事例研究 CASE STUDY

超音波テレメトリーを用いた、人工池における石の間隙がニホンウナギの隠れ場所として果たす機能の把握

海部 健三^{1)*}・竹野 遼馬^{2,3)**}・高木 淳一^{2,3)}・市川 光太郎^{3,4)}・脇谷 量子郎⁵⁾・板倉 光⁶⁾・平江 多績⁷⁾・猪狩 忠光⁷⁾・三田村 啓理^{2,3)}・荒井 修亮^{3,4)}

1) 中央大学法学部 〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1

2) 京都大学大学院情報学研究科 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 36-1

3) CREST, JST 〒332-0012 埼玉県川口市本町

4) 京都大学フィールド科学教育研究センター 〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

5) 中央大学研究開発機構 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

6) 神戸大学大学院理学研究科 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

7) 鹿児島県水産技術開発センター 〒891-0315 鹿児島県指宿市岩本字高田上 160-10

Kenzo KAIFU^{1)*}, Ryoma TAKENO^{2)**}, Junichi TAKAGI²⁾, Kotaro ICHIKAWA^{3,4)}, Ryoshiro WAKIYA⁵⁾, Hikaru ITAKURA⁶⁾, Tatsumu HIRAE⁷⁾, Tadamitsu IGARI⁷⁾, Hiromichi MITAMURA^{2,4)}, Nobuaki ARAI^{3,4)}: Use of rocks as refuges by Japanese eel, *Anguilla japonica*, in artificial pond, revealed by acoustic telemetry. *Ecol. Civil Eng.* 22(1), 83-92, 2019

1) Faculty of Law, Chuo University, 724-1 Higashinakano, Hachioji-shi, Tokyo 192-0393, Japan

2) Graduate School of Informatics, Kyoto University, 36-1 Yoshidahon-cho, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8501, Japan

3) CREST, JST Honcho, Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan

4) Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

5) Research and Development Initiative, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

6) Graduate School of Science, Kobe University, 1-1 Rokkoudai-chou, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

7) Fisheries Technology and Development Center, 160-10 Takadaue, Iwamoto-aza, Ibusuki-shi, Kagoshima 891-0315, Japan

Ecology and
Civil Engineering
応用生態工学

Abstract: The Japanese eel, *Anguilla japonica*, is one of the most important fishery species in Japan, however, population of this species has been decreased, with the species listed as endangered (EN) on the International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List of Threatened Species. To understand use of stone piles as refuge by Japanese eel, behavior of 8 individuals in an experimental pond was monitored using acoustic biotelemetry. The sediment of the pond was sand and mud, and 6 stone piles with about 1 m diameter and 0.7 m height were made as refuge. According to the results of two-dimensions Kernel den-

2019年3月3日受付, 2019年4月15日受理

*e-mail: kaifu@tamacc.chuo-u.ac.jp

**現所属: ソフトバンク株式会社 〒105-7317 東京都港区東新橋 1-9-1

**Present Address: SoftBank Corp. 1-9-1 Higashishinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-7317, Japan

sity estimate, some eels stayed at stone piles and others stayed places without stone piles (sand-mud sediment). When stone piles were filled with sand, eels did not stay at the filled stone piles. Burrowing behaviors were sometimes observed in this experiment. Although Japanese eels might prefer stone piles as refuge, they can also use sand-mud sediment as refuge by burrowing themselves.

Key words: acoustic telemetry, *Anguilla japonica*, Japanese eel, rock revetment

論文の目的

ニホンウナギ *Anguilla japonica* は、外洋のマリアナ諸島西方海域に産卵場を持ち、陸水で成長する降河回遊魚である (Tsukamoto 1992, 2006). 孵化した仔魚はレプトセファルスと呼ばれ、北赤道海流に乗って西方へ運ばれた後、黒潮に乗り換えて北へ輸送され、その過程で、シラスウナギへ変態する (Kimura et al. 1994; Otake et al. 1998). シラスウナギは東アジア近海で黒潮を脱し、陸域へ接岸する。接岸したシラスウナギは、感潮域の最上流域周辺に着底し (Kaifu et al. 2010), 色素が発達し、クロコと呼ばれる時期を経て、黄ウナギになる (松井 1972). 黄ウナギは感潮域の最上流域の上・下流へと生息域を拡大しながら、数年から 10 年程度を東アジアの成育場で過ごした後、銀ウナギとなり産卵回遊を開始する (Yokouchi et al. 2009). ニホンウナギは我が国における重要な水産物であるが、その漁獲量は急激に減少し、2013 年には環境省、2014 年には IUCN (国際自然保護連合) が本種を「Endangered (絶滅危惧 IB 類)」に区分している (環境省 2015; Jacoby & Gollock 2014).

本種の減少に関わる要因として、過剰な漁獲、海洋環境の変化などとともに、成育場である河川や湖沼、沿岸環境の変化が挙げられており (Jacoby et al. 2015), 成育場環境の保全と回復が急がれる。ニホンウナギは夜行性で、日中は石やコンクリートの間隙、ヨシ類などの植生の間、リターの下などに隠れている (環境省 2016). 河川の下流域や汽水湖などには、砂泥が堆積している場合が多く見られる。ニホンウナギは砂泥に巣穴を掘る習性が知られているため (Aoyama et al. 2005), 底質が砂泥である水域では、巣穴を掘ることにより、幅広い水域を隠れ場所として利用できる可能性が考えられる。実際に、汽水湖でニホンウナギの行動追跡を行なった結果からは、本種が湖岸から沖までの幅広い環境を利用していることが示されている (海部ほか 2019).

河川下流域や汽水湖では、ニホンウナギは幅広い水域を隠れ場所として利用できることが考えられるが、これに対して、底質が礫を中心に構成される河川中上流域で

は、礫の間隙やヨシ類などの植生を隠れ場所として利用している (環境省 2016). 環境省の報告 (環境省 2016) では、ニホンウナギが礫を隠れ場所として利用する場合、礫の下部に隠れ場所として機能する間隙を含むことが重要であるとされている。このような間隙は、砂泥に埋まっていない「浮き石」によって形成される場合が想定される。しかしながら近年、河川において浮き石が減少し、水生生物に悪影響を与えている状況が報告されている。例えば底生魚であるハナカジカ *Cottus nozawae* については、河川横断構造物が設置されている水域で浮き石が少なく、生息密度が低いことが報告されている (渡辺ほか 2001). また、小野田・萱場 (2013) は、河川における実験に基づき、砂の堆積によって魚類 (主にヨシノボリ類) の生息密度に一時的な低下が見られることを指摘している。ニホンウナギについても、河川中上流域における浮き石の減少により、隠れ場所として利用可能な間隙が減少していることが危惧されるが、間隙の減少が本種の隠れ場所に与える影響に関する研究は知られていない。

そこで本研究は、間隙の減少が本種の隠れ場選択に与える影響を検討することを目的として、間隙を持つ石積み、及び、間隙が埋められた石積みの利用について、超音波テレメトリーを用いた行動追跡実験を行なった。海部ほか (2019) は、福井県久々子湖において、本種の利用する水際環境について調査を行なっているが、自然環境では受信範囲外への移出など、詳細に行動を追うことには困難を伴う。そこで本研究では、受信範囲外への移出がない閉鎖水域である人工池を利用して、ニホンウナギの行動追跡を試みた。

超音波テレメトリーとは、超音波発信機 (ピンガー) を生物に装着し、ピンガーが発する信号を受信機によって受信することにより、対象生物の位置などの情報を得る調査方法である。特に電波が伝播しにくい水圏において利用されることが多い。

調査地

ニホンウナギの行動追跡は、鹿児島県指宿市に立地す

る鹿児島県水産技術開発センターの内水面実験池内にあるコンクリート実験池（21.2 m×36.0 m，水深 1.1 m）（Fig. 1A, C）で行った。実験池はコンクリート製の垂直壁面に周囲を囲まれ，注水口と排水口がそれぞれ一箇所ずつ設けられている。飼育水は内水面実験池敷地内で汲み上げられた地下水を掛け流しで使用した。注水口と排水口は金網で実験池本体と仕切り，実験池からニホンウ

ナギが逃げないようにした。後述する，実験のために池内に設置した 6 基の石積みを除き，底質は概ね砂泥質，深さはおよそ 30 cm であった。コンクリートの隙間など，石積み以外のニホンウナギの隠れ場所となりうる池内の構造については，実験開始前に予め水を排水して底面を露出させ，土嚢により間隙を塞いだ。

実験池の長辺（36.0 m），短辺（21.2 m）をそれぞれ

Fig. 1. Experimental pond and time flow of the experiment. A: photo of the pond, B: photo of stone pile, C: map of the experimental pond, D: time flow of the experiment.

実験池と実験の流れ。A：実験池の写真，B：石積み，C：実験池の図，D：実験の流れ。

4等分するように、各辺に3箇所ずつの地点を設置し、それぞれ池を挟んで正対する地点間に測量用水糸を張ることで、池上に4×4のグリッドを作成した。長辺方向の中心を除く2本の糸と、短辺方向に張られた3本の糸による6箇所の交点の直下に、それぞれ石積み1基ずつ、計6基設置した(Fig. 1B, C)。石積みには、石材店で購入した鹿児島県内産の凝灰岩を使用し、直径約1 m、高さ約0.7 mの円錐型に、石の間に間隙が保持されるように作成した。石積みを用いた石材の大きさは、長軸 28.1 ± 5.3 cm (平均 $\pm$ SD)、短軸 20.8 ± 5.1 cmであった。さらに、コンクリート製の垂直壁面によって反射した信号により、位置の推測(測位)のばらつきが大きくなることが考えられるため、コンクリート壁による信号の反射を軽減することを目的とし、表面に凹凸構造をもつ遮光シートを池壁面全周にわたって敷設した。

方 法

実験の流れ

2017年8月22日午前9時からニホンウナギを放流して行動追跡を行った後、供試魚の一時回収と石積みの再設置のため、8月30日11時から各石積み1に回し網を設置した上で石積み1の一時解体を行った。なお、石積み1、石積み3、石積み5に関しては、石積みの再設置に伴い、実験池底質の砂泥を用いて石材の間隙を塞いだ。石積み再設置後の8月31日14時から、再度ニホンウナギを放流して行動追跡を再開した。また、石積み1の間隙が再生した場合のニホンウナギの行動を観察するため、2017年9月25日13時から、石積み1、石積み3、石積み5について、回し網を設置した上で石積み1の一時解体による間隙の砂泥除去後、再設置を行った。石積み1の再設置が完了した後、同日15時に行動追跡を再開した。2017年9月28日10時に全ての実験を終了した(Fig. 1D)。行動追跡開始(8月22日9時)から石積み解体(8月30日11時)までの194時間を「イニシャル期間」、石積み1、3、5の間隙を埋めている8月30日15時から9月25日13時までの622時間を「間隙閉塞期間」、間隙を埋めていた砂泥を取り除き、全ての石積み1の間隙が保持されている9月25日15時から9月28日10時までの67時間を「間隙再生期間」とした。

行動追跡手法

行動追跡実験の供試個体として、鹿児島県いちき串木野市内を流れる八房川水系の淡水域において、2017年7・8月にカニ籠によって採集されたニホンウナギ8個

体を用いた。ニホンウナギの全長は 733.9 ± 47.2 mm (平均 $\pm$ SD)、体重は 563.8 ± 172.5 gであった。2017年8月22日8時30分頃から約1時間の間に、8個体のニホンウナギにFA100を用いて麻酔を施したのちに外科手術を行い、ピンガーを腹腔に挿入した。手術の方法は、Itakura et al. (2018)に倣った。手術を終えた供試個体は、胴丸に入れた状態で実験池に数時間馴致させた後に放流した。なお、実験に用いた全てのニホンウナギは、定住性が強いと考えられる黄ウナギの成長段階にあることを外部形態により確認した(Okamura et al. 2007)。

受信機には、AQRM-1000(アクアサウンド社)8台を用いた(Fig. 2)。ニホンウナギに装着するピンガーについては、IDを識別可能なAQPX-1040PT(直径9.5 mm、長さ43 mm、水中重量1.8 g、アクアサウンド社)を用いた。ピンガーのIDは、連番でC1からC8とした。時刻同期用ピンガーとして、AQTD-600P(アクアサウンド社)を用いた。ピンガーの発信間隔は1分とした。

全実験終了後に受信機を引き上げ、データを回収した。回収したデータを元に、Takagi et al. (2018)に倣い、信号の各受信機への到達時間差からニホンウナギの位置を算出した。個体ごとに1時間単位で、限られたデータから全体の分布を推定する二次元カーネル密度推定を行い、ニホンウナギの存在位置を推定した。既知の場所でニホンウナギに挿入していない、静止させた状態のピンガーから信号を発信させ、二次元カーネル密度推定により存在確率が50%以上となる面積の平均値+標準偏差の2倍の値を求めたところ、 15.5 m^2 であった。このため、ニホンウナギに挿入したピンガーから得られた受信データより算出した二次元カーネル密度推定により存在確率が50%となる範囲が 15.5 m^2 以下の値をとる場合、ニホンウナギは定位しており(定位)、 15.5 m^2 より大きい値をとる場合は定位していない(非定位)、と区分した。8月30日に回し網を用いた捕獲調査を行い、石積み1に隠れているニホンウナギを捕獲した。捕獲した個体について、IDを確認して二次元カーネル密度推定によって推定された位置と比較することにより、石積み1に隠れているウナギを二次元カーネル密度推定によって特定できることを確認した。解析には、R ver 3.2.3(R Development Core Team)およびMATLAB 2016a(Mathworks社)を使用した。カーネル密度推定には、RのパッケージadehabitatHRを使用した。

巣穴状の構造および潜砂行動の確認

実験開始後、実験池の環境整備中には確認されなかった穴を複数確認したため、このうち一つの巣穴について、

Fig. 2. Examples of the results of two-dimensional kernel density estimation applied on same individual on same day. A: 12:00-13:00 (stay), B: 20:00-21:00 (not stay), circles: position of the receivers, crosses: estimated positions of eel. Lighter gray indicates higher probability of existence.

同一日，同一個体の二次元カーネル密度推定の結果．A：12時から13時（定位），B：20時から21時（非定位），○：受信機の位置，×：算出されたウナギの位置．存在確率の高い範囲ほど薄い色で示されている．

Table 1. Results of two-dimensional kernel density estimation. NA: kernel density estimation was not applicable, not stay: area of 50% existence probability is greater than 15.5 m², stay: area of 50% existence probability is equal or smaller than 15.5 m².

二次元カーネル密度推定の結果．NA：二次元カーネル密度推定によって位置を推定できなかった場合，not stay：存在確率が50%となる範囲が15.5 m²より大きい場合．Stay：存在確率が50%となる範囲が15.5 m²以下の場合．

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	total
NA	56.9	0.9	1	13.1	8.1	60.7	9.5	1.7	19
Not stay	36.8	88.8	92.5	82.2	71.7	33.7	67.9	69.2	67.8
Stay	6.3	10.3	6.4	4.7	20.2	5.6	22.6	29.1	13.2

浜野（1990）にしたがって型を取り，その内部形状を確認した．あわせて，石積みの際間を砂泥で埋めた際，および砂泥を除する際に実験池内のニホンウナギの目視観察を行った．

データ解析

ニホンウナギが定位している場合，存在確率50%以上の範囲に石積みが含まれる場合と，含まれない場合の二通りに区分し，含まれる場合は当該の石積み定位していると判断した．また，間隙閉塞期間に一部の石積み（石積み1，石積み3，石積み5）が砂泥で埋められている場合は，石積み砂泥で埋められていない場合と，埋められた場合を区別した．この区分に従い，個体ごとに定位していた時間について，どの石積み定位していたのか，または石積み以外の場所（その他）に定位していたのか，時間を追って定位場所を整理した．また，イニシャル期間，間隙閉塞期間，間隙再生期間について，埋められていない石積み，埋められた石積み，石積み以外

の場所（その他）のそれぞれに定位していた時間の割合を， χ^2 検定を用いて比較した．なお，間隙再生期間に関しては，実験期間が短く，砂泥を除去した石積みの利用が再開することの確認を目的としていたため，石積みとそのほかの環境の利用時間の割合について，ほかの期間との比較は行わなかった．

結 果

カーネル密度推定の結果

二次元カーネル密度推定が可能であった時間の割合について，実験期間全体を通して見ると，最も低いC6は全期間の39.3%，最も高いC2は全期間の99.1%，全個体では81.0%であった（Table 1）．二次元カーネル密度推定を行うことができた時間帯について，定義に従って非定位と定位の時間を区分すると，全個体では13.2%の時間が「定位」と区分された．ニホンウナギは日中

に定位することが多く、夜間は広範囲を移動する傾向が見られた (Fig. 2).

定位している環境

全個体について、イニシャル期間に着目すると、定位時間のうち石積みに滞在している時間の割合は62.6%、石積みのない「その他」の環境に定位する時間の割合は37.5%であった (Fig. 3). この期間については、後に間

隙を埋められた石積み (石積み1, 石積み3, 石積み5) と、間隙を埋められなかった石積み (石積み2, 石積み4, 石積み6) への定位時間の割合はともに31.3%であり、両者は等しかった. 間隙閉塞期間について、全個体の動向をみると、石積みが埋められている、いないを考慮しない場合、石積みに定位している時間は定位時間の64.8%, 「その他」の環境に定位する時間の割合は35.2

Fig. 3. Ratio of time spend at each environment when eels estimated to 'stay'. A: initial period, B: gap filling period, C: gap recovering period. No 'stay' was observed for C1 and C6 in the gap recovering period. 環境ごとの定位時間の割合. A: イニシャル期間, B: 間隙閉塞期間, C: 間隙再生期間. C1 および C6 は間隙再生期間には定位が確認されなかった.

%であり、砂泥で埋める前と有意に変わらなかった (χ^2 検定, $p=0.57$). これに対して、間隙を埋められた石積み (石積み1, 石積み3, 石積み5) と、間隙を埋められなかった石積み (石積み2, 石積み4, 石積み6) への定位時間の割合はそれぞれ2.7%, 62.1%であり、両者が等しかったイニシャル期間の割合とは有意に異なっていた (χ^2 検定, $p<0.05$). 石積み1, 石積み3, 石積み5の間隙を埋めていた砂泥を除去した間隙再生期間では、1, 3, 5の石積みへ定位する時間の割合は、全個体で10.9%にまで増加した. その一方で、元から砂泥に埋められていなかった石積み2, 石積み4, 石積み6に定位している時間の割合は56.3%にまで減少した. 間隙閉塞期間に砂泥で埋められた石積み1, 石積み3, 石積み5に定位している時間の割合と、全く埋められなかった石積み2, 石積み4, 石積み6に定位している時間の割合は、間隙閉塞期間と間隙再生期間で有意な差が検出された (χ^2 検定, $p<0.05$).

個体ごとに着目すると、全ての個体で石積みへ定位する時間、およびその他の環境へ定位する時間が観察された (Fig. 3). また、イニシャル期間と間隙閉塞期間の前後で、C4を除く全ての個体について、環境ごとの定位時間の割合に有意な差が見られた (χ^2 検定, $p<0.05$). 例えばC3は埋砂前には石積みへ定位した時間が確認されていないが、間隙閉塞期間では、定位に区分された時間のうち55.6%で石積みへ滞在していた. その一方で、

イニシャル期間に81.3%の時間を石積みへ滞在していたC6が間隙閉塞期間に石積みへ定位した時間は、定位時間の15.1%であり、84.8%の時間を石積み以外の「その他」の環境で過ごしていた.

実験を行った883時間のうち、複数個体が同時に同じ石積みへ定位していた時間は14例に限られていた (Table 2). 全個体について、定位していた環境を時間軸に沿って整理した結果を Fig. 4 に示す. 一部の石積みの間

Table 2. A list of time when more than one individual stay at a single stone pile.

複数個体が同じ石積みへ定位していた時間.

Day & time	Stone pile	ID	
8月24日10時	1	C5	C8
8月22日21時	5	C2	C5
8月30日03時	3	C2	C8
9月20日00時	6	C1	C5
9月03日07時	2	C3	C8
9月07日16時	2	C3	C8
9月11日15時	2	C3	C8
9月16日17時	2	C3	C8
9月05日22時	2	C3	C8
8月31日18時	6	C3	C6
9月01日14時	6	C3	C5
9月01日17時	6	C3	C5
9月12日15時	6	C5	C6
9月12日14時	6	C5	C6

Fig. 4. Environment used by individual eels. 1-6: number of stone piles, 7: other environment without stone pile. Stone piles of no. 1, 3, and 5 were filled with sand in 'gap filling period' and the sand was removed in 'gap recovering period'. 個体ごとに定位した環境. 1-6: 石積みの番号, 7: 「その他」の環境. 石積み1, 石積み3, 石積み5は、間隙閉塞期間に砂泥で間隙が埋められ、間隙再生期間には砂泥が取り除かれた.

Fig. 5. Wholes observed in the experimental pond after releasing eels.
ウナギ放流後に実験池内に観察された穴.

隙が砂泥で埋められたイニシャル期間と間隙閉塞期間の前後の個体の移動に注目すると、C5が砂泥で間隙を埋められた石積み1から埋められていない石積み6へ定着場所を移した。また、砂泥で埋められた石積み5に定位していたC7が、同じ時期に埋められなかった石積み4に移動し、同時に石積み4に定位していたC8が、やはり埋められなかった石積み2に移動した。さらに、C7とC8の移動と同時に、石積み2に定位していたC2が、石積みを利用せず、「その他」の環境を利用するようになった。

巣穴状の構造および潜砂行動の確認

実験開始後、実験池の環境整備中には確認されなかった穴を複数確認した (Fig. 5)。このうち一つの巣穴について型を取ったところ、二つの穴が地中で繋がった構造をしていた。ニホンウナギの利用は確認できなかったが、実験池にニホンウナギを導入する以前に穴は確認されていなかったことから、これらの穴はニホンウナギが掘った可能性が高い。また、実験期間中に、ニホンウナギが砂泥に潜る行動が複数回確認された。

結果の評価

ニホンウナギによる石積みの利用

日中に定位し、夜間に活動する傾向は、ニホンウナギが夜行性であるとする先行研究 (Kaifu et al. 2013; Itakura et al. 2018; 海部ほか 2019) の考察と一致した。定位していた環境は個体ごとに異なるだけでなく、同一個体であっても、利用環境は時間の経過や環境改変とともに変化した。このことからニホンウナギは定位する環境として、石の間隙や砂泥底を利用できることが改め

て確認された。一部の石積みを砂泥で埋める際に石積みからニホンウナギが捕獲されたことから、ニホンウナギが石積みを隠れ場所として利用していることは明らかである。また、ニホンウナギが砂泥底に潜って身を隠すことも、本実験の中で目視確認された。Aoyama et al. (2005) は、砂泥底において本種が巣穴を掘ることを報告している。巣穴は二つの入り口が繋がった構造をしており、実験中に見つかった巣穴状の構造と類似している。これらのことから、定位と区分された時間の3割以上を占める「その他」(石積みなどの構造が確認されていない場所) への定位は、巣穴の中に入っていた状態、または砂泥に潜った状態の場合が含まれていると推測される。

本研究では、石積みを砂泥で埋めた後に、埋められた石積みへの定位が減少した一方で、埋められていない石積みへの定位は継続した。また、砂泥で埋められていた石積みは、砂泥を撤去したのちに定位時間が有意に長くなっている。さらに、実験が行われた条件下では、複数個体が同一の石積みを利用することは少なく、ある個体が石積みを利用することによって、それまで石積みを利用していた別の個体が、石積みのない環境へ定位場所を移した。これらのことから、砂泥で塞がれたことにより、石積みの間隙への侵入が困難になり、ニホンウナギの利用可能な隠れ場所が制限されたことが示唆される。

8個体全体の定位時間に着目すると、石積みへ定位する時間はおよそ6割を占めており、今回利用した実験池においては、ニホンウナギが砂泥底よりも石積みの間隙を隠れ場所として選好したことが示唆される。砂泥に潜る、または巣穴を掘るという行動は、すでに存在する間隙に入る行動と比較して、より多くのエネルギーと時間

を必要とすると考えられる。このため、本種が砂泥底よりも石積みを選択した理由のひとつとして、エネルギーおよび時間の節約が推察される。九州地方の河川中下流域で行われている伝統的な漁法に、石倉漁と呼ばれるものがあり、本研究で使われた石積みと同じように、河床に積み上げた石の間隙を隠れ場所として利用しているウナギを捕獲する（原田ほか 2017）。石倉漁は、水域の底質が主に砂泥で構成される河口域から感潮域で行われる（原田ほか 2017）。砂泥底の上に石倉が設置された環境は、本研究において実験池の砂泥底に石積みが設置された環境と類似している。本来河口域の砂泥底では、ニホンウナギは砂泥に潜ったり巣穴を掘ったりすることで隠れ場所としていたと考えられるが、比較的エネルギーと時間を消費せずに隠れ場所として利用可能な石倉が設置されることで、石倉を選択的に利用した結果、石倉によるウナギの漁獲が可能になるものと推測される。

ニホンウナギの隠れ場所としての間隙の重要性

本研究では、ニホンウナギが石積みの間隙を隠れ場所として利用すること、および、間隙が砂泥などで塞がれると、間隙の塞がった石積みの利用頻度が低下することが確認された。魚類の生息域に存在する石の間隙が砂泥で埋まることは、間隙を利用する水生生物に大きな影響を及ぼすと考えられ、アユ *Plecoglossus altivelis*（荒木 2011；高橋ほか 2015）、ハナカジカ（野上ほか 2001a, 2001b）、ネコギギ *Pseudobagrus ichikawai*（佐川ほか 2008）に関して、この問題を扱った調査研究が行われている。しかしその一方で、ニホンウナギを調査対象としているものは筆者らの知る限り存在しない。重要な水産種でありながらも絶滅危惧種に区分されているニホンウナギについて、石の間隙が砂泥で埋められることで、隠れ場所が制限されることを示した本研究は、本種の保全と持続的利用について、重要な示唆を与えるものである。

ニホンウナギは、沿岸域から河川上流域まで幅広い環境を生息域として利用する（Kaifu et al. 2010；Wakiya et al. 2016）。底質が砂泥を主体とする水域においては巣穴を掘る（Aoyama et al. 2005）、または本研究が示したように砂泥に潜ることによって、水底全体を隠れ場所として利用することが可能であると考えられる。巣穴を作り、潜砂を行うニホンウナギについては、砂泥底の水域の石の間隙が砂泥で埋まったとしても、隠れ場所の減少という視点では、深刻な影響は生じない可能性が高い。ただし、河川中上流域など礫が主要な底質である水域においては、底質に穴を開けて潜り込むことは難しいと考えられるため、石の間隙が埋まることによって、利用可

能な隠れ場所が減少する可能性が想定される。

石の間隙が砂で埋まる要因としては、土砂供給の減少と、流量の安定化（年最大流量の減少、および中小規模の洪水の頻度減少）が考えられる（渡辺ほか 2001；高橋ほか 2015）。ダムなどの河川横断構造物が土砂供給の減少と流量の安定化の要因の一つとされているが（佐川ほか 2008）、この他に、河川に沿った道路による山と河川の分断、治山による土砂崩れの減少も、土砂供給を減少させている可能性が想定される。河川中上流域など礫が主要な底質である水域においては、ダムなどの河川横断構造物による土砂供給の減少と流量の安定化、山と河川の分断、治山による土砂崩れの減少による土砂供給の減少に対して適切な対処を取ることによって、ニホンウナギの隠れ場所が確保され、生息環境を改善できる可能性が示唆される。

今後の課題

ニホンウナギが石積みの間隙を隠れ場所として利用するとともに、砂泥底に穴を掘る、または潜ることによって隠れ場所とする。砂泥底の水域においては、本種は広い範囲を隠れ場所として利用できると考えられる。このため本種の隠れ場所の維持と回復という観点からは、河川中上流域の礫底の水域の重要性が高いと推測される。

謝 辞

この研究は、水産庁「平成 28 年度内水面資源生息環境改善手法開発事業」の予算を用いて行われた。

摘 要

鹿児島県水産技術開発センターの所有する人工池（21.2 m×36.0 m、水深 1.1 m）において、間隙を持つ石積み、および、間隙が埋められた石積みを作成し、超音波テレメトリー技術を利用してニホンウナギ 8 個体の行動追跡を試みた。砂泥底の実験池内に直径約 1 m、高さ約 0.7 m の円錐型に、石積みを 6 基設置した。石積みのうち 3 基に関しては、実験開始 9 日後に砂泥を用いて石材の間隙を塞ぎ、その 26 日後に砂泥を除去した。行動追跡実験の供試個体としてニホンウナギ 8 個体を用い、ピンガーを腹腔に挿入して実験池に放流した。8 台の受信機を用い、個体ごとに 1 時間単位で二次元カーネル密度推定を行い、実験期間中のニホンウナギの存在位置を

推定した。間隙のある石積みに定位する個体が確認されたが、定位する環境は個体ごとに異なるだけではなく、同一個体であっても、利用環境は時間の経過と環境改変とともに変化しうることが確認された。また、石積みの間隙を砂泥で埋めることによって、定位環境としての石積みの利用は激減した。複数個体が同一の石積みを利用することは少なく、個体の侵入によって、別の個体の石積みの利用が制限される可能性が示唆された。さらに、実験中にニホンウナギが砂泥に潜る行動が観察され、実験期間中には巣穴と考えられる構造が確認された。既往研究によれば、石の間隙が砂泥で埋まる要因として、土砂供給の減少と流量の安定化が考えられる。ダムなどの河川横断構造物が土砂供給の減少と流量の安定化の要因の一つとされており、ニホンウナギの生息環境の改善のためには、これらの問題に対する適切な対処が必要と考えられる。

引用文献

- Aoyama J., Shinoda A., Sasai S., Miller M. J. & Tsukamoto K. (2005) First observations of the burrows of *Anguilla japonica*. *Journal of Fish Biology* **67**: 1534-1543.
- 荒木康夫 (2011) 寒河江川・月布川におけるアユ漁業実態および漁場環境調査。「良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針」, pp. 46-59. 水産庁.
- 浜野龍夫 (1990) ポリエステル樹脂を使用して底生動物の巣型をとる方法. *日本ベントス学会誌* **39**: 15-19.
- 原田真実・久米学・望岡典隆・田村勇司・神崎東子・橋口峻也・笠井亮秀・山下洋 (2017) 大分県国東半島・宇佐地域の伊呂波川と桂川に設置したウナギ石倉かごにより採集されたニホンウナギと水生動物群集. *日本水産学会誌* **84**: 45-53.
- Itakura H., Miyake Y., Kitagawa T. & Kimura S. (2018) Site fidelity, diel and seasonal activities of yellow-phase Japanese eels (*Anguilla japonica*) in a freshwater habitat as inferred from acoustic telemetry. *Ecology of Freshwater Fish* **27**: 737-751.
- Jacoby D. & Gollock M. J. (2014) *Anguilla japonica*. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3.
- Jacoby D. M. P., Casselman J. M., Crook V., DeLucia M. B., Hyojin Ahn H., Kaifu K., Kurwie T., Sasal P., Silfvergrip A. M. C., Smith K. G., Uchida K., Walker A. M. & Gollock M. J. (2015) Synergistic patterns of threat and patchy data challenge the global conservation of anguillid eels. *Global Ecology and Conservation* **4**: 321-333.
- Kaifu K., Miller M. J., Aoyama J., Washitani I. & Tsukamoto K. (2013) Evidence of niche segregation between freshwater eels and conger eels in Kojima Bay, Japan. *Fisheries Science* **79**: 593-603.
- 海部健三・竹野遼馬・三田村啓理・高木淳一・市川光太郎・脇谷量子郎・板倉光・石井潤・荒井修亮 (2019) 超音波テレメトリーを用いた、汽水湖におけるニホンウナギの生息場所利用の把握. *応用生態工学* **22**: 73-82.
- Kaifu K., Tamura M., Aoyama J. & Tsukamoto K. (2010) Dispersal of yellow phase Japanese eels *Anguilla japonica* after recruitment in the Kojima Bay-Asahi River system, Japan. *Environmental Biology of Fishes* **88**: 273-282.
- 環境省 (2015) レッドデータブック 2014—絶滅のおそれのある野生生物—4 汽水・淡水魚類. ぎょうせい.
- 環境省 (2016) 平成 27 年度ニホンウナギ保全方策検討委託業務. 環境省自然環境局.
- Kimura S., Tsukamoto K. & Sugimoto T. (1994) Model for the larval migration of the Japanese eel: role of the trade winds and salinity front. *Marine Biology* **119**: 185-190.
- 野上毅・渡邊康玄・中津川誠・土屋進・岩瀬晴夫・渡辺恵三・加村邦茂 (2001a) 真駒内川における底生魚類生息環境の改善についての現地実験. *河川技術論文集* **7**.
- 野上毅・渡邊康玄・中津川誠 (2001b) 真駒内川における魚類の生息環境. *水工学論文集* **45**.
- Okamura A., Yamada Y., Yokouchi K., Horie N., Mikawa N., Utoh T., Tanaka S. & Tsukamoto K. (2007) A silvering index for the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Environmental Biology of Fishes* **80**: 77-89.
- 小野田幸生・萱場祐一 (2013) 石礫河床への大量の覆砂が魚類生息密度に及ぼす影響について. *河川技術論文集* **19**.
- 松井魁 (1972) 鰻学. 恒星社厚生閣.
- Otake T., Inagaki T., Hasumoto H., Mochioka N. & Tsukamoto K. (1998) Diel vertical distribution of *Anguilla japonica* leptocephali. *Ichthyological Research* **45**: 208-211.
- 佐川志朗・萱場裕一・田代喬 (2008) ネコギギの再導入に関わる生息場所解析の試み—希少淡水魚類の生息場所整備の進め方—. *水利科学* **303**: 15-41.
- Takagi et al. (2018) Simultaneous observation of intermittent locomotion of multiple fish by fine-scale spatiotemporal three-dimensional positioning. *PLoSOne* **13**: e0201029.
- 高橋勇夫・寺門弘悦・曾田一志・村山達朗・福井克也 (2015) 資料 江の川上流域におけるアユ漁場診断調査. 島根県水産技術センター研究報告 **8**: 39-49.
- Tsukamoto K. (1992) Discovery of the spawning area for Japanese eel. *Nature* **356**: 789-791.
- Tsukamoto K. (2006) Spawning of eels near a seamount. *Nature* **439**: 929.
- Wakiya R., Kaifu K. & Mochioka N. (2016) Growth conditions after recruitment determine residence-emigration tactics of female Japanese eels, *Anguilla japonica*. *Fisheries Science* **82**: 729-736.
- 渡辺恵三・中村太士・加村邦茂・山田浩之・渡邊康玄・土屋進 (2001) 河川改修が底生魚類の分布と生息環境におよぼす影響. *応用生態工学* **4**: 133-146.
- Yokouchi K., Sudo R., Kaifu K., Aoyama J. & Tsukamoto K. (2009) Biological characteristics of silver-phase Japanese eels, *Anguilla japonica*, collected from Hamana Lake, Japan. *Coastal Marine Science* **33**: 54-63.