

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：平井康幸、渡邊和好、矢野雅昭、
林田寿文、杉原幸樹、渡邊尚宏、
鳥谷部寿人

【要旨】

シロザケの産卵が毎年確認される個所での現地調査と数値計算を実施し、砂州地形がその頂部から前縁部へ浸透流を発生させていることを確認した。また、この前縁部には産卵床が多く分布しており、砂州地形が産卵環境に寄与していると考えられた。数値計算による物理環境値（流速、水深、平均粒径、浸透流）を用いた PHABSIM により産卵適地の推定、将来予測を試みた。その結果、推定結果と実際の産卵床分布が概ね一致し、有効な手法であることが確認された。岩河床の覆礫対策の水理模型実験を行った結果、覆礫厚が砂州波高程度あれば、露岩部が拡大せず、持続性に有利であることが確認された。

キーワード：産卵床、砂州、浸透流、PHABSIM、覆礫対策

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⁾。そのため、現在確認されるシロザケの多くは、人工孵化放流魚であると考えられる。一方で、近年ではシロザケの野生魚の価値にも着目されている。これは、野生魚は孵化放流に比べリスクが分散していること、産卵環境さえ整えばコストがかからないこと、孵化放流魚にはない環境に適応した遺伝的特性を有している可能性があることによる³⁾。そのため、孵化放流魚と野生魚との共存・相互補完を目指した資源管理の必要性が指摘され³⁾、河川整備においても、シロザケが再生産可能となるよう、産卵環境として重要な物理条件などに配慮する必要がある。本研究では、冷水性魚類の一種であるシロザケが自然再生産可能となるよう産卵環境を考慮した河道整備手法の検討を行なうものである。

本研究では過年度まで、砂州の前縁部で浸透流が湧出傾向であり、さらに産卵床が多く分布していることが確認した⁴⁾。また、物理環境値から魚類などの生息適地を把握する PHABSIM (Physical Habitat Simulation

Model)⁵⁾にシロザケ産卵環境に影響する物理環境要素を用いて、平面的な産卵適地の推定を行いその適用性を確認した⁶⁾。

平成 26 年度は、①砂州地形とシロザケ産卵環境の関係をより詳細に把握するため、現地調査と数値計算により、砂州地形における浸透流挙動、産卵床分布の関係を把握した。②また、PHABSIM による産卵適地の推定を将来予測にも適用可能とするため、数値計算による物理環境値を用いて解析する手法を検証した。③さらに、岩床河川における産卵環境の復元に繋がる覆礫対策について、より持続可能な設計条件を水理模型実験により検討した。以降、これらについて詳細に述べていく。

2. シロザケの産卵場における砂州地形に起因する浸透流の把握

2.1 目的

シロザケの産卵環境には流速、水深、河床材料、浸透流、河床内水温などが影響し⁶⁾、浸透流に着目すると湧出傾向の個所を利用することが指摘されている⁷⁾。また、浸透流の発生には河床地形が影響し⁸⁾、その一つである砂州地形の重要性も指摘されている⁴⁾。

産卵環境に重要な要素である浸透流の調査は、対象地形に複数のポイントで透水係数や圧力を計測する方法が主に取られている⁹⁾。しかし、このような調査は、砂州地形内における浸透流の挙動を把握するのに、多くの調

査数を必要とし、時間と労力が多く掛かっている。さらに、浸透流の水温や溶存酸素量に影響する浸透路長については把握できず、産卵適地推定の精度向上が望めない。このような河床内部の浸透流の挙動を把握する方法として、浸透流計算が有効な手法の一つと考えられる。河床地形内の浸透流計算に関わる研究として、実河川の瀬淵地形を対象としたもの¹⁰⁾や、模型実験での交互砂州を対象としたもの¹¹⁾があるが、実河川のシロザケの産卵が確認される砂州においては、知見が不足している。

本章では、シロザケ産卵床が確認された砂州において、現地調査および浸透流計算を行い、浸透流の挙動の把握、産卵環境との関係について考察した。

2.2 方法

2.2.1 調査箇所

砂州における浸透流の現地調査は、毎年シロザケの産卵が確認される北海道の豊平川で行った。豊平川は石狩川の一級支川で、流路延長 72.5km、流域面積 902km²の河川である。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-1b に示す KP11.96 ~ 12.32 の延長 360m を調査対象区間とした。この区間の平均河床勾配は約 1/230、低水路幅は 60~70m であり、シロザケの産卵が確認される区間であることを、過去の調査で把握している^{4,6)}。また、本調査区間は豊平川扇状地の扇端にあたる個所である

2.2.2 現地調査

河床地形と浸透流、産卵床分布の関係把握するため、河床地形の横断測量、河川・砂州内同時水位調査および浸透流調査を低水路内で行った。各調査項目別の調査地点を図-1c に示す。なお、図-1c の黒網掛け部は後述する流況計算により、水深1cm以下となった個所であり、調査時において冠水していない個所である。調査地点のNo.1~5、7、8、10、11、14~16、18は調査時の流量では冠水する個所（以降、河川部）であり、No.6、9、12、13、17は調査時の流量では冠水しない砂州頂部の礫河原（図-1c の島状の黒網掛け部。以降、砂州頂部礫河原）である。

横断測量は、KP11.96~12.32の延長360mにおいて、縦断間隔10mで行った。測量はRTK-GPSを用いて、横断地形変化点の座標と標高を計測した。

河川・砂州内同時水位調査は、平成25年10月23日に図-1c に示す地点において行われた。調査は河川部のNo.5、8、11、14、16の5地点と、これらと同横断測線上の砂州頂部礫河原上のNo.6、9、12、13、17の5地点で行い、観測中に流量変化の影響を受けないように30分以内に水位を計測した。砂州頂部礫河原においては、地下水面が現れるまで

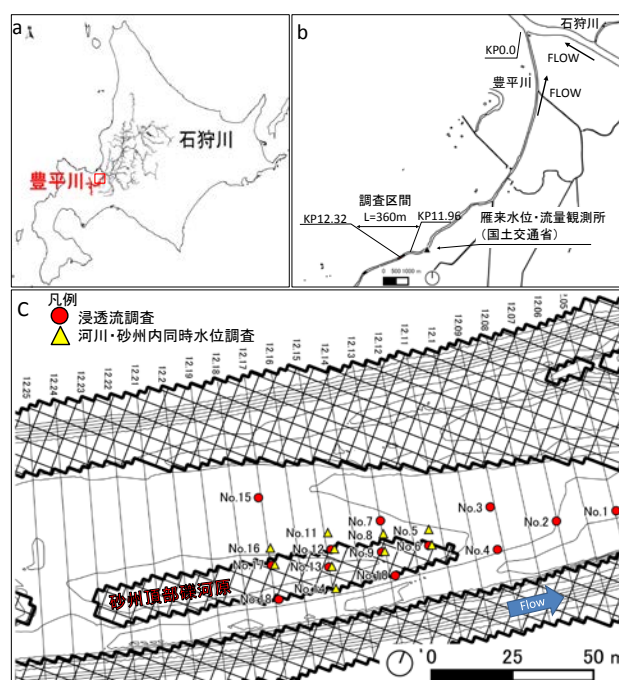


図-1 調査箇所

河床を掘削して河床内水位を計測した。なお、この河床内水位は、最下流のNo.6の標高を基準とした相対的な計測値として記録された。

浸透流調査は、平成25年10月24日、11月5日に図-1c に示す河川部のNo.1~4、7、10、15、18の8地点で行い、河床面から概ね20、40、60cmの深さの位置でそれぞれ調査を行った。また、砂州頂部礫河原であるNo.6、9、12、13、17においては、河川・砂州内同時水位調査による掘削底面より概ね20、40、60cmの深さの位置でそれぞれ浸透流調査を行った。そのため、河川部よりも河床面から深い位置で調査を行っている。調査方法は、Baxter et al.⁹⁾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速を算出した。なお、深さ40cm、60cmの浸透流速の算出には、それぞれ深さ20cm、40cmの同地点の計測点との水頭差により算出した動水勾配を用いている。また、浸透流はプラス値を湧出傾向、マイナス値を浸透傾向としている。

シロザケ産卵床位置は、札幌市豊平川さけ科学館が行った調査結果¹²⁾により把握した。産卵群には9月下旬から11月中旬に産卵を行う前期群と、11月下旬から1月上旬に産卵を行う後期群があり、これらが利用する浸透流環境が異なることから¹³⁾、検討においてもこれらを区別して取り扱った。

各調査の実施日とその日の日流量を表-1に示す。平成

25年10月23、24日、11月5日の河川・砂州内同時水位調査および浸透流調査の実施から、平成26年1月20、21日の横断測量調査の実施までに時期の開きがある。この期間に最大132m³/sの小出水が11月10日に、最大205m³/sの小出水が11月26日にそれぞれ発生している(暫定流量での値。国土交通省北海道開発局札幌開発建設部)。しかし、これらの出水の規模は小さく、継続時間が短いため、河床地形への影響は少ないと考えられる。なお、平成15~24年の10年間の年最大流量の平均値は405m³/sである¹⁴⁾。

2.2.3 解析

河床内における浸透流の挙動を把握するため、浸透流計算を行った。浸透流の計算は3次元計算モデルであるDTRANSU-3D¹⁵⁾を使用した。計算格子はiRIC¹⁶⁾を用いて横断測量結果から平面格子データを作成し、それをDTRANSU-3Dに対応した有限要素格子に変換し、河床面から6m深部まで0.2m間隔で作成した。河床上面の境界条件には、平面2次元の流況計算(iRIC Nays2D)により得た河川水位の平面分布を全水頭として設定した。流況計算の対象とする河川流量は、河川・砂州内同時水位調査日の日流量である13.94m³/sとした。また、表-1に示すとおり、10月7、11、14日を除くと産卵床調査日の日流量が10.63~14.35m³/sであり、浸透流計算で用いた日流量と大きく変わらない。このため、産卵床での浸透流速の検討においても、この計算結果を用いた。河川の流況計算の設定条件を表-2に示す。浸透流計算に用いた透水係数は、後述するとおり、現地での計測結果の範囲が1オーダー以内であり、大きく異ならないと判断して河床内分布を考慮せず、平均値の74.3m/dayを用いた。また、有効間隙率は沖積礫層の0.25を用い、比貯留係数は密な砂礫の $9.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ を用いた¹⁷⁾。左右岸、上下流および底部の境界条件は、これらの位置の浸透流調査を行って決定することが望ましいが、本研究は砂州地形による浸透流の発生に着目しているため、簡単のため次のように仮定した。現地の側岸の護岸がモルタル充填されたものであることを踏まえ、左右岸方向の浸透流の流入は平均河床勾配(1/230)と後述する平均透水係数(74.3m/day)の積である0.33m/dayが流入し、下流端から同一の流速が流出している条件とした。底面の境界条件は、流入がない条件とした。これらの浸透流計算の条件を表-3に示す。

浸透流の現地調査結果と計算結果の比較においては、鉛直方向の湧出・浸透の傾向が産卵環境に重要であることから、計算値として鉛直方向成分の浸透流の実流速を

表-1 調査時の流量

調査日	調査内容	日流量(m ³ /s) ※暫定値
9月27日	産卵床調査(さけ科学館実施)	12.15
10月7, 11, 14日	産卵床調査(さけ科学館実施)	7.40, 8.77, 17.81
10月23日	河川・砂州内同時水位調査	13.94
10月24日, 11月5日	浸透流調査	14.95, 13.15
11月6日	産卵床調査(さけ科学館実施)	10.63
11月18日	産卵床調査(さけ科学館実施)	14.31
12月4日	産卵床調査(さけ科学館実施)	14.35
12月18日	産卵床調査(さけ科学館実施)	13.94
1月8日	産卵床調査(さけ科学館実施)	データなし
1月20, 21日	横断測量調査	データなし

表-2 流況計算条件(GRIC)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2D
格子サイズ	約1×1m
マンギングの粗度係数	0.035
乱流モデル	ゼロ方程式
移流項の差分法	風上差分
下流端水位	等流水深

表-3 浸透流計算条件(DTRANSU-3D)

項目	計算条件
解析対象範囲	縦断方向: KP11.96~12.32 横断方向: 低水路左右岸法尻間 鉛直方向: 河床面から6m深部まで
格子(X×Y×Z)	約1×1×0.2m
透水係数	一定(74.3m/day)
有効間隙率	0.25
比貯留係数	$9.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$
差分法	中央差分
定常・非定常	定常計算
上流境界条件	節点流速0.33m/day
下流境界条件	節点流速-0.33m/day
上面境界条件	全水頭=河川水位
左右岸・底面境界条件	流入なし

用いた。なお、浸透流の実流速とは河床内の連続した空隙内を流れる流速であり、浸透流の断面平均流速を有効空隙率で除した値である¹⁷⁾。本稿では以降、実流速を浸透流速と呼ぶ。浸透流計算結果の3次元流線の可視化にはParaveiw¹⁸⁾を用いた。また、現地調査結果と計算結果の関係の検討は、GIS¹⁹⁾上で平面的に結果を重ね合わせて行った。

2.3 結果

2.3.1 河床地形と産卵床分布

横断測量結果から作成した河床高の平面図に産卵床位置をプロットしたものを図-2に示す。KP12.04~12.26付近の右岸側の砂州前縁線付近に、前期群を中心に多くの産卵床が分布していた。また、KP11.99~12.06の左岸部においても、後期群を中心に産卵床が確認される。なお、図-2の四角枠の範囲は、図-1cの範囲と概ね同じで、以

降の検討で表示している範囲と同じである。

2.3.2 浸透流調査結果

浸透流調査による各調査点の透水係数、動水勾配および浸透流速を深度毎に図-3a~cに示す。なお、砂州頂部礫河原では、河川・砂州内同時水位調査時の掘削底面を基準に浸透流調査を行っていることから、河川部と分けている。

透水係数の計測結果の範囲は32.4~157.4m/dayであり、透水係数の平均値は74.3m/dayであった。透水係数の深度方向での傾向として、No.1~3、10、12、15などで、深度が増すに伴い、透水係数が低くなる傾向が確認された。浸透流計算においては、深度方向による透水係数の低下量は地点により異なり、モデル化することが困難であるため、透水係数の平均値を用いた。

動水勾配の計測結果の範囲は、-0.38~0.32、浸透流速の範囲は-34.9~17.7m/dayであった。動水勾配および浸透流速は、深度方向で湧出・浸透の傾向が異なる地点が確認され、河川部の方が砂州頂部礫河原よりも顕著にみられた。また、砂州頂部礫河原では、その左岸部に位置するNo.6、9、12、17で、概ね全ての深度で浸透傾向であった。

2.3.3 河川・砂州内同時水位の平面分布

図-4に河川・砂州内同時水位調査の結果および流況計算による河川水位を示す。なお、河川・砂州内同時水位調査結果から作成したコンターも併記している。また、この流況計算による水位は、浸透流計算において全水頭として設定したものである。河川水位分布より、冠水しない砂州頂部礫河原の左右岸で水面に標高差が確認される。河川・砂州内同時水位調査においても、コンターにより砂州頂部礫河原の左岸上流側から右岸下流側に向

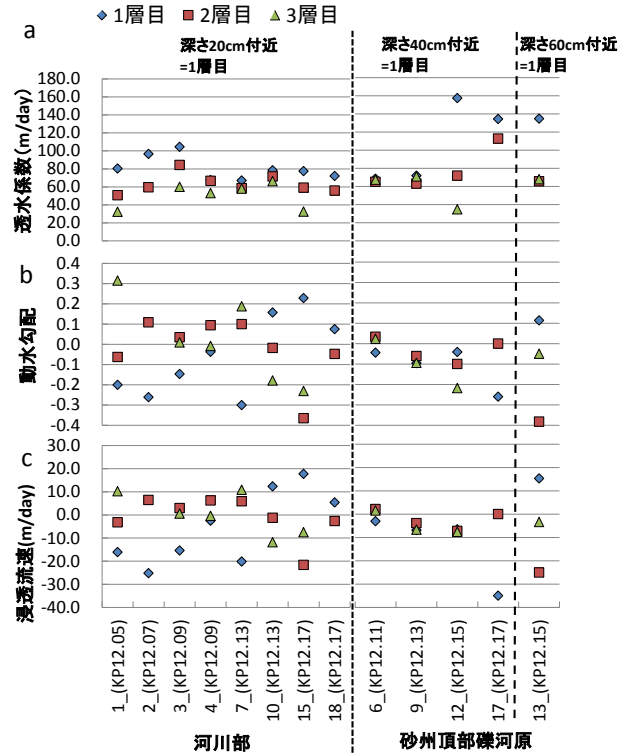


図-3 現地調査による浸透流調査結果

かって河床内水位が傾斜していることが確認される。

2.3.4 浸透流計算結果と産卵床分布

現地調査による河川・砂州内同時水位調査結果と浸透流計算により算出した全水頭の分布を図-5に示す。河川・砂州内同時水位調査結果では、基準点であるNo.6と最上部であるNo.16の水位差は37cmであった。浸透流計算によるこれらの地点の全水頭差は45cmである。また、河川・砂州内同時水位調査で確認された砂州頂部礫河原の左岸上流側から右岸下流側に向かって河床内水位が傾斜している

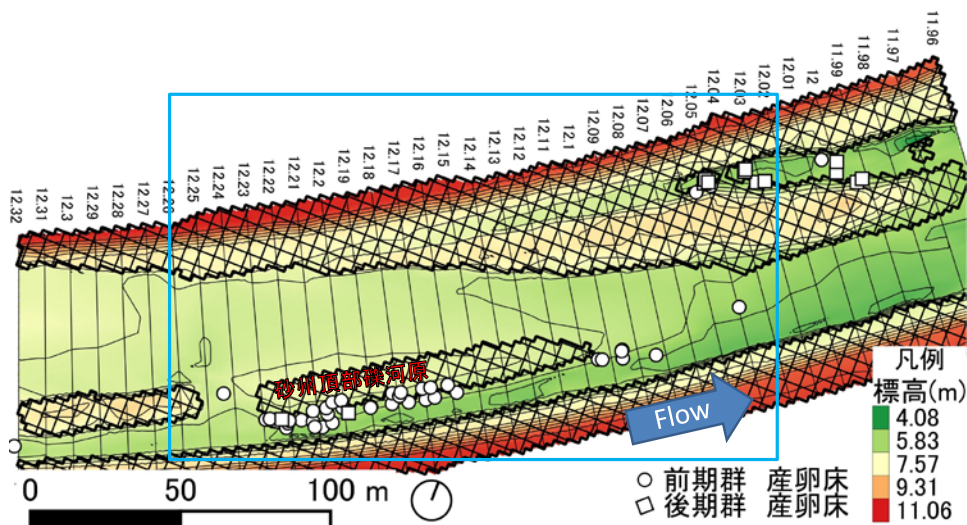


図-2 横断測量による河床地形と産卵床分布 (札幌市豊平川さけ科学館) の平面分布

傾向も、計算値の全水頭は表現している。そのため、概ね現地の全水頭の分布を浸透流計算は再現しているものと判断され、砂州前縁線付近の浸透流の検討に、今回採用した計算手法を用いることができると考えられる。

計算による浸透流速の3次元の流線を図-6に示す。なお、この流線の色は浸透流速の鉛直方向成分を表し、青が浸透、赤が湧出していることを表している。流線の分布より砂州頂部礫河原の左岸付近で河川水が浸透し、前縁線で湧出している状況が確認される。また、KP11.99~12.06付近の左岸の後期群の産卵床が多数確認された個所においても、上流からの浸透流が湧出していることが確認される。

図-7に河床面から深さ20cmの現地調査による浸透流速と、計算による鉛直成分の浸透流速および産卵床の分布を示す。これより産卵床が分布している個所の多くは、浸透流が湧出している個所であることが確認される。

計算による鉛直成分の浸透流速を、現地調査による浸透流速の結果と同様に深度毎に取りまとめた結果を図-8に示す。計算では現地調査と異なり、深度方向による傾向の違いはほとんど確認されず、ほぼ同一の値となった。なお、砂州頂部礫河原ではほぼ0値であるのは、図-6の流線より、側方の流れが卓越しているためと考えられる。

図-3、7、8に示すとおり現地調査と計算の浸透流速のオーダーは概ね一致した。現地は礫床であり、動水勾配の計測値は空隙の流速（速度水頭）を含んだものであった可能性がある。そのため、有効空隙中の浸透流速を算出した計算値と近い値になった可能性が考えられる。

図-7に示す産卵床位置における計算による鉛直方向成分の浸透流速を抽出した結果、中央値が6.74m/dayであり、25%値、75%値が、それぞれ-0.09、11.60m/dayで

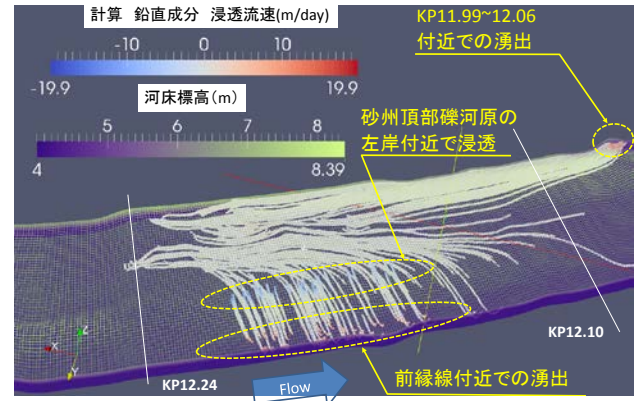


図-6 浸透流計算結果（河床地形（半透明）と実流速の3D流線）

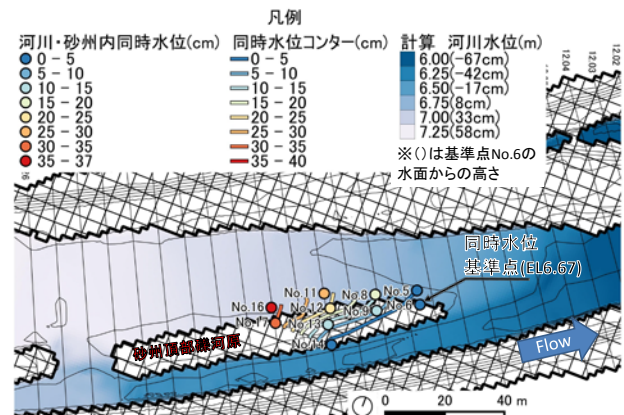


図-4 河川・砂州内同時水位と計算による河川水位の平面分布

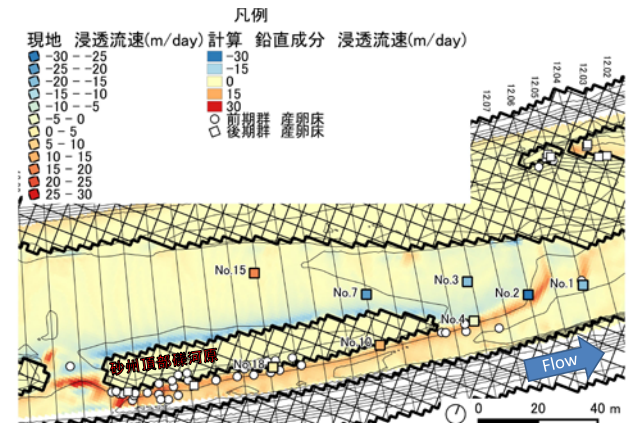


図-7 河床面から深さ20cmにおける現地調査による浸透流速と計算による鉛直成分の浸透流速の平面分布

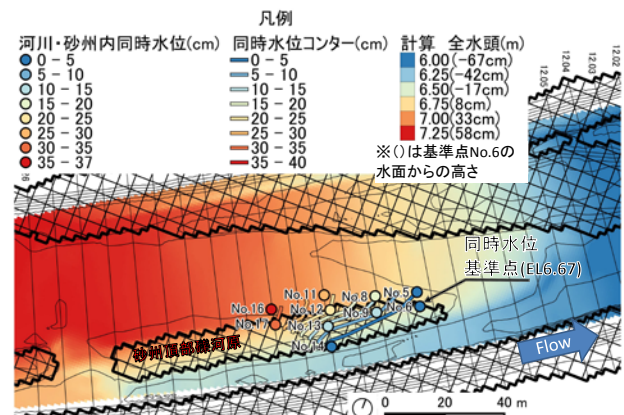


図-5 河川・砂州内同時水位と計算による全水頭の平面分布

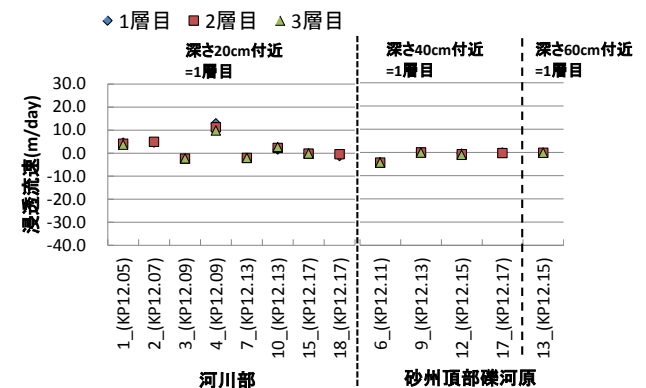


図-8 計算による鉛直成分の浸透流速

あった。

2. 4 考察

2.4.1 砂州地形による浸透流の発生

河川・砂州内同時水位調査の結果、**図-4**に示すとおり砂州頂部礫河原の左右岸で河川水位差があり、砂州頂部礫河原内部に左岸上流側から右岸下流側への水面勾配が発生していた。また、**図-7**に示すとおり、浸透流調査および浸透流計算の結果から、砂州頂部礫河原の左岸側で河川水が浸透傾向であり、右岸側の前縁線で湧出傾向であった。これは**図-6**の流線が示すとおり、砂州頂部礫河原の左岸側において河川水が浸透し、右岸側の前縁線で湧出している状況と考えられる。ダルシー則によると浸透流速は、透水係数と全水頭の動水勾配の積で表される¹⁷⁾砂州頂部礫河原の左岸上流側と右岸下流側の水位差が浸透流を河床内部に発生させたと考えられる。

浸透流調査により、深度による浸透流の流出入の傾向の違いが確認されたが、**図-8**に示すとおり浸透流計算ではこれが確認されなかった。この原因として、本研究では透水係数や境界条件を簡略化しているが、現地河床は3次元的に異なる透水係数の河床材料が分布していることや、現地の境界条件が計算条件と異なる可能性が考えられる。しかし、本研究の着目点である砂州頂部から前縁線付近の浸透流の発生については、**図-4**に示すような砂州頂部と前縁線との局所的な河川水位差が影響しているため、この水位差がある場合は、透水係数分布や境界条件が極端な場合を除き、砂州頂部で浸透し前縁線で湧出するという傾向は変わらないと考えられる。

2.4.2 浸透流と産卵床の分布

産卵床位置の計算による鉛直方向の浸透流速を抽出し、取りまとめた結果、中央値が6.74m/dayであった。既往研究ではシロザケ産卵床の特徴として、浸透流が湧出傾向で、河床内水温が高い個所を利用することが指摘されている⁷⁾。本研究では水温は計測していないが、浸透流の湧出個所において産卵床が確認されており、既往研究の結果と一致している。浸透流は溶存酸素の供給の面から卵の生存にとって重要であり、溶存酸素量の少ない地下水の湧出が卓越する箇所では生存率が低いことが指摘されている²⁰⁾。浸透流中の溶存酸素は河床内の代謝活動により消費されることから、溶存酸素量は浸透時間の影響を受け²¹⁾、浸透時間の増加と共に減少することが考えられる。砂州地形が発生させる浸透流は、頂部から前縁線という短い距離の浸透であるため、溶存酸素量も比較的高いことが考えられる。すなわち、砂州地形による浸

透路長の短い浸透流の発生は、シロザケの産卵環境に重要であると考えられる。

一方、**図-2**に示すシロザケの後期群の産卵床が多く確認されたKP11.99～12.06の左岸部では、**図-6**に示すとおり、浸透路長の長い浸透流が湧出している状況が確認される。シロザケの前・後期産卵群で利用する浸透流環境の違いがあることが指摘されており、前期群は河川水に近い変動の個所を利用するのにに対し、後期群は水温が河川水に対して高く、かつ一定の水準で推移する個所であるとされている¹³⁾。浸透路長の違いは河床内水温に影響を及ぼすため、これが前・後期群の産卵床分布に影響している可能性がある。

3. 物理環境要素の計算結果を用いた PHABSIM によるシロザケ産卵環境の評価について

3.1 目的

河道改修が産卵環境に及ぼす影響を検討するためには、改修前後の産卵適地の量・質的な変化を比較する必要がある。著者らは過去に、物理環境値から魚類などの生息適地を把握するPHABSIM (Physical Habitat Simulation Model)⁵⁾にシロザケ産卵環境に影響する物理環境要素を用いて、平面的な産卵適地の推定を行った⁶⁾。この際の調査数量は、数値計算結果を用いた流速、水深を除き、河床材料、浸透流、河床内水温の物理環境値を面的に現地調査したため、膨大となった。また、河川改修により変化する産卵適地の将来予測を行うには、物理環境の予測値が必要である。これらの現地調査量の軽減と、将来予測を可能とする手段として、数値計算による物理環境値の推定が有効と考えられる。

本章では、数値計算によりシロザケの産卵環境に影響する物理環境値を予測し、それを用いてPHABSIMにより産卵適地の推定を試みた。そして、現地調査結果と比較することにより、その適応性を検討した。

3.2 方法

3.2.1 対象箇所

本研究の対象河川は、前章と同様の豊平川とし、調査対象区間も前章とほぼ同様の区間であるKP11.8～13.0とした。

3.2.2 解析

本研究でシロザケ産卵適地の推定に用いる物理環境要素は、流速、水深、河床材料の平均粒径、浸透流とした。河床内の水温や溶存酸素²⁰⁾も産卵環境の解析に用いることが望ましい。しかし、ここでは河床微地形に起因した浸透路長の短い伏流水の湧出個所を利用する前期群¹³⁾のみ

対象とし、水温と溶存酸素は解析に用いなかった。

解析の流れを述べると、まず豊平川の対象区間において、平成18年に調査された河床形状、粒径を初期条件とし、平成19年4月～平成23年9月の期間の河床変動計算を行った。次に計算により得られた河床地形、平水時の河川水位分布を用いて浸透流計算を行った。そして、これらの数値計算で得られた物理環境値を用いてPHABSIMにより産卵適地の推定を行った。また、物理環境の計算結果と産卵適地の推定結果は、GIS¹⁹⁾に取り込み、河床地形により区分した範囲の値を集計し、後述する平成23年に行った現地調査結果と比較した。

a) 河床変動計算

流速、水深、平均粒径を算出する河床変動計算には、iRIC2.3のNays2DHソルバー¹⁶⁾を用いて、表-4に示す条件で計算を行った。計算格子は、平成18年に国土交通省北海道開発局札幌開発建設部が実施した、縦断間隔200mの河川定期横断測量結果から作成した。河床材料の粒度構成は、同建設部がKP12~14の区間で1km間隔に左右岸・流心の3点で実施した河床材料調査結果の平均値を算出し、その値を図-9のとおり近似したものをを用いた。計算においては、平成20年に国土地理院で撮影された写真²²⁾で樹木が確認される範囲に植生の抵抗を設定した。植生による遮断面積と樹木の抵抗係数は、内田ら²³⁾が豊平川を対象に河畔林の影響を検討した際の値を用いた(表-4)。

計算に用いた河川流量は、国土交通省北海道開発局の雁来水位流量観測所における観測値¹⁴⁾を用いた。また、計算対象期間が約4年半と長期であり、計算量を減らす必要がある。そのため、図-10に示すとおり平成19年4月から平成23年9月までの融雪出水規模程度の流量である200m³/s以上を計算に用いた。ただし平成23年9月の1,000m³/sを超える出水のみは減水期の影響を考慮するため、平水流量の14.4m³/sに減衰するまでの期間も含めた。これにより計算対象時間は425時間となった。産卵適地の推定に用いた流速、水深の計算値は、計算により得られた河床地形に14.4m³/sの流量が流れている状態の値とした。

b) 浸透流計算

浸透流計算は、3次元計算モデルであるDTRANSU-3D¹⁵⁾を使用した。浸透流計算の条件を表-5に示す。計算格子は前述した河床変動計算を行った平面格子データを、DTRANSU-3Dに対応した3次元の有限要素格子に変換して作成した。深度方向の格子間隔は0.2m間隔とし河床面から20m深部まで作成した。河床上面の境界条件として、平水流量14.4m³/sが流れた状態の平面的な河川水位分布を全水頭として設定した。透水係数は、後述する現地でも実施し

た水頭落下試験の平均値である57.9m/dayを用いた。また、有効間隙率は沖積礫層の0.25を用い、比貯留係数は密な砂礫の $9.4 \times 10^{-6} \text{m}^3$ を用いた¹⁷⁾。左右岸、上下流および底部の境界条件は、これらの位置の浸透流調査を行って決定することが望ましいが、本研究は河床微地形による浸透流の発生に着目しているため、簡単のため次のように仮定した。現地の側岸の護岸がモルタル充填されたものであることを踏まえ、左右岸方向の浸透流の流入は無いものとした。上流端からの浸透流の流入は平均河床勾配(1/420)と平均透水係数(57.9m/day)の積である0.14m/dayが各格子に流入し、下流端から同一流量が流出する条件とした。底面の境界条件は、流入がない条件とした。

産卵適地の推定では、シロザケが産卵する河床面付近での浸透流の湧出・浸透の傾向が重要である。そのため、計

表-4 河床変動計算条件 (iRIC NAYS2D ソルバー)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2DH
ソルバー・タイプ	有効
移流項の差分法	風上差分
河床材料の種類	混合粒径
	交換層厚0.30m
	堆積層厚0.15m
	掃流砂&浮遊砂
流砂の種類	ゼロ方程式
乱流モデル	樹木あり
	植生の遮断面積0.1
	樹木の抵抗係数1.2
境界条件	等流水深
格子設定	下流端水位
	格子サイズ
	約4×4m
	マンニングの粗度係数
	河床 0.030
	河岸護岸 0.025

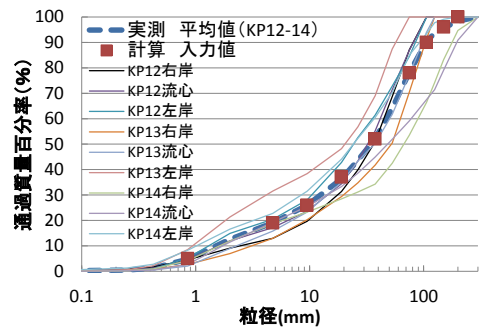


図-9 河床変動計算に用いた粒度分布

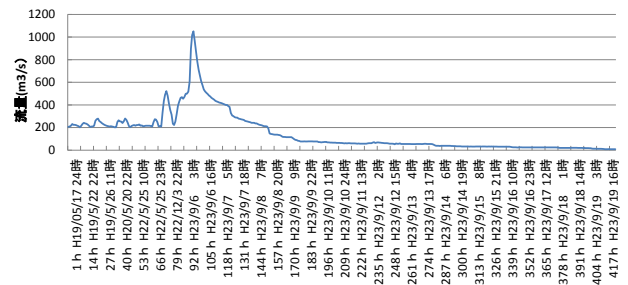


図-10 河床変動計算に用いた流量 (雁来水位流量観測所¹³⁾)

表-5 浸透流計算の条件 (DTRANSU3D・EL¹⁵⁾)

項目	計算条件
解析対象範囲	縦断方向: KP11.8~13.0 横断方向: 低水路左右岸法尻間 鉛直方向: 河床面から6m深部まで
格子(X×Y×Z)	約4×4×0.2m
透水係数	一定(57.9m/day)
有効間隙率	0.25
比貯留係数	$9.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
差分法	中央差分
定常・非定常	定常計算
上流境界条件	節点流速0.14m/day
下流境界条件	節点流速0.14m/day
上面境界条件	全水頭=河川水位
左右岸・底面境界条件	流出なし

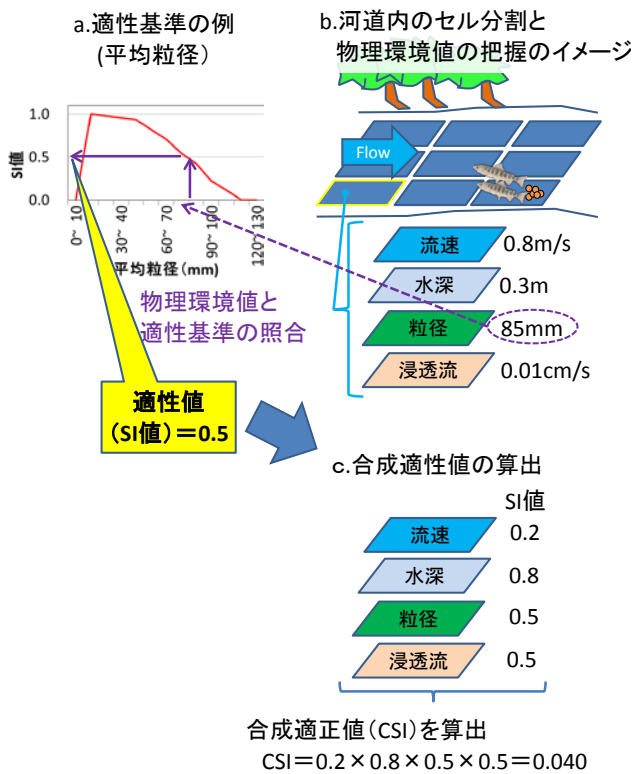


図-11 PHABSIMにおける河道内セルの合成適性値の把握イメージ

算結果の内、河床表面から20cm深部の鉛直方向成分の浸透流の実流速を用いた。なお、浸透流の実流速とは河床内の連続した空隙内を流れる流速であり、浸透流の断面平均流速を有効空隙率で除した値である¹⁷⁾。本稿では以降、実流速を浸透流速と呼ぶ。

c) PHABSIM

PHABSIMによる検討のイメージを図-11に示すが、①最初に現地調査などにより、対象とする生物が利用している個所の物理環境値(流速、水深、河床材料等)を把握する。②利用場としての適性を水深、流速などの各物理環境値で基準化した図または表である適性基準⁹⁾を作成する(図-11 a)。適性基準は物理環境値に対する適性値(Suitability Index Value: 以降、SI値)⁹⁾の関係で表され、適性値が高い程、利用に適した環境であることを意味する。SI値の算出方法は後述するが、0~1の値で表される。③河道内をセル分割し、現地調査や数値計算により、各セルの物理環境値を把握する(図-11 b)。④河道内の各セルの物理環境値を適性基準に照らし、各セルのSI値を把握する(図-11 a b)。複数の物理環境要素が生物による利用に関係する場合は、各セルで各物理環境要素のSI値を掛け合わせ、合成適性値(Composite Suitability Index Value: 以降、CSI値)⁹⁾を算出する(図-11 c)。CSI値に対する利用適性の一つの考え方として、CSIが0.5を物理環境要素数でべき乗した値以上であれば、利用可能セルとするものがある⁹⁾。

本研究ではシロザケの産卵適地を対象としており、流速、水深、河床材料、浸透流を対象に、各物理環境要素の産卵場としての適性基準⁹⁾を作成した。産卵床位置の物理環境値は、著者らが過去に行った方法⁹⁾と同様の方法で把握した。これは現地調査結果の離散した値を内挿補間して、物理環境値の平面分布を作成し、産卵床位置の値を抽出し、把握したものである。

適性基準には、物理環境値に対する利用頻度分布に基づく第2種適性基準⁹⁾と、河道内の環境的な偏りに対する補正を行った第3種適性基準⁹⁾がある。例えば、河道内に様々

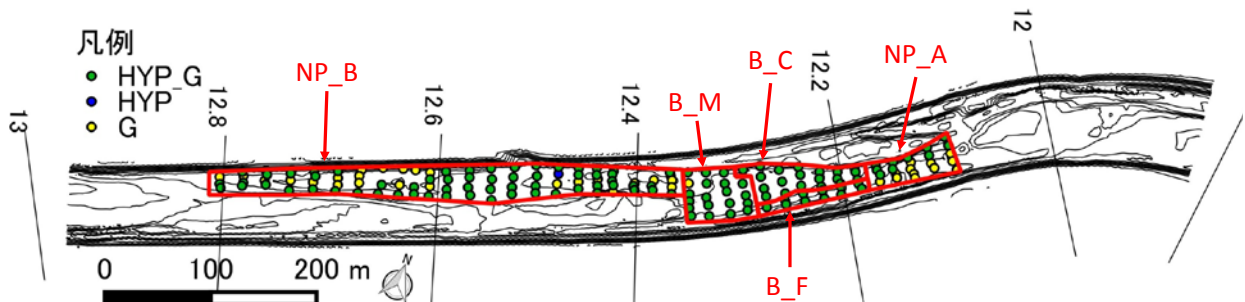


図-12 現地調査地点 ※G: 河床材料調査位置、HYP: 浸透流調査位置
B_F: 砂州前縁部、B_C: 砂州頂部、B_M: 砂州主流横断部、NP_A: 下流狭窄部、NP_B: 上流狭窄部

な流速値が分布し、これらの河道内の面積が均等量である場合は、第2種適性基準を使用することが簡易で良いと考えられる。しかし例えば、遅い流速と速い流速における利用個体数が同じでも、遅い流速個所の面積が少ない場合には、速い流速個所よりも選択的に利用されている可能性がある。このような場合には、第3種適性基準を用いる方が妥当と考えられる。本研究では、第3種適性基準（以降、SI3）を用いることとし、SI3を式(1)、(2)にて作成した。

$$c_i = \frac{SN_i}{EN_i} \quad (1)$$

$$SI3_i = c_i / c_{max} \quad (2)$$

ここで、SI3_i：第3種適性基準、SN_i：産卵床の確認数、EN_i：河道内のセル数、c_{max}：cの最大値である。なお、添え字のiは、ある物理環境要素の数値帯に属するものであることを表す。

また、作成したSI3が物理環境値に対してなめらかでない部分や、既往文献から検討し適切でないと判断される部分を、後述する方法で調整し、これをSI4とした。

各セルの各物理環境要素のSIは、数値計算で把握された2×2mメッシュの物理環境値をSI4に代入して算出した。また、合成適性値（Composite Suitability Index Value. 以降、CSI）⁹⁾は、式(3)により各セルで算出した。

$$CSI = SI_a \times SI_b \times SI_c \quad (3)$$

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

なお、PHABSIMによる産卵適地の推定区間は、境界条件の影響を受けていると考えられる計算範囲の上下流部を除いたKP12.1~12.8付近とした。

3.2.3 現地調査

数値計算による物理環境値の予測精度を確認するため、平成23年に対象区間において、横断測量、河床材料調査および浸透流調査を行った。河床材料、浸透流の調査地点を図-12に示す。数値計算と現地調査結果の比較は、図-12に示す赤枠の区分で行い、平水時に冠水している砂州の前縁部、頂部および砂州上を濘筋主流が横断する位置（以降、主流横断部）をそれぞれ、B_F、B_C、B_Mとした。また、その上下流の平水時冠水しない比高の高い砂州により、水面幅が狭窄している個所をそれぞれNP_B、NP_Aとした。

横断測量は、KP11.8~13.0の範囲の延長1.2kmにおいて、縦断間隔10mで行った。

河床材料調査は、縦断間隔20mで横断測線を設定し、1横断測線あたり平水時水面下の主流部を概ね等分した4~5地点を調査した。河床材料の採取は、河床表面から河床

下30cm程度までとした。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、平均粒径を算出した。

浸透流調査の地点は、河床材料調査と同一とした。調査方法は、Baxter et al¹⁰⁾が考案した方法で行い、ピエゾメータの計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速を算出した。

なお、調査地点の中には流速や水深が大きいため、実施できないものがあつた。そのため、図-12に示すように地点により調査項目が異なる。

PHABSIMによる産卵適地推定の結果と比較する実際の産卵床分布は、札幌市豊平川さけ科学館¹²⁾が本調査と同年度に行った調査結果を用いた。

3.3 結果と考察

3.3.1 数値計算結果と実測の比較

a) 河床高の比較

図-13aに平成23年に調査した実測の河床高を示す。実測ではKP12.2付近の左岸部とKP12.4付近の右岸部に、比高の高い砂州が確認され、その対岸側が深掘れしている。図-13bに示すとおり河床変動計算においてもこの状況は概ね再現されている。平成20年に撮影された国土地理院の航空写真では、この比高の高い砂州で、樹林化が確認されており（図-13bの網掛けの範囲。数値計算でも樹木を設定。）、平成23年9月の現地調査時においても、樹林化が確認されている。そのため、これらの比高の高い砂州と対岸部の深掘れは、樹木の影響で緩流域となった個所に土砂が堆積し、その影響で対岸部の主流部が狭窄して深掘れした状況と考えられる。

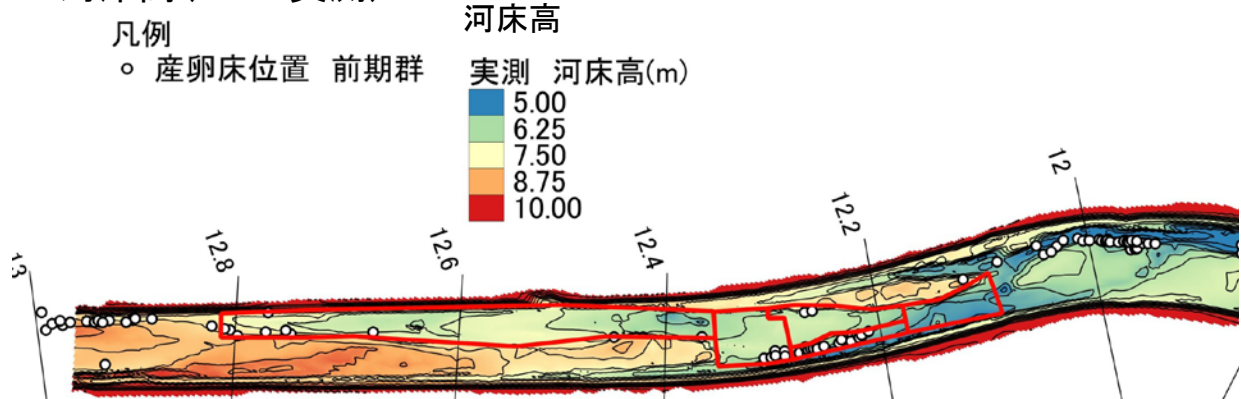
KP12.6~12.8の右岸部は、平成23年9月の実測においては標高が高く、現地調査時に樹林化していることを確認している。しかし、平成20年の国土地理院の航空写真では樹木とは判断できなかったため、計算において植生設定を行っておらず、河床高が発達しなかった。

KP12.0周辺とその下流およびKP12.8周辺とその上流は、実測に対する計算の精度は低いが、これは計算区間の上下流端であり、境界条件の影響を受けたためと考えられる。

b) 河床材料粒径の比較

図-12に示す区分で集計した、平均粒径の実測値および計算値の平均値と標準偏差を図-14に示す。砂州前縁部B_Fと下流狭窄部NP_Aでは計算値よりも実測が18mm程度大きいが、その他は10mm以内の差である。そのため、計算結果は概ね現地を再現できていると考えられる。

a. 河床高(H23 実測)



b. 河床高(計算)

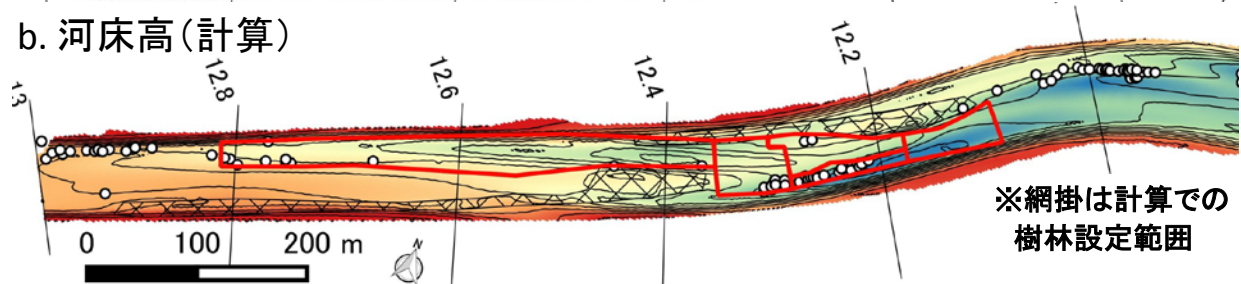


図-13 実測と数値計算の河床高の比較

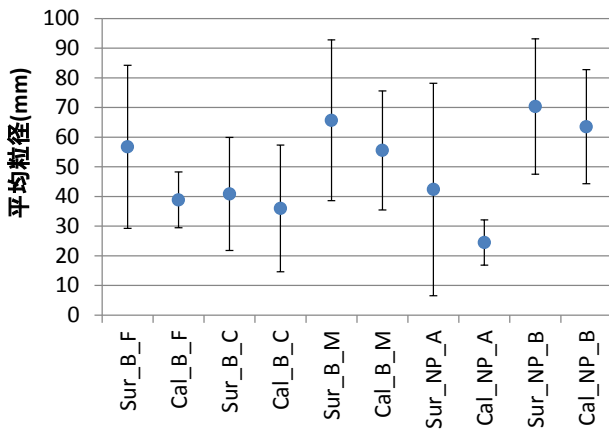


図-14 実測と数値計算の平均粒径の比較

※「Sur」、「Cal」はそれぞれ実測、計算値を示す。

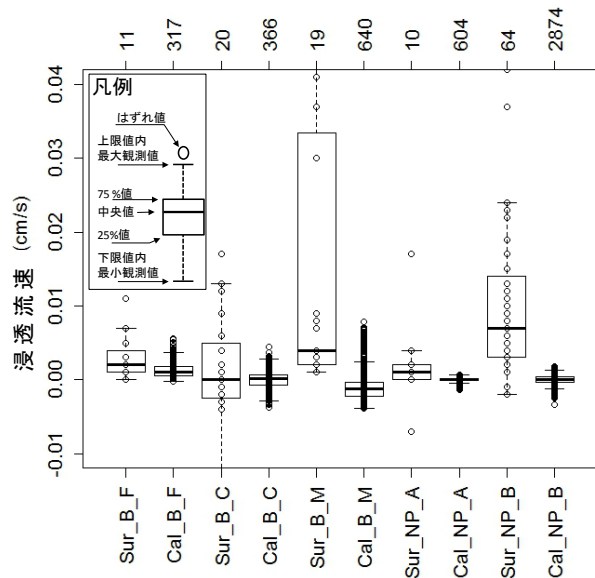


図-15 実測と数値計算の浸透流の比較

c) 浸透流の比較

図-12に示す区分で集計した、浸透流の実測値と計算値の中央値、25、75%値を図-15に示す。なお、ここで中央値、25、75%値により比較しているのは、浸透流は湧出、浸透で正負の値をとるため、これらを平均すると傾向が把握できないためである。砂州の主流横断部B_M、上流狭窄部NP_Bを除き、実測値と計算値の中央値の差は0.001cm/s未満であり、ほぼ同程度である。また、実測値と計算値ともに砂州頂部B_Cでは、25%値以下でマイナス値(浸透)が確認されるが、砂州前縁部B_Fでは確認されず、ほぼプラス値(湧出)のみとなっている。このことから、数値計算においても砂州頂部で河川水が浸透し、前縁

部で湧出するといった河床地形に起因する浸透流の傾向は再現されていると考えられる。ただし、実測値は計算値と比べ、データの範囲が広い。この原因として、数値計算においては、単一の透水係数しか用いていないが、現状で河床内部に空間的に様々な透水係数が分布しているためと考えられる。

3.3.1 PHABSIMによる産卵適地の推定

a) 適性基準の補正

SI3を図化したものを図-16a~d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を作成した。

平均粒径のSI4は、図-16 a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。ただし、サケ科魚類が使用できる50%粒径は体長の1/10との知見がある²⁴⁾。そのた

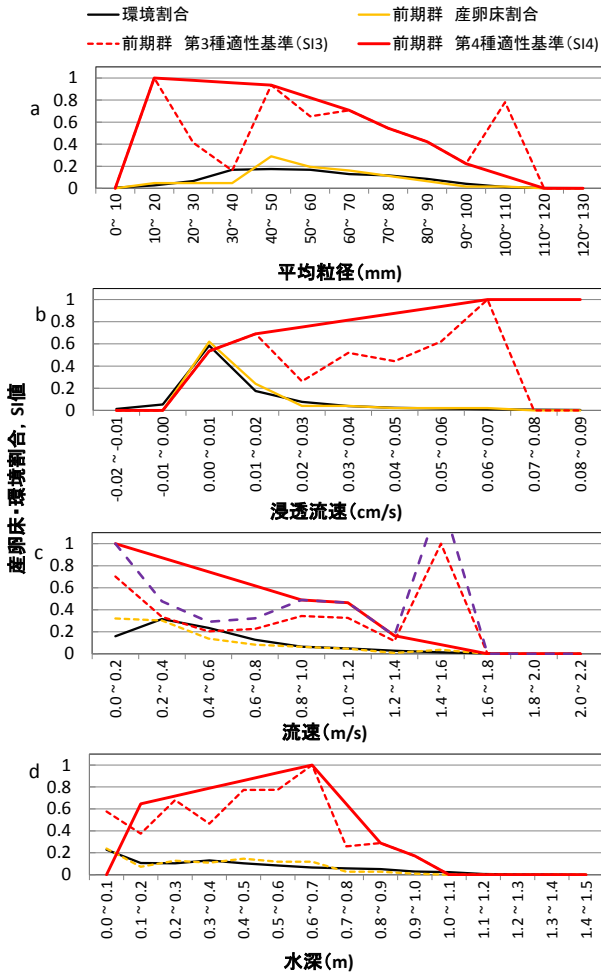


図-16 シロザケ産卵床の適性基準

め、大きすぎる粒径は産卵床造成の支障となることから、100~110mmの適性値の凸は無視し、その上下の数値帯の適性基準値を結んだ。

浸透流速のSI3は、図-16bに示すように0.01~0.02cm/sおよび0.06~0.07cm/sで凸状に値が大きい。シロザケは浸透流が湧出傾向の個所を産卵環境として利用しているとの指摘があり、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ではSI3の凸部を結び、凹部を埋め、SI3の最大値より大きい数値帯のSIは1.0とした。

流速のSI3は、図-16cに示すとおり、0.0~0.2m/s、1.4~1.6m/sで凸となった。SI4では、凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。ただし、既往研究では流速0.8m/sを超えると雌は産卵行動をほとんど行わなくなるとの指摘がある²⁵⁾。そのため、1.4~1.6m/sの凸を無視することし、0.0~0.2m/sの数値帯のSIが1となるように全体を補正した(図-16c紫線)。そして、1.4~1.6m/sの凸を無視し、上下の数値帯の適性基準を結んだ。

水深のSI4は、図-16dに示すとおり、SI3の凸部を結び、凹部を埋めたSI分布とした。ただし、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。

b) 適性基準の補正

PHABSIMにより算出したCSIと産卵床の分布を図-17に示す。ここで例えば、利用可能なCSIは0.5を物理環境要素数だけべき乗した値以上だとすると⁹⁾、0.063以上がそれにあたる。KP12.1~12.3付近の砂州前縁部のCSIが0.063以上であり、実際の産卵床もこの位置に多く確認されている。そのため、本手法により、ある程度産卵適地の推定が可能と考えられる。

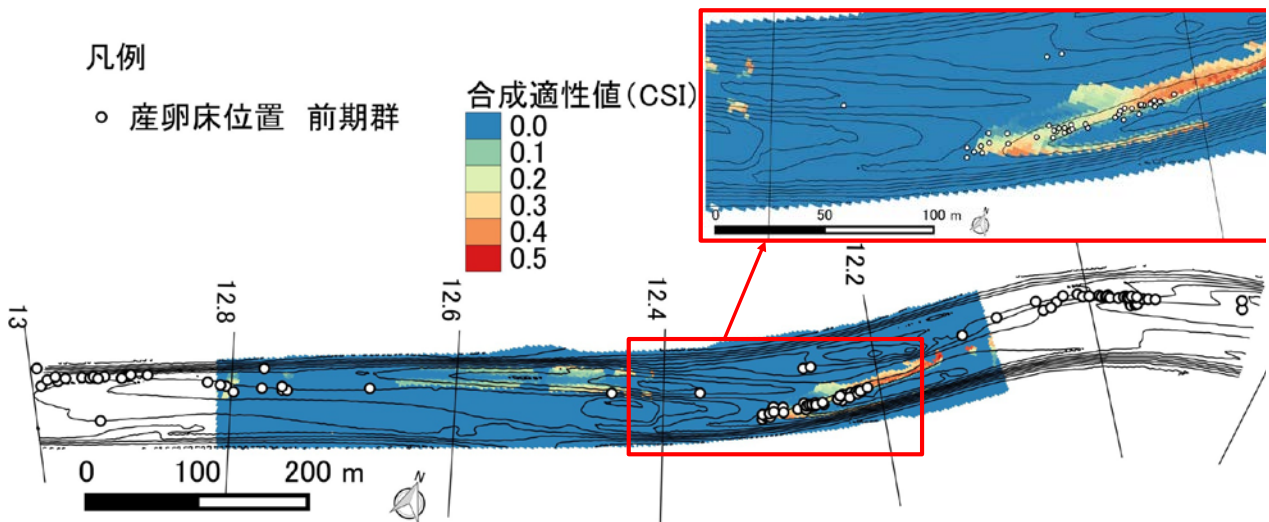


図-17 PHABSIMによる合成適性値と産卵床との対応

4. 岩河床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響

4.1 目的

近年、河川の中上流域では河床低下により脆弱な岩河床が露出し、流砂の衝突による岩盤浸食で、さらに河床低下が進行する事例が確認されている^{26, 27)}。河床材料の消失と岩盤浸食に伴う浸食部の滞筋化は、治水上ならびに河川環境上、様々な問題を引き起こしている。河川環境のうち、魚類に焦点を当てると、底生魚や遊泳魚の生息環境の減少をもたらし²⁶⁾、砂礫堆に産卵するサケ科魚類の産卵環境の消失にもつながる。

給砂量の減少や掃流力の増加といった河床低下の原因を解決したとしても、露出した岩盤床の粗度が低い場合、礫の限界掃流力が下がるため、再び礫床に復元することは非常に困難となる²⁸⁾。そのため、対策として岩河床を人為的に覆礫し、礫床を回復させることが試験的に行われているものの、出水による滞筋の再露岩が生じている²⁷⁾。また、大型水理模型実験による岩河床の覆礫対策の効果の把握も行われているが、砂州の形成に伴う深掘れの露岩部が縦断方向に伸びる現象が確認されている²⁹⁾。このように、岩河床の覆礫に関しては、砂州形成と露岩の相互作用や、持続的に効果を発揮する覆礫方法についてより詳細な検討が必要となっている。

本研究は、自由砂州が形成される水理条件において、岩河床上に覆礫した場合を想定し、覆礫厚の違いによる砂州形状と岩盤の露出箇所の変化とその機構を移動床水理模型実験により明らかにすることを目的としたものである。

4.2 方法

4.2.1 実験水路

実験水路は、延長 43m、幅 0.9m、勾配 1/200、水路底部には平滑な塩ビ板を設置したものをを用いた。なお、この塩ビ板のマニング粗度は、今回設定する水理条件において 0.01 であることを把握している。また、塩ビ板の色は、後述する露出面積の検出が容易となるよう、河床材料と識別可能な緑色とした。

実験では、河床材料として粒径 0.77mm のほぼ均一な珪砂を敷均し（以降、敷き設した河床材料を「覆礫」と称する）、流量 0.005m³/s を 10 時間通水し、水路上流端から 30 分間隔で給砂を行った。なお、この河床材料の粒径から算出されるマニング粗度は、Manning-Stricker 式¹⁷⁾の粗度 ks に粒径の 2 倍を代入した場合、0.014 となる。なお、本実験における水路諸元ならびに実験条件は、河床低下により軟岩の露出が問題となっている、北海道オ

表-6 実験条件

ケース	河床材料厚	単位幅給砂量
ケース08-100	8cm	平衡給砂量 0.0247cm ² /s
ケース02-100	2cm	平衡給砂量 0.0247cm ² /s
ケース02-030	ケース02-100 通水終了河床	30%給砂量 0.00741cm ² /s
ケース04-100	4cm	平衡給砂量 0.0247cm ² /s
ケース04-030	ケース04-100 通水終了河床	30%給砂量 0.00741cm ² /s

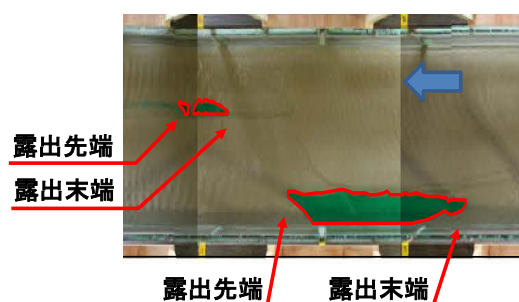


図-18 露出部ポリゴン化の例と露出部の先端、末端の名称

ホーツク地域の 1 級河川常呂川の支川である無加川の 1/100 スケールを想定している。

4.2.2 実験ケース

実験ケースは表-6 に示すとおりで、ケース 08-100 の覆礫厚は砂州が十分発達しても底板が露出しない 8cm、ケース 02-100 の覆礫厚は十分発達した砂州波高よりも薄い 2cm、ケース 04-100 の覆礫厚は十分発達した砂州波高程度の 4cm とした。これらのケースの単位幅給砂量は、実験時に確認した水路下流端の単位幅流砂量と概ね同量の平衡条件である 0.0247cm²/s とした。また、実河川の河床低下箇所の多くは、何らかの影響で土砂収支が負となった箇所である。ケース 02-030、04-030 はこのような条件を想定し、それぞれケース 02-100、04-100 の実験終了後の河床を初期河床とし、単位幅給砂量を平衡給砂量の 30% である 0.00741cm²/s とした。実験に用いた水理条件は、小規模河床波が発生しないように設定し、交互砂州の発生区分¹⁷⁾によると、交互砂州と複列砂州の発生領域の境界付近となる条件である。なお、ケース 02-100、04-100 の通水終了後に本稿には用いなかった他の計測のため 1 時間程度、給砂を行いながら通水を行った。そのため、ケース 02-100、04-100 の実験終了後の値とケース 02-030、04-030 の実験開始時の値に若干差異が生じている。

4.2.3 計測

(a) 露出率の把握

通水中に砂州形成による底板の露出箇所(以降、露出部)の変化を把握するため、高さ2mの架台にデジタルカメラを鉛直下向きに設置し、これを移動させながら、縦断間隔2m毎に水路全延長を30分間隔で撮影した。なお、水路全延長の1回あたりの撮影は10分以内で完了している。

撮影された写真から、30分毎の露出部の面積算出を行った。算出にあたっては、図-18に示すように、CADにより露出部の範囲をポリゴン化し、面積を計測した。そして、各ケースの各時間における露出面積の合計値を、水路面積で割った値(以降、露出率)を算出した。また、図-18に示すとおり、露出部の先端と末端を、それぞれ「露出先端」、「露出末端」と定義して露出部の位置を明確にした。

(b) 砂州波高計測

砂州波高の時間変化を把握するため、通水中に30分間隔で水路内に発生した砂州の計測を行った。通水中は河床形状が変化するため、計測は迅速に行う必要がある。そのため、ここでは計測を簡易化するため、波高の定義を、砂州先端付近の砂州頂部と淵の高低差として計測を行った。このため、一般に使用されている波高よりやや小さな値を示すこととなる。

(c) PIV解析

PIV (Particle Image Velocimetry) 解析のため、通水中に水路下流端から12.5~17.5mの延長5mの範囲を、高さ2mの位置に鉛直下向きに設置した2台のビデオカメラにより撮影を行った。ビデオカメラは動画で614万画素のものをを用い、トレーサ散布は、撮影区間の少し上流から30分間隔で行った。PIV解析は「イメージトラッカー(PIV)」(株式会社デジモ)を用いた。流速ベクトルは5×5cmメッシュで算出し、解析時間は10秒、解析画像の時間差は1/30秒とし、300回の解析の平均値を用いた。なお、このビデオカメラによる撮影区間は、前述したデジタルカメラ撮影が行えないため、ビデオカメラの静止画をカメラ撮影写真の代替とした。

(d) 露出部の移動速度の把握

露出部の変化の要因を検討するため、露出先端・末端の移動速度と、底板が露出しないケース08-100の砂州の移動速度を比較した。露出先端・末端の移動距離の算出は撮影写真から、砂州の移動距離の算出は通水中に砂州先端の位置を計測することにより、それぞれ行った。移動速度の算出対象とした時間は、ケース08-100、02-100、04-100は砂州波高が発達した通水5時間から通水終了までとし、給砂量を減らした継続通水実験であるケース02-030、04-030は通水開始から通水終了までとした。

4.3 結果

4.3.1 砂州波高と露出率

通水中に30分毎に計測した砂州波高の平均値と標準偏差、露出率を図-19に示す。一部欠測が生じた時間もあるが最終計測値を比較すると、覆礫厚が最も厚いケース08-100では、平均波高は3.3cmとなり、露出部は確認されなかった。覆礫厚が発達した波高よりも薄いケース02-100と、同ケースの給砂量を減らした継続通水実験であるケース02-030では、平均波高がそれぞれ1.7、2.0cm、露出率がそれぞれ16、20%となった。また、覆礫厚が発達した波高程度であるケース04-100と、同ケースの給砂量を減らした継続通水実験であるケース04-030では、平均波高がそれぞれ2.9、3.0cm、露出率が共に7%となった。なお、前述したように、ここでの波高は簡易的に測定したものであることから、一般的に定義される波高(同一砂州における横断面内の高低差の最大値)よりは小さい値となっている。

ともに平衡給砂条件である、露出率が大きいケース02-100と、露出率が小さいケース04-100に着目すると、両ケースともに、通水5時間程度まで波高発達に伴い露出率が増加している。しかし、ケース04-100では波高発達が安定した通水5時間以降、露出率の増加がほぼないが、ケース02-100では露出率が増加している。このため、ケース02-100の露出率の増加には、波高発達以外の要因も含まれていると考えられる。

4.3.2 露出部の変化

各ケースの露出部の時間変化を確認するため、露出の有無を2色化したものを図-20に示す。白い部分は砂粒子に底板が覆われている部分であり、黒い部分は底板が露出している部分である。なお、ここでは抜粋して、通水5時間から通水終了までの1時間間隔の様子を示した。

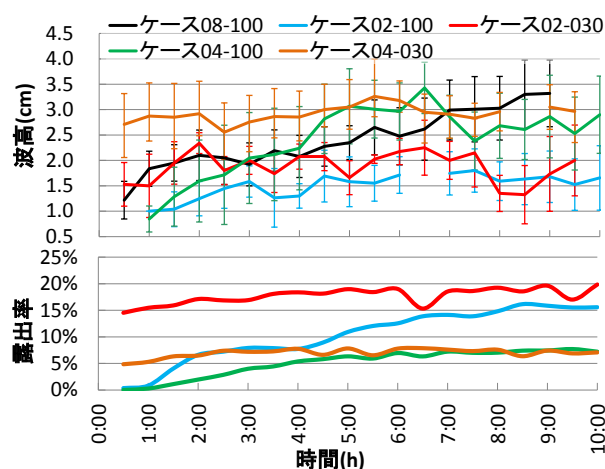


図-19 砂州波高、露出率の時間変化

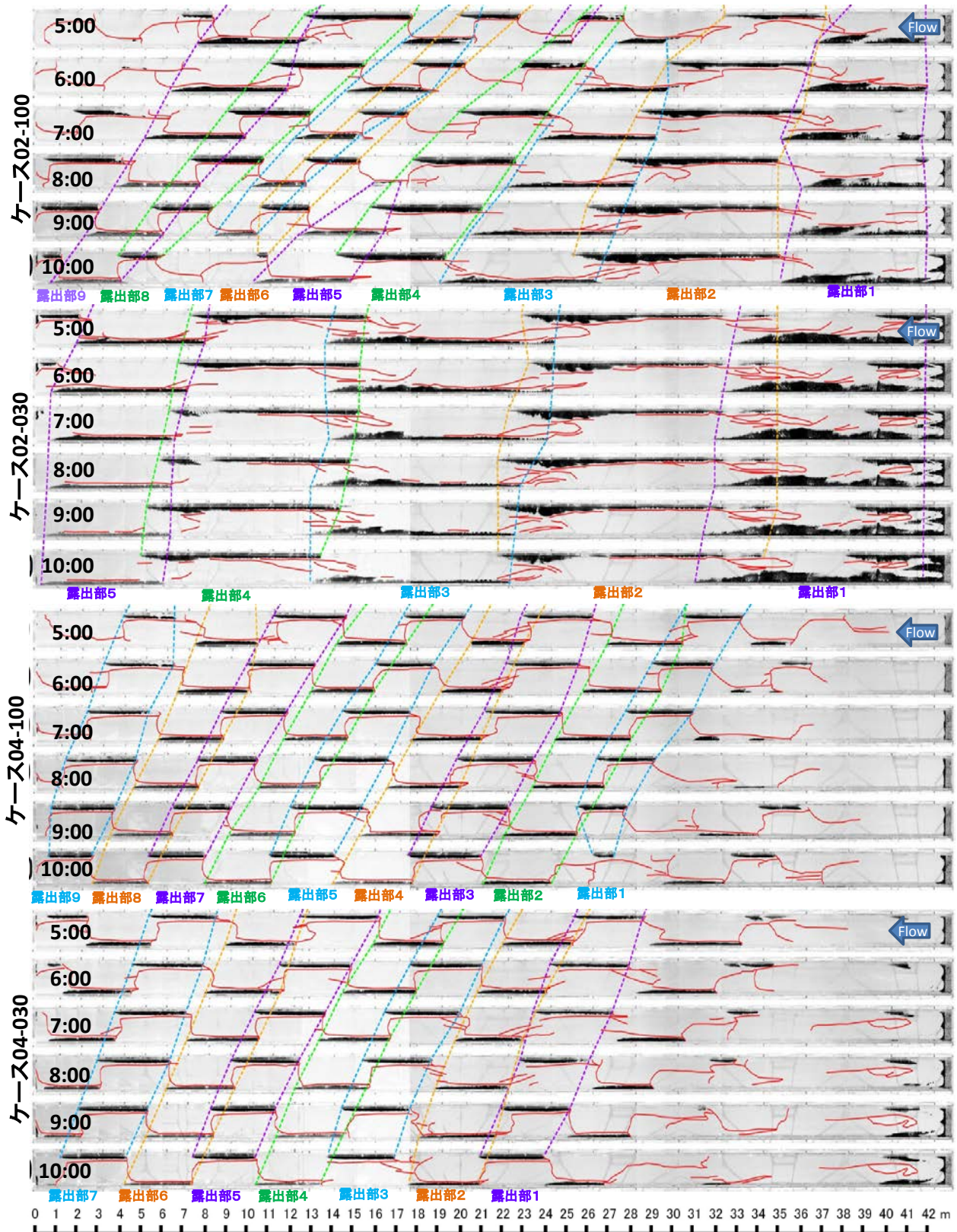


図-20 露出先端・末端の移動状況

※横断方向のスケールは1.5倍に拡大している。黒色部は露出部、赤線は写真で線状に判読できる河床の局所的な起伏を表している。点線の各色は個々の露出部の露出先端・末端を表している。

各ケースの露出箇所の特徴として、主に砂州前縁線に沿って形成される洗掘部分が露出していることが分かる。

露出率が小さかったケース 04-100、04-030 では露出部の延長が短い、露出率が大きかったケース 02-100、02-030

では露出部の延長が長い。また、ケース 02-100 では、時間の経過と共に上流側の砂州から徐々に露出部が伸びている様子が確認されたが、水路の下流部では露出部の縮小や消失が確認される。給砂量を平衡給砂量の 30% に減らした 02-030、04-030 では、時間の経過と共に水路上流端付近の露出部が拡大し、浮き州状の形状が表れている。

図-21 に底板が露出しなかったケース 08-100 の水路内に発生した砂州の移動速度および底板が露出した他の各ケースの露出先端・末端の平均値と標準偏差を示す。ただし、最終通水時間において、水路の上下流端の 3m 以内（水路幅の 3 倍程度）に入った砂州は、水路端部の流況の影響を受けていることが考えられるため、除いている。また、ケース 02-100 は図-20 に示されているように、水路の上下流で露出部の拡大・縮小といった変化の傾向が異なったため、これらを分けて算出している。これより、ケース 02-100 の拡大した露出部 2~5 では、露出先端・末端の移動速度がそれぞれ 1.89、1.08m/h であり、露出先端の移動速度が、ケース 08-100 の砂州の移動速度 0.93m/h よりも 2 倍程度速い。また、同露出部では、露出先端の移動速度が露出末端よりも速いことにより、露出部が相対的に下流側に伸びて拡大している。ケース 02-100 の縮小した露出部 6~8 では、露出先端・末端の移動速度がそれぞれ 1.89、2.43m/h であり、ともにケース 08-100 の砂州の移動速度よりも 2 倍以上速い。また、同露出部では、露出末端の移動速度が露出先端よりも速いことにより、露出部が相対的に上流側から縮んで縮小している。ケース 02-030 では、露出先端・末端の移動速度がそれぞれ 0.45、0.22m/h と、実験ケースの中で最も遅い。ケース 04-100 の露出先端・末端の移動速度はそれぞれ 1.19、1.23m/h、ケース 04-030 の露出先端・末端はそれぞれ 0.98、0.90m/h となっており、ケース 08-100 の砂州の移動速度の 0.93m/h と同程度となっている。また、

ケース 04-100、04-030 は、露出先端と末端の移動速度が同程度であるため、露出部は下流に移動するが拡大は生じていない。

4.3.3 PIV 解析結果

ともに平衡給砂量の 30% の給砂条件である、露出部が拡大した状態のケース 02-030 の通水 5 時間と、拡大していないケース 04-030 の通水 4 時間の PIV 解析結果を図-22 に示す。これより、露出部が拡大したケース 02-030 は、主流部が直線的なのに対し、拡大してないケース 04-030 では、砂州に伴う蛇行流が確認できる。

露出率の増加が大きかったケース 02-100 の、通水 6.5~10 時間における PIV 解析の結果と露出状況を重ねて図-23 に示す。この図から図-20 の露出部 4~6 の流況の時間変化が確認できる。なお、PIV 解析により確認された主流部を、赤色破線で強調している。これより、全ての時間において、左右岸の露出部をつなぐような蛇行流と、蛇行流が対岸へと流れの方向を変えた後に、水路中央付近で蛇行流から反対側に分岐する流れが確認される。蛇行流は、概ね対岸下流の露出部の下流側（露出先端側）に衝突するように流れている。PIV 解析の範囲が狭いため今後更なる検討が必要であるが、時間の経過と共に、この蛇行流の角度は小さくなり（より直線的になり）、

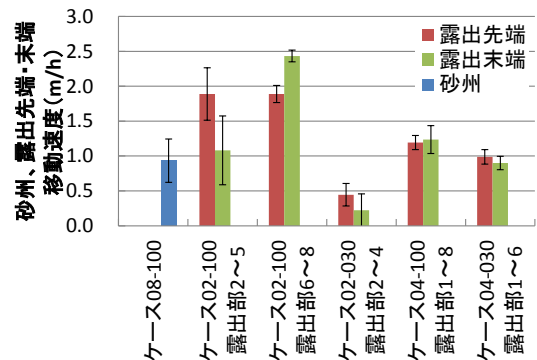


図-21 砂州および露出部先端・末端の砂州移動速度

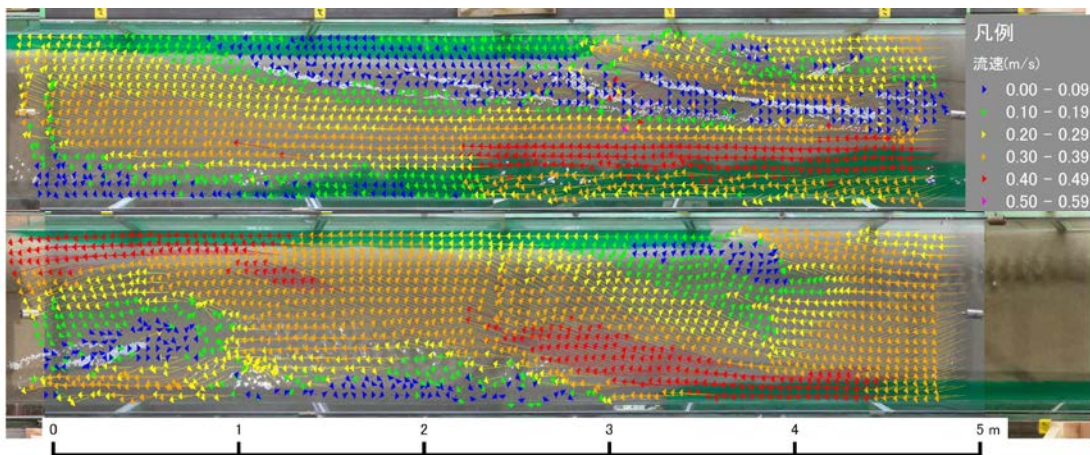


図-22 PIV 計測結果 (上: ケース 02-030 5 時間, 下: ケース 04-030 4 時間)

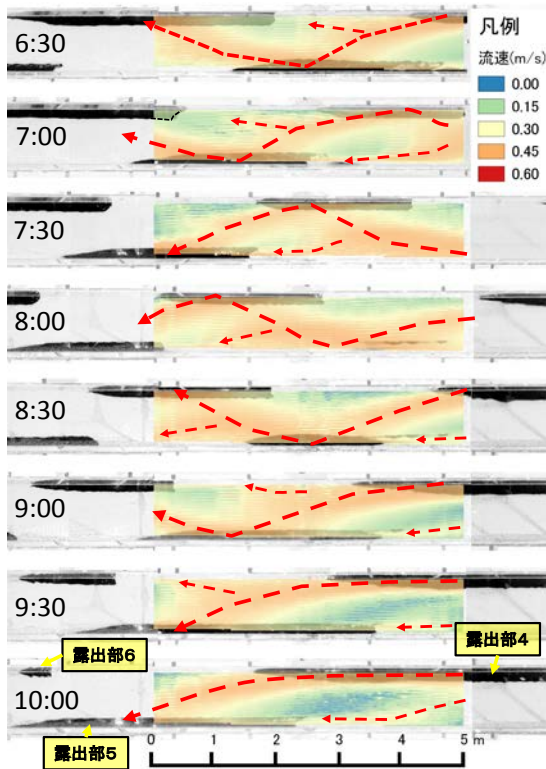


図-23 ケース 02-100 の露出部の変化と PIV 流況

蛇行流が対岸下流の露出部に衝突する位置が下流側へ移動し、露出部も下流に伸びていることが確認できる。

4.4 考察

4.4.1 砂州変形機構

覆礫厚が十分発達した砂州波高よりも薄いケース 02-100 では、砂州深掘れ箇所の露出部が伸びて拡大した (図-20)。Nelson and Seminara³¹⁾は線形安定解析により、固定床の粗度が低い条件ほど、砂州波長が伸びることを指摘しているが、その機構については述べていない。そこで、砂州発達に関する既往研究と本研究の結果を用いて、砂州変形機構について考察する。

芦田³²⁾によると、通常の砂州では、砂州移動は前縁直下に土砂が堆積することで生じ、その移動速度は波高に反比例し、流砂量に比例する。図-22をみると、ケース02-100 (露出部2~5) の砂州先端の移動速度は、通常の砂州が形成されたケース08-100の砂州移動速度に比べ速い。これは、ケース02-100の砂州波高が小さかったためと推測される。一方、ケース02-100 (露出部2~5) の露出末端の移動速度は、砂州波高が小さいにも関わらず、ケース08-100の砂州移動速度と殆ど変化していない。これは、露出末端に堆積する土砂 (局所的な流砂量) が減少したためと推測される。

露出末端に堆積する土砂が減少した理由として以下が考えられる。藤田ら³³⁾によると、通常の砂州では、砂州

先端の対岸付近で洗掘された土砂が放射状に流送され砂州の前進や波高の発達に寄与する。しかし、本実験では露出した低粗度面の影響によって、流れの直進性が増している (図-23)。この結果、流れの直進性が増した露出部の、対岸下流に位置する次の露出末端に供給される流砂量が減少したと考えられる。つまり本実験で確認された砂州の変形と露出部の拡大は、低粗度面の流下方向への拡大によって、流れと流砂移動が直進化したため生じたと考えられる。

ケース 02-100 において、砂州の洗掘部により形成される露出部は水路上流側から徐々に拡大し、下流側では縮小していた。ケース 02-100 では、水路上流側で露出部の拡大が進んだため、水路下流側で過給砂状態になり、河床が上昇傾向となっていたと推測される。これが水路下流側における露出部すなわち砂州波長の縮小に影響したことが考えられる。なお、高畑・泉³⁴⁾は、河床が上昇傾向である場合、砂州波長が短くなることを指摘しており、その指摘と符号する。

4.4.2 十分な覆礫厚が露出部の拡大抑制に果たす影響

覆礫厚が十分発達した砂州波高よりも薄いケース 02-100 では露出部が拡大したのに対し、覆礫厚が十分発達した砂州と同程度あるケース 04-100、04-030 では拡大しなかった (図-20)。これらのケースでは波高や移動速度が、底部が露出しないケース 08-100 と同程度であることから (図-19 下、図-21)、通常の砂州と同様の挙動を示していたと考えられる。この原因として、砂州による深掘れが十分発達することにより、底部に生じる掃流力が弱くなり、露出部の拡大や砂州形状の変化には至らなかったためと考えられる。また、砂州が概ね発達した時点での露出率が、覆礫厚が薄いケース 02-100 では 11% であるのに対し、覆礫厚が厚いケース 04-100 では 6% と小さいことも影響した可能性がある。

4.4.3 給砂量の減少と露出部拡大の関係

覆礫厚が薄いケース 02-100 完了後を初期河床とし、給砂量が平衡給砂量の 30% に減じたケース 02-030 では、水路上流端での露出部の拡大と、変化は遅いものの、その下流での露出部の伸びが確認された (図-20)。給砂量が少なくなると、岩床上に形成される砂州波長が伸びる現象は、Nelson and Seminara の線形安定解析³¹⁾および井上らの数値計算³⁵⁾でも指摘されている。そのため、ケース 02-030 で確認された露出部の伸びは、給砂量の減少が原因であった可能性がある。しかし一方で、ケース 02-100 の通水完了時の状態をみると、水路下流部については、露出部拡大の途中であった可能性も考えられる (図-20)。

そのため、ケース 02-030 の露出部の拡大に、各々の要因がどれだけ寄与したかは本稿では明確とならない。

覆礫厚が厚いケース 04-030 では給砂量が減少しているにも関わらず、露出率に大きな変化は確認されなかった(図-19)。しかし、水路の上流端付近では露出部の拡大や、浮き州状の地形が確認されることから(図-20)、河床低下していたと考えられる。そのため、給砂量は減少したが、水路の上流端の河床から土砂が供給されていたため、その下流では給砂量が減じられた影響が及ばなかったと推察される。しかし、長期的には上流から徐々に河床低下が進行すると考えられ、露出部の安定した状態がどの程度の期間、維持されるかは本稿では明らかではない。

5. まとめ

本研究では、平成 26 年度の成果として、以下の成果が得られた。

5.1 シロザケの産卵場における砂州地形に起因する浸透流の把握

シロザケの産卵床が確認される砂州周辺において、横断測量と浸透流調査を行い、さらに浸透流計算を行った。そして、浸透流と産卵床分布との関係性を検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

①現地調査により、浸透流が砂州の頂部付近で浸透傾向であり、前縁線で湧出傾向であることが確認された。これは、砂州地形による頂部と前縁線の水位差に起因するものと考えられた。この浸透流の経路として、浸透流計算により、砂州頂部で浸透した河川水が前縁線で湧出していることが明らかとなった。

②浸透流の現地調査結果では、鉛直方向による浸透流の傾向の違いが確認されたが、計算では確認されなかった。この原因として、本計算では透水係数分布と境界条件を簡略化していることが考えられた。

③浸透流計算結果では、産卵床が確認された個所は、ほとんど浸透流が湧出傾向である個所であった。そのため、砂州地形に起因する浸透流が産卵環境に寄与していることが考えられた。

なお、本調査地は扇状地の扇端部であるため、境界条件の簡略化により、計算では表すことができなかった様々な浸透路長の浸透流が混在している可能性がある。より精度の高い浸透流計算を行うためには、これらの把握と計算条件としての設定を行う必要があり、今後の課題である。

5.2 物理環境要素の計算結果を用いた PHABSIM による

シロザケ産卵環境の評価について

数値計算により取得した物理環境値から PHABSIM により産卵適地の推定を試み、さらに現地調査結果と比較し、次のことが明らかとなった。

①計算区間の上下流端付近や、現地植生が計算対象期間内に变化した個所以外は、河床変動計算により河床高と粒径分布の傾向を概ね再現できた。また、浸透流についても、数値計算により河床地形に起因した浸透、湧出の傾向を概ね再現できた。

②PHABSIM により産卵適地を推定した結果、砂州前縁部で合成適性値(CSI)が高くなり、実際の産卵床分布と概ね一致した。

今後、PHABSIM による産卵適地の推定精度を向上させるためには、河床変動計算において、植生変化や深度方向の河床材料分布(特に河床表面の粗粒層)を反映することや、浸透流計算において、河床内部の透水係数の分布を考慮することが考えられる。また、本稿で用いた適性基準(SI4)は、期間や場所が限られたデータにより作成したものである。また、水温や溶存酸素を含まないものである。そのため、さらに推定の精度を上げるためには、データの蓄積による適性基準の改善や新たな物理環境要素を追加することが考えられる。

5.3 岩河床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響

自由砂州発生条件で、粗度の小さい岩河床上に覆礫を行った場合を想定し、移動床水理模型実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

①覆礫厚が十分発達した砂州波高よりも小さい場合、砂州の深掘れに伴う露出部が通常の砂州波長よりも伸びて拡大した(3倍程度)。この原因として、蛇行流の直線化が生じたことから、流砂動態にも影響が及び、砂州の安定形状が変化したことが考えられた。

②覆礫厚が十分発達した砂州波高と同程度の場合、砂州の形成に伴い露出部は出現するが拡大せず、安定して推移していた。この原因として、発達した砂州の深掘れ底部では掃流力が弱く、砂州が変化するには至らなかったことが考えられる。

③給砂量を平衡給砂量の 30%に減らしても、覆礫厚が十分発達した砂州波高と同程度の場合、実験通水時間においては露出部の拡大が生じなかった。しかし、水路の上流端で露出部や浮き州状の個所が確認され、河床低下が生じていたと考えられる。そのため、通水時間が長くなると、その下流部においても河床低下や露出部の拡大が進行することが想定される。

本研究では、覆礫厚の違いにより、砂州形状や露出率、流況に変化が生じることが明らかとなったが、それらが生じた機構については推測の域を出ていない。今後さらなる検討が必要である。

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) 永沢亨:サケ科魚類のプロファイル-10 サケ, *SALMON 情報* 6: pp22-25,2012.
- 4) 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.
- 5) 玉井信行ら：河川生態環境評価法, 東京大学出版, pp95-102,2000,3.
- 6) 矢野雅昭ら：豊平川中流部における PHABSIM によるシロサケ産卵環境の評価, *河川技術論文集*, Vol.19, pp507-512, 2013,6.
- 7) Geist D.R., Hanrahan T.P., Arntzen E.V., McMichael G. A., Murray C.J. & Chien Y. : Physicochemical characteristics of the hyporheic zone affect redd site selection by chum salmon and fall chinook salmon in the Columbia River. *North American Journal of Fisheries Management*, Vol.22, pp1077-1085, 2002.
- 8) 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, No 4, pp 1-4,1999,9.
- 9) 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*, Vol.132, pp493-502, 2003.
- 10) Storey R.G., Howard K.W.F., Williams D.D. : Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: a three-dimensional groundwater flow model. *Water Resources Research*, Vol.39(2), 2003.
- 11) Tonina D. and Buffington J.M. :Hyporheic exchange in gravel bed rivers with pool-riffle morphology: Laboratory experiments and three-dimensional modeling, *Water Resources Research*, Vol.43, 2007.
- 12)札幌市豊平川さけ科学館, <http://www.sapporo-park.or.jp/sake/>
- 13) 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, pp3-5,2008,1.
- 14) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 15) 西垣 誠, 三菱マテリアル株式会社, 株式会社ダイヤコンサルタント: オイラリアン・ラグランジアン・3次元飽和・不飽和浸透流-移流分散解析プログラムデータ入力マニュアル, 2001,10.
- 16) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 17) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会,1999.
- 18) Para view, <http://www.paraview.org/>
- 19) QGIS プロジェクト, <http://www.qgis.org/>
- 20) Malcolm I.A., Soulsby C., Youngson A.F. & Hannah D.M. : Spatial and temporal variability of groundwater-surface water interactions in an upland salmon-spawning stream: implications for egg survival. *Hydrology: Science & Practice for the 21th Century*, Vol.2, pp130-138, 2004.
- 21) Brunke M. & Gonser T. : The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, Vol.37, pp1-33,1997.
- 22) 国土地理院, 地図・空中写真閲覧サービス, <http://mapps.gsi.go.jp/>
- 23) 内田有子ら：豊平川の洪水時における河畔林における影響に関する研究, 土木学会北海道支部, 第 67 号, B-29,2010.
- 24) Kondolf M.G. & Wolman G.M. : The sizes of Salmonid Spawning Gravels. *Water Resource Research* vol.29 (7), pp2275-2285, 1993,1.
- 25) Tiffan F.K., Haskell C.A & Kock T.J. : Quantifying the behavioral response of spawning chum salmon to elevated discharges from Bonneville Dam, Columbia river, USA. *River Research and Applications* 26: 87-101.2010.
- 26) 井上卓也, 矢野雅昭, 濱木道大, 高橋直志, 米元光明, 旭一岳, 伊藤丹：軟岩河床における魚類生息場に関する調査と分布, *河川技術論文集*, Vol.20, pp85-90, 2014,6.
- 27) 高橋紳吾, 木下誠一, 鈴木利幸, 小泉和久, 渡邊康玄, 中村哲：常呂川水系無加川における軟岩河床の低下対策に関する試験施工とその有効性, *河川技術論文集*, Vol.20, pp229-234, 2014,6.
- 28) Inoue, T., Izumi, N., Shimizu, Y., and G. Parker : Interaction among alluvial cover, bed roughness and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, *J. Geophys. Res.*, 2014.
- 29) 牛山智夫, 旭一岳, 米元光明, 井上卓也：大型模型実験による岩盤床を含む河床低下対策に関する位置考察, *河川技術*

- 論文集, Vol.20, pp289-294, 2014,6.
- 30) 河村三郎：土砂水理学1, 森北出版, 1982.
- 31) Nelson, P. A., and Seminara, G.: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channels, *Geophys. Res. Lett.*, 2012.
- 32) 芦田和男：洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究, 土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会, 1982.
- 33) 藤田裕一郎, 村本 嘉雄, 堀池 周二, 小池 剛：交互砂州の発達機構, 水理講演会論文集, 第26回, pp25-30, 1982,2.
- 34) 高畑知明・泉典洋：河床上昇・低下を伴う砂州の線形安定解析, 水工学論文集, Vol.55, ppS865-870, 2011,2.
- 35) 井上卓也, 清水康行, 山口里実, 伊藤丹：給砂量と岩床侵食地形の関係, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, I_1039-I_1044, 2014,2

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 : HIRAI Yasuyuki

WATANABE Kazuyosi

YANO Masaaki

HAYASHIDA Kazuhumi

SUGIHARA Kouki

WATANABE NAOHIRO

TOYABE Toshihito

Abstract : Field survey and numerical calculation were conducted on a section where chum salmon spawning is confirmed annually. As results, bar morphology inducing hyporheic flow from bar crest to bar front was confirmed. And many spawning redd were confirmed on the bar front. Therefore, it was assumed that bar morphology contributes for spawning environment. To predict stable spawning place, PHABSIM analysis with physical value (flow velocity, depth, mean diameter and hyporheic flow) was tested. The result showed favorable agreement of the prediction and spawning redd distribution. Therefore it was thought that this method is effective. Hydraulic experiments of bedrock cover measure were conducted. The results showed that equipping bedrock cover thickness, same as fully grown bar height, is effective for its sustainability because of not occurring bedrock exposer expansion.

Key words : spawning red, bar morphology, hyporheic flow, PHABSIM, bedrock cover measure