遡上範囲を推定した。10月中旬には定点1のやや下流に位置する産卵場周辺においてもアユの採集を行って同様に計測した。

(2) 可搬魚道の設置・運用とアユの遡上

通し回遊種の遡上阻害緩和を目的として流域単位で魚道整備計画を立てる際には，下流側の堰堤から優先して進めることが効果的である。日和佐川の場合，最下流の堰堤aでは平水時には水が堰堤を越流していないため，魚道への導水が困難である。加えて，現在設置されている魚道は河床洗掘の結果入口に落差が生じており，機能していない(図-1)。一方，魚道に導水が可能な水位となる出水の後には，河岸近くの岩盤によって形成されたプールや水際の流れを伝ってアユやハゼ類が遡上していた。堰堤bには魚道が設置されておらず，堰堤下流側法面の勾配が流心付近で垂直，右岸側の一部区間が2/3と急であった(図-1)。さらに，平水時には，アユが堰堤を越えることが困難な65cm以上の落差⁹⁾が生じる。2017年のアユ分布調査の結果，堰堤cまでの区間ではアユの

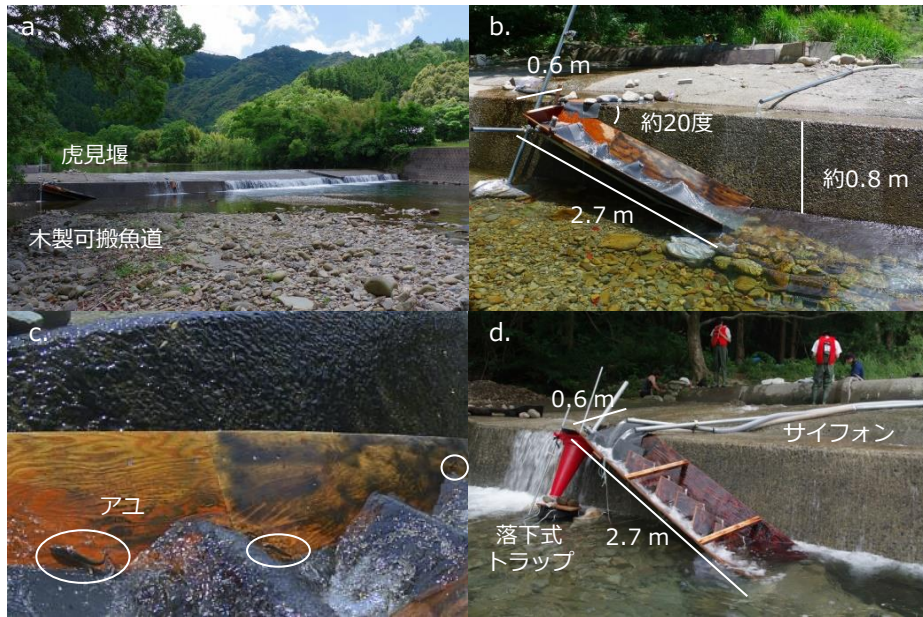


図-3 日和佐川虎見堰における可搬魚道の設置状況とアユ遡上の様子。a：堰堤全景；b：2018年設置魚道；c：2018年設置魚道を遡上するアユ；d：2019年設置魚道。

遡上阻害が生じている一方、堰堤dでは、遡上阻害が生じていないと考えられた。これらから、堰堤bを可搬魚道設置箇所とした。

堰堤bに、河川において天然アユの遡上実績がある木製の可搬魚道²⁾を設置した。この魚道は、V字断面のプール型であり、安価で人力で容易に設置ができるため、固定式の魚道を整備するのが困難な箇所での運用に適している²⁾。2018年にはそれぞれの堰板の下流側にゴム板を取り付けて斜路としたものと隔壁を魚道底面に対して35度に傾けて剥離流の発生を抑えたもの¹⁰⁾との2基を、2019年には後者1基を断続的に運用した(図-3)。魚道は、堰堤に平行して設置し、魚道入口付近に礫を積み上げて川底と繋ぐことで河床に沿って生物が進入しやすいよう配慮した。2018年には堰堤からの越流量が少ない場合、2019年には設置期間を通して、サイフォンで魚道に導水した。魚道の設置状況の詳細と魚道内での流況については、高橋ら(2019)¹⁰⁾を参照されたい。設置期間は、その年の堰堤aでの越流状況、アユの遡上状況と台風による出水の影響を考慮して2018年は4月中旬から6月下旬、2019年は5月上旬から6月下旬とした。大規模な出水が予想される場合、事前に可搬魚道を引き上げた。

2018年には、可搬魚道の上端付近にタイムラプスカメラを設置した。10秒間隔で撮影したタイムラプス画像をおおむね4日おきに、日中毎時10分間ずつ確認し、アユの個体数を記録した。2019年には魚道上端に落下式のトラップを設置して(図-3)原則毎日1回取り上げた。採捕されたアユの個体数を計数した後、堰堤の上流側に放流した。タイムラプスカメラ画像から遡上個体数を推定するため、同時に撮影した動画での遡上個体数と比較した。10秒間隔で撮影したタイムラプス画像、および同時

に撮影した動画を10分ごとに分割した。画像での確認個体数をx、動画での確認個体数(実際に遡上した個体数)をyとして、直線回帰分析を行った。得られた回帰式にて、画像上の個体数を遡上個体数に換算した。

(3) 可搬魚道設置がアユの分布におよぼす効果

可搬魚道を設置した2018年と2019年に、2017年と同様の方法でアユの河川内分布を調査した。調査定点は、2017年に調査を実施した9定点全てとした(図-2)。

アユの分布調査に用いた潜水目視調査は、採捕と異なり対象種の分布に影響を及ぼさず、比較的短時間で複数地点の調査を行える⁷⁾。反面、調査担当者によってばらつきが生じることが指摘されており¹¹⁾、複数年に渡ってモニタリングを継続する上での障壁となりうる。そこで、水中から対象種のDNAを検出・定量して分布密度を相対的に評価できる環境DNA分析^{12), 13), 14)}に着目した。本手法における現地作業は採水のみであり¹²⁾、調査担当者の影響が軽微である。山口県の佐波川では、河川生活期を通して、アユの河川内分布を相対的に評価できると報告されている¹⁴⁾。本河川におけるアユの分布モニタリングに環境DNA分析を活用できるか検討するため、2019年の調査では、潜水目視と同じ9定点の早瀬下流側にてそれぞれ底層水を1Lずつ採水し、結果を比較した。サンプルに含まれるDNAの分解を抑制するため、塩化ベンザルコニウムを現地で0.1%の濃度で添加し、氷冷して研究室に持ち帰った。採水瓶は、DNAを除去するため事前に10%次亜塩素酸漂白剤で洗浄し、イオン交換水ですすいだ。輸送過程でのDNAの混入の有無を確認するため、イオン交換水1Lをクーラーボックスに入れて持ち運び、クーラーブランクとしてサンプルと同様に処

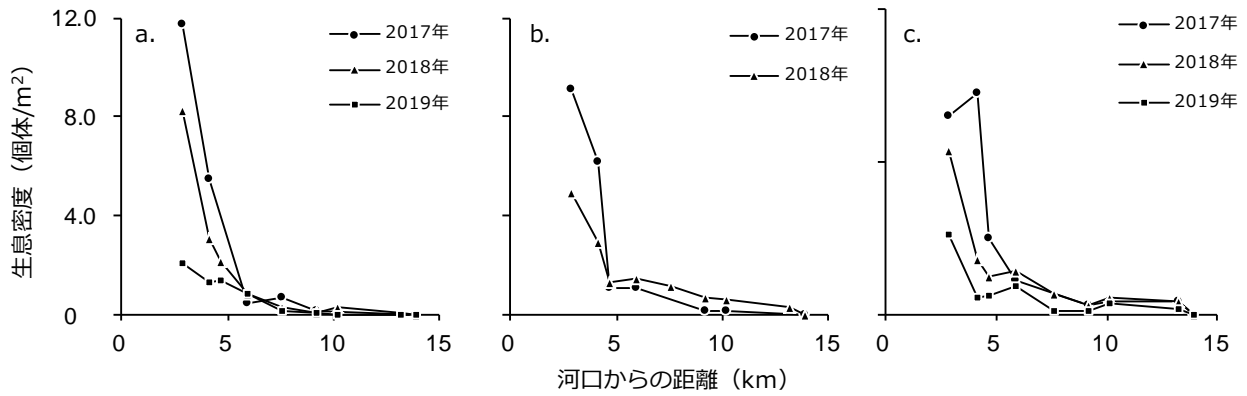


図4 アユの生息密度. a:5月;b:7月;c:9月.

理した. なお, 採水は潜水目視調査に先立って実施した.

採水サンプルは, ガラス繊維濾紙 (口径 $0.7\mu\text{m}$; GF/F, GE Helathcare社製) を用いて吸引濾過し, -20°C で冷凍保存した. サリベットチューブ (Sarstedt社製) とDNA抽出キット (DNeasy Blood & Tissue Kit, Qiagen社製) を用いてDNAを抽出し, アユを特異的に検出するプライマーと蛍光プローブのセット¹⁴⁾ を用いてCFX Connect Real-Time PCR Detection System (Bio-Rad社製) にてPCRにかけた. 既知の濃度に調整したスタンダードDNA ($6.0 \times 10^1 \sim 10^5$ コピー/ μl) を標準試料として引いた検量線と比較し, アユのDNA濃度を定量化した. 標準試料には, プラスミドによってクローニングされたアユの人工DNA¹⁵⁾ を用いた. 野外サンプル・スタンダードDNAともに3反復分析し, それらの平均値を解析に用いた.

3. 結果と考察

(1) 魚道設置前における堰堤によるアユの遡上阻害

2017年におけるアユの生息密度は, 最下流の堰堤aまでの区間では調査期間を通して 4 個体/ m^2 以上と高く (図-4), 下流から3箇所目の堰堤cより上流では期間を通して 0.5 個体/ m^2 未満と低かった. また, 栄養状態の良否を示す肥満度は, アユの遡上がおおむね完了した7月の段階で, 堰堤cより下流では中央値が10前後と低かった (図-5). そのため, 堰堤cまでの区間においては堰堤によってアユの遡上が阻害されており, 中・上流域におけるアユの生息密度が環境収容量よりも低くなっていると考えられた. 堰堤dの上流と下流 (定点7, 8) ではアユの体サイズに違いは認められず, それより下流の堰堤3箇所と異なり, 肥満度も15前後と産卵期と同等の高い値を示したため (図-5), 堰堤dでは遡上阻害は生じていないと考えられた. 堰堤a~cに挟まれた区間では5月から7月の間に生息密度が上昇しており (図-4), アユが成長して遊泳力が高まるに従って, 遡上に成功する個体が増えたと考えられた.

2017年に日和佐川で放流されたアユは海産種苗 110kg ,

約 13000 尾であり, 放流時期は4月下旬と5月中旬, 放流箇所は定点5, 堰堤d, および定点7の上流約 500m の地点であった (図-2). 堰堤cより上流側で採捕された62個体のうち, 下顎の側線孔列に異常が認められて放流個体であると判断されたのは 24% にあたる 15 個体であった. したがって, 堰堤による遡上阻害が認められるものの, 中・上流域に生息する大部分の個体が天然遡上であると推定された. 10月における産卵場周辺では, 体長 20cm を超える大型個体から体長 5cm 程度と河川加入後ほとんど成長できていないと思われる個体までが採集された. 産卵のために降下してきたと考えられる体長 15cm を超える大型個体 30 個体のうち, 43% に当たる 13 個体には下顎孔列に異常が認められ, 放流種苗由来であると考えられた. 堰堤cより上流においてはアユの環境収容量に達していないと考えられること, この区間でも海から遡上した天然個体が大部分を占め, 先に放流された種苗と同等の大きさまで成長する例も認められたことから, 魚道を設置することで, 日和佐川の中・上流域におけるアユの個体群の復元に寄与できると推察された.

(2) 可搬魚道でのアユの遡上

10秒間隔で撮影したタイムラプスカメラの画像上で確認されたアユの個体数 (x) と動画での遡上個体数 (y) の間には, 10分単位で区切って比較したところ, 有意な直線回帰式が得られた ($y=3.52x+6.98$, $r^2=0.867$, $p<0.05$). この換算式を用いて2018年に可搬魚道を遡上したアユの個体数を推定し, 調査日数で乗じた結果, 約 6 万個体が遡上したと考えられた. 2019年には, 落下式トラップにてアユ合計 346 個体の遡上を確認した.

(3) 可搬魚道設置がアユの分布におよぼす効果

2018年5月時点での定点1, 2におけるアユの生息密度は, 魚道設置前の2017年に比べて低く, 加入量が相対的に少なかったと考えられた (図-4). アユの遡上が概ね終了する7月⁴⁾におけるアユの密度は, 最下流の定点1で約 5 個体/ m^2 , 定点2で約 3 個体/ m^2 と2017年に比べて高く, 定点3より上流では上流ほど密度がやや低下する傾向が

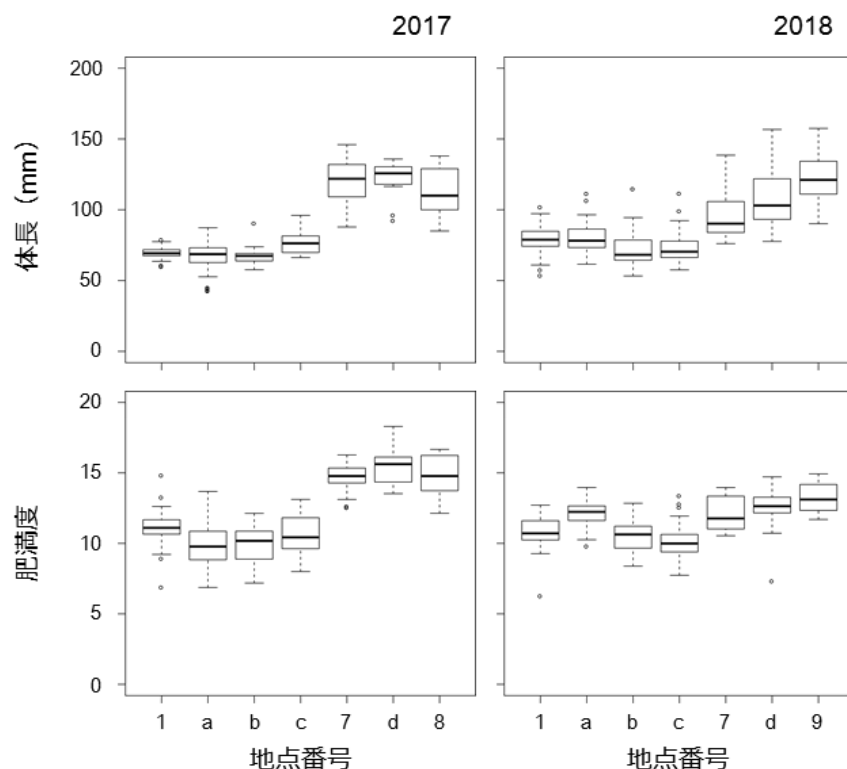


図-5 2017年(左)と2018年(右)における7月時点でのアユの体長(上)と肥満度(下)の箱ひげ図。地点番号は、図-1に示したアユの潜水目視定点(数字), および堰堤(アルファベット)と対応し、堰堤bが可搬魚道設置箇所。

示された(図-4)。定点3では、生息密度の折れ線グラフに屈曲点が認められた。したがって、この定点の下流側に位置する最下流の堰堤aがアユの遡上を阻害している実態が改めて示された。体長・肥満度ともに、2017年と異なり、上流寄りと下流寄りの定点間で値に明瞭な乖離は生じていなかった(図-5)。下流寄りの定点では2017年に比べて体サイズと肥満度が大きく、生息密度の低下に伴い成長率が上昇したと考えられた。また、上流寄りの定点においても2017年に比べて体サイズの小型化や肥満度の大幅な低下が生じていないことから(図-5)、これらの地点におけるアユの環境収容量には達していないと推察された。これらから2018年の堰堤bにおける可搬魚道設置は、5月～6月に出水が多かったことと併せて、下流域におけるアユの滞留改善や河川内分布の上流寄りにおけるアユの生息密度向上につながり、日和佐川中・上流域におけるアユの個体数増加に部分的に寄与したと考えられた。

2019年5月時点では下流域での生息密度が2017年と2018年に比べて低く、最下流の定点1では2018年の約1/4にあたる約2個体/m²であった(図-4)。魚道設置箇所の上流にあたる定点4～5では2018年と同等であり、定点6とその上流では0.1個体/m²未満と極めて生息密度が低かった。2019年7月には、梅雨の増水の影響で潜水目視、および採捕調査を実施できなかった。9月には、定点1、7と8では5月の密度を上回ったものの、それ以外の定点では5月と同等以下であり、2017年と2018年に比べて低い

値であった。6月下旬には、魚道を設置している堰b直下にアユが滞留していない状態となっており、期間を通しての可搬魚道でのアユ遡上個体数も約350個体と少なかった。以上の結果から、2019年はアユの加入量、または遡上開始までの生残率が低く、堰で滞留しにくい状態であったと言える。従って、2019年の可搬魚道設置は、魚道の形状面ではアユが十分遡上可能であるものの¹⁰⁾、アユの加入量や魚道運用の問題から、遡上阻害緩和効果は限定的であった。

2019年のアユの生息密度と環境DNA濃度との間には、5月では正の順位相関が示された(ケンドールの順位相関係数; $\tau=0.888$, $p<0.01$)。そのため、アユの加入期にあたる5月時点では既往研究¹³⁾と同様に、本河川においても環境DNA分析にて分布密度の相対的な評価を簡易に行えることが示された。一方、9月では、相関関係は認められなかった($p>0.05$)(図-6)。産卵期前にあたる9月はアユの成長が進んでおり、生息密度と生物量のずれが大きくなる。同じ個体数を用いた水槽実験では、水温や生物量によって環境DNA含有物質の分泌や分解速度が変化するとの報告があり¹⁶⁾、少なくとも秋においては、環境DNAが生息密度よりも、生物量を反映している可能性が考えられた。本研究では秋にアユのDNA濃度と生息密度とが相関しない要因を特定できなかったため、継続調査でアユの降下や流況との関係についても検討する必要がある。

4. おわりに

徳島県南部の日和佐川中流域における可搬魚道の設置効果を評価するため、魚道でのアユの遡上状況と魚道設置前後でのアユの河川内分布の変化を調査した。魚道設置前の2017年におけるアユの分布状況、堰堤の通水状況と性状に基づき、下流から2箇所目の堰堤への魚道設置がアユの遡上阻害緩和につながると判断した。2018年には、魚道で約6万個体の遡上を確認し、魚道設置前に比べて下流域におけるアユの密度が低く、体サイズ、肥満度も大きかった。加えて、上流域でのアユの密度が高くなったため、小型の可搬魚道2基の設置のみでも、6月までの降水量の多さと併せて、日和佐川におけるアユの個体群復元に寄与したと推察された。一方、2019年には前年と同様にアユの遡上実績を有する魚道を設置したにも関わらず遡上個体数が1/100以下となったため、アユを安定して魚道入口へ誘導する手法を確立するとともに、魚道複数基の運用が求められる。担当者が変わってもアユの分布を継続的にモニタリング可能な体制を整えるため、本河川における潜水目視結果と環境DNA分析との関係性を評価した。アユの加入期にあたる5月には、分布密度の相対的な評価を簡易に行えた。一方、産卵期前の9月では生息密度と環境DNA濃度が相関せず、生物量での評価や流況、アユの降下状況との関係を検討する必要があると考えられた。年魚であるアユの遡上量は加入量や降水量等によって年ごとに大きく変動するため、今後も魚道設置とアユの分布状況のモニタリングを継続することが重要である。

謝辞：魚道設置と現地調査にあたっては、故石田寛次氏、大谷純治氏、梶原慧太郎氏・御処野 誠氏、宮岡勇輝氏、宮園誠二博士、香川高専高橋研究室の皆様、四国の右下生き物研究会の皆様、徳島科学技術高校海洋コースの皆様、徳島県県土整備部河川整備課、虎見用水組合はじめ、多くの方々にご協力いただきました。本研究の一部は、四国の右下生き物研究会への日垂ふるさと振興財団、神戸市立須磨海浜水族園スマスイ自然環境保全助成からの助成により実施しました。御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 浜野龍夫編：水辺の小わざ改訂増補第二版，山口県土木建築部河川課，2016。
- 2) 高橋直己，長尾涼平，林 和彦，多川 正：V型断面簡易魚道の流況特性と小型水生生物の魚道利用状況，土木学会論文集B1（水工学），73巻，pp.I_391-I_396, 2017。
- 3) 高橋剛一郎：魚道の評価をめぐって，応用生態工学，3巻，pp.199-208，2000。
- 4) 畑間俊弘：扇型簡易粗石付き斜路式魚道（"水辺の小わざ"魚道）の設置効果について，山口県水産研究センター研究報告，9号，pp.137-164, 2011。

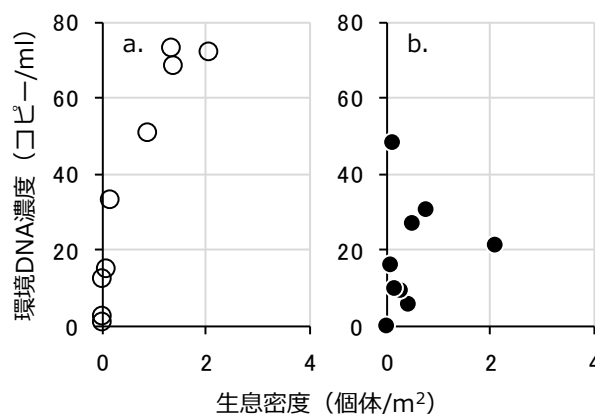


図-6 2019年5月(a)と9月(b)におけるアユの生息密度と環境DNA濃度の関係。

- 5) 下田和孝，中野 繁，小野有五：プールタイプ魚道の設置が北海道の通し回遊魚の流程分布に与える効果，魚類学雑誌，50巻，pp.15-23, 2003。
- 6) 高橋勇夫，東 健作：天然アユの本，築地書館，2016。
- 7) 水野信彦：魚類の生態学的研究，河川の生態学補訂・新装版，水野信彦，御勢久右衛門，築地書館，pp.104-214, 1993。
- 8) 占部敦史，海野徹也：人工および天然アユにおける計数形質の比較，日本水産学会誌，84巻，pp.70-80, 2017。
- 9) 小山長雄：アユの生態，中央公論社，1978。
- 10) 高橋直己，木下兼人，齋藤 稔，柳川竜一，多川 正：実河川におけるV形断面可搬魚道を用いた水生動物の遡上と魚道内流速特性，土木学会論文集B1（水工学），75巻，pp.I_565-I_570, 2019。
- 11) 高橋勇夫，岸野 底：奈半利川におけるアユの生息数と減耗率の潜水目視法による推定，応用生態工学，19巻，pp.233-244, 2017。
- 12) 高原輝彦，山中裕樹，源 利文，土居秀幸，内井喜美子：環境DNA分析の手法開発の現状～淡水域の研究事例を中心にして～，日本生態学会誌，66巻，pp.583-599, 2016。
- 13) Takahara, T., Minamoto, T., Yamanaka, H., Doi, H. and Kawabata, Z.: Estimation of fish biomass using environmental DNA, *Plos One*, Vol.7, e35868, 2012。
- 14) Doi, H., Inui, R., Akamatsu, Y., Kanno, K., Yamanaka, H., Takahara, T. and Minamoto, T.: Environmental DNA analysis for estimating the abundance and biomass of stream fish, *Freshw. Biol.*, Vol.62, pp.30-39, 2017。
- 15) Yamanaka, H. and Minamoto, T.: The use of environmental DNA of fishes as an efficient method of determining habitat connectivity, *Ecol. Indic.*, Vol.62, pp.147-153, 2016。
- 16) Jo, T., Murakami, H., Yamamoto, S., Masuda, R. and Minamoto, T.: Effect of water temperature and fish biomass on environmental DNA shedding, degradation, and size distribution. *Ecol. Evol.*, Vol.9, pp.1135-1146, 2019。

(2020. 4. 2受付)