

# 以UAV掌握低水流路河床土砂覆蓋率及以之進行香魚棲地適性評估模型之精緻化

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<sup>1</sup>・宇佐美將平<sup>2</sup>・小野田幸生<sup>3</sup>・田代喬<sup>4</sup>・宮川幸雄<sup>5</sup>・中村圭吾<sup>1</sup>  
Yuta MIZOGUCHI, Shohei USAMI, Yukio ONODA, Takashi TASHIRO, Yukio MIYAGAWA  
and Keigo NAKAMURA

<sup>1</sup>正會員 博(工) 土木研究所 水環境研究小組 河川生態團隊  
(〒305-8516 茨城縣筑波市南原1-6)

<sup>2</sup>學生會員 學士(工) 筑波大學 大学院理工情報生命學術院系統情報工學研究群  
(〒305-8573 茨城縣筑波市天王台 1-1-1)  
(研究當時: 埼玉大學 工學部建設工學科)

<sup>3</sup>非會員 博(理) 應用地質株式會社 應用生態工學研究所  
(〒963-7722 福島縣田村郡三春町西方石275)  
(研究當時: 土木研究所 水環境研究小組 自然共生研究中心)

<sup>4</sup>正會員 博(工) 名古屋大學 減災連携研究中心 (〒464-8601 名古屋市千種區不老町)

<sup>5</sup>正會員 博(工) 土木研究所 水環境研究小組 自然共生研究中心  
(〒501-6021 岐阜縣各務原市川島笠田町官有地無地址)

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

物理棲地適性評估模型PHABSIM為評估魚類棲地保護常用方法之一，其選擇曲線 (Selectivity curve) 大量使用能簡易觀測到的水深與流速等水理量。但香魚攝食區這類河床形態為魚類分布關鍵因素時<sup>1)</sup>，評估棲地適性時不只水理量，也應評估香魚的河床環境偏好度因素。代表例子是水壩下游河川之土砂還原工程。這類土砂人為供給顯然會造成河床變化，因此，

若要推動維護河川環境之綜合土砂管理，須精確掌握土砂供給對生物的影響。

因此，本研究希望能用來監測堤壩下游河川所實施的土砂還原工程，建立納入領域性香魚河床環境偏好度的棲地適性評估模型。此外，除了運用空間解析度高且能短時間內達到規模調查的UAV之外，也嘗試地把容易以空拍照片完成量化的土砂可能覆蓋率 (覆蓋河床面之土砂比例) 作為河床環境指標而進行香魚覓食環境評估。此

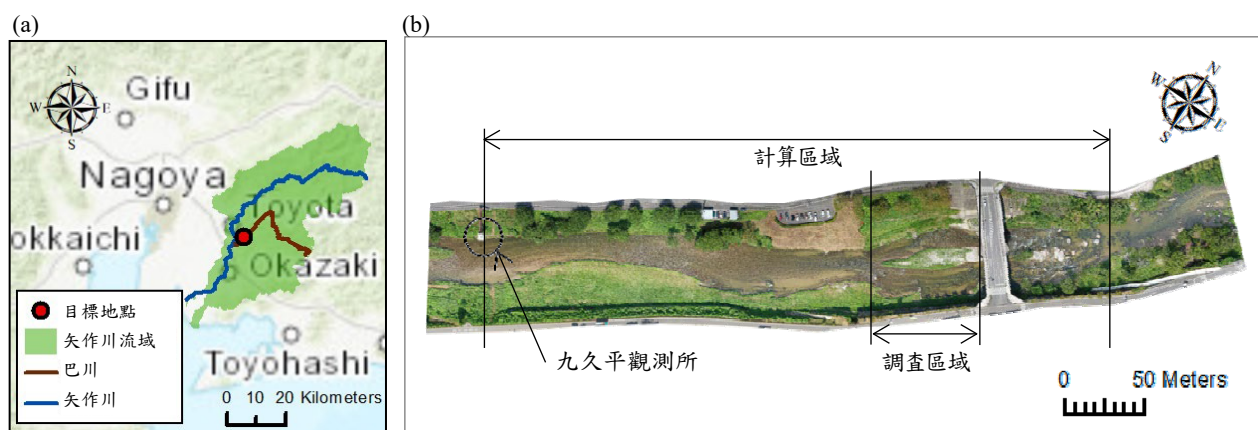


圖-1 (a)目標地點、(b)計算區域（水理演算）及調查區域（香魚定位地點與土砂覆蓋率）擴大圖

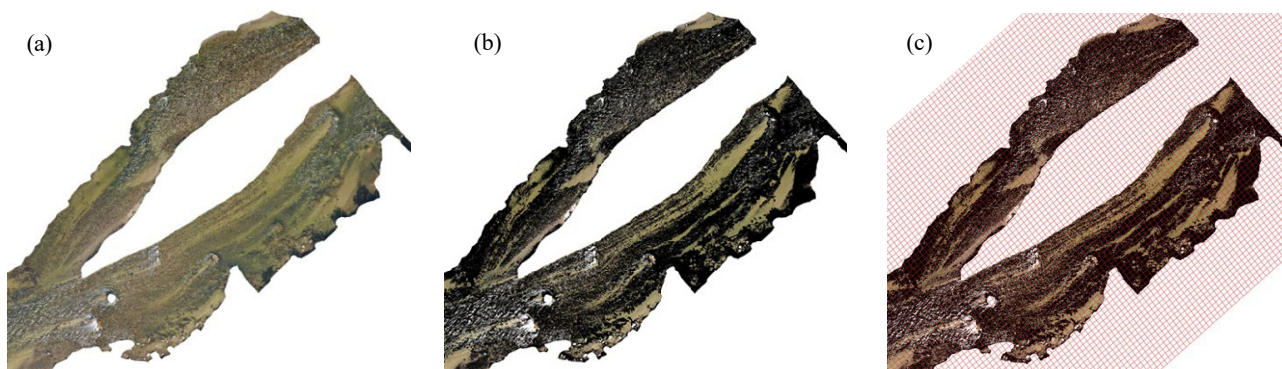


圖-2 利用影像處理計算土砂覆蓋率（(a)有水區塊的正射影像，(b)完成判讀的土砂畫素[除此之外以黑色標示]與(c)網格[1m四方]）

外，本論文集上一冊<sup>1)</sup>之中無法充分討論的香魚對土砂覆蓋率之偏好度，除了依據選擇指數（Manly index:  $\alpha_i$ ）<sup>2,3,4)</sup>予以定量化之外，還可依據其結果做成適性指數（Suitability Index: SI）。此外，作為棲地適性評估模型，本文建立各環境因素SI之積所得出的合成適性指數SCI（Compositer Suitability Index）模型與一般線形模型GLM（Generalized Linear Model），由此二處切入驗證棲地適性評估納入土砂覆蓋率的重要性。

## 2. 現地觀測

### (1) 目標地點

實施目標地點為流經愛知縣豐田市的矢作川水系巴川，如圖-1(a)所示。該地點位於與矢作川匯流點約五公里之上游，觀測河段之流程長度約七十公尺，該處河幅約五十公尺（含河心沙洲），實施水理、土砂覆蓋率與魚類調查（圖-1(b)）。倣照藤田<sup>5)</sup>的做法，該目標河川之河床材料（河床質）可區分為河床基本材料礫石（以下稱為「基質」）及其表層（護甲層）或孔隙所淤積土砂（以下稱為「孔隙材料」）二種粒徑分布。矢作川流域山地區域大部分覆蓋風化花岡

岩，特徵為受風化作用而細粒化（砂質壤土化），土砂粒徑約0.064-2釐米，容易安定<sup>6,7)</sup>。此外，花岡岩所產生的孔隙材料色調較基質明亮。香魚主要攝食環境之淺灘水淺，因此即使UAV空拍也能看出河床質地之色調差異，有可能可以判讀有水區域在內的孔隙材料。

### (2) 觀測項目

本研究運用宇佐美等<sup>1)</sup> 2019/6/10所實施之水深與流速觀測（聲學都卜勒流速剖面儀ADCP；使用Xylem公司製 SonTek River Surveyor M9）、9/7-8之香魚分布調查與9/19空拍（UAV；DJI公司製 Mavic 2 Pro）之結果，瞭解香魚對土砂覆蓋率的偏好度，據此建立棲地適性評估模型。另外，香魚的分布調查採取浮潛之潛水目測，依據香魚對其他個體有無領域防衛而判定香魚是否有領域性。有領域性香魚的位置利用丁壩狀構造物等為標記而在流程方向間隔五公尺所設置之測線，注意整合水理分析及影像分析所使用網格座標地記錄下來。水深與流速之觀測結果則用來驗證針對圖-1(b)之計算區域所建立水理分析的重現性；空拍所取得正射影像圖像，則用來實施土砂覆蓋率定量化。

### (3) 以影像分析掌握低水流路河床土砂覆蓋率

大部分用來掌握低水流路河床土砂覆蓋率的正射影像係在Agisoft公司Metashape軟體中輸入UAV空拍影像作成。此外，正射影像之解析度約為1.7cm/pixel。之後裁接陸地部分（圖-2(a)），然後，會因為水面波紋與陽光反射而看不出是河床的畫素，則設定依RGB顏色模型決定的閾值（臨界值）而予以排除。接下來針對剩餘的所有畫素實施RGB機械性判讀，將所有畫素區分為砂子及其他（圖-2(b)）。另外，土砂覆蓋率的計算方法為，依據領域性香魚游泳範圍約一米四方<sup>8)</sup>的習性設置一米四方網格，算出其中砂子畫素所佔比例（砂子畫素數目/網格內全部畫素數目）（圖-2(c)）。

### (4) 香魚土砂覆蓋率選擇性之分析

本研究定義土砂覆蓋率為0到1，整理出代表調查區域整體環境及香魚定位地點土砂覆蓋率頻率分布。土砂覆蓋率每0.05設定為一級（分成20級）。此外，香魚對土砂覆蓋率的偏好度，以選擇指數（曼力指數，Manly index:  $\alpha_i$ <sup>2,3,4)</sup> 評估之。通常 $\alpha_i$ 大於隨機利用的選擇指數 $1/m$  ( $\alpha_i > 1/m$ )，代表香魚會選擇利用該級位（亦即此為香魚喜好之棲地環境）。此外，選擇指數可以下式算出。

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

在此， $\alpha_i$ ：級位 $i$ 土砂覆蓋率的選擇指數， $r_i$ ：級位 $i$ 所屬香魚定位地點數目占香魚全部定位地點之比例， $n_i$ ：級位 $i$ 所屬河床環境占調查區域之比例， $m$ ：級位數目。

## 3. 棲地適性評估模型

### (1) 概要

本研究共建立兩個棲地適性評估模型，即CSI與GLM。第一個模型係以當作水理量處理的水深與流速二因子作為控制變數；第二個模型再加上土砂覆蓋率，計使用三個因子作為控制（自）變數。兩模型於建立後，比較其預測精度，據此確認環境因子納入土砂覆蓋率的重要性。另外，水理量與宇佐美等<sup>1)</sup>一樣，係以觀測結果所確認重現性的水理模型得出其計算值；土砂覆蓋率則使用2(3)影像分析所得出之觀測值。

### (2) 一般線性模型 (GLM)

此處的因變數為有領域性香魚存在或不存在之數據，控制變數值只有水理量 ( $GLM_{hv}$ )，如此就

可建立水理量與土砂覆蓋率 ( $GLM_{hvb}$ ) 二種模型。但偏好度有極值，因此兩種控制變數分別予以平方。另外，確認無香魚的網格數遠多於有香魚的網格數（約為有香魚網格之72.5倍），因此參考大城等<sup>9)</sup>的做法，為儘量反映多樣化環境特性且避免與調查區域全部重疊，因此從有香魚網格6倍之無香魚網格隨機選出，反覆操作完成20個模型（數字代表所有香魚不存在之網格所反覆選出的次數）。然後，將所有模型的參數平均而做成一個模型，以AIC (Akaike's Information Criterion) 決定最佳模型。此外，分析時使用Python模組之statsmodels0.11.1。

GLM之精度驗證依據有無香魚之答對率及ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線所算出的AUC (Area Under the Curve) 進行評估。此外，由不同網格算出香魚存在率而判定有無香魚時所需使用的截正值，採用「敏感度+特異度-1」最大點為閾值之「約登指數 (Youden index)<sup>10)</sup>」。此外，分析時使用Python模組sklearn0.22.1。

### (3) 合成適性指數 (CSI) 模型

由水理量算出 $CSI_{hv}$ 之後就可分別由以下公式算出水理量與土砂覆蓋率所得出的 $CSI_{hvb}$ 。此外，與水理量有關的香魚偏好度，使用田代與辻本<sup>11)</sup>所提出之水深與流速 $SI_h$ 、 $SI_v$ 曲線。另外，土砂覆蓋率依據2(4)所述分析法，制作 $SI_b$ 曲線。另外，結果如4(1)所示。

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

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

在此， $SI_h$ 、 $SI_v$ 、 $SI_b$ 分別是水深、流速、土砂覆蓋率之SI值。此外，針對水中部分，分別評估每1m四方網格之棲地適性。

另外，驗證CSI模型精度可援用3(2)所述GLM驗證法。目前定量性CSI模型驗證案例不多，但與中野等<sup>12)</sup>所提案從複數CSI模型選出高重現性最佳模型的方法類似，因此採用GLM驗證法。但CSI模型與GLM的結果同樣以0到1的方式標示，其值代表棲地潛在可能性，而與確定存在機率之GLM不同。因此，應注意GLM與CSI模型的重現性不適合直接拿來做比較。

## 4. 結果與考察

### (1) 香魚對土砂覆蓋率的偏好度

調查區域中確認34處完成領域性香魚定位。但因有的地點重覆，換算成網格數變成30處（1m<sup>2</sup>/網格，因此總面積30m<sup>2</sup>）。代表區域全域的整體環境及定位地點土砂覆蓋率之頻率分布，如圖-3所示。整體環境



之中低土砂覆蓋率的網格較多，覆蓋率小於0.5的佔1676m<sup>2</sup>，占調查區域（2204m<sup>2</sup>）約76%。低土砂覆蓋率代表礫石較多，推測以附著藻類為食餌的香魚偏好度會因此提高。但另一方面有定位到香魚地點的土砂覆蓋率，最多是0.20-0.25，覆蓋率整體而言0.00-0.50都有分布。此外，也確認少數地點土砂覆蓋率0.65-0.70及0.90-0.95。另一方面，選擇指數在土砂覆蓋率0.15-0.40、0.65-0.70、0.90-0.95時的值，比隨機利用時還大，代表選擇性地利用。

詳細分析土砂覆蓋率的空間分布與定位場所之關係發現，土砂覆蓋率大於0.65的地點主要位於河岸延伸出去丁壩狀構造物與巨石背後等土砂淤積的「流區裡側」，與無明顯土砂覆蓋「主流區」之邊界（以下稱為「流區裡側與主流區邊界」）。這種邊界定位到的地點不同網格設定方法所取得的土砂覆蓋率變成高低不一（網格內流區裡側所占比例參差不齊），或許應該特別注意整合所定位香魚之活動範圍與網格。因此，彙整流區裡側與主流區邊界除外22處定位到的地點頻率分布（圖-3）。結果發現除了土砂覆蓋率小於0.05以及大於0.65的極端地點之外，香魚偏好的土砂覆蓋率範圍是0.15-0.50，土砂覆蓋率分布最多的是0.20-0.25，呈單峰性分布狀態。然後參考流區裡側與主流區邊界之外的定位地點選擇性指標，作成以土砂覆蓋率0.15-0.50適性指數為1的SI<sub>b</sub>曲線（圖-4）。這部分主要是實施納入土砂覆蓋率因子的CSI模型棲地適性評估時派上用場。

## (2)棲地適性評估

以CSI模型及GLM進行棲地適性評估，結果如圖-5、6所示。此外，其判別精度如表-1、2所示。其中，(a)是只用水理量判別的結果，(b)是用水理量與土砂覆蓋率判別的結果。在此乃是以流區裡側與主流區邊界確認有定位到香魚地點之外的22處進行精度驗證。

第一次得到代表可能是香魚攝食環境棲地的CSI結果。由圖-5可知，CSI<sub>lv</sub>的所有調查區域幾乎都評估適性很高，納入土砂覆蓋率（CSI<sub>lvb</sub>）因素，便可更精準找到具高棲地適性區域。代表香魚存在或不存在的截正值CSI<sub>lv</sub>為0.705、CSI<sub>lvb</sub>為0.792時，確認代表有香魚地點預測精度之感度都達到95.5%高精度（表-1）。此外，無香魚地點預測精度特異度由CSI<sub>lv</sub>的29.0%改善為CSI<sub>lvb</sub>的63.5%，判斷有無香魚整體答對率則從29.0%提高到63.8%。

此外，以下是GLM所呈現棲地適性評估結果。

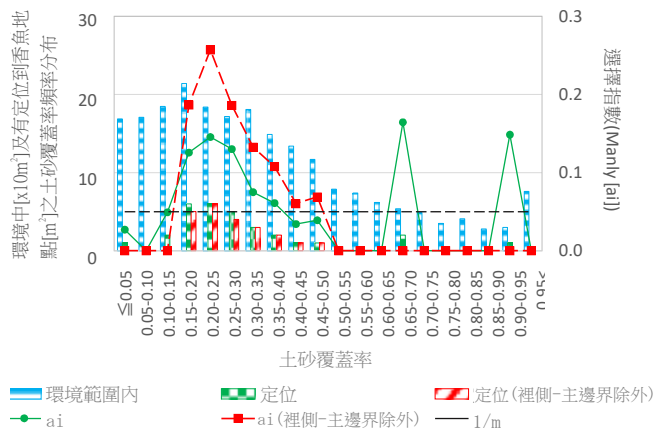


圖-3 依據環境範圍內及定位到香魚地點土砂覆蓋率頻率分布所算出的香魚土砂覆蓋率偏好度

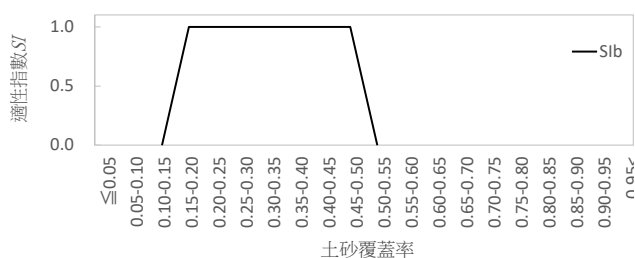


圖-4 香魚的土砂覆蓋率適性指數SI<sub>b</sub>

只考量水理量與土砂覆蓋率的模型，分別如下式所示。

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

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

在此， $h$ 、 $v$ 、 $b$  分別是水深、流速、土砂覆蓋率。

AUC 方面， $GLM_{hv}$  為0.760， $GLM_{hvb}$  為0.835，確認考量土砂覆蓋率已提高模型精度。由圖-6所示確實存在之比率可看出 $GLM_{hv}$ 呈連續性變化， $GLM_{hvb}$ 則形成空間離散分布，顯示不同網格所算出的土砂覆蓋率依離散分布狀況而定，即使CSI模型的CSI<sub>lv</sub>與CSI<sub>lvb</sub>也出現相同狀況。

此外， $GLM_{hv}$ 與 $GLM_{hvb}$ 之截正值分別算出0.197與0.150。此時感度與CSI模型一樣持續提高，特異度與整體答對率卻降低（表-2）。若要正確預測香魚喜好之攝食地點，可優先選擇納入土砂覆蓋率因子以提升感度的 $GLM_{hvb}$ 。但納入土砂覆蓋率因子卻降低特異度。原因是該調查之中無法定位到香魚的地點，GLM卻判別為有香魚。這類GLM預測很可能成為香魚攝食的地點，調查卻可能發現該地點無香魚。除此之外，該模型未納入香魚食餌附著藻類質量差異因子，也多少有影響。因此，有必要反覆進行現地調查、增加該

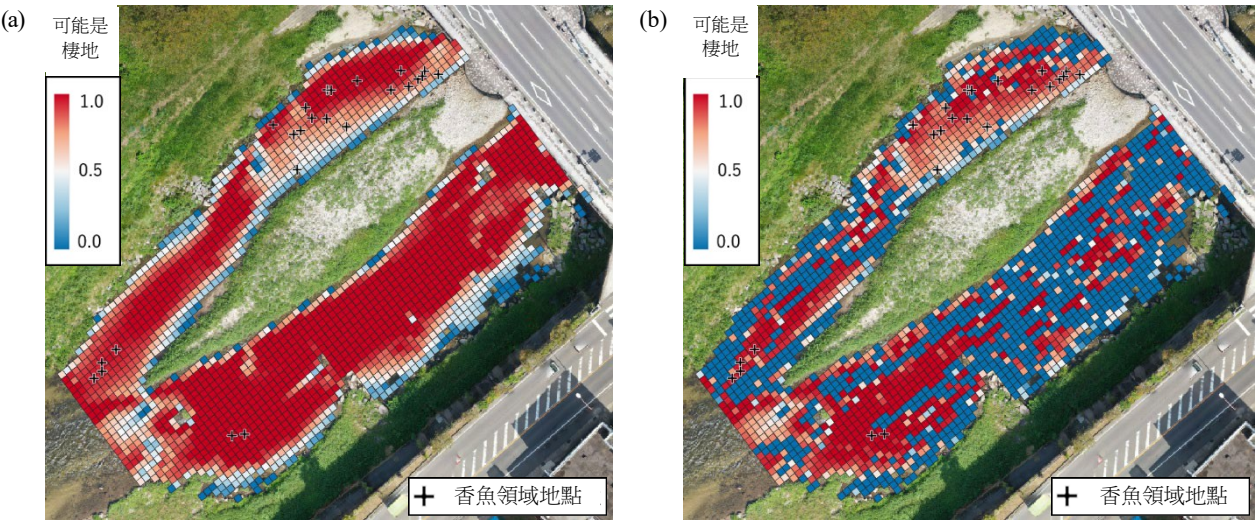


圖-5 (a)CSI<sub>hv</sub>（水理量）及(b)CSI<sub>hmb</sub>（水理量與土砂覆蓋率）之空間分布與香魚領域地點

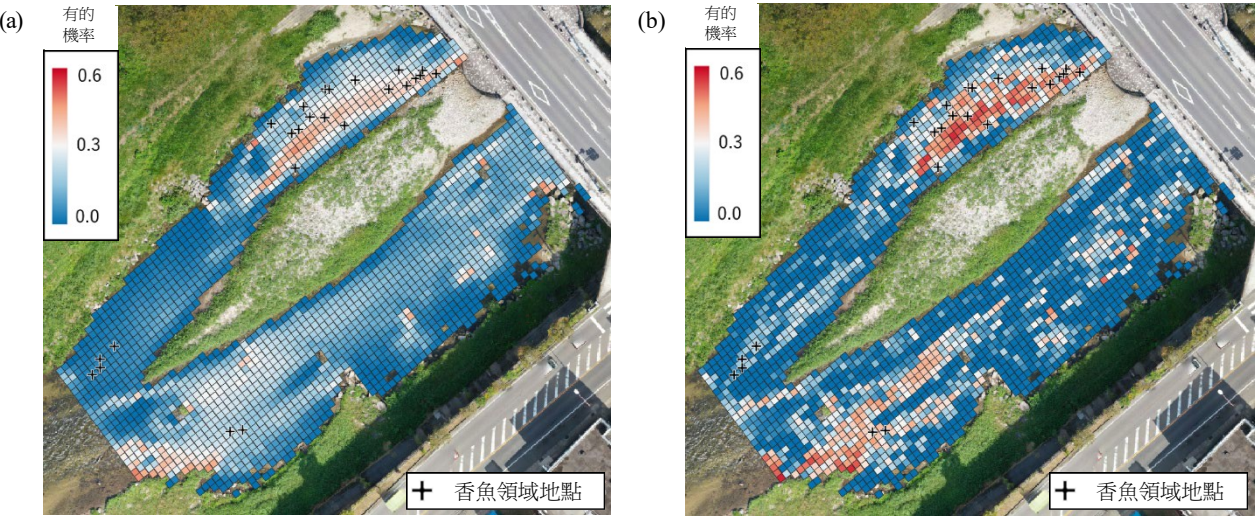


圖-6 (a)GLM<sub>hv</sub>（水理量）及(b)GLM<sub>hmb</sub>（水理量與土砂覆蓋率）之空間分布與香魚領域地點

表-1 以(a)CSI<sub>hv</sub>（水理量）及(b)CSI<sub>hmb</sub>（水理量與土砂覆蓋率）判別結果

(a)		預測		答對率
		有	無	
實測	有	21	1	感度：95.5%
	無	1559	615	特異度：28.3%
整體答對率				29.0%

(b)		預測		答對率
		有	無	
實測	有	21	1	感度：95.5%
	無	793	1381	特異度：63.5%
整體答對率				63.8%

※Youden index所得到的閾值： 0.705

※Youden index所得到的閾值： 0.792

表-2 (a)GLM<sub>hv</sub>（水理量）及(b)GLM<sub>hmb</sub>（水理量與土砂覆蓋率）實施判別的結果

(a)		預測		答對率
		有	不在	
實測	有	17	5	感度：77.3%
	無	522	1652	特異度：76.0%
整體答對率				76.0%

(b)		預測		答對率
		有	無	
實測	有	20	2	感度：90.9%
	無	711	1463	特異度：67.3%
整體答對率				67.5%

※Youden index所得到的閾值： 0.197

※Youden index所得到的閾值： 0.150

模型適用案例或加入環境因子等進一步做驗證。

其次，與環境因子水深、流速、土砂覆蓋率有關的GLM有香魚機率與適性指數SI之關係，如圖-7

所示。此外，依據調查區域所觀測到的個別因子最小與最大值設定圖示範圍。由此結果可知，GLM<sub>hv</sub>與GLM<sub>hmb</sub>對環境因子的回應性都類似，水深是值越



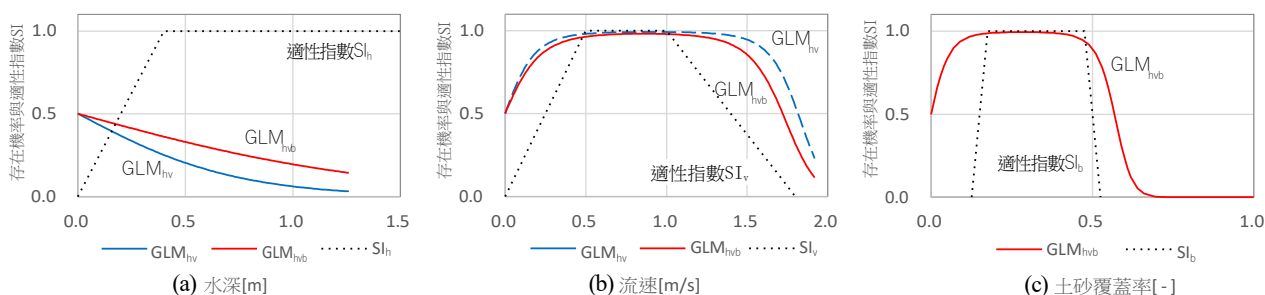


圖-7 (a)水深、(b)流速及(c)土砂覆蓋率相關GLM<sub>hv</sub>與GLM<sub>hvb</sub>之存在機率與適性指數SI之關係 (SI<sub>h</sub>與SI<sub>v</sub>參照田代與辻本<sup>11)</sup>)

大有香魚的機率越低，流速則是GLM<sub>hv</sub> 0.91m/s、GLM<sub>hvb</sub> 0.86m/s時取到極大值。此外，GLM<sub>hvb</sub>土砂覆蓋率在0.28時得到極大值。這些數值與適性指數SI相比可發現，GLM之流速與土砂覆蓋率分布類似SI曲線。另一方面，水深的GLM與SI曲線分布差異很大。推測這是因為探討攝食環境淺瀨棲地適性之本研究和過去不只淺瀨還探討休息環境深潭的研究<sup>11)</sup>在研究目標之有水深分布與香魚行動模式範圍（覓食、休息）之不同研究標的，可能也因此產生香魚不同水深偏好度。另外，以GLM<sub>hvb</sub>為例，依據不同控制變數所設定範圍（最小與最大值）而比較各環境因子對於有香魚機率之影響度時，發現水深、流速、土砂覆蓋率分別為1.0：2.8：14.1，顯示土砂覆蓋率之影響相對大。

## 5. 結論

本研究除了比較容易以UAV空拍照片完成量化的土砂覆蓋率作為河床環境指標之外，還分析了與有領域性香魚空間分布之關係，並且釐清香魚的土砂覆蓋率偏好度。另外，以①水深與流速、②水深、流速及土砂覆蓋率作為說明量而建立合成適性指數CSI模型與一般線性模型GLM時，有無納入土砂覆蓋率會造成不同的預測精度，因此討論了棲地適性評估導入河床環境（土砂覆蓋率）的重要性，討論結果如下。

- 1) 領域性香魚會選擇利用的河床環境為土砂覆蓋率（每1m<sup>2</sup>河床面土砂覆蓋之比率）0.15-0.50之範圍，最多的是0.20-0.25，可能呈現單峰性分布。
- 2) 就棲地適性評估精緻化這點來看，納入土砂覆蓋率因素可提升CSI模型特異度、整體答對率與GLM之敏感度。
- 3) 由水深、流速與土砂覆蓋率對GLM的影響可看出，土砂覆蓋率是香魚存在機率的主要環境因子。

謝辭：本研究實施過程中承蒙建設環境研究所（研究時任職土木研究所）北川哲郎博士及土木研究所末吉正尚博士諸多建議裨益良多，在此一併表達謝忱。

## 參考文獻

- 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り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 收件)

編譯：水土保持局技術研究發展小組

Research and Technology Development Team, SWCB, COA

December 2020

本文件之翻譯及轉載，均符合日本著作權法相關規定。