

図 13 愛媛県重信川水系における、2021 年 6 月と 7 月、放流前後における採水地点の環境 DNA フラックス。

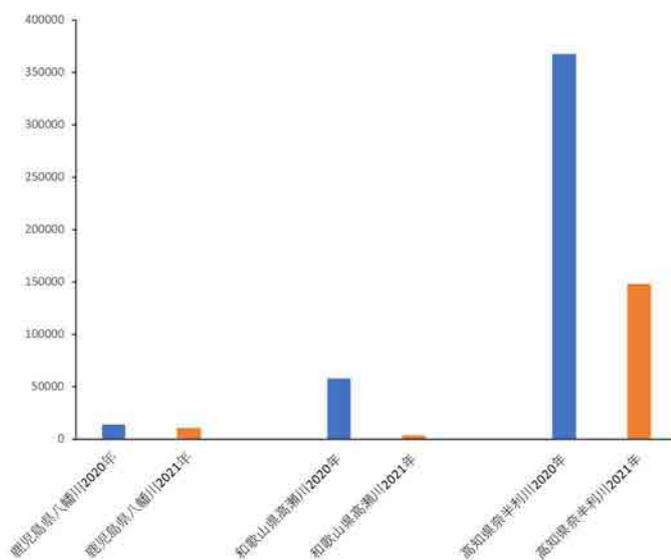


図 14 鹿兒島県八幡川、和歌山県高瀬川、高知県奈半利川における平均環境 DNA フラックス。

**課題と対応策：**

八幡川、高瀬川、奈半利川において実施されているニホンウナギ採捕調査の結果から、ニホンウナギは各河川の調査区間内に一様に分布することが報告されており(本事業報告書)、環境 DNA 濃度は下流に設定した地点ほど高くなることが予想されたが、河川における環境 DNA の空間分布は不均一であり、2020 年、2021 年ともに流程に沿った明瞭な増減傾向は確認されなかった。また、地点毎のニホンウナギバイオマスと環境 DNA 濃度との関係も不明瞭であった。このことは個体から放出された環境 DNA が河川を流下する過程で急速に拡散または分解していることを示唆する。本課題によ

り、環境 DNA 濃度やフラックスは、河川間、そして同一河川の年度間で大きく異なることがわかってきた (図 14)。今後も複数河川の調査を実施し、環境 DNA の挙動についての一般性や共通性を検討するとともに、環境 DNA 濃度の時間的・空間的变化、それらと環境要因やニホンウナギの生息量との関係を調べる必要がある。

愛媛県重信川水系では、放流が、直後のニホンウナギ環境 DNA フラックスを増加させることがわかった。しかし、放流された個体は消失しやすいことも知られているため、今後定期的に調査を行い、環境 DNA フラックスの消長を追う必要がある。また、放流と関係なく調査間で環境 DNA フラックスが特に河口でばらついた。この要因を明らかにするため、インターナルポジティブコントロールを用いて PCR 阻害物質の効果の季節的变化を調べるなどが必要である。また放流により形成された堰堤上流のニホンウナギ個体群は流下して繁殖に寄与することがあり得るのか評価し、場合によって放流場所を堰堤下流に変更することを提言するなどの対策が必要である。

#### 参考文献：

- Minamoto T. et al. (2016) Techniques for the practical collection of environmental DNA: filter selection, preservation, and extraction. *Limnology*, 17: 23-32.
- Kasai A. et al. (2020) The effect of temperature on environmental DNA degradation of Japanese eel. *Fish. Sci.*, 86:465-471.
- Miya M. et al. (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. *R Soc Open Sci.* 2(7):150088.

課題番号	2-(3)	事業実施期間	令和3年度
課題名	背負い型エレクトロ・フィッシャーによるニホンウナギ捕獲効率推定		
主担当者	石田 健太 (山口県水産研究センター内海研究部)		
分担者	吉村 栄一 (山口県水産研究センター内海研究部)		

### 令和3年度の成果の要約

1. 自然河川における背負い型エレクトロ・フィッシャー (スミス・ルート社製 LR-20B。以下「電気ショッカー」という。) によるニホンウナギの採捕効率試験を行った。今年度は宇部市を流れる有帆川において、一般的に採捕効率が低下するとされている冬季と、それ以外の季節での採捕効率の差を調べた。試験の結果、同河川における電気ショッカーでのニホンウナギ採捕効率は秋季、冬季とも初日は約14%であり、採捕効率にほぼ差がみられなかった。なお、過年度までの試験と同様、2日目以降の採捕効率は、採捕を重ねるごとに低下する傾向がみられた。
2. 電気ショッカーの設定(DC、FQ)が採捕効率に与える影響を水槽試験で調べた。今回は設定値として、過年度までに水槽試験で使用した2つの設定(①500V、DC20、FQ30、②500V、DC30、FQ35)と、魚へのダメージが少ないとされる直流波形のうち、水槽内で通電可能な最大の電圧設定(③350V、DC100)の3つの設定で採捕効率を比較した。試験の結果、3pass 終了時における設定①～③の平均採捕効率は、それぞれ約40%、約45%、約29%となり、試験区間で有意差がみられた(ANOVA,  $p < 0.05$ )。設定③で採捕効率が低下した原因として、直流の場合、通電終了後にウナギの麻痺が直ちに解け、採捕が間に合わないケースが多発したことが影響したと推察される。

### 過年度までの成果の概要

平成30年度は背負い型エレクトロ・フィッシャーによるニホンウナギ捕獲効率について明らかにするため、試験池を使用した捕獲効率試験と自然河川における電気ショッカーの作動試験を実施した。試験池を使用したニホンウナギ採捕効率試験では、Schnabel法による標識採捕法により、85～93%の精度で個体数を推定できた。350V、500Vと700Vでは採捕傾向が大きく異なり、350V、500Vでは1Pass目の採捕効率が24～36%と高いが700Vでは1Pass目の採捕効率が4～12%と低い傾向が示された。自然河川における電気ショッカー作動試験では電気伝導度と通電電圧には負の相関傾向が確認された。Duty Cycleでは700Vは電気伝導度が100以下、500Vは電気伝導度150以下、400Vは電気伝導度200以下と電気伝導度の値が50高くなる毎に、Duty Cycleの設定の自由度が高い電圧値が低下した。作動電圧と電気伝導度等の要件把握を目的に重回帰分析を行った。電圧(Y)を目的変数、電気伝導度 EC25 (X1)、PH (X2)、Duty Cycle (X3)、Frequency (X4)、有効水深 (X5) を説明変数として重回帰分析を行った結果、重回帰式  $y = 2637 - 0.984x_1 - 226x_2 - 4.86x_3$  が得られた。

平成31年度(令和元年度)は①自然河川における電気ショッカーによるニホンウナギの採捕効率

試験、②ニホンウナギの全長別の採捕効率試験、③電気ショッカーの設定別作動条件試験を行った。①では試験の結果、本県萩市白須川における電気ショッカー1passでのニホンウナギ採捕効率は27～34%であること、日数を重ねるごとに採捕効率が落ちる傾向を確認した。②では、全長200～500mmのニホンウナギを100mm毎に3グループに分けて試験したところ、5%水準で3グループ間の採捕効率に有意差は認められなかった(ANOVA, n. s.)。これにより、河川での個体数推定において、現地に生息するウナギの全長分布を把握しなくても、個体数推定を行うことができる可能性が示唆された。③の試験では、水温・電気ショッカーの設定を変えながら屋内2トン水槽において試験を行ったところ、水温は低いほど、電気ショッカーのFrequencyの設定値は高いほど、Duty Cycleの設定値は低いほど作動しやすい傾向がみられた。

令和2年度は①自然河川における電気ショッカーによるニホンウナギの採捕効率試験、②金属製構造物が採捕効率に与える影響の試験、③電気ショッカーの設定別作動条件試験を行った。①では、山口市四十八瀬川における電気ショッカー1passでのニホンウナギ採捕効率は約11%であること、過年度までの試験と同様、連日採捕を行うと、採捕効率が著しく低下することを確認した。②では、試験池に設置したカバーの上に、ステンレス製金網を設置した場合と設置しなかった場合の採捕効率を比較したところ、金網を設置した場合の平均採捕効率は24%、設置しなかった場合の平均採捕効率は35%であり、5%水準で両者に有意差は認められなかった(Fisher 正確検定, n. s.)。一方、両者の平均採捕効率には10%程度の差が生じており、ステンレス製金網を設置した場合、採捕効率が低下する傾向がみられた。③では、硬度の高い環境下で、Duty CycleとFrequencyの設定が電気ショッカーの作動条件に与える影響について調べた。水温・電圧の条件を変えながら屋内2トン水槽において試験を行ったところ、Frequencyの設定値は高いほど、Duty Cycleの設定値は低いほど作動しやすい傾向がみられた。これは昨年度に塩分のある環境下で試験を行った結果と概ね同じ傾向であり、1,000 $\mu$ S/cm程度の比較的電気電導度の高い河川環境下でも、設定次第で電気ショッカーを安定して作動させることが可能と考えられた。

### 全期間を通じた課題目標及び計画

現在、国、都道府県および大学の水産研究機関において、ニホンウナギの採集漁具として、背負い型エレクトロ・フィッシャーを使用する事例が多い。当該JV事業参画機関においても、河川におけるニホンウナギ採捕の主要採捕方法として採用している。しかし、現場において、背負い型エレクトロ・フィッシャーの捕獲効率を実証した国内事例はない。そこで、当該事業において、背負い型エレクトロ・フィッシャーによるニホンウナギの採捕効率推定を行う際に、全長組成、カバー及び水質等の条件が採捕に与える影響を把握することを課題とし、課題実現のため、水槽試験、フィールド試験及び水質調査を5ヶ年計画で実施する。そして、事業最終年度に公設試験研究機関を対象とした、河川におけるニホンウナギ資源量推定手法のガイドラインを作成することを目標とする。

## 当該年度計画

本年度は、電気ショッカーの採捕効率について、自然河川及び大型養殖池を使用した試験を実施する。

## 結果

### 1. 自然河川におけるニホンウナギ採捕効率試験

宇部市有帆川の河床が礫及び石底の区間(流程約210m。図1。)において、電気ショッカーによる季節別のニホンウナギ採捕効率試験を実施した。試験は秋季、冬季の2回行い、秋季試験は2021年10月11日～2021年10月14日、冬季試験は2022年1月11日～14日に実施した。試験には県内の小規模河川において、2021年5月～2021年12月に電気ショッカーで採捕したニホンウナギ各50個体を使用した。(秋季試験：平均全長 $41.8 \pm 7.1$ cm(±S.D.)、冬季試験： $39.7 \pm 7.0$ cm(±S.D.))。試験に使用したニホンウナギには、試験開始日から3日以上前にPITタグ(Biomark社製 BI08. B. 03)を腹腔内に挿入し、水槽内で試験前日まで飼育して脱落がないことを確認した。水温・導電率ロガー(onset社製 UA24-001)を用いて計測した各試験日の試験区間中心における採捕開始直前(14:00)の水温は、秋季試験で $20.6^{\circ}\text{C} \sim 21.1^{\circ}\text{C}$ 、冬季試験で $5.1^{\circ}\text{C} \sim 5.7^{\circ}\text{C}$ であり、電気伝導率は秋季試験で $132.9 \mu\text{S/cm} \sim 137.7 \mu\text{S/cm}$ 、冬季試験で $96.4 \mu\text{S/cm} \sim 178.4 \mu\text{S/cm}$ だった。試験は電気ショッカー操作員1名、採捕者2名の計3名により実施した。電気ショッカーの電圧設定は500Vとし、Duty Cycleは30、Frequencyは35で固定し、アノードリングはステンレス製( $\phi 28$ cm)を使用した。試験区域内外へ移動したウナギの個体数を計数することで試験区域内の試験個体数を推定できるように、試験区域の上流端、下流端にタイムラプスカメラ(brinno社製 TLC200)を設置し、1秒間隔で撮影した。また、在来個体がタイムラプスカメラに映らないよう、試験時と同じ設定の電気ショッカーで連日採捕を行い、試験区域内で3日間連続してニホンウナギが採捕されないことを確認してから試験を行った。試験個体を試験開始日に試験区間の流程の中心地点に放流した後、放流後1日目から3日目にかけて1日1回1pass採捕を行った。採捕は下流から上流に移動しながら行った。採捕した個体はPITタグにより個体識別を行った後、試験開始日の放流地点に再度放流した。なお、試験個体の斃死はなかったものとみなした。

採捕試験の結果を表1に示した。放流後1日目の採捕効率は秋季・冬季試験とも約14%だった。このことから、秋季・冬季における同河川での電気ショッカーの採捕効率はほぼ同じと推定された。この採捕効率は、過年度までに別の小規模河川で同様に調査した場合(約11～34%)と比較すると、中間的な値となった(平均約20%)。今回までの試験で3河川において計5回、採捕効率を調べたことになるが、いずれの試験も同一河川ではほぼ同じ採捕効率が出る傾向が確認された。このことから、過去に採捕効率を調べた調査区間であれば、ある程度の確度を持った個体数推定が出来る可能性が示唆された。

## 2. 試験池を使用したニホンウナギ採捕効率試験

山口市平川の榎野川漁業協同組合平川養魚場のコンクリート製 200t 水槽(長辺 15m×深さ 1.5m)において、電気ショッカーの設定値が採捕効率に与える影響について調べた。試験は 2021 年 12 月 7 日～同月 23 日にかけて行った。人工カバーとして、ポリエチレン製の水稻育苗箱 (60cm×30cm×5cm。以下「育苗箱」という。)を長方形に縦列 3 個、横列 5 個の計 15 個配置した。育苗箱にはエア一抜きのため側面に 2 箇所穴を開けたものを使用した。浮上防止の重しとして、10cm 厚の基本コンクリートブロックを使用した。カバー間の空隙幅は塩化ビニルパイプ規格の VP20 の外径 3.2cm とし、空隙高さは育苗箱を 2 枚重ねることで、10cm とした。カバーの配置は図 2 のとおりとし、水槽の南北に計 2 箇所配置した。試験期間中、水温・電気電導度ロガー(onset 社製 U24-001)を用いて計測した試験池の水温は 11.9～16.6℃、電気電導度は 81～91  $\mu$ S/cm で推移した。試験に使用したニホンウナギは 2020 年 11 月に漁業権のない県内中小規模河川において、電気ショッカーで採捕したニホンウナギの中から各試験 40 尾ずつ選定した。試験に使用したニホンウナギには、PIT タグ (Biomark 社製 BIO8.B.03) を腹腔内に挿入した。試験は電気ショッカー操作員 1 名、採捕者 2 名の計 3 名により実施した。電気ショッカーの設定は、試験区ごとに設定①500V、Duty Cycle20、Frequency30(パルス直流)、設定②500V、Duty Cycle30、Frequency35(パルス直流)、設定③350V、DC100(直流)の 3 つの設定を使用した。アノードリングはステンレス製( $\phi$ 28cm)を使用した。採捕は試験区ごとに 1 日 1 回 3Pass 採捕を 3 日連続行った。採捕個体は PIT タグにより個体識別を行った。試験期間中、試験個体の逸出や PIT タグの脱落、供試個体の斃死はなかった。

試験の結果を表 2 に示した。3pass を終えた時点の採捕効率は、設定①で 33%～48%(平均 40%)、設定②で 40%～50%(平均 45%)、設定③で 28%～33%(平均 29%)であり、試験区間で有意差がみられた(ANOVA,  $p < 0.05$ )。設定③の採捕効率が他の設定と比較して低くなった原因として、通電終了時のウナギの麻痺時間が、他の設定と比較して極めて短いことが影響したと考えられる。他の設定では、通電が終了した後も感電したウナギは数秒間硬直していたが、設定③では通電が終了した直後に硬直が解け、一目散にウナギが逃げるため、採捕が間に合わないケースが多発した。設定③は設定①②と電圧も異なるが、平成 30 年度の試験で電圧の差による採捕効率を比較した際は、350V～700V までの採捕効率はほぼ差がみられなかったことから、麻痺時間の差が採捕効率の違いに影響したものと推測される。

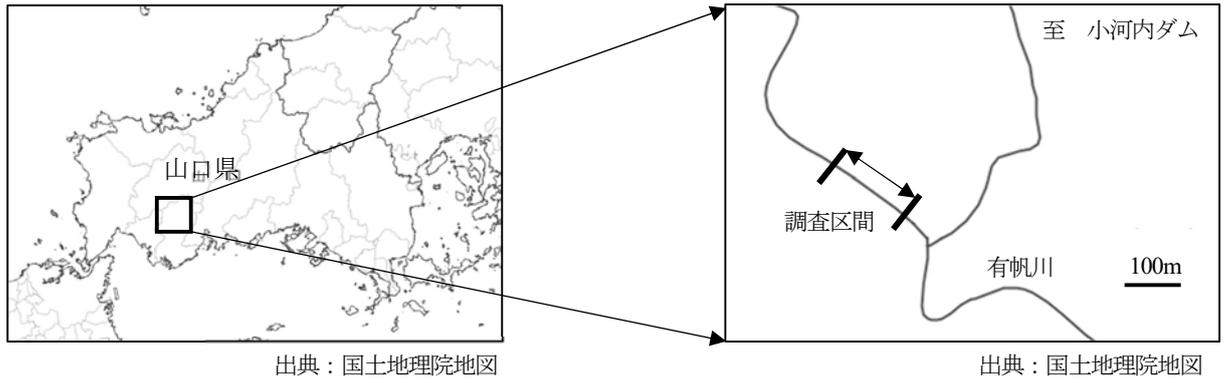


図1. 試験区域

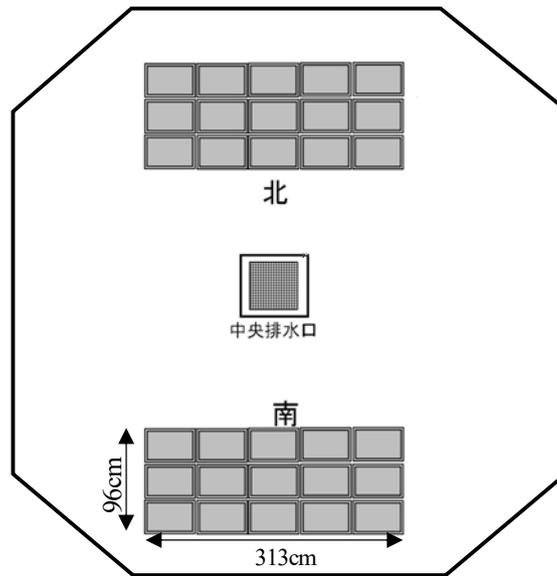


図2. カバー配置

表1. 有帆川における試験結果(上段：秋季試験、下段：冬季試験)

	2021年10月11日～2021年10月14日			
	0日目	1日目	2日目	3日目
採捕個体数(尾)	-	7	2	1
流入個体数(尾)	-	0	0	0
流出個体数(尾)	-	1	0	0
区間内の個体数(尾)	50	49	49	49
採捕率(%)	-	14.3	4.1	2.0

	2022年1月11日～2022年1月14日			
	0日目	1日目	2日目	3日目
採捕個体数(尾)	-	6	6	5
流入個体数(尾)	-	0	0	0
流出個体数(尾)	-	10	0	0
区間内の個体数(尾)	50	44	44	44
採捕率(%)	-	13.6	13.6	11.4

表2. 電気ショッカーの設定の影響試験結果

		1日目	2日目	3日目
設定①	採捕尾数(尾)	19	16	13
	採捕効率(%)	48	40	33
設定②	採捕尾数(尾)	16	18	20
	採捕効率(%)	40	45	50
設定③	採捕尾数(尾)	11	11	13
	採捕効率(%)	28	28	33

## 課題と対応策

自然河川における採捕効率試験では、同一調査区間であれば、採捕効率はある程度安定した値を示すものの、調査河川を変えた場合は平均採捕効率に最大20%近い差が生じている。こうした差は、各調査区間における河床地形やカバーの種類・量によるものと推測されるため、一般的な河川における平均的な採捕効率を示せるよう、引き続き調査点を増やして試験を行う必要がある。

また、過年度までの試験で、採捕効率に影響を与えることが想定される主要な要因については試験を行うことができたが、電気ショッカーの採捕を行うにあたり、ウナギや生物へ与える悪影響の度合(斃死や骨折等の傷害)については未だに検証できていないことから、当該漁具による採捕調査を推奨する前に、確認を進める必要がある。

課題番号	2.-(4)	事業実施期間	令和3年度
課題名	ニホンウナギの生息環境評価		
担当者	井上幹生（国立大学法人 愛媛大学）		
分担者	畑 啓生・三宅 洋（国立大学法人 愛媛大学）・澤山周平・西本篤史・山本祥一郎・山本敏博（国立研究開発法人 水産研究・教育機構）		

### 令和3年度の成果の要約：

令和3年度には、主に(1)生息量と環境要因との関係の地図化、(2)生息場所に対する選好性に関するデータ整理、解析、および(3)食性に関するサンプル処理およびデータ解析を行った。上記(1)では、前年度までに完了した解析結果を基に、遡上阻害構造物がニホンウナギ密度に及ぼす影響を地図上に示すことができた。(2)の生息場所に対する選好性については完了に至らなかったものの、(3)の食性解析については完了し、ニホンウナギが基本的に甲殻類を選好することが示された。

**過年度までの成果の概要：**本課題では、愛媛県・瀬戸内沿岸地域におけるニホンウナギの分布状況を把握し、(1)生息量と環境要因との関係、(2)生息場所に対する選好性、および(3)食性および採餌選好性を明らかにすることを主要な目的としている。令和2年度までの、それぞれの成果概要および進捗については下記のとおり。

(1) 生息量と環境要因との関係：愛媛県瀬戸内沿岸地域（今治市～伊予市）の21河川123地点に調査地を設定し、本種の生息密度、個体サイズ、水深や底質、およびコンクリート護岸による改変状況や遡上阻害構造物といった環境要因に関する調査・解析を行った結果、若齢・分散期の中型ウナギについては堰堤などの遡上阻害構造物によって密度が下げられていること、また、より成長した大型ウナギの生息密度に対してはカバー（隠れ場所）やコンクリート護岸といった局所的な生息場所要因の影響力が高まることが明らかになった。これらのことより、河川の環境収容力を有効に活用するためには遡上阻害効果の解消や緩和が必要であること、また、河道内における隠れ場所の保持、造成が環境収容力の維持、増大につながることを示唆された。

(2) 生息場所に対する選好性：河川に進入直後（初夏）のクロコ、夏季の黄ウナギ、および冬の黄ウナギの3時期を対象に、河川内における利用場所の特徴を明らかにすることを目的とするものだが、令和2年度までに、クロコ3河川3地点、夏季の黄ウナギ4河川4地点、冬季の黄ウナギ3河川3地点における野外調査が完了している。クロコ2地点と夏季の黄ウナギ3地点のデータでの予備的な解析から、黄ウナギは周囲の環境に応じて大礫や被覆植生、砂（潜伏）など様々なものを隠れ場所として利用すること、およびクロコは主に砂に潜伏する傾向が示されているが、上記のべ10地点全データを用いた解析は完了していない。

(3) 食性：夏季と冬季の2時季で本種のエサ生物に対する選好性を調べるもので、令和2年度までに、2河川7地点で胃内容物サンプル採取および餌生物調査を完了し、サンプル処理を進めている。

また、炭素・窒素安定同位体を用いた調査・分析も試み、胃内容物サンプルと安定同位体比分析の結果から甲殻類が主要な餌資源であることが示唆されている。さらに、同 2 河川の 10 地点においてエサ量とウナギ生息量との関係を検討するための野外調査、データ解析を完了し、甲殻類や底生無脊椎動物の現存量が高い区間ほど、ニホンウナギ密度・現存量も高まる傾向が示された。

**全期間を通じた課題目標及び計画：**ニホンウナギをはじめとした内水面魚種漁獲量の減少傾向への対策として、資源増大を目的とした放流や、石倉増殖礁の設置等、環境改善の取組が実施されている。しかしながら、河川等の環境においてどの程度の内水面水産資源が生息可能かを示す指標が存在しないことから、必ずしも最適な資源増殖等の手法が採用されていない可能性がある。本課題ではニホンウナギの分布状況や生息環境調査を通じて、本種が生息するために必要な環境を維持・改善するために重要な環境収容力の調査手法について検討する。愛媛県の瀬戸内沿岸河川において、ニホンウナギの分布、生息密度、体サイズ、食性、及び生息環境等に関するデータを収集・解析する。特に、本種の生息場所および餌に対する選好性、および生息量と河川環境要因との関係を明らかにする。

**当該年度計画：**令和 3 年度の目標は以下のとおり。

- (1) 生息量と環境要因との関係：令和 2 年度までに得られた解析結果を基に、遡上阻害構造物の影響等を地図上にわかりやすく表現することを試みる。
- (2) 生息場所に対する選好性：これまでに終えたのべ 10 地点全てのデータを用いたデータ解析を進めて、生息場所の選好性に関する結論を導く。
- (3) 採餌選好性：胃内容物サンプルの採取を完了している 2 河川 7 地点のサンプル処理、データ解析を完了させ、餌に対する選好性に関する結論を導く。

## 結果：

- (1) 生息量と環境要因との関係：地図化について

ウナギ生息密度の地図化には QGIS (ver. 3.10.6) を用いた (<http://www.qgis.org>)。令和 2 年度に実施したウナギ生息量と環境要因との関係についての解析結果に基づき、中型ウナギ（全長 12-40 cm）の密度  $N$  (尾/㎡) を推定する下式を作成した。

$$N = e^{-3.154828 - 0.0527877D - 0.1635952B}$$

ここで  $e$  は自然対数の底、 $D$  は河口からの距離 (km)、 $B$  は河口からその地点までに存在する高さ 0.4 m 以上の遡上阻害構造物（以下、堰とよぶ）の総数である。国近川、森川および頓田川の 3 河川を対象とし、GIS 上で本流と主要な支流の流路上に 100 m ごとに設定した各地点において  $D$  および  $B$  の値を求めた。ここで、 $D$  の値としては GIS 上で 0.1 メートル単位で測定した距離を用いた。 $B$  の計算においては 2019 年に現場調査で得られた堰の実際の位置データを用いた。また、遡上阻害の解消がウナギの密度に与える影響を地図上で可視化することを目的に、河口からの距離 5 km 区間