

| | | | |
|------|--------------------------------|--------|-------|
| 課題番号 | 1.-(4) | 事業実施期間 | 令和2年度 |
| 課題名 | 鹿児島県内河川におけるニホンウナギの移動状況等の把握 | | |
| 主担当者 | 眞鍋美幸（鹿児島県水産技術開発センター） | | |
| 分担者 | 吉満 敏・猪狩忠光・市来拓海（鹿児島県水産技術開発センター） | | |

令和2年度の成果の要約：

春、夏、秋、冬の年4回、鹿児島市八幡川において、電気ショッカーによりニホンウナギを採捕・標識放流した。令和2年度は延べ104尾採捕し、再採捕の割合は34.3%～59.1%であった。

Jolly-Seber法による調査区間の推定生息数は、令和2年11月時点で313尾（4.4尾/100㎡）と推定された。

再採捕された140尾の、初回放流日から最終採捕日の平均瞬間成長率（SGR（%/day））は全長が0.036%、体重0.104%であった。

調査区別の環境収容力を検討するため、成長と密度の関係を解析したところ、St.2、St.15、St.16、St.6等は環境収容力に余裕がある可能性が示唆された。一方St.19等は環境収容力に余裕が少なくと推察された。今後更なるデータの蓄積による精度の向上が必要である。

過年度までの成果の概要：

鹿児島市八幡川において、電気ショッカーによりニホンウナギを採捕・標識放流し、Jolly-Seber法による調査区間の生息数を推定した。

これまでに123尾の再採捕個体が確認され、25尾に体重減少がみられたが、これらの大半は再採捕までの期間が短いものであったことから、電気ショッカーや麻酔、標識装着などのハンドリングストレスの影響が考えられた。また、全流程を5m毎に川幅、水深、優占底質、カバー等を調べる環境調査を行ったが、優占底質等の環境要因と採捕尾数の間に相関はみられなかった。

調査区別の環境収容力を検討するため、成長と密度の関係を解析したところ、St.6やSt.16等では他の調査区より成長が良く環境収容力に余裕がある可能性が示唆された。一方St.4、St.5は密度が高く成長が悪いので環境収容力に余裕が少なくと推定された。

全期間を通じた課題目標及び計画：

鹿児島市八幡川におけるニホンウナギの成長過程に伴う移動状況や生息数を調査することで、河川域でのニホンウナギの生息状況に係る知見を収集する。

年度別計画

| 全体計画 | H30年度 | R1年度 | R2年度 | R3年度 | R4年度 |
|------|-------------------|------|------|------|------|
| 八幡川 | 環境調査 | | | | |
| | 電気ショッカー採捕, 標識放流調査 | | | | |

当該年度計画：

鹿児島市八幡川において、春、夏、秋、冬の年4回、天然のニホンウナギを電気ショッカーで採捕し、標識放流（DNA または PIT タグ標識）を行い、季節毎の移動や生息数を時系列で把握する。また、推定生息数は Jolly-Seber 法により求め、再採捕個体については成長について調べる。

結果：

令和2年4月22日、8月6日、11月26～27日、令和3年2月2～3日の4回採捕を行った。

調査場所は図1のとおり、鹿児島市八幡川の河口から約2km 地点を基点とし、そこから920m 上流の堰までの区間を50m毎に区分し、下流側から St. 1、St. 2、… St. 19（終点前の St. 19 のみ 20m）として19 区間（流域面積 7,060 m²）を設定した。なお、本河川に漁業権はなく過去に養殖ウナギの放流は行われていない。

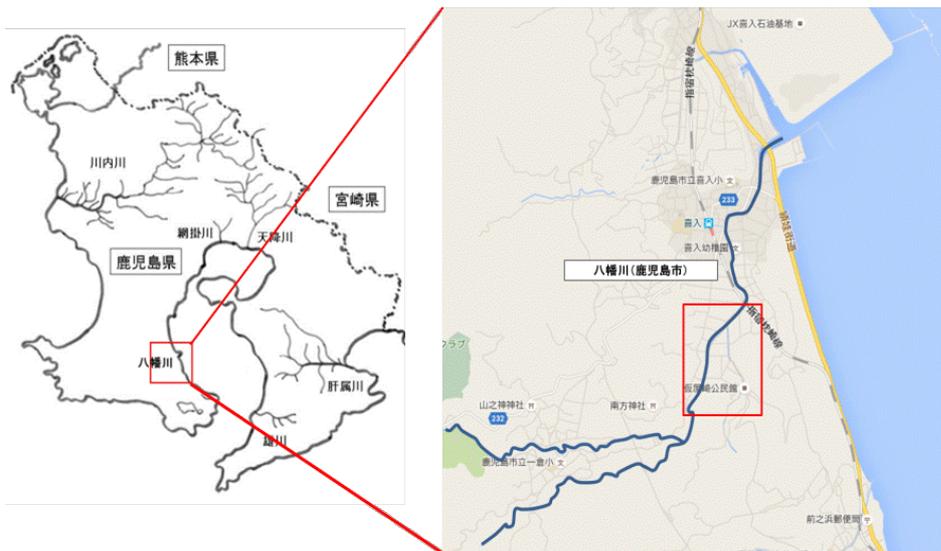


図1 八幡川調査地点

1) 採捕尾数とサイズ

表1のとおり、令和2年度は延べ104尾、平成27年度からの合計で延べ725尾を採捕した（複数回採捕した個体は複数回で集計）。これまでの調査区間別採捕尾数の合計は図2のとおりで、下流側の St. 1～St. 7 が30尾以上で多く、特に St. 6 は124尾で最多であった。

表1 月別、年度別採捕尾数

| 年度 | H27 | H28 | | | | | H29 | | | | | H30 | | | | R1 | | | | R2 | | | | 合計 |
|---------|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| 調査月 | 12月 | 5月 | 6月 | 8月 | 10月 | 1月 | 5月 | 6月 | 8月 | 10月 | 12月 | 4月 | 7月 | 10月 | 1月 | 5月 | 7月 | 10月 | 1月 | 4月 | 8月 | 11月 | 2月 | |
| 採捕尾数(尾) | 7 | 29 | 46 | 63 | 35 | 71 | 34 | 23 | 29 | 25 | 30 | 24 | 29 | 17 | 33 | 24 | 38 | 39 | 25 | 22 | 27 | 35 | 20 | 725 |
| 年度別 | 7 | 244 | | | | | 141 | | | | | 103 | | | | 126 | | | | 104 | | | | |

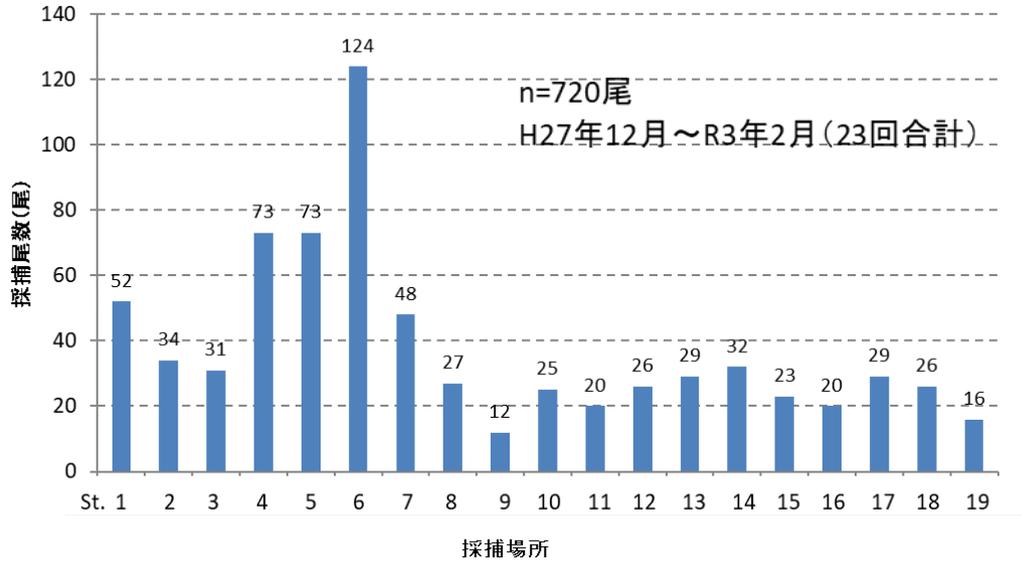


図2 調査区間別の採捕尾数

図3-1にこれまでに採捕した個体の全長組成を示す。200mm～500mmが多く、全個体の平均は381.3mmであった。

図3-2にこれまでに採捕した個体の体重組成を示す。50g以下が最も多く48.1%を占めた。全個体の平均は104.5gであった。

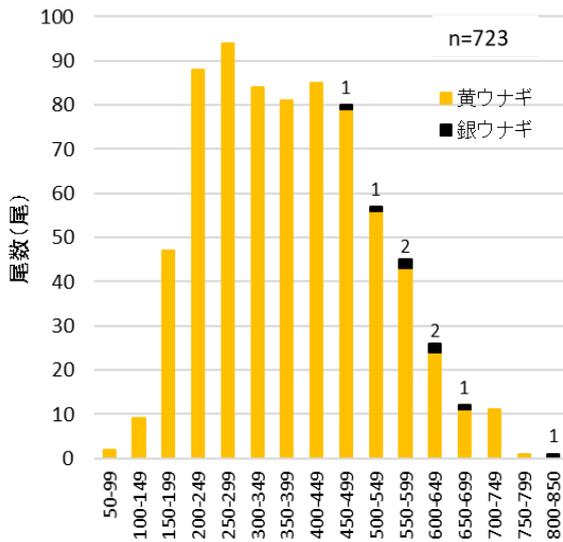


図3-1 全長組成 (mm)

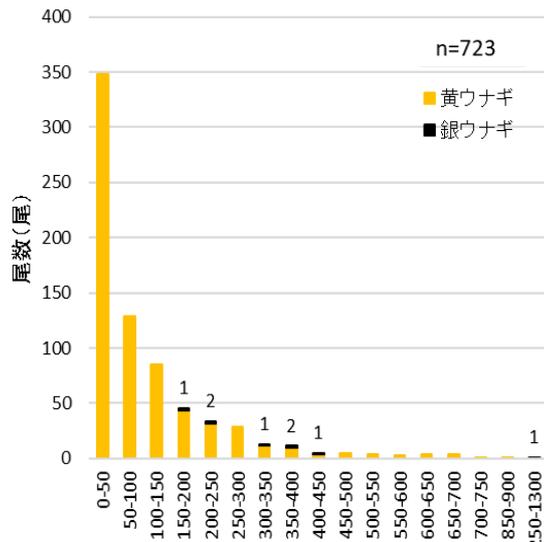


図3-2 体重組成 (g)

2) 再採捕の割合

表2のとおり、令和2年度の再採捕割合は34.3%~59.1%で推移し、全調査の平均は34.9%であった。

図4のとおり、平成29年度から令和2年度までの年度別の再採捕割合の季節変動は、春季（4~5月）はいずれも50%程度と高く、夏季（7~8月）、秋季（10~11月）に30%程度に下がり、冬季（12~2月）に再び40%以上に高くなる傾向がみられた。これは高水温期はウナギの活動が活発で調査区域外からの新規加入が多いのに対し、低水温期はあまり移動せず調査区域外との出入りが少ないためではないかと推察された。

表2 再採捕尾数

| 年度 | 調査日 | 測定数 | うち新規 | うち再採捕 | 再採捕割合 |
|----|-----------|-----|------|-------|-------|
| 1 | H27 12/16 | 7 | 7 | 0 | 0.0% |
| 2 | H28 5/13 | 29 | 29 | 0 | 0.0% |
| 3 | 6/15 | 46 | 40 | 6 | 13.0% |
| 4 | 8/8 | 63 | 54 | 9 | 14.3% |
| 5 | 10/13 | 35 | 22 | 13 | 37.1% |
| 6 | 1/19 | 71 | 48 | 23 | 32.4% |
| 7 | H29 5/23 | 34 | 17 | 17 | 50.0% |
| 8 | 6/29 | 23 | 16 | 7 | 30.4% |
| 9 | 8/22 | 29 | 19 | 10 | 34.5% |
| 10 | 10/11 | 25 | 14 | 11 | 44.0% |
| 11 | 12/20 | 30 | 14 | 16 | 53.3% |
| 12 | H30 4/26 | 24 | 13 | 11 | 45.8% |
| 13 | 7/2 | 29 | 21 | 8 | 27.6% |
| 14 | 10/3 | 17 | 12 | 5 | 29.4% |
| 15 | 1/9 | 33 | 18 | 15 | 45.5% |
| 16 | R1 5/8 | 24 | 10 | 14 | 58.3% |
| 17 | 7/25 | 37 | 21 | 16 | 43.2% |
| 18 | 10/9 | 39 | 26 | 13 | 33.3% |
| 19 | 1/15 | 25 | 15 | 10 | 40.0% |
| 20 | R2 4/21 | 22 | 9 | 13 | 59.1% |
| 21 | 8/6 | 27 | 14 | 13 | 48.1% |
| 22 | 11/26-27 | 35 | 23 | 12 | 34.3% |
| 23 | 2/2-3 | 20 | 9 | 11 | 55.0% |
| 計 | | 724 | 471 | 253 | 34.9% |

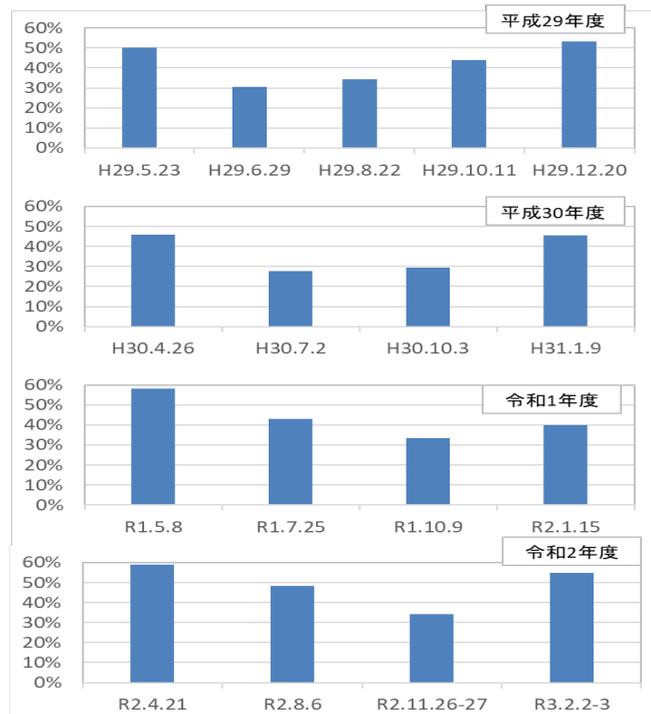


図4 再採捕割合の季節変動

3) Jolly-Seber 法による生息数推定

表3のとおり、Jolly-Seber 法による平成28年以降の全調査区間（総面積7,060 m²）におけるニホンウナギの推定生息数は84尾～773尾、平均312尾で、100 m²あたりの密度に換算すると1.2尾～10.9尾、平均4.4尾であった。なお、直近の令和2年11月現在では313尾（4.4尾/100 m²）と推定された。

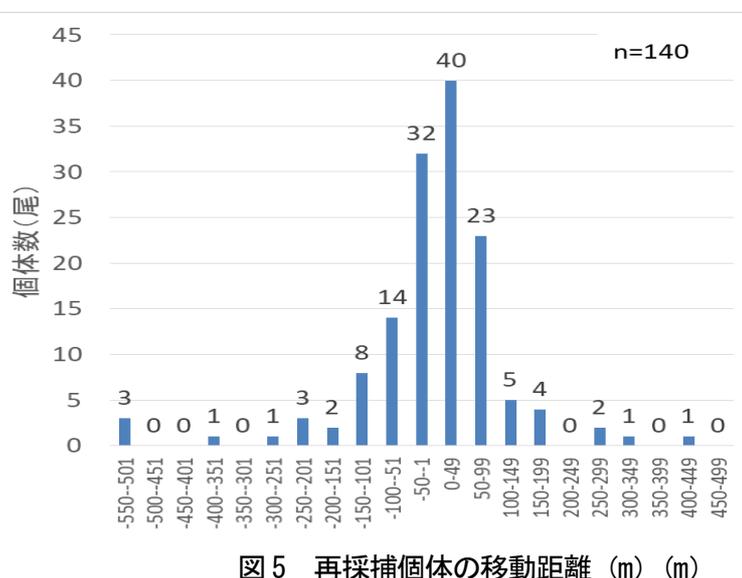
表3 Jolly-Seber 法による推定生息数と100 m²あたりの推定密度

| 調査年度 | H28 | | | | | H29 | | | | | H30 | | | | R1 | | | R2 | | | 平均 | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調査月 | 5月 | 6月 | 8月 | 10月 | 1月 | 5月 | 6月 | 8月 | 10月 | 12月 | 4月 | 7月 | 10月 | 1月 | 5月 | 7月 | 10月 | 1月 | 4月 | 8月 | 11月 | |
| 推定尾数(尾) | 84 | 265 | 274 | 265 | 279 | 313 | 714 | 241 | 174 | 342 | 169 | 413 | 442 | 773 | 300 | 235 | 341 | 253 | 158 | 195 | 313 | 312 |
| 推定密度 尾/100m ² | 1.2 | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 3.9 | 4.4 | 10.1 | 3.4 | 2.5 | 4.8 | 2.4 | 5.9 | 6.3 | 10.9 | 4.2 | 3.3 | 4.8 | 3.6 | 2.2 | 2.8 | 4.4 | 4.4 |

4) 再採捕個体の移動状況

採捕された725尾のうち、PITタグ標識またはDNA標識により、1回以上の再採捕が確認された個体140尾（2回以上再採捕された個体も1尾とする）について、初回放流地点から最終採捕地点までの移動距離を図5に、移動状況を図6-1～6-3に示す。

放流地点から下流側へ550m～上流側に450mの範囲内で移動し、下流側に50m以上移動していた個体は32尾、上下50mの範囲内にとどまっていた個体は72尾、上流側に50m以上に移動していた個体は36尾であった。



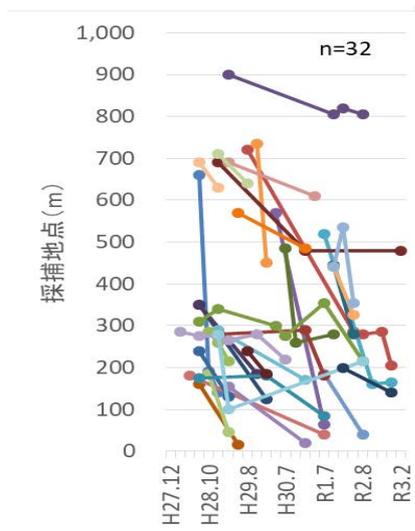


図 6-1 個体別の移動状況
(50m 以上下流へ移動)

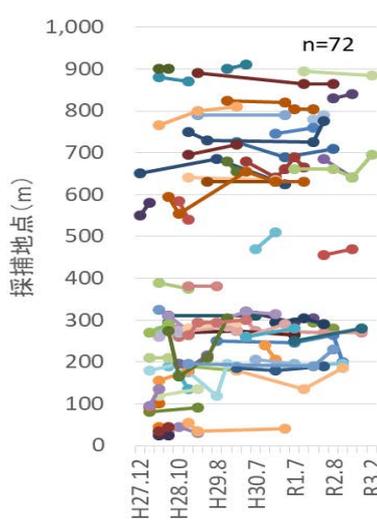


図 6-2 個体別の移動状況
(上下 50m 以内に定住)

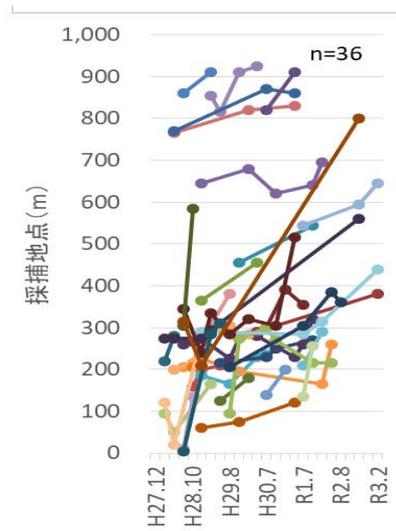


図 6-3 個体別の移動状況
(50m 以上上流に移動)

5) 再採捕個体の成長

再採捕された個体 140 尾 (2 回以上再採捕された個体も 1 尾とする) のうち、最終採捕時に初回採捕時から体重が増加した個体は 114 尾、減少した個体は 26 尾であった。

最終採捕時の体重が 100g 未満の小型個体の体重変化を図 7-1 に、100g 以上の大型個体の体重変化を図 7-2 に示す。再採捕までの期間が短い個体は体重が減少しているものが多く、電気ショッカーや麻酔、標識作業等のハンドリングストレスによる一時的な減少と推察された。なお、短期間では減少した個体も以後回復し、長期間を経た後に再採捕された個体は増加しているものが大半を占めた。

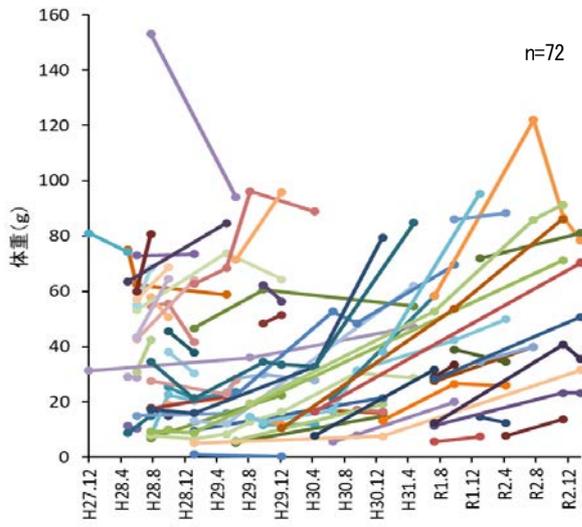


図 7-1 再採捕個体の体重変化 (100g 未満)

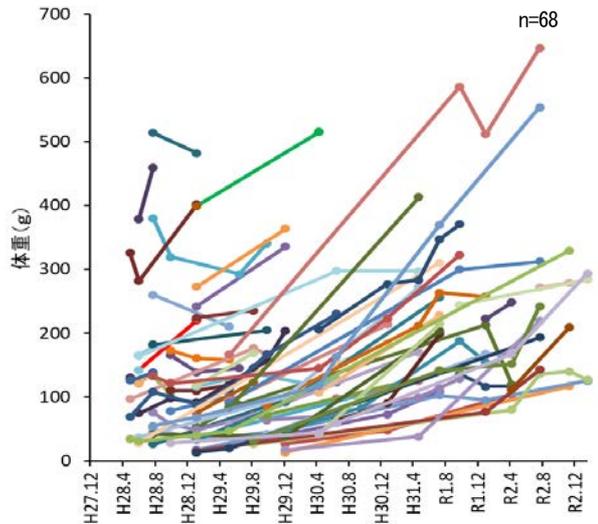


図 7-2 再採捕個体の体重変化 (100g 以上)

6) 再採捕個体の瞬間成長率

全長の瞬間成長率 Specific Growth Rate (SGR (%/day)) = $100 \times (\ln(L2) - \ln(L1)) / T$ L1 : 放流時全長 (mm) L2 : 再採捕時全長 (mm) T : 再採捕までの期間 (日) を算出し、その頻度を図 8-1 に示す。全長 SGR の最頻値は、0~0.05% で、全個体の平均値は 0.036% であった。

同様に体重の SGR (%/day) = $100 \times (\ln(W2) - \ln(W1)) / T$ W1 : 放流時体重 (g) W2 : 再採捕時体重 (g) T : 再採捕までの期間 (日) を算出し、その頻度を図 8-2 に示す。体重 SGR の最頻値は、0.1~0.2% で、全個体の平均値は 0.104% であった。

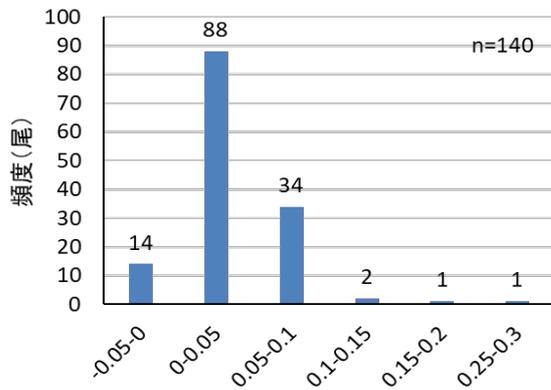


図 8-1 再採捕個体の全長 SGR (%)

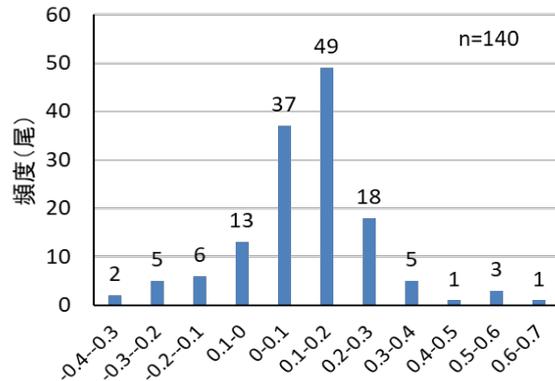


図 8-2 再採捕個体の体重 SGR (%)

7) 再採捕個体の日間成長量

全長の日間成長量 Growth Rate (GR (mm/day)) = (L2-L1) / T L1 : 放流時全長 (mm) L2 : 再採捕時全長 (mm) T : 再採捕までの期間 (日) を算出し、その頻度を図 9-1 に示す。全長 GR の最頻値は、0.1~0.2mm で、全個体の平均値は 0.131mm であった。

体重の日間成長量 GR (g/day) = (W2-W1) / T W1 : 放流時体重 (g) W2 : 再採捕時体重 (g) T : 再採捕までの期間 (日) を算出し、その頻度を図 9-2 に示す。体重 GR の最頻値は、0~0.1g で、全個体の平均値は 0.104g だった。

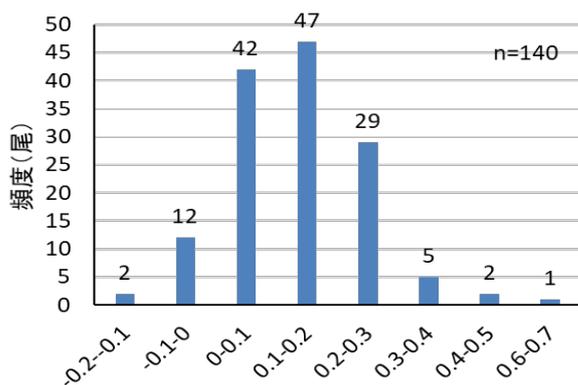


図 9-1 再採捕個体の全長 GR (mm/day)

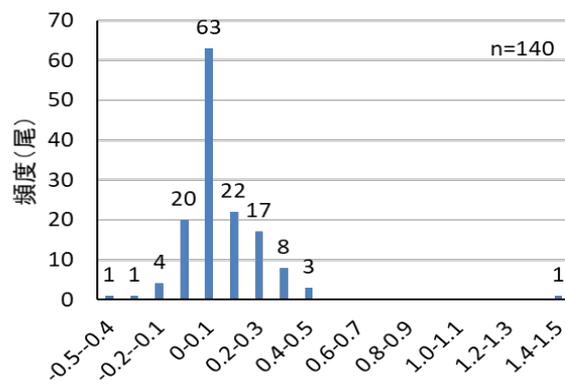


図 9-2 再採捕個体の体重 GR (g/day)

8) 調査区別の環境収容力の検討

各 St. の環境収容力を検討するため、St. 別の成長と密度の関係を図 10 に示す。成長は St. 別の体重 SGR の平均 (ハンドリングストレス等による影響を除外するため初回放流から最終再採捕までの期間が 100 日未満の個体は除外)、密度は 1 回あたり・100 m²あたりの採捕数とした。

St. 2、St. 15、St. 16 等は、密度が低く成長が良いので、環境収容力に余裕がある可能性が示唆された。また St. 6 は、密度は高いが成長は良いので、環境収容力に余裕がある可能性が示唆された。一方 St. 19 等は、密度が高く成長が悪いので環境収容力に余裕が少ないと推察された。

なお、調査区によっては再採捕個体が 2~3 尾と少なく、特に St. 9 は再採捕個体が無かったため、更なるデータの蓄積による精度の向上が必要である。

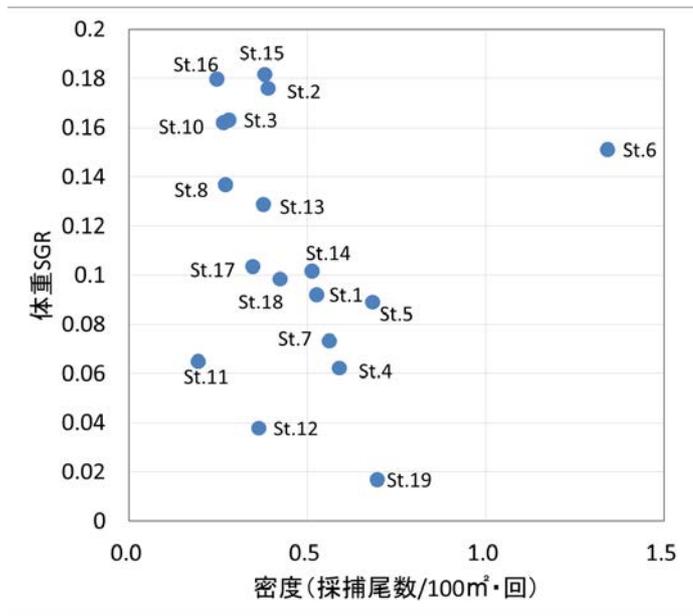


図10 体重SGRと密度の関係

課題と対応策：

令和2年12月から令和3年1月にかけて、上流域のSt.15～St.19で河川工事があり、護岸の草木は伐採され、寄州は除去され、川底は浅く平坦にならされるなど河川環境が一変し、過去の調査結果と比較できなくなった。

| | | | |
|------|--|--------|-------|
| 課題番号 | 2.-(1) | 事業実施期間 | 令和2年度 |
| 課題名 | 環境DNAによるニホンウナギの在・不在検出技術の実証開発 | | |
| 主担当者 | 山本祥一郎（国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所） | | |
| 分担者 | 山本敏博・關野正志・安池元重・馬久地みゆき・本郷悠貴（国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所）・矢田 崇（同 水産技術研究所）・井上幹生・畑 啓生・三宅 洋（国立大学法人 愛媛大学） | | |

令和2年度の成果の要約：

室内実験において、ニホンウナギから放出される環境DNA量と分解量が平衡となる濃度を調べ、その濃度が大型個体ほど高くなることを示した。高知県奈半利川および鹿児島県八幡川において、環境DNAの河川内分布を調べる調査を実施した。奈半利川に設定した5箇所の調査地点（流程に沿って約5km毎に設定）では、地点間で平均環境DNA濃度に差は認められなかったが、環境DNAフラックス（1秒間に流下する環境DNA総コピー数）は河口近くの最下流地点で最も多いことが分かった。八幡川に設定した19箇所の調査地点（流程に沿って50m毎に設定）では、環境DNA濃度、環境DNAフラックスともに流程に沿った増減傾向は認められなかった。また両河川とも、採水場所の流速、水深は環境DNA濃度と関係を示さなかった。

過年度までの成果の概要

環境水からニホンウナギ環境DNAを検出する実験手法を確立させた。実験の手順は以下の通りである。採水検体（1L）を、電動ポンプを用いてガラスフィルター（ワットマン社 GF/F フィルター 47 mm）上に濾過した。さらに、DNAの保存状態を高めるために、100%エタノール15mlをフィルター上に添加し（Minamoto et al. 2016）、目視によりフィルターの乾燥が認められるまで吸引濾過を続けた。濾過後のフィルターは、直ちに-20℃で冷凍保存した。フィルターからのトータルDNA抽出は、Miya et al. (2015)の方法に従い、Qiagen社のDNeasy Blood & Tissue Kitを用いて最終容量が200μlになるように抽出した。環境DNAの検出・定量化には、ロシュ社LightCycler480機器を用いてリアルタイムPCRにより分析した。リアルタイムPCR反応には、ミトコンドリアDNA(16S ribosomalRNA)に設計されたニホンウナギを特異的に検出するプライマーおよび蛍光プローブ(蛍光色素:FAM)を用いて（Minegishi et al., 2009）、アニーリング温度60℃で反応させた。水産技術研究所日光庁舎・屋内水槽にて畜養しているニホンウナギの飼育水を用いてPCR反応をおこなったところ、明瞭な増幅反応を確認することができた。また、既知濃度のスタンダードサンプルを用いて作成した検量線と照合させることにより、環境水中に存在するニホンウナギDNAコピー数を定量することが可能となった。

環境水中の環境DNA分解過程を調べるために、水産技術研究所日光庁舎において以下の室内実験

を行った。300Lの円形水槽を4基設置し、恒温器を用いてそれぞれ10℃、15℃、20℃、25℃の水温に設定した。別に用意したニホンウナギ飼育水10Lをそれぞれの円形水槽に移し、経時的に採水し、定量PCR反応を行った。その結果、環境DNAコピー数は時間とともに有意に減少し、その減少パターンは指数関数式に適合することが分かった。また、ほとんどの実験において、高水温環境下ほど分解速度が速くなる傾向が認められた。環境DNAコピー数が半数となる日数（半減期）を推定したところ、10℃ではおよそ2.1～2.2日、15℃では1.6～1.9日、20℃では1.1日～1.5日、25℃では1.0～1.2日であった。

ニホンウナギ個体から環境中に放出される環境DNA量を実験的に調べた。水産技術研究所日光庁舎の実験施設内において20℃の水温に設定した300Lの円形水槽にニホンウナギ1尾を移し、経時的に採水し、環境DNA濃度を求めた。環境DNA濃度の推移パターンは個体毎に大きく異なっていたが、実験開始24時間後の環境DNA濃度はニホンウナギの体重と正の相関関係を示した。

日光庁舎内の人工河川（流程約120m、川幅約1m、流量0.021m³/s）を用いてニホンウナギの個体数、バイオマスと環境DNA濃度との関係を調べた。その結果、環境DNA濃度は、ニホンウナギの尾数およびバイオマスと有意な相関関係を持つことが示された。

全期間を通じた課題目標及び計画：

環境DNAは、環境中に含まれるDNAのことを指す。近年、環境DNA分析は、水生生物の在・不在の検出のみならず、個体数やバイオマス、分布パターンなどを推定する新しい手法としても注目を集めている。本課題では、ニホンウナギの環境収容力を評価する手法開発の一環として、環境DNA分析の技術開発に取り組む。まず、ニホンウナギを対象とする環境DNA分析手法を確立させ、ニホンウナギの在・不在検出への適用について検討する。次に、室内・野外実験を通して、ニホンウナギ環境DNAの放出・分解過程を把握する。また、野外調査データと組み合わせることにより、河川内における環境DNAの分布パターンやニホンウナギ生物量と環境DNA濃度との関係を調べる。

当該年度計画：

室内実験を行い、ニホンウナギの生物量と環境DNA濃度との関係を調べる。自然河川において環境DNAの分布パターンを調べる。

結果：

(1) 環境水中における環境DNAの挙動を調べる研究の一環として、本年度も引き続きニホンウナギ個体から環境中に放出される環境DNA量を調べる実験に取り組んだ。実験の方法は下記の通りである。水産技術研究所日光庁舎の実験施設内において設置した300Lの円形水槽4基を、恒温器を用いて20℃の水温に設定した(図1)。円形水槽内の水は、電動ポンプを使用し常に循環状態を保った。日光庁舎にて20℃で馴致、畜養しているニホンウナギを全長、体重を記録した後に、各円形

水槽に1尾ずつ移し、投入から24時間毎にそれぞれ1Lを採水した。採水した水は、30分以内にフィルター濾過を行ない、DNA抽出までフィルターを冷凍保存した。実験終了後の円形水槽、恒温器については、次亜塩素酸ナトリウムを用いて十分に洗浄した後に、その後の実験に用いた。環境DNAコピー数の定量については、それぞれの検体についてリアルタイムPCR反応を4回(反復)おこない、1回のPCR反応においてDNAコピー数が1未満であった場合は検出下限値扱いとし、その後の解析から除外した。実験は12個体についてそれぞれ17日～18日間行った。実験に用いたニホンウナギの全長および体重の範囲はそれぞれ136mm～541mm、2.03g～247.60gである。



図1 室内実験に使用した円形水槽

図2に、個体ごとの環境DNA濃度の推移を示した。実験水槽内の環境DNA濃度は、いずれも実験開始2日～4日後にピークに達し、その後減少に転じるパターンを示した。これは実験水槽に移されたニホンウナギがある時間を経て活動性を低めた結果、体外に放出される環境DNA量が減少し、単位時間あたりの放出量が分解量を下回ったためと考えられる。実験開始から8日～10日以降では、極端な濃度変化は観察されず、個体毎にある一定の値で推移した。水槽内の環境DNA濃度が安定する実験開始から15日後の環境DNA濃度は、ニホンウナギの全長、体重と正の相関関係を示した(全長、 $R^2=0.66$ ；体重、 $R^2=0.68$ ；図3)。

本実験において、環境DNAの放出量と分解量が平衡に達する濃度が、ニホンウナギの体サイズによって異なることを明らかにした。今回の実験により得られた関数式を用いると、体サイズ100mmの個体(クロコに相当)の環境DNA平衡濃度(300L、20℃の環境)は約130(コピー/L)、体サイズ400mmの個体(黄ウナギに相当)では約11000(コピー/L)と推定される。一方、同一個体であっても、実験水槽内の環境DNA濃度は大きな変動をみせた。このことは、環境DNA濃度が個体の活動性や代謝の変化によっても影響を受けることを示している。

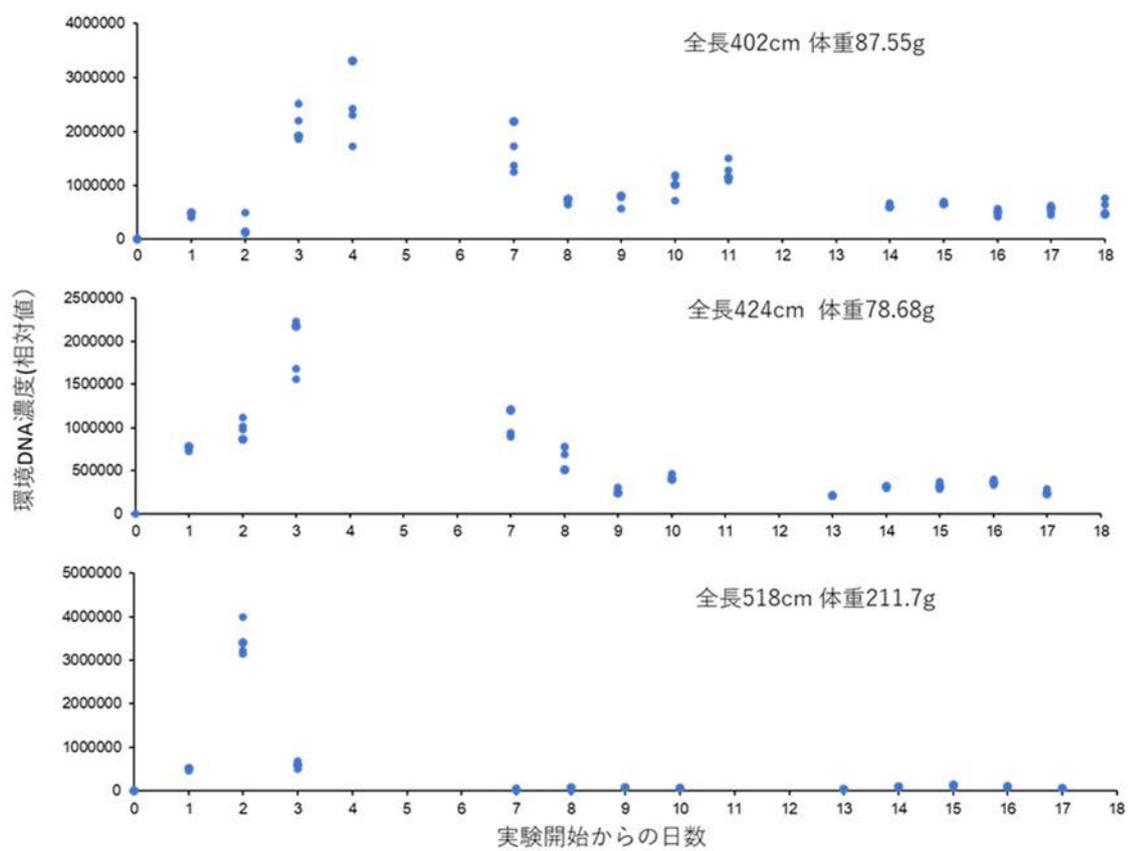


図2 個体ごとの環境DNA濃度の推移。各実験で、縦軸の範囲が異なるので注意のこと。

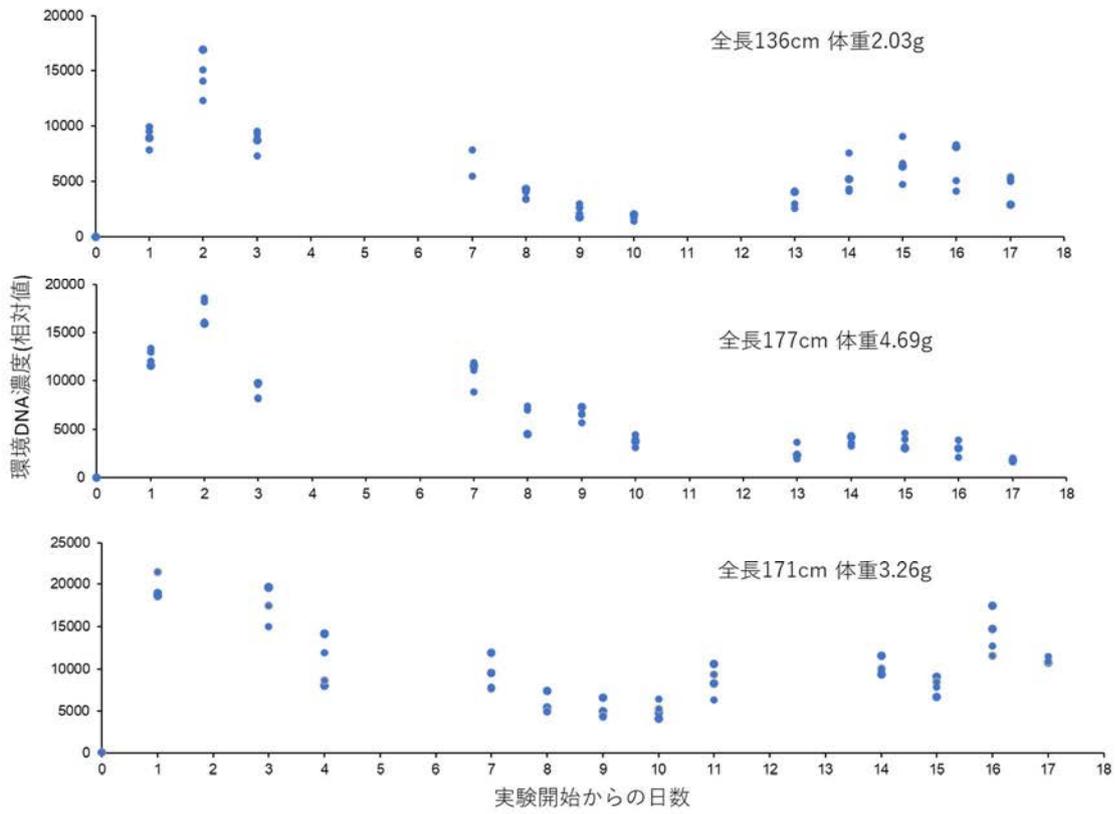


図2 つづき。

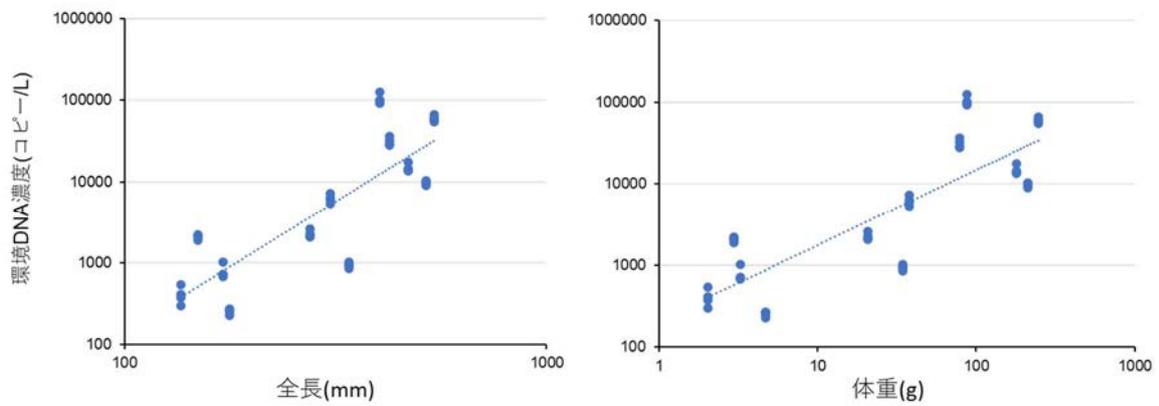


図3 実験開始から15日後のニホンウナギ全長・体重と環境DNA濃度との関係。

(2) 自然河川における環境DNAの分布パターンを調べるために、高知県奈半利川および鹿児島県八幡川において以下の調査を行った。

(奈半利川)

調査区間(流程距離約 20km)内に流程に沿っておよそ 5km 毎に調査地点を設定し、それぞれの地点において横断面に沿って 10m 毎に 1L×2 本を採水した(図 4)。同時に、採水場所の流速、水深、調査地点の流量を計測した。採水した水は直ちにフィルター濾過を行い、DNA 抽出までフィルターを冷凍保存した。採水調査は 2020 年 12 月 3 日～4 日にかけて実施した。

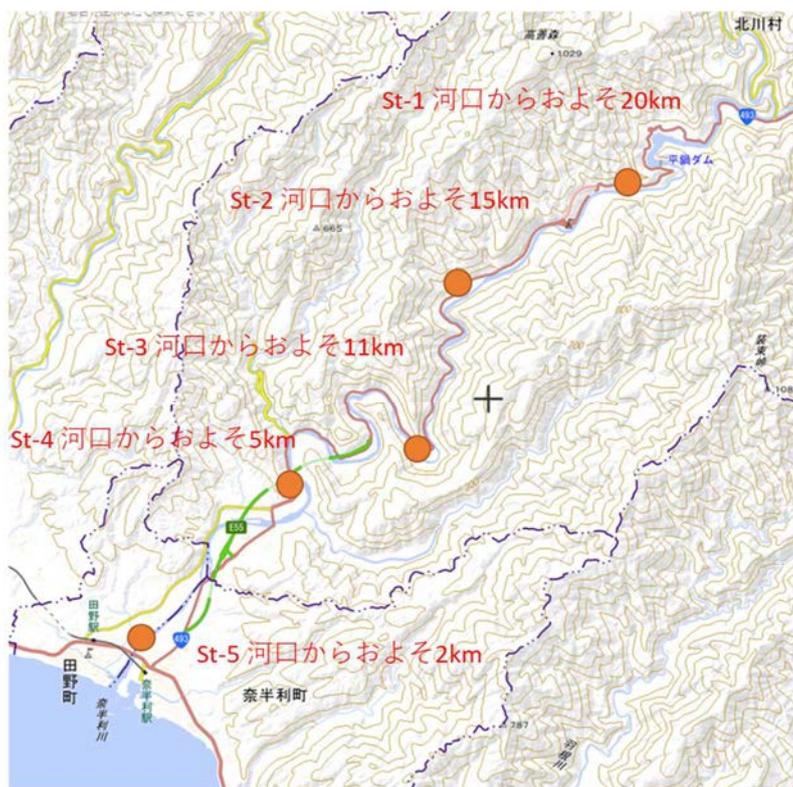


図 4 高知県奈半利川における環境 DNA 調査地点。

奈半利川に設定した 5 箇所の調査地点の平均環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックス (1 秒間に流下する環境 DNA 総コピー数) を図 5 に示す。調査地点を固定因子、採水地点の流量および水深を変動因子、各採水地点での 2 サンプルを繰り返しとした一般線型モデルによる解析の結果、調査地点、採水場所の流量・水深はいずれも環境 DNA 濃度を説明する変数として採択されなかった。一方、環境 DNA フラックスは、最下流地点のみ極端に高い値を示した。

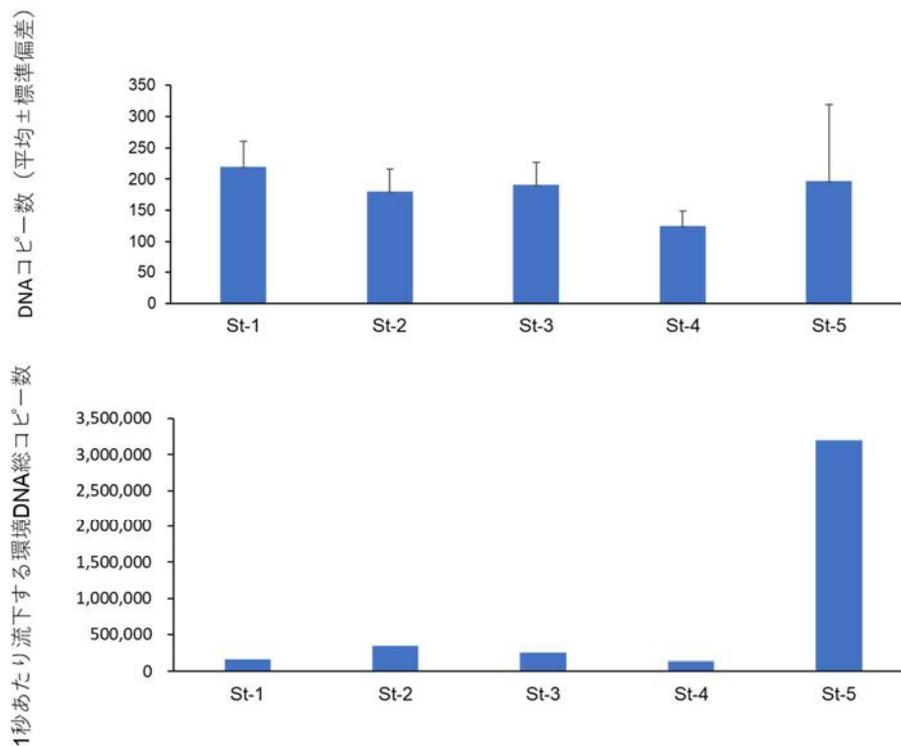


図5 高知県奈半利川に設定した調査地点毎の平均環境DNA濃度、および環境DNAフラックス。

(八幡川)

鹿児島県八幡川の調査区間(流程距離約900m)に、流程に沿って50m毎に計19箇所の調査地点を設定し、採水調査を行った(図6)。それぞれの調査地点において、横断面に沿って2m毎に1L×2本を採水し、同時に採水場所の流速、水深、調査地点の流量を計測した。採水した水は直ちにフィルター濾過を行い、DNA抽出までフィルターを冷凍保存した。採水調査は2020年11月4日に実施した。



図6 鹿児島県八幡川における環境 DNA 調査地点。赤線は調査区間(約 900m)を示す。

八幡川に設定した 19 箇所の調査地点の平均環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックス (1 秒間に流下する環境 DNA 総コピー数) を図 7 に示す。今回、最上流に設定した調査地点 (St19) において環境 DNA は検出されなかった。一般線型モデルによる解析の結果、調査地点、採水場所の流量・水深はいずれも環境 DNA 濃度を説明する変数として採択されなかった。同様に、環境 DNA フラックスも地点毎の大きな違いは認められなかった。

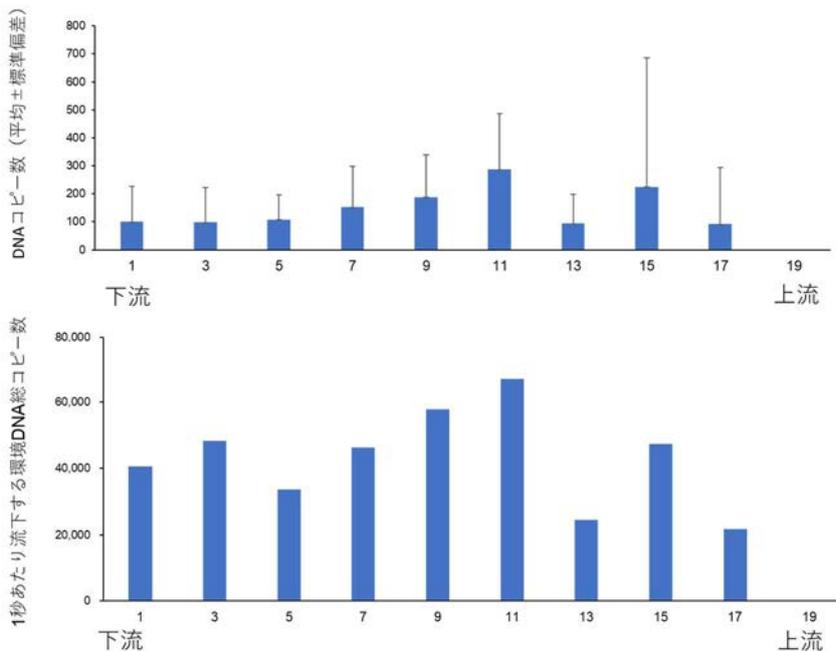


図7 鹿児島県八幡川に設定した調査地点毎の平均環境 DNA 濃度、および環境 DNA フラックス。

課題と対応策：

本課題でこれまで実施した室内実験によって、環境 DNA 濃度(平衡濃度)が個体の体サイズと活動性(代謝)に強い影響を受けることを示した。これらの知見は、今後、自然河川、湖沼での環境 DNA の挙動、動態を理解する上で重要な貢献をもたらすものと期待される。

鹿児島県水産技術開発センターが八幡川で実施した採捕調査から、ニホンウナギは調査区間内にまばら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、八幡川、奈半利川ともに流程に沿った環境 DNA 濃度の増減傾向は確認されなかった。同様の結果は、和歌山県高瀬川においても報告されている(本事業 2019 年度報告書)。自然河川では、存在する微生物の種類・量によって環境 DNA の分解が急速に進む可能性があり、また環境 DNA が流下する過程で底泥などにも吸着することも考えられる。今後は、野外における環境 DNA 分解速度や拡散範囲についての検証試験が必要と考える。一方、奈半利川では、河口近くに設定した調査地点で環境 DNA フラックスが高くなっており、この河川ではニホンウナギの生息量が下流域で多いことが予想された。

今後も複数河川での調査を実施し、一般性や共通性を検討するとともに、環境 DNA 量の時間的・空間的变化、それらと環境要因やニホンウナギの空間利用との関係を調べる必要がある。

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.
- Minegishi Y. et al. (2009) Species identification of *Anguilla japonica* by real-time PCR based on a sequence detection system: a practical application to eggs and larvae. *ICES J. Mar. Sci.*, 66: 1915-1919.
- 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.-(2) | 事業実施期間 | 令和2年度 |
| 課題名 | 漁具によるサイズバイアス/採集効率の検討(筒) | | |
| 主担当者 | 矢田 崇 (国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産技術研究所) | | |
| 分担者 | 山本敏博・横内一樹・福田野歩人(国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所)・眞鍋美幸(鹿児島県水産技術開発センター) | | |

令和2年度の成果の要約：

- ① 平成30年度に実施した筒の長さとおよび太さの選択実験の解析では時間経過を読み込めていなかったため、時間経過を考慮したデータセットを再集計・整理した。解析は目的変数に時間毎に筒にウナギが入っている(1)、入っていない(0)をカウントし、説明変数はパイプの長さ及び太さ、ウナギの大小を用いてCox回帰分析で評価した。筒の長さおよび太さを解析するために、それぞれ1,008データを再集計・整理した。解析はフリーの統計ソフトRを用い、パッケージ“survival”を用い、時間経過毎の筒の選択率はKaplan-Meier推定で求めた(パッケージ“KMsurv”を使用)。ウナギが全長より長い筒を選択するかの実験では、ウナギは大小で、筒を選択する傾向に違いは認められなかった。また、ウナギは短い筒は選択せず、全長と同じか少し長い筒または、全長よりも長い筒を選択することが解った。Cox回帰分析の結果、ウナギは短い筒に対し、全長と同じか少し長い筒を2.23倍有意に選択しやすく($p < 0.001$)、全長よりより長い筒を2.59倍有意に選択しやすかった($p < 0.001$)。ウナギが体高より太い筒を選択するかの実験では、ウナギは大小で、筒を選択する傾向に違いは認められなかった。また、ウナギは太すぎる筒は選択せず、体高と同じか少しだけ太い筒を選択することが解った。Cox回帰分析の結果、ウナギは体高より太い筒や最も太い筒を有意に選択しにくいことが解った。また、最も太い筒と小型個体には負の交互作用が認められ($\text{coef.} = -0.772, p < 0.01$)、小型個体ほど太すぎる筒に入りにくい傾向があった。これらの知見は天然ウナギで改めて確認する必要があるが、河川改修等による生息環境の減少を補う工作物(ウナギの寝床)を設計する際にも有用であるかも知れない。
- ② 令和元年度に実施した実験の画像を画像編集ソフトPhotoshop CCのフィルター機能を用いて編集し、同じ筒に入ったウナギの尾数をカウント出来るか、また大小サイズの判別が可能か検討した。しかし、画像解析のみでは、これらを判別出来ないことが多く、解析を断念した。
- ③ NFCの通信技術を用いた個体判別技術が水中で使用可能か検討した。水を詰めたユニパックをNFCカードリーダーライタの上に乗せて、NFCのPITタグが認識出来るか確認した結果、2cm程度までは水層を挟んでも認識出来ることが解った。Arduinoを用いた実験では本報告書作成までに実験結果を得ることが出来なかった。しかし、水中でNFCによる極近距離通信が可能であれば、令和元年度の実験設計でウナギのサイズ間干渉や個体間干渉等を評価出来る可能性がある。

過年度までの成果の概要：

平成 30 年度には、ニホンウナギの筒の長さとおさの選択実験を、2 つのサイズ群の養殖ウナギを用いて、鹿児島県水産技術開発センター宮ヶ浜実験池で行った。大サイズ群のウナギ（平均全長 469 ±15mm (±S.D.)、最大体高 27.4 ±1.1mm (±S.D.)）と小サイズ群のウナギ（平均全長 331 ±36mm (±S.D.)、最大体高 15.7 ±1.5mm (±S.D.)）を用いた。1. 筒の長さを選択する実験では、筒の内径を平均最大体高の概ね 1.1-1.2 倍に固定したうえで、全長より短い、全長とほぼ同じか少し長い、全長がスッポリ隠れるほど長い筒を 1 セットとした 7 セットを水槽へ入れるとともにウナギを 7 尾収容した。各サイズ群毎に 3 つの水槽で観察実験を行った。なお筒は、個別判別できる様に番号を油性マジックで書き込んだ。その結果、大ウナギ、小ウナギともに全長よりも長い筒を選択し、長い筒を選択する傾向は時間が経過しても変わらなかった。2. 筒の太さを選択する実験では、筒の全長を概ね全長の 1.1-1.2 倍に固定したうえで、最大体高の 1.5 倍未満の筒、最大体高の 2 倍未満の筒、最大体高の 2 倍を超える筒 1 セットとした 7 セットを水槽へ入れるとともにウナギを 7 尾収容した。各サイズ群毎に 3 つの水槽で観察実験を行った。実験は、FRP 水槽（横幅(W) 170cm × 縦長(L) 70cm）を用いて行った。観察は水中カメラを用いて、10 分後、90 分後、6、24、30、48、54、72 時間後に撮影して、筒の太さ毎に入ったウナギの数を計数した。その結果、大ウナギでは、実験開始後 6 時間まで筒の太さに選択性は認められなかったが、時間の経過とともにより細い筒を選択する傾向がみられた。一方、小ウナギでは実験開始 10 分後は体高の 2 倍未満の太い筒を選択したが、時間の経過とともにより細い筒を選択する傾向が強まった。

令和元年度には、2 つのサイズ群（大小）のニホンウナギを用い、3. 筒の長さの選択に個体サイズ間の干渉があるか、4. 筒の太さの選択に個体サイズ間の干渉があるか、を検証する水槽実験を行った。実験は養殖ウナギを用い、鹿児島県水産技術開発センター宮ヶ浜実験池で行った。大サイズ群のウナギ（平均全長 481 ±21mm (±S.D.)、平均最大体高 24.6 ±1.3mm (±S.D.)）と小サイズ群のウナギ（平均全長 364 ±16mm (±S.D.)、平均最大体高 16.4 ±1.3mm (±S.D.)）を用いた。いずれの実験においても（細い）筒の内径は、大ウナギが 2 匹入ることが出来ず、より好むと考えられる平均最大体高の 1.1 倍以上、1.5 倍以下に決めた。3. の実験では、内径が 30mm で長さが 250mm と 570mm の筒を抱き合わせ 1 セットとし、これを 20 セット準備した。4. の実験では長さが 500mm で内径が 30mm と 70mm の筒を抱き合わせ 1 セットとし、これを 20 セット準備した。3. と 4. で使う筒には個別に番号を振った。実験は FRP（縦/横=170cm/70cm、実験中の水深は 11cm に調整）水槽に筒を 10 セット入れ、大ないし小ウナギを各 10 尾、計 20 尾入れ、約 10 分後、約 6 時間後に水中ビデオ撮影し、筒中のウナギの大小数を筒毎にカウントした。約 24 時間後には筒と、筒に入ったウナギを取り上げ、筒毎に入った大小ウナギを計測すると共に、筒毎に尾数をカウントした。3. および 4. は 4 回繰り返し実験とした。何れの実験区でも約 10 分後、約 6 時間後の画像で、ウナギが複数入っているか、大ウナギなのか等判別できない場合があったので、本年度は 24 時間後のデータを用いて解析した。解析は比の検定（ χ 二乗解析）を用いた。その結果、3. の実験では小ウナギはより長い筒を選択する、また小ウナギの筒選択には大ウナギの在・不在に影響されない、4. の実験

では小ウナギはより細い筒を選択する、また小ウナギの筒選択には大ウナギの在・不在に影響されることが示唆された。

全期間を通じた課題目標及び計画：

ニホンウナギの筒漁法について、鹿児島県水産技術開発センター宮ヶ浜実験池を用いて採捕サイズの偏りや採集効率を定量的に調べることで、漁獲調査による個体数推定のための基礎データを収集する。宮ヶ浜実験池では、筒の長さや直径等の漁具の条件、ウナギの体サイズを変えて漁獲試験を繰り返すことで、採捕サイズや採集効率を把握する。

当該年度計画：

- ① 平成 30 年度に行った筒の長さや太さの選択実験について時間経過も組み込んで解析する
- ② 令和元年度に実施した実験の画像を画像編集ソフトを用いて解析し、同じ筒に入ったウナギの尾数をカウント出来るか、また大小サイズの判別が可能か検討する
- ③ NFC の通信技術を用いた個体判別技術が水中で使用可能か検討する

材料と方法：

- ① 平成 30 年度に実施した筒の長さや太さの選択実験について、改めて画像からデータを再集計・整形した。実験の方法は本報告の「過年度までの成果の概要」または平成 30 年度の報告書に記載の通りである。なお、本課題の実験では、すべての筒には固有番号があることから、今年度の解析では、筒からみたウナギの入り易さに着目し、Cox 回帰分析のためのデータセットを準備した（表 1. および 2.）。例えば、ウナギの長さ選択実験では、筒の実験総数 126（ID：7 本×3 種筒×2 ウナギサイズ×3 回繰り返し）、時間経過 8 セットデータ（10 分後、90 分後、6 時間後、24 時間後、30 時間後、48 時間後、54 時間後、72 時間後）、status（各観察時間に ID を振った筒にウナギが入っていれば 1、入っていなければ 0）、パイプタイプ（全長より短い、ちょうど良いか少し長い、長いの 3 タイプ）、ウナギサイズ（大と小）、実験区（大と小の 2 実験×各 3 回繰り返し=6 実験）、frail 項（筒への入りにくさの指標：1 本の筒へ複数入ると筒にウナギが入る確率は減少する。1 実験では 7 尾のウナギを使用するので N 尾が他のウナギが入った同じ筒に入ったら $(7-N)/7$ で算定と定義）の総計 1,008 データセットを準備し、同様に太さの選択実験でも 1,008 データセット準備した。解析はフリーの統計ソフト R を用い、パッケージ”survival”を用い、時間経過毎の筒の選択率は Kaplan-Meier 推定で求めた（パッケージ”KMsurv”を使用）。

表1. 筒の長さの選択実験におけるデータセット(1,008 データ)

| | |
|-----------|--|
| ID | 7本×3種筒×2サイズ×3繰り返し=126 |
| time | 10分、90分、6時間、24時間、30時間、48時間、54時間、72時間：8セット |
| status | 各観察時間にIDを振った筒にウナギが入っていれば1、入っていなければ0 |
| pipe_type | long, short, fit_length |
| eel_size | smallとlargeの2type |
| exp | 2サイズ×3繰り返し=6実験 |
| frail | 筒への入りにくさの指標：1本の筒へ複数入ると筒にウナギが入る確率は減少する。1実験では7尾のウナギを使用するのでN尾が他のウナギが入った同じ筒に入ったら $(7-N)/7$ で算定 |

表2. 筒の太さの選択実験におけるデータセット(1,008 データ)

| | |
|-----------|--|
| ID | 7本×3種筒×2サイズ×3繰り返し=126 |
| time | 10分、90分、6時間、24時間、30時間、48時間、54時間、72時間：8セット |
| status | 各観察時間にIDを振った筒にウナギが入っていれば1、入っていなければ0 |
| pipe_type | loosest, looser, fit_width |
| eel_size | smallとlargeの2type |
| exp | 2サイズ×3繰り返し=6実験 |
| frail | 筒への入りにくさの指標：1本の筒へ複数入ると筒にウナギが入る確率は減少する。1実験では7尾のウナギを使用するのでN尾が他のウナギが入った同じ筒に入ったら $(7-N)/7$ で算定 |

- ② 令和元年度に実施した大小ウナギの個体間干渉があるかを検証する実験では、Raw 画像からウナギの大小を判別出来ないまたは、同じ筒に複数の個体が入ると尾数ないし大小のウナギの判別が困難であった。そこで画像編集ソフト Photoshop CC のフィルター機能を用いて、ウナギの大小等の判別が可能か検討した。色調補正（明るさ、コントラスト、レベル、トーンカーブ、露光量、彩度、カラーバランス等）機能を用いて、動画の静止画像を様々確認した。
- ③ NFC 通信技術は交通系カードやマイナンバーカードにも利用され、社会で一般的に用いられている通信技術である。数ミリ～数センチの近距離通信を可能とし、水の壁があっても通信が可能なことは経験的に知られている（鉄道の自動改札機では両手の平で交通系カードを挟んでタッチしても決済は可能であることが多い）。また、海外でこの技術を活用した PIT タグが販売されるなど水中での極近距離個体識別技術への応用が期待される。そこで、まず市販の NFC カードリーダーライター（I・O DATA USB-NFC3）を購入し、ユニパックに水を詰めてこの NFC カードリーダーライターの上に乗せて、NFC の PIT タグが認識出来るか確認した。次に、市販の NFC カードリーダーライターを PC へ繋げても、NFC タグを認識する・しないしか判別出来ない。そこで、NFC センサー等の操作が可能な電子工作キット Arduino を用いて PIT タグの認識が可能か回路を組むこととした。なお、Arduino は様々なキットが販売され、プログラムコードも多数公開されている。Arduino のキットに付属する RFID-RC522 のセンサーを用いた認証をこころみる予定で

あったが、RFID-RC522 は我が国の電波法に抵触する可能性があり断念した。その後、新たに総務省の型式番号を取得している SONY の RC-S620/S を用いた実験を行うこととした。

結果：

- ① ウナギが全長より長い筒を選択するかの実験では、まずウナギのサイズによって筒の選択性に違いがあるか Kaplan-Meier 推定を行って確認した (図 1.)。その結果、何れのサイズでも、筒を選択する傾向に違いは認められなかった。次に、大小サイズに関わらずウナギがどう言った長さの筒を選択するか Kaplan-Meier 推定で求めた (図 2.)。その結果、ウナギは短い筒は選択せず、全長と同じか少し長い筒または、全長よりも長い筒を選択することが解った。また、Cox 回帰分析の結果、ウナギは短い筒に対し、全長と同じか少し長い筒を 2.23 倍有意に選択しやすく ($p < 0.001$)、全長よりより長い筒を 2.59 倍有意に選択しやすかった ($p < 0.001$: 図 3.)。次に、ウナギが体高より太い筒を選択するかの実験では、まずウナギのサイズによって筒の選択性に違いがあるか Kaplan-Meier 推定を行って確認した (図 4.)。その結果、何れのサイズでも、筒を選択する傾向に違いは認められなかった。次に、大小サイズに関わらずウナギがどう言った太さの筒を選択するか Kaplan-Meier 推定で求めた (図 5.)。その結果、ウナギは太すぎる筒は選択せず、体高と同じか少しだけ太い筒を選択することが解った。また、Cox 回帰分析の結果、ウナギは体高より太い筒と最も太い筒を有意に選択しにくかった (図 6.)。また、最も太い筒と小型個体には負の交互作用が認められ (coef. = -0.772, $p < 0.01$)、小型個体ほど太すぎる筒に入りにくい傾向が明らかになった。これらの結果から、ウナギは全長と同じか長い筒で程よく体高に合う筒をサイズの大小に関わらず選択することが明らかになった。これらの知見は天然ウナギで改めて確認する必要があるが、河川改修等による生息環境の減少を補う工作物 (ウナギの寝床) を設計する際にも有用であるかも知れない。
- ② Photoshop CC のフィルター機能を用いた画像解析では、様々なフィルターを用いて画像編集を試みたが、検討段階でウナギの大小や複数尾入っているかどうか判別出来ない画像が多く、画像編集での判別を断念した。
- ③ 水を詰めたユニパックを NFC カードリーダーライタの上に乗せて、NFC の PIT タグが認識出来るか確認した結果、2cm 程度までは水層を挟んでも認識出来ることが解った。一方、Arduino 用いて SONY の RC-S620/S (NFC リーダライタセンサー) を回路に組み込んだ実験は本報告書作成までに実験結果を得ることが出来なかった。しかし、水中で NFC による極近距離通信が可能であれば、令和元年度の実験設計で、ウナギのサイズ間干渉や個体間干渉等を評価出来る可能性がある。

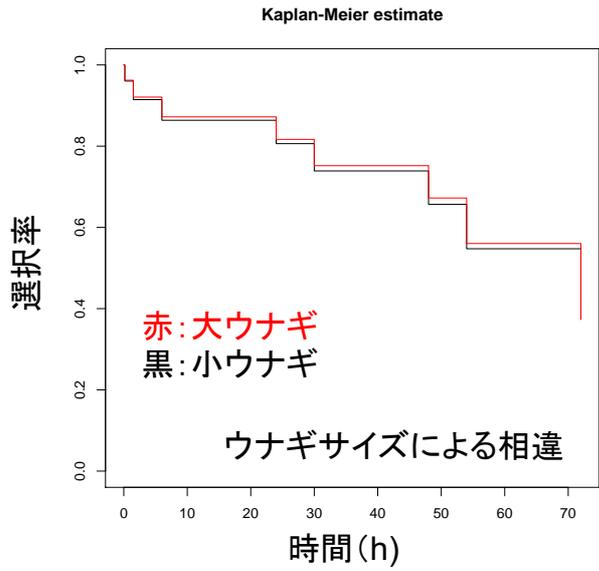


図1. ウナギのサイズの大小による筒の長さの選択性の推定
 選択率の値が0に近い程、その筒を選択する傾向を示す

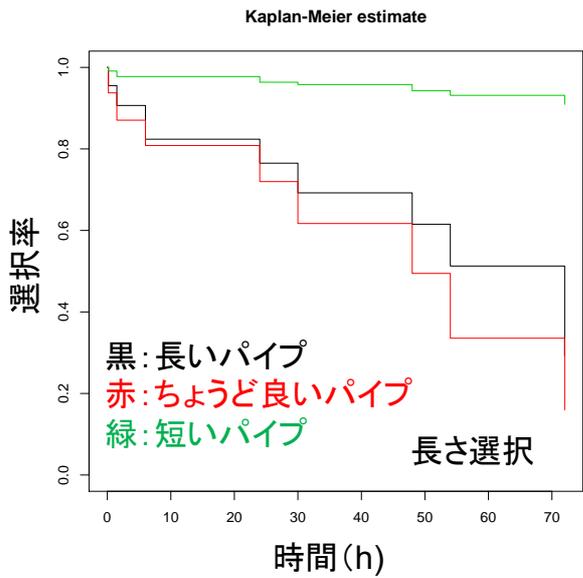


図2. 全長に対する筒の長さの選択性の推定
 選択率の値が0に近い程、その筒を選択する傾向を示す

```
coxph(formula = Surv(time, status) ~ pipe_type + eel_size, data = dat1)
```

n= 1008, number of events= 326
(10 observations deleted due to missingness)

| | coef | exp(coef) | se(coef) | z | Pr(> z) |
|---------------------|---------|-----------|----------|-------|--------------|
| pipe_typefit_length | 2.23069 | 9.30633 | 0.27275 | 8.179 | 2.87e-16 *** |
| pipe_typelong | 2.59460 | 13.39130 | 0.26880 | 9.653 | < 2e-16 *** |
| pipe_typeshort | NA | NA | 0.00000 | NA | NA |
| eel_sizelarge | 0.03559 | 1.03623 | 0.11079 | 0.321 | 0.748 |
| eel_sizsmall | NA | NA | 0.00000 | NA | NA |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

図 3. Cox 回帰分析結果。ウナギは短い筒に対し、全長と同じか少し長い筒を 2.23 倍有意に選択しやすく、全長よりより長い筒を 2.59 倍有意に選択しやすい。

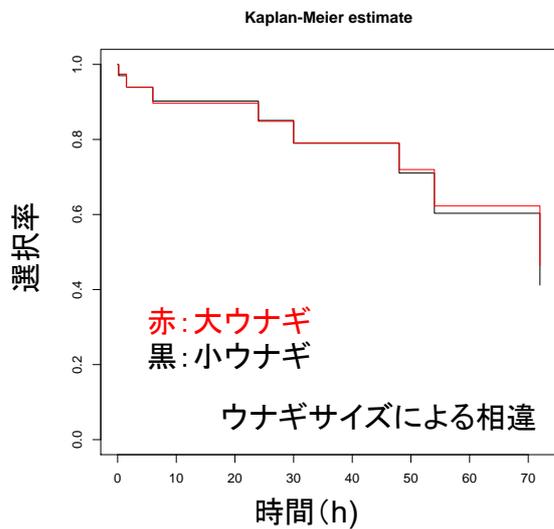


図 4. ウナギのサイズの大小による筒の太さの選択性の推定
選択率の値が 0 に近い程、その筒を選択する傾向を示す

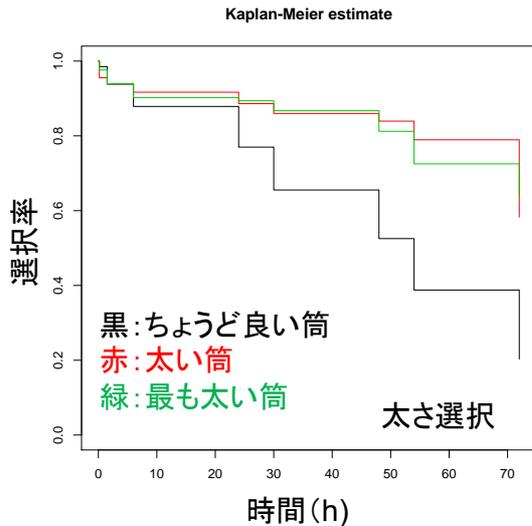


図5. 全長に対する筒の太さの選択性の推定
 選択率の値が0に近い程、その筒を選択する傾向を示す

```
coxph(formula = Surv(time, status) ~ pipe_type + eel_size, data = dat2)
```

n= 1008, number of events= 268

| | coef | exp(coef) | se(coef) | z | Pr(> z) |
|------------------|----------|-----------|----------|--------|--------------|
| pipe_typelooser | -1.04974 | 0.35003 | 0.15524 | -6.762 | 1.36e-11 *** |
| pipe_typeloosest | -1.03836 | 0.35403 | 0.15431 | -6.729 | 1.71e-11 *** |
| eel_sizessmall | -0.06051 | 0.94128 | 0.12223 | -0.495 | 0.621 |

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

図6. Cox 回帰分析結果。ウナギは体高より太い筒や最も太い筒を有意に選択しにくい。

課題と対応策：

本年度予定していた実験はすべて順調に実施された。しかし、画像解析では、小ウナギが複数入っているか、大ウナギ1尾なのかといった判別が確実に行えない。そのため時間経過や大小のサイズ間の干渉を検定出来なかった。NFC 対応の PIT タグが海外で市販されており、NFC 回路を組み込んだ実験装置を作ることで、こうした実験をより精緻に行えると考えられた。

なお、本課題は本年度で終了とする。

| | | | |
|------|---------------------------------|--------|-------|
| 課題番号 | 2.-(3) | 事業実施期間 | 令和2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2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。試験の結果、同河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%だった。昨年度に別河川で行った試験の結果(約 27~34%)と比較すると、採捕効率は 20%程度低い結果となった。今回の結果を踏まえると、水温や河床環境がある程度同じ条件であっても、河川により採捕効率に一定の差が生じる可能性があることから、小規模河川での平均的な採捕効率を推定することができるよう、引き続き試験を重ねて知見を集積する必要がある。
2. 金属製構造物(ステンレス製金網)の有無が電気ショッカーの採捕効率に与える影響を調べた。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、両者に有意差は認められなかった(Fisher 正確検定, $p>0.05$)。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. 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。

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 100 mm毎に 3 グループに分けて試験したところ、3 グループ間で採捕効率に有意差は認められなかった(ANOVA, $p > 0.05$)。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。

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。また、電気ショッカーの設定について、室内水槽において作動試験を実施し、水質と設定値に係るデータを収集・分析する。

結果

1. 自然河川におけるニホンウナギ採捕効率試験

山口市四十八瀬川の河床が礫及び石底の区間(流程約220m、図1。)において、電気ショッカーによるニホンウナギの採捕効率試験を実施した。試験は2020年10月5日～2019年10月8日に実施した。試験には県内の小規模河川において、2020年9月に電気ショッカーで採捕したニホンウナギ(平均全長 42.3 ± 6.1 cm(\pm S.D.))50個体を使用した。試験に使用したニホンウナギには、試験開始日から1週間以上前に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(13:00)の水温は 18.3°C ～ 18.5°C 、電気伝導率は $49.8 \mu\text{S/cm}$ ～ $59.6 \mu\text{S/cm}$ 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(ϕ 28cm)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、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日目の採捕効率は約11%だった。このことから、同河川で電気ショッカーにより採捕される個体数は、実際の個体数の1割程度と推定された。昨年度、別の小規模河川で行った同様の試験の結果(約27～34%)と比較すると、20%程度採捕効率が低い結果となった。試験区内の河川環境の違いが結果の差に結び付いたと推測されるため、小規模河川での平均的な採捕効率を推定することができるよう、引き続き試験を重ねて知見を集積していく必要があると考えられた。また、今回の結果を用いて、一般的な個体数推定手法として用いられてきたJolly-Seber法を河川のウナギに適用した場合の精度を調べたところ、2日目で1.5尾、3日目で0尾となり、著しく過小評価された。ただ、これは推定手法の問題というよりも、推定に使用する変数である再採捕個体数が1尾のみと、今回の試験では少なかったことが大きく影響したものと考えられた。

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、金属製構造物が電気ショッカーの採捕効率に与える影響について調べた。試験は2020年12月10日～同月18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。試験する金属製構造物は、石倉等で一般的に利用されているステンレス製金網(300cm×90cm)を使用し、人工カバーの上に設置した。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 16.0~18.2℃、電気電導度は 101~110 μ 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。電気ショッカーの電圧設定は 500V とし、Duty Cycle 20、Frequency 30 で固定し、アノードリングはステンレス製(ϕ 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。採捕効率は金網ありの試験区で 12.5~35.0%、金網なしの試験区で 27.5~40.0%であり、試験区間で有意差はみられなかった(Fisher の正確確率検定, $p>0.05$)。一方、両試験区の平均採捕効率は 10%程度の差が生じており、金網ありの試験区の方が採捕効率は低くなる傾向がみられた。

3. 電気ショッカー作動試験

ウナギの生息する河川の中には、カルスト台地や温泉、鉱泉から流入する物質により、硬度が高くなっているところがあり、そうした場所では設定次第で電気ショッカーが作動しない場合がある。そこで、硬度の高い環境下でも作動する電気ショッカーの設定(電圧、Duty Cycle、Frequency)を調べた。試験は山口県水産研究センター内海研究部建屋内にある 2 トン水槽を使用し、水槽中央の深さが 40cm となるよう水道水を注水するとともに、硬度が高い河川に溶けている代表物質である硫酸マグネシウムを添加し、電気電導度(25℃補償)が 1,114 μ S/cm となるよう調整した。水温及び電気電導度の計測にはマルチ電気電導度計(YSI 社製 PRO30)を用いた。電気ショッカーのアノード・カソード間の距離は 2m となるよう両極を水槽に固定し、アノードはステンレス製(ϕ 28cm)を使用した。電気ショッカーの作動は 3 秒以上連続して通電できた場合を作動可、そうでない場合を作動不可と判断した。試験は 2021 年 1 月 28 日から同年 2 月 17 日までの期間に実施した。

(1)電圧別の作動試験

水温 20℃の条件下で電圧 300V、500V 及び 700V に設定した電気ショッカーが作動する Duty Cycle、Frequency の組合せを調べた。試験を行う前にエアポンプで水を攪拌しながら 1kW チタンヒーター 2 個により水温 20℃まで加温した。試験で通電する際はエアポンプ及び 1kW チタンヒーターを撤去した。

試験の結果を表 3 に示した。電圧が高くなるにしたがい、作動可能となる Duty Cycle 及び Frequency の設定の自由度が下がる傾向がみられた。また、Duty Cycle の設定値は低いほど、Frequency の設定値は高いほど作動しやすい傾向がみられた。また、H31 年度試験で行った電気電導度 $1,106 \mu S/cm$ (25℃補償)の塩化ナトリウム水溶液での試験と比較すると、作動可能な Duty Cycle と Frequency の組合せはほぼ同じであった。

(2)水温別の作動試験

水温 15℃、20℃、25℃の条件下で電気ショッカーが作動する Duty Cycle、Frequency の組合せを調べた。試験を行う前にエアポンプで水を攪拌しながら 1kW チタンヒーター 2 個により水温 20℃まで加温した。試験で通電する際はエアポンプ及び 1kW チタンヒーターを撤去した。

試験の結果を表 4 に示した。水温が高くなるにしたがい、作動可能となる Duty Cycle 及び Frequency の設定の自由度が下がる傾向が見られた。また、(1)水温別の作動試験と同様、Duty Cycle の設定値は低いほど、Frequency の設定値は高いほど作動しやすい傾向がみられた。H31 年度試験と比較すると、(1)と同様に、作動可能な Duty Cycle と Frequency の組合せはほぼ同じであった。

(3)硬水中での設定別麻痺時間について

試験(1)(2)で使用した水槽の水位を 25cm まで落とした後、アノード・カソード間の中心に直径 90cm のアクリル製円盤を敷き、更にその上に縦 39cm×横 55cm×高さ 28cm のポリプロピレン製メッシュ籠の底面を切り落として作成した仕切りを設置した(図 3)。そのうえで、仕切りの中にウナギを 1 匹ずつ入れて 5 秒間通電し、通電終了後、仕切りを外してアクリル製円盤の外にウナギの全身が出るまでの時間を計測して、電気ショッカーの設定が麻痺時間に与える影響を調べた。電気ショッカーの設定は電圧を 300V とし、①Duty Cycle10・Frequency50、②Duty Cycle10・Frequency100、③Duty Cycle20・Frequency100 の 3 つの組合せとした。試験(1)(2)と同様、試験を行う前にエアポンプで水を攪拌しながら 1kW チタンヒーター 2 個により水温 15℃まで加温した。試験で通電する際はエアポンプ及び 1kW チタンヒーターを撤去した。ニホンウナギは「2. 試験池を使用したニホンウナギ捕獲効率試験」の金網あり試験区で使用した個体から 39 尾を選別し、平均全長になるべく差が生じないように 3 グループに分けて使用した。

試験結果を図 4 に示した。平均麻痺時間は①16.5 秒、②26.0 秒、③32.5 秒となり、Duty Cycle・Frequency とともに設定値を高くするほど麻痺時間が長くなる傾向がみられた。平成 31 年度試験で行った簡易実験と比べると全体的に麻痺時間が大きく伸びているが、これは通電時間を長くしたこと(3 秒→5 秒)、試験に使用した環境水の電気電導度がウナギの魚体の電気電導度に近づき、結果として水中でなく魚体に多く電流が流れたこと等が影響していると考えられる。

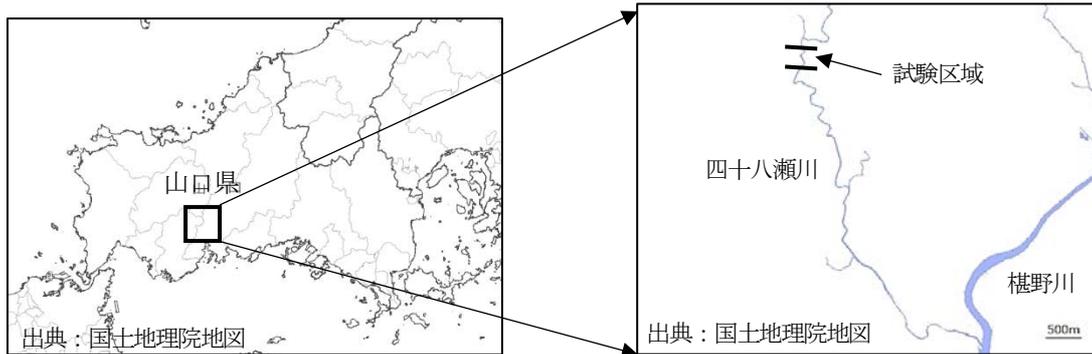


図1. 試験区域

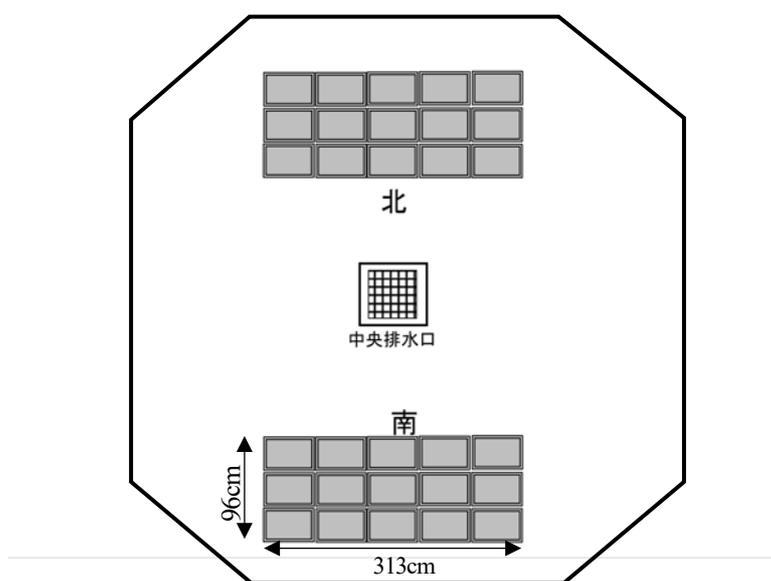


図2. カバー配置

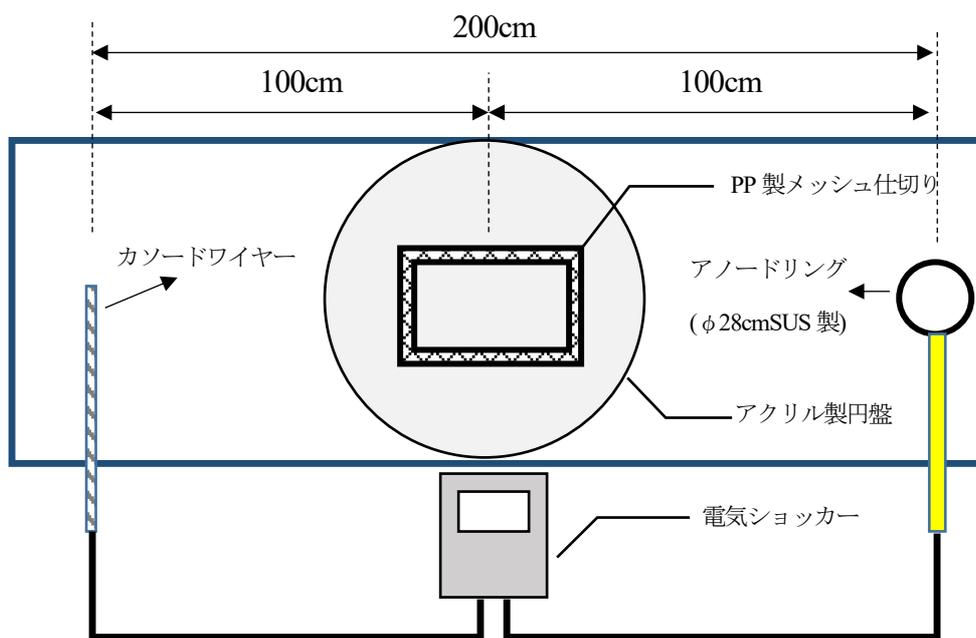


図3. 試験水槽の配置

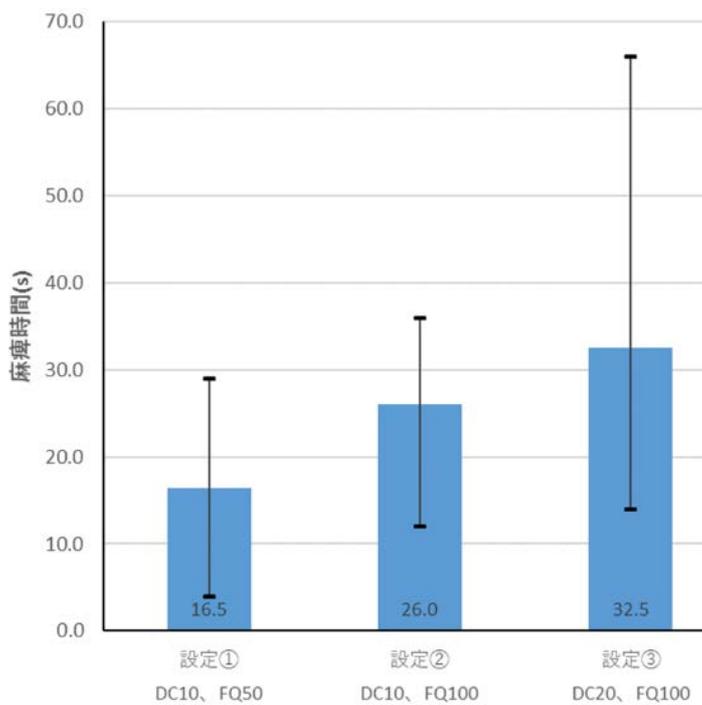


図4. 硬水中における設定別のウナギ麻痺時間

表1. 白須川における試験結果

| | 2020年10月5日～2020年10月8日 | | | |
|------------|-----------------------|------|-----|-----|
| | 0日目 | 1日目 | 2日目 | 3日目 |
| 採捕個体数(尾) | - | 5 | 2 | 3 |
| 流入個体数(尾) | - | 0 | 0 | 0 |
| 流出個体数(尾) | - | 6 | 0 | 0 |
| 区間内の個体数(尾) | 50 | 44 | 44 | 44 |
| 採捕率(%) | - | 11.4 | 4.5 | 6.8 |

表2. 金属製構造物の影響試験結果

| | | 1日目 | 2日目 | 3日目 |
|------|---------|------|------|------|
| 金網あり | 採捕尾数(尾) | 10 | 14 | 5 |
| | 採捕効率(%) | 25.0 | 35.0 | 12.5 |
| 金網なし | 採捕尾数(尾) | 16 | 11 | 16 |
| | 採捕効率(%) | 40.0 | 27.5 | 40.0 |

表3. 電圧別の電気ショッカー作動試験結果

| | | FQ | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| DC | 5 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 10 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 15 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 20 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 25 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 30 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 35 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 40 | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 45 | | | | | | | | | | | | |
| | 50 | | | | | | | | | | | | |
| | 60 | | | | | | | | | | | | |
| | 70 | | | | | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | |

□ いずれの電圧でも作動不可

● 300Vのみ作動

■ 300V、500Vで作動

■ 300V、500V、700Vのいずれの条件でも作動

表 4. 水温別の電気ショッカー作動試験結果

| | | FQ | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| DC | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | | | | |
| | 15 | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | | | | | | | | | | | | |
| | 30 | | | | | | | | | | | | |
| | 35 | | | | | | | | | | | | |
| | 40 | | | | | | | | | | | | |
| | 45 | | | | | | | | | | | | |
| | 50 | | | | | | | | | | | | |
| | 60 | | | | | | | | | | | | |
| | 70 | | | | | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | |

□ いずれの水温でも作動不可

◻ 15℃のみ作動

◻ 15℃、20℃で作動

◻ 15℃、20℃、25℃のいずれの水温でも作動

課題と対応策

今後の課題として、自然河川における採捕効率試験については、淡水域でのより正確な採捕効率の求め方を検証するため、河床、水温等の条件を変えながら、さらに多くの検証試験を重ねてデータを蓄積する必要がある。

養殖池を使用した採捕効率試験については、Duty Cycle と Frequency の設定による採捕効率・斃死率の違いについて検討する必要がある。