短報 SHORT COMMUNICATION

琵琶湖流入河川におけるアユの産卵場の表面硬度の特徴

水野 敏明^{1)*}・東 善広¹⁾・北井 剛²⁾・小島 永裕¹⁾

1) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター 〒520-0022 滋賀県大津市柳ヶ崎 5-34

2) 滋賀県立琵琶湖博物館 〒525-0001 滋賀県草津市下物町 1091

Toshiaki MIZUNO^{1)*}, Yoshihiro AZUMA¹⁾, Takeshi KITAI²⁾, Nagahiro KOJIMA¹⁾: Characteristics of surface hardness of spawning riverbed of Ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) in Lake Biwa basin. *Ecol. Civil Eng.* 22 (1), 93-101, 2019

1) Lake Biwa Environmental Research Institute, 5-34, Yanagasaki, Otsu, Shiga 520-0022, Japan

2) Lake Biwa Museum, 1091 Oroshimo, Kusatsu, Shiga 525-0001, Japan

Ecology and
Civil Engineering
応用生態工学

Abstract: In the Lake Biwa basin, the number of laying eggs in Ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*, has decreased recently, especially the number in 2017 was very small. Therefore, improving the spawning environment of Ayu is an urgent issue. As Ayu prefers soft riverbed for spawning, in order to restore the favorable spawning environment of Ayu, it is necessary to quantify the spawning riverbed hardness. In previous studies, quantification of the spawning riverbed hardness of Ayu was carried such as Hasegawa type soil intrusion meter, but there was a problem in accuracy and reproducibility. In this study, we conducted quantitatively evaluate the hardness of spawning riverbed of Ayu by using Yamanaka type soil hardness tester which has not been used as it is. The field survey period was conducted in September 2014 and the field survey area were in the four Lake Biwa inflow rivers: Echi, Ado, Shiotsuoh and Ane Rivers. We surveyed both the spawning riverbed at head of rapid riffle area and the non-spawning riverbed at flat riffle area on dried parts near edge of water of sandbars in these rivers. As a result of the survey, median value of the spawning riverbeds hardness was 0.22 kgf/cm² and the non-spawning riverbeds hardness was 1.40 kgf/cm². Statistical analysis of riverbeds hardness and occurrence of egg laying by mixed effect logistic regression model formula showed the tendency that the egg production probability became 40% or more when the riverbed hardness was 1.0 kgf/cm² or less from the model formula. Finally, we discussed the usefulness and the issues of quantification of monitoring about surface hardness of spawning riverbed of Ayu by using Yamanaka type soil hardness tester.

Key words: Ayu, Lake Biwa, quantification of monitoring, spawning riverbed hardness, Yamanaka type soil hardness tester

はじめに

琵琶湖のアユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) は、琵琶湖全体の漁獲量の 40% 以上を占める重要水産魚種である。琵琶湖のアユの産卵数の平年値は、約 120 億粒であ

る。しかし、近年ではアユの産卵数に減少が見られ、特に 2017 年の産卵数は 2.7 億粒であり平年値の 2.2% と非常に少なかった (滋賀県水産試験場 2018)。この減少要因は未だ不明であるため対策を講じるのは難しい。そのため、アユの資源回復に資する確実性の高い対策として、アユの産卵場の環境を改善することは、喫緊の課題となっている。

2018 年 6 月 29 日受付, 2019 年 5 月 15 日受理

*e-mail: mizuno-t@lberi.jp

琵琶湖流域のアユの産卵期は、8月下旬から11月上旬である。産卵場所は、琵琶湖流入河川の下流域の軟らかく堆積した小礫の河床である。石田（1961）によれば、アユは10 mm以下の小礫を選好して産卵していると言われている。また、西田（1978）によれば、アユは数mmから20 mm程度の小礫を産卵に利用していると言われている。

アユの産卵行動は、1尾の雌に多数の雄が追尾して、主に夜間に行われる（宮地ほか 1976）。石田（1961）によれば、アユは自から動かすことのできる小さい砂礫の多いところを選んで産卵すると言及している。井口ほか（1998）によれば、水の流れに揺れ動く砂利が河床を浮き石状態にする状況が、アユに産卵場を認知させる環境であることを言及している。さらに、好適な産卵場を見つけることが、産卵に向けた最終的な成熟を開始させると言及している。そのため、産卵場における表面の礫の状態を示す「表面の河床硬度」は、アユの産卵場所の選定や成熟促進の重要な指標になる。

近年ではダムなどにより、上流からの小礫の供給が減少し、河床のアーマーコート化が全国の河川で問題となっている（国土交通省 2011）。そのため、アユの産卵場にも影響を及ぼしている可能性が指摘されている（河川環境総合研究所 2005）。こうした背景からも、アユの産卵場の河床硬度を定量化する技術が必要とされている。

西田（1978）は、アユの産卵場は他の場所に比べて砂礫のつまり具合が粗く、手で簡単にすくいとれるような柔らかさであり、そこに立つと足の周囲の砂礫が少しずつ流出し、足が河底にめりこむような浮石帯が特徴であることを指摘している。アユの産卵場における河床硬度は、産卵場の環境の良し悪しに直結するため、経験則ではない数値目標を提示することが望まれる。しかしながら、この研究では産卵場の河床硬度は定量評価されていない。

伊藤ほか（2006）では、全長2 mの赤白ポールを体重60 kgの測定者が河床に突き刺して貫入深を測定し、河床硬度を定量的に評価している。しかし、この測定方法は、測定者による個人差が生じやすいと考えられる。

兵藤ほか（2014）は、シノと呼ばれる長さ30 cmの目盛付きの鉄製の道具を使用し、アユの産卵場の河床の貫入深を測定している。シノは、河床に人力で一定の荷重をかけて突き刺し、その貫入深を記録するものであり、簡便な方法であるため、多くの地点を効率的に調査ができると言及している。しかし、この方法も、伊藤ほか（2006）の赤白ポールによる測定方法と同様、測定者に

よる個人差が生じやすい。

角ほか（2011）の研究では、アユの産卵場の河床の硬さを、長谷川式土壌貫入計を用いて10 cmおよび20 cmの貫入深までのおもりの落下回数を指標として定量的に評価している。長谷川式土壌貫入計は、造園緑化地の植栽基盤の調査機材で、根系発達を規制するような硬い不良土層があるかどうかを調べるために開発されたものである（長谷川 2006）。長谷川式土壌貫入計は、価格は約17万円で全長173 cm、全重量6.6 kgの機器である。部品は、ガイドポール、貫入ロッド、貫入コーン、2 kgのランマー（重り）で構成されている。測定方法は、高さ50 cmの位置から貫入ロッドに沿って、ランマーをノッキングヘッドに落下させて、先端コーンを土壌に貫入させるというものである。測定結果は、貫入深（cm）を重りの落下回数（drop）で割った値で示される。長谷川式土壌貫入計は、荷重が一定であり精度のバラつきが少ないという利点がある。しかし、測定しようとする土壌が極度に軟らかい場合（1回の打撃で4 cm以上落下）は、測定精度が荒くなる（ダイトウテクノロジー株式会社 2018）。そのため、極度に軟らかいアユの産卵場は、高精度で測定できない欠点がある。さらに、後述の山中式土壌硬度計と比較すると、機器が大きく携帯性に劣り、1地点の調査に時間がかかるため操作性に劣り、高価であるという欠点もある。

山中式土壌硬度計は、軟らかい土壌でも硬度が測定可能な道具として、林業や農業で広く知られ汎用されている（真下 1973）。干潟や浅海のような軟らかい底質の測定には、山中式土壌硬度計やそれに準ずる原理のバネ式の貫入機器により測定した記録が多いと言われている（梶原 2013）。干潟における貫入抵抗値に関しては、山中式土壌硬度計は小型でかつ短時間に1人で計測できるという簡便性に優れていると言われている（上田ほか 2003）。

アユの産卵場の河床硬度の測定にも、バネ式貫入機器による測定が適していると予想されるが、そうした研究は、著者らが知る限りでは、前例がなかった。そこで本研究は、安価（約7万円）かつ小型軽量（全長23 cm、重量650 g）で携帯性に優れていて、バネ式貫入機器として広く普及している山中式土壌硬度計を用いて、産卵場の表面の河床硬度を高精度に評価することを目的として実施した。

材料と方法

調査対象および調査地

琵琶湖や流入河川に生息するアユは、他の地域の両側回遊型の集団とは10万年程度の分化が見られる陸封型の集団である (Takeshima et al. 2016)。琵琶湖流域では、オオアユとコアユという生活型と体サイズが異なるアユが生息している (東 1973)。調査時に観察された産卵親魚は主にコアユだった。

調査期間は、2014年の滋賀県水産試験場のアユの第2次定期産卵調査に同行して9月16、17、18日の3日間とした。寺井ほか (2016) によれば、この時期は2014年の全アユ産卵調査の中でもアユの産卵が多く見られた期間であった。そのため、調査対象河川における各調査地点において、黒い婚姻色を呈した成熟個体が多数観察される状況であった。

調査は、琵琶湖流入河川の安曇川、塩津大川、姉川、愛知川で行った。これらの河川では、堰によってアユの産卵遡上が制限される傾向が示唆されている (石崎ほか 2016)。そのため、最下流の堰付近で調査を実施した。

琵琶湖のアユは、降雨があったときに産卵遡上することが多いと言われている (遊磨ほか 2016)。その後、増水が落ち着き減水し始めている夜間に、砂州縁辺の瀬頭で産卵を行うことが多い (知花ほか 2007; 兵藤ほか 2014)。そのため、河床の微高地である砂州縁辺の浮石帯では、夜間では水中にあったアユの産卵場が、数時間から十数時間後には水際に露出しやすい。そのような場所では、浮力や掃流力による影響を排除して、産卵場の表面の河床硬度のみを容易に測定することができる。そこで本研究では、砂州縁辺の水際の河床露出部を調査場所として選定した。

河床硬度の測定

水中のアユの産卵場の砂礫にかかる浮力や掃流力は、流量や流況にともない刻々と大きく変化する。そのため、浮力や掃流力も含めた厳密な意味での水中における産卵場の河床硬度測定は困難である。浮力や掃流力による影響を排除して、産卵場の河床硬度を示せば、高精度な測定や他地点との比較も可能となる。そこで本研究では、山中式土壤硬度計で測定できる水面に露出した産卵場の表面に焦点を絞って測定をした。

山中式土壤硬度計は、高さ40 mm、底径18 mm、頂角12° 40'の円錐部と、遊動指標と硬度目盛のついた円筒形の胴体の中に40 mmの縮小に対して正確に8 kgの圧力を示すバネが入っている (北海道立総合研究機構

2012)。山中式土壤硬度計で測定したバネ縮長は、次式により河床硬度に換算した。

河床硬度： P (kgf/cm²)

バネ縮長： X (mm)

$$P = 100X / (0.7952(40 - X)^2)$$

各河川の砂州縁辺では、まず「A産卵場所」および「B非産卵場所」の探索を行った。A産卵場およびB非産卵場では、それぞれ3箇所以上で片手1杯程度の礫を河床から採取して、それをバットに広げて礫に付着した卵の有無を目視で確認した。

A産卵場は、卵を確認できた砂州縁辺上の水際の河床露出部を測定点とした。B非産卵場は、産卵が無いことが確認できた砂州縁辺上の水際の河床露出部を測定点とした (Fig. 1)。河床硬度は、山中式土壤硬度計を使用してA産卵場およびB非産卵場のそれぞれ3箇所測定した。

山中式土壤硬度計は、先端を礫面に接触させた状態で圧迫すると測定値が過大になる。そのため、先端を河床の表層の礫間に挿入して測定した (Fig. 2)。また、水中測定用に調整されてないため、水中では使用しなかった。

測定した縮長は、前述の換算式により土壌硬度 (kgf/cm²) を算出した。

河床硬度は、河川ごとにA産卵場およびB非産卵場それぞれの平均値と中央値を求めた。それら4河川分の値を使用して、A産卵場およびB非産卵場における河床硬度をマン・ホイットニーのU検定により比較した。

混合効果ロジスティック回帰モデル分析

ロジスティック回帰分析は、「有」「無」の2値データを利用できる統計解析手法である。本研究では、A産卵場を1、B非産卵場を0とする2値データを、被説明変数とした。また、河床硬度のデータを説明変数とした。

しかし、アユの産卵の有無は、親魚の数など河川別に異なる環境の違いにも影響されることが考えられる。そこで、河川別の産卵場の違いによる影響を「ランダム効果 (変量効果)」として考慮に入れるため、一般化線形混合モデルの混合効果ロジスティック回帰モデル分析 (Mixed Effect Logistic Regression Model Analysis) を実施した。この分析方法では、一般化線形モデルのロジスティック回帰モデルの部分は固定効果として扱われる。その固定効果の切片と傾きに、ランダム効果の項を変量効果として加えることによって、下記の混合効果ロジスティック回帰モデルのモデル式が構成される。

Fig. 1. Outline of survey points on spawning and non-spawning area of Ayu.
アユの産卵場と非産卵場における測定地点の概略図.

Fig. 2. Measurement method of river bed hardness by Yamanaka soil hardness tester.
山中式土壌硬度計による河床硬度の測定方法.

$$Y = 1 / (1 + \exp(-((a + r_a)X + b + r_b)))$$

Y : 被説明変数 (アユの産卵確率)

X : 説明変数 (河床硬度)

a : 固定効果の傾き

b : 固定効果の切片

r_a : 傾きのランダム効果 (変量効果: 河川)

r_b : 切片のランダム効果 (変量効果: 河川)

混合効果ロジスティック回帰モデル分析は、統計ソフト R version 3.0.3 のパッケージ lme4 で解析を行った (R Development Core Team 2014)。

結 果

河床硬度

各河川で砂州縁辺で卵の分布を調査した結果、砂州前方縁辺の瀬頭付近で卵が見つかった。そこで、アユの卵が付着している礫周辺で、水面に礫の一部が露出している場所を A 産卵場の測定地点とした (Fig. 1, 2)。一方、A 産卵場と同じ砂州後方の平瀬延長部の水際の水面に露出した礫帯には、各河川ともアユの卵が見つからない場所があった。その場所を B 非産卵場所の測定地点とした。

河床硬度は、愛知川、安曇川、姉川では、A 産卵場 3 箇所、B 非産卵場 3 箇所測定できた。しかし、塩津大川は、1 箇所測定ミスがあったため、A 産卵場 2 箇所、B 非産卵場 3 箇所の測定となった。

河床硬度の範囲は Table 1 のようになった。全河川の

平均値と中央値は、A 産卵場：河床硬度平均値 0.43 kgf/cm²、中央値 0.22 kgf/cm²、B 非産卵場：河床硬度平均値 1.83 kgf/cm²、中央値 1.40 kgf/cm²であった (Fig. 3)。マン・ホイットニーの U 検定の結果、河床硬度は A 産卵場と B 非産卵場との間に有意差が認められた ($p=0.01$)。

混合効果ロジスティック回帰モデル分析の結果

分析の結果、下記の混合効果ロジスティック回帰モデル式が示された。固定効果の傾きは -2.77 ($p=0.01$) であった。

$$Y = 1 / (1 + \exp(-((-2.77 + r_a)X + 2.41)))$$

$$-1.14 \times e^{-16} < r_a < 1.25 \times e^{-16}$$

ランダム効果 (変量効果) の切片 r_b への影響は 0 であった。また、傾きへの影響は下記のようになった。

$$r_a (\text{安曇川}) = 1.25 \times e^{-16}$$

$$r_a (\text{塩津大川}) = 0.48 \times e^{-17}$$

$$r_a (\text{姉川}) = -5.87 \times e^{-17}$$

$$r_a (\text{愛知川}) = -1.14 \times e^{-16}$$

河川別のランダム効果 (変量効果) による傾きへの影響は、固定効果の傾き $a = -2.77$ と比較すると、非常に微小であった。

$$|-2.77| > |r_a|$$

その結果から、本研究のモデル式において、河川間の差異は、ほとんどないことが示された。そのため、アユ

Table 1. Spring shrinkage and riverbed hardness measured with a Yamanaka type soil hardness tester at Ayu spawning riverbed and non-spawning riverbed of the Lake Biwa inflowing rivers.

琵琶湖流入河川のアユ産卵場および非産卵場において山中式土壌硬度計で測定されたバネ縮長および河床硬度。

	River name	Spring shirinkage (mm)	Riverbed hardness (kgf/cm ²)
A Spawning riverbed	Ado river	2.5-10.0	0.22-1.40
	Shiotsuoh River	2.0-8.0	0.17-0.98
	Ane River	1.0-3.0	0.08-0.28
	Echi River	2.0-4.5	0.17-0.45
	Mean ± SD	4.0 ± 2.8	0.43 ± 0.41
	Median	2.5	0.22
B Non-spawning riverbed	Ado river	10.0-12.0	1.40-1.92
	Shiotsuoh River	10.0-18.0	1.40-4.68
	Ane River	1.5-17.0	0.13-4.04
	Echi River	4.5-10.5	0.45-1.52
	Mean ± SD	10.5 ± 4.6	1.83 ± 1.32
	Median	10.0	1.46

Fig. 3. Box plot showing the riverbed hardness of spawning and non-spawning area summarizing 4 river survey points on the Lake Biwa basin. The vertical line shows the range, the box portion shows the 25th to 75th percentile. The horizontal line inside the box shows the median value. The crossmark inside the box shows the mean value.
琵琶湖流域の4河川におけるアユのデータを集約した産卵場と非産卵場の河床硬度の箱ひげ図。縦線は範囲、箱部分は25-75パーセン範囲を示す。箱内の横線は中央値を示す。×印は平均値を示す。

Fig. 4. Graph of analysis results by mixed effect logistic regression model analysis about spawning probability of Ayu and riverbed hardness.
琵琶湖流域の4河川におけるアユの河床硬度と産卵確率との関係およびそのモデル式による解析結果のグラフ。

の産卵有無と河床硬度については、固定効果だけの下記
のモデル式で、関係性を説明できることが示された
(Fig. 4).

$$Y=1/(1+\exp(-(-2.77X+2.41)))$$

考 察

アユの産卵場の表面の河床硬度の測定意義

井口ほか(1998)によれば、産卵場の表面の水の流れ
に揺れ動く砂利が河床を浮き石状態にする状況が、アユ
に産卵場所を認知させる環境であり、さらに、好適な産
卵場を見つけることが、産卵に向けた最終的な成熟につ
ながると言われている。

山中式土壌硬度計による産卵場の表面の河床硬度の測
定値は、河床の表面の「浮き石状態」の程度を数量化し
たものと考えられる。そのため、山中式土壌硬度計によ
る産卵場の表面の河床硬度の測定値は、アユの産卵行動
における「産卵場の選択」および「産卵成熟促進」に関
して重要な指標になると考えられる。

アユの産卵場の表面の河床硬度の特徴

真下(1973)によれば、森林土壌の堅密度区分は6階
級あり、山中式土壌硬度計のバネ縮長との対応で示すと、
0-8 mm「しょう」、9-13 mm「軟」、14-17 mm「やや堅」、
18-21 mm「堅」、22-25 mm「すこぶる堅」となっている。
前述の全河川の縮長の平均値と中央値の測定結果と照ら
し合わせれば、A産卵場は平均値も中央値も8 mm未満

であるため、「しょう」に区分された。一方、B非産卵
場は平均値も中央値も9 mm以上であり13 mm未満で
あるため「軟」に区分された。その結果、アユの産卵行
動においては、同じ砂州縁辺であっても、堅密度区分の
「しょう」の河床硬度の場所が、「軟」の河床硬度の場所
よりも産卵場として選好される傾向があることが明らか
となった。さらに、得られたモデル式により(Fig. 4)、
例えば、河床硬度が1.0 kgf/cm²であれば産卵確率は40
%, 0.5 kgf/cm²であれば産卵確率は74%と算定され、
河床硬度からアユの産卵の適否を予測することが可能と
なった。総じて、山中式土壌硬度計による測定により、
従来の測定方法では難しかった、産卵場の表面の河床硬
度について、高精度の結果が得られることが実証できた。

山中式土壌硬度計と他の測定方法の違いと利点

シノや赤白ポールは、携帯性や操作性が高いが、測定
者による個人差が生じやすいという問題があった。この
ほか、長谷川式土壌貫入計は、定量的な評価が可能であ
るが、軟らかい河床の測定には不向きであるほか、価格
ならびに携帯性や操作性に難点があった。一方、山中式
硬度計は、長谷川式土壌貫入計よりも安価かつ携帯性と
操作性が高い上、測定者による個人差が生じにくいとい
った利点がある。さらに、軟らかい河床の測定に適して
いることから、河床の表面の河床硬度に関しては、長谷
川式土壌貫入計よりも高精度な評価が可能である(Table
2)。

試験研究機関における活用の可能性

アユの視点から考えると、山中式土壌硬度計が測定し

Table 2. Comparison of the characteristics of the riverbed hardness measuring instrument of the spawning ground of Ayu.

アユの産卵場の河床硬度を測定する機器の特性比較.

Instrument for measuring riverbed hardness	Measurement target	Expected improvement contents	Measurement accuracy of solid density of surface layer	Measurement accuracy of solid density of sedimentary layer	Portability	Operability	Price	Underwater measurement
Yamanaka type soil hardness tester	The solid density of surface layer	Improvement of spawning ground selection rate and promotion of oviposition maturation	◎	—	◎	◎	○	△
Hasegawa type soil intrusion meter	The solid density of the sedimentary layer	Increase survival rate by submergence of eggs after laying eggs	—	◎	△	△	△	△
Red & White Pole for surveying	The solid density of the sedimentary layer	Increase survival rate by submergence of eggs after laying eggs	—	△	△	○	○	△
Sino (with a scale of 30 cm on a steel bar)	The solid density of the sedimentary layer	Increase survival rate by submergence of eggs after laying eggs	—	△	◎	○	◎	△

河床硬度とは、いわば産卵場の表面の「触感」である。「触感」が良ければ産卵場として利用されやすく、また、産卵成熟も促される。

一方、長谷川式土壤貫入計など貫入深の測定機器は、産卵場の堆積層の河床硬度を測定している。アユの卵は産卵後に堆積層の約 6-10 cm の深さに卵が埋没と言われている（石田 2001）。埋没することが卵や仔魚の被食を妨げて生残率を向上させている可能性がある。そのため、貫入深を測定する機器は、アユの卵の生残率の重要な指標となる、産卵場の「卵の埋没しやすさ」を測定していると考えられる。

山中式土壤硬度計が測定する「産卵場の触感」も、貫入深の測定機器が測定する「卵の埋没しやすさ」も、違いはあるものの、どちらもアユの産卵環境の改善には欠かせない重要な項目である。この 2 つの項目は相関はあるものの必ずしも合致するものではない。例えば、堆積層が薄かったり堅かったりする場合でも、産卵場の表面の触感だけが良いケースも考えられる。逆に、堆積層が卵が埋没しやすい良好な状態でも、産卵場の表面の触感が悪くアユが産卵場として選択しないケースも考えられる。そのため、産卵場の河床硬度を試験研究する機関などでは、山中式土壤硬度計と長谷川式土壤貫入計の両機器で、産卵場を精緻に測定評価するのが望ましいと考えられる。

今後の課題と展望

本研究では、琵琶湖流入河川のアユが産卵場として「しょう」の地点を選好することが確認された。しかし、本研究の結果を、そのまま全国的に一般化できるか考えて見ると、体サイズが比較的小さいコアユが産卵の多数を占めていたことによる琵琶湖流域だけに限定された特性という可能性もある。そのため、本研究のアユの産卵場の特徴が全国的に一般的な傾向かどうかについては、オオアユや海産アユの産卵床についても検討する必要がある。そのため、多くの河川についても同様の調査によりデータを蓄積して検証していく必要がある。

本研究では水中におけるアユの産卵場の河床硬度の測定が困難であるため、確実に調査可能なアユの産卵場の水際の河床露出部に焦点を絞って研究を行った。しかし、水際の河床露出部は、川の水面の波や水位変動の影響を受けて、河床硬度がアユ産卵時より大きく変化している可能性もある。そのため、河床露出部の河床硬度と、水中のアユ産卵床表面の河床硬度の関係性について詳細に調査研究していく必要がある。

バネ式貫入計は、バネを貫入力とするために仕組みと

しては水中でも測定可能である。しかしながら、山中式土壤硬度計は、水中測定用に調整されていないため、水中の河床硬度の測定に応用するのは難しい。また、長谷川式土壤貫入計などの貫入深の測定機器は、空気中から水中に貫入する際に貫入力に変化が生じるため、水中の河床硬度について高精度の測定は難しい。総じて、水中におけるアユの産卵場の河床硬度を、簡便に高精度に測定する方法は未だ確立されていない。そのため、水中の河床硬度を簡便に測定するための新たな機器や測定方法を研究開発することが必要である。

アユの産卵場が不足している河川では、河床耕耘や砂利の投入により人工産卵場を造成することが必要である（近藤ほか 2011）。本研究が提示した山中式土壤硬度計による、河床露出部の産卵場表面の河床硬度の測定方法は簡便で精度が高い。そのため、前述の水中における河床硬度と河床露出部の河床硬度との関係性の詳細が明らかになれば、将来的には、河床硬度を考慮したより効果的な人工産卵場の造成技術にも応用できる可能性があると考えられる。

謝 辞

本研究の起点においては京都大学防災研究所の竹門康弘氏に河床変動とアユに関するアドバイスをいただきました。また、フィールド調査においては滋賀県水産試験場の皆様にアユの産卵調査に同行の承諾をいただき、さらに、貴重なアドバイスをいただきました。査読いただいた先生方には、論文の改善に資する重要なコメントをいただきました。ご協力いただいた皆様に感謝の意を表します。本研究は、滋賀県の琵琶湖環境研究推進機構『水系・生物の「つながり」の再生に関する研究～在来魚介類のにぎわい復活に向けて～』として、地方創生推進交付金を活用して実施されました。

摘 要

琵琶湖流域では、近年アユの産卵数が減少し、特に 2017 年の産卵数は少なかった。そのため、アユの産卵場を改善することが喫緊の課題となっている。アユは水の流れてゆらぐような「浮き石状態」の河床を産卵場として選択する。そのため、産卵場の表面の河床硬度を評価して、産卵場改善することが必要とされている。既存研究におけるアユの産卵場の河床硬度の定量化は、シノや長谷川式土壤貫入計で行われてきたが、精度や再現性

に欠点があった。そこで、これまで利用されてこなかった山中式土壤硬度計を用いて、アユの産卵場の表面の河床硬度を高精度に評価することを研究目的として実施した。調査は2014年9月に安曇川、塩津大川、姉川、愛知川の4つの琵琶湖流入河川の砂州縁辺の水際のアユの産卵場の河床露出部で行った。調査の結果、河床硬度の中央値は、産卵場が 0.22 kgf/cm^2 であった。また非産卵場は 1.40 kgf/cm^2 であった。産卵場と非産卵場ではU検定で統計的に5%有意で差異があった。さらに、混合効果ロジスティック回帰モデル式による河床硬度と産卵の有無の統計解析の結果、河床硬度が 1.0 kgf/cm^2 以下になれば産卵確率が40%以上になる傾向がモデル式から示された。最後に、山中式土壤硬度計と他の測定方法の違いと利点や、水中の産卵場の河床硬度との比較の必要性など、山中式土壤硬度計によるアユ産卵場の河床硬度の評価方法についての有用性や今後の課題について考察した。

引用文献

- 東幹夫（1973）びわ湖における陸封型アユの変異性に関する研究：Ⅳ．集団構造と変異性の特徴についての試論．日本生態学会誌 **23**: 255-265.
- 知花武佳・林融・三宅基文（2007）河川中流域における土砂の動態が早瀬の物理環境に及ぼす影響．水文・水資源学会誌 **23**: 362-372.
- ダイトウテクノグリーン株式会社（2018）長谷川式土壌貫入計取扱説明書 Ver5.2. (<https://www.daitoutg.co.jp/prd/pdf/kannyu5.2.pdf>, 2019年1月11日確認).
- 長谷川秀三（2006）特集「斜面の安定と根系を巡る諸問題」根系深さの推定手法．日本緑化工学会誌 **31**: 346-351.
- 長谷川秀三（2008）特集・樹木の診断と対策：土壌診断の方法について．グリーン・エージ 2008年8月号 No.416号．一般財団法人日本緑化センター，東京．
- 北海道立総合研究機構（2012）Ⅲ土壌物理性．「土壌・作物栄養診断のための分析法2012」，pp. 29-56．地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部，北海道夕張郡長沼町．
- 兵藤誠・泉公祐・竹門康弘・角哲也（2014）天竜川におけるアユ産卵に適した河床地形特性と置き土の効果の把握．京都大学防災研究所年報 **57**(B): 537-549.
- 井口恵一郎・伊藤文成（1998）3.3 ネイティブなアユが子孫を残せる川．「自然復元特集4魚から見た水環境—復元生態学に向けて／河川編—」（森誠一編），pp. 131-144．信山社サイテック，東京都．
- 石田力三（1961）アユの産卵生態—Ⅱ．産卵魚の体型と産卵場の砂礫の大きさ．日本水産学会誌 **27**: 1052-1057.
- 石田力三（1997）第2章産卵から遡上にいたるアユの生態第1節産卵生態．「天然アユを川にたくさん遡上させるための手引き—海産アユ種苗回帰率向上総合検討調査報告書—」（羽生功監修），pp.9-19．全国内水面漁業協同組合連合会，東京都．
- 石崎大介・亀甲武志・藤岡康弘・水野敏明・永田貴丸・淀太我・大久保卓也（2016）魚類の生息環境からみた琵琶湖と流入河川とのつながりの重要性．魚類学雑誌 **63**: 89-106.
- 伊藤一十三・渡部秀之・高比良光治・横山博保・近磯晴・石田力三（2006）多摩川における魚類生息環の改善について．リバーフロント研究所報告 **17**: 68-75.
- 梶原直人（2013）底生生物の生息環境指標としての底質の硬度．海の研究 **22**: 147-158.
- 河川環境総合研究所（2005）流量変動と流送土砂量の変化が沖積河川生態系に及ぼす影響とその緩和技術．「財団法人河川環境管理財団 河川環境総合研究所資料第16号」，pp.1-11．財団法人河川環境管理財団，東京．
- 国土交通省（2011）下流河川土砂還元マニュアル（案）第2版．国土交通省河川局河川環境課，東京．
- 真下育久（1973）硬度計における森林土壌の堅密度の区分および粗孔隙量の予知．森林立地 **15**: 22-24.
- 宮地傳三郎・川那部浩哉・水野信彦（1976）原色日本淡水魚類図鑑．保育社，大阪．
- 西田睦（1978）びわ湖のコアユの産卵生態．日本水産学会誌 **44**: 577-585.
- 西田睦・伏木省三・中賢治・水谷英志・田沢茂（1974）びわ湖のアユの天然産卵場および産卵群について．滋賀県水産試験場研究報告 **25**: 31-45.
- R Core Team（2014）R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria: <http://www.R-project.org/>.
- 滋賀県水産試験場（2018）平成29年アユ産卵調査結果．滋賀県水産試験場，滋賀県彦根市．
- 角哲也・中島佳奈・竹門康弘・鈴木崇正（2011）アユの産卵に適した河床形態に関する研究．京都大学防災研究所年報 **54**(B): 719-725.
- Takeshima H., Iguchi K., Hashiguchi Y. & Nishida M. (2016) Using dense locality sampling resolves the subtle genetic population structure of the dispersive fish species *Plecoglossus altivelis*. Molecular ecology **25**: 3048-3064.
- 上田薫利・上月康則・倉田健悟・大谷壮介・桂義教・東和之・堅田哲司・村上仁士（2003）貫入抵抗値を用いた簡便的な干潟底生生物調査地点の選定手法に関する基礎的研究．海岸工学論文集 **50**: 1056-1060.
- 遊磨正秀・丸山敦・山中裕樹・太田真人（2016）琵琶湖の回遊魚と流入河川の河口付近環境．「龍谷大学里山学研究所センター2015年度年次報告書」，pp. 298-302．龍谷大学里山学研究所センター，滋賀．