

河川基金助成事業

堰を登れるウナギと登れないウナギは
何が違うのか？

助成番号：2022-5211-005

京都大学フィールド科学教育研究センター
特定助教 久米 学

2022 年度

1. はじめに

ウナギ属魚類は19種・亜種で構成され、熱帯域から温帯域にかけて広く分布する。ウナギ属魚類は通し回遊魚であり、海で生まれて河川や湖沼で成育する。回遊の規模は様々であり、産卵場近くに接岸する小規模回遊を行うものから数百 km の中規模回遊を行うもの (Aoyama et al., 2003; Kuroki et al., 2006), 数千 km におよぶ大規模回遊を行うもの (Schmidt, 1922; Tsukamoto, 1992; Tsukamoto et al., 2011) まで存在する。ウナギ属魚類は水産資源として重要な魚種であるが、近年その資源の減少が世界規模で確認されており、大きな問題となっている (Kuroki et al., 2014; Righton et al., 2021)。日本を含む東アジア沿岸に生息するニホンウナギ *Anguilla japonica* は、ウナギ属魚類の中でも特に資源の減少が進んでいる種の一つである。

ニホンウナギは東アジア沿岸域で成長し、西マリアナ諸島西方海域で産卵する (Tsukamoto, 1992; Tsukamoto et al., 2011)。卵から孵化したレプトセファルスと呼ばれる柳葉のような形をした仔魚は、北赤道海流に乗って西に運ばれた後、フィリピン諸島付近で黒潮に乗り換えて北上し、5ヶ月から1年ほどかけて東アジア沖合まで移動する (Kimura et al., 1994, 1999)。東アジア沖合でレプトセファルスはシラスウナギと呼ばれる透明な稚魚に変態し (Otake et al., 2006), 東アジア一帯に接岸する (Cheng & Tzeng, 1996)。日本では、12月から5月にかけてシラスウナギの接岸が観測される (Tsukamoto, 1990)。シラスウナギとして接岸した後、クロコ期や黄ウナギ期初期の小型のニホンウナギが沿岸域から河川上流まで分散し (Kaifu et al., 2010), 幅広い環境で性成熟までの数年から十数年を過ごす (Yokouchi et al., 2008)。その後、銀ウナギに変態し、産卵場に向けて約半年にわたる産卵回遊を開始する (Okamura et al., 2002; Tsukamoto, 2009; Higuchi et al., 2021)。

ニホンウナギは東アジアで重要な水産資源であるが、1970年代から漁獲量が減少を続けており (Tsukamoto et al., 2009b)、2014年には国際自然保護連合 (IUCN) レッドリストの *Endangered* に指定された (Jacoby & Gollock, 2014)。ニホンウナギの個体数減少の一因として、成育場である河川的环境変化が挙げられる。例えば、河川横断構造物による河川の連続性の分断によって河川上流への遡上が阻害されている (Kume et al., 2019, 2020; Itakura et al., 2020; Yokouchi et al., 2022)。Chen et al. (2014) は、河川横断構造物の設置を含む河川環境の改変により、日本、中国、台湾、韓国の16河川において、1970年代には存在したニホンウナギの生息域のうち76.8%が2010年までに失われたと報告している。

堰や堰、ダムなどの河川横断構造物は人間の生活に必要な各種用水の確保や洪水被害の軽減、河床保護などの目的で様々な河川に多数設置されている。例えば日本では、約20年前の段階でダムが約2700基 (日本ダム協会, 1998), 高さ15m以下の堰や堰などの河川横断構造物が約55000基設置されている (全国治水砂防協会, 2003)。河川横断構造物は人間にとって有用な施設である一方で、河川の連続性を分断し、多種多様な生物の河川内、あるいは河川-海域間の移動を制限している (Fagan, 2002; Faulks et al., 2011)。

ニホンウナギは、小型個体が沿岸から河川上流域まで遡上し (Kaifu et al., 2010), 全長40cmを越えるような大型個体も海を介した河川間移動 (Kume et al., 2021) に伴い河川を遡上する。そのため、河川横断構造物による影響を受けやすいと考えられる。実際、河川横断構造物の上流では個体数密度の低下が確認されており、ニホンウナギの遡上が阻害されていると報告されている (Kume et al., 2019, 2020; Itakura et al., 2020; Yokouchi et al., 2022)。また、コンクリート板などを用いてウナギ属の遡

上を観察した室内実験でも、板を遡上できた個体は全長の小さい個体の一部に限られたと報告されており（松井・永井, 1967; 松田ら, 2016）, 河川横断構造物はニホンウナギの障害になっていることが示唆されている. 一方で, 河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響の大きさは十分に評価されていない. ニホンウナギの個体数密度は護岸の割合（Itakura et al., 2015; Matsushige et al., 2020）や底質（Matsushige et al., 2020）, 河口からの距離（Kume et al., 2020; Itakura et al., 2020; Yokouchi et al., 2022）によっても変化する. そのため, 個体数密度を調査した研究では, 河川横断構造物の他にこれらの一部または全部を含んだ複合的な影響の評価となる. また, 実際の河川横断構造物では, コンクリートの劣化による突起や付着物, 壁面に生える植物によってニホンウナギの遡上難易度が変化する可能性がある（Solomon & Beach, 2004; Kume et al., 2019, 2020, 2022）. そのため, 高さや角度が等しい場合でも, 実際の河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響を室内実験で正しく評価できるかは分からない. したがって, 河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響の大きさを十分に評価するためには, 実際の河川横断構造物で直接その影響を評価する必要がある.

Kume et al. (2022) は和歌山県の小河川で, 高さ 165 cm の垂直な堰上端の両岸を 2 月から 5 月にかけて昼夜通して撮影し, 夜間に全長 6-14 cm のニホンウナギが堰を遡上したと報告している. また, 電気ショッカーを用いた捕獲調査により, この堰の上流には多数のニホンウナギが生息していることが確認されている（Kume et al., 2021）. そのため, 堰の上流に生息するニホンウナギは高さ 165 cm の垂直な堰を越えて, 上流へ到達した個体だと考えられる. 一方で, 全長 14 cm を越える個体が堰を遡上する様子は確認されなかった（Kume et al., 2022）. その理由として, 全長 14 cm を越える個体がこの堰を遡上できない可能性と, そもそも遡上を試みていない可能性があるとしている. 一つの仮説が正しければ, 垂直な河川横断構造物が存在することで, 特定の全長を閾値として, それよりも大きいニホンウナギは上流へ遡上することができなくなる. そのため, 垂直な河川横断構造物を遡上可能なニホンウナギの全長の閾値を調査することで, 河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響の大きさを評価することができると考えられる. しかしながら, Kume et al. (2022) は堰の下側でニホンウナギの撮影を行っていなかったため, これらの仮説を検証することができなかった. そこで本研究では, Kume et al. (2022) と同じ堰において, 遡上可能なニホンウナギの全長に閾値が存在するという仮説の検証を行い, その閾値を明らかにすることで, 垂直な河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響の大きさを評価することを目的とした.

キーワード: ニホンウナギ, 堰, 体サイズ

2. 材料と方法

2.1 調査地

本研究は和歌山県西牟婁郡白浜町を流れる安久川（流程4.3 km）の河口から2.75 km上流に位置する高さ165 cmの垂直なコンクリート堰で調査を行った（図1; Kume et al., 2022）。この堰の下には長さ5 mほどの水叩きが設置されている。この堰には魚道は設置されていない。堰の上流は下流よりも河道幅が狭く、堰の両端には水が流れず湿っている場所、乾燥している場所が存在している（図1 d）。また、コンクリートの劣化による粗骨材の露出や藻の繁茂により、堰の壁面には無数の凹凸が形成されている（図1 d）。河口からこの堰までの間に他の堰や堰は設置されておらず、この堰が潮汐限界地点となっている。また、両岸がコンクリートで護岸されており、底質は主に砂泥や砂利で構成されている。それに対して、堰の上流域では、自然河岸が残っており、大小様々な浮石が存在している（図1 e, f）。浮石が創る間隙はニホンウナギが捕食者から隠れ、捕食を回避する場所として機能している（坂上ら, 2021）。また、ニホンウナギの餌となる小型の甲殻類や魚類も豊富に生息しており、堰の上流にはニホンウナギの生息にとって適した環境が整っている。

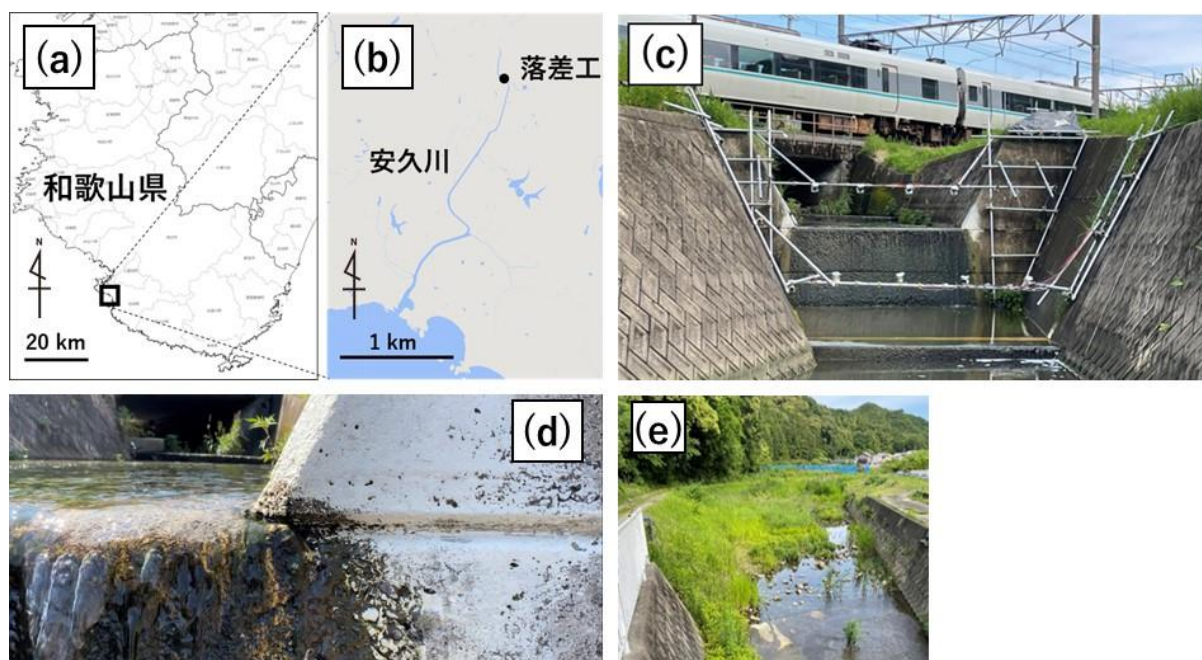


図1. 調査地の地図. 和歌山県 (a) および安久川周辺の地図 (b). 調査対象とした堰の全景 (c) と左岸側の縁辺部 (d) の写真. 堰上流の写真 (f)

2.2 動画の撮影と分析

2.2.1 動画撮影方法

本研究では、安久川の垂直な堰において、堰を登るニホンウナギを撮影するために2台、堰を登ろうとする、または堰を登るのを諦めたニホンウナギを撮影するために4台の赤外線暗視ビデオカメラシステム（田中三次郎商店社製）を設置して、堰の上流端の両岸（エリア1）、および堰の下流に位置する水叩きの川幅全体（エリア2）を撮影した（図1c）。撮影は2022年2月1日から2022年5月31日の4ヶ月間行った。夜間には、赤外線ライトを照射し、24時間撮影を行った。解像度は1980×1280pixels、フレームレートは30 fpsに設定した。

エリア1の撮影範囲は、堰両端それぞれについて水の流れがほとんど無い部分と水が流れ落ちる部分の両方を含んだおよそ50×100 cmの範囲であり、Kume et al., (2022)と同様の範囲である。堰中央部の撮影は行っていない。小型のニホンウナギ(平均全長±標準偏差 = 5.8 ± 0.2 cm)とヨーロッパウナギ *Anguilla anguilla* (全長 6.9-7.5 cm) は、流速が 50 cm/s を越えると前進することが困難であると報告されており (McCleave, 1980; 矢田谷ら, 2020), 遊泳能力は低い。また, Kume et al. (2022) はエリア1と同じ範囲において、確認された全てのニホンウナギが水の流れがほとんど無い堰端を登っていたと報告している。そのため、垂直な壁面を水が流れ落ちる堰の中央部を流水に逆らって登ることはできないと考えられた。

エリア2の撮影範囲は、堰の下流に位置する水叩きの川幅全体を含むおよそ50×400 cmの範囲であり、カメラを4台用いて1台につきおよそ50×100 cmの範囲を撮影した。

ニホンウナギの輪郭を明瞭に撮影し、発見しやすくするために、湿潤面でも塗装可能な白色塗料(アクアコート, HERMETIC社製)を用いてビデオカメラの画角内を塗装した。エリア1では、Kume et al. (2022)によりニホンウナギの遡上が確認された水の流れていない両端の壁面を全体的に、堰上端の河道内を幅10 cmの帯状に塗装した。エリア2では、河道内と兩岸の壁面を幅40 cmの帯状に塗装した。また、全てのカメラの撮影範囲内に5 cmのスケールを貼り付けた。

2.2.2 動画分析の方法

撮影した映像を VLC media player Ver. 3.0.18 を用いて再生し、目視で確認した。ニホンウナギは夜行性であり、日没後に活発に行動する (Aoyama et al., 2002; Dou & Tsukamoto., 2003; Itakura et al., 2018; Noda et al., 2021)。また, Kume et al. (2022) はニホンウナギが堰を遡上する様子が夜間のみ確認されたと報告している。そのため本研究では、エリア1については夜間(日没1時間前-日出1時間後)の映像のみを確認した。エリア2については、エリア1でニホンウナギが確認された夜間に加え、その前の日中12時間について映像を確認した。ニホンウナギの移動速度が遅く、等倍速では発見が難しかったため、1-32倍速までの倍速機能を用いて動画を再生し、動画に映ったニホンウナギの確認日時を記録した。なお、エリア1の右岸側は4月23日から5月3日まで、左岸側は4月23日から4月25日までの間、機材トラブルのため映像を記録できなかった。エリア2では、4月18日の18時から20時の間に合計20分程度、4月19日の19時から4月20日の2時半にかけて、赤外線ライトの不備により右岸から10-20 cmまでの範囲を確認することができなかった。また、4月21日の14時から4月22日の日出1時間後にかけて全範囲が、4月26日の18時以降に右岸から10 cmほどの範囲、23時から4月27日の日出1時間後までは全範囲が、雨や濁り、赤外線ライトの不備により確認できなかった。さらに、5月14日の日出1時間後から22時にかけて全範囲が、5月30日の19時から10分ほどの間全範囲が雨や濁り、赤外線ライトの不備により確認できなかった。

確認されたニホンウナギについて、全長を計測した。全長は、ImageJ Ver. 1.53を用いて5 cmのスケールを基準に1 cm単位で推定した。本研究では、以下のように遡上成功個体、遡上挑戦個体、遡上断念個体を定義した(図5)。

遡上成功個体：エリア1で発見された個体のうち、下流側からビデオカメラの画角に入り、白色塗装部を越えて上流へ移動した個体。

遡上挑戦個体：エリア2で発見された個体のうち、下流側からビデオカメラの画角に入り、白色塗装部

を越えて上流に移動した個体（遡上挑戦個体 A），および上流側からビデオカメラの画角に入り，もう一度上流側に移動した個体（遡上挑戦個体 B）。

遡上断念個体：エリア 2 で発見された個体のうち，上流側からビデオカメラの画角に入り，白色塗装部を越えて下流に移動した個体（遡上断念個体 A），および下流側からビデオカメラの画角に入り，もう一度下流側に移動した個体（遡上断念個体 B）。

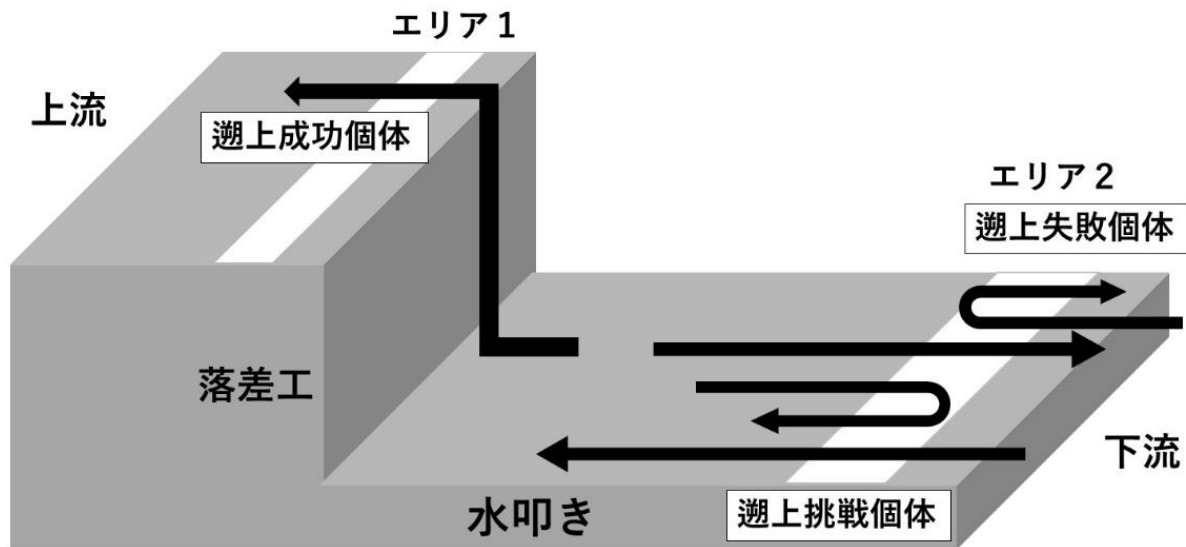


図 2. 遡上成功個体，遡上挑戦個体，遡上断念個体のイメージ図。遡上挑戦個体と遡上断念個体はその移動方向の違いから，さらに A, B の 2 種類に分類した。白線はニホンウナギを発見しやすくするために行った堰への白色塗装を示している。

垂直な堰を遡上することができるニホンウナギの全長に閾値が存在するならば，遡上挑戦個体と遡上断念個体の全長に対して，遡上成功個体の全長は小さくなる。そこで，それぞれの全長を比較した。

3. 結果

エリア 1 の夜間の映像を全て確認した結果、本研究の調査期間中に合計 24 個体のニホンウナギが確認された。これらの個体は 4 月 17 日から 5 月 31 日の間に日没から日の出までの 10 夜で確認された (図 3)。そのうち、遡上成功個体が 17 個体、遡上の途中で落下した個体が 3 個体、遡上の途中で撮影範囲外に出てしまったため遡上成否を確認できなかった個体が 4 個体であった (表 1)。本研究においても、Kume et al. (2022) が報告したように全ての個体が水の流りがほとんど無い堰の端を登っていた。

表 1. エリア 1 で確認されたニホンウナギの確認日時と全長。結果の成功は遡上成功個体、落下は遡上の途中で落下した個体、不明は遡上の途中で撮影範囲外に出てしまい遡上成否を確認できなかった個体を示している。夜間ごとに色分けしている。

個体	確認日	確認時間	結果	全長 (cm)
1	4 月 17 日	20:08:38	成功	6
2	4 月 17 日	20:08:58	成功	10
3	4 月 17 日	20:30:26	成功	6
4	4 月 17 日	22:07:50	成功	6
5	4 月 17 日	22:12:13	成功	8
6	4 月 18 日	2:06:54	成功	7
7	4 月 18 日	19:00:00	成功	8
8	4 月 18 日	20:40:02	落下	7
9	4 月 18 日	20:43:56	成功	6
10	4 月 18 日	20:54:35	成功	8
11	4 月 18 日	20:54:55	成功	7
12	4 月 18 日	20:57:15	成功	8
13	4 月 19 日	0:36:51	落下	測定不可
14	4 月 19 日	0:55:13	落下	測定不可
15	4 月 19 日	23:40:16	成功	7
16	4 月 21 日	19:21:59	成功	9
17	4 月 26 日	19:46:37	不明	7
18	4 月 26 日	22:27:36	成功	9
19	5 月 14 日	23:51:55	不明	8
20	5 月 20 日	21:05:15	不明	8
21	5 月 22 日	1:44:07	不明	7
22	5 月 23 日	20:01:35	成功	8
23	5 月 30 日	20:22:07	成功	9
24	5 月 31 日	0:17:01	成功	7

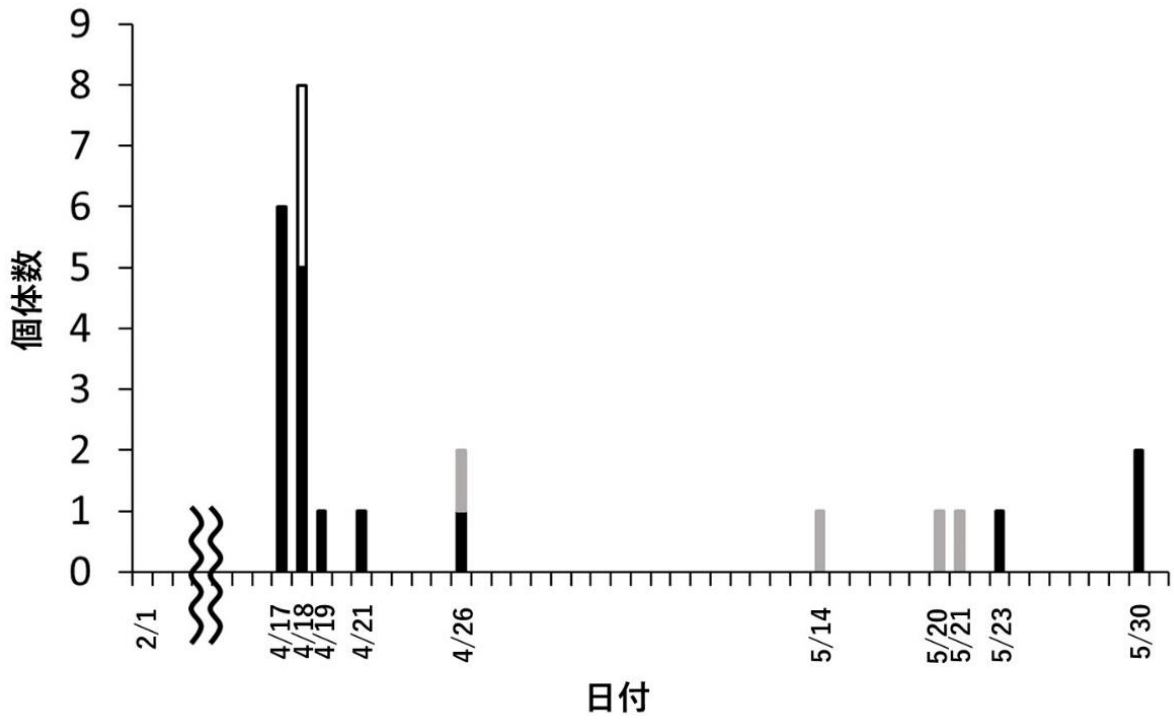


図3. エリア1においてニホンウナギが確認された日付と個体数. 黒：遡上成功個体，白：遡上の途中で落下した個体，灰：遡上の途中で撮影範囲外に出てしまったため遡上成否を確認できなかった個体.

エリア 1 においてニホンウナギの遡上が確認された 10 夜それぞれについて、日没前の日中 12 時間を含めてエリア 2 の映像を確認した。4/17-4/18, 4/18-4/19, 4/19-4/20, 4/21-4/22, 4/26-4/27, 5/14-5/15, 5/20-5/21, 5/21-5/22, 5/23-5/24, 5/30-5/31 の日中から日の出までをそれぞれ期間 (1) - (10) とした。その結果、遡上挑戦個体が 66 個体 (遡上挑戦個体 A=46 個体, 遡上挑戦個体 B=20 個体), 遡上断念個体が 81 個体 (遡上断念個体 A=67 個体, 遡上断念個体 B=14 個体) 確認された。遡上挑戦個体と遡上断念個体は、午前 8 時 39 分に見つかった遡上挑戦個体 A の 1 個体を除いて全て日没後に確認された (図 5)。

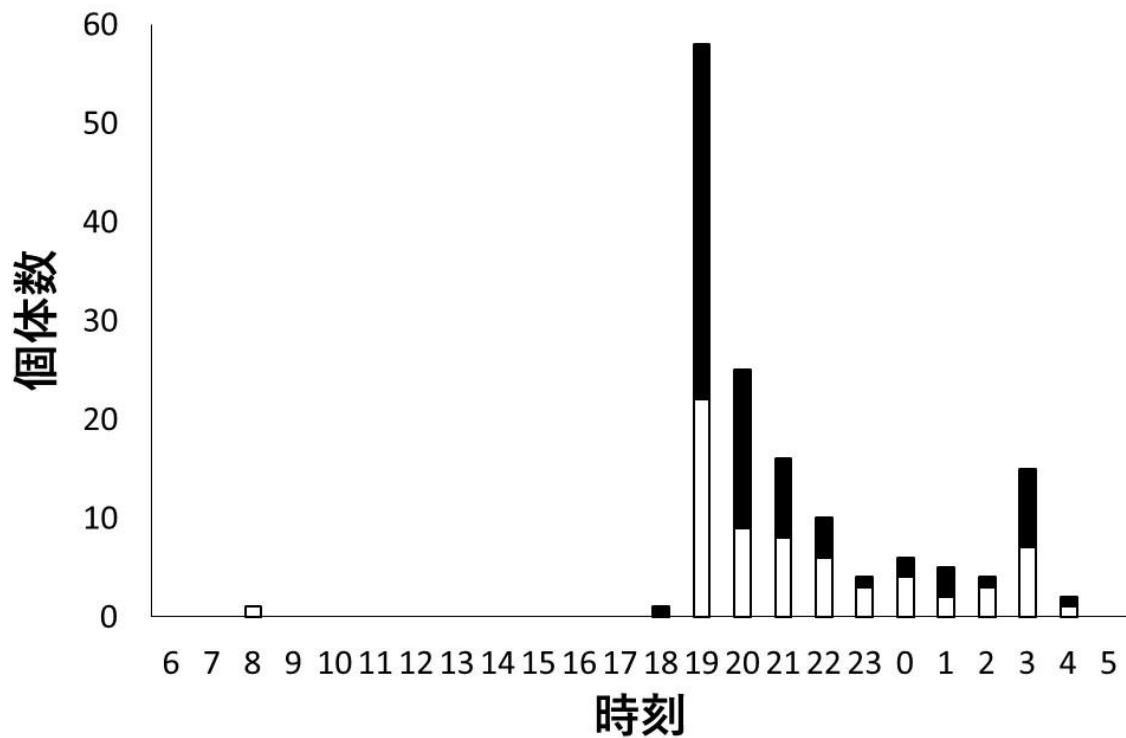


図 5. 遡上挑戦個体と遡上断念個体の確認時刻と個体数。白が遡上挑戦個体, 黒が遡上断念個体を示す。

水叩きに新しく加入する個体（遡上挑戦個体 A）と水叩きから出て行く個体（遡上成功個体+遡上断念個体 A）の個体数を各期間で比較すると、期間（1），（2），（3），（4），（5），（7），（8），（10）で個体数に差が認められた。期間（1）では、水叩きに新しく加入する個体が 4 個体だったのに対し、水叩きから出て行く個体が遡上成功個体 6 個体 + 遡上断念個体 A 26 個体 = 32 個体確認され、水叩きから出て行く個体の方が 28 個体多かった（図 6）。同様に、期間（2），（3），（4），（5）では、水叩きから出て行く個体の方がそれぞれ 10 個体，6 個体，1 個体，1 個体多かった（図 6）。期間（7），（8），（10）では、水叩きに新しく加入する個体の方がそれぞれ 2 個体，1 個体，3 個体多かった（図 6）。期間（6），（9）では、水叩きに新しく加入する個体と水叩きから出て行く個体の個体数は同じであった（図 6）。

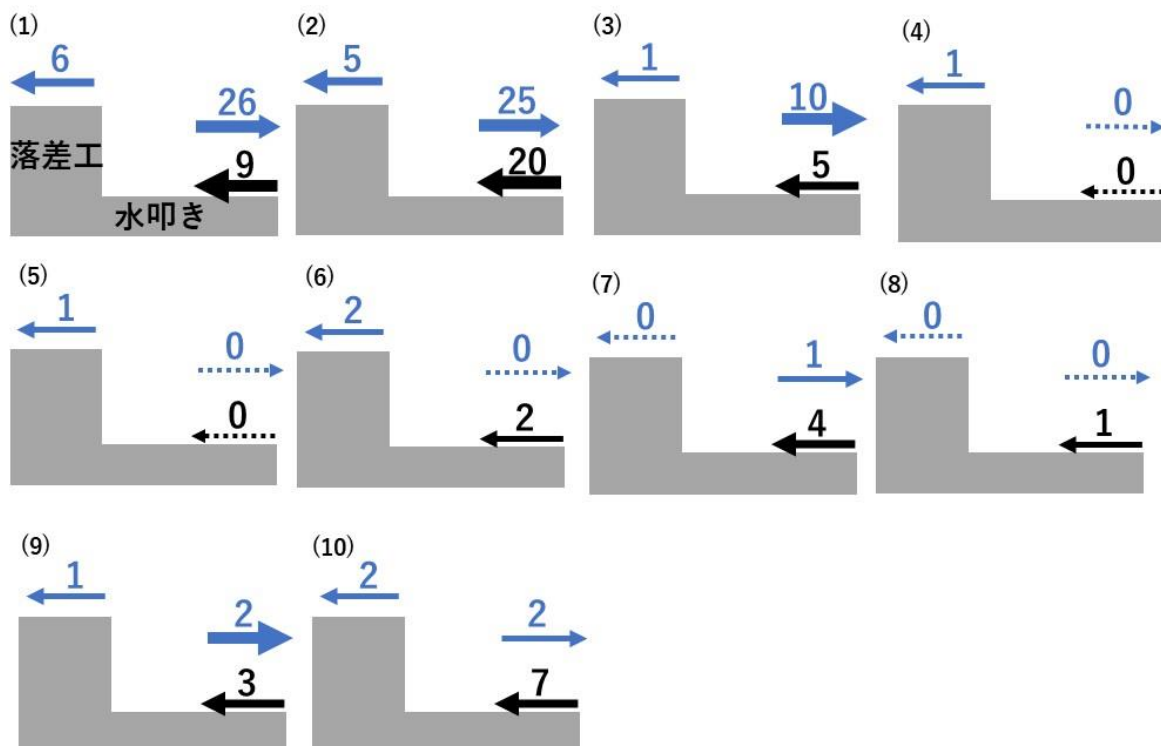


図 5. 水叩きに新しく加入する個体と水叩きから出て行く個体. (1) - (10) は期間. 矢印の向きはニホンウナギの移動方向を示し、数字はその個体数を示す. 黒が水叩きに新しく加入する個体，青が水叩きから出て行く個体を表す.

確認された遡上成功個体と遡上挑戦個体、遡上断念個体の全長を測定した結果、遡上成功個体は 6-10 cm までの個体で構成されていたのに対し (図 6a)、遡上挑戦個体では 6-14 cm (図 6b)、遡上断念個体では 6-17 cm までの個体が確認された (図 6c)。また、エリア 1 で確認された、遡上の途中で落下した個体 1 個体の全長は 7 cm、遡上の途中で撮影範囲外に出てしまい遡上成否を確認できなかった個体 4 個体の全長は 7-8 cm であった (表 1)。遡上の途中で落下した残りの 2 個体は光量の非常に少ない場所で確認されたため、全身を捉えることができず全長測定をできなかった。

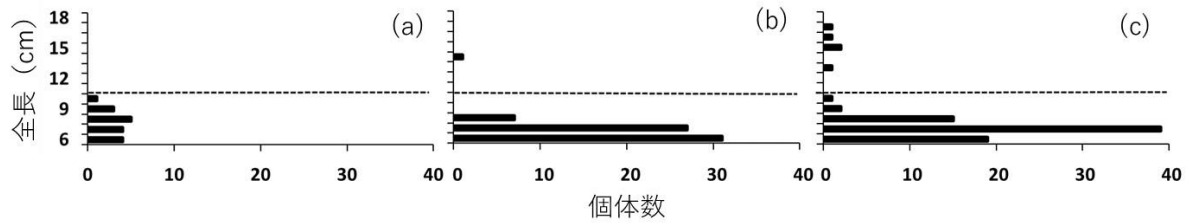


図 6. (a) 遡上成功個体, (b) 遡上挑戦個体, (c) 遡上断念個体の全長分布. 点線は全長 10 cm.

4. 考察

本研究では、赤外線暗視ビデオカメラシステムを用いて、垂直な堰の上下で4ヶ月間にわたりニホンウナギを直接観測した。その結果、垂直な堰を登ることができるニホンウナギの全長の閾値は10cmであることが示唆された。

Kume et al. (2022) は本研究と同じ堰の壁面を撮影し、映像から堰を登るニホンウナギの全長を推定した結果、全長6-14cmまでのニホンウナギが堰を登っていたと報告している。しかし、本研究では遡上成功個体の全長は6-10cmと推定された。エリア1で確認された、遡上成功個体以外の7個体のうち、全長を推定できた5個体の全長も7-8cmと推定され、全長を推定できなかった2個体は途中で落下したことを確認している。一方、遡上挑戦個体では全長14cm、遡上断念個体では全長13-17cmの個体が確認され、全長10cmを越える個体も堰を登ろうとしていると考えられた。Kume et al. (2022) は撮影を本研究(1980×1280 pixels)よりも低い画質(1280×720 pixels)で行っており、ニホンウナギの遡上が確認された堰の壁面に白色塗装を行っていなかったため、ニホンウナギの輪郭を正確に捉えることが困難であった。したがって、Kume et al. (2022) が推定した閾値である14cmは過大推定であり、この堰を遡上可能なニホンウナギの全長の閾値は10cmであると考えられる。

ウナギ属はシラスウナギ、クロコ、黄ウナギの小型個体が河口から上流に向かって河川を遡上する(Imbert et al., 2010; Kaifu et al., 2010)。全長6.2-63.3cmのヨーロッパウナギを対象にした研究では、河川遡上が確認されたのは全長24cm未満の個体だけであったと報告されている(Imbert et al., 2010)。ニホンウナギにおいて河川を遡上する個体の全長範囲は明らかになっていないが、本研究では全長17cmまでの個体が堰下で確認されており、これらの個体は上流への遡上を試みていると考えられる。しかしながら、高さ165cmの垂直な河川横断構造物を越えて上流へ遡上できるニホンウナギは、河川を遡上する個体の中でも特に小型である全長10cm以下の個体に限られる。本研究を行った堰は、河口からの距離が2.75kmと近く、感潮域の上流端に位置するため、シラスウナギの成長段階から潮流に乗って堰まで到達することができる(Deelder, 1958; Creutzberg, 1958, 1959; Jellyman, 1979; McCleave & Kleckner, 1982; Gascuel, 1986; Wippelhauser & McCleave, 1987; de Casamajor et al., 2000; Sughea et al., 2001; Dou & Tsukamoto, 2003; Bru et al., 2009; Trancart et al., 2012)。そのため、多くの個体が全長10cm以下で堰まで到達し、その一部は堰を登ることができたと考えられる。しかし、このような河川横断構造物が河川上流に位置するほど、全長10cm以下で河川横断構造物に到達する個体は減少し、遡上可能な個体は少なくなる。加えて、全長10cm以下のニホンウナギが遡上し、到達することができる範囲よりも上流にこのような河川横断構造物が存在した場合、ニホンウナギは河川横断構造物よりも上流に遡上できず、生息域が河川横断構造物までに制限されてしまうと考えられる。例えば、ヨーロッパウナギでは流程32kmの河川の河口から15km上流に位置する堰において、上流へ遡上する個体を採取したところ、全長10cm以下の個体はほとんど採取されなかったと報告されている(Naismith & Knights, 1988)。

超音波テレメトリー調査により、全長40cm以上のニホンウナギ大型個体も高さ165cmの垂直な堰を越えて、上流に移動しないことが確認されている(Kume et al., 未発表)。ニホンウナギの大型個体は定住性を示し、河川内を大きく移動する可能性は低い(Itakura et al., 2018)。大型個体が定住性を示すことは他のウナギ属でも報告されている(Hedger et al., 2010; Walker et al., 2014)。その一方で、大型のニホンウナギは海を介して異なる河川に移動することが報告されている(Kume et al., 2021)。そのため、大型の個体であっても河川間移動に伴い河川を遡上するが、このような河川横断構造物により

到達できる範囲が制限されてしまう。

本研究では、全長 10 cm 以下のニホンウナギには高さ 165 cm の垂直な堰を登ることができる個体が存在していた。しかし、2月01日から5月31日までの夜間全てで確認された遡上成功個体が17個体だったのに対して、エリア2の映像を確認した10期間だけで全長10cm以下の遡上挑戦個体が65個体、遡上断念個体が76個体確認されている。そのため、全長10cm以下のニホンウナギであっても高さ165cmの垂直な河川横断構造物を登ることができる個体は一部に限られると考えられる。小型の *Anguilla bicolor* とオオウナギ *Anguilla marmorata* (体重 0.09-1.16g) 197 個体を用いた実験でも、垂直に設置した長さ 1m のコンクリート板を登ることができたのは 20 個体だけだったと報告されている (松田ら, 2016)。また、エリア 2 を確認した期間中には雨や濁りにより映像からニホンウナギの確認ができなかった時間があった。ニホンウナギを含むウナギ属魚類は、雨などによる河川の増水時に遡上個体数が増加することが知られており (Santos et al., 2016; Welsh et al., 2016; Welsh & Liller, 2013; Kume et al., 2022)、映像を確認できなかった時間に多数のニホンウナギがエリア 2 を通過した可能性がある。加えて、堰の遡上に試みた全てのニホンウナギが遡上を断念し、エリア 1 まで到達しなかった日もあると考えられる。したがって、このような河川横断構造物において、実際にニホンウナギの遡上成功する確率はさらに小さいと推察される。

本研究の結果から、ニホンウナギが高さ 165 cm の垂直な河川横断構造物により被る遡上阻害は非常に深刻であると考えられる。日本は河川横断構造物の設置数がアメリカ合衆国、中国に続いて3番目に多く (Lehner et al., 2011)、ダムが約 2700 基 (日本ダム協会, 1998)、高さ 15m 以下の河川横断構造物が約 55000 基 (全国治水砂防協会, 2003) 存在する。しかし、遡上阻害を改善する対策が採られている河川横断構造物は少ない。そのため、日本には本研究を実施した堰のような、全長 10 cm を越えるニホンウナギの遡上を困難にしてしまう河川横断構造物が多数存在すると考えられる。このような河川横断構造物への対策が進まなければ、河川におけるニホンウナギの生息域や生息数が増加することは難しい。したがって、ニホンウナギの保全に向けて、これらの河川横断構造物による遡上阻害を解消するための対策を進めていく必要がある。

河川横断構造物によるニホンウナギの遡上阻害を解消するための対策として2つのことが挙げられる。一つは河川横断構造物の撤去である。アメリカウナギ *Anguilla rostrata* では、高さ 6.7 m の大型堰を撤去したことで、撤去地点から上流 150 km にかけて個体数が増加したと報告されている (Hitt et al., 2012)。河川横断構造物を撤去することで、形成されていた水位差が解消されるため、撤去は最も効果的な遡上阻害対策である。しかし、河川横断構造物は人間の生活に必要な各種用水の確保や洪水被害の軽減、河床保護などの役割を果たしているため、人間活動への寄与が大きく撤去できない河川横断構造物も存在する。もう一つはウナギ用魚道 (Solomon & Beach, 2004; Vowles et al., 2015; 後藤・望岡, 2016; Watz et al., 2019; 鬼塚ら, 2019) の設置であり、撤去できない河川横断構造物への対策として有用である。ウナギ用魚道は河川横断構造物の機能を維持しつつ、ニホンウナギの遡上阻害を軽減することができる。ヨーロッパウナギでは、複数の河川横断構造物にウナギ用魚道を設置したことで、個体数密度が増加したと報告されている (Briand et al., 2005)。ヨーロッパやアメリカではこれらの遡上阻害対策が様々な河川横断構造物で実施されている (Briand et al., 2005; Laffaille et al., 2005; Schmidt et al., 2009; Hitt et al., 2012; Turner et al., 2018)。

水叩きは河川横断構造物から流れ落ちる水により河床が洗掘されないように、河川横断構造物下の河床をコンクリートで覆ったものである。一面がコンクリートで覆われているためニホンウナギをはじめ

とする水生生物が身を隠す場所となる構造物は非常に少ない。しかし、本研究では、期間ごとに水叩きに新しく加入する個体(遡上挑戦個体 A)と水叩きから出て行く個体(遡上成功個体+遡上断念個体 A)の個体数を比較したところ、期間(1) - (5)において水叩きから出て行く個体の方が多かった。また、遡上挑戦個体 A の 1 個体を除き、日中にニホンウナギは確認されなかった。そのため、水叩きから出て行く個体の多くは映像確認期間の前夜以前に水叩きに参加し、少なくとも日中の約 12 時間の間、水叩きに滞在していたと考えられる。また、目視観察からサギ類が水叩きに侵入することが確認された。加えて、雨や満潮により水叩きの水深が増加したときにはオオクチバス *Micropterus salmoides* やナマズ *Silurus asotus* も確認された。これらの鳥類や魚類は、ニホンウナギの捕食者となり得る (Kameda et al., 2003; Haubrock et al., 2019)。そのため、ニホンウナギにおいて水叩きは被食リスクの高い危険な場所である可能性がある。河川横断構造物を対象にしたニホンウナギの保全として、遡上阻害への対策だけでなく、水叩きにおいて、ニホンウナギが身を隠せる場所の創出が重要となるかもしれない。

本研究では、高さ 165cm の垂直な河川横断構造物を遡上可能なニホンウナギの全長の閾値が 10 cm であることが示唆され、このような河川横断構造物がニホンウナギの遡上に与える影響の大きさを示すことができた。また、これまで注目されていなかったコンクリートで覆われた水叩きが、ニホンウナギの被食リスクが大きい場所である可能性が示された。その一方で、今後の研究で明らかにする必要がある課題も見つかった。第一に、全長 10cm を越えるニホンウナギの遡上の成否を分ける河川横断構造物の高さの閾値が挙げられる。本研究では、全長 10cm を越えるニホンウナギはエリア 1 の下端にすら到達しておらず、実際には 165cm よりも低い高さで遡上が困難になると考えられた。ニホンウナギの遡上を阻害することが示唆されている河川横断構造物の高さは 40cm 以上であり (Yokouchi et al., 2022)、高さ 40-165cm の間に閾値となる高さが存在すると考えられる。高さの異なる複数の河川横断構造物でニホンウナギの遡上を観察し、この閾値を明らかにすることで、優先的に遡上阻害の対策を行うべき河川横断構造物を抽出する指標の一つとなる。次に、水叩きで長時間滞在するニホンウナギの割合や捕食被害の有無が挙げられる。本研究で、水叩きに長時間滞在するニホンウナギの存在が明らかになったが、エリア 2 の映像を確認した期間が非常に限られていたため、これらの個体が全体に占める割合は不明である。また、ニホンウナギの捕食者が水叩きに侵入する様子は確認できたが、実際にニホンウナギが捕食されているかは確認できなかった。したがって、残った期間の映像を確認し、水叩きに長時間滞在するニホンウナギの割合と捕食被害の有無を調査することで、水叩きにおいて捕食被害の対策を施すことの重要性を評価する必要があると考える。

5. 引用文献

- Aoyama, J., Sasai, S., Miller, M., Shinoda, A., Nakamura, A., Kawazu, K., & Tsukamoto, K. (2002). A preliminary study of the movements of yellow and silver eels, *Anguilla japonica*, in the estuary of the Fukui River, Japan, as revealed by acoustic tracking. *Hydrobiologia*, 470(1-3), 31-36.
- Aoyama, J., Wouthuyzen, S., Miller, M.J., Inagaki, T., & Tsukamoto, K. (2003). Short distance spawning migration of tropical freshwater eels. *The Biological Bulletin*, 204(1), 104-108.
- Briand, C., Fatin, D., Fontenelle, G., & Feunteun, E. (2005). Effect of re-opening of a migratory pathway for eel (*Anguilla anguilla* L.) at a watershed scale. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture*, 378-79, 67-86.
- Bru, N., Prouzet, P., Lejeune, M. (2009). Daily and seasonal estimates of the recruitment and biomass of glass eels runs (*Anguilla anguilla*) and exploitation rates in the Adour open estuary (Southwestern France). *Aquatic Living Resources*, 22(4), 509-523.
- Chen, J. Z., Huang, S. L., & Han, Y. S. (2014). Impact of long-term habitat loss on the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 151, 361-369.
- Creutzberg, F. (1958). Use of tidal streams by migrating elvers (*Anguilla vulgaris*, Turt.). *Nature*, 181, 857-858.
- Creutzberg, F. (1959). Discrimination between ebb and flood tide in migrating elvers (*Anguilla vulgaris*, Turt.) by means of olfactory perception. *Nature*, 184, 1961-1962.
- Deelder, C.L. (1958). On the behavior of elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.) migrating from the sea into fresh water. *ICES Journal of Marine Science*, 24(1), 135-146.
- de Casamajor, M.N., Bru, N., & Prouzet, P. (2001). Fluctuations of glass-eels (*Anguilla anguilla* L.) catches and variability of their catchability in the Adour estuary (France). *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture*, 64(357-360), 387-404.
- Dou, S. Z., & Tsukamoto, K. (2003). Observations on the nocturnal activity and feeding behavior of *Anguilla japonica* glass eels under laboratory conditions. *Environmental Biology of Fishes*, 67(4), 389-395.
- Fagan, W. F. (2002). Connectivity, fragmentation, and extinction risk in dendritic metapopulations. *Ecology*, 83(12), 3243-3249.
- Faulks, L. K., Gilligan, D. M., & Beheregaray, L. B. (2011). The role of anthropogenic vs. natural in-stream structures in determining connectivity and genetic diversity in an endangered freshwater fish, Macquarie perch (*Macquaria australasica*). *Evolutionary Applications*, 4(4), 589-601.
- Fukuda, N., Miller, M. J., Aoyama, J., Shinoda, A., & Tsukamoto, K. (2013). Evaluation of the pigmentation stages and body proportions from the glass eel to yellow eel in *Anguilla japonica*. *Fisheries Science*, 79(3), 425-438.
- Gascuel, D. (1986). Flow-carried and active swimming migration of the glass eel (*Anguilla anguilla*) in the tidal area of a small estuary on the French Atlantic coast. *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 40, 321-326.

- 後藤靖裕, 望岡典隆 (2016) . ニホンウナギ稚魚の遡上に最適なブラシ型 Eel-ladder 構造. *九州大学大学院農学研究員学芸雑誌*, 71(2), 21-27.
- Haubrock, P.J., Balzani, P., Criado, A., Inghilesi, A.F., Tricarico, E. (2019). Predicting the effects of reintroducing a native predator (European eel, *Anguilla anguilla*) into a freshwater community dominated by alien species using a multidisciplinary approach. *Management of Biological Invasions*, 10(1), 171–191.
- Hedger, R. D., Dodson, J. J., Hatin, D., Caron, F., & Fournier, D. (2010). River and estuary movements of yellow-stage American eels *Anguilla rostrata*, using a hydrophone array. *Journal of Fish Biology*. 76(6), 1294-1311.
- Higuchi, T., Watanabe, S., Manabe, R., Tanimoto, A., Miller, M.J., Kojima, T., & Tsukamoto, K. (2021). Horizontal and vertical migration behavior of silver-phase Japanese eels in coastal, pelagic and spawning areas observed by pop-up satellite archival tags. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 542, 151587.
- Hitt, N. P., Eyler, S., & Wofford, J. E. B. (2012). Dam Removal Increases American Eel Abundance in Distant Headwater Streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141(5), 1171-1179.
- Imbert, H., Labonne, J., Rigaud, C., & Lambert, P. (2010). Resident and migratory tactics in freshwater European eels are size-dependent. *Freshwater Biology*, 55(7), 1483-1493.
- Itakura, H., Kitagawa, T., Miller, M. J., & Kimura, S. (2015). Declines in catches of Japanese eels in rivers and lakes across Japan: Have river and lake modifications reduced fishery catches? *Landscape and Ecological Engineering*, 11(1), 147-160.
- 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(3), 737-751.
- Itakura, H., Wakiya, R., Gollock, M., & Kaifu, K. (2020). Anguillid eels as a surrogate species for conservation of freshwater biodiversity in Japan. *Scientific Reports*, 10(1), 8790.
- Jacoby, D., & Gollock, M. (2014). *Anguilla japonica*. *The IUCN red list of threatened species, 2014*, e. T166184A1117791.
- Jellyman, D.J. (1979). Upstream migration of glass-eels (*Anguilla* spp.) in the Waikato River. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 13(1), 13-22.
- 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(3), 273-282.
- Kameda, K., Ishida, A., & Naruse, M. (2003). Population increase of the Great cormorant *Phalacrocorax carbo hanedae* in Japan: Conflicts with fisheries and trees and future perspectives. *Vogelwelt*, 124(Supplement), 27-33.
- Kimura, S., Tsukamoto, K., & Sugimoto, T. (1994). A model for the larval migration of the Japanese eel – roles of the trade winds and salinity front. *Marine Biology*, 119(2), 185-190.
- Kimura, S., Doos, K., & Coward, A. C. (1999). Numerical simulation to resolve the issue of downstream migration of the Japanese eel. *Marine Ecology Progress Series*, 186, 303-306.

- Kume, M., Terashima, Y., Wada, T., & Yamashita, Y. (2019). Longitudinal distribution and microhabitat use of young Japanese eel *Anguilla japonica* in a small river flowing through paddy areas. *Journal of Applied Ichthyology*, 35(4), 876-883.
- Kume, M., Terashima, Y., Kawai, F., Kutzer, A., Wada, T., & Yamashita, Y. (2020). Size-dependent changes in habitat use of Japanese eel *Anguilla japonica* during the river life stage. *Environmental Biology of Fishes*, 103(3), 269-281.
- Kume, M., Nakayama, N., Iwasaki, Y., Hori, T., Watanabe, S., Terashima, Y., Ayano, M., Nobuaki, A., Yamashita, Y., & Mitamura, H. (2021). River to river: First evidence of eel movement between distant rivers via the sea. *Environmental Biology of Fishes*, 104(4), 529-533.
- Kume, M., Yoshikawa, Y., Tanaka, T., Watanabe, S., Mitamura, H., & Yamashita, Y. (2022). Water temperature and precipitation stimulate small-sized Japanese eels to climb a low-height vertical weir. *PLoS ONE*, 17(12), e0279617.
- Kuroki, M., Aoyama, J., Miller, M.J., Wouthuyzen, S., Arai T., & Tsukamoto, K. (2006). Contrasting patterns of growth and migration of tropical anguillid leptocephali in the western Pacific and Indonesian Seas. *Marine Ecology Progress Series*, 309, 233-246.
- Kuroki, M., Righton, D., & Walker AM. (2014). The importance of Anguillids: a cultural and historical perspective introducing papers from the World Fisheries Congress. *Ecology of Freshwater Fish*. 23(1), 2-6.
- Laffaille, P., Acou, A., Guillouet, J., & Legault, A. (2005). Temporal changes in European eel, *Anguilla anguilla*, stocks in a small catchment after installation of fish passes. *Fisheries Management and Ecology*, 12(2), 123-129.
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vorosmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., Doll, P., Endejan, M., Frenken, K., Magome, J., Nilsson, C., Robertson, J., Rodel, R., Sindorf, N., & Wisser, D. (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 494-502.
- 松田圭史, 服部宏勇, 富山実, 矢田崇, 内田和男 (2016) . ウナギ属 4 種における飛び出し行動とよじ登り能力. *水産技術*, 8(2), 67-72.
- 松井魁, 永井泉 (1967) . 鰻のそ上力. *木曾三川河口資源調査報告*, 4(下), 1325-1330.
- Matsushige, K., Yasutake, Y., & Mochioka, N. (2020). Spatial distribution and habitat preferences of the Japanese eel, *Anguilla japonica*, at the reach and channel-unit scales in four rivers of Kagoshima Prefecture, Japan. *Ichthyological Research*, 67(1), 68-80.
- McCleave, J. D. (1980). Swimming performance of European eel (*Anguilla anguilla* (L.)) elvers. *Journal of Fish Biology*, 16(4), 445-452.
- McCleave, J.D., & Kleckner, R.C. (1982). Selective tidal stream transport in the estuarine migration of glass eels of the American eel (*Anguilla rostrata*). *ICES Journal of Marine Science*, 40(3), 262-271.
- Naismith, I. A., & Knights, B. (1988). Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. *Journal of Fish Biology*, 33(Supplement A), 161-175.
- 日本ダム協会 (1988) . ダム年鑑 1988. 日本

- Noda, T., Wada, T., Mitamura, H., Kume, M., Komaki, T., Fujita, T., Sato, T., Narita, K., Yamada, M., Matsumoto, A., Hori, T., Takagi, J., Kutzer, A., Nobuaki, A., & Yamashita, Y. (2021). Migration, residency and habitat utilisation by wild and cultured Japanese eels (*Anguilla japonica*) in a shallow brackish lagoon and inflowing rivers using acoustic telemetry. *Journal of Fish Biology*, *98*(2), 507-525.
- Okamura, A., Yamada, A., Tanaka, S., Horie, N., Utoh, T., Mikawa, N., Akazawa, A., & Oka, H. (2002). Atmospheric depression as the final trigger for the seaward migration of the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Marine Ecology Progress Series*, *234*, 281-288.
- 鬼束幸樹, 泉孝佑, 窄友哉, 宮川智行, 峰下颯也, 本松七海 (2019) . ウナギ用魚道内の突起物の配置がウナギの遡上特性に及ぼす影響. *水工学論文集*, *75*(2), I_547-I_552.
- Otake, T., Miller, M. J., Inagaki, T., Minagawa, G., Shinoda, A., Kimura, Y., Sasai, S., Oya, M., Tasumi, S., Suzuki, Y., Uchida, M., & Suzuki, Y. (2006). Evidence for migration of metamorphosing larvae of *Anguilla japonica* in the Kuroshio. *Coastal Marine Science*, *30*(2), 453-458.
- Quintella, B. R., Mateus, C. S., Costa, J. L., Domingos, I., & Almeida, P. R. (2010). Critical swimming speed of yellow- and silver-phase European eel (*Anguilla anguilla*, L.). *Journal of Applied Ichthyology*, *26*(3), 432-435.
- Righton, D., Piper, A., Aarestrup, K., Amilhat, E., Belpaire, C., Casselman, J., Castonguay, M., Diaz, E., Dorner, H., Faliex, E., Feunteun, E., Fukuda, N., Hanel, R., Hanzen, C., Jellyman, D., Kaifu, K., McCarthy, K., Miller, M.J., Pratt, T., Sasal, P., Schabetsberger, R., Shiraishi, H., Simon, G., Sjoberg, N., Steele, K., Tsukamoto, K., Walker, A., Westerberg, H., Yokouchi, K., & Gollock, M. (2021). Important questions to progress science and sustainable management of anguillid eels. *Fish and Fisheries*, *22*(4), 762-788.
- 坂上嶺, 佐藤駿, 松重一輝, 安武由矢, 日比野友亮, 眞鍋美幸, 内田和男, 望岡典隆 (2021) . 河川生活期のニホンウナギにおける浮き石による被食回避効果の検証. *日本水産学会誌*, *87*(3), 255-264.
- Santos, J. M., Rivaes, R., Oliveira, J., & Ferreira, T. (2016). Improving yellow eel upstream movements with fish lifts. *Journal of Ecohydraulics*, *1*(1-2), 50-61.
- Schmidt, J. (1923). The breeding places of the eel. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, *211*, 382-390.
- Schmidt, Re., O'reilly, Cm., & Miller, D. (2009). Observations of American Eels Using an Upland Passage Facility and Effects of Passage on the Population Structure. *North American Journal of Fisheries Management*, *29*(3), 715-720.
- Solomon, D., & Beach, M. (2004). Fish pass design for eel and elver (*Anguilla anguilla*). *R & D Technical Report W2-070/TR1. Environment Agency, Bristol*.
- Sughea, HY., Arai, T., Miller, MJ., Limbong, D., & Tsukamoto, K. (2001). Inshore migration of the tropical eels *Anguilla* spp. recruiting to the Poigar River estuary on north Sulawesi Island. *Marine Ecology Progress Series*, *221*, 233-243.
- Trancart, T., Lambert, P., Rochard, E., Daverat, F., Coustillas, J., & Roqueplo, C. (2012). Alternative flood tide transport tactics in catadromous species: *Anguilla anguilla*, *Liza ramada* and *Platichthys flesus*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *99*(1), 191-198.

- Tsukamoto, K., (1990). Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast. *Journal of Fish Biology*, 36(5), 659–671.
- Tsukamoto, K. (1992). Discovery of the spawning area for Japanese eel. *Nature*, 356, 789-791.
- Tsukamoto, K., (2009). Oceanic migration and spawning of anguillid eels. *Journal of Fish Biology*, 74(9), 1833–1852.
- Tsukamoto, K., Aoyama, J., & Miller, M. J. (2009). Present status of the Japanese eel: resources and recent research. *American Fisheries Society Symposium*, 58, 21-35
- Tsukamoto, K., Chow, S., Otake, T., Kurogi, H., Mochioka, N., Miller, M.J., Aoyama, J., Kimura, S., Watanabe, S., Yoshinaga, T., Shinoda, A., Kuroki, M., Oya, M., Watanabe, T., Hata, K., Ijiri, S., Kazeto, Y., Nomura, K., & Tanaka, H. (2011). Oceanic spawning ecology of freshwater eels in the western North Pacific. *Nature Communications*, 2:179.
- Turner, SM., Chase, BC., & Bednarski, MS. (2018). Evaluating the Effect of Dam Removals on Yellow-Phase American Eel Abundance in a Northeastern U.S. Watershed. *North American Journal of Fisheries Management*, 38(2), 424-431.
- Vowles, A. S., Don, A. M., Karageorgopoulos, P., Worthington, T. A., & Kemp, P. S. (2015). Efficiency of a dual density studded fish pass designed to mitigate for impeded upstream passage of juvenile European eels (*Anguilla anguilla*) at a model Crump weir. *Fisheries Management and Ecology*, 22(4), 307-316.
- Walker, A. M., Godard, M. J., Davison, P. (2014). The home range and behaviour of yellow-stage European eel *Anguilla anguilla* in an estuarine environment. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 24(2), 155-165.
- Watz, J., Nilsson, P. A., Degerman, E., Tamario, C., & Calles, O. (2019). Climbing the ladder: an evaluation of three different anguillid eel climbing substrata and placement of upstream passage solutions at migration barriers. *Animal Conservation*, 22(5), 452-462.
- Welsh, S., Aldinger, J., Braham, M., & Zimmerman, J. (2016). Synergistic and singular effects of river discharge and lunar illumination on dam passage of upstream migrant yellow-phase American eels. *ICES Journal of Marine Science*, 73(1), 33-42.
- Welsh, S., & Liller, H. (2013). Environmental correlates of upstream migration of yellow-phase American eels in the potomac river drainage. *Transactions of the American Fisheries Society*, 142(2), 483-491.
- Wippelhauser, GS., & McCleave, JD. (1987). Precision of behavior of migrating juvenile American eels (*Anguilla rostrata*) utilizing selective tidal stream transport. *ICES Journal of Marine Science*, 44(1), 80-89.
- 矢田谷健一, 泉完, 東信行, 丸居篤 (2020) . クロコ期のニホンウナギを対象とした遊泳能力の測定. 土木学会論文集 G(環境), 76(6), II_109-II_114.
- Yokouchi, K., Aoyama, J., Oka, H.P., & Tsukamoto, K. (2008), Variation in the demographic characteristics of yellow-phase Japanese eels in different habitats of the Hamana Lake system, Japan. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(4), 639-652.
- Yokouchi, K., Itakura, H., Wakiya, R., Yoshinaga, T., Mochioka, N., Kimura, S., & Kaifu, K. (2022).

Cumulative effects of low-height barriers on distributions of catadromous Japanese eels in Japan. *Animal Conservation*. 25(1), 137-149.

全国治水砂防協会 (2003) . 砂防便覧 平成 15 年版.監修国土交通省砂防部, 社団法人全国治水砂防協会, 東京.

・助成事業者紹介

氏名 久米 学

現職 京都大学フィールド科学教育研究センター 特定助教

主な著書 トゲウオの自然史（北海道大学図書刊行会、2003年 分担執筆）

岐阜県の魚類（岐阜新聞社、2017年 分担執筆）

Fish Diversity of Japan（Springer、2022年 分担執筆）