

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課題番号	ア	事業実施期間	令和5年度
課題名	産卵場に向かうニホンウナギの由来判別		
担当者	白井厚太郎, 板倉 光 (東京大学大気海洋研究所), 矢田 崇, 福田野歩人, 横内一樹 (水産研究・教育機構)		

令和5年度の成果の要約：産卵場に向かうニホンウナギが天然加入又は放流由来かを判別するため、本事業によりこれまでに実施された計334個体のニホンウナギについて、耳石酸素炭素安定同位体分析による放流判別分析結果をとりまとめ、放流由来のニホンウナギの産卵回遊への参加状況および、確認された計9個体の放流に由来する産卵回遊開始個体（ステージ：Y2~S2）の生物学的特性について明らかにした。天然加入個体と放流由来個体の生物学的特性の比較から、放流由来の産卵回遊開始個体の性別はすべて雌で、外部形態・成熟状態は銀ウナギとして天然と遜色なく、放流由来の個体が銀化・成熟を開始していることを明らかとした。また、経験環境履歴を推定する手法の高度化のため、耳石 Sr/Ca、耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ に加えて、眼球の炭素窒素安定同位体比を用いた放流判別法について検討した。

背景：近年、ニホンウナギの稚魚（シラスウナギ）の採捕量は低水準にあり、平成26年6月には国際自然保護連合（IUCN）のレッドリストに絶滅危惧IB類として掲載されるなど、ニホンウナギの資源の増大が急務となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。しかしながら、ニホンウナギの生態には不明な点が多く、放流したニホンウナギがどの程度生き残っているのか、産卵に参加しているのかといった知見はほとんどない状況である。そのため、ニホンウナギの生態について得られた知見を順次取り入れていき、ウナギの資源管理を推進していく必要がある。

耳石安定同位体比を利用した放流ウナギと天然ウナギの判別法が中央大学、東京大学、水産研究・教育機構などにより開発された (Kaifu et al. 2018; Itakura et al. 2018)。耳石には酸素と炭素などが含まれており、酸素や炭素にはわずかに重さの異なる安定同位体が存在する。この手法により、放流個体と天然個体の経験環境の差異によって、これら安定同位体比の異なることを利用し、放流/天然の判別が可能となった。

課題実施計画

(1) 全体計画

目的：産卵場に向かうニホンウナギが天然加入個体又は放流個体であるかを判別し、放流個体が産卵回遊に参加しているかを調査する。また産卵場に向かう個体の経験環境履歴を推定する手法を検討する。

方法：課題イ)「産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握」において採集されたニホンウナギについて、天然加入個体又は放流個体であるかの判別を行うことにより、放流したニホンウナギの産卵回遊状況の把握を進める。産卵回遊に参加している放流個体の生物学的特性について検討する。

期待される成果：放流したニホンウナギの産卵回遊状況とその生物学的特性が明らかとなる。

(2) 令和5年度の計画

目的：産卵場に向かうニホンウナギが天然加入個体又は放流個体であるかを判別し、放流個体が産卵に参加しているかを調査する。また産卵場に向かう個体の経験環境履歴を推定する手法を検討する。

方法：課題イ)「産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握」において採集されたニホンウナギ標本を用いた天然加入／放流の判別のため、安定同位体比分析試料の作成および分析を進める。あわせて、産卵回遊に参加している放流個体が確認された場合、その生物学的特性について、課題イ)「産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握」の天然個体のものと比較する。耳石分析等を行い、判別個体の経験環境履歴を推定する手法を検討する。

放流判別は、以下の方法によって行った：ニホンウナギの耳石を研磨し薄片切片を作成する。切片のうち、沿岸来遊以前に形成された耳石の中心部位を除去する。放流個体については、耳石の沿岸来遊後の形成部位として、内側から順に、養殖場で形成された部位、放流後に自然環境下で形成された部位が存在することになる。このため、沿岸来遊後に相当する耳石部位をマイクロドリルで削り出し、酸素炭素安定同位体比分析を行うことで、放流個体の耳石酸素炭素安定同位体比は、養殖場の環境を反映したものとなり、天然個体であれば、自然環境を反映したものとなる。得られた酸素炭素安定同位体比は、ランダムフォレストを用いた判別モデル (Kaifu et al. 2018; Itakura et al. 2018) により、判別確率により個体毎に放流／天然／判別不可能として判別した。

結果：産卵場に向かうニホンウナギが、天然加入個体又は放流個体であるかを判別するため、採集されたニホンウナギ標本を用いた耳石試料の作成および酸素炭素安定同位体分析を実施した。本事業期間を通じて、これまでに計 334 個体のデータを得て、ランダムフォレストによる天然／放流判別分析 (教師データ：Itakura et al. 2018) を行った (図 1)。その結果、本事業よって始めて、調査対象水域において採集された放流由来の産卵回遊開始個体 (ステージ Y2~S2、判別確率 90%以上) 計 9 個体を確認することができた (図 2、表 1)。

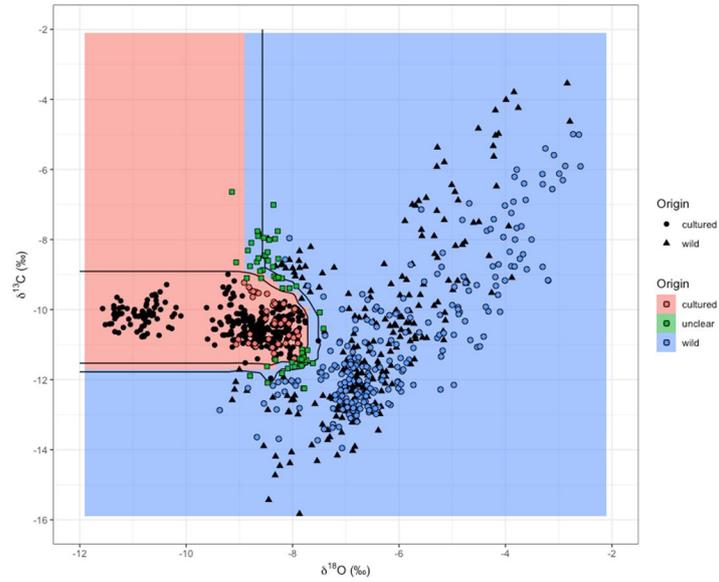


図1. ニホンウナギ耳石酸素・炭素同位体比 (n=334). 教師データ: (●) 養殖, (▲) 天然; 分析データ: (●) 天然, (■) 判別確率<90%, (○) 放流由来. (—) 判別確率 70%. 赤のエリアは放流の判別確率>50%, 青は天然の判別確率>50%.

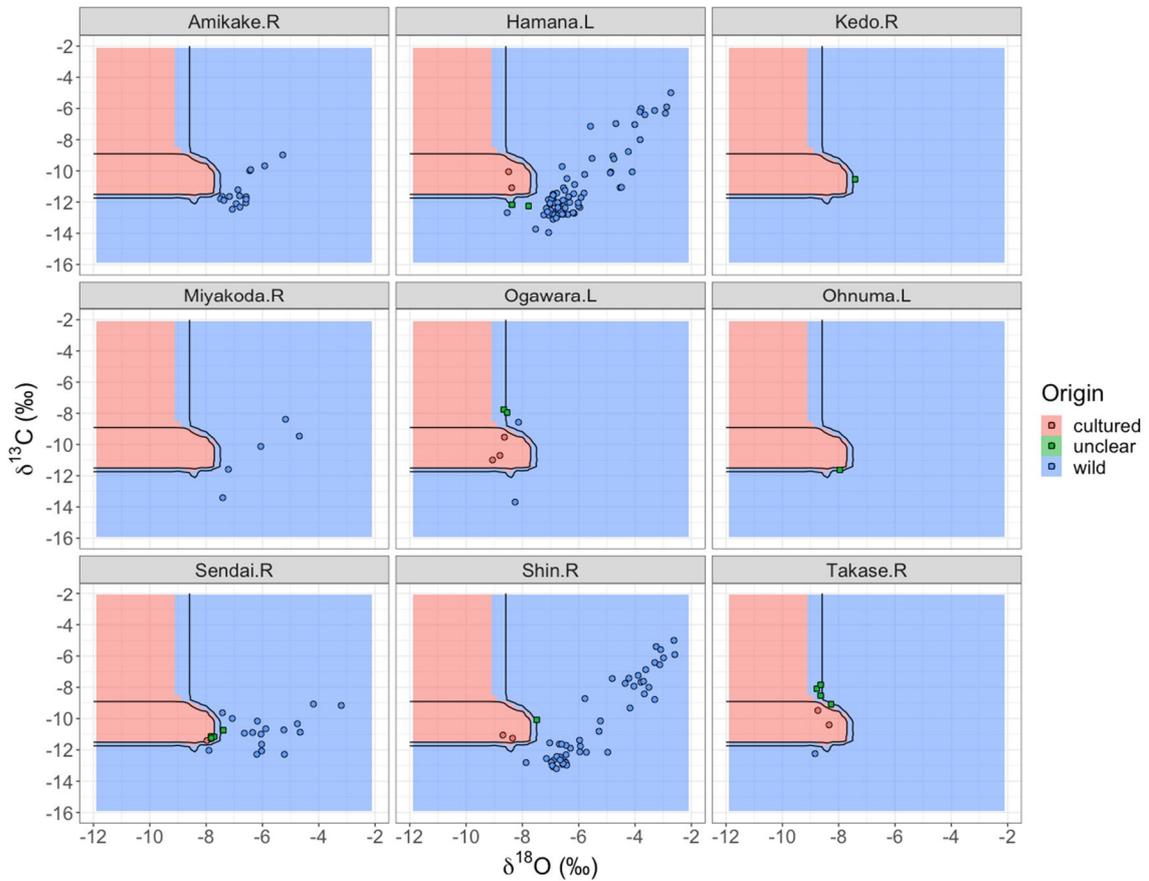


図2. 地点ごとの産卵回遊開始個体 (stage:Y2~S2) の判別結果. 表記は図1と同様.

産卵回遊開始個体（ステージ Y2~S2）について水域ごとにみると、青森県では、高瀬川・小川原湖で採集された個体のうち、5 個体が放流由来、6 個体が判別不可、3 個体が天然加入と判別され、大沼では、1 個体が放流と判別された（図 2、表 1）。静岡県では、浜名湖本湖（鷺津）で採集された回遊個体のうち 2 個体が放流由来、2 個体が判別不可となった（図 2、表 1）。浜名湖・新川（雄踏）では、採集された回遊個体のうち 2 個体が放流由来、1 個体が判別不可となった（図 2、表 1）。鹿児島県では、網掛川では過去の事業により採集された銀ウナギ 16 個体から放流個体は出現せず、花渡川では、1 個体が放流と判別された（図 2、表 1）。

表 1. 本事業により採集されたニホンウナギ産卵回遊個体（ステージ Y2~S2）の放流・天然判別結果.

県	採集地	採集年	採集月	ID	個体数	ステージ	全長 (mm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	判別確率	判別結果	
青森県	高瀬川	2020	11月	A Nov 1	-	S2	692	-9.48	-8.74	94.2%	放流	
			11月	A Nov 2	-	S2	725	-10.40	-8.34	99.6%	放流	
			10月	A Oct 1	-	S2	689	-8.78	-8.09	60.6%	判別不可	
			10月	A Oct 2	-	S2	875	-8.64	-7.84	68.2%	判別不可	
			11月	A Nov 3	-	S2	770	-8.53	-8.64	67.4%	判別不可	
			11月	A Nov 4	-	S2	745	-8.84	-12.24	94.4%	天然	
	2021	10月	756	-	S2	716	-8.27	-9.08	63.8%	判別不可		
	小川原湖	2021	9月	725	-	S1	760	-9.06	-10.99	99.0%	放流	
			9月	727	-	S1	808	-8.64	-9.53	96.2%	放流	
			10月	749	-	S2	864	-8.80	-10.70	100%	放流	
			8月	723	-	Y2	824	-8.66	-7.76	68.0%	判別不可	
			9月	726	-	S1	665	-8.54	-7.95	73.4%	判別不可	
			9月	724	-	S1	805	-8.14	-8.57	95.0%	天然	
			10月	755	-	S2	945	-8.26	-13.69	97.6%	天然	
2017			8月	AO525	-	Y2	541.0	-7.96	-11.63	64.2%	判別不可	
静岡県	雄踏・新川	2020	10月	Y Oct 1	-	S2	565	-8.69	-11.05	99.4%	放流	
			10月	Y Oct 4	-	S1	545	-8.35	-11.25	99.6%	放流	
			10月	-	9	Y2~S2	574.2	-5.80	-11.35	100%	天然	
			11月	-	27	Y2~S2	609.9	-4.82	-9.21	99.7%	天然	
	鷺津	2021	11月	21-32ot	-	S2	560	-7.49	-10.08	71.0%	判別不可	
			11月	-	9	Y2~S2	575	-6.35	-12.23	99.8%	天然	
			12月	-	3	S1~S2	716.7	-5.04	-8.90	100%	天然	
			2020	12月	W Dec 9	-	S2	725	-8.49	-10.05	100%	放流
				12月	W Dec 2	-	S2	660	-8.37	-12.17	88.2%	判別不可
				8月	-	15	Y2~S1	556.5	-5.05	-9.51	99.8%	天然
				10月	-	20	Y2~S2	620.9	-6.46	-11.47	99.9%	天然
			2021	12月	-	18	S1~S2	661.4	-5.92	-10.89	99.6%	天然
	11月	21-28ot		-	S2	771	-8.38	-11.08	98.6%	放流		
	11月	21-22ot		-	S1	773	-7.78	-12.25	84.8%	判別不可		
10月	-	3		Y2~S1	471.7	-6.02	-12.23	99.9%	天然			
11月	-	15		Y2~S2	620.1	-6.71	-12.30	98.9%	天然			
12月	-	5		S1~S2	701.4	-5.76	-10.55	99.6%	天然			
鹿児島県	網掛川	2013	10~12月	-	16	S1	564.0	-6.74	-11.30	99.4%	天然	
			川内川	2013	6月	KG107	-	Y2	477.0	-7.97	-11.40	92.4%
	川内川	2013	6月	-	4	Y2	478.0	-7.69	-11.07	57.6%	判別不可	
			6月	-	17	Y2	473.0	-5.83	-10.80	98.8%	天然	
	花渡川	2020	12月	K Dec 1	-	S1	487	-7.42	-10.54	86.8%	判別不可	

注：静岡県・鹿児島県の天然個体および川内川の判別不可は平均値

産卵回遊に参加している放流個体の生物学的特性について同時期・同地域の天然個体のものと比較した結果、放流由来の産卵回遊個体の性別はすべて雌で、外部形態*は銀ウナギとして通常どおり発達しており、生殖腺体指数（GSI）から、成熟が順調に開始されていることが明らかとなった（図3）。

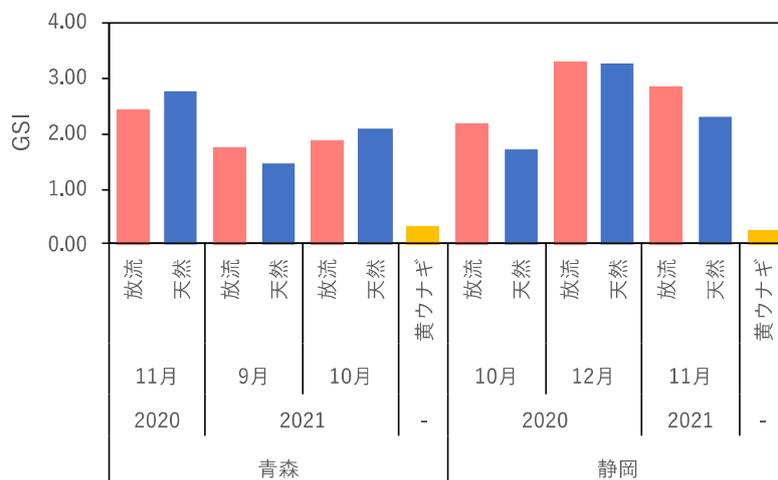


図3. 本事業により採集された放流由来と天然加入の産卵回遊開始個体および成長期の黄ウナギ個体の生殖腺体指数（GSI）の比較。

成長期の黄ウナギ（ステージ Y1）については、本事業により採集された個体の耳石酸素炭素安定同位体比による放流／天然判別を行った（図4、表2）。その結果、青森県では小川原湖で採集された個体のうち、6個体が放流由来、15個体が判別不可、4個体が天然加入と判別された。六ヶ所村沿岸で採集された1個体の黄ウナギは天然と判別された。静岡県では、浜名湖で採集された9個体の黄ウナギから放流個体は出現しなかった。

過去の事業により全国各地で採集された133個体のうち、放流由来の黄ウナギを計27個体確認することができた（図4、表2）。水域ごとにみると、青森県では小川原湖で採集された33個体のうち17個体が放流、判別不可が15個体、天然が1個体となった。大沼では、採集された4個体のうち、1個体が放流、3個体が天然と判別された。静岡県では、都田川で採集された35個体から放流は出現しなかった。愛媛県の肱川で採集された33個体のうち5個体が放流、16個体が判別不可、12個体が天然と判別された。鹿児島県では、川内川で採集された3個体から放流は出現しなかった。

*銀化の進行に伴い、胸びれ (FI: Fin Index); 眼 (EI: Eye Index); 肝臓 (HSI: Hepato-Somatic Index); 生殖腺 (GSI: Gonado-Somatic Index)の指標は増加し、消化管 (GI: Gut Index)は減少することが知られている。

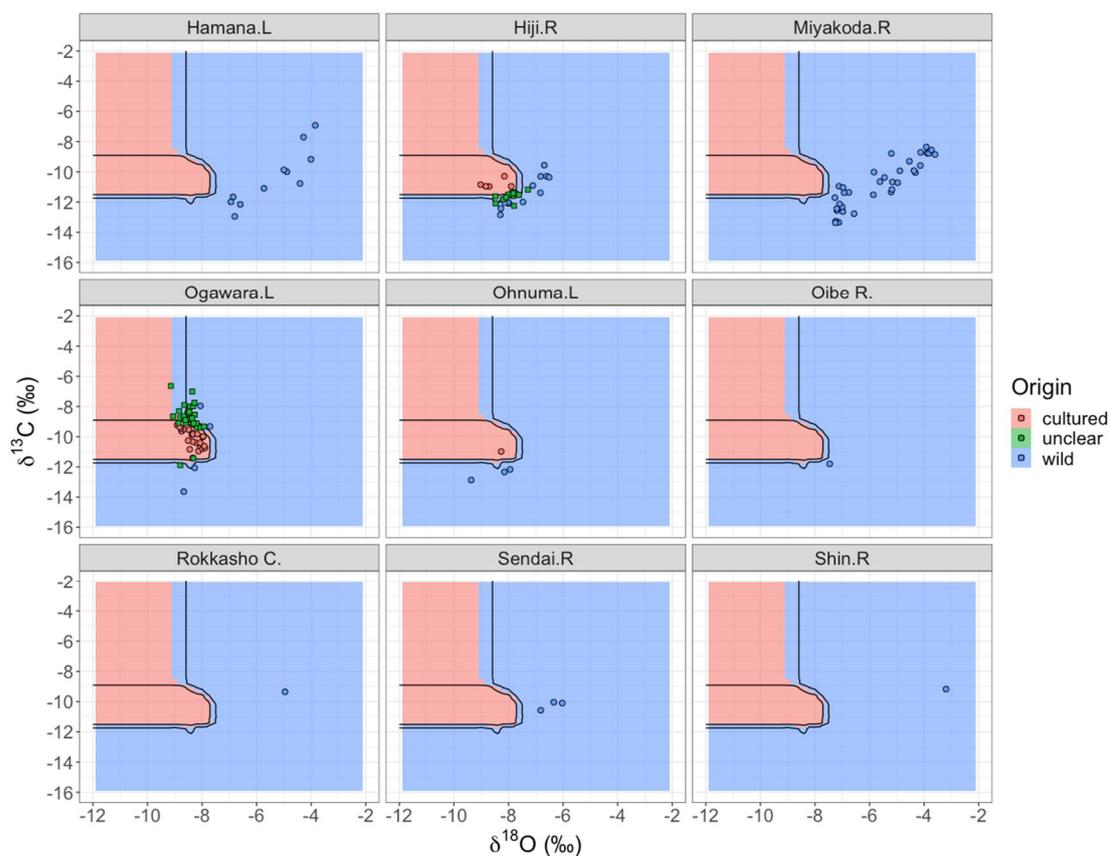


図4. 地点ごとの成長期の黄ウナギ (stage:Y1) の判別結果. 表記は図1と同様.

表2. 成長期のニホンウナギ (ステージY1) の放流・天然判別結果.

県	採集地	採集年	採集月	ID	個体数	ステージ	全長 (mm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	判別確率	判別結果
青森県	小川原湖	2021	10月	736	-	Y1	518	-8.34	-11.41	90.8%	放流
				738	-	Y1	454	-7.96	-9.98	99.0%	放流
				743	-	Y1	426	-8.51	-10.26	100.0%	放流
				744	-	Y1	369	-8.17	-9.83	99.0%	放流
				751	-	Y1	466	-8.07	-10.40	98.8%	放流
				753	-	Y1	382	-8.82	-9.36	98.8%	放流
				-	15	Y1	483.6	-8.47	-8.72	71.1%	判別不可
		-	4	Y1	512.5	-8.18	-10.75	95.9%	天然		
		2018	6~7月	-	17	Y1	486.6	-8.33	-10.14	97.6%	放流
			6~7月	-	15	Y1	547.5	-8.56	-8.71	56.7%	判別不可
6~7月	AO517		-	Y1	745.0	-8.84	-12.24	94.4%	天然		
大沼	2017	8月	AO526	-	Y1	540.0	-8.27	-10.98	99.6%	放流	
		8月	-	3	Y1	514.7	-8.49	-12.46	95.8%	天然	
老部川	2016	6月	AO-OI1	-	Y1	702.0	-7.46	-11.80	99.8%	天然	
	2021	10月	750	-	Y1	167	-4.96	-9.35	99.4%	天然	
静岡県	鷺津・雄踏	2020	8~10月	-	3	Y1	530.7	-5.24	-11.07	99.7%	天然
	鷺津	2021	10~11月	-	9	Y1	480.9	-5.20	-10.03	99.8%	天然
	都田川	2017	6月	-	35	Y1	360.9	-5.71	-10.85	99.5%	天然
愛媛県	肱川	2016	7月	-	5	Y1	391.6	-8.52	-10.81	99.7%	放流
				-	16	Y1	325.6	-7.91	-11.59	62.4%	判別不可
				-	12	Y1	336.6	-7.40	-11.35	98.0%	天然
鹿児島県	川内川	2013	6月	-	3	Y1	460.3	-6.40	-10.24	99.5%	天然

注: 個体IDの記載のない行は平均値.

通し回遊魚の回遊履歴推定に代表的な指標として、耳石 Sr/Ca (河川-海洋往来履歴の指標) と Sr 安定同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) がある。そこで酸素炭素同位体比による天然/放流判別済み 62 個体について、生息域履歴推定のため耳石 Sr/Ca 比分析を行ったところ、天然個体(n=60)では河口・内湾域利用個体が 63%と優占したが、浜名湖の雄踏・新川で採集された放流由来の産卵回遊個体 (n=2) はともに、耳石中の Sr/Ca 比が来遊 (核から約 150 μm) ~採集時 (縁辺) まで低値で推移したことから、黄ウナギ期を通じて河川淡水域を成育場として利用していたことが示唆された (図 5)。

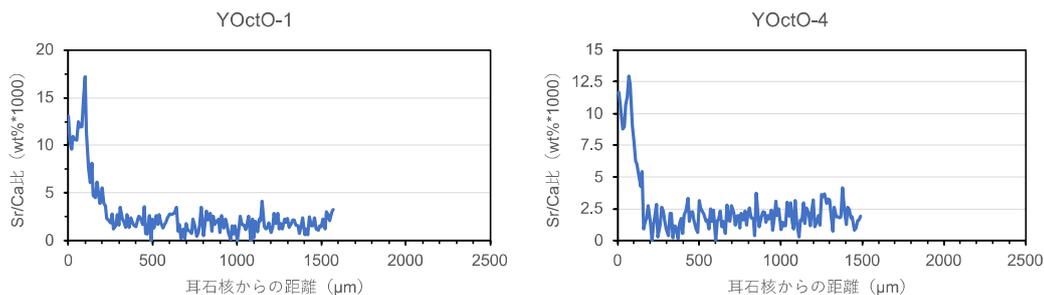


図 5. 耳石酸素・炭素同位体比による放流由来と判別された産卵回遊個体の耳石 Sr/Ca 比プロファイル.

河川水の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は、地域毎に値が変化し (Bentley 2006)、耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と平衡関係にあり (Kennedy et al. 1997)、移動・回遊の指標となる。そこで耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の指標としての利用可能性について、耳石 Sr/Ca と耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の対応から検討した (図 6)。耳石 Sr/Ca 比 < 2.5 となる淡水域定着個体の耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は、個体ごとに大きく異なる値をとり、流域の地質の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ に由来する値の差異を反映したものと推察された (図 6)。また、耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ プロファイル (図 7) を指標として用いることにより、黄ウナギ期初期に該当する耳石領域の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が大きく変化した場合には、水系外から放流種苗として導入された個体である可能性が高いと考えられることが示唆された。

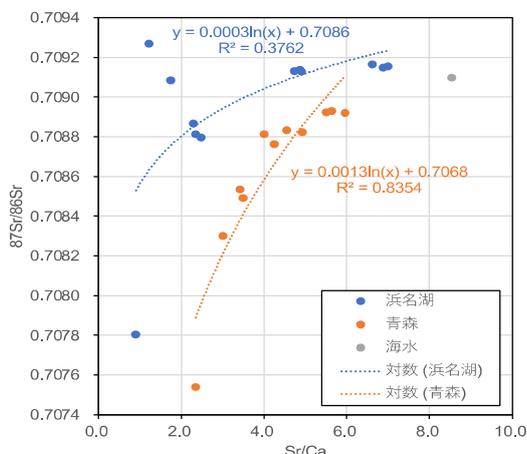


図 6. ニホンウナギの耳石 Sr/Ca と耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の関係。 (●) 浜名湖, (●) 小川原湖, (●) 海水.

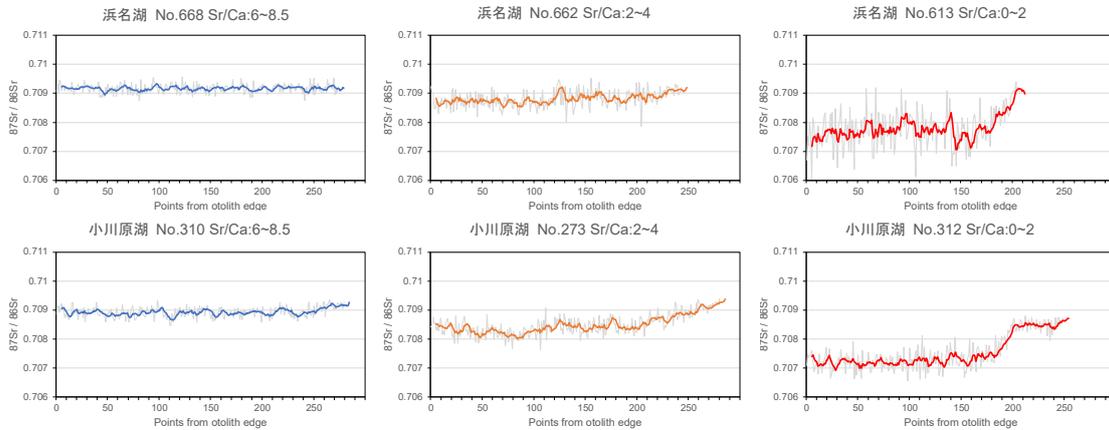


図 7. ニホンウナギ産卵回遊開始個体の耳石 Sr/Ca 比クラス毎の耳石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比のプロファイル（代表例）。太線：6点移動平均値、グレー：実測値。

眼球の水晶体は、タンパク質のクリスタリンを主成分とし（Wistow & Piatigorsky 1988）、一度形成された水晶体の組織は代謝で入れ替わることがなく、体成長にしたがい成長し層状の構造を形成する（Nicol 1989）。したがって、水晶体の中心部から外側に向かって生態履歴の指標となる微量元素・安定同位体を分析することで、過去から直近までの連続的な情報の復元が可能となる（Wallace et al. 2014）。近年、魚類の水晶体微量元素・安定同位体比分析により、魚類の生活史を通じた地理的・食物網的履歴に関する知見の集積が急速に進んでいる（e.g. Tzadik et al. 2017; Bell-Tilcock et al. 2021）。現状、ウナギの放流判別法は耳石の情報のみを利用しているが、水晶体は耳石からは得られない相補的な情報（例えば、窒素安定同位体比の時系列情報等）を含むと考えられる。そのため今回、放流判別法の高度化を目的とし、水晶体の炭素窒素安定同位体比分析による放流判別法への応用可能性の検討を実施した。始めに履歴復元・時間分解能を確認する目的として、眼球が利用可能なニホンウナギ天然個体（栃木県、新潟県、静岡県）および養鰻場の養殖個体・放流用種苗（千葉県、静岡県、宮崎県、鹿児島県）の標本（ $n=101$ ）により、全長と水晶体直径の関係を検討したところ、有意な正の傾きを持つ直線回帰式が得られた（水晶体直径(mm) $\sim 0.0044 \times$ 全長(mm) $+ 0.013$, $r^2 = 0.74$, $p < 0.001$ ）。次に、天然個体（栃木県、新潟県、静岡県）および養殖個体（千葉県、静岡県）の水晶体標本（ $n=46$ ）を、天然個体については放流用種苗の想定される体サイズ（全長 300 mm）に相当する直径（1 mm）程度まで、水晶体の層を剥き乾燥重量 1 mg 程度の試料とし、養鰻場の養殖個体については全層を試料とし、炭素窒素安定同位体比分析に供した。その結果、水晶体の炭素・窒素安定同位体比は、養殖個体と天然個体で明確に異なることが確認された（図 8）。したがって、本研究により初めて、水晶体の炭素窒素安定同位体比によっても放流判別可能性のあることを明らかとすることができた。

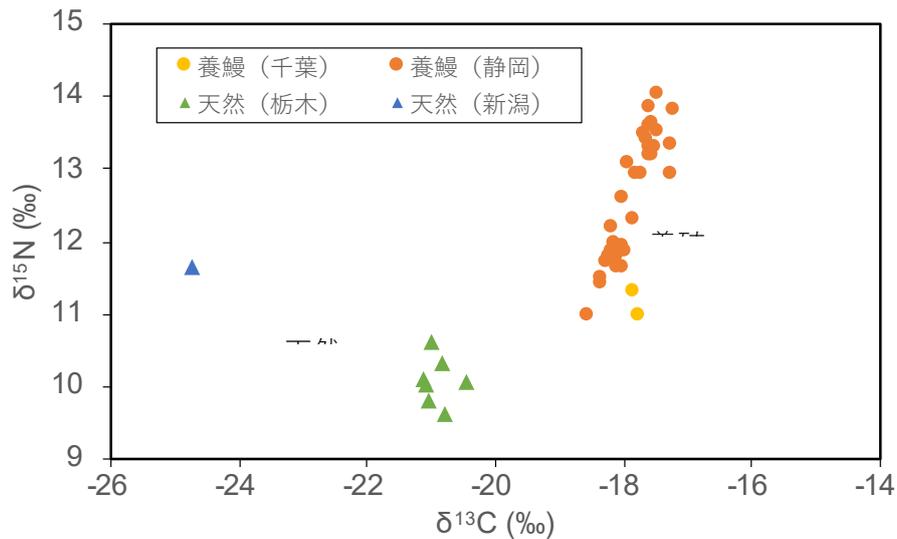


図 8. ニホンウナギの眼球水晶体における炭素窒素安定同位体比プロット。●：養鰻場の養殖個体、▲：天然個体。

課題と対応策：計画通りに順調に実施されると共に、着実な成果を得た。

年度末まで可能な限り、掘削作業・同位体分析を実施し、データの積み増しを試みる。

次年度計画：産卵場に向かうニホンウナギが天然加入個体又は放流個体であるかを判別し、産卵に参加している放流個体についての生物学的特性のより詳細な把握のために、データの蓄積を進める。また、産卵場に向かう個体の経験環境履歴を推定する手法について検討を進める。

引用文献

- Bell-Tilcock M, Jeffres CA, Rypel AL, Sommer TR, Katz JVE, Whitman G, et al. 2021. Advancing diet reconstruction in fish eye lenses. *Methods Ecol. Evol.* **12**: 449–457.
- Bentley RA. 2006. Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review. *J. Archaeol. Method. Theory* **13**: 135–187.
- Itakura H, Arai K, Kaifu K, Shirai K, Yoneta A, Miyake Y, Secor DH, Kimura S. 2018. Distribution of wild and stocked Japanese eels in the lower reaches of the Tone River catchment revealed by otolith stable-isotope ratios *J. Fish Biol.* **93**: 805–813.
- Kaifu K, Itakura H, Amano Y, Shirai K, Yokouchi K, Wakiya R, Murakami-Sugihara N, Washitani I, Yada T. 2018. Discrimination of wild and cultured Japanese eels based on otolith stable isotope ratios. *ICES J. Mar. Sci.* **75**: 719–726.
- Kennedy BP, Folt CL, Blum JD, Chamberlain CP. 1997. Natural isotope markers in salmon. *Nature* **387**: 766–767.
- McArthur JM 1994. Recent trends in strontium isotope stratigraphy. *Tera Nova* **6**: 331–358.

- Nicol JAC. 1989. *The Eyes of Fishes*. Clarendon Press; Oxford University Press, Oxford, UK.
- 白井厚太郎, 矢田 崇, 山本敏博, 横内一樹, 福田野歩人. 2022. 課題ア 産卵場に向かうニホンウナギの由来判別. 令和3年度水産庁委託「資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業」報告書.
- 白井厚太郎, 板倉 光, 矢田 崇, 福田野歩人, 横内一樹. 2023. 課題ア 産卵場に向かうニホンウナギの由来判別. 令和4年度水産庁委託「資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業」報告書.
- Tzadik OE, Curtis JS, Granneman JE, Kurth BN, Pusack TJ, Wallace AA, et al. 2017. Chemical archives in fishes beyond otoliths: a review on the use of other body parts as chronological recorders of microchemical constituents for expanding interpretations of environmental, ecological, and life-history changes. *Limnol. Oceanogr. Methods* **15**: 238–263.
- Wallace AA, Hollander DJ, Peebles EB. 2014. Stable isotopes in fish eye lenses as potential recorders of trophic and geographic history. *PLoS One* **9**: e108935. doi: 10.1371/journal.pone.0108935
- Wistow GJ, Piatigorsky J. 1988. Lens crystallins: the evolution and expression of proteins for a highly specialized tissue. *Annu. Rev. Biochem.* **57**: 479–504.

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課題番号	イ	事業実施期間	令和5年度
課題名	産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握		
担当者	遠藤 赳寛（青森県産業技術センター内水面研究所） 棟方 有宗（宮城教育大学）		

令和5年度の成果の要約：小川原湖のニホンウナギの漁獲情報及び放流尾数を調査し、湖内の資源実態把握に資する基礎情報の充実を図った。

耳石由来判別用に銀ウナギ3個体を含む12個体のニホンウナギを採集した。採集した個体はいずれもメスであった。

青森県太平洋側の大沼で採捕された黄ウナギ3個体について、過年度に標識放流された個体であることを確認し、おおよその成長速度を推定した。小川原湖に放流されたニホンウナギの成長は地理的に近い大沼と比較して著しく早いことが示唆された。

由来判別の教師データ用に小川原湖及び周辺の水域で天然ウナギ11個体を採集し、耳石を採取した。

青森県六ヶ所村泊地先の海岸（岩礁域）で観察されるクロコウナギの生息分布状況調査を実施した。クロコウナギが主に分布する水域は岩礁域の中でも岸寄りに分布する湧水付近の淡水域（塩分濃度0.05%以下）付近に局在していたが、中には塩分濃度1.5%程度の汽水域に分布する個体も見られた。また同地域では全長25cm程度の黄ウナギが1尾採捕されたことから一部のクロコウナギは複数年にわたってこうした環境で生育する可能性も考えられ、川や海とも異なる、ニホンウナギの第3の生息環境として興味深い生態系であると考えられた。

背景：近年、ニホンウナギの稚魚（シラスウナギ）の採捕量は低水準にあり、平成26年6月には国際自然保護連合（IUCN）のレッドリストに絶滅危惧IB類として掲載されるなど、ニホンウナギの資源の増大が急務となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。しかしながら、ニホンウナギの生態には不明な点が多く、放流したニホンウナギがどの程度生き残っているのか、産卵に参加しているのかといった知見はほとんどない状況である。そのため、ニホンウナギの生態について得られた知見を順次取り入れていき、ウナギの資源管理を推進していく必要がある。

課題実施計画

（1）全体計画

目的：青森県小川原湖において産卵親魚候補である銀ウナギ（下りウナギ）の実態を把握する。放流由来個体が下りウナギに含まれているか把握する。

方法：産卵場に向かうニホンウナギの由来判別（天然/放流）のためのサンプル収集及び生物特性の調査・分析を行う。

期待される成果：翌年の産卵親魚候補である下りウナギのうち、放流由来個体の割合が分かる。また、天然由来および放流由来の下りウナギに関する生物学的特性（性・形態・生理状態等）の違いの有無について明らかとなる。

（2）当該年度の計画

目的：青森県小川原湖におけるウナギ漁業及び種苗放流の状況を把握するとともに、青森県で漁獲される銀ウナギの実態を把握する。また、小川原湖及び周辺水域において天然由来個体のサンプルを収集し、由来判別モデルの精度向上に資する教師データの充実をはかる。

1. 漁獲・種苗放流実態の把握とニホンウナギサンプルの採集

方法：

（i）漁獲・種苗放流実態の把握：

小川原湖漁協において漁期中（6月1日から9月30日）に荷受伝票調査を実施し、操業者数及び時期別・サイズ別・漁法別の漁獲量と漁獲尾数を求めた。

小川原湖漁協の義務放流と同日に放流種苗の測定及び放流尾数調査を実施した。また、放流種苗16個体について、由来判別モデルの教師データ用に耳石を採取した。

（ii）銀ウナギサンプルの採集と生物学的特性の把握：

小川原湖において6～11月に建網または延縄による採捕調査と市場購入によりニホンウナギを採集した。高瀬川において10～12月に建網を設置し、太平洋に降海するニホンウナギを採集した。また、7月に青森県太平洋側の大沼で延縄により再採捕された標識放流ウナギ3個体、及び3月に青森県日本海側の深浦町沿岸で採捕された銀ウナギ1個体についてもサンプルとした。

得られたサンプルについて、全長、体重、胸鰭長、眼径（水平・垂直）、銀化ステージ、性、各内臓重量（肝臓、胃、腸、生殖腺）を記録し、胸鰭、耳石、脳（RNAlater）、肝臓（RNAlater）、生殖腺（ユフィックス）及び血液（血漿にして凍結）を保存した。

小川原湖及び高瀬川で採捕された個体について、マイクロサテライト8遺伝子座を用いたフラグメント解析を実施し、2016年及び2017年に小川原湖内に放流された遺伝子型既知の標識個体が含まれるか判別した。

（iii）天然ウナギサンプルの採集：

小川原湖内において、放流種苗のサイズより小さく、天然由来の可能性が極めて高い全長20cm程度のウナギを採集した。また、現在種苗放流が行われていない青森県太平

洋側の老部川、及び泊海岸において採集したニホンウナギについてもサンプルとした。

泊海岸では2022年5月から2023年4月まで、毎月1回の頻度で定期的に採捕調査を実施した。調査地点は水深20cm以浅の磯で、日没から2時間を目途に調査員2~4名で手網によりサンプリングを行った(2022年6月のみ日中に実施)。

結果：

(i) 漁獲・種苗放流実態の把握：

小川原湖漁協の荷受け伝票を基に算出した2023年のニホンウナギ漁獲量は1,338kg、漁獲尾数は3,586尾であった(相対取引等の漁獲物は含まない)。

漁法は漁獲全体の94%が延縄で、6月及び9月にワカサギ、シラウオ漁の袋網に入網した個体が市場に持ち込まれた。月別漁獲量及び操業者数の推移、並びに漁法の傾向は2020年から2022年の調査結果と概ね同様であった(図1)。

小川原湖漁協では200g以上の個体を荷受けの対象としている。2023年の漁獲物を100g刻みでサイズ分けして尾数を集計すると、サイズ組成は200~300gが1,483尾(41%)、310~400gが910尾(25%)、410~500gが576尾(16%)、510~600gが329尾(9%)、610~700gが160尾(5%)、710g以上が128尾(4%)だった(図2)。サイズ別の集計を始めた2021年以降、漁獲物のサイズ組成は概ね同様の傾向を示した。各サイズの年別漁獲尾数及び年間の操業者数の推移は図3のとおり。

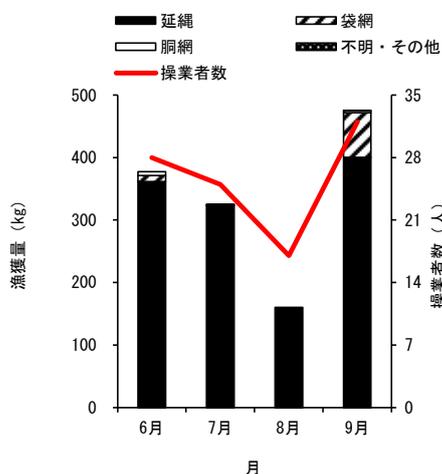


図1. 小川原湖における月別漁法別ニホンウナギ漁獲量と操業者数の推移(2023年)

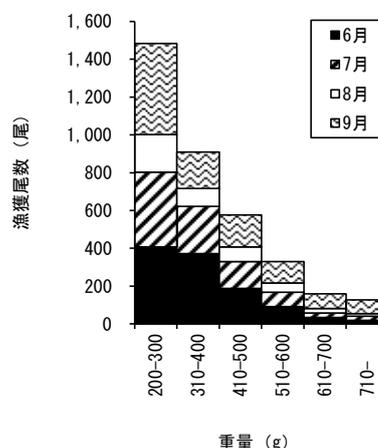


図2. 小川原湖におけるサイズ別ニホンウナギ漁獲尾数(2023年)

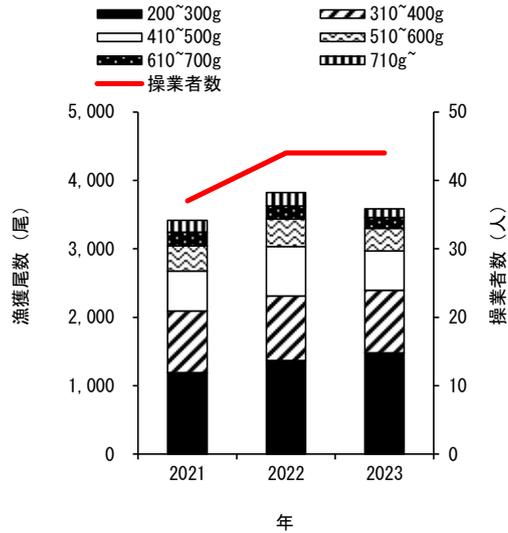


図3. 小川原湖における年別ニホンウナギ漁獲尾数及び操業者数の推移 (2021~2023年)

2014年以降の小川原湖の漁獲量と2007年以降の全国のシラスウナギ採捕量(表1)を比較したところ、小川原湖の漁獲量と7年前の全国のシラスウナギ採捕量の間には正の相関があった(図4、Spearmanの順位相関係数、 $r_s=0.66$ 、 $p<0.05$)。小川原湖へのシラスウナギ来遊量は不明であるものの、全国のシラスウナギ資源量の動態とある程度連動していることが示唆された。また、7年の期間はシラスウナギの加入から主要漁獲サイズに成長するまでの期間と対応している可能性があり、今後漁獲物の年齢査定により確認することが望ましい。

表1. 小川原湖のニホンウナギ漁獲量と全国のシラスウナギ採捕量(ニホンウナギ稚魚国内採捕量の推移(水産庁)より作成)

年	小川原湖の漁獲量 (kg)	全国のシラスウナギ採捕量 (t)
2007		22.2
2008		11.4
2009		24.7
2010		9.2
2011		9.5
2012		9
2013		5.2
2014	1,133	17.4
2015	861	15.3
2016	1,075	13.6
2017	540	15.5
2018	778	8.9
2019	700	3.7
2020	912	17.1
2021	1,559	11.3
2022	1,401	10.3
2023	1,338	5.6

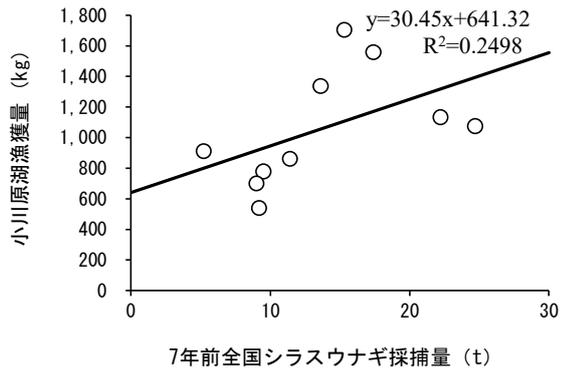


図4. 小川原湖におけるニホンウナギ漁獲量と7年前の全国のシラスウナギ採捕量の関係

2023年の小川原湖漁協のニホンウナギ義務放流は4月19日に実施された。放流種苗100個体を無作為に測定したところ、平均全長及び平均体重はそれぞれ $45.5 \pm 0.3\text{cm}$ 、 $102.5 \pm 2.3\text{g}$ (\pm 標準誤差)であった。放流種苗の全長及び体重組成は図5~7のようになり、2016年から2022年までに放流された種苗と比較してかなり大型であった。

放流尾数はおよそ 780 個体と推定され、放流尾数調査を開始した 2016 年以降最も少なかった。種苗の総重量は例年 80kg 前後でほぼ一定のため、魚体が小さい年ほど放流尾数が多い傾向がある (図 8)。

全国のシラスウナギ採捕量が多い年には小川原湖の放流尾数も多くなる傾向があり (図 9、Spearman の順位相関係数、 $r_s=0.71$ 、 $p=0.058$)、小川原湖内のニホンウナギ資源は天然由来個体、放流由来個体ともにシラスウナギの資源状態の影響を強く受けることが示唆された。

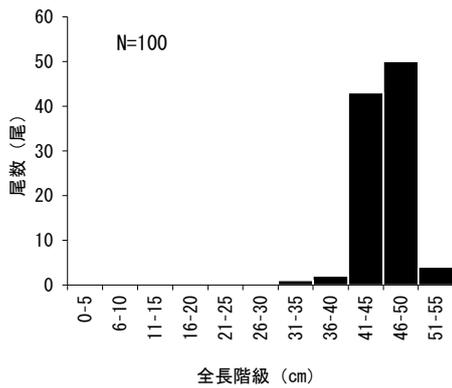


図 5. 小川原湖におけるニホンウナギ放流種苗の全長頻度分布 (2023 年)

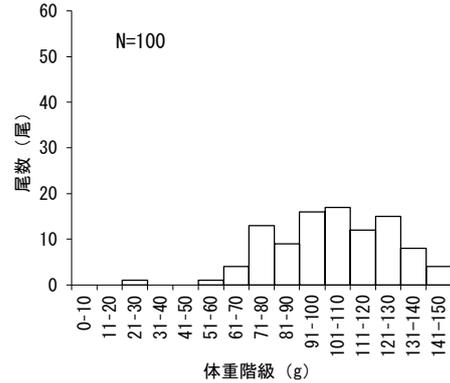


図 6. 小川原湖におけるニホンウナギ放流種苗の体重頻度分布 (2023 年)

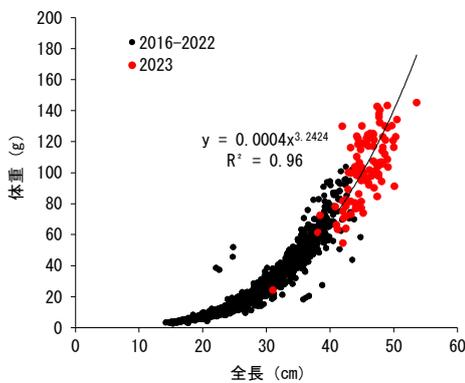


図 7. 小川原湖におけるニホンウナギ放流種苗の全長と体重の関係

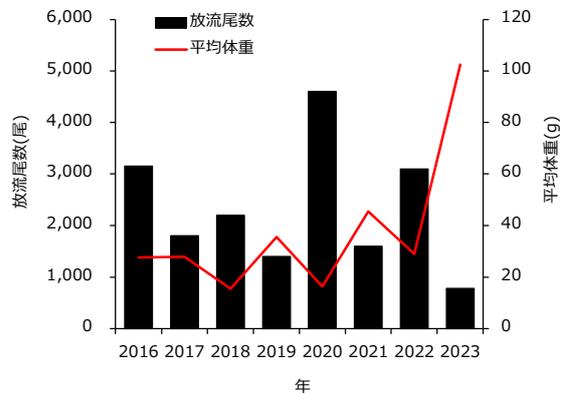


図 8. 小川原湖におけるニホンウナギ放流尾数と平均体重の推移

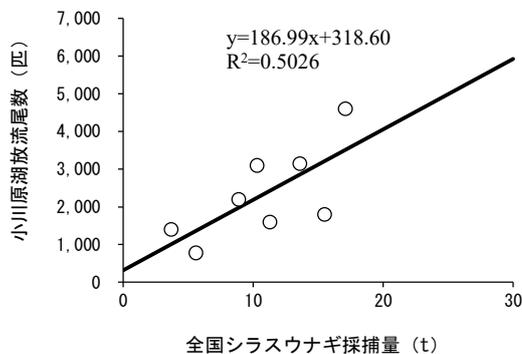


図 9. 小川原湖におけるニホンウナギ放流尾数と全国のシラスウナギ採捕量の関係

(ii) 銀ウナギサンプルの採集と生物学的特性の把握：

小川原湖、高瀬川、青森県太平洋側の大沼、及び青森県日本海側沿岸において、採捕調査及び市場購入により 12 個体のニホンウナギサンプルを収集した。全サンプルの精密測定結果は表 2 のとおり。このうち銀ウナギ（銀化ステージ S1、S2）は高瀬川で 2 個体、日本海沿岸で 1 個体の計 3 個体だった。また、小川原湖では Y2 の個体が 3 個体採捕された。収集した個体はすべてメスだった。

個体判別の結果、小川原湖及び高瀬川で採捕された個体の中に遺伝子型既知の放流個体は含まれなかった。なお、2016 年及び 2017 年に標識放流された 1,010 個体のうち、2022 年までに 40 個体が再採捕されている。

大沼の 3 個体は眼にイラストマー標識が施されており、2016 年及び 2017 年に大沼に放流された個体であることが確認された。大沼では放流時に遺伝子型の確認は行っていないため、個体ごとの成長は追跡できないものの、放流時の平均全長 29.5cm（2016 年）及び 28.4cm（2017 年）から、およそ 3cm/年の速度で成長していると考えられた（図 10）。松谷（2019）では小川原湖の放流種苗の平均成長速度が 1.2cm/月と報告しており、地理的に近い大沼と比較して、小川原湖に放流されたニホンウナギの成長が著しく速いことが示唆された。

表 2. 小川原湖、高瀬川、大沼及び青森県日本海側で採捕されたニホンウナギ（2023 年）

採捕日	採捕地点	漁法	全長 (cm)	体重 (g)	胸鰭長 (mm)	眼球長縦 (mm)	眼球長横 (mm)	生殖腺重量 (g)	肝臓重量 (g)	胃重量 (g)	腸重量 (g)	雌雄	ステージ	標識
3月23日	日本海	建網	94.1	1450.01	47.9	10	10.1	60.50	16.92	3.32	4.89	メス	S2	なし
7月23日	大沼	延縄	43.2	96.92	16.2	4.2	3.5	0.41	1.58	1.48	1.26	メス	Y1	青 (2017年放流)
7月23日	大沼	延縄	50.3	161.03	19.4	4.6	4.5	0.43	2.16	1.65	1.85	メス	Y1	橙 (2016年放流)
7月23日	大沼	延縄	52.4	167.92	21.9	5.2	4.5	0.29	2.42	2.30	2.65	メス	Y1	橙 (2016年放流)
9月20日	小川原湖	延縄	70.5	707.03	39.6	7.1	6.9	8.44	7.54	2.42	3.95	メス	Y2	なし
9月25日	小川原湖	延縄	78.6	738.46	42.4	7.3	6.7	9.73	11.88	4.69	6.91	メス	Y2	なし
10月13日	小川原湖	定置	70.1	489.15	33.7	6.3	5.9	7.99	6.71	3.42	2.78	メス	Y2	なし
10月24日	高瀬川	建網	78.4	768.20	36.8	7.4	7.2	15.52	11.20	2.39	4.56	メス	S1	なし
10月26日	高瀬川	定置	48.6	132.53	19.1	3.2	3.3	0.14	2.25	0.89	1.60	メス	Y1	なし
10月26日	高瀬川	定置	56.8	271.13	22.6	3.9	3.6	1.77	4.17	1.73	3.24	メス	Y1	なし
10月27日	高瀬川	建網	72.6	609.22	34.4	7.6	6.9	14.81	7.40	1.37	2.25	メス	S2	なし
11月2日	高瀬川	定置	48.2	151.06	22.3	3.8	3.8	0.56	2.60	1.50	2.63	メス	Y1	なし

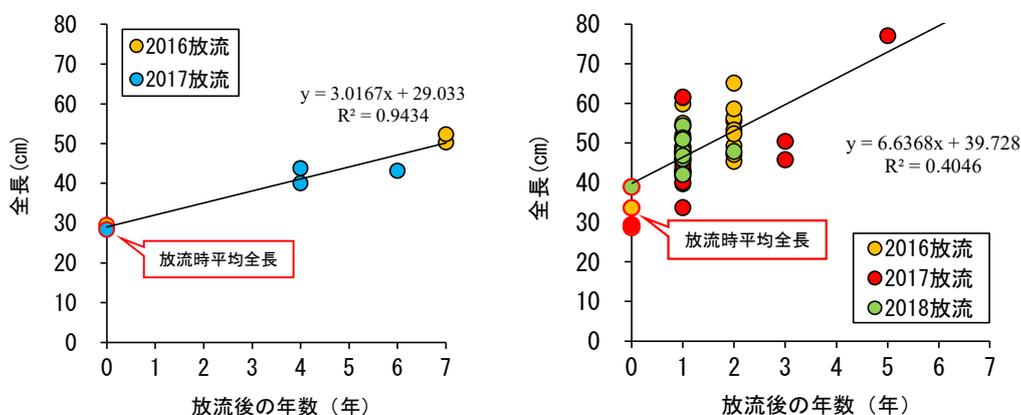


図 10. 放流翌年以降に大沼（左）及び小川原湖（右）で再採捕された標識放流個体の全長（2016–2023）

(iii) 天然ウナギサンプルの採集：

小川原湖、老部川及び泊海岸において計 11 個体を採集し、耳石サンプリングに供した(表 3)。なお、泊海岸において前年度中に採捕された個体の精密測定結果については令和 4 年度報告書に掲載した。

表 3. 小川原湖、老部川及び泊海岸で採捕された天然ウナギ (2023 年)

採捕日	採捕地点	漁法	全長 (cm)	体重 (g)	胸鰭長 (mm)	眼球長縦 (mm)	眼球長横 (mm)	生殖腺重量 (g)	肝臓重量 (g)	胃重量 (g)	腸重量 (g)	雌雄	ステージ
6月6日	老部川	ショッカー	70.0	460.9	33.1	5.1	5.2	3.54	5.83	4.22	6.93	メス	Y1
4月27日	泊海岸	手網	21.5	8.1	7.5	1.5	1	—	0.15	0.12	0.15	—	Y1
9月13日	小川原湖	定置	19.4	6.0	7.1	1.4	1.5	—	0.09	0.05	0.06	—	Y1
9月26日	小川原湖	定置	24.6	15.6	9.5	1.7	1.7	—	0.27	0.23	0.23	—	Y1
9月26日	小川原湖	定置	24.2	12.9	7.9	2	2	—	0.19	0.18	0.16	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	20.9	7.6	7.6	1.9	1.8	—	0.12	0.09	0.12	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	21.0	8.6	6.8	1.6	1.6	—	0.12	0.08	0.11	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	19.2	6.5	6.5	1.2	1.2	—	0.09	0.07	0.10	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	19.8	7.7	6.6	1.15	1.5	—	0.14	0.09	0.10	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	22.5	9.6	6.7	1.7	1.7	—	0.14	0.06	0.09	—	Y1
10月13日	小川原湖	定置	22.9	12.7	8.1	1.7	1.6	—	0.25	0.12	0.18	—	Y1

泊海岸における 1 年間を通したウナギの出現状況及び調査地点の水温は図 11 のとおりで、11 月及び 1~3 月を除く月でウナギが確認された。

採捕されたウナギのサイズはシラスウナギ (6 月のみ出現) ~全長 41.3cm の範囲だった(図 12)。全長 12~18cm にモードがあり、また、採捕せずに目視確認した個体も含めて、15cm 前後にサイズが集中しているものと思われた。仮にこれらの個体が同じ年級で、直近で全国のシラスウナギ採捕量が多かった 2020 年頃に加入した個体であると仮定すると、泊海岸の集団は主に卓越年級の加入により維持されている可能性がある。

ウナギ発見地点の塩分を測定するとおおよそ 0~20psu 程度であり、周辺に比べ塩分が低い傾向があった。泊海岸の中でも生活排水や湧水等の淡水が混じる特定の地点にウナギが定着していることが示唆されたことから、同地点におけるウナギ生息状況及び塩分を詳細に把握するため、次章に示す調査を実施した。

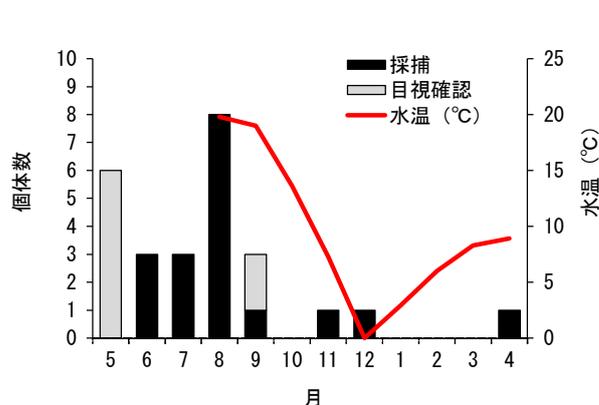


図 11. 泊海岸における月別のニホンウナギ出現個体数 (目視確認含む) 及び出現地点の水温 (5~7 月欠測)

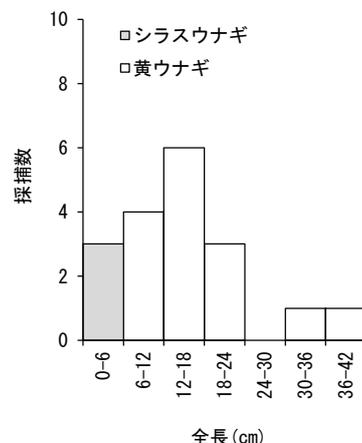


図 12. 泊海岸におけるサイズ別のニホンウナギ採捕個体数

2. 青森県泊海岸におけるクロコウナギの生息状況

方法：2023年8月10、11日、青森県六ヶ所村泊地区地先の海岸（岩礁域）におけるクロコウナギの生息状況調査を行った。同地区では3年ほど前からコンブ漁をしている地元住民によって岩礁域周辺にクロコウナギが相当数生息することが確認されていた。そこで本年度は当地のクロコウナギの生息分布状況、クロコウナギが分布する地点の塩分濃度、ならびにクロコウナギ生息分布域内の水生生物（魚類、貝類、甲殻類、昆虫類、等）の現存量を調べた。

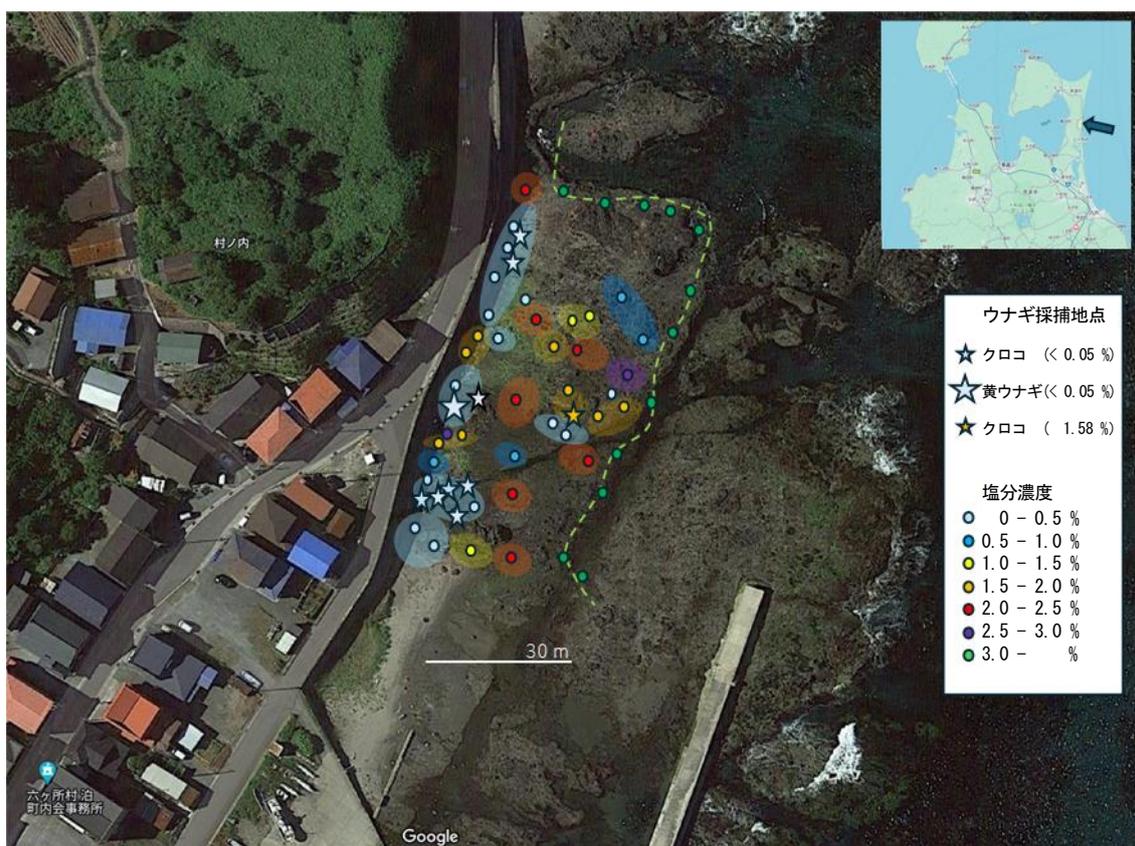


図13 クロコウナギならびに周辺の水生生物相調査を行った泊地先の岩礁域の塩分濃度と二ホンウナギの出現地点の様子。

結果：調査の結果、岩礁域は純粋な海水環境ではなく、海岸付近のコンクリート製堤防の下方や岩礁域の一部からスポット的に淡水の湧水が染み出ており、その周辺に段階的に塩分濃度が低い汽水域が連なっていることがわかった（図13）。

今回の調査ではクロコウナギが10尾、また全長20cm程度の黄ウナギが1尾、採捕された。これらの11尾のうち、10尾は海岸付近のコンクリート製堤防の下方の湧水域付近（塩分濃度0.05%以下）の砂底の中に潜砂している状態で採捕されたが、一尾のクロコウナギは防潮堤から20mほど沖に離れた岩礁帯（塩分濃度約1.6%）の汽水

域から採捕されており、クロコウナギが淡水域だけでなく半海水程度の汽水域にまで適応して生息している可能性が示された。

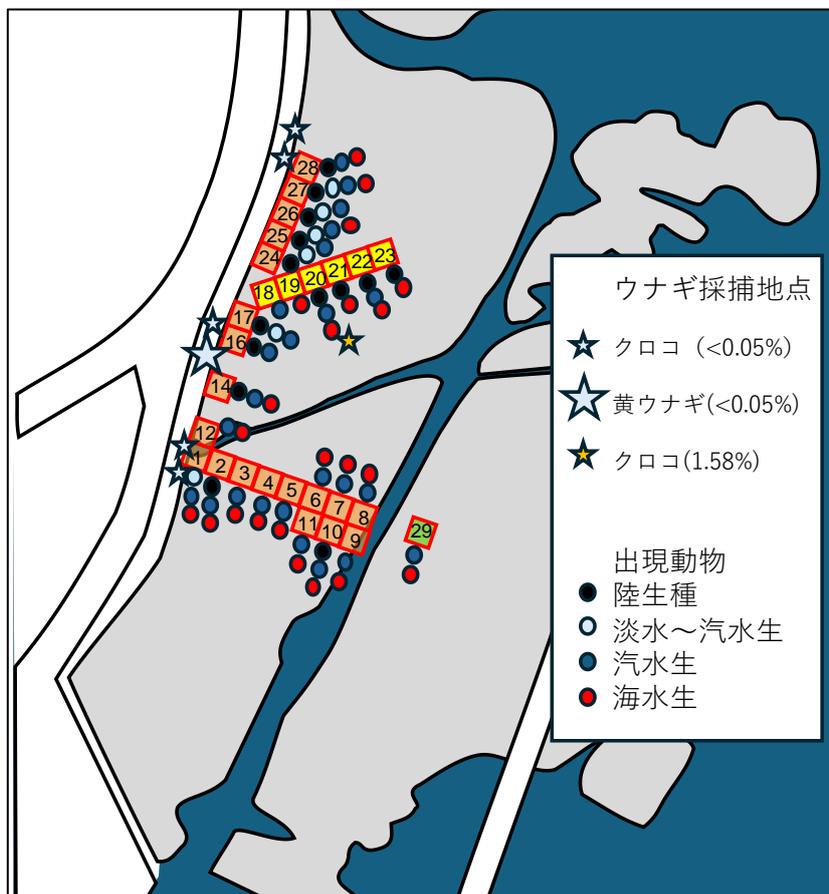


図14 クロコウナギ出現地点周辺のベントス類調査の結果の概要。

次に、クロコウナギの出現地点（図13）の周辺に図14に示すように調査グリッド（5 x 5 m）を29地点設定し、出現する代表的な水生生物（魚類、貝類、甲殻類、昆虫類、多毛類、貧毛類）を調べた（図14、表4）。調査の結果、主にクロコウナギが出現した海岸付近の湧水域付近では、ユスリカやナミハナアブなどの淡水生の水生昆虫類やウキゴリなどの汽水生の魚類、ケフサイソガニなどの汽水生の甲殻類、さらには、ドロメ（魚類）やタマキビ（貝類）、イワガニ（甲殻類）などの海生の動物がパッチ状、あるいは混合して生息していることが確認された。

これらの結果は、今回の調査地点が周年にわたって淡水～汽水～海水環境が混合状態で保たれていることを示唆しており、このような特殊な環境下でクロコウナギや黄ウナギが継続的に分布している可能性が高いと考えられる。こうした生息環境の発見は、二ホンウナギの回遊生態や、我が国における二ホンウナギの環境収容力を論じるうえでも興味深い知見と考えられる。

表4 クロコウナギ出現地点の周辺の代表的動物種の出現状況

	St.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
	調査詳細	1:40-1:50	11:29-11:39	11:39-11:28	11:02-11:12	10:45-10:55	10:30-10:40	9:40-9:50	9:15-9:25	8:52-9:02	9:56-10:06	10:12-10:22	13:02-13:12	13:32-13:42	13:42-13:50	13:52-14:02	14:58-15:08	14:51-14:58	14:44-14:50	14:50-14:58	14:50-14:58	14:58-14:58	14:28	8:21-8:31	8:32-8:42	8:43-8:53	8:54-9:04	9:05-9:16	9:37-9:47
	水温					15.8							32.2															33.1	34.0
	塩分												2																
1)ニホウナギ	魚類	淡水～汽水																											
2)カシノ	魚類	淡水～汽水	1																										
3)ミズハゼ	魚類	汽水	10-100	1-10	1-10	1																							
4)ウケゴリ	魚類	汽水	1																										
5)ヨリ	魚類	汽水～海水								1-10																			
6)ドロ	魚類	海水		10-100	10-100	1-10	10-100	1-10	10-100	10-100	10-100	10-100								1									
7)シ	魚類	海水						1																					
8)クミミ	魚類	海水						100-1000	100-1000	10-100	10-100	10-100								1-10									
9)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
10)シ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
11)ウケゴリ	魚類	海水	10-100	10-100	100-1000	1000≤	100-1000	100-1000	100-1000	100-1000	100-1000	100-1000	100-1000	10-100	10-100														
12)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
13)ウケゴリ	魚類	海水	10-100	10-100	100-1000	100-1000	100-1000	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100							10-100									
14)ウケゴリ	魚類	海水						1																					
15)ウケゴリ	魚類	海水						10-100	10-100	10-100	10-100	10-100																	
16)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
17)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
18)ウケゴリ	魚類	海水						1																					
19)ウケゴリ	魚類	海水						1																					
20)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
21)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
22)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
23)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
24)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
25)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
26)ウケゴリ	魚類	海水						10-100	10-100	10-100	10-100	10-100																	
27)ウケゴリ	魚類	汽水	1-10	1-10	1-10	10-100	10-100	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
28)ウケゴリ	魚類	汽水～海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
29)ウケゴリ	魚類	汽水～海水						10-100	10-100	10-100	10-100	1-10																	
30)ウケゴリ	魚類	汽水～海水	10-100	1-10	1-10	10-100	1-10	10-100	10-100	10-100	10-100	1-10																	
31)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	10-100	10-100	10-100	1-10																	
32)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	10-100	10-100	10-100	1-10																	
33)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	10-100	10-100	10-100	1-10																	
34)ウケゴリ	魚類	海水	100-1000	100-1000	1000≤	1000≤	1000≤	1000≤	100-1000	100-1000	1000≤	100-1000																	
35)ウケゴリ	魚類	海水						100-1000	100-1000	100-1000	1000≤	100-1000																	
36)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
37)ウケゴリ	魚類	海水～汽水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
38)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
39)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
40)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
41)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
42)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
43)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
44)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	
45)ウケゴリ	魚類	海水						1-10	1-10	1-10	1-10	1-10																	

課題と対応策：

1. 銀ウナギサンプルの確保が難航したことから、採捕調査期間を広くとることに加え、調査地点数を増やして対応する。

2. 泊地区地先の岩礁帯では海岸付近の淡水～汽水域の環境が周年にわたって維持されていることが周囲の水生物相の調査からも示された。こうした環境においてクロコウナギが一時的、あるいは周年にわたって生息する可能性が示されたことは、これまで淡水、あるいは終生にわたって海で暮らすかのどちらかの生態を示すと考えられていたニホンウナギの生態に新たな解釈を生み出す、重要なデータと考えられる。このようなハビタットが県内外の他の地域でも見られるのか否か、今後新たな視点のフィールド探索調査が行われることが期待される。

また、今回見つかった泊地先のようなハビタットが我が国のニホンウナギにとって量的にも重要な成育場としての役割を担っているのか、あるいは、こうした環境が海から川への遡河回遊の際の中継地点的な機能をはたしているのかといった、ニホンウナギによる利用実態がさらに明らかにされることも期待される。

次年度計画：

産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握に資する銀ウナギサンプルの収集を継続する。

小川原湖の漁獲・放流データ収集を継続し、湖内のウナギ資源の実態把握に向けた基礎情報の充実を図る。また、漁獲・放流金額調査に加え、漁獲物の由来判別及び年齢査定を実施し、放流の費用対効果把握に向けた基礎情報の充実を図る。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号	イ	事業実施期間	令和5年度
課 題 名	産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握		
担 当 者	吉川昌之（静岡県水産・海洋技術研究所 浜名湖分場）		

令和5年度の成果の要約：

浜名湖の天然ウナギのサンプルについて、性別並びに銀化ステージ別に、肥満度、胸鰭長比、眼球指数、肝重量比、消化管重量比及び生殖腺重量比を比較した。

背景：近年、ニホンウナギの稚魚（シラスウナギ）の採捕量は低水準にあり、平成26年6月には国際自然保護連合（IUCN）のレッドリストに絶滅危惧IB類として掲載されるなど、ニホンウナギの資源の増大が急務となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。しかしながら、ニホンウナギの生態には不明な点が多く、放流したニホンウナギがどの程度生き残っているのか、産卵に参加しているのかといった知見はほとんどない状況である。そのため、ニホンウナギの生態について得られた知見を順次取り入れていき、ウナギの資源管理を推進していく必要がある。

課題実施計画

（1）全体計画

目的：浜名湖及びその周辺河川を調査水域とし、産卵親魚候補である銀ウナギ（下りウナギ）の生物学的特性並びにその由来に養殖ウナギの放流が及ぼす影響を把握する。

方法：浜名湖内で漁獲され市場に水揚げされたウナギをサンプリングし、産卵に向かう銀ウナギの生物特性を、湖内にとどまる黄ウナギを対照として比較することで、調査・分析する。また、上流で養殖ウナギの放流が行われている河川が浜名湖に流入する水域においてウナギを採集し、銀ウナギ及び黄ウナギそれぞれにおいて、天然あるいは養殖ウナギ放流由来のものがそれぞれどの程度を占めるかを調査し、上流における養殖ウナギ放流実績と合わせ、銀ウナギの由来に養殖ウナギ放流が及ぼしている影響を明らかにする。

期待される成果：ウナギの資源回復に及ぼす養殖ウナギ放流の効果が明らかとなる。

（2）当該年度の計画

目的：浜名湖で漁獲される黄ウナギ及び銀ウナギの生物学的特性を把握する。

方法：

浜名湖において小型定置網により漁獲されるウナギを、黄ウナギ及び銀ウナギの生物学的特性を把握することを目的とするものについては鷺津市場にてランダムに、銀ウナギの由来の調査を目的とするものについては雄踏市場にて定置網を指定して銀ウナギを、購入した。

購入したサンプルは、全長、体重、胸鰭長、眼径（水平、垂直）及び胸鰭の状態による銀化ステージを測定した後解剖し、性別の確認、並びに肝臓、胃、消化管及び生殖腺の重量を測定し、得られたデータから、肥満度、胸鰭長比、眼球指数、肝重量比、消化管重量比及び生殖腺重量比を求めた。

結果：

ア 今年度のサンプル

今年度は 62 尾のサンプルを入手した。その内訳を表 1 に示した。水揚地別では、鷺津で 31 尾、雄踏で 31 尾、雌雄別では、雄 38 尾及び雌 24 尾、銀化ステージ別では Y1 が 6 尾、Y2 が 15 尾、S1 が 27 尾、S2 が 14 尾であった。

イ 令和 2 年度から 5 年度までのとりまとめ結果

(ア) サンプル数

サンプル数は 266 尾で、その内訳を表 2 に示した。水揚地別では、鷺津で 167 尾、雄踏で 99 尾、雌雄別では、雄 67 尾及び雌 199 尾、銀化ステージ別では Y1 が 19 尾、Y2 が 45 尾、S1 が 144 尾、S2 が 58 尾であった。

(イ) 各測定項目における各銀化ステージの平均値とステージ間の有意差の有無 (t -test, $p<0.05$)

a 肥満度 (図 1)

雌では平均値はステージが進むほど大きくなり、全てのステージの間に有意差があった。雄では平均値に大きな差はなかったものの、S2 は他のすべてのステージの間と有意差があり、また S1 は Y1 との間に有意差があった。

b 胸鰭長比 (図 2)

雌では平均値はステージが進むほど大きくなり、全てのステージの間に有意差があった。雄では、平均値は Y1 のみ他の 3 ステージと比べて小さかった。S1、S2 及び Y1 の各ステージ間に有意差があったが、Y2 は、Y1 との間には有意差があったが、S1 及び S2 との間には有意差はなかった。

c 眼球指数 (図 3)

雌では平均値はステージが進むほど大きくなり、S1 と S2 の間には有意差はなかったが、この両区と Y2 及び Y1 の間、並びに Y2 と Y1 間に有意差が認められた。雄では平均値はステージが進むほど大きくなったが、S2、S1 及び Y2 の間には有意差はなかった。S2 及び S1 と Y1 の間には有意差があった。

d 肝重量比 (図 4)

雌では S2、S1 及び Y2 の間で、平均値はステージが進むほど大きくなり各ステージ間に有意差があったが、Y1 のみ平均値が高くなり、S2 とは有意差がなく、S1 及び Y2 とは有意差があった。雄では平均値はステージが進むほど大きくなる傾向が認められ、S2、S1 及び Y1 の各ステージ間に有意差があったが、Y2 は他のいずれのステージとも有意差はなかった。

e 消化管重量比 (図 5)

雌では S の両ステージと Y の両ステージの間で平均値に差があり有意差も認められた。S の両ステージの間、及び Y の両ステージの間には有意差はなかった。雄では平均値は S1 まではステージが進むほど小さくなったが、S2 は S1 と大きな差はなかった。一方、各ステージ間に有意差があった。

f 生殖腺重量比 (GSI) (図 6)

雌では平均値はステージが進むほど大きくなり、各ステージ間に有意差があった。雄においても平均値はステージが進むほど大きくなり、各ステージ間に有意差があった。

g エストラジオール 17 β (E2) 血中濃度 (図 7)

雌では平均値はステージが進むほど高くなったが、いずれのステージ間にも有意差はなかった。

h テストステロン (T) 血中濃度 (図 8)

雌では平均値はステージが進むほど高くなったが、いずれのステージ間にも有意差はなかった。

i 11-ケトテストステロン (11-KT) 血中濃度 (図 9)

雌では平均値は S1 まではステージが進むほど高くなったが、S2 では一転して低くなった。有意差はいずれのステージ間にも認められなかった。

j コルチゾール血中濃度 (図 10)

雌では平均値は S1 まではステージが進むほど低くなったが、S2 では一転して高くなった。ただし、有意差が認められたのは S1 と Y1 の間のみであった。

k 銀化ステージと各測定項目の関係

以上の結果を表 3 にとりまとめた。銀化ステージと肥満度、胸鰭長比及び眼球指数といった外形の項目間では、雌で強い関係が認められた。内臓の重量比では、消化管と生殖腺で、雌雄ともに銀化ステージと強い関係が認められた。

(ウ) 各測定項目と生殖腺重量比 (GSI) の相関

a 胸鰭長比 (図 11)

雌では正の有意な相関が認められた ($p<0.01$)。雄では相関は認められなかった。

b 眼球指数 (図 12)

雌では正の有意な相関が認められた ($p<0.01$)。雄では相関は認められなかった。

c 消化管重量比 (図 13)

雌で GSI が大きくなるほど消化管重量比が小さくなる傾向があり、対数曲線で近似

された。雄では相関は認められなかった。

d まとめ

雌では、胸鰭長比、眼球指数及び消化管重量比のいずれも、生殖腺重量比と相関が認められたが、雄ではいずれも相関は認められなかった。

課題と対応策： 順調に実施することができ、着実な成果を得た。

次年度計画：

ア 産卵回遊が期待できるニホンウナギの作出

(ア) 養殖ウナギを用いた天然ウナギに近い銀ウナギの作出技術開発

a 銀化生理機構の把握と養殖ウナギと天然ウナギの差異の把握

b 露地養殖池等を利用した天然個体と遜色ない銀ウナギの作出試験

イ ニホンウナギ等内水面資源の生息状況調査

(イ) ニホンウナギ等の資源増殖手法の高度化

a ウナギ放流を効果的にするための手法高度化の検討

表1 令和5年度浜名湖天然ウナギサンプルの内訳

水揚地	採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)	水揚地	採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)
鷺津	2023/10/23	Female	Y1	2	雄踏 (新川)	2023/10/17	Female	Y1	3
			Y2	1				Y2	2
			S1	1			Male	Y2	5
		Male	Y1	1				S1	1
	Y2		2	Female		S1	3		
	S1	4	2023/11/9			Y2	1		
	Female	S1		1		Male	S1	4	
		S2		1			S2	2	
	Male	Y2		1		2023/11/14	Y2	1	
		S1	1	Male			S1	6	
	S2	6	S2				3		
	Y2	2	合計	31					
	Female	S1	6						
		S2	2						
合計			31						

採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)	性別	ステージ	尾数(尾)		
2023/10/17	Female	Y1	3	小計	Female	Y1	5	
		Y2	2			Y2	5	
	Male	Y2	5			S1	S1	11
		S1	1				S2	3
2023/10/23	Female	Y1	2	Male	Y1	1		
		Y2	1		Y2	10		
	Male	S1	1		S1	S1	16	
		Y1	1			S2	11	
2023/11/9	Female	Y2	2	合計	合計	62		
		S1	4					
	Male	S1	4					
		S2	1					
2023/11/14	Female	Y2	2					
		S1	6					
	Male	S2	2					
		Y2	1					
合計	合計	S1	6					
		S2	3					
		合計	62					

表2 令和2年度から5年度までの浜名湖天然ウナギサンプルの内訳

水揚地	採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)
鷺津	2020	Female	Y1	3
			Y2	10
			S1	34
			S2	26
	2020	Male	Y1	0
			Y2	2
			S1	3
			S2	3
	2021	Female	Y1	6
			Y2	3
			S1	11
			S2	4
	2021	Male	Y1	3
			Y2	0
			S1	6
			S2	3
	2022	Female	Y1	0
			Y2	2
			S1	10
			S2	0
	2022	Male	Y1	0
			Y2	0
			S1	6
			S2	1
2023	Female	Y1	2	
		Y2	3	
		S1	8	
		S2	3	
2023	Male	Y1	1	
		Y2	3	
		S1	5	
		S2	6	
合計				167

水揚地	採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)
雄踏 (新川)	2020	Female	Y1	1
			Y2	8
			S1	16
			S2	1
	2020	Male	Y1	0
			Y2	0
			S1	0
			S2	1
	2021	Female	Y1	0
			Y2	2
			S1	7
			S2	3
	2021	Male	Y1	0
			Y2	0
			S1	1
			S2	0
	2022	Female	Y1	0
			Y2	3
			S1	23
			S2	2
	2022	Male	Y1	0
			Y2	0
			S1	0
			S2	0
2023	Female	Y1	3	
		Y2	2	
		S1	3	
		S2	0	
2023	Male	Y1	0	
		Y2	7	
		S1	11	
		S2	5	
合計				99

水揚地	採捕年月日	性別	ステージ	尾数(尾)
小計	2020	Female	Y1	4
			Y2	18
			S1	50
			S2	27
	2020	Male	Y1	0
			Y2	2
			S1	3
			S2	4
	2021	Female	Y1	6
			Y2	5
			S1	18
			S2	7
	2021	Male	Y1	3
			Y2	0
			S1	7
			S2	3
	2022	Female	Y1	0
			Y2	5
			S1	33
			S2	2
	2022	Male	Y1	0
			Y2	0
			S1	6
			S2	1
2023	Female	Y1	5	
		Y2	5	
		S1	11	
		S2	3	
2023	Male	Y1	1	
		Y2	10	
		S1	16	
		S2	11	
合計				266

性別	ステージ	尾数(尾)
Female	Y1	15
	Y2	33
	S1	112
	S2	39
Male	Y1	4
	Y2	12
	S1	32
	S2	19
合計		266

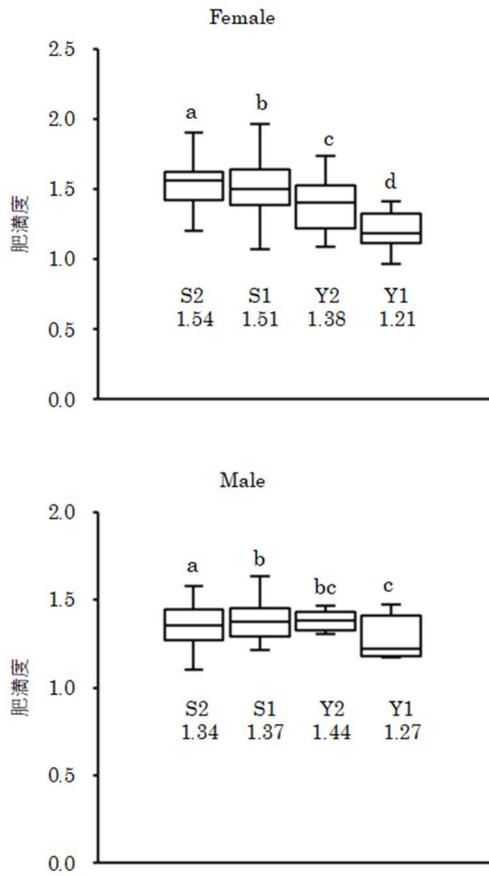


図1 各銀化ステージにおける肥満度の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

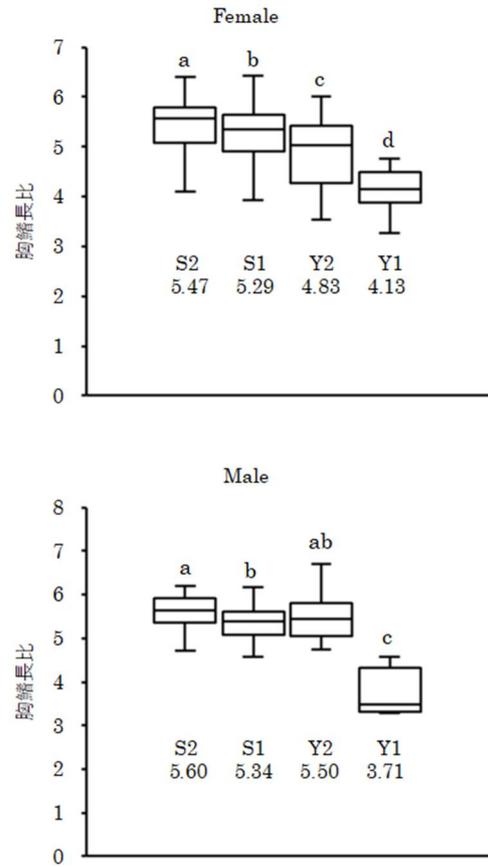


図2 各銀化ステージにおける胸鰭長比の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

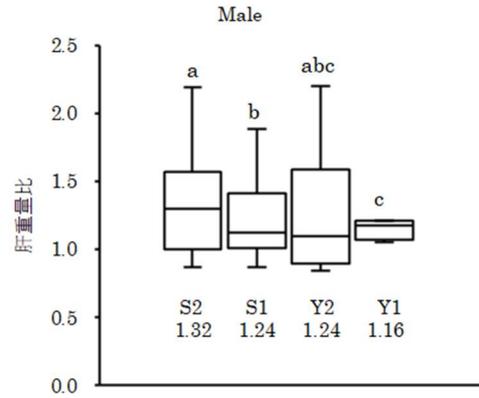
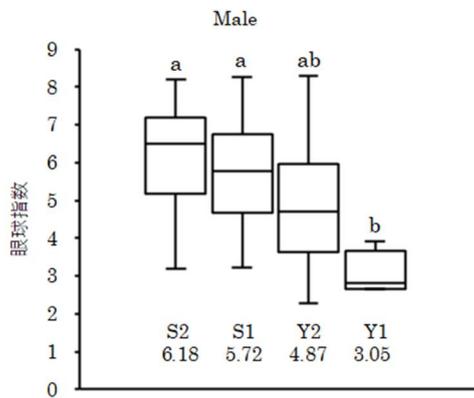
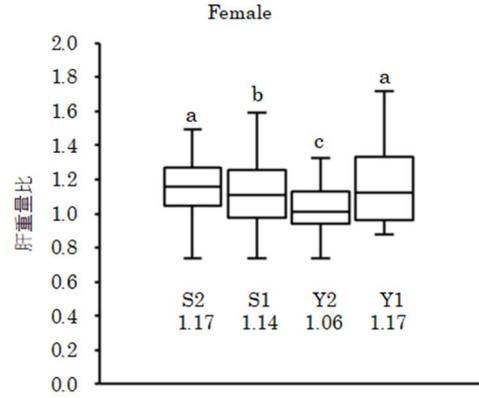
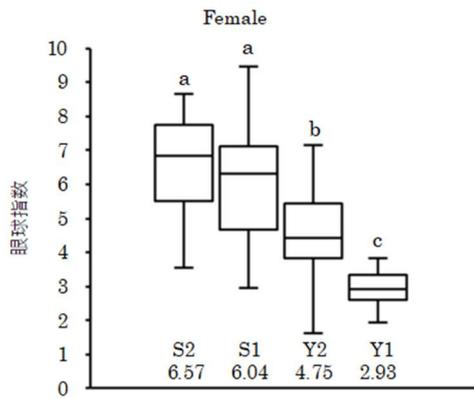


図3 各銀化ステージにおける眼球指数の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

図4 各銀化ステージにおける肝重量比の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

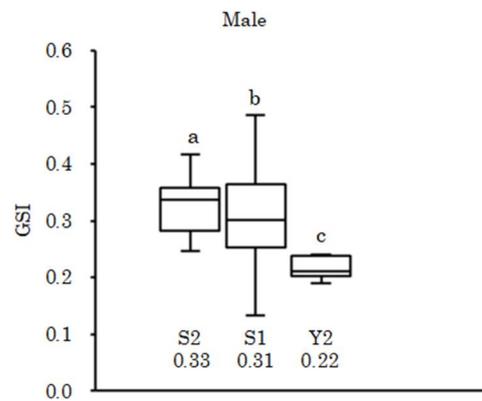
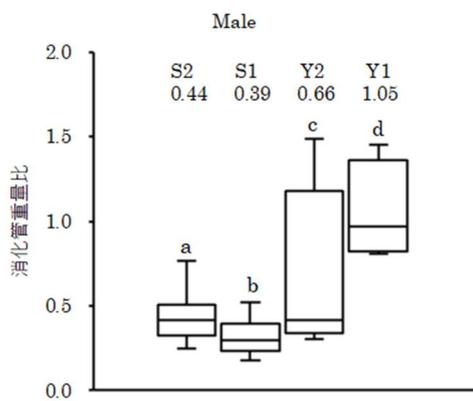
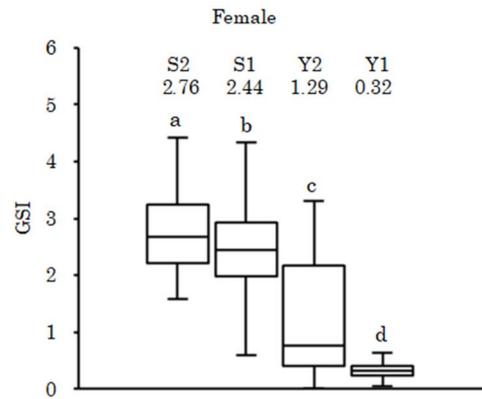
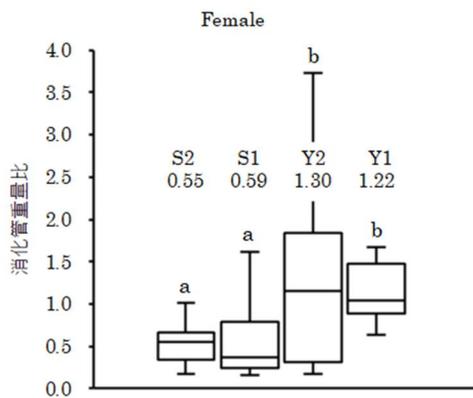


図5 各銀化ステージにおける消化管重量比の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

図6 各銀化ステージにおける生殖腺重量比(GSI)の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (t -test, $p < 0.05$)

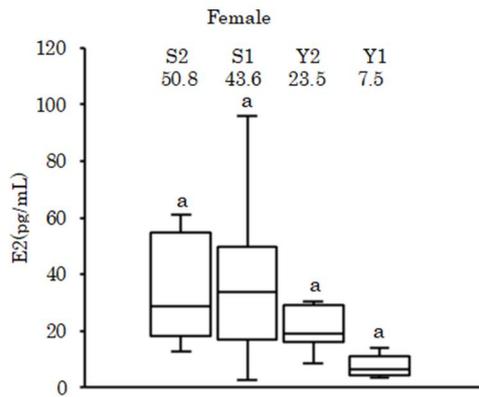


図7 雌の各銀化ステージにおけるエストラジオール 17β (E2) 血中濃度の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (*t*-test, $p < 0.05$)

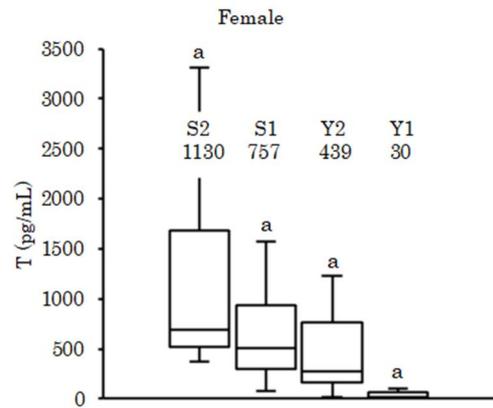


図8 雌の各銀化ステージにおけるテストステロン (T) 血中濃度の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (*t*-test, $p < 0.05$)

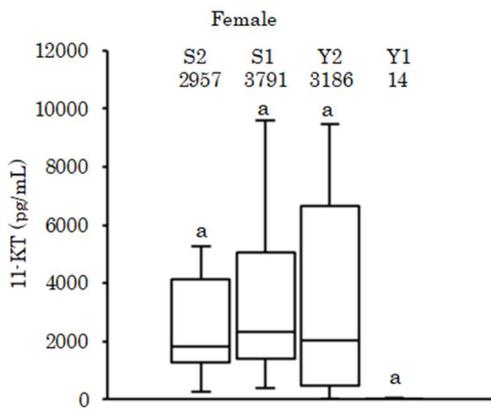


図9 雌の各銀化ステージにおける11-ケトテストステロン (11-KT) 血中濃度の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (*t*-test, $p < 0.05$)

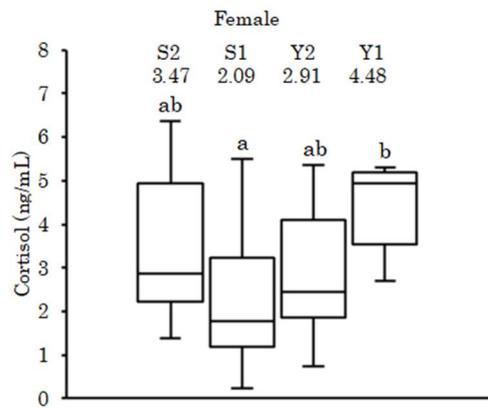


図10 雌の各銀化ステージにおけるコルチゾール血中濃度の分布
 ステージ名の下の数値は平均値
 異なるアルファベット間に有意差あり
 (*t*-test, $p < 0.05$)

表 3 各測定項目と銀化ステージの関係

測定項目	Female	Male
肥満度	◎	○
胸緒長比	◎	○
眼球指数	◎	○
肝重量比	○	○
消化管重量比	◎	◎
生殖腺重量比	◎	◎
エストラジオール17β	○	
テストステロン	○	
11-ケトテストステロン	×	
コルチゾール	×	

◎ 強い関係あり
 ○ 関係あるが弱い
 × 関係なし

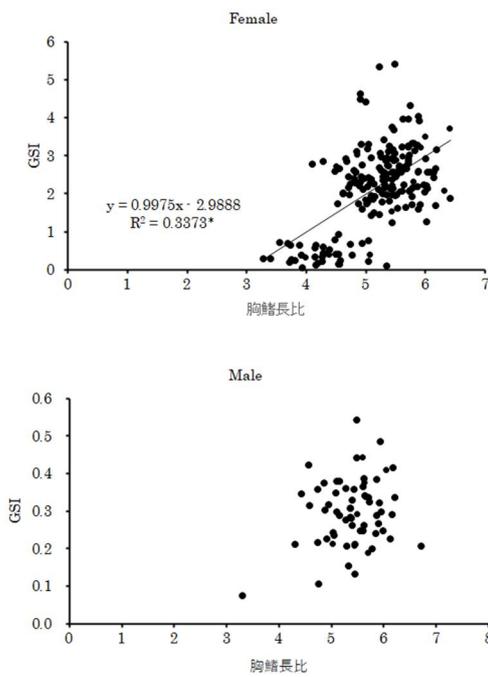


図 11 胸緒長比と生殖腺重量比(GSI)の相関

* : 相関あり ($p < 0.01$)

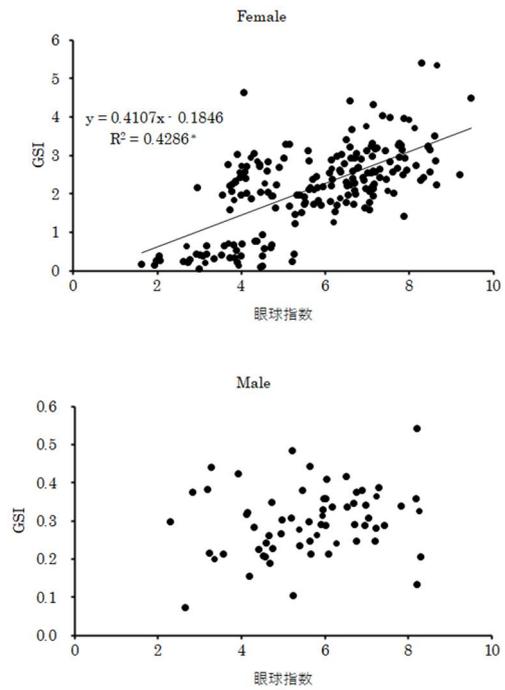


図 12 眼球指数と生殖腺重量比(GSI)の相関

* : 相関あり ($p < 0.01$)

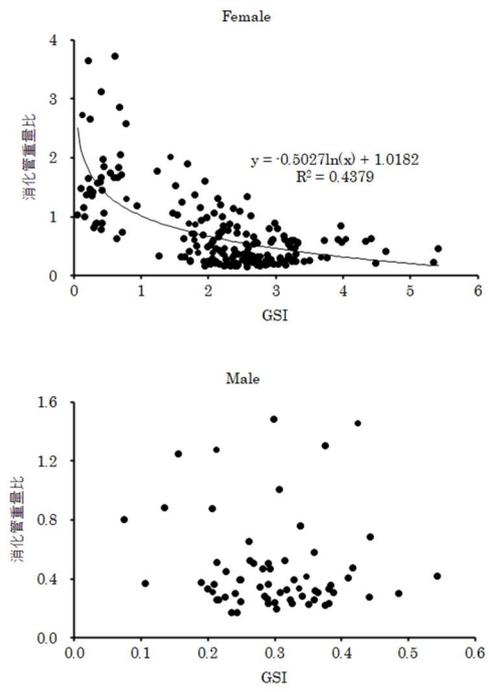


図 13 生殖腺重量比(GSI)と消化管重量比の相関

課題番号	2	事業実施期間	令和5年度
課題名	産卵回遊に向かうニホンウナギの実態把握		
担当者	上村沙起・猪狩裕代・中島広樹（鹿児島県水産技術開発センター） 棟方有宗（宮城教育大学） 矢田崇（水産研究・教育機構）		

令和5年度の成果の要約：

1 鹿児島県河川におけるニホンウナギの放流手法開発

鹿児島県枕崎市花渡川、鹿児島市貝底川において、放流サイズ等の条件を変えて養殖ウナギを標識放流（貝底川の令和2年度の放流は鹿児島県ウナギ資源増殖対策協議会の事業による放流）し、竹筒、石倉カゴ等を用いて採捕し成長等を調査した。

i 花渡川の平成26、27年度の約190gの大型放流群は放流年度にのみ採捕され次年度以降は全く採捕されなかった。また、貝底川は放流尾数が少ないものの、令和3、4年度の大型放流群は放流の翌年度は1尾のみしか採捕されず（PITタグアンテナでは放流年度のみ検出）、花渡川の大型放流群と再採捕状況は近似していた。花渡川の大型放流群は養殖池での飼育期間が長かったため飼育下で雄化した個体が多かったと考えられ、雄としては再生産回遊に参加するサイズに達していた。雌が存在すれば雌は雄よりも大型になるため複数年にわたって再採捕されると考えられるが、小型放流群の再採捕状況とは明らかに異なっていた。以上のことから、平成26、27年度の大型放流群は大半が雄で、放流年に花渡川を離脱し再生産回遊に参加した可能性は否定できない。

ii 花渡川の平成26～29年度の約50gの小型放流群は放流から4～5年後まで確認されたが、再採捕率は時間経過とともに減少し、その傾向は各放流群で近似していた。概ね2～5年で200gに達する個体が出現し、一部はさらに大型サイズにまで成長し雌と思われる個体も出現していた。再採捕率及び成長経過から、50g放流群のうち生残できた個体は放流から2～5年後に再生産回遊に参加している可能性は大型放流群同様に否定できない。

放流群間で成長差が確認されたが、一点放流、分散放流間に特に差はなく、放流群間の成長差の原因については不明であった。また、放流後に肥満度が低下する傾向が見られ、1年で概ね天然ウナギと同等の肥満度に達する個体がいる一方で、1年以上経過しても肥満度がかなり低い個体がいることから、天然ウナギとの競合や急激な環境変化に順応できず斃死あるいは捕食されている個体が相当数いるものと考えられた。

iii 竹筒での採捕サイズにはバイアスがあり、全長40cm台が最も多く採捕される。花渡川の約10gサイズ（平均全長約220mm）の放流群は、生残していれば成長とともに竹筒を利用する個体が増え再採捕率が上昇すると考えられるが、実際の再採捕率は低位で推移している。貝底川の約12gサイズの放流群も同様の傾向であった。このことから、10gサイズの放流個体は天然ウナギとの競合や鳥類を含めた捕食者等の影響により50gサイズより生残率が悪いものと考えられた。

今回の調査結果から、放流した養殖ウナギが再生産回遊に参加した可能性が示唆されたが、東アジアの各地から搬入され国内の養殖池で飼育された個体が産卵場を見出す能力を天然

ウナギ同様に有しているかについては未解明であり、養殖ウナギを放流する意義の根幹部分であることから早期の解明が望まれる。

養殖ウナギが産卵場を見出す能力を有するという前提で、養殖ウナギの放流により資源増大を図っていくためには雌個体をより多く生残させていくことが必要であるが、養殖ウナギは性比が大きく雄に偏る傾向がある。より多くの雌を再生産に寄与させるためには、性決定前の小型サイズで放流するのが望ましいが、本調査結果から、本県のような天然ウナギ等が多い水域では競合あるいは捕食により小型サイズでは生残率が悪く、費用対効果を考えるとウナギ資源増殖には賢明な手法ではない可能性がある。どのようなサイズで放流すれば生残し、かつ雄に偏らないのか、雄が雌に性転換する可能性も含め、今後の精査が必要である。

未解明な部分の多い現状において、本県のような地域でより効果的な放流手法としては、天然ウナギの遡上が阻害され、生息密度の低い横断工作物の上流域で、かつウナギの生育に適した環境を有する水域を選定して放流することが養殖ウナギの成長、生残、性比にとって好ましいものと考えられる。しかし、放流する水域によっては異なる結果となる可能性もあることから、今後、複数の水系で検証を行うなど、より効果的な放流手法を開発していく必要がある。

2 貝底川における養殖・天然ウナギの PIT タグによる行動特性把握

河川遡上期のクロコウナギの蝟集行動に及ぼす同種他個体（クロコ・黄ウナギ）の影響を調べるため、Y字水路を用いた遡上選択行動観察実験を行った。結果、クロコウナギ飼育水を流下した水槽に対しては遡上選択（蝟集）行動が有意に促進された一方、黄ウナギ飼育水を流下した水槽に対しては蝟集行動が観察されなかったことから、クロコウナギは同じステージの魚によって蝟集行動が促進されることが示された。

貝底川において PIT タグ標識した養殖・天然ウナギの移動の様子を 2 台の PIT タグアンテナでモニターした。個体の出現日数は延べ 10 日以下となるものが最も多く、これらの中には短期的にアンテナ上を移動した降海回遊魚が含まれる可能性が考えられた。そこでこれらが最後にアンテナで検出された日と月齢、降水量、水位等の環境要因との関係を統計的手法により調べたところ、検出尾数と月齢、満潮時水位、降水量といった環境要因と相関があることが示唆された。

また本年度は短期的に淡水域と海水域の間を行き来する可能性がある黄ウナギの生態を調べるための端緒として、徳島県島田島 田尻地区地先の低標高の湿地に生息するニホンウナギの生息状況調査と周辺地形の三次元画像撮影を実施した。

背景：近年、ニホンウナギの稚魚（シラスウナギ）の採捕量は低水準にあり、平成 26 年 6 月には国際自然保護連合（IUCN）のレッドリストに絶滅危惧 I B 類として掲載されるなど、ニホンウナギの資源の増大が急務となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。しかしながら、ニホンウナギの生態には不明な点が多く、放流したニホンウナギがどの程度生き残っているのか、産卵に参加しているのかといった知見はほとんどない状況である。そのため、

ニホンウナギの生態について得られた知見を順次取り入れ、ウナギの資源管理を推進していく必要がある。

1 鹿児島県河川におけるニホンウナギの放流手法開発

課題実施計画

(1) 全体計画

目的: 鹿児島県内河川において、再生産に寄与するニホンウナギの放流手法の開発を行う。

また、親魚候補である銀ウナギ（下りウナギ）に含まれる養殖由来個体とその特性を把握する。

方法: 放流した養殖ウナギの追跡調査を行うことにより成長等を把握する。また、産卵場に向かうニホンウナギの由来判別（天然／放流）と生物特性の調査・分析を行う。

期待される成果: 再生産に寄与しうる養殖ウナギの放流効果の向上が図られる。また、天然由来および養殖由来の銀ウナギに関する生物学的特性（性・形態・生態・生理状態等）の違いの有無が明らかとなり、養成手法の技術開発の一助となる。

(2) 令和5年度の計画

目的: 鹿児島県内河川において、再生産に寄与するニホンウナギの放流手法の開発を行うとともに、銀ウナギ（下りウナギ）に含まれる養殖由来個体とその特性を把握する。

方法:

i. 花渡川

河口から上流までの3.5 kmの感潮域に設定した St. 1～St. 10 の10 定点（図1）で竹筒（4～12月）、石倉（4～12月）、袋網（10, 11月）によりニホンウナギ（天然・養殖）の採集を月1～2回行い、全長、体重、標識の有無を記録し、無標識の天然ウナギには新たに PIT タグ（Biomark 社製 BI08 又は BI012B）を腹腔内に挿入し、採捕した地点に再放流する。秋季（9～12月）に銀ウナギが得られた際、全長、体重、胸鰭長、眼径（水平、垂直）、体色による銀化ステージを記録し、採血後、天然個体は再放流し、養殖個体は持ち帰り解剖する。

ii. 貝底川河口（図2）の3箇所（いずれも St. 1）で竹筒（周年）によりニホンウナギ（天然・養殖）の採集を月1回行い、全長、体重、標識の有無を記録し、無標識の天然ウナギには新たに PIT タグ（Biomark 社製 BI08 又は BI012B）で標識を行い、採捕場所に再放流する。秋季（9～12月）に得られた銀ウナギは、全長、体重に加え胸鰭長、眼径（水平、垂直）、体色による銀化ステージを記録し、血液採取後、天然個体は再放流し、養殖個体は持ち帰り解剖する。

iii. 貝底川河口でPIT タグアンテナ 2 台を用い、これまでに標識放流した養殖・天然ウナギと、令和 3、4 年度に放流したツインタグ（2 重標識）ウナギ（養殖ウナギ）の河口域（St. 1）での動向を調査する。

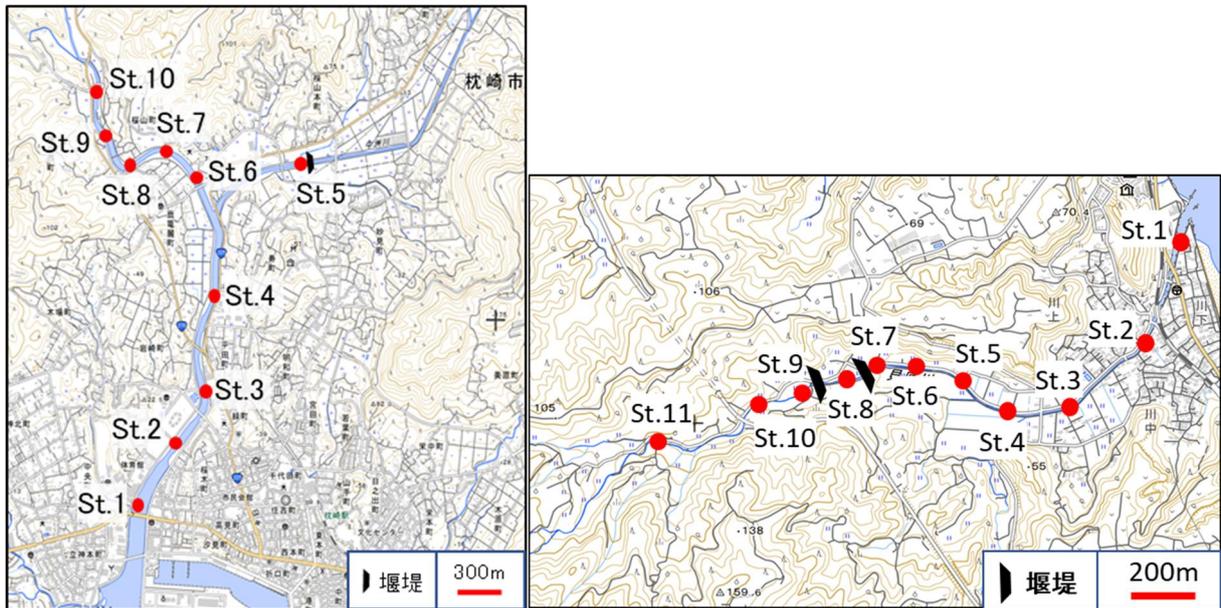


図1 花渡川の定点位置図

図2 貝底川の定点位置図

結果：

1. 花渡川調査

放流に使用した養殖ウナギは大隅半島で養殖されたニホンウナギで、当センター内水面実験池に搬入、飼育し、オイゲノール（DS ファーマアニマルヘルス株式会社製 FA100）で麻酔をかけて全長、体重を測定後、PIT タグ標識を腹腔内に挿入し放流した。これまでの放流定点、放流尾数、放流サイズを表 1、2 に示す。

表1 花渡川の年度別・定点別の放流尾数

年度 (サイズ)	定点・放流尾数												計
	St. 1	下流 石倉	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	上流 石倉	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	
H26 (小)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	398	-	-	698
H26 (大)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	300	-	-	698
H27 (小)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	345	-	-	743
H27 (大)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	398	-	-	743
H28	60	50	60	60	60	60	60	50	40	80	60	60	700
H29	60	50	60	60	59	60	60	50	40	80	60	60	699
R2	60	90	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	750
R3	60	90	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	750
R4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	750	-	-	750

表2 花渡川の放流時平均全長・平均体重・平均肥満度

年度 (サイズ)	放流 年月日	平均全長 (mm)±SD	平均体重 (g)±SD	平均肥満度 ±SD
H26 (小)	2014/7/22	361.3±22.8	52.7±14.2	1.09±0.12
H26 (大)	2014/10/28	502.6±16.1	186.2±16.2	1.47±0.13
H27 (小)	2015/7/29	367.9±31.7	54.8±9.8	1.11±0.15
H27 (大)	2015/7/29	498.9±19.2	191.9±16.7	1.55±0.13
H28	2016/7/14	372.3±22.5	50.2±8.6	0.97±0.11
H29	2017/7/21	356.2±30.2	52.3±10.6	1.16±0.19
R2	2020/10/13	211.7±16.6	8.5±2.0	0.89±0.10
R3	2021/7/21	224.5±23.6	10.2±3.2	0.88±0.17
R4	2022/10/28	230.2±23.2	10.1±4.0	0.80±0.11

1) 採捕数及び採捕率

平成26年度から令和5年度までの放流した養殖ウナギの総採捕数（複数回採捕した個体は複数尾で集計）は390尾であった（表3）。なお、今年度は養殖ウナギの銀化個体は確認されなかった。

平成26、27年の約190gの大型放流群は放流年度のみ（H26放流群は11月下旬まで、H27放流群は10月中旬まで）確認され、H26～29年度の小型群については、放流から4～5年後まで確認された。長期間、養殖環境下で育成された約190gの大型放流群は、翌年以降まったく採捕されなかったことから雄が大半を占めていたと考えられ、小型群との再採捕状況と大きく異なることから、雄としては再生産回遊に参加するサイズに達しており、放流年に花渡川を離脱し、再生産に参加する回遊を開始した可能性は否定できない。他県の内湾で

表3 養殖ウナギの年度別再採捕個体数

放流 年度	年度別再採捕個体数										計
	H26	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	
H26 (小)	23	14	4	2	1	0	0	0	0	0	44
H26 (大)	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
H27 (小)	—	23	14	6	3	1	0	0	0	0	47
H27 (大)	—	17	0	0	0	0	0	0	0	0	17
H28	—	—	66	38	13	8	4	1	0	0	130
H29	—	—	—	37	17	9	4	2	3	0	72
R2	—	—	—	—	—	—	48	5	3	4	60
R3	—	—	—	—	—	—	—	0	4	1	5
R4	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2	5
計	33	54	84	83	34	18	56	8	13	7	390

複数回採捕された個体あり

発信器を取り付けた養殖個体が秋季に海域に移動したことが確認されており、大型個体の秋季以降の行動については今後、詳細な調査が必要と考えられる。

令和5年度までの採捕個体数のうち、放流地点より上流で確認された個体はごく一部で、下流側の流れの緩やかな定点で確認される傾向が見られた（表4）。本調査結果から、養殖ウナギは遡上する傾向は少なく、多くの個体は下流方向に能動的に移動するか、若しくは受動的に流下しているものと考えられた。

表4 養殖ウナギの定点別再採捕個体数

放流年度	再採捕定点・再採捕個体数														
	下流石倉	St.1竹筒	St.1~2袋網	St.2竹筒	St.3竹筒	St.4竹筒	St.5竹筒	St.6竹筒	St.6石倉	上流石倉	St.7竹筒	St.8竹筒	St.9竹筒	St.10竹筒	その他
H26 (小)	9	8	0	2	0	1	4	2	4	5	4	4	1	0	0
H26 (大)	0	0	0	0	0	0	0	2	1	6	0	1	0	0	0
H27 (小)	8	9	0	9	2	3	7	1	0	4	0	1	0	0	3
H27 (大)	1	0	0	0	1	1	1	6	1	2	2	2	0	0	0
H28	10	12	0	8	15	9	23	16	4	17	6	1	3	3	0
H29	3	12	0	4	8	14	5	8	11	4	1	0	1	0	0
R2	41	3	0	3	2	3	0	0	0	5	1	0	1	0	0
R3	0	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
R4	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0

塗りつぶし部は放流地点を示す。
複数回採捕された個体あり

養殖ウナギの放流群別の再採捕率は、いずれの放流群も経過年とともに再採捕率は減少傾向にあった（図3）。H26～29年度の約50g放流群の再採捕率は近似しており、一点放流（H26、27）、分散放流（H28、29）にも特に傾向は確認できなかった。

R2～4年度放流群（9～10g）は、R2放流群の初年度の採捕率を除くと低位で推移した。R2～4年度放流群（放流時平均全長約220mm）は花渡川の主たる採捕漁具である竹筒で採捕されるには400mm程度まで成長しなければ再採捕し難く（図4）、石倉カゴも令和2年度放流群が放流3日後に32個体が採捕された以外、小型個体は採捕されにくい傾向にある。本来ならば成長とともに竹筒、石倉カゴの利用が増え、R2～4放流群の再採捕率は上昇するはずであるが、その傾向は見られていない。天然ウナギと養殖ウナギをコンクリート池で混用すると養殖ウナギの成長、生残が阻害されることが報告されており、花渡川には天然ウナギが相当数生息していると考えられるため、小型の放流個体ほど生息場所や餌料で競合する天然ウナギ

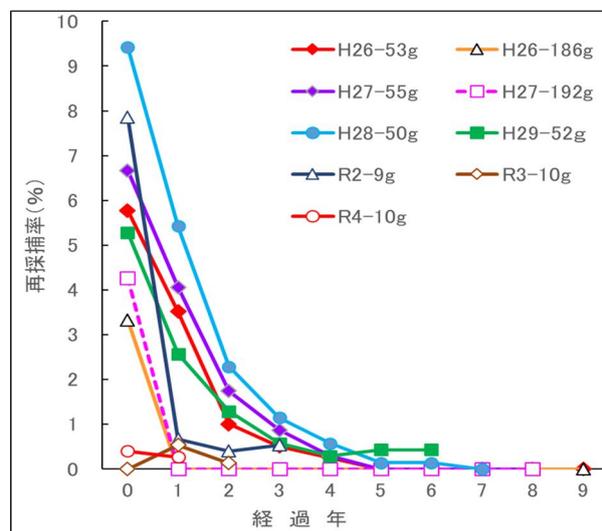


図3 養殖ウナギの再採捕率の推移

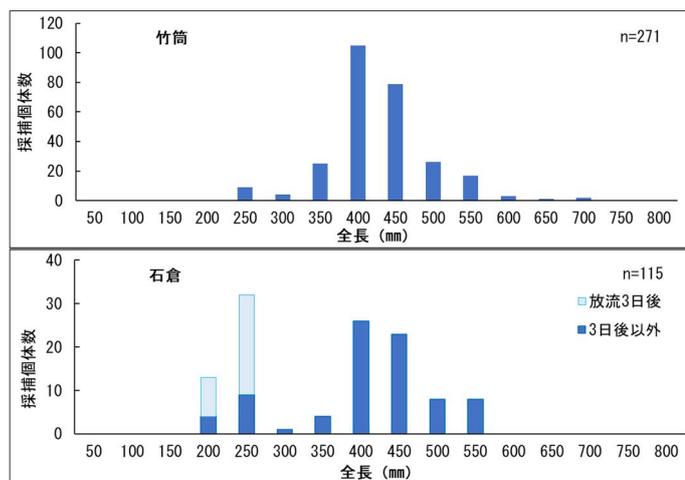


図4 花渡川 養殖ウナギの漁具別全長組成

の影響を強く受けるものと考えられた。花渡川については今後も R2～4 放流群の動向について引き続き調査を行っていく予定である。

標識した天然ウナギの再採捕率を図 5 に示す。天然ウナギも経過年とともに再採捕率は減少傾向にあった。再採捕率の減少は自然減耗及び再生産回遊への参加によるものと考えられるが、再採捕率は養殖ウナギよりも高い傾向にある。これは両者間で自然減耗率に差があるためと考えられた。

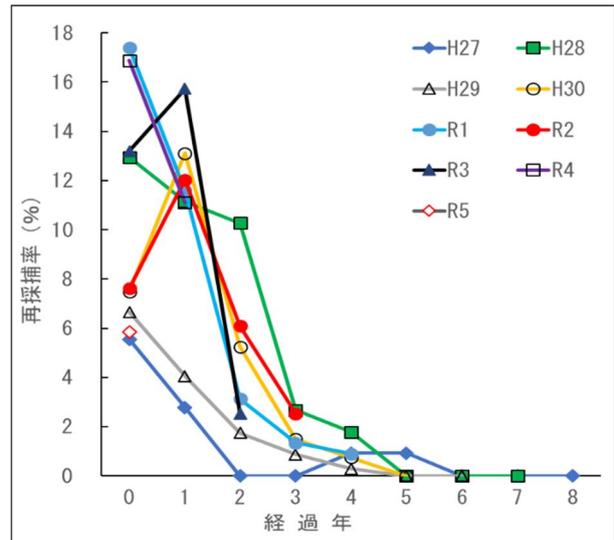


図5 標識天然ウナギの再採捕率の推移

2) 放流後の成長等

養殖ウナギの放流群別放流からの経過時間と体重の関係を図 6 に示す。

時間の経過とともに再採捕された個体の体重は増大しており、いずれの群も一定の成長が確認された。しかし、再採捕率の減少から、河川環境に順応し、生残できたごく一部の個体のみを再採捕している可能性がある。H26～H29 放流群の放流時平均全長は 350～370 mm 程度であったことから、雄への性分化が完了していた個体も存在していたと思われる。これらの群は概ね 2～5 年で 200g に達しており、雄であれば再生産回遊に参加するサイズにまで達している。また、一部の個体はさらに大型サイズにまで成長し、雌と思われる個体も出現していた。最終的な性比は不明であるが、放流から 4～5 年経過した後、再採捕されてい

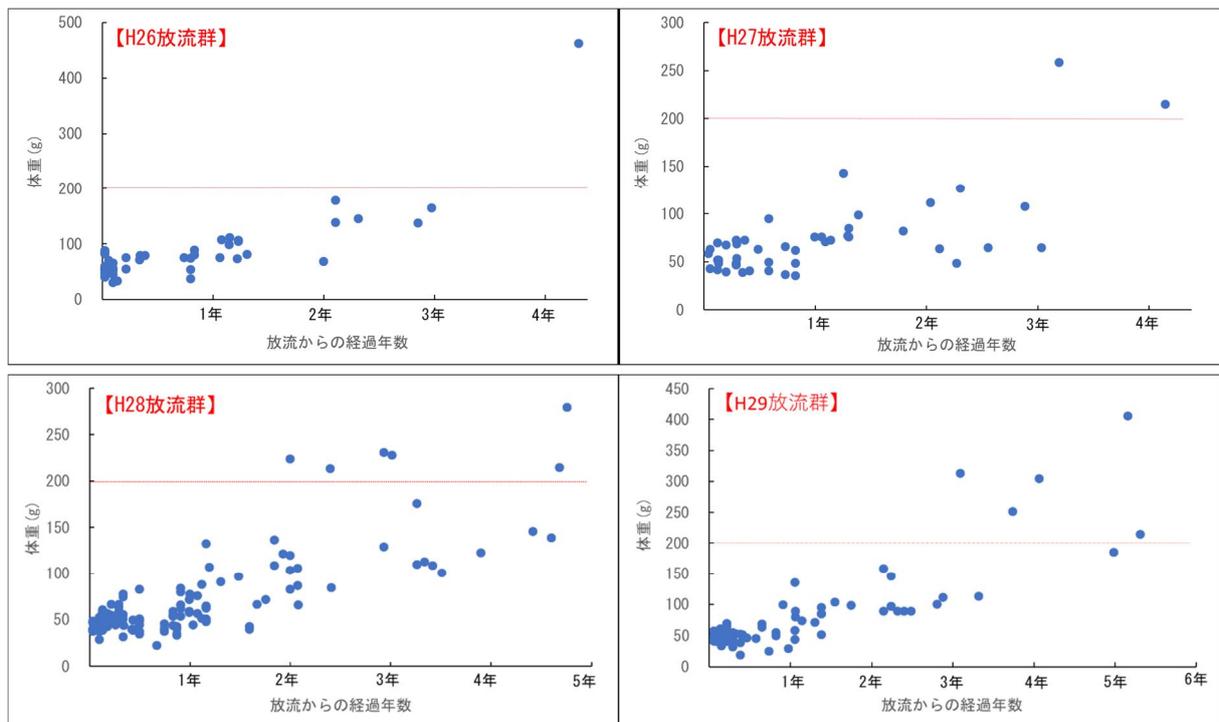


図6 放流群別再採捕個体の放流からの経過時間と体重の関係

ないことから、花渡川を離脱し再生産回遊に参加している可能性は否定できない。

天然ウナギと養殖ウナギの放流群毎の全長の年間成長率を図7に示す。成長率の算出に当たっては当初放流時と最終の再採捕時の測定値を用い、いずれの群も放流時の魚体コンディション及びPITタグ挿入等のハンドリングに伴う成長への影響を排除するため、放流から100日以上経過して再採捕された個体（天然ウナギは標識後100日以上経過した個体）のみで算出した。天然ウナギについては養殖ウナギと成長条件を揃えるため、初回（標識挿入時）の体重が8～60gの個体のみを抽出し算出した。

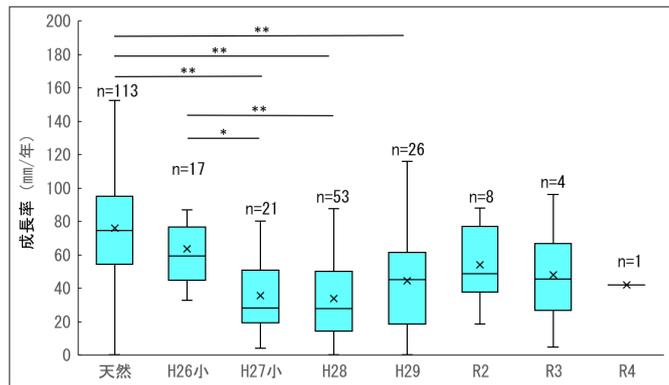


図7 花渡川天然ウナギ及び放流群別の成長率
(Steel-Dwass test *: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$)

天然ウナギの平均年間成長率は76 mm/年で養殖ウナギよりも高い傾向にあったが、個体差も大きかった。ニホンウナギは均一条件下の養殖環境下でもかなり成長差が生じる。自然環境下は生息場所によって大きく環境条件が異なることから、養殖環境以上に成長差が生じると考えられる。放流した養殖ウナギの年間成長率は放流群で異なり、35.7～64.9 mm/年で、約50gの放流群と約10gの放流群間で成長差は認められなかった。

養殖ウナギが環境に順応し、天然餌料を摂餌していることを確認するため、肥満度を天然ウナギと比較した。図8は放流（天然ウナギはPITタグ挿入）から1年未満の再採捕個体、図9は再採捕までに1年以上経過した再採捕個体の肥満度の推移を示す。なお、複数回再採捕された個体については最終採捕時の数値のみを用いた。

放流から1年未満の養殖ウナギは天然ウナギに比べ明らかに肥満度の低い個体が多く、時間の経過とともに天然ウナギの肥満度に近づいている。このことから、養殖ウナギは天然餌料に順応するには時間を要し、1年で概ね天然ウナギと同等の肥満度に達する個体がいる一方で、1年以上経過しても肥満度がかなり低い個体がいることから、天然ウナギとの競合や急激な環境変化に順応できず斃死している個体が相当数いるものと考えられた。

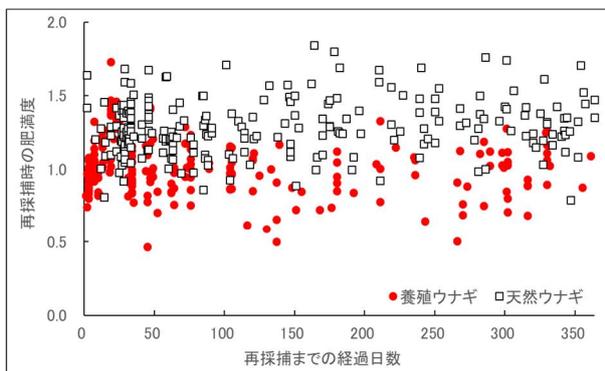


図7 養殖ウナギ及び天然ウナギの肥満度推移
(再採捕まで1年未満の個体)

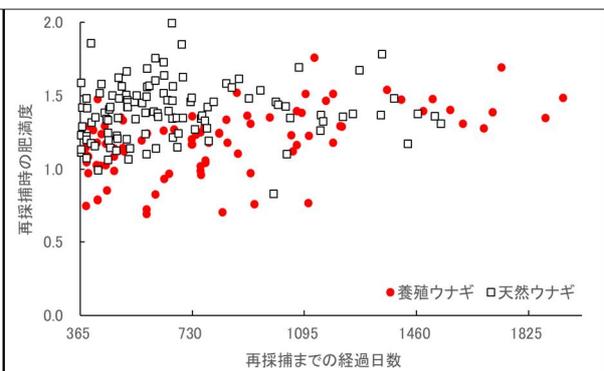


図8 養殖ウナギ及び天然ウナギの肥満度推移
(再採捕まで1年以上経過した個体)

養殖ウナギについて、放流群別に肥満度の推移を1年未満（図10）、1年以上（図11）に分けて示した。

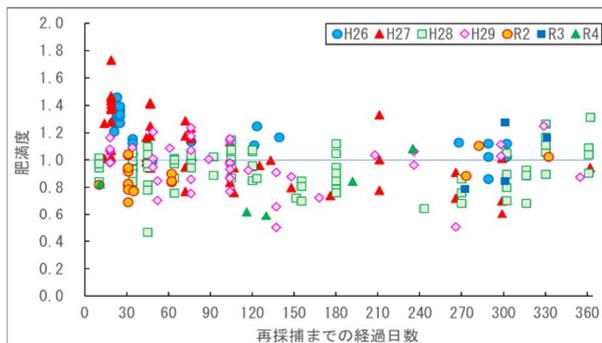


図9 養殖ウナギ放流群別の肥満度推移
(再採捕まで1年未満の個体)

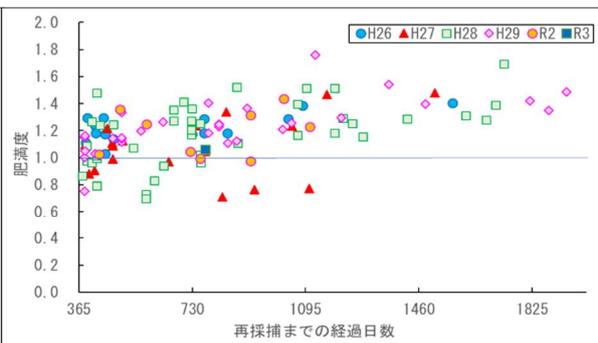


図10 養殖ウナギ放流群別の肥満度推移
(再採捕まで1年以上経過した個体)

全体的には、放流後 200 日程度までは肥満度が減少し、その後増加する個体が出現する傾向が見られた。放流当初の肥満度が放流群により異なり、H27 群は H28 群より当初肥満度は高かったが、その後の肥満度は H28 群のほうが高い傾向にあり、放流時の魚体コンディションが良ければ順応しやすいという傾向は無いように思われた。

なお、より小型のサイズで放流した R2、R3、R4 については、採捕個体数が少ないものの、時間経過とともに天然餌料に順応したと考えられる個体も確認された。しかし、放流サイズ間、一点放流・分散放流間で明確な肥満度の差は認められなかった。

H26 放流群については、放流前に 6 週間かけて生物餌料（ミミズ、ゴカイ）に徐々に馴致させる区（馴致区）と通常の配合飼料を 6 週間給餌する区（非馴致区）を設けて放流に供した。なお、再採捕された個体の放流時の肥満度は、配合飼料区（非馴致区）のほうが高かった（U-test $p < 0.05$ ）が、原因は生物餌料よりも配合飼料は栄養価が高いためと考えられた。

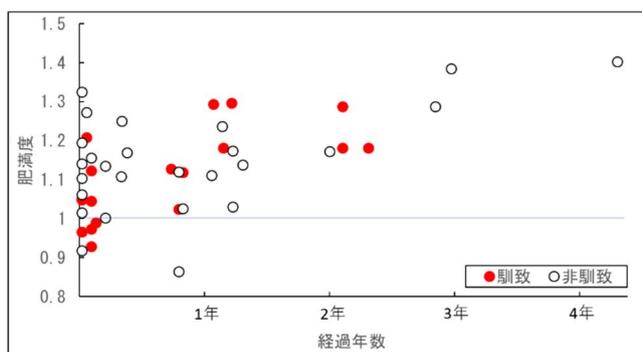


図11 H26放流（53g群）ウナギの放流前馴致の有無による放流後肥満度の推移

再採捕個体数が少ないため、両区に明確な傾向は認められないが（図 11）、馴致区は早期に生物餌料に順応していた可能性がある。

2. 貝底川調査

放流に使用した養殖ウナギは大隅半島で養殖されたニホンウナギで、当センター内水面実験池に搬入、飼育し、オイゲノール（DS ファーマアニマルヘルス株式会社製 FA100）で麻酔をかけて全長、体重を測定後、PIT タグ標識を腹腔内に挿入し放流した。これまでの放流した定点、放流尾数、放流サイズを表 5、6 に示す。なお、R2 年度の放流は鹿児島県ウナギ資源増殖対策協議会の予算で、同協議会の事業として放流したものである。

表5 年度別・定点別放流サイズおよび放流個体数

年度	定点・放流個体数											計
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
H29	-	125	35	20	30	20	10	25	20	30	55	370
R2	-	300	74	61	75	60	30	44	60	60	161	925
R3	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
R4	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24

R3、R4はPITタグのツインタグ標識魚

表6 年度別・定点別放流サイズおよび放流個体数

年度	放流年月日	平均全長 (mm) ±SD	平均体重 (g) ±SD	平均肥満度 ±SD
H29	2017年6月8日	296.8 ± 16.8	29.6 ± 4.6	1.13 ± 0.10
R2	2020年7月22日	226.7 ± 22.5	12.7 ± 4.1	1.05 ± 0.15
R3	2021年10月20日	575.5 ± 44.3	308.1 ± 100.7	1.57 ± 0.17
R4	2022年10月31日	621.8 ± 81.0	441.7 ± 194.1	1.73 ± 0.13

1) 採捕・検出数の推移

貝底川河口の St. 1 で主に竹筒で再採捕された養殖ウナギを表7に示す。H29 放流群は R5 年度で放流から6年目となるが、採捕されなかった。花渡川の約 50g 放流群も5、6年で再採捕されなくなっており同様の結果となった。また、R2 放流群も R5 年度は採捕数が減少した。

PIT タグアンテナによる検出数も H29 放流群は R4 以降減少しており、R2 放流群も R5 年度は減少し、竹筒による採捕と傾向は近似していた (表8)。

なお、大型魚を放流した R3、R4 については、竹筒では R3 の1尾のみで、PIT タグアンテナでも R3 放流群は同年度中に11尾が確認されたが、R4 以降は確認されなかった。R4 放流群は同年度中の1尾のみであった。貝底川の大規模個体の放流数は少ない

ため評価は難しいが、再採捕の状況は花渡川の大規模個体の再採捕状況と近似しており、放流初年度に再生産回遊を開始した個体が多く存在した可能性は否定できない。

2) 放流後の成長等

H29 放流群は放流から4年目から再採捕を開始したため放流初期の成長は把握できていない。また、ほとんどが竹筒による採捕のため大型個体は採捕されていない可能性があるものの、花渡川の約 50g サイズ放流群に近い成長経過が確認された (図12)。

表7 養殖ウナギの年度別再採捕個体数

放流年度	調査年度		
	R3	R4	R5
H29	6	1	0
R2	21	23	3
R3	0	1	0
R4	-	0	0

複数回採捕された個体を含む

表8 PITタグアンテナによる養殖ウナギの検出個体数

放流年度	調査年度・検出個体数			
	R2	R3	R4	R5
H29	25	12	7	2
R2	11	26	26	12
R3		11	0	0
R4			1	0

複数年度で検出された個体を含む

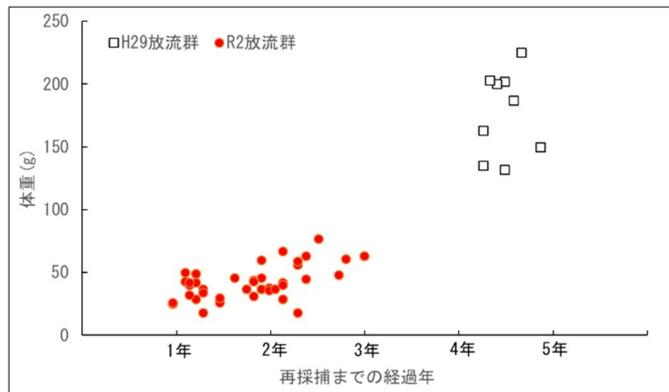


図12 放流群別再採捕個体の放流後の経過時間と体重の関係

R2 放流群は放流の翌年度から採捕を開始したが、時間の経過とともに一定の成長は確認された。しかし、成長が停滞している個体も確認された。

R2 放流群で2 回以上再採捕された個体の成長推移を図 13 に示す。放流地点による成長差は特に確認されなかった。どの時点で河口の St. 1 に移動したか不明であり、そもそもウナギの成長に個体差が大きいためと考えられた。なお、St. 2 から上流域にかけては鹿児島県ウナギ資源増殖対策協議会で調査が実施されている。

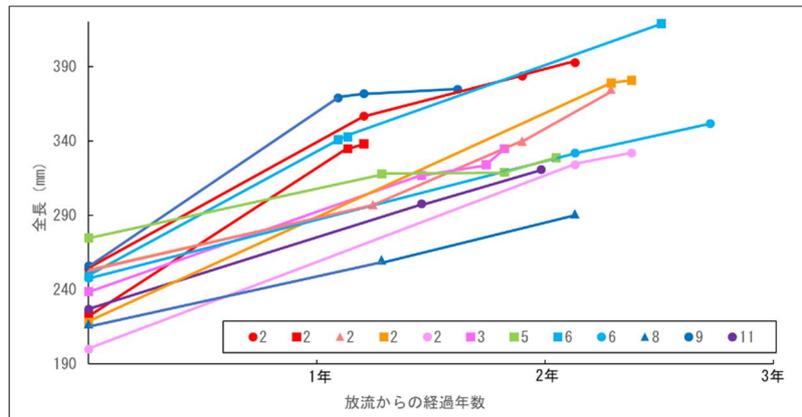


図13 R2放流群の個体別全長の推移
(2回以上再採捕された個体のみを抽出，図中の個体番号は放流定点を示す)

R2 放流群は、成長の経過から放流後2 年目以降に竹筒の利用が増えるはずであるが、令和5 年度の採捕数は減少しており、花渡川の10g サイズ放流群と同様の傾向が見られた。

天然ウナギと養殖ウナギの放流群毎の全長の年間成長率を図 14 に示す。成長率の算出に当たっては当初放流時と最終の再採捕時の測定値を用い、天然個体は PIT タグ挿入等のハンドリングに伴う成長への影響を排除するため、標識挿入から100 日以上経過して再採捕された個体を抽出し算出した。なお養殖ウナギは全ての個体が再採捕まで100 日以上経過していた。また、天然ウナギについては養殖ウナギと成長条件を揃えるため、初回（標識

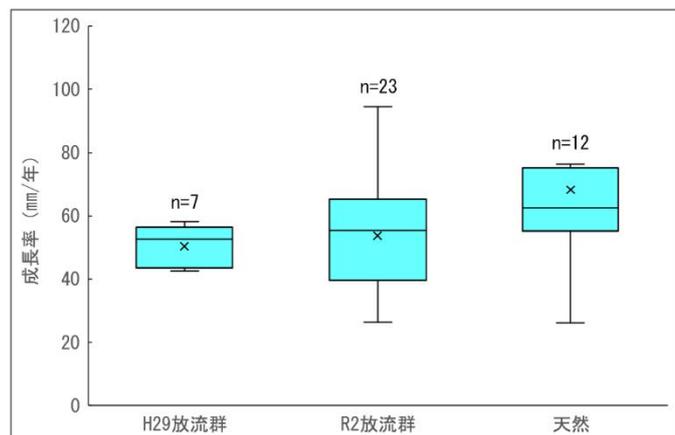


図14 貝底川天然ウナギ及び放流群別の成長率

挿入時) の体重が10~50 g の個体のみで算出した。その結果、天然ウナギ及び各放流群の成長には差は認められなかった (Kruskal-Wallis test $p > 0.05$)。天然ウナギ (8~60g) の平均成長率は68 mm/年と花渡川 (標識時8~60g サイズの標識装着後100 日以上経過個体：平均76 mm/年) と差は無く (U-test $p > 0.05$)、養殖群間も成長差は一部の群間でのみであった (花渡川 H28 群-貝底川 R2 群間 Steel-Dwass test $p < 0.05$)。貝底川は勾配が急な小規模河川で、かつ堰堤による遡上阻害もあり、ウナギの生息適地が少ない環境と思われるが、貝底川は河口域のみの調査であることに加え、貝底川は鹿児島湾内の河川で、外洋に面する花渡川と比較するとシラスウナギ来遊数、ウナギ生息数が少ないと考えられ、そのことが影響している可能性もある。

貝底川における天然ウナギと養殖ウナギの肥満度の状況を図 15 に示す。花渡川と同様に養殖ウナギの肥満度は天然ウナギに比べ低く、時間の経過とともに上昇する傾向が認められた。また、放流から1 年以上経過しても肥満度が低い個体が存在することも花渡川と同様であった。

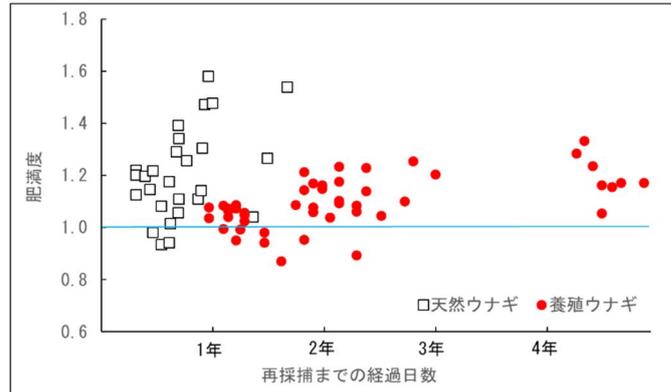


図15 養殖ウナギ及び天然ウナギの肥満度の推移

養殖ウナギの放流によりニホンウナギの資源増大を図っていくためには雌個体をより多く生残させていくことが必要であるが、養殖ウナギは性比が大きく雄に偏る傾向にあることが知られている。より多くの雌を再生産に寄与させるためには、性決定前のサイズで放流するのが望ましいが、本調査結果から、本県のような天然ウナギ等が多い水域では、競合あるいは捕食により小型個体は生残率が悪く、費用対効果を考えるとウナギ資源増殖を図る手法として賢明な手法ではない可能性がある。どのようなサイズで放流すれば生残し、かつ雄に偏らないのか、雄が雌に性転換する可能性も含め、今後の精査が必要である。

本県のような天然ウナギが多く生息する地域の河川での放流は天然ウナギとの競合が成長・生残の阻害要因となるほか、放流に伴う密度増加は放流した水系のウナギの成長や性比に影響を及ぼす可能性も考えられる。

未解明な部分の多い現状において、今回の調査結果から本県のような地域で放流をより効果的なものとするための手法としては、天然ウナギの遡上が阻害され天然ウナギの生息密度が低い横断工作物の上流域で、かつウナギの生育に適した環境を有する水域を選定して放流することが養殖ウナギの成長、生残、性比にとって好ましいものと考えられる。発電施設のあるダムの上流域では資源増殖への寄与は期待できないが、放流する水域によっては異なる結果となる可能性があることから、今後、複数の水系で検証を行うなど、より効果的な放流手法を開発していく必要がある。

2 貝底川における養殖・天然ウナギの PIT タグによる行動特性把握

2. 1. クロコウナギの蝟集刺激要因の解析

(方法) 2023年5月、クロコの蝟集行動に対する同種他個体(クロコ・黄ウナギ)の影響を調べるため、Y字水路による2種類の行動観察実験を行った。実験に用いたクロコ・黄ウナギは鹿児島県産の養殖種苗を水産研究教育機構日光庁舎に移送して飼育したものを用いた。

まず、クロコウナギの蝟集行動に対するクロコウナギ飼育水の影響を調べた。5月16日、Y字水路の下流側の水槽に30尾のクロコウナギを収容し、15分間馴致した。その後、Y字水路の上流側の2つのタンクの一方からクロコウナギ飼育水(実験日は給餌をせずにクロコウナギのみを収容しておいた飼育水)(22℃)、またもう一方からは飼育水(22℃)のみをそれぞれ10 ml/分の割合で流下させ、5分後に下流側のゲートを開放して30分間の遡上選択行動を観察した。この実験を6セット行った。なお、Y字水路上流のクロコ飼育水、飼育水のみタンクは実験ごとに位置を交換した。

次に、同じくY字水路を用いてクロコウナギの蝟集行動に対する黄ウナギ飼育水の影響を調べた。5月17日、Y字水路の下流側の水槽に30尾のクロコウナギを収容し、15分馴致した。その後、水路の上流のタンクの一方から黄ウナギの飼育水(全長60 cm、体重350 gの個体を20 Lの水槽に4時間収容したもの)(22℃)、または飼育水(22℃)のみを10 ml/分の割合で流下させ、30分間の遡上選択行動を観察した。この実験を6セット行った。

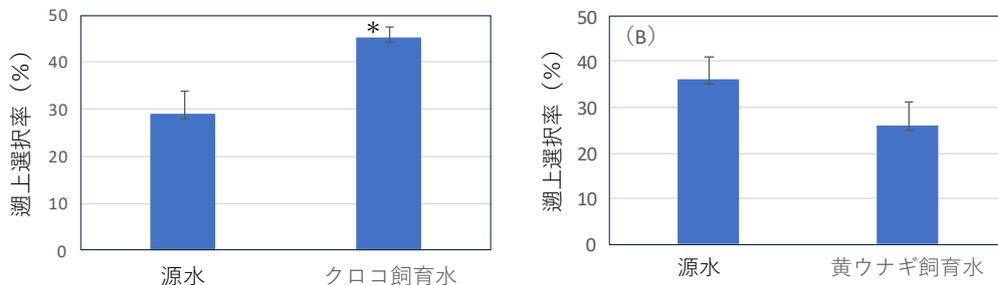


図1 Y字水路におけるクロコウナギの遡上選択(蝟集)率。(A)クロコウナギ飼育水に対する蝟集率。(B)黄ウナギ飼育水に対する蝟集率。

(結果) 本実験ではクロコウナギが同じ成育ステージにあるクロコウナギの飼育水に対しては蝟集し($P < 0.05$)、黄ウナギ飼育に対しては蝟集しない(傾向としては忌避行動を起こす)ことが示された(図1)。また、単純にクロコウナギがY字水路を遡上した割合は対クロコウナギ飼育水の場合が74%、対黄ウナギ飼育水の場合が62%と、若干ではあるが対黄ウナギ飼育水を用いた際の遡上率が低くなった。これらの結果から、クロコウナギは川の upstream にクロコウナギがいる場合は蝟集することを志向し、逆に upstream 側に黄ウナギがいる場合はその場所には蝟集しない傾向があることが示された。本知見は、今後のクロコウナギの河川における汲み上げ放流実施時のクロコウナギ採捕技術等に応用可能と考えられる。

2. 2. 貝底川における養殖・天然ウナギ PIT タグ標識魚の行動解析

(方法) 2023年度は9月28日から12月22日の間に貝底川河口域(図2、3)に設置した2台のPITタグアンテナによる養殖・天然ウナギPITタグ標識魚の検出調査を実施した。なお、本年度は電気関係のトラブルにより11月24日から12月7日まではデータが取得できなかった。

これまで(2020年度から2022年度)の調査では貝底川に放流した標識魚のアンテナ通過行動が主に18時から深夜1時の暗期の時間帯に活発になることが示されており、2023年度も同様の結果が得られた。



図2 鹿児島県貝底川の調査区間(3次元オルソ画像)の様子。

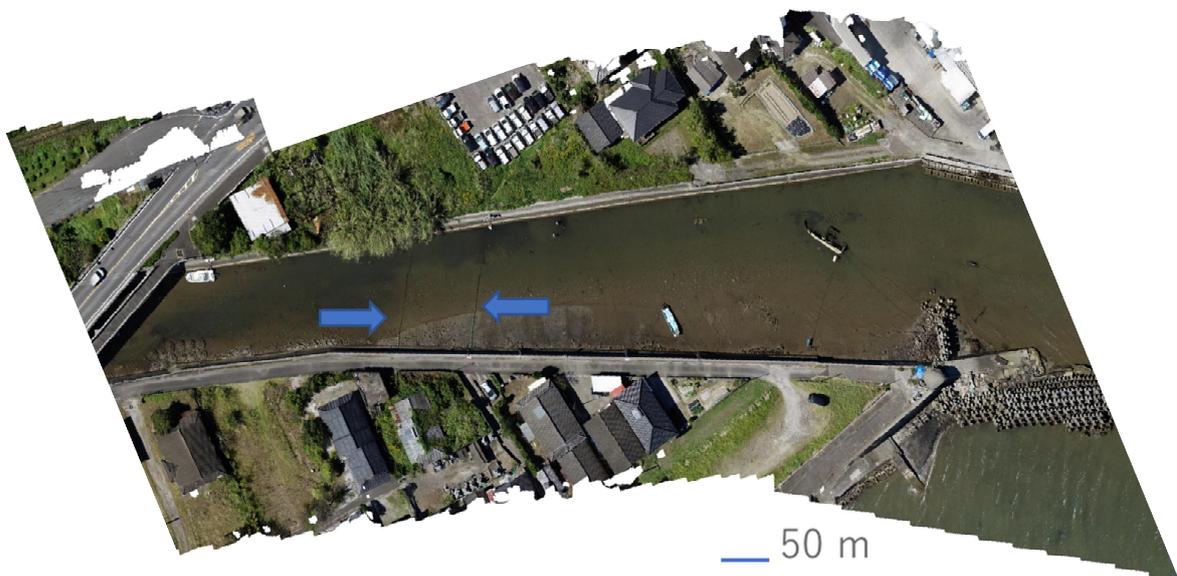


図3 調査区間の拡大図。矢印で示したのがPITタグアンテナ(2基)の設置箇所。

(結果) 貝底川では2021年度までに計1505尾のPITタグ標識魚(養殖魚1315尾、天然魚175尾)が放流されている(表1)。また2022年度は12月末までに合計82尾の標識魚(養

殖魚 24 尾、天然魚 58 尾) が放流されている。一方、2023 年度は標識魚の放流は実施されなかった。

これらのうち、2020 年度に検出された標識魚は、養殖魚が 36 尾、天然魚が 1 尾であり、2021 年度に検出されたのは、養殖魚が 49 尾、天然魚が 31 尾と、どちらの年も養殖魚の検出尾数が多かった。これは、上述の通り 2021 年度までの養殖魚の放流数が天然魚の 7 倍程度多かったことによると考えられる。

一方、2022 年度は養殖魚が 34 尾、天然魚が 54 尾、検出され、2020、2021 年度と比べて養殖魚と天然魚の検出尾数が逆転した。また、2023 年度は養殖魚が 17 尾、天然魚が 47 尾と、本年も天然魚の検出尾数の方が多くなった。

以上の結果を、表 1 および図 4 にまとめた。まず、2020～2023 年の 4 年間に PIT タグアンテナで検出された標識魚の総検出尾数の全放流尾数に占める割合は、養殖魚が 10.2%、天然魚が 57.1%と天然魚の方が高かった。このような結果となった背景には天然魚よりも養殖魚の放流後の生残率が低かったか、養殖魚の多くが PIT タグアンテナ実験を開始した 2020 年以前に降海してしまった可能性、あるいは養殖魚の多くが PIT タグアンテナの主な設置期間である 9～12 月以外の時期にも不規則的に降海してしまった可能性が考えられる。

表 1 養殖・天然ウナギ標識放流魚の放流年と各都市の検出尾数

ウナギ放流尾数					ウナギ検出尾数				
年度	養殖魚(尾)	割合(%)	天然魚(尾)	割合(%)	年度	養殖魚(尾)	割合(%)	天然魚(尾)	割合(%)
2021年度以前	1315	98.2	175	75.1	2020年度	36	26.5	1	0.8
					2021年度	49	36.0	31	23.3
2022年度	24	1.8	58	24.9	2022年度	34	25.0	54	40.6
2023年度	0	0.0	0	0.0	2023年度	17	12.5	47	35.3
放流総数	1339	100	233	100	総検出尾数	136	100	133	100
						総検出尾数/総放流数	10.2		57.1

一方、養殖魚、天然魚の検出率の内訳（経年変化）を見ると、養殖魚の検出率が年々、減少する傾向にあったのに対して、天然魚では増加する傾向が見られた（図 4）。この結果から、やはり天然魚は養殖魚よりも生残率が高く、標識放流から 2、3 年間程度は貝底川で生育し、その後、成長・成熟して降海行動を行うことが示唆された。今後の課題として、養殖魚と天然魚の生残率の違いや降海生態の違い、ならびに養殖魚と天然魚の個体間作用をより詳細に検討することが望まれる。

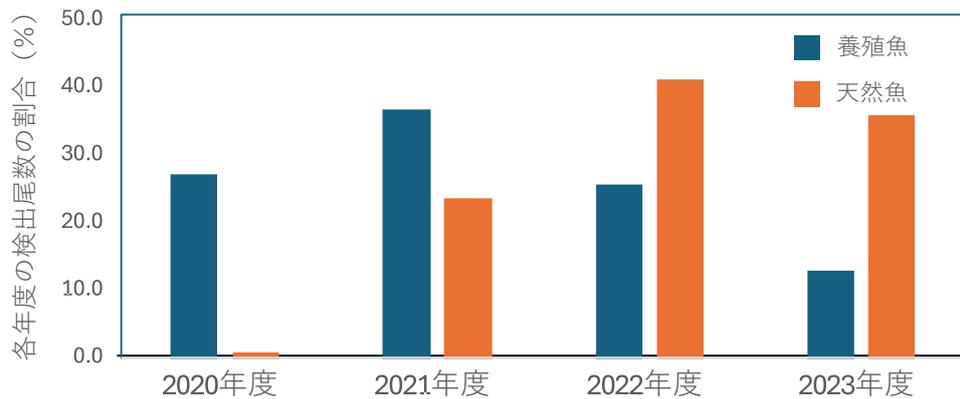


図4 養殖・天然魚の標識個体の年度ごとの検出尾数の割合。

次に、養殖・天然魚の個体ごとの検出頻度（出現日数）を調べたところ、2020～2022年度と同様、出現日数が1～10日となる個体が最も多く、また最大では41～50日間にわたってアンテナで検出された個体も見られた（図5）。傾向としては天然魚の方が養殖魚よりも出現日数が多かったことから、こうした天然魚は貝底川河口域のPITタグアンテナ付近に定住している可能性が考えられた。つまり、貝底川河口域付近では天然魚が優占的に分布していること、したがって養殖魚と天然魚では標識放流後の行動や生態（生残率含む）が異なる可能性が示唆された。

一方、出現日数が少なかった養殖・天然魚の多くはアンテナから離れたエリア（河口域よりも上流側）に分布し、不定期に河口域にまで降りるといった河川内回遊を行うか、あるいはアンテナ上を短期間の間に通過（移動）して海に降りる降海行動を発現した可能性が考えられた。

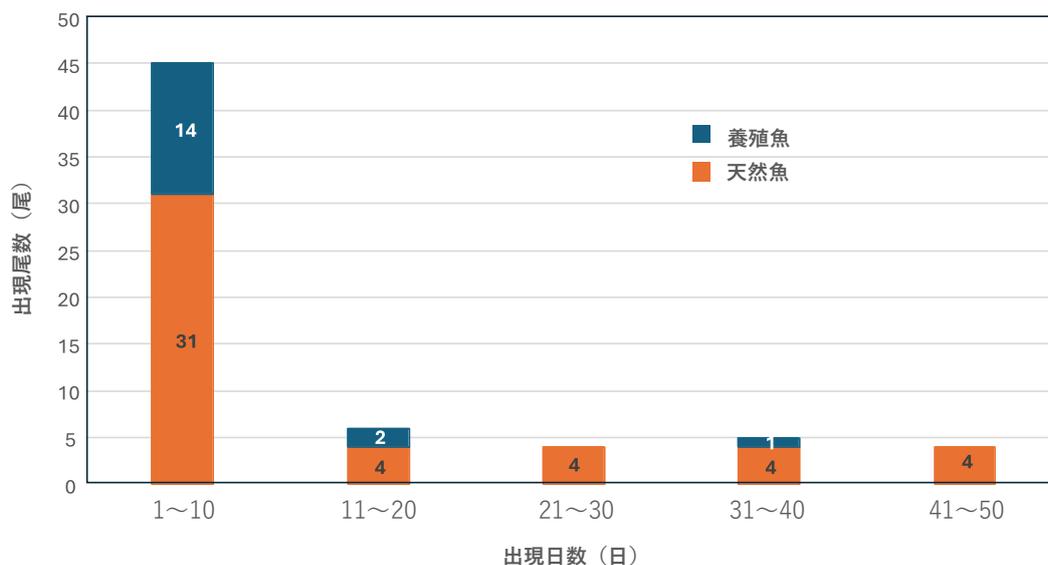


図5 養殖・天然ウナギの検出日数と個体数の関係。グラフ上の数字は尾数を表す。

そこで2022年度に倣い、のべ出現日数が20日以下となった標識魚（養殖魚16尾、天然魚35尾）（図5）を降海魚と見立ててこれらが最後に上流、または下流アンテナで検出された日（最終検出日）と、月齢、降水量、水位等の環境要因との関係を調べた（図6、7）。解析の結果、2023年度の標識魚の最終検出日は主に10月上旬や11月中旬、12月中旬にまとまって見られた。また、こうした移動は、降雨の際や気圧が減少した際、満月が終わり次の満月となるまでの間に発現しているように見えた。

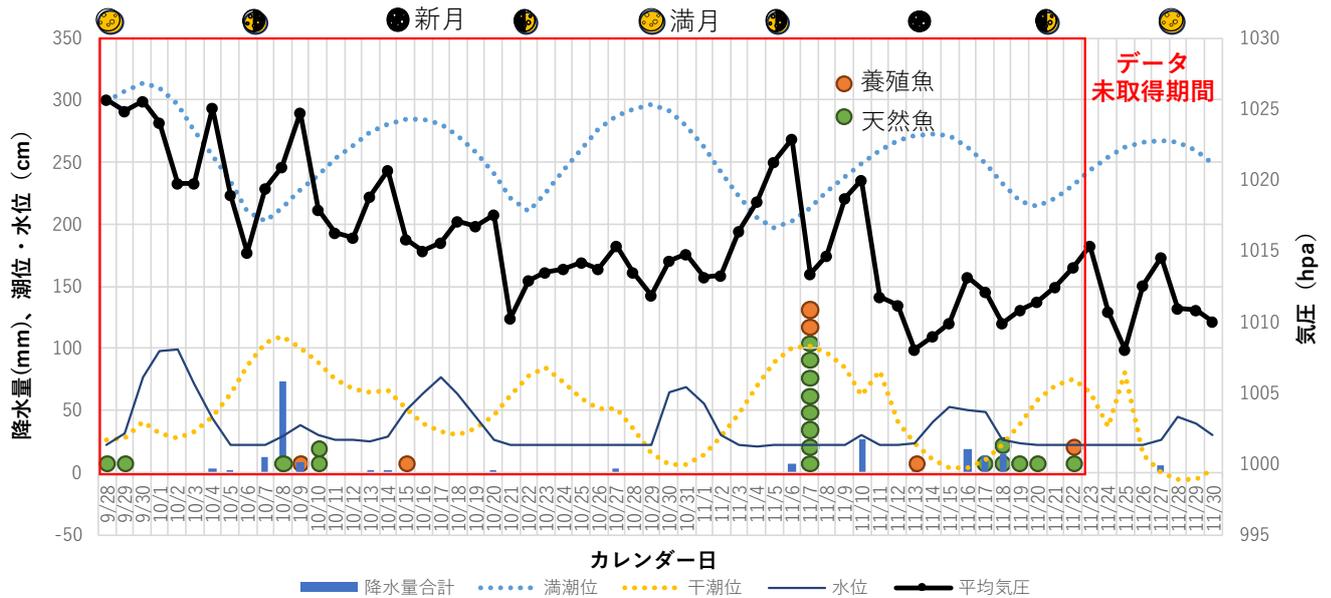


図6 9～11月の養殖・天然魚の最終検出日と月齢、気圧、降水量、河川水位（満潮・干潮位、朝9時の平均水位）との関係。黄丸は満月、黒丸は新月を表す。

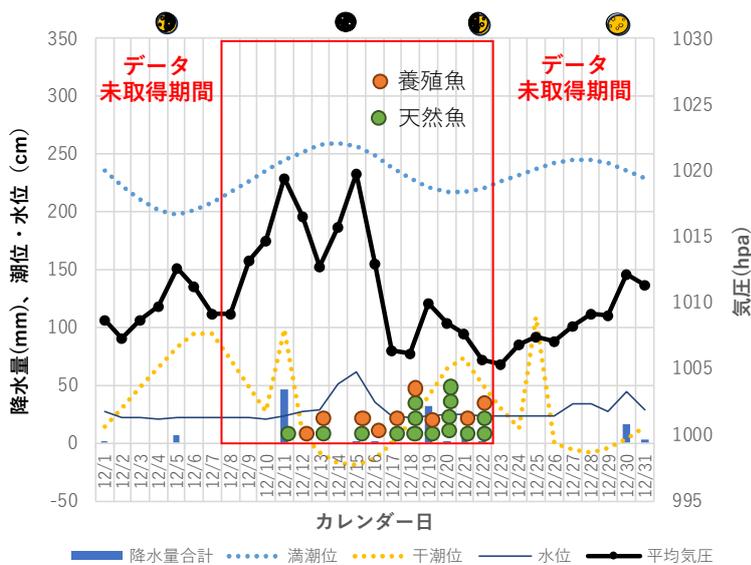


図7 12月の養殖・天然魚の最終検出日と月齢、気圧、降水量、河川水位（満潮・干潮位、朝9時の平均水位）との関係。黄丸は満月、黒丸は新月を表す。

そこで、養殖・天然ウナギの降海行動とこれらの外部環境要因との相関関係を調べるため、重回帰分析（ポアソン回帰）による統計解析を行った。

統計解析の結果、2023年度に養殖・天然ウナギの降海行動に影響を及ぼしていると考えられる主な要因は、月齢（ $P < 0.05$ ）、満潮位（満潮時の最高水位（1に日2回ある満潮のうちの高い方の水位）（ $P < 0.05$ ）であることが示された。気圧、降水量は、朝9時の平均水位は、統計的には影響を及ぼしていないと判断された。

これらの結果を受け、2022年の結果についても同様に重回帰分析（ポアソン回帰）を行ったところ、気圧（ $P < 0.05$ ）との間に関係性が見られた。そこでさらに2022年度と2023年の結果を合算して同様の解析を行ったところ、気圧（ $P < 0.01$ ）および降水量（ $P = 0.08$ ）との間に相関関係が見られた。

以上の結果をまとめると、貝底川の養殖・天然ウナギの降海行動は、主に月齢、満潮時の水位、気圧の低下、および降水量の影響を受けて解発されている可能性が考えられた。

2. 3 徳島県島田島海岸湿地における二ホンウナギの生息状況

（方法・結果）2023年12月、徳島県鳴門市島田島北東部に位置する田尻地区地先の湿地における二ホンウナギの生息状況調査、並びに今後のフィールド実験に向けた観察を行った（図8）。

同地区は海拔が数メートル以内と標高が低く、数百メートル先で瀬戸内海と接続している。その一方で湿地自体は淡水環境が保たれている。ここには高密度で二ホンウナギが生息することが知られており、地元の漁師によって一部が漁獲されているが、聞き込み調査によるとここに生息するウナギの一部が淡水域である湿地と目の前の海域の間を不定期に行き来している可能性があると考えられた。従来、二ホンウナギでは海から川に遡上して成長する黄ウナギのほか、河川に遡上せずに海域や汽水域で生息する、いわゆる海ウナギの存在が知られているが、本調査地点に生息する黄ウナギは短期的に淡水域と海水域の間を能動的に行き来する、新たな行動様式を示す二ホンウナギの事例となる可能性が考えられる。

そこで本年度は同地区の二ホンウナギの生息状況を確認するとともに、要所においては土木研究所自然共生研究センターの林田寿文博士らによって開発され、教授いただいた地上からのアイパッド（Lidar 機能搭載機種）による3次元画像撮影を行った（図9）。



図8 徳島県島田島田尻地区地先湿地と接続する海域の様子。



図9 アイパッドのLidar機能により撮影した島田島田尻地区地先湿地の3次元画像。写真は湿地からの排水路と海岸との間に存在する傍証邸の暗渠の開口部を撮影したもの。

2023年度の調査結果を受け、次年度以降は同地区において、黄ウナギの淡水域、海水域間の短期的な移動の実態を解明することが望まれる。数日程度の短期間の移動は耳石のストロンチウム・カルシウム比率には反映されにくいとされるため、電波発信機装着魚によるバイオテレメトリー実験の導入が有効と考えられる。

(今後の課題と対応策)

水産研究教育機構日光庁舎において実施したY字水路による遡上選択行動観察実験により、クロコウナギは同じステージのクロコウナギに対しては蝸集行動を示す一方、黄ウナギに対しては蝸集行動を示さないことが示された。この知見を応用してクロコウナギからの放出成分を用いた誘因装置を開発し、遡上困難河川における組上げ放流の際のクロコウナギの採捕に役立てることなどが期待できる。

貝底川におけるPITタグアンテナによる養殖・天然ウナギの行動特性把握実験によって、本河川に放流された標識ウナギが月齢や満潮時の水位、気圧、降水量の刺激を受けて降海行動を発現する可能性が示された。今後はこうした環境条件に着目してより重点的に銀ウナギの降海行動を観察し、銀ウナギの回遊生態をより詳細に解明することが期待される。

徳島県島田島地先の低標高の湿地帯においては数日以内の短期間に淡水の湿地と海との間を行き来する黄ウナギが生息する可能性が示された。まずは今後、本個体群の降海生態等をバイオテレメトリー実験によって明らかにするとともに、こうした行動の適応的意義や海水移動時の生理的適応過程等を解明するモデルとすることが期待できる。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	産卵回遊が期待できるニホンウナギの作出		
担 当 者	倉石 祐（静岡県水産・海洋技術研究所）		

背景：ニホンウナギ（以下、ウナギ）の資源保護のため養殖または天然由来のウナギが各地で放流されているが、放流後に成熟・産卵し、資源増加に寄与しているか不明である。特に未成熟で放流されたウナギは直ちに産卵に寄与するとは考えにくいいため、産卵回遊に寄与する放流ウナギを作出する手法を開発する必要がある。

課題実施計画

（1）4カ年の全体計画

目的：産卵回遊に寄与するウナギを作出するため、水温や塩分など環境による成熟や産卵回遊行動への影響に関する知見を集める。

方法：長期変動が成熟に影響するとされる水温について、数カ月間で変動させる飼育実験を行った（R2～R4）。一方で、短期的/長期的両方で生理状態に影響を及ぼす塩分濃度については、短期的/長期的両方による飼育実験により成熟への評価を行っており（R4～R5）、天然魚/養殖魚における違いについても検討を行う。最終的に、水温と塩分濃度の要因を考慮し、適切な飼育環境を整えることで産卵回遊に寄与するウナギを作出する。

期待される成果：産卵回遊に寄与するウナギを作出するために、水温や塩分といった成熟に関わる要因についての知見が集約され、適切な飼育環境を確立することが期待される。

（2）令和5年度の計画

目的：養殖ウナギにおける塩分濃度の違いによる生理状態について

これまで天然ウナギについて、異なる塩分環境下における生理状態の違いを明らかにした。令和5年度は養殖ウナギについて、異なる塩分環境下における経過日数ごとの生理状態の差を明らかにすることで天然魚/養殖魚の差を明らかにすることを目的とした。

方法：

(i) 異なる塩分環境下における養殖ウナギの生理状態について

試験魚は鹿児島県産養殖ウナギを購入し、水産研究・教育機構日光庁舎で飼育したものを静岡県水産・海洋技術研究所駿河湾深層水利用施設に移送し、円形 5t FRP 製水槽で飼育した。飼育水は試験開始時まで 20℃に設定した投げ込み式ヒーターを入れて加

温した汲み置きした水道水を使用し、対照区(n=8)はそのまま飼育、半海水区(n=7-8)は塩分濃度が元の海水から塩分濃度が 50%になるように希釈した海水を 20℃に加温したものを扱い、海水区(n=7-8)は 20℃の半海水から徐々に海水へ移行するように約 2～3L/min 程度注水を行い、一晩かけて海水に移行した。水槽には 20℃に設定した投げ込み式ヒーターを入れて水温を調整した。給餌は行わず、屋内自然日光下で飼育した。開始時、2 日後、14 日後に全長、体重、眼径、鰭長、銀化指数を測定後、解剖して鰓、血液、脳、下垂体、生殖腺を採取し、分析に供した。血液はエストラジオール-17β (E2)、テストステロン (T)、11-ケトテストステロン (11-KT)、チロキシシン (T4)、コルチゾルの分析を行った。

(ii) 鰓の塩類細胞について

採取した鰓は免疫染色用に 4%パラホルムアルデヒド、電子顕微鏡に 2%パラホルムアルデヒド/4%グルタルアルデヒドで一晩固定後、70%エタノールに置換して 5℃で保存した。免疫染色は塩類細胞のマーカーである NKA (Na⁺/K⁺-ATPase) と海水型塩類細胞のマーカーとされる CFTR (Cl⁻チャネル) について、それぞれの抗体を用いて蛍光顕微鏡観察を行った。また、電子顕微鏡観察は定法に従って、t-ブチルアルコールで脱水処理し、金属コーティングした後、走査型電子顕微鏡で観察を行った。

結果：

(i) 異なる塩分環境下における養殖ウナギの生理状態について

各試験区ごとの測定結果を表 1 に示す。眼径や鰭長について、試験区間に有意な差はなかった。また、銀化指数はすべての個体が Y2 であった。

表 1 各試験区における魚体データ

	開始時 (n=8)	2 日後			2 週間後		
		対照区 (n=7)	半海水区 (n=7)	海水区 (n=7)	対照区 (n=8)	半海水区 (n=8)	海水区 (n=8)
体重 (g)	278±18	283±34	289±19	258±19	279±35	272±18	269±30
全長 (cm)	57.9±3.0	57.9±2.2	58.6±2.1	57.7±1.8	56.9±2.4	58.0±2.1	56.3±2.8
眼径 (mm)	6.61±0.56	6.39±0.34	6.41±0.31	6.77±0.58	6.76±0.27	6.86±0.44	6.86±0.32
鰭長 (mm)	27.2±0.9	28.4±2.9	28.6±1.5	28.8±2.3	29.0±2.1	28.8±2.3	28.1±1.3
銀化指数	すべて Y2	すべて Y2	すべて Y2	すべて Y2	すべて Y2	すべて Y2	すべて Y2

次に各試験区における血中ホルモン濃度を図 1 に示す。それぞれのホルモンについて、各試験区間に有意な差は見られなかったが、T については、同時期において、対照区、半海水区、海水区の順で平均濃度が高くなっていることから高浸透圧環境によってなんらかの影響を受けている可能性がある。

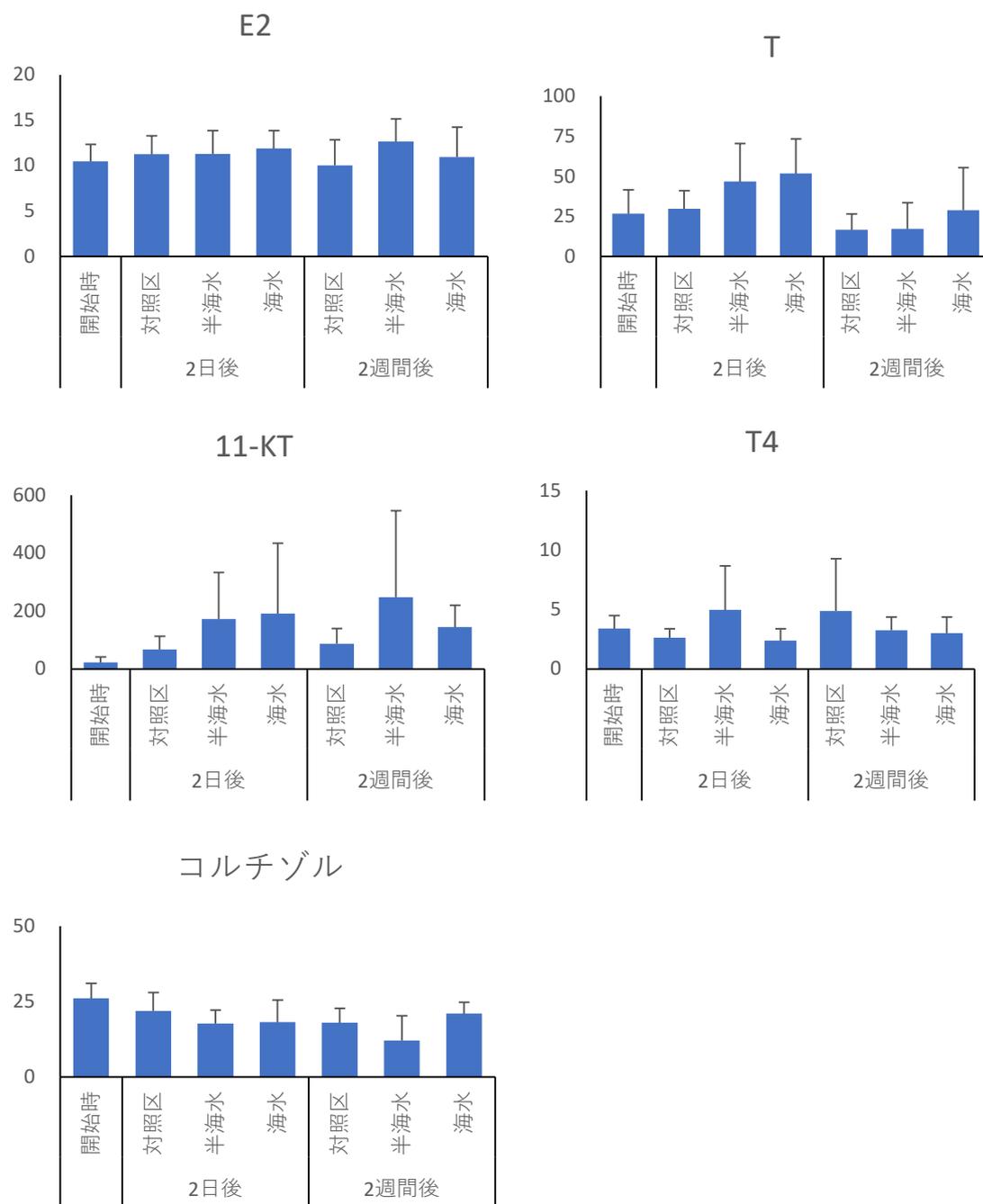
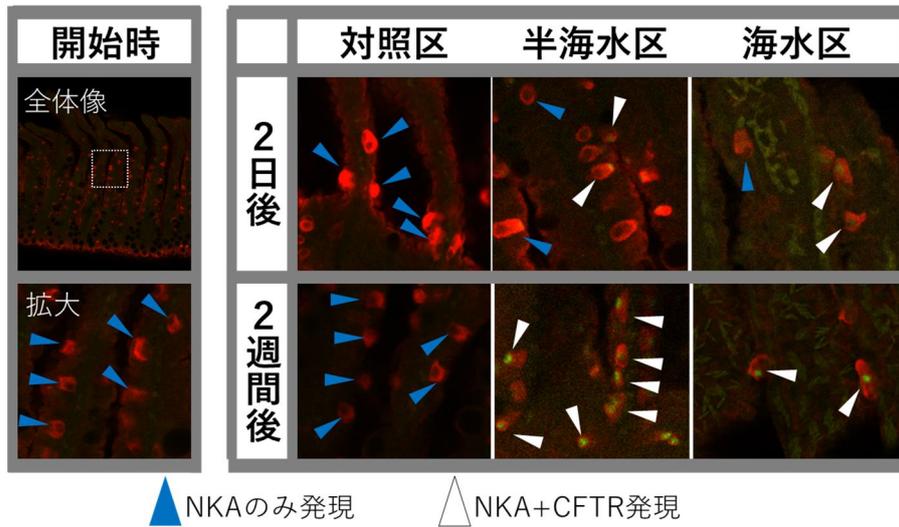


図 1 各試験区の血中ホルモン濃度
(縦軸は血中ホルモン濃度(pg/mL))

(ii) 鰓の塩類細胞について

各試験区の鰓の蛍光免疫染色観察結果を図2に示す。開始時、2日後の対照区および2週間後の対照区でNKAの発現が観察された。一方で、2日後の半海水区・海水区、2週間後の半海水区・海水区ではNKAとCFTRの共発現が観察された。



赤 : NKA 緑 : CFRT

図2 鰓の蛍光免疫染色観察結果

また、各試験区の電子顕微鏡観察結果を図3に示す。開始時、2日後の対照区・半海水区、2週間後の対照区において、淡水型塩類細胞が観察された。また、2日後の半海水区・海水区、2週間後の半海水区・海水区において、海水型塩類細胞が観察された。このことから、半海水～海水移行時において、2日目には海水型塩類細胞が出現し、高浸透圧適応を行っていると考えられる。

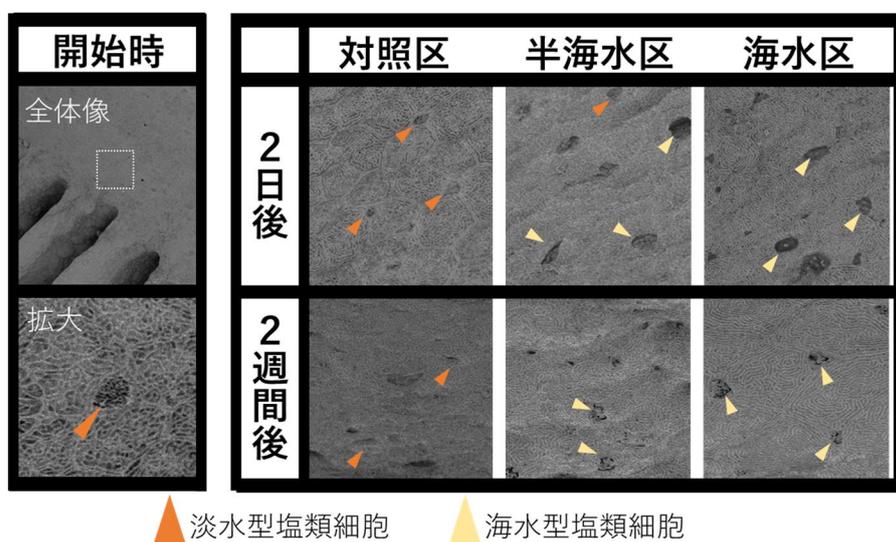


図3 鰓の電子顕微鏡観察結果

課題と対応策：

- ・各ホルモン（E2、T、11-KT）の濃度について、浜名湖で降下回遊時期に漁獲される天然ウナギ（R4実施）と養殖ウナギ（R3, R5実施）では、大きな差があった。この差異の原因を明らかにする必要があるとあり、様々な時期・場所の天然ウナギを分析することで明らかになると考えられる。
- ・ウナギの銀化メカニズムについて、これまで水温、塩分濃度、魚体サイズの影響について検討を行ったが完全に解明できていない。その理由として、分析を行っている項目が特定のホルモンや遺伝子に限られているためであると考えられる。このため、今後は網羅的に解析ができるオミックス解析などを活用し、銀化メカニズムについて詳細に解析する必要があると考えられる。

次年度計画：

- ・浜名湖のみならず、河川に生息する天然ウナギの分析
- ・様々な銀化ステージのウナギについて、網羅的な解析

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課題番号	ウ	事業実施期間	令和5年度
課題名	産卵回遊が期待できるニホンウナギの作出		
担当者	長畠 大四郎（日本養鰻漁業協同組合連合会）		

令和5年度の成果の要約: 銀ウナギの育成に繋がると期待される露地池での飼育実証試験のため、2面の利用可能な露地池を提供し(6月7日及び8月上旬に池入れ実施)、11月21-22日に採捕調査が実施された。当該露地池に池入れする実証試験に供するウナギ及び露地池育成ウナギとの比較対照のための温水育成ウナギを提供した。

背景: 近年、ニホンウナギの稚魚(シラスウナギ)の採捕量は低水準にあり、平成26年6月には国際自然保護連合(IUCN)のレッドリストに絶滅危惧IB類として掲載されるなど、ニホンウナギの資源の増大が急務となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。しかしながら、ニホンウナギの生態には不明な点が多く、放流したニホンウナギがどの程度生き残っているのか、産卵に参加しているのかといった知見はほとんどない状況である。そのため、ニホンウナギの生態について得られた知見を順次取り入れていき、ウナギの資源管理を推進していく必要がある。

課題実施計画

(1) 全体計画

目的: 当初、実際の養殖池を用いて、加温・無加温の飼育試験を行い、目的に適した飼育条件等を見極めるとの計画であったが、試験に適した小型池の使用が確保できなかったことから、水産技術研究所日光庁舎の科学者の意向を受けて、1) 資源増大に貢献するウナギの作出のための飼育試験を行う水産研究・教育機構からの要望に沿った個体について、会員組合に照会の上、手配を行う(令和2年度～令和4年度)。2) 露地池育成個体が温水池養殖個体よりも資源回復のための放流種苗として、より適している可能性があるとする露地池育成ウナギの特性の把握に資すべく、4つの養鰻場の露地池で採捕したウナギを提供する(令和4年度)。3) 露地池で天然個体と遜色なく、銀化して繁殖に貢献し得る生理・生態・行動となり得るのかについて調べる取組に、実際の露地池の使用機会の提供、池入れ対象のウナギの提供等を通じて参画することとした(令和5年度～令和6年度)。

方法: 上記目的の1): 大隅地区養まん漁業協同組合傘下温水養殖池で育成来歴の明確な2Pサイズウナギを数十キロずつ(4年度は70kgずつ)を12月中旬に水産技術研究所日光庁舎及び静岡県水産・海洋技術研究所(焼津)に配送するように手配

(令和 2 年度～4 年度)。

上記目的の 2)： 浜名湖養魚漁業協同組合所属の 4 軒の組合員の露地池で育成されたウナギの特性を把握するため、露地池育成ウナギを晩秋に採捕し、静岡県水産・海洋技術研究所浜名湖分場に提供(令和 4 年度)。

上記目的の 3)：測定、PIT タグ挿入を施した複数のサイズの個体を、一定の数露地池に池入れし、その後の特性を、温水養殖ウナギと比較しつつ、把握するため、浜名湖養魚漁業協同組合会員浜名湖うなぎ漁業生産組合の露地池 2 面の使用機会を提供並びに池入れ用ウナギ及び比較対照用に温水育成ウナギを提供(令和 5 年度～)。

期待される成果：資源の増大への貢献が期待できる、銀ウナギの効率的・効果的な育成方策として、露地池を活用した取組等の見極めが可能となる。

(2) 令和 5 年度年度の計画

目的： 資源の増大に貢献する銀ウナギ作出に向けて、これまで、秋期の水温低下、塩水環境で銀化促進の兆候が認められたことを踏まえ、水研機構側の意向に応じて露地池育成ウナギの可能性を見極める取組を今年度から実施。

方法： 浜名湖養魚漁業協同組合会員浜名湖うなぎ漁業生産組合の養鰻場において隣接した 2 面の露地池を用い、より自然に近い条件で育成させる得る機会を提供した。6 月上旬(南側の露地池)及び 8 月上旬(北側の露地池)には小型ウナギ(それぞれ、20P サイズ 300 尾を提供)を池入れし、8 月上旬に両露地池に大型ウナギ(過年度に大隅養まん地区漁協から静岡県水産・海洋技術研究所焼津に提供した 3P サイズ)が池入された。なお、今年度池入れされたすべての個体には PIT タグが挿入等が施されている。

また、露地池育成ウナギとの比較・対照のために、12 月中旬に、温水育成ウナギ(水研機構福田氏が取り揚げに立会)を提供した(30P～20P サイズ: 282 尾・5 P サイズ: 8 尾)。

結果： 6 月上旬・8 月上旬に露地池への池入れが実施され、11 月下旬の採捕・測定等が可能となった。なお、集計、分析等に当たっては、同じ養鰻場の温水育成ウナギとの比較を行うことが可能である。

課題と対応策： 露地池を用いた銀ウナギを育成する試みは、1 年を超える期間において実施し、状況、結果等を見極める必要があるとみなされることから、今後とも露地池による育成を継続する。

また、資源の増大に、より貢献するウナギの育成に繋がる自然界への放流手法の確立に向けて、放流種苗構成及び放流環境等にいくつかの差

異を設けて、放流後の状況を調査することが重要とされており、そのための放流ウナギを提供する。

次年度計画： 水産研究・教育機構の水産技術研研究所サイドの意向に応じて、銀ウナギの効率的・効果的な育成に向け、令和5年度と同様に、露地池を用いた自然界により近い環境での実証試験のための場(2面の露地池)並びに池入れ用ウナギを提供する。

また、より効果的な放流の実施に資するための放流用ウナギの育成段階・過程の差異に関する調査のために、新仔、イソフラボン投与誘導メス新仔及びビリを提供し、また、放流環境の差異(砂防ダムの上及び同下)に関する調査のために、放流用ウナギを提供する。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号	ウ	事業実施期間	令和5年度
課 題 名	産卵回遊が期待できるニホンウナギの作出		
担 当 者	福田野歩人, 矢田 崇, 阿部倫久, 須藤竜介, 横内一樹 (水産研究・教育機構)		

令和5年度の成果の要約

露地池育成ウナギの成長および銀化・成熟状況の把握を目的として、養殖露地池で標識ウナギの池入れと再捕獲調査を実施した。長期間粗放的な状態で稼働されていた旧池では、池入れした小型ウナギで非常に良い成長が認められ、一方、大型ウナギを池入れしても成長につながらないことが示唆された。水を張って間もない新池では、大小の種苗サイズに依らずウナギの成長は認められなかった。また、汽水環境の季節的な水温低下時に、ウナギの銀化が促進傾向にあることが露地試験でも再確認された。露地池で長期間かけて大型に育成したウナギの血中 11-KT 濃度および生殖腺成熟度は天然個体同様に高く、天然個体と遜色ない銀ウナギ作出に露地池での育成が有効である可能性が示された。養殖ウナギの日周鉛直移動について調べることを目的とし、黒潮域でポップアップ式タグを装着した養殖ウナギの放流試験を実施した。その結果、養殖ウナギ放流前の経験水温に依らず、天然個体と同様の日周鉛直移動を行うことがわかった。

背景 近年、ニホンウナギの稚魚（シラスウナギ）の採捕量は低水準にあり、ニホンウナギ資源の増大にむけた対策が必要となっている。こうした中、各地で資源増大を目的とした放流が行われ、漁獲量の増加及び漁業者の収入増加につながっている地域もある。ニホンウナギは、海で産卵し、川や沿岸・河口域で成長するという“通し回遊”という特殊な生活史を持っている。資源として考えた場合に、各地に放流されたウナギが再生産にも貢献しているのか、また養成ウナギの環境を整えることによって、正常に再生産に貢献できる可能性があるのか、といった点は不明なままである。一度飼育された個体を再生産に貢献しうるものとするためには、飼育下でもバランスのとれた性比とする手法、性成熟を開始させる条件の検討、銀化個体の回遊行動の評価、に関する知見の蓄積が必要である。

課題実施計画

(1) 4カ年の全体計画

目的: 産卵に寄与するニホンウナギの資源増大に資する種苗の育成及び放流手法の開発につなげ得る知見を集積する。

方法：ニホンウナギの性分化と成熟の進行、回遊行動について調査研究を行うことにより、産卵に寄与する個体の作出手法について検討する。天然個体群と同質の銀ウナギを出現させることを目標とし、具体的には（i）雌雄を選択的に作出する技術の検討、（ii）性成熟の開始により黄ウナギが銀ウナギとなる条件及び性成熟の維持と促進に関わる要因の検討、（iii）正常な回遊行動をさせるための飼育・放流手法の検討を行う。

期待される成果：産卵に寄与するニホンウナギ種苗の育成及び放流手法が明らかとなる。

（2）令和5年度の計画

(ii) 性成熟の開始により黄ウナギが銀ウナギとなる条件及び性成熟の維持と促進に関わる要因の把握

目的：銀化および性成熟を促進する環境条件の検討（R2年～）

露地池育成ウナギの成長および銀化・成熟状況の把握（R4年～）

昨年度までの成果

養殖ウナギの生殖腺発達と並行する体色変化を調べるため、ウナギ（雄）に rLH ホルモン投与し、生殖腺発達と並行する体色変化を調べた結果、胸鰭の黒化が養殖ウナギにおいて銀化指標となることがわかった。銀化を促進する環境要因を調べるため、（海水・淡水）×（高水温一定、水温低下）の条件で飼育試験を実施した結果、海水の低水温条件で銀化促進効果があることがわかった。養殖ウナギを環境操作で一定程度、黄ウナギの銀化および成熟促進させることができたものの、その成熟状態や銀化ステージは天然個体に及ばず、11-KT 投与を投与しても天然個体で起こるような回遊衝動行動も見られないこともわかった。課題イでは、自然河川で放流されて生き残った養殖ウナギから発生した銀ウナギは、天然個体の成熟状態と遜色ないことがわかってきている。吉川（1995a,b）は、養殖露地池のウナギの4歳以上の高齢個体（雌）は、1～3歳よりも成熟度が高いことを報告している。このことから、養殖露地池のような自然環境に近い条件で養殖ウナギを育成すれば、天然個体と遜色ない銀ウナギを作出できる可能性が高いと考えられた。R4年度より、天然個体と遜色ない銀ウナギ作出することを目的として、現在でもわずかに残る露地池を利用した研究に着手した。R4では、露地池ウナギの肥満度は天然個体に類似すること、生殖腺指数の上昇する体サイズが天然個体に比べ大きい傾向があることがわかった。

今年度の実施内容

露地池育成ウナギの成長および銀化・成熟状況の把握を目的に、大型ウナギ（3Pサイ

ズ) および小型ウナギ (30P~20P サイズ) を淡水露地池 (2面) や感潮露地池に収容し、それらの再捕獲調査を行うことにより、露地池ウナギの詳細な生物学的特性を把握することとした。(なお、ここで3P、30P というのは、3尾で1kg、30尾で1kgとなるウナギを指している。)

方法

浜名湖うなぎ漁業生産組合の露地池を試験に用いた (写真1)。露地池は2面あり、1面は令和2年からウナギを収容し稼働させている池 (以下、旧池)、もう一面は今年度 (令和5年7月に新設) から稼働させた池 (以下、新池) であった。毎日夕刻に、新池には8-10月に浮き餌200gを、旧池には5-10月に練り餌200-500gを給餌した。水温・照度ロガー (Onset社、MX2202) を各面の底層に設置した。塩分は、捕獲調査時に導電率計 (マザーツール社、CD-4307SD) で計測した。



写真1 試験に利用した露地池の様子

露地池に収容する小型ウナギ(30P~20Pサイズ)の供試魚には、低成長魚 (以下、30Pヒネ)、新仔 (以下、30P新仔)、イソフラボン餌料給餌の新仔 (以下、30P雌誘導新仔) の3群を、大型ウナギの供試魚には、3Pサイズ (以下、3Pウナギ) を用いた。

旧池には、30Pヒネ、30P新仔、30P雌誘導新仔をそれぞれ90個体ずつ、6月5-6日および17日に形態計測およびPITタグを腹腔に挿入をした後、池入れした。3Pウナギは、6月7日に形態計測およびPITタグ挿入をした後、静岡県水産海洋技術研究所で管理し、8月4日に63個体を池入れした。

新池放流用には30Pヒネ、30P新仔、30P雌誘導新仔を各群90尾用い、6月に形態計測とPITタグを挿入を実施し、新池完成まで旧池内でウナギ籠に入れ保管した。保管中、ウナギ籠内で半数程度が死亡したため、8月3日に死亡個体数と同数分、すなわち30Pヒネ61個体、30P新仔46個体、30P雌誘導新仔64個体を新たに用意し、形態計測およびPITタグ挿入を行った。同日、これらの個体を新池に池入れし、翌4日に3Pウナギ65個体を池入れした。

秋季には、露地池育成個体について、塩水・低水温条件による銀化促進効果がみられ

るかという試験を実施した。当初計画では、隣接する用水路から満潮時に新池へと水を汲み入れることで、新池を塩水化する予定であったが、新池は稼働させて間も無く、浮き草や餌生物量が旧池とは全く異なる状況であり、旧池と新池の違いは塩分以外の要素も大きいものと考えられた。実際に、結果の項で詳述するが、両池を淡水のまま稼働して、ウナギの成長を調べたところ、旧池では小型ウナギで良好な成長が見られたのに対して、新池での成長は不良であった。新池をそのまま淡水池として利用し、どの程度で旧池の状態となるかを調べる必要があると判断した。新池以外で、塩水によるウナギの銀化促進への影響をみる必要があると考え、両池の水が排出される区画(以下、出口池)を利用することとした。この出口池は、およそ 10 平米くらいの大きさで、潮の満ち干きにより、塩分変化が起こる場所である。10 月に旧池、新池で捕獲された 3P ウナギについて形態計測および血液採取後、10 個体(旧池から 1 個体、新池から 9 個体)を出口池へ移し替えた。これと同時に、標識タグのないウナギ 6 個体(旧池から 5 個体、新池から 1 個体)についても出口池へ移し替えた。旧池で今年以前に池入れされ大型に育成したウナギ 1 個体が 6 月 20 日にたも網で捕獲できたため、露地池で長期間育成したウナギの成熟度を知るための参考になると考え、静岡県水産・海洋技術研究(焼津本所)へ輸送した。この個体は、10 月まで 20-24℃の海水で保管し、10 月-11 月にかけて 15℃へと徐々に水温低下を経験させた後、11 月 29 日に解剖し、生殖腺重量を測定した。

露地池の捕獲調査には、塩ビ管の 3 種(φ 50mm、φ 30mm、φ 16mm)をそれぞれ 6 本ずつ束ねたトラップを 1 セットとし、旧池、新池でそれぞれ 25 セットを用いた。出口池では、φ 50mm の塩ビ管 6 本を束ねたトラップを 6 セット用いた。これらを 10 月 3 日に設置し、10 月 18 日-19 日、11 月 21 日-22 日、12 月 14 日-15 日に旧池、新池および出口池(10 月は除く)で、捕獲調査した。捕獲した個体は、全長、体重、ステージを記録し、PIT タグのないものには新規に PIT を入れて、再度、池入れした。10 月、11 月、12 月に捕獲した全長 45cm 以上の個体については、血中性ステロイド測定のため、血液採取した。12 月には、旧池 2 個体、新池 3 個体、出口池 7 個体を解剖に供し、生殖腺、肝臓、消化管の重量を記録した。なお、銀化ステージは、Okamura et al.(2008)の Y1、Y2、S1 に加えて、本研究では S0 を追加することとした。前年度の試験で、胸鰭黒化が成熟促進と並行して起こる外部形態の変化であることがわかったが、Okamura et al.(2008)の Y2 の胸鰭黒化程度の範囲が非常に広く、この区分のみでは黒色素の黒化程度を十分に把握しきれないためである。そのため、胸鰭の縁辺部にわずかに透明部分が残る、胸鰭全体が黒化した状態を、本研究では銀化直前ステージ(S0)と評価することとした(図 1)。

従来ステージ (Okamura et al. 2009)	本研究	基部の金属光沢	黒色素胞の状態	
Y1	Y1	×	黒色素の点状	
Y2	Y2	○	黒色素が重なり合うが、密度が薄く、透けている	
Y2	Y2	○	中央部は密に並び、不透明である。縁辺に向かって放射状に黒色素が発現	
Y2	S0	○	縁辺部にわずかに透明部分があるが、それ以外は黒い	
S1	S1	○	黒色素が鱗全体に発達し、縁辺部も黒い	

図1 本研究における胸鰭黒化による銀化ステージ区分

結果

露地池の水温・塩分環境

水温度・照度ロガーによる計測結果を図2に示す。新池、旧池とも、8月は30℃前後で、以降徐々に低下し、12月には10℃前後であった。新池の日内水温変動は、旧池よりも大きい傾向が見られた。旧池ではホテイアオイやヨシが繁茂しており、水中へ日照が届きづらいため、水温変動を小さくしている可能性がある。新池、旧池の塩分は、0.1-0.4‰であった。12月調査時の出口池の塩分は、底層19.1‰、中層3.0‰、表層0.3‰であり、汽水環境となっていた。

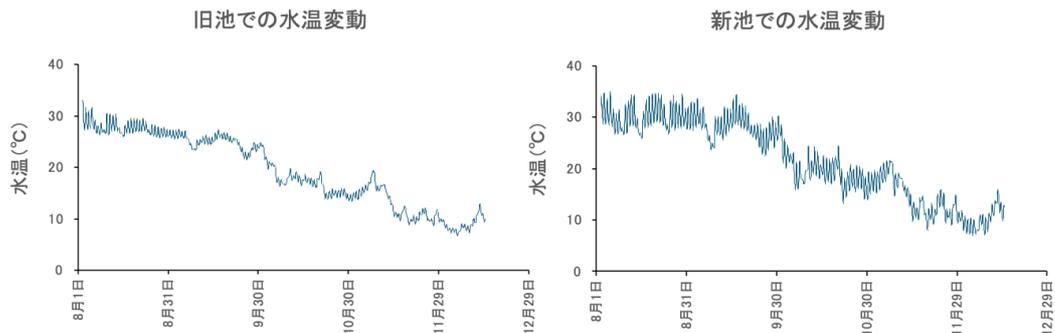


図2 2023年8月-12月における旧池と新池での水温変動

露地池種類別、育成種苗由来別のウナギの成長

8月に池入れ、10-12月に再捕獲された3Pウナギは、新池で19個体、旧池で1個体であった。いずれも全長の成長は見られず、体重は大きく減少していた(新池で月当たり平均20.6g減少、旧池で月当たり17.2g減少、図3)。10-12月の新池調査で、8月に池入れした30Pヒネ1個体、30P新仔2個体、30P雌誘導新仔1個体が再捕獲された。

30P 新仔 1 個体では体重の成長（月当たり 5.1g 増加）が見られたが、他の 3 個体では体重の減少が見られた（図 3）。10-12 月の旧池調査で、6 月に池入れした 30P ヒネ 2 個体、30P 新仔 4 個体、30P 雌誘導新仔 1 個体が再捕獲された。これら 7 個体の体重はいずれも大きく成長しており、月あたり平均 23.3g 増加していた（図 3）。7 個体のうち 6 個体では、4-5 ヶ月間に全長が 12.4-16.2cm 伸び、体重が 88.5-166.3g 増加するという顕著な成長が見られた（写真 2）。10 月-12 月の間に捕獲-再捕獲した個体（図 3 のタグなし群、初回捕獲時にタグ付け）では、両池ともに体重が減少傾向で、減少幅は新池で大きい傾向が見られた（図 3）。

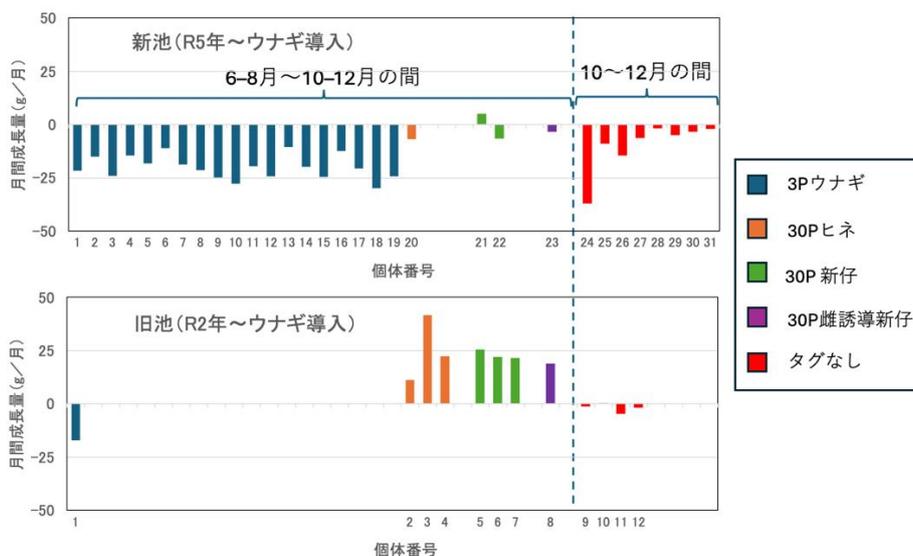


図 3 新池、旧池における再捕獲個体の月間成長量

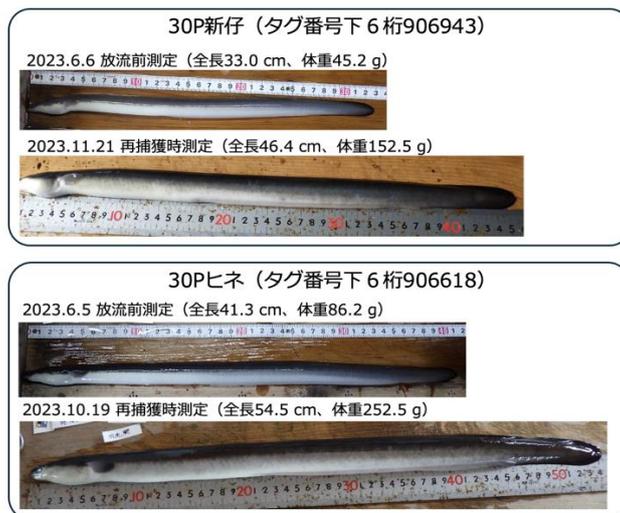


写真 2 旧池で高成長を示した再捕獲個体

銀化および成熟状況

旧池と新池の個体の銀化ステージを調べたところ（図4）、10月と11月には、1個体を除き全てY2（n=33）であった。旧池において、12月に捕獲された5個体のうち2個体は、S0およびS1であった。出口池の個体は、11月には10個体のうち6個体がS0およびS1であり、12月に6個体すべてがS0およびS1であった。塩分の差し込む出口池へ移し替えたウナギおよび自発的移動で出口池に生息していたウナギは、旧池や新池の淡水環境に比べ銀化が進んでいる傾向があった。

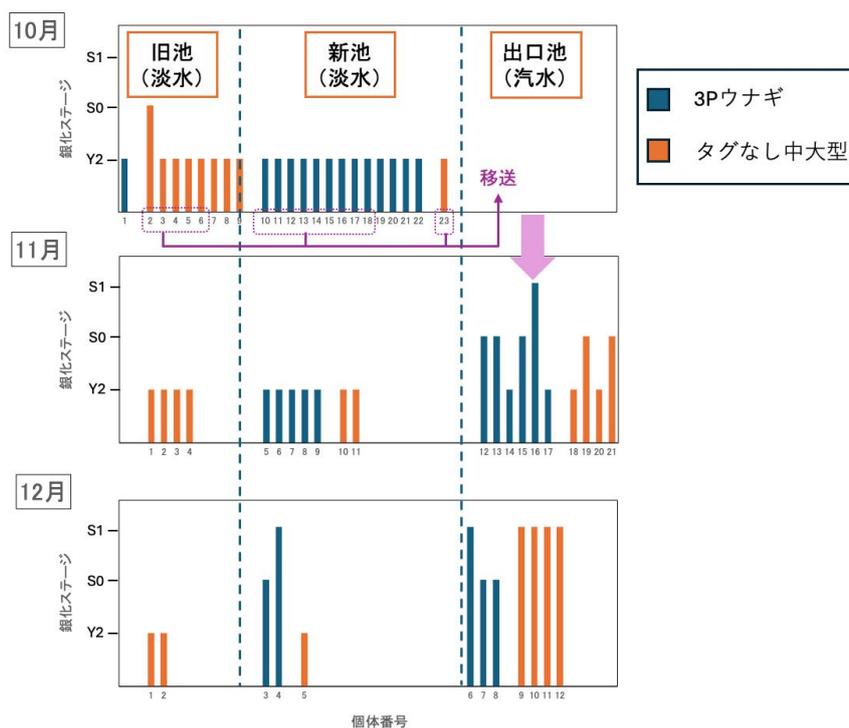


図4 新池、旧池、出口池のウナギの銀化ステージ

*各月の個体番号は、同月内における番号であり、月間で個体が対応するわけではない

成熟に関わる内分泌状況については、銀化・成熟に伴って上昇されると言われる血中 11-KT（ケトテストステロン）濃度に着目し、結果を述べる（図5）。

10月に捕獲した3Pウナギの平均血中11-KT濃度は、旧池で41 pg/ml（n=1）、新池で34 pg/ml（n=13）であった。タグなし中大型個体（全長45cm以上）の平均血中11-KT濃度は、旧池で13 pg/ml（n=8）、新池で8 pg/ml（n=1）であった。

11月に捕獲した3Pウナギの平均血中11-KT濃度は、新池で280 pg/ml（n=5）、出口池で180 pg/ml（n=6）と、10月に比べて高い傾向が見られた。タグなし中大型個体（全長45cm以上）の平均血中11-KT濃度は旧池で45 pg/ml（n=4）、新池で646 pg/ml（n=2）、出口池で762 pg/ml（n=4）であり、新池と出口池で高い傾向が見られた。11月の出口池の個体番号20,21は、10月に新池あるいは旧池から移し替えたものでなく、出口池で初

めて捕獲されたものであり、自発的に出口池に移動し生息していたものと考えられる。その1個体の血中 11-KT 濃度は、最高値 1771 pg/ml を示した。

12月に捕獲した 3P ウナギの平均血中 11-KT 濃度は、新池で 26pg/ml、出口池で 16 pg/ml (n=13) と、11月に比べて低い傾向が見られた。タグなし個体(全長 45cm 以上)の平均血中 11-KT 濃度は旧池で 3 pg/ml (n=2)、新池で 14 pg/ml (n=1)、出口池で 72 pg/ml (n=4) であり、いずれも 11月に比べて低い傾向が見られた。

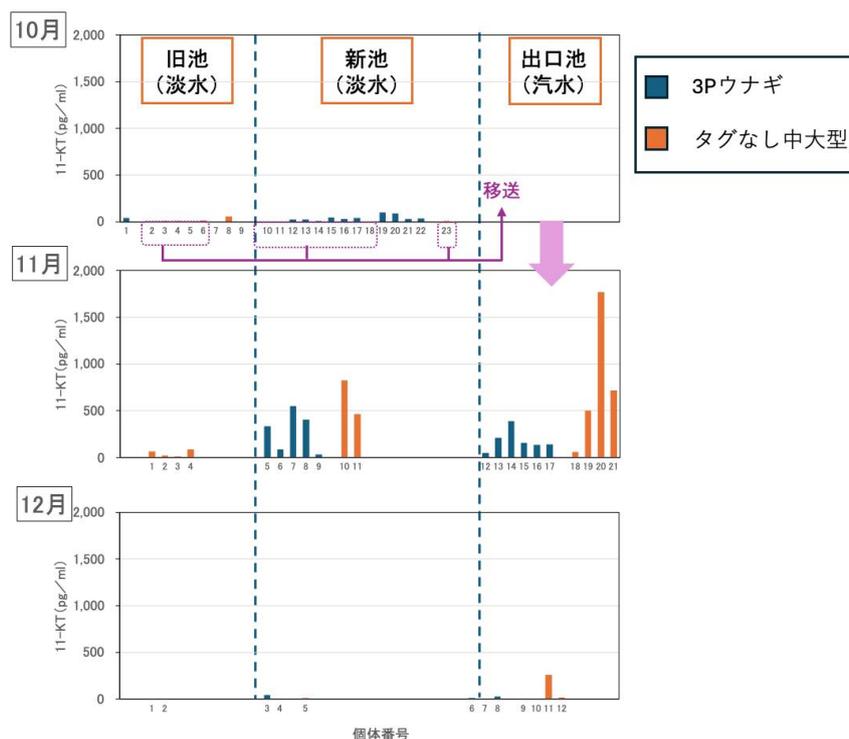


図5 新池、旧池、出口池のウナギの血中 11-KT 濃度

*各月の個体番号は、同月内における番号であり、月間で個体が対応するわけではない

旧池で今年以前に池入れされ、大型ウナギとして捕獲された個体は、捕獲直後の 6 月の計測時、全長 773 mm、体重 710 g、銀化ステージは Y2 であった (表 1)。静岡県水産・海洋技術研究 (焼津本所) で 20-24°C の海水で無給餌で管理し、10 月-11 月にかけて 15°C へと徐々に水温を低下させた後、再度計測したところ、全長 777 mm、体重 665.7g、銀化ステージは S0、性は雌であった (表 4)。解剖の結果、生殖腺指数 (GSI) は、2.36 であり、天然個体の雌と同等の値を示した。

表 1 浜名湖露地池 (旧池) で育成されたウナギの海水低水温処理後の計測結果

	全長	体重	眼径指数	銀化ステージ	GSI
2023/6/21	773	710	4.2	Y2	
2023/11/29	777	665.7	5.9	S0	2.36

以上のことから、長期間粗放的な状態で稼働されている旧池（浮き草で一面を覆われ、テナガエビやカニ類の甲殻類も多く見られる）では、小型ウナギで極めて良い成長が認められ、一方、大型ウナギが池入れされても成長につながらないことが示唆された。水をいれて間もない新池では、大小の種苗サイズに依らずウナギの成長は認められなかった。新池が旧池同様の条件となるには時間を要するものと考えられ、ウナギ育成に適する露地池条件を知る上で、今後も同池の変遷をモニタリングする必要があると考えられた。銀化を促すには、出口池のような潮の入る塩分環境で、かつ季節的な水温低下が有効であることが本野外試験でも確認できた。露地池で長期間かけて大型に育成したと考えられるウナギの血中 11-KT 濃度および生殖腺成熟状態は天然個体と同様に高く、天然個体と遜色ない銀ウナギ作出のため、露地池での育成が有効である可能性が示唆された。

(iii) 正常な回遊行動をさせるための飼育・放流手法

目的：銀ウナギとなった養殖個体が天然個体と相違なく回遊行動をするための飼育・放流手法を把握する

昨年度までの結果

Sudo & Tsukamoto (2015) は、天然銀ウナギの回遊衝動が高まると隠れ家（塩ビパイプ）から出る時間が多くなり、その時の血中 11-KT 濃度が高いことを報告した。R2-4 年度に、養殖ウナギに 11-KT 投与して行動試験を実施した結果、11-KT の血中濃度上昇のみでは天然個体で報告されるような回遊衝動の高まりが見られなかった。一般的な養殖個体は、まだ産卵回遊の準備ができておらず、11-KT を上昇させても回遊衝動に繋がらない可能性が考えられた。天然の銀ウナギと遜色ない準備段階の個体を作るため、前述した露地池育成ウナギに着手した。一方、養殖ウナギが外洋で天然個体同様の日周鉛直行動を行うかを調べる放流試験を実施しており、R3 年度、1 個体の追跡結果が得られ、天然個体と同様、日周鉛直移動をする可能性が高いことがわかった。R4 年度は、放流前経験水温が養殖ウナギの日周鉛直行動へ影響するかも含め、養殖ウナギの回遊行動を調べるため、ポップアップ式タグを装着して 8 個体を黒潮域で放流試験に着手した。

今年度の実施計画

天然個体を用いた産卵回遊追跡調査では、日周鉛直移動を行うことが多数報告される。産卵回遊中の日周鉛直移動は、捕食者からの回避や成熟のコントロールのために重要な行動と考えられる。Chow et al.(2015)は、放流後三日目までを超音波発信機で追跡し、

養殖ウナギで日周鉛直移動がみられなかったことを報告している。Chen et al.(2018)は、台湾沿岸域に養殖ウナギを放流して日周鉛直移動を示したと報告した。養殖ウナギが再生産参加への期待を高めるためには、日周鉛直移動するような放流前の飼育条件を把握する必要がある。養殖ウナギは、天然個体に比べ、常に高水温条件下で成長しており、低水温経験が少ないことが考えられる。日周鉛直移動をするには、深海の低水温への順応が必要となる可能性が考えられる。そこで、本試験では、放流前の低水温経験が放流後の日周鉛直行動に影響するかを調べることにした。今年度、R4 年度末に黒潮域に放流した 8 個体のウナギから記録データが得られたので、その分析を行うことにした。

方法：

供試魚には、静岡県水産・海洋技術研究所（浜名湖分場）で R2 年産シラスウナギから養成された 1 kg 超のウナギを用いた。これらはシラスウナギ以降、23℃以上で飼育されたものである。これらを 2022 年 12 月上旬に静岡県水産・海洋技術研究所焼津本所へと輸送した。全長、体重等の形態計測を実施したのち、12 個体を海水へ馴致させた。6 個体は 23℃海水条件（対照区）で、6 個体は深層水を注入して 12℃へ水温を低下させて飼育した（低水温処理区）。1kg 以上の大型となるのは雌であると考えられたため、雌の人工催熟で使用されている rFSH を用いて、船へ輸送する前に成熟を誘導した。rFSH 投与が水温低下区のウナギに対して成熟効果が遅いと想定されたため、12 月 20 日、1 月 4 日の 2 回、1ml/kg 体重の分量で rFSH を注射した。対照区のウナギには、1 月 4 日、同じ分量で rFSH を注射した。これらを 1 月 12 日、静岡県水産・海洋技術研究所（焼津本所）から水産研究・教育機構蒼鷹丸へ輸送した。蒼鷹丸の甲板に、500L 活魚タンク（幅 100cm×奥行 100cm×高さ 70cm）を 2 つ設置し、ヒーターおよびクーラーで、各水温を維持した。

1 月 13 日、船上にて麻酔後、形態計測をおこない、ポップアップ式タグ（wildlife 社、miniPAT）を装着するための 3 つのステンレス輪をウナギの背中に細工した。タグの装着方法は、Økland et al. (2013) の westerberg method に従った。タグは 6 ヶ月後に切り離されるようにプログラムした。

1 月 15 日に、北緯 32 度 30 分、東経 138 度 45 分の海域で、ポップアップ式タグを取り付け、ウナギをたも網に入れて、柄を海中まで伸ばし放流した。放流海域は、北方向

に流れのある黒潮域内で、黒潮流軸より少し沖側に位置した。

結果

試験魚の外部形態

放流試験のため、船上に載せた養殖ウナギは全長 80cm 以上、体重は 1kg 以上であった（表 2）。銀化ステージが S1 以降であった 8 個体（対照区 4 個体、低水温処理区 4 個体）にポップアップ式タグを装着し、放流試験に使用した。

表 2 放流試験に用いたニホンウナギの基礎的生物情報

試験区	Pop-up ID	全長 (cm)	体重 (mm) *1	眼径指数	銀化ステージ
対照区	236887	84	1297	7.7	S1
対照区	236888	91.8	1471	7.0	S1
対照区	236889	92	1569	8.4	S1
対照区	236890	83.3	1435	7.6	S1
低水温処理区	236891	100.4	2352	8.0	S1
低水温処理区	236892	89.8	1403	6.2	S1
低水温処理区	236893	87	1280	6.8	S1
低水温処理区	236894	87.9	1512	7.7	S2

*1 体重は12月13日に計測した時のもの

ポップアップ式タグの浮上

放流した 8 個体のうち 7 個体のポップアップ式タグから衛星経由でのデータの受信があった（表 3）。放流後 1-38 日後に受信が確認された。放流位置より東側でタグが浮上する傾向が見られた（図 6）。本試験では捕食者に喰われて体内に留まっていた、あるいはタグがウナギから脱落し漂流していたと推察される期間があった個体が多く見られ（次項で述べる）、タグの浮上位置はウナギの放流から浮上までの間の移動を必ずしも反映しているわけではないものと考えられた。

表 3 ウナギの放流およびポップアップ式タグが浮上した日時と時刻

Tag ID	放流		浮上		
	時間 (JST)	地点	時間 (JST)	地点	
6887	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/2/22 10:32	36.41° N	144.22° E
6888	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	-	-	-
6889	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/1/16 8:29	32.60° N	138.65° E
6890	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/2/5 6:07	34.09° N	138.85° E
6891	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/2/16 6:02	30.55° N	142.90° E
6892	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/1/22 10:23	32.47° N	137.62° E
6893	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/2/18 5:20	33.40° N	139.53° E
6894	2023/1/15 8:20	32.50° N 138.75° E	2023/2/5 5:07	32.18° N	139.38° E

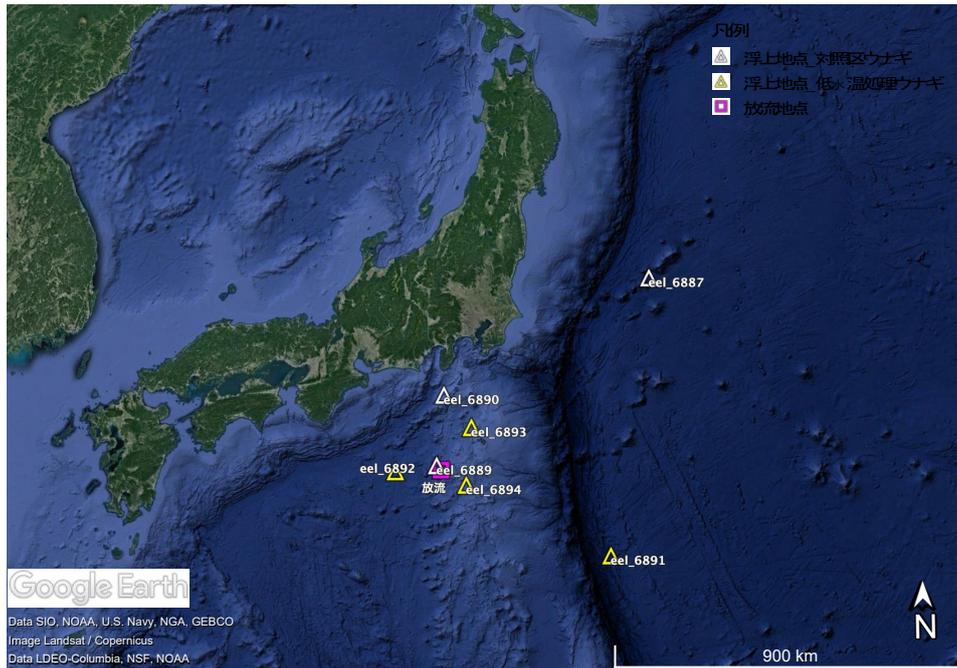


図6 養殖ウナギの放流位置とポップアップ式タグの浮上位置

設定より早期に浮上した原因

ポップアップ式タグは、同じ水深に留まり一定期間が経過した場合、あるいは、水深 1800m より深く沈んだ場合には、緊急浮上する仕組みとなっていた。本試験では、水温と水深のデータから、8 個体のうち 4 個体が被食された可能性が高いと考えられた。なお、被食されて捕食者の体内に入ると、水深の変化に比べて水温の変化が遅くなると考えられ、このような状況があった時を被食と判断した。被食されたタグが体外に排出されたのち、上記いずれかの条件となって緊急浮上したものと考えられた

(表 4)。ほかに、何らかの理由により脱落が起こったものが 2 個体おり、もう 1 個体は放流翌日に理由不明で深海へ沈下し、緊急浮上した。これまでのニホンウナギ天然個体および養殖個体のポップアップ式タグによる産卵回遊追跡では、長くて 2 ヶ月程度でタグが浮上することが報告されている (Manabe et al. 2009; Chen et al. 2018; Higuchi et al. 2021)。その理由として、ニホンウナギの比較的小さい体サイズが一因であると推察されていた。本試験では、このことを考慮し、1kg 以上の大型の養殖ウナギを供試魚として試験を行ったが、追跡期間の延長効果を認めることはできなかった。被食が原因と推察された緊急浮上が半数あったことから、外洋での産卵回遊中、ニホンウナギは捕食されるリスクが高いものと推察された。

表 4 ポップアップ式アーカイバルタグのデータで見られた異変の日時と内容

Tag ID	異変		内容
	時間 (JST)	推定原因	
6887	2023/2/14 1-3pm	被食	2/14 1-3pmに被食された可能性。1週間後に排出され浮上。
6888	-	-	
6889	2023/1/15 5pm-1/16 1pm	不明	1/15 5pm-1/16 1pmに異変。緊急浮上。
6890	2023/1/24 9-10pm	脱落	1/24に脱落后、水深600~700m層で12日漂流。
6891	2023/1/24 6am	被食	1/24 6am頃に被食された可能性。脱落后、表層で24日漂流。2/12 3am頃に不可解な潜航あり
6892	2023/1/15 12-2pm	被食	放流直後(1/15 12-2pm)に被食された可能性。水深と水温に位相差がある。
6893	2023/2/4 5-7am	脱落	2/4に脱落后、水深600~700m層で14日漂流。
6894	2023/1/24 1-7am	被食	1/24 1-7amに被食された可能性。水深に対して、水温変動が小さい

養殖ウナギの日周鉛直移動

対照区の2個体、低水温処理区の3個体について、放流後にウナギが経験した水深および水温のデータが得られた (図7)。水深および水温は処理区間で相違は認められなかった。どの個体も放流直後から日周鉛直移動しており、昼間には水深700m前後を、夜間には水深200m前後を遊泳していた。本試験の養殖ウナギが示した日周鉛直移動は、放流前の経験水温による影響はなく、また養殖ウナギでも天然個体と同様、正常な行動を行うことを示唆するものであった。

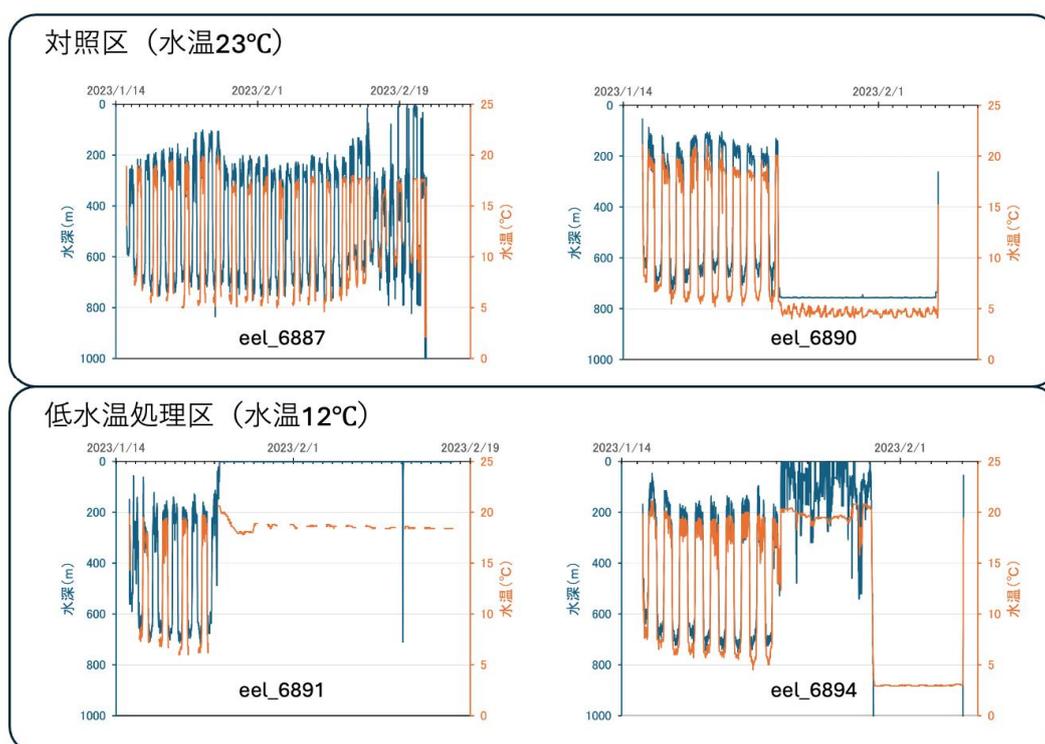


図7 ポップアップ式アーカイバルタグから得られた水深と水温の時系列データ

課題と対応策

温室ハウスで育てられた養殖個体と天然個体にはそもそもどのような (行動や生理面に) 違いがあるのか不明であり、今後、両者の違いを明らかにする必要がある。そのた

めには、様々な生息場所の天然個体をサンプルとして、温室の養殖ウナギと飼育試験や遺伝子発現等の分析による比較を行う必要がある。両者の違いに関する知見をもとに、露地池で育成されたウナギが天然個体に遜色ないものであるかをあらためて評価することができるものと考えられる。また、露地池のウナギの成長や成熟に関する基礎的生物情報もまだ十分ではなく、引き続き調査を継続して、成長と成熟に影響する生育環境の要素を抽出していく必要があると考えられる。

参考文献

- Chen, S. C., Chang, C. R., & Han, Y. S. (2018). Seaward migration routes of indigenous eels, *Anguilla japonica*, *A. marmorata*, and *A. bicolor pacifica*, via satellite tags. *Zoological Studies*, 57.
- Chow, S., Okazaki, M., Watanabe, T., Segawa, K., Yamamoto, T., Kurogi, H., ... & Miyake, Y. (2015). Light-sensitive vertical migration of the Japanese eel *Anguilla japonica* revealed by real-time tracking and its utilization for geolocation. *PLoS One*, 10(4), e0121801.
- 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.
- Manabe, R., Aoyama, J., Watanabe, K., Kawai, M., Miller, M. J., & Tsukamoto, K. (2011). First observations of the oceanic migration of Japanese eel, from pop-up archival transmitting tags. *Marine Ecology Progress Series*, 437, 229-240.
- 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.
- Økland, F., Thorstad, E. B., Westerberg, H., Aarestrup, K., & Metcalfe, J. D. (2013). Development and testing of attachment methods for pop-up satellite archival transmitters in European eel. *Animal Biotelemetry*, 1(1), 1-13.
- Sudo, R., & Tsukamoto, K. (2015). Migratory restlessness and the role of androgen for increasing behavioral drive in the spawning migration of the Japanese eel. *Scientific Reports*, 5(1), 17430.
- 吉川昌之(1995a) ニホンウナギ *Anguilla japonica* 養殖魚における体重、年齢と生殖腺の成熟度の関係、ならびにその季節変化について. 静岡水試研報. 30, 23-27.
- 吉川昌之(1995b) 天然および養殖ニホンウナギ *Anguilla japonica* の大型魚における性比と体重および年齢の関係. 静岡水試研報. 30, 29-34.

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課題番号		事業実施期間	令和5年度
課題名	河川の安定性に着目した二ホンウナギの生息状況調査		
担当者	井上幹生、三宅洋、畑啓生（愛媛大学）、 棟方有宗（宮城教育大学）、朝倉大河（水産研究・教育機構）		

令和5年度の成果の要約：

典型的な扇状地河川である愛媛県の重信川水系を対象とし、流量および河床の変動が激しい河川本流とその周辺に存在する比較的安定した湧水池とで、二ホンウナギの生息密度、サイズ分布、肥満度およびエサ量を比較した。その結果、湧水池が河川本流と同程度に二ホンウナギに利用されていることが示されたものの、安定生息地としての湧水池の特別な効果を示唆するような結果は得られなかった。

また、重信川流域の中でも河道攪乱が起りやすいと考えられる下流域における河道の経年変化と、それらが二ホンウナギの生息分布に与える影響を今後、継続的にモニターする端緒として約2 kmの河道区間の3次元画像撮影を行うとともに、得られた画像に基づく礫サイズの計測と礫のサイズ分布状況を調べた。

年度計画：

近年、ウナギ等内水面資源の採捕量は著しい減少傾向にある。さらに今後は気候変動による水温上昇や降雨による攪乱頻度・強度の激化による悪影響も予想される。このような状況の中、内水面資源の維持・回復のためには、生息環境の調査・分析を通じて漁場環境に応じた資源増殖等の手法を検討していく必要がある。本課題では、今後の気候変動への対応を意識し、河川の安定性に注目する。流量および河床地形の変動が激しく、かつ、湧水水域を伴うという特徴を持つ扇状地河川流域を対象にすることで、環境（流量、水温）の安定性が異なる場所間で二ホンウナギ（以下、ウナギと呼ぶ）およびその餌生物（小型魚類、無脊椎動物）の生息状況を比較する。また、河川環境の変動を効率的にモニタリングする手法として、ドローンを用いた河道撮影による画像解析の有効性を検討する。

方法：

1) 環境の安定性による比較

典型的な扇状地河川である愛媛県の重信川水系を対象とし、ウナギの調査地として、流量および河床の変動が激しい本流に、流程に沿って4カ所、本流周辺に存在する比較的安定性の高い湧水

池に3か所の調査地を設定した。本流最下流の調査地は感潮域の上流端にあたり、上げ潮時には海水が流入する。この感潮域の調査地（本流0）のおよそ2km、7km、10km上流に位置する出合床止、井門霞、一番泉床止付近に調査地を設定した（それぞれ、本流2、本流7、本流10）。湧水池は、感潮域からおよそ7km、8km、9kmに位置する赤坂泉、夫婦泉、広瀬霞湿地に調査地を設定した（それぞれ、湧水7、湧水8、湧水9）。それぞれの調査地において岸際に沿って100～200m程度の範囲を電気漁具により通電し、ウナギを捕獲した。採捕されたウナギには現地で麻酔を施し全長と重量を測定した後、放流した。重量（g）と全長（cm）を用いて、「 $1000 \times \text{重量g} / (\text{全長cm})^3$ 」で肥満度を算出した。ウナギ密度については、岸際長100 mあたりの個体数で示した。この調査を、2023年6月から10月にかけて、本流については毎月、湧水池については2カ月に1度行った。

ウナギの餌生物に関しては、湧水7、湧水8、湧水9、本流7、本流10および感潮域からおよそ8 km上流の本流8にて底生無脊椎動物と魚類の生息密度を調査した。底生無脊椎動物については、各調査地において、流れのある場所と流れの穏やかな場所から3か所ずつ、合計6カ所からキックサンプリングを用いて採取した。魚類については流れのある場所と流れの穏やかな場所から2か所ずつ、計4カ所に調査区画（10m²）を設定して電気漁具により採捕した。この調査は2023年9月に行った。

2) ドローンを用いた重信川河道の3次元撮影と礫サイズ・分布の解析

河道の攪乱が起りやすいと考えられる重信川下流域において河道状況の経年変化をモニタリングし、そこに生息する二ホンウナギ等の水生生物との関係性を明らかにする端緒として、ドローンによる3次元画像撮影と画像データに基づく礫サイズ・礫のサイズ分布の解析を行った。2023年8月2日、重信川下流域の重信橋と久谷大橋の間の河道をドローン（DJI社ファントムII）で上空から反復撮影し、3次元画像（1ピクセル=2 cm）を作成した。その後、画像データから河道の礫サイズを読み取り、5 x 5 mのグリッド内の礫の個数やサイズ分布を算出し、流域内のグリッド間の礫組成を可視化して比較した。

結果：

1) 環境の安定性による比較

重信川本流におけるウナギの生息密度については、下流から上流に向かって密度が低下するという一般的傾向が見られた（図1）。感潮域である本流0においては100 mあたり40～80個体と高い密度を示したが、中流域に位置する本流7、本流10においては、多くの場合、100 mあたりの個体数は10個体以下であった。湧水池でも、ほとんどの場合が100 mあたり10個体以下と低密度であり、流程上の位置が同程度の本流7、本流10と比べると同程度、またはやや低めであった。

本流におけるウナギのサイズ分布の時空間的動態からは（図2）、上流にいくにつれて小型個体

が少なくなるという一般的傾向が確認されるとともに、全長10cm程度になるまでは感潮域に留まっていることが示唆された。感潮域である本流0では、ウナギ密度が高かったが、その多くが全長20cm未満の若齢個体であることが示された。特に6月ではその8割以上が20cm未満の個体が占めた。本流0においては、それら小型集団が、月を追うごとに成長していく様子がうかがえる。また、全長10cm未満の個体は本流0でしか確認されなかったが、9月には本流0においても僅かしか見られなくなったことから、9月には多くの小型個体（おそらく新規加入個体）が全長10cm以上に成長したことが示唆される。感潮域から約2km上流の本流2においても小型個体の割合が高かったが、特に10月には全長20cm未満の割合が9月に比べて増加した。このことは、感潮域付近で10cm以上に育った個体が遡上加入したことを示すものかもしれない。中流域に相当する、個体数密度の低い本流7、本流10、湧水7、湧水8、および湧水9においては全長30cm以上の大型個体の割合が高くなった。

3つの湧水池と、流程上の位置が同程度である本流7、本流10との間で肥満度を比較した結果（図3）、6月には湧水8で本流7よりも有意に高い傾向が認められたが、8月、10月では有意な差は認められなかった。ウナギの潜在的なエサとなりうる底生無脊椎動物と魚類の生息密度を本流と湧水で比較すると（図4）、底生無脊椎動物および魚類のいずれも重信川本流のほうが高い傾向が認められた。

2) ドローンを用いた重信川河道の3次元撮影と礫サイズ・分布の解析

ドローンによって重信橋から久谷大橋にかけての区間で撮影した3次元画像を下流側（以下、地点1）および上流側（以下、地点2）の2つに分割した（図5）。次に、分割した地点1および2内を5 x 5 mのグリッドに区分し、各区分内の礫を任意に抽出してサイズを計測するとともに、各サイズの礫の個数を計数した（図6）。さらにその後、地点1、2の全グリッド内の礫のサイズを計測してグリッド内の礫の個数とサイズ分布を求めた。さらにこれらを合算し、地点内1、2内の礫のサイズ分布を求めた（図7）。以上の解析の結果、重信川の地点1、2のグリッドごと、ならびに全グリッドの礫の平均サイズ、個数、および礫のサイズ分布を示すことができるようになった（図7）。2023年度のデータからは、河道に近い地点ほど礫の平均サイズが大きく、礫の個数も多くなる傾向等が示された。

課題と対応策：

今回の調査では、変動の激しい本流に対して、比較的安定した湧水域が好適な生息場所（例えば、避難場所）を提供することを示唆するようなデータが得られることを期待した。しかし、今回のウナギ密度、サイズ分布、肥満度およびエサ量の比較結果は、「湧水池も河川本流と同様にウナギに利用されている」ということを示す程度にとどまった。しかし、ウナギの生息環境として湧水の機能を検討した例は、おそらく、これまでにほとんど無く、今後も取り組んでいく価値の

ある課題と思われる。一方で、今回、湧水池でのウナギの採捕が比較的困難であり、サンプル数が少なくなってしまったことから、採捕努力量や効率に関する調査手法の改善が必要であることもわかった。

ドローンで撮影した3次元画像に基づいて重信川下流域の5 x 5 mグリッド内の礫の組成を示すことができるようになったことから、今後はこの手法を用いて重信川の攪乱の過程（河道や各グリッド内の礫のサイズ分布の経年変化）を長期にわたってモニターすることが可能となった。また今後は河道や河道内の礫の分布と二ホンウナギ等の水生生物の生息分布状況を対比させることで河道の攪乱が二ホンウナギの生息分布に及ぼす影響を評価することが可能になると考えられる。

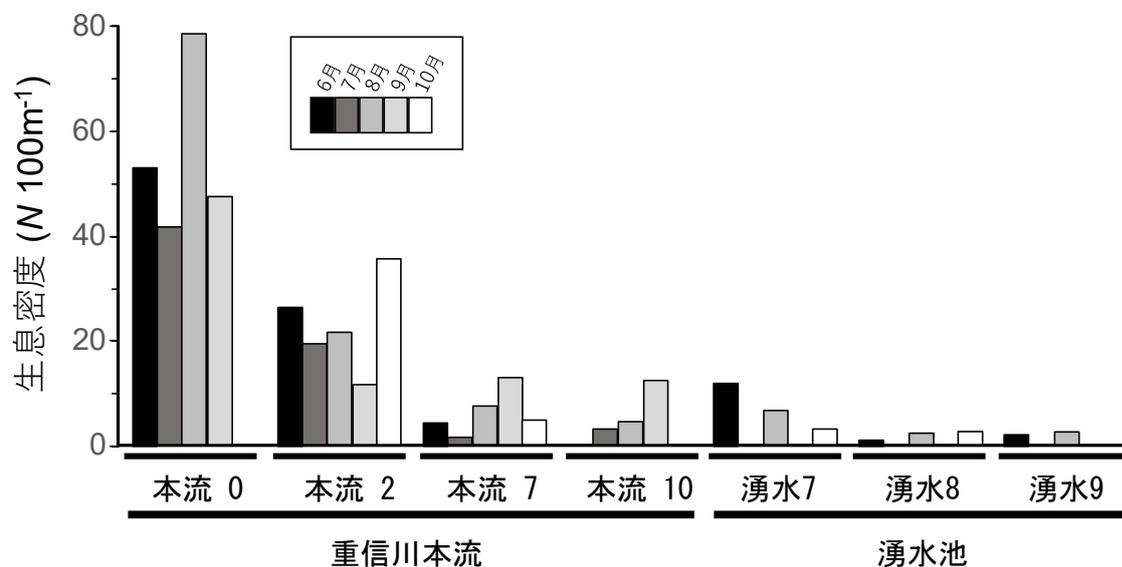


図1. 各調査地、各月における二ホンウナギの生息密度. 調査地名となっている数字は感潮域上流端からの距離(km)を示す.

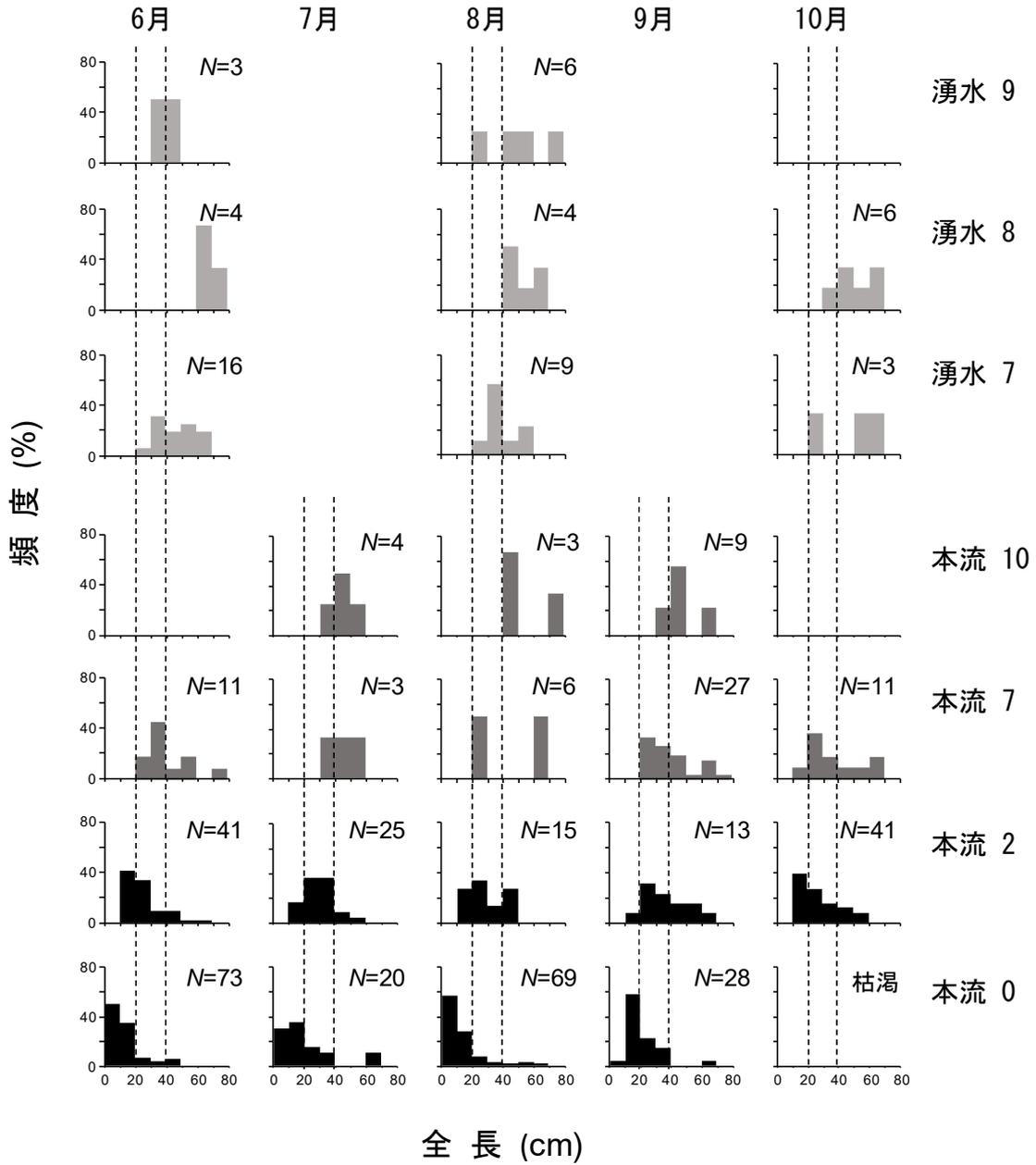


図2. 各調査地、各月におけるニホンウナギの全長分布. 調査地名となっている数字は感潮域上流端からの距離(km)を示す.

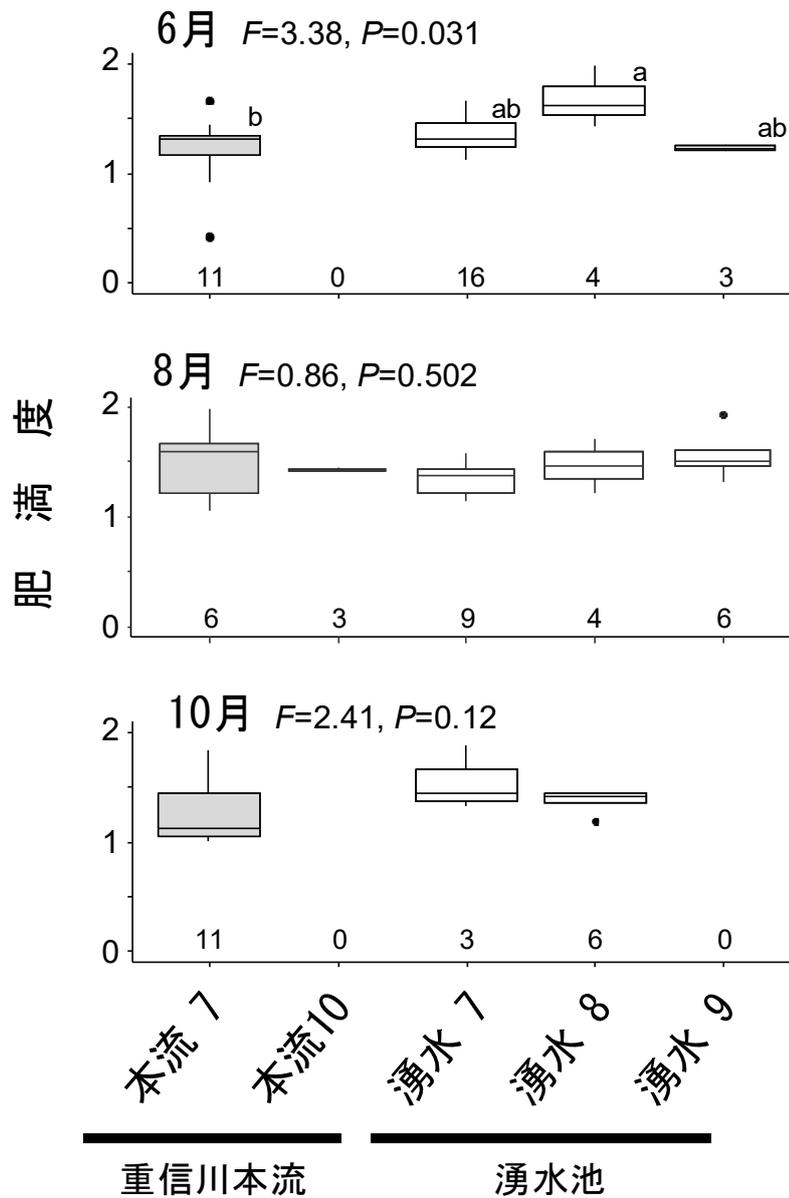


図3. 本流中流域の調査地、湧水池の調査地における各月でのニホンウナギの肥満度. 調査地名となっている数字は感潮域上流端からの距離 (km) を示す. 横軸上側の数値はサンプル数.

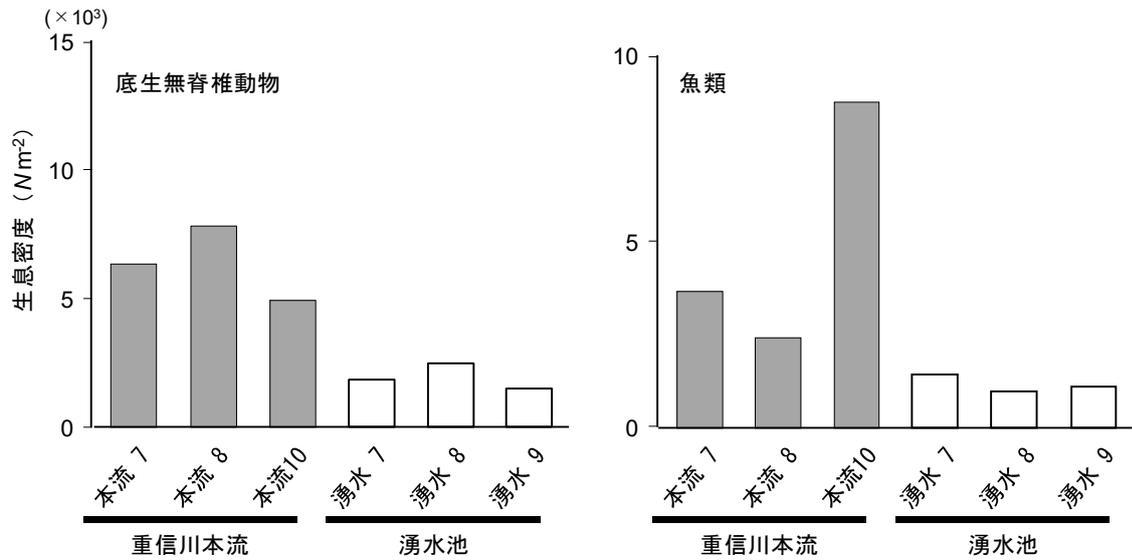


図4. 本流中流域の調査地、湧水池の調査地における底生無脊椎動物および魚類の生息密度. 調査地名となっている数字は感潮域上流端からの距離 (km) を示す.



図5. 重信川下流域で撮影した3次元画像を地点1、2に分割したところ。全撮影区間は約2 km。画像解像度は、1ピクセル=2 cmとした。

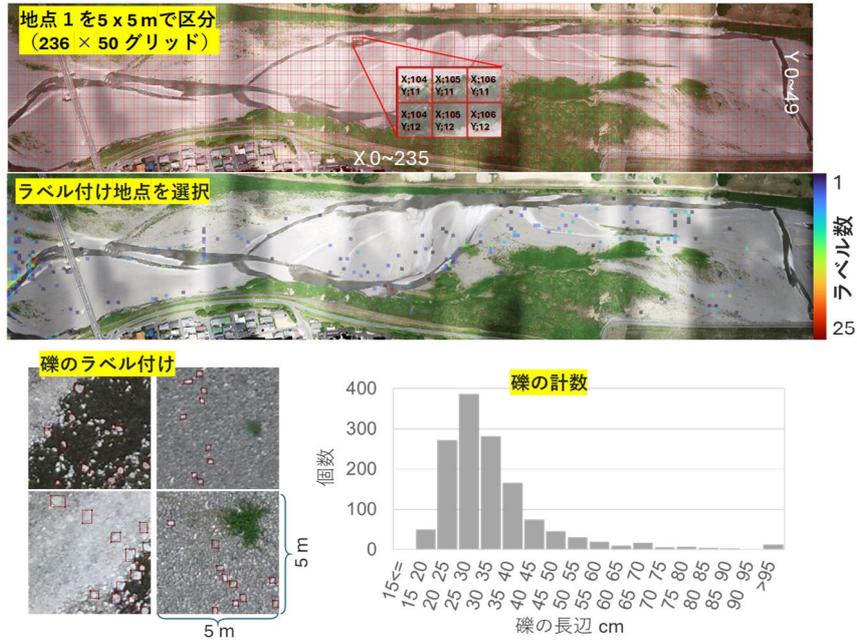


図6. 重信川下流域で撮影した地点1の画像を5 x 5 mのグリッドに区分して区分内の礫を任意にラベルし、サイズと個数を算出した。

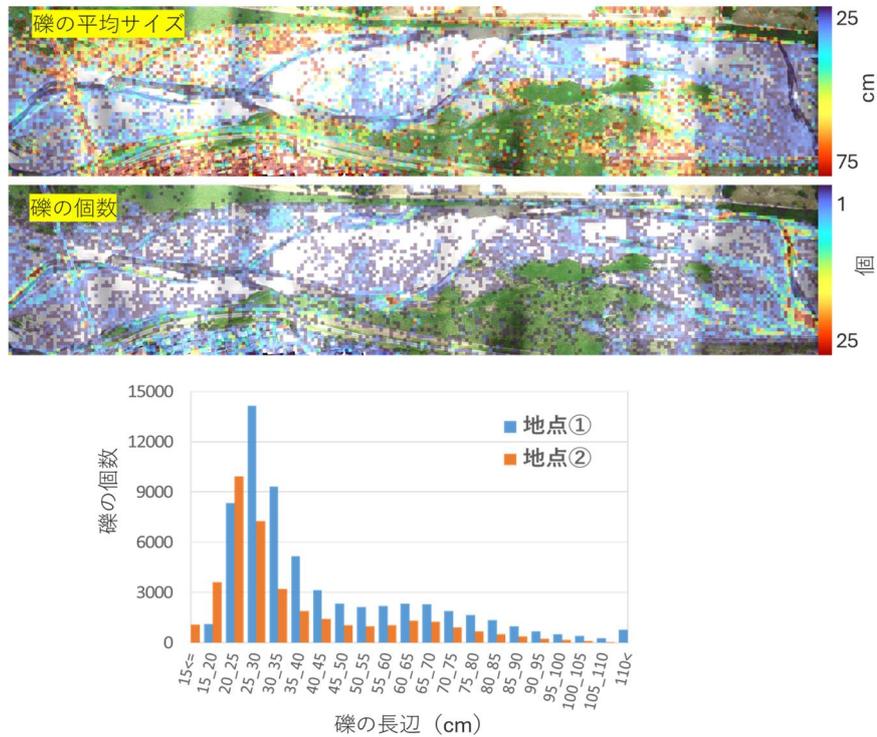


図7. 重信川下流域で撮影した地点1内の各グリッドの礫の平均サイズと個数を画像内に可視的に示した(上の2枚)。またこれらのデータを集計して地点1および2内の礫のサイズ分布(下段)を算出した。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5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		
担 当 者	上村 沙起 (鹿児島県水産技術開発センター)		

令和5年度の成果の要約：

鹿児島市八幡川の淡水域910m区間において、電気ショッカーによりニホンウナギの採捕・標識放流を反復し、先行事業を含む合計33回の調査で、延べ1,155尾のニホンウナギを採捕し、実質個体数は743尾であった。

Jolly-Seber法による調査区域内の推定生息尾数は81尾～599尾で推移し、直近の令和5年8月現在では103尾と推定された。特に、秋季は推定生息数が多く、また、再採捕率も高い。これは、調査区域の最上流が堰で遡上困難となっているため、春から冬にかけては下流から遡上してきた個体が調査区間内へ集中して標識個体数が増加したのち、冬から春にかけては降下傾向であり、新規個体の加入は少なく、翌春の再採捕率が低くなったものと推察する。一方で、令和4年度の春季は例外で、再採捕率35.9%と低かった。これは、令和2年のシラスウナギ豊漁時に調査河川へ来遊した個体が、クロコへ成長し、感潮域よりも上流である調査区域へ大量に加入したことによるものと推察される。

ニホンウナギと豪雨の関係については、豪雨があった前後の調査で採捕された個体の採捕地点の情報から、降下傾向にあることがわかったが、調査区域内の個体数全体に影響があるとはいえず、豪雨により下流へ流されてはいないことが示唆された。これは、八幡川的环境は、コンクリート等で整備されていない自然河岸が多く残っており、良好な避難場所が十分にあったためと推察する。

八幡川の調査区域(910m)の両岸について、自然河岸(植栽・砂泥)は831m(45.7%)、人工河岸(コンクリート護岸・蛇籠・網籠・石垣)は989m(54.3%)であった。また、八幡川で採捕されたニホンウナギのうち、川岸で採捕されたニホンウナギ(n=1,036)について、自然河岸と人工河岸での採捕数からウナギの密度を算出したところ、自然河岸(n=653)では0.79尾/mで、人工河岸(n=383)尾が0.39尾/mとなり、自然河岸が人工河岸よりも密度が高かった。また、自然河岸に生息するニホンウナギと人工河岸に生息するニホンウナギについて比較したところ、全長及び重量は有意差がなかったが、肥満度においては自然河岸を住处とするウナギの方が高かった。八幡川の自然護岸はニホンウナギにとって良好な住处であり、餌が豊富で、身を隠す場所が多いことから移動をする必要もなく、肥満度が高くなったと推察された。

河川工事(掘削工や除草等)の影響については、工事後のニホンウナギの分布について、工事の作業区域以外のところが多くなったように見えたが、分布に有意差はなかった。

また、工事の作業区域に生息していた個体の多くは、工事外への移動を行わずに、工事後も定位置していた。これは、工事の内容が、掘削工（寄り州の除去）や除草等、川岸を住処としている個体には影響が少ない工事であったことが理由と考えられる。

コンクリート等での護岸工事は治水上必要な措置であるが、ニホンウナギの生息地としては不利な環境となるため、石倉かごや魚道の設置等生息場所を保全・拡大する対策を講じていくべきと考える。

ただし、八幡川においては、上流が頭首工（可動堰）により遡上困難となっており、既存の簡易魚道の設置は不向きであるため、上流域への汲み上げ放流等、別の手法を検討する必要がある。

年度計画：

鹿児島県内の河川において、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季節毎の移動や生息個体数を時系列で把握する。

また、今後の気候変動による降雨の激甚化が懸念される中、自然攪乱（災害）及び人為攪乱（復旧工事）等、特に降雨に伴う生息環境の変化に対する分布の変化やウナギ資源量の反応等を把握する。

方法：

年3回、電気ショッカーによる天然ニホンウナギの採捕・標識放流を反復する。分析においては、これまでの環境収容力推定手法開発事業での調査結果も活用する。

(1)ー① 調査区域

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910m上流の頭首工（可動堰）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10m）として19区間を設定した。なお調査域は、最下流（St.1の一部）が大潮の満潮時のみ潮の影響があるだけで、ほぼ淡水域である。また、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と考えられる。

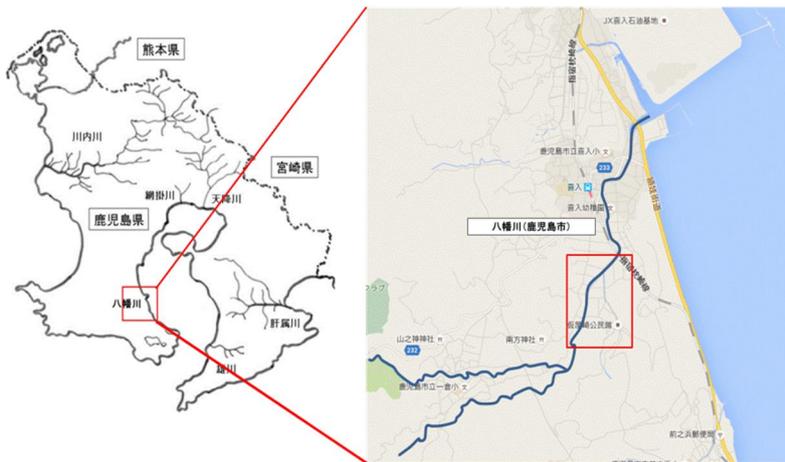


図1 八幡川調査地点

(1)ー② 調査区域の環境

調査区域の環境については、図2の通り。先行事業にて合計2回の調査を行っている。

ア 1回目調査（平成30年8月28日、29日）

平成30年8月28日、29日に調査区間(910m)の水深、優占底質、両岸のカバーを調査した。全調査区間について5m間隔の横断測線（合計192カ所）を設定して川幅を計測し、横断測線上の20cm毎の優占底質を7段階の粒径（Detritus（有機堆積物）、sand（砂：<2mm）、gravel（小礫：2-16mm）、pebble（中礫：17-64mm）、cobble（大礫：65-256mm）、Boulder（巨礫：>256mm）、bedrock or concrete（岩盤・コンクリート））に分類し、19調査区間毎に優占底質を調べた。また横断測線を目測で8分割し7箇所の水深を測定した（愛媛大学提案、各県共通手法）。

イ 2回目調査（令和3年10月25日、26日）

令和2年12月～令和3年1月にSt.15～19、令和3年7～8月にSt.1～7で河川工事（寄洲除去、両岸の草木の伐採等）があり河川環境が大きく変化したため、令和3年10月25～26日に、工事があった区間について平成30年度の手法に準じて実施した。

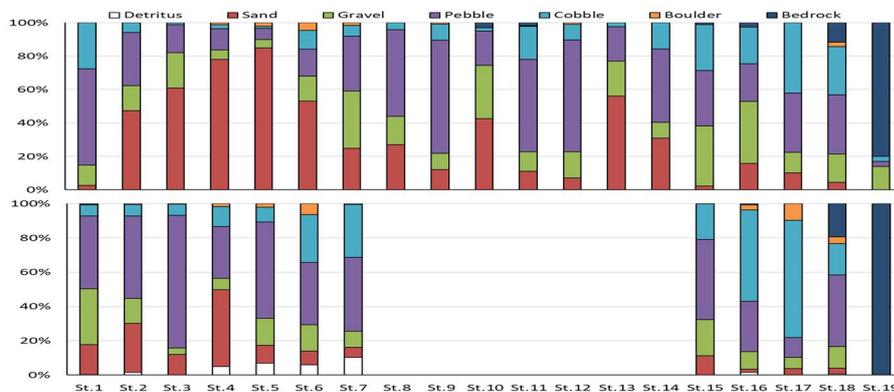


図2 調査区間別の底質組成（上：平成30年度 下：令和3年度（河川工事後））

St. 1~7 の下流域は、工事前後で sand (砂 : <2mm) が減少して pebble (中礫 : 17-64mm) が増加し、粒径が大きくなっていた。また平均川幅は 8.8m から 10.2m に広がり、平均水深は 33.5cm から 22.5cm に浅くなっていた。

St. 15~19 の上流域は、工事前後で gravel (小礫 : 2-16mm) が減少して cobble (大礫 : 65-256mm) が増加し粒径が大きくなっていた。また平均川幅は 6.6m から 10.1m に広がり、平均水深は 26.2cm から 11.5cm に浅くなっており、下流域と同様の傾向であった。

河川工事で川幅が広がった事により、流域面積は令和 2 年度秋季調査までは 7,060 m²、令和 2 年度冬季~令和 3 年度春季調査は 7,774 m²、令和 2 年度夏季調査以降は 8,285 m² となった。

(2) 調査方法

採捕は、春季 (令和 5 年 6 月 7 日)、夏季 (令和 5 年 8 月 18 日、21 日)、秋季 (令和 5 年 10 月 12 日) の年 3 回実施した。

調査区間内で電気ショッカー (有限会社フロンティアエレクトリック社製 FISH SHOCKER III S) を用いて天然ウナギを採捕し、採捕位置や環境 (底質、住処等) を記録した。採捕した天然ウナギは個体毎に網袋に入れて採捕地点に浸漬しておき、調査終了後に回収して指宿市宮ヶ浜の当センター実験池の陸上水槽 (25°C 地下水の掛け流し) に袋ごと安置した。採捕翌日、実験池飼育施設内で水産用麻酔薬オイゲノール (DS ファーマアニマルヘルス株式会社製 FA100) にて麻酔し全長及び体重を計測した。また PIT タグ標識 (Biomark 社製 BIO8 または BIO12B) の有無を確認し、標識が確認された個体は PIT タグ標識のコード番号を記録し、標識が確認されなかった体長 15 cm 以上の個体には新たに腹腔内に PIT タグを挿入した。なお、標識が確認されなかった新規個体はサイズに拘わらず、胸鰭の先端をカットしてエタノールで固定し、後日、国立研究開発法人水産研究・教育機構に送付し DNA 多型解析による個体識別を行った。

測定等が終了した全個体は、個体毎に網袋に戻して陸上水槽で 1~3 日安置後、記録した採捕地点に 1 尾ずつ放流した。

(3) 推定生息尾数

各調査時における推定生息尾数は、非閉鎖系のフィールドで用いられる標識再採捕法である Jolly-Seber 法を用い、下記の式により求めた。

$$\hat{N}_i = \frac{\hat{M}_i n_i}{m_i} \quad (i=2, 3, \dots, s-1)$$
$$\hat{M}_i = \frac{R_i z_i}{r_i} + m_i \quad (i=2, 3, \dots, s-1)$$

N_i : 時点 i でのサンプリング直前の総個体数

M_i : 時点 i でのサンプリング直前の標識個体の総個体数

n_i : i 時点の採捕数

m_i : i 時点の採捕数中の標識個体数

R_i : 時点 i で標識放流された数

r_i : 時点 i で標識放流され、その後再採捕※された合計数

z_i : 時点 i より前に標識され、 i では捕らえられず i 以降に再採捕された個体数

() 内の $s-1$ は時点 i のサンプリング直前を意味する表記

※ 「採捕」と「再採捕」を区別するため、当事業では便宜上後者を「再採捕」という。

(4) 解析

後の気候変動による降雨の激甚化が懸念される中、自然攪乱（災害）及び人為攪乱（復旧工事）等、特に降雨に伴う生息環境の変化に対する分布の変化やウナギ資源量の反応等を把握する。解析においては、先行事業である「鰻来遊・生息調査事業（平成 27～29 年度）」及び「環境収容力推定手法開発事業（平成 30～令和 4 年度）」の調査結果も含めて行った。調査期間（平成 27 年～令和 5 年）に実施した調査と、調査区域内で起こった主な環境変動項目の一覧については、表 1 のとおり。

(表1) 八幡川における平成27(2015)年以降の調査及び主な環境変動項目

年	月		
2015	12	2015年度冬調査	鰻来遊・生息調査事業
(H27)	3~6	掘削工, 伐採工 (St.1~3)	
2016	5	2016年度春調査①	
(H28)	6	2016年度春調査②	
	8	2016年度夏調査	
	10	2016年度秋調査	
2017	1	2016年度冬調査	
(H29)	5	2017年度春調査①	
	6	2017年度春調査②	
	8	2017年度夏調査	
	10	2017年度秋調査	
	12	2017年度冬調査	環境収容力推定手法開発事業
2018	4	2018年度春調査	
(H30)	7	2018年度夏調査	
	8	環境調査 (1回目)	
	10	2018年度秋調査	
2019	1	2018年度冬調査	
(R1)	5	2019年度春調査 令和元年6月29日から7月5日の大雨 (令和元年7月豪雨)	
	7	2019年度夏調査	
	10	2019秋年度調査	
	12	鹿児島県シラスウナギ豊漁	
2020	1	2019年度冬調査	
(R2)	4	2020年度春調査 令和2年7月3日から12日にかけての大雨 (令和2年7月豪雨)	
	8	2020年度夏調査	
	11	2020年度秋調査	
	12~1	掘削工, 土砂運搬・処分, 除草・運搬・処分 (St.15~18) : 工事①	
2021	2	2020年度冬調査	
(R3)	4	2021年度春調査	
	7~8	掘削工, 土砂運搬・処分, 除草・運搬・処分 (St.1~5) : 工事②	
	10	環境調査 (2回目)	
	11	2021年度秋調査	
2022	2	2021年度冬調査	
(R4)	4	2022年度春調査	
	7	2022年度夏調査	
	10	2022年度秋調査	
2023	4~5	掘削工, 伐採工 (St.1~3) : 工事③	資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業
(R5)	6	2023年度春調査	
	8	2023年度夏調査	
	10	2023年度秋調査	

結果：

(1) 採捕尾数

表2のとおり、令和5年度の本調査において、秋季調査まで延べ77尾採捕した。

平成27年度からの合計では延べ1,155尾を採捕し、実質個体数は743尾であった。

(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3のとおりで、下流側のSt.4～6が比較的多く、特にSt.6は151尾で最多であった。

年度	合計	春 (初夏)				冬 (12月)
		5月	6月	8月	10月	
H27	7				7	
H28	244	29	46	63	35	
H29	141	34	23	29	25	
H30	103	24	29	17	33	
R1	126	24	38	39	25	
R2	104	22	27	35	20	
R3	189	28	60	59	42	
R4	164	64	55	45		
R5	77		23	31	23	
延べ1155匹		32	35	43	35	

表2 月別、年度別採捕尾数

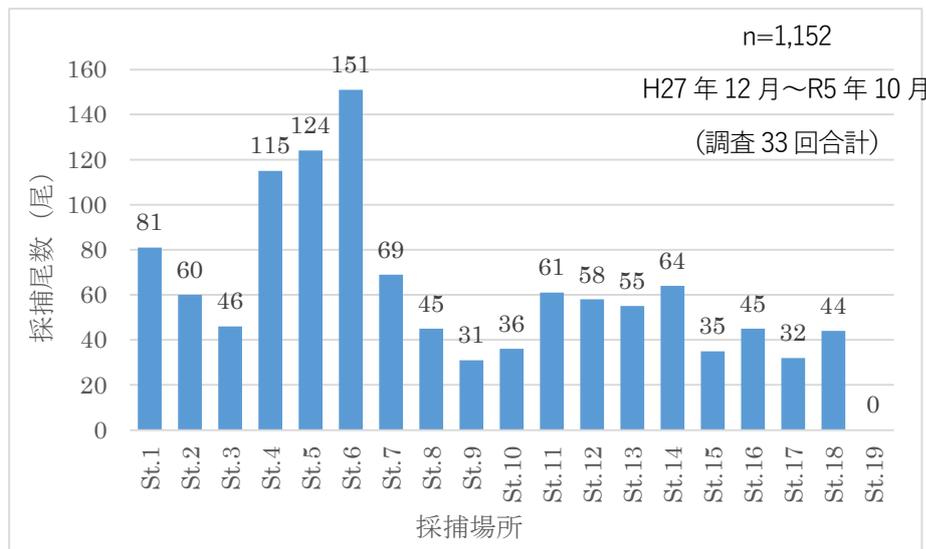


図3 調査区間別の採捕尾数



St5～6



St9 (左岸)

(2) 全長および体重

図 4-1 にこれまでに採捕した全個体の全長組成を示す。150mm～500mmが多く、平均値は356±147mm (±SD) であった。

図 4-2 にこれまでに採捕した全個体の体重組成を示す。50g以下が最も多く全体の55.6%を占め、平均値は94±133g (±SD) であった。

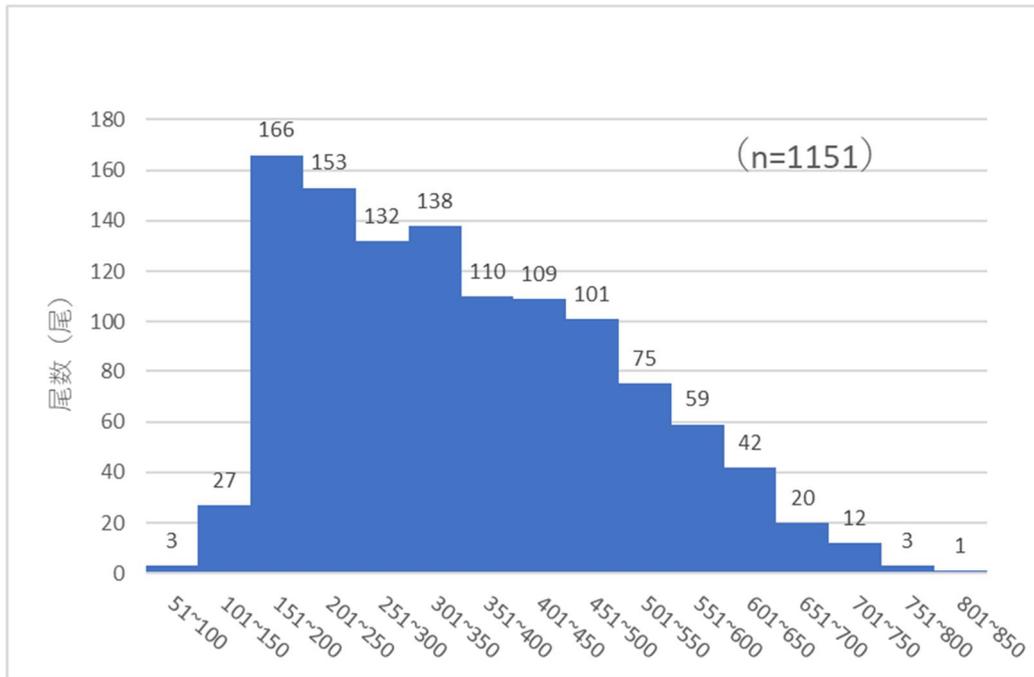


図 4-1 全長組成 (mm)

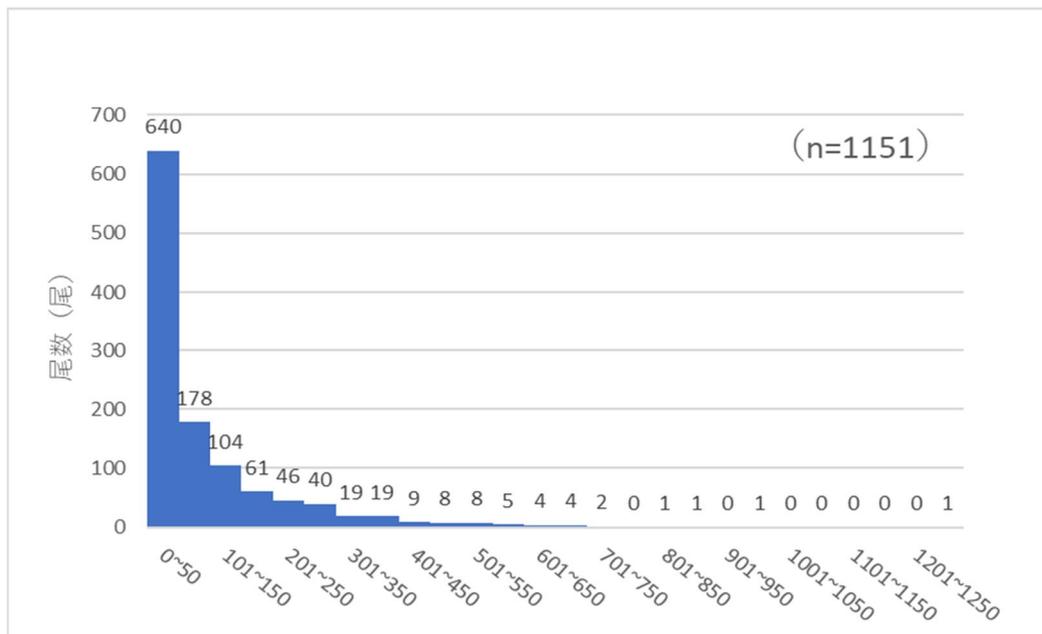


図 4-2 体重組成 (g)

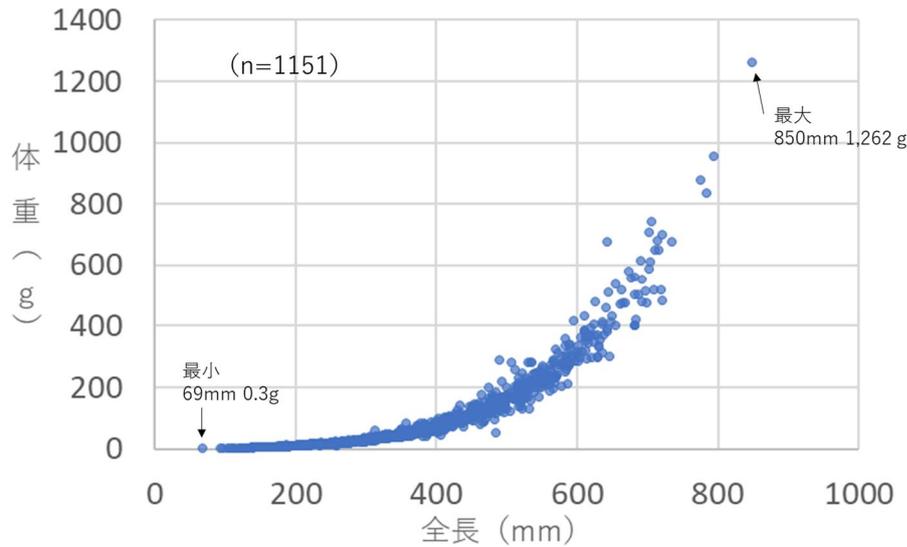


図 4-3 全長と体重の関係

(3) 再採捕率

表 3 のとおり令和 5 年度調査の再採捕の割合は 34.8~52.2%で推移し、全調査平均は 35.6%であった。

年度	H27						H28						H29						H30				全合計					
	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	6月	8月	11月	2月	4月	7月		10月	6月	8月	10月	
採捕尾数	7	29	46	63	35	71	34	23	29	25	30	24	29	17	33	35	27	28	60	59	42	64	55	45	23	31	23	1155
うち再採捕	0	1	6	9	12	23	17	7	10	11	16	11	8	5	15	12	11	15	22	11	15	23	25	14	12	13	8	411
再採捕率	0.0	3.4	13.0	14.3	34.3	32.4	50.0	30.4	34.5	44.0	53.3	45.8	27.6	29.4	45.5	34.3	55.0	53.6	36.7	18.6	35.7	35.9	45.5	31.1	52.2	41.9	34.8	35.6

表 3 再採捕尾数

平成 29 年度以降の年度別の再採捕割合の季節変動は、春季（4~6 月）はいずれも 50%程度と高く、夏季（7~8 月）、秋季（10~11 月）に下がり、冬季（12~2 月）に再び高くなる傾向がみられ、令和 5 年度も同様の傾向が見られた。

これは、季節間のウナギの移動傾向（後述）について春から冬にかけては遡上傾向であり、併せて、調査区域の終点が高さ 1.5m の可動堰（写真）で遡上困難となっていることから、調査区間内のウナギの標識個体数が増加したのち、秋以降は産卵回遊にて海へ下る個体がいることと、冬から春にかけては降下傾向であるため新規個体の加入は少なく、春季の再採捕率が低くなったものと推察する。



写真 調査区域終点（起点から910m上流）の可動堰

一方で、令和4年度の調査においては、春季の再採捕率が35.9%と低かった。

これは、令和2年のシラスウナギ豊漁時に八幡川へ来遊した個体が、クロコに成長し、感潮域よりも上流である調査区域へ大量に加入したものと推察する。実際、採捕率が高い令和2年の採捕個体と比較すると、令和4年の新規個体は100～200mmのサイズのものが多くを占めていた。

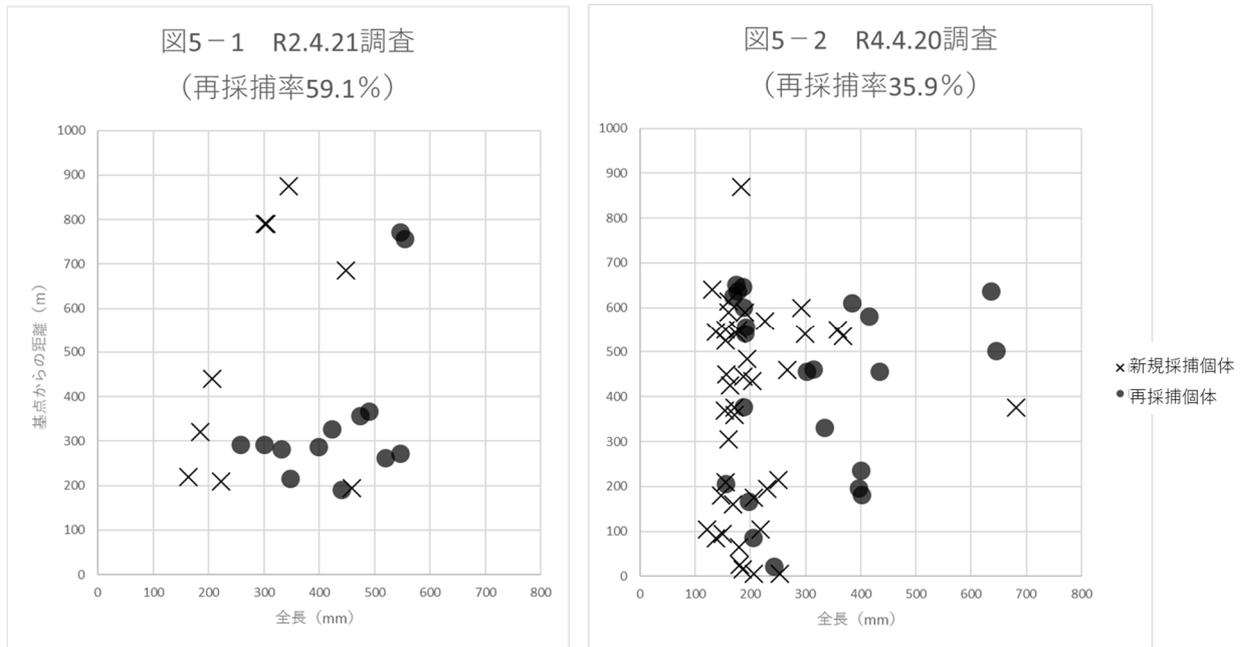


図5 再採捕率別の採捕個体の全長及び採捕地点

(4) Jolly-Seber 法による生息数推定

図6のとおり、Jolly-Seber 法により調査区域内の二ホンウナギの個体数を推定した。全調査期間において、推定個体数は81尾～599尾で推移し、直近の令和5年8月現在では103尾と推定された。全体の傾向として、秋季の個体数が多い。前述のとおり、調査区域の最上流が堰で遡上困難となっていることと季節ごとのウナギの移動傾向によるものと推察される。

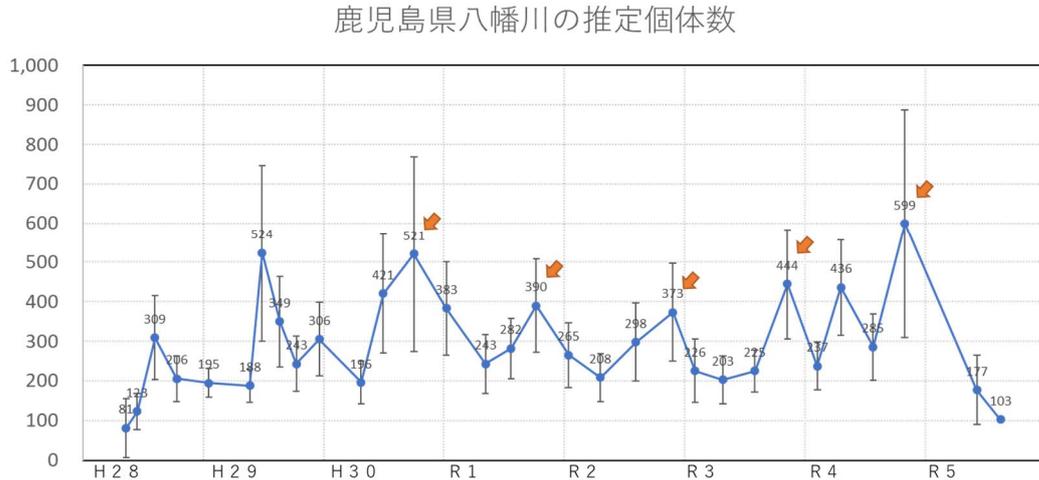


図6 Jolly-Seber 法による推定生息数

(5) 再採捕個体の移動状況

採捕された1,155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223尾(2回以上再採捕された個体も1尾とする)について、初回採捕地点から最終採捕地点までの移動距離を図7に示す。

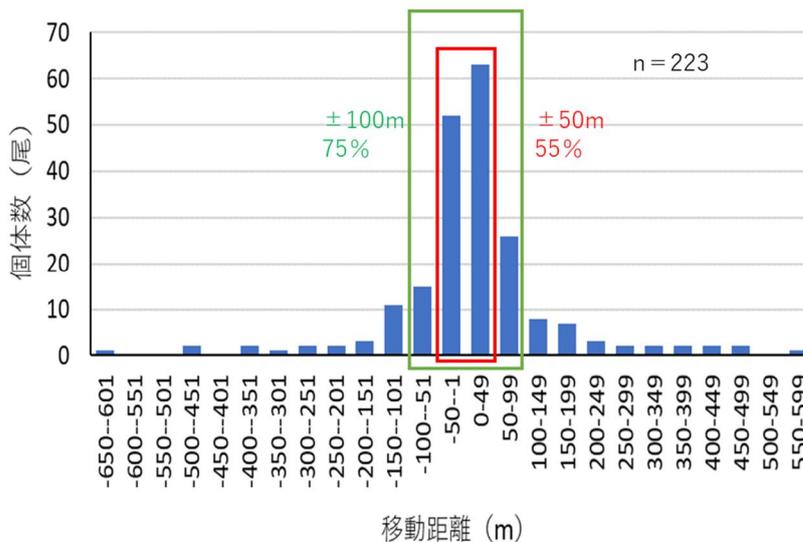


図7 再採捕個体の移動距離

放流地点から下流側へ635m～上流側に565mの範囲内で移動し、下流側に50m以上移動していた個体は39尾、上下50mの範囲内にとどまっていた個体は122尾、上流側に50m以上に移動していた個体は62尾であった。個体別の移動状況は図7のとおり。

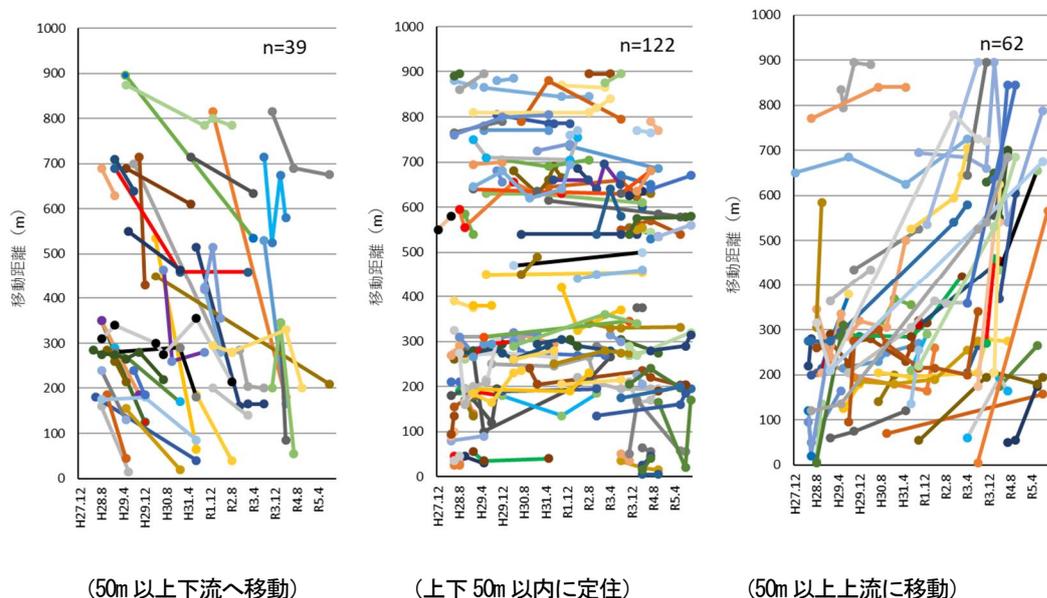
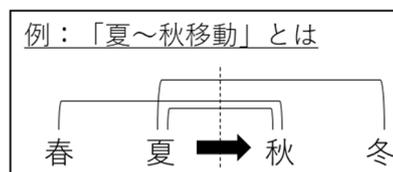


図7 個体別の移動状況

(6) 季節間のウナギの移動傾向

各季節間の移動について、各季節間の前後で採捕された個体の採捕地点の情報から、移動距離とベクトル（方向）を調べた。例えば、「夏～秋移動」についてのデータは、夏と秋を挟んだ2つの採捕地点の情報（春と秋・夏と秋・夏と冬の3通り）より求める。



全調査期間のデータより、春～夏移動した個体は74尾、夏～秋移動した個体は70尾、秋～冬移動した個体は70尾、冬～春移動した個体は70尾であった。これらの平均移動距離と、移動ベクトル（上流へ遡上する場合はプラス、下流へ降下する場合はマイナスとなる）については、表4のとおり、夏～秋移動および秋～冬移動が遡上傾向であり、冬～春移動においては降下傾向であった。

各季節における、始点を0とした場合の個体別の移動状況は図8のとおり。

	春～夏	夏～秋	秋～冬	冬～春
n	n = 74	n = 70	n = 70	n = 70
平均移動距離	45.9	58.7	60.7	60.3
ベクトル	↗5.5	↗18.6	↗16.8	↘5.9

表4 季節間のウナギの移動傾向

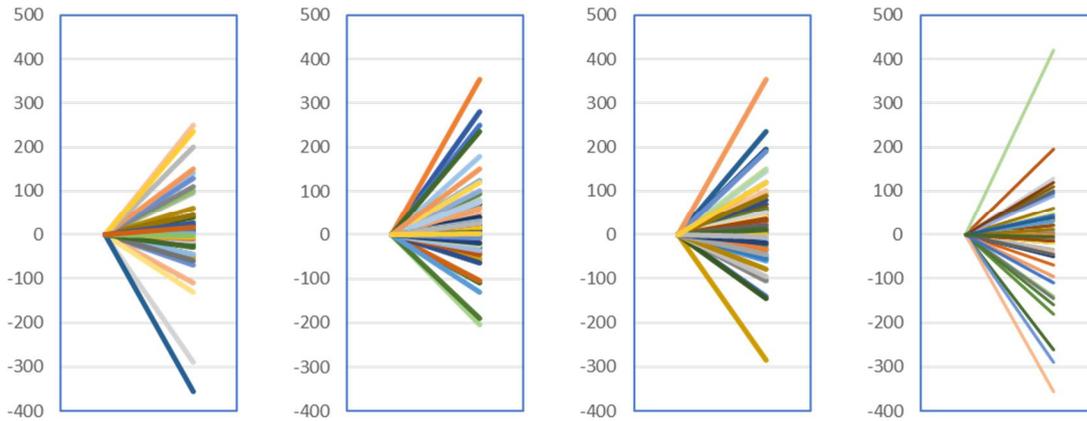


図8 各季節における個体別の移動状況（始点を0とする）
 (左：春～夏、中央左：夏～秋、中央右：秋～冬、右：冬～春)

(7) 豪雨と移動の関係

ここでいう「豪雨」は、近年発生した雨のうち、調査河川での水位に大きく影響した上位2回の大雨のことであり、1回目が、令和元年6月29日から7月5日にかけて発生した「令和元年7月豪雨」であり、最大水位（八幡川二重橋）は7月3日時点で290cmとなり、1時間降水量（鹿児島市喜入）の最大は45mm/hであった。2回目が、令和2年7月3日から12日にかけて発生した「令和2年7月豪雨」であり、最大水位（八幡川二重橋）は7月6日時点で304cmとなり、1時間降水量（鹿児島市喜入）の最大は64.5mm/hであった。

Jolly-Seber 法により推定した調査区域内の推定個体数について、豪雨の通過による個体数の減少等は見られなかった（図9）。

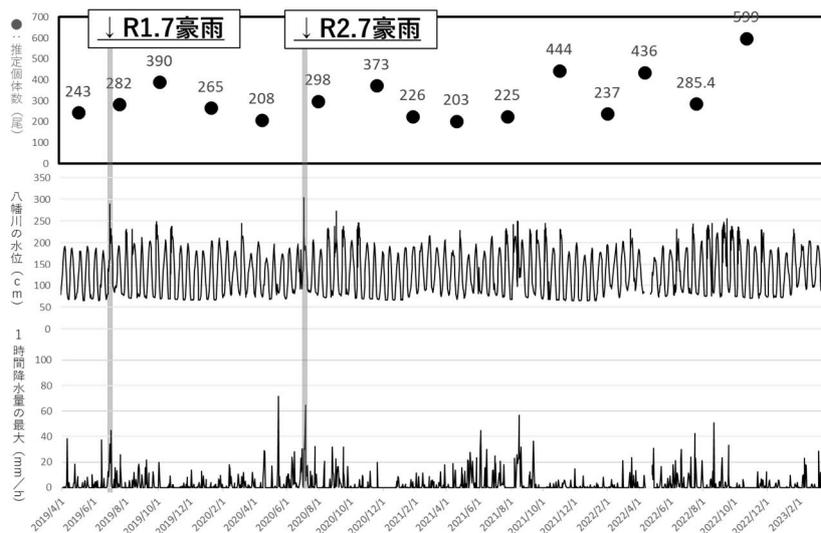


図9 推定個体数と八幡川の水位及び1時間降水量の最大の水位

次に、豪雨とウナギの移動の関係を見るため、豪雨前後で採捕された個体の採捕地点の情

報から、季節間のウナギの移動傾向を求めた時と同様の方法で、移動距離と移動方向の傾向を調べた。

令和元年7月豪雨の前後で移動した個体は5尾、令和2年7月豪雨の前後で移動した個体は7尾であった。これらの平均移動距離と、移動傾向（上流へ遡上する場合はプラス、下流へ降下する場合はマイナスとなる）については、表5のとおり降下傾向であった。

また、各豪雨の前後における、始点を0とした場合の個体別の移動状況は図10のとおりとなった。

表5 季節間のウナギの移動傾向

	R1.7豪雨	R2.7豪雨
n	n = 5	n = 7
移動距離	37.0	19.3
ベクトル	∖13.0	∖5.0

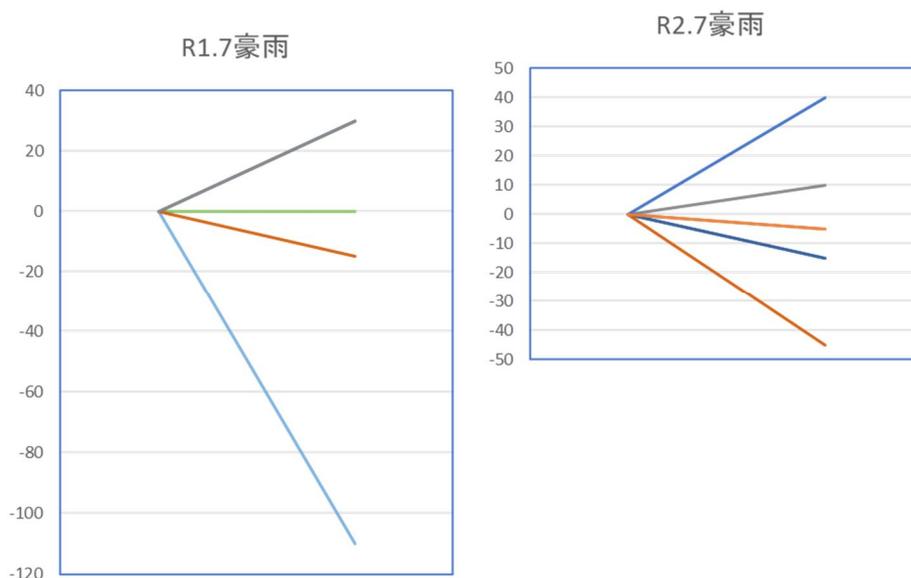


図10 豪雨の前後における個体別の移動状況（移動前の始点を0とする）
（左：令和元年7月豪雨、右：令和2年7月豪雨）

このことから、ニホンウナギと豪雨の関係については、豪雨があった前後の調査で採捕された個体の採捕地点の情報から、降下傾向にあることがわかったが、調査区域内の個体数全体に影響があるとはいえず、豪雨により下流へ大きく流されてはいないことが示唆された。これは、八幡川の環境は自然河岸が多く、良好な避難場所が十分にあったためと推察する。

(7) 自然河岸と人工河岸

① 個体数

八幡川の調査区域（910m）の両岸について、自然河岸（植栽・砂泥）は831m、人工河岸（コンクリート護岸・蛇籠・網籠・石垣）は989mであった。（右岸：自然河岸387m、人工河岸523m、左岸：自然河岸444m、人工河岸466m）。

八幡川で採捕されたウナギのうち、川岸で採捕されたウナギ（n=1,036）について、自然河岸と人工河岸での個体数を比較したところ、自然河岸では653尾、人工河岸では383尾であった。表6のとおり、自然河岸は人工河岸よりもウナギの密度が高かった。

表6 自然河岸及び人工河岸でのウナギの採捕尾数と密度

	距離 (m)	採捕尾数 (尾)	(匹/m)
自然河岸	831	653	0.79
人工河岸	989	383	0.39

② 全長・重量・体脂肪率の比較

自然河岸に生息するウナギ（n=653）と人工河岸に生息するウナギ（n=383）について比較したところ、図11のとおり、全長及び重量は有意差がなかった（U-test $p > 0.05$ ）が、肥満度においては自然河岸を住処とするウナギの方が高かった（U-test $p < 0.05$ ）。八幡川の自然護岸は、ウナギにとって良好な住処であり、餌が豊富で移動の必要がないことから肥満度が高いものと推察された。

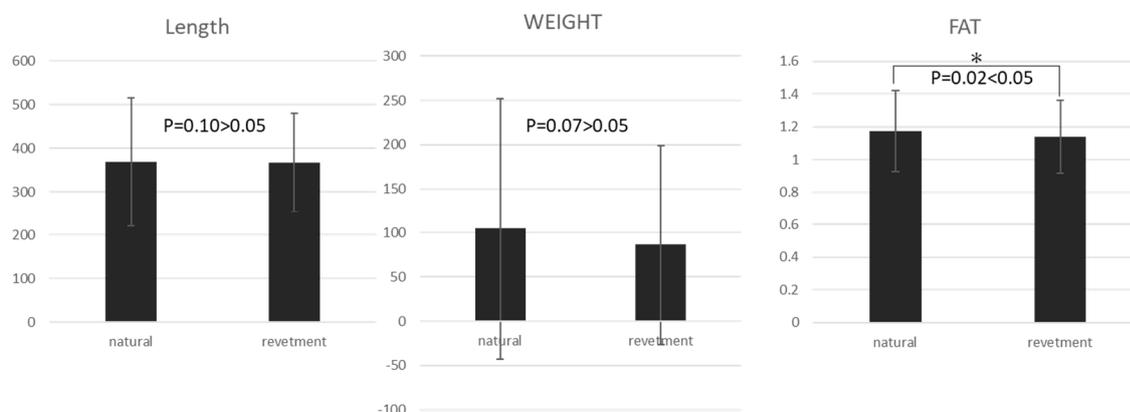


図11 自然河岸と人工河岸の全長（左）・重量（中央）・肥満度（右）の比較

(8) 河川工事とウナギの関係

① 河川工事

八幡川の調査期間・調査区域内において実施された河川工事は表1記載のとおり。うち、環境調査の1回目を行ったH28年度以降に実施された工事①～③の影響について分析した。

工事①

工期：令和2年12月～令和3年1月

作業区域：St. 15 (690) ～St. 18 (880) ※()内は始点からの距離

作業内容：掘削工、土砂運搬・処分、除草・運搬・処分

工事②

工期：令和3年7～8月

作業区域：St. 1 (0) ～ St. 3 (150)

作業内容：掘削工、土砂運搬・処分、除草・運搬・処分

工事③

工期：令和5年4～5月

作業区域：St. 1 (0) ～ St. 7 (320) うち掘削工はSt 2～3のみ

作業内容：掘削工、土砂運搬・処分、除草・運搬・処分

② 工事前後の分布変化

比較的大規模であった令和3年に実施された工事①と②の影響について分析するため、平成30年度から令和2年度末の3年間を「R3工事前」、令和3年度から5年度末までの3年間を「R3工事後」として、分析を行った。

図12に、工事前後の調査区間別の採捕尾数を示す。なお、工事前後の分布について有意差はなかった。(KS test $p>0.05$)

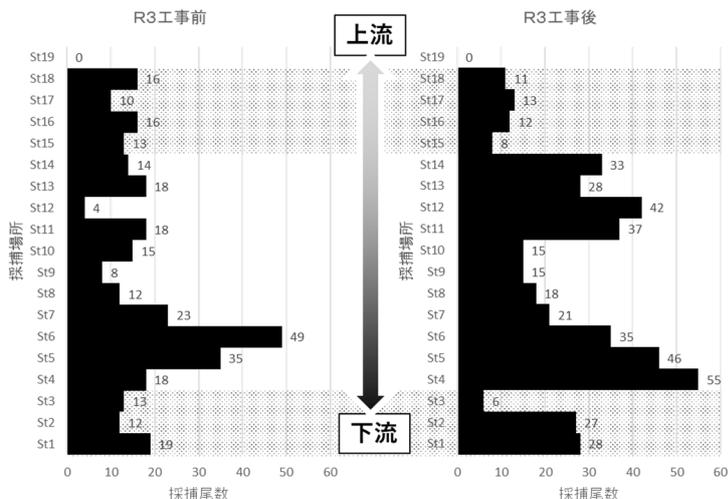


図12 調査区間別の採捕尾数 (左：R3工事前、右：R3工事後)

※色付き部分…工事の作業区域

各調査における採捕したウナギについて、工事①及び②の作業区域とそれ以外の区域別で採捕されたウナギの割合は、図 13 のとおりとなった。

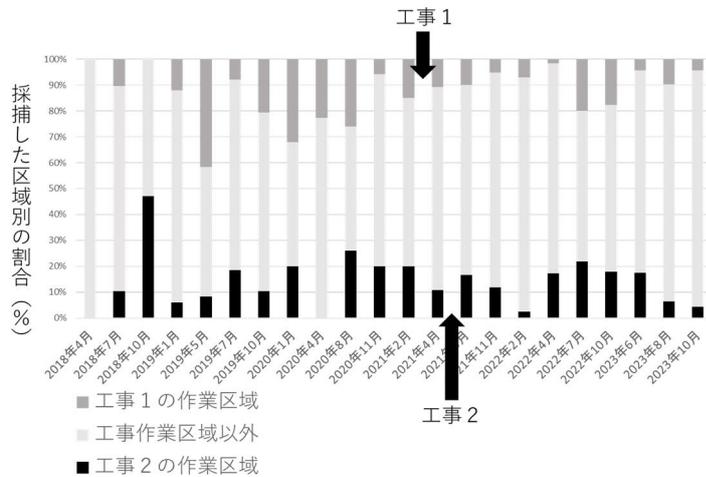


図 13 各調査における工事作業区域とその他の区域のウナギの割合

図 14 に、工事前後の分布と体長の関係を示す。

工事①（上流側）については、工事前と比較して大型（全長 600～800mm）の個体が減少したようにみえたが、産卵回遊にむけた移動も考えられる。また、工事後は工事实施区域のすぐ下流に、特に小型の個体（100～200mm）が分布している傾向が確認された。

工事②（下流側）については、工事前と比較して小型（全長 200mm）の個体が増加したようにみえたが、大型個体が産卵回遊にむけて移動したことも考えられる。また、工事後は工事实施区域のすぐ上流で生息数が増大している傾向が確認された。

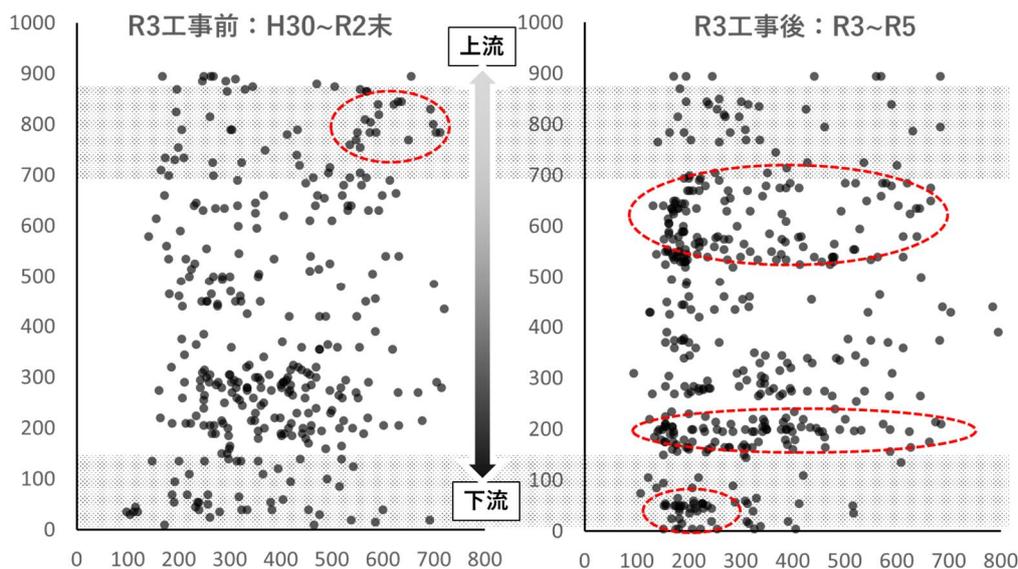


図 14：ウナギの全長と起点からの距離（左：R3工事前、右：R3工事後）

※色付き部分…工事が実施された箇所

③ 工事前後の分布変化

工事前後に採捕された個体の採捕地点の情報から工事の影響を検討したところ、工事の作業区域に生息していた個体の多くは、工事外への移動を行わずに定位していた（図 15）。

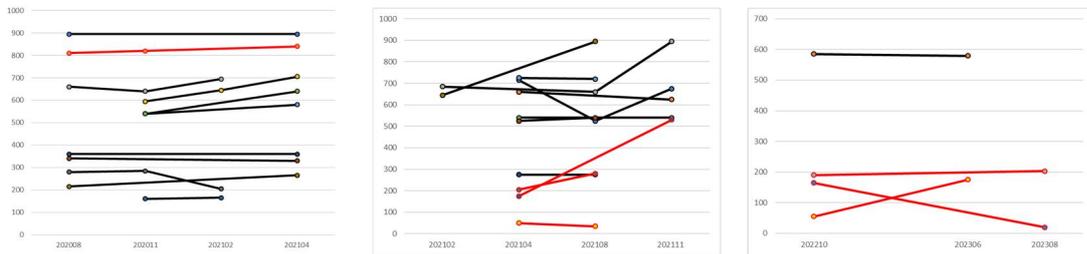


図 15 工事前後に採捕された個体の移動

（工事前に工事の作業区域に生息していた個体は赤線で表記）

（左：工事①、中央：工事②、右：工事③）

課題と対応策：

コンクリート等での護岸工事は治水上必要な措置であるが、ニホンウナギの生息地としては不利な環境となるため、石倉かごや魚道の設置等生息場所を保全・拡大する対策を講じていくべきと考える。

ただし、八幡川においては、上流が頭首工（可動堰）により遡上困難となっており、既存の簡易魚道の設置は不向きであるため、上流域への汲み上げ放流等、別の手法を検討する必要がある。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	宮崎県におけるニホンウナギの生息状況調査と分析		
担 当 者	三木 涼平、中村 充志、中西 健二、入木田 敦（宮崎県水産試験場内水面支場）		

令和5年度の成果の要約：

自然攪乱（災害）及び人為攪乱（復旧工事）に伴う生息環境の変化に対するウナギの分布の変化や資源量の反応等を把握することを目的に、一ツ瀬川水系日置川における7か年計21回のニホンウナギの採捕・標識放流調査によって得られたデータを元に解析を行った。本河川において、平成29年度から令和5年度までに再採捕を含む計1,030尾を採捕し、Jolly-Seber法による平均推定密度は9.4尾/100m²であった。

ニホンウナギの採捕数と降水量の関係を解析した結果、降水量や豪雨日数の違いにより、ニホンウナギの採捕数が増減するという傾向はなかった。そこで、特筆した雨量や降雨災害をもたらした台風の前線でニホンウナギの採捕数を比較した結果、採捕数に明確な違いはないことが確認された。以上の結果から、台風やそれに伴う豪雨がニホンウナギに与える影響は小さいと考えられた。

堆積土砂撤去工事がニホンウナギに与える影響を解析した結果、工事区間における採捕数の減少が確認された。特に工事完了1か月後の調査においては、工事区間でニホンウナギは全く確認できなかった。工事区間外の下流125m区間においては、採捕数が増加したことから、工事によってニホンウナギは下流に移動し、工事区画を抜けると大きく移動せず定住したと考えられる。採捕数は、工事完了3か月後には平年程度の水準まで回復しており、比較的早期に本来の分布へと復元することが示唆された。

河川工事による生息環境の変化を調査した結果、底質組成の大幅な変化が確認された。底質組成は、工事翌年度の調査においても復元されておらず、堆積土砂撤去工事によってその後の底質組成が変化することが示唆された。一方で、工事により撤去された河岸の草木が工事翌年には再度繁茂した結果、隠れ家の被覆度は比較的早期に回復する傾向がみられた。河岸の草木はニホンウナギの隠れ家としてサイズを問わず広く利用されており、隠れ家の回復は、工事から比較的早期にニホンウナギが本来の分布へと復元した要因の1つであると推察された。

年度計画：

宮崎県児湯郡新富町の一ツ瀬川水系日置川においてニホンウナギの採捕調査を行い、河川での生息場所と分布状況を調べる。さらに、これまでに得られた長期野外データを活用し、自然攪乱（災害）及び人為攪乱（復旧工事）等、特に降雨に伴う生息環境の変化に対するウナギの分布の

変化や資源量の反応等を把握する。

方法：

一ツ瀬川水系日置川において、河口から上流に約 600m の感潮域上端の可動堰を調査区間の基点 (0m) に、基点から上流に 1、140m の根固めブロックを終点に設定した (図 1)。調査区間内には 5m ごとに区間表示を設置し、1 区間 50m×23 区間 (St. 1-23) とした。年 3 回 (7 月、10 月、11 月)、電気ショッカーにより採捕調査を行い、採捕位置や環境 (底質、住処等) を記録した。採捕したウナギは採捕地点ごとに網袋に入れて回収し、宮崎県水産試験場内水面支場の陸上水槽 (17℃湧水の掛け流し) に袋ごと安置した。採捕後 1~3 日以内に 2-フェノキシエタノールにて麻酔し、全長及び体重を測定した。また、PIT タグの有無を確認し、標識がついていない新規個体はサイズに関わらず胸鰭の先端をカットしてエタノールで固定し、後日、国立研究開発法人水産研究・教育機構に送付し DNA 多型解析による個体識別を行った。無標識の採捕個体のうち、標識が可能な概ね 120mm 以上の個体について、PIT タグ及びイラストマー蛍光タグを併用して標識を施した。全ての採捕個体は、死亡や脱走した個体を除いて、採捕後 1 週間以内にそれぞれの採捕場所へ放流した。本河川では平成 28 年からウナギの採捕調査を実施し、標識放流していることから、本調査では調査区間と区間表示の方法が本年度と同様の手法で実施された平成 29 年以降の記録も用いて解析を行った。採捕個体については、平成 29 年 6 月以降の、延べ 21 回の採捕調査及び標識放流で得られた結果から、調査区間 (1、140m : 7、141 m²) の資源個体数を Jolly-Seber 法により推定し、調査対象河川の資源量を推定した。

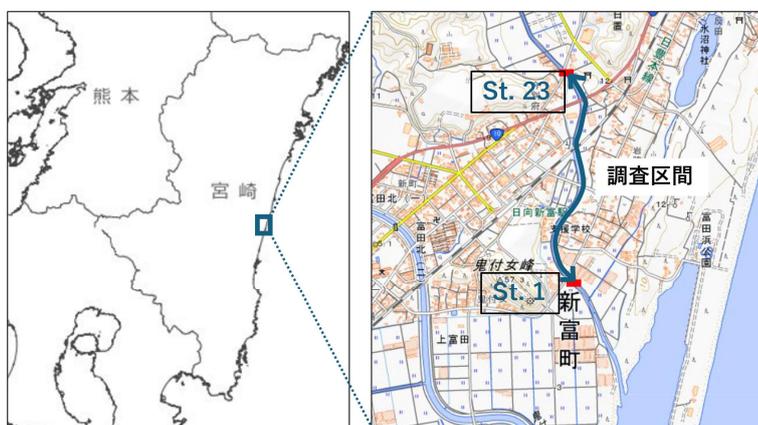


図 1 調査区間の位置図

気温・降雨量のデータは、気象庁 (<https://www.jma.go.jp>) の観測データ (高鍋 : 平成 28 年 12 月 1 日 - 令和 5 年 11 月 30 日) を用いた。ニホンウナギの採捕数と降水量や豪雨日数の関係を解析するため、観測データを用いて、調査エリア {調査区間を 3 区間 (St.22-23 のみ 2 区間) に束ね、下流から 1~8 まで区分け}、年、季節、当期間降水量、前期間降水量、当期間の豪雨 (120mm 以上) の日数、前期間の豪雨 (120mm 以上) の日数を説明変数、平成 29 年度から令和 5 年度の計 21 回の調査におけるニホンウナギの採捕個体数を応答変数 (ポアソン分布、リンク関数 log) とし

て、一般化線形モデル（GLM）による解析を行った。また、全ての説明変数を含むモデルから総当たり法により赤池情報量基準（AIC）が最も低い7モデルを選択した。解析にはR（Version4.2.1）を用いた。また、ニホンウナギの採捕数と自然災害との影響を調べるため、気象庁の観測データから日間降水量150mm以上をもたらした自然災害を抽出した。なお、対象期間は各調査年度の1回目から3回目の間に限定した。

調査河川の工事履歴に関しては、宮崎県高鍋土木事務所への聞き取りを行い、平成28年以降の工事の有無を確認した。その結果、令和2年3月31日－8月31日の間に、St. 15-6-20-5に該当する約250m区間において河川内の堆積土砂撤去工事の実施が確認された。工事の影響を調査するため、平成30年度－令和4年度事業「環境収容力推定手法開発事業」にて調査した環境データ（底質、隠れ家の被覆度）を用いて解析を行った。

結果：（1）採捕数と再採捕率

調査区間1、140mにおけるニホンウナギの年度別採捕状況を表1に示す。令和5年度は129尾（7月：60尾、10月：48尾、11月：21尾）を採捕した。また、平成29年度から令和5年度までに計21回の調査を実施し、その総採捕数は1,030尾であった。初回の調査を除き、再採捕数は1－18尾の範囲であった。再採捕率は2.0－47.1%の範囲で変動した。また、平均再採捕数は8.3尾であり、その再採捕率は20.5%であった。平成29年度から令和5年度における調査区間別（St. 1－23）の採捕数はSt. 6で最も多く100尾となり、St. 16で最も少なく15尾であった（図2）。

次に、採捕尾数に占める全長及び体重の組成を図3、4にそれぞれ示す。全長は100－149mm区分が全体の14.6%と最も多く、測定した全個体の最小は50mmで、最大は887mmであり、平均は285.5mmであった。体重は50g未満が全体の70.1%を占め、測定した全個体の最小は0.1gで、最大は1,402gであり、平均は57.0gであった。

表1 調査区間1、140mにおけるニホンウナギの年度別採捕状況

調査年度		H29年度			H30年度			R1年度			R2年度			R3年度			R4年度			R5年度		
調査月		6月	8月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	10月	11月	7月	10月	11月
月別	採捕数(尾)	61	51	38	39	39	33	80	94	38	44	38	50	56	49	25	58	64	54	60	48	21
	再採捕(尾)	0	1	3	5	4	7	9	18	7	9	2	7	14	10	8	8	15	10	12	12	4
	再採捕率(%)	0.0	2.0	8.6	14.7	16.0	26.9	12.7	23.7	22.6	25.7	5.6	16.3	33.3	25.6	47.1	16.0	30.6	22.7	25.0	33.3	23.5
年度計	採捕数(尾)	150			101			212			132			130			176			129		
	再採捕(尾)	4			16			34			18			32			33			28		
	再採捕率(%)	2.7			18.8			19.1			15.8			32.7			23.1			27.7		

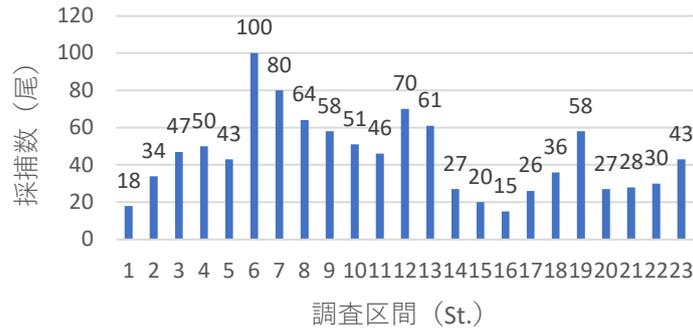


図2 各調査区間におけるニホンウナギの採捕尾数

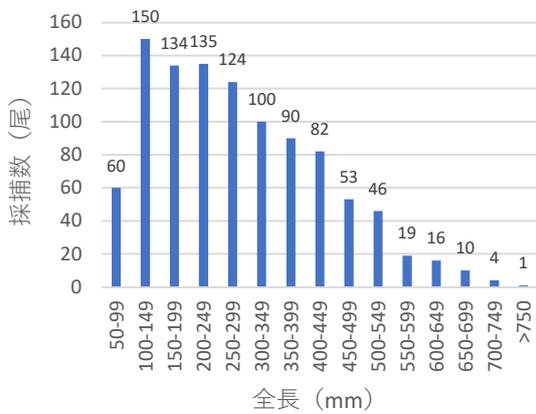


図3 採捕個体の全長組成

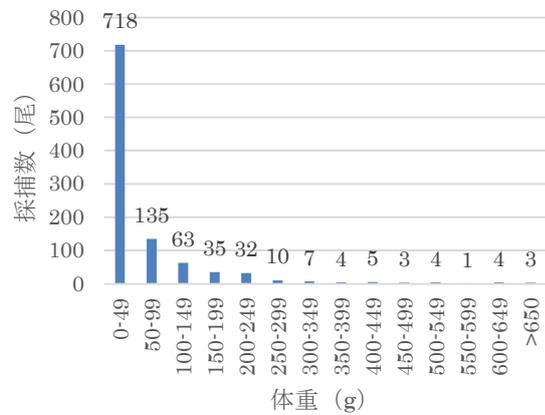


図4 採捕個体の体重組成

(2) 推定個体数と生息密度

Jolly-Seber法による平成29年8月以降の全調査区間におけるニホンウナギの推定生息尾数と100㎡あたりの生息密度を表2に、生息密度の推移を図5に示す。総面積は平成30年11月調査までを6、169㎡、令和元年7月調査までを6、020㎡、令和元年11月調査までを6、542㎡、令和2年7月以降は7、141㎡として密度を算出した。ニホンウナギの推定生息数は115-2、142尾、100㎡あたりの密度に換算すると1.6-25.0尾で、平均推定密度は9.4尾/100㎡であった。直近の令和5年10月は115尾と推定され、生息密度は7年間で減少傾向がみられた。

表2 Jolly-seber法による推定生息数及び生息密度

調査年度	H29		H30			R1			R2			R3			R4		R5		
調査月	8月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	9月	11月	7月	10月	11月	7月	10月
推定尾数(尾)	694	682	500	740	470	322	213	617	646	1638	408	432	412	597	2142	244	496	439	115
推定密度(尾/100㎡)	11.2	11.1	8.1	12.0	7.6	5.4	3.5	10.3	10.7	25.0	6.2	6.0	5.8	8.4	30.0	3.4	6.9	6.1	1.6

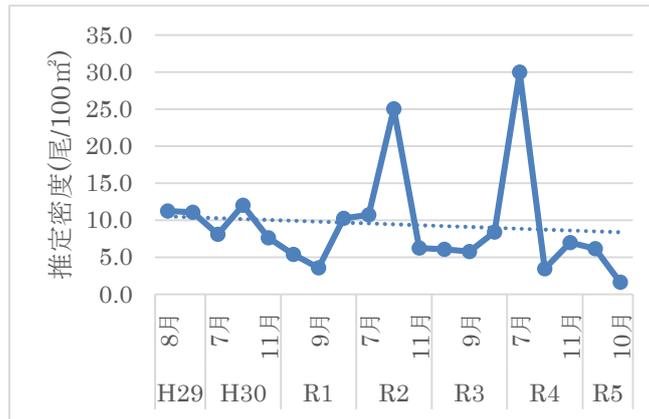


図5 Jolly-seber法による推定密度の推移

(3) 時系列変化

平成29年以降の各調査における3区間ごとの採捕合計数を表3に示す。なお、調査地点の最上流にあたる St. 22-23 のみ2区間の合計とした。また、調査季節については、6-7月の調査を初夏 (Early summer)、8-10月の調査を夏 (Summer)、11月の調査を秋 (Fall) として定義した。平成29年度から令和5年度における累計採捕数は調査区間の下流から中流域にあたる St. 4-12 で最も多く、初夏及び夏と比較して、秋は個体数が減少する傾向にあった。各年度ごとにおいても、概ね同様の傾向がみられたが、平成29年の秋は上流域で採捕数が多い傾向にあったほか、令和2年は年間通して秋が最も採捕数が多くなるなど、調査期間を通して規則性はなかった。

表3 日置川採捕調査におけるニホンウナギの時系列変化

Year	Season	St. 1-3	St. 4-6	St. 7-9	St. 10-12	St. 13-15	St. 16-18	St. 19-21	St. 22-23		
H29	Early summer	7	12	13	5	5	7	4			
	Summer	3	17	12	1	6	6	6	4		
	Fall	4	4	3	5	4	5	6	9		
	H30	Early summer	14	5	1	1	3	8	8	3	
		Summer	6	9	6	0	0	0	2	1	
		Fall	4	8	3	1	1	1	9	7	
		R1	Early summer	9	16	13	11	4	11	11	3
			Summer	9	16	24	9	3	3	10	9
			Fall	4	6	7	7	1	3	3	2
R2			Early summer	1	15	6	12	3	3	2	2
			Summer	5	12	9	3	8	0	1	1
			Fall	9	17	4	5	10	3	1	2
	R3		Early summer	5	14	6	7	7	7	6	4
			Summer	1	10	11	5	3	7	6	6
			Fall	1	7	9	4	3	7	6	6
		R4	Early summer	4	17	15	6	4	8	3	1
			Summer	5	10	19	16	3	3	11	2
			Fall	0	10	16	5	10	6	6	1
R5			Early summer	2	7	9	10	10	6	8	8
			Summer	3	5	12	9	8	3	5	3
			Fall	4	3	2	4	3	2	2	1
	合計		Early summer	42	81	66	62	41	36	45	25
			Summer	31	57	91	75	32	22	41	25
			Fall	26	55	45	30	35	19	27	23

(3) 降雨災害に対するニホンウナギの応答

一般化線形モデルを構築し、ベストモデルを含む AIC が低い上位 7 モデルを選択した結果、調査エリア、年、季節は説明変数として優位性が確認されたが、降水量及び降雨日数は優位性が確認されなかった（表 4）。

表 4 一般化線形モデルによる解析結果
(採捕数と環境要因の関係)

	(Int)	エリア	年	季節	当期間豪雨日数	前期間豪雨日数	当期間降水量	前期間降水量	df	logLik	AIC	delta	weight
1	1.714	+	+	+					16	-444.579	921.2	0	0.144
2	1.762	+	+	+		<0.001			17	-444.023	922	0.89	0.093
3	1.777	+	+	+				<0.001	17	-444.185	922.4	1.21	0.079
4	1.9	+	+	+	<0.001	<0.001			18	-443.376	922.8	1.59	0.065
5	1.738	+	+	+	<0.001				17	-444.524	923	1.89	0.056
6	1.663	+	+	+			<0.001		17	-444.526	923.1	1.89	0.056
7	1.345	+	+				<0.001		15	-446.553	923.1	1.95	0.055

また、日間降水量 150mm の影響を及ぼした自然災害を抽出した結果、4 個の台風が確認された（表 5）。いずれの台風もニホンウナギの時系列変化（表 3）に対する影響は確認されなかった。

表 5 調査期間中に日間降水量 150mm 以上の降雨をもたらした台風一覧

日付	台風	最大日間降水量	次回調査までの日数(季節)	激甚災害指定	備考
H29.9.16	18号	154.5mm	46日(Fall)		2日間で合計雨量300mm
H30.9.30	24号	272mm	57日(Fall)	○	最大で96mm/hの降水量を記録
R4.9.18	14号	175mm	17日(Summer)	○	新富町で河川氾濫や床上浸水の被害
R5.8.18	7号	199mm	46日(Summer)		

(4) 河川工事に対するニホンウナギの応答

堆積土砂撤去工事が実施された 250m 区間におけるニホンウナギの年度別採捕合計数と、その上下流 125m 区間におけるニホンウナギの年度別採捕合計数を表 6、7 に示す。工事が実施された令和 2 年度と他年度を比較した結果、工事区間に当たる 250m 間の採捕数は、工事が実施された令和 2 年度が初夏及び夏で最も少なくなった。一方で、工事区間の下流 125m 区間においては、夏及び秋で令和 2 年度が最も多くなった。

表6 工事区間 250m とその前後 125m におけるニホンウナギの採捕数。黒枠は工事期間内を示す。

H29	Early smmer	Summer	Fall	R3	Early smmer	Summer	Fall
工事区間下流125m	5	1	4	工事区間下流125m	7	3	0
工事区間内125m①	1	3	3	工事区間内125m①	6	3	0
工事区間内125m②	11	6	3	工事区間内125m②	6	8	2
工事区間上流125m	2	4	8	工事区間上流125m	3	7	2
H30				R4			
工事区間下流125m	1	0	0	工事区間下流125m	4	2	9
工事区間内125m①	3	0	1	工事区間内125m①	3	2	5
工事区間内125m②	7	1	7	工事区間内125m②	7	12	7
工事区間上流125m	3	2	5	工事区間上流125m	2	3	1
R1				R5			
工事区間下流125m	11	5	7	工事区間下流125m	7	5	3
工事区間内125m①	1	2	1	工事区間内125m①	8	3	1
工事区間内125m②	9	7	2	工事区間内125m②	7	6	2
工事区間上流125m	6	8	1	工事区間上流125m	2	2	2
R2				工事区間(250m)の採捕数			
工事区間下流125m	1	8	9	H29	12	9	6
工事区間内125m①	4	0	4	H30	10	1	8
工事区間内125m②	2	0	0	R1	10	9	3
工事区間上流125m	1	2	3	R2	6	0	4
				R3	12	11	2
				R4	10	14	12
				R5	15	9	3

表7 工事区間におけるニホンウナギの採捕数。黒枠は工事期間内を示す。

H29	Early smmer	Summer	Fall	R3	Early smmer	Summer	Fall
St. 15	0	0	2	St. 15	1	0	0
St. 16	0	1	0	St. 16	0	2	0
St. 17	1	2	2	St. 17	6	1	0
St. 18	4	3	2	St. 18	1	4	2
St. 19	3	2	0	St. 19	5	4	0
St. 20	4	4	2	St. 20	0	0	0
H30				R4			
St. 15	0	0	0	St. 15	1	2	0
St. 16	1	0	0	St. 16	1	1	1
St. 17	2	0	1	St. 17	1	0	4
St. 18	0	0	0	St. 18	6	2	1
St. 19	2	1	4	St. 19	2	9	6
St. 20	6	0	3	St. 20	0	1	0
R1				R5			
St. 15	1	1	0	St. 15	2	2	1
St. 16	0	0	1	St. 16	2	0	0
St. 17	1	1	0	St. 17	3	0	1
St. 18	3	2	0	St. 18	1	3	1
St. 19	6	2	2	St. 19	7	2	0
St. 20	0	3	0	St. 20	0	2	1
R2				工事区間の採捕数合計(St15-20)			
St. 15	3	1	3	H29	12	12	8
St. 16	2	0	3	H30	11	1	8
St. 17	0	0	0	R1	11	9	3
St. 18	1	0	0	R2	7	2	6
St. 19	1	0	0	R3	13	11	2
St. 20	0	1	0	R4	11	15	12
				R5	15	9	4

(5) 河川工事による生息環境の変化

平成30年度、令和2年度、及び令和3年度の調査で得られた工事区間の底質組成を図6に示す。平成30年度と比較して、堆積土砂撤去工事の直後に実施した令和2年度は、St. 17-20でSandの割合が大きく減少し、Pebbleが増加するなど粒径が大きくなっていた。減少したSandの割合は、令和3年度にはSt. 19を除く地点で増加していた。一方で、St. 16は、工事直後の令和2年度で増加し、令和3年度には減少した。

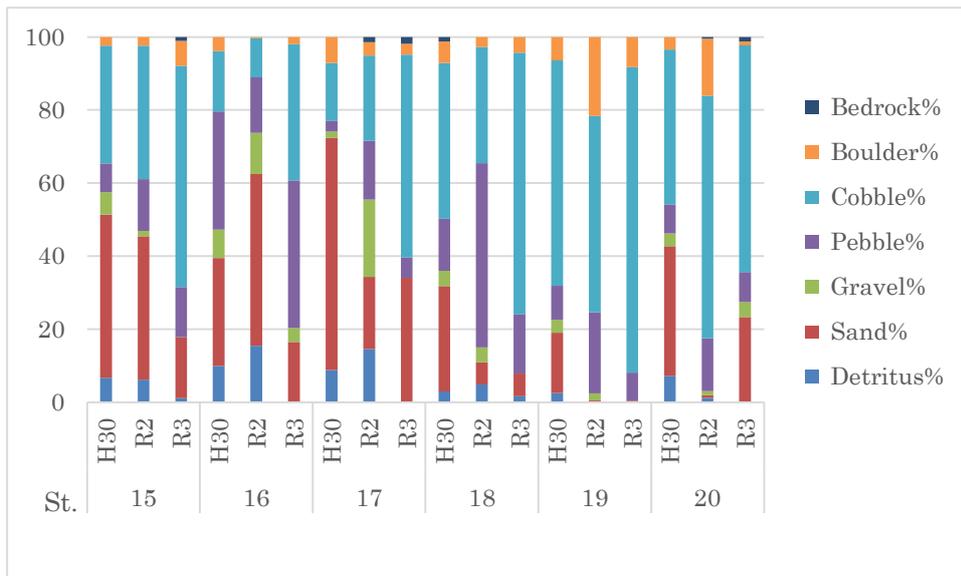


図6 工事前後における工事区間の底質組成の変化。Detritus（有機堆積物）、Sand（砂： $<2\text{mm}$ ）、Gravel（小礫： $2-16\text{mm}$ ）、Pebble（中礫： $17-64\text{mm}$ ）、Cobble（大礫： $65-256\text{mm}$ ）、Boulder（巨礫： $>256\text{mm}$ ）、Bedrock（岩盤）。工事前（H30）、工事直後（R2）、工事1年後（R3）を示す。

令和元年度、令和2年度、及び令和3年度の調査で得られた工事区間の隠れ家の被覆度を図7に示す。工事が実施された令和2年度は、工事前年度と比較して、全ての地点で隠れ家の被覆度が減少したが、多くの区間で翌年には一定の回復がみられた。実際の調査においても工事によって撤去された草が区間の一部で翌年には再度繁茂する姿が確認された（図8）。

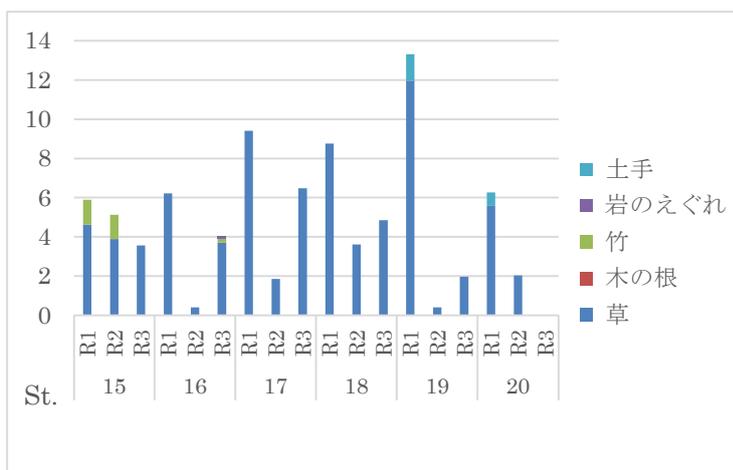


図7 工事前後における隠れ家の被覆度の変化。工事前（R1）、工事直後（R2）、工事1年後（R3）を示す。



図8 工事前後における工事箇所（St. 16）の経時変化。

課題と対応策：

(1) 自然攪乱（降雨災害）に対するニホンウナギの応答

ニホンウナギの採捕数と降水量や豪雨日数の関係を解析した結果、年や季節による降水量や豪雨日数の違いにより、ニホンウナギの採捕数が増減するという傾向はないという結果が得られた。そこで、河川内の分布そのものに影響するかを調べるため、特筆した雨量や降雨災害をもたらした台風の前後でニホンウナギの採捕数を比較した結果、採捕数に明確な違いはないことが確認された。以上の結果から、台風やそれに伴う豪雨がニホンウナギに与える影響は小さいと考えられる。しかし、台風の通過後から調査日までの間隔が 17-57 日と開いていることから、台風直後のニホンウナギの応答に関する知見は不足しており、今後のより詳細な調査研究によって明かされることを期待したい。

(2) 人為攪乱（河川工事）に対するニホンウナギの応答

令和2年度に行われた堆積土砂撤去工事がニホンウナギに与える影響を解析した結果、工事期間中と工事完了1か月後の採捕調査において、工事区間における採捕数に明確な減少が確認された。特に、工事完了1か月後の夏期調査においては、工事区間でニホンウナギは全く確認できず、他年度平均 8.8 尾（1-14 尾）と比較しても差は明瞭であった。工事区間内における採捕数が減少した一方で、工事区間外の下流 125m 区間においては採捕数が増加していた。過年度調査において、ニホンウナギは大きく移動せず定住性が強いことが報告されていることから、工事によって定住場所を奪われたニホンウナギは下流に移動し、工事区画を抜けると大きく移動せず定住したと考えられる。工事の影響で減少したと考えられるニホンウナギの採捕数は、工事完了 3 か月後の 11 月には平年程度の水準まで回復しており、翌年度の調査においても採捕数の減少は確認されなかったことから、工事から比較的早期に本来の分布へと復元することが示唆された。

堆積土砂撤去工事では、河川内に重機を入れて、堆積した土砂を取り除くため、粒径の小さい砂が少なくなったと考えられる。なお、工事区間内の下流においては砂の割合が増加したが、これは河川内の工事区間下流に盛土と敷砂利によって設置した工事用道路の影響と考えられる。底質組成は、河川工事翌年度の調査においても河川前の組成に復元されておらず、堆積土砂撤去工事によって、その後の底質組成が変化することが示唆された。一方で、隠れ家の被覆度は比較的早期に回復する傾向がみられた。堆積土砂の撤去に伴って、砂州に繁茂した草木も撤去されたため、工事完了後には、主に植生で構成されていた隠れ家の被覆度が大きく減少することが確認されたが、多くの区間で翌年には一定の回復がみられた。過年度調査において、河岸の草木はニホンウナギの隠れ家としてウナギのサイズを問わず広く利用されていることがわかっており、隠れ家の回復は、工事から比較的早期にニホンウナギが本来の分布へと復元した要因の1つであると推察された。今回の結果においては、河川工事がニホンウナギの分布に与える影響は、隠れ家となる草木の回復が早ければ、比較的早期に回復することが示唆されたが、工事の内容や河川規模によって異なる結果が得られると推察される。今後のより詳細な調査研究によって明かされること

を期待したい。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	高知県物部川におけるウナギ生息状況に対する環境変動の影響調査		
担 当 者	高村 一成（高知県内水面漁業センター）		

令和5年度の成果の要約：

高知県東部に位置する、物部川下流の2地点にて、河床材の評価と電気ショッカーによるニホンウナギ（以下、ウナギ）の採捕を実施した。また、出水前には箱漁法を用いた採捕も行った。大量出水による河床材の変化と、ウナギの生息状況の変化に相関が見られるか検証した。電気ショッカー及び箱漁法によって計41個体を採捕し、全てのウナギサンプルの全長と体重の測定、成熟段階の判別、体表粘液からのDNA採取及びイラストマー注入による標識放流を行った。採捕個体の平均全長は42.7cm、平均体重は126.8gであった。また、成熟段階は、Y1が0個体、Y2が40個体、S1が1個体、S2が0個体であった。

ウナギが採捕されたのは、河床に一定の大きさの浮石が存在する箇所に限られていた。また、出水前と比較すると河床材の平均粒度や巨礫率、ウナギが採捕された箇所の河床材の大きさに小型化傾向が確認された。

年度計画：

著しい減少傾向にあるウナギ資源を保全するためには、本種の河川環境に応じた生態を明らかにする必要があり、河川環境とウナギの生息状況の関係を明らかにする上で河川環境の変化の調査は必要不可欠である。物部川においても、河床環境の変化がウナギの生息状況にどのような影響をもたらすのか不明な点が多い。そこで、出水が河床環境とウナギの生息状況に及ぼす影響について調査を行うこととした。

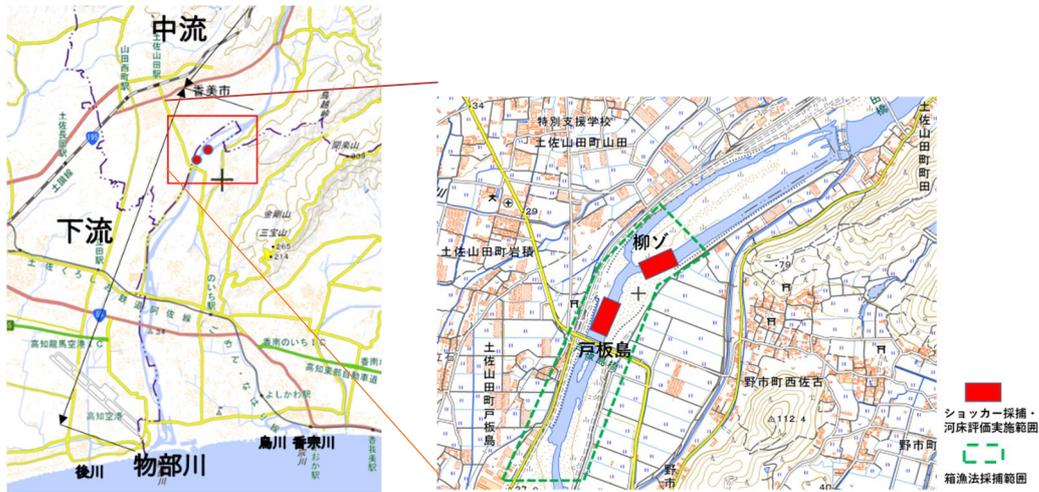
出水の前後に河床材の評価とウナギの採捕を行い、出水が河床材とウナギの生息に及ぼす影響を調査する。

また、採捕個体については、移動、成長、及び分布密度を分析するため、DNA抽出による個体識別及びイラストマーを行い放流した。

方法：

調査地点の位置を図1に、各調査地点の詳細を図2及び3に示した。物部川下流の2地点（戸板島、柳ゾ）において、河床評価と電気ショッカーによるウナギの採捕を実施した。出水前の調査は、河床評価を6月27日（戸板島）と7月27日（柳ゾ）に、採捕を7月26日（戸板島）と7月28日（柳ゾ）に実施した。出水後の調査は、採捕を9月19日（柳ゾ）、9月20日（戸板島）に、河床評価を10月2日（柳ゾ）、と10月3日（戸板島）に実施した。

また、出水前に図1に破線で示した範囲で箱漁法によるウナギの採捕を行い、電気ショッカーで採捕したウナギサンプルと同様に測定した。サンプルは全て体表粘液からDNAを採取し、イラストマーにより標識した上で放流した。



国土地理院地図

<https://maps.gsi.go.jp/#15/33.593298/133.697605/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f0>

図1 調査・サンプル採捕区域

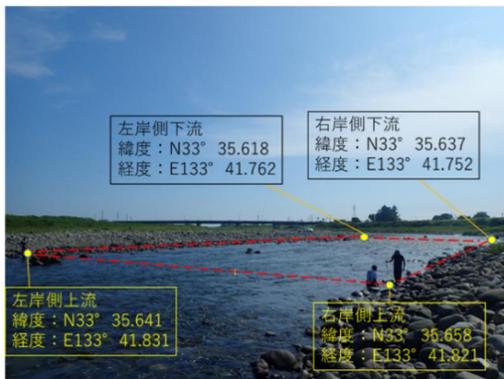


図2 調査地点全景 (柳ゾ)

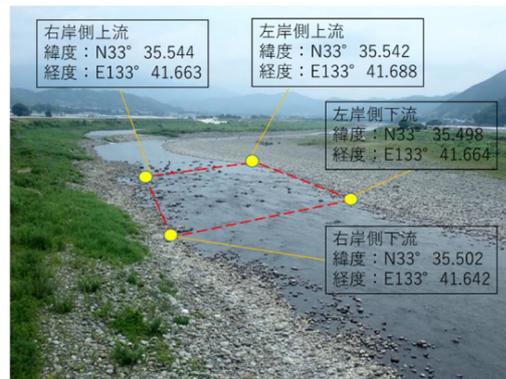


図3 調査地点全景 (戸板島)

河床評価は、調査範囲の下流端から川を横断する方向に測線を取り、この測線に沿って20cm毎に河床の状況を7段階(0:有機泥落ち葉などの堆積物、1:直径2mm以下の砂礫、2:2~20mmの小礫、3:20~50mmの中礫、4:50~256mmの大礫、5:256mm~の巨礫、6:巨礫として5に分類するには大きすぎる岩と判断したもの、岩盤、コンクリート)で評価した。また、巨礫率(評価値5以上の評価地点数の全調査地点数に対する割合)及び底質粗度(全評価値の平均)を算出した。併せて1m毎の水深も計測した。全ての統計解析には、フリーソフトウェア「R-3.4.0」を使用した。

結果：

調査期間の戸板島水位を図4に示す。期間中、8月17日に最高水位234cmを記録した。

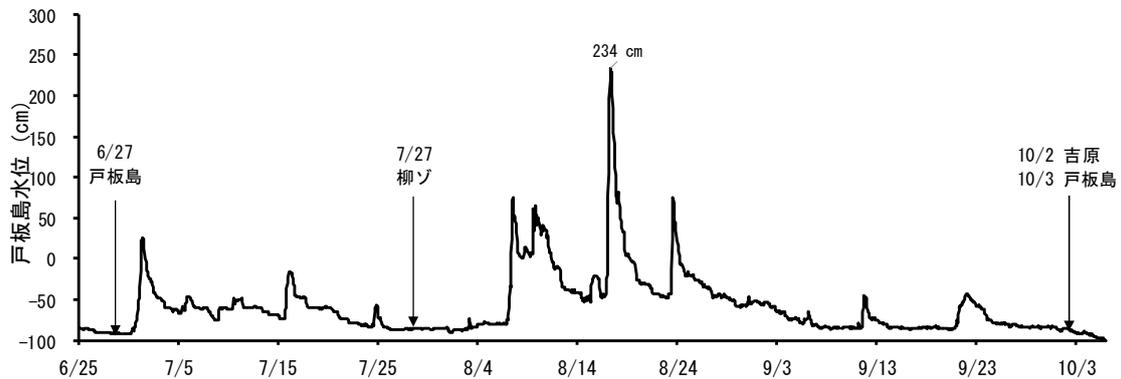


図4 6月下旬～10月上旬の戸板島水位と河床評価実施日

結果：ウナギの採捕結果

電気ショッカーで23個体、箱漁法で18個体の計41個体を採捕した。全個体の全長及び体重の組成を、それぞれ図5及び図6に示した。全長については、最大77.9cm、最小24.3cm、平均42.7cmで、全長50cm以下が73.2%を占めた。体重については、最大681.6g、最小14.5g、平均152.7gで、体重100g以下が65.9%を占めた。なお、箱漁法は小さい個体は脱出でき、大きい個体は入りきらないため、採集される個体サイズに限られ、実際の体長組成とは異なる可能性がある。

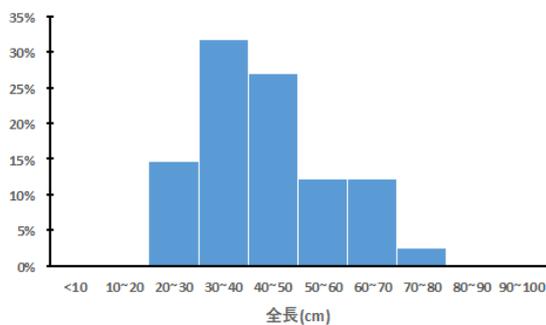


図5 採捕個体の全長分布

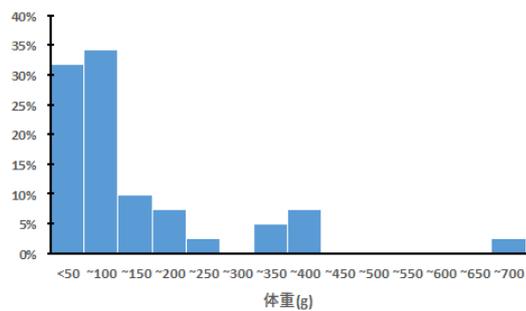


図6 採捕個体の体重分布

また、全個体成熟段階を図7に示す。黄ウナギ (Y1 及び Y2) の Y2 が 40 個体、銀ウナギ (S1 及び S2) は、10月に S1 が 1 個体確認された。

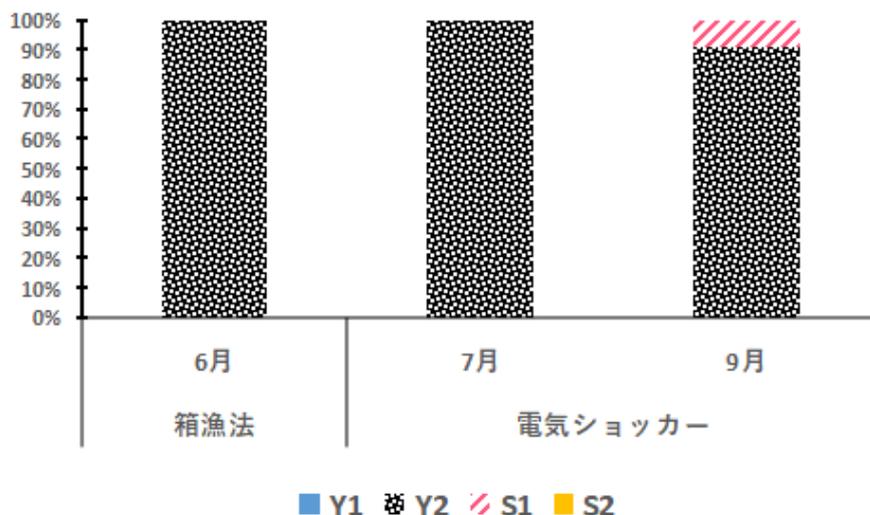


図7 採捕個体の成熟段階別構成比

結果：

河床評価

河床評価の結果を表1及び図8に示す。平均底質粗度は、大量出水前の戸板島が4.452、柳ゾが4.449、大量出水後の戸板島が4.330、柳ゾが4.402といずれも低下した。巨礫率についても、大量出水前の戸板島が50.3%、柳ゾが54.6%、大量出水後の戸板島が40.1%、柳ゾが51.6%といずれも低下し、戸板島においては10ポイント以上低下した。

出水前後の河床粒度の組成を比較すると、戸板島、柳ゾ共に出水後は組成が有意に小型化していた (Tukey's multiple comparison produce)。今回調査した2地点には、背の高い草や泥質の河床、護岸で生じた隙間といったウナギの隠れ場所は見られなかった。

表1 河床評価の結果

評価数カウント	戸板島		柳ゾ	
	出水前	出水後	出水前	出水後
0：有機堆積物	0	0	0	0
1：砂	0	0	0	0
2：小礫	24	19	44	62
3：中礫	285	343	297	336
4：大礫	1539	1730	1390	1410
5：巨礫	1728	1266	2065	1896
6：巨岩、コンクリ	143	133	16	34
データ数	3719	3491	3812	3738
平均値	4.452	4.330	4.449	4.402
巨礫（5以上）	1871	1399	2081	1930
巨礫率	50.3%	40.1%	54.6%	51.6%

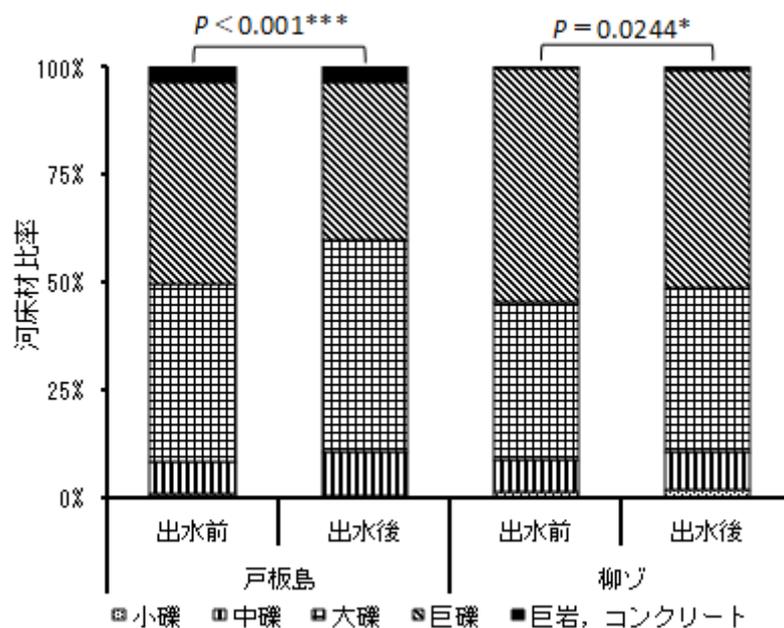


図8 河床材の構成比

ウナギの採捕と河床評価の結果との比較

調査地点における、電気ショッカーによるウナギの採捕と個体発見場所の平均岩面積を表2に示す。採捕の結果、出水前に戸板島で6個体（逃避確認含めると7個体）、柳ゾで6個体（逃避確認含めると9個体）を採捕した。また、出水後に戸板島で7個体（逃避確認含めると11個体）、柳ゾで4個体を採捕した。

単位調査面積あたりの確認個体数は、大量出水前の戸板島では0.203尾/100 m²、柳ゾでは0.246尾/100 m²で、2地点間の違いは小さかったが大量出水後は戸板島が0.112尾/100 m²、柳ゾが0.335尾/100 m²と、2地点間では3倍近い差が生じた。

表2 調査結果一覧（令和5年度）

実施期間	実施内容	地点名	面積 (m ²)	採捕尾数	逃避個体 含めた 確認尾数	確認個体数 (尾/m ²)	採捕個体 平均体長 (cm)	採捕個体 平均体重 (g)	確認個体 発見場所 平均岩面積 (cm ²)
6月27日	河床評価	戸板島	3443.7	6	7	0.0020327	52.5	215.2	7114.3
7月26日	ウナギ採捕								
7月27日	河床評価	柳ゾ	3654.1	6	9	0.0024630	32.4	44.4	2550.0
7月28日	ウナギ採捕								
8～9月:大雨・増水期間									
9月19日	ウナギ採捕	柳ゾ	3563.3	4	4	0.0011225	51.8	237.2	2550.0
10月2日	河床評価								
9月20日	ウナギ採捕	戸板島	3285.6	7	11	0.0033479	41.7	143.8	8620.0
10月3日	河床評価								

ウナギが確認された石の大きさ（上面の面積）を図9に示す。平均値を見ると、戸板島では出水前が7,114.3 cm²、出水後が8,620.0 cm²と大型化したが、柳ゾでは出水前後で同じ値（2,550.0 cm²）であった。

有意差が見られたのは、大量出水後の戸板島（9月20日）と柳ゾ（7月28日、9月19日）の間のみで、大量出水前後の同一地点における有意差は認められなかった（Tukey's multiple comparison produce）。今回の調査では、出水によるウナギの生息状況の変化を捉えることはできなかった。また、今回採捕、確認された全てのウナギは、上面の表面積が約1,200 cm²以上の浮石から出現した。

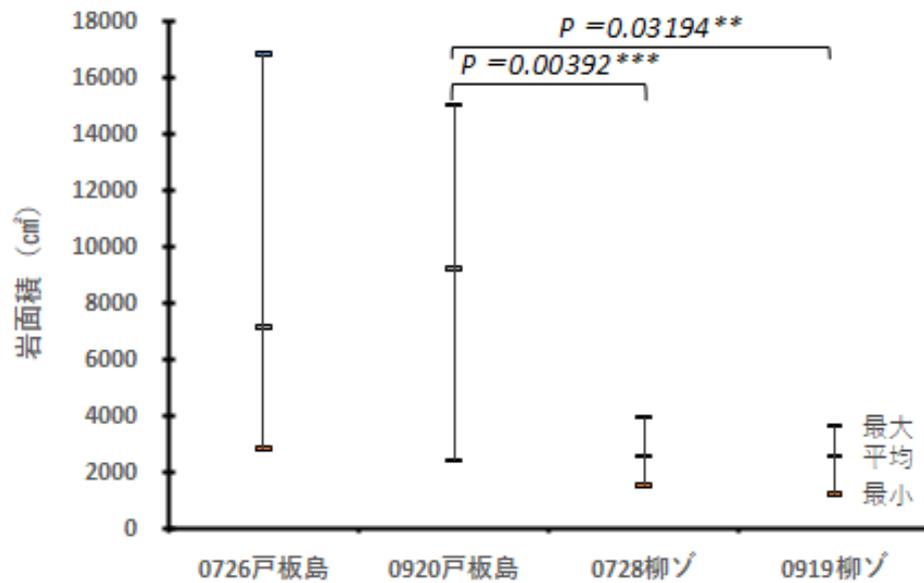


図9 ウナギが確認された浮石の上面面積

ウナギの全長とウナギが確認された浮石の面積の関係を図10に示す（なお、逃避個体は確認時の目測でおおよその全長を記録した）。ウナギの全長とウナギが確認された浮石のサイズの間には、有意な相関は認められなかった（Spearman rank order correlation、 $\rho=0.3596972$ ）

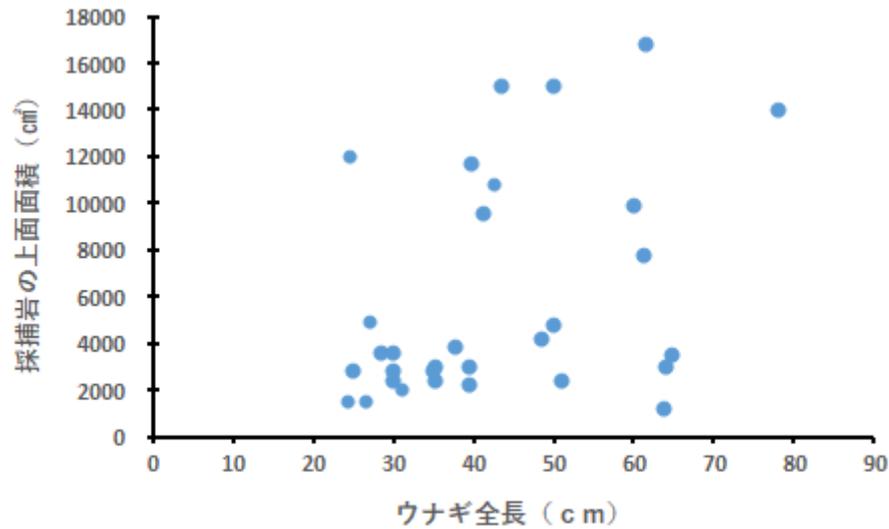


図10 ウナギの全長とウナギが確認された浮石の面積

なお、今回の調査ではウナギが確認された地点の水深についても記録したが、水深とウナギの採捕数や全長との間に相関は見られなかった。

考察：今回の調査では、大量出水後の河床材の粒度の小型化が確認された。また、有意差は認められなかったが、大量出水後の戸板島ではウナギの確認された浮石が大型化した。大量出水による粒径の小さい河床材の流入で、戸板島ではウナギが影響を受け、大型の浮石に移動した可能性が考えられる。

課題と対応策：今後の課題としては、物部川におけるウナギの具体的な保全策の検討に向け、河床環境の変化とウナギの生息状況の関係について、より詳細かつ定量的に解明する必要がある。今年度の調査で大量出水が河床粒度やウナギの生息する環境に影響を与えていることは明らかになったものの、より具体的かつ詳細に影響を定量化するためには、継続的なデータの蓄積が必要である。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	和歌山県高瀬川におけるニホンウナギ個体群動態と 稚魚短期育成による放流効果の把握		
担 当 者	福田野歩人、山本祥一郎（水産研究・教育機構）、田中俊充（和歌山 県内水面試験池）、揖善継（和歌山県立自然博物館）		

令和5年度の成果の要約：

和歌山県高瀬川にて、4月にシラスウナギと短期中間育成稚魚（以下、育成クロコ）に耳石標識を施した後に放流、7月には育成クロコに外部標識（イラストマー）を施して放流し、10月に捕獲調査を実施した。また、7月に外部標識した育成クロコについては、電気ショッカーによる採捕効率を調べるため、放流直後の捕獲試験を行い、捕獲効率は平均17.6%（標準偏差5.2）と算定された。10月の捕獲調査について放流個体の生残数を推定したところ、4月放流シラスウナギ、4月放流育成クロコ、7月放流育成クロコの生残率はそれぞれ2.1%、7.8%、33.4%であった。この結果、シラスウナギの生残率は極めて低い可能性が示唆され、中間育成によりクロコとすると生残率が高まることがわかった。黄ウナギの標識再捕調査を7月、10月に実施し、過年度の調査結果と合わせて解析した結果、黄ウナギの見かけの生存率は年56.6%であった。また、成長について von Bertalanffy 成長曲線のパラメータ推定を行い、 k と L_{∞} は0.020、1700（mm）と推定され、高瀬川の黄ウナギの成長を一般化することができた。河川での黄ウナギ期の基礎的な生物学的情報はいまだ不足しており、本課題で貴重な一知見が得ることができた。

年度計画：

シラスウナギおよび育成クロコの放流調査を高瀬川にて実施し、シラスウナギ着底後の個体数変化および、短期中間育成による放流効果を調べる。また、同河川にて、黄ウナギの標識再捕調査を実施し、個体群動態を把握する。

方法：

- (1) シラスウナギおよび育成クロコの個体数変化の把握

試験魚

千葉県利根川で2023年2月12日、2023年4月11日に採集されたシラスウナギを試験魚とした。2月12日採集魚を育成して育成クロコ群（以下、育成クロコ①）とし、4月11日採集魚はシラスウナギ群として、4月の高瀬川への放流に用いた。また、放流するものとは別に4月11日採集されたシラスウナギの一部を飼育して育成クロコ群（以下、育成クロコ②）とし、イラストマー標識をして7月19日に放流した。

放流用シラスウナギ群は、4月11日に利根川で採集された後、日光へ輸送して、2つの40L水槽でそれぞれ550個体ずつ保管した。放流前サンプルとして、上記とは別に、形態計測と保存用に28個体をサブサンプリングした。

育成クロコ①は、2月12日に利根川で採集されたシラスウナギ（到着時水温5.5℃、塩分1）を日光庁舎へ輸送し、水槽2つにそれぞれ323尾ずつを収容して4月17日までに飼育した。飼育時には、不透明の塩ビ製の水槽（40L、30cm×65cm×30cm（水深20cm））を用い、隠れ家として10cm塩ビ管を10本入れ、エアストーンでエアレーションを行った。230～246ml/minの掛け流しをして、換水した。各水槽300Wヒーター2本を入れ、収容から3日間で水温27度へと徐々に加温し、その後27度で維持した。餌は、収容6日後から、冷凍赤虫を飽食で1日3回（平日）に与え、収容13日後（2/27）から、1日3回（平日）人工飼料を飽食で与えた。3月10日、40L水槽から300L水槽へ（50cm×100cm×50cm（水深30cm））移し、飼育した。放流前（4/13）、30個体を形態計測と保存用にサブサンプリングした。

育成クロコ②は、4月11日採集されたシラスウナギを日光庁舎へ輸送し、育成クロコ①と同様の条件で、7月放流前まで育成した。

放流前の耳石標識方法

シラスウナギ群と育成クロコ①の耳石にALC標識を施した。シラスウナギ群は、4月13日～14日にALC標識を行った。標識に用いるALC濃度はALC100ppmとし、ALCを1規定NaOH溶液に溶かした後、1規定HCl溶液で中和して、pH8にした後、5Lの飼育水に混ぜて作成した。シラスウナギを15℃で16時間、浸漬させた。育成クロコ①の耳石は、放流前に2度のALC標識を行った。4月6日～7日、4月13日～14日、クロコをそれぞれ27℃、15℃で16時間、5LのALC溶液（100ppm）に浸漬して、耳石に2重ALC標識ができるように行った。なお、4月7日～12日の間 短期飼育群の飼育水温は20℃で餌は赤虫とし、12日～13日に飼育水温を15℃へ低下させた。

高瀬川での放流試験

放流個体（シラスウナギ、育成クロコ①）を水産技術研究所日光庁舎から和歌山県内水面試験地へ輸送し、4月19日に高瀬川で放流を行った。高瀬川の飛鳥橋下（K4）にて、それぞれシラスウナギ群は1088個体を272尾ごとに4つ、クロコ群は366個体を183個体ごとに2つに分けて、それぞれを河川内に置いた放流カゴ（φ30cm塩ビ管に4つのメッシュ付き通水孔あり）に収容した。4時間、放流カゴ内で現地の水へ馴致させた後、放流カゴを撤去し、開放した。育成クロコ②はイラストマーで赤、青、緑で標識し、7月19日早朝、高瀬川の飛鳥橋下（K4）から150～100m下流の区間に、各色55個体の計165個体を放流した。

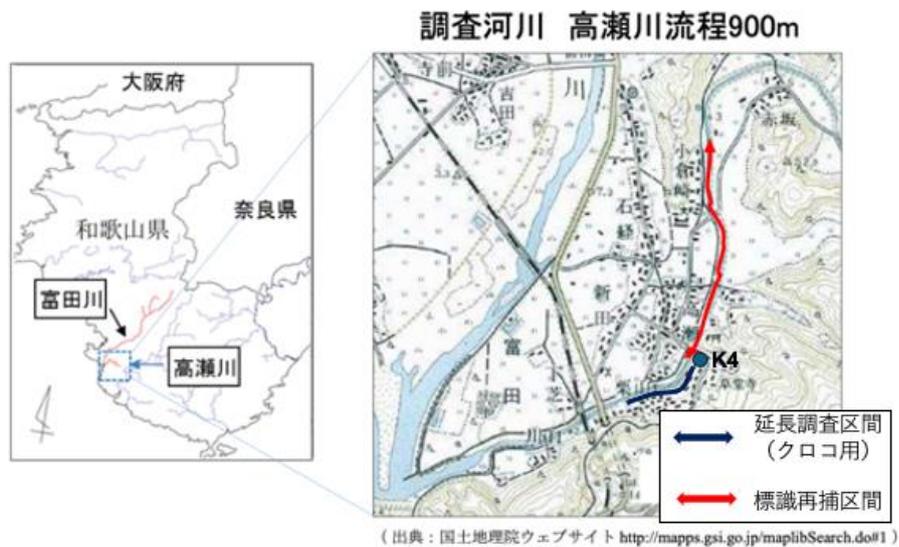


図1 和歌山県高瀬川の調査区間

電気ショッカーの捕獲効率調査

7月19日、育成クロコ②の放流から当日午後の電気ショッカーでの捕獲調査までの間、放流地点(K4、図1)より150～100m下流の放流区間の上限と下限には1mmメッシュの仕切り網を設置し、逸出しないようにした。電気ショッカー2台(Smith-root社製1台および自作1台)で、捕獲調査を実施した後、仕切り網は撤去した。

放流個体の再捕獲調査

2023年7月18日～20日、10月25日～27日に、クロコ放流地点(K4)から250m下流を起点とし、その上流1150m区間で、電気ショッカーで全長15cm以下のウナギの捕獲を実施した。捕獲したウナギは、0.1%の2-phenoxyethanolで麻酔して形態計測したのち、麻酔下で安楽死させて冷凍で保存した。後日、冷凍サンプルから耳石を取り出し、研磨して蛍光顕微鏡下でALC標識の有無を調べた。

結果：

捕獲調査結果

4月に放流したシラスウナギ群、育成クロコ①群の平均全長(±標準偏差)は、それぞれ59.0±2.0mm(n=28)、68.4±10.9mm(n=30)、平均体重(±標準偏差)は0.14±0.02g、0.26±0.17gであった(図2)。7月に放流した育成クロコ②群の平均全長および体重(±標準偏差)は、90.8±17.1mm(n=20)、0.75±0.45gであった(図2)。

7月の再捕獲調査では、全長15cm以下のニホンウナギは73個体が捕獲された。捕獲されたニホンウナギの平均全長および体重(±標準偏差)は、108.5±21.8mm、1.67±0.93gであった。耳石

ALC 標識の判別結果で、4月放流シラスウナギであったのは1個体（全長 64.4mm）、4月放流クロコは1個体（全長 68.3mm）であった。

10月の再捕獲調査では、全長 15cm 以下のニホンウナギは 144 個体が捕獲された。捕獲されたニホンウナギの平均全長および体重（±標準偏差）は、103.8±18.7 mm、1.38±0.76 g であった。耳石 ALC 標識の判別結果で、4月放流シラスウナギであったのは4個体（全長 90.0±9.9mm）、4月放流クロコは5個体（全長 99.2±11.0mm）、7月放流クロコは8個体（全長 102.3±20.3mm）であった。

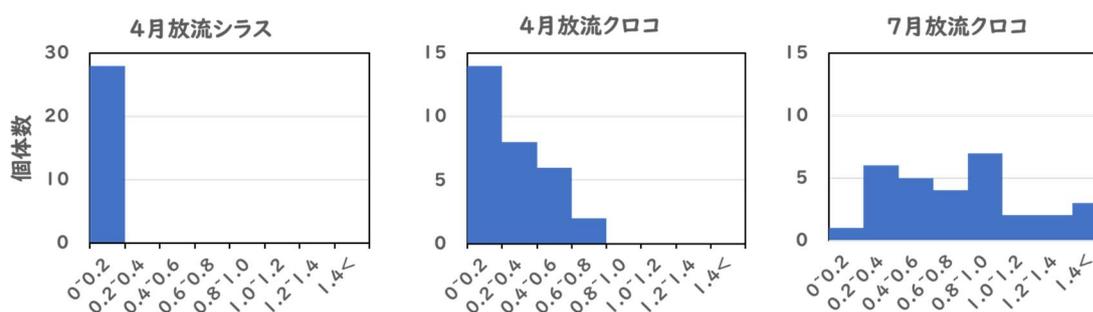


図2 放流種苗の体重組成

電気ショッカーの採集効率

赤、青、緑のイラストマー標識を施した各 55 個体を放流し、同日、再捕獲を試みた結果、赤 13 個体、青 8 個体、緑 8 個体が捕獲された。その結果、採集効率の平均（±標準偏差）は 17.6%（±5.2）であった。

推定生残率

採集効率を調べるのに用いた放流群は全長 90.8±17.1 mm であり、10月に再捕獲したシラスウナギ、育成クロコ群と類似したものであった。7月時には放流群は小さく、調査で求めた捕獲効率と異なる可能性があると考え、採捕時の全長が類似する 10月時の再捕獲調査の放流群（4月放流シラスウナギ 4 個体、4月放流クロコ 5 個体、7月放流クロコ 8 個体）について、調査区域内での個体数を推定することとした。捕獲個体数を採捕効率の 0.176 で除して、4月放流のシラスウナギ群は 22.7 個体、4月放流の育成クロコ①28.4 個体、7月放流の育成クロコ②45.5 個体が河川内に生残していると推定された。放流時の個体数はそれぞれ 1088 個体、366 個体、136 個体（電気ショッカーの採捕効率推定のため、放流当日に捕獲した 27 個体は除く）であるため、放流個体の 10月時点での推定生残率は、それぞれ 2.1%、7.8%、33.4%であった（図3）。前者 2 群は半年間の生残、後者は 3ヶ月間の生残を表している。後者が残り 3ヶ月も同じ生残率でいると仮定した場合、半年間の生残率は 11.2%と推定された（図3）。

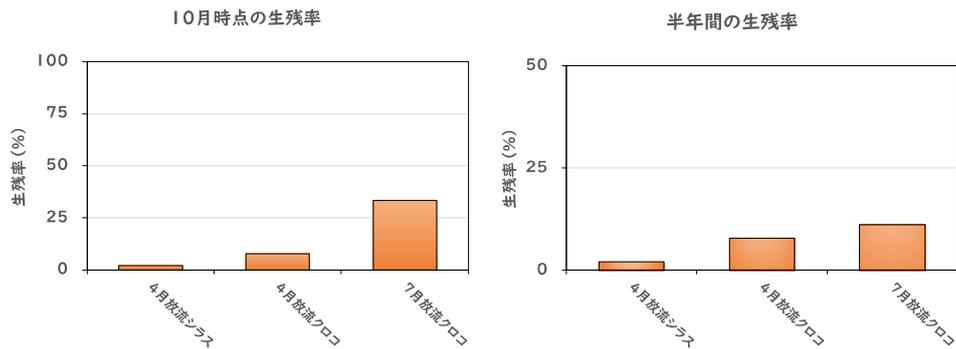


図3 各放流種苗群の推定生残率

(2) 黄ウナギの標識採捕調査

方法：

和歌山県高瀬川黄ウナギ調査区間にて、7月、10月に電気ショッカー調査を実施した。全長15cm以上の個体について、形態計測後にPITタグを挿入し、再放流をおこなった。2017年以降の標識再捕データを用いて、Jolly Seber法による個体数推定、Cormack Jolly Seber法による見かけの生存率推定、Fabens法を用いてvon Bertalanffy成長曲線に当てはめ、 k と L_{∞} を求めた。

結果：

7月20～21日の調査（区間は図1参照）では122個体を捕獲し、そのうち再捕個体は29個体であった。10月26～27日の調査では127個体を捕獲し、そのうち再捕個体は26個体であった。

Jolly-Seber法による推定では、7月の個体数は673（±233）と推定された。推定個体数密度は、1平米あたり0.18個体、流程1mあたり0.75個体であった。ただし、推定個体数密度は、2022年8月以降に大きく変動していた。2022年8月以降の調査回数がまだ少ないこと、2022年10月では新規捕獲個体に標識せず標識再放流個体が12個体と少なかったことなどにより、推定値が大きくぶれているものと考えられた。調査前後の捕獲調査データが十分である2018～2021年でみると、個体数密度は0.20～0.53個体/㎡と推定された。これらは高瀬川での個体数密度を反映しているものと考えられる。Cormack Jolly Seber法により、黄ウナギの見かけの生存率を推定したところ、年56.6%と推定された。Fabens法によるvon Bertalanffy成長曲線のパラメータ推定を行った結果、 k と最大全長 L_{∞} は0.020、1700（mm）と推定された。ウナギは大きくなると産卵回遊のために降海することから、ここで得られた最大全長はウナギの成長の実態を表すものではないことは明らかである。高瀬川のこれまでの調査で捕獲された最大体長は642mmであり、600mmを超えたあたりで産卵回遊へ旅立っているものと考えられる。得られた成長曲線は、全長150mmから600mmまでの成長について高瀬川での成長を表しているものと考えられる。高瀬川では全長150mmから600mmとなるのに、17年要すると計算され、非常に成長が遅いものと推察された。なお、最大全長 L_{∞} を700（mm）に固定して k を推定した場合には、0.069であった。



図3 Jolly Seber 法による推定個体数密度の推移

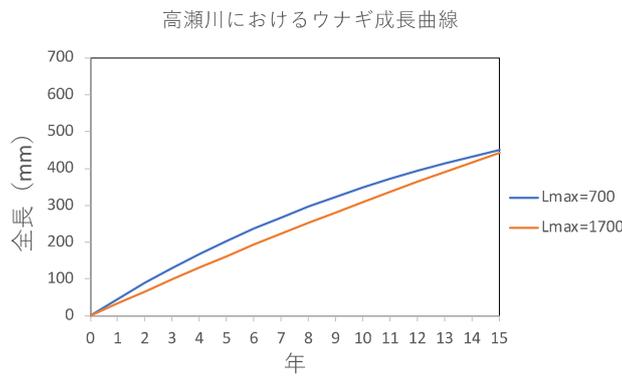


図4 Fabens 法による高瀬川黄ウナギの von Bertalanffy 成長曲線

課題と対応策：

実際の運用を考えて、養殖場で養成したものを放流用の育成クロコに用いる場合には、シラス育成後1ヶ月程度で初め的水槽替えをするため、そのタイミングの種苗を放流に利用することが考えられる。1ヶ月の育成で0.2gのシラスウナギは1g程度のクロコになる。今回の試験では1g程度の育成クロコ②群で生残率が最も高く、養殖場で得られる1gの育成クロコの利用可能性が考えられる。そのため、今後、養殖場で育成されたクロコ群を用いた放流後の生残率をシラスウナギと比較して調べるのが重要である。本研究で、黄ウナギ期の天然個体のみかけの生存率を算出できたが、自然死亡と調査区間からの逸出がその減耗要因として考えられる。ウナギは銀化して産卵場に向かうと逸出してしまうこと、また、黄ウナギ期の生息場所の移動でも調査区間から逸出する可能性がある。今後、黄ウナギ期の真の生存率を明らかにするには、調査区間からの逸出率を調べる調査が必要である。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	気候変動が天然ニホンウナギに及ぼす生理的影響の評価手法の開発		
担 当 者	安池 元重、馬久地 みゆき、本郷 悠貴、相馬 智史、朝倉 大河、福田 野歩人、矢田 崇、山本 祥一郎（水産研究・教育機構）		

令和5年度の成果の要約：

本課題は、野外で非侵襲的にサンプリングを行い、気候変動が天然ウナギに及ぼす生理的影響を評価するための手法を開発することを目的とした。まず技術開発の第一段階として、野外で非侵襲的にサンプリング可能な部位である粘液に着目し、粘液採取から網羅的な遺伝子発現情報の取得（RNA-Seq）までの実験手法を確立した。そして本手法により、“濁り”、低温（10℃）や高温（30℃）などの河川環境の攪乱を模した飼育試験により得られた粘液サンプルを解析することで、各環境ストレス下におけるニホンウナギの生理状態を把握するための指標となり得る候補遺伝子を同定することができた。今年度は飼育試験の成果ではあるが、開発した非侵襲的な分析方法と同定した候補遺伝子を活用することで、将来、天然ウナギの生理状態（健康状態）を把握するための技術開発につながることを期待される。

年度計画：

気候変動に伴う温暖化や降雨の激甚化による河川環境の変化が、天然ニホンウナギに生理的な影響（環境ストレス）を及ぼすことが懸念されている。そこで、気候変動に起因する天然ニホンウナギへの物理的影響として想定される（1）豪雨に伴う土砂流出による“濁り”と（2）水温変化に着目し、攪乱を模した試験区にニホンウナギを飼育することで、各環境ストレスに応答するニホンウナギの遺伝子（生理的な指標）を探索するとともに、野外で非侵襲的にサンプリングするための手法を開発する。

方法：

環境ストレスに対するニホンウナギの生理的な影響の指標として利用できる遺伝子を探索するため、以下の水槽試験を行なった。試験魚には、養鰻場で育てられた 300g 程度のニホンウナギを用いた。

（1）濁度処理試験

試験区として、濁度あり区 [50～100NTU (Nephelometric Turbidity Unit) になるようにカオリン（天然粘土鉱物）を添加]、濁度なし区を設けた。各試験区にニホンウナギ5尾をアクリル水槽 [幅 89×奥行 29×高さ 30cm（水深 21cm）] に収容し、1日間かけて水温を 20℃に徐々に上昇させた。4日間馴致したのち、濁度あり区にはカオリン 10g を加え、サンプリングまで濁度 50～100NTU を維

持するために、6時間おきにカオリンを追加した。

(2) 温度処理試験

試験区として、10°C区（低温区）、20°C区（対照区）および 30°C区（高温区）を設定した。各タンク（幅88×奥行44×高さ44.5cm）へ5尾を収容し、2日間にかけて、それぞれの設定水温へ徐々に合わせていき、5日後のサンプリングまで水温を維持した。

各試験区のニホンウナギ（n=5）から綿棒で粘液を非侵襲的に採取し、RNA保存液に入れて安定化させた。それらサンプルを用いて、次世代シーケンサーによる網羅的な遺伝子発現解析（RNA-Seq）を行なった。各サンプルから、TRIzol Reagent LS（Invitrogen）およびDirect-zol RNA MicroPrep（ZYMO RESEARCH）を用いて全RNA（発現している遺伝子が含まれる）を抽出し、Illumina Stranded mRNA Prep、Ligation（Illumina）を用いて、RNA-Seq用のライブラリーを作製した。作製したライブラリーについては、TapeStation（Agilent Technologie）およびQubit Fluorometer（Thermo Fisher Scientific）により品質評価および定量を行った。次世代シーケンサーNextSeq 500（Illumina）により、RNA-Seqライブラリーの配列情報を解読し、発現遺伝子の配列データを取得した。取得した発現遺伝子の配列データをニホンウナギ参照ゲノム配列にマッピング（貼り付け）し、各遺伝子の発現量（TPM: Transcripts Per Million）を算出した。なお、2倍以上発現量に変化し、かつ誤検出率False discovery rate (FDR)が0.05未満（FDR p-value < 0.05）の遺伝子を発現変動遺伝子と判断した。また、同定した発現変動遺伝子が、どのような生命現象に関わっているのかについて推定するために、ShinyGO 0.77 (<http://bioinformatics.sdstate.edu/go77/>)によるエンリッチメント解析(どのような生物学的な機能を持つ遺伝子セットが多く含まれているのかについて調べる解析法)を実施した。

結果：

ニホンウナギの粘液を綿棒で採取したサンプルから全RNAの抽出を行なったところ、RNA-Seq解析に十分な量の全RNA（25 μg以上）が得られ、それぞれの粘液サンプルにおいて発現している遺伝子の配列を網羅的に取得することができた。RNA-Seq解析の結果、31、452個のニホンウナギ予測遺伝子中、濁度処理試験（カオリン添加区）では674個（2.1%）、温度処理試験の低温区（10°C）では2、980個（9.5%）、高温区（30°C）では515個（1.6%）の遺伝子の発現量が対照区に比べて変動していた（表1）。以上の結果から、今回の実験条件では、低温によるストレスが最もニホンウナギの生理状態に影響を与えていたことが示唆された。

表1 発現変動した遺伝子数

	濁度処理試験	温度処理試験*	
	カオリン（濁度）	10°C（低温）	30°C（高温）
増加した遺伝子数	277	1,393	227
減少した遺伝子数	397	1,587	288
合計	674	2,980	515

*20°C区をコントロールとして計算

濁度（カオリン添加）、低温（10℃）および高温（30℃）のそれぞれのストレスで共通して発現量が増加した遺伝子は2個のみで、減少した遺伝子は11個のみであり、他の多くの発現変動遺伝子は、それぞれのストレスに特異的なものであった（図1）。したがって、それぞれのストレスにより、異なる生理反応が起きていることが示唆された。そこで、それぞれのストレスで発現量が増加した遺伝子群では、どのような機能を持つものが多いのかについて調べたところ（エンリッチメント解析）、濁度処理区では、炎症反応や生体防御反応に関わる遺伝子が多く発現していたことが推定された（図2）。これは、添加したカオリンを異物として認識した結果引き起こされた生体防御反応であることが示唆された。低温区（10℃）において発現量が増加した遺伝子群においても免疫系（特に特異的免疫）に関わるカテゴリーが多かったが、「肉芽腫形成」や「止血」などの他の試験区とは異なるカテゴリーも推定された（図2）。一方、高温区（30℃）においては、「熱に対する細胞の反応」、「小胞体ストレスの応答」および「ストレスに対する細胞応答の制御」など、高温ストレスに関連するカテゴリーが含まれていた（図3）。以上のことから、今回の飼育試験の解析結果は、それぞれのストレスに対して特徴的に発現する遺伝子群について捉えられていると考えられた。

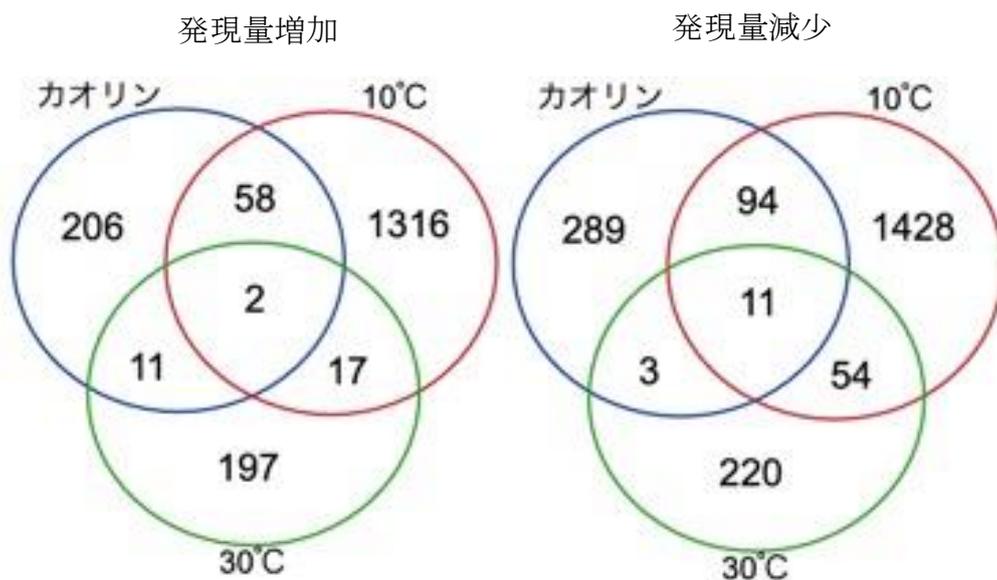
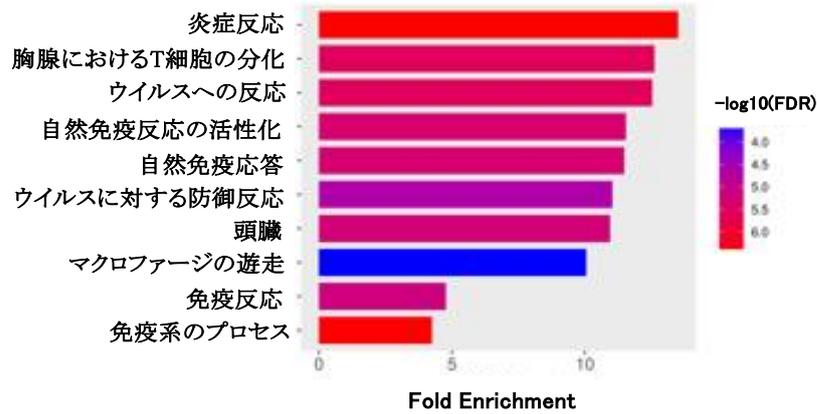
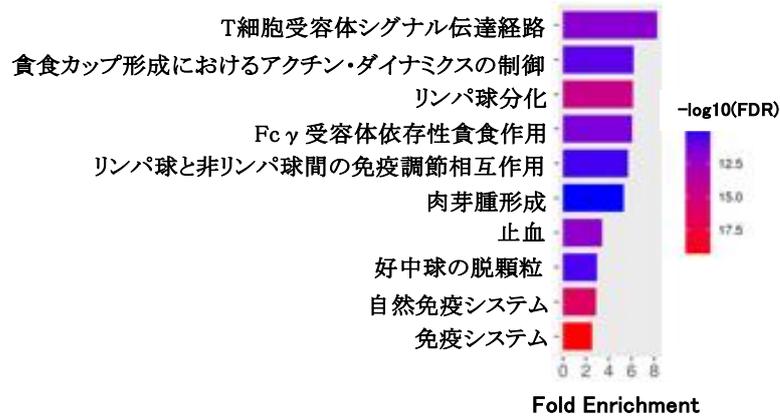


図1 各試験区において特異的に発現変動した遺伝子数

カオリン



10°C



30°C

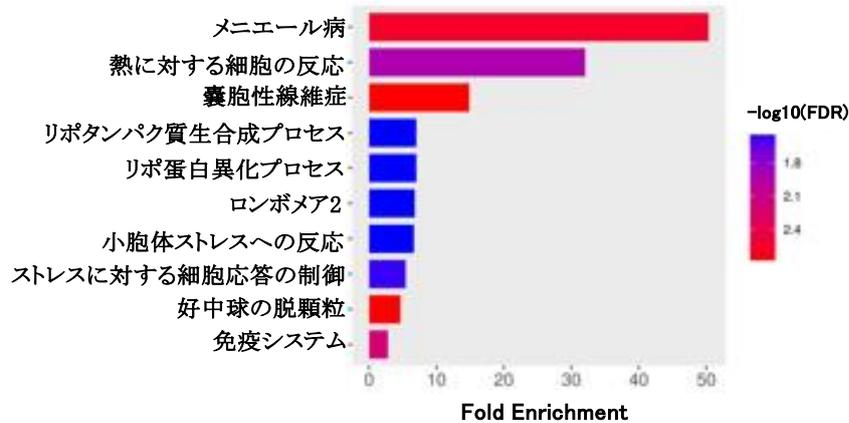


図2 各試験区において発現量が増加した遺伝子群のエンリッチメント解析(どのような機能を持つ遺伝子群が多いのかについて調べる解析法)の結果

最後に、各ストレスに対して指標になり得る候補遺伝子について、誤検出率(FDR)が小さい順に各試験区について5つに絞り込んだ(表2)。現時点で、これら候補遺伝子は、ニホンウナギの粘液のストレス応答において、どのような役割を担っているのか明らかではないが、各ストレスに対するニホンウナギの生理的な影響を評価するための指標として利用可能と考えられた。今後、これら候補遺伝子を利用することで、RNA-Seqのような網羅的な解析をしなくとも、定量PCRなどの簡便で定量的な方法でニホンウナギの生理状態(健康状態)について評価することが可能にな

ることが期待できる。

表2 各ストレスの指標となる遺伝子候補（各5遺伝子）

	遺伝子番号	Fold change (発現比)*	FDR p-value	予測された遺伝子名
カオリン	g001740	31.0	1.20E-10	チューブリン α -1鎖
	g003940	82.6	1.47E-07	ガラクトース結合レクチン 1-1
	g000010	26.6	1.47E-07	肥満細胞プロテアーゼ1A
	g008180	4.6	9.81E-07	インターロイキン-1ファミリーA
	g017710	17.2	2.09E-06	チューブリン β 鎖
10°C	g016530	11.6	5.83E-20	アシルCoAデサチュラーゼ
	g008220	53.0	1.60E-18	プロミン-2
	g006630	28.5	4.03E-16	軟骨マトリックスタンパク質
	g000940	8.5	3.77E-14	機能未知
	g010010	6.7	6.48E-14	jumonji(十文字)タンパク質
30°C	g004970	36.6	4.42E-17	I型ケラチン
	g002830	6.8	4.93E-14	チオレドキシシン相互作用タンパク質
	g008080	28.0	1.10E-09	RINGフィンガー・タンパク質 208
	g008190	31.6	1.99E-09	中間系フィラメントタンパク質
	g002520	5.1	4.53E-08	C末端結合タンパク質2a

*コントロール区に対する発現比

課題と対応策：

今後、本課題で同定した各ストレスに対する候補遺伝子の“発現の量”と、ニホンウナギの健康状態のレベル(健康、ストレス状態、回復可能、回復不能/致死的) の関係を長期試験により明らかにする必要がある。

令和5年度 資源回復のための種苗育成・放流手法検討事業 報告書

課 題 番 号		事業実施期間	令和5年度
課 題 名	ニホンウナギの生息域拡大に資する簡易魚道の開発		
担 当 者	上村 沙起（鹿児島県水産技術開発センター）		

令和5年度の成果の要約：

ニホンウナギの生息域の拡大に向けて、耐久性に優れた簡易な魚道を模索している。これまで、ジョイント式人工芝マット魚道（以下、芝マット魚道という）や金網魚道を設置し、遡上性能や設置方法の簡便さについては実証され、より効果的な設置方法（Z型）も開発された。一方で、枕崎市中洲川の堰堤に設置した芝マット魚道においては500mm/月を超えるような大雨が降ると増水により破損する等、耐久性が課題となっている。

これについて、令和3年9月10日に、中洲川の第4堰堤に敷設した芝マット魚道の表面を亀甲金網で覆い、上端部にステンレス製マルチアングルを取り付けて、その後、毎月1回設置状況を確認したところ、令和4年9月に台風14号の来襲もあったものの、芝マット本体に破れ等はみられず、設置から1年7ヶ月経過した令和4年3月末現在まで設置状況は良好であった。しかし、設置から現在まで500mm/月を超える大雨が降っていないため、今年度も同様の調査を継続した。

今年3月から4月の間に、補強型芝マット魚道上の植栽が刈り払われており、魚道すぐ右岸側に強い水流が発生していた。また、上端部に設置したステンレス製マルチアングルが倒れていた。4月は月間雨量が500mmを超えないものの、最大14mm/時間のやや強い雨が降っていたことから、植栽の伐採により水の勢いを直接受けて倒れたものと示唆される。

6月の雨量は534.5 mm/月となっており、6月20日の確認時には、補強型芝マット魚道表面の亀甲金網が剥がれ上がってねじれていた。一方、魚道本体には損傷がなく、その後12月12日の確認時には、亀甲金網のねじれが解消されていた。

従来の芝マット魚道及び金網魚道（L型・Z型）においては、損傷は発生しなかった。

以上のことから、補強型芝マットは、亀甲網による魚道本体への損傷の防止効果がみられ、通常の芝マットと比較して強度が高い可能性が示唆された。

金網魚道は、破損や形状の変化が全く見られず、芝マットに比べ耐久性は非常に高かった。

年度計画：

耐久性試験（令和5年4月～12月）

方法：

簡易魚道（芝マット・補強型芝マット・金網）の耐久性を調べる。特に降雨量と破損・流出の関係を注視する。

1 調査場所

野外調査は枕崎市花渡川支流中洲川（2級河川）の下流から4番目の堰堤と、枕崎市尻無川（2級河川）の下流から1番目の堰堤で行った。（図1）



図1 調査場所

2 芝マット魚道の耐久性試験

中洲川第4堰堤（図1：高さ1.1m 幅12.7m）両岸で芝マット魚道の耐久性試験を行った。

令和2年8月4日に左岸に設置した「従来型芝マット魚道（図2）」と、令和元年11月5日に右岸に設置し、令和3年9月10日に右岸の芝マット表面を亀甲金網（目合10mm、ビニール被覆）で覆うと共に、上部部にステンレス製マルチアングル（横60cm×奥行4cm×高さ4cm）を取り付けた「補強型芝マット（図3）」について、魚道の破損や脱落等について毎月1回目視調査を行い耐久性を確認した。



（図2）従来型芝マット（左：設置時点、右：令和5年4月時点）



(図3) 補強型芝マット (左：設置時点、右：令和5年4月時点)

3 金網魚道の耐久性試験

コイル状の金網であるステンレス製メッシュベルトSタイプを素材とした金網魚道の耐久性試験を行った。

令和3年10月21日に枕崎市尻無川第1堰堤(図1：高さ95cm、幅6.4m)の左岸に設置した150cmのL型金網魚道(図4)と、令和4年10月14日に右岸に設置した長さ200cmのZ型金網魚道(図5)と、について、魚道の破損や脱落等について毎月1回目視調査を行い、耐久性を確認した。



(図4) L型金網魚道 (左：設置時点、右：令和5年4月時点)



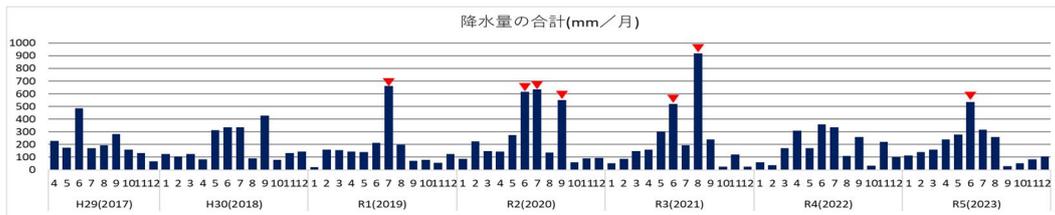
(図5) Z型金網魚道 (左：設置時点、右：令和5年4月時点)

結果：

1 降水量について

鹿児島県枕崎市の月降水量の合計の推移は図6のとおり。

先行事業での耐久試験（～R4）においては、500mm/月を超える多雨の期間中に、従来型芝マットの破損等が起きている。令和5年度の6月は534.5 mm/月であり、魚道の破損が起きうる雨量であった。



(図6)月降水量の合計の推移（▼は魚道の破損が確認されたところ）

2 芝マット魚道の耐久性試験

(1)従来型芝マット魚道

従来型芝マット魚道においては、先行事業において、500mm/月を超える多雨の期間中に、右岸に設置した芝マットが破れたり一部が流失していた（図7）。

今年度の調査においては、6月に534.5 mm/月の降水があった際も、破損はみられず（図8）、調査終了時点まで設置を維持していた（図9）。



(図7)令和元年8月5日時点（左上に破れあり）



(図8)令和5年7月18日時点



(図9) 令和5年12月12日時点

(2)補強型芝マット

先行事業においては、設置から1年2ヶ月経過した令和4年度末まで設置状況は良好であり、令和4年9月の台風14号の来襲による芝マット本体の破損等はみられなかった。

しかし設置から現在まで500mm/月を超える大雨（従来型芝マットでは破損を確認した雨量）が降っていなかったため、今年度も調査を継続した。

試験を開始する直前の3月から4月の間に、補強型芝マット魚道上の植栽が刈り払われており、魚道すぐ右岸側に強い水流が発生していた（図10）。また、上端部に設置したステンレス製マルチアングルが倒れていた。4月は月間雨量が500mmを超えないものの、最大14mm/時間のやや強い雨が降っていたことから、植栽の伐採により水の勢いを直接受けて倒れたものと示唆される。

6月の雨量は534.5 mm/月となっており、6月20日の確認時には、補強型芝マット魚道表面の亀甲金網が剥がれ上がってねじれていた（図11）。一方、魚道本体には損傷がなく、その後12月12日の確認時には、亀甲金網のねじれが解消されていた（図12）。



(図10) 令和5年4月19日時点



(図11) 令和5年7月18日時点



(图12) 令和5年12月12日時点

3 金網魚道（L型・Z型）の耐久性試験

金網魚道（L型・Z型）においては、先行事業含め、今年度試験においても、損傷等は発生しなかった。（図13、14）



（図13）L型金網魚道

令和5年12月12日時点



（図14）Z型金網魚道

令和5年12月12日時点

課題と対応策：

芝マット魚道と金網魚道の比較を表2にまとめた。

金網魚道は芝マット魚道と比較して価格は高くなるものの、ウナギの遡上性能と設置にかかる手間は同等程度で、耐久性があり、海洋プラスチックごみになるリスクがない点では優れていると考えられる。

芝マットを設置する場合は、亀甲網にて補強をし、流れが強くない場所を選んで設置する必要がある。

	芝マット魚道	補強型芝マット魚道	金網魚道
遡上性能	○	○	○
材料費※	○（6,000円）	○（8,000円）	△（50,000円）
設置しやすさ	○	○	○
耐久性	×	△※設置場所に注意	○
環境負荷	×	△	○

※約1mの高さの堰に60cm幅の魚道を設置した場合（工具代、人件費は含まず）