

河床形態の変動に着目したアユ生息環境評価手法の構築

四国電力(株) 再生可能エネルギー部 齋藤 彬郎
四国電力(株) 再生可能エネルギー部 合田 陵
(株)四電技術コンサルタント 環境部 多田 真也
(株)四電技術コンサルタント 環境部 大津 洋暁

キーワード: アユ
河床形態
フルード数
二次元流況解析
物理指標
選好曲線
生息環境評価

Key Words: *Plecoglossus altivelis*
Riffle-pool structure
Froude number
Two-dimensional flow analysis
Physical variable
Preference curve
Habitat evaluation

A quantitative methodology for assessing ayu habitat responses to discharge-driven changes in riffle-pool structures

Shikoku Electric Power Co.,Inc., Renewable Energy Department

Akio Saito, Ryo Goda

Yonden Consultants Co.,Inc., Environment Department

Shinya Tada, Hiroaki Otu

Abstract

Ayu (*Plecoglossus altivelis*) is frequently selected as a target fish species for riverine environmental assessment, with studies demonstrating that population density and body length exhibit significant correlations with riffle-pool structures. Furthermore, riverine systems adjacent to hydroelectric facilities often provide optimal habitat conditions for ayu populations. This study aimed to develop a quantitative methodology for assessing ayu habitat response to changes of riffle-pool structures under altered discharge regimes.

We developed an ayu habitat assessment methodology by integrating a riffle-pool structure analysis model based on topographic data with preference curves derived from ayu habitat conditions and physical variables. This versatile methodology is applicable to any river system with available topographic, population density, and habitat data. To demonstrate its utility, we conducted predictive analyses of habitat suitability variations, examined optimal conditions for ayu and territorial ayu based on density preferences, and evaluated feeding environments using grazing scar area preferences.

1. はじめに

水力発電所の運用においては、ダムや取水堰下流河川の流量変化を生じさせることにより、魚類の生息場を変化させる可能性がある。このため、我が国では、流量変化の影響が大きい「瀬」における水深と流速を指標とし、対象魚種の生息環境を評価している事例が多い。しかし、実河川においては、流量変化は水深・流速の増減だけにとどまらず、砂や礫等が流下・堆積し、河道の形状や勾配、川底の起伏等の変化として現れ、これら河床形態の変動が魚類の生息環境に影響することが知られている。

本稿では、今回構築した河床形態の変動に着目したアユ生息環境評価手法、同手法を用いて実施したアユ好適生息場の変動予測解析・考察について報告する。

2. 研究の全体像

2.1 研究の目的

本研究の対象魚種としたアユは、我が国の河川に広く生息し、古くから清流を代表する魚類として親しまれている。特に、四国の河川では、漁獲量も多く、内水面漁業関係者などの関心が非常に高いことから、河川環境評価の対象魚種として選定される例が多い。

国内における過去の調査・研究事例において、アユの生息密度や体長等は河床形態との関連性が認められること、河床形態は河川の瀬淵構造・外見的特徴から「早瀬」、「平瀬」、「トロA級」、「トロB級」、「淵」の5区分（以下、「5河床形態」という）に判別できること、流量変化に伴い5河床形態の水面面積割合が変化すること等が報告されている。水力発電所の周辺河川は、アユの良好な生息場となっている場所も多いため、河川流量が変化した場合における河床形態の変動に伴うアユの生息環境を定量的に評価できる手法の構築を目的として研究を行ったものである。

2.2 評価手法の概要

今回構築した評価手法は、現地の地形情報から作成する「河床形態解析モデル」とアユが棲みやすい環境条件を表す「アユの選好曲線」を組み合わせ、任意の流量におけるアユの生息ポテンシャルを地形図に可視化できる特長を有する（図1）。

河床形態解析モデルは、UAV写真測量ならびに深淺測量で取得した現地の地形情報に基づく平面二次元流況解析で求めた流速、水深からフルード数を算出し、そのフルード数から河床形態の判別を行うものである。解析には、水工学分野における汎用数値シミュレーションソフトウェアであるiRIC Nays2DHを活用している。

アユの選好曲線は、検討対象河川のアユの生息状況と現地の物理指標との関係性を表し、前述の河床形態解析モデルにインプットする生息場適性指数として0（不適）から1（最適）の範囲で設定するものである。本稿では、アユの生息状況は、「アユの生息密度」、「なわばりアユの生息密度」、「ハミアト面積」の3種類について、アユの選好する物理指標は、「流速」、「水深」、「河床材料」データを現地河川で計測し、設定している。

なお、アユとなわばりアユの生息密度を区別した理由として、なわばりアユは、餌場である川底の石の表面に生えた藻類を独占的に確保するために防衛行動を示す個体であり、集団で行動する群れアユに比べて一般的に成長が早く、アユ釣り等の集客資源としても価値が高い個体と考えられるためである。また、ハミアトは、アユの摂餌行動の結果、石表面に残る藻類の色や質感が変わった帯状・斑状の擦過痕である。このため、本稿では、新たな試みとして、なわばりアユの生息密度、ハミアト面積を選好曲線に加えている（写真1）。

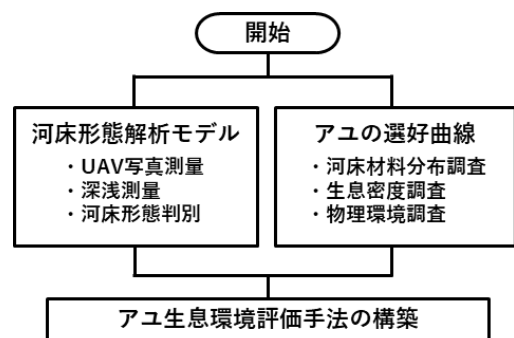


図1 検討フロー

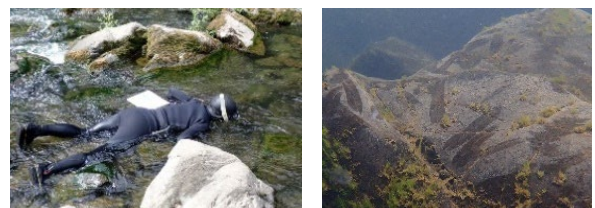


写真1 潜水観察およびハミアトの様子

2.3 モデル構築範囲・現地調査地点

本稿における河床形態解析モデルの構築範囲は、高知県西部を流れる四万十川の支流梶原川に設置された津賀ダムの下流0.20km～1.15kmの約1kmとした。ダム直下には河川維持流量を利用した津賀発電所3号機（最大出力550kW）があり、10～3月の間は $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 、4～9月の間は $1.91 \text{ m}^3/\text{s}$ という期別に設定された所定流量が絶えず流下している。また、ダム下流河川は、所定流量に加えて出水に伴う年間約120日程度に及ぶ洪水吐ゲートからの放流があり、河床攪乱の頻度が比較的多い。

アユの選好曲線作成のための河床材料分布調査については、モデル構築範囲全体で実施した。また、アユ生息密度・物理環境調査については、梶原川の主たるアユの生息場である古味野々、大奈路、田野々の3地点を設定した（図2）。

3. 河床形態解析モデル

3.1 モデルの作成

本稿では、令和2年度に実施したUAV写真測量や深浅測量で取得したモデル構築範囲の地形情報を基に、流況解析に用いる格子状の計算グリッドを作成した。グリッドサイズ、粗度係数等の計算条件パラメータを表1に示す。

河床形態解析モデルでは、iRICのEvaTRiP Proを用いた瀬淵分析により、フルード数から5河床形態を判別する方法とした。従来からの河床形態判別は、水面の波立ち、水深や川底の形状等の状態を目視観察する方法が一般的に採用されているが、観察者の感覚によるバラツキが生じ易く、経験に委ねる部分が大いという課題があった。

これに対し、フルード数から河床形態を判別する方法は、任意の流量での流況解析で得られる水

深、流速からの計算結果より定量的に判別することが可能である。

フルード数から河床形態を判別する方法の採用にあたっては、図3に示すように、モデル構築範囲で実施した流速、水深の実測データから求めたフルード数による5河床形態の判別結果と、従来からの目視観察による判別結果を比較のうえ、妥当性を確認している。また、5河床形態に分類するためのフルード数は、表2のとおり、iRIC EvaTRiP Proの標準条件（Entwistle et al. 2018）と極めて高い整合性が確認されている。

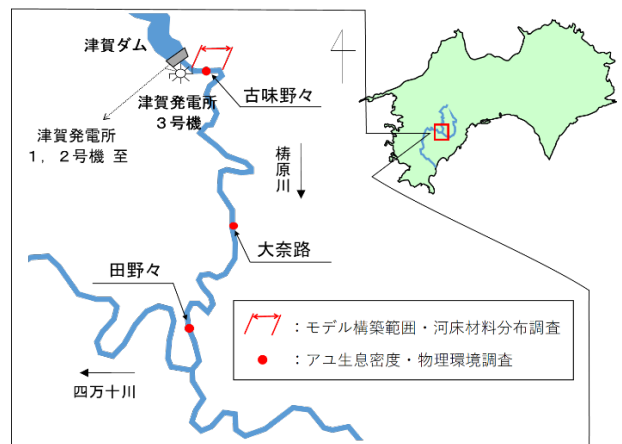


図2 モデル構築範囲・現地調査地点

表1 計算条件パラメータ

項目	内容および設定値
グリッドサイズ	縦断分割数：202（格子幅5.0m程度） 横断分割数：81（格子幅0.5m程度）
粗度係数	0.050
下流端の水深	等流水深
タイムステップ	0.02秒

表2 本研究とiRIC標準条件のフルード数の比較

河床形態	フルード数	
	本研究	iRIC標準条件
早瀬	0.50以上	0.49以上
平瀬	0.25～0.50	0.245～0.49
トロA級	0.15～0.25	0.15～0.245
トロB級	0.05～0.15	0.04～0.15
淵	0.05未満	0.04未満

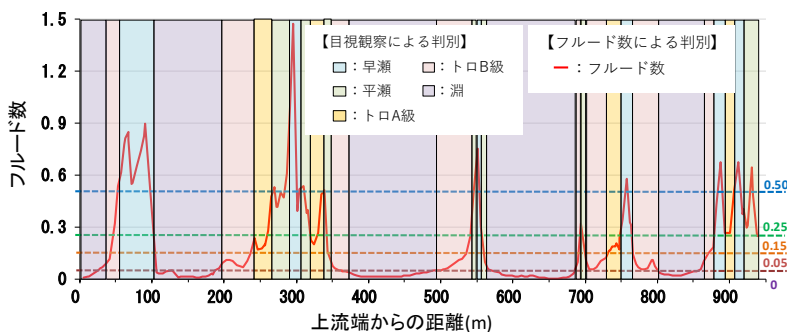


図3 河床形態判別結果の比較

3.2 流量変化に伴う河床形態の変動

流量を変化させた場合における、河床形態の変動に関するモデルの応答性を確認するため、表 3 に示す 5 ケースの流量を対象に解析を実施した。本稿における 5 河床形態の面積の算出は、モデル構築範囲の地形情報と重ね合わせて図化するため、iRIC の解析結果を汎用 GIS ソフトウェア (QGIS) で変換する方法を採用している。

解析結果では、流量の増加に伴い、淵の割合が減少する一方で、他の瀬やトロの河床形態が微増傾向にあることが確認された (図 4)。一般に、流量の増加に伴う河床形態の変化としては、河床勾配が急な河川では淵から瀬あるいはトロへの移行が起こりやすいことが知られている。モデル構築範囲は、河床勾配が比較的急であるため、今回作成したモデルは、流量変化に伴う河床形態の変動を適切に表現できていると考える。

表 3 解析対象流量

ケース	流量	設定の考え方
1	1.15 m ³ /s	10～3 月における河川維持流量
2	1.91 m ³ /s	4～9 月における河川維持流量
3	2.87 m ³ /s	ケース 2 の 1.5 倍
4	3.82 m ³ /s	ケース 2 の 2 倍
5	5.73 m ³ /s	ケース 2 の 3 倍

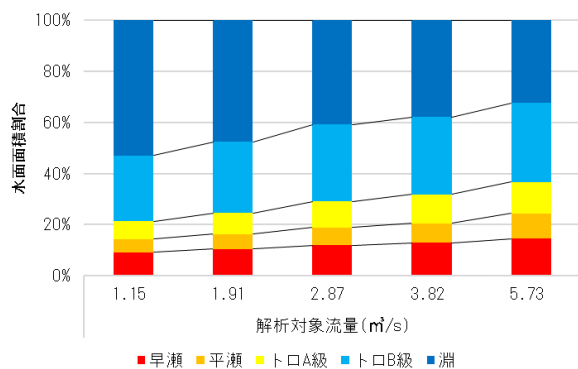


図 4 流量変化に伴う河床形態の変動

4. アユの選好曲線

4.1 調査項目と実施時期

アユの選好曲線を作成するための現地調査は、令和 6 年に実施しており、調査実施時期としては、アユが河川の中流域まで遡上・定着のうえ、なわばりを形成する 7～9 月とした (表 4, 図 5)。

河床材料分布調査は、7 月上旬に 1 回実施した。その後、台風による出水が発生したため、出水前の結果と比較するため 9 月下旬にも 1 回実施した。

アユ生息密度・物理環境調査は、計 3 回実施しており、アユ（なわばりアユを含む）の生息密度ならびにハミアト面積に関するデータを取得するとともに、物理指標として流速、水深、河床材料を記録した。

表 4 調査項目・実施日

調査項目	種別	実施日
河床材料分布調査	出水前	令和 6 年 7 月 7 日
	出水後	令和 6 年 9 月 26 日
アユ生息密度 物理環境調査	1 回目	令和 6 年 7 月 7 日
	2 回目	令和 6 年 7 月 23 日
	3 回目	令和 6 年 8 月 26 日

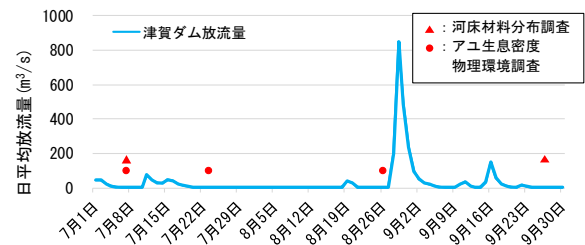


図 5 調査実施日と津賀ダム放流量との関係

4.2 河床材料分布調査

河床材料分布調査では、上流から下流に向けて潜水観察を行い、モデル構築範囲における河床の表層部分の面的な粒径分布状況を確認した。河床材料の粒径は折れ尺等で計測を行い、平成 28 年度版河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル【河川版】（底生動物調査編）に基づき区分した。

出水前・後の河床材料別面積を比較した結果、合計面積に対する変化率は最大でも細礫の 2% 程度であり、河床材料の分布に大きな変化は認められなかった (表 5, 図 6)。ここでは、選好曲線の物理指標としては、最新のデータである出水後の数値を用いることとした。

表5 出水前後の河床材料別面積比較

河床材料の名称 (粒径等)	分布面積 (m ²)			合計面積 に対する 変化率 (%)
	出水前	出水後	増減	
大石 (500mm 以上)	17,767	17,357	-410	0.7
中石 (200~500mm)	10,803	10,682	-121	0.2
小石 (100~200mm)	2,098	2,385	287	0.5
粗礫 (50~100mm)	901	737	-164	0.3
中礫 (20~50mm)	183	1,112	929	1.7
細礫 (2~20mm)	1,399	183	-1,216	2.2
砂 (0.074~2mm)	-	-	-	-
泥 (0.074mm 未満)	-	-	-	-
岩盤 (岩盤・コンクリート)	19,851	20,546	695	1.3
合計	53,002	53,002	-	-

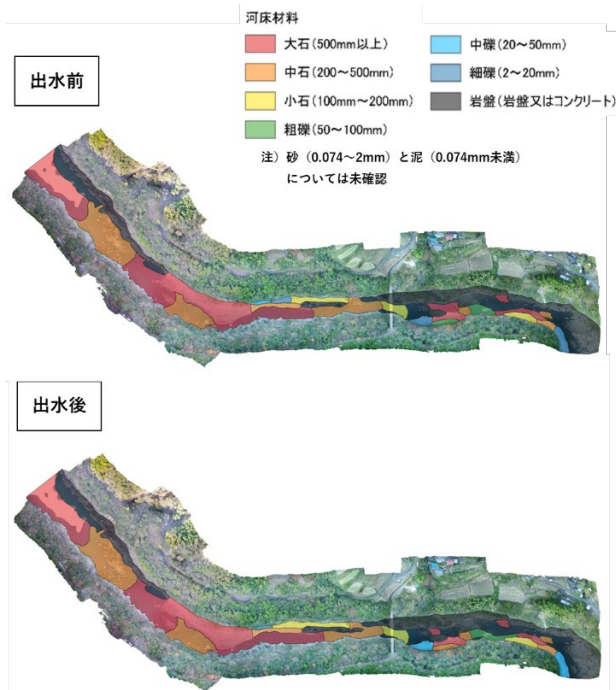


図6 モデル構築範囲における河床材料分布

4.3 アユ生息密度・物理環境調査

アユ生息密度・物理環境調査では、潜水観察により、アユ、なわばりアユ、ハミアトのいずれかが確認された場合には、「在データ」として観察箇所で生息密度、ハミアト面積、流速、水深、河床

材料の記録を行った。また、アユやハミアトが確認されなかった場合は、「不在データ」として観察箇所の流速、水深、河床材料を記録した。

3回の現地調査により計68データを収集しており、このうち、在データとしては、アユが43データ、なわばりアユが8データ、ハミアトが57データとなっている。本稿では、在・不在データをそれぞれの選好性毎にあわせて整理しており、アユの生息密度における選好性を図7、なわばりアユの生息密度における選好性を図8、ハミアト面積における選好性を図9に示す。

アユの生息密度は、主に流速が0.1~1.1m/s、水深が0.2~0.9mの領域を選好していることを確認した。また、河床材料としては、粗礫以上の粒径を選好しており、その中でも中石が最も生息密度が高いことを確認した(図7)。

なわばりアユの生息密度については、アユの生息密度より1オーダー小さくなっている。また、今回調査結果においては、流速が0.1~0.9m/s、水深が0.4~0.9mの領域、河床材料としては中石以上の粒径を選好し、なわばりを持たないアユの選好性よりも物理指標の範囲が狭くなっている。

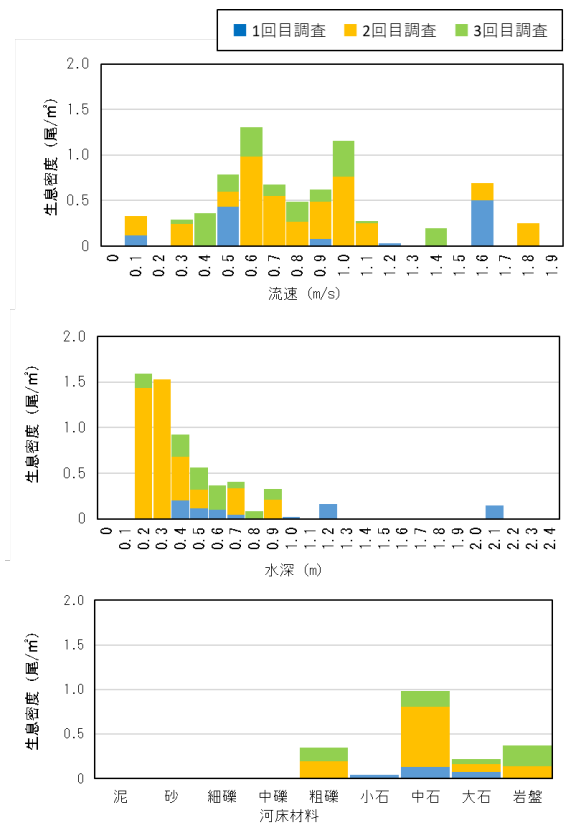


図7 アユの生息密度における選好性

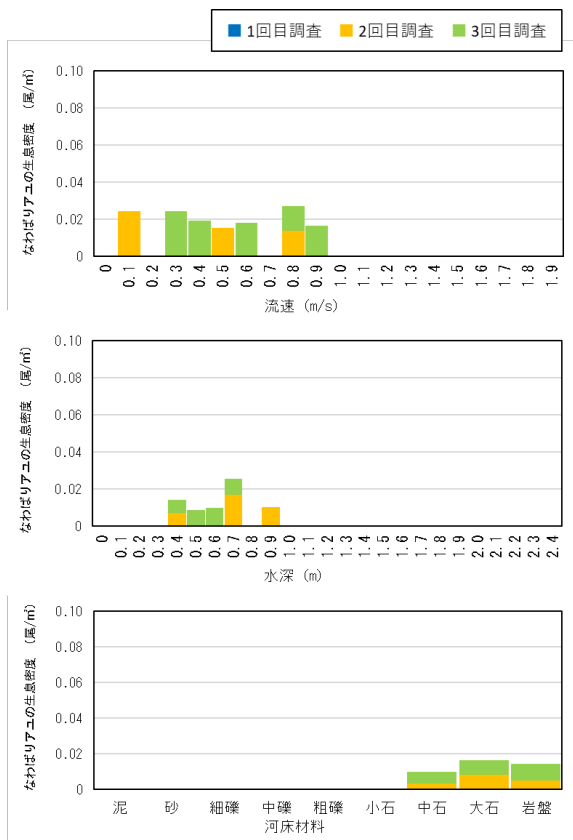


図8 なわばりアユの生息密度における選好性

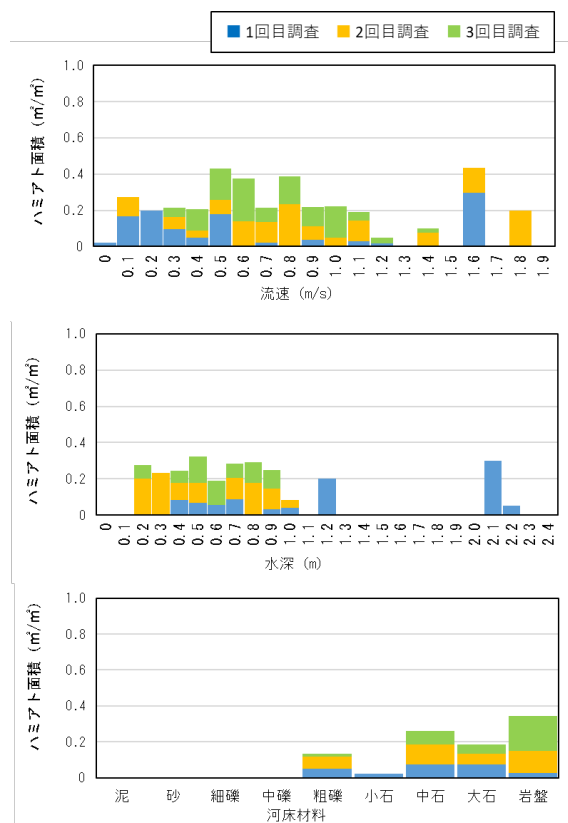


図9 ハミアト面積における選好性

このことから、調査時のなわばりアユは、なわばりを持たないアユよりも水深が深く、比較的粗い河床材料が存在する場所を好んで利用していたと示唆された（図8）。

ハミアト面積については、物理指標の範囲に多少の差はあるものの、アユの生息密度における選好性と類似の結果となっていることから、ハミアト面積に基づき選好曲線を作成し、アユの好適生息場の評価に活用することは概ね妥当と考える。（図7、図9）

4.4 選好曲線の作成

選好曲線の作成は、既往の報告において提案されている代表的な選好曲線関数の中から、図10に示す河村の方法を採用した。河村の方法は、選好値0～1の範囲を現地調査で取得した選好性のデータと整合するように、ある幅を持つ台形型の曲線として表現できることが特徴である。また、アユの生息密度と流速、水深、河床材料の関係性から台形型の選好曲線を作成している事例が過去に報告されており、本稿において算定した選好曲線との比較も容易であると考えた。

ここで、 $SI(x)$ は、流速、水深、河床材料といった各物理指標の選好値であり、図10に示す選好曲線関数の $C_1 \sim C_4$ については調査結果を基に設定する任意の定数である。選好曲線関数の作成手順としては、まず、アユの生息密度あるいはハミアト面積の調査データ上位2点の平均が最大1（最適）となる補正係数を求め、その係数にて全ての調査データを選好値に置換し、物理指標との関係図上にプロットする。次に、選好値が1となる最適生息域の範囲を定める C_1 、 C_2 について、アユの生息密度あるいはハミアト面積の選好値上位2点対

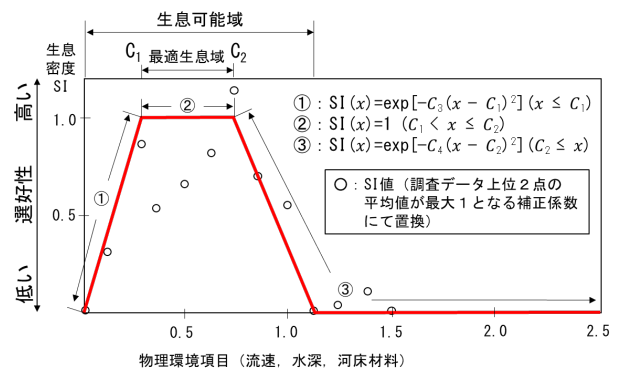


図10 選好曲線の基本形

応する物理指標や参考文献から決定する。最後に、曲線の形状を決定する C_3 、 C_4 について、関係図上にプロットされたデータとの乖離をできるだけ小さくし、物理指標の変化に伴う選好値の上昇・低下を滑らかに表現するよう逐次計算から求める。

アユの生息密度に関する選好曲線を図 11，なわばりアユの生息密度に関する選好曲線を図 12，ハミアト面積に関する選好曲線を図 13 に示す。それぞれの選好曲線については、流速（図の上段）、水深（図の中段）、河床材料（図の下段）毎に整理している。なお、図 11 には、筆者らが確認したアユの生息密度に関する選好曲線についての既往報告事例を参考に併記している。今回設定した選好曲線（算定 SI）と選好値 1 を示す物理指標の範囲や選好値 0～1 の曲線形状に、概ね整合していることが確認された。

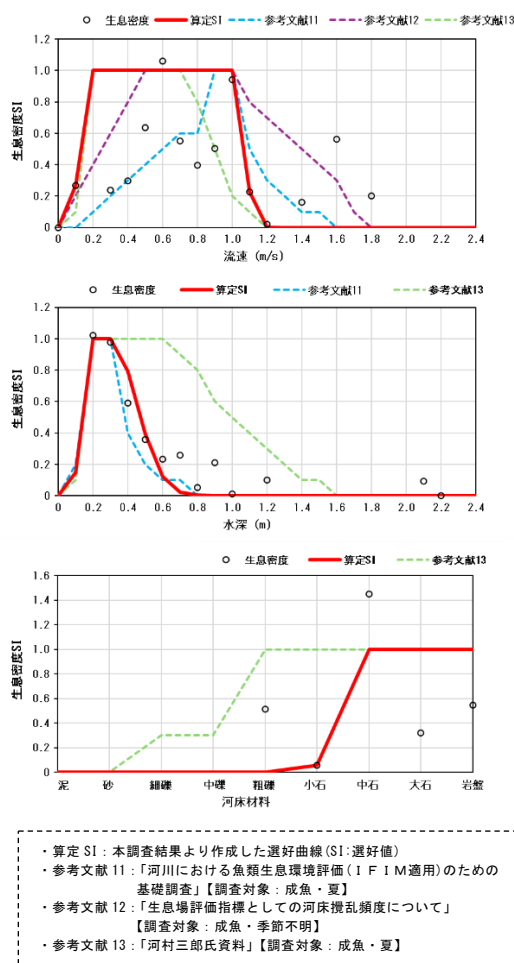


図 11 アユの生息密度に関する選好曲線

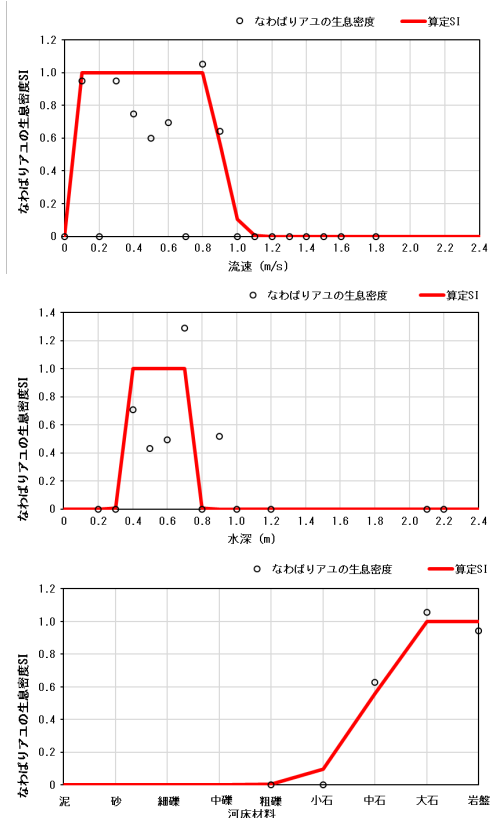


図 12 なわばりアユの生息密度に関する選好曲線

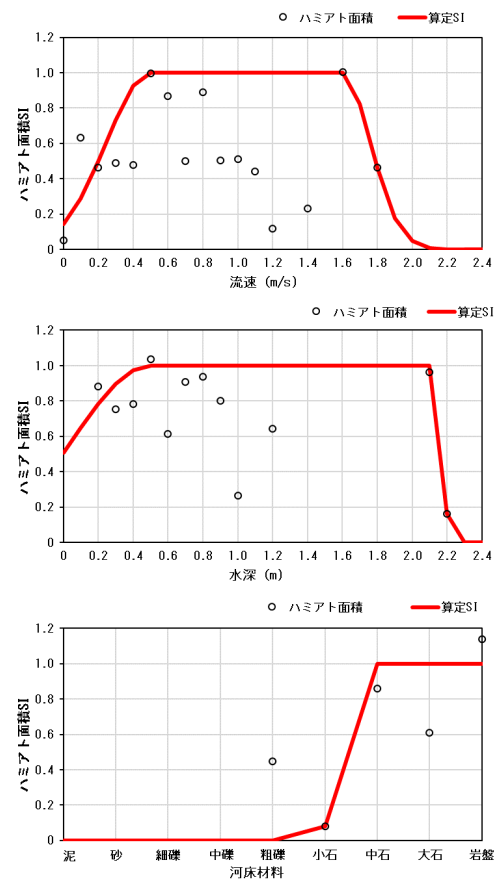


図 13 ハミアト面積に関する選好曲線

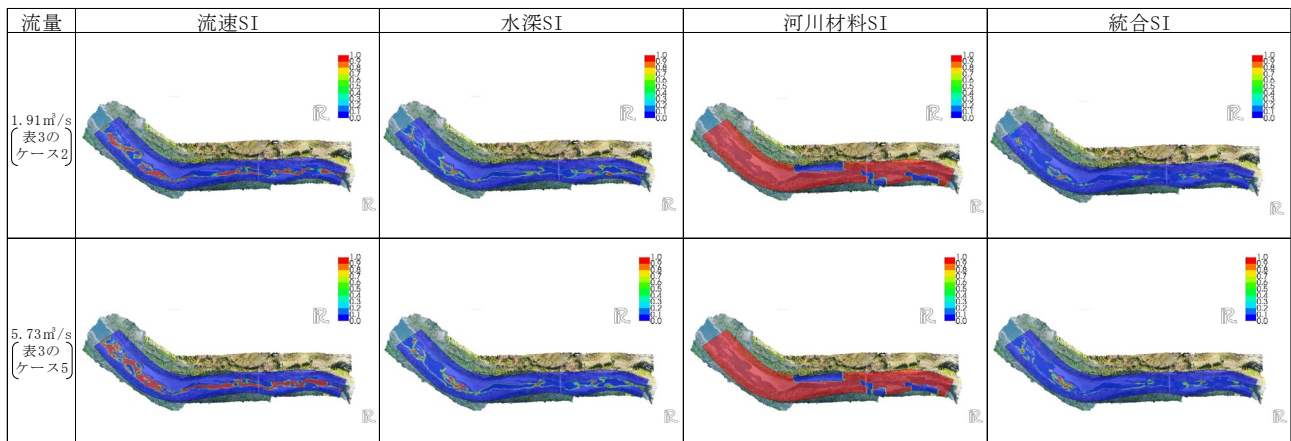


図 14 アユの好適生息環境に関する SI 値分布

5. アユ好適生息場の変動予測解析

5.1 解析の実施

河床形態解析モデルと選好曲線を組み合わせて構築したアユの生息環境評価手法を活用し、津賀ダム下流河川におけるモデル構築範囲を対象に、アユ好適生息場の変動予測解析を実施した。

当解析では、アユの好適生息環境、なわばりアユの好適生息環境、ハミアトによるアユの摂餌環境の検討を目的とし、表 3 に示す 5 ケースを対象流量とした再現流況に iRIC EvaTRiP でアユの選好曲線（流速、水深、河床材料）データを読み込み、解析メッシュ毎に選好値（SI 値）の計算を行った。また、3 項目の SI 値を平均した統合 SI 値も同時に計算した。

ここでは、解析結果の一例として、アユの好適生息環境に関する SI 値分布を図 14 に示す。図の上段が流量 1.91 m³/s（表 3 のケース 2）、図の下段が 5.73 m³/s（表 3 のケース 5）であり、物理指標毎の選好性として、左から流速、水深、河床材料、統合 SI の順で整理している。

アユの好適生息環境に関する SI 値分布は、現地の地形図と重ね合わせて視覚的に表現することが可能であるため、イメージが湧きやすく、第三者の理解向上にも繋がるものとする。

5.2 解析結果と考察

解析結果に基づき、アユの好適生息環境、なわばりアユの好適生息環境、ハミアトによるアユの摂餌環境について考察する。なお、図 15～17 は全て統合 SI 値を用いている。また、アユが生息または摂餌する可能性がある SI 値 0.2～1.0 の範囲に

ついて、上段を水面面積、下段を水面面積割合としている。

(1)アユの好適生息環境

SI 値 0.2～1.0 の水面面積は、1.91 m³/s のケースが最も大きく、それ以上の流量ではやや減少する傾向にある。また、比較的好適と考えられる SI 値 0.6 以上の割合は、解析対象流量の範囲内ではほぼ変化しないことが確認された（図 15）。

今回、解析対象流量の増加に伴い、河床形態が淵から瀬あるいはトロヘ一部移行するものの、モデル構築範囲においては、河床形態の変動がアユの好適生息環境に与える影響は比較的小さいと言える。

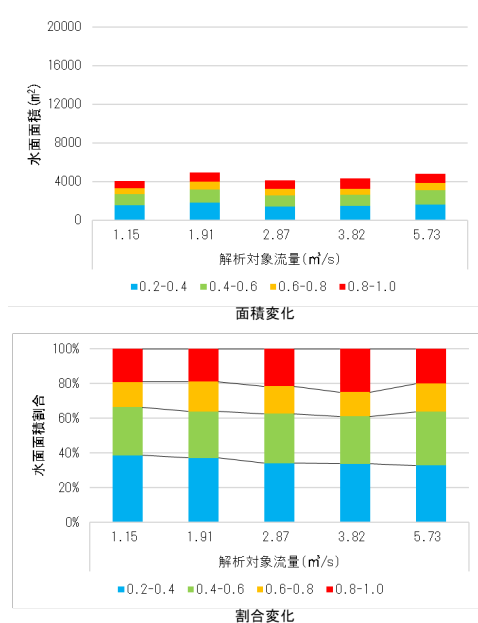


図 15 アユの好適生息環境の変化

(2)なわばりアユの好適生息環境

SI 値 0.2～1.0 の水面面積については、流量の増加に伴い微増する傾向にある。一方、比較的好適と考えられる SI 値 0.6 以上の割合は、解析対象流量の範囲内ではほぼ変化しないことが確認された（図 16）。

なわばりアユの好適生息環境としては、今回、現地調査で確認された図 7、図 8 に示す選好性について、なわばりアユとなわばりを持たないアユの物理環境の領域の違いが反映された結果となっている。

(3)ハミアトによるアユの摂餌環境

SI 値 0.2～1.0 の水面面積については、流量の増加に伴い増加する傾向にあり、その大きさはアユやなわばりアユの水面面積の 3 倍程度となっている（図 17）。

モデル構築範囲は、出水による攪乱頻度が比較的高く、現地調査においても瀬や淵など幅広い場所ではハミアトが確認されていることから、アユの餌となる付着藻類が存在し、アユが活発に摂餌できる環境にあると考えられる。

6. まとめ

本稿では、現地の地形情報から作成する「河床形態解析モデル」と、アユの生息状況および物理環境条件から作成した「アユの選好曲線」を組み合わせ、河床形態に着目したアユ生息環境評価手法を構築した。今回提案する手法は、汎用性が高く、地形情報、アユの生息密度や物理環境等のデータを取得できれば、あらゆる河川で適用可能である。また、選好曲線の作成にあたっては、なわばりアユやハミアト面積という新たな評価指標についても検討を行った。

さらに、本稿においては、今回構築した手法を用いて、アユの好適生息場に関する変動予測解析を実施し、生息密度の選好値よりアユおよびなわばりアユの好適生息環境、ハミアト面積の選好値よりアユの摂餌環境について考察を行い、流量の変化に伴う河床形態の変動がアユの生息環境に与える影響を評価する手法としての有用性を示した。

今後、アユの生息環境をより詳細に評価するうえで、出水に伴う土砂移動による付着藻類の剥離・更新の影響についても考慮する必要があると

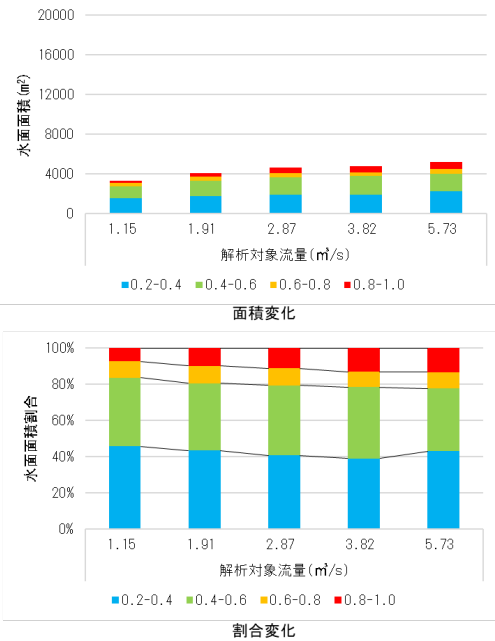


図 16 なわばりアユ好適生息環境の変化

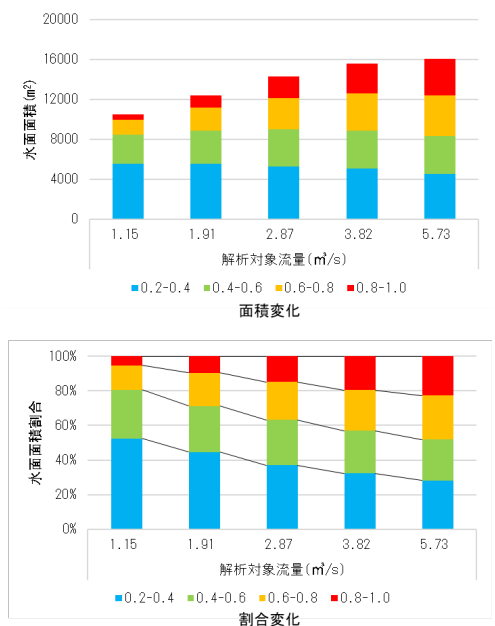


図 17 ハミアトによるアユの摂餌環境の変化

考える。また、出水に伴う土砂移動を予測するモデルを構築し、今回の研究成果に組み込むことにより、それらを考慮したアユの好適生息場に関する変動予測解析も可能になると考える。さらに、本稿で着目した河床形態の変化としては、アユをはじめとする魚類に限らず、底生動物の種組成等への影響も生じることから、それらの評価手法の構築についても検討を進めていく予定である。

【参考文献】

- 1) ダムと下流河川の物理環境との関係についての捉え方ー下流河川の生物・生態系との関係把握に向けてー, 国総研資料 第 521 号.
- 2) 高橋 勇夫, 谷口 順彦: 流量変化に伴う河床型構成およびアユの生息密度の変化とそれらの河川維持流量評価への活用, 応用生態工学会, 15 巻 2 号, pp.197-206, 2012.
- 3) 高橋 勇夫, 寺門 弘悦, 村山 達朗, 曾田 一志: 高津川におけるアユの適正収容量の推定, 島根県水産技術センター研究報告, 2 巻, pp.49-64, 2009.3.
- 4) 山本 亮介: 河川流量変化に伴うアユ生息・産卵環境の変動予測, 電力中央研究所, 2010.
- 5) 宮本 一仁, 佐々木 勝教, 山本 亮介: 河川維持流量の変化に伴うアユ生息環境変動予測解析, 電力土木, No.350, pp.9-15, 2010.11.
- 6) 梅本 健児, 牧之内 洋一: 筑後川におけるアユ生息・産卵適地の可視化について, 国土交通省九州地方整備局.
- 7) 伊藤 浩文, 関根 雅彦, 中村 好希, 神野 有生, 山本 浩一, 樋口 隆哉, 今井 剛: 中小河川における魚類生息場評価のための生態環境多様性指数の提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No.1, pp.1-11, 2016.
- 8) 改訂版建設省河川砂防技術基準(案)同解説調査編
- 9) 野上 毅, 渡邊 康玄, 中津川 誠: 急河川における河床地形の定量的区分, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.1087-1092, 2003.2.
- 10) 河村 三郎: 魚類生息環境の水理学, 初版, リバーフロント整備センター, 2003.
- 11) 石川 雅朗, 中村 俊六, 築坂 正美, 東 信行, 中村 緩徳: 河川における魚類生息環境評価(IFIM 適用)のための基礎調査, 木更津工業高等専門学校紀要, 第 29 号, pp.23-32, 1996.
- 12) 北村 忠紀, 田代 喬, 辻本 哲郎: 生息場評価指標としての河床攪乱頻度について, 河川技術論文集, Vol.7, pp.297-302, 2001.
- 13) 河村三郎氏資料(自然共生研究センター公開データ)
- 14) 鬼束 幸樹, 永矢 貴之, 白石 芳樹, 笠瀬 明日香, 東野 誠, 高見 徹, 横峯 正二, 秋山 壽一郎, 小野 篤志, 芹川 泰介: アユに関する流速の選好曲線の提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol.46, pp.29-38, 2009.
- 15) 原田 守啓, 藤田 裕一郎, 深谷 治由: 河川の生息環境評価手法に関する一考察, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.1129-1134, 2001.
- 16) 鈴木 金治: 魚類生息環境評価手法に関する研究, リバーフロント研究所「研究報告」, pp.175-183, 1997.
- 17) 平成 28 年度版河川水辺の国勢調査基本調査マニュアル【河川版】(底生動物調査編)
- 18) iRIC Software Nays2DH Solver Manual
- 19) iRIC Software EvaTRiP Solver Manual version3.0
- 20) EvaTRiP Pro User's Manual リリース 2.0.0
- 21) Entwistle, N., Heritage, G., Milan, D.: Ecohydraulic modelling of anabranching rivers, River Research and Applications, Vol. 35, Issue 4, pp.353-364, 2018.
- 22) 宮地 伝三郎: アユの話, 第 34 刷, 株式会社岩波書店, 2005.
- 23) 坪井 潤一, 高橋 勇夫, 高木 優也: 完全攻略! 鮎 Fanatic, 初刷, 築地書館株式会社, 2023.