

UAVによる低水路河床の砂被度把握とそれを用いたアユの生息場適性評価モデルの精緻化

REFINEMENT OF HABITAT SIMULATION MODELS FOR AYU FISH BASED ON QUANTIFICATION OF THE SAND COVER RATE ON RIVERBEDS FROM AERIAL PHOTOGRAMMETRY

溝口裕太¹・宇佐美将平²・小野田幸生³・田代喬⁴・宮川幸雄⁵・中村圭吾¹
Yuta MIZOGUCHI, Shohei USAMI, Yukio ONODA, Takashi TASHIRO, Yukio MIYAGAWA
and Keigo NAKAMURA

¹正会員 博(工) 土木研究所 水環境研究グループ 河川生態チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²学生会員 学士(工) 筑波大学 大学院理工情報生命学術院システム情報工学研究群
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
(研究当時: 埼玉大学 工学部建設工学科)

³非会員 博(理) 応用地質株式会社 応用生態工学研究所
(〒963-7722 福島県田村郡三春町西方石畑275)

(研究当時: 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター)

⁴正会員 博(工) 名古屋大学 減災連携研究センター (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

⁵正会員 博(工) 土木研究所 水環境研究グループ 自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

There is a growing demand to consider a riverbed as a factor to evaluate fish habitat in river management. This requirement arose because various sediments augmentation expecting riverbed restoration has been planned in gravel-bed rivers, especially in the downstream reaches of dams. In this study, sand cover rate (SCR) was defined as an indicator of the riverbed and for the focal point of ayu (*Plecoglossus altivelis*) in spatial distribution. The results indicated that ayu preferred SCR of 0.15–0.50, especially 0.20–0.25. Two types of the composite suitability index (CSI) model and generalized linear model (GLM) were developed considering the hydraulic quantities with SCR and without SCR, respectively. The models with SCR were found to improve calculation sensitivity, and SCR is the most influencing factor in the GLM to explain the ayu presence probability.

Key Words : composite suitability index, generalized linear model, riverbed restoration, sand cover rate, ayu

1. 序論

生息場適性評価モデルであるPHABSIMは、魚類の生息場の保全を検討するための代表的な手法の一つだが、それを構成する選好曲線には、簡易的に観測可能な水深や流速といった水理量が多用されやすい。しかしながら、アユの採餌場所のように、河床の状態が魚類分布を支配する重要な因子となる場合には、生息場の適性を評価する際に、水理量だけでなく、河床環境に対する選好性も加味した検討が必要となる。代表例として、ダム下流

河川での土砂還元事業がある。そのような人為的な土砂供給が河床の変化を促すことは明らかであり、河川環境に配慮した総合土砂管理の推進には、供給土砂に対する生物の応答を的確に把握することが不可欠だと考える。

そこで、本研究ではダム下流河川での土砂還元事業におけるモニタリングへの適用を想定し、なわばりアユを対象に河床環境への選好性を加味した生息場適性評価モデルを構築することを目的とする。また、空間解像度が高く、短時間にリーチスケールの調査が可能なUAVを活用するとともに、その空撮写真から容易に定量化が可能な砂被度(河床面を覆う砂の被度)を河床環境の指標

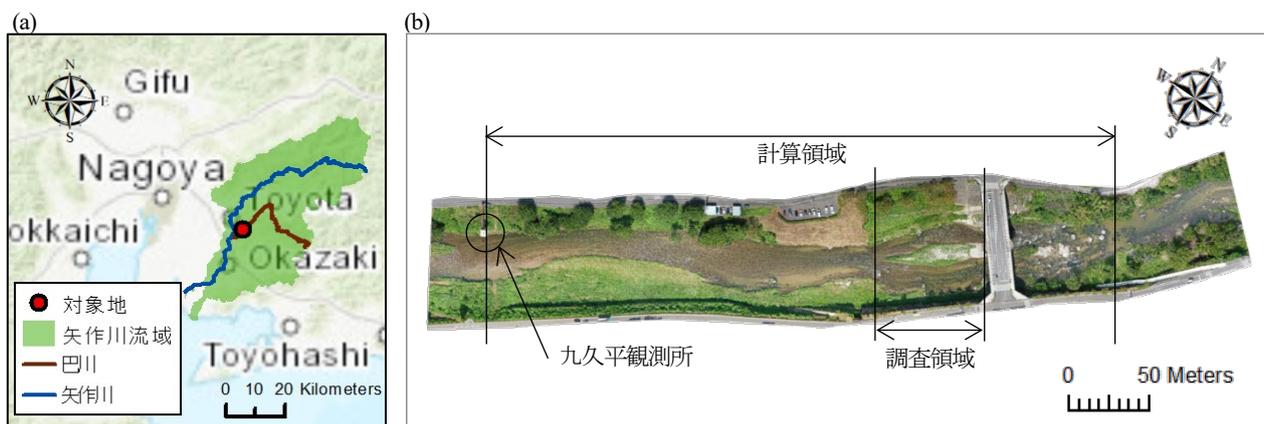


図-1 (a) 対象地と (b) 計算領域 (水理計算) および調査領域 (アユ定位場所と砂被度) の拡大図

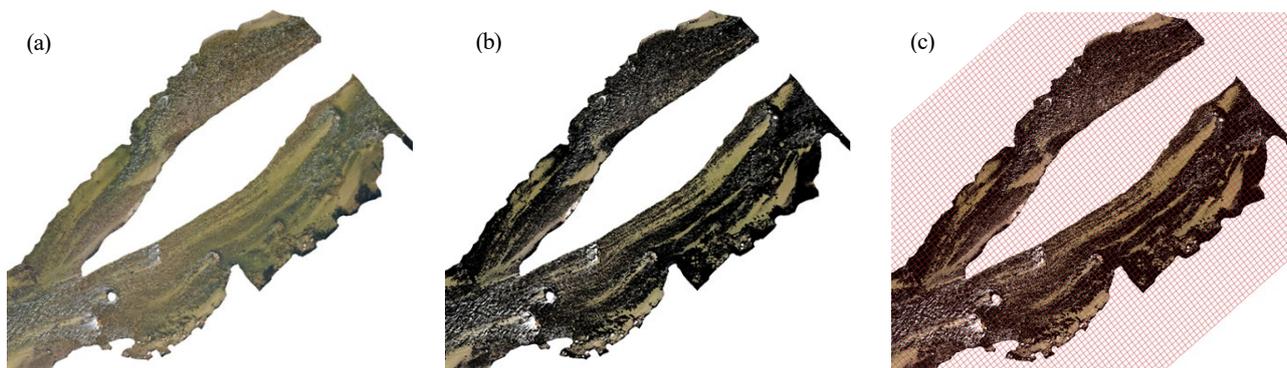


図-2 画像処理による砂被度の算出 ((a) 水部のオルソ画像, (b) 判読された砂ピクセル[それ以外は黒色表示]と (c) 格子[1m四方])

とし、アユの採餌環境の評価を試みた。なお、前報¹⁾では議論が十分にできなかった砂被度へのアユの選好性を、選択性指数(Manly index: α_i)^{2,3,4)}に基づいて定量化するとともに、その結果を踏まえて適性指数 (Suitability Index: SI) を作成した。また、生息場適性評価モデルとしては、環境因子ごとのSIの積として求まる合成適性指数CSI (Composite Suitability Index) モデルと、一般化線形モデルGLM (Generalized Linear Model) を構築し、それら2つのアプローチから、生息場適性評価に砂被度を考慮する重要性を検証した。

2. 現地観測

(1) 対象地

愛知県豊田市を流れる矢作川水系巴川を対象とした。対象地を図-1 (a) に示す。矢作川との合流点から約5km上流に位置し、流程距離約70m、川幅約50m (中州を含む) を対象に、水理量、砂被度および魚類調査を実施した (図-1 (b))。藤田⁵⁾に倣うと、対象河川の河床材料は、河床の骨格となる礫 (以下、骨格材料) と、その表面や間隙に堆積する砂 (以下、間隙材料) の2つの粒径集団として捉えることができる。矢作川流域の山地域は、大部分が風化花崗岩で覆われており、それは、風化作用を

受けて細粒化 (マサ化) し、砂 (0.064-2mm) 程度の粒径で安定⁶⁾しやすい特徴を持っている。また、花崗岩由来の間隙材料は、骨格材料と比べて明るい色調を持つ。アユの主要な採餌環境である瀬は、水深が浅いことから、UAV空撮写真からでも、河床材料の色調の違いを捉えることができ、水部を含めて間隙材料を判読することが可能である。

(2) 観測項目

本研究では、宇佐美⁷⁾が実施した2019/6/10の水深・流速観測 (ADCP; Xylem社製SonTek River Surveyor M9)、9/7-8のアユの分布調査、9/19の空撮 (UAV; DJI社製Mavic 2 Pro) の結果を用いて、砂被度に対するアユの選好性を明らかにした上で、生息場適性評価モデルを構築した。なお、アユの分布調査は、シュノーケリングによる潜水目視とし、なわばりアユかどうかは他の個体へのなわばり防衛行動の有無によって判定した。なわばりアユの位置は、水制状の構造物などを目印に流程方向に5m間隔で測線を設けることで、水理解析や、画像解析に用いる格子の座標との整合性に留意して記録した。水深と流速の観測結果は、図-1 (b) の計算領域を対象に構築した水理解析の再現性の検証に、また、空撮によるオルソ画像は、砂被度の定量化に用いた。

(3) 画像解析による低水路河床の砂被度把握

低水路河床の砂被度把握の基本となるオルソ画像は、Agisoft社製Metashapeに、UAV空撮画像を取り込み作成した。なお、オルソ画像の解像度は約1.7cm/pixelとなった。その後、陸部をトリミング(図-2(a))した上で、水面の波立ちや太陽光の反射により、河床だと認識できないピクセルは、色情報(RGB)に基づく閾値を設定して除外した。その後、残ったすべてのピクセルを対象とした、RGBに基づく機械的な判読により、ピクセルごとに砂と、それ以外に分類した(図-2(b))。なお、砂被度は、なわばりアユの遊泳範囲が1m四方程度⁹⁾であることから、1m四方の格子を設け、それに占める砂ピクセルの割合(砂のピクセル数/格子内の全ピクセル数)を算出した(図-2(c))。

(4) 砂被度に対するアユの選択性分析

本研究では、砂被度を0から1の範囲で定義し、調査領域の全体を意味する環境中と、アユ定位場所における砂被度の頻度分布を整理した。なお、砂被度の階級は0.05ごとに設定(20区分)した。また、砂被度に対するアユの選好性を評価するために、選択性指数(Manly index: α_i)^{3,4)}を用いた。一般に、ランダム利用時の選択性指数を意味する $1/m$ を α_i が超える($\alpha_i > 1/m$)とき、その階級を選択的に利用するものと判断される。なお、選択性指数は、次式より求める。

$$\alpha_i = (r_i/n_i) \sum_{i=1}^m (r_i/n_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

ここに、 α_i : 階級*i*の砂被度に対する選択性指数、 r_i : 階級*i*に属するアユの定位場所数がアユの定位場所全数に占める割合、 n_i : 階級*i*に属する河床環境が調査領域に占める割合、 m : 階級数である。

3. 生息場適性評価モデル

(1) 概要

本研究では、2つのアプローチから、生息場適性評価モデルを構築する。一つは、CSIによる評価モデル、もう一つはGLMである。ここでは、水理量として扱う水深と流速の2因子と、それに砂被度を加えた3因子を説明変数として、それぞれのモデルを構築し、予測精度の比較に基づき、砂被度を環境因子に加える重要性を確認した。なお水理量は、宇佐美ら¹⁾と同様に観測結果に基づく再現性が確認された水理モデルによる計算値、また砂被度は、2(3)に記した画像解析による観測値を用いた。

(2) 一般化線形モデル (GLM)

ここでの目的変数は、なわばりアユの在・不在データとし、説明変数を、水理量のみ(GLM_{hw})と、水理量お

よび砂被度(GLM_{hwb})とする2つのモデルを構築した。ただし、選好性には、極値を持つものがあるため、それぞれの説明変数の2乗項を加えた。また、アユを確認した格子数よりも、不在が圧倒的に多いため(在格子の約72.5倍)、大城ら⁹⁾を参考に、できるだけ多様な環境特性を反映するため、調査領域の全域から重複しないよう、在格子の6倍の不在格子をランダムに抽出した上で、これを繰り返し、20個のモデルを作成した(数の上では、すべての不在格子が選択される繰り返し回数)。さらに、すべてのモデルのパラメータを平均化して1つのモデルを作成し、AIC (Akaike's Information Criterion) を用いてベストモデルを決定した。なお、解析にはPythonモジュールのstatsmodels0.11.1を用いた。

GLMの精度検証は、在・不在の正答率およびROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線から求まるAUC (Area Under the Curve) に基づき評価した。なお、格子ごとに求まるアユの在確率から、在・不在を判定するためのカットオフ値が必要となるが、ここでは、「感度+特異度-1」が最大となるポイントを閾値とするYouden index¹⁰⁾を採用した。なお、解析にはPythonモジュールのsklearn0.22.1を用いた。

(3) 合成適性指数 (CSI) モデル

水理量から求める CSI_{hw} と、水理量および砂被度に基づく CSI_{hwb} は、それぞれ次式から求めた。なお、アユの水理量に関する選好性は、田代・辻本¹¹⁾が提案する水深と流速の SI_h 、 SI_v 曲線を用いた。また、砂被度は、2(4)に記す分析法に基づき SI_b 曲線を作成した。なお、結果は4(1)に示す。

$$CSI_{hw} = (SI_h \times SI_v)^{1/2} \quad (2)$$

$$CSI_{hwb} = (SI_h \times SI_v \times SI_b)^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 SI_h 、 SI_v 、 SI_b : 水深、流速、砂被度の SI 値である。なお、水部を対象に1m四方の格子ごとに生息場の適性を評価した。

また、CSIモデルの精度検証には、3(2)に記すGLMの検証法を援用した。定量的なCSIモデルの検証例は少ないが、中野ら¹²⁾が提案した複数のCSIモデルから再現性の高い最適なモデルを選択する方法と類似することから、GLMの検証法を採用することとした。ただし、CSIモデルは、GLMの結果と同様に0から1の範囲で示されるが、その値は、生息場としてのポテンシャルを意味し、在確率であるGLMとは異なる。したがって、GLMとCSIモデルの再現性を直接比較することは適切でない点に留意が必要である。

4. 結果と考察

(1) アユの砂被度に対する選好性

調査領域では、34地点のなわばりアユの定位場所を確認した。ただし、近接する地点を含むため、これを格子数に換算すると30地点（1m²/格子であるため30m²）となる。調査領域の全域を意味する環境中と、定位場所の砂被度の頻度分布を図-3に示す。環境中には、砂被度が比較的小さい格子が多く、被度0.5以下は1676m²であり、調査領域（2204m²）に占める割合は約76%となった。砂被度が低いことは、石礫の多さを示し、付着藻類を餌とするアユの選好性が高まると予測された。しかしながら、アユの定位場所数は、砂被度0.20-0.25にピークを持ち、被度0.00-0.50に広く分布した。また、地点数は少ないが、被度0.65-0.70と、0.90-0.95にも確認された。他方、選択性指数は、砂被度0.15-0.40、0.65-0.70、0.90-0.95において、ランダム利用時の値よりも大きく、選択的に利用されていた。

砂被度の空間分布と、定位場所との関係を詳細に分析すると、被度0.65以上は、河岸から伸びる水制状の構造物や巨石の背後など、砂が堆積する後流域と、顕著な砂の被覆がみられない主流域との境界に位置していた（以下、後流域・主流域境界）。こういった境界にある定位場所は、格子の取り方で砂被度がばらつきやすく（格子内に占める後流域の割合など）、定位するアユの活動範囲と、格子との整合に一層の注意が必要だと考えられた。そこで、後流域・主流域境界を除外し、定位場所22地点の頻度分布を整理した（図-3）。その結果、砂被度0.05以下や、0.65以上の極端な地点が除外され、アユの選好性は、砂被度0.15-0.50を範囲とし、被度0.20-0.25にピークを持つ、一峰性の分布を示した。さらには、この後流域・主流域境界を除く定位場所の選択性指標を参考に、砂被度0.15-0.50の適性指数を1とする*SI_b*曲線を作成した（図-4）。これは、CSIモデルにおいて、砂被度を考慮した生息場適性評価を実施する際に用いた。

(2) 生息場適性評価

CSIモデルと、GLMによる生息場適性評価の結果を図-5、6に示す。また、それらの判別精度を表-1、2に示す。それぞれ、(a)は水理量のみ、(b)は水理量と砂被度の結果である。ここでは、後流域・主流域境界に確認されたアユの定位場所を除いた22地点を精度検証の対象とした。

はじめに、アユの採餌環境としての生息場ポテンシャルを意味するCSIの結果を示す。図-5からわかるように、*CSI_m*は調査領域のほとんどを適性が高いと評価したが、砂被度を考慮（*CSI_{mb}*）することで、高い生息場適性を持つ領域を絞り込むことができた。アユの在・不在のカットオフ値を、*CSI_m*は0.705、*CSI_{mb}*は0.792としたとき、在地点の予測精度を意味する感度は、どちらも95.5%となり高い精度を確認した（表-1）。また、不在地点の予測精度である特異度は、*CSI_m*の29.0%から*CSI_{mb}*の63.5%に改善し、その結果、在・不在の全体正答率は、29.0%から63.8%に向上した。

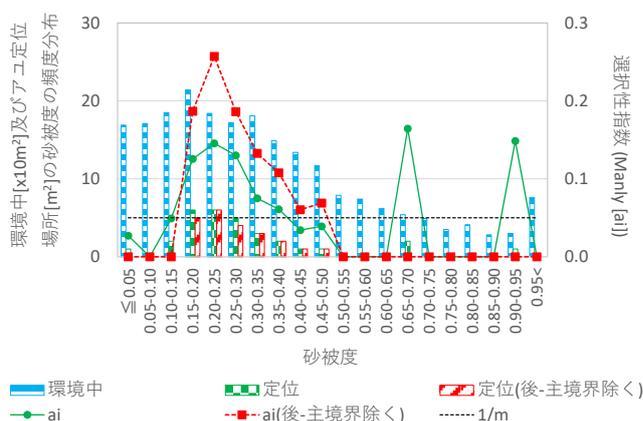


図-3 環境中及びアユ定位場所の砂被度の頻度分布に基づくアユの砂被度に対する選好性

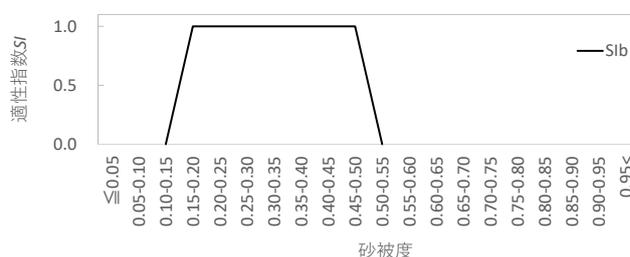


図-4 アユの砂被度に対する適性指数*SI_b*

次に、GLMによる生息場適性評価の結果を示す。水理量のみと、砂被度を考慮したモデルは、それぞれ次式となった。

$$GLM_{hv} : -2.7h + 11.0v - 6.1v^2 - 4.8 \quad (4)$$

$$GLM_{hvb} : -1.4h + 9.3v - 5.4v^2 + 35.5b - 62.5b^2 - 8.6 \quad (5)$$

ここに、 h 、 v 、 b ：水深、流速、砂被度である。

AUCは、*GLM_h*は0.760、*GLM_{hb}*は0.835となり、砂被度の考慮によるモデルの精度向上が確認された。図-6に示す在確率の結果より、*GLM_h*は連続的に変化するが、*GLM_{hb}*は離散的な空間分布となった。これは、格子ごとに求まる砂被度が、離散的に分布することに依存しており、CSIモデルでも*CSI_h*と*CSI_{hb}*の結果には、同様な傾向が認められる。

また、*GLM_h*と*GLM_{hb}*のカットオフ値として、それぞれ0.197と0.150が求めた。そのときの感度は、CSIモデルと同様に向上した一方で、特異度、全体正答率は低下する結果となった（表-2）。アユにとっての好適な採餌場所を正しく予測するという点では、砂被度を考慮し、感度を向上させた*GLM_{hb}*に優位性がある。その一方で、砂被度の考慮は、特異度の低下を招くことになった。これは、調査において、アユの定位が確認されなかった地点を、GLMで在と判別したことによる。そういった地点は、GLMの予測結果が示すように、採餌場所としてのポテンシャルは高いものの、当該の調査では、たまたま不在であったという可能性が考えられる。この他、

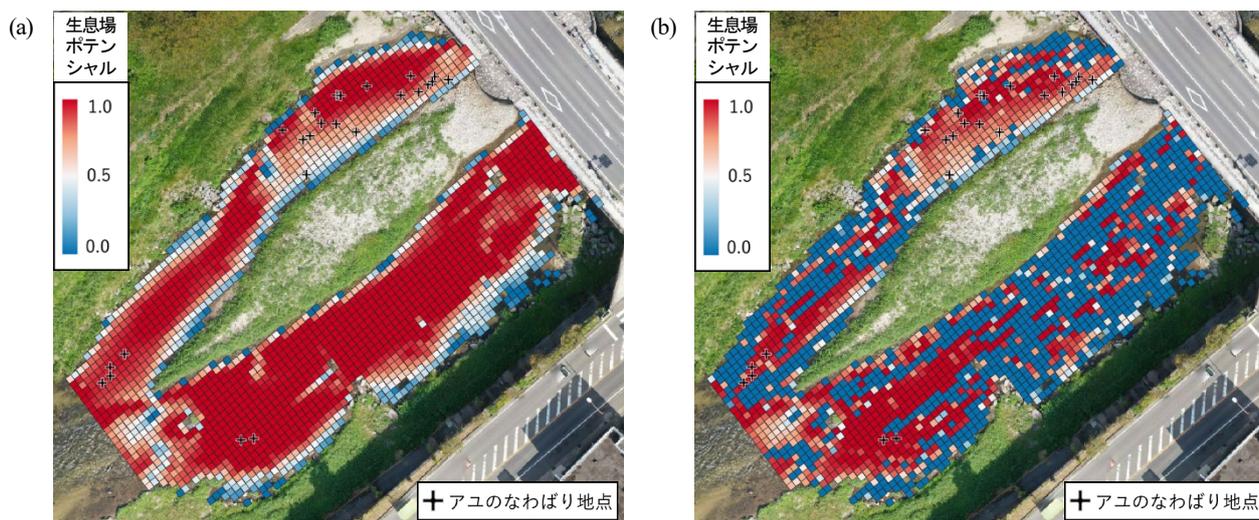


図-5 (a) CSI_{iv} (水理量) および(b) CSI_{ivb} (水理量と砂被度) の空間分布とアユのなわばり地点

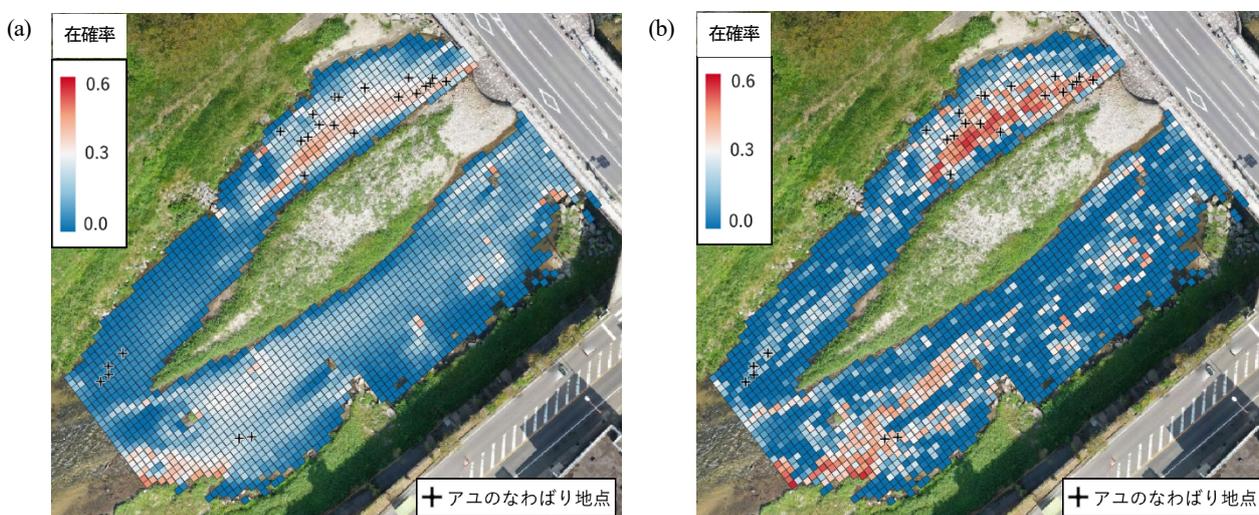


図-6 (a) GLM_{iv} (水理量) および(b) GLM_{ivb} (水理量と砂被度) の空間分布とアユのなわばり地点

表-1 (a) CSI_{iv} (水理量) および(b) CSI_{ivb} (水理量と砂被度) による判別結果

(a)		予測		正答率
		在	不在	
実測	在	21	1	感度: 95.5% 特異度: 28.3%
	不在	1559	615	
全体正答率				29.0%

※Youden indexによる閾値: 0.705

(b)		予測		正答率
		在	不在	
実測	在	21	1	感度: 95.5% 特異度: 63.5%
	不在	793	1381	
全体正答率				63.8%

※Youden indexによる閾値: 0.792

表-2 (a) GLM_{iv} (水理量) および(b) GLM_{ivb} (水理量と砂被度) による判別結果

(a)		予測		正答率
		在	不在	
実測	在	17	5	感度: 77.3% 特異度: 76.0%
	不在	522	1652	
全体正答率				76.0%

※Youden indexによる閾値: 0.197

(b)		予測		正答率
		在	不在	
実測	在	20	2	感度: 90.9% 特異度: 67.3%
	不在	711	1463	
全体正答率				67.5%

※Youden indexによる閾値: 0.150

当該のモデルでは考慮していないアユの餌である付着藻類の質、量的な違いが影響していることも拭いきれない。したがって、現地調査の回数を重ね、当該モデルの適用例を増やすことや、環境因子を加えるなど、さらなる検

証を進める必要がある。

次に、環境因子である水深、流速、砂被度に関するGLMの在確率と適性指数SIとの関係を図-7に示す。なお、調査領域で観測されたそれぞれの因子の最小・最大値に

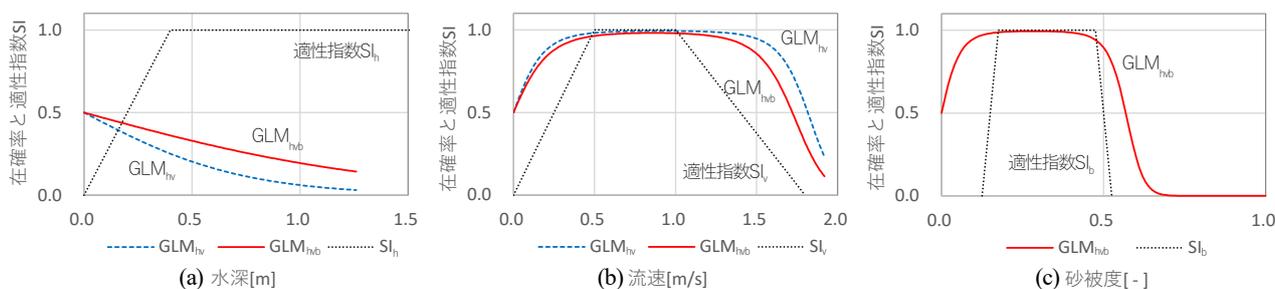


図7 (a)水深、(b)流速および(c)砂被度に関する GLM_{hv} と GLM_{hb} の在確率と適性指数 SI の関係 (SI_h と SI_v は田代・辻本¹¹⁾を参照)

に基づき、図示する範囲を設定した。その結果から、 GLM_{hv} 、 GLM_{hb} ともに、環境因子への応答性は類似し、水深は、その値が大きいほど在確率が低下、流速は、 GLM_{hv} が0.91m/s、 GLM_{hb} が0.86m/sに極大値を持つことがわかる。また、 GLM_{hb} の砂被度は、0.28に極大値を持った。それらを適性指数 SI と比較すると、GLMの流速と砂被度の分布は、 SI 曲線と類似することを認めた。他方、水深は、GLMと SI 曲線の分布は大きく異なった。これは、採餌環境である瀬の生息場適性を求めた本研究と、瀬だけでなく、休息環境の淵を含む既往研究¹¹⁾では、対象とする水深分布や、アユの行動モードの範囲（採餌、休息）が異なることから、水深に対する選好性に違いが生じたと推察される。また、 GLM_{hb} を例に、アユの在確率に与える環境因子ごとの影響度を、それぞれの説明変数がとる範囲（最小・最大値）に基づいて比較すると、水深：流速：砂被度＝1.0：2.8：14.1となり、砂被度の影響が相対的に大きいという結果になった。

5. 結論

本研究では、UAV空撮写真から容易に定量化が可能な砂被度を河床環境の指標とした上で、それと、なわばりアユの空間分布との関係を分析し、砂被度に対するアユの選好性を明らかにした。さらには、①水深および流速、②水深、流速および砂被度を説明量として、合成適性指数CSIモデルと、一般化線形モデルGLMを構築し、砂被度の考慮の有無による予測精度の違いから、生息場適性評価に河床環境（砂被度）を導入することの重要性を検討した。その結果を以下にまとめる。

- 1) なわばりアユが選択的に利用する河床環境は、砂被度（1m²あたりの河床面を覆う砂の被度）が0.15-0.50の範囲であり、0.20-0.25にピークを持つ、一峰性の分布になる可能性が示された。
- 2) 生息場適性評価の精緻化という点では、砂被度の考慮は、CSIモデルの特異度と全体正答率、また、GLMの感度の向上に貢献した。
- 3) 水深、流速および砂被度に対するGLMの応答性から、砂被度がアユの在確率に与える影響が、他の環境因子と比べて、相対的に大きいことがわかった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、建設環境研究所（研究当時：土木研究所）の北川哲郎博士ならびに、土木研究所の末吉正尚博士には有益な助言をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 宇佐美将平ら：対照的な河床環境を有する流路におけるアユの生息地適性評価モデルの構築とそれに基づく予測精度の比較による河床環境の重要性の検討，河川技術論文集，26，pp.361-366，2020。
- 2) Manly, B. F. J.: A model for certain types of selection experiments, *Biometrics*, 30, pp.281-294, 1974.
- 3) Chesson, J.: Measuring Preference in selective predation, *Ecology*, 59, pp.211-215, 1978.
- 4) Chesson, J.: The estimation and analysis of preference and its relationship to foraging models, *Ecology*, 64, pp.1297-1304, 1983.
- 5) 藤田光一：流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望，水工学に関する夏期研修会講義集，36B，pp.B.4.1-B.4.15，2000。
- 6) 小出博：日本の国土—自然と開発—(上)，東京大学出版会，pp.53-64，1973。
- 7) 秦夢露・知花武佳：急勾配大規模扇状地にみられる流路形態に流域地質が及ぼす影響，河川技術論文集，26，pp.229-234，2020。
- 8) 川那部浩哉：アユの社会構造と生産II—15年間の変化をみて—，*日本生態学会誌*，20，pp.144-151，1970。
- 9) 大城温ら：動植物の移植・移設先の選定を目的とした生物分布推定モデル3種の比較，環境システム研究論文発表会講演集，43，pp.153-158，2015。
- 10) Youden, W. J.: Index for rating diagnostic tests, *Cancer*, 3, pp.32-35, 1950.
- 11) 田代喬・辻本哲郎：河床攪乱頻度を指標とした生息場評価による瀬・淵構造の変質に関する考察，*水工学論文集*，46，pp.1151-1156，2002。
- 12) 中野晋ら：吉野川河口干潟の底生生物を対象としたHSIモデル作成ガイドラインについて，*土木学会論文集B2*，66，pp.1151-1155，2010。

(2021. 4. 2受付)