

高知県の天然アユ資源を回復させるための取組支援

占部敦史・稲葉太郎・荻田淑彦・田中ひとみ・隅川 和

高知県のアユ資源量は河川環境の悪化などによって低い水準にあり、維持・回復のための対策が強く求められている。まず、アユ資源量を回復させるためには、産卵親魚を保護し、産卵量を確保することが必要である。そこで本事業では、産卵に関するデータ（産卵場所・期間・量）および遡上に関するデータ（遡上時期・量や遡上魚の孵化日組成）を収集し、それらを整理・分析した資料を各内水面漁業協同組合に提供することで、各漁協が取り組む親魚保護事業（産卵場の造成、親魚保護期間・区域の設定など）をより効果的なものにするを目的とした。

1. 遡上魚に関する調査

2018年の遡上に関するデータを収集するために、遡上量のスコア評価および遡上魚の孵化日組成の推定を行った。

材料と方法

遡上量の評価 2018年（H30）2～5月に、県内11河川の定点（表1）において、箱メガネによる目視観察によって、表2の遡上スコアに基づいて遡上量を評価した。また、各河川の遡上量の年比較を行う際には、各年の3～5月の遡上スコアの平均値を、その年の遡上量指標値として使用した。

各河川で判定した遡上スコア値が遡上量の多寡を反映しているかを検証するため、河川中のアユ環境DNA量を測定した。アユ環境DNA量は各河川の遡上調査時に河川水を1L採水し、ろ過およびDNA抽出を行い、リアルタイムPCR

で測定した。アユ環境DNA量の測定方法は、Doi et al. (2016), Yamanaka and Minamoto (2016), 占部ら (2018) に従った。各河川で測定したアユ環境DNA量は、採水時に評価した遡上スコア値と比較することで、両者の関係性を確認した。

表1. 2018年の遡上状況調査の調査地点および調査日

調査河川	調査地点	調査日			
		2月	3月	4月	5月
野根川	鴨田堰	26	12	10	17
奈半利川	田野井堰	26	2, 12, 22	10, 23	17
安田川	焼山堰	26	12, 22	10, 23	17
伊尾木川	有井堰	26	12, 27	9, 23	17
安芸川	中之橋	26	12, 27	9, 23	17
物部川	物部川橋	26	12, 27	9, 23	17
鏡川	トリム堰	28	12, 28	12	18
仁淀川	八田堰	28	13, 29	12	18
新荘川	岡本堰	27	13, 29	12	16
四万十川	赤鉄橋	27	13, 30	19	16
松田川	河戸堰	27	7, 13, 30	19	16

表2. 遡上量の評価に用いたスコアとその基準

スコア	基準
0.0	影なし、食み跡なし
1.0	魚影なし、食み跡あり
1.5	観察される一群が1尾以上～10尾未満
2.0	観察される一群が10尾以上～50尾未満
2.5	観察される一群が50尾以上～100尾未満
3.0	観察される一群が100尾以上～500尾未満
3.5	観察される一群が500尾以上～1,000尾未満
4.0	観察される一群が1,000尾以上

遡上魚の孵化日の推定 県内 6 河川（松田川，新莊川，仁淀川，鏡川および奈半利川）において，遡上量調査を実施した定点で，のぼりうえ，または電気ショッカーにより遡上魚を採捕した。採捕した遡上魚は，体長および体重を測定し，頭部から耳石扁平石を摘出した。取り出した耳石は，光学顕微鏡および日輪計測システム（ラトックシステムエンジニアリング社）を用いて Tsukamoto and Kajihara（1987）に従い日輪を計数した。さらに，採捕日から日輪数を差し引いたものを推定孵化日として，各月の遡上群の孵化日組成を確認した。

結果と考察

遡上量の評価 2018 年（H30）の各河川の遡上スコアを図 1 に示した。全ての河川で 2 月下旬にスコア 1.5～4.0 の遡上が確認された。各河川の遡上ピーク（その年の最大スコアを一番初めに示した月）は，安田川が 2 月，松田川，四万十川，仁淀川，鏡川，物部川，安芸川，伊尾木川および奈半利川が 3 月，新莊川および野根川が 4 月であった。前年（2017 年）は遡上開始時期と遡上ピークが遅い傾向であったが，2018 年は遡上開始時期が早く，多くの河川で遡上ピークが 3 月と早い傾向にあり，2～4 月までの遡上量が多かった。

2018 年の各河川の遡上量指標値は，1 河川以外で全て平年値を上回った。また，2018 年の県内全体の平均値（2.9）は，2016 年と 2017 年に比べて増加し，平年値より高かった。したがって，本年の県内アユ遡上量は平年より多かったことが推察された（表 3）。近年のアユの資源量を遡上量から推察すると，2016 年は低水準であったが，2017 年は平年並みに回復し，2018 年は高水準となったものと考えられた。

表3. 2018年における各河川の遡上量指標値（3～5月遡上スコア平均値）

	2016	2017	2018	平年値 (2010-17平均)
野根川	1.6	3.3	2.3	2.5
奈半利川	1.7	2.8	3.4	2.6
安田川	2.3	2.7	3.0	2.6
伊尾木川	1.5	1.8	2.7	2.1
安芸川	1.7	1.5	2.8	1.9
物部川	1.9	1.8	3.1	2.3
鏡川	1.8	1.8	3.3	1.9
仁淀川	2.3	2.4	3.5	2.7
新莊川	2.2	3.1	3.2	2.8
四万十川	1.0	2.3	2.4	2.3
松田川	2.2	1.9	2.3	2.3
県内平均	1.8	2.3	2.9	2.4

各河川で実施した遡上調査において，遡上スコアが遡上量の多寡を反映しているかを検証するために，遡上調査時に採水した河川水からアユ環境 DNA 量を測定した。その結果，遡上スコアが高いとアユ環境 DNA 量も高いといった正の相関が認められた ($n=55$, $R=0.48$, $R^2=0.23$, $p<0.01$, 図 2)。また，Doi et al. (2016) はアユ環境 DNA 量が生息密度と関係することを報告している。これらのことから，遡上スコアは遡上量の多寡を反映しているものと考えられる。

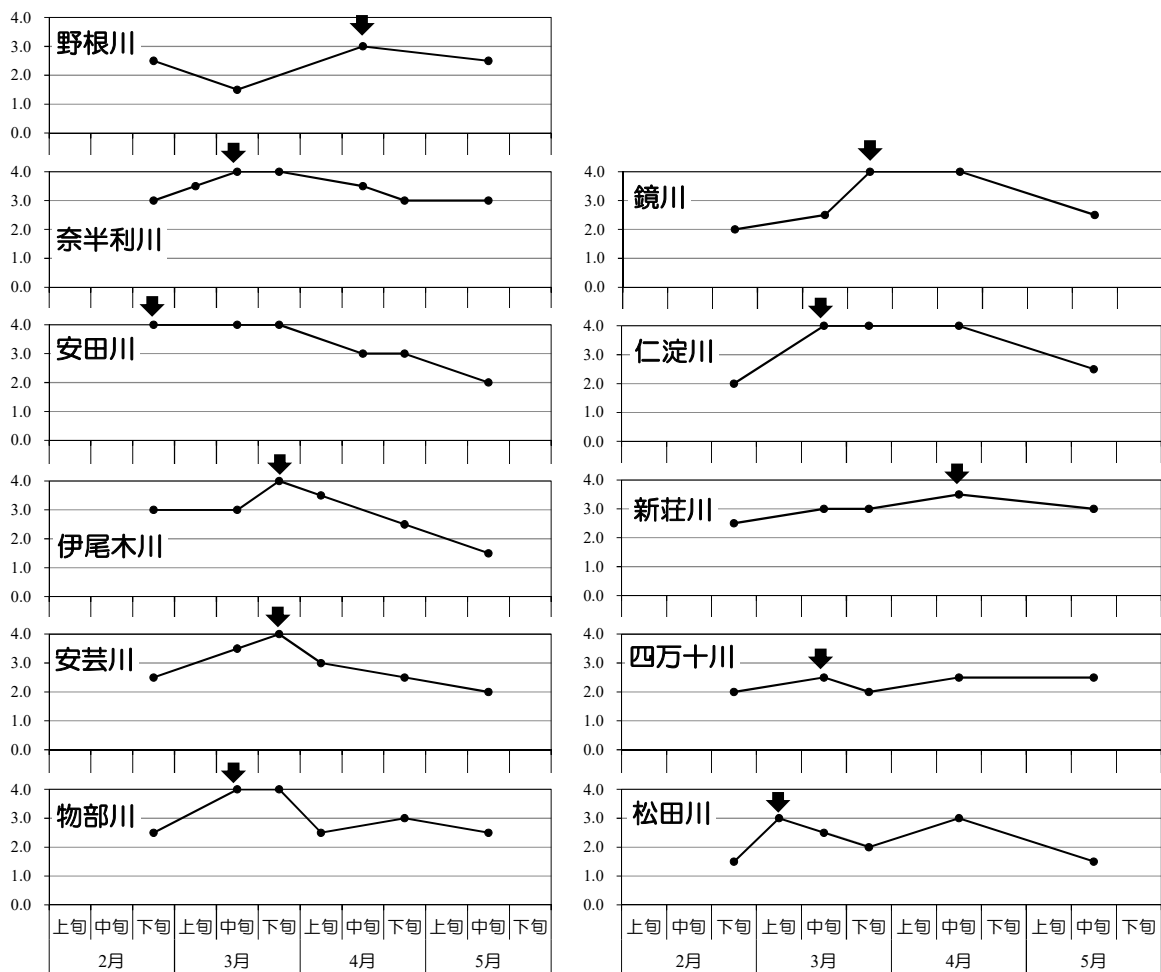


図 1. 県内 11 河川における 2018 年遡上状況調査の結果

矢印は遡上ピークを示す

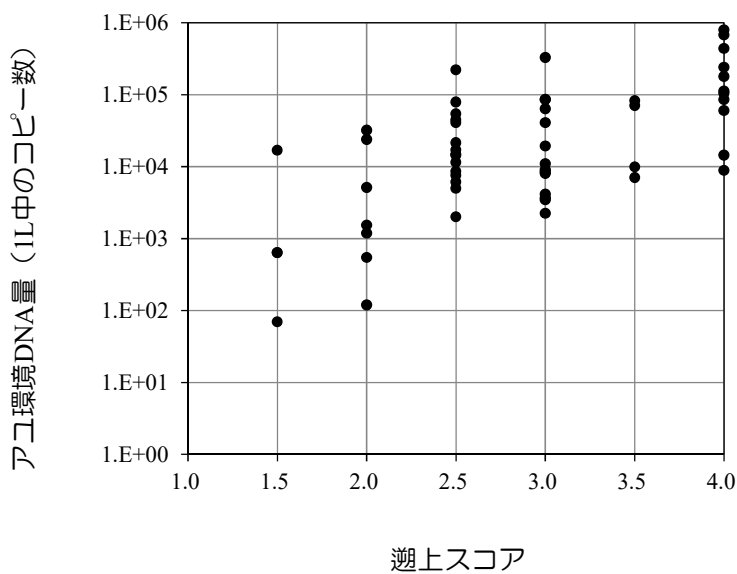


図 2. 遡上スコアとアユ環境 DNA の散布図

遡上魚の孵化日組成 県内6河川における遡上魚の孵化日組成を図3に示した。各河川の遡上魚の孵化日について、松田川は3月遡上群が11/18～12/13であった。新荘川は3月遡上群が11/21～12/11、4月遡上群が12/14～1/2、5月遡上群が1/2～1/29であった。仁淀川は3月遡上群が11/8～12/11、4月遡上群が12/11～1/17、5月遡上群が12/13～1/3であった。鏡川は3月遡上群が11/22～12/31、4月遡上群が12/5～1/9、5月遡上群が12/14～1/21であった。伊尾木川は4月遡上群が11/28～12/27であった。奈半利川は3月遡上群が11/7～12/3であった。

また、各月の遡上群の孵化月をみると、3月遡上群は11月孵化が28～97%、12月孵化が3～73%であり、11～12月の孵化群が主体となっていた。4月遡上群は11月孵化が0～7%、12月孵化が50～93%、1月孵化が10～50%であり、12～1月の孵化群が主体となっていた。5月遡上群は12月孵化が0～80%、1月孵化が20～100%であり、12～1月の孵化群が主体となっていた(図4)。

遡上魚を採集した6河川において、2018年の遡上スコアは3～4月で高かった。3～4月遡上群の孵化月組成は松田川で11～12月、新荘川で11～12月、仁淀川で11～1月、鏡川で12月、伊尾木川で12月、奈半利川で11月が高かったことから、その月に孵化したアユが翌年の遡上資源に大きく貢献したと考えられた。

また、2018年の遡上に対応する前年度(2017年度)の4河川の流下仔魚調査結果をみると、仔魚の流下盛期は新荘川では11月下旬と12月中旬、仁淀川では11月下旬、鏡川では11月下旬と12月中旬、伊尾木川では11月下旬であった(占部ら2018)。伊尾木川を除く3河川では、遡上資源に貢献した遡上魚の孵化月と流下盛期の月がほぼ一致しており、流下盛期の仔魚が翌年の資源の主体となったものと考えられた。ただし、伊尾木川に隣接する安芸川では仔魚の流下盛期が12月下旬にあり、それら仔魚が伊尾木川の4月遡上に貢献した可能性があった。

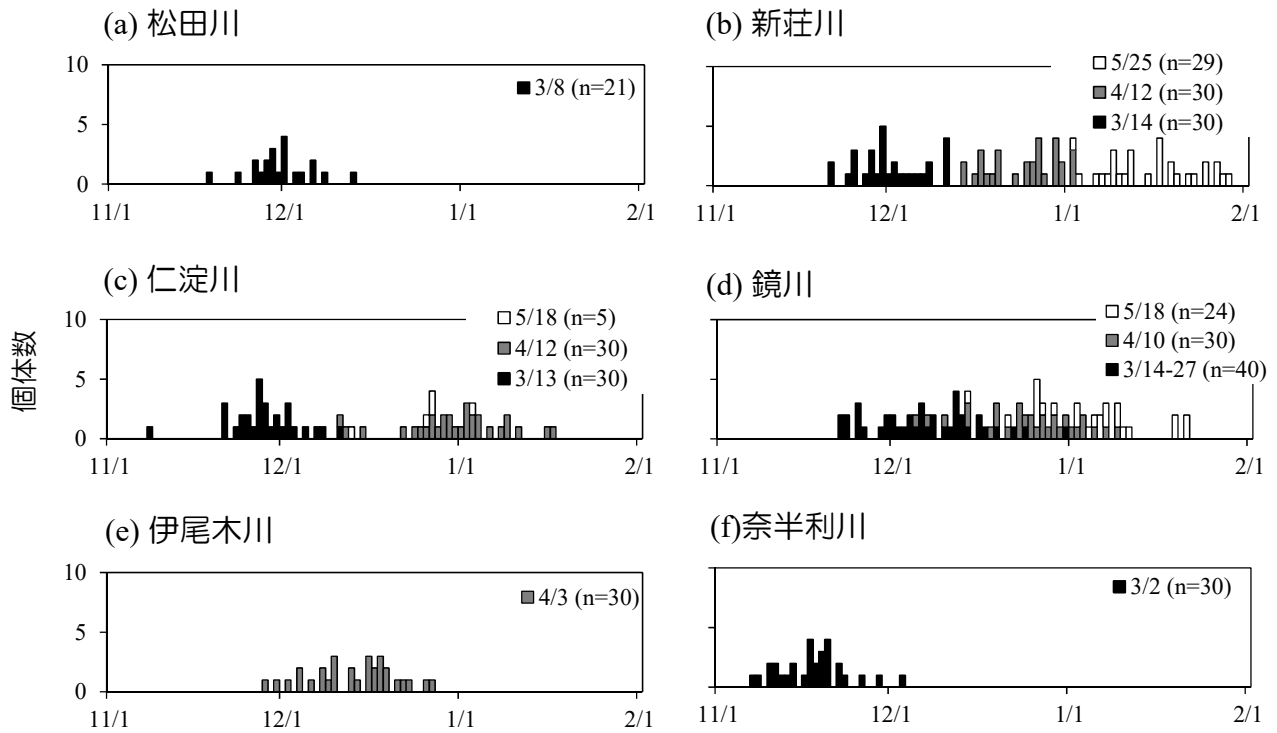


図 3. 県内 6 河川における 2018 年遡上魚の孵化日組成

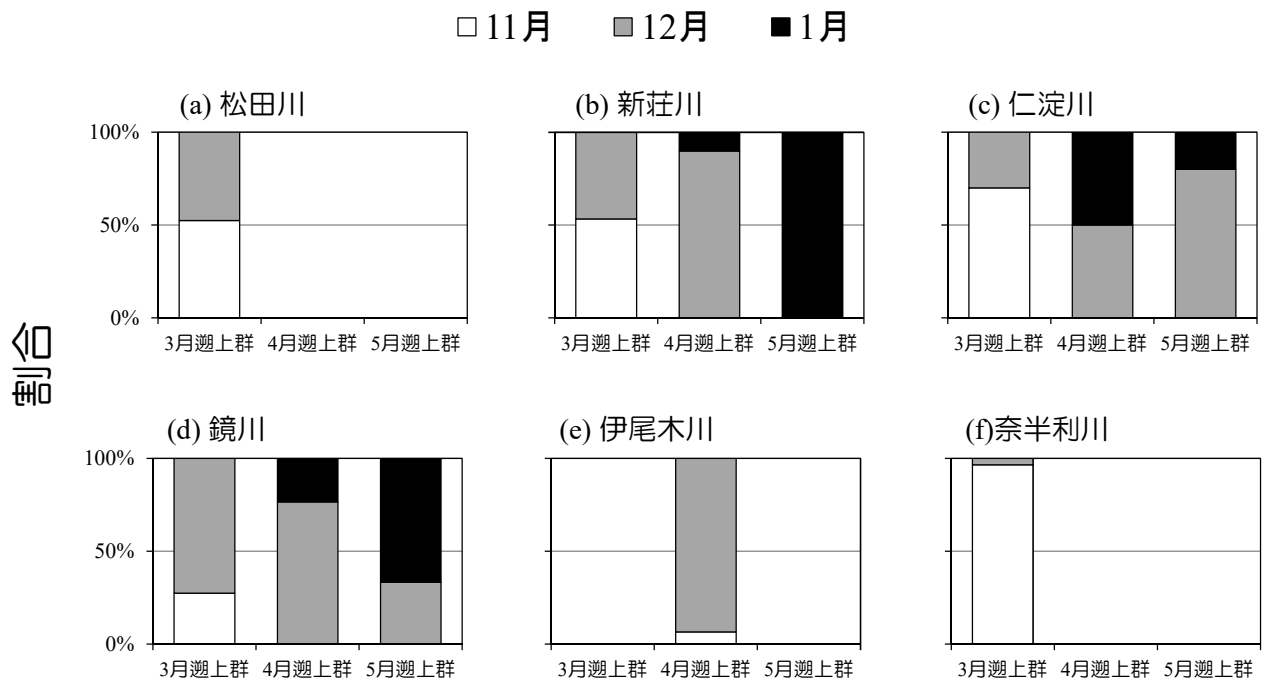


図 4. 県内 6 河川における 2018 年遡上魚の孵化月組成

2. 流下仔魚に関する調査

2018 年度の産卵に関するデータを収集するために、各内水面漁業協同組合と連携し、流下仔魚に関する調査を実施した。

材料と方法

新莊川、仁淀川および鏡川において、表 4 に示す定点、日時に、網口に濾水計を取り付けた仔魚ネット（口径 50 cm, 側長 150 cm, 目合い 335 μm ）を流心近くに 3 分間設置して流下仔魚を採集し、計数した。採集した流下仔魚数を、濾水計の値をもとに流下仔魚密度（尾/ m^3 ）に換算し、その経月変化をみることで流下の盛期を推定した。なお、既報（伊藤ら 1971）の孵化日数と水温との関係式（ $\text{Log}(y)=2.8623 - 1.4068 \text{Log}(x)$, y : 孵化日数, x : 水温）から孵化までに要した日数を算出し、流下盛期から産卵盛期を推定した。また、 X 軸に月日、 Y 軸に流下仔魚密度をとった折れ線グラフ（10 月 30 日と 2 月 1 日を 0 と仮定して作成）と X 軸で囲まれる部分を積分し、その値を LOG2 変換した値を流下仔魚量指標値として、その年、その河川の流下仔魚量を評価した。四万十川、伊尾木川および安芸川については、四万十中央および芸陽漁業協同組合が調査した結果の提供を受け、データの解析に供した。

結果と考察

各河川における 2018 年度（2018 年 10 月～2019 年 1 月）の流下仔魚密度の推移を図 5 に示した。仔魚の流下盛期は、流下仔魚密度が高かった時期とし、四万十川では平元で 12 月中旬（8,544 尾/ m^3 ）、小畑で 12 月下旬（731 尾/ m^3 ）、新莊川では 1 月上旬（308 尾/ m^3 ）、仁淀川では行当で 11 月下旬（116 尾/ m^3 ）と 12 月中旬（105

尾/ m^3 ）、中島で 11 月下旬（177 尾/ m^3 ）、鏡川ではトリム堰下流で 11 月下旬（1,997 尾/ m^3 ）、紅葉橋上流で 11 月下旬（31 尾/ m^3 ）、安芸川では 12 月上旬（417 尾/ m^3 ）、伊尾木川では 11 月下旬（118 尾/ m^3 ）であったと推測された。

2018 年度の流下仔魚量指標値は、四万十川、鏡川および伊尾木川で前年度（2017 年度）より高く、新莊川、仁淀川および安芸川で前年度（2017 年度）より低かった（表 5）。ただし、伊尾木川を除く 5 河川では平年値よりも高く、2018 年度の県内アユの産卵量は平年より多かったことが示唆された。

表4. 各河川における2018年度の流下仔魚調査の定点および日時

調査河川	調査定点	調査日				調査時刻
		10月	11月	12月	1月	
新莊川	長竹橋下	24	7, 14, 28	12, 26	9	19:00
仁淀川	行当、中島	24, 31	7, 14, 21, 28	5, 12, 19, 26	9, 23	20:00
鏡川	トリム堰下・紅葉橋上	23, 30	6, 13, 20, 27	4, 11, 18, 25	8, 22	19:00
四万十川*	平元、小畑	29	5, 12, 19, 26	3, 10, 17, 24	7, 14, 21, 28	19:00
伊尾木川*	鉄道橋下	-	8, 15, 22, 29	6, 13, 20, 27	10, 17, 24, 31	19:00
安芸川*	国道橋下	-	8, 15, 22, 29	6, 13, 20, 27	10, 17, 24, 31	19:30

※, 各漁協からデータ提供を受けた河川

表5. 各河川における流下仔魚量指標値

	2016年度	2017年度	2018年度	平年値 (2009-17年度の平均)
四万十川	10.4	12.8	16.5	11.2
新莊川	13.0	13.5	13.0	12.8
仁淀川	10.8	13.2	12.3	12.3
鏡川	10.4	12.8	14.2	11.6
伊尾木川	9.7	10.6	11.5	11.6
安芸川	12.3	14.4	13.2	12.1

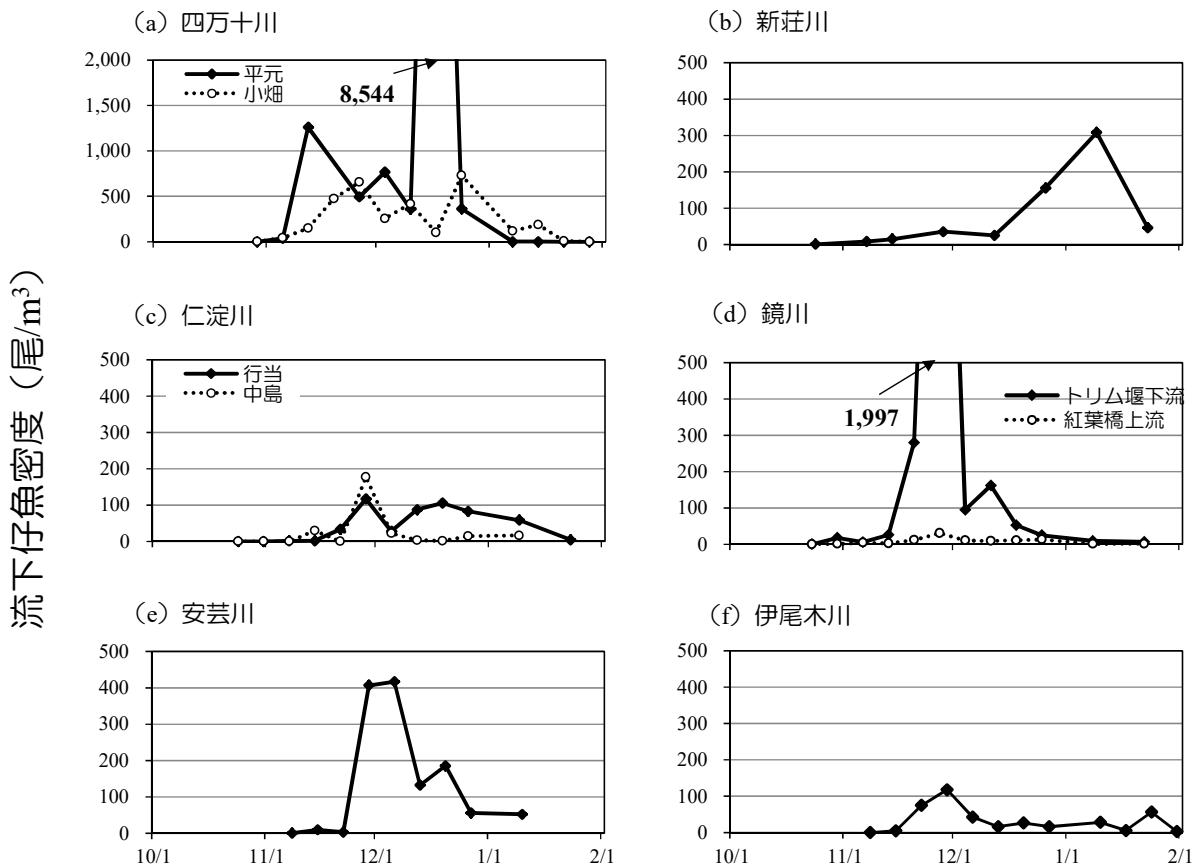


図5. 県内6河川における2018年度の流下仔魚密度の推移

3. 遡上量の変動要因の解明

近年、アユ資源量の変動が激しく、資源の維持や回復が課題となっている。アユの資源変動は主に産卵量と仔魚期における海域での生残によって左右されるものと考えられるが、不明な部分が多い。そこで、アユ資源量の多寡を示す遡上量について、その変動がどのような要因によって影響されるのかを分析した。

材料と方法

遡上量の変動要因を明らかにするために、以下の分析を行った。回帰分析では、目的変数をアユ遡上量指標値 ($Y1$) とし、説明変数をアユ流下仔魚量指標値 ($X1$, LOG2 変換), 産卵期 ($X2$) および海洋生活期 ($X3$) の降水量 (mm), 海水温 ($X4$, °C), シラスイワシ漁獲量 ($X5$, t) および黒潮離岸距離 ($X6$, 流軸距離 NM) の 6 項目とした。

アユ遡上量指標値は遡上量の多寡を表すもので (表 3), 高知県内の 11 河川における指標値の平均値 (2010~2018 年) を分析に使用した。アユ流下仔魚量指標値は、流下仔魚量の多寡を表すもので (表 5), 各年 (2010~2018 年) に 4~7 河川で流下仔魚調査を実施しており、その全河川の指標値を平均したものを分析に使用した。降水量は産卵期にあたる 10~12 月の合計値および仔魚の海域生活期にあたる 11~2 月の合計値 (気象庁: <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>), 海水温は 11~2 月の土佐湾における表層の平均値 (観測地点: 黒牧 13 号 (足摺沖), 12 号 (高知沖), 10 号 (室戸沖)), シラスイワシ漁獲量は土佐湾パッチ網の 11~2 月の合計水揚げ量 (高知県魚海況情報システム: <http://www.suisan.tosa.pref.kochi.lg.jp/>), 黒潮離岸距離は 11~2 月の室戸岬から黒潮流軸までの距離の平均値 (海上保安庁: <https://www1.aiho>

[mlit.go.jp/jhd.html](https://www1.aiho)) を分析に用いた。

回帰分析において、目的変数は遡上量指標値 ($Y1$), 説明変数は上記の 6 項目 ($X1\sim6$) とし、重回帰分析を実施した。なお、各説明変数間で有意な相関はなく、重回帰分析を行う上で問題となる多重共線性は認められなかった。また、目的変数を遡上量指標値とし、説明変数をそれぞれの 6 項目とし、単回帰分析による相関関係も確認した。重回帰および単回帰分析は統計ソフト R (Ver.3.1.2) で行った。

結果と考察

遡上量指標値を目的変数、6 項目を説明変数とする重回帰分析では、回帰式は決定係数が 0.93 であったが、 F 検定で有意とならなかった ($F=4.24$, $p=0.203$; 表 6)。次に、単回帰分析を行ったところ、遡上量指標値は海洋生活期の降水量と海水温に有意な負の相関があった ($p<0.05$; 表 7)。そこで、海洋生活期の降水量と海水温を説明変数とする重回帰分析を行ったところ、決定係数が 0.77 で、 $Y1=-0.002X3-0.136X4+6.066$ の回帰式が得られた ($F=10.10$, $p=0.012$; 表 7)。

全ての項目を説明変数とする重回帰分析では有意な回帰式を得ることができなかった。しかし、単回帰分析では遡上量とアユの海洋生活期にあたる 11~2 月の降水量および海水温で有意な負の相関があり (図 6), その 2 項目を説明変数とする重回帰分析では有意な回帰式を得ることができた。つまり、11~2 月の降水量が多くなることや海水温が高くなることで、県内のアユ遡上量は少なくなる傾向があるといえる。一方、単回帰分析において、遡上量は初期資源量となる流下仔魚量と有意な相関が得られなかった。これは、遡上量が初期資源量より海洋生活期の減耗率に大きく左右されたこと

によるものと考えられる。ただし、今後も継続的な調査と解析を継続すれば、遡上量と流下仔魚量に有意な関係性が表れる可能性がある。

なお、遡上調査および流下仔魚調査の結果は、報告書として各漁協に提供するとともに、いくつかの漁協については、理事会、シンポジウム、広報誌などで結果を紹介し、親魚保護の重要性などについての普及を行った。

表6. 遡上量指標値との重回帰分析 (X1~6)

説明変数	係数	t value
X1 流下仔魚量指標値 (LOG2)	0.039	0.26
X2 産卵期の降水量 (mm)	0.000	0.06
X3 海洋生活期の降水量 (mm)	-0.002	-2.96
X4 海水温 (°C)	-0.026	-0.12
X5 シラスイワシ漁獲量 (t)	0.001	1.32
X6 黒潮離岸距離 (流軸距離NM)	-0.005	-0.29
切片	3.097	
F		4.24
R^2		0.93

*, 有意水準5%未満

表7. 遡上量指標値との単回帰分析

説明変数	n	r	p
X1 流下仔魚量指標値 (LOG2)	9	0.28	0.47
X2 産卵期の降水量 (mm)	9	0.22	0.56
X3 海洋生活期の降水量 (mm)	9	-0.85	0.00*
X4 海水温 (°C)	9	-0.67	0.05*
X5 シラスイワシ漁獲量 (t)	9	0.25	0.51
X6 黒潮離岸距離 (流軸距離NM)	9	0.31	0.42

*, $P < 0.05$

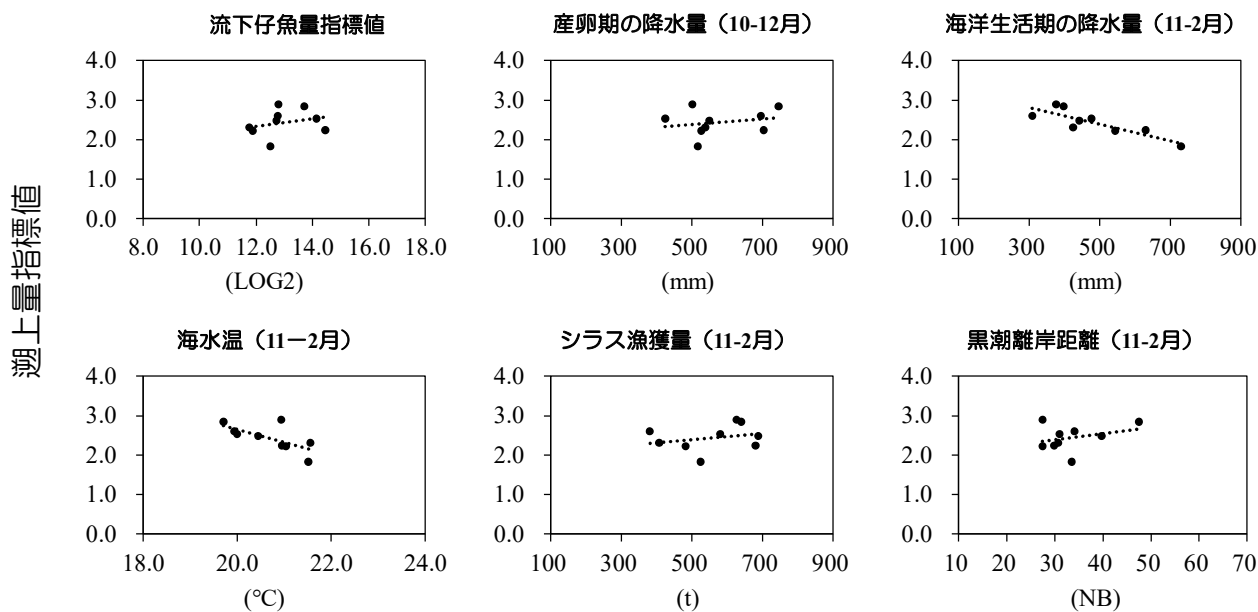


図6. 遡上量指標値との散布図

表8. 遡上量指標値との重回帰分析 (X3, 4)

説明変数	係数	t value
X3 海洋生活期の降水量 (mm)	-0.002	-2.88*
X4 海水温 (°C)	-0.136	-1.18
切片	6.066	
F		10.10*
R^2		0.77

*, 有意水準5%未満

4. 環境 DNA を用いた資源評価手法の開発

近年, Doi et al. (2016) は, 河川中のアユ環境 DNA 量とそれらの生息数に相関があることを報告しており, 河川中のアユ環境 DNA 量を測定することは生息数を評価する有効な手法になると考えられている。そこで, 水槽実験によるアユ環境 DNA の量的変化を解析し, 県内におけるアユ資源量評価手法として実用できるかを検討した。

材料と方法

尾数, 注水量および水深実験 アユ環境 DNA の量的変化を確認するため, 尾数実験, 注水量実験および水深実験の計 3 つの実験を行った。実験は, 円形水槽 (直径: 1.00m, 容量: 500L) を用いて, 井戸水で行った。各実験の飼育条件については表 9 に示した。実験ではそれぞれの収容尾数, 注水量および水深を調整し, その飼育環境を 24 時間維持した後, 飼育水を回収した。回収した飼育水は 1L をフィルターでろ過し, DNA 抽出後, リアルタイム PCR によりアユ環境 DNA 量を測定した。測定した DNA 量は, 収容尾数 (密度), 注水量および水深ごとで比較した。

環境 DNA 消失実験 実験は, 円形水槽 (直径: 1.00m, 容量: 500L) にアユ 4 尾を収容し, 注水量 1.0L/10s (井戸水: 17~18°C) および水深 0.30 m で 24 時間維持した後, 全てのアユを取り上げて行った。取上げ後は止水にし, 経時的 (0~168 時間) に水槽内の水を回収し, 1L 水中のアユ環境 DNA 量を測定した。測定したアユ環境 DNA 量は取り上げ直後 (0 時間) の DNA 量と比較することで, DNA 消失率を確認した。

表9. 尾数、注水量および水深実験の飼育条件

実験	収容尾数 (尾)	注水量 (L/10s)	水深 (m)	水温 (°C)
尾数実験	1~49	1.5	0.50	20
注水量実験	5	0.5~2.5	0.60	16~17
水深実験	4	1.0	0.30~0.60	17

結果と考察

尾数, 注水量および水深実験 尾数実験について, DNA 量は, 収容尾数がそれぞれ 1 尾 (密度: 1.3 尾/m²) で 6.9 copies mL⁻¹, 5 尾 (密度: 6.4 尾/m²) で 22.1 copies mL⁻¹, 10 尾 (密度: 12.7 尾/m²) で 53.2 copies mL⁻¹, 20 尾 (密度: 25.5 尾/m²) で 113.5 copies mL⁻¹, 49 尾 (密度: 62.4 尾/m²) で 201.1 copies mL⁻¹ となった。収容尾数と密度が高くなるにつれて, DNA 量も高くなり, 有意な相関があった ($R^2=0.973, p<0.01$, 図 7)。また, 収容した総魚体重と飼育水の容量からバイオマス (mg/L) を換算し, アユ 1mg/L あたりの DNA 量を算出したところ, 平均値は 0.2 copies mL⁻¹ (範囲: 0.1~0.2 copies mL⁻¹) であった。これらの結果から, 河川 1m³ にアユ 1 尾 (10g) が生息している場合には, アユ環境 DNA 量が 2.0 copies mL⁻¹ 程度検出されるものと考えられる。

注水量実験について, アユ DNA 量は注水量 0.5~2.5L/10s で 23.6~167.6 copies mL⁻¹ となり, 注水量が増加すると DNA 量は少なくなった (図 8)。

水深実験について, アユ DNA 量は水深 0.30~0.60m で 12.3~68.6 copies mL⁻¹ となり, 水深 0.60m が他より突出して DNA 量が多くなった (図 8)。

これらの実験結果から, アユ環境 DNA 量は, 密度以外にも, 注水量 (流量) や水深によっても変動することが明らかとなった。

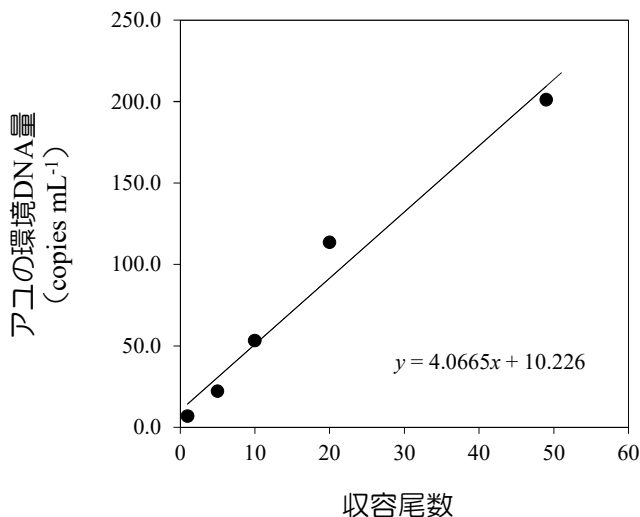


図 7. 收容尾数と環境 DNA 量の関係

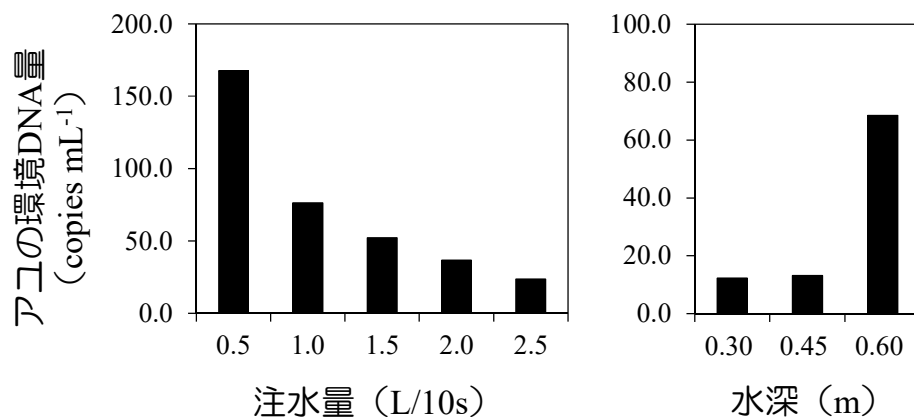


図 8. 注水量, 水深と環境 DNA 量の関係

DNA 消失実験 アユ DNA 量は、取上げ後 0 時間で 114.0 copies mL⁻¹, 1~168 時間で 0.0~88.4 copies mL⁻¹であった。DNA 消失率は 1~7 時間で 22.5~75.9%, 24~168 時間で 97.5~100.0%となった(表 10)。魚体から放出された環境 DNA は、7 時間で約 76%, 24 時間で約 98%以上が分解され、検出されなくなった。この結果から、ある地点におけるアユ環境 DNA 量は、採水地点から上流部の一定の区間・期間現存したアユ生物量が反映されていることが分かった。

資源量評価手法としての活用 アユ環境 DNA 量を用いて生息密度やバイオマスなどを算出するためには、環境 DNA 量を変動させる要因となる流量、水深などを現場で測定することが必要である。また、アユ環境 DNA 量で資源量を評価する場合には、採水地点より上流部から流れてきた環境 DNA 量が反映されていることを考慮しなければならない。これらのことから、アユ環境 DNA 量を用いてバイオマス等の生息量を表す数値に変換することは難しいが、アユの生息が在不在かを判定する、または生息量の多寡をある程度予測することは可能であると考えられた。今後は、アユ資源量を評価するための活用方法について検討していく。

表10. 経過時間ごとの環境DNA量の消失率

時間	DNA量 (copies mL ⁻¹)	DNA 消失率 (%)	DNA 残存率 (%)
0	114.0	0	100
1	88.4	22.5	77.5
3	83.3	26.9	73.1
5	58.0	49.1	50.9
7	27.5	75.9	24.1
24 (1日)	2.8	97.5	2.5
48 (2日)	0.2	99.8	0.2
120 (5日)	0.1	100.0	0.0
168 (7日)	0.3	99.7	0.3

引用文献

- 伊藤 隆, 富田 達也, 岩井寿夫 (1971). アユ種苗の人工生産に関する研究-LXXI (アユの人工受精卵のふ化に対する水温の影響). アユの人工養殖研究, 11, 57-98.
- 占部敦史・隅川和・長岩理央 (2018) 高知県の天然アユ資源を回復させるための取組支援. 平成 27 年度高知県内水面漁業センター事業報告書, 9-12.
- Doi H, Inui R, Akamatsu Y, Kanno K, Yamanaka H, Takahara T, Minamoto T (2016) Environmental DNA analysis for estimating the abundance and biomass of stream fish. *Freshwater Biology*, 62, 147-153.
- Tsukamoto K, Kajihara T (1987) Age determination of ayu with otolith. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53, 1985-1997.
- Yamanaka H, Minamoto T (2016) The use of environmental DNA of fishes as an efficient method of determining habitat connectivity. *Ecological Indicators*, 62, 147-153.