

8.3 冷水性魚類の産卵床を考慮した自律的河道整備に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：矢部浩規、渡邊和好、林田寿文、
矢野雅昭、渡邊尚宏、佐藤好茂

【要旨】

既往調査結果より、シロザケの産卵床の分布を縦断的なセグメント区分により検討した結果、主にセグメント 1 に分布していることが確認された。また、縦断的な産卵床分布の概略的な評価手法として、50%粒径と Fredle 指数を用いる手法を提案し、これが有効であることを明らかにした。

平面的な産卵環境の評価手法として、PHABSIM に正規化した合成適合値（NCSI）と選択指数を組み合わせたものを用い、調査区間の産卵環境に影響する物理環境要素を特定した。また、多くの産卵床が確認された砂州前縁線で NCSI が高い結果となった。

河岸粗度の違いによる交互砂州形状への影響を移動床水理模型実験により検討した結果、河岸粗度が小さいケースでは砂州の延長が短く、最深河床高が高かった。この原因として、流速分布の計測結果より、河道中心部や河岸部の流れの直進性、河岸部の 2 次流の違いが影響したものと考えられた。

キーワード：シロザケ産卵床、セグメント、PHABSIM、護岸、交互砂州

1. はじめに

北海道の河川には、冷水性魚類のサケ科魚類が生息している。その中で最も馴染みのあるシロザケ（*Oncorhynchus keta*）の北海道における捕獲量は、全国の 8 割以上を占め¹⁾、地域にとって重要な水産資源となっている。シロザケの捕獲量は、自然再生産していた 1960 年では 300～500 万尾であったが、人工孵化放流技術の発達とともに 1994 年には 5 千万尾を超えた²⁾。このように、シロサケの資源量は人工孵化放流量とともに増加してきたが、今後も人工孵化放流を続けていくことにより、遺伝的多様性の喪失が懸念されている³⁾。遺伝的多様性は一度失われると回復できない場合が多く、予防的な視点が必要であるといわれている⁴⁾。そのため、数少ない野生個体群の維持増大のため、産卵環境に配慮した河川整備の必要性が指摘されている^{3,5)}。一方で、シロザケの産卵が確認される河川中流域では、土地利用に伴い、堤防の造成による河道断面の形成や護岸工などが行われてきた箇所でもある。

本研究は、河川改修と競合しやすい河川中流域に産卵する冷水性魚類のシロザケの産卵環境に考慮した、自律的河道整備手法の検討を行なうものである。

2. 縦断的な産卵床の分布について

2. 1 目的

サケ科魚類の産卵環境と河床材料に関する既往研究では、産卵床として利用できる礫径（50%粒径）は体長の 1/10 程度までとの指摘や⁶⁾、サケ科魚類の産卵に適した河床材料の指標として Fredle 指数が提案されている⁷⁾。また、河床材料が産卵環境に及ぼす影響として、サクラマスの発眼卵を用いた人工産卵床実験により、河床材料に細粒分が多いと浸透流が減少し、生存率が低下することが指摘されている⁸⁾。このように河床材料は、産卵環境の重要な要素の一つである。ところで河床材料は、河川の縦断勾配の変化により異なる粒径分布となっている⁹⁾。また、河床勾配がほぼ同一である区間は、河床材料や河道の特性が似ており、これをセグメントと呼び区分されている⁹⁾。

本章では、河床勾配や河床材料から区分されるセグメントの、どの位置に産卵床が分布しているか把握し、縦断的なシロザケの産卵床の分布範囲を評価することに資することを目的に行うものである。

2. 2 方法

2.2.1 調査河川

調査河川は、シロザケの産卵床位置調査、河川定期横

断測量、河床材料調査が過去になされた、一級河川石狩川水系豊平川、漁川、一級河川十勝川水系札内川、音更川、一級河川釧路川水系釧路川とした（図-1）。

2.2.2 調査方法

河川内のセグメント区分を把握し、産卵床分布との関係を検討するため、河床勾配、河床材料、産卵床の分布を各河川における既往の調査資料により把握した。なお、釧路川の調査対象区間については湿原区間の KP38.2（KP；上流方向を正，単位 km）より上流とした。各河川における既往調査資料の年度を表-1 に示す。

a) 河床勾配の把握

河床勾配は、各調査対象河川で最近年に実施された河川定期横断測量結果による平均河床高から算出した。河床勾配の算出間隔は、河川定期横断測量の縦断間隔と同様に 200m である。

b) 河床材料の把握

河床材料は、縦断間隔 1km 毎に、左右岸と流心の 3 点もしくは左右岸の 2 点で実施されている。本検討においては、縦断間隔 1km 毎の各点において平均粒径、50%粒径、60%粒径を算出し、それらの平均値を、縦断位置を代表する粒径として用いた。なお、豊平川においては、平成 23 年 9 月に 1000m³/s を超える出水が有り、その前後で河床材料調査を行っている。平成 23 年 9 月出水前では KP13.0,14.0 における調査が行われていないことから、平成 23 年 9 月出水前と平成 23 年 9 月出水後の調査結果を分けて、それぞれ検討することとした。

c) 産卵床分布の把握

産卵床分布は、漁川、札内川、音更川、釧路川については、各河川で国土交通省北海道開発局により実施された産卵床位置調査結果や河川環境情報図を用いて把握した。豊平川については、札幌市豊平川さけ科学館が実施した、産卵床位置調査結果を用いた¹⁰⁾。確認された産卵床は、縦断間隔 200m 毎にどの区間に位置するか検討し、縦断的な河床勾配、河床材料との関係を把握した。

2.2.3 解析方法

a) セグメントの判定

セグメントは、河床勾配と代表粒径により区分されているが⁹⁾、本検討では簡易に代表粒径の代わりとして 60%粒径を使用した。セグメント 1 は河床勾配が 1/400 (0.0025) 以上で、60%粒径が 2cm 以上の区間とし⁹⁾、セグメント 2-1 は河床勾配が 1/400 (0.0025) 以下で、60%粒径が 1~2cm⁹⁾の区間とし、セグメント 2-2 は河床勾配が 1/400 (0.0025) 以下で、60%粒径が 1cm 以下⁹⁾の区間とした。



図-1 調査対象河川

表-1 使用データおよび調査機関

水系	河川名	横断測量	河床材料調査	産卵床調査
石狩川水系	豊平川	H23 国土交通省 北海道開発局	H23 国土交通省 北海道開発局	H20~H23 札幌市 豊平川さけ科学館
石狩川水系	漁川	H17 国土交通省 北海道開発局	H17 国土交通省 北海道開発局	H23~24 国土交通省 北海道開発局
十勝川水系	札内川	H23 国土交通省 北海道開発局	H23 国土交通省 北海道開発局	H6,H17 国土交通省 北海道開発局
十勝川水系	音更川	H23 国土交通省 北海道開発局	H23 国土交通省 北海道開発局	H6,H17 国土交通省 北海道開発局
釧路川水系	釧路川	H22,23 国土交通省 北海道開発局	H21 国土交通省 北海道開発局	H17 国土交通省 北海道開発局

b) Fredle 指数

サケ科魚類の産卵環境の指標として提案されている Fredle 指数⁷⁾を算出し、産卵床の分布との関係を検討した。Fredle 指数は、式(1)に示すとおり河床材料の平均粒径に比例し、式(2)のふるい分け係数に反比例する。ふるい分け係数は粒径加積曲線の粒径分布の広さに影響することから、Fredle 指数は河床材料内の空隙、透水性の指標である。

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

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

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。

2. 3 結果及び考察

2.3.1 セグメントによる産卵床の分布

各河川で、どのセグメントに産卵床が分布しているか、各河川での全体に対する割合を把握した。その結果、釧路川以外の河川では、大部分の産卵床がセグメント 1 に分布していた（図-2）。

2.3.2 概略的なシロザケ産卵床の縦断分布の評価手法

の提案

既往の知見では、河床材料と産卵環境の関係が指摘されており、産卵環境適地の評価を概略的に行える可能性がある。例えば Kondolf & Wolman⁶⁾は、様々なサケ科魚類が産卵床に利用している河床材料を 50%粒径で評価し、体長の 1/10 倍程度までの 50%粒径が利用可能であることを述べている。豊平川におけるシロザケの 3 歳魚の体長は、平均 660mm、範囲 560~760mm 程度であり¹⁰⁾、大きい個体でも使用できる 50%粒径の最大値は 76mm となる。また、Fredle 指数は式(1)に示すとおり、平均粒径に比例し、ふるい分け係数に反比例する。そのため、同じ平均粒径でも、ふるい分け係数が大きくなると (Fredle 指数が小さくなると)、粒度分布が広くなり、河床材料中の空隙が充填され透水性が低下する⁷⁾。鈴木¹¹⁾は Fredle 指数の異なる河床材料内で、シロサケの卵・仔魚の孵化、生存実験を行ない、生存率が急激に低下する閾値として、Fredle 指数が 2.5~4.8mm であることを述べている。

これらの既往知見により、シロザケの産卵床を河床材料から評価した場合、Fredle 指数が 5.0mm 以上、50%粒径が 80mm 以下となる区間が、産卵適地となることが予想される。漁川の河床材料と産卵床の縦断分布に Fredle 指数が 5.0 以上で、50%粒径が 80mm 以下である範囲を追記したものを図-3 に示す。図-3 より、概ね産卵床の分布範囲の大部分が網羅できていると考えられる。このことから、Fredle 指数と 50%粒径を把握することにより、概略的ではあるが、縦断的にシロザケの産卵適地を把握することが可能であると考えられる。ただし、図-3 をみて分るとおり、全ての産卵床を網羅しているわけではない。この原因として、他の産卵環境に重要な要素である浸透流や水温、横断方向の粒径のバラツキが考慮されていないことが考えられる。

3. PHABSIM による産卵環境の評価手法

3. 1 目的

シロサケは尾鰭で河床に深い窪みをつくり、そこに産卵し、直前部の砂利を掘って被覆することが知られている¹²⁾。シロサケの産卵環境として、浸透流が湧出傾向であることや¹³⁾、河川水よりも河床内水温が高い個所であることが知られている^{11,13,14)}。また、瀬・淵構造、分流等がある地形や、河川の屈曲度が大きいほど産卵床数が多いという調査結果があり、河川地形と浸透流の関係が指摘されている¹⁴⁾。また、河床材料も重要なことが知られており、既往研究では産卵床の河床材料の粒径が 0.5~3cm を中心とした砂利¹²⁾、D50 が 1~4cm 程度⁹⁾である

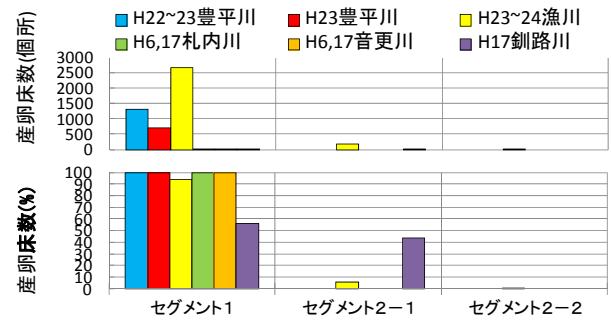


図-2 各河川の河床勾配による産卵床の分布

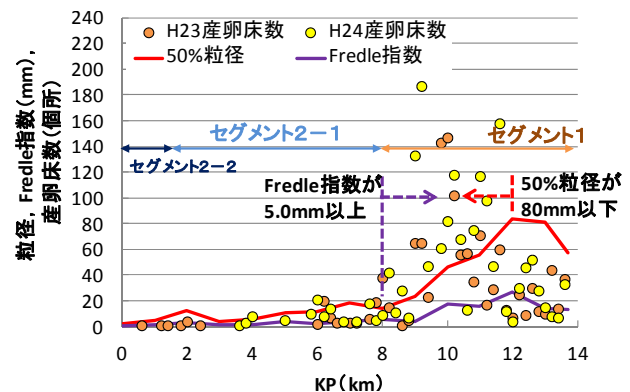


図-3 漁川の河床材料による産卵床縦断分布の評価結果

ことが確認されている。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、これらを考慮して平面的な産卵環境適地の分布を評価した事例はない。平面的な産卵環境の分布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¹⁵⁾。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。

本章では、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 による平面的な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を対象とする¹¹⁾。

3. 2 方法

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 として、図-4 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。

3.2.1 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-4 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、同測線上の砂州の陸域部の河岸部 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⁷⁾を算出した。

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 al¹⁶⁾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 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ）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 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）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、これらの調査地点の中には調査内容により流速や水深が大きいことにより、調査ができないものがあった。そのため、図-4 に示すように同一地点においても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¹⁰⁾の内、今回現地調査した年度のものをを用いた。産卵床位置は GPS により座標が計測されている。

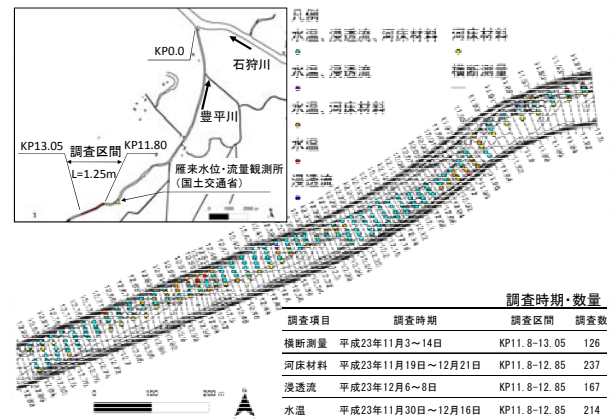


図-4 調査箇所図

表-2 iRIC2.0 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

3.2.2 流況解析

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・水深の評価を行うこととした。流況解析は、iRIC2.0 を用いて行い、解析ソルバーは NAYS2D¹⁷⁾ を用いた。

河道内の流速・水深分布の推定には、図-4 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ることから、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るため、ここでは図-5 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-2 にまとめて示す。

3.2.3 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、GIS¹⁸⁾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。そして、産卵床位置の物理環境値を GIS により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-5 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 12 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。

3.2.4 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¹⁹⁾を作成した。適性基準は、環境的な偏りに対する補正を行ったもの¹⁹⁾ (以降、SI3) を式(3)、(4)にて作成した。さらに、作成した SI3 を、後述する方法で調整した適性基準を、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、SI4-3 の作成については次節で述べる。

$$c_i = \frac{SN_i}{EN_i} \quad (3)$$

$$SI3_i = c_i / c_{max} \quad (4)$$

ここで、 SN_i : 産卵床の確認数、 EN_i : 河道内物理環境分布のセル数、 $SI3_i$: 第 3 種適性基準、 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。

SI4-3 により算出された SI から、式(5)により合成適性値 (Composite Suitability Index value. 以降、CSI)¹⁹⁾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。

$$CSI = SI_a \times SI_b \times SI_c \cdots \quad (5)$$

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

3.2.5 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(6)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(7)に示す選択指数²⁰⁾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。

$$NCSI = \frac{CSI}{CSI_{max}} \quad (6)$$

$$w_i = o_i / \pi_i \quad (7)$$

ここで、 $NCSI$: 正規化した CSI 値、 CSI_{max} : 合成適合値の最大値、 w_i : 選択指数、 o_i : ある階級 i の NCSI に属する産卵床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、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られる。

3. 3 結果と考察

3.3.1 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-5 にみられるように調査区間内に 3 箇所の砂州 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。産卵床位置調査により確認された産卵床数を図-5 内の表に示す。

3.3.2 産卵環境の適性基準

SI3 を求め、図化したものを図-6 に示す。SI3 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 SI4-3 を作成した。

10%粒径の SI3 の最大値は、それぞれ 70~80mm で確認された。Terzaghi の式では透水係数は 10%粒径の 2 乗に比例するため²¹⁾、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、SI4-3 では SI3 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。作成した SI4-3 を図-6a に示す。

河床材料の粒径としてよく用いられる 50%粒径の SI4-3 では、図-6b に示すように SI3 の凸部を結び、凹部を埋めた SI 分布とした。

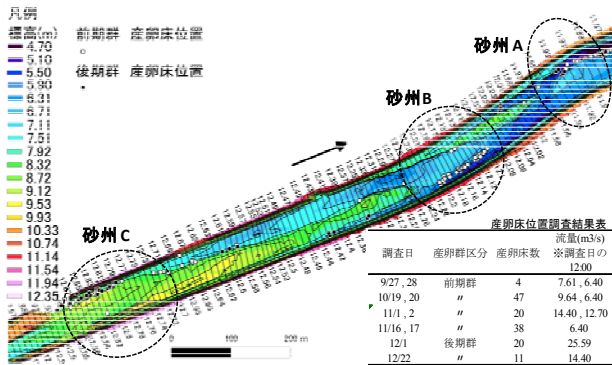


図-5 河床地形と産卵床位置

90%粒径のSI3の最大値は、60～70mmで確認された。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、SI4-3ではSI3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の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。作成したSI4-3を図-6cに示す。

Fredle指数のSI3の最大値は、5～10mmで確認された。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¹¹⁾。そのため、SI4-3では、図-6dに示すとおり5～10mm以上のSIを1.0とした。

浸透流のSI3の最大値は、0.06～0.07cm/sで確認された。浸透流は産卵環境との関係が指摘されており^{11,13,14)}、これが高いほど産卵環境に寄与することが考えられる。そこで、SI4-3ではSI3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。作成したSI4-3を図-6eに示す。

水温差のSI3の最大値は3.0～3.5℃で確認されたが、前期群が利用する浸透流は、河川水が伏流し湧出するので、水温は河川水よりわずかに高いものである¹¹⁾。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。作成したSI4-3を図-6fに示す。

流速のSI4-3は図-6g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SI4-3は、SI3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。作成したSI4-3を図-6hに示す。

3.3.3 産卵環境の評価に寄与する物理環境要素の検討

SI4-3の全ての物理環境要素を用いたケースから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より、産卵環境に関わる物理環境要素の検討を行

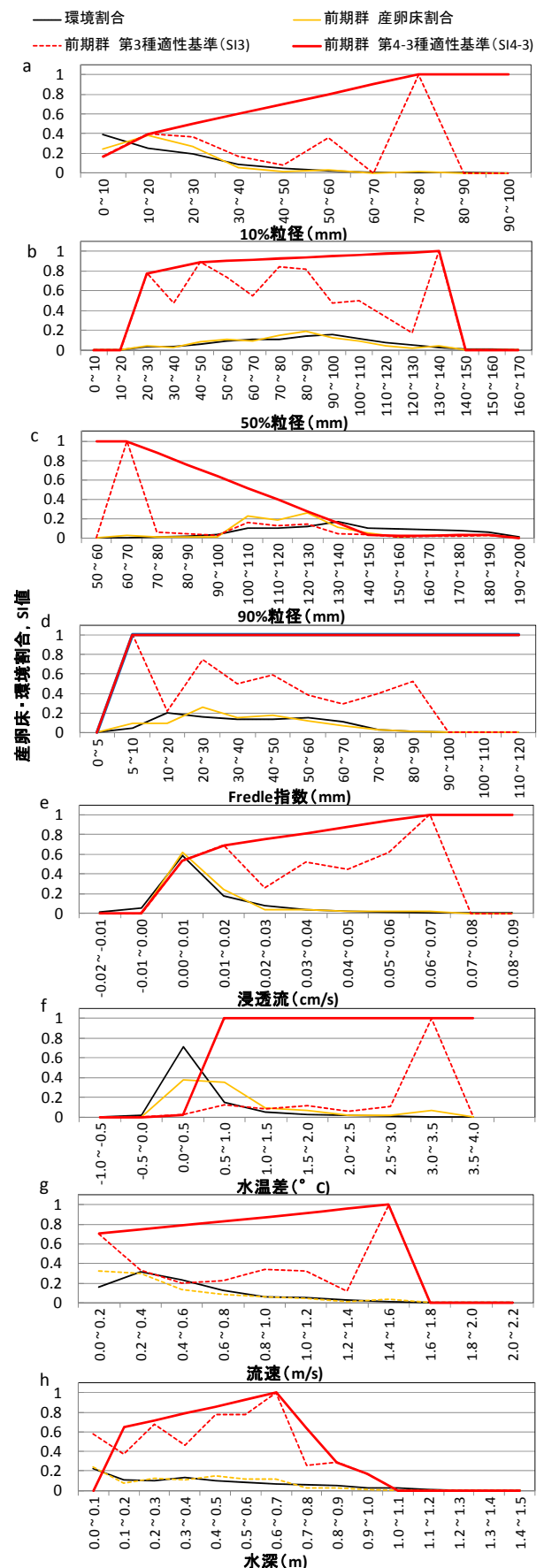


図-6 シロザケ前期群の適性基準

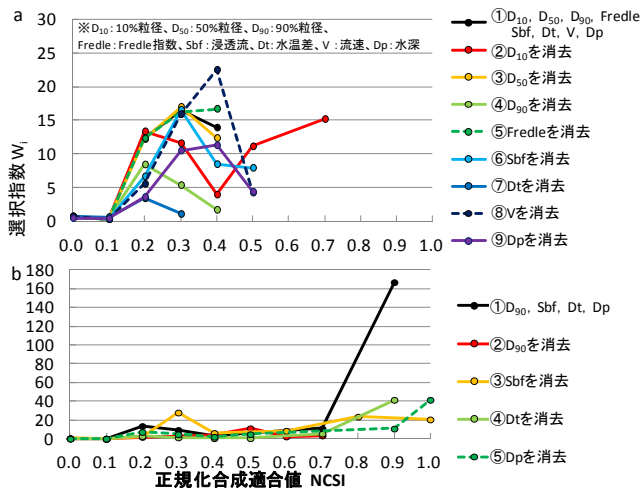
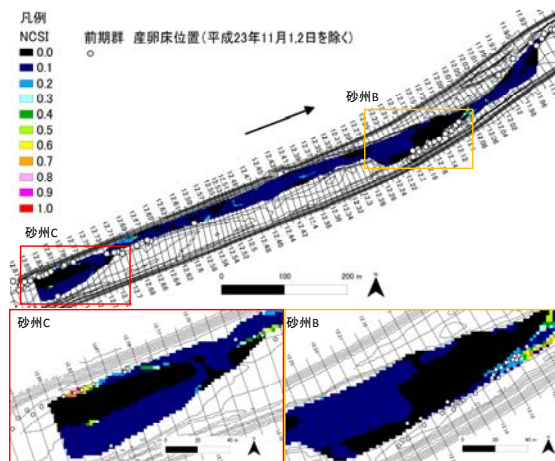


図-7 第4-3種適性基準によるNCSIと選択指数の関係

図-8 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)

った。図-7aに示すとおり、全ての物理環境要素から、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と判断され、Fredle指数を除いて同様の検討を行った。この検討を繰り返し、物理環境要素を取り除いていった。最終的に、図-7bに示すように90%粒径、浸透流、水温差、水深の中から、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-8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、多くの産卵床が分布する砂州前縁線に高い値が分布していた。

3.3.4 産卵環境の評価に寄与する物理環境要素

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^{12,14,15}。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⁸。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、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%粒径や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、今後の課題である。

4. 護岸工が河床地形に及ぼす影響

4.1 目的

シロザケが産卵を行うセグメント1にあたる扇状地の河川では、急勾配で流れ速いため、河岸侵食対策として護岸が設置されている。しかし、護岸の設置により、河岸の粗度が低下し、河床形状に影響が及ぶことが指摘されている²⁾。河床地形の一つである交互砂州は、その前縁線で浸透流を創出するなど、産卵に適した環境を創出することが指摘され²³⁾、重要な地形である。護岸設置による河岸粗度の低下は、交互砂州の形状にも影響を及ぼすことが考えられるが、明確にはなっていない。本章では、河岸粗度の違いが交互砂州地形に及ぼす影響を把握することを目的としたものである。

4.2 方法

実験に用いた水路は、移動床部の延長が43.25m、河岸に図-9に示す改修された河川の河岸形状を模した模型を設置したものを用い、河床には厚さ10cmで粒径

0.77mm の珪砂を敷き均した。実験は、河岸の粗度を変化させた表-1 に示す2 ケースを行った。なお、水理条件は、交互砂州の発生条件²⁴⁾となっている。

河岸粗度が 0.0085 (目標) のケースは、化粧合板で河岸を作成し、0.0138 (目標) のケースは足立の式²⁵⁾により所定の粗度となるように棧粗度を設置(縦断間隔 33cm、高さ 2mm) して実験を行った。実験で、河岸粗度の差が流況や河床形状へ及ぼす影響を把握するため、レーザー砂面計による河床高の計測、2 次元電磁流速計による平面流速分布の計測を行った。これらの計測は、表-1 に示す通水時間の後に、河床をセメント固化した状態で行った。河床高の計測は、縦断間隔 15cm の横断測線を設置し、レーザー砂面計により横断方向 1mm 間隔で計測した。2 次元電磁流速計による計測は、固化した河床に表-1 に示す流量を通水し、図-9 に示す横断地点において縦断間隔 30cm で行った。また、砂州の形成により生じた淵部において、図-10 に示すよう淵の上流端より下流へ 5cm、15cm、25cm の地点で、6 割水深の中層と河床面である下層において、2 次元流速計測を行った。流速計測は 10 秒間計測を 3 回実施し、それらの平均値により検討を行った。なお、河床高および流速分布の計測は、縦断的に形成される各砂州地形の不均一性の影響があっても全体的な傾向が把握できるよう、5 半波長分の砂州を観測した。

4. 3 実験結果と考察

4.3.1 河床形状の計測結果

図-10 に移動床通水後の河床高と 2 次元電磁流速計の計測結果の分布を示す。ケース 1 の方がケース 2 よりも、平均された波長が短くなっている。また、図-11 に平均河床高、最深河床高の縦断分布を示すが、ケース 1 は

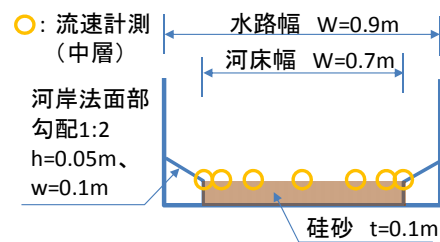


図-9 横断形状および流速観測点

表-3 実験条件 一覧

ケース	水路幅 (m)	流量 (m ³ /s)	勾配	河床マニング粗度 (粒径から算出)	河岸(護岸)マニング粗度	粒径 (mm)	移動床時通水時間
1	0.70	0.0060	1/200	0.0138	0.0085	0.77	9時間半
2	0.70	0.0060	1/200	0.0138	0.0116	0.77	9時間

ケース 2 よりも最深河床高が高くなっている。

4.3.2 流速分布の計測結果

図-12 に図-10 に示す横断位置における 2 次元電磁流速計計測の計測区間全体での縦断方向流速と、横断方向流速 (絶対値) の平均値と標準偏差を示す。ケース 1 ではケース 2 よりも河岸部の縦断方向流速が速く、中央部の流速がわずかに遅い。また、横断方向流速はケース 1 ではケース 2 よりも水路中心部の流速が速く、それ以外では遅くなっている。

砂州の淵部の同一地点における中層と低層の横断方向流速の比較を行ったものを図-13 に示す。ケース 1 では中層と低層が比例関係にあり、横断方向流速がほぼ同一の方向に向いている。一方、ケース 2 では、中層と低層の流速に明確な関係は認められないが、横断方向流速が異なる方向を向いている状況も確認される。

4.3.3 砂州延長の減少要因の考察

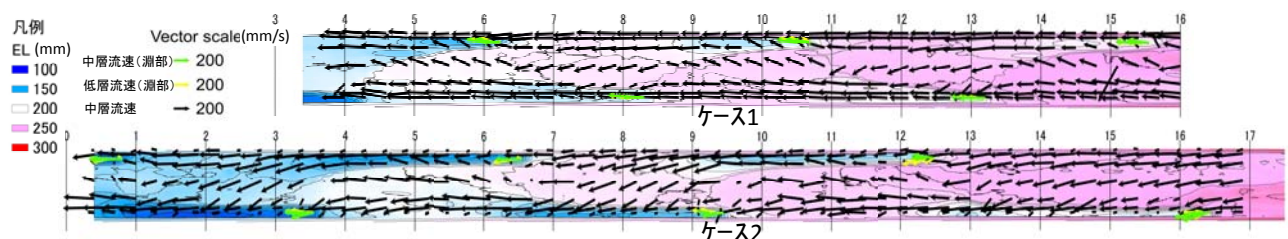


図-10 移動床通水後の河床高と流速ベクトル

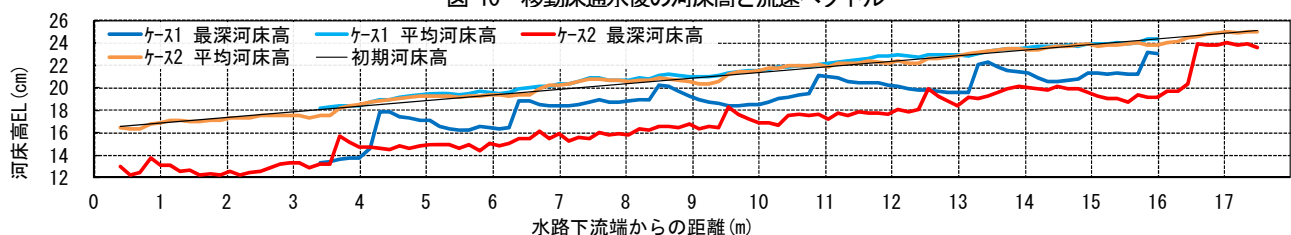


図-11 平均河床高 縦断図

河岸粗度が小さいケース1ではケース2よりも砂州の波長が短くなった。ケース1では水路中心部の縦断方向流速がわずかに遅く、横断方向流速が速いため、水路中心部の縦断方向の流れの直進性が低くなる結果を得た。このことが影響してケース1では砂州延長が短くなったとも考えられる。

4.3.4 深掘れの衰退要因の考察

河岸粗度が小さいケース1ではケース2よりも最深河床高が高くなった。砂州の淵部の中層、低層の横断方向流速をみると、ケース2ではこれらが異なる方向を向いているのに対して、ケース1はほぼ同一の方向を向いており、2次流が小さいことが考えられる。最深河床高は砂州前縁線の深掘れの高さを表しており、ケース1の最深河床高が高い原因として、砂州の淵部における2次流が小さいことが考えられる。ケース1では、河岸部の縦断方向の流れの直進性が高く、横断方向の流れの直進性が低いため、淵部の2次流が低下したのではないかと考えられる。

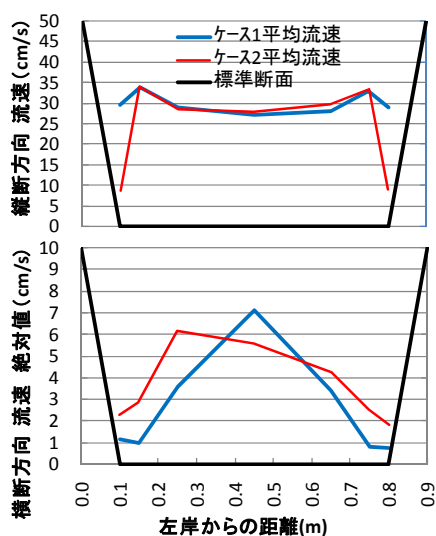


図-12 中層部 縦横断流速分布

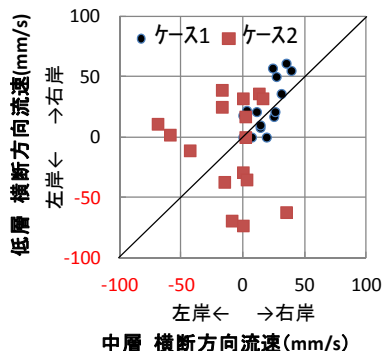


図-13 砂州淵部における中層と低層の横断方向流速の比較

5. まとめ

①縦断的なシロザケ産卵床の分布を、豊平川、漁川、札内川、音更川、釧路川の既往調査結果から検討した結果、セグメント1に多いことが明らかとなった。

縦断的な産卵環境の評価手法として、50%粒径とFredle 指数により概略的に把握できることが明らかとなった。

②平面的な産卵環境適地の評価手法として、PHABISIMに正規化した合成適合値(NCSI)と選択指数を組み合わせた手法を用いて、調査区間内の産卵環境に影響する物理環境要素を特定した。

多くの産卵床が分布していた砂州前縁線で、NCSIが高くなり、本手法が有効であることを確認した。

③護岸の設置などにより河岸粗度が低下した条件での、交互砂州形状の違いを移動床水理模型実験により検討した。その結果、河岸粗度が小さいケースでは砂州の延長が短い状況が確認された。この原因として、河道中心部の流れの直進性が低下したことが影響したものと考えられた。また、河岸粗度が低いケースでは、最深河床高が高い状況が確認された。この原因として、河岸粗度が低いケースでは、河岸近傍の流れの直進性が大きく、2次流が低下したことが影響したと考えられた。

参考文献

- 1) (独) 水産総合研究センター北海道区水産研究所 HP : <http://salmon.fra.affrc.go.jp/index.html>
- 2) 野川秀樹：さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史 (序説), Journal of Fisheries Technology, 3(1), pp1-8, 2010.
- 3) 帰山雅秀・眞山紘：野生産サケの復活をめざして, Tech.Rep.Hokkaido salmon Hatchery(165) : 41-52, 1996
- 4) 谷口順彦：魚類集団の遺伝的多様性の保全と利用に関する研究, 日本水産学会, 73(3), pp408-420, 2007
- 5) 帰山雅秀：日本系サケ資源の現状と今後の資源管理のあり方, さけ・ます資源管理センターニュース, No.1, pp4-7, 1998.3
- 6) G.Mathias Kondolf, Michael J Sale, M.Gordon Wolman : the sizes of Salmonid spawning gravels, water resource research, vol.29, no.7 pp2275-2285, July 1993
- 7) Fredrich B.lotspeich and Fred H.Everst: A New Method for Reporting and Interpreting textural Composition of Spawning Gravel, united states department of agriculture forest service pacific northwest forest and range experiment station, research
- 8) 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(2), pp169-181, 2009.
- 9) 山本晃一：構造沖積河川工学，山海堂，2004
- 10) 札幌市豊平川さけ科学館，<http://www.sapporo-park.or.jp/sake/>
- 11) 鈴木俊哉：自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み，*SALMON 情報*，No.2，pp3-5，（独）水産総合研究センター，2008.1.
- 12) 佐野誠三：北日本産サケ属の生態と蕃殖について，北海道さけ・ます・ふ化場研究業績，第152号，1955
- 13) Geist, R.D., Hanrahan, P., Arntzen, V.E., McMichael, A., Murray, J.C., Chien, Y., "Physicochemical characteristics of the hyporheic zone affect red site selection of chum and fall Chinook salmon Columbia River", Report to Bonneville Power Administration, No.00000652, (2001).
- 14) 鈴木俊哉：遊楽部川におけるサケの自然産卵環境調査，*SALMON 情報*，No.4，（独）水産総合研究センター，1999.9
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 18) QGIS, <http://www.qgis.org/>
- 19) 玉井信行ら：河川生態環境評価法，東京大学出版，pp95-102, 2000.3.
- 20) 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
- 21) 例えば，土木学会 水理公式集，社団法人 土木学会，1999.
- 22) 長田健吾ら：急流礫床河川における低水路護岸沿いの深掘れ流路形成とその特性，*河川技術論文集*，第13巻，2007.6.
- 23) 矢野雅昭，矢部浩規，林田寿文：砂州地形とシロサケの産卵環境について，*寒地土木研究所月報*，No.710, pp23-27, 2012.7.
- 24) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，*土木学会論文報告集*，第342号，土木学会，pp87～96，1984.
- 25) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，*土木学会論文集* 104号，1963.

A study on autonomous river channelization considering spawning environment of cold-water fish

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Watershed Environmental
Engineering Research Team

Author : YABE Hiroki

WATANABE Kazuyosi

HAYASHIDA Kazuhumi

YANO Masaaki

WATANABE Naohiro

SATOU Yoshishige

Abstract :

We considered longitudinal distribution of chum spawning beds in Segment by anamnestic survey results. The result shows that almost all spawning beds were distributed in segment 1. And we proposed brief longitudinal method to assess spawning points by using 50% grain size and Fredle index. And we confirmed its efficacy.

We introduced PHABSIM to assess planar and detailed distribution of spawning beds with normalized composite suitability index and selective index.. And we identified physical factors in the study area by the method. NCSI is high on the sand bar front which spawning bed distributed mainly.

To clarify influence of Manning roughness of channel shore on alternate bars, we performed movable bed hydraulic model experiment. The results show that length of alternate bars was shorter and the longitudinal deepest height is higher in the case of low Manning roughness. Hence the survey results of velocity distribution shows differ of flow straightness on channel shore and center and differ of secondly flow on channel shore, these flow conditions difference was caused alternate bars shape difference.

Key words : Chum salmon spawning bed, Segment, PHABSIM, Revetment, Alternate bars