

## 天竜川における湧水流路の環境条件とアユ産卵床形成との関係解明

### Relationship Between Environment Conditions in a Spring Water Channels and Spawning Redds Formation for Ayu Fish in the Tenryu River

高橋真司<sup>(1)</sup>・兵藤誠<sup>(2)</sup>・山崎弘美<sup>(3)</sup>・角哲也・竹門康弘

Shinji TAKAHASHI<sup>(1)</sup>, Makoto HYODO<sup>(2)</sup>, Hiromi YAMASAKI<sup>(3)</sup>,  
Tetsuya SUMI and Yasuhiro TAKEMON

(1) 東北大学工学部

(2) いであ株式会社

(3) 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

(1) Department of engineering, Tohoku University

(2) IDEA Consultants, Inc., Japan

(3) Department of Urban Management, Kyoto University

#### Synopsis

Formation of spawning redds for ayu fish can be affected by both environmental factors and morphological factors at spring water channel. Thus, regression analysis of presence of spawning redds and each factor allows for the identification of the underlying effects at both local and sandbar scales. To evaluate the directly or indirectly effects of water quality, physical variables, meso-scale riverbed configuration and sandbar variations on spawning redds, we examined the relationships between distribution of spawning redds and environmental factors. The logistic regression model indicated that the distribution of redds is affected by turbidity, velocity, depth, meso-scale rived parameters and several sandbar variation parameters but not affected by water temperature, number of channels and number of sandbar variations. Recognition of the distribution pattern of spawning redds at a sandbar scale at spring water channel may be useful to determine areas on which to focus both future river and reservoir sediment management strategies.

**キーワード:** 砂州地形, 産卵床, 湧水流路, 中規模河床形態

**Keywords:** sandbar, spawning redds, spring water channel, meso-scale riverbed configuration

#### 1. はじめに

アユ (*Plecoglossus altivelis altivelis*) は、天竜川の主要な水産資源の一つであり、漁協による養殖や種苗放流を行う事で資源の維持・増大が図られている。また、産学官連携の元、天竜川天然資源再生推進委員会が立ち上げられ、天然アユの再生産を目的とした活動が行われている。アユにとって好適な産卵床

環境は、瀬であること、河床がきれいな浮石で構成されている事、河床材料は砂利が多い事が挙げられる(石田, 1961; 石田, 1962; 石田, 1964; 水産庁, 2009)。また、Nagaya et al. (2008) は水深、流速、河床材料が産卵床にとって特に重要なパラメーターであることを示し、浮石河床におけるせん断速度が 0.05-0.12m/s の範囲の時に、産卵床は最適化されることを示した。一方、天竜川では度々発生する濁水の

影響で産卵床環境が劣化している可能性がある。天竜川下流域では、大雨などによる出水によってダム放流量が増加した際、上流ダム群からシルト分を大量に含む濁水が長期間に渡って流入し、濁水の長期化が生じる。下流域の流量が $2,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える中規模以上の出水が発生した場合、濁水は数週間から一ヶ月程度に渡って流入し続ける傾向にある。そして、河川に流入した濁質成分は河川環境に影響を及ぼす事が報告されている (Nobles and Zhang, 2011; Denic and Geist, 2015)。濁質成分の流入は河川水の濁度を高め、河床への入射光を減少させる。そして、アユの餌資源でもある付着藻類等の一次生産を抑制する (Davies-Colley et al., 1992; Wood and Armitage, 1999; Henly et al., 2000)。また、河床へ沈降した濁質成分は石礫表面に堆積することで付着藻類を覆い、付着藻類の生産を直接的に阻害したり、アユの採餌を妨げたりしている。加えて、濁質成分は石礫間に沈降・堆積することで間隙の目詰まりを引き起こし、浮石環境を消失させアユの産卵床環境を劣化させる事が懸念されている。

天竜川におけるアユの産卵時期は9月下旬から12月中旬であり、主たる産卵場所は河口から上流の9km~17kmと推定されている。(鈴木ら, 2014; 兵藤ら, 2014)。この産卵時期直前や期間中に台風等による大雨が発生した場合、濁水の長期化が生じ天竜川本川の濁度が高まり、産卵床にとって不適な環境となる。一方、砂州の下流側に形成される砂州尻ワンドは砂州間隙内を通過した透明度の高い湧水によって形成されるハビタットであり、本川が濁水状態であっても透明度が高い状態が維持されている。砂州尻ワンドに湧き出る湧水流量が多くなると湧水流路が出現し、湧水で構成される瀬が形成される事がある(以下、湧水瀬)。既往研究では、湧水瀬内にアユの産卵床が形成されることが報告されているが(泉ら, 2016)、湧水瀬であっても産卵床が形成されない場合もあり、湧水瀬と産卵床形成との関係については十分な議論がされていない。そこで、本研究では現地調査の結果に基づいて産卵床が形成される湧水瀬の地形及び環境条件を明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 調査地点

調査対象河川である天竜川は、流路長 213km、流域面積  $5,090\text{km}^2$  の一級河川であり、流程内に 15 のダムが存在する。本研究では、天竜川本川のダム群のうち最下流にある船明ダム下流域を調査対象範囲とし、河口から 7kp~15kp の範囲に点在する複数砂

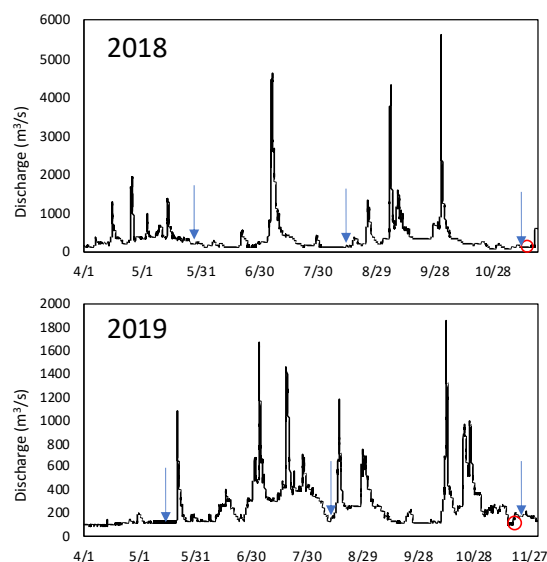


Fig. 1 Hydrograph of Funagira Dam in 2018 and 2019. Sampling period are indicated by red circles, the acquired satellite images are indicated by blue arrows.

州及び砂州内を流れる湧水流路を調査対象とした。現地調査は 2018 年 11 月 10~12 日と 2019 年 11 月 13~15 日に実施した。調査時の流量は、それぞれ  $146 \pm 11\text{m}^3/\text{s}$ ,  $153 \pm 38\text{m}^3/\text{s}$  (mean +SD) であった (Fig. 1)。現地調査実施前に、調査日近傍で平水位時の衛星画像 (Sentinel-2, 解像度 10m) を入手し、調査対象砂州及び湧水瀬の選定を行なった。調査地点は、流路上端が砂州によって本川と分断されている側流路とし、本川の水の色と比較して濃青である水域を複数選択した。湧水瀬が縦断方向に長大な場合、同一の湧水瀬内で上流、中流、下流と複数地点の調査を行った。

### 2.2 調査項目

調査地点で水質及び物理環境の測定を行い、同地点でアユの産卵床調査を実施した。pH, EC 及び水温は pH・電気伝導度測定器 (HORIBA, D-54)、溶存酸素濃度はポータブルマルチメータ (HACH, HQ30d)、濁度はポータブル濁度計 (東亜 DDK, TB-31) を用いて測定した。但し、溶存酸素濃度は測定器の故障により、2018 年のみ測定を行った。流速は、流路の流心部でプロペラ流速計を用いて測定し、同地点で水深の測定も行なった。アユの産卵床は、新村式アユ産卵床探索筒を用いて河床表層から 10cm 程度の深さまでの河床材料を掬い上げた後、バットに移し、目視にて卵の有無を評価した。卵が発見された場合、速やかに河床材料とともに原位置へ戻した。

### 2.3 砂州地形及び流路形状解析

産卵床が形成される湧水流路と砂州地形の特徴の

Table 1 Sampling sites and spawning redds presence (p), absence (a) across the 2 years in the study.

Year	Location		Spawning redds	
	Sandbar	Spring water channel		
2018	18.6kp-16.2kp, left side bank	16.4	a	
		16.4kp-14.2kp, right side bank	14.9kp	p
	14.2kp-9.7kp, right side bank	14.8kp	p	
		13.2kp	a	
		12.9kp	a	
		12.8kp	a	
		12.6kp	a	
		12.4kp	a	
	9.7kp-8.1kp, left side bank	11.4kp	p	
		11.3kp	p	
		9.0kp	a	
		8.9kp	a	
	8.7kp-6.6kp, right side bank	8.5kp	a	
		8.3kp	a	
7.5kp		p		
2019	17.2kp-14.0kp, right side bank	15kp	p	
		14.9kp	p	
		14.8kp	p	
		14.6kp, upper	p	
	17.2kp-14.0kp, right side bank	14.6kp, lower	p	
		14.5kp, upper	a	
		14.5kp, middle	a	
		14.5kp, lower	a	
		14.0kp-9.7kp, right side bank	11.9kp, upper	p
	14.0kp-9.7kp, right side bank	11.9kp, middle	p	
		11.9kp, lower	p	
		11.7kp, upper	p	
		11.7kp, middle	p	
		11.7kp, lower	p	
		9.2kp-7.8kp, left side bank	9.0kp	a
		8.0kp	a	

関係性を定量化するために、砂州毎に中規模河床形態パラメーターを算出した。本研究では、砂州波長、砂州面積、蛇行度及び平均流路数を中規模河床形態パラメーターに設定した。砂州波長は対象砂州の上端から下端までの直線距離とし、砂州面積は調査対象の湧水流路が流れる砂州の陸地部分の面積とし、それぞれ調査日近傍の衛星画像に基づいて算出した。流路蛇行度は、以下の式から算出した (Friend and Sinha, 1993)。

$$S = L_m / L \quad (1)$$

ここで、 $L_m$ は対象砂州の上端から下端の範囲を流れる本川の流路距離、 $L$ は砂州波長を表す。平均流路数は、対象砂州を縦断方向に200m間隔で区切り、その横断線上に存在する流路または水域数の合計を横断線数で除す事で算出した。平均流路数は、流路の網状度を示す指標の一つであり、対象砂州が交互砂州で砂州内にたまりや湧水流路も存在しない場合、平均流路数は1となり、対象砂州の範囲内に湧水流路や副流路等が存在すると1以上の値を示す。

上記の中規模河床形態パラメーターに加えて、河床地形変動が湧水流路及びアユ産卵床形成に及ぼす

Table 2 The *t*-test results of the water quality, physical condition, mesoscale fluvial configuration and sandbar variation for spring water channels where spawning redds were presence and absence.

Variable	Parameters	t	p
Water quality	Water temperature	-2.420	<0.05
	Turbidity	3.340	<0.01
Physical condition	Velocity	6.250	<0.01
	Depth	2.200	<0.05
Meso-scale riverbed configuration	Area	0.763	>0.05
	Wave length	0.320	>0.05
	No. of channel	-2.406	<0.05
	Sinuosity	4.371	<0.01
Sandbar variation	1st eroded area	-0.561	>0.05
	2nd eroded area	-0.395	>0.05
	Deposited-eroded area	1.652	>0.05
	1st deposited area	5.017	<0.01
	2nd deposited area	-0.546	>0.05
	Eroded-deposited area	-0.964	>0.05
	Total eroded area	0.151	>0.05
	Total deposited area	2.715	<0.01
	Total variation area	1.362	>0.05
	Deposited/eroded	-0.320	>0.05
	No. of 1st eroded area	-0.477	>0.05
	No. of 2nd eroded area	-0.181	>0.05
	No. of deposited-eroded area	-0.181	>0.05
	No. of 1st deposited area	0.978	>0.05
No. of 2nd deposited area	2.129	<0.05	
No. of eroded-deposited area	1.839	>0.05	
No. of total eroded area	0.978	>0.05	
No. of total deposited area	1.526	>0.05	
No. of total variation area	1.290	>0.05	

影響を評価するために、出水による砂州面積の変動量を求めた。本研究では、各年の流量データに基づき5月、8月、11月の衛星画像を重ね合わせ、砂州地形の時間変化から侵食エリアと堆積エリアを描画し、それぞれの面積を算出した。対象砂州内において出水後に消失した砂州のエリアを侵食面積、新たに形成された砂州のエリアを堆積面積とした。砂州変動量のパラメーターは、侵食量(5月-8月間(1<sup>st</sup>侵食量)及び8月-11月間(2<sup>nd</sup>侵食量))、堆積量(5月-8月間(1<sup>st</sup>堆積量)及び8月-11月間(2<sup>nd</sup>堆積量))、侵食-堆積量(5月-8月間に侵食を受け、11月に堆積した量)及び堆積-侵食量(5月-8月間に堆積し、11月に侵食された侵食量)とし、5月-11月間の侵食または堆積量の和を総侵食量または総堆積量とした。さらに、総侵食量と総堆積量の和を総砂州変動量とし、総堆積量と総侵食量の比を堆積/侵食比とした。中規模河床形態パラメーター及び砂州変動量の定量は imageJ software (1.48v) を用いて行い、砂州毎にそれぞれの値を算出した。

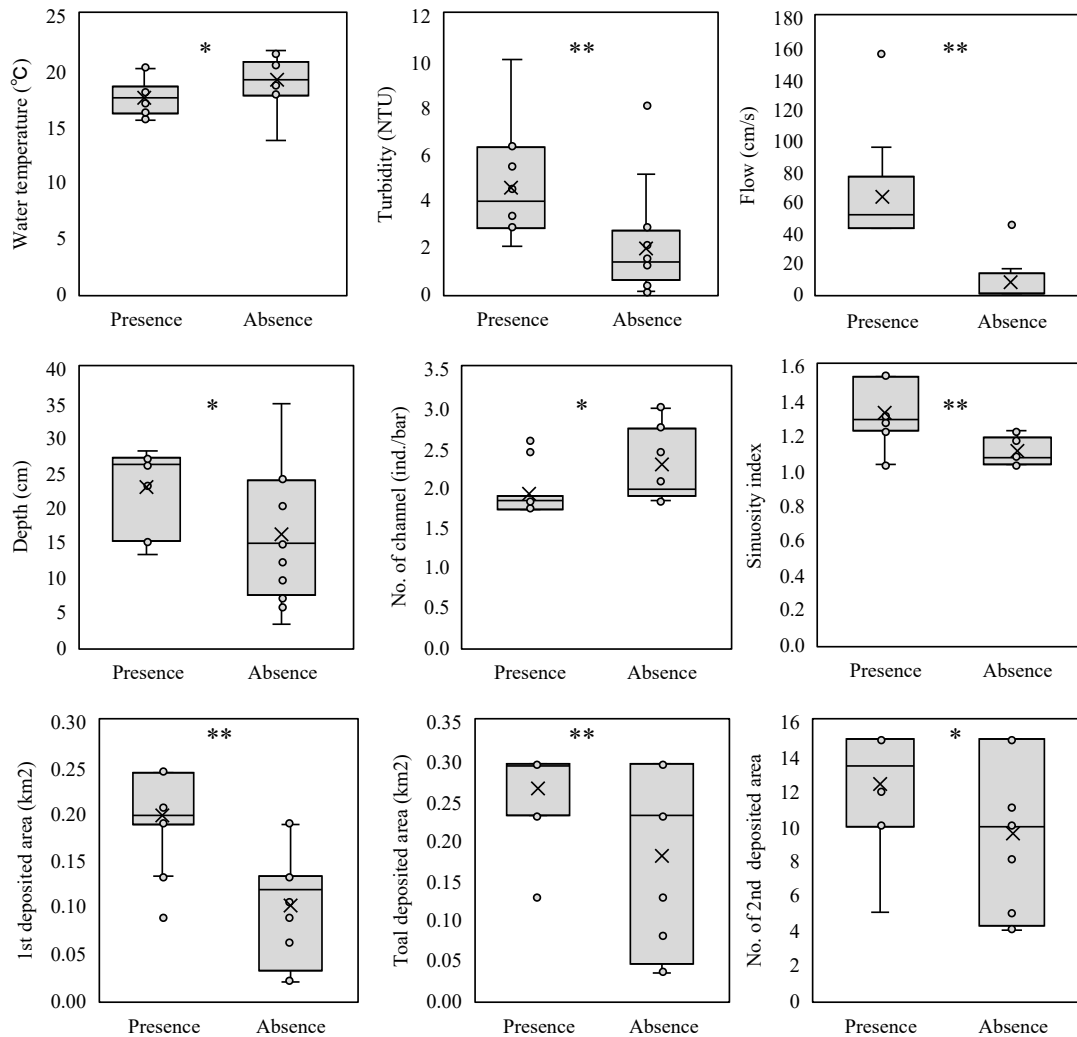


Fig. 2 Comparative box and whisker plots of water temperature, turbidity, flow velocity, depth, mean of number of channels, sinuosity index, 1<sup>st</sup> deposited area, total deposited area and number of 2<sup>nd</sup> deposited area for spring water channels where spawning redds were presence and absence. The lower and upper whiskers correspond to the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentiles, respectively. The lower and upper bounds of each box represent quartiles, and the middle line represents the mesian. Asterisks ( $P < 0.05$ ) and double asterisks ( $P < 0.01$ ) denote statistically significant differences between distribution based on a Welch  $t$ -test.

## 2.4 統計解析

湧水流路の環境条件が産卵床の有無で異なるかを評価するために、各種調査項目の平均値について Welch の  $t$  検定を行った。但し、一部測定機器の故障等によりデータの欠損が生じたが、検定の際は当該データを除外した。湧水流路の環境条件を説明変数、産卵床の有り・無しの2値データを目的変数とするロジスティック回帰モデルを作成した。ロジスティック回帰モデルは以下の式で表せる。

$$p = \frac{\exp(y)}{1 + \exp(y)} \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i = \text{logit } p \quad (3)$$

ここで、 $p$ は産卵床出現確率、 $b_0$ は定数項、 $b_i$ は偏

回帰係数、 $x_i$ は各説明変数を示す。但し、本報告では複数の説明変数を選択せず、各調査項目を単独で説明変数に選択し、二乗項も考慮して環境条件と産卵床形成の関係を評価した。回帰モデルの適合度は赤池情報量基準 (AIC)、Hosmer-Lemeshow 検定、McFadden の擬似決定係数 (pseudo- $R^2$ ) を用いて評価した。

## 3. 結果

### 3.1 湧水流路の分布と環境条件の比較

全2回の調査で9つの砂州、32箇所調査を実施し、16箇所であゆの産卵床が確認された (Table 1)。

Table 3 Logistic regression analysis results for the good models fitted to all data set. Designations n is the number of sampling sites. Akaike's information criterion (AIC), Hosmer-Lemeshow test and pseudo- $R^2$  (McFadden's Adjusted  $R^2$ ) indicates goodness of fit test.

Variable	Parameter	Estimate	SE	Z value	P	n	AIC	Hosmer-Lemeshow test	
								P	Pseudo- $R^2$
Water quality	Intercept	-4.639	1.8161	-2.554	0.011	30	31.9	0.120	0.37
	Turbidity	2.194	0.862	2.544	0.011				
	Turbidity <sup>2</sup>	-0.171	0.07793	-2.197	0.028				
Physical condition	Intercept	-8.5366	7.4844	-1.141	0.254	30	10.6	0.992	0.84
	Velocity	0.2367	0.1705	1.388	0.165				
	Intercept	-2.1769	1.2449	-1.749	0.080	26	35.0	0.164	0.25
Meso-scale fluvial configuration	Depth	0.118	0.0587	2.011	0.044				
	Intercept	-8.772	4.815	-1.822	0.069	32	32.8	0.894	0.40
	Area	12.795	6.095	2.099	0.036				
	Area <sup>2</sup>	-3.677	1.636	-2.248	0.025				
	Intercept	-10.3518	3.8457	-2.692	0.007	32	40.0	0.184	0.23
	Wave length	6.7894	2.4195	2.81	0.005				
	Wave length <sup>2</sup>	-0.9745	0.3431	-2.84	0.005				
	Intercept	-15.548	5.889	-2.64	0.008	32	32.5	0.585	0.36
	Sinuosity	12.961	4.959	2.613	0.009				
Sandbar variation	Intercept	-2.705	1.354	-1.998	0.046	32	41.4	0.517	0.16
	Total deposited area	11.716	5.301	2.21	0.027				
	Intercept	-2.0174	0.9277	-2.175	0.030	32	40.7	0.942	0.22
	Total eroded area	45.3536	17.3286	2.617	0.008				
	Total eroded area <sup>2</sup>	-132.0226	49.5054	-2.667	0.008				
	Intercept	-11.51	6.21	-1.853	0.064	32	34.0	0.915	0.37
	Total variation area	66.09	32.49	2.034	0.042				
	Total variation area <sup>2</sup>	-79.61	37.44	-2.127	0.034				
	Intercept	-5.9165	2.3389	-2.53	0.011	32	38.2	0.771	0.27
	Deposited/eroded	5.4843	2.1965	2.497	0.013				
	Deposited/eroded <sup>2</sup>	-0.7292	0.3024	-2.412	0.016				

2018年の調査では、14.9~7.6kpの範囲で産卵床が確認され縦断方向に点在していた。一方、2019年では15.0kp~11.9kpの範囲で産卵床が確認され比較的上流側で確認された。アユ産卵床の有無に基づいて湧水流路間の環境条件、中規模河床形態パラメーター及び砂州変動量を比較した (Table 2, Fig. 2)。水温は、産卵床が確認された湧水流路群 (以下、産卵床有群) において産卵床が形成されていなかった湧水流路群 (以下、産卵床無群) より有意に低かった (Welch *t*test,  $P < 0.01$ )。産卵床有群の平均濁度は4.56NTUであり、産卵床無群の1.94NTUより有意に高かった ( $P < 0.01$ )。但し、本川の平均濁度は13.7NTUであり、湧水流路群の濁度は本川より有意に低く ( $P < 0.01$ )、透明度が高かった。流速は、産卵床有群において産卵床無群より有意に速かった ( $P < 0.01$ )。水深は、産卵床有群で23.0cmであり、産卵床無群より有意に深かった ( $P < 0.05$ )。中規模河床形態パラメーターのうち、平均流路数と蛇行度は群間に有意さがあつた。湧水流路がある区間の網状度を表す平均流路数は、産卵床有群で1.93、産卵床無群で2.27であり、産卵床有群が有意に小さかつた ( $P$

$< 0.05$ )。蛇行度は産卵床有群で1.33、産卵床無群で1.12と産卵床有群が有意に大きかつた ( $P < 0.01$ )。出水による砂州変動量パラメーターのうち、1st堆積量、総堆積量及び2nd堆積頻度で有意さが認められた。各年の5-8月間の出水による砂州の堆積量である1st堆積量は産卵床有群が有意に多かつた ( $P < 0.01$ )。また、総堆積量も産卵床有群で有意に高かつた ( $P < 0.01$ )。8月-11月間の出水による堆積頻度は、産卵床有群で有意に多かつた ( $P < 0.05$ )。

### 3.2 環境条件と産卵床形成との関係

各種環境条件と産卵床の有無との関係を明らかにするためにロジスティック回帰分析を行なつた。各変数のうち、回帰モデルが5%水準で有意か、または適合度検定で好適なモデルのみを選択した (Table 3, Fig. 3)。水質項目では、濁度が有意なモデルとして選択され、2次の回帰モデルが好適であつた。物理環境では流速と水深が選択されたが、流速は有意ではなかつたもののモデル適合度は他の変数に比べて最も高かつた。中規模河床形態パラメーターのうち、砂州面積、砂州波長及び蛇行度が最適なモデルとして

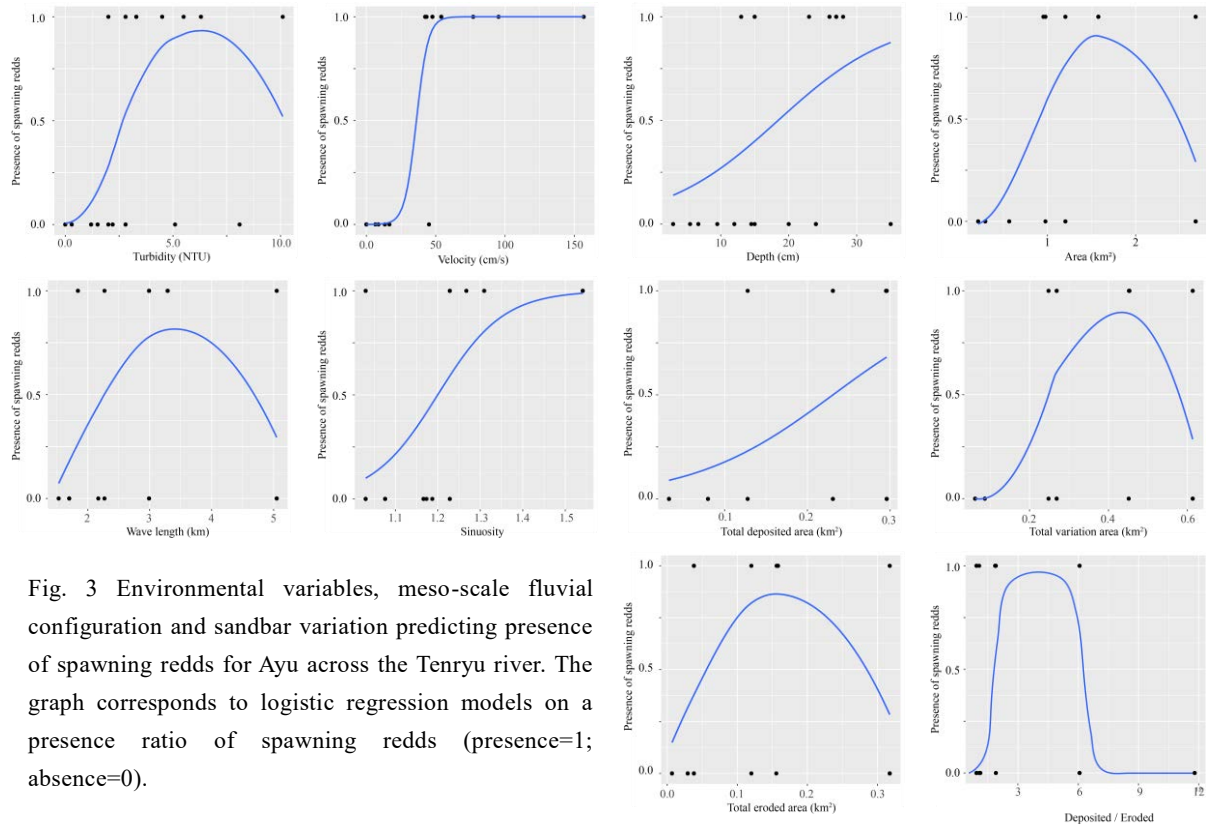


Fig. 3 Environmental variables, meso-scale fluvial configuration and sandbar variation predicting presence of spawning redds for Ayu across the Tenryu river. The graph corresponds to logistic regression models on a presence ratio of spawning redds (presence=1; absence=0).

選択され、砂州面積と砂州波長は 2 次の回帰モデル、蛇行度は 1 次の回帰モデルが選択された。出水による砂州変動量では、総堆積量、総侵食量、総砂州変動量及び堆積/侵食比が有意な回帰モデルとして選択され、総堆積量のみ 1 次の回帰モデルが選択され、その他のパラメーターは 2 次の回帰モデルが選択された。

産卵床形成の好適性を評価するために、産卵床の存在確率が 0.5 以上となる時の各種環境条件を回帰モデルから求めた (Fig. 3)。濁度の好適範囲は、2.7~10.1NTU と推定された。流速の好適範囲は 36.1cm/s 以上、水深は 18.5cm 以上と推定された。中規模河床形態パラメーターである砂州面積、砂州波長及び蛇行度の好適範囲は、それぞれ 0.94~2.54km<sup>2</sup>、2.26~4.70km、1.2 以上と推定された。砂州変動量指標である総堆積量、総侵食量、総変動量及び堆積/侵食比の好適範囲はそれぞれ 0.23km<sup>2</sup>以上、0.053~0.291km<sup>2</sup>、0.248~0.581km<sup>2</sup>、1.3~6.2 と推察された。

#### 4. 考察

天竜川下流域では、複数の湧水流路内でアユ産卵床が形成されている事が明らかとなった。また、15.0kp~7.0kp の砂州内に形成された湧水流路において 2 年連続で産卵床が確認されたことから、天竜川では湧水流路内に産卵床が形成される事象は偶発的ではないことが推察された。産卵床が確認された地

点は、流速が比較的早く、水深がある湧水瀬であり、河床表層に砂利や礫が堆積していた。一方、湧水瀬であるものの河床表層に砂やシルトが大量に堆積している地点では、産卵床は確認されなかった (例、2018 年 12.8~12.4kp ; 2019 年 14.5kp)。濁度の好適範囲は 2.7~10.1NTU と中程度の時に産卵床の存在確率が最も高まる傾向にあった。湧水の湧き間 (upwelling zone) やその直下は、河床間隙による濾過作用によって著しく濁度が低いが、一方で低溶存酸素濃度環境となる場合がある (Boulton, 2008)。表層水の溶存酸素濃度は産卵床形成に必要な環境条件の一つであり、溶存酸素濃度が低い地点は産卵床としては不適な環境となり得る (Sear et al., 2014 ; 泉ら, 2016, 山崎ら, 2019)。実際、2018 年の調査で測定した溶存酸素濃度は、産卵床有群で 105.7±9.8%であったのに対し、産卵床無群では 72.3±31.1%と有意に低かった ( $P < 0.05$ )。産卵床無群 16 地点のうち 7 地点は upwelling zone またはその直下であり、低濁度でかつ低溶存酸素濃度であったが、産卵床が確認された湧水瀬は upwelling zone から数百 m 下流側に位置しており、流下過程で大気中からの酸素供給によって溶存酸素濃度が飽和状態まで回復したことにより産卵床形成に寄与したと考えられる。また、湧水流路では、濁度が本川より低いことで河床間隙への細粒分の目詰まりが少なく、浮石環境が維持されていることも産卵床形成には有利であったと考えられる。

中規模河床形態パラメーターのうち、産卵床形成

と関連が認められたのは砂州面積、砂州波長及び蛇行度であり、砂州面積と砂州波長はそれぞれ中程度の値が好適範囲となることが明らかとなった。本研究で対象としている湧水流路は交互砂州ではほとんど存在せず、複列砂州区間で出現する水域であり、出水時に水位上昇に伴い砂州内を縦断する流路が形成され、水位低下と共に流路上端部が陸地となることで形成される流路である。その中でも砂州面積が $0.94\sim 2.54\text{km}^2$ 、砂州波長が $2.26\sim 4.70\text{km}$ の条件下で形成された湧水流路が産卵床形成に貢献していることが示された。産卵床は、水質や物理環境、河床材料粒径等の複数の条件が揃った時のみに形成されるため、砂州波長や砂州面積は産卵床形成の基盤となる地形条件であることが示唆された。また、砂州の形成は川幅と水深に規定されており(黒木・岸, 1984)、砂州面積や砂州波長を流路面積や川幅等の地形条件で除し、無次元化することで湧水流路におけるアユ産卵床の好適性評価を一般化でき、他の流域においても中規模河床形態パラメーターを活用した産卵床の好適性評価に応用できる可能性がある。蛇行度の好適性は、1.2以上であり交互砂州から複列砂州への移行段階の砂州が好適と評価された。中規模河床形態パラメーターの一つである平均流路数は、産卵床有・無群でそれぞれ1.93, 2.27であったことから流路が2つ以上となる完全な複列砂州区よりも交互砂州から複列砂州区間への移行期の砂州地形が産卵床形成に寄与していることが示唆された。

出水による砂州変動量は、総堆積量、総侵食量及び総砂州変動量が産卵床形成に寄与していることが明らかとなった。本研究の結果から、年間を通じて2期間の出水(6-7月, 9-10月)による砂州変動量を評価することで産卵床の形成を予測可能であることが示唆された。さらに、一度の中規模程度～大規模出水( $2,000\sim 5,000\text{m}^3/\text{s}$ )が産卵床を有する湧水流路を形成するのではなく、その後 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 以下の小規模出水との組み合わせによって産卵床に好適な湧水流路が形成された可能性が考えられる。産卵床の好適性評価も含めた湧水流路の形成プロセスについては、流況の詳細な評価(規模, 頻度, 変化率, タイミング, 持続時間)(Poff et al., 1997)と地形変動との関係をスケール別(セグメント, 砂州及びリーチスケール)(Frissel et al., 1986)に評価することで明らかにすることができるだろう。出水による砂州の侵食は目詰まりした河床間隙をリフレッシュさせ砂州内部への透水効率を改善し、湧水量を再生する機能があると考えられる。そして、砂州上への土砂の堆積は目詰まりをしていない河床地形の形成に貢献し、場所によっては産卵床にとって好適な河床材料の供給源ともなり得ることが推察される。本調査で発見された

全ての産卵床地点は、出水による土砂の堆積または侵食及び堆積の影響を直接的に受けており、河床攪乱が産卵床形成に寄与している可能性が高い。但し、砂州の侵食量が多いと元々湧水流路が存在していても、砂州上端が本川と繋がり副流路となってしまう可能性が高い。したがって、砂州の堆積/侵食比の好適性範囲が示すように砂州変動量のバランスが産卵床形成には重要であることが示唆された。

## 5 まとめ

天竜川下流域において、湧水流路内のアユ産卵床の形成と各種環境条件との関係性を評価した。湧水流路内の濁度は本川と比較して有意に低く、透明度の高い水域が維持されていることが明らかとなった。また、濁度が低いことで河床間隙の目詰まりが少なく浮石環境が維持されていたことも産卵床形成に有利に働いたと考えられる。既往研究からアユの産卵床は瀬に形成されることから、湧水流路でも湧水瀬の区間において産卵床は確認された。但し、湧水瀬であっても河床表層に大量の砂が堆積している場合は、産卵床は形成されていなかったことから、水質、物理環境、河床材料等の各種条件が揃った時に湧水流路内に産卵床が形成されることが示唆された。産卵床形成と中規模河床形態パラメーターとの関係から砂州面積、砂州波長及び蛇行度における産卵床形成の好適範囲は、それぞれ $0.94\sim 2.54\text{km}^2$ 、 $2.26\sim 4.70\text{km}$ 、1.2以上であることが推定された。加えて、産卵床が形成された地点の平均流路数が1.93であったことから、交互砂州から複列砂州へ段階的に移行する区間に存在する湧水瀬が産卵床形成に寄与していることが示唆された。出水による砂州変動量は、砂州の侵食・堆積が湧水流路及び産卵床の形成に貢献していることを示唆し、産卵床形成には侵食・堆積のバランスが重要であることを示した。

本研究では、アユの産卵期における河床地形条件だけではなく、年間を通じた出水による河床変動も考慮して産卵床形成に寄与する環境条件の推定を行った。産卵床が形成される湧水瀬の条件は見出すことはできたが、定性的な評価であり、産卵数や流下仔魚数との関係解明までは至っていない。また、調査地点数が少なく十分な統計解析が行えていない状況であるため、今後も継続して調査を行いデータの収集に務める必要がある。そして、研究成果に基づきアユを代表とする天然水産資源の回復や河川生態系の保全・再生に寄与する河川管理手法の構築について検討していく予定である。

## 謝 辞

本調査の実施にあたり、国土交通省浜松河川国道事務所、天竜川漁業協同組合、天竜川天然資源再生推進委員会に協力を頂いた。また、本研究を進めるにあたり奨励研究（19H00266, 20H01170）の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 石田力三（1961）：アユの産卵生態－II 産卵魚の体型と産卵床の砂礫の大きさ，日本水産学会誌，27(12).
- 石田力三（1962）：アユの産卵生態－III，産卵場の水深と産卵魚の体型，日本水産学会誌，28(4)，pp.339-404.
- 石田力三（1964）：アユの産卵生態－IV，産卵水域と産卵場の地形，日本水産学会誌，30(6)，pp.478-485.
- 泉公祐・竹門康弘・兵藤誠・喜多村雄一・角哲也(2016)：天竜川における副流路の湧水環境創出によるアユ産卵床の造成実験，土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4, I\_439-I\_444.
- 黒木幹男・岸力（1984）中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp.87-96.
- 水産庁（2009）：アユの人工産卵床のつくり方。
- 鈴木邦弘・鈴木勇己・谷高弘記・井口明（2014）：興津川と天竜川におけるアユの産卵生態からみた現行の禁漁措置の妥当性，静岡水技研研報46，pp.85-91.
- 兵藤誠・泉公祐・竹門康弘・角哲也（2014）：天竜川におけるアユの産卵について，京都大学防災研究所年報第57号，vol. 57B，pp537-549.
- Boulton, A. J., Fenwick, G. D., Hancock, P. J. and Harvey, M. S. (2008): Biodiversity, functional roles and ecosystem services of groundwater invertebrates. *Invertebrate Systematics*, 22, pp. 103-116
- Davies-Colley, R. J., Hickey, C. W., Quinn, J. M., and Ryan, P. A. (1992): Effects of clay discharges on streams. *Hydrobiologia*, 248(3), pp. 215-234.
- Denic, M., Geist, J. (2015): Linking stream sediment deposition and aquatic habitat quality in pearl mussel stream: implications for conservation, *River research and applications*, 31 (8), pp. 943-952.
- Friend, P.F. and Sinha, R. (1993): Braiding and meandering parameters. In: Best, J.L., Bristow, C.S. (Eds.), *Braided Rivers*. Geological Society Special Publication 75, London, pp. 105-111.
- Frissell, C. A., Liss, W. J., Warren, C. E., and Hurley, M. D. (1986): A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 10(2), 199-214.
- Henly W. F., Patterson M. A., Neves R. J. and Lemly A. D., (2000): Effects of sedimentation and turbidity on lotic food web: a concise review for natural resource managers. *Rev. Fish. Sci.* 8 (2), pp. 125-139.
- Nagaya, T., Shiraishi, Y., Onitsuka, K., Higashino, M., Takami, T., Otsuka, N., Akiyama, J., and Ozeki, H. (2008): Evaluation of suitable hydraulic conditions for spawning of ayu with horizontal 2D numerical simulation and PHABSIM. *Ecological Modelling*, 215(1-3), pp. 133-143.
- Nobles, T., and Zhang, Y. (2011): Biodiversity loss in freshwater mussels: importance, threats, and solutions, *Biodiversity Loss in a Changing Planet*, pp. 137-162.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E. and Stromberg, J. C. (1997): The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47, 769-784.
- Wood, P. J., and Armitage, P. D. (1999): Sediment deposition in a small lowland stream—management implications. *River Research and Applications*, 15(1-3), pp.199-210

（論文受理日：2020年8月31日）