

耳川水系ダム通砂による アユ産卵環境への効果の推定

EXPECTED IMPACT OF SEDIMENT SLUICING AT DAMS ON THE AYU
(*Plecoglossus altivelis*)'S SPAWNING ENVIRONMENT FOR MANAGEMENT PLAN OF
SEDIMENT SLUICING AT DAMS IN THE MIMIKAWA RIVER BASIN

井原高志¹・齋藤剛²・大塚海斗³・山本秀平⁴・森遼太郎⁵・鬼倉徳雄⁶
Takashi IHARA, Tsuyoshi SAITO, Kaito OTSUKA, Shuhei YAMAMOTO, Ryotaro MORI and
Norio ONIKURA

¹非会員 農修 九州大学附属水産実験所(〒811-3304 福岡県福津市津屋崎4-46-24)
西日本技術開発(株)環境部(〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1丁目1番1号)

²非会員 学士 西日本技術開発(株)環境部(〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通1丁目1番1号)

³非会員 工修 九州電力(株) 土木建築技術センター(〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通2-11-82)

⁴非会員 工修 九州電力(株) 耳川水力整備事務所(〒883-8533 宮崎県日向市北町 1-112)

⁵会員 工修 九州電力(株) 耳川水力整備事務所(〒883-8533 宮崎県日向市北町1-112)

⁶非会員 農博 九州大学附属水産実験所(〒811-3304 福岡県福津市津屋崎4-46-24)

宮崎県耳川水系では、2005年台風14号による未曾有の災害を契機に、河川管理者である宮崎県が、耳川水系総合土砂管理計画を2011年10月に策定した。耳川水系内にダムと発電所を有する九州電力(株)は、耳川水系総合土砂管理計画の中核的な事業として、ダム通砂(上流からダムに流れ込む土砂をダム下流に通過させる試み)を実施している。ダム通砂は、ダム下流の河床材料の粒度組成が変化し、生物の生息場の変化につながるものが想定される。通砂の影響や効果を把握することは、今後の総合土砂管理を検討する上で有益となる。本研究では、環境改善が期待されるアユ産卵環境に着目し、現地調査データから産卵ポテンシャル予測モデルを構築し、物理環境条件からそのポテンシャルを推定し、ダム通砂によるアユ産卵環境への影響や効果を推定した。その結果、ダムに近い上流側からアユ産卵環境の改善が進んでいると推定された。

Key Words : *Plecoglossus altivelis*, spawning environment, sediment sluicing, GLM, ROC analysis,

1. はじめに

九州南東部に位置する宮崎県耳川水系では、2005年の台風14号により、河川やダム貯水池に大量の土砂が流れ込み、流域市町村で甚大な浸水被害が発生した。この台風14号による未曾有の災害を契機に、河川管理者である宮崎県は、耳川水系総合土砂管理計画を2011年10月に策定した¹⁾。耳川水系内に7つのダムと発電所を有する九州電力(株)は、耳川水系総合土砂管理計画の中核的な事業として、ダム通砂を実施している²⁾。台風による大規模出水時に貯水池の水位を低下させ、河川状態をつくりだすことにより、上流からダムに流れ込む土砂をダム下流に通過させる試みである³⁾。2017年から西郷ダムと大内原

ダムの2ダムで、2021年からは上流の山須原ダムを加えた3ダムで通砂を実施している²⁾。

ダム通砂を実施した場合、河川環境の主要な変化の一つとして、ダム下流の河床材料の粒度組成が変化し、生物の生息場の変化につながるものが想定される⁴⁾。既往研究⁵⁾では、通砂に伴う生態系変遷の指標種としてアユが挙げられているが、ダム通砂の影響や効果はまだ示されていない。通砂の影響や効果を把握することは、今後の総合土砂管理を検討する上で極めて有益となる。本研究では、環境改善が期待されるアユ産卵環境に着目し、耳川水系の現地調査データを使って産卵ポテンシャル予測モデルを構築し、物理環境条件からそのポテンシャルを推定し、ダム通砂によるアユ産卵環境への影響や効果を推定することを目的とした。

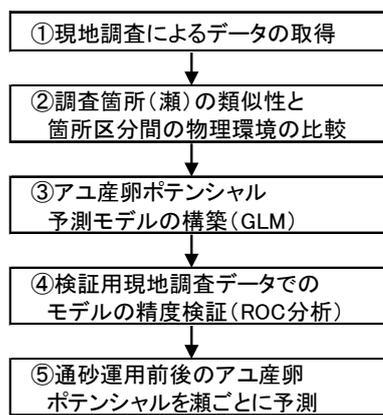


図-1 予測の手順(フロー)

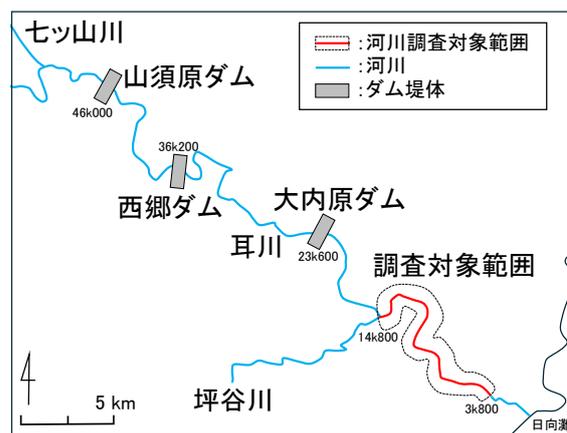


図-2 調査箇所

2. 方法

(1) 予測の手順

予測の手順を図-1に示す。現地調査で取得したアユ産卵場の物理環境データを用いて、調査箇所ごとの物理環境条件の類似性を調べるとともに、産卵の有/無と物理環境条件との関係性を調べた。次に、アユ産卵ポテンシャル予測モデルを構築し、検証用データを用いてROC分析⁶⁾にてAUC(曲線下面積, Area Under the ROC Curve)を算出し、予測モデルの精度を検証した。最後に、精度が高いと判断されたモデルを用いて、現地調査で取得した物理環境データを挿入することで、ダム通砂運用前後におけるアユ産卵ポテンシャルを予測し、その評価を行った。

(2) 研究対象地

現地調査実施箇所は、耳川本川の大内原ダム(河口からの距離: 23k600)より下流の範囲とし、既往調査³⁾でアユの産卵が経年的に確認されている3k800-14k800(坪谷川合流点下流まで)の区間に存在する瀬を対象(図-2)とした。

(3) 現地調査

現地調査は、2012年から2022年までの間、年1回、耳川のアユ産卵盛期とされる11月³⁾に、23~30箇所を実施した。まず、河床に付着する産着卵を目視で確認することで、アユの産卵の有/無を確認した。次に、産卵調査を実施した瀬の中の最大流速・最大水深(瀬の中の流心部の各3ポイントで計測してその平均値を最大流速・最大水深と定義)および面積格子法(日本河川協会, 1997)による粒度分布(礫分含有率)を計測した。有機物量については、既往調査³⁾と同様に、瀬内で代表的な石礫を5個採取し、それぞれから2cm×2cmの面積の付着藻類をブラシで採取し、JIS K 0102 14.5_2019)に準拠して強熱減量分析を実施した。

ダム通砂運用が始まる2017年よりも前のデータでモデル構築とその精度検証を行う必要があった。また、モデ

ルの精度を上げるには、より多くの構築用データを用いることが望ましいと判断した。そのため、2012年から2015年までの4年間の延べ109箇所のデータをモデル構築に使用し、2016年の26箇所を精度検証用データとして取り扱った。そして、その後も継続的に産卵と物理環境の調査を実施したものの、2017年以降のデータは通砂の影響を受けている可能性があるため、物理環境のデータはモデルを使った産卵ポテンシャルの予測用とし、産卵の有/無はモデル構築と精度検証には使用しなかった。

(4) 調査箇所の類似性(クラスター分析)と物理環境条件

ダム通砂運用前の2012年から2015年における調査箇所の環境の特徴を把握するために、物理環境データを用いて、Bray-Curtis指数を算出し、クラスター分析(群平均法)を行った。また、クラスター分析で類型化された調査箇所のグループ間の物理環境について、Mann-WhitneyのU検定を用いて比較した。なお、これらの解析には、「R ver.4.2.2(<https://www.r-project.org/>)」を用いた。

(5) アユ産卵ポテンシャル予測モデルの構築

アユ産卵ポテンシャルの予測のために、産卵の有/無を1/0変数に置き換えて目的変数、物理環境データを説明変数として、一般化線形モデル(GLM)を構築した。その際、目的変数は二項分布に従うと仮定した。

説明変数の総当たり全てのモデルを構築し、赤池情報量規準(AIC, Akaike 1973)⁸⁾を算出した。さらに、モデルの推定値を連続変数、産卵の有/無を二値変数としたROC分析を行い、AUCを算出するとともに、アユ産卵の有/無の閾値を算出した。なお、これらの解析には、「R ver.4.2.2(<https://www.r-project.org/>)」を用いた。

(6) アユ産卵ポテンシャル予測モデルの精度検証

構築したモデルの精度検証のために、ダム通砂運用前の2016年に現地調査で取得した検証用の物理環境データを、(5)で構築したモデルに当てはめて、各調査箇所の産卵ポテンシャルを計算した。これらの計算結果を連続変

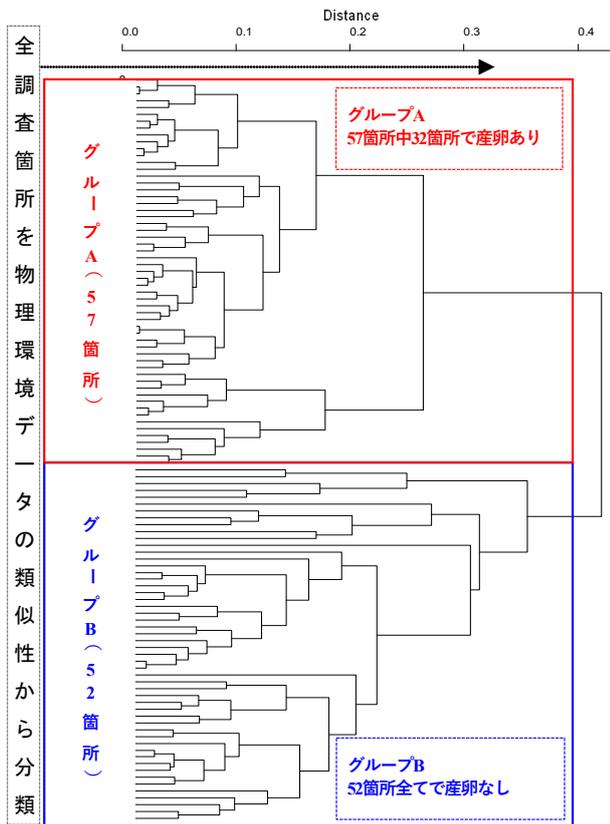


図-3 クラスタ分析に基づく調査箇所の類似性

数、現地調査で取得したアユ産卵の有／無の実測データを二値変数としてROC分析を行い、AUCを算出した。

(7) ダム通砂運用前後のアユ産卵ポテンシャルの予測

構築した産卵ポテンシャル予測モデルを用いて、ダム通砂運用前の2012年から2016年及びダム通砂運用後の2017年から2022年の延べ286箇所について、アユ産卵ポテンシャルを予測した。なお、2017年からは西郷ダムと大内原ダムの2ダムでの通砂を、2021年からは上流の山須原ダムを加えた3ダムでの通砂を実施している。ここでは、2017年以降をダム通砂運用後とし、2019年および2021年は、ダム通砂運用が途中で中止されているが、前年までの通砂の影響を考慮し、ダム通砂運用後として位置付けた。

3. 結果

(1) アユの産卵と物理環境

2015年までの延べ109箇所で行った現地調査を実施した結果、32箇所でアユの産卵が確認された(2012年：7箇所、2013年：7箇所、2014年：7箇所、2015年：11箇所)。

調査箇所の環境の特徴を把握するため、物理環境データを用いてクラスタ分析を行ったところ(図-3)、109箇所は概ね2グループに区分された(Bray-Curtis指数による相対距離0.4を基準とした)。グループAは57箇所が含ま

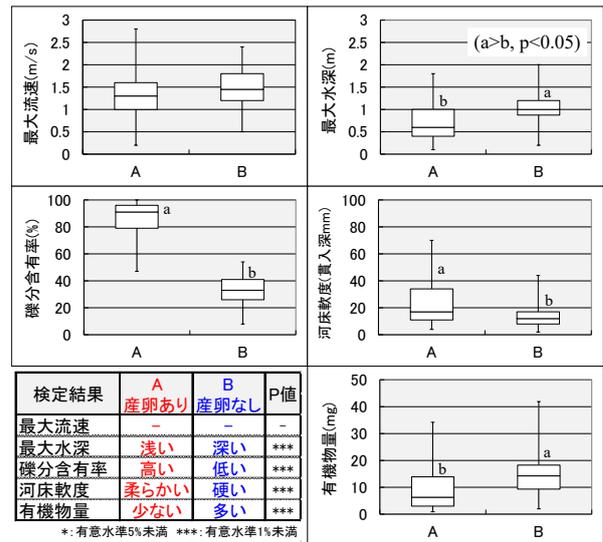


図-4 調査箇所区分A, B間の物理環境の比較

れ、アユの産卵が確認された32箇所は全てこのグループに分類された。グループBは52箇所、全て産卵が確認されなかった場所であった。

グループAとBの物理環境を比較したところ(図-4)、最大流速を除く4項目について、有意な差がみられた。グループAは、最大水深が浅く、礫分含有率が高く、河床軟度が軟らかく、有機物量が少ない環境であるのに対し、グループBは、最大水深が深く、礫分含有率が低く、河床軟度が硬く、有機物量が多い環境であった。

この結果は、アユが産卵場として利用する河床は小礫を主とした河床材で貫入深が大きい(河床が軟らかい)浮き石状態で存在する⁹⁾といった生態的な知見と一致した。

(2) 産卵ポテンシャル予測モデルの構築

産卵の有／無を1/0変数に置き換えて目的変数に、最大流速・最大水深・礫分含有率・河床軟度・有機物量の5項目を説明変数とし、産卵ポテンシャル予測モデルを構築したところ(表-1)、AICが最も低かったモデルに選択された変数は、礫分含有率、河床軟度、有機物量であった。上位5モデル全てで礫分含有率及び有機物量が、4モデルで河床軟度が、3モデルで最大流速及び最大水深が選択された。上位5モデルのAUCはいずれも0.9を超えており、モデル構築用データ内での精度は極めて高い⁶⁾と判断された。

河床材料との関係性をみると、上位5モデルにおいて、河床材料に関わる変数の選択頻度が高く、産卵の有／無と河床材料との関係性が深いことが判断された。上位5モデルの精度はいずれも高かったものの、AICが最も低く、ダム通砂の影響を大きく受けると予想される河床材料に関わる変数(礫分含有率、河床軟度、有機物量)が多く選択されたModel 1(表-1)を産卵ポテンシャル予測用とした。なお、Model 1におけるアユ産卵の有／無の閾値は0.25であった。

表-1 アユ産卵ポテンシャル予測モデル(109箇所で構築)に関する統計値

Model	AIC	ΔAIC	wi	AUC	Intercept (切片)			CV (最大流速)			WD (最大水深)		
					CE	SE	CE/SE	CE	SE	CE/SE	CE	SE	CE/SE
1	45.07	0.00	0.243	0.976	-11.535	3.605	3.200***						
2	45.59	0.53	0.187	0.976	-14.462	4.891	2.957***	1.173	0.984	1.192			
3	46.78	1.72	0.103	0.975	-12.792	4.526	2.826***				0.588	1.116	0.527
4	47.43	2.36	0.075	0.975	-13.889	4.932	2.816***	1.546	1.351	1.144	-0.633	1.545	0.409
5	48.26	3.19	0.049	0.972	-16.547	5.141	3.218***	1.578	1.254	1.258	-0.298	1.411	0.211
Null	133.96	88.89	0.000	0.500	-0.878	0.210	4.175***						

Model	AIC	ΔAIC	wi	AUC	GR (礫分含有率)			RF (河床軟度)			IL (有機物量)		
					CE	SE	CE/SE	CE	SE	CE/SE	CE	SE	CE/SE
1	45.07	0.00	0.243	0.976	0.139	0.044	3.195***	0.074	0.046	1.600	-0.163	0.063	2.569*
2	45.59	0.53	0.187	0.976	0.158	0.051	3.092***	0.065	0.044	1.465	-0.172	0.064	2.675***
3	46.78	1.72	0.103	0.975	0.149	0.050	3.009***	0.069	0.045	1.510	-0.163	0.063	2.581***
4	47.43	2.36	0.075	0.975	0.151	0.052	2.897***	0.068	0.046	1.486	-0.176	0.065	2.686***
5	48.26	3.19	0.049	0.972	0.190	0.053	3.584***				-0.150	0.058	2.586***
Null	133.96	88.89	0.000	0.500									

CE:係数推定値

SE:係数推定値の標準誤差

|CE/SE|:標準化係数

Significance levels of coefficients (係数の信頼性):***p<0.01, *p<0.05

(3) モデルの精度検証

精度検証用データ(2016年調査分)を使って、対象の実測値(1/0変数)とModel 1の予測値(連続変数)でROC分析を行ったところ、AUCが0.938であった。一般に、AUCが0.9を超えると極めて高い予測精度、0.7を超えると適度な精度といわれており⁹⁾、アユ産卵の有/無を予測可能な高い精度のモデルが構築できたと判断できた。

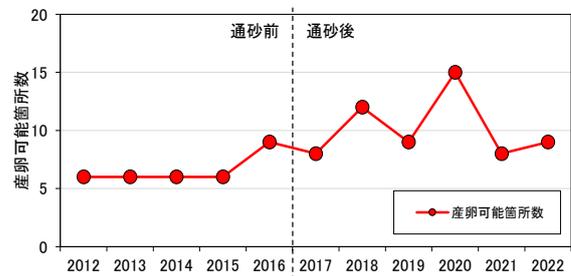


図-5 産卵可能箇所数の推移

(4) 産卵ポテンシャルと産卵の有無

2012年から2022年に現地調査で取得した物理環境データ(計286箇所)を用いて、各調査箇所のアユの産卵ポテンシャルを予測した。なお、産卵ポテンシャルが閾値以上となった調査箇所を産卵可能箇所、閾値未満を産卵不可箇所と判断した。予測の結果、286箇所のうち129箇所産卵可能と予測され、そのうち82箇所では実際に産卵が確認された。また、157箇所産卵不可と予測され、そのうち実際は産卵していたのは2箇所だけであった。予測に使用したModel 1は、通砂後においてもアユ産卵の有/無を高い精度で予測可能と判断できた。

(5) 産卵ポテンシャルのダム通砂運用前後の比較

2012年から2022年の期間で10回以上調査が実施できた22箇所における、各年の産卵可能箇所数の推移を図-5に示す。ダム通砂運用前後の産卵可能箇所数を比較したところ、通砂後の数が通砂前よりも有意に多かった(通砂後平均箇所10.2、通砂前平均箇所6.6、 $p<0.05$)。

2012年から2022年の期間で10回以上調査が実施できた22箇所における、産卵の有/無及び産卵ポテンシャルの推移および実際の産卵の有無を図-6に示す。潮汐の影響を受ける調査箇所1(河口からの距離:3k800)、淡水域の最下流である調査箇所2(4k700)および3(4k900)は、通砂の有無にかかわらず概ね毎年産卵が行われている場所であり、産卵ポテンシャルも通砂前から高い予測値が継続していた。

他に通砂前から産卵の実績があった調査箇所は、7(7k000)、9(8k000)、10(8k200)の3箇所で、通砂前も通砂後も、産卵ポテンシャル及び実際の産卵実績が不安定であった。これらの3箇所は、安定して瀬が形成されている場所であった。いずれの箇所も産卵ポテンシャルが低い調査年は、礫分含有率が低い値であり、河床材料の年変化にその産卵が影響される箇所であると考えられる。なお、通砂前後での変化は認められず、通砂の影響はこのエリアにはまだ及んでいないと判断された。そして、延べ17回の産卵のうち、16回は産卵ポテンシャルが高い年と場所で産卵が確認されており、モデルの予測の正答性を示すものと判断できる。

その他については、産卵ポテンシャルが通砂前から2022年まで低い状態が継続している調査箇所(6, 8, 18, 21, 22)、ポテンシャルに変動を伴う箇所(4, 5, 11~17, 19, 20)に大別されるが、通砂後にポテンシャルが大幅な減少傾向を示した箇所はなかった。また、低いポテンシャルの箇所の幾つかについては直線的で幅が狭い河道であった。そして、変動を伴う箇所のうち、通砂後に産卵ポテンシャルが大きく上昇している調査箇所(19と20)が2箇所あり、これらの箇所では2022年の調査で産卵も確認されている。調査範囲の中では上流側であり、大内原ダムからの距離が近い箇所で、通砂によってアユに適した砂礫が達し始めた可能性が示唆される。

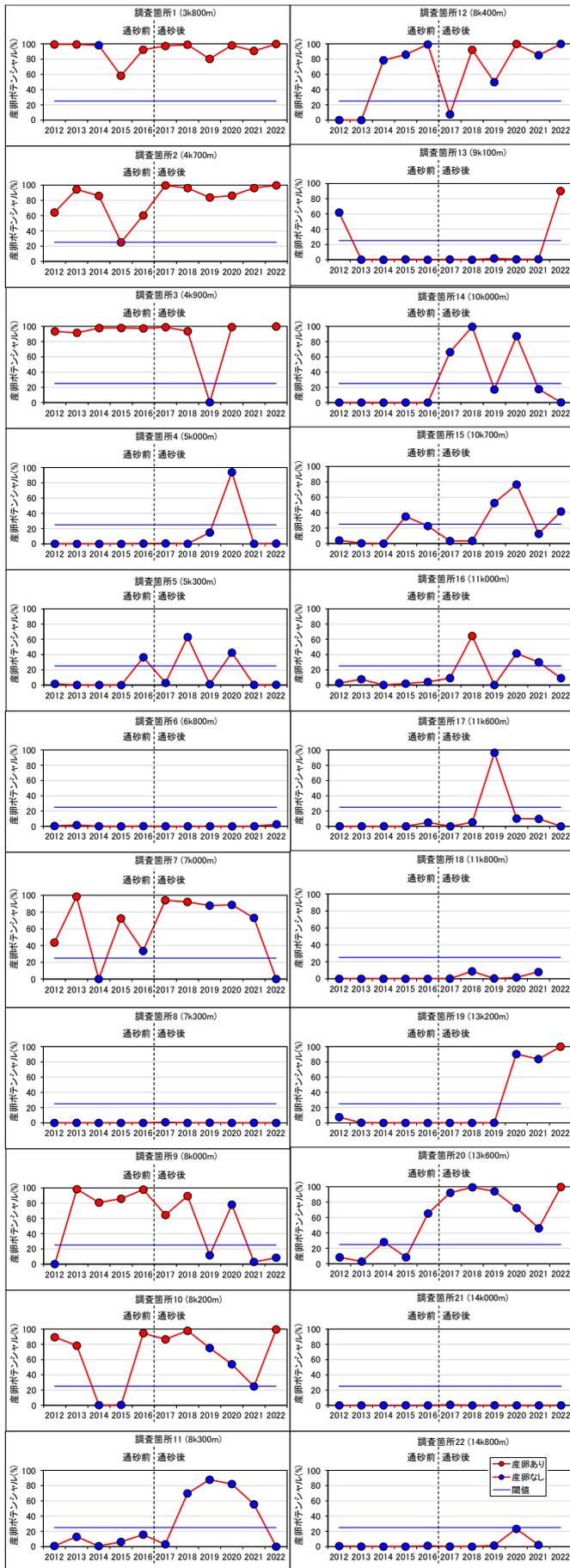


図-6 卵の有／無及び産卵ポテンシャルの推移

4. 考察と今後の展望

本研究で構築した予測モデルは、アユ産卵の有／無を高い精度で予測可能であった。また、予測結果より、大内原ダムより下流の調査箇所(瀬)では、ダム通砂運用後に、産卵ポテンシャルが低下することはなく、また産卵不可箇所の一部で産卵ポテンシャルが上昇すると予測された。この結果は、耳川のダム通砂がアユ産卵場の形成に対し、正に寄与する可能性を示している。そして、実際に、通砂運用以前に産卵の実績がない2箇所で、産卵ポテンシャルの大きな上昇に加えて、2022年には実際に産着卵が確認されていることが、通砂の効果を裏付けていると考えられる。

既往の検討¹⁰⁾では、ダム通砂における大内原ダム下流の河床形状及び河床粒度への影響が最も大きく現れる流量条件は、大内原ダム地点のピーク流量が2,100m³/s程度(1/5確率流量)とされている。本研究における調査では、ダム通砂運用後の2018年に、約2,100m³/s程度のピーク流量でのダム通砂を経験している¹¹⁾。そして、2022年にはさらに大きな出水での通砂運用も行われている(ピーク流量：約5,800m³/s程度)¹¹⁾。これらの出水でのダム通砂で、大内原ダム下流の河床形状及び河床粒度が変化し、結果として産卵ポテンシャルの上昇と新たな2箇所での産卵が行われたと推察される。

ただし、①アユ産卵環境の形成には河床地形の変動履歴が重要な要素となる¹²⁾点、②中規模出水では礫分の移動距離は2km程度に留まると推定¹³⁾されている点、そして、③通砂前と通砂後で出水の規模が異なる点(通砂前：1,000～1,700m³/s程度、通砂後：800～5,800m³/s程度)¹¹⁾を考慮すると、ダム通砂よりも出水の規模や履歴の方が産卵環境の改善に影響した可能性もあり、それらの効果とダム通砂の効果(産卵環境改善にどの程度寄与したのか)を切り分けるのは難しいのが現状である。そして、ダム通砂運用の目的である土砂をダム下流に通過させること自体も、出水規模に影響される。それゆえに、今後、ダムを通過した土砂の量と質について、ダム通砂運用のケースと通砂を行わなかったケースのシミュレーション結果を比較するなど、通砂の効果を裏付ける客観的なデータを集積したい。

通砂後に産卵ポテンシャルが上昇し、2022年に実際に産卵が確認された場所が、調査地の中では上流側に位置し、大内原ダムに近いことにも注目したい(図-7)。

上述したように、土砂の移動には時間を要するため、改善効果は上流側から認められると予想できる。今回の結果は、ダム下流域において、よりダムに近いエリアから通砂による場の改善が進んでいることを裏付けるものといえる。

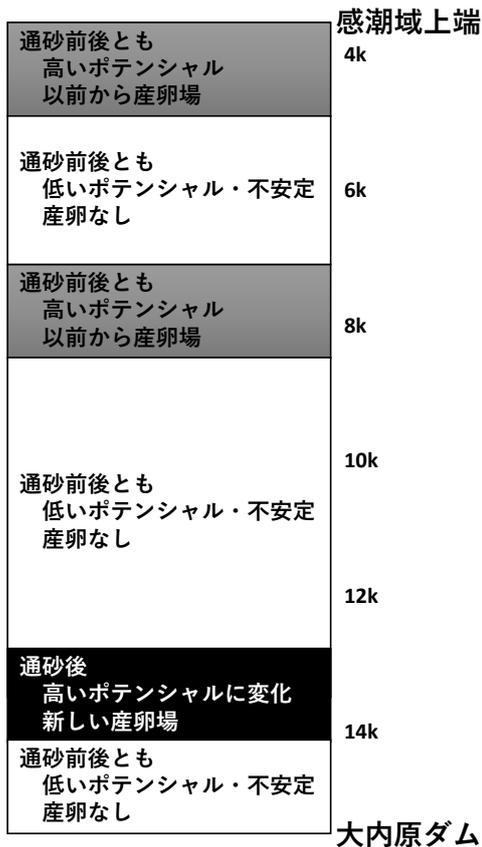


図-7 耳川4~15kにおける通砂前後の
アユ産卵ポテンシャルと産卵場の概略図

今後、大内原ダムより下流域のアユ産卵環境が徐々に下流側へと広がっていくことが期待される。今後も、継続的にモニタリング調査を行う必要がある。

本研究では、ダム通砂による河床材料の変化に着目し、ダム通砂運用前に取得したデータからアユ産卵ポテンシャル予測モデルを構築し、アユ産卵ポテンシャルの通砂前後の予測結果から、ダム通砂によるアユ産卵環境への影響や効果を考察している。モニタリング調査の継続や土砂動態を加味したダム通砂の効果の検証等は今後の課題であるが、ダム通砂による生物の影響予測評価手法のモデルケースとして、また河川整備や河川管理における評価手法・保全目標の設定等に本研究が少しでも寄与することを期待する。

謝辞：現地調査の実施及びデータ分析にあたり、ご指導・ご協力を頂いた流域関係漁協、電力中央研究所、(株)ベントスの関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 耳川流域における総合土砂管理について. 宮崎県 HP(<http://www.pref.miyazaki.lg.jp/kasen/shakaikiban/kasen/page00135.html>). 2024. 1月閲覧.
- 2) 耳川水系ダム通砂関連情報. 九州電力(株)宮崎支店 HP(https://www.kyuden.co.jp/company_outline_branch_miyazaki_initiative_mimikawa.html). 2024. 1月閲覧.
- 3) 川上馨詞, 吉村健, 新屋裕生: 耳川水系ダム通砂に向けた河川環境調査結果に基づくモニタリング計画の概要, 河川技術論文集, 第22巻, pp.115-118, 2016.6月.
- 4) 川上馨詞, 吉村健, 新屋裕生: 耳川水系ダム通砂基本操作策定に係る河川環境面からの検討アプローチ, 電力土木, No.381, pp.31-35, 2016.1月.
- 5) 大中臨, 赤松良久, 佐藤領星, 山口皓平, 小室隆, 乾隆帝: 耳川におけるダム通砂が土砂動態及びアユ現存量に及ぼす影響の検討, 土木学会論文集B1(水工学), 第75巻2号, pp.409-414, 2019.8月.
- 6) Metz C. E. : Basic principle of ROC analysis, Seminars in Nuclear Medicine, No.8(4), pp.283-298, 1978.10月.
- 7) Akobeng A. K. : Understanding diagnostic tests 3: Receiver operating characteristic curves, Acta Paediatrica, No.96, pp.644-647, 2007.5月.
- 8) Akaike, H., : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle", Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest: 267-281, 1973.
- 9) 藤田朝彦, 横山良太, 加藤康充, 井上修, 原田守啓: アユの産卵環境はどこまでわかったのか, 応用生態工学, 第24巻2号, pp.217-234, 2022.3月.
- 10) 井原高志, 川上馨詞, 坂田賢亮, 鬼倉徳雄: 耳川水系ダム通砂実施計画の策定に向けたダム通砂による魚類への影響予測, 河川技術論文集, 第23巻, pp.663-668, 2017.6月.
- 11) 耳川流域における総合土砂管理について(第12回耳川水系総合土砂管理に関する評価・改善委員会). 宮崎県 HP(<https://www.pref.miyazaki.lg.jp/kasen/kurashi/shakaikiban/page00135.html>). 2024. 1月閲覧.
- 12) 兵藤誠, 泉公祐, 竹門康弘, 角哲也: 天竜川におけるアユ産卵床の河床地形特性と変動履歴の関係, 河川技術論文集, 第20巻, pp.67-72, 2014.6月.
- 13) 角哲也, 中島佳奈, 竹門康弘, 鈴木崇正: アユの産卵に適した河床形態に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第54巻, pp.719-725, 2010.6月.

(2024. 4. 3受付)