

環境 DNA 濃度による多摩川流域におけるアユの 生息状況の把握

Understanding of Inhabiting Situation of Ayu *Plecoglossus altivelis* in the River Basin of Tama River Based on the Environmental DNA Concentration

自然環境グループ	研 究 員	内藤 太輔
山口大学大学院	准 教 授	赤松 良久
山口大学大学院	特 命 助 教	乾 隆帝
山口大学大学院	学 術 研 究 員	後藤 益滋
山口大学大学院	特 命 助 教	小室 隆
日本工営株式会社	課 長	今村 史子

近年発展が著しい環境 DNA 分析は、現場での作業が採水のみで負担が少ないことに加え、採水箇所のアユの生物量（個体数や現存量）の大小を相対的に評価できる段階にまで至っている。本研究では、この環境 DNA 分析を用いて、多摩川とその支川を含む広域において、アユの河川生活期の生息範囲を明らかにするとともに、アユの生息密度の分布を把握し、多摩川本川で特に生息密度が高い範囲を特定した。特定された生息密度の高い範囲と河川水辺の国勢調査で確認個体数の多かった範囲がほぼ一致し、環境 DNA によるアユの生息密度の推定が捕獲調査と整合することを確認した。

また、本研究と同様の手法でアユの環境 DNA を定量化した佐波川、高津川と比較した結果、今回得られた多摩川の環境 DNA 濃度が極めて高く、多摩川のアユ資源量が多いことが示唆された。

キーワード：環境 DNA、アユ、定量 PCR、河川水辺の国勢調査、河川生態、水産資源

Environmental DNA analysis, which has been developing significantly in recent years, not only requires less workload (only water needs to be sampled on site) but also has reached a stage where it can perform a relative evaluation of biomass size (population and standing crop) of Japanese trout at a sampling place. In this research, we used that environmental DNA analysis to clarify the range of the inhabitation of Ayu (*Plecoglossus altivelis*) during its river-living period in the wide area of Tama River, including its subsidiary streams, understand the habitat density distribution of Ayu, and identify the area of Tama River main stream where the habitat density is particularly high. We confirmed that the identified area with a high habitat density roughly matched the area where the National Survey on River Environments revealed a high population, and that the habitat density of Japanese trout that was estimated in the environmental DNA was consistent with the result of a catching investigation.

In addition, as a result of a comparison with the results of Saba River and Takatsu River, which were obtained by quantifying the environmental DNA of Ayu in the same method as this research, it was suggested that the environmental DNA concentration at Tama River, which we obtained in this research, was extremely high and there were large numbers of Japanese trout stock in Tama River.

Keywords: environmental DNA, Ayu (*Plecoglossus altivelis*), quantified PCR, National Survey on River Environments, river ecosystem, fishery stock

1. はじめに

アユ (*Plecoglossus altivelis*) は、河川における漁業対象として最も重要な種の一つである¹⁾。しかし、農林水産統計によるとアユの漁獲量は全国的には減少傾向であり²⁾、河川におけるアユ資源量の減少が懸念されている (図-1)。

一方、東京都島しょ農林水産総合センターが公表している1983年以降の多摩川のアユ推定遡上数は、1990年代から徐々に増加し、2011年で急増、2012年には1000万尾を超えた。しかし、2013年以降は減少傾向に転じ、2017年の推定遡上数は158万尾となっている (図-1)。多摩川のアユの急増の要因としては、東京湾の環境改善、河川水質の改善、魚道整備等による遡上可能範囲の拡大が挙げられているが³⁾、減少傾向の原因については、まだ十分に解明されていない。

多くの河川でアユの放流や産卵場の保護等の増殖策が行われているが、それらについての有効性を科学的に明らかにした例は、静岡県得天竜川や鳥取県の日野川、高知県の奈半利川等の一部の河川に限られている⁴⁾。その理由として、両側回遊魚であるアユは生活史の中で河川と海域を利用し、成長段階によっても生息環境や行動様式を変えることから、生活史の各段階における資源量の把握が困難で、影響を受ける要因が多岐にわたることが挙げられる^{5)~8)}。

多摩川においてもアユの資源量を把握する定期的な調査は調布堰の遡上個体数調査などに限られており、生活史の各段階における現存量に関する情報は少ない。

河川におけるアユの資源量の把握と減少要因の解明のためには、河川の広範囲にわたってアユの資源量を定期的に把握する必要があるが、従来おこなわれてきた採集や目視では技術的、コスト的に不可能な場合が多かった。しかしながら、近年発展が著しい環境DNA分析により^{9)~11)}、水中に含まれるアユのDNA量が、その箇所にも生息するアユの生物量 (個体数や現存量) と強い関係性があることが明らかになっているため (図-2)¹²⁾、環境DNA分析をおこなうことにより、その箇所のアユの生物量の大小を相対的に評価できる段階にまで至っている。

本研究では、現地での作業負担が少ない環境DNA分析の利点を活かし、多摩川およびその支川の69地点で採水し、環境DNA分析をすることで定量的に広域でのアユの分布特性を把握することを試みた。また、同様の手法でアユの環境DNA分析を行っている佐波川、高津川の環境DNA濃度と比較することで、多摩川のアユの生息状況について考察した。

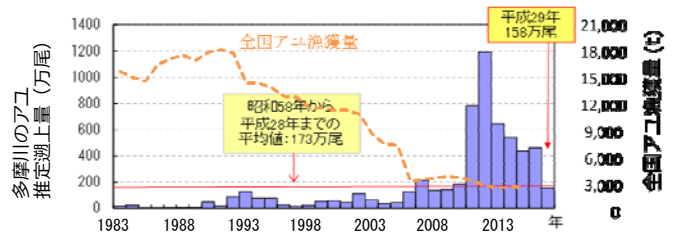


図-1 全国のアユの漁獲量と多摩川のアユ推定遡上量の経年変化

※全国アユの漁獲量：農林水産省 漁業・養殖業生産統計年報を基に作成

※多摩川のアユ推定遡上量：東京都島しょ農林水産総合センター 報道発表資料 を編集

(<http://www.metro.tokyo.jp/tosei/hodohappyo/press/2017/06/05/04.html>)

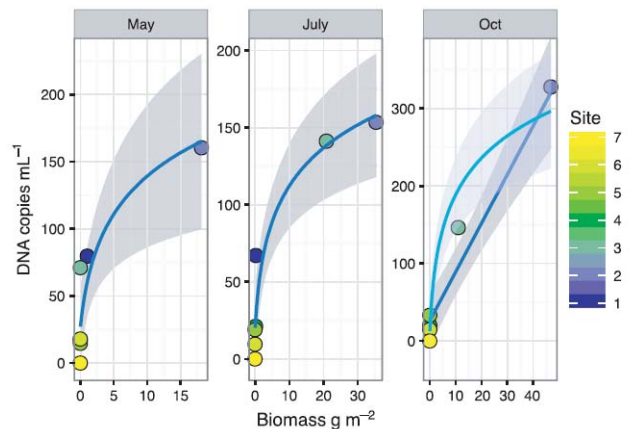


図-2 アユの環境DNA濃度と生物量の関係¹²⁾

※佐波川において、アユの環境DNA濃度と各採水地点直上で潜水目視調査を行った3ラインの平均の生物量の関係を示したもの¹²⁾。図中の青い線は最適な回帰線、グレーで囲んだ部分は95%信頼区間を示している。10月のグラフには、最適な回帰線に加えて、対数回帰曲線を水色の線で示しており、その95%信頼区間は薄紫で囲んだ部分である。最適な回帰線のR²値は5月では0.915、7月では0.824、10月では0.961となり、すべての月で高い値を示している。

2. 方法

2-1 多摩川の概要

多摩川は、山梨県塩山市の笠取山 (標高1,953m) に発し、多くの支流を合わせながら東京都の西部から南部を流下し、東京都と神奈川県の間を流れ、東京都大田区羽田地先で東京湾に注ぐ、幹川流路延長138km、流域面積1,240km²の一級河川である。

魚類の溯上・降下環境については、河口から約89

kmにある小河内ダムまでに18の堰等の横断工作物があるが、1991年度に「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル河川」に指定されたことなどから、魚道整備等による改善が図られている。

2-2 調査方法

図-3に対象河川の調査地点を示す。調査は、降下期前の成魚が安定して生息する期間と想定される2017年9月6~8日に行った。

調査地点は、瀬の下流を基本とし、本川の多摩川では、河口から奥多摩湖の上流までに40点を、9つの支川では29点(小菅川_2、秋川_7、谷地川_1、残堀川_1、浅川_14、大栗川_1、三沢川_1、平瀬川_1、野川_1)を設定した。多摩川本川および、支川の小菅川、秋川、浅川についてはアユの分布の上限を把握するため最上流部周辺にも調査地点を設定した。

各調査地点で、表層水1Lを採集し、クーラーボックスに入れ、冷却して持ち帰った。なお、サンプルにはDNAの分解を阻害するために10%塩化ベンザルコニウム溶液を1Lあたり1mL入れた¹²⁾。また、輸送時のDNAの混入を確認するために、輸送時のクーラーボックスの中に、採水ボトルに脱イオン水を入れたクーラーボックスを入れた。なお、採水に用いるボトルは、次亜塩素酸ナトリウム漂白剤(市販製品を10倍希釈したもの)で洗浄し、DNAを含まない脱イオン水によって洗浄した。

2-3 環境DNA分析

各地点とも、基本的にDoi et al.¹²⁾で用いられた手法と同様に表層水1LからDNAを抽出し、定量PCRをおこなった。以下に手順の概要を示す。サンプル水は、冷却して持ち帰った後、GF/Fガラスフィルター(pore size c. 0.7 μm; GE Healthcare, Little Chalfont)で濾過し、アルミホイルで包んで-20°Cで凍結保存した。フィルターからの抽出には、サリベットチューブ(Sarstedt, Nümbrecht, Germany)およびDNA抽出キット(DNeasy Blood & Tissue Kit, Qiagen)を用い、サンプル水1L全量から100 μLのDNA溶液を抽出した。抽出したDNA溶液100 μLから2 μLずつに小分けした4サンプルを用意し、PikoReal Real-Time PCR System (Thermo Fisher Scientific, Waltham)を用いてDoi et al.¹²⁾と同様の条件で定量PCRを行った。アユに特異的なプライマーおよびTaqMan蛍光プローブについては、Yamanaka&Minamoto¹¹⁾と同様のものを使用した。また、PCR産物はランダムに選んだ7サンプルのシーケンスを行い、BLAST (National Center for Biotechnology

Information)による検索結果からアユの配列であることを確認した。

環境DNA濃度は、定量PCRで得られた4サンプルのDNAのコピー数の平均値からサンプル水1L中のコピー数を算出しcopies/mLに換算した。サンプルの定量化にあたっては、標準試料として、PCRごとにプラスミドによってクローニングされたアユの人工DNA¹¹⁾、30000、3000、300、30copiesを測定し(繰り返し4回)、それらの結果から作成した検量線(R²の値:0.911~0.999)を用いた。また、ネガティブコントロールとして、先述のクーラーボックスおよび、脱イオン水を濾過したサンプルを測定し、それぞれDNAが不検出であることを確認した。

3. 結果と考察

図-3、4に各調査地点の環境DNA分析、水温測定の結果を示す。全69地点の環境DNAは、最小値0copies/mL(不検出)、最大値15681.8copies/mL、平均値1003.8copies/mLであったが、59地点が平均値を下回り、2地点の値が突出して高いなど偏りが大きかったため、濃度によって6段階にレベル分けした(レベル0:不検出、レベル1:0~10copies/mL、レベル2:10~100copies/mL、レベル3:100~1000copies/mL、レベル4:1000~10000copies/mL、レベル5:10000~copies/mL)。

ここでは、環境DNAの検出による多摩川水系のアユの分布範囲、濃度分布によるアユの生息密度の分布特性、そして、同様の調査手法で測定されている佐波川、高津川のアユの環境DNA濃度との比較について述べる。

3-1 環境DNAの検出によるアユの分布範囲の推定

(1) 環境DNAの検出によるアユの分布範囲の推定(奥多摩湖上流)

奥多摩湖より上流の多摩川本川3地点、および小菅川2地点では、多摩川本川の最上流の地点T41で7.4copies/mLの環境DNAが検出されたものの他の4地点(T39、40、K1、2)では検出されなかった。奥多摩湖の小河内ダムには魚道はなくアユの遡上は不可能なこと¹³⁾、山梨県に位置する多摩川最上流部では、丹波川漁業協同組合によるアユの放流が行われていることから、地点T1ではこれらのアユによる環境DNAが検出されたと考えられる。

奥多摩湖では1958年に陸封アユの定着を目的として琵琶湖産のアユが放流され、1963年ごろより丹波川漁業協同組合が丹波川(山梨県内の多摩川の呼称)で

放流を行っている¹⁴⁾。一方、放流のなかった1985年に0年魚が確認されたことから、陸封アユの自然繁殖の可能性が報告されている¹³⁾。今後、奥多摩湖上流において環境DNAを用いて、アユの分布の季節的な動態を定量的に把握することで、奥多摩湖の陸封アユの自然繁殖についても科学的な根拠を示すことができると考えられる。

(2) 環境DNAの検出によるアユの分布範囲の推定(奥多摩湖より下流および秋川、浅川)

奥多摩湖より下流では、小河内ダムより約5km下流の日原川との合流点付近のT38で2.0copies/mLの環境DNAが検出された。また、T38より下流に向かっては、

より高濃度の環境DNAが連続して検出されていることから、放流と天然の区別はできないものの、白丸ダム(図-4中のNo.17)より上流地点までのアユの生息の可能性が示された。

秋川については、北秋川、南秋川の合流部より約1km下流の地点AK6で9.3copies/mLが検出されており、それより下流に向かっては、より高濃度で検出されている。河川におけるアユの環境DNAの検出範囲については、赤松らによって、採水地点から上流に400~800mという値が報告されている¹⁵⁾。環境DNAは生物の分泌物や排泄物に含まれていることから、水量や流速によっても検出範囲は変動するが、仮にこの値を参考とす

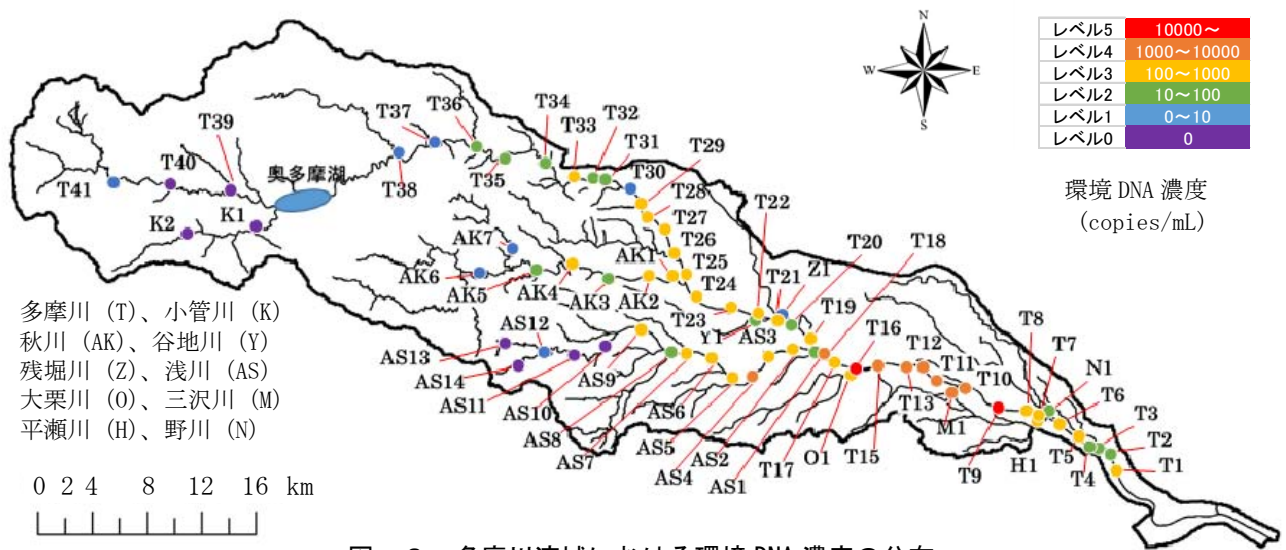


図-3 多摩川流域における環境DNA濃度の分布

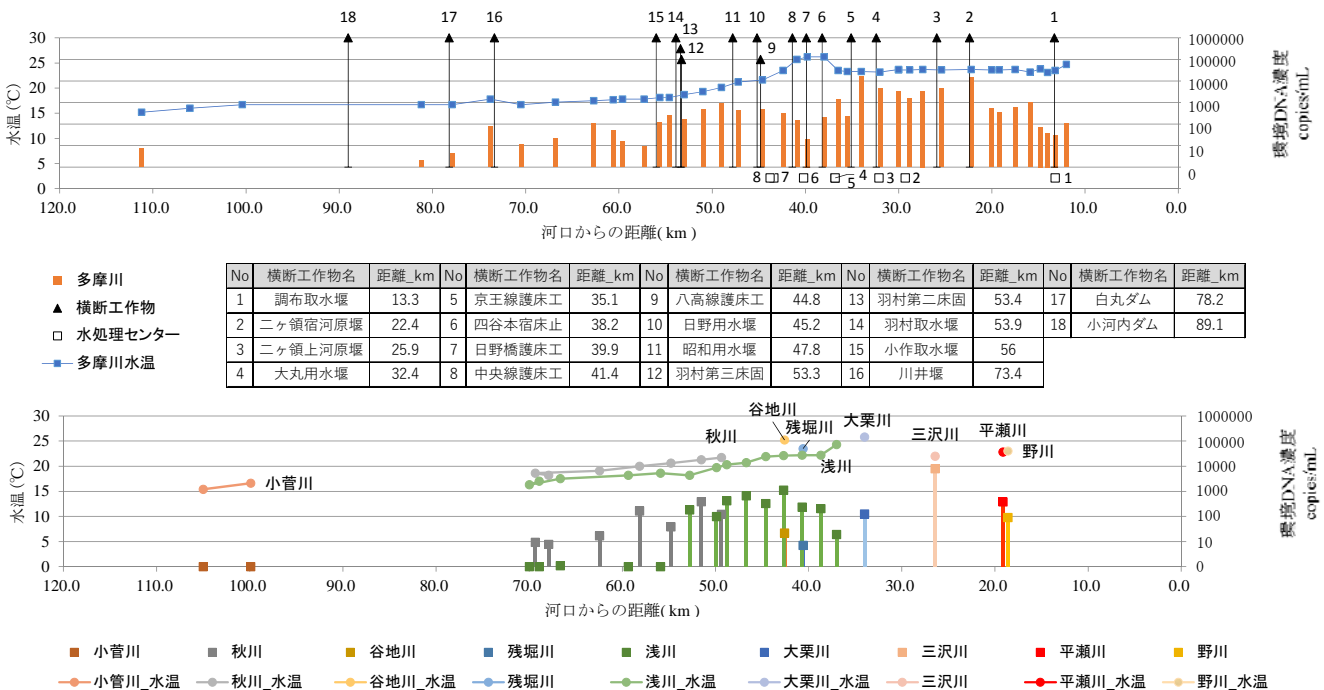


図-4 多摩川とその支川における環境DNA濃度と水温の縦断分布

れば、北秋川と南秋川の合流点付近あたりまではアユが生息していると推定される。

一方、浅川については北浅川の上流部で不検出の箇所が4か所（AS10、11、13、14）あり、アユの分布の上流端をほぼ示すことができた。すなわち、1.1 copies/mL と微量の環境 DNA が検出できた AS12 周辺（北浅川と南浅川の合流部から約 1km の位置）が浅川でのアユの生息する最上流端と推定できた。

(3) 環境 DNA の検出によるアユの分布範囲の推定(支川)

多摩川の9つの一次支川について、多摩川との合流部付近で採水し、環境 DNA 分析を行った。その結果、奥多摩湖上流に位置する小菅川を除く、すべての支川で環境 DNA が検出された。これは、多摩川の中流部のほとんどの支川にアユが生息しており、多摩川本川のみならず支川もアユの生息環境として機能していることを示している。支川も含めた生息空間の大きさは、成魚のアユの現存量に影響することが想定されるほか、複数の支川が生息環境として機能することで、大きなかく乱などで一部の支川の環境が消滅、劣化した際にも他の支川が補完することで、総合的により安定したアユの生息環境が形成されることが期待できる。

3-2 環境 DNA の濃度分布によるアユの生息状況の把握

(1) 環境 DNA 濃度から推定される広域のアユの分布特性

レベル 4、5 の濃度の高い地点は、多摩川本川の約

22~37km の範囲に集中しており、この他は、浅川の中流（AS4：河口から 42.7km）、三沢川の下流部（M1：河口から 26.4km）に1地点ずつであった。

レベル 3 に該当する地点の多くは、多摩川および浅川のレベル 4、5 の上下流に分布している。この他、秋川（AK1、2、4：河口から 49.4~58.2 km の範囲）、大栗川（O1：河口から 34.0 km）、平瀬川（H1：河口から 19.1 km）がレベル 3 に該当する。

レベル 2 に該当する地点は、多摩川本川と浅川では、やはりレベル 4、5 の範囲を中心として、その上下流のレベル 3 のさらに上下流側に分布しており、広域ではレベル 4、5 の範囲から離れるにつれて徐々に濃度が下がる傾向がみられた。支川では、谷地川（Y1：河口から 42.6km）、野川（N1：河口から 18.6km）がレベル 2 に該当した。

レベル 1、0 に該当する地点は、多くは、多摩川、秋川、浅川の渓流部に位置し、支川では、小菅川（K1、2：河口からそれぞれ 99.9km、105.0km）、残堀川（Z1：河口から 40.6km）が該当した。

表-1 に 2011、2016 年度に行われた河川水辺の国勢調査（以下「水国調査」という）における秋季（10月）のアユの個体数を示す。最も確認数が多かったのは、いずれの調査結果においても宿河原堰下流（21.5~22.5km）であった。また、確認数の多い調査地点はどちらも連続しており、かつ、新二子橋（17.8~18.8km）から大丸用水堰下流（31.5~32.5km）で重複していた。

5年を隔てた、確認総数の異なる調査結果において、このように確認数の多い範囲が重複したことから、こ

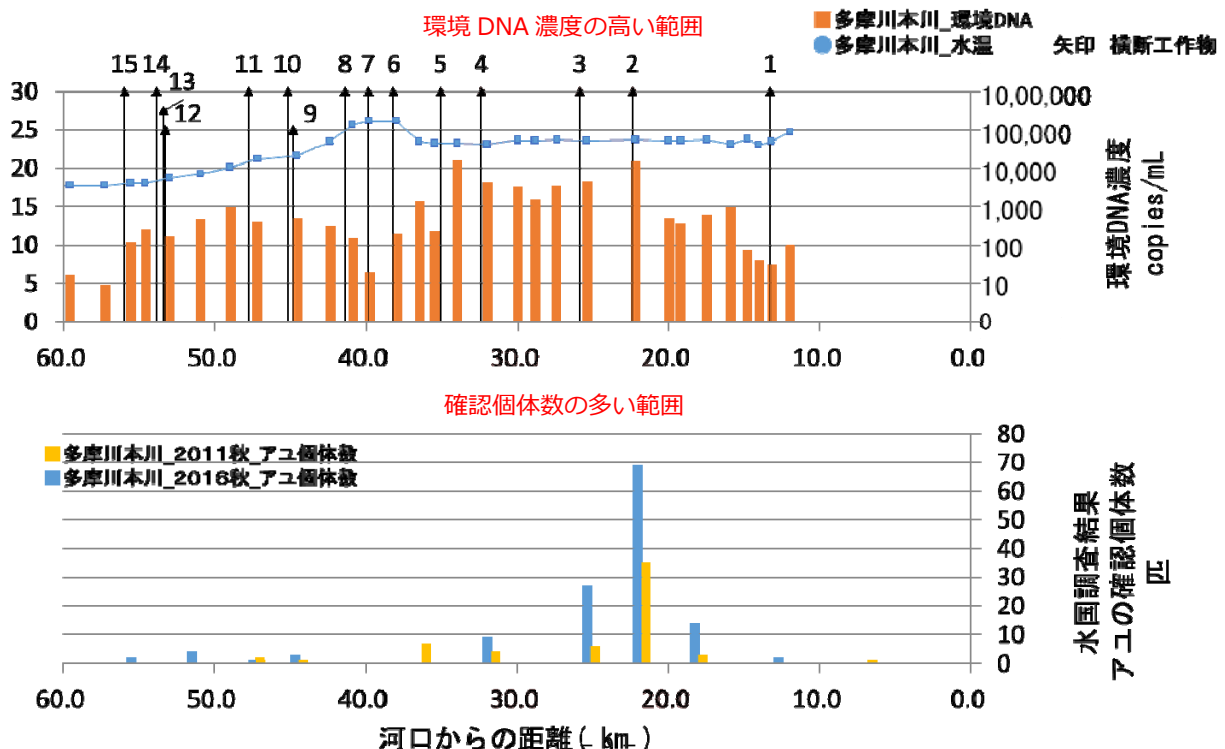


図-5 河川水辺の国勢調査結果との比較

これらの範囲は安定的にアユ成魚が生息できる環境である可能性が示唆された。

今回の環境 DNA 濃度の分布と比較すると、水国調査で最も多くのアユが確認された、宿河原堰下流 (21.5～22.5km) と同じ箇所 T9 (22.2km) で、突出した環境 DNA 濃度が検出されている (図-5)。さらに、2 回の水国調査のいずれかで確認数の多かった、新二子橋 (17.8～18.8km) から浅川合流部 (36～37km) の範囲についても、今回の調査でレベル 4、5 が集中する範囲 (22～37km) と概ね一致した。これらのことから、環境 DNA による分析は、アユの生息数が多い範囲の検出において概ね捕獲調査と整合することが確認できた。

表-1 河川水辺の国勢調査におけるアユの確認状況

地区名	距離 km	個体数_秋 2011年 10月	個体数_秋 2016年 10月
河口	0～1	0 (0)	0 (0)
大師橋付近	2～3	0 (0)	0 (0)
多摩川大橋	8～9	1 (2)	0 (0)
調布取水堰下流	12.2～13.2	0 (0)	2 (2)
新二子橋	17.8～18.8	3 (5)	14 (11)
宿河原堰下流	21.5～22.5	35 (59)	69 (53)
上河原堰下流	24.9～25.9	6 (10)	27 (21)
大丸用水堰下流	31.5～32.5	4 (7)	9 (7)
浅川合流部	36～37	7 (12)	0 (0)
日野用水堰下流	44.2～45.2	1 (2)	3 (2)
昭和用水堰下流	47～48	2 (3)	1 (1)
永田橋	51～52	0 (0)	4 (3)
小作堰下流	55～56	0 (0)	2 (2)
万年橋上流	61～62	0 (0)	0 (0)
合計		64	157

※ () の数値は総数に対する割合 (%)

※赤字はいずれかの年に確認個体数が多い (5%以上) 地点

(2) 横断工作物の分布との関係性

調布堰 (13.3km) から小河内ダム (89.1km) までには、18 箇所の横断工作物がある (図-4)。小河内ダムを除く横断工作物には、魚道が設置されるなどしてアユが遡上できるとされており、2011 年度の国土交通省の遡上調査では、少なくとも小作堰 (56km) までの 14 施設すべてでアユの遡上が確認されており¹⁶⁾、本研究の環境 DNA で推定する分布範囲もこれと矛盾しない。

今回の調査で、突出した環境 DNA 濃度が検出された T9 (22.2km)、T16 (34.0km) の上流には、それぞれ二ヶ領宿河原堰 (22.4km)、京王線護床工 (35.1km) が存在する。上述のとおり、T9 (22.2km)、T16 (34.0km) の 2 地点は、多摩川本川でレベル 4、5 の高濃度の環境

DNA が約 15km ほど広がっている範囲に含まれていることから、アユの生息に適した環境となっていると考えられる。一方で、二ヶ領宿河原堰 (22.4km)、京王線護床工 (35.1km) の横断工作物は、ほぼ、この範囲の上下流端に位置することから、これらの横断工作物の下流でアユが滞留し生息密度が特に高くなっている可能性が考えられる。

(3) 水温の分布との関係性

図-6 に採水と合わせて測定した水温の分布を示す。最高水温 26.2℃、最低水温 15.2℃、平均水温 20.9℃であった。多摩川本川においては、13.2～36.5km の範囲では、23.5℃前後で安定しており、浅川水再生センター、北多摩第二水再生センター、錦町下水処理場 (図-4 の 4～6) が隣接する 38.0～40.9km の範囲で 26℃前後に上がり、それより上流では徐々に水温が下がる傾向が見られた。

今回の調査結果では、アユ成魚の適水温域とされる 14～25℃¹⁷⁾ の範囲外となるのは、上述の多摩川本川の 38.0～40.9km の範囲にある T19、20、21、および谷地川 (Y1)、大栗川 (01) の 5 つで、いずれの地点も 25℃より高かった。これら 5 地点の環境 DNA 濃度のレベルは 2、3 で平均値 1003.8copies/mL より低く、多摩川本川の環境 DNA 濃度のプロファイルでは T20 を底とする谷型が見られた (図-4)。T19、20、21 の上流には、それぞれ横断工作物と瀬があり、アユが忌避する目立った濁りも確認されなかったことから、多摩川においても既知の適水温域 (14～25℃) がアユの分布に影響する要因の一つである可能性が示唆された。

3-3 他河川とのアユの環境 DNA 濃度の比較

表-2 に今回の多摩川と河野ら¹⁸⁾による 2016 年の佐波川、高津川の環境 DNA 濃度、および河川の諸元を示す。多摩川本川 40 地点の環境 DNA 濃度の平均値は 1409.3copies/mL、ピーク値は 15681.8copies/mL であった。本研究と同様の手法を用いてアユの環境 DNA 分析が行われた佐波川、高津川では、河川生活期の 7 月において、環境 DNA 濃度の平均値、ピーク値は、それぞれ、佐波川で 70.9copies/mL、333copies/mL、高津川で 32.7copies/mL、75copies/mL であった。多摩川で得られた値は、高津川より高い値を示した佐波川と比較した場合においても、平均値で約 20 倍、ピーク値で約 47 倍となり極めて高濃度のアユの環境 DNA が検出された。多摩川を佐波川と比較した場合、幹川流路延長にして約 2.5 倍、年平均流量にして約 2.2 倍となり、河川規模の大きな多摩川では、環境 DNA の濃度の倍率以上に、河川全体のアユの現存量が佐波川より多いこ

とが推定される。

佐波川は、中国地方では比較的良好なアユの生産場であり、アユの放流が行われるとともに、数多くの天然遡上アユが再生産している。今回の環境 DNA 分析の結果からは、多摩川では全国的に見ても非常に多くのアユが生息していると考えられる。

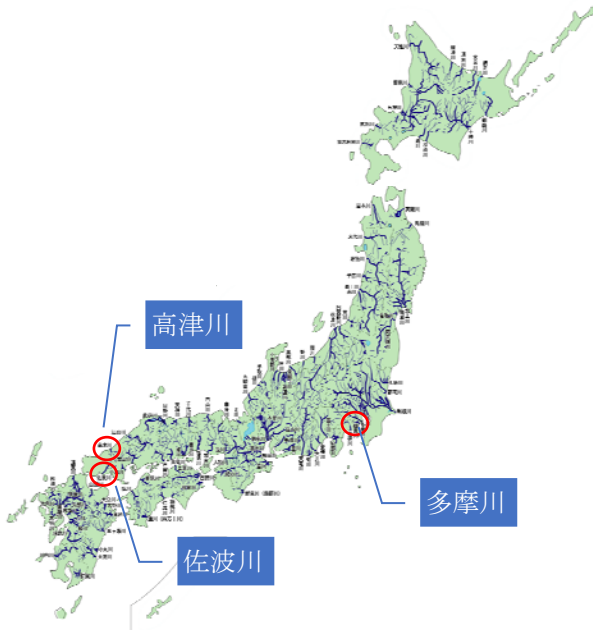


図-6 多摩川、佐波川、高津川の位置

※国土交通省水管理・国土保全局ウェブページ (http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi) の図を編集

表-2 多摩川、佐波川、高津川の諸元とアユ環境 DNA 濃度の比較

河川名	多摩川	佐波川	高津川
環境 DNA 濃度_平均値 copies/mL	1409	71	33
環境 DNA 濃度_中央値 copies/mL	196	56	18
環境 DNA 濃度_ピーク値 copies/mL	15682	333	75
採水地点数	40	11	9
採水時期	2017.9月	2016.7月	2016.7月
幹川流路延長 ^{※1} km	138	56	81
観測点 ^{※2}	石原	新橋	高角
年平均流量 ^{※2} m ³ /s	40.3	18.7	51.9

※1：引用元「河川便覧 2002」(国土開発調査会発行)

※2：引用元「平成 14 年流量年表」(公益財団法人日本河川協会)

4. まとめ

本研究では、アユの河川生活期にあたる 9 月上旬において、多摩川本川とその支川を含む広域におけるアユの環境 DNA 分析を行い、以下の 3 つの知見を得た。

(1) 多摩川本川では、奥多摩湖より上流の 111.2km 地点においてもアユの環境 DNA が検出でき、小河内ダムで遡上は分断されているものの、多摩川本川ではほぼ全域に渡ってアユが生息していることが示された。また、浅川においては、66.7km 地点が検出の最上流端であり、それより上流で不検出であったことから、この付近がアユの生息域の上限であることを示すことができた。

(2) 環境 DNA 濃度から推定したアユの生息密度の分布では、本川の中流部(約 22~37km)で、特に生息密度が高いことが明らかになった。この範囲を中心に生息密度が減少していくことから、この範囲がアユの生息に適していると考えられた。一方で、突出して高い環境 DNA 濃度が検出された 2 地点では、いずれも河川構造物の下流であったことから、これらの影響によるアユの滞留が示唆された。また、これらの結果は水国調査の結果と整合した。

(3) 環境 DNA による同様の方法を用いてアユの生息密度を推定している佐波川、高津川と比較して、多摩川の環境 DNA 濃度は、平均値で約 20 倍、ピーク値で約 47 倍となり、全国的に見ても生息密度の高い河川であることが示された。

本研究では、現地での負担が少ない環境 DNA 分析の特性を活かし、3 日という短期間の調査で広域に分布する 69 地点でアユの分布を捉えることができた。今後も環境 DNA を用いて、経年的、季節的なアユの広域での生息分布の変化を把握していくことで、アユの資源量の増減の要因解明に繋がるものと期待される。

謝辞:環境 DNA 濃度とアユの確認数との比較にあたり、国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所より 2016 年の河川水辺の国勢調査(魚類)結果をご提供いただいたので、ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 川那部浩哉, 水野信彦, 細谷和海:日本の淡水魚(山溪カラー名鑑)改訂版, 2005
- 2) 農林水産省統計部:全国年次別・魚種別生産量(平成 16 年~27 年),平成 27 年漁業・養殖業生産統計, 2017
- 3) 高橋勇夫:天然アユの本, 築地書館, 東京, 2016

- 4) 高橋勇夫：天然アユが育つ川，築地書館，東京，2009
- 5) 吉本洋，高橋芳明：紀伊水道東部海域における稚アユの漁獲量変動要因，水産増殖，Vol. 54, No. 1, pp. 89-94, 2006
- 6) 田子泰彦：富山湾の湾奥部で成育したアユ稚魚の河川への回遊遡上，日本水産学会誌，Vol. 68, No. 4, pp. 554-563, 2002
- 7) 高橋勇夫：気候変動とアユ，四万十・流域圏学会誌，第10巻，第2号，pp. 13-16, 2011
- 8) Iida Y and Mizokami A. : Outbreaks of coldwater disease in wild ayu and pale chub, Fish Pathology, 31, pp. 157-164, 1996
- 9) Doi H., Takahara T., Minamoto T., Matsuhashi S., Uchii K. and Yamanaka H. : Droplet digital polymerase chain reaction (PCR) outperforms real-time PCR in the detection of environmental DNA from an invasive fish species, Environmental Science & Technology, Vol. 49, pp. 5601-5608, 2015
- 10) Takahara T., Minamoto T. and Doi H. : Using environmental DNA to estimate the distribution of an invasive fish species in ponds, PLOS ONE, Vol. 8, e56584, 2013
- 11) Yamanaka H. and Minamoto T. : The use of environmental DNA of fishes as an efficient method of determining habitat connectivity, Ecological Indicators, Vol. 62, pp. 147-153, 2016
- 12) 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, Freshwater Biology, Volume 62, Issue 1, pp. 30-39, 2017
- 13) 加藤憲司：奥多摩湖における陸封アユの自然繁殖，水産増殖，vol. 33, No. 3, pp. 139-140, 1985
- 14) 東京都水産試験場：奥多摩湖水産増殖対策調査報告書，1982
- 15) 赤松良久，乾隆帝，一松晃弘，河野誉仁，土居秀幸：環境DNAを用いた河川内の魚類現存量推定に関する基礎的検討，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol. 73, No. 4, I_1111-I_1116, 2017
- 16) 岸大介：多摩川水系における魚道維持管理とアユ等遡上状況について，スキルアップセミナー関東，一般（環境）部門，関東地方整備局，2012
- 17) 日本水産資源保護協会【編】：環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理，日本水産資源保護協会，東京，1983
- 18) 河野誉仁，赤松良久，後藤益滋，乾隆帝：環境DNAを用いたアユの定量化と降下状況モニタリングの試み，河川技術論文集，第23巻，pp. 669-674, 2017