

豊平川中流部の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

HYPORHEIC FLOW CAUSED BY BAR MORPHOLOGY ON CHUM SALMON
SPAWNING AREA IN MIDDLE REACH OF TOYOHIRA RIVER

矢野雅昭¹・渡邊康玄²・杉原幸樹³・渡邊和好¹・矢部浩規³

Masaaki YANO, Yasuharu WATANABE, Kouki SUGIHARA, Kazuyoshi WATANABE
and Hiroki YABE

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)

To understand relationship among bar morphology, hyporheic flow and chum salmon spawning environment, the cross sectional profile, river water and ground water level distribution around bar and hypoheic flow were surveyed. Numeric calculation was also conducted to understand hyporheic flow path. The results revealed that a river water elevation gap between bar crest and front, generates welling out hyporheic flow around bar front. Numeric calculation also revealed flow path of hyporheic flow which sink into river bed on the bar crest and well out on the bar front. Spawning redds were found around bar front where hyporheic flow well out. Thereby, we conclude that bar morphology contribute generating suit hypoheic flow for spawning environment on bar front.

Key Words : bar, hyporheic flow, chum salmon, spawning environment

1. はじめに

北海道におけるシロザケ(*Oncorhynchus keta*)の漁獲量は全国の8割以上を占め、地域にとって重要な水産資源である¹⁾。近年ではシロザケの野生魚の価値が指摘され、河道整備においても産卵環境に配慮する必要があると考えられる。

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²⁾、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³⁾。また、浸透流の発生には河床地形が影響し⁴⁾、その一つである砂州地形の重要性も指摘されている⁵⁾。

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⁶⁾。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、産卵環境評価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⁷⁾や、模型実験での交互砂州を対象としたもの⁸⁾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。

本研究は、シロザケの産卵床が確認された砂州における浸透流の現地調査と、その結果を利用した浸透流の数値計算の適用性を確認するとともに、砂州地形による浸透流の発生機構および浸透流分布とシロザケの産卵床分布の関係を把握し、産卵環境の保全・創出へ寄与する知見を得ることを目的としている。

2. 方法

(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次支川で、流路延長72.5km、流域面積902km²の一

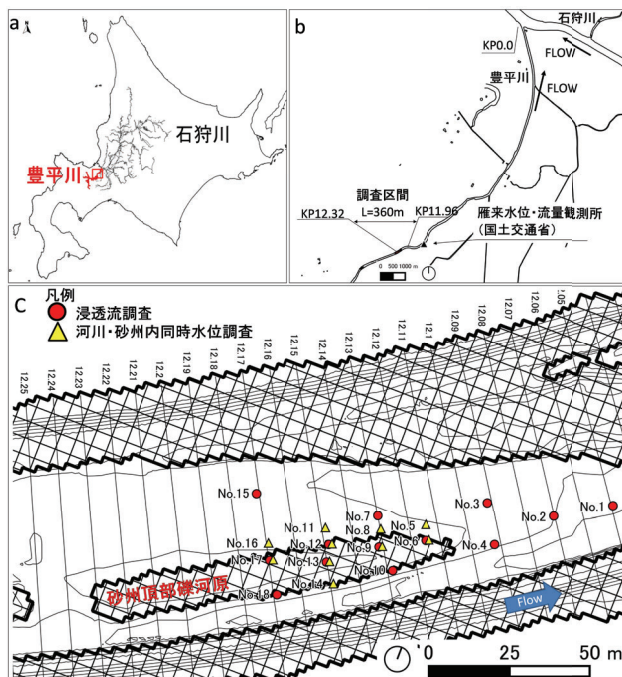


図-1 調査箇所

級河川である。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。この区間にシロザケが産卵する砂州があることは, 過去の調査で把握している^{2,5)}。この区間の平均河床勾配は約1/230であり, 低水路幅は60~70mである。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) 調査の概要

河床地形と浸透流, 産卵床分布の関係を把握するため, 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.⁶⁾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。なお, 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⁹⁾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¹⁰⁾, 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¹¹⁾。

(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-3D¹²⁾を使用した。計算格子はiRIC¹³⁾により横断測量結果から平面格子データを作成し, 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として, 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。なお, 冠水しない箇所の全水頭は, 浸透流計算により算出される。解析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,

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(iRIC)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2D
格子サイズ	約1×1m
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	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

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平面分布を考慮せず、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¹⁴⁾。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無いものとした。上流から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、流入が無い条件とした。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¹⁴⁾。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次元的な流線の可視化にはParaview¹⁵⁾を用いた。また、現地調査結果と計算結果の関係の検討は、GIS¹⁶⁾上で平面的に結果を重ね合わせて行った。

3. 結果

(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) 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

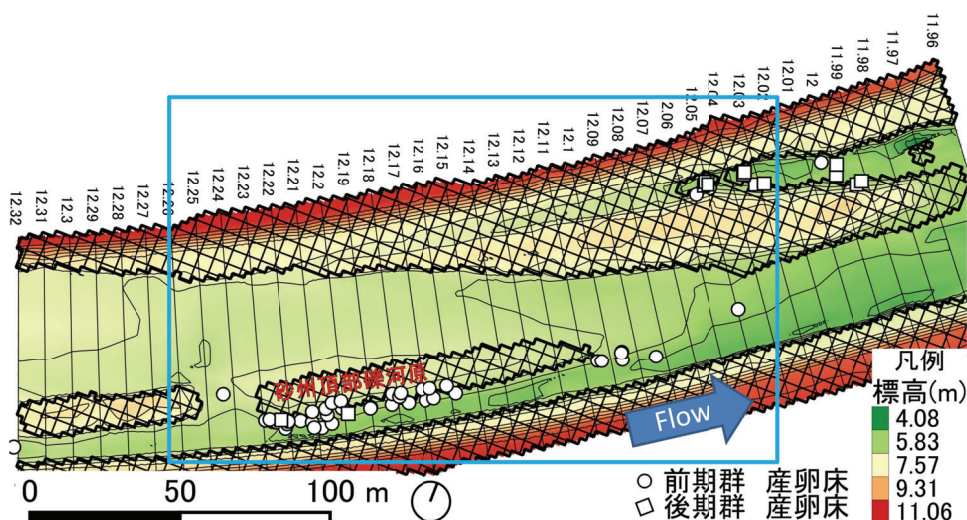


図-2 横断測量による河床地形と産卵床分布(札幌市豊平川さけ科学館)の平面分布

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。

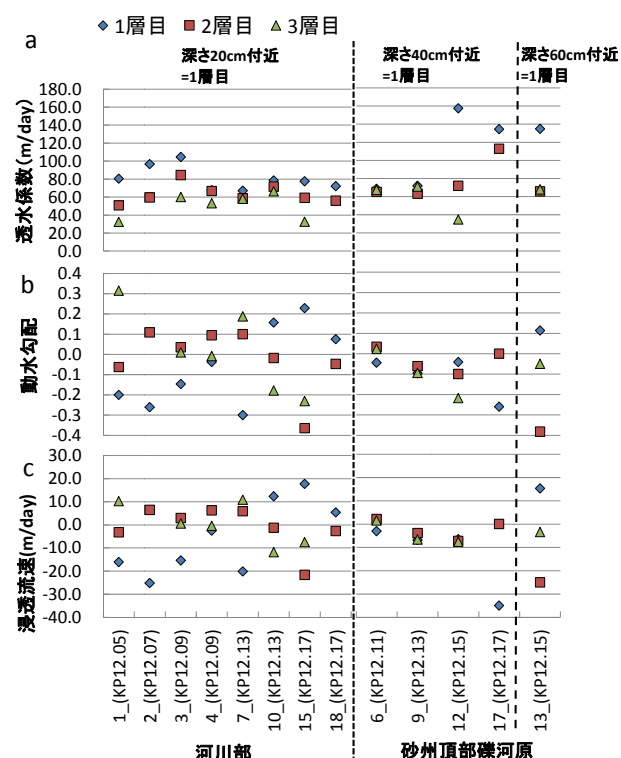


図-3 現地調査による浸透流調査結果

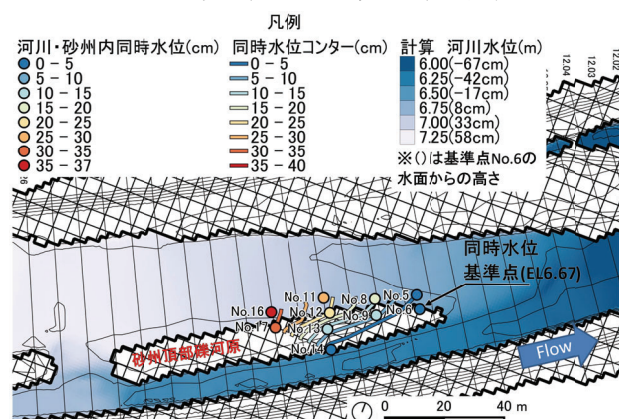


図-4 河川・砂州内同時水位と計算による河川水位の平面分布

(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かって河床内水位が傾斜していることが確認される。

(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

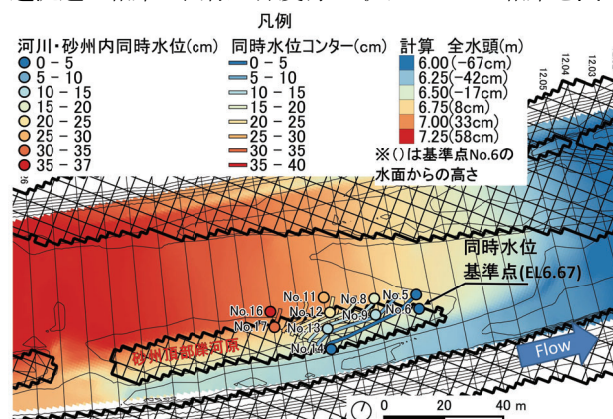


図-5 河川・砂州内同時水位と計算による全水頭の平面分布

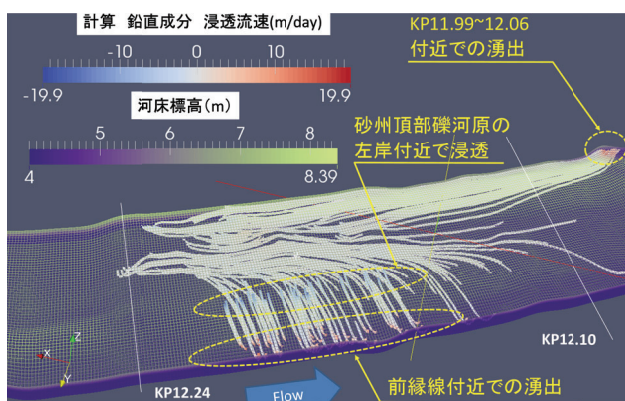


図-6 浸透流計算結果（河床地形（半透明）と実流速の3D流線）

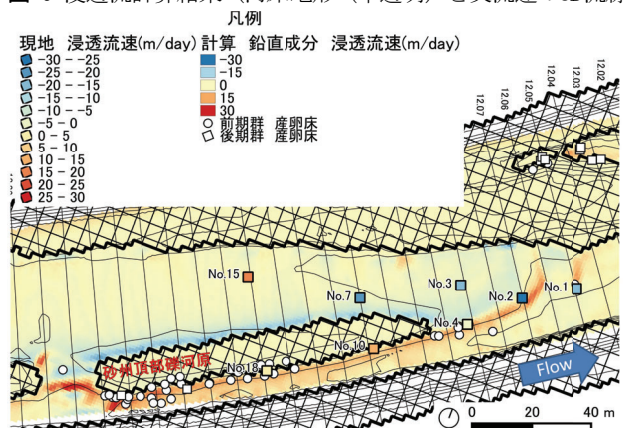


図-7 河床面から深さ20cmにおける現地調査による浸透流速と計算による鉛直成分の浸透流速の平面分布

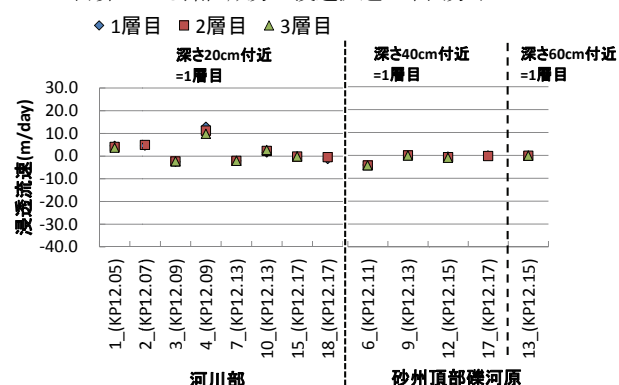


図-8 計算による鉛直成分の浸透流速

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であった。

4. 考察

(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¹⁴⁾。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) 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、河床内水温が高い箇所を利用することが指摘されている³⁾。本研究では水温は計測していないが、浸透流の湧出箇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。しかしながら、図-7を詳しくみると、浸透流が湧出傾向である箇所でも産卵床が確認されていない箇所がある。産卵環境には、流速・水深、河床材料の粒径なども影響することから²⁾、何らかの制限要因があった可能性や、この周辺の相対的な産卵環境の優劣により、偏った箇所が選ばれた可能性も考えられる。

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¹⁷⁾。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¹⁸⁾、浸透時間の増加と伴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。これはこの湧出点の河川水位が低いことに起因している。シロザケの前・後期産卵群で利用する浸透流環境に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¹⁰⁾。本調査からは、前期群の産卵床が多く確認された砂州の前縁線では、浸透路長が短い浸透流が湧出しており、後期群の産卵床が多く確認されたKP11.99～12.06の左岸部においては、それよりも浸透路長が長い浸透流が湧出していると考えられる。これらの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。

5. まとめ

本研究は、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。

謝辞：札幌開発建設部河川管理課より暫定流量データを提供戴き、札幌市豊平川さけ科学館より産卵床位置調査結果を提供戴いた。また浸透流の現地調査を(株)レックスに、河床地形の調査を(株)エコニクスに実施して戴いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) さけます来遊速報 (平成23年度), 水産総合研究センター北海道区水産研究所, <http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/H23salmon/h23salmon.htm>.
- 2) 矢野雅昭ら：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, 河川技術論文集, Vol.19, pp507-512, 2013,6.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 矢野雅昭ら：砂州地形とシロザ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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 札幌市豊平川さけ科学館, <http://www.sapporo-park.or.jp/sake/>
- 10) 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.
- 11) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 12) 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.
- 13) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
- 14) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会,1999.
- 15) Para view, <http://www.paraview.org/>
- 16) QGISプロジェクト, <http://www.qgis.org/>
- 17) 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.
- 18) Brunke M. & Gonser T. : The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, Vol.37, pp1-33,1997.

(2014. 4. 3受付)