

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

DEVELOPMENT OF PHYSICAL HABITAT SIMULATION MODEL FOR AYU
CONSIDERING RIVERBED ENVIRONMENT IN CHANNEL WITH
CONSTRASTING RIVERBED ENVIRONMENT

宇佐美将平¹・八木澤順治²・溝口裕太³・小野田幸生⁴・田代喬⁵・宮川幸雄⁶
Shohei USAMI, Junji YAGISAWA, Yuta MIZOGUCHI, Yukio ONODA, Takashi TASHIRO and
Yukio MIYAGAWA

¹学生会員 埼玉大学 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
(現 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)

²正会員 博(工) 埼玉大学 大学院理工学研究科 (同上)

³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)

⁴非会員 博(理) 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)
(現 応用地質株式会社 応用生態工学研究所)

⁵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)

⁶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

For the evaluation of habitat suitability for fish, hydraulic data that can be easily observed have been often used. However, it has become essential to consider fish's preference for riverbed environments modified by artificial sediment supply in gravel-bed rivers. In this study, two types of evaluation methods were applied on the target river with different riverbed environment in the two diversion channels. These models are conventional evaluation method based on hydraulic quantity (*HSI*), and it taking into account the sand cover on stony riverbed as a riverbed environment in addition to the hydraulic quantity (*HSI_b*). The prediction accuracy was elucidated by comparing the habitat suitability index calculated from these models with the spatial distribution of the focal point of Ayu obtained from the field survey. The evaluation of habitat suitability taking into account the degree of sand coverage (*HSI_b*) was found to be able to evaluate the focal point of Ayu more accurately than the conventional method (*HSI*).

Key Words : *Habitat Suitability Index, PHABSIM, riverbed environment, ayu(Plecoglossus altivelis)*

1. はじめに

平成2年に「多自然型川づくり」の実施要領が通達されたことが一つの契機となり、治水機能や利水機能だけでなく、自然環境の保全や創出に配慮した河川整備が進められるようになった。特に、魚類に関しては、*IFIM* (*Instream Flow Incremental Methodology*) に代表される生息環境評価手法が提案されている。*IFIM*は欧米を中心に実用化されており、水深や流速に対する魚類の選好曲線

(*SI: Suitability Index*) に基づいて生息地適性が評価され、維持すべき河川流量の設定などに用いられてきた。近年では、河床環境がサケやマスの生息地、とりわけ産卵地を評価する上での重要性¹⁾が指摘されている。他方、人為的な土砂供給に伴う礫床河川への覆砂が魚類の生息密度を一時的に低下させること²⁾、また、本研究で対象とするアユについては、露出高(河床面から露出する石礫の高さ)を指標として、河床環境に対する選好性の違いが報告³⁾されている。

総合土砂管理(例えば、ダム下流河川での土砂還元)

が喫緊の課題であることを鑑みると、簡易な観測が可能のために生息地適性評価に多用される水理量だけでなく、人為的な土砂供給によって改変される河床環境への魚類の選好性を考慮することが不可欠であり、水理量および河床環境から成る生息地評価手法を構築し、河川管理に役立てる必要があると考える。

そこで、本研究ではダム下流河川を想定し、河床環境の改善を考慮した土砂還元事業に資するために、なわばりアユを対象として生息地適性評価モデルを構築することを目的とする。本稿では、対象河川で観測されたなわばりアユの空間分布と、①水深および流速、②水深、流速および河床環境から求めた生息地適性指数（*HSI: Habitat Suitability Index*）の空間分布とを比較することで、それぞれの評価手法の妥当性を確認する。さらには、それぞれの評価結果を比較することで、アユの生息地適性の評価において、水理量だけでなく河床環境を考慮することの重要性を検討する。

2. 現地観測

(1) 対象地点

愛知県豊田市を流れる矢作川水系巴川の図-1(a)に示す赤枠の領域（矢作川との合流点から上流約5km地点）を調査対象とした。調査領域の拡大図を図-1(b)に示す。この領域において現地観測を行い、対象とするアユの生息地適性評価を行った。当該河川は、河床の骨格材料である大礫とその間隙に一時的に堆積する細粒成分（粗砂）の大きくわけて2粒径集団から構成されている。さらに、出水に応じて河床環境が時空間的に変化することから、ダム直下の粗粒化した河川における、土砂供給に伴う河床環境の変化を模したものと考えることができ、本研究の成果を将来的にダム下流河川に適用することを想定した地点設定となっている。また、調査領域は中州を挟んで分流しており、北側流路（以下、流路N）と南側流路（以下、流路S）で河床環境が異なることを現地観測より確認している。概況を示すと、流路Nは河床面の砂被度（大礫が露出しておらず覆砂されたエリア）が小さい一方、流路Sでは砂被度が大きい傾向にある（図-2）。流路N、Sの平均的な河床縦断勾配はそれぞれ1/121、1/140と概ね同程度である。また、なわばりアユの空間分布を支配する一因である餌資源の付着藻類は、その空間分布についての詳細な分析は今後の課題であるものの、現地観測とUAV空撮画像（図-1）から、対象域の流路N、Sの双方において満遍なく繁茂していることが確認でき、アユの生息地に対する選好性を水理量および河床環境から議論できると判断した。

(2) 観測項目

調査領域において、水深と流速の観測（ADCP; Xylem

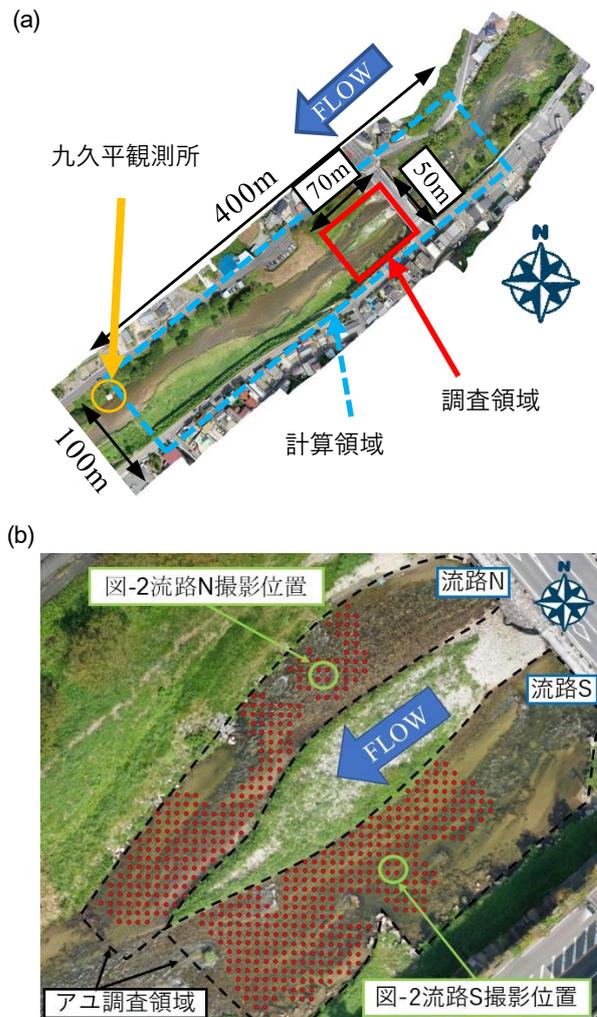


図-1 (a)対象域（計算領域：水理計算の領域）および(b)調査領域の拡大図（赤点群：ADCPデータ位置）



図-2 河床環境（左：流路N、右：流路S）

社製SonTek RiverSurveyor M9)、アユの分布調査、空撮(UAV; DJI社製Mavic 2 Pro)と河床材料調査をそれぞれ2019/6/10, 9/7-8, 9/19に実施した。各日の流況を九久平観測所(図-1(a))の水位で示すと、それぞれ平水時+5cm, 平水時+8cm, 平水時±0cm程度である。

水深と流速の観測は、調査領域における様々な流量規模での流れ場を再現するための水理解析モデルを構築するために、その検証データの収集を目的とした。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、水理解析に用いる計算格子の座標との整合性に

留意して記録した。また、UAVによる空撮画像は、計算格子の作成、付着藻類の繁茂状況の確認および、河床環境（覆砂域；河床面のうち砂に覆われた領域）の定量化に用いた。画像の解像度は約1.8cm/pixelである。この他、河床材料調査は粒度分布の把握を目的としている。骨格材料は現地で取得した画像からBASEGRAIN⁴⁾を用いて、また、間隙材料はふるいわけにより、それぞれ粒度分布を求めた。平均粒径 d_{50} は、それぞれ66.8mm、1.19mmである。

3. 生息地適性評価モデル

(1) 概要

本稿では、水理量として水深と流速、河床環境として覆砂域を用いて生息地適性評価を行い、これとなわばりアユの分布調査の結果とを比較した。水深と流速は、ADCPの観測値に基づき検証した水理解析モデルから、また、覆砂域は空撮写真から求めた。さらに、SI曲線から水深、流速、覆砂に対するアユの選好性を計算し、HSIを求めた。

(2) 水理解析

溝口ら⁵⁾が底生無脊椎動物の生息地評価を目的に構築した平面2次元解析モデルを参考にした。河川地形はUAV空撮写真からAgisoft PhotoScanを用いて作成したDEMとした。なお、水部は神野ら⁶⁾が提案した水面屈折補正係数を用いて補正した。定位しているなわばりアユの遊泳範囲が1m四方程度⁷⁾であることからメッシュサイズは1m四方、粗度係数は骨格材料の d_{50} を用いてJulienの式⁸⁾より $n=0.04$ とした。また、助走区間の確保と境界条件（九久平観測所）を入力するために、図-1(a)に示す計算領域を水理解析の対象とした。なお、2018年以降の流量は公開されていないため、2017年の水位・流量データからH-Q曲線を作成し、それを用いて対象期間の観測水位から流量を求めた。水理解析モデルの検証は、ADCPの観測値がある6/10を対象とした。また、アユの生息地適性を評価するために、平水時である9/19の流れ場を対象とした。これは、なわばりアユの分布調査を実施した9/7-8はやや増水していたものの、なわばりが長期的に維持（平水時の流れ場に依存）されることを考慮した条件設定である。

(3) 河床環境

対象とするアユは、間隙に堆積する土砂に対する大礫の露出の程度が小さいほど、採餌場所としての選好性が低いことが報告³⁾されており、このことから、河床の鉛直構造（大礫の露出高）を考慮した生息地の評価が望ましい。本稿では、その前段として河床面の砂被度として河床環境を捉え、さらにこれを覆砂域として面的に把

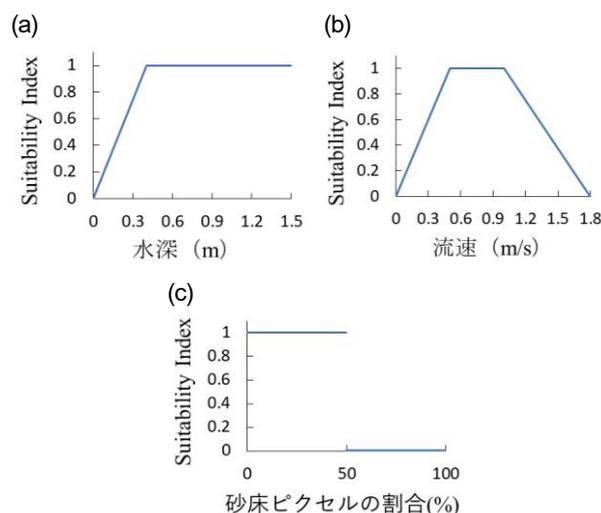


図-3 (a)水深、(b)流速および(c)砂被度のSI曲線

握することとした。なお、河床が砂面か否かは、画像処理を用いて調査領域（図-1(b)）のピクセルごとに求め、覆砂エリアとそれ以外に分類した。ここでは、調査領域のオルソ画像の色情報（RGB）に基づく機械的な判読を実施し、砂床だと目視で判断した複数のピクセルにおけるRGBの値を基に閾値を設定した。なお、陸部は画像処理の対象から除外した。

(4) 生息地適性の評価方法

生息地に対する選好性は、0から1のレンジで評価するSI曲線を用いて行う。水深と流速についてのアユのSI曲線は田代・辻本⁹⁾を参照した（図-3(a), (b)）。また、水理量に基づく生息地適性指数については次式を用いた。

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

ここに、 SI_h ：水深のSI値、 SI_v ：流速のSI値である。また、水理量に加えて砂被度を考慮した生息地適性指数 HSI_b は、次式のように定義する。

$$HSI_b = (SI_h \times SI_v \times SI_b)^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 SI_b ：砂被度のSI値である。なお、砂被度に関するSI値は、水理解析で用いるメッシュサイズと一致させる必要があるため、画像処理で砂床と判断されたピクセルが1m四方において50%以上を占めれば $SI_b=0$ 、50%未満を $SI_b=1$ とした。

4. 結果と考察

(1) 水理環境

6/10の流れ場の再現計算の結果を、横軸を観測値、縦軸を計算値としてグラフ化したものを図-4に示す。水深は概ね高い精度を確保しており、流速は微地形の影響によると思われる乖離が見られるものの、一定の再現性は確保できたと考える。

また、本稿ではアユのなわばり（長期的な定位）に着目するために平水時の流れ場を生息地適性評価の対象と

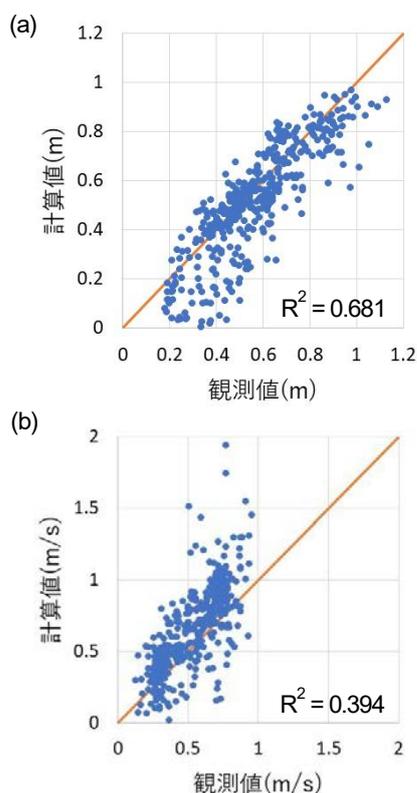


図-4 (a)水深および(b)流速の観測値と計算値の比較

する。その計算結果を図-5に示す。流路Nの水深は、当該流路の上流側と比較して下流側において大きい傾向にある。その一方で、流速は水深とは逆の傾向を示した。流路Sについては、水深、流速ともに平均的に流路Nよりも大きいことがわかる。

(2) 河床環境

画像処理による判読で砂床とされたピクセルを図-6に赤枠で示す。それぞれの流路の水部面積に対する覆砂エリアの割合は、図-7のように流路Nが約32%、流路Sが約42%となり、流路Sにおいて覆砂エリアの面積割合が高いことを確認した。本稿では、移動しにくい比較的大きな河床材料の表面には付着藻類が繁茂していることを現地観測で確認したことから、オルソ画像のピクセルごとの色情報によって機械的に砂床を抽出している。しかしながら、流路Sではなわばりアユの採餌場所として不適であるものの、表面に付着藻類が繁茂した小礫が、当該流路の中流部（図-6、橙枠）において広い面積を占めていた。したがって、流路Sは覆砂エリアに加えて、前述の小礫によって被覆されたエリアが存在することから、アユの生息地としての適性が高い大礫の露出エリアを過大に評価していることに留意したい。

(3) 生息地適性の評価結果

a) 水量による生息地適性評価

水深と流速から求めたそれぞれのSIおよび、それらを合成したHSIの空間分布を図-8と図-9に示す。また、図-

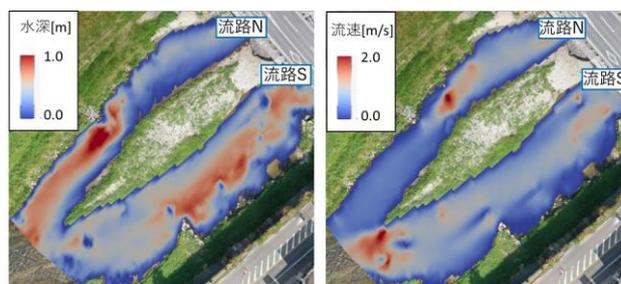


図-5 生息地適性評価に用いる水深および流速の計算値



図-6 画像処理による覆砂エリアの抽出

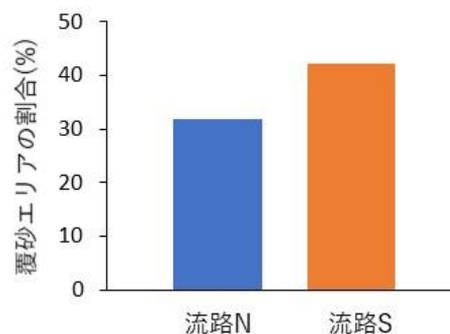


図-7 覆砂エリアの割合の流路N、Sでの比較

9にはアユのなわばり地点をプロットした。まず、水深SIと流速SIに着目すると、どちらも流路Sでは、巨礫が存在する位置とその背後を除いてSIが1のエリアが大部分を占めている。他方、流路Nでは部分的にSIの低いエリアがみられる。これは、図-8(a)の黒色実線の領域および、図-8(b)の赤色実線と黄色破線の領域の水深が小さい、流速が大きい、流速が小さいことが要因である。

次に、HSIとアユの分布を比較すると、HSIの値が大きいエリアにアユのなわばりが集中する一方、HSIの値が低いエリアには、アユはなわばりを形成していないことがわかる。とりわけ、流路Nでは、HSIの空間的なばらつきが大きく、当該流路のなかでも相対的にHSIが高いエリアにアユのなわばりが集中するようにみえる。

また、図-10(a)、(b)のように、流路Nでは高HSIエリアの割合は流路Sよりも20%程度低いものの、なわばり地点数は流路Sの3.3倍程度となっている。なお、高HSIとは、HSIの値が0.7以上とした。HSIも同様な定義である。

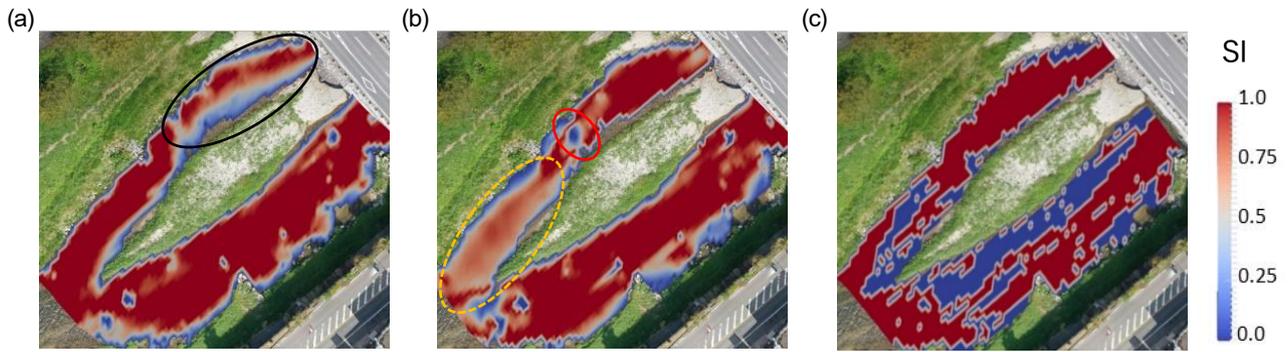


図-8 (a)水深SI (黒実線枠：水深小) , (b)流速SI (赤実線枠：流速大, 黄破線枠：流速小) および(c)砂被度SIの空間分布

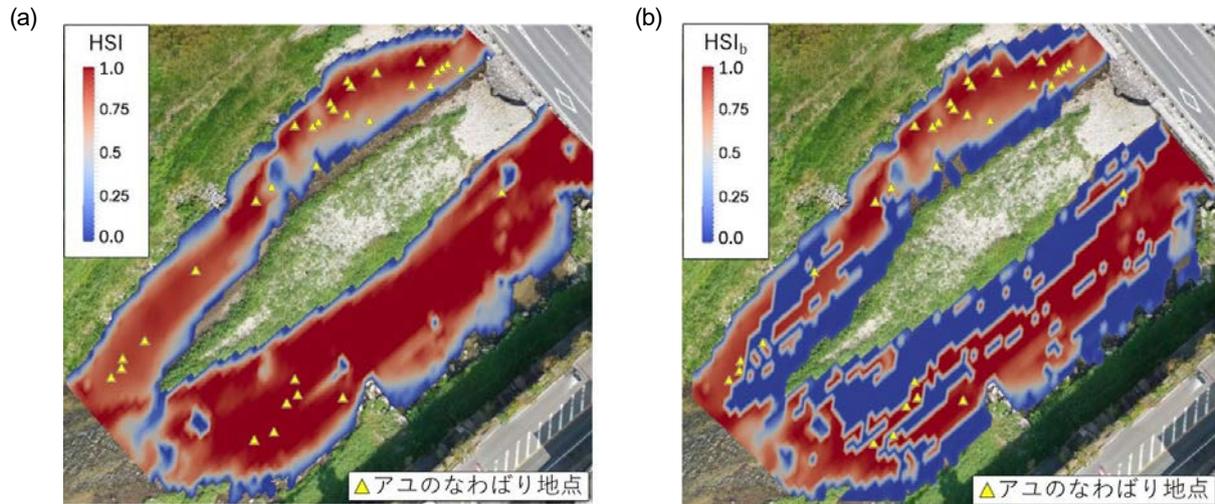


図-9 (a)HSI (水理量) および(b)HSI_b (水理量と砂被度) の空間分布とアユのなわばり地点

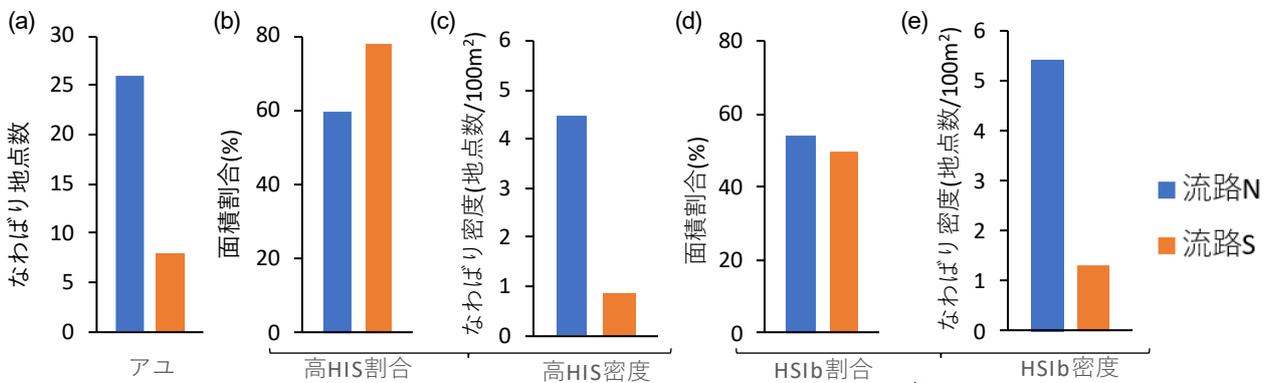


図-10 (a)なわばり地点数, (b)高HSIエリアの面積割合, (c)高HSIエリアのなわばり密度, (d)高HSI_bエリアの面積割合および(e)高HSI_bエリアのなわばり密度の流路N, Sでの比較

さらに、図-10(c)のように流路Nの高HSIエリアのなわばり密度は流路Sと比較して5.3倍大きい。この要因を分析するために、次項では流路N, Sの河床の砂被度の違いを考慮した上で、アユの生息地適性について論じる。

b) 水理量および砂被度による生息地適性評価

砂被度に関するSIを図-8(c)に示す。また、これを考慮した生息地適性指数HSI_bを図-9(b)に示す。これより、アユのなわばりは、全てがHSI_bの値が0でないエリアに存在することを確認した。流路Sでは、HSIの値がほとんど1で占めているにもかかわらず、なわばりアユが確認で

きなかったが、砂被度を考慮したHSI_bでは値が1の箇所が大きく減少していた(図-9(a), (b))。図-10(d)を見ると、高HSI_bエリアの割合は流路Nの方がわずかに大きい結果となった。図-10(b)と図-10(d)の比較より、河床環境として砂被度を考慮することで水深と流速から生息地適性を評価するよりも、実情に即した結果を得ることができたと考える。他方、図-10(e)には、高HSI_bエリアにおけるアユのなわばり密度を示す。高HSIエリアに比べ高HSI_bエリアが小さくなったことから、なわばり密度は大きくなった。HSI_bに基づく流路Sに対する流路Nのな

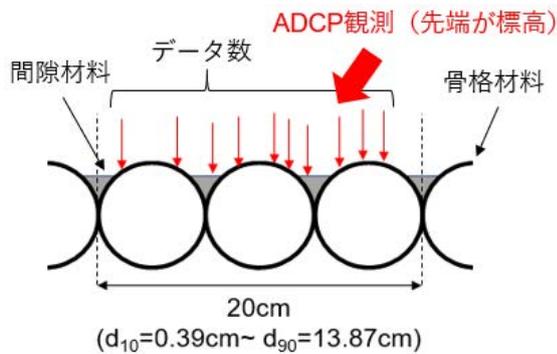


図-11 ADCP標高データに基づく河床凹凸の算出イメージ

表-1 河床凹凸指標 (標高データの標本標準偏差)

	平均値(cm)	不偏分散(cm ²)	サンプル数
流路N上流域	3.2	0.15	49
流路S中流域	2.2	0.01	36

わばり密度は4.1倍であり、*HSI*に基づくなわばり密度5.3倍と比較して、両流路間の密度差が小さくなったことから、生息地適性の評価に砂被度を考慮することは、予測精度の向上に貢献するものと考えられる。また、前述のように流路Sは、アユの採餌場所として不適だと考えられる河床面に小礫が堆積するエリアがその中流部 (図-6)に分布するものの、*SI*の値を0と評価していないため、高*HSI_b*エリアの面積割合を過大に求めていると考えられる。この可能性を明らかにするため、アユのなわばりが密集する流路N上流域と、高*HSI_b*であるもののなわばりが確認できなかった流路S中流域を対象として、河床鉛直構造(河床の凹凸)を調べた。2地点の河床鉛直構造は、ADCPを用いて取得した標高データが密集しているエリア (20cm方形区に3個以上)を対象として、標高の標本標準偏差を求めることで、河床の凹凸の定量的な指標とした (図-11)。なお、標高の変化が大きい水際部は集計対象から除外した。平均値と不偏分散をそれぞれの対象域において計算した結果を表-1に示す。ウェルチの検定より両者の平均値に有意差を確認した ($P<0.05$)。これは、現地調査とUAV空撮画像から判断した、大礫が分布しそれが露出する流路N上流域では河床凹凸が激しく、小礫が堆積する流路S中流域ではゆるやかという河床の鉛直構造の違いを意味するものであり、簡易的な指標である標高データの標準偏差から捉えることができたと考えられる。またこれは、砂被度だけでなく、アユの採餌場所として適さない粒径区分や、河床の鉛直構造を考慮することで、なわばりアユの生息地を精緻に予測できる可能性を示唆している。

今後は、河床面からの大礫の露出高を含む、河床の鉛直構造を考慮することで、アユの生息地適性の予測精度の向上に貢献することが期待され、検討を深める予定である。

5. 結論

本研究では、河床環境に違いがある2つの流路について、対象河川で観測されたなわばりアユの空間分布と、①水深および流速、②水深、流速および河床環境から求めた*HSI*の空間分布とを比較することで、それぞれの評価手法の妥当性を確認した。さらには、それぞれの評価結果を比較することで、アユの生息地適性の評価において、水理量だけでなく河床環境を考慮することの重要性を検討した。その結果と、今後の課題を以下にまとめる。

- 1) 水理量のみに基づく生息地適性評価は、適性域を過大に評価する傾向はあるが、アユのなわばり地点を説明することができた。
- 2) 河床面の砂被度を河床環境として考慮し、生息地適性評価を行った結果、水理量だけの評価よりもアユの生息適性域を絞り込むことができ、予測精度が向上することを確認した。
- 3) ADCPによる標高データを用いた分析より、河床の凹凸が大きい方が、なわばりアユの生息地としての適性が高いことが示唆され、大礫の露出高を含む、河床の鉛直構造を考慮することの重要性を確認した。

参考文献

- 1) Yao, W., Liu, H., Chen, Y., Zhang, W., Zhong, Y., Fan, H., Li, L. and Bamal, S.: Simulating Spawning and Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Habitat in Colorado River Based on High-Flow Effects. *Water*, Vol.9, No.2, 15p, 2017.
- 2) 小野田幸生, 萱場祐一: 石礫河床への大量の覆砂が魚類生息密度に及ぼす影響について, *河川技術論文集*, Vol.19, pp.525-530, 2013.
- 3) 自然共生研究センター: ダム下流に土砂を流す一健全な河床を目指して, *ARRC NEWS*, No.14, pp.2-4, 2017.
- 4) ETH Zürich: BASEGRAIN, (<https://basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html>), 2019.
- 5) 溝口裕太, 戸田祐嗣, 辻本哲郎: 摂食型および生息型に着目した河川底生動物動態モデルの開発, *土木学会論文集G (環境)*, Vol.71, No.6, II_171-II_181, 2015.
- 6) 神野有生, 米原千絵, Patrama, I. G. Y., 小室隆, 乾隆帝, 後藤益滋, 赤松良久: UAVとSfM-MVSを用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に関する検討, *河川技術論文集*, Vol.24, pp.19-24, 2018.
- 7) 川那部浩哉: アユの社会構造と生産II—15年間の変化をみて一, *日本生態学会誌*, Vol.20, No.4, pp.144-151, 1970.
- 8) Julien, P. Y.: *River Mechanics*. Cambridge University, 4334p, 2002.
- 9) 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*, Vol.46, pp.1151-1156, 2002.

(2020. 4. 2受付)