石川県於古川流域におけるトミヨ属淡水型の HSI モデルの構築

小谷直樹¹・一恩英二²・長野峻介³・泉 智揮⁴・上田哲行⁵Building of HSI Model for the Freshwater Type of Nine-Spined Stickleback (*Pungitius* sp.1) in the Oko River Basin, Ishikawa, JapanNaoki Kodani¹, Eiji Ichion², Shunsuke Chono³, Tomoki Izumi⁴ and Tetsuyuki Uéda⁵

Abstract: To evaluate the habitat and examine comprehensive conservation measures for the freshwater type of nine-spined stickleback (*Pungitius* sp.1) in the Oko River basin, Sika, Ishikawa, we developed a Habitat Suitability Index (HSI) model using weighted geometric mean formulas obtained by multiple linear regression analysis. The HSI values obtained by the model revealed that the habitat qualities in four of the watercourses were superior to those in other areas. The habitat unit (HU) values also showed that one watercourse and a pond were important habitats in terms of quality and quantity. The study showed that the HSI model is a practical tool in managing the habitat for this species. In the model test, significant regression formulas were obtained between the minimum values of population density and the minimum and averaged values of HSI for each water area in the study period.

Keywords: Nine-spined stickleback (*Pungitius* sp.1); Habitat suitability index; Habitat unit; Weighted geometric mean; Multiple linear regression analysis

1 はじめに

トミヨ属淡水型 (*Pungitius* sp.1, 以下トミヨと略記) は、背部に8~10本の棘を持つ体長4, 5cmの冷水性魚類であり、カムチャッカ半島、アムール川流域から朝鮮半島、北海道および本州東北・北陸地方に分布する(高田, 1987)。急流を好まず、平野部に生息することが多いため、分布の南限域においてその生息場所が扇状地の端から湧き出る低水温の湧水に依存することが多い(高橋・後藤, 2003)。

近年本州各県では住民団体や自治体などがトミヨの保護活動を行っているが、河川改修、圃場整備、井戸等の地下水の過剰使用等による湧水量の減少や枯渇、排水の流入、都市化に伴う水質の悪化などにより生息箇所の減少とともに生息個体数も激減していることから、本州の個体群がLP(絶滅のおそれのある地域個体群)として新たに環境省のレッドデータブックに掲載された(杉山, 2010)。石川県においても、手取川扇状地における1970年と1990年の調査を比較すると、50地点中30地点でトミヨが確認された1970年に対し、1990年では57地点中わずか6地点でしかトミヨが確認されず、個体数で比較すると702個体から18

個体と激減している(平井, 1992)。このような背景から石川県のトミヨは絶滅が危惧されており、石川県絶滅危惧I類および石川県希少野生動植物種に指定されている(石川県環境部自然環境課, 2009; 石川県環境部自然環境課, 2013)。また、現在石川県では、手取川水系の熊田川、安産川および米町川水系の於古川に通じる水路の2水系、3地区でトミヨの生息が確認されている(石川県淡水魚類研究会, 1996)。

トミヨを保全し、個体数の増加を図るためには、生息場を修復、あるいは保全することが必要であるが、これらを適切に行うにあたって、まずはその生息場を評価することが重要である。生物の生息場を質と量の面から評価する場合、Habitat Suitability Index (HSI) モデルを基本とするHEP (Habitat Evaluation Procedure; U.S. Fish and Wildlife Service, 1980) が用いられることが多い。研究分野においても、HSIモデルは様々な対象生物種の生息場評価に用いられてきた(例えば、小出水ら, 2005, 関根ら, 2007; 風間ら, 2007)。HSIモデルとは、環境要因(生存必須条件)ごとに0(まったく不適)から1(最適)の数値を返す数式あるいは文章で表現されるSI (Suitability Index) モデルを核としており、これらのSIモデルを統合することにより構築される(田中, 2011)。

田中(2011)によれば、日本では2005年12月時点で、80種(魚類27種)の生物種に対して、計178件のHSIモデルが公式に報告されている。このうち、レッドデータ種は13種であり、すでに野生絶滅しているトキ (*Nipponia nippon*) を対象とした適用事例も存在する。しかし、今のところ、トミヨに関するHSIモデルやSIモデルの適用事例は報告されていない。そこで、本研究は石川県於古川流域の農業水路やため池に生息するトミヨを対象とするHSIモデルを構築し、生息場の評価を行うことを目的とした。

¹ 石川県白山自然保護センター技師, Engineer, Hakusan Nature Conservation Center, Ishikawa Prefectural Government, Nu 4 Kinameri, Hakusan, Ishikawa 920-2326, Japan

² 石川県立大学生物資源環境学部准教授, Associate Professor, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonouchi, Ishikawa 921-8836, Japan (Corresponding Author) E-mail: ichion@ishikawa-pu.ac.jp

³ 石川県立大学生物資源環境学部助教, Assistant Professor, Faculty of Bioresources and Environmental Sciences, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonouchi, Ishikawa 921-8836, Japan

⁴ 愛媛大学農学部准教授, Associate Professor, Faculty of Agriculture, Ehime University, 3-5-7 Tarumi, Matsuyama, Ehime 790-8566, Japan

⁵ 石川県立大学名誉教授, Emeritus Professor, Ishikawa Prefectural University, 1-308 Suematsu, Nonouchi, Ishikawa 921-8836, Japan

2 研究方法

2.1 調査地

本研究の調査地は、石川県羽咋郡志賀町於古川流域にある農業水路および鷺池である(図 1および図 2)。農業水路は、5本の小排水路(図 2の水路1～5)と排水路(図 2の水路6と水路7)に分類される。水路1～5の下流端には排水機場と水門が設けられており、地区内の排水路の水位を調節している。また、水路6の下流端から80m上流に転倒ゲートが設けられており、灌漑期に用水の取水が行われている。水路の水面幅と延長は、表 1に示す。水路1と水路6の最上流部には面積約25aのため池である鷺池があり、池と水路は2つの潜孔付き全面越流型魚道で結ばれている(一恩ら, 2015)。鷺池を含む地域では、平成12～16年度の県営圃場整備事業末古地区の事業実施が契機になり、平成16年度の事業完了後も、石川県、石川県立大学、民間の専門家、志賀町土地改良区、地域住民が協力して、鷺池のトミヨの保護、周辺環境の保全、トミヨのための小規模魚道の調整とモニタリング、水生植物の試験移植などのフォローアップの取り組みが継続された(池田ら, 2008)。また、この羽咋郡志賀町のトミヨ生息地周辺はかつて広大な湿地帯であり、1980年に行われた大規模な区画整理事業によって湿地帯はすべて埋立てられた(石川県淡水魚類研究会, 1996)。

図 1: 調査地

表 1: 各水路の水面幅と延長 (m)

項目	水路1	水路2	水路3	水路4	水路5	水路6	水路7
水面幅	0.8-1.1	0.7-1.3	0.9-1.1	0.9-1.1	1.1-2.0	1.5-4.7	0.5-0.8
延長	850	400	500	410	290	980	780

2.2 調査方法

トミヨのHSIモデルを構築するため、トミヨの個体密度調査を実施した。また、モデルを構成するSI(Suitability Index: 適正指数)の算定のため、生息環境調査も同時に実施した。個体密度調査および生息環境調査は、2011年春(4、

5月), 夏(7, 8月), 秋(10月), 2012年春(3月), 夏(8月), 秋(9月)の計6回実施し、調査は、鷺池内に19～24地点、水路1に8～9地点、水路2と水路3に各4地点、水路4に3～4地点、水路5に3地点、水路6に9～10地点、水路7に1～5地点の調査地点を設定して行った(図 2)。

図 2: 調査地点と小評価区域

個体密度調査は、サデ網(三谷釣漁具店bl-s1, 間口1m, 網目3mm)を用いて各地点1m²のトミヨの採集を行い、個体数と体長を記録した。

生息環境調査は、水深、流速、水温、植生、底質の5項目について実施した(ただし、底質調査は2012年のみ実施)。水深は、鋼尺を用いて測定した。流速は、(株)ケネックの簡易型電磁流速計(表示器: VE100, 検出器: VET-200-10P)を用いて、各地点の水路中央部において水深の約6割の位置で測定した。水温は、(株)アイシーのデジタル携帯温度計サーモ1050を用いて、各地点の水深5cmの表層部の水温を測定した。植生と底質は目視で判別した。植生は、被度を0～100%を10%刻みで、底質に関しては、砂、シルト、コンクリート(堆積なし)に分類した。

2.3 HSIモデル

現地調査と文献調査から、環境要因ごとにSIを求めるために、SIモデルを作成した。SIとは適性度合いを、0(不適)から1(最適)までの数値で表す指数であり、SIモデルは評価種の生息条件を表す環境変数に対応して、SIを規定する。本研究では、水深、流速、水温、植生被度、底質のSIモデルを作成し、それぞれSI₁～SI₅と呼ぶこととした。

これら5つのSIモデルを統合し、HSIモデルを構築した。SIの統合方法は、算術平均法(arithmetic mean)、幾何平均法(geometric mean)、限定要因法(minimum function)、加算要因法(additive function)などいくつかの方法がある(田中, 2011)。水谷ら(2010)によれば、SIモデルの統合は幾何平均または重み付き幾何平均で行うことが多いとあり、本研究では重み付き幾何平均法を採用した。SI₁～SI₅の単純な幾何平均は(1)式のように表現されるのに対して、SI₂に重みをつけた場合の重み付き幾何平均は(2)式のように表現される。

$$HSI = \sqrt[5]{SI_1 \times SI_2 \times SI_3 \times SI_4 \times SI_5} \quad (1)$$

$$HSI = \sqrt[6]{SI_1 \times (SI_2)^2 \times SI_3 \times SI_4 \times SI_5} \quad (2)$$

本研究では重回帰分析を行い、AICによるステップワイズ変数選択を行って、選択されたSIに2乗の重みをつける方法を採用した。

調査のために、図2に示す小評価区域に水域を分割した。水路の小評価区域には、調査地点を1地点設置した。鷺池は、19～24の調査地点を設置したが、池全体をひとつの小評価区域として扱った。池、水路とも、個体密度、SI、HSIの算出は調査地点ごとに行った。水域ごとの評価は、水路では小評価区域の個体密度、SI、HSIの面積加重平均値を、鷺池では調査地点の個体密度、SI、HSIの算術平均値を用いて行った。

さらに、本研究ではHSIを用いてHU(Habitat Unit:環境価値)を算出することによって質と量の両面を評価することを試みた。HUの算出は以下の(3)式を用いた。HUは、生息場の各小評価区域の面積A(m²)を乗じているため、本研究ではm²の単位をとる。

$$HU = HSI \times A \quad (3)$$

3 結果と考察

3.1 個体密度調査

各水域におけるトミヨの平均個体密度と推定個体数をそれぞれ表2と表3に示す。推定個体数は、平均個体密度に面積を乗じて算出した。ただし、2011年春の鷺池の個体密度は、調査を実施しなかったため得られていない。

季節による推定個体数の変化は2011年と2012年で異なっていた。2011年は夏から秋に減少した水域が多かったのに対して、2012年は春、夏、秋にかけて個体数は大きな水域が多かった。水路1の個体密度の季節変動はほかの水路に比べて小さく、再生産が活発でない可能性が考えられた。水路3～6や鷺池では、個体密度の最大値と最小値の比は2.7～65.2と大きな値で、再生産が活発だと推定された。水路3は2012年にトミヨは採集されず、水路2、7においては6回の調査で一度もトミヨは採集されなかった。

調査水域において、水路6は6回の調査で常に個体密度が一番大きく、推定総個体数の69～88%を占めていた。

表 2: 各水域の平均個体密度 (個体/m²)

時期	水路1	水路2	水路3	水路4	水路5	水路6	水路7	鷺池
2011 春	0.38	0.00	1.84	0.69	2.12	4.28	0.00	N/A
2011 夏	0.39	0.00	0.00	6.32	13.69	14.42	0.00	1.75
2011 秋	0.28	0.00	0.67	1.09	6.99	9.48	0.00	1.21
2012 春	0.63	0.00	0.00	0.27	0.21	0.63	0.00	0.08
2012 夏	0.46	0.00	0.00	0.27	1.70	2.98	0.00	0.21
2012 秋	0.39	0.00	0.00	0.55	2.68	5.71	0.00	0.42

表 3: 各水域の推定個体数

時期	水路1	水路2	水路3	水路4	水路5	水路6	水路7	鷺池
2011 春	290	0	890	290	920	13,000	0	N/A
2011 夏	300	0	0	2,600	6,000	44,000	0	4,400
2011 秋	210	0	320	460	3,000	29,000	0	3,000
2012 春	480	0	0	110	70	1,900	0	210
2012 夏	350	0	0	110	530	8,900	0	520
2012 秋	300	0	0	220	840	17,000	0	1,000

3.2 SIモデル

現地調査で得られた生息環境データおよび文献調査の結果に基づいてSIモデルの作成を行った。SI₁(水深)、SI₂(流速)、SI₃(水温)、SI₄(植生被度)、SI₅(底質)を図3に示す。

水深については、トミヨの選好水深に関する文献が収集できなかったため、本研究の調査結果から得られたトミヨの個体密度と水深の関係を散布図に表し、水深が0.3m以上のSI値を1.0、水深0.0mのSI値を0.0と設定した。

塚本・梶原(1973)によると、魚類の巡航速度は体長の2～3倍であり、突進速度は体長の約10倍である。トミヨ成魚の体長を5cm程度と考えると、巡航速度は0.10～0.15m/s、突進速度は0.50m/sと算定される。流速のSI₂は、トミヨ成魚の巡航速度と突進速度を用いて、巡航速度0.10m/s以下が最適で1.0、突進速度0.50m/s以上を0.0とした。本研究では体長3cm未満のトミヨ未成魚(神宮宇ら, 1999)も多く採集されているが、流速のSI₂において成魚より小さい未成魚の巡航速度や突進速度は考慮していない。また、イバラトミヨの営巣場所の流速は0.04m/sを超えないことなどから(神宮寺ら, 2003)、トミヨの営巣場所および繁殖場所の流速条件も同様に0.04m/sを超えないと推定されるが、その流速条件も本研究のSI₂には反映されていない。今後、トミヨの成長段階や繁殖条件を考慮したモデルの構築が必要である。

平井・梅本(1991)では、トミヨの適温帯は8～20℃であること、手取川扇状地では5～25℃の範囲でしか生息が確認されていないことが報告されている。これらのことから、水温のSI₃は、4℃で0.0、8～20℃の間を1.0、25℃以上で0.0と決定した。

植生被度のSI₄は、植生被度調査とトミヨの個体密度調査の結果から、植生被度が0%の多くの調査地点でトミヨが採集されており、植生被度とトミヨの個体密度の散布図

より植生被度0%のSI₄は0.3とした。トミヨの営巣のためには水草が必要であることや(神宮宇・森, 2003), 被度と個体密度の散布図から被度20%以上のSI₄を1.0とした。

図 3: SI モデル

底質のSI₅に関しては、砂、シルト、コンクリートの3つのカテゴリーに分けた。本調査地では、砂底の調査地点において比較的大きい個体密度が得られていたため、砂を1.0とした。シルト底の調査地点においては、砂底に次ぐトミヨの個体密度を得たため、シルトのSI₅を0.9とした。また、

コンクリート底の水路においてもトミヨが採集されること、底に砂やシルトが堆積することによって生物の生息環境を造りだす可能性があることなどを考慮し、コンクリート底の水路で得られたトミヨの個体密度からコンクリートのSI₅は0.25と決定した。

対象とした古川流域のため池と農業水路では、図 3 に示したように、流速が0.1m/s以下の調査地点が多く、流速のSI₂が1.0と高い地点が多数存在していた。調査で得られたトミヨの個体密度と環境変数の関係についても、図 3 の散布図に示したように、水深は0.3m以上、流速はトミヨ成魚の巡航速度である0.1m/s以下、水温は15~20℃、植生被度は30%以上、底質は砂底において高い個体密度が得られた。

3.3 SIの統合

各調査地点の測定された環境変数の値と図 3のSIモデルを用いて、各地点のSI₁~SI₅の値を算定した。これらのSI値を説明変数として、個体密度を目的変数として、重回帰分析(AICによるステップワイズ変数選択)を実施した。AICは、たくさんの独立変数候補から少数の有用な独立変数だけを選ぶときの指標である(青木, 2009)。最小のAICを持つように選択された説明変数の標準偏回帰係数と調整済み決定係数を表 4に示す。

表 4: 重回帰分析結果

項目		春	夏	秋
標準偏回帰係数	SI ₁ (水深)	0.169		
	SI ₂ (流速)	-0.196*		
	SI ₃ (水温)	0.174*	0.213*	
	SI ₄ (植生被度)	0.188*	0.284**	0.371*
	SI ₅ (底質)			
調整済み決定係数		0.071**	0.119***	0.113*

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

重回帰分析は、各説明変数が目的変数をどの程度説明するかを明らかにするために、変数はすべて標準化して解析を行った。季節ごとに重回帰分析の結果に違いがあり、春季にはSI₁(水深)、SI₃(水温)、SI₄(植生被度)に、夏季にはSI₃(水温)、SI₄(植生被度)に、秋季にはSI₄(植生被度)に重みをつけることにした。春季のSI₁(水深)は有意な変数ではなかったが、AICを用いた変数選択で有用な変数として選ばれたので、重み付けに用いた。それに対して、春季のSI₂(流速)は説明変数に選択されたが、標準偏回帰係数の値が負であったため、重み付けには用いなかった。SI₂が負になる原因は、季節やライフステージによってSI₂が異なる可能性があることや、魚類の個体密度データが本来持っていると思われる、あいまいさなどが原因になっている可能性がある。表 4の重回帰分析の結果から、春、夏、秋のHSIは、次の(4)、(5)、(6)式の重み付き幾何平均式により、SIを統合して算定した。

$$HSI_{\text{spring}} = \sqrt[8]{(SI_1)^2 \times SI_2 \times (SI_3)^2 \times (SI_4)^2 \times SI_5} \quad (4)$$

$$HSI_{\text{summer}} = \sqrt[7]{SI_1 \times SI_2 \times (SI_3)^2 \times (SI_4)^2 \times SI_5} \quad (5)$$

$$HSI_{\text{autumn}} = \sqrt[6]{SI_1 \times SI_2 \times SI_3 \times (SI_4)^2 \times SI_5} \quad (6)$$

3.4 HSIによる生息場評価

各調査地点で算定されたHSIの水域ごとの季節変化を図4に、水域ごとのSIとHSIの平均値を表5に示す。以下、水域ごとにHSIやSIの傾向について説明する。

図 4: 各水域の HSI の変化

表 5: 各水域のSIとHSIの平均値

	SI ₁	SI ₂	SI ₃	SI ₄	SI ₅	HSI
水路1	0.97	0.96	0.94	0.89	0.98	0.93
水路2	0.93	1.00	0.65	0.72	0.85	0.69
水路3	0.97	0.99	0.95	0.56	0.93	0.78
水路4	0.89	0.98	0.91	0.93	0.99	0.88
水路5	0.86	0.99	0.92	0.83	0.97	0.86
水路6	0.99	1.00	1.00	0.91	0.97	0.96
水路7	0.97	1.00	0.83	0.36	0.25	0.54
鷺池	0.96	1.00	0.82	0.73	0.94	0.76

水路1では、HSIの季節変化が小さく、水路6に次ぐ、高いHSIが得られた(表5)。夏季にわずかにHSIの低下がみられるのは(図4)、水路1の下流区間の水温が夏季に20℃を超えているためである。水路1の下流区間では、調査期間を通じてトミヨはまったく採集されていない。水路1は上流端が鷺池と魚道によって結ばれており、鷺池から水路1に約5~24L/s(年平均14L/s)の湧水が供給されている(一恩ら, 2015)。このため、水路1の上流区間では夏季においても水温は20℃以下で、年間を通じてSI₃は1.0を保っている。また、水路1の全区間で除草や枯死によって、植生被度が低い地点が散見される。底質は、最下流部がシルトである以外は、主に砂で特に問題はない。

水路2の水温環境は、SI₃の平均が0.65で、全水域の中で最低である。2012年夏には、全調査地点で水温が25℃前後の値を記録し、このためにHSIが0.28と落ち込み、最もHSIの季節変化が大きい傾向がある(図4)。水路2は、夏季だけでなく春や秋にも水温が20℃を超えることがあり、SI₃が低下する。表5に示すように、水路2のHSIの平均は0.69と、水路7の0.53に次いで低かった。SI₄の平均も0.72と3番目に低く、SI₅も0.85と水路7に次いで低かった。

水路3~5は、水路2と同様に水田の間を流れる小排水路であるが水温環境は水路2と異なり、良好であった。水

路3は、植生被度が低いため、SI₄が0.56と水路7の0.36に次いで低かった。水路4と水路5は上流部に水深が小さい区間があり、SI₁がほかの水路に比べて低い傾向であった。水路3~5のHSIは、図4に示すように、水路6と比べると明らかに季節変動が大きいことが分かる。

水路6のHSIの平均は0.96であり、調査水域の中で最も高い値を持っていた。季節変動も、ほかの水域に比べて明らかに小さい(図4)。SI₁~SI₅も0.91~1.00の範囲にあり、特に問題となる項目はない。これらのことから、於古川流域のトミヨの生息水域の中で最も環境条件が良いのは水路6だと考えられる。それに対して、最もHSIの平均が低かったのは水路7の0.54である。水路7の底質はすべての調査地点でコンクリートと分類されており、SI₅は0.25になっていた。水温のSI₃は、水路2より良好で、鷺池とほぼ同等の値を持っていた。底質はコンクリートで植生がないため、SI₄は0.36と調査した水域の中で最低であった。

鷺池の底質はシルト~砂で、SI₅の平均は0.94と問題のない値であった。沿岸帯の植生被度は高いが、沖帯で低い傾向にあり、鷺池全体のSI₄は0.73にとどまっている。また、鷺池はこれまで水路1や水路6の最上流部で湧水を供給する水源だと考えられてきたが、流れのない水域であるために、表層部が日射によって温められやすく、SI₃の平均は0.82にとどまった。

表5に示したように、対象水域では、SI₁は0.86~0.99、SI₂は0.96~1.00と、水深と流速の環境はともに良好であった。水温環境は、水域ごとや水域内部において、差異があった。水路2や水路1下流部、水路7では、湧水の湧き出しがない可能性が考えられる。また、水路7は堆積土砂と植生がほとんどないコンクリート水路であったため、HSIの平均値は最低であった。

3.5 HU

各水域における2年間のHUの変化を図5に示す。ただし、2011年春の鷺池の調査データがないので、HUの算定は行っていない。2011年、2012年とも、春から秋にかけてHUが上昇している傾向が見られた。最もHUが高いのは水路6、次いで鷺池であり、この2つの水域がトミヨにとって質と量(面積)の両面で評価した場合に価値が高いことが明らかとなった。鷺池はHSIの平均値は0.76と低かったが、面積が25aと大きいので、ここでの環境修復がトミヨにとって重要な意味を持つ可能性が示唆される。

図 5: 各水域の HU の変化

3.6 HSIモデルの検証

HSIモデルを検証するため、表 2に示した個体密度と図 4に示したHSIの間で、15ケースの単回帰分析を実施した。表 5に示すように、2011～2012年に得られた水域ごとの個体密度の最小値とHSIの平均値(Case 14)および個体密度の最小値とHSIの最小値(Case 15)の2つの分析ケースにおいて p 値が0.05以下の有意な回帰式が得られた。

ある地域あるいは空間において、その生態系を壊すことなくある生物種が生存し続けられる最大限の生物個体数であるキャリングキャパシティー(環境収容力)とHSIの間に正の相関があるという大前提のもとにHSIモデルは成立している(田中, 2011)。

表 2に示したように、水路1～3と水路7以外は、大きな個体密度の変動が存在する。これは水路1～3と水路7では再生産が盛んでなく、それ以外の水域では活発に再生産が行われていると推定される。単回帰分析の結果は、繁殖期に一時的に大きくなった個体密度をモデルの検証に使うのではなく、生息環境条件に応じて小さくなった個体密度をモデルの検証に使うことが妥当である可能性や、再生産が活発な水路5や水路6では一時的にキャリングキャパシティーを超えた個体密度が得られている可能性を示唆している。

次に、Case14とCase15の散布図と回帰直線を図 6に示す。2つの回帰直線が原点を通らない理由としては、調査精度、SIの選び方、調査時期の問題が考えられる。水域ごとの個体密度は1～24m²の限られた面積の採集を行って得られているため、個体密度の小さい水域では、個体密度が0と算定される傾向がある。また、本研究では水深、流速、水温、植生被度、底質の5つのSIでモデルを構成したが、餌の多寡や溶存酸素量など、魚類生息に関係するその他の環境要因を導入することで、例えば、水路2, 3, 7などで、HSIが大きく低下する可能性がある。つまり、SIモデルの選び方が回帰直線に影響している可能性がある。また、本研究では、春、夏、秋の3つの季節の調査からモデルを構成している。今後、冬季の水温や植生被度など

のデータを手に入れば、各水域のHSIの平均値や最小値がより小さくなる可能性がある。本来原点を通るべき回帰式が負の切片を持っているのは、以上のような理由が考えられる。

図 6: 個体密度の最小値と HSI

表 5: 単回帰分析結果

Case	HSI	個体密度	n	回帰式	R^2	P
1	2011春と2012春の平均値	同左	8	$y = 3.42x - 2.09$	0.375	0.107
2	2011夏と2012夏の平均値	同左	8	$y = 12.5x - 6.75$	0.306	0.155
3	2011秋と2012秋の平均値	同左	8	$y = 7.72x - 4.56$	0.184	0.289
4	2011春の平均値	同左	7	$y = 6.38x - 4.05$	0.348	0.125
5	2011夏の平均値	同左	8	$y = 22.9x - 13.5$	0.299	0.161
6	2011秋の平均値	同左	8	$y = 6.60x - 2.98$	0.077	0.506
7	2012春の平均値	同左	8	$y = 0.855x - 0.481$	0.204	0.287
8	2012夏の平均値	同左	8	$y = 2.66x - 1.20$	0.267	0.190
9	2012秋の平均値	同左	8	$y = 5.74x - 3.54$	0.234	0.225
10	2011～2012の最小値	2011～2012の最大値	8	$y = 17.5x - 6.67$	0.377	0.106
11	2011～2012の平均値	2011～2012の最大値	8	$y = 26.3x - 16.3$	0.326	0.139
12	2011～2012の最小値	2011～2012の平均値	8	$y = 6.94x - 2.82$	0.389	0.099
13	2011～2012の平均値	同左	8	$y = 10.3x - 6.56$	0.330	0.136
14	2011～2012の最小値	同左	8	$y = 0.789x - 0.335$	0.596	0.025
15	2011～2012の平均値	2011～2012の最小値	8	$y = 1.31x - 0.871$	0.632	0.018

本研究におけるSIの導出は、野外調査の結果と既往文献に基づいて行った。平松ら(2003)と福田ら(2005)は、メダカの生息場選好性を、遺伝的アルゴリズムやファジィ推論を用いて精度良く推定する方法を提案している。トミヨのSIの導出に、遺伝的アルゴリズムやファジィ推論を用いることで、魚類の応答行動のあいまいさを組み込んだ、より精度が良いモデルの開発が可能になると考えられる。また、SIの不確実性がHSIやHUに与える影響を感度分析しておくことで、より頑健性の高いモデルの構築が可能になると考えられる。

さらに、水域間のトミヨの移動についても今後モデルに組み込むことが考えられる。ある水域の質は低くても、近隣に再生産が活発な質の高い水域があれば、その水域のトミヨの個体数は質の高い水域からの移入や反対に質の高い水域への移出によって影響を受ける可能性がある。一恩ら(2015)は、鷺池と水路1および鷺池と水路6の間に設置された魚道において、16ヶ月間で合計6,900個体のトミヨが鷺池へ遡上したことを報告している。今後、魚道によるトミヨの移動を含め、各水域間のトミヨの移動に関して、ネットワークSIなどの新たなインデックスを導入して各水域の質として考慮するモデルの検討も必要になると考えられる。

最後に、本研究のHSIモデルは、石川県の於古川流域で得られたデータのみに基づいて構築されている。今後、ほかの流域のモデルとの比較を行い、より汎用的なモデルを構築し、検証していく予定である。

4 まとめ

石川県羽咋郡志賀町の於古川流域に生息するトミヨ属淡水型の個体密度と生息環境の調査を行い、重回帰分析による重み付き幾何平均式を用いて、トミヨのための HSI モデルを構築した。モデルによって得られた HSI から水路 1, 4, 5, 6 の生息環境の質がほかの水域に比べて高いことが示された。また、HUから水路6と鷺池が質と量の両面で重要な生息場所であることが示された。本研究により、HSI モデルがトミヨの生息場所の環境管理を行うための実用的なツールとなることが明らかになった。また、モデルを検証したところ、調査期間中に得られた各水域の個体密度の最小値とHSIの平均値や最小値の間に有意な回帰式が得られた。

謝辞

本研究の実施には、石川県立大学学生の小林裕宜(現JA共済連石川)、山崎湧稀(現石川県公立学校教員)、水口尚也の3氏に現地調査とデータ整理において多大なるご協力を賜った。ここに記して、深甚なる感謝を表す。

引用文献

- [1] 青木繁伸 (2009): Rによる統計解析, 第6章 多変量解析, 6.1.2 変数選択, 株式会社オーム社, pp.146-149.
- [2] 福田信二・平松和昭・森 牧人・四ヶ所四男美 (2005): 農業用水路におけるメダカの生息場選好性のあいまいさに関する数理表現, 農業土木学会論文集, 239, pp.43-49.
- [3] 平井賢一 (1992): 手取川扇状地における淡水魚類の減少傾向, 日本海域研究所報告, 24, pp. 49-62.
- [4] 平井賢一・梅本浩照 (1991): トミヨの温度選択と季節変化, 金沢大学教育学部紀要(自然科学編), pp.1-9.
- [5] 平松和昭・福田信二・四ヶ所四男美 (2003): ファジィ推

論によるメダカの環境応答モデルの開発, 農業土木学会論文集, 228, pp.65-72.

- [6] 一恩英二・前田恭平・藤原洋一・長野峻介・上田哲之 (2015): トミヨ属淡水型のための潜孔付き全面越流型魚道のモニタリング, 日本雨水資源化システム学会誌, 20(2), pp.75-83.
- [7] 池田千也・草光紀子・細川正次 (2008): トミヨの生息場所保全活動のフォローアップ, 農業農村工学会誌, 76(2), pp.52-53.
- [8] 石川県環境部自然環境課 (2009): いしかわレッドデータブック(動物編)2009, pp.125-128.
- [9] 石川県環境部自然環境課(2013): 石川県指定希少野生動植物種の指定について, <http://www.pref.ishikawa.lg.jp/sizen/srdb/index.html>, (更新日:2013-07-22).
- [10] 石川県淡水魚類研究会 (1996): 石川県の自然環境シリーズ 石川県の淡水魚類, 石川県環境部自然保護課, pp.64-65.
- [11] 神宮宇寛・森 誠一 (2003): トミヨ属雄物型の生息場所としての水路と保全, トゲウオの自然史(多様性の謎とその保全), 北海道大学図書刊行会, pp.223-232.
- [12] 神宮宇寛・森 誠一・柴田直子 (2003): 維持管理作業がイバラトミヨの営巣環境に与える影響, 応用生態工学, 5(2), pp.169-177.
- [13] 神宮宇寛・近藤 正・沢田明彦・森 誠一 (1999): 小規模湧泉におけるイバラトミヨの生息と保全, 応用生態工学, 2(2), pp.191-198.
- [14] 風間 聡・松本 哲・沢本正樹 (2007): 数値地図情報ならびに水文モデルデータを用いたHSIモデルによる生物生息域の推定, 土木学会論文集B, 63(4), pp.323-337.
- [15] 小出水規行・竹村武士・奥島修二・相賀啓尚・山本勝利・蛭原 周 (2005): HEP法による農業排水路におけるタモロコの適性生息場の評価:千葉県谷津田域を事例として, 河川技術論文集, 11, pp.489-494.
- [16] 水谷正一・南 雄策・船川はるか (2010): HEPによる環境価値の評価に基づいた順応的管理, 農業農村工学会誌, 78(2), pp.117-120.
- [17] 杉山秀樹 (2010): 本州のトミヨ属淡水型, 改訂レッドリスト付属説明資料, 汽水・淡水魚類, 環境省自然環境局野生生物課, p.68.
- [18] 関根雅彦・後藤益滋・伊藤信行・田中浩二・金尾充浩・井上倫道 (2007): 生息場評価手法を用いたホテル水路の建設, 応用生態工学, 10(2), pp.103-116.
- [19] 高橋 洋・後藤 晃 (2003): mtDNA分子系統からみた東アジア産トミヨ属魚類の進化の歴史, トゲウオの自然史—多様性の謎とその保全—(後藤 晃・森 誠一編著), 北海道大学図書刊行会, pp. 74-89.
- [20] 高田啓介 (1987): トミヨ属魚類の遺伝的分化(水野信彦・後藤晃編), 日本の淡水魚類—その分布 変異, 種分化をめぐって—, 東海大学出版会, pp.135-143.
- [21] 田中 章 (2011): 新装版 HEP入門(ハビタット評価手続き)マニュアル, 朝倉書店, 266p.
- [22] 塚本克己・梶原 武 (1973): 魚類の遊泳速度と遊泳能力, 水産土木, 10(1), pp.31-36.
- [23] U.S. Fish and Wildlife Service (1980): *Habitat Evaluation Procedures (HEP): ESM102*, Department of the Interior, 123p.

この論文の公開の質疑または討議は2016年12月31日まで受け付けます。