

表2 再採捕個体一覧

No.	採捕年月日	再採捕年月日			全長(cm)				経過日数			移動距離 (絶対値)			採捕区間			
	標識放流年月日	1回目	2回目	3回目	標識放流時	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	標識放流時	1回目	2回目	3回目
51	2019/9/26	2021/9/22			25.9	46.0			727			155			10	7		
52	2021/7/14	2022/10/5			28.5	40.5			448			20			7	7		
53	2020/9/28	2020/11/11			62.0	62.6			44			10			14	15		
54	2020/9/28	2020/11/11	2021/7/15		44.7	45.0	48.8		44	246		0	20		14	14	15	
55	2019/7/12	2019/9/26			62.5	63.0			76			85			21	22		
56	2019/7/12	2019/9/26			49.0	49.9			76			85			21	19		
57	2019/9/26	2019/11/13			35.2	36.0			48			5			13	13		
58	2019/7/12	2019/9/26			16.0	17.7			76			150			11	8		
59	2019/7/12	2019/9/26			36.1	38.6			76			15			9	9		
60	2019/7/12	2020/7/20			22.4	29.4			374			15			8	8		
61	2019/7/12	2020/7/20			17.3	28.4			374			90			8	6		
62	2019/9/26	2019/11/13			37.2	37.1			48			5			6	6		
63	2019/9/26	2021/7/14	2021/11/24	2022/9/25	18.3	28.0	29.3	35.0	657	133	315	45	0	55	5	4	4	5
64	2019/7/12	2019/11/13			27.0	31.5			124			35			12	12		
65	2019/9/26	2021/7/14			28.9	51.1			657			25			7	6		
66	2019/9/26	2020/7/20			28.0	38.9			298			35			4	4		
67	2019/7/12	2019/9/26			52.5	54.8			76			75			19	21		
68	2019/9/26	2019/11/13	2021/7/14		30.7	29.7	46.4		48	609		5	30		7	7	6	
69	2019/9/26	2019/11/13			17.4	17.5			48			45			11	12		
70	2019/7/12	2019/11/13			55.8	60.8			124			25			22	21		
71	2019/9/26	2020/11/11			35.8	44.6			412			560			12	1		
72	2019/7/12	2021/7/14			18.7	33.5			733			5			6	6		
73	2019/7/12	2019/9/26			17.2	19.8			76			15			11	11		
74	2019/7/12	2019/9/26			16.5	21.1			76			5			23	23		
75	2019/7/12	2019/9/26			24.6	25.5			76			15			2	2		
76	2019/7/12	2019/9/26			55.6	58.7			76			200			19	23		
77	2019/7/12	2019/9/26			16.6	19.9			76			5			6	7		
78	2019/9/26	2020/11/11			35.6	54.3			412			80			3	5		
79	2020/7/20	2022/7/26			27.6	40.5			736			40			7	7		
80	2020/11/11	2022/11/21			22.3	35.5			740			5			6	6		
81	2020/11/11	2022/7/26			14.2	24.5			622			35			5	4		
82	2020/11/11	2021/7/14			12.3	15.6			245			40			13	12		
83	2020/7/20	2021/9/22			29.8	43.0			429			10			5	5		
84	2020/11/11	2022/7/26			14.3	24.0			622			15			3	4		
85	2021/7/14	2022/7/26			15.1	23.0			377			65			10	8		
86	2020/11/11	2021/9/22			14.5	26.8			315			420			3	12		
87	2019/11/13	2020/7/20			35.0	41.7			250			155			7	10		
88	2019/11/13	2021/7/14			39.8	53.5			609			320			8	2		
89	2019/11/13	2020/7/20	2022/9/25		21.4	26.3	58.0		250	807		135	15		12	10	9	
90	2020/11/11	2021/7/14	2022/11/21		14.6	17.1	31.2		245	495		65	50		5	6	7	
91	2020/11/11	2022/7/26			14.4	5.5			622			60			3	2		
92	2020/11/11	2021/9/22			12.7	22.8			315			145			4	7		
93	2020/11/11	2021/11/24			12.0	17.7			378			115			5	7		
94	2021/7/14	2022/9/25			16.0	27.0			448			10			3	3		
95	2020/7/20	2020/11/11	2021/9/22		24.3	26.2	34.1		114	315		30	10		4	4	4	
96	2019/11/13	2020/9/28	2021/7/14		40.8	43.4	45.9		320	289		0	20		1	1	1	
97	2019/11/13	2021/9/21			23.9	43.3			678			315			8	14		
98	2020/11/11	2021/9/22			21.8	26.9			315			15			5	6		
99	2020/11/11	2021/9/21			15.8	26.2			314			15			22	22		
100	2020/11/11	2022/11/21			25.6	51.0			740			35			10	10		
101	2020/11/11	2021/7/15			12.9	15.4			246			195			13	17		
102	2020/11/11	2021/11/24			11.4	17.1			378			605			21	9		
103	2019/11/13	2020/9/28			15.4	28.0			320			140			7	9		
104	2022/10/5	2022/11/21			32.0	32.0			47			80			7	9		
105	2022/10/5	2022/11/21			24.3	24.0			47			0			7	7		
106	2022/10/5	2022/11/21			29.0	30.0			47			50			18	17		
107	2022/10/5	2022/11/21			38.0	38.0			47			95			11	9		
108	2021/9/22	2021/11/24			21.4	21.6			63			15			8	9		
109	2021/11/24	2022/7/26			25.0	31.0			244			20			6	6		
110	2021/11/25	2022/7/26			34.6	45.6			243			5			18	18		
111	2021/11/24	2022/10/5			34.8	47.0			315			20			6	6		
112	2021/9/21	2022/11/21			25.9	42.5			426			10			21	22		
113	2021/9/21	2022/11/21			26.8	46.0			426			45			16	17		
114	2021/9/21	2022/10/5			21.9	38.0			379			25			19	19		
115	2021/9/21	2021/11/24			27.1	27.5			64			305			19	12		
116	2021/9/22	2022/10/5			24.2	38.0			378			135			13	16		
117	2021/9/21	2022/10/5			27.7	42.0			379			35			18	19		
118	2018/7/13	2019/7/12			36.5	51.3			364			125			20	17		

令和4年度の全長SGRを図5、5か年の全長SGRの頻度分布を図6に示す。

令和4年度の全長SGRは0.098%であった。

5か年で再採捕された142個体の全長SGRの頻度分布は0.05～0.09%にモードがあり、全個体の平均値は0.081%となった。

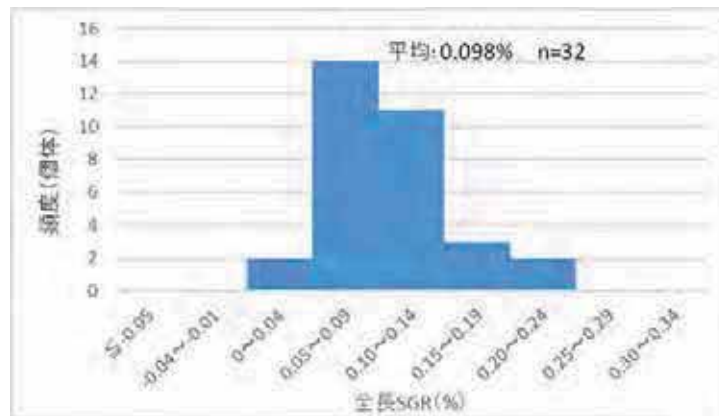


図5 令和4年度全長SGRの頻度分布

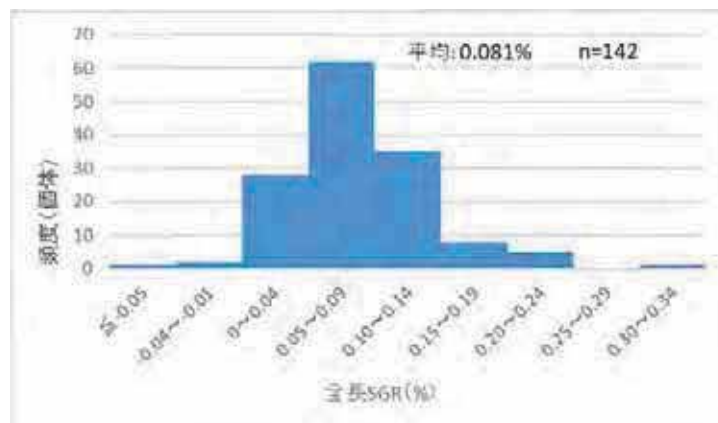


図6 5か年の全長SGRの頻度分布

令和4年度の全長GRを図7、5か年の全長GRの頻度分布を図8に示す。

令和4年度の全長GRは0.10～0.19mm/日及び0.20～0.29mm/日にモードがあり、平均で0.295mm/日となった。

また、5か年の全長GRにおいてもモードは0.10～0.19mm/日にあり、平均で0.241mm/日であった。

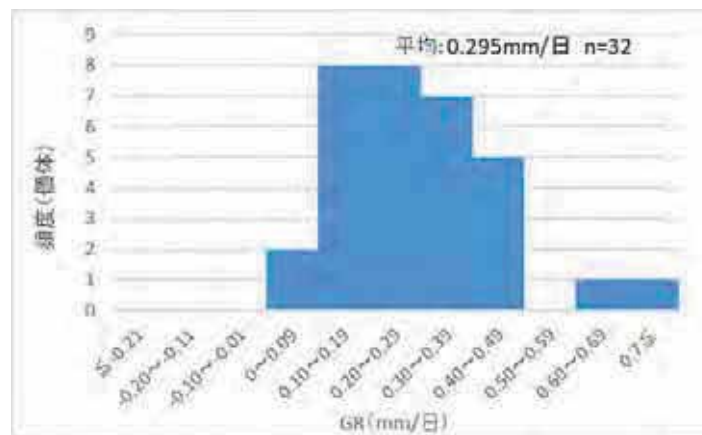


図7 令和4年度全長GRの頻度分

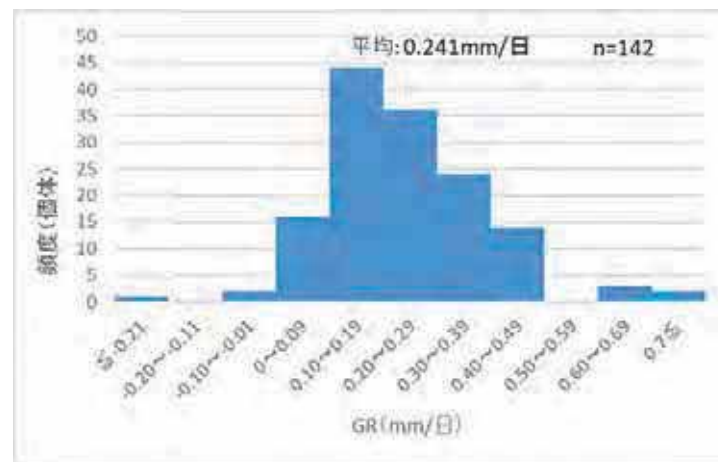


図8 5か年の全長GRの頻度分布

調査区間の推定資源尾数及び生息密度を表3に示す。

調査区間（1,140m：7,141 m²）の資源個体数は、平均847個体（263～1,840個体）となり、100 m²あたりの生息密度は、平均で12.7個体/100 m²（4.3～25.8個体/100 m²）、と推定された。

表3 調査区間1,140mの推定資源個体数及び生息密度

調査年	2018			2019			2020			2021			2022		平均
調査月	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	
資源尾数	472	790	263	659	383	684	837	1,109	506	1,840	1,250	923	1,599	541	847
生息密度(尾/100m ²)	7.6	12.8	4.3	11.0	6.4	11.4	13.9	17.0	7.7	25.8	17.5	12.9	22.4	7.6	12.7

（2）河川内の生息環境の把握

平成30年度及び令和3年度の調査で得られた調査区間ごとの底質組成を図9に示す。

平成30年度と比べ令和3年度では、Detritus（泥）とSand（砂）の割合が減少し、

Pebble（中礫:17～64mm）と Cobble（大礫:65～256mm）が増加した。

底質の大きさを表す底質粗度は全区間で 3.56 ± 1.48 （平均値±標準偏差）となり、平成30年度の 2.48 ± 1.78 （同）から大型化した。

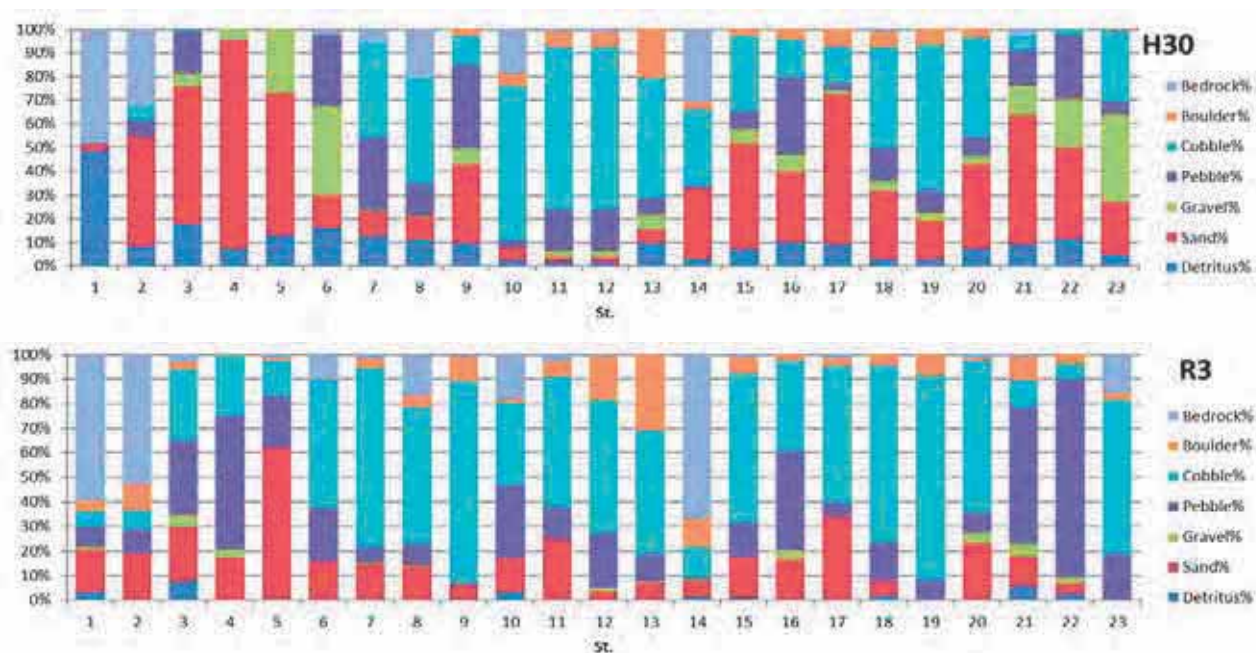


図9 調査区間の底質組成（上段 H30 年度/下段 R3 年度）

調査区間ごとの環境データと5か年の調査において各調査区間で採捕されたニホンウナギの平均生息密度との関係について検証した結果を図10～18に示す。

いずれの底質 {Detritus（泥）、Sand（砂）、Pebble（中礫:17～64mm）、Cobble（大礫:65～256mm）、Boulder、Gravel} においても、平均生息個体数との間に相関は認められなかった。

また草の被覆度及び水深及び断面積（水深×水深）との関係においても同様に相関は認められなかった。

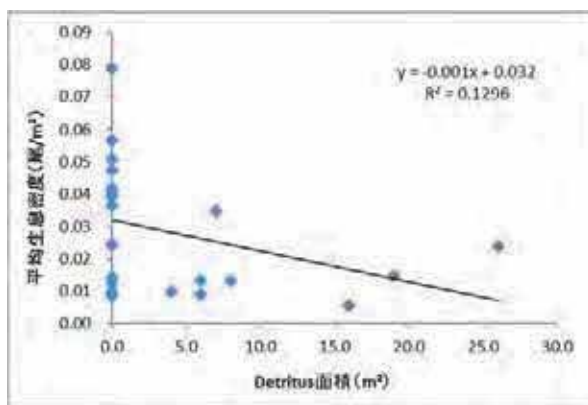


図 10 平均生息密度と Detritus 面積

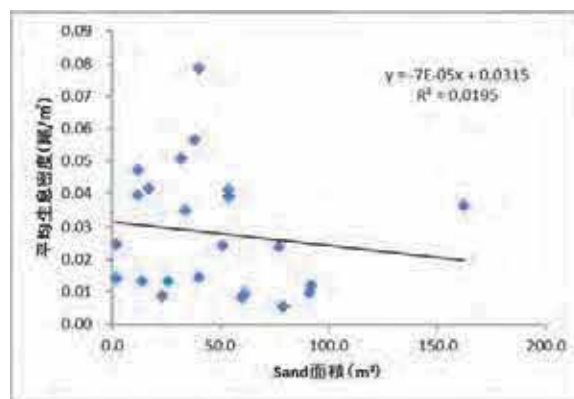


図 11 平均生息密度と Sand 面積

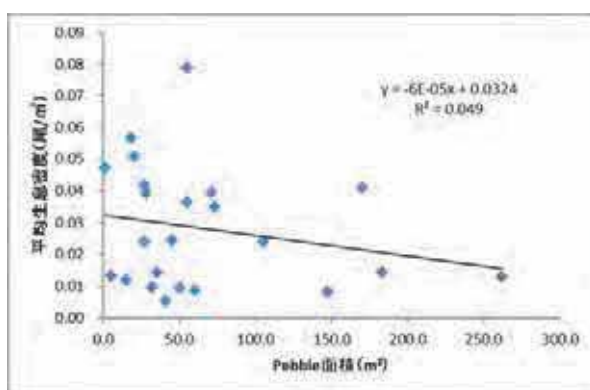


図 12 平均生息密度と Pebble 面積

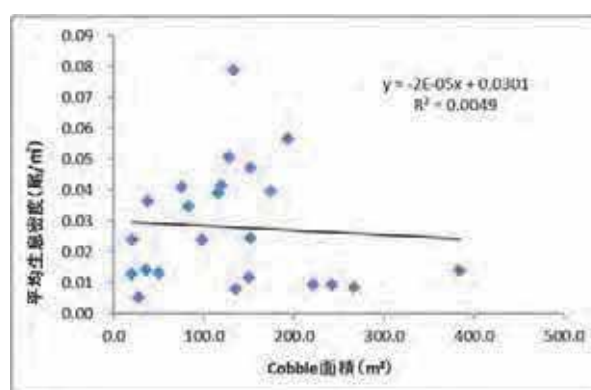


図 13 平均生息密度と Cobble 面積

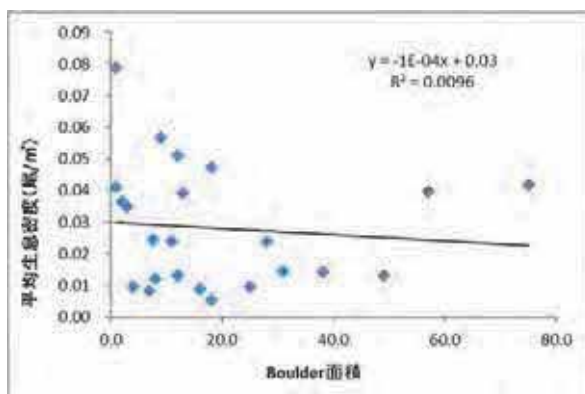


図 14 平均生息密度と Boulder 面積

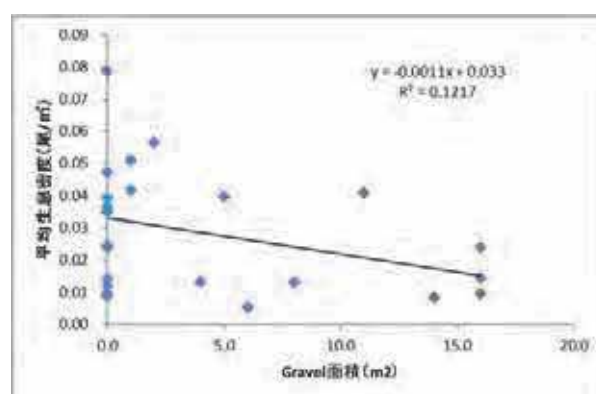


図 15 平均生息密度と Gravel 面積

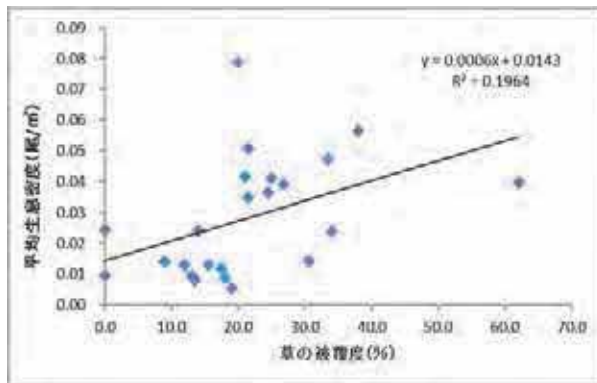


図 16 平均生息密度と草の被覆度

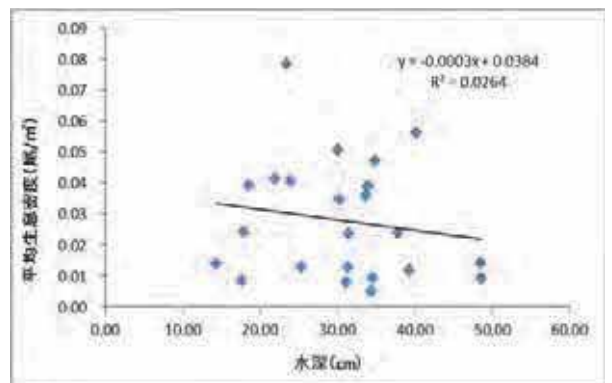


図 17 平均生息密度と水深

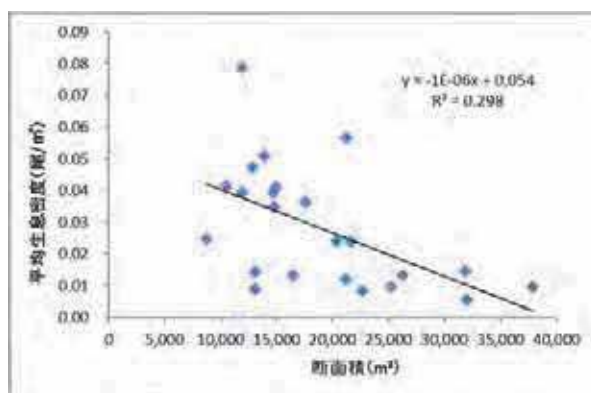


図 18 平均生息密度と断面積

令和 4 年度に採捕された採捕個体の隠れ家を図 19 に、5 か年で採捕された全個体の隠れ家について図 20 に示す。

令和 4 年度の結果、5 か年の結果ともに同様の傾向が見られた。いずれの季節においても草で採捕された個体の割合が多く、次いで、Boulder、Cobble で多く確認された。また、7 月の調査では、Detritus での採捕がなかったが、9 月（10 月）と 11 月では Detritus で採捕される個体が増えた。

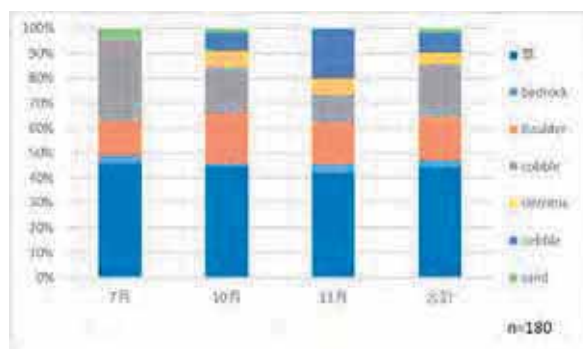


図 19 令和 4 年度の採捕個体の隠れ家

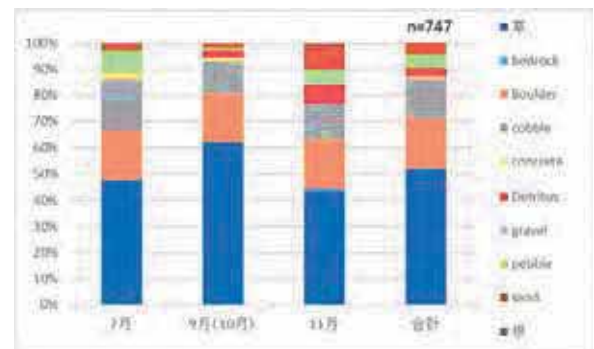


図 20 5 か年における採捕個体の隠れ家

令和4年度に行った200mm未満及び200mm以上の個体における、瀬・淵と生息数との関係について検証した結果を図21、22、5か年の結果を図23、24に示す。

7月及び10月では、瀬における採捕割合が多かったが、11月では淵における採捕割合が増えた。また、200mm以上の個体については、周年を通して瀬の採捕割合が多かったものの、11月になると淵の採捕割合が増加した。

5か年をまとめた結果については、200mm以下の個体は同様の傾向を示したが、200mm以上の個体については令和4年度の結果と比較すると、瀬における採捕割合が若干下がり淵の採捕割合が多かった。

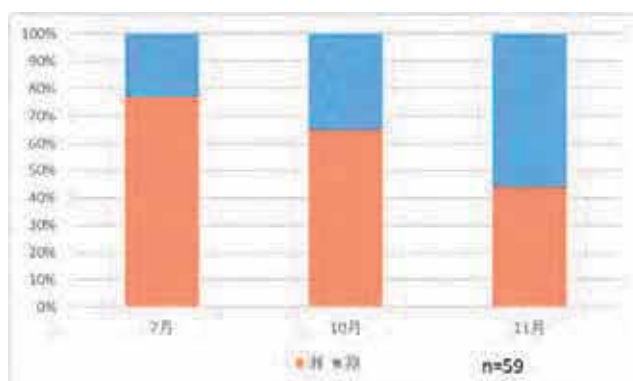


図21 令和4年度の採捕個体別の生息環境 (200mm 未満)

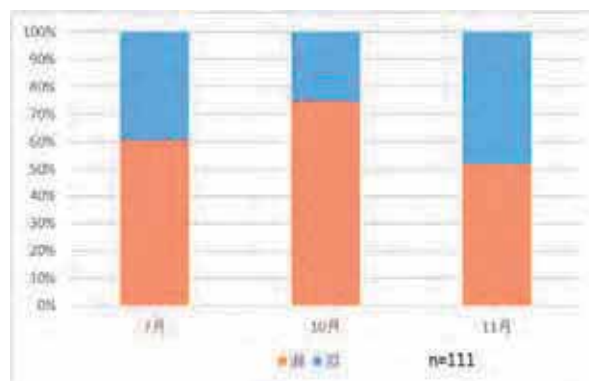


図22 令和4年度の採捕個体別の生息環境 (200mm 以上)

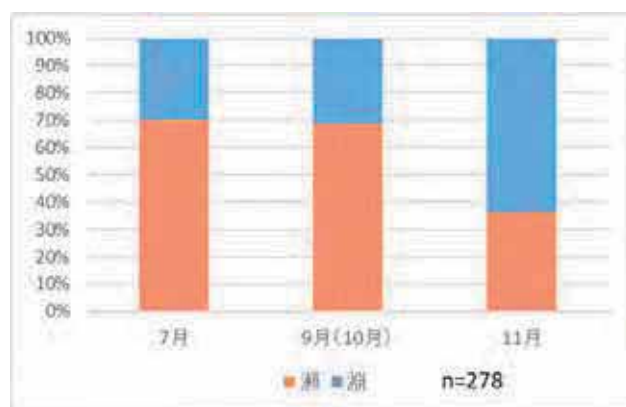


図23 5か年の採捕個体別の生息環境 (200mm 未満)

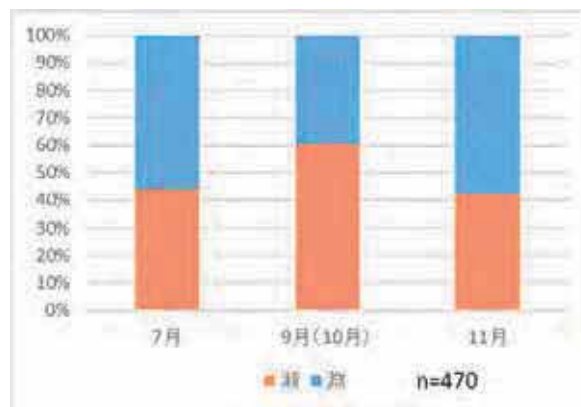


図24 5か年の採捕個体別の生息環境 (200mm 以上)

流速と採捕個体数との関係について検証した結果を図25に示す。

流速と採捕個体数との関係については、令和2年度～令和4年度に採捕した個体を対象とした。200mm未満、200mm以上のいずれについても、流速70m/sec未満における採捕が多かったが、60m/sec以上の流速では200mm未満の採捕個体数が200mm以上よりも多い傾向がみられた。

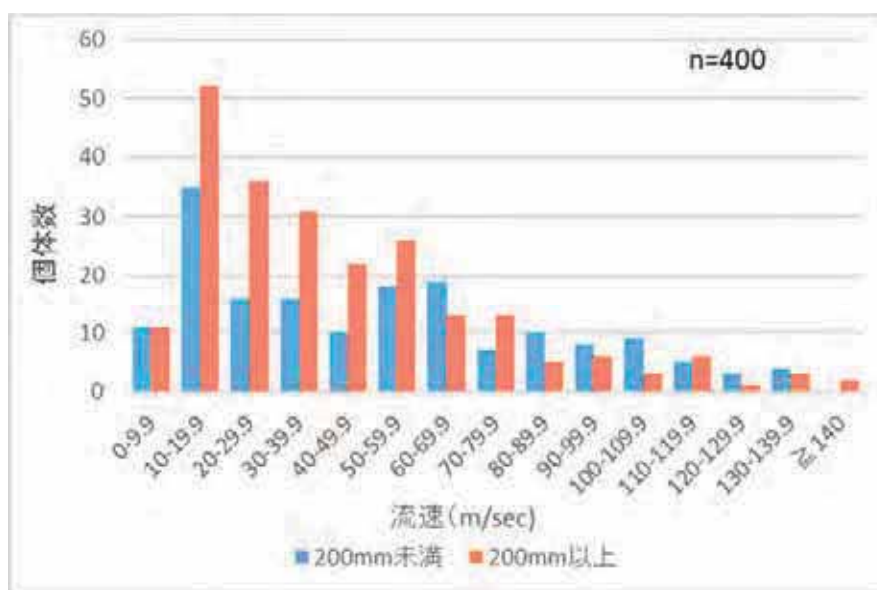


図 25 流速と採捕個体数

(3) 餌料生物の季節変動の把握

最終年度となる令和4年度調査における、魚類及び十脚甲殻類の採捕調査結果を表4、単位あたりの魚類及び甲殻類の重量とウナギ生息密度の関係を図28、甲殻類の重量とウナギ生息密度の関係を図29に示す。

単位あたりの魚類及び甲殻類の重量はSt.6では、7月に最大値を示し、St.12では10月に最大値を示した。また、単位あたり餌料生物量及び甲殻類とウナギ生息密度の関係については相関が認められなかった。

令和2年7月～令和4年11月までの計9回の調査結果におけるSt.6、St.12の魚類及び十脚甲殻類の採捕調査結果を表5、うち、単位あたりの魚類及び甲殻類の重量とウナギ生息密度の関係を図30、甲殻類の重量とウナギ生息密度の関係を図31に示す。

単位あたり魚類及び十脚甲殻類の重量はSt.6では、7月に最大値を示し、St.12では9月(10月)に最大値を示した。単位あたりの魚類及び甲殻類の重量と、甲殻類の重量についてウナギ生息密度との間に相関は認められなかった。

表4 令和4年度2定点(St.6・St.12)における魚類及び甲殻類採捕調査結果

	調査日	7月			10月			11月		
	標準和名	尾数	重量(g)	g/m ²	尾数	重量(g)	g/m ²	尾数	重量(g)	g/m ²
St.6	オイカワ				1	6.2				
	タカハヤ									
	テナガエビ	6	63.8							
	ウグイ									
	ボラ							1	26.2	
	ゴクラクハゼ									
	シマヨシノボリ									
	ヌマチチブ				4	4.8				
	ボウズハゼ									
	ミズハゼ	6	3.84		3	3.8				
	アユカケ									
	スミウキゴリ									
	モツゴ									
	マハゼ	2	5.86		2	27.8		2	39.4	
	モクズガニ	29	76.1		16	50.8		6	19.4	
	ミナミテナガエビ	63	191.4		3	6.8		3	2.06	
	ヒラテテナガエビ	14	89							
	スジエビ									
	ミゾレヌマエビ	2	0.32		8	1.6		5	1.22	
	ミナミヌマエビ									
	トゲナシヌマエビ	19	10.38		2	0.8				
小計		141	440.7	4.11	39	102.6	0.96	17	88.28	0.82
St.12	オイカワ				1	2.2				
	ウグイ				1	27.8				
	ボラ				6	134.0		4	78.2	
	シマヨシノボリ									
	ヌマチチブ				8	14.2				
	マハゼ	2	4.47		5	57.4				
	ボウズハゼ									
	スズキ				1	76.8				
	スミウキゴリ							1	8.13	
	ミズハゼ									
	ユゴイ				2	2.2				
	アユカケ									
	モクズガニ	8	36.59		18	256.2		14	132.1	
	ミナミテナガエビ	16	90.3		8	29.6		4	78.2	
	ヒラテテナガエビ	8	42.46		6	39.0				
	スジエビ									
	ミゾレヌマエビ				2	0.0		8	1.31	
	ミナミヌマエビ									
	トゲナシヌマエビ	5	2.4		1	0.1				
小計		39	176.22	2.08	59	639.48	7.54	31	297.94	3.51

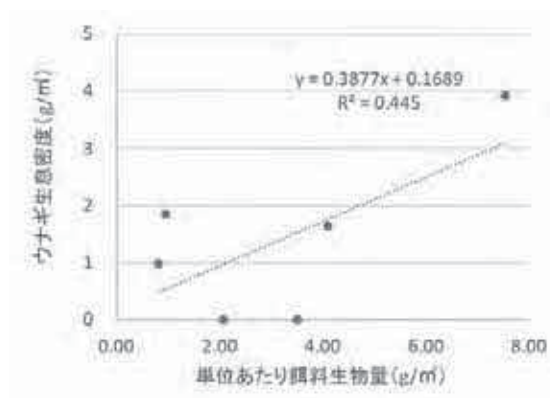


図28 魚類及び甲殻類の重量とウナギ生息密度

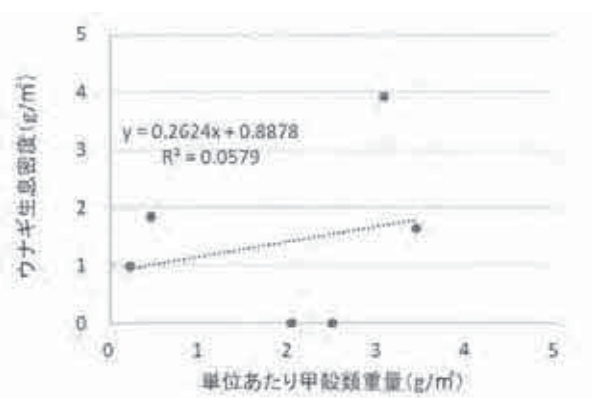


図29 甲殻類重量とウナギ生息密度

表5 3年間の2定点(St.6・St.12)における魚類及び甲殻類採捕調査結果(合計)

	調査日	7月			9月(10月)			11月		
	標準和名	尾数	重量(g)	g/m ²	尾数	重量(g)	g/m ²	尾数	重量(g)	g/m ²
St.6	アユカケ	3.0	20.4							
	ウグイ	3.0	34.1							
	オイカワ	3.0	25.2		117.0	148.8		40.0	69.7	
	オオヨシノボリ	1.0	0.3		13.0	7.7				
	ゴクラクハゼ	11.0	11.9		13.0	11.0		4.0	6.5	
	シマヨシノボリ	4.0	5.8		5.0	5.8		18.0	13.2	
	スミウキゴリ				1.0	7.5				
	タカハヤ							1.0	3.4	
	ヌマチチブ	35.0	165.8		95.0	169.7		40.0	36.8	
	ヒラテテナガエビ	29.0	214.3		7.0	47.2				
	ボウズハゼ	1.0	3.0		6.0	47.9				
	ボラ	1.0	3.4					1.0	26.2	
	マハゼ	2.0	5.9		2.0	27.8		2.0	39.4	
	ミミズハゼ	8.0	4.9		5.0	5.3		1.0	1.6	
	モツゴ				2.0	2.3				
	スジエビ							5.0	4.9	
	テナガエビ	6.0	63.8							
	トゲナシヌマエビ	31.0	15.7		4.0	2.0				
	ミゾレヌマエビ	36.0	16.3		42.0	9.9		16.0	3.2	
	ミナミテナガエビ	147.0	551.5		51.0	59.8		57.0	101.9	
	ミナミヌマエビ							13.0	1.7	
	モクズガニ	56.0	205.1		39.0	159.0		20.0	89.1	
小計			1347.4	12.5		711.7	6.6		397.6	3.7
St.12	アユ	1.0	67.5							
	アユカケ	1.0	8.8		1.0	22.5				
	ウグイ	3.0	10.8		3.0	55.2				
	オイカワ	10.0	99.2		53.0	155.4		21.0	66.3	
	オオヨシノボリ	5.0	1.5							
	カワムツ	2.0	33.5							
	ゴクラクハゼ	1.0	2.0		4.0	2.1		1.0	0.7	
	シマヨシノボリ				2.0	3.7		8.0	8.9	
	スズキ				1.0	76.8				
	スミウキゴリ							1.0	8.1	
	タカハヤ	4.0	4.4					5.0	19.3	
	トウヨシノボリ	1.0	1.6							
	ヌマチチブ	354.0	116.0		83.0	161.0		56.0	120.0	
	ヒラテテナガエビ	36.0	245.0		15.0	83.3		4.0	23.2	
	ボウズハゼ	3.0	12.5		3.0	29.7		1.0	18.2	
	ボラ	32.0	49.7		7.0	144.3		4.0	78.2	
	マハゼ	2.0	4.5		5.0	57.4				
	ミミズハゼ							1.0	1.5	
	モツゴ				7.0	14.9				
	ユゴイ				2.0	2.2				
	アカテガニ	1.0	8.8							
	スジエビ							19.0	23.8	
	トゲナシヌマエビ	51.0	26.3		4.0	1.5				
	ミゾレヌマエビ	2.0	0.9		12.0	2.6		13.0	2.9	
	ミナミテナガエビ	121.0	595.0		38.0	92.3		42.0	144.8	
	モクズガニ	33.0	188.3		28.0	313.8		38.0	331.2	
小計			1476.2	17.4		1218.5	14.4		847.0	10.0

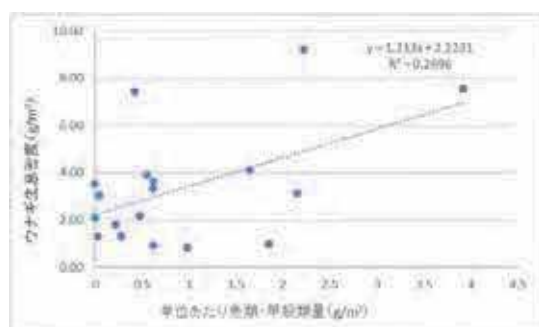


図30 魚類及び甲殻類重量とウナギ生息密度

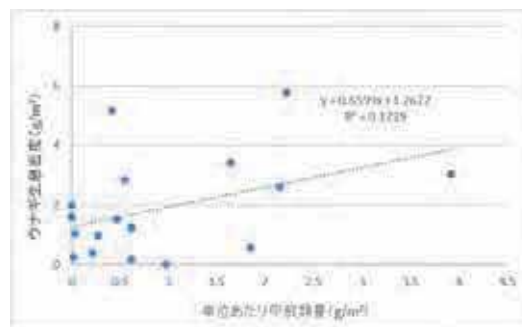


図31 甲殻類重量とウナギ生息密度

令和3年度に実施した7月の調査において、日置川で採捕されたニホンウナギのうち、全長200mm以上の39個体について、ストマックポンプを用いて胃内容物を調査した結果を図26、27に示す。

39個体中9個体(23%)は空胃個体であり、残りの30個体(77%)について、胃内容物の分類を行った。

調査の結果、合計で11分類群459個体、総重量34.84gの底生動物が確認された。優占種は、個体数ではカゲロウ目幼虫(65.1%)、ミズアブ科幼虫(25.9%)、ユスリカ科幼虫(5.4%)であり、重量ではミズアブ科幼虫(54.5%)、テナガエビ(31.5%)、不明魚類(8.5%)であった。

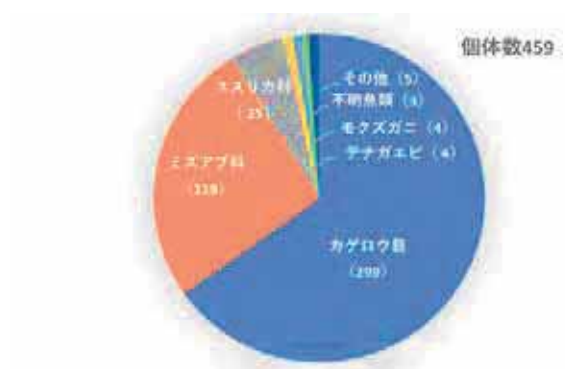


図26 胃内容物調査結果（確認個体数）

図27 胃内容物調査結果（重量）

考察

(1) 河川内におけるウナギの移動、生息数の把握

調査対象河川においては、150mm 未満のサイズで調査区間内に下流から加入すると考えられた。また、調査区間内への加入後は徐々に定住するようになり、再採捕の状況から定住後はほとんど移動しない傾向があることから、ニホンウナギは定住性が強い傾向が窺える。

令和2年度に100～149mmの個体が多く採捕されたものの、150mm以上の個体数が非常に少なくなっている要因としては、調査月である7月と9月の間に調査区間内で行われた堆積物除去の工事による可能性が考えられ、定住性は強いものの、環境の変化には敏感に反応し、定住場所から移動してしまう可能性が窺える。

生息数については、本河川においては最高で25.8 個体/100 m²であり、良好な環境下であれば、この程度の収容能力があるものと考えられた。

(2) 河川内の生息環境の把握

ニホンウナギは、草の生い茂った場所をよく好むほか、体を隠すことができる間隙のある礫に生息する傾向が強いと考えられた。ただし、7月の調査では、Detritusでの生息が確認できないものの、9月(10月)と11月ではDetritusで採捕される個体が増えることから、季節によって生息場所を変えている可能性が考えられた。

また、200mm 未満の個体は、水温の高い時期は瀬を好む傾向があり、水温が下がる時期になると淵に移動することが考えられた。一方で、200mm 以上の個体は瀬よりも淵を好む傾向があることが考えられた。

流速の遅い場所における採捕数からも、全体的に比較的流れの緩い箇所を生息地として選択している状況がうかがえ、200m 以上の個体ではよりその傾向が強い可能性が考えられた。

(3) 餌料生物の季節変動の把握

年により変動があるため明確ではないが、餌料生物になると思われる魚類や甲殻類については、7月に多く9月(10月)、11月と減少していく傾向がみられた。

ただし、調査期間を通じて実施してきた、ウナギ採捕個体数が多い生息環境と考えられる区間における魚類や甲殻類の採捕調査結果とニホンウナギの生息密度に相関は認められず、餌料生物の多い環境が生息に適しているのかは不明であるが、令和3年7月に行った胃内容物の調査においては、確認個体数、重量ともに水生昆虫が過半を占めており、水生昆虫を含めた季節的な餌料生物の変化の状況を調査する必要があると考えられた。

参考文献

- 1) 宮崎県水産試験場内水面支場2018. 環境収容力推定手法開発事業. 平成30年度 報告書
- 2) 宮崎県水産試験場内水面支場2019. 環境収容力推定手法開発事業. 令和元年度 報告書
- 3) 宮崎県水産試験場内水面支場2020. 環境収容力推定手法開発事業. 令和2年度 報告書
- 4) 宮崎県水産試験場内水面支場2021. 環境収容力推定手法開発事業. 令和3年度 報告書

担当者

平成30年度～令和3年度 宮崎県庁 漁業管理課 兒玉 龍介

令和4年度 宮崎県水産試験場内水面支場 中武 邦博

1.-(4) 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

鹿児島県水産技術開発センター漁場環境部

要旨

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天然ニホンウナギの採捕・標識放流を反復し、平成 27 年度（先行事業）からの合計 30 回の調査で 696 尾を 1,077 回採捕した。特に令和 3～4 年度は 10g 以下の小型個体が多く採捕されたが、これは令和 1～2 年漁期のシラスウナギ漁が近年では比較的豊漁だった事から新規加入が多く、それらが成長と共に下流の感潮域から調査区内へ移動してきたためではないかと推察された。

再採捕されたのは 209 尾 377 回で、低水温期は再採捕率が高く、高水温期は再採捕率が低くなる傾向が見られた。

Jolly-Seber 法による調査区間の推定生息数は 159 尾～685 尾（2.2 尾～9.7 尾/100 m²）で推移し、直近の令和 4 年 7 月現在では 290 尾（3.5 尾/100 m²）と推定され、7 年間でわずかな減少傾向がみられた。

再採捕された 209 尾のうち、放流場所から上下 100m 以内で 75%が、上下 50m 以内で 55%が再採捕され、天然ウナギの定住性の高さがうかがえた。

平均日間成長量（GR）は全長が 0.142mm/day、体重が 0.105g/day であった。

平均瞬間成長率（SGR）は全長が 0.041%/day、体重が 0.123%/day であった。

再採捕までの期間が短い個体の一部には、電気ショッカーや麻酔、標識作業等のハンドリングストレスによると思われる一時的な体重の減少や停滞が見られたが、長期間を経た後に再採捕された個体は増加していた。

ストマックポンプによる食性調査の結果、夏季は魚類や大型甲殻類（エビ、カニ類）の利用が多く、秋季は魚類や大型甲殻類に加え昆虫類の幼虫やミミズ等も利用していた。また夏季より秋季の空胃率が高く、水温低下による活動量の減少が摂餌に影響していると推察された。

リター（落葉や枯草等の有機堆積物）や砂泥は全長が小さいほど、大礫や岩盤は全長が大きいほど多く利用される傾向が見られた一方、植生（水草や岸の植物）はサイズに関係なく広く利用されていた。また、河床に巨礫がある調査区では巨礫率と生息密度に強い正の相関がみられ、川床に巨礫のない調査区では、岸のカバー（植生、石垣等）率と生息数に正の相関がみられた。ウナギの環境収容力を低下させないためにはこれらの環境を保全していく事が重要であると考えられた。

全期間を通じた課題目標及び計画

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。

方法

図1のとおり、鹿児島市八幡川（2級河川）の河口から約2km地点を基点とし、基点から910m上流の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。

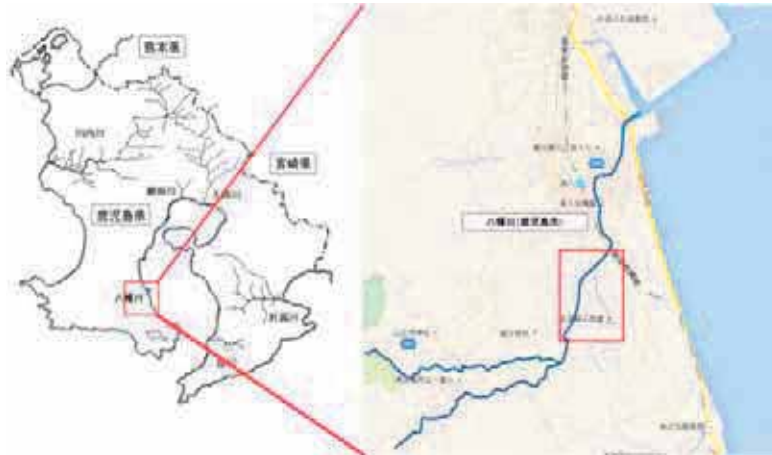


図1 調査場所

1 環境調査

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）。

また、令和2年12月～令和3年1月に上流側の St. 15～19、令和3年7～8月に下流側の St. 1～7で、河川工事により寄州除去や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、工事があった区間について、令和3年10月25～26日に環境調査の再調査を実施した。

2 天然ニホンウナギの生息状況及び生息環境調査

採捕は基本的に春季（4～5月）、夏季（7～8月）、秋季（10～11月）、冬季（1～2月）の年4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 SHOCKERⅢS 又は米国スミス・ルート社製 エレクトロフィッシャーLR-20B）を用いて天然ウナギを採捕し、採捕位置や環境（底質、住处等）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℃地下水の掛け流し）に袋ごと安置した。採捕当日または翌日、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 BI008B または BI012B) の有無を確認し、標識が付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。加えて約 15 cm 以上の新規個体については新たに腹腔内に PIT タグ標識を挿入した。

また、令和 3 年度の夏季と秋季、令和 4 年度の夏季の体重 10g 以上の採捕個体については、採捕当日にストマックポンプ (ウナギの口から胃の奥までチューブを挿入し、スポイトで水を送り込んで胃内容物を吐出させる) による食性調査を実施した。

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。

(1) 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。

Mi : 時点 i でのサンプリング直前の総個体数

Ni : 時点 i でのサンプリング直前の標識個体の総個体数

ni : i 時点の採捕数

mi : i 時点の採捕数中の標識個体数

Ri : 時点 i で標識放流された数

ri : 時点 i で標識放流され、その後再採捕された合計数

zi : 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

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

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

(2) 日間成長量 (GR)

全長と体重の日間成長量 Growth Rate (GR) を下記の式により求めた。

$$\text{全長 GR (mm/day)} = (L2 - L1) / T$$

L1 : 放流時全長 (mm) L2 : 再採捕時全長 (mm) T : 再採捕までの期間 (日)

$$\text{体重 GR (g/day)} = (W2 - W1) / T$$

W1 : 放流時体重 (g) W2 : 再採捕時体重 (g) T : 再採捕までの期間 (日)

(3) 瞬間成長率 (SGR)

全長と体重の瞬間成長率 Specific Growth Rate (SGR) を下記の式により求めた。

$$\text{全長 SGR (\%/day)} = 100 \times (\ln(L2) - \ln(L1)) / T$$

L1 : 放流時全長 (mm) L2 : 再採捕時全長 (mm) T : 再採捕までの期間 (日)

$$\text{体重 SGR (\%/day)} = 100 \times (\ln(W2) - \ln(W1)) / T$$

W1 : 放流時体重 (g) W2 : 再採捕時体重 (g) T : 再採捕までの期間 (日)

※ 「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。

※ 先行事業である「鰻来遊・生息調査事業 (平成 27~29 年度)」の調査結果も含めて解析を行った。

結果

1 環境調査

平成30年度と令和3年度の調査区間別の底質の調査結果を図2に示す。

St. 1～7の下流側は、河川工事後の令和3年度はsand（砂：＜2mm）が減少してpebble（中礫：17-64mm）が増加するなど、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の上流側は、河川工事後の令和3年度はgravel（小礫：2-16mm）が減少してcobble（大礫：65-256mm）が増加するなど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、下流側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、調査区間の流域面積は令和2年度秋季調査までは7,060㎡、令和2年度冬季～令和3年度春季調査は7,774㎡、令和2年度夏季調査以降は8,285㎡となった。

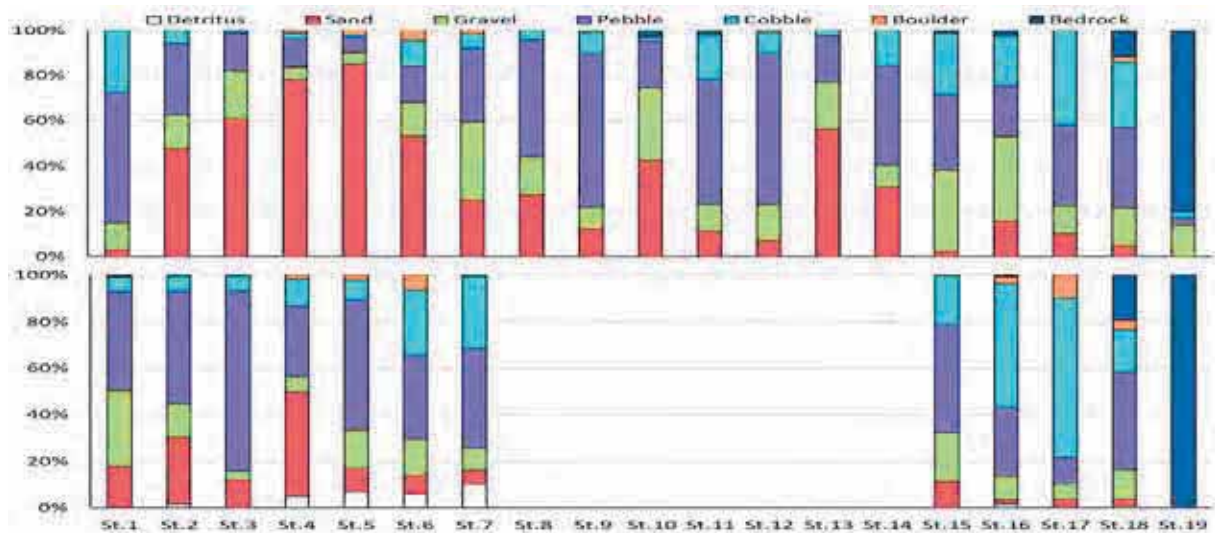


図2 調査区間別の底質組成（上：平成30年度 下：令和3年度（河川工事後））

2 天然ニホンウナギの生息状況及び生息環境調査

(1) 採捕数と再採捕率

調査回毎の延べ採捕数、再採捕数、再採捕率を表1に示す。これまでの30回の調査で延べ1,077尾（同一個体を複数回採捕した場合は複数回で集計）を採捕した。実質個体数（同一個体を複数回採捕した場合も1尾で集計）は696尾でPITタグ標識628尾、DNA標識63尾、未標識5尾だった。

表1 調査区間910mにおけるニホンウナギの採捕状況

※H27は予備調査

年度		H27	H28					H29					H30				R1				R2				R3				R4			合計
調査月		12月	5月	6月	8月	10月	1月	5月	6月	8月	10月	12月	4月	7月	10月	1月	5月	7月	10月	1月	4月	8月	11月	2月	4月	8月	11月	2月	4月	7月	10月	
月別	採捕数 (尾)	7	29	46	63	35	71	34	23	29	25	30	24	29	17	33	24	38	39	25	22	27	35	20	28	60	58	42	64	55	45	1077
	再採捕数 (尾)	0	0	6	9	12	23	17	7	10	11	16	11	8	5	15	14	16	13	10	13	13	12	11	15	22	11	15	23	25	14	377
	再採捕率 (%)	0.0	0.0	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	58.3	42.1	33.3	40.0	59.1	48.1	34.3	55.0	53.6	36.7	19.3	35.7	35.9	45.5	31.1	35.0
年度別	採捕数 (尾)	7	244					141					103				126				104				188				164			1077
	再採捕数 (尾)	0	50					61					39				53				49				63				62			377
	再採捕率 (%)	0.0	20.5					43.3					37.9				42.1				47.1				33.5				37.8			35.0

調査年度毎の体重別採捕数を図3-1に示す。全年度で50g以下が多いが、平成28年度、令和3年度、令和4年度は特に多かった。そこで50g以下の個体について、更に細かく10g毎の体重別採捕数を図3-2に示す。平成28年度は各階級で満遍なく採捕されているのに対し、令和3年度は10g以下が特に多く、令和4年度は10g以下及び10～20gが多かった。更に調査回ごとの10g以下の小型個体のうち新規採捕数の推移を図4に示す。令和3年8月から採捕数が増加し令和4年4月に最多となり以後減少していた。

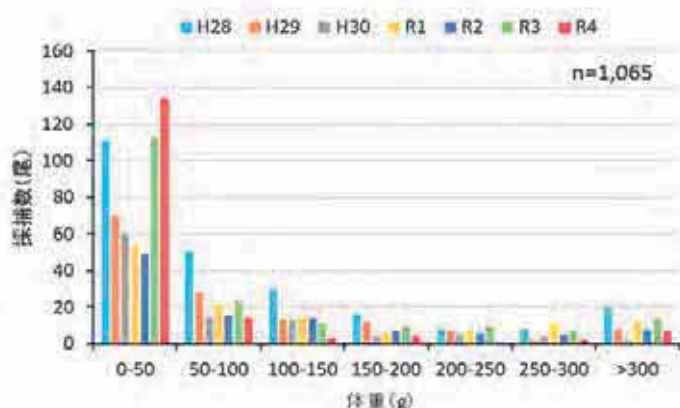


図3-1 調査年度別体重別採捕数

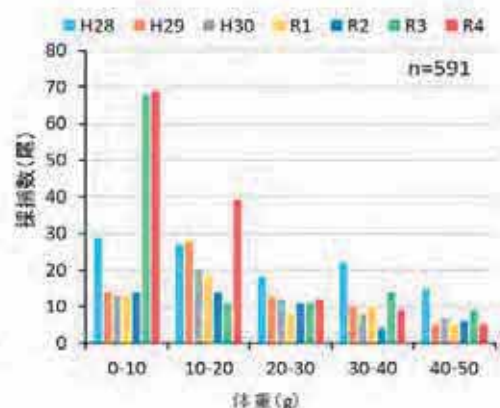


図3-2 調査年度毎体重別採捕数(50g以下)

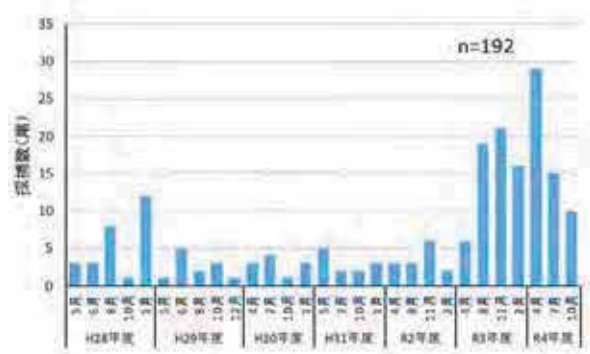


図4 体重10g以下の新規採捕数

平成29年度以降（平成27、28年度は標識放流数が少ないため除く）の年度別の再採捕率（1回の調査で採捕した天然ウナギのうち、すでに標識されたウナギの割合）を図5に示す。平成29年度以降の再採捕率は19.3%～59.1%で推移した。平成29年度から令和3年度の再採捕率の季節変動は、いずれも春季（4～5月）は50%前後で高く、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た。しかし令和4年度は春季の再採捕率が低く、例年とは異なる傾向がみられた。

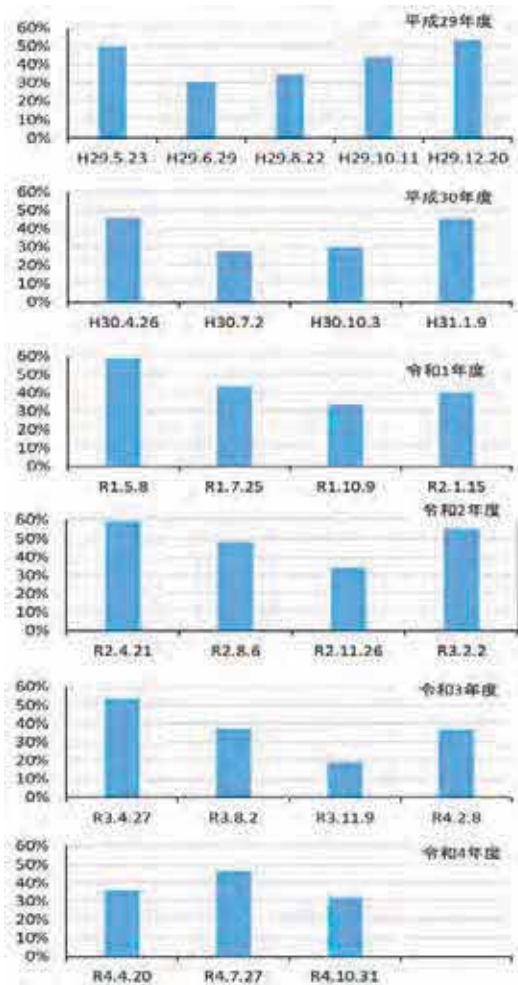


図5 再採捕割合の季節変動

調査区間別の採捕数を図6に示す。St. 4～St. 6が100尾以上で多く、特にSt. 6は142尾で最多であった。



図6 調査区間別の採捕数

(2) 全長と体重

サイズ測定を行った延べ1,072尾の全長組成を図7-1に示す。150mm～199mmが最も多く、全個体の平均は355mm±148mm (±S.D.) であった。同様に体重組成を図7-2に示す。50g以下が多く56%を占めた。全個体の平均は93g±131g (±S.D.) であった。また全長と体重の関係を図8に示す。

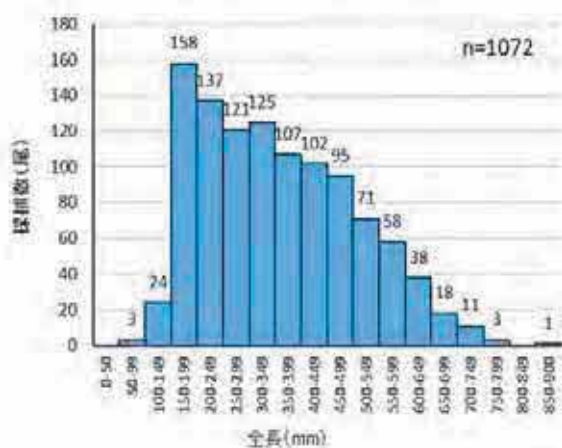


図7-1 全長組成 (mm)

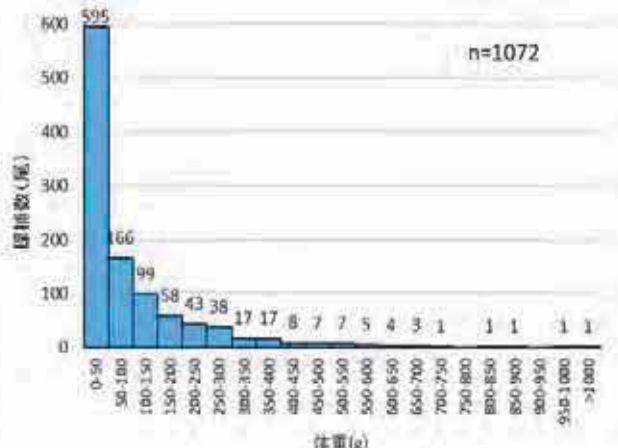


図7-2 体重組成 (g)

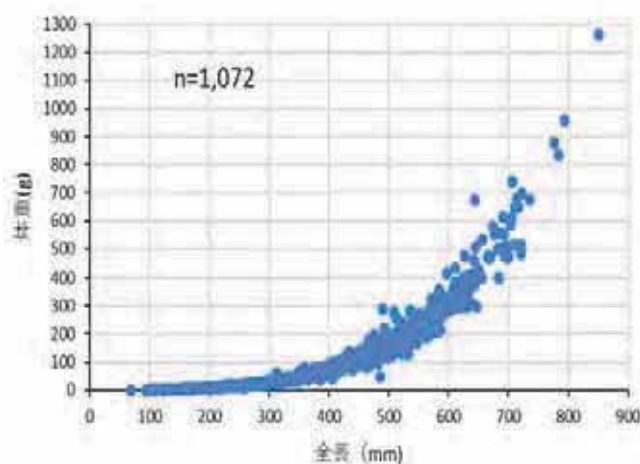


図8 全長と体重の関係

(3) 推定個体数と推定密度

Jolly-Seber 法による平成28年6月以降の全調査区間における天然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9に示す（総面積は令和2年11月調査までは7,060㎡、令和3年4月調査までは7,774㎡、令和3年8月調査以降は8,285㎡として密度を算出）。ニホンウナギの推定生息数は159尾～685尾、100㎡あたりの密度に換算すると2.2尾～9.7尾であった。直近の令和4年7月現在は290尾（3.5尾/100㎡）と推定され、7年間でわずかに減少傾向がみられた。

表2 Jolly-Seber 法による推定生息数及び推定密度

調査年度	H28				H29					H30				R1				R2				R3				R4	
調査月	6月	8月	10月	1月	5月	6月	8月	10月	12月	4月	7月	10月	1月	5月	7月	10月	1月	4月	8月	11月	2月	4月	8月	11月	2月	4月	7月
推定尾数(尾)	260	307	304	287	271	685	239	188	363	186	356	378	600	240	264	297	350	159	264	484	259	172	231	385	273	552	290
推定密度 (尾/100㎡)	3.7	4.4	4.3	4.1	3.8	9.7	3.4	2.7	5.1	2.6	5.0	5.4	8.5	3.4	3.7	4.2	5.0	2.3	3.7	6.9	3.3	2.2	2.8	4.6	3.3	6.7	3.5

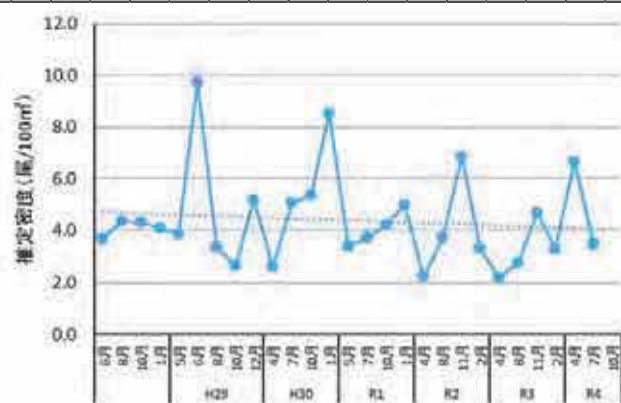


図9 Jolly-Seber 法による推定密度の推移

また、電気ショッカーの採捕効率（採捕尾数/推定尾数×100）を表3に示す。3%～26%と調査回次で差が大きく、平均13%であった。

表3 電気ショッカーの採捕効率

調査年度	H28				H29					H30				R1				R2				R3				R4		平均
調査月	6月	8月	10月	1月	5月	6月	8月	10月	12月	4月	7月	10月	1月	5月	7月	10月	1月	4月	8月	11月	2月	4月	8月	11月	2月	4月	7月	
ショッカー採捕効率	18%	20%	11%	25%	13%	3%	12%	13%	8%	13%	8%	4%	5%	10%	14%	13%	7%	14%	10%	7%	8%	16%	26%	15%	15%	12%	16%	13%

(4) 再採捕個体の移動

採捕された1,077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209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・放流地点から最終採捕地点までの移動距離の分布を図10（遡上した距離を+、降下した距離を-で示す）に、個体別の移動状況を図11-1～11-3に示す。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115尾、上流側に50m以上に移動していた個体は55尾であり、55%が上下50m以内に、75%が上下100m以内に定位していた。

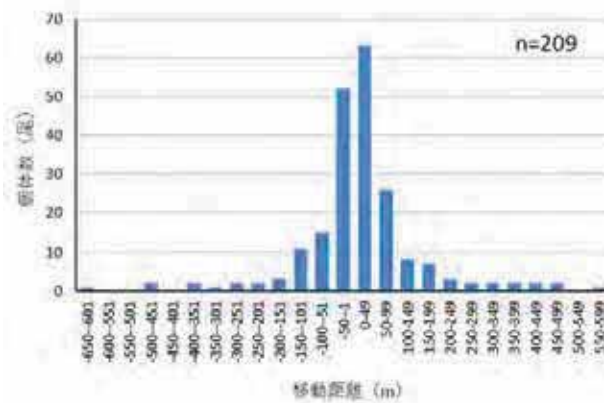


図 10 再採捕個体の移動距離 (m)

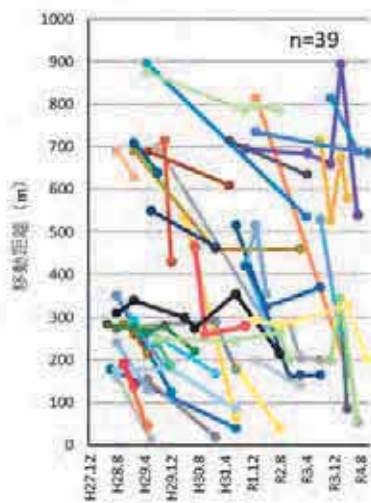


図 11-1 個体別の移動状況
(50m 以上下流へ移動)

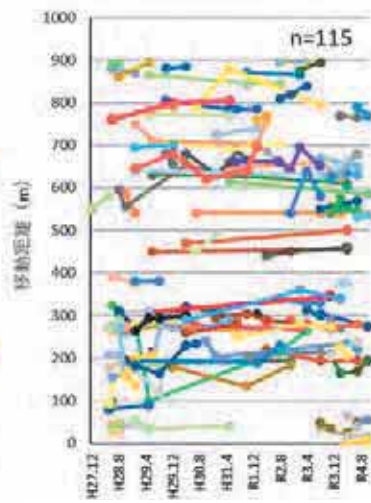


図 11-2 個体別の移動状況
(上下 50m 以内に定住)

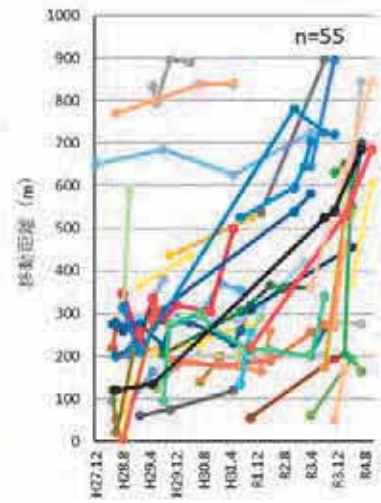


図 11-3 個体別の移動状況
(50m 以上上流に移動)

(5) 再採捕個体の成長

再採捕された209尾の個体別の体重変化について、最終採捕時の体重が100g未満の小型個体を図12-1に、100g以上の大型個体を図12-2に示す。

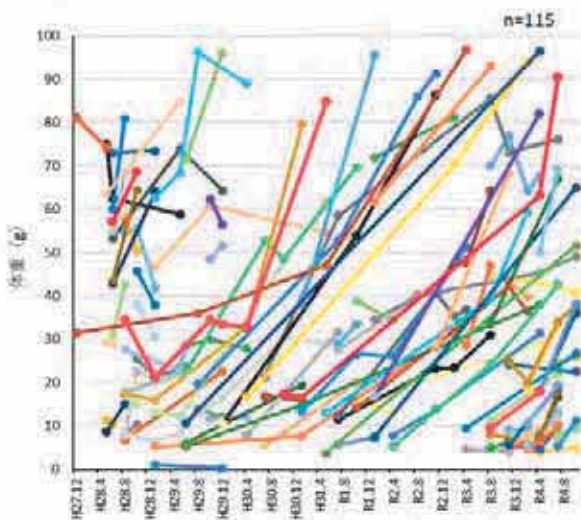


図12-1 再採捕個体の体重変化 (100g未満)

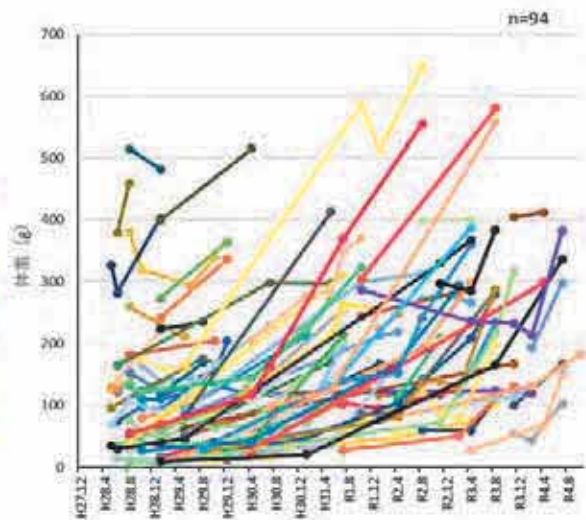


図12-2 再採捕個体の体重変化 (100g以上)

また、再採捕された209尾377回の採捕について、体サイズと経過日数の関係について全長を図13-1に、体重を図13-2に示す。全長は減少39回、増加338回、体重は減少88回、増加289回であった。

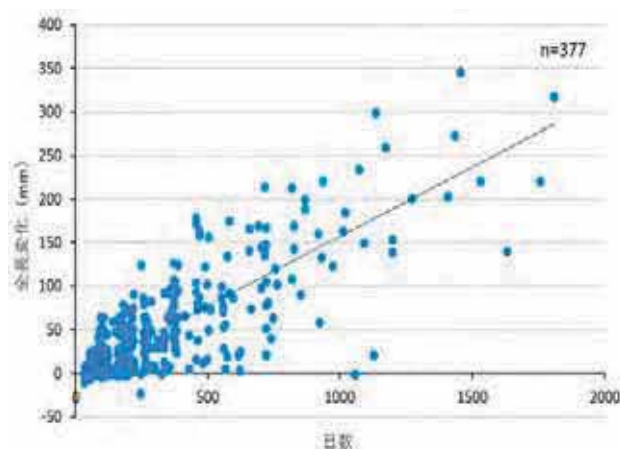


図13-1 経過日数と全長変化

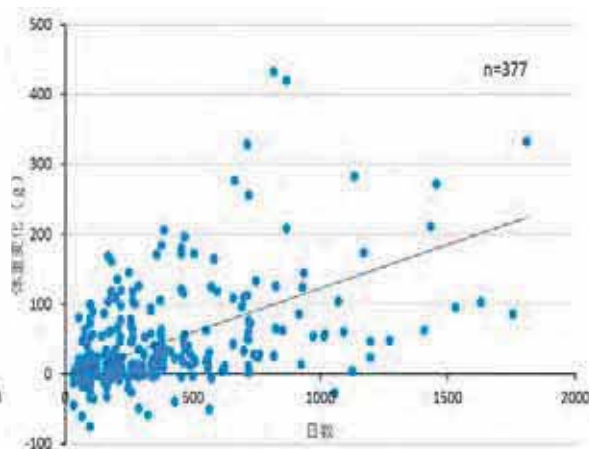


図13-2 経過日数と体重変化

再採捕された209尾の377回の採捕について、全長と体重の日間成長量（GR）の分布を図14-1、14-2に示す。全長GRは0.0～0.05mm/dayが最も多く、全個体の平均値は0.142mm/dayであった。体重GRは0.1～0.2g/dayが最も多く、全個体の平均値は0.105g/dayであった。

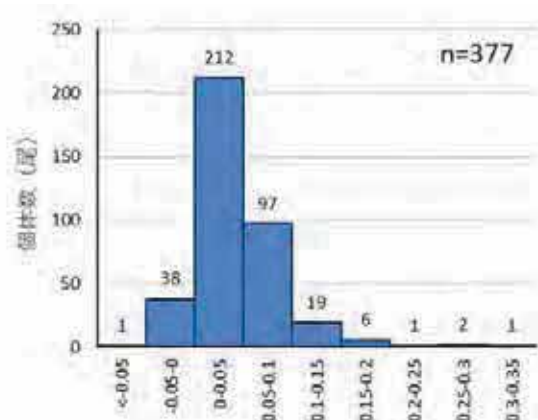


図14-1 再採捕個体の全長GR (mm/day)

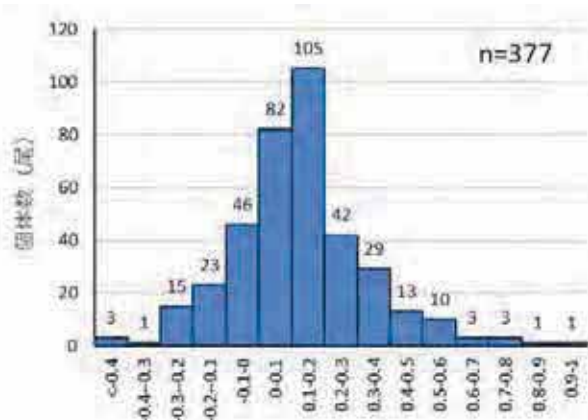


図14-2 再採捕個体の体重GR (g/day)

同様に再採捕された209尾の377回の採捕について、全長と体重の瞬間成長率（SGR）の分布を図15-1、15-2に示す。全長SGRは0～0.05%/dayが最も多く、全個体の平均値は0.041%/dayであった。体重SGRは0.1～0.2%/dayが最も多く、全個体の平均値は0.123%/dayであった。

また、再採捕個体209尾の377回の採捕について、放流時の全長別全長SGR および体重別体重SGRをそれぞれ図16-1、図16-2に示す。なお体重は、図9の全長と体重の関係図より概ね200mmで10g、300mmで30g、400mmで70g、500mmで150g、600mmで300gとして階級を分けた。全長SGR、体重SGRともにウナギの体サイズが大きくなるにつれて低下する傾向がみられた。

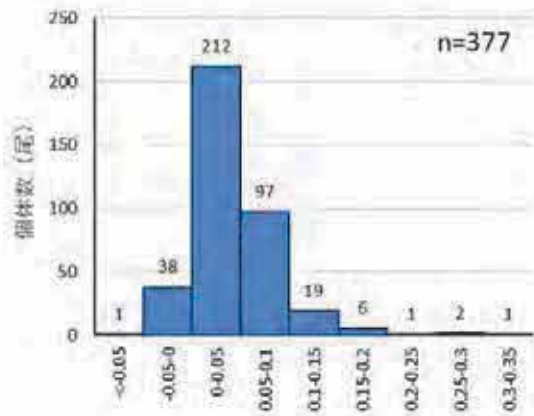


図15-1 再採捕個体の全長SGR (%/day)

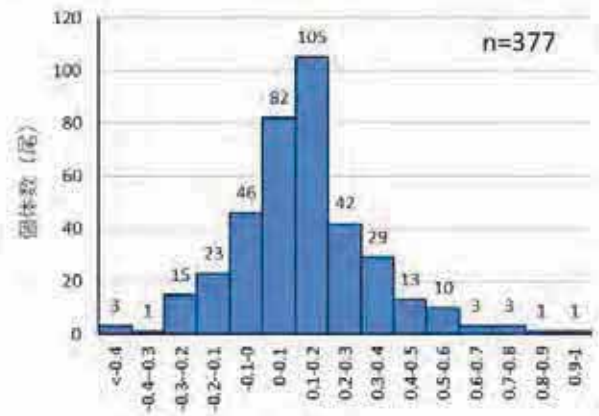


図15-2 再採捕個体の体重SGR (%/day)

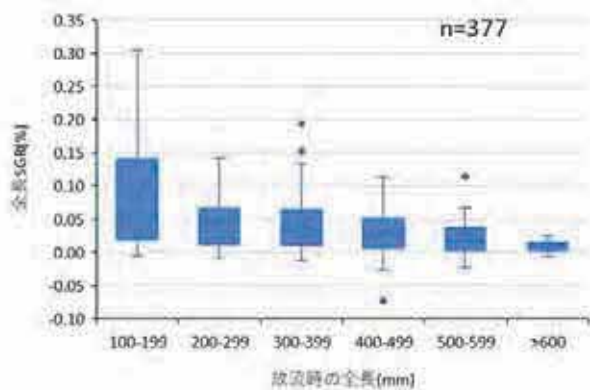


図16-1 全長別全長SGR

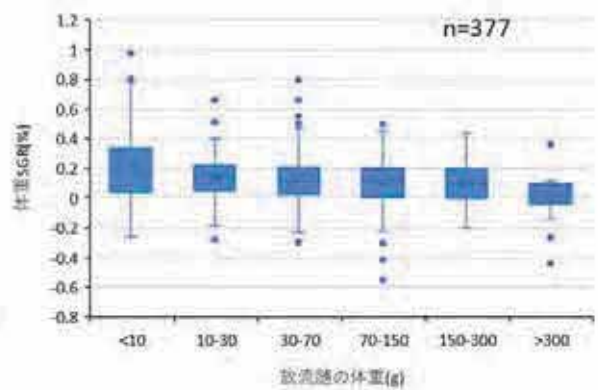


図16-2 体重別体重SGR

(6) 食性

ストマックポンプによる胃内容物調査を行った結果を図17に示す。空胃率は令和3年夏季が53.5%、秋季が76.3%、令和4年夏季が50.0%で夏季より秋季の空胃率が高かった。

胃内容物の分類については、多くの個体で消化が進んで詳細な同定が出来ず、魚類、大型甲殻類（エビ、カニ類）、昆虫類（幼虫）、環形動物（ミミズ）、判別不可（ほとんど消化され判別困難）の5分類とした（重複有り）。夏季は魚類や大型甲殻類（エビ、カニ類）の利用が多く、秋季は魚類や大型甲殻類に加え昆虫類の幼虫やミミズ等も利用していた。

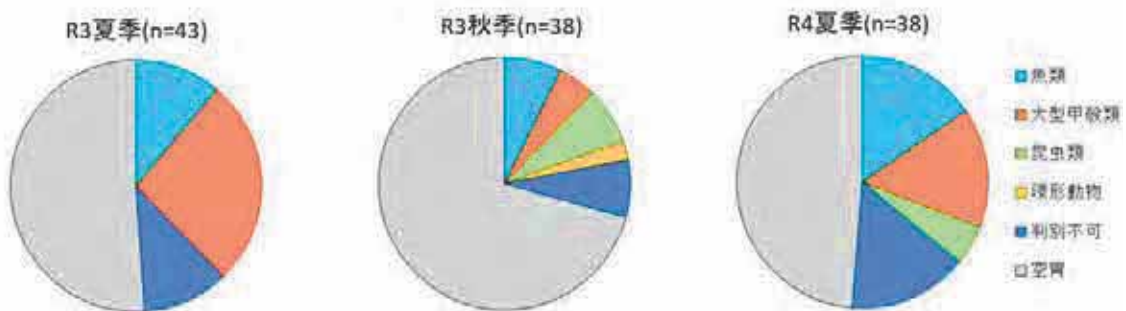


図17 ストマックポンプによる胃内容物調査結果

(7) 生息密度と成長

調査区間別の密度（採捕数/100m²・回）と瞬間成長率（同一調査区に定位していた個体の平均）を図18に示す。全長SGR、体重SGRともに密度依存的な相関は見られなかった。

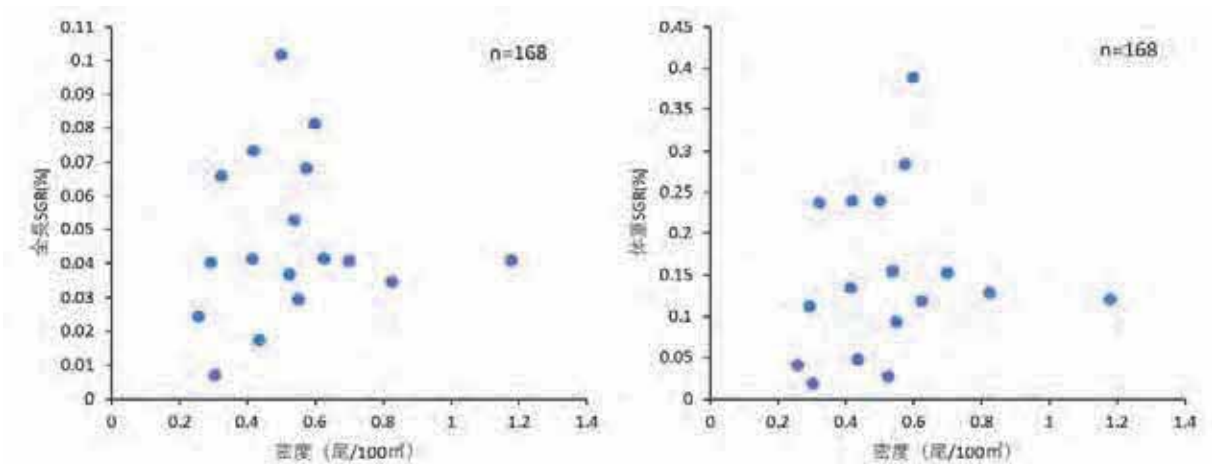


図18 密度と成長の関係（左：全長SGR 右：体重SGR）

(8) ニホンウナギと生息環境の関係

全長別生息環境の割合を図19に示す。全長が小さいほどリター（落葉や枯草等の有機堆積物）や砂泥が多く、全長が大きいくほど大礫や岩盤が多く利用されている傾向が見られた一方、植生（水草や岸の草木）はサイズに関係なく広く利用されていた。

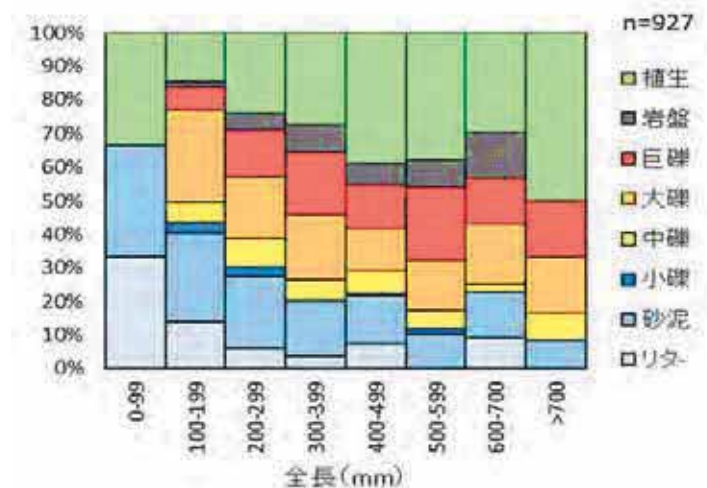


図19 全長と生息環境

調査区間別の河川環境と採捕尾数の関係（河川工事後はデータ数が少ないため、工事前の令和2年秋季調査まで）を解析したところ、河床に巨礫がある調査区では巨礫率と生息密度に強い正の相関がみられ（図20左：Spearman's rank Correlation、 $p < 0.05$ ）、河床に巨礫のない調査区では岸のカバー（植生や石垣等）率と生息数に正の相関がみられた（図20右：Spearman's rank Correlation、 $p < 0.01$ ）。なお、他県のモデル河川で相関がみられた全長20mm未満のニホンウナギ

の採捕尾数とgravel（小礫：2-16mm）及びpebble（中礫：17-64mm）の合計面積や、全長20mm未満のニホンウナギの生息密度とsand（砂：<2mm）の割合等は、八幡川では相関がみられなかった。

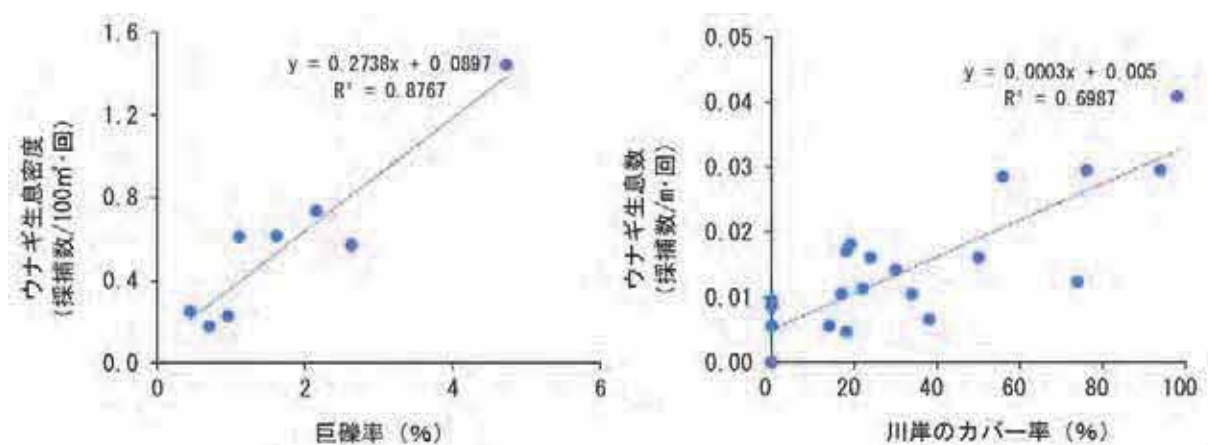


図20 河川環境と採捕数の関係（左：河床の巨礫率 右：岸のカバー率）

考察

1 環境調査

寄州除去工事では川の中に重機を入れて堆積した砂州を取り除くため、粒径の小さい砂や小礫が少なくなり、結果として粒径が大きい中礫や大礫の割合が多くなると共に、川幅が広がったと考えられた。また重機により川底が均された結果、水深が浅くなったと考えられた。

寄州除去工事が河川のウナギに与える影響を示すデータは不十分ではあるが、工事後のウナギの採捕数や推定密度が減少しておらず、重機で均され平坦になった川底も降雨で増水する度に起伏が回復し寄州が再生されていたことから、河川の一部で行う寄州除去工事の影響は限定的ではないかと推察された。

2 採捕尾数

過去と比較して令和3～4年度に10g以下の小型ウナギが多かったのは（図3、4）、令和1～2年漁期のシラスウナギ漁が近年では比較的豊漁だった事（図21）から新規加入が多く、それらが成長と共に下流の感潮域から調査区域である上流の淡水域へ移動したためではないかと推察された。また、令和4年度に10～20gのウナギが多かったのは、それらが卓越年級群となって成長したためではないかと推察された。

3 再採捕率

再採捕の割合が、夏季（7～8月）と秋季（10～11月）が低く、春季（4～5月）と冬季（12～2

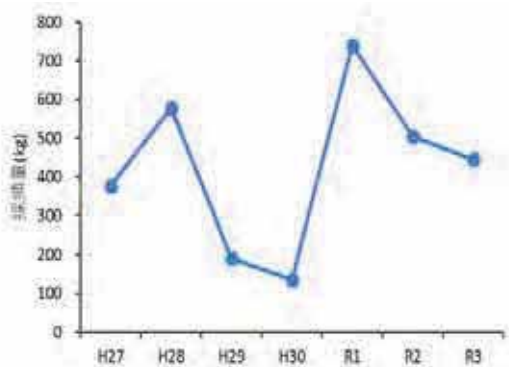


図21 鹿児島県シラスウナギ採捕量の推移

月)が高いのは(図5)、高水温期はウナギの活動が活発で調査区域外からの新規加入が多いのに対し、低水温期はあまり移動せず調査区域外との出入りが少ないためではないかと推察された。

一方、令和4年度は、例年であれば再採捕率が高い春季に、10 g以下の小型新規個体が特に多く加入したため(図4) 夏季よりも再採捕率が低くなり、例年と異なる傾向となったと考えられた。

4 調査区間別の採捕数

調査区間別の採捕数について、St. 4~6が多いのは、底面積に占める割合はわずか数%だが他の調査区にほとんど無い巨礫が存在しているため(図2上、図20左)と考えられ、巨礫の下に形成される隙間がウナギの隠れ処として適していると推察された。

5 電気ショッカーの採捕効率

電気ショッカーの採捕効率が3%~26%と調査回次で差が大きかった(表3)理由として、河川的环境条件が刻々と変化している事が考えられる。例えば水草や岸の草木が水面を覆う、水深が深い等で調査困難な場所が、時期によって植物が枯れる又は伐採される、渇水で水深が浅くなる等で調査可能な回もある。このように採捕効率が変化するため、短期的な調査では正確な実態を把握できないと考えられ、7年間同手法で継続調査した当研究のデータは価値が高いと思われる。

6 再採捕個体の移動

平成29年度放流用種苗育成手法開発事業で、天然ウナギは約9割が同じ場所で定位していたと報告されているが、当調査でも天然ウナギの定住性の強さがうかがえた(図10)。

7 再採捕個体の成長

再採捕までの期間が短い個体の一部には、電気ショッカーや麻酔、標識作業等のハンドリングストレスによると思われる一時的な体重の減少や停滞が見られたが、長期間を経た後に再採捕された個体は増加していた(図12、13)。このため、採捕によるストレスがない自然環境下における瞬間成長率等は、本調査結果よりもやや高くなると推察された。

8 食性

空胃率が夏季より秋季の方が高くなるのは、水温が下がってウナギの活動の低下に伴い摂餌も不活発になってくるためではないかと考えられた(図17)。

9 成長と密度

調査区別の環境収容力を検討するため成長と密度の関係を検討したが、同調査区に定位している個体を抽出して解析したところ相関は見られなかった(図18)。

10 生息環境

八幡川の天然ニホンウナギは、巨礫がある区間では巨礫を、巨礫がない区間では岸のカバーを多く利用している事が明らかになった(図19、20)。また、体サイズによって利用する環境が異なる事もわかった(図19)。ウナギの環境収容力を低下させないためにはこれらの環境を保全していく事が重要であると考えられた。

参考文献

- 鹿児島県水産技術開発センター事業報告書（2015～2017）「ウナギ資源増殖対策事業－Ⅰ（鰻来遊・生息調査事業）」漁場環境部
- 鹿児島県水産技術開発センター事業報告書（2017）「ウナギ資源増殖対策事業－Ⅱ（放流用種苗育成手法開発事業）」漁場環境部
- 鹿児島県水産技術開発センター事業報告書（2018～2021）「ウナギ資源増殖対策事業（ニホンウナギ生息状況調査：八幡川）」漁場環境部

担当者

鹿児島県水産技術開発センター漁場環境部

平成30年度	平江多績・猪狩忠光・市来拓海
令和1～2年度	眞鍋美幸・猪狩忠光・市来拓海
令和3年度	眞鍋美幸・猪狩忠光・中島広樹
令和4年度	眞鍋美幸・猪狩裕代・中島広樹

2. -(1) 環境 DNA によるニホンウナギの在・不在検出技術の実証開発

国立研究開発法人 水産研究・教育機構

国立大学法人 愛媛大学

要旨

ニホンウナギの環境 DNA を検出する実験系(フィルター濾過、遺伝子抽出、リアルタイム PCR)を確立した。ニホンウナギ環境 DNA の分解過程を調べる室内実験を行った。環境水中(300L 円形水槽)における環境 DNA の分解速度 (DNA コピー数が半数になる日数) を求めたところ、10℃の水温条件下ではおよそ 2.1~2.2 日、15℃では 1.6~1.9 日、20℃では 1.1 日~1.5 日、25℃では 1.0~1.2 日と推定された。また、室内実験において、ニホンウナギから放出される環境 DNA 量と分解量が平衡となる濃度を調べたところ、その濃度は大型個体ほど高くなることが示された。野外の人工河川 (流量 0.021m³/s) を使用した実験により、河川に畜養したニホンウナギの尾数およびバイオマスが下流域での環境 DNA 量と相関することを示した。

鹿児島県八幡川、和歌山県高瀬川、高知県奈半利川において、環境 DNA の河川内分布を調べる調査を実施した。いずれの河川においても、環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックスの流程に沿った増減傾向は認められなかった。また、環境 DNA の河川内空間分布は不均一であり、採水地点の流速、水深と環境 DNA 濃度との間にも関係性は認められなかった。八幡川および高瀬川では、多地点採水調査に基づく平均環境 DNA フラックスデータが標識再捕獲調査によって得られたニホンウナギの推定個体数と対応している可能性が示唆された。愛媛県重信川では、ニホンウナギ放流前後で環境 DNA フラックスが増加することが確認された。この結果は、環境 DNA によるモニタリング調査が放流効果検証のアプリケーションの一つになり得ることを示す。

全期間を通じた課題目標及び計画：

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

(1) ニホンウナギの環境 DNA を検出する実験手法の確立

方法および結果

採水検体（1L）を、電動ポンプを用いてガラスフィルター（ワットマン社 GF/F フィルター 47 mm）で濾過した。さらに、フィルター上に蟯集させた DNA の保存状態を高めるために、約 15ml の 100%エタノールをフィルター上に添加し(Miyamoto et al. 2016)、目視によりフィルターが乾燥に至るまで濾過を続けた。濾過後のフィルターは、直ちに冷凍保存した。フィルターからのトータル DNA 抽出は、Miya et al. (2015)の方法に従い、Qiagen 社の DNeasy Blood & Tissue Kit を用いて最終収量が 200 μ l になるように抽出した。

環境 DNA の検出・定量化には、ロシュ社 LightCycler480 を用いてリアルタイム PCR により分析した。リアルタイム PCR には、ミトコンドリア DNA に設計されたニホンウナギを特異的に検出する 2 種類のプライマー・蛍光プローブ(蛍光色素:FAM)セット (Minegishi et al., 2009; Kasai et al., 2020)のどちらかを用いて、蛍光プローブ法により増幅した。プライマー、蛍光プローブの塩基配列を下記に示す。

- ・蛍光プローブ (5' to 3'): CACATGTGTAAGTCAGAACGGACCGACC
 - ・フォワードプライマー (Aja16S-L3): AATCAGTAATAAGAGGGCCCAAGC
 - ・リバースプライマー (Aja16S-H3): TGTTGGGTTAACGGTTTGTGGTA
- (Minegishi et al., 2009)

- ・蛍光プローブ (5' to 3'): ACCCATAAACTGATAAATAG
 - ・フォワードプライマー (Aja-D1p-F2): TACATTTAATGGAAAACAAGCATAAGCC
 - ・リバースプライマー (Aja-D1p-R3): CGTTAACATTACTCTGTCAACTTACCTG
- (Kasai et al., 2021)

PCR 反応には、ロシュ社の LightCycler 480 Probe Master を用い、下記の反応溶液組成で増幅を行った。

・テンプレート DNA	5.00 μ l
・ロシュ社マスターミックス	10.00 μ l
・超純水	2.60 μ l
・フォワードプライマー(10pmol/ μ l)	1.00 μ l
・リバースプライマー(10pmol/ μ l)	1.00 μ l
・プローブ(10.0 μ M)	0.40 μ l
・合計	20.0 μ l

なお、河川水を PCR する際は試料に PCR 阻害物質が含まれる可能性を考慮し、サーモフィッシャー社の 2×Environmental Master Mix 2.0 を用いて下記の反応溶液組成で増幅を行った。

・テンプレート DNA	5.00 μ l
-------------	--------------

・ 超純水	1.05 μ l
・ サーマフィッシャー社マスターミックス	10.0 μ l
・ UNG 酵素 (サーモフィッシャー社 AmpErase Uracil N-Glycosylase)	0.10 μ l
・ フォワードプライマー (10pmol/ μ l)	1.80 μ l
・ リバープライマー (10pmol/ μ l)	1.80 μ l
・ プローブ (10.0 μ M)	0.25 μ l
・ 合計	20.00 μ l

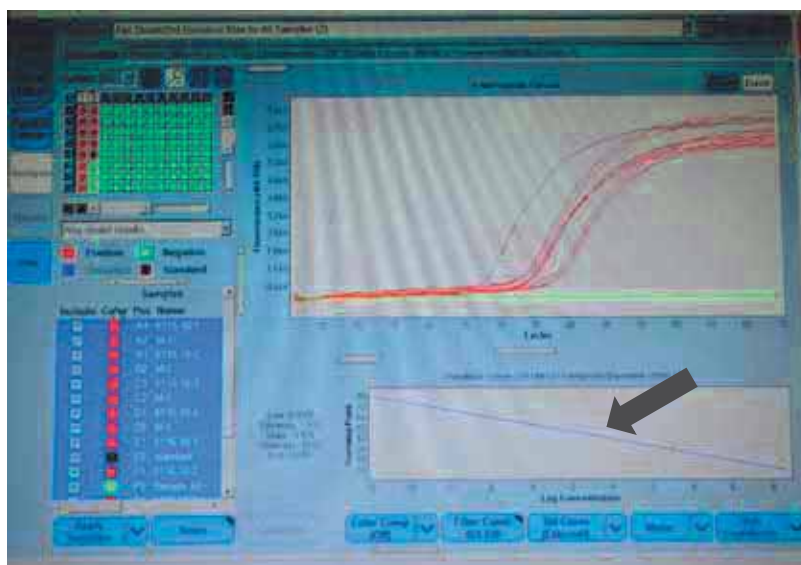


図1 ロシュ社LightCycler480を使用したリアルタイムPCR反応の一例。図中の矢印は検量線を示す。

水産技術研究所日光庁舎・屋内水槽にて畜養しているニホンウナギの飼育水を用いてアニーリング温度 60℃で反応させたところ、いずれのプライマーセットを用いても明瞭な増幅反応を確認することができた(図1)。またニホンウナギのDNA コピー数が予めわかっているスタンダードサンプルを用いて作成した検量線(図1)と照合させることで、環境水に含まれるニホンウナギのDNA コピー数を定量することが可能となった。

(2)環境DNAの分解過程およびニホンウナギ体内からの放出量を調べる室内実験、および野外人工河川におけるニホンウナギの生息量と環境DNA濃度との関係を調べる調査

方法

環境水中の環境DNAの分解過程を調べるために、水産技術研究所日光庁舎の実験施設内において以下の室内実験を行った。300Lの円形水槽を4基設置し、恒温器を用いてそれぞれ10℃、

15℃、20℃、25℃の水温に設定した(図2)。円形水槽内の水は、電動ポンプを使用し常に循環している状態を保った。別に用意した200Lのガラス水槽にニホンウナギを10尾畜養し、3～5日後に、ニホンウナギ飼育水10Lをそれぞれの円形水槽に投入した。約15分後に各円形水槽から環境DNA分析用の水を1L採水し、速やかにフィルター濾過作業を行った。各円形水槽からの採水・濾過は1～3日間隔でおこない、この一連の実験を3回繰り返した。環境DNAコピー数の推定については、それぞれの検体についてリアルタイムPCR反応を4回おこない、1回のPCR反応でコピー数が1未満であった場合は検出下限値扱いとしその後の解析から除外した。

ニホンウナギ個体から環境中に放出される環境DNA量を調べるために以下の実験に取り組んだ。水産技術日光庁舎の実験施設内において設置した300Lの円形水槽4基を、恒温器を用いて20℃の水温に設定した。円形水槽内の水は、電動ポンプを使用し常に循環状態を保った。日光庁舎にて畜養しているニホンウナギを全長、体重を記録した後に、それぞれの円形水槽に1尾ずつ移し、投入から24時間毎にそれぞれ1Lを採水した。採水した水は、30分以内にフィルター濾過を行ない、DNA抽出までフィルターを冷凍保存した。実験終了後の円形水槽、恒温器については、次亜塩素酸ナトリウムを用いて十分に洗浄した後に、その後の実験に用いた。環境DNAコピー数の定量については、それぞれの検体についてリアルタイムPCR反応を4回(反復)おこない、1回のPCR反応においてDNAコピー数が1未満であった場合は検出下限値扱いとし、その後の解析から除外した。実験は12個体についてそれぞれ17日～18日間行った。実験に用いたニホンウナギの全長および体重の範囲はそれぞれ136mm～541mm、2.03g～247.60gであった。



図2 室内実験に使用した円形水槽

ニホンウナギの個体数、バイオマスと環境 DNA 量との関係を調べるために、人工河川を用いた以下の実験をおこなった。水産技術研究所日光庁舎内を流れる人工河川（流程約 120m、川幅約 1m、流量 0.021m³/s:図 3）の最上流部にウナギ用カゴ(高さ約 30cm、直径 60cm)を設置し、日光庁舎にて畜養しているニホンウナギを移した。実験に使用するニホンウナギは、全長・体重を計測した後、実験開始日の 10:00 にウナギカゴに移し、同日の 15:00 にウナギ用カゴから 70m 下流で環境水を採取した。この一連の実験を、ニホンウナギの尾数を 1 尾から 10 尾まで変化させて合計 10 回おこなった。実験では、同一個体を連続して使用しないようにし、1 尾から 10 尾までの各 10 回の実験はランダムな順序で実施するようにした。実験は、2018 年 10 月 22 日から 2018 年 11 月 2 日までの期間におこなった。実験期間中の河川水温は、最低 8.4℃、最高 10.4℃の範囲であった。



図 3 ニホンウナギ環境 DNA 実験に用いた人工河川。

結果と考察

図 4 に、実験回ごとの環境 DNA コピー数の減衰過程を示した。いずれの実験回においても、それぞれの温度条件下で環境 DNA コピー数は時間とともに有意に減少し、その減少パターンは指数関数式に適合した。また、2 回目の実験を除くと、高水温環境下ほど分解速度が速くなる傾向が認められた。環境 DNA コピー数が半数となる日数（半減期）を推定したところ、10℃ではおよそ 2.1～2.2 日、15℃では 1.6～1.9 日、20℃では 1.1 日～1.5 日、25℃では 1.0～1.2 日であった（2 回目実験のデータを除く）。

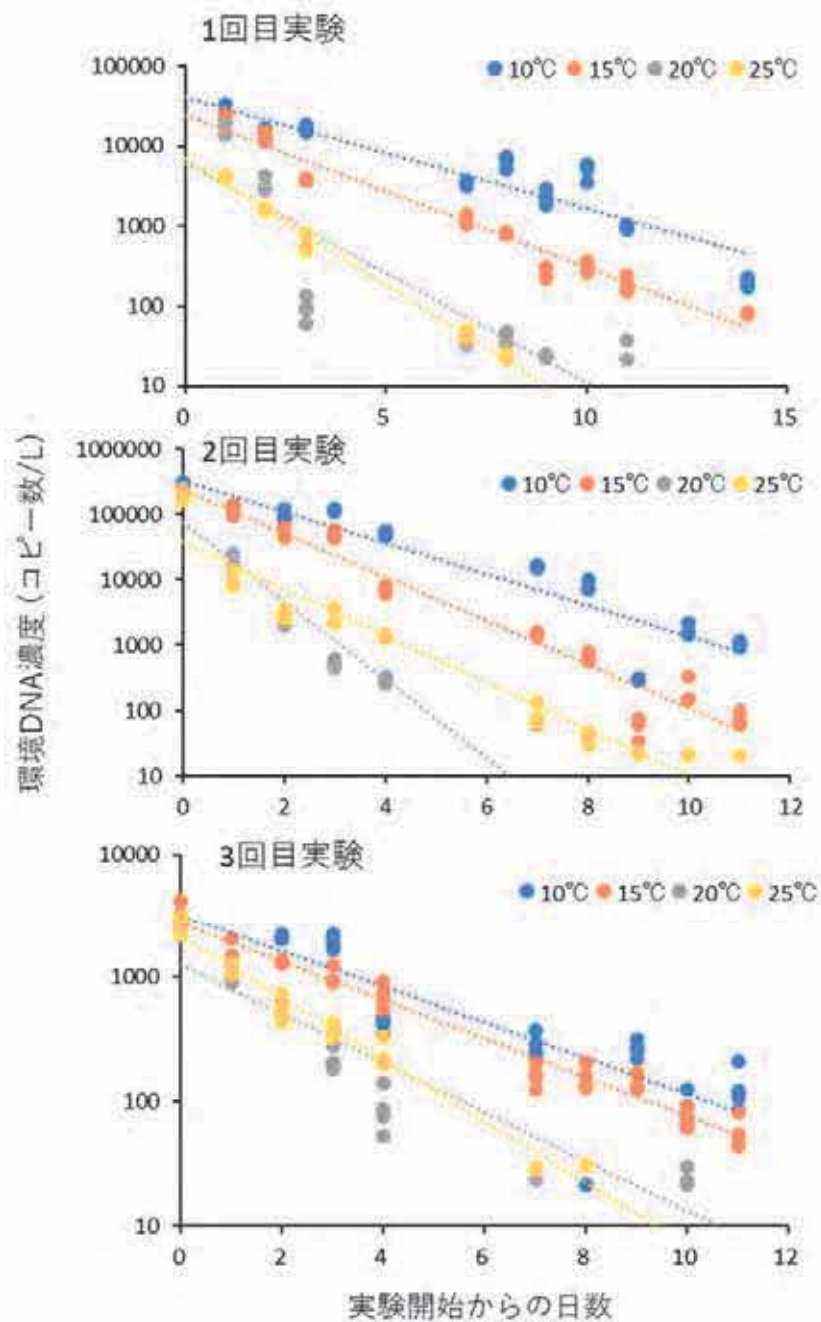


図4 円形水槽実験におけるニホンウナギ環境DNAコピー数の推移。指数関数式のあてはめには、コピー数が最大であった日を起点として計算し、それ以前のデータは計算に含めなかった。また、グラフからも省いた。

図5に、ニホンウナギを投入した水槽内における実験回ごとの環境DNA濃度の推移を示した。実験水槽内の環境DNA濃度は、いずれも実験開始2日～4日後にピークに達し、その後減少に転じるパターンを示した。これは実験水槽に移されたニホンウナギがある時間を経て活動性を低めた結果、体外に放出される環境DNA量が減少し、単位時間あたりの放出量が分解量を下回ったためと考えられる。実験開始から8日～10日以降では、極端な濃度変化は観察されず、個体毎にある一定の値で

推移した。水槽内の環境 DNA 濃度が安定する実験開始から 15 日後の環境 DNA 濃度は、ニホンウナギの全長、体重と正の相関関係を示した(全長、 $R^2=0.66$: 体重、 $R^2=0.68$; 図 6)。

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

人工河川におけるニホンウナギの尾数、バイオマス (体重の合計) と環境 DNA 量との関係を図 7 に示す。環境 DNA コピー数は、ニホンウナギの尾数およびバイオマスと有意な相関関係を持つことが示された [決定係数: 40% (尾数)、34% (バイオマス)]。この結果は、実験に使用した人工河川程度の小規模河川や水路においては、環境 DNA 分析がニホンウナギのバイオマス推定に適用可能であることを示す。

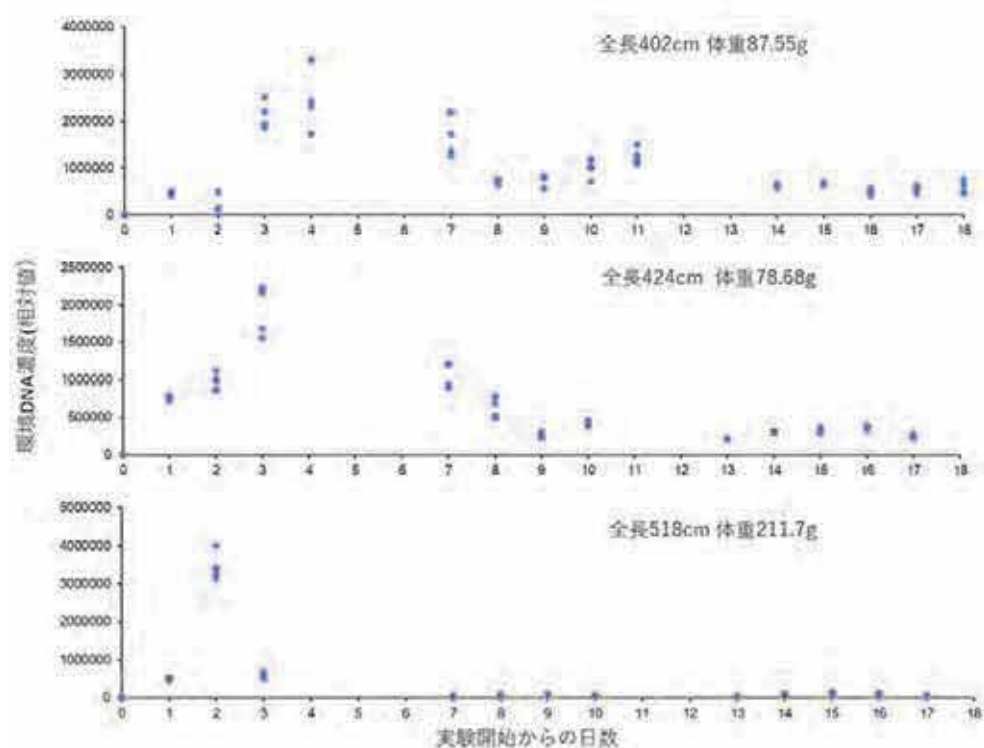


図 5 実験回ごとの環境 DNA 濃度の推移。各実験で、縦軸と横軸の範囲が異なるので注意のこと。

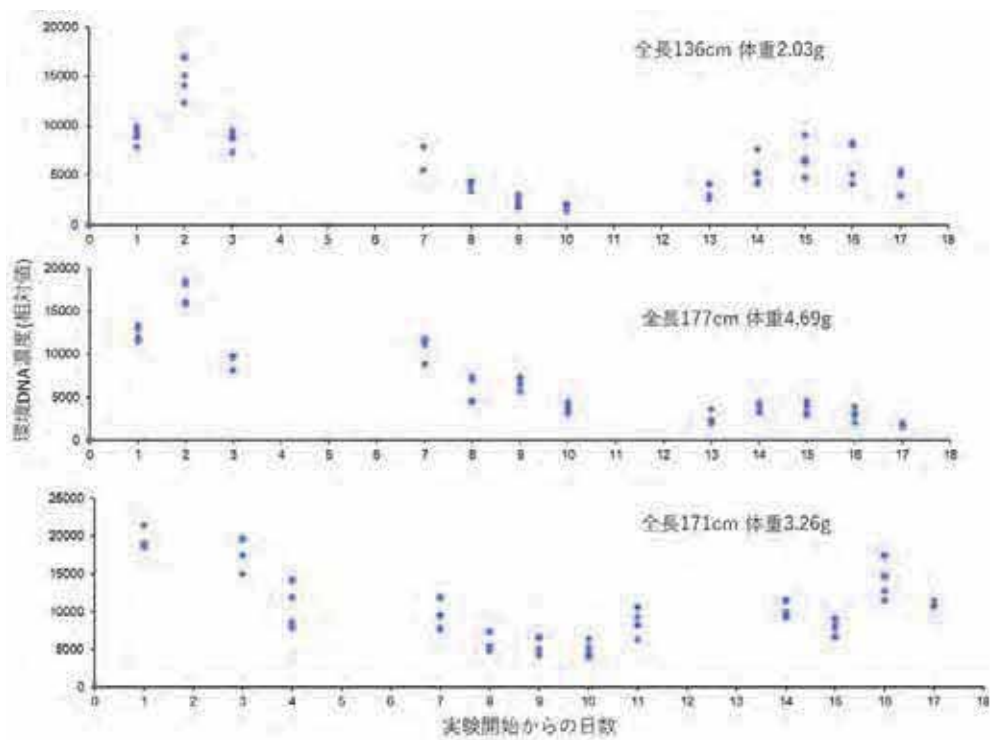


図5 つづき

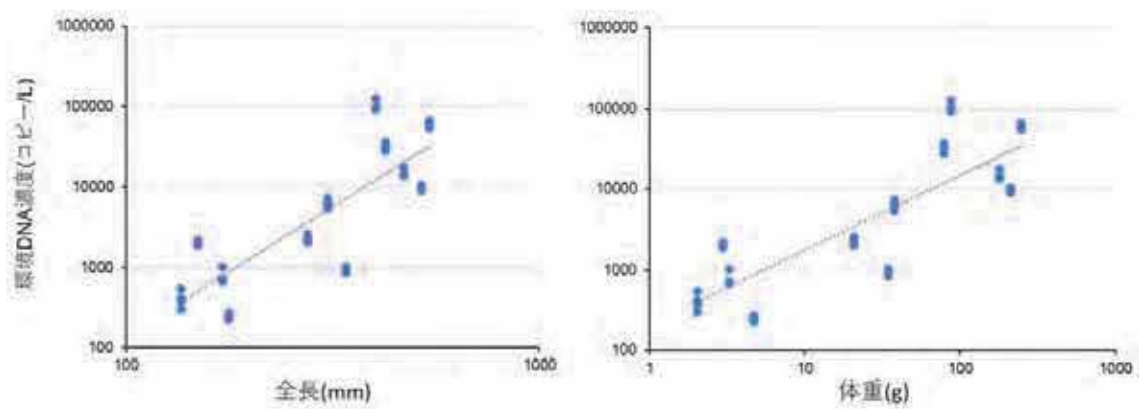


図6 実験開始から15日後のニホンウナギ全長・体重と環境DNA濃度との関係。

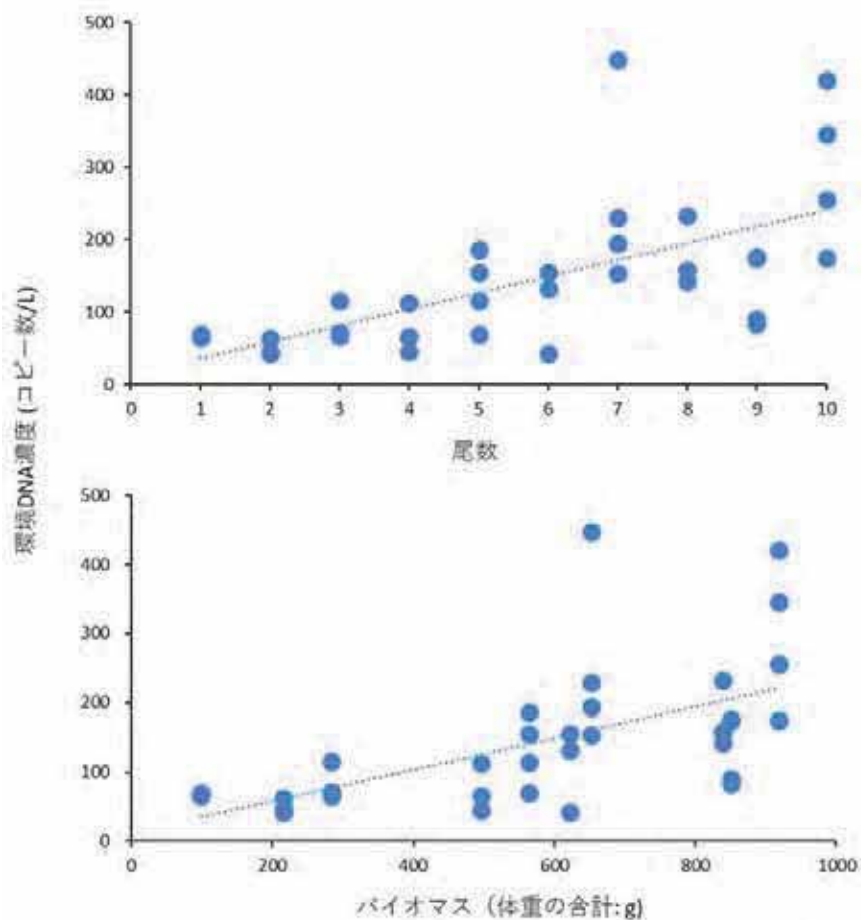


図7 野外人工河川におけるニホンウナギ尾数、バイオマスと環境DNA濃度との関係。

(3) 自然河川における環境DNAの空間分布および存在量の評価

方法

i. 自然河川における環境DNAの空間分布

自然河川における環境DNAの分布パターンを調べるために、鹿児島県八幡川、和歌山県高瀬川および高知県奈半利川（図8）において以下の調査を行った。

鹿児島県八幡川の調査区間（流程距離約900m）に、流程に沿って100m毎に計10箇所の調査地点を設定し、採水調査を行った。それぞれの調査地点において、横断面に沿って2m毎に1L×2本を採水し、同時に採水場所の流速、水深、調査地点の流量を測定した。採水した水は直ちにフィルター濾過を行い、DNA抽出までフィルターを冷凍保存した。採水調査は2020年11月4日、2021年11月17日、2022年11月8日に実施した。

和歌山県高瀬川の調査区間（流程距離約900m）に、流程に沿って100m毎に計10箇所の調査地点を設定し、採水調査を行った。それぞれの調査地点において、横断面に沿って2m毎に1L×2本を採水し、同時に採水場所の流速、水深、調査地点の流量を測定した。採水した水は直ちにフィル

ター濾過を行い、DNA 抽出までフィルターを冷凍保存した。採水調査は 2020 年 7 月 30 日、2021 年 11 月 18 日、2022 年 11 月 9 日に実施した。

高知県奈半利川の調査区間(流程距離約 20km)内に、流程に沿っておよそ 5km 毎に調査地点を設定し、それぞれの地点において横断面に沿って 10m 毎に 1L×2 本を採水した。2021 年、2022 年調査時には、支流(野川)での採水を加えた。同時に、採水場所の流速、水深、調査地点の流量を測定した。採水した水は直ちにフィルター濾過を行い、DNA 抽出までフィルターを冷凍保存した。採水調査は 2020 年 12 月 3 日～4 日、2021 年 12 月 24 日、2022 年 11 月 10 日～11 日に実施した。

ii. ニホンウナギの放流にともなう環境 DNA フラックスの時間的变化

ニホンウナギの放流にともなう環境 DNA フラックスの変化を調べるために、愛媛県重信川水系において以下の調査を行った。2021 年 7 月に重信川水系 10 地点で地域の漁業協同組合によるニホンウナギの放流が実施されている(図 14)。ニホンウナギの放流前となる 2020 年 10 月、2021 年 6 月末と、放流後の 7 月、9 月、10 月、11 月、2022 年 1 月、3 月に、放流が実施された 10 地点に加え、その上流と下流の計 27 地点で環境計測と採水を行った。採水した水は現地でフィルター濾過し、実験室にて定量 PCR 解析を行った。

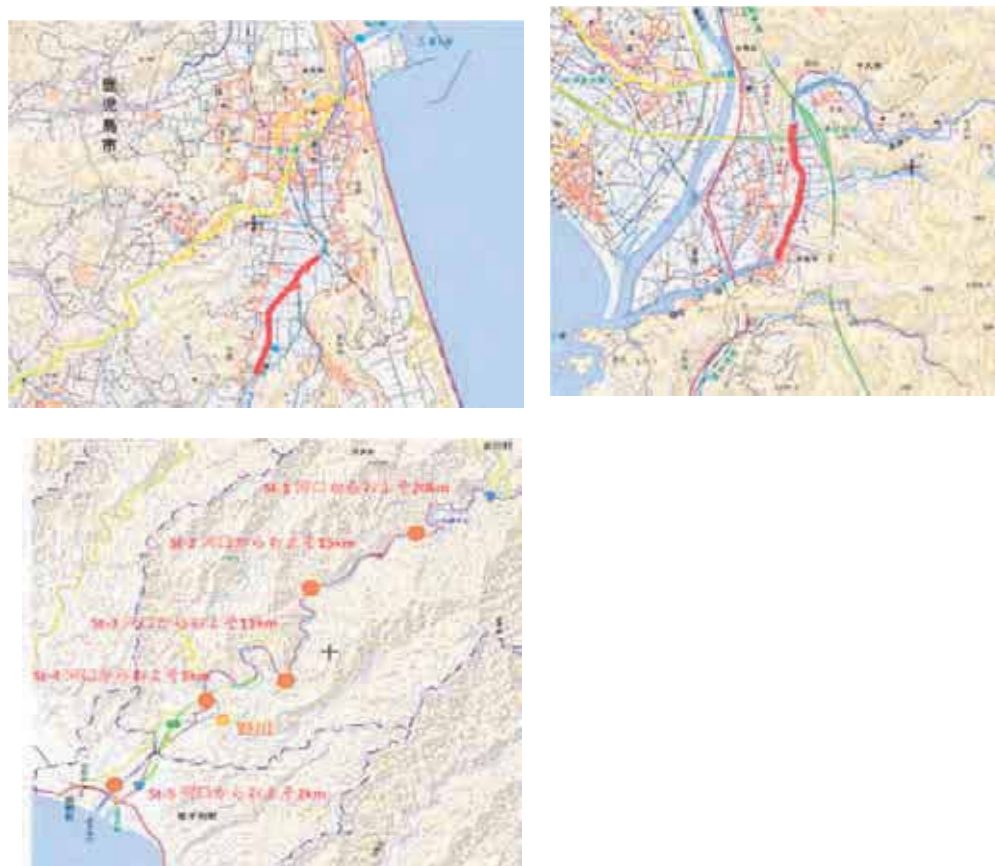


図 8 鹿児島県八幡川(左上図)、和歌山県高瀬川(右上図)、高知県奈半利川(左下図)。八幡川および高瀬川図中の赤線は調査場所を示す。

結果

i. 八幡川、高瀬川、奈半利川での調査結果

八幡川に設定した 10 箇所の調査地点の平均環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックス（1 秒間に河川横断面を流下する環境 DNA コピー数）を図 9 に示す。環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックスともに、流程に沿った増減傾向は確認されなかった。鹿児島県水産技術開発センターによって行われた電気漁具によるニホンウナギ採捕調査(2020 年 11 月 22 日、2021 年 11 月 9-10 日、2022 年 10 月 31 日～11 月 1 日にそれぞれ実施)によって得られた各地点のニホンウナギバイオマス（採捕個体の体重合計値）と環境 DNA フラックスとの関係をみたところ（図 10）、いずれの調査年においても有意な相関関係は認められなかった。

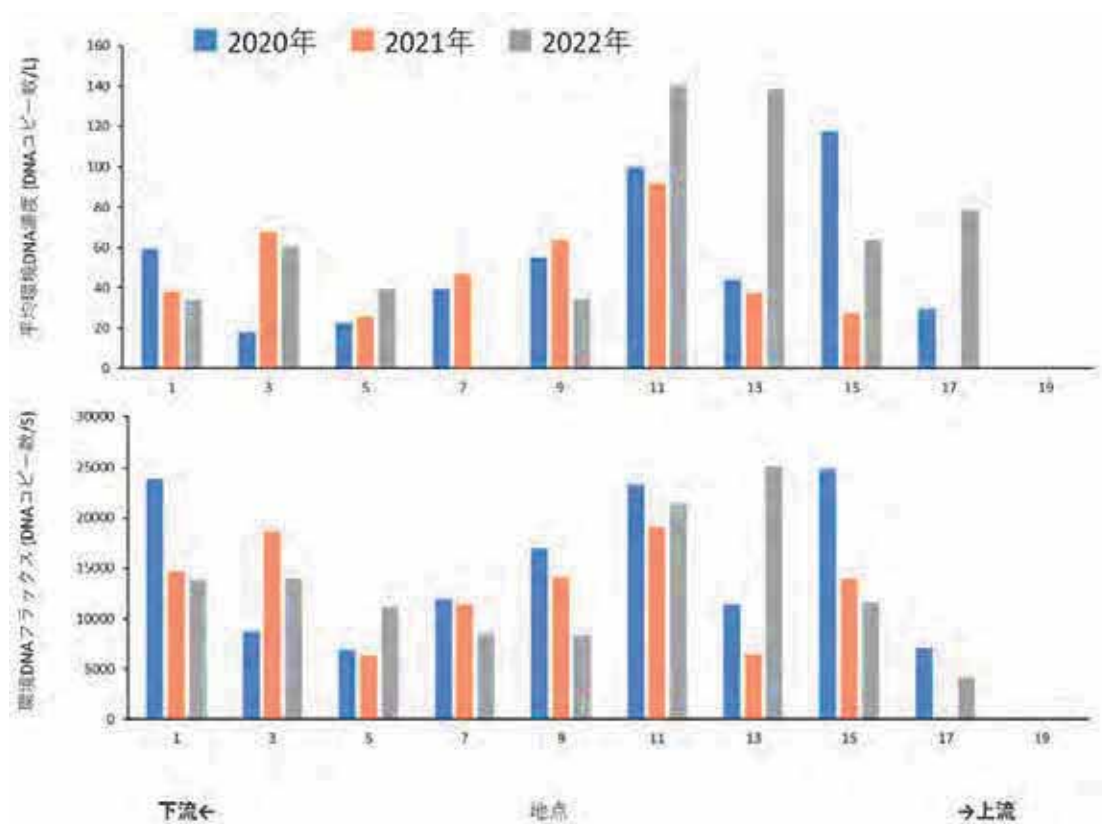


図 9 鹿児島県八幡川における調査地点毎の平均環境 DNA 濃度および環境 DNA フラックス。

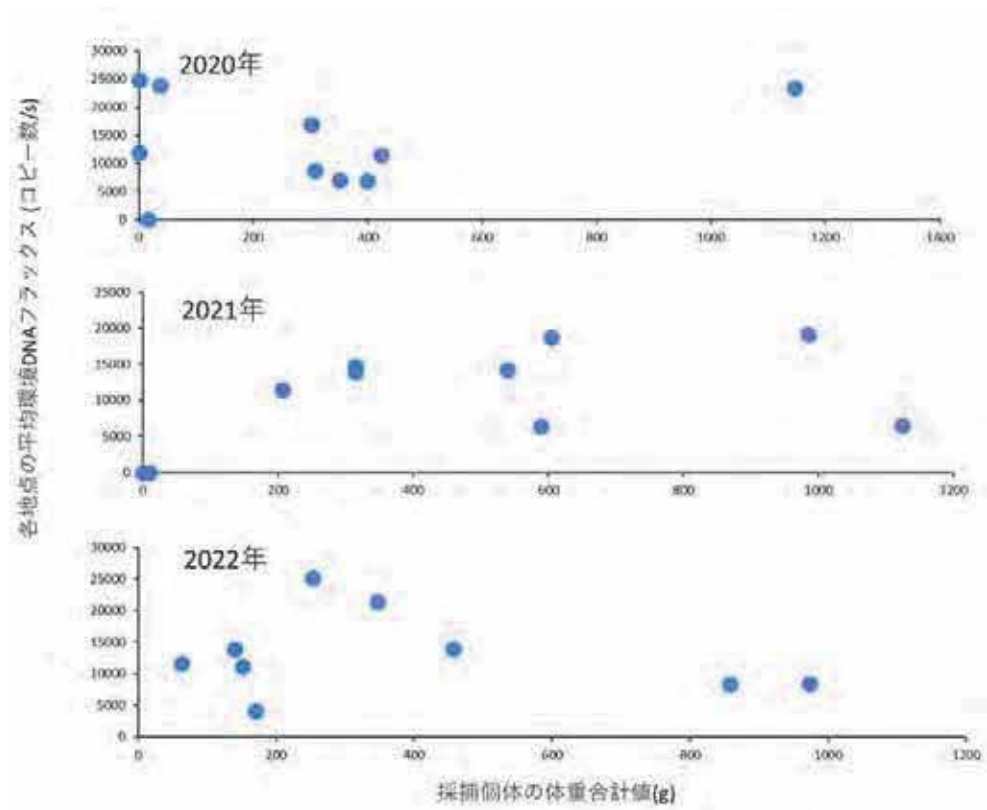


図 10 鹿児島県八幡川における地点毎のニホンウナギ採捕個体の体重合計値と平均環境 DNA フラックスとの関係。

高瀬川に設定した 10 箇所の調査地点の平均環境 DNA 濃度、環境 DNA フラックスを図 11 に示す。2021 年の採水調査時に極端な渇水が観察され、水の流れが途切れる瀬切れ箇所が多く現れた。そのため流量を測定することができず、多くの地点で環境 DNA フラックスデータを得ることができなかった。2021 年サンプルのうち地点番号 11 より上流域で環境 DNA 濃度が極端に高くなっていたが、これは川が滞流することにもなう濃度の一時的な上昇と考えられる。同様に、2022 年度調査時においても各調査地点の流量は全体的に少なく、検出される環境 DNA 濃度に対して環境 DNA フラックスは 2020 年ほどには高い値を示さなかった。和歌山県水産試験場によって行われた電気漁具によるニホンウナギ採捕調査(2020 年 8 月 5 日、2021 年 11 月 12 日、2022 年 10 月 6 日-7 日にそれぞれ実施)によって得られた各地点のニホンウナギ採捕個体の体重合計値と環境 DNA 濃度との関係をみたところ (図 12)、いずれの調査年においても関係性は認められなかった。

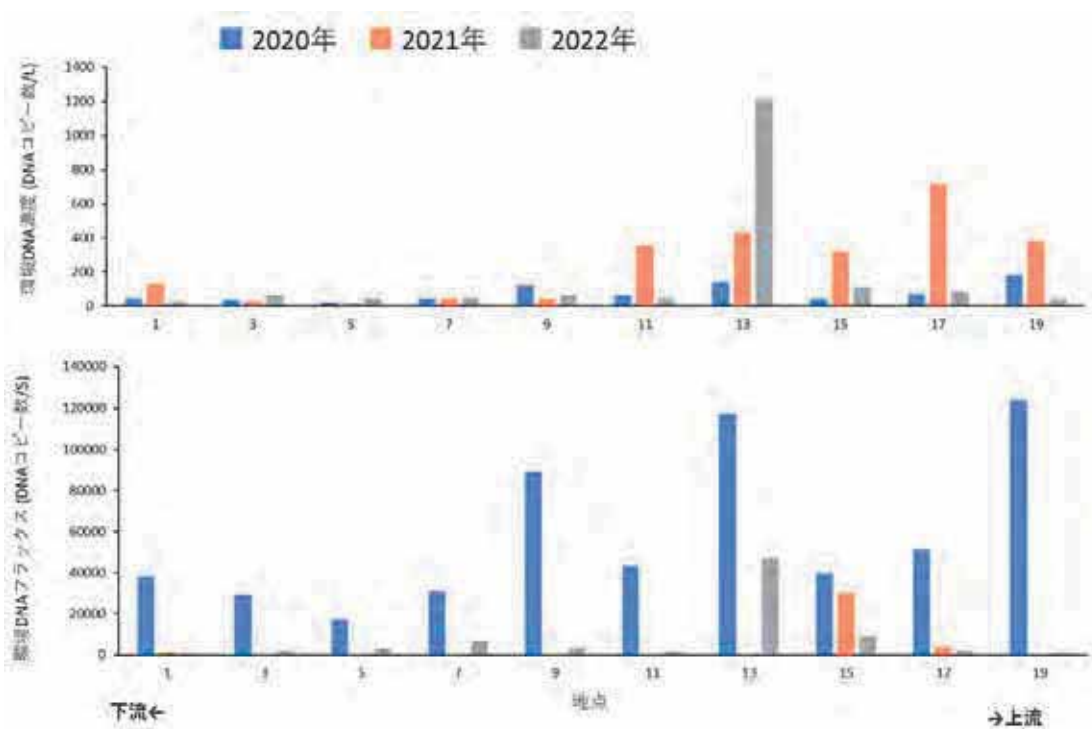


図 11 和歌山県高瀬川における調査地点毎の平均環境 DNA 濃度および環境 DNA フラックス。

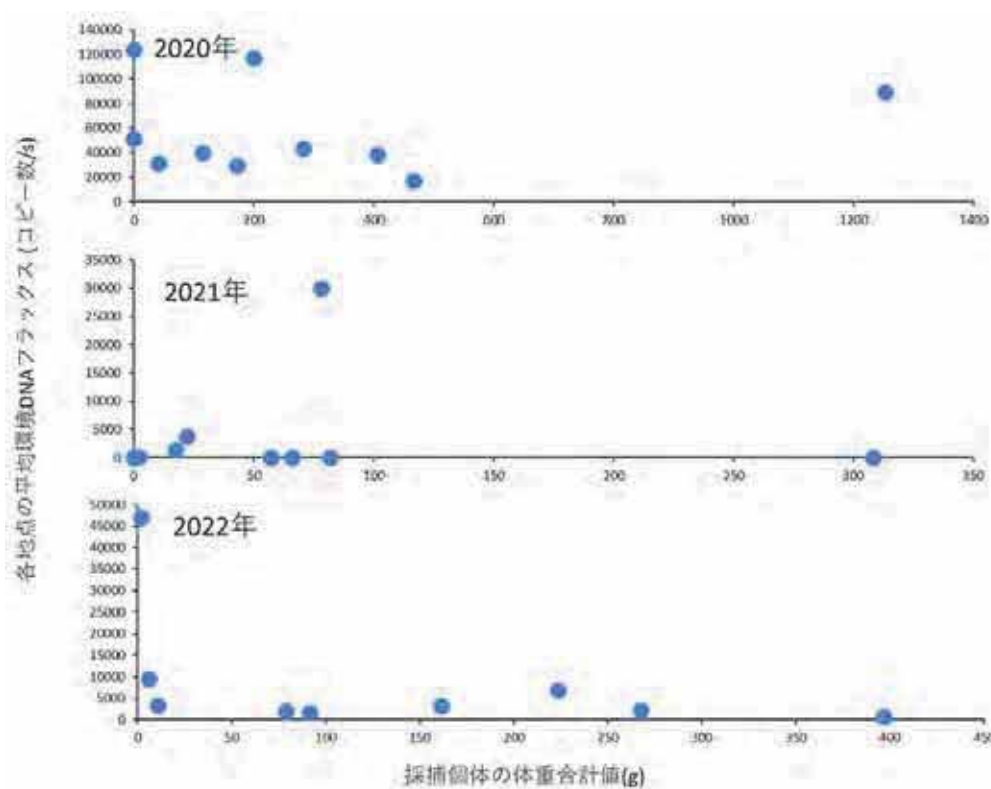


図 12 和歌山県高瀬川における地点毎のニホンウナギ採捕個体の体重合計値と環境 DNA フラックスとの関係。