

豊平川中流部におけるPHABSIMによるシロザケ 産卵環境の評価

ASSESSMENT OF THE SPAWNING ENVIRONMENT FOR CHUM SALMON AT THE MIDDLE REACHES OF THE TOYOHIRA RIVER BY USING PHABSIM

矢野雅昭¹・渡邊康玄²・矢部浩規³・渡邊和好¹

Masaaki YANO, Yasuharu WATANABE, Hiroki YABE and Kazuyoshi WATANABE

¹正会員 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 工博 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165 番地)

³正会員 博士 (工学) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

We surveyed the cross-sectional profile, bed materials, water permeability of the substrate, temperature of permeable water flow and distribution of spawning beds in the Toyohira River. Based on the survey results, two suitability criteria for salmon spawning habitat were developed for use in PHABSIM. One criterion, called "the 2nd suitability criterion," depends only on the use frequency of spawning beds. The other criterion, called "the 3rd suitability criterion," focuses on environmental bias. Also, normalized composite suitability index and selectivity index were used to examine physical factors for the spawning habitat in the areas surveyed. The results show that the 3rd suitability criterion was more effective in evaluating the distribution of the spawning beds than the other criterion. Additionally, 90% fine-particle size, water permeability of the substrate, temperature of permeable water flow and water depth were considered to be physical factors influencing the spawning habitats in the areas.

Key Words : Spawning Environment, Chum Salmon, PHABSIM

1. はじめに

北海道の河川に生息するシロザケ (*Oncorhynchus keta*) の漁獲量は、北海道が全国の8割以上を占め¹⁾、シロザケは地域にとって重要な水産資源となっている。そのため、河川整備においても、シロザケの産卵環境に配慮することが重要である。

シロザケは、尾びれで河床に直径約1m、深さ約50cmの窪みをつくり、そこに産卵し、直前部の砂利を掘って被覆する²⁾。産卵環境として、浸透流、浸透流の水温に特徴があり^{3,4)}、河床材料の粒度分布から算出されるFredle指数⁵⁾により、発眼卵の生存の影響を評価できることが指摘されている⁴⁾。また、産卵の前期群 (9～11月中旬) は伏流した河川水が湧出する個所を、後期群 (11月下旬～1月上旬) は地下水が湧出する個所を、それぞれ産卵場として利用することも指摘されている⁴⁾。

このようにシロザケの産卵環境には複数の物理環境が影響すると考えられるが、これらを考慮して産卵環境適地を客観的、定量的に評価した事例はない。産卵環境を物理環境から評価した研究として、河道掘削断面の検討のため、PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model)

によりアユの産卵場の評価が行われた事例がある⁶⁾。

PHABSIMは多項目の物理環境要素により環境を評価することができ、シロザケの産卵環境の評価においても、有効である可能性がある。

本研究は、シロザケの産卵環境に影響すると考えられる物理環境要素を用いて、PHABSIMによる産卵環境適地の評価手法を検討するものである。なお、本研究では、河床微地形に、より強く影響を受ける河川水由来の浸透流を利用するとされる、前期群⁴⁾を対象とする。

2. 調査および検討

(1) 調査河川

物理環境とシロザケの産卵環境の関係を確認するため、毎年シロザケの産卵が確認される北海道の豊平川で、現地調査を行った。豊平川は石狩川の一次支川で、流路延長72.5km、流域面積902km²の一級河川である。調査区間は、石狩川との合流点をKP0.0 (KP; 上流方向を正、単位km) として、図-1に示すKP11.8～13.05の区間を対象とした。なお、この区間の平均河床勾配は約1/420で、低水路幅は60～70mである。また本調査結果より、調査区間の50%粒径の中央値は87mmであることを確認している。

(2) 現地調査

河床地形、河道内物理環境、産卵環境の関係を把握するため、横断測量、河床材料調査、浸透流調査、浸透流水温・河川水温調査を低水路内で行った。各調査項目別の調査地点および調査月日を図-1に示す。

横断測量は、KP11.8～13.05の範囲の延長1.25kmにおいて、縦断間隔10mで行った。

河床材料調査の範囲は、KP12.88周辺に位置する橋梁周辺に護床工があるため、KP11.8～12.85の延長1.05kmとし、縦断間隔20mで横断測線を設定した。1横断測線あたりの調査数は、平水時水面下の主流部を概ね等分した4～5地点と、同測線上の砂州の水面上の河岸部1地点とした。河床材料は、河床下30cm程度までを採取した。粒度分析は、直径75mm未満の成分はふるい分け分析を行い、75mm以上の成分は現地で礫径を計測した。ふるい分け分析と礫径計測の結果は、同一の粒径加積曲線に取りまとめ、10%、25%、50%、75%、90%粒径を算出した。また、式(1)、(2)で表されるFredle指数⁶⁾を算出した。

$$f_i = d_g / s_o \quad (1)$$

$$s_o = \sqrt{d_{75} / d_{25}} \quad (2)$$

ここで、 f_i : Fredle 指数(mm)、 d_g : 相乗平均粒径(mm)、 s_o : ふるい分け係数、 d_{75} : 75%粒径(mm)、 d_{25} : 25%粒径(mm)である。

浸透流調査の地点設定は、河床材料調査の水面下の調査地点と同一地点とした。調査方法は、Baxter et al⁷⁾が考案した方法で行い、ピエゾメータの観測値より動水勾配を、水頭落下試験より透水係数をそれぞれ求め、これらの積から浸透流を算出した。

浸透流水温および河川水温調査の地点設定は、水面下の河床材料調査と同一地点とした。浸透流水温の計測は、河床内に水温計(ハンディロガー CHINO MR2041-U ±0.7℃)のセンサー部を20cm程度貫入して計測した。河川水温の計測は、水質チェッカー(東亜ディーケーケー WQC-22A ±0.1℃)を用いて、浸透流水温調査と同一地点において6割水深の位置で計測した。検討においては、浸透流水温と河川水温の絶対値よりも両者の差が重要であると考え、浸透流水温から河川水温を差し引いた水温差(以降、水温差)を用いることとした。

なお、水面下における調査地点の中には調査内容により流速や水深が大きいため、調査ができないものがあった。そのため、図-1に示すように調査項目が異なる箇所がある。

調査区間における産卵床分布の把握は、札幌市豊平川さけ科学館が、同区間で行っている調査結果⁸⁾の内、今回現地調査した年度のものを用いた。産卵床位置はGPSにより座標が計測されている。

(3) 流況解析

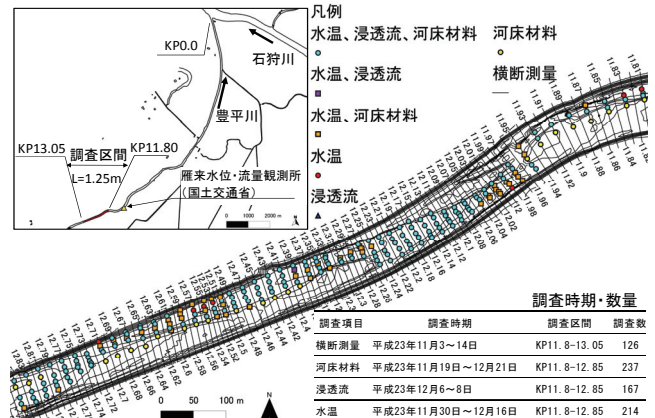


図-1 調査箇所図

表-1 i-RIC2.0 NAYS-2Dによる流況計算条件

項目	計算条件
ソルバー	Nays2D
格子サイズ	約2×2m
マンニングの粗度係数	0.035
乱流モデル	ゼロ方程式
移流項の差分法	CIP 法
下流端水位	等流水深

現地において、同じ流量条件で、河道内の流速・水深分布を調査することは、本調査区間の延長が長く、さらに日流量変動があるため困難である。また、産卵環境の把握においては、産卵床が造成された直後に、その位置の現地調査を行うことは困難である。そのため、流況解析により河道内の流速・水深分布および産卵床位置の流速・水深の推定を行うこととした。流況解析手法は、i-RIC2.0を用いて行い、解析ソルバーはNAYS2D⁹⁾を用いた。

河道内の流速・水深分布の推定には、図-1に示される調査範囲のやや下流に位置する国土交通省北海道開発局の雁来水位・流量観測所のデータを用い、前期群(9～11月中旬)を対象とした調査日の12:00に最も多い観測流量である6.4m³/sを用いた。

産卵環境に適した流速・水深の推定には、個々の産卵床が造成されたときの流量がそれぞれ異なると考えられ、本来なら個々の産卵床が造成されたときの流量により行う必要がある。しかし、この流量を正確に把握するのは困難であり、ここでは図-2内の表に示す各産卵床位置調査日の12:00の流量により、その調査時に確認された産卵床の流速・水深の物理環境の推定を行った。なお、1回の産卵床位置調査が、2日間にわたり行われている場合には、初日の流量を用いることとした。流況解析の設定条件を表-1にまとめて示す。

(4) 河道内物理環境分布と産卵環境の把握

PHABSIMによる検討を平面的に詳細に行うため、現地調査により得られた河道内の物理環境値を、GIS¹⁰⁾を用いた三角形分割補間法により平面的に補間し、セルサイズ2×2mの河道内物理環境分布を求めた。その後、GISにより産卵床位置の物理環境値を河道内物理環境分布から

抽出し、産卵床の物理環境として用いた。なお、ここで用いた産卵床は、図-2内の表に示す産卵床位置調査時の流量が、河道内の流速・水深分布の検討で用いた6.4m³/sと大幅に異なる11月1,2日に調査されたもの除いたものとした。また、河道内物理環境分布からの産卵床物理環境値の抽出は、各物理環境調査の範囲内に確認された産卵床のみで行った。

(5) 適性基準の検討と合成適合値の算出

PHABSIMにより産卵環境適地の評価をするため、各物理環境の適性値 (Suitability Index Value. 以降, SI) を算出する適性基準¹¹⁾を作成した。適性基準は、確認された産卵床の利用頻度分布に基づくもの¹¹⁾ (以降, SI2) を式(3)により作成し、環境的な偏りに対する補正を行ったもの¹¹⁾ (以降, SI3) を式(4), (5)にて作成した。さらに、作成したSI2およびSI3を、後述する方法で調整した適性基準を、それぞれSI4-2およびSI4-3とし、これを用いて河道内物理環境分布 (2×2mセル) の値からSIを算出した。なお、SI4-2, 3の作成については次章で述べる。

$$SI2_i = \frac{SN_i}{SN_{max}} \quad (3)$$

$$c_i = \frac{SN_i}{EN_i} \quad (4)$$

$$SI3_i = c_i / c_{max} \quad (5)$$

ここで、 $SI2_i$: 第2種適性基準, SN_i : 産卵床の確認数, SN_{max} : SN の最大値, $SI3_i$: 第3種適性基準, EN_i : 河道内物理環境分布のセル数, c_{max} : c の最大値である。なお、添え字のiは、ある物理環境の数値帯iに属するものであることを表す。これらの適性基準により得られるSIは、値が0～1の指標で、値が大きいほど産卵環境に適していることを表す。

SI4-2, 3により算出されたSIから、式(6)により合成適性値 (Composite Suitability Index Value. 以降, CSI)¹¹⁾を、全ての物理環境要素の値が存在するセルで算出した。なおこの面積は、物理環境調査として最も調査範囲が広い、河床材料調査の約9割の範囲である。

$$CSI = SI_a \times SI_b \times SI_c \quad (6)$$

ここで、 CSI : あるセルの合成適性値, SI : 適性基準 (SI4-2 or 3) から得られたあるセルのある物理環境 (a, b, c...) の適性値である。

(6) 産卵環境に影響する物理環境要素の検討

適切な物理環境要因が何であるかを把握するためには、CSIの分布と産卵床分布の関係を比較することが有効と考えられる。しかし、CSIは物理環境要素の数が多くなるほど低下しやすく、物理環境要素の数異なるものから算出されたCSIは、単純に比較できない。そこで、本研究では式(7)により、CSIを正規化 (Normalized CSI.

以降, NCSI) することとした。そして、産卵床位置のNCSIを河道内のNCSI分布より抽出し、式(8)に示す選択指数¹²⁾を用いてNCSIと選択指数の関係を検討した。NCSIの河道内分布が産卵環境の説明に適切であれば、NCSIの階級 (範囲: 0.0～1.0, 間隔: 0.1) が高いほど、選択指数が増加し、概ね比例関係を示すものと判断される。

$$NCSI = \frac{CSI}{CSI_{max}} \quad (7)$$

$$\widehat{w}_i = o_i / \pi_i \quad (8)$$

ここで、 $NCSI$: 正規化したCSI, CSI_{max} : 合成適合値の最大値, $\widehat{w}_i$: 選択指数, o_i : ある階級iのNCSIに属する産卵床数の全産卵床数に対する割合, π_i : ある階級iのNCSIに属する河道内のセル数の全セル数に対する割合である。

適切な物理環境要素の検討方法は、考えられる全ての物理環境要素を組み合わせたケースと、そこから一つの物理環境要素を取り除いたケースとで、NCSIと選択指数の関係がどのように変化するかを比較することにより行った。例えば、ある物理環境要素を取り除き、選択指数の最大値が変わらないか増加する場合や、NCSIと選択指数が比例関係となる場合、その物理環境要素は、産卵環境の評価に寄与しないと考えた。

3. 調査および検討結果

(1) 河床地形と産卵床の分布

横断測量から得た河床地形から、図-2にみられるように調査区間内に3個所の砂州A～Cが確認され、この砂州の前縁線付近に多数の産卵床が確認された。産卵床位置調査において、確認された産卵床数を図-2内の表に示す。

(2) 産卵環境の適性基準

SI2, 3をそれぞれ求め、図化したものを図-3に示す。SI2, 3は、横軸に対して滑らかではなく、凹凸があり、そのまま使用することができないと判断される。このため、次に述べる方法でSI4-2, 3を作成した。

10%粒径のSI2, 3の最大値は、それぞれ10～20mm, 70～80mmであった。Terzaghiの式では透水係数は10%粒径の2乗に比例するため¹³⁾, 10%粒径が大きな数値であるほど産卵環境に寄与することが考えられる。そこで、SI4-2, 3では、SI2, 3の最大値より大きい数値帯のSIは1.0とした。またSI4-3は、SI3の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。これらSI2, 3, SI4-2, 3を図-3aに示す。

河床材料の粒径としてよく用いられる50%粒径のSI4-2, 3は、図-3bに示すようにSI2, 3の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。

90%粒径のSI2, 3の最大値は、それぞれ120～130mm, 60～70mmであった。90%粒径は粒径分布の大きい成分を表すもので、粒径が大きいほど河床を掘るのに大きな力を要すると考えられ、産卵床造成の難易性の指標であると考えられる。そのため、SI4-2, 3ではSI2, 3の最大値より小さい数値帯のSIは1.0とした。またSI4-3では、SI3の

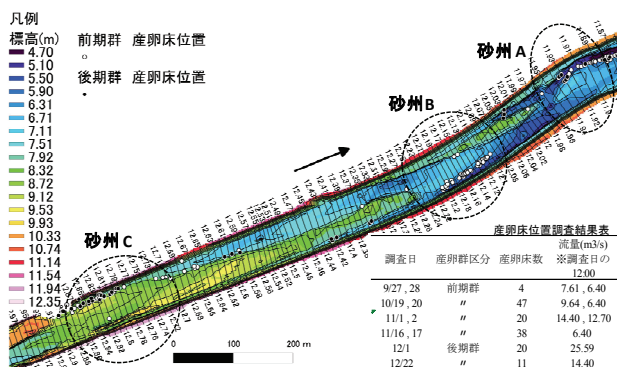


図-2 河床地形と産卵床位置

凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。これらSI2, 3, SI4-2, 3を図-3cに示す。

Fredle指数のSI2, 3の最大値は、それぞれ20~30mm, 5~10mmであった。既往文献では2.5~4.8mmに生存率が低下する閾値があるとされている⁴⁾。そのため、SI4-2, 3では、図-3dに示すとおり5~10mm以上のSIを1.0とした。

浸透流のSI2, 3の最大値は、それぞれ0.00~0.01cm/s, 0.06~0.07cm/sであった。浸透流は産卵環境との関係が指摘されており^{3,4)}、これが大きいほど産卵環境に寄与することが考えられる。そこで、SI4-2, 3ではSI2, 3の最大値より大きい数値帯のSIは1.0とした。またSI4-3では、SI3の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。これらSI2, 3, SI4-2, 3を図-3eに示す。

水温差のSI2の最大値は、0.0~0.5℃であった。産卵環境では、河川水よりも浸透流の水温の方が高い^{3,4)}、適性基準の検討には、さらに積算暖度が孵化や浮上の必要量に達する時期を考慮して検討する必要性も考えられる。しかしここでは、検討の第1段階として水温差が大きいほど産卵環境に寄与すると考え、SI4-2ではこれより大きい値のSIを1.0とした。また、SI3の最大値は3.0~3.5℃であったが、前期群が利用する浸透流は、河川水が伏流し湧出するもので、水温は河川水よりわずかに高いものである⁴⁾。そのためSI4-3では、0.5~1.0℃でSIを1.0とし、これより高い数値帯についても1.0とした。これらSI2, 3, SI4-2, 3を図-3fに示す。

流速のSI2, 3の最大値は、それぞれ0.0~0.2m/s, 1.4~1.6m/sとなり、SI4-2, 3は、図-3gに示すとおり、凸部の結び、凹部を埋めたSI分布とした。

水深のSI4-2, 3は、SI2, 3の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。また、0.0~0.1mの数値帯は、水深が浅く、シロザケの遊泳が困難であると考え、SIを0.0とした。これらSI2, 3, SI4-2, 3を図-3hに示す。

(3) 産卵環境の評価に寄与する物理環境要素の検討

各要素を一つ取り除いた際のNCSIに対する選択指数の増減の関係から、産卵環境に関わる物理環境要素の検討を行った。

(a) SI4-2による物理環境要素の検討

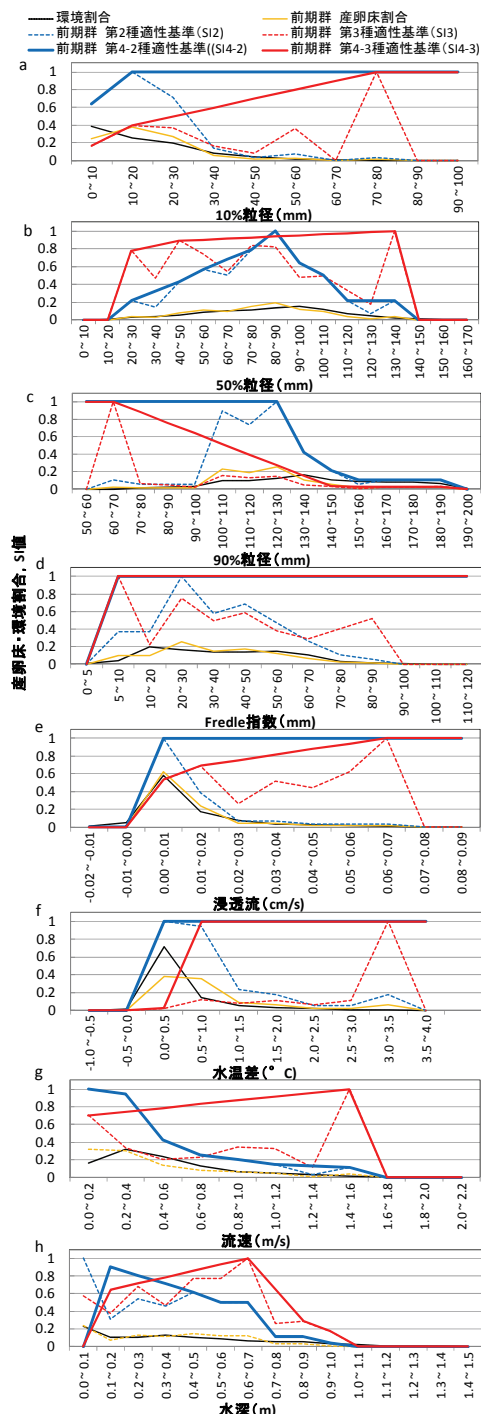


図-3 シロザケ前期群の適性基準

SI4-2の全ての物理環境要素を用いたケースと、そこから物理環境要素を一つ除いたケースの、NCSIと選択指数の関係の変化を確認した結果を図-4aに示す。その結果、Fredle指数、浸透流のいずれかを除いた場合は、ほとんど選択指数には変化が見られなかった。このことから、Fredle指数、浸透流は、産卵環境の評価に大きく寄与していないと考え、これらを除いて同様の検討を行った。図-4bにその結果を示すが、10%粒径、50%粒径、90%粒径、水温差、流速、水深の内、どれを除いてもNCSIの低下がみられた。このことから、これらの物理環境要素が、本調査地でのSI4-2による産卵環境の評価に最も適

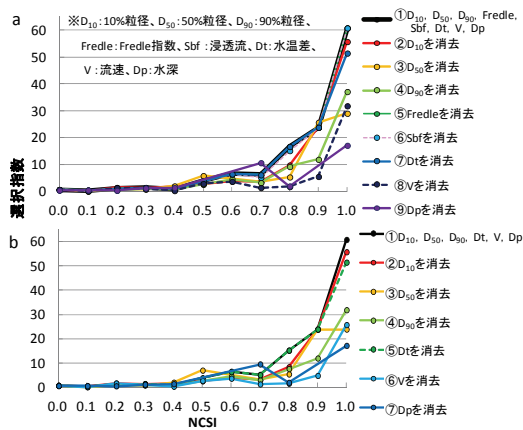


図-4 第4-2種適性基準によるNCSIと選択指数の関係

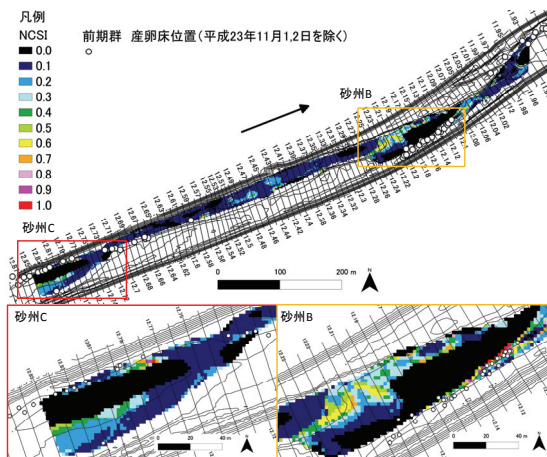


図-5 第4-2種適性基準によるNCSI分布
(10%, 50%, 90%粒径, 水温差, 流速, 水深)

したものと考えることができる。

この物理環境要素を用いて算出したNCSIの河道内分布を図-5に示すが、砂州周辺に高い値が多く分布していることが読み取れるものの、産卵床が確認されない砂州の上流側にも高い値が分布している結果となっている。

(b) SI4-3による物理環境要因の検討

SI4-3により、上記と同様の検討を行った結果を図-6aに示す。Fredle指数を除いた場合、選択指数の最大値が上昇し、なおかつNCSIと選択指数が比例関係となった。このため、Fredle指数は本調査地の場合、産卵環境の評価に大きく寄与していないものと判断される。この結果を受け、Fredle指数を除いて同様の検討をした。その結果、図-6bに示すとおり、どの物理環境要素を除いてもNCSIと選択指数の比例関係が破綻する。しかし、その中でも、10%粒径を除いたケースでは、NCSIの大きい範囲の選択指数が増加した。NCSIの大きい範囲の選択指数が増加することは、産卵環境の評価精度が向上したことを意味する。このことから、10%粒径を除いて同様の検討を行い、図-6cの結果を得た。50%粒径、流速、水深を除いたケースで、それぞれ選択指数の最大値が上昇している。一方、NCSIが2.0もしくは3.0において、わずかではあるが選択指数の山が見られ、比例関係が破綻している。

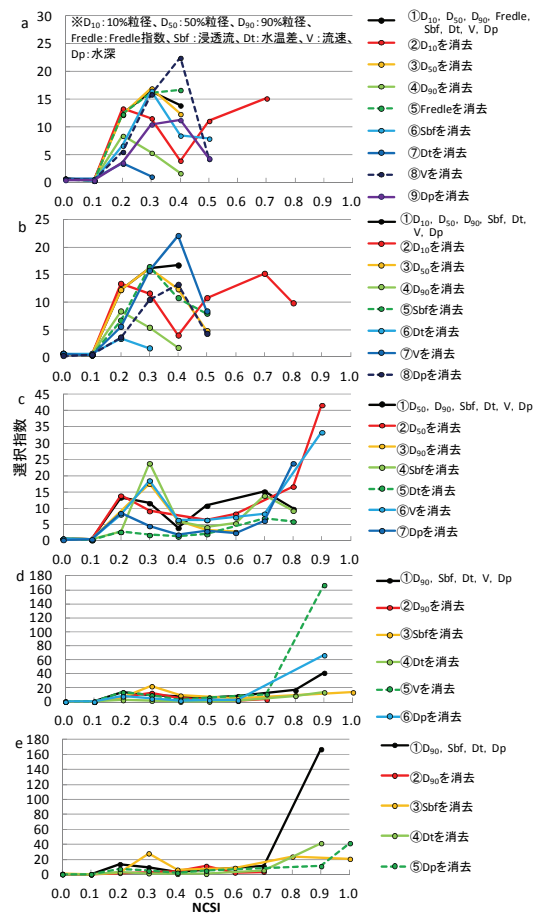


図-6 第4-3種適性基準によるNCSIと選択指数の関係

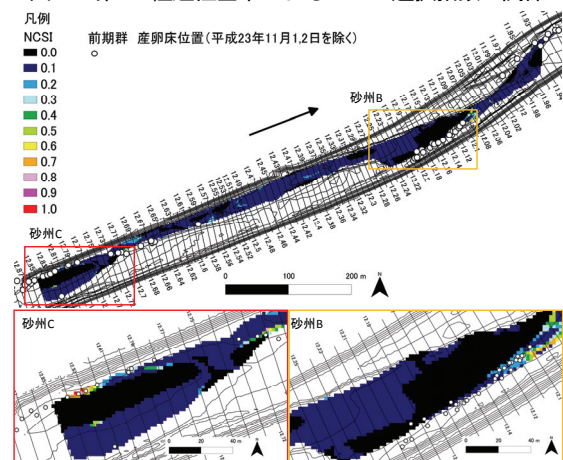


図-7 第4-3種適性基準によるNCSI分布
(90%粒径, 浸透流, 水温差, 水深)

これらの中で、50%粒径を除いたケースが最も比例関係の破綻が小さく、NCSIの最大値も高いことから、50%粒径を除いたケースにより、同様の検討を行うこととした。その結果が図-6dである。流速を除いたケースで選択指数が大きくなることから、流速は、産卵環境の評価に寄与していないと考え、流速を除いたケースで同様の検討を行った。その結果、図-6eに示すように、どの物理環境要素を除いても選択指数が低下することから、本調査地では、90%粒径、浸透流、水温差、水深が産卵環境の評価に最も適した物理環境要素であると考えられる。

図-7に示すこの物理環境要素により算出したNCSIの河道内分布をみると、概ね産卵床が多く分布する砂州の前縁線に高い値が多く分布していた。

4. 産卵環境の評価に寄与する物理環境要素

産卵床の利用頻度分布に基づくSI4-2から、産卵環境の物理環境要素を検討した結果、10%、50%、90%粒径、水温差、流速、水深が本調査地での産卵環境の評価に最も適したものと考えられた。一方、環境的な偏りを考慮したSI4-3から同様の検討をした結果、90%粒径、浸透流、水温差、水深が産卵環境の評価に適したものと考えられ、選択指数の最大値はSI4-2と比べ増大した。また、これらのNCSIの河道内分布をみると、SI4-2では、産卵床がない砂州の上流部においてもNCSIの高い値が分布していたが、SI4-3では概ね産卵床の分布が多い砂州前縁線で高い値が分布していた。このことから精度良く産卵床の分布を評価するためには、環境の偏りを考慮する必要があることが明らかとなった。

SI4-3による検討で得られた、物理環境要素は、90%粒径、浸透流、水温差、水深であった。90%粒径は河床材料の大きい成分であり、これが大きくなりすぎると河床材料を移動させるために、大きな力が必要となり産卵床造成が困難になると考えられる。浸透流、水温差は、既往の研究においてもシロザケの産卵環境との関係が指摘されている^{3,4)}。水深は、浅くて遊泳困難な箇所や、淵状で深く淀んだ箇所等を表していることが考えられる。サケ科魚類の産卵場における細粒分の流下が浸透流の低下、それに伴う卵の生存率の低下を引き起こすことが指摘されている¹⁴⁾。しかし、本調査では、細粒分の指標の10%粒径や河床材料の空隙の指標のFredle指数は、産卵環境の評価に寄与しない結果となった。本調査では調査区間の10%粒径の中央値は12mmであり、礫と呼べるものである。このことから、本調査地では、産卵環境に影響を与える細粒分が、多く存在しなかったものと考えられる。また、SI4-3による検討で得られた物理環境要素に、浸透流が入っていることにより、河床材料の透水性の指標である10%粒径、Fredle指数が内包された可能性もある。

SI4-3によるNCSIと選択指数の関係を検討した結果、NCSIが0.2~0.3の階級で、選択指数がわずかに大きくなる箇所が確認された。これには砂州Bの前縁線に位置する産卵床が影響していると考えられる。産卵床が存在するにも関わらず、この箇所のNCSIが比較的低い原因の詳細は明らかではないが、より適切な物理環境要素が他にあり、適性基準の設定に更なる検討が必要である可能性があり、今度の課題である。

5. おわりに

本研究では、PHABISMによりシロザケ前期群の産卵環境の評価を行い、以下のことが明らかとなった。

①産卵床の利用頻度分布に基づく第2種適性基準と、環

境の偏りを考慮した第3種適性基準を作成し、河道内のNCSIの分布を把握した。その結果、両適性基準で砂州周辺の適性が高い状況が確認されたが、第2種適性基準では、産卵床が確認されない砂州の上流部の適性も高くなった。一方、第3種適性基準では、この状況が確認されず、産卵床が多い砂州前縁線で適性が高い状況が確認された。そのため、第3種適性基準の方が、より産卵環境の評価に有利であることが確認された。

②本研究で用いた正規化CSIと選択指数の関係を検討する手法により、概ね良好に物理環境要素の推定が行えることが確認された。

謝辞：河川水位・流量データをご提供戴いた国土交通省札幌開発建設部と、産卵床位置データをご提供戴いた札幌市豊平川さけ科学館に、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 水産総合研究センター北海道区水産研究所、さけます来遊速報（平成23年度）、<http://salmon.fra.affrc.go.jp>
- 2) 佐野誠三：北日本産サケ属の生態と繁殖について。北海道さけ・ますふ化場研究報告 14、pp21-90、1955。
- 3) 鈴木俊哉：遊楽部川におけるサケの自然産卵環境調査。さけ・ます資源管理センターニュース 4：1-4、1999。
- 4) 鈴木俊哉：自然再生産を利用したザケ資源保全への取り組み。SALMON情報 2：pp3-5、2008。
- 5) Lotspeich, F.B. and Everst, F.H. : A New Method for Reporting and Interpreting textural Composition of Spawning Gravel, United States Departure of Agriculture Forest Service, Research Note PNW-369,1981,1.
- 6) 永矢貴之ら：アユ産卵場の保全と創出を目指した河道掘削断面の選択手法の提案、河川技術論文集、第15巻、pp79-84、2009、6。
- 7) Baxter, C. Hauer, R.F. & Woessner W.W. : Measuring Groundwater-Stream Water Exchange: new Techniques for Installing Minipiezometers and Estimating Hydraulic Conductivity, Transactions of the American Fisheries Society 132: 493-502, 2003.
- 8) 札幌市豊平川さけ科学館、<http://www.sapporo-park.or.jp/sake/>
- 9) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 10) QGIS, <http://www.qgis.org/>
- 11) 玉井信行ら：河川生態環境評価法、東京大学出版、pp95-102、2000、3。
- 12) Manly, B.F.J. McDonald, L.L. Thomas, D.L. McDonald, T.L. Erickson, W.P. :Resource Selection by Animals, Kluwer Academic Publishers, p51, 2002
- 13) 例えば、土木学会 水理公式集。社団法人 土木学会、1999。
- 14) Yamada, H. Nakamura, F. : Effects of fine sediment accumulation on the redd environment and the survival rate of masu salmon (*Oncorhynchus masou*) embryos, Landscape and Ecological Engineering, 5, 2009,7.

(2013. 4. 4受付)