

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、谷瀬 敦、矢野雅昭
杉原幸樹、林田寿文、田中忠彦

【要旨】

冷水性魚類のシロザケに着目し、産卵床を考慮した自律的河道整備手法の調査研究を行い、次の成果を得た。①河床材料の指標である 50%粒径、Fredle を用いて、河川の縦断的な産卵適地を簡易に推定する手法を開発し、産卵環境として配慮が必要な区間の把握が可能となった。②砂州地形が産卵環境に寄与することを確認し、河川整備において砂州の発生を考慮した川幅を設定する重要性を明らかとした。③礫厚が浸透流の水温に影響することを確認し、河道掘削や覆礫において、河岸と河床で礫床の連続性確保および地下水より上部に 1.9m 以上の礫厚を確保することが重要となることを明らかとした。④河道掘削や覆礫後に、砂州前縁部の露岩部が拡大しない条件として、砂州波高程度の礫厚を確保することが重要であることを明らかとした。⑤砂州が発生する川幅に対して水深が小さい水理条件においては、河岸の粗度の違いによる砂州形状、河床材料の分級状況に大きな差がないことを確認した。⑥数値計算による物理値を用いた PHABSIM による詳細な産卵適地推定手法を開発し、河川整備後の産卵適地の推定が可能となった。

キーワード：シロザケ産卵床、砂州地形、浸透流、河床材料分級

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。その中のシロザケ (*Oncorhynchus keta*) は、北海道における捕獲量が全国の 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により、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、野生魚は孵化放流魚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。また、多自然川づくりの考えでは、河川が自らの力で河川らしい地形をつくるメカニズムを活かすことの重要性が指摘されている⁴⁾。この河川が自律的に作り出す地形を考慮することは、河川本来の自然環境により近づき、さらに維持管理コストの低減に

も繋がると考えられる。そのため、河道整備においてシロザケの産卵床を考慮する際にも、出水時に河川が自律的に形成する砂州などの地形を考慮する必要がある。

本研究は、冷水性魚類であり重要水産種である、シロザケの自然再生産可能となるよう、河川の自律的な作用を考慮した河道整備手法の提案を行なうものである。

本稿の構成として、第 2 章において、既往文献から産卵環境に重要な河川内の物理特性を整理する。第 3～5 章では、第 2 章で明らかとなった産卵場の物理特性を踏まえ、縦断的な河床材料分布と産卵床分布の関係、砂州地形による浸透流の発生と産卵床分布との関係、岩盤からの礫床の厚さ(礫厚)と浸透流の質との関係を検討し、河道の特徴と産卵環境の関係について明らかとする。第 6 章では、砂州発生条件における礫厚の違いが、産卵環境に不可欠である礫床の維持に、どのような影響を及ぼすか明らかにする。第 7 章では、砂州形成条件の水理条件において、河川中・上流域での護岸工設置による河岸の粗度低下が、砂州形状、河床材料の分級に及ぼす影響について明らかにする。第 8 章では、河川整備後の産卵適地変化の予測手法として、数値計算による物理値を用いた PHABSIM による手法を提案する。そして、本研究のまとめとして、第 9 章で第 2～8 章を踏まえた「産

卵床を考慮した自律的河道整備」の提案を行う。

2. シロザケの産卵環境に係る物理環境

2.1 既往文献による産卵環境の特徴

シロザケの雌は、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ことが知られている⁹⁾。そのため、河床材料は重要であり、2つの観点で産卵環境に影響する。

1つはシロザケが産卵床の造成の可否への影響であり、Kondolf & Wolman⁶⁾は、サケ科魚類が産卵床に利用できる河床材料の50%粒径は、体長の1/10までと指摘している。もう1つは、河床材料の細粒分の量が浸透流の発生に及ぼす影響であり、Yamada & Nakamura⁷⁾は、サクラマス (*Oncorhynchus masou*) 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を述べている。Lotspeich & Everest⁸⁾は、サケ科魚類の産卵に適した河床材料の指標として透水性を表す Fredle 指数を提案している。そして、鈴木⁹⁾は、Fredle 指数の異なる河床材料内で、シロザケの卵・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。

シロザケの産卵場となる箇所は、浸透流が湧出傾向であり、河床内水温が高いことが指摘されている¹⁰⁾。これは、浸透流が卵や稚魚への溶存酸素の供給や代謝排泄物の除去に重要であるためである¹¹⁾。また、滞留時間が長い浸透流は河川水と比べ、夏は冷たく、冬は暖かい^{12, 13)}、滞留時間が長い浸透流の存在はシロザケの卵の孵化、浮上に必要な、積算水温 (孵化: 480°C・日、浮上: 900~1,000°C・日²⁾の確保に寄与する。シロザケには産卵のため遡上する時期により、前期群と後期群があり、前期群 (9~11月中旬) は、河川水温変動に近い挙動を示し、伏流水が湧出していると考えられる箇所を、後期群 (11月下旬~1月上旬) は河川水温変動の影響が少なく、地下水が湧出していると考えられる箇所をそれぞれ産卵場として利用することが指摘されている⁹⁾。

3. 縦断的な河床材料分布とシロザケ産卵環境

縦断的に河川内のシロザケ産卵適地を把握することは、産卵環境の保全や創出の検討が必要な区間を把握する上で重要である。産卵環境の重要な要素の一つである河床材料は、河川の縦断的な勾配の変化により異なる粒径分布となっている¹⁵⁾。一方でシロザケの産卵環境は河床材料の影響を受けている^{6~8)}。そのため、河床材料の特徴

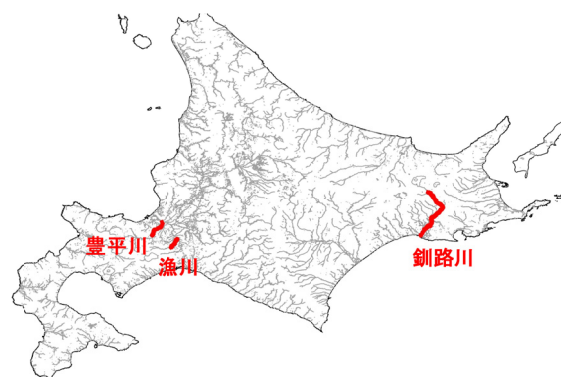


図-1 調査対象河川

表-1 使用データおよび調査機関

水系	河川名	河床材料調査	産卵床位置調査
石狩川水系	豊平川	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	H23~24 国土交通省 北海道開発局
釧路川水系	釧路川	H21 国土交通省 北海道開発局	H17 国土交通省 北海道開発局

から河川の縦断的な区間のどこがシロザケ産卵適地なのか評価できる可能性がある。既往研究では、河床材料と産卵環境との関係についての知見の蓄積があり、これらを適用できる可能性がある。

本章では、河床材料の特徴から河川の縦断的なシロザケ産卵適地の分布を、概略的に評価する手法を提案するものである。

3.1 方法

3.1.1 調査河川

調査河川は、縦断的な河床材料調査とシロザケの産卵床位置調査が過去になされている河川である一級河川石狩川水系豊平川、漁川および一級河川釧路川水系釧路川とした (図-1)。

3.1.2 調査方法

縦断的な河床材料の分布と産卵適地分布の関係を把握するため、調査河川で、最近年に実施された既往の河床材料、産卵床位置調査結果を用いて検討を行った。表-1に各河川で検討に用いた資料を示す。なお、釧路川での検討には、湿原区間上流端の KP38.2 より上流の既往調査資料を用いた。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、各調査点において 50%粒径を算出し、それらの各横断 2~3 点を平均した値を縦断位置の

粒径として用いた。また、後述する Fredle 指数の算出のために 25%、75%粒径についても算出した。なお、豊平川においては、平成 23 年 9 月に 1,000m³/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。この出水の前後で河床材料分布も変化している可能性があるため、平成 23 年 9 月出水前と出水後の調査結果をそれぞれ検討することとした。

産卵床分布の把握には、漁川、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を用いた。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¹⁶⁾を用いた。確認された産卵床は、縦断間隔 200m 毎にその数を集計し、産卵床数の縦断分布を把握した。

3. 1. 3 河床材料による産卵適地評価

河床材料が産卵環境に及ぼす影響として、①細粒分が多すぎることにより透水性が低下し、浸透流量が低下すること、②粒径が大きすぎ、産卵床造成が困難になることが考えられる。

本研究では、細粒分の指標として、Fredle 指数⁸⁾を用いることとした。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、ふるい分け係数に反比例する⁸⁾。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。そのため、Fredle 指数は河床材料内の空隙、すなわち透水性の指標であると考えられる。

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

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

ここで、 f_i はFredle 指数(mm)、 d_g は平均粒径(相乗平均)、 s_o はふるい分け係数、 d_{75} は75%粒径、 d_{25} は25%粒径である。鈴木⁹⁾は、Fredle 指数の異なる河床材料内で、シロザケの卵・仔魚の孵化、生存確認実験を行ない、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。そのため、本研究では、産卵環境としてFredle 指数が5.0mm以上必要であると考え、産卵適地の一つの評価指標として用いた。

河床材料の粒径が大きすぎることにより産卵床造成が困難になる指標として、50%粒径を用いることとした。これは、Kondolf & Wolman⁶⁾が、サケ科魚類が産卵床に利用できる河床材料を体長の1/10倍程度までの50%粒径であることを述べているためである。豊平川においては、例えばシロザケの3歳魚の体長は、平均660mm、範囲560～760mm程度である¹⁰⁾。そのため、大きい個体でも産卵床造成が可能な50%粒径の最大値は76mmとなり、

本研究では50%粒径が80mm以下であることを、もう一つの産卵適地の評価指標に用いた。

これらをまとめると、本研究では河床材料による縦断的なシロザケの産卵適地の評価指標として、Fredle 指数が5.0mm以上かつ50%粒径が80mm以下というものを用い、これらの条件満たす区間を「良評価区間」とした。

3. 1. 4 選択性による産卵適地評価の適合性検討

前項で提案した河床材料による産卵適地評価の適合性の検討には、河床材料の必要条件を満たす区間を「良評価区間」、それ以外を「その他区間」とし、それらの区間の利用について、選択性を確認することで行った。これは、「良評価区間」と評価された区間が真に産卵適地ならば、そこが選択的に利用されている(選択性がある)であろうという考えに基づくものである。選択性は、式(3)に示す選択性指数^{17, 18, 19)}により評価することとした。

$$\widehat{W}_i = o_i/\pi_i \quad (3)$$

ここで、 \widehat{W}_i は選択性指数、 o_i はある階級*i*の環境に属する産卵床数の全産卵床数に対する割合、 π_i はある階級*i*の環境に属する箇所全箇所に対する割合である。この選択性指数は、選択性がなければ $o_i = \pi_i$ ($\widehat{W}_i=1$)となり、選択性指数が1と有意に異なるかどうかを確認することにより、選択性を評価するものである^{17, 18, 19)}。式(4)、(5)の Bonferroni 信頼区間を用いて、信頼区間の範囲が1を越えているか否かで、選択性の有無を評価した^{17, 18, 19)}。

$$\widehat{W}_i \pm z_{\alpha/2} se(\widehat{W}_i) \quad (4)$$

$$se(\widehat{W}_i) = \sqrt{o_i(1-o_i)/(u\pi_i^2)} \quad (5)$$

ここで、 z は標準正規分布表における確率変数、 α は有意水準でここでは0.05、 $se(\widehat{W}_i)$ は \widehat{W}_i の標準誤差、 u は評価区間に確認された産卵床総数である。なお、選択性指数の検討は、後述するとおり、「良評価区間」の抽出が行えた、豊平川、漁川のみで行った。

3. 2 結果

3. 2. 1 産卵適地評価と産卵床分布

図-2～5に各河川のFredle 指数、50%粒径および産卵床の縦断分布を示す。なお、図-2～5の各縦断位置のFredle 指数および50%粒径は、各横断位置における平均値を示し、参考として横断位置の最大値、最小値についても示している。

豊平川における、河床材料による産卵適地評価の結果、

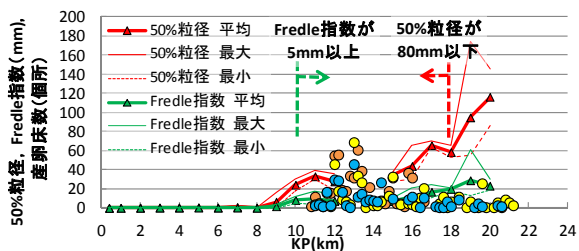


図-2 河床勾配、粒径、産卵床縦断分布（豊平川H23. 9出水前）

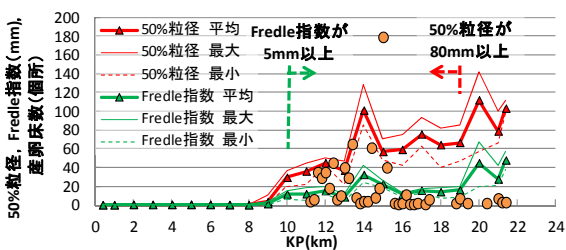


図-3 河床勾配、粒径、産卵床縦断分布（豊平川H23. 9出水後）

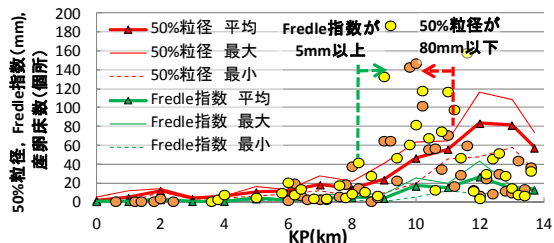


図-4 河床勾配、粒径、産卵床縦断分布（漁川）

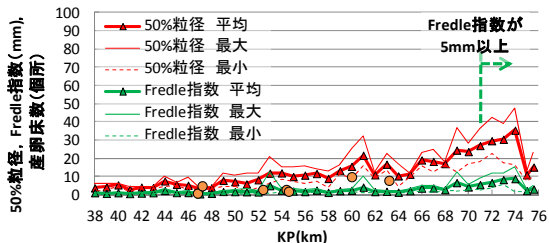


図-5 河床勾配、粒径、産卵床縦断分布（釧路川）

平成23年9月出水前では、Fredle指数が5mm以上となる箇所はKP10.0より上流で、50%粒径が80mm以下である箇所はKP18.0より下流となった。そのため、「良評価区間」を、KP10.0～18.0であると判断した（図-2）。平成23年9月出水後では、50%粒径が80mm以下である箇所はKP19.0より下流であり、産卵適地の区間を、KP10.0～19.0であると判断した（図-3）。

漁川における河床材料による産卵環境評価の結果、Fredle指数が5mm以上となる箇所はKP8.0より上流で、50%粒径が80mm以下である箇所はKP11.0より下流であった。そのため、「良評価区間」を、KP8.0～11.0であると判断した（図-4）。

釧路川における河床材料による産卵環境評価の結果、

表-2 選択性の検討に用いた産卵床数と評価延長

河川名	産卵床数				評価延長					
	全区間 (箇所)	良好評価 区間		その他 区間		全区間 (km)	良好評価 区間		その他 区間	
		箇所数 (箇所)	割合	箇所数 (箇所)	割合		延長 (km)	割合	延長 (km)	割合
豊平川 H23出水前	1311	1215	0.93	96	0.07	10.6	7.4	0.70	3.2	0.30
豊平川 H23出水後	699	682	0.98	17	0.02	10.4	8.0	0.77	2.4	0.23
漁川	2839	1774	0.62	1065	0.38	13.2	3.0	0.23	10.2	0.77

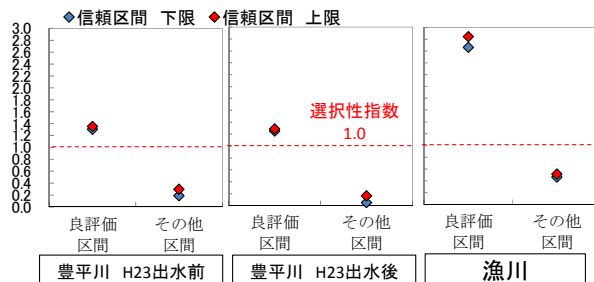


図-6 選択性指数による産卵適地評価手法の適合性評価

Fredle指数が5mm以上となる箇所はKP71.0より上流であったが、50%粒径が80mm以下である箇所は調査範囲内には現れなかった。そのため、「良評価区間」の上流端は定めることはできなかった（図-5）。

3. 2. 2 選択性による産卵適地評価の適合性評価結果

河床材料による産卵適地評価の適合性を、選択性指数により検討した。選択性指数の算出に用いたデータを表-2に示す。表-2の「評価延長」とは、選択性の検討を行った区間の延長であり、河床材料調査と産卵床位置調査の両方が行われた区間延長である。

豊平川の平成23年9月出水前・後の、「良評価区間」の選択性指数の信頼区間はそれぞれ1.30～1.35、1.25～1.29と、1.0を越え、正の選択性が確認される（図-6）。また、漁川では、信頼区間は2.66～2.88と、豊平川よりも大きい正の選択性が確認された（図-6）。

3. 3 考察

3. 3. 1 産卵適地の簡易評価

各河川において、河床材料による産卵適地評価を行った結果、豊平川、漁川では「良評価区間」を抽出できた。産卵床の分布をみると、この「良評価区間」には特に多くの産卵床が分布していた（図-2～4）。また、これらの河川の「良評価区間」では、選択性指数の信頼区間が1.0を上回り、選択的に利用されていることが確認された（図-6）。そのため、これらの河川ではこの手法により、産卵適地を評価できたと考えられる。一方、釧路川では、「良評価区間」を抽出できず、Fredle指数が5mm以下で、産卵に不適であると考えられる箇所にも産卵床が確認され

ている(図-5)。河床材料による産卵適地評価手法で「良評価区間」とならなかった箇所にも産卵床が分布する原因として、河床材料調査と産卵床調査の年度の不整合や、実際は横断位置により河床材料の粒径分布が異なるが、1横断面あたり2~3点の河床材料調査しか行っておらず、必ずしも産卵場となる箇所の河床材料を評価できていない可能性がある。

3. 4 本章のまとめ

石狩川水系豊平川、漁川、釧路川水系釧路川において、既往調査資料により河床材料と産卵環境の関係を検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

河床材料による産卵環境評価手法(Fredle指数が5mm以上かつ50%粒径が80mm以下の縦断区間の抽出)を提案し、その適合性の検討に、選択性指数を用いて「良評価区間」と「その他区間」の選択性を把握する手法を提案した。そして、調査区間内に「良評価区間」を抽出できた豊平川、漁川については、産卵床が多い区間を概ね抽出しており、その区間が選択的に利用されていることも確認できた。本研究で提案した産卵適地推定は、概略的に産卵適地を把握するには有効であると考えられる。

4. 砂州地形とシロザケ産卵環境

既往研究では、産卵環境に重要な浸透流と、瀬淵などの河床地形との関係が指摘されている^{20, 21)}。日本の多くの河川中・上流域では、直線化や護岸などによる流路幅の固定など河川整備が進んでおり、このような箇所主に確認される地形は交互砂州となっている。交互砂州を模した地形による浸透流の発生については、水理実験や数値計算により検討された事例がある²²⁾。しかし、実河川における砂州地形とそれに依存した浸透流の分布および産卵床分布との関係については明らかではない。そのため、河道整備の検討に当たって、砂州地形が浸透流と産卵床の分布に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本章では、砂州地形とそれに依存した流況によって発生する浸透流の分布、その発生要因を現地調査、浸透流計算により把握する。そして、実際の産卵床分布との関係を検討することにより、砂州地形が産卵環境に果たす役割を明らかにする。

4. 1 方法

4. 1. 1 調査河川

現地調査を、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-7bに示すKP11.96~12.32の延長360mを調査対象区間とした。この区間でシロザケが産卵していることは、過去の調査で把握されている¹⁵⁾。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箇所である。

4. 1. 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-7cに示す。なお、図-7cの黒網掛け部は後述する流況計算により、水深1cm以下となった箇所であり、調査時において冠水していない箇所である。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箇所(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-7cの島状の黒網掛け部。以降、砂州頂部礫河原)である。

4. 1. 3 現地調査

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-7cに示す地点において行った。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した。

浸透流調査は、平成25年10月24日、11月5日に図-7c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から概ね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。浸透流の調査方法は、Baxter et al.²³⁾の方法に従い、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

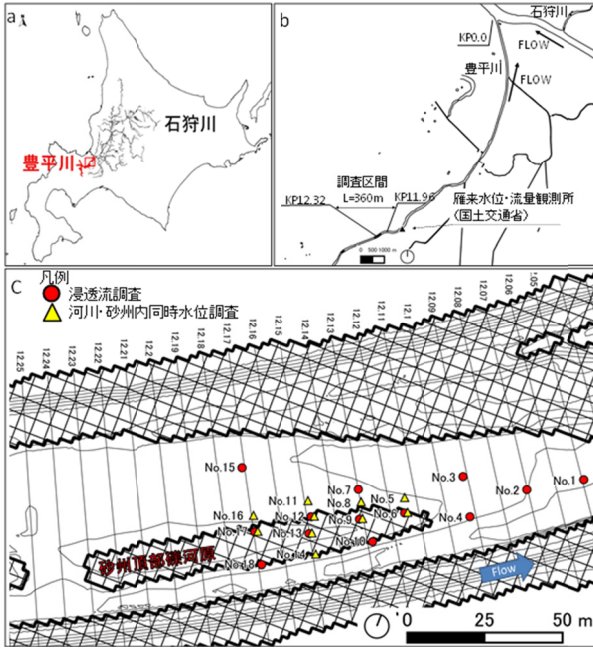


図-7 調査箇所

さ 40、60cm の浸透流速の算出には、それぞれ深さ 20、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、マイナス値を伏流傾向としている。

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¹⁵⁾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⁹⁾、検討においてもこれらを区別した。

各調査の実施日とその日の日流量を表-3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かった。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²⁴⁾。

4. 1. 4 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-3D・EL²⁵⁾を使用した。浸透流計算の計算格子は、流況計算のため横断測量結果を基にiRIC²⁶⁾を用いて

表-3 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-4 流況計算条件(iRIC²⁶⁾)

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

作成した平面格子データを、DTRANSU-3D・EL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。浸透流計算の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-3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-4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9.4×10⁻⁶m³を用いた²⁷⁾。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出入はないものとした。上流からの浸透流

表-5 浸透流計算条件(DTRANSU-3D²⁵)

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	流出なし

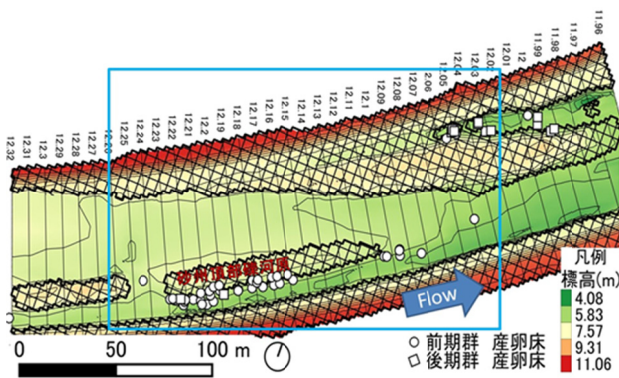


図-8 横断測量による河床地形と産卵床の平面分布
(札幌市豊平川さけ科学館)

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、流出がない条件とした。これらの浸透流計算の条件を表-5 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、鉛直方向の伏流・湧出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²⁷⁾。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 Paraveiw²⁸⁾を用いた。また、現地調査結果と計算結果の関係の検討は、GIS²⁹⁾上で平面的に結果を重ね合わせて行った。

4. 2 結果

4. 2. 1 河床地形と産卵床分布

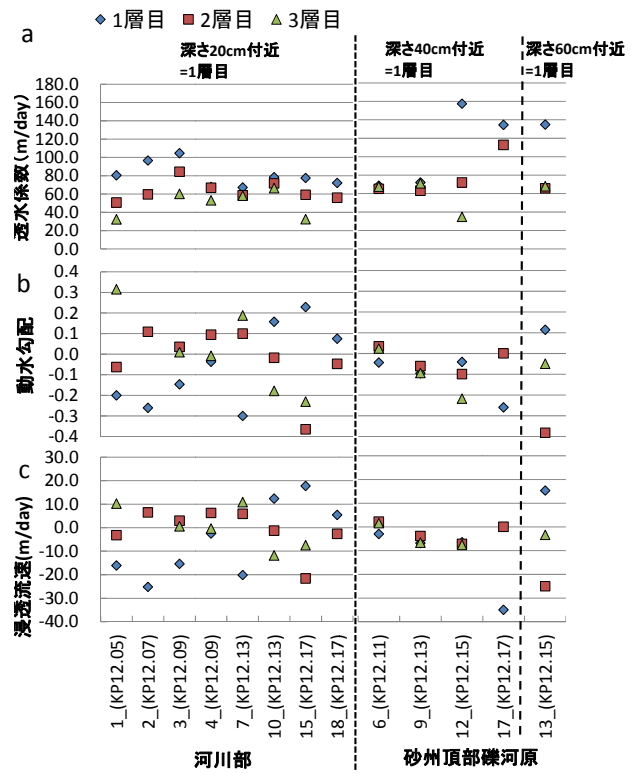


図-9 現地調査による浸透流調査結果

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-8 に示す。KP12.04~12.26 付近の右岸側の砂州前縁部付近に、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-8 の四角枠の範囲は、図-7c 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。

4. 2. 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-9a~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、河川部と分けられている。

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、深度方向で伏流・湧出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分布幅が広がった。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 での浸透流速がマイナス値であり、概ね全ての深度で浸透傾向であった。

4. 2. 3 河川・砂州内同時水位の平面分布

図-10 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. 2. 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-11 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

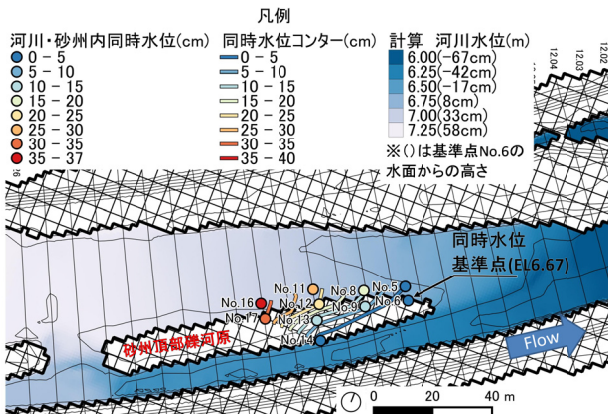


図-10 河川・砂州内同時水位と計算河川水位の平面分布

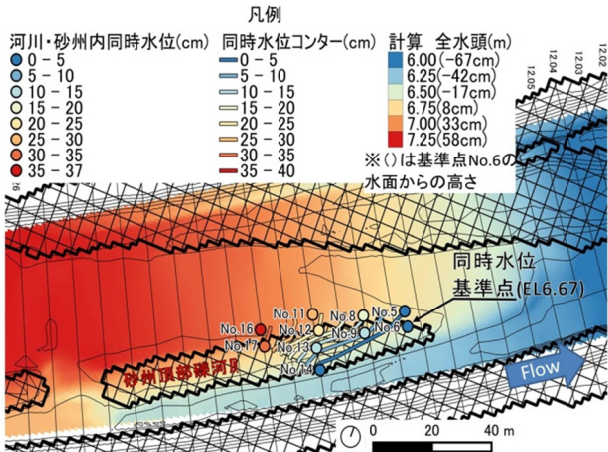


図-11 河川・砂州内同時水位と計算全水頭の平面分布

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、砂州前縁部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-12 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、青が伏流、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伏流し、前縁部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箇所においても、上流からの浸透流が湧出していることが確認される。

図-13 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

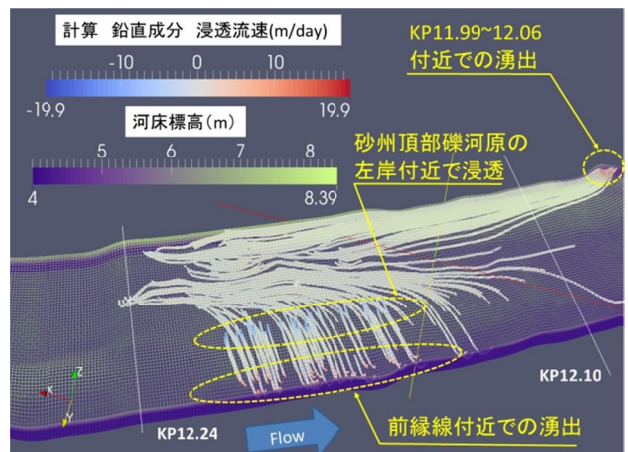


図-12 浸透流計算結果（河床地形（半透明）と実流速の 3D 流線）

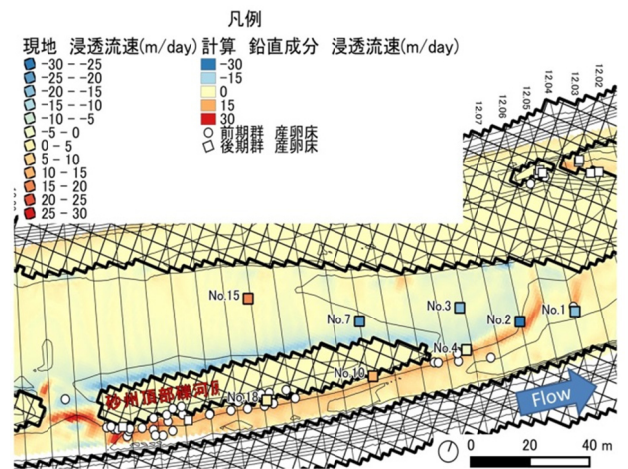


図-13 河床面から深さ 20cm における現地調査による浸透流速と計算による鉛直成分の浸透流速の平面分布

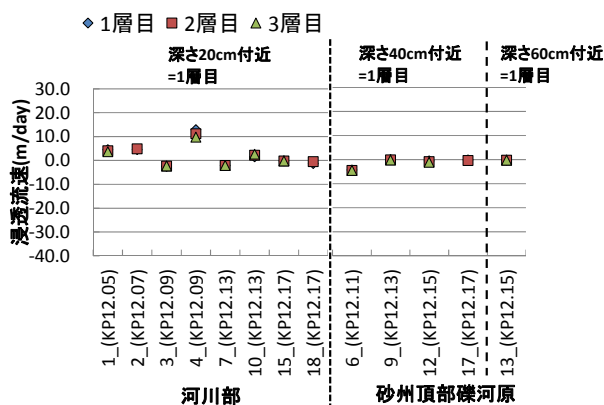


図-14 計算による鉛直成分の浸透流速

分布を示す。これより産卵床が分布している箇所多くは、浸透流が湧出している箇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-14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-12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-13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. 3 考察

4. 3. 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-10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-13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伏流傾向であり、右岸側の前縁部で湧出傾向であった。これは図-12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伏流し、右岸側の前縁部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²⁷⁾。砂州頂部礫河原付近の浸透流は、砂州頂部礫河原の左岸上流側と右岸下流側の水位差が動水勾配として作用したことで、河床内部に発生したと考えられる。

浸透流調査により、深度による浸透流の伏流・湧出の傾向の違いが確認されたが、図-14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部付近の浸透流の発生については、図-9に示すような砂州頂部と前縁部との局所的な河川水位差が影響しているため、このような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部で湧出するという傾向は変わらないと考えられる。

4. 3. 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¹⁰⁾。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。

このような浸透路長の短い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卵の生存率が低いことが指摘されている³⁰⁾。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、溶存酸素量は浸透流の滞留時間の増加と共に減少する¹²⁾。砂州地形が発生させる浸透流は、頂部から前縁部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、溶存酸素供給の観点からシロザケの産卵環境に重要であると考えられる。

一方、図-13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-12に示すとおり、浸透路長のやや長い浸透流が湧出している状況が確認される。この浸透流の発生は、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の違いがあることが指摘され、前期群は河川水に近い水温変動の箇所を利用するのに対し、後期群は浸透流の水温が河川水に対して高く、かつ時間変化が小さい箇所を利用するとされている⁹⁾。本研究における計算結果からは、前期群の産卵床が多く確認された砂州の前縁部では、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やや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。

4. 4 本章のまとめ

本章では、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った。さらに浸透流計算を行い、浸透流と産卵床分布との関係性を検討し、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伏流傾向であり、前縁部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部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、砂州頂部で伏流した河川水が前縁部で湧出していることが明らかとなった。

②浸透流計算結果では、産卵床が確認された箇所は、ほとんど浸透流が湧出傾向である箇所であった。この砂州地形が起因して発生した浸透流は、浸透路長が短いため、溶存酸素量が高いことが考えられ、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. 礫厚が浸透流とシロザケ産卵環境に及ぼす影響

交互砂州に起因した浸透流の滞留時間は、礫厚の影響を受けることが指摘されている³¹⁾。産卵環境に重要な溶存酸素量や水温は、浸透流の滞留時間の影響を受けることから¹²⁾、河床低下により礫厚が変化した場合、浸透流の質も変化することが考えられる。礫厚と浸透流の溶存酸素量および水温の関係、さらに産卵床分布との関係については明らかではなく、産卵環境の観点から浸透流の質を考慮した礫厚条件についても明らかではない。

本章では、実河川の礫厚が異なる区間において、礫厚と浸透流の溶存酸素量、水温の関係を明らかにし、さらに、それらと産卵環境との関係を明らかにする。また、産卵環境の観点から浸透流の質が良好となる礫厚条件についても明らかにする。

5. 1 方法

5. 1. 1 対象箇所

現地調査を図-15 に示す、北海道の石狩川上流部の礫厚が異なる3区間で行った。第一の区間は、KP163.5～164.1 (KP: 河口を原点とした流路延長、単位 km) であり、後述する本調査の横断測量結果で確認された最深河

床高が既往の地質調査³²⁾による軟岩層上面の標高より低い区間である。すなわち、軟岩が侵食されて、表層に薄く礫が堆積している状態と考えられる区間(以降、薄礫区間)である。この状況は図-16 に示す現地写真からも確認される。なお、この区間の上下流端における最深河床高の標高はそれぞれ EL122.1、120.4m であり、軟岩表層の標高はそれぞれ EL122.37、121.39m である。第2の区間は KP164.3～164.85 の区間であり、本調査による横断測量結果と既往の地質調査結果から、上流端では最深河床高が軟岩層の表層よりも高く礫層が維持されているものの、下流端では第1の区間と同様に軟岩層の表層の標高が最深河床高よりも低く、軟岩層の上に礫層が存在する区間である。すなわち、礫厚が上流から下流に減少して遷移している区間(以降、礫厚遷移区間)である。なお、この区間の上下流端における最深河床高の標高はそれぞれ EL124.84、122.04m であり、軟岩表層の標高はそれぞれ EL124.48、122.77m である。第3の区間は、河口から KP176.2～176.7 の区間であり、既往の地質調査³³⁾から礫厚が20m以上と厚いことが確認される区間(以降、厚礫区間)である。

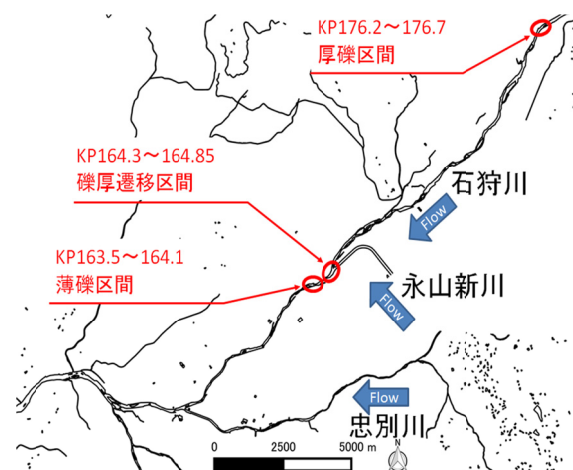
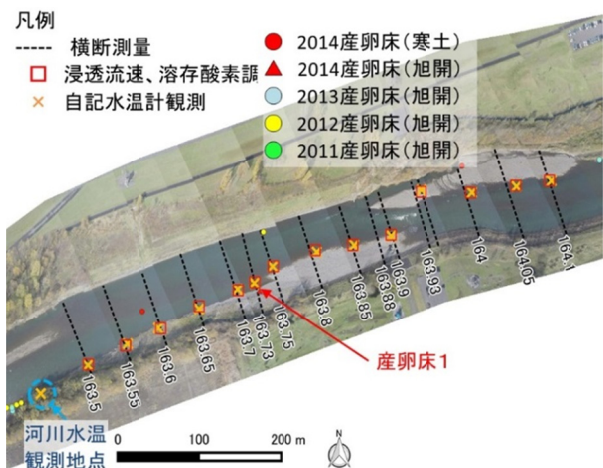


図-15 調査箇所図



図-16 薄礫区間の露岩状況

(KP163.88 右岸から左岸上流を撮影 平成26年11月)



※凡例の「寒土」、「旭開」は、それぞれ寒地土木研究所、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部による産卵床調査結果を示す。

図-17 調査地点 (KP163.5~164.1 薄礫区間)

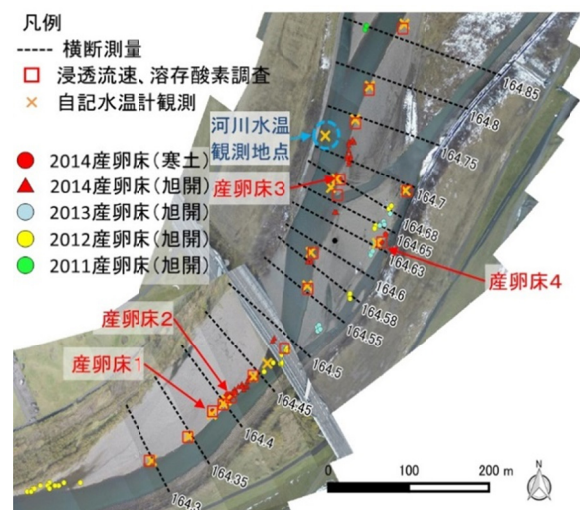


図-18 調査地点 (KP164.3~164.85 礫厚遷移区間)

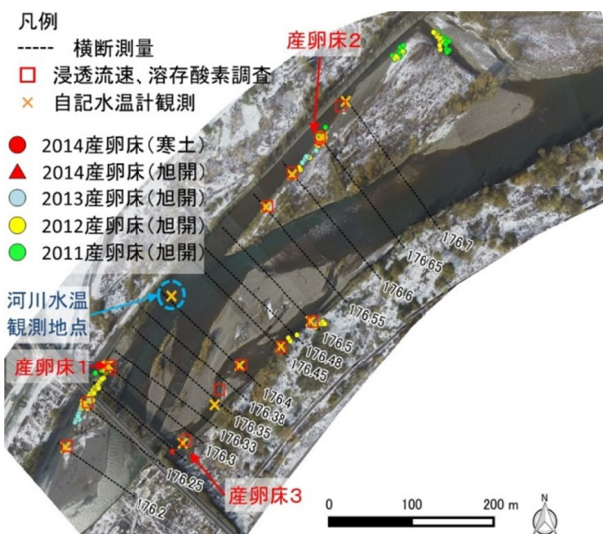


図-19 調査地点 (KP176.2~176.7 厚礫区間)

5. 1. 2 現地調査

図-17~19 に示す各区間内において、横断測量、簡易空撮、浸透流速調査、浸透流溶存酸素調査および河床内での自記水温計観測を行った。なお、図-17~19 の背景写真は簡易空撮から得たものである。

a) 横断測量

河床の横断形状を把握するため、2014年11月11日~12月1日に、縦断間隔50mおよび縦断的に交互砂州が入れ替わる地形の変化点などにおいて、横断測線を設け、RTK-GPSにより横断形状を計測した。

b) 浸透流速調査

2014年11月12~26日に、砂州前縁部上において浸透流速調査を縦断間隔50mで行った。調査方法は、Baxter et al.²³⁾に従ったもので、河床面から20cm深部においてピエゾメータ観測と水頭落下試験を行い、鉛直方向の動水勾配と透水係数を求め、これらの積から浸透流速を算出した。なお、浸透流速の値はプラス値を湧出傾向、マイナス値を伏流傾向とした。

c) 浸透流溶存酸素調査

2014年11月18日~26日に前述した浸透流速調査と同様の地点で、浸透流の溶存酸素調査を行った。調査方法は、河床面から概ね20cm深部からハンドポンプにより間隙水を採水し、よう素滴定法 (JIS K0102) により分析した。また、調査位置の河川水も同様に採水、分析した。

d) 浸透流水温調査

河床内の水温とその変化を把握するため、2014年11月13~27日に前述した浸透流速調査とほぼ同様の位置に、自記水温計 (Tidbit v2 Onset社 精度 $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$) を設置した。河床内への自記水温計の設置は、先端が開口した鋼管を河床内に貫入し、河床面から約20cm深部に自記水温計を投入した後に、鋼管を引き抜く方法で行った。自記水温計の回収は、融雪出水前の2015年2月25、26日に設置地点の河床を掘り起して行った。また、河川水温についても同様に把握するため、各調査区間の1箇所ずつ河床に鉄杭を貫入し、結氷しない深さに自記水温計を設置した。これらの自記水温計による計測間隔は1時間とした。また、2014年12月1日~2015年2月24日の観測水温の平均値を算出し (以降、期間平均水温)、調査地点の特徴の把握に用いた。なお、自記水温計は各区間で100%回収したが、一部データが欠測した地点があった (データを取得できた地点の割合: 薄礫区間71.4%、礫厚遷移区間81.3%、厚礫区間100%)。

e) 産卵床位置調査

調査区間における産卵床分布を把握するため、産卵床

位置調査を行った。薄礫区間と厚礫区間では、2014年10月10、20、29日、11月10～12、26日、12月5、16、25日の8回行った。礫厚遷移区間においては、11月26日、12月5、16、25日の4回のみ実施した。産卵床位置の座標はGPS(GARMIN 社製 GPSMAP 60CSx)により取得した。また、図-17～19に示す薄礫区間で1箇所、礫厚遷移区間で4箇所、厚礫区間で3箇所を産卵床の代表地点として前述した浸透流速、溶存酸素、自記水温計観測を行った。また、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部により2011年～2014年に行われた産卵床調査の結果も検討に用いた。

5. 1. 3 浸透流数値計算

a) 計算ケース

浸透流計算の対象ケースを表-6に示す。ケース1～3は、それぞれ薄礫区間、礫厚遷移区間、厚礫区間の現地状況を想定したものである。これらのケースの特徴としてケース1の薄礫区間では、既往研究³²⁾による岩盤層の高さに難透水層を設定した。また、薄礫区間では、図-16に示す現地の状況のとおり、露岩により河岸と河床の礫の連続性が断たれている箇所も確認されていることから、左右岸からの地下水流入を考慮せず、低水路部のみを計算対象範囲とした。ケース2の礫厚遷移区間においては、ケース1と同様に既往研究³²⁾による岩盤層の高さに難透水層を設定した。また、この区間では、本調査による横断測量結果と既往研究³²⁾の岩盤層の高さの関係より、河岸から河床に礫層が連続していると考えられ、高水敷まで含めた計算範囲とした。既往研究³²⁾より、この周辺では河川水よりも地下水位が1m程度高いことが確認されていることから、高水敷の格子端部に河川水よりも1m高い水位を設定した。ケース3の厚礫区間では、河岸から100m程度離れた高水敷において、既往研究³³⁾により地下水位が河川水位よりも1m程度高い状況が確認されており、計算範囲を高水敷まで含め、高水敷の格子端部に地下水位を設定した。また、ケース4では、礫厚が薄くなることによる浸透流況への影響を把握するため、仮に厚礫区間の礫厚が1m程度になった条件について検討した。

b) 流況計算

浸透流計算に設定する河川水位の平面分布を把握するため、流況計算を行った。流況計算にはiRICのNays2Dソルバー²⁶⁾を用い、表-7の条件とした。低水路の計算格子は、本調査による横断測量結果の標高値を反映させた。また、礫厚遷移区間と厚礫区間の高水敷の計算格子には、国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル)³⁴⁾の5m

表-6 浸透流の数値計算ケース

ケース	区間	左右岸地下水位	岩盤層の有無
1	KP163.5~164.1 薄礫区間	考慮しない	あり (砂礫厚0~1m程度)
2	KP164.3~164.85 礫厚遷移区間	河川水位+1m	あり (砂礫厚0~2.5m程度)
3	KP176.2~176.7 厚礫区間	河川水位+1m	なし
4	KP176.2~176.7 厚礫区間	河川水位+1m	あり (砂礫厚1m程度)

表-7 河川流況計算条件 (iRIC Nays2DH²⁶⁾)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2DH
格子サイズ	約4×4m
マニングの粗度係数	0.03
乱流モデル	ゼロ方程式
移流項の差分法	CIS法
流量	40m ³ /s
下流端水位	等流水深

メッシュデータの標高値を反映させた。なお、高水敷幅は低水路法肩から100m程度とした。対象流量は、本調査地近傍の永山、比布水位流量観測所の2007～2012年の平水流量の平均値程度(永山43.9m³/s、比布37.5m³/s)²⁴⁾の40m³/sとした。

c) 浸透流計算

浸透流計算は3次元計算モデルであるDTRANSU-3D・EL²⁵⁾を使用した。計算格子は流況計算を行った平面格子データを深度方向に拡張し、DTRANSU-3D・ELに対応した有限要素格子に変換した。深度方向の計算格子は、表-8に示すとおり、薄礫区間、礫厚遷移区間では、河床面から10m程度深部までとした。これは、薄礫区間、礫厚遷移区間の河床面における砂礫層厚が、それぞれ1m、3m程度であり、これより深い位置の透水係数が小さい岩層の厚さは礫層の浸透流の分布に大きく影響せず、岩層の深部まで考慮する必要がないと判断したためである。厚礫区間の深度方向の計算格子は河床面から20mまでとしているが、これは既往の地質調査³³⁾から礫厚が20m程度まで確認されているためである。

浸透流計算の設定条件を表-8に示すが、砂礫層の透水係数は、本調査で行った各区間での水頭落下試験の平均値を用いた。また、砂礫層の有効間隙率、比貯留係数は、それぞれ沖積礫層の0.25、密な砂礫の $9.4 \times 10^{-6} \text{m}^{-1}$ を用いた²⁷⁾。薄礫区間(KP163.5~164.1)では、薄い礫層の下に砂岩の岩盤層があり、岩盤層については基質を次の通り設定した。岩盤層の透水係数は現地試験で決定することが最も正確である。しかし、ここでは簡単のため、幾

表-8 浸透流計算条件 (DTRANSU-3D・EL²⁶⁾)

項目	区間	計算条件			
		KP163.50 ~164.10	KP164.30 ~164.85	KP176.20 ~176.70	KP176.20 ~176.70(岩盤あり)
解析対象範囲	横断方向	低水路	低水路および低水路法肩から100m程度までの高水敷		
	鉛直方向	河床面から10m深部程度	河床面から10m深部程度	河床面から20m深部程度	河床面から20m深部程度
格子サイズ(X×Y×Z)		約4×4×0.3m(0.5m)	約4×4×0.3m(0.5m)	約4×4×0.4m(0.5m)	約4×4×0.4m(0.5m)
砂礫層 透水係数(一定値)		63.1m/day	67.0m/day	90.5m/day	90.5m/day
岩層 透水係数(一定値)		0.03m/day	0.03m/day	-	0.03m/day
砂礫層 有効空隙率		0.25			
岩層 有効空隙率		0.0925			
比貯留係数		9.4×10 ⁻⁶ 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)		0.19m/day	0.46m/day	0.54m/day	0.54m/day
下流境界条件(節点流速)		-0.19m/day	-0.46m/day	-0.54m/day	-0.54m/day
上面境界条件(全水頭)		全水頭=河川水位			
底面境界条件		流出なし			
左右岸境界条件(全水頭)		表-3.2 浸透流の数値計算ケース参照			

※格子サイズZの0の数値は高水敷での厚さを示す

つかある既往研究により報告されている数オーダー異なる値³⁵⁾の範囲の概ね中間値である 3.4×10⁻⁷m/s(≒0.03m/day)を用いた。また、岩盤層の有効空隙率は砂岩の値として0.0925²⁵⁾を用いた。

礫厚遷移区間における岩盤層の標高は、既往調査結果³²⁾により薄礫区間の上下流端の値から比例配分計算により設定した。薄礫区間の最深河床高は既往文献で報告されている岩盤層の標高を下回り、砂礫が堆積している状態であった。そのため、河道内の正確な岩盤位置を特定することが困難であり、薄礫区間では区間上下流端の最深河床高を比例配分計算した高さを岩盤層の標高とした。

河床上面の格子点に作用する全水頭として、前述した流況計算で得た河川水位を設定した。また、左右岸の境界条件は、地下水位を設定することとした。上下流端の境界条件の影響を軽減するため、計算格子の上下流端と同様の低水路断面をそれぞれ100mの延長で付加した。また、表-8に示すとおり、この上下流端に各区間の平均河床勾配と平均透水係数の積の流量が流入し、下流端から同一の流量が流出する設定をした。浸透流計算結果はParaveiw²⁸⁾を用いて3次元的な流線の可視化を行った。

5. 2 結果

5. 2. 1 浸透流の質と産卵床数

浸透流速、溶存酸素量および自記水温計観測より算出した期間平均水温(2014年12月1日~2015年2月24日)の各区間および全産卵床の平均値と標準偏差を図-20に示した。厚礫区間では、湧出箇所および伏流箇所における浸透流速の平均値がそれぞれ32.3、51.5 m/dayと、薄礫区間(湧出4.9、伏流5.7 m/day)、礫厚遷移区間(湧出8.4、伏流3.3 m/day)より大きかった。また厚礫区間では、浸透流の溶存酸素量の平均値が9.3 mg/lと、薄礫区間(11.1 mg/l)、礫厚遷移区間(11.3 mg/l)よりやや低く、期間平均水温の平均値は2.3℃と、薄礫区間(0.6℃)、

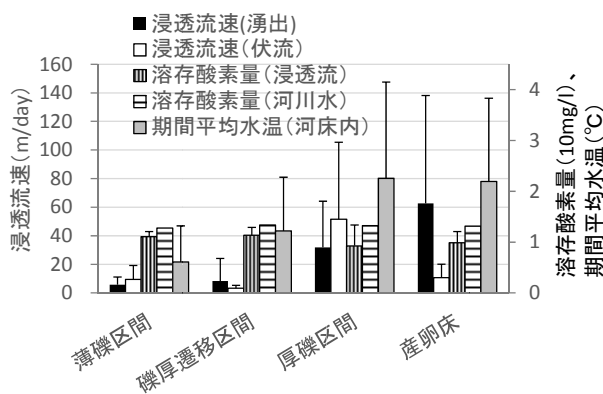


図-20 各区間、産卵床の浸透流速、存酸素、期間平均水温

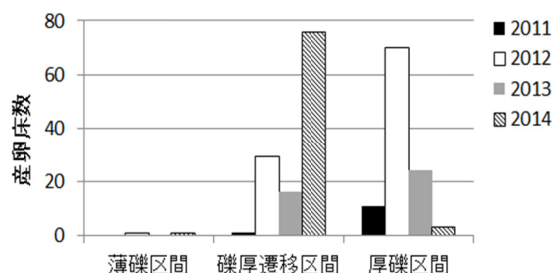


図-21 区間別産卵床数(国土交通省北海道開発局 旭川開発建設部調査)

礫厚遷移区間(1.2℃)より高かった。産卵床で調査された値の平均値は、浸透流速(湧出)が75.5 m/dayと各区間の平均値より大きく、期間平均水温も2.2℃と厚礫区間と同程度に大きかった。

2011~2014年に行われた調査で確認された産卵床位置を図-17~19に示すが砂州に沿って産卵床が分布していることが確認される。また、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部のデータを用いて区間ごとに集計した結果を図-21に示す。薄礫区間では産卵床はほとんど確認されていないのに対し、礫厚遷移区間と厚礫区間では年によって変動はあるものの産卵床が確認されている。

5. 2. 2 調査地点毎の浸透流の質の特徴

個々の調査地点の浸透流速と期間平均水温を、区間毎に図-22~24に示す。また、同様に浸透流と河川水の溶存酸素量について図-25~27に示す。薄礫区間では浸透流速、溶存酸素量および期間平均水温の値に地点間で大きな違いは無い(図-22、25)。それに対し、礫厚遷移区間では、期間平均水温の区間平均値が1.2℃であるが、KP164.3、産卵床1~3でそれぞれ3.2、3.7、3.5および2.2℃と、突出して大きい値の地点が確認された(図-23)。また、厚礫区間においても、期間平均水温の区間平均値が2.3℃であるのに対し、KP176.25、176.65、176.7および

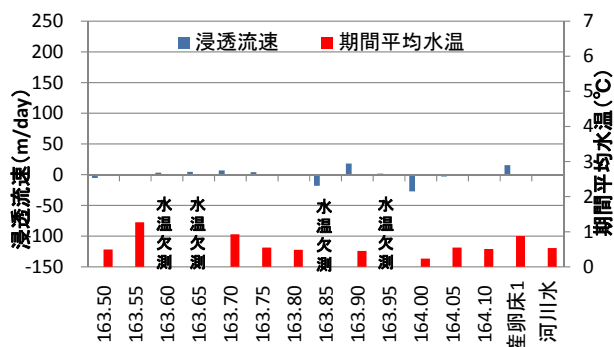


図-22 浸透流速と期間平均水温 (薄礫区間)

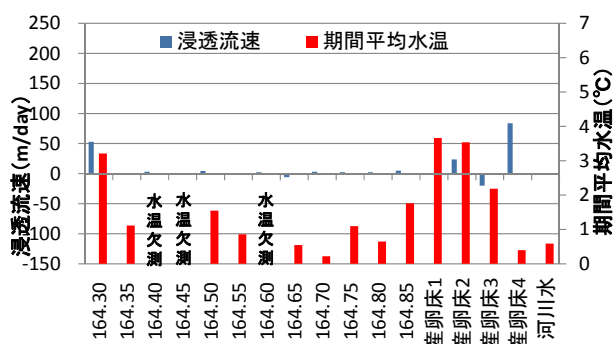


図-23 浸透流速と期間平均水温 (礫厚遷移区間)

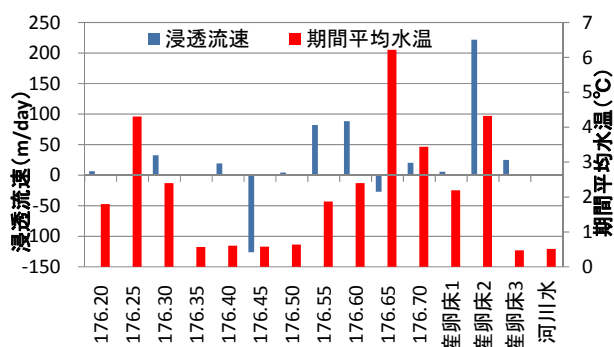


図-24 浸透流速と期間平均水温 (厚礫区間)

産卵床2ではそれぞれ4.3、6.2、3.4および4.3℃と、突出して大きい値の地点が確認された(図-24)。また、厚礫区間では、KP176.6、176.65、176.7および産卵床2の溶存酸素量が、それぞれ2.3、4.5、3.2および4.8mg/lとなっており(図-27)、他の地点で確認されている10mg/l前後の半分程度となっていた。

5. 2. 3 浸透流計算による流線分布

薄礫区間、礫厚遷移区間および厚礫区間の現地の状況を想定し、浸透計算を行ったケース1~3の流線分布を図-28~30に示す。岩盤層を礫層の下部に設定したケース1の薄礫区間、ケース2の礫厚遷移区間では、鉛直方向の流線がほぼ確認されず、流線が平面的に分布している。一方でケース3の厚礫区間では、砂州頂部で伏流し、前

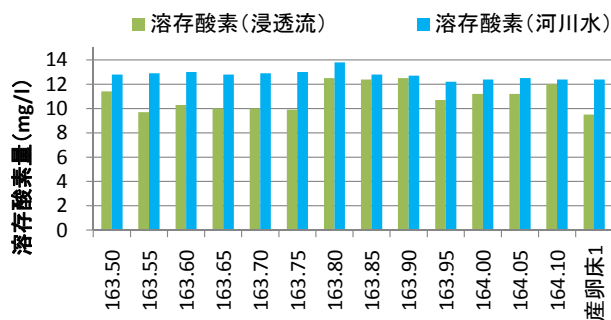


図-25 浸透流・河川水溶存酸素 (薄礫区間)

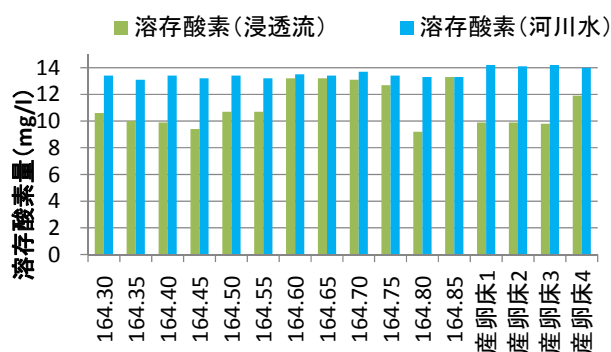


図-26 浸透流・河川水溶存酸素 (礫厚遷移区間)

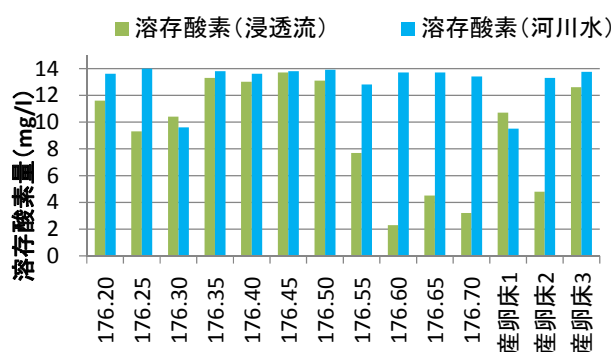
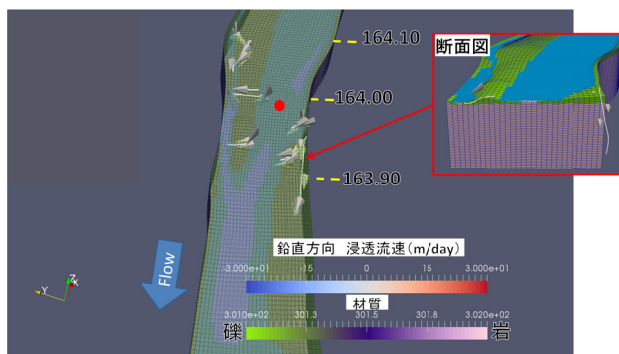


図-27 浸透流・河川水溶存酸素 (厚礫区間)

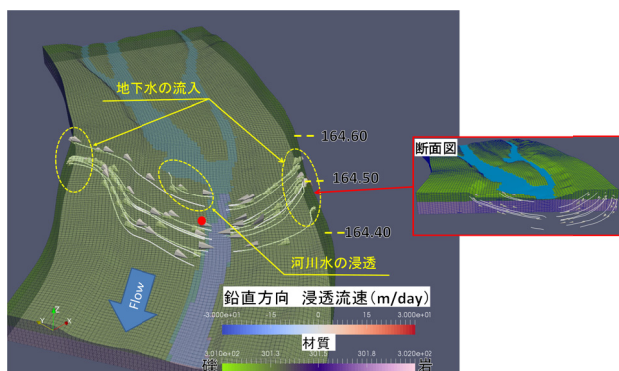
縁部で湧出する流線が確認され、鉛直方向に流れが生じていることが分かる。また、右岸の高水敷側から地下水が河床内に流入し、低水路の側岸付近で湧出している。そのため、ここで示すKP176.45~176.65の右岸低水路河岸では浸透路長が長い地下水位と、砂州地形による水位差に起因した河川由来の伏流水も湧出し、混在している。なお、図-19に示すとおり、この箇所には産卵床の分布が確認されている。

礫厚が薄い影響を把握するため、厚礫区間の河床材料厚が、仮に1m程度であることを想定したケース4では、図-31に示すとおり、ケース3で確認されたような、砂州頂部から河川水が伏流し、砂州前縁部で湧出することに伴う鉛直方向の浸透流の流れがなくなり、岩盤面に沿って水平方向に流れる浸透流のみとなっている。



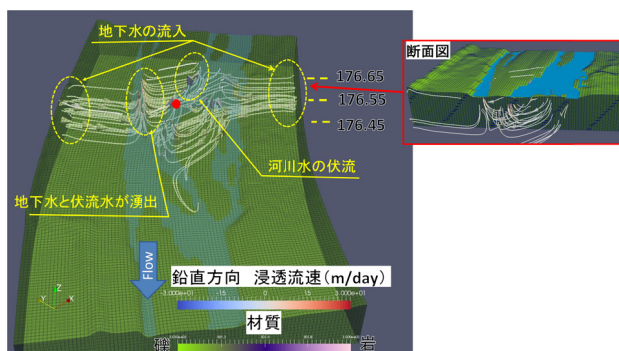
※赤丸は流線の発生範囲の中心

図-28 浸透流速計算による流線分布 (ケース1 薄礫区間)



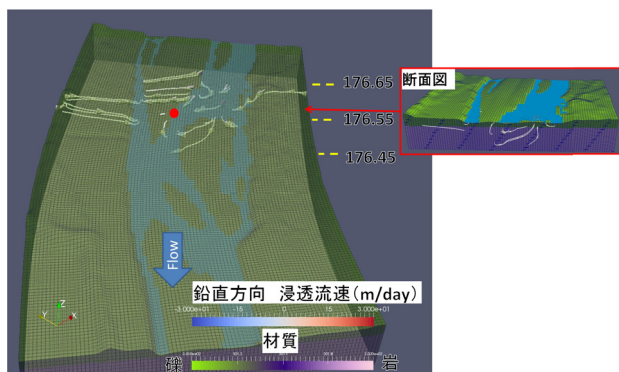
※赤丸は流線の発生範囲の中心

図-29 浸透流速計算による流線分布 (ケース2 礫厚移行区間)



※赤丸は流線の発生範囲の中心

図-30 浸透流速計算による流線分布 (ケース3 厚礫区間)



※赤丸は流線の発生範囲の中心

図-31 浸透流速計算による流線分布 (ケース4 厚礫区間)

5. 3 考察

5. 3. 1 砂州地形による浸透流の発生

a) 厚礫区間

各区間の浸透流速、浸透流の溶存酸素量および期間平均水温を比較した結果、厚礫区間では薄礫区間と比べ浸透流速と期間平均水温が大きく、浸透流の溶存酸素量がやや小さい状況であった (図-20)。浸透流の溶存酸素量は微生物など間隙の群落の代謝活動により消費され、滞留時間が長い程、減少する¹²⁾。そのため、厚礫区間では滞留時間が長い浸透流が混在していた可能性がある。なお、飽和溶存酸素量は水温の上昇により減少するが、浸透流の溶存酸素量が低かった原因は、この影響だけでは説明できない。なぜならば、本調査では採水時の水温を計測していないが仮に4~8℃であったとした場合、飽和溶存酸素量は13.1~11.8 mg/l²⁷⁾となるが、厚礫区間内の浸透流の溶存酸素量が突出して低い地点である KP176.60、176.65、176.32 および産卵床 2 では、その値がそれぞれ 2.3、4.5、3.2 および 4.8 mg/l と、飽和溶存酸素量の半分以上のためである (図-27)。水温の特徴からも厚礫区間で滞留時間が長い浸透流が影響していたと解釈される。浸透路長が長い浸透流は、河川水と比べ夏は冷たく、冬は暖かい^{12, 13)}。そのため、冬季などの河川水温が低い時期に、河川水温の影響が少なく滞留時間が長い浸透流が流入した際は、湧水の水温は高くなる。これらのことから、厚礫区間における突出して浸透流の溶存酸素量が少ない地点や、期間平均水温が高い地点では (図-24、27)、滞留時間が長い浸透流が湧出していたと考えられる。

厚礫区間に滞留時間が長い浸透流が混在していた原因として、礫厚やその連続性が影響したことが考えられる。Tonina³¹⁾は数値計算により、交互砂州地形で発生する浸透流が、底部の不透水層の影響を受けて滞留時間が減少しない条件として、砂州波長の0.3倍の礫厚が必要であることを指摘している。本調査において、厚礫区間では交互砂州形状が明確ではなく、前述した条件の礫厚は明確でない。しかし、既往の地質調査³³⁾から礫厚が20m以上と厚いことが確認されており、砂州などの河床地形により発生する浸透流^{20, 21)}に対する不透水層の影響が小さく、滞留時間が長い浸透流が混在していたと考えられる。また、礫厚が厚く連続していれば、河川上流部や周辺からの滞留時間が長い伏流水や地下水などの流入も可能となる。本調査地の厚礫区間では、地質調査時に低水路河岸から100m外岸側の高水敷で地下水水位が河川水よりも1m高いことが確認されており³³⁾、河道内への地下水流入があったと考えられる。また、浸透流計算結果が

ら、KP176.45～176.65 右岸河岸部では、河川周辺から流入した地下水が湧出し、さらに浸透路長の短いものを含んだ砂州地形由来の浸透流も湧出して、混在していることが確認された (図-30)。そのため、礫厚が十分あり、河川周辺の地下水位が河川水位よりも高く、砂州地形の前縁部が位置する箇所は、河岸部付近に長・短様々な浸透路長の浸透流が湧出する環境が形成されることが考えられる。なお、図-19 に示すとおり、この地下水と砂州地形由来の浸透流が混在して湧出していると考えられる箇所では、産卵床も確認されている。

b) 薄礫区間

一方で、薄礫区間では、浸透流の溶存酸素量が高く、期間平均水温が低い状況であり (図-20)、滞留時間が短い浸透流が優占していたと考えられる。薄礫区間では、最深河床高が既往の地質調査³²⁾による岩盤標高より低く、現地の岩盤からの砂州波高が平均で 1m 程度であり、礫厚は薄くなっている。そのため、Tonina³¹⁾が指摘するように、礫厚が薄いことにより、砂州地形に起因した浸透流の滞留時間が短いことが影響したと考えられる。薄礫区間を対象とした浸透流計算結果では、砂州などの河床地形に起因した鉛直方向の浸透流がほとんどなく、岩盤面に沿った水平方向の流れが卓越していることが確認される (図-28)。また、厚礫区間の礫厚が仮に 1m 程度となった状況を想定した浸透流計算においても、薄礫区間と同様の傾向となっている (図-31)。また、薄礫区間では、高水敷と河床で礫層が分断されている箇所も現地で確認された (図-16)。そのため、高水敷から流入する地下水が河床内に侵入できない箇所もあったと考えられる。また、礫の連続性が完全に分断されなくとも、礫厚が薄いことは浸透流の流下断面が減少することになる。そのため、礫厚の減少箇所、河川上流部や河川周辺からの滞留時間の長い地下水などの流入が減少することが考えられる。

b) 礫厚遷移区間

礫厚遷移区間では、浸透流の水質の特徴として、薄礫区間と同程度に溶存酸素量が高いが、厚礫区間と同様に突出して期間平均水温が高い地点を含んでいた (図-20)。そのため、滞留時間が長い浸透流が混在していると考えられる。浸透流計算の結果では、岩盤層の影響を受けているため、鉛直方向の浸透流の流れは少ないが、礫層が高水敷から河床まで連続していることから、周辺からの地下水位流入が確認される (図-29)。また、砂州上で伏流した河川水に起因した浸透流も、水平方向に流れている状況が確認される (図-29)。このことから、礫厚遷移

区間では、鉛直方向の浸透流の流れは少ないが、周辺地下水などの滞留時間が長い浸透流と、滞留時間が短い浸透した河川水が混在していると考えられる。

5. 3. 2 産卵環境の観点から礫厚

シロザケの卵の孵化には積算温度が 480 °C・日、浮上には 960 °C・日必要とされ²⁾、溶存酸素はシロザケ仔魚の生育に影響を及ぼさないためには 5 mg/l 必要である³⁶⁾。また、Malcolm et al.³⁰⁾は、地下水の影響が強い箇所は溶存酸素量が低く、仔魚の死亡率が高いことを指摘している。前述したとおり、溶存酸素量と冬季の水温は、浸透流の滞留時間に対して異なる傾向を持つが、産卵環境の観点からは、これらの要素が両立されていることが望ましい。そのため、短・長の滞留時間の浸透流が混在することがより良い条件と考えられる。Baxter & Hauer³⁷⁾は、ブルトラウト(*Salvelinus confluentus*)を対象に、短・長の浸透路長の浸透流発生の観点から、瀬淵などの局所的な地形と、谷幅が部分的に広い区間など広域な地形の双方が産卵環境に重要であることを指摘している。礫厚が厚いことは、砂州などの河床地形由来の浸透流が十分滞留できる³¹⁾だけでなく、広域地形に由来した滞留時間が長い浸透流が遮断されず、十分流入することにも寄与すると考えられる。

本研究では融雪出水前に自記水温計を回収したため、卵の孵化に必要な積算温度が確保されたかは明らかではない。しかし、厚礫区間や礫厚遷移区間では、水温が比較的低い時期 (2014 年 12 月 1 日～2015 年 2 月 24 日) の期間平均水温で、3.5 °C を超える地点もあった (図-22、23)。これらの地点では、例えば 3.5 °C×30 日×5 ヶ月 (11～3 月) とした場合、積算温度が 525 °C・日となり、孵化に必要な積算温度 480 °C が確保されたことも考えられる。溶存酸素量は厚礫区間の一部で 4.8 mg/l となっている産卵床の箇所があったが、前述した 5 mg/l の条件を概ね満たしている。また、各区間で確認された産卵床数を比較すると、薄礫区間ではほとんど産卵床が確認されず、礫厚遷移区間、厚礫区間では年により違いがあるが、産卵床が確認されている (図-21)。このことから、礫厚遷移区間や厚礫区間では、前述したとおり短・長の滞留時間の浸透流が混在していたため、溶存酸素の条件だけではなく、水温の面からも産卵環境として良好だったことが考えられる。

5. 3. 3 産卵環境に適した覆礫条件

覆礫を行う場合、厚礫区間のような礫厚を確保することは非常に困難である。礫厚遷移区間では、厚礫区間ほど礫厚が厚くないが、浸透流の水温が厚礫区間と同程度

に高い箇所が含まれ (図-22、23)、産卵床数も厚礫区間と同様に多く確認された (図-21)。ここでは、礫厚を厚礫区間ほど確保できない場合を想定し、どのような礫厚条件であれば、産卵環境として良好となるのかについて検討する。

前述したとおり、産卵環境には、溶存酸素量と、孵化、浮上までに必要な積算温度の確保が必要であり、短・長様々な滞留時間の浸透流が混在することが重要となる。本調査結果から、どの礫厚条件においても、砂州などの河床地形が形成されていれば、伏流水の湧出があると考えられるため、溶存酸素量は産卵環境として問題がないようである。しかし、浸透流の水温については、薄礫区間では低く、礫厚遷移区間や厚礫区間のように突出して高い水温の地点はない。産卵期から融雪期までの積算温度の観測を行ってないため推定にすぎないが、薄礫区間では孵化・浮上に必要な積算温度の確保することが困難と考えられる。薄礫区間では、高水敷から河床にかけての礫層が分断されている箇所が確認されるなど (図-16)、滞留時間が長い地下水の流入が困難な箇所と考えられ、このことが、浸透流の水温が低い原因の一つと考えられる。また、寒冷地においては、外気温の影響が地下にも及ぶ。外気に曝された砂州の中の浅い位置を岩盤面に沿って浸透流が流れる条件では、外気温が砂州内部の浸透流に影響し、水温が低下することが考えられる。そのため、外気温の影響により、卵の孵化に必要な積算温度を下回らない礫厚が必要と考えられる。

これらのことから、厚礫区間のような伏流・湧出といった鉛直方向の浸透流の流れが十分望めない礫厚の箇所では、産卵環境に必要な礫厚条件として、①高水敷から河床に礫が連続していること、②砂礫河床面が外気に曝される場合は、外気温が浸透流の水温に悪影響を及ぼさない礫厚とすること、が考えられる。

「②」の条件について、礫厚とその中を流れる地下水位の関係が変化せず流下し続けると仮定した場合、1次元熱伝導計算により概略を把握できると考えられる。この計算には、対象箇所の外気温、河床材料の温度伝導率を設定する必要があるが、本調査ではこれらの計測をしていないため、既往文献や近傍の観測値を用いて計算を行う。1次元熱伝導方程式には式(6)を用い、クランク-ニコルソンの陰解法により解いた。

$$\frac{\partial \theta_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial z^2} \quad (6)$$

ここで、 θ_g : 温度、 t : 時間、 k_g : 温度伝導率、 z : 深度方向の距離である。地表面の境界条件には、気象庁³⁸⁾による旭川地点の毎正時の気温の観測値を設定した。解析はこの地域の恒温層の深さの地下 11.4m³⁹⁾まで行うこととし、地下端部の境界条件には9.3°C³⁹⁾を一定値として設定した。地中内部の条件は2ケース設定した。一つは薄礫区間を想定したもので、河床面から深さ0~1mが水飽和砂礫層、深さ1~11.4mまでが岩盤層である条件である。もう一つは礫厚遷移区間を想定したもので、河床面から深さ0~1.5mまでが不飽和砂礫層、深さ1.5~3mが水飽和砂礫層、深さ3~11.4mまでが岩盤層であるものである。水飽和砂礫層の温度伝導率は、佐渡⁴⁰⁾による常呂川上流での現地観測から得られた値の $6.1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ を用いた。岩盤層の温度伝導率は粘土鉱物の値である $12.0 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ ⁴¹⁾を用いた。不飽和砂礫層は、主に土粒子と空気からなる空隙で構成されていることから、空気と粘土鉱物の体積熱容量と熱伝導率を合成する式(7)、(8)により算出し、合成された体積熱容量と熱伝導率から式(9)により温度伝導率を算出した。なお、この不飽和砂礫層の温度伝導率は $12.1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$ となった。

$$(\rho C)_e = nS_w(\rho C)_w + n(1 - S_w)(\rho C)_a + (1 - n)(\rho C)_s \quad (7)$$

$$\lambda_{ed} = nS_w\lambda_w + n(1 - S_w)\lambda_a + (1 - n)\lambda_s \quad (8)$$

$$k_{ge} = \frac{\lambda_{ed}}{(\rho C)_e} \quad (9)$$

ここに、 (ρC) : 体積熱容量、 λ : 熱伝導率、 n : 空隙率であり 0.4 を用いた。 S_w : 多孔体の水飽和度であり、ここでは空隙が空気で充填された条件を想定し、0 とした。添え字の e 、 w 、 a および s は、それぞれ合成値、水、空気および土粒子であることを示している。計算点の間隔は深度方向に 0.1m とし、初期の温度条件は 0°C とした。計算期間は、初期の温度条件の影響を少なくするため、調査年度の前年度からである 2012 年 4 月 1 日~2015 年 3 月 31 日の 3 カ年とした。

薄礫区間と厚礫区間を想定した 1 次元熱伝導計算の結果について、深度別に時系列で表したものをそれぞれ図-32、33 に示す。これらの図より、深度が深くなるに伴い温度変動幅が小さくなり、気温に対しての温度のピークに遅れが生じていることが確認される。薄礫区間と礫厚遷移区間を想定した計算結果について、期間平均水温

を算出した期間である2014年12月1日~2015年2月24日の各深度の平均温度と深度との関係を表したものをそれぞれ図-34、35に示す。前述したとおり、期間平均水温が3.5°C以上であれば、孵化に必要な積算暖度が確保できると考えると、薄礫区間では2.2m必要となり、礫層の範囲では期間平均水温が確保されないことが分かる。一方、礫厚遷移区間では、期間平均水温が3.5°C以上確保される深度は1.9mであり、礫層の範囲内にこの深度が位置している。このことから、薄礫区間の砂州が外気に曝されている箇所では、浸透流の温度が外気温の影響を受けて低下したことで、産卵環境として不適となっていた可能性も考えられる。一方で礫厚遷移区間では、礫厚が3m程度あり、地表面から1.9m以下の浸透流は外気温の影響を受けづらいこととなる。礫厚遷移区間における現地調査において、浸透流の水温が高かったのは、礫厚が外気温の影響に対して十分な厚さを持っており、地下水の水温の保持に寄与したためだと考えられる。この礫厚遷移区間における検討結果から、本調査地の条件においては、礫厚が1.9mあれば、その下部の浸透流の水温は外気温の影響を受け、産卵環境に悪影響を及ぼす程、低下しないこととなる。ただし、この検討結果は簡易方法によるもので、積雪や浸透流の流れを考慮した、より詳細な条件については今後の課題である。

5. 4 本章のまとめ

本章では、礫厚の違いが浸透流の質、シロザケの産卵環境に及ぼす影響を現地調査、浸透流の数値計算により検討し、以下のことが明らかとなった。

①礫厚が20m以上と厚い区間では、礫厚が1m程度と薄い区間と比べ、浸透流速が速く、浸透流の水温が高く、浸透流の溶存酸素量がやや低いことが確認された。この区間内の浸透流の溶存酸素量、水温変動の状況から、短・長様々な滞留時間の浸透流が混在していると考えられた。短・長様々な滞留時間の浸透流が混在している原因として、礫厚が厚いため、砂州などの河床地形由来の浸透流の滞留時間が短くならないことや、上流や河川周辺からの地下水が河床内に流入できたことが考えられた。

一方で、礫厚が1m程度と薄い区間では、砂州などの河床地形由来の浸透流の滞留時間が、不透水層の影響を受けて短かったことや、礫厚が薄いことや部分的な露岩により、上流部や河川周辺から冬は河川水よりも暖かい滞留時間の長い浸透流の流入が困難であったことが考えられた。そして、このことが影響したため、浸透流の水温が低かったことが考えられた。

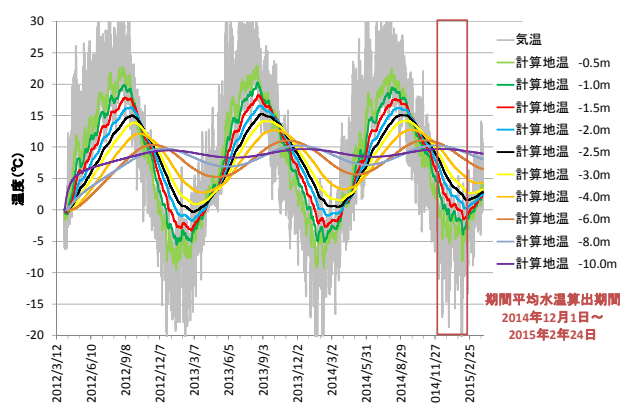


図-32 1次元熱伝導計算による深度毎の地温変化 (薄礫区間を想定)

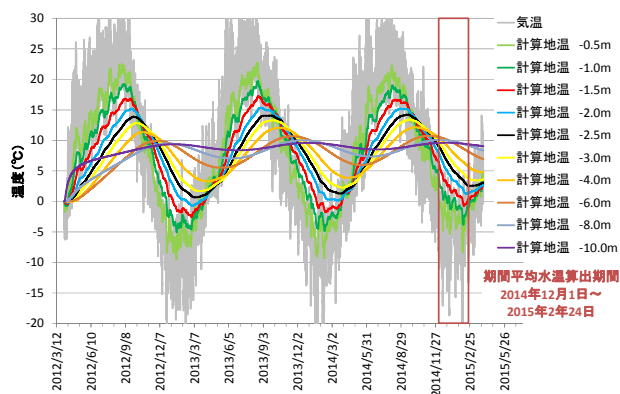


図-33 1次元熱伝導計算による深度毎の地温変化 (礫厚遷移区間を想定)

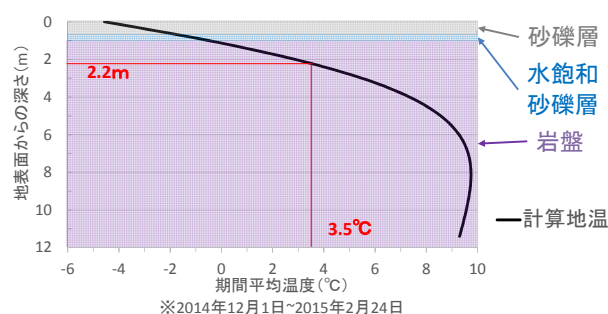


図-34 地表面からの深さによる期間平均温度 (薄礫区間を想定)

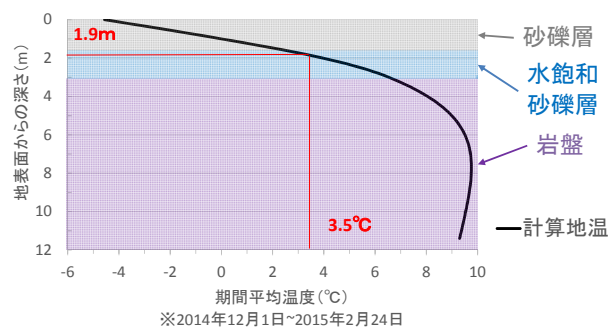


図-35 地表面からの深さによる期間平均温度 (礫厚遷移区間を想定)

②礫厚が上流から下流にかけて薄くなっているが、礫厚が3m程度ある区間では、浸透流の水温が厚礫区間と同程度に高い地点も確認された。この原因として、高水敷から河床にかけて礫が連続していることや、上流から礫厚が連続している影響で、滞留時間が長い浸透流が混在していたと考えられた。

③礫厚が20m以上と厚い区間と、礫厚が3m程度ある区間には産卵床が多く確認され、礫厚が1m程度と薄い箇所では産卵床が少なかった。この原因として、前者では、短・長様々の滞留時間の浸透流が混在することで、産卵環境に重要な溶存酸素量、水温の条件で有利であったと考えられた。一方で後者は、前述したとおり、礫厚が薄い影響で浸透流の水温が低いことから、産卵環境として不利であったと考えられた。

④産卵環境に必要な礫厚条件として、高水敷から河床に礫が連続していること、砂礫面が外気に曝される場合は浸透流が外気温の影響を受けない礫厚とすることが考えられた。この礫厚として、一次元熱伝導計算による簡易な検討結果ではあるが、本調査地の条件においては、礫厚が1.9m以上あればその下部の浸透流の水温は、産卵環境に悪影響する程、低下しない結果となった。

6. 砂州形成条件における礫厚と露岩部拡大の関係

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侵食で、さらに河床低下が進行する事例が確認されている^{42,43)}。河床材料の消失と岩盤侵食に伴う侵食部の濘筋化は、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す⁴²⁾、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⁴⁴⁾。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、出水による濘筋の再露岩が生じている⁴³⁾。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⁴⁵⁾。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。

本章では、覆礫後に露岩河床部が拡大する原因を明ら

かにするため、礫厚と砂州形状、岩盤の露出率の関係を水理模型実験により明らかにする。また、露岩河床部の拡大を引き起こさず、産卵環境に良好な砂州地形が維持される覆礫条件についても明らかにする。

6. 1 方法

6. 1. 1 水路実験

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のほぼ均一な硅砂を敷均し（以降、敷き設した河床材料を「覆礫」と称する）、流量 $0.005\text{m}^3/\text{s}$ 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-Strickler式⁴⁶⁾の相当粗度 k_s に粒径の2倍を代入した場合、0.014となる。

6. 1. 2 実験ケース

実験ケースは表-9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 $0.0247\text{cm}^2/\text{s}$ 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 $0.00741\text{cm}^2/\text{s}$ 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²⁷⁾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。

6. 1. 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

表-9 実験条件(礫厚と露岩部拡大に関する実験)

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

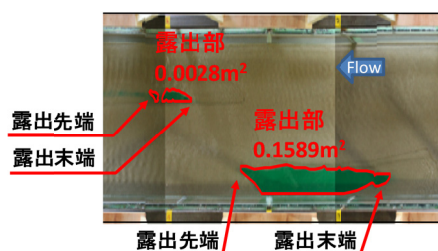


図-36 露出部ポリゴン化の例と露出部の先端、末端の名称

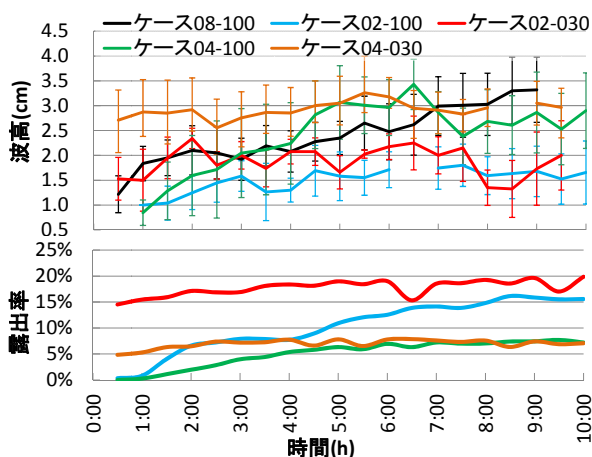


図-37 砂州波高、露出率の時間変化

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-36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-36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。

6. 2 結果

6. 2. 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-37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、露出率がともに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。

6. 2. 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-38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。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、時間の経過ととも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、時間の経過ととも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-39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-38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。

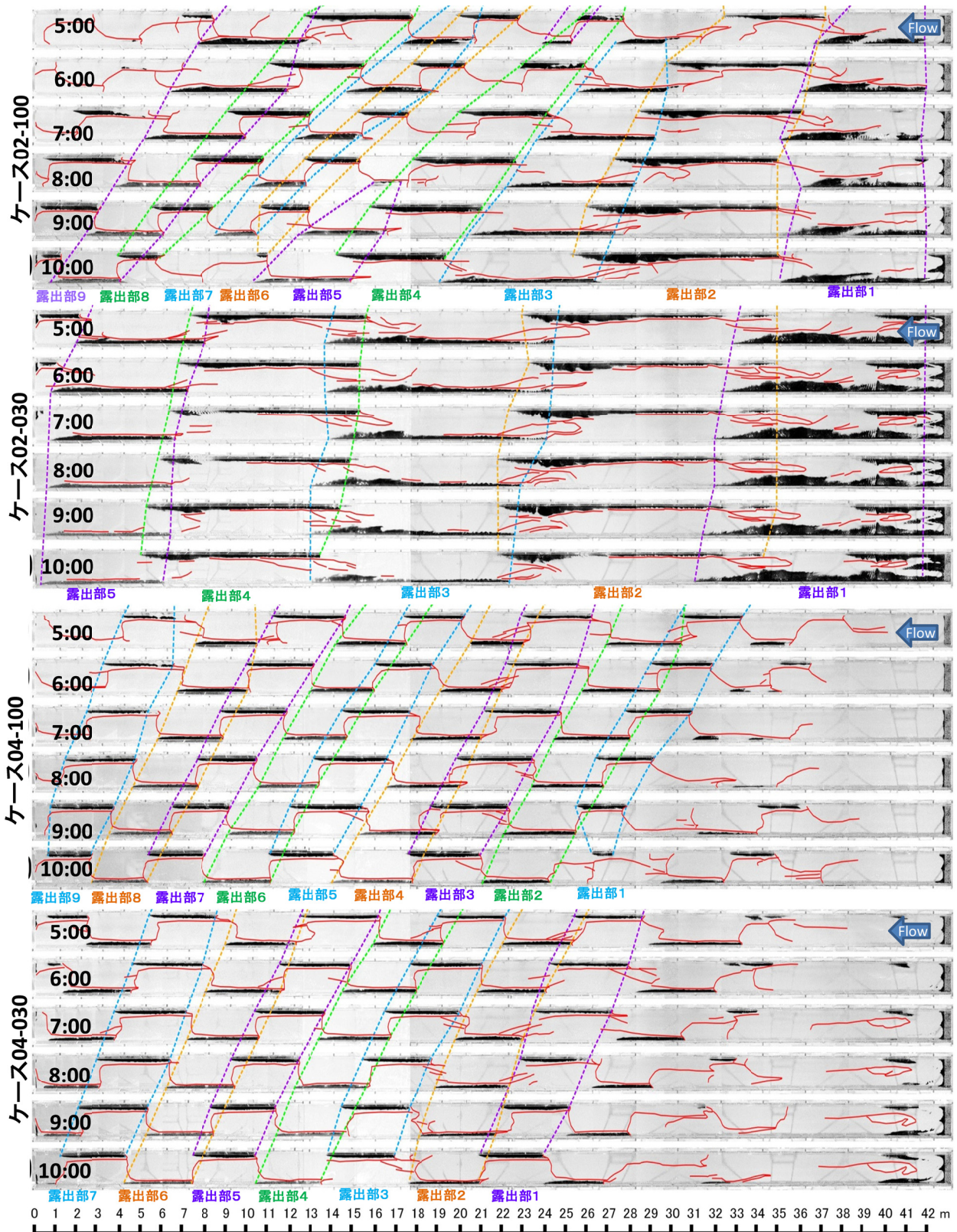


図-38 露出先端・末端の移動状況

※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。

6. 2. 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-40 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、拡大していないケース 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-41 に示す。この図から図-38 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、時間の経過とともに、この蛇行流の角度は小さくなり（より直線的になり）、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。

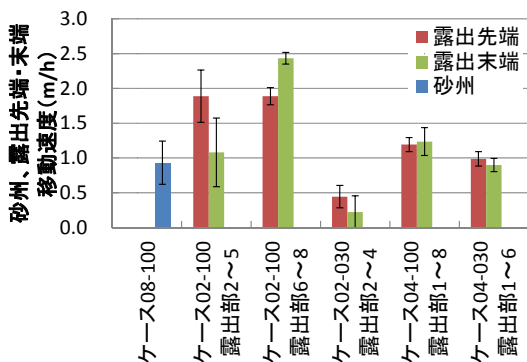


図-39 砂州および露出部先端・末端の砂州移動速度

6. 3 考察

6. 3. 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、砂州深掘れ箇所での露出部が伸びて拡大した (図-38)。Nelson and Seminara⁴⁷⁾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。

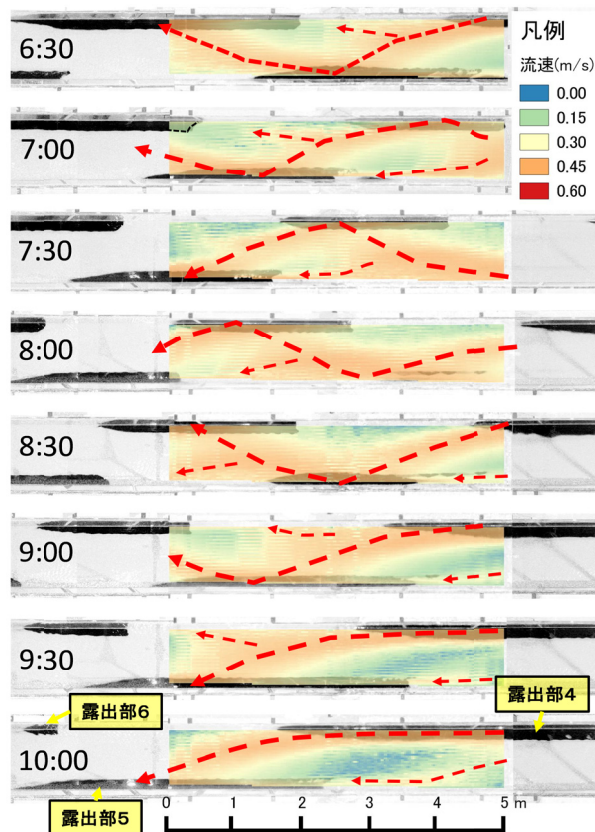


図-41 ケース 02-100 の露出部の変化と PIV 流況

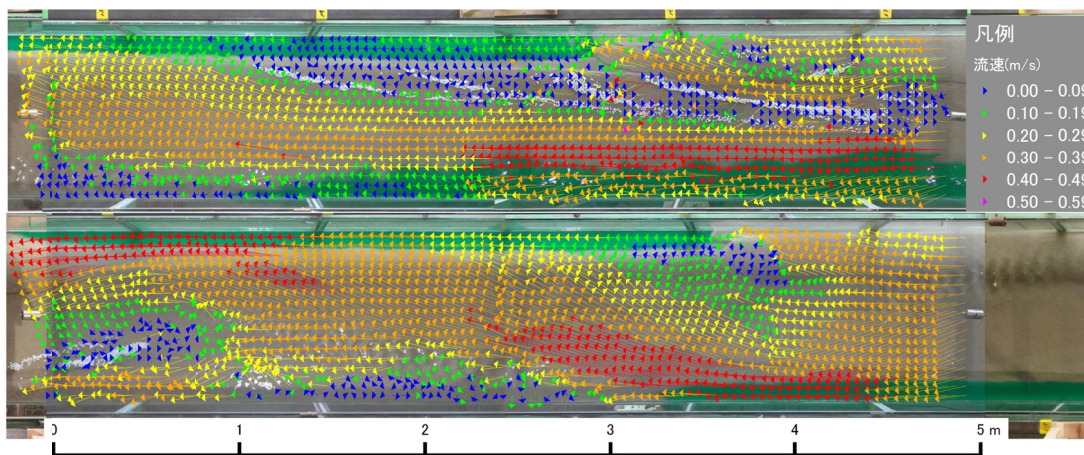


図-40 PIV 計測結果 (上: ケース 02-030 5 時間, 下: ケース 04-030 4 時間)

芦田⁴⁸⁾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-39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⁴⁹⁾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-41）。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⁵⁰⁾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。

6. 3. 2 十分な覆礫厚が露出部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-38）。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04-100と同程度であることから（図-37下、図-39）、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。

6. 3. 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-38）。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⁴⁷⁾および井上らの数値計算⁵¹⁾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-38）。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-37）。しかし、水路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-38）、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。

6. 4 本章のまとめ

本章では、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は、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、水路上

流端で露出部や浮き州状の箇所が確認され、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。

7. 護岸工が砂州形状と分級に及ぼす影響

第4章で、砂州が河川水の伏流および浸透流の湧出に影響し、シロザケなどの産卵環境に寄与していることを示した。河川の中・上流域では、護岸工がなされることが多く、平滑な護岸の設置により、河岸の粗度が自然河岸よりも低くなっている場合がある。

本章では、自由砂州条件の砂州形成時において、河岸の粗度の違いが砂州形状および空間的な河床材料の分級に及ぼす影響を、水理実験により把握する。

7. 1 方法

7. 1. 1 実験水路・ケース

実験に用いた水路の移動床部の延長は20.0m、幅0.45m、水路勾配1/100である。実験ケースは表-10に示すとおりで、ケース1は水路の側面が平滑なガラスもしくは塗装板となっており、過去の実験からマニング粗度が0.01程度と想定される。ケース2では河岸に平均粒径0.77mmの珪砂を張り付けており、Manning-Strickler式⁴⁶⁾の相当粗度 k_s にこの粒径の2倍を代入した場合、マニング粗度は0.014となる。河床材料は平均粒径がそれぞれ1.53、0.77、0.16mmである珪砂を15:70:15の割合で混合したものを、河床に厚さ8cmで敷き均した。この河床材料の粒径加積曲線を図-42に示すが、25、50、75%粒径はそれぞれ0.26、0.35、0.56mmである。なお、本実験条件を1/100スケールだとすると、実スケースでは、川幅45m、流量344m³/s、ケース1、2の河岸のマニング粗度が、それぞれ0.022、0.030、50%粒径が35cmとなる。

7. 1. 2 計測

通水中に30分間隔で、水路下流端から10m上流までに発生した砂州の先端位置と波高の計測を行った。また、隣り合う砂州の先端位置の流下方向位置の差から半波長も算出した。波高計測は、通水中にお迅速に行う必要があるため、ここでは計測を簡易化し、波高の定義を砂州先端付近の砂州頂部と前縁部の淵の高低差として計測した。このため、一般に使用されている波高よりやや小さな値

表-10 実験条件(護岸工と砂州形状・分級に関する実験)

ケース	勾配	河岸粗度 (マニング粗度)	流量 (m ³ /s)	移動床時 通水時間	河床材料採取断面 (水路下流端からの位置(m))
1	1/100	0.010	0.00344	5:45	3.250, 3.750, 4.250, 4.750, 5.250
2	1/100	0.014	0.00344	6:00	3.425, 3.925, 4.425, 4.925, 5.425

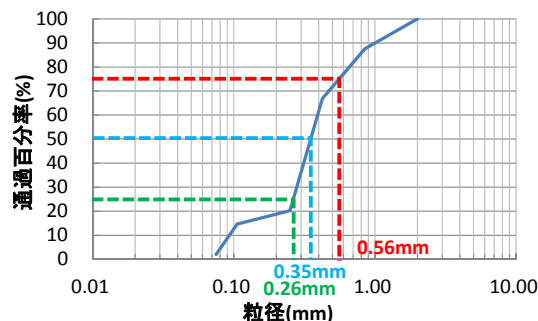


図-42 初期河床の粒度分布

を示す。

通水中は水路下流端から4~8mの範囲を上空からビデオ撮影した。また、水路下流端から4.5、6.5m上流の位置において、右岸側のガラス壁面越しに河床側面の撮影も行った。

通水終了後にケース1、2において、それぞれ砂州が形成された水路下流端から2.000~6.500、2.175~6.675mの区間を、レーザー砂面計により縦断間隔0.1mで計測した。また、表-10に示す水路下流端から上流の位置に5測線を設定し、各測線の右岸から4.5、13.5、22.5、31.5、41.5cmの横断位置で河床材料のコア採取を行った。採取に使用した器具はBlom and Ribberink⁵²⁾が用いたものを参考に作成し、縦横5×5cm、厚さ10cmのコアを採取できる構造とした。採取したコアは河床面から3cm深部までを厚さ5mm間隔でスライスし、1コアあたり6試料のふるい分け分析を行い、25、50、75%粒径を算出した。

7. 2 結果と考察

7. 2. 1 河岸粗度による砂州形状

図-43に通水後の初期河床からの河床変動量を示す。それぞれのケースにおいて、交互砂州が形成されていたことが確認される。通水中に測定した砂州波高・波長の平均値の時間変化を図-44に示す。通水開始から約5時間経過後からは、波長・波高の変化が小さくなり、安定していることが確認される。通水終了時における波長は、ケース1、2でそれぞれ1.82、2.00mであり、波高はそれぞれ1.2cm、1.1cmとなった。河岸の粗度が低いケース1の方が、波長がやや小さいが、2つのケースの砂州波長・波高は顕著な違いとなっていない。禰津・中川⁵³⁾は、川

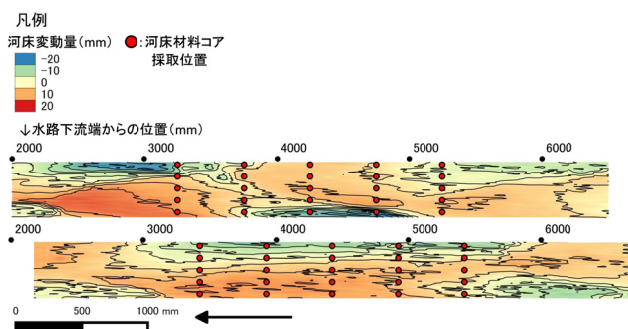


図-43 通水終了後の初期河床からの河床変動量



図-44 平均砂州波長・波高の時間変化

幅水深比 (B/h) $\alpha < 5$ では流れの三次元性が強いが、 α が大きい程、流れの抵抗に及ぼす側壁効果が小さくなることを述べている。本実験では、砂州が形成される条件であり、等流時の川幅水深比 (B/h) α は 24 程度あった。そのため、側岸の粗度の違いは、砂州形状に大きな影響を及ぼすほどの流況の違いにならなかったと考えられる。

7. 2. 2 河岸粗度による河床材料の分級状況

通水終了後に表-11、図-43 の位置で採取したコアを、表層から深度 3cm まで厚さ 5mm 間隔で粒度分析した結果を図-45、46 に示す。ここでは粒度分布の違いが分かり易いよう 75% 粒径を示している。

水路中心における河床材料の分級状況の把握のため、図-45、46 に示す結果から、右岸からの横断位置が 225mm における初期河床からの深度と 75% 粒径の関係を表したものを図-47 に示す。また、砂州の向きを考慮して、砂州前縁部および頂部の区分により、右岸からの横断位置が 45mm もしくは 450mm の初期河床からの深度と、75% 粒径の関係を示したものを図-48、49 に示す。なお、ケース 1 の水路下流端から 3.75m 上流の測線に関しては、図-45 に示すとおり砂州の前縁部と頂部が明確でないため、図-48、49 には含めていない。また、データを線で結んでいるのは同じコアのデータであることを示し、各コアにおける深度方向での粒度変化を表している。

これらの結果から、図-47 に示すとおり、水路中心に

おいては初期河床からの深度が 0mm の付近の河床材料が初期状態よりも細粒化し、75% 粒径が 0.4mm 程度となっていた。また、これより深部では初期河床と同程度の 75% 粒径となっている。竹林・江頭⁵⁴⁾は、交互砂州の河床面における河床材料の分級の特徴として、前縁部の深掘れ部で粗粒化し、頂部で細粒化することを述べている。本実験においては、水路中心部は砂州頂部にあたる箇所が多いため、攪乱の受けた深度は河床材料が細粒化したものと考えられる。

図-48 に示すとおり、砂州前縁部については、深掘れしているため、初期河床からの深度が 10mm 程度より深いデータとなっている。ケース 1、2 の砂州前縁部においては、それぞれ初期河床からの深度が 20~30mm、10~20mm 付近で、75% 粒径が 1.00mm を超え、粗粒分が多くなっている。また、それより深い位置では 75% 粒径が 0.6~0.8mm と、初期河床よりもやや粗い粒径となっている。砂州前縁部の深掘れで粗粒部が多くなる傾向は、竹林・江頭⁵⁴⁾が指摘と一致した。

図-49 に示すとおり、砂州頂部側においては、両ケースとも初期河床から深度が 0~10mm において、75% 粒径が 0.4mm 程度と初期よりも細粒化している。一方で、ケース 1、2 で、それぞれ初期河床からの深度が 15~25mm、10~0mm 付近で、75% 粒径が 0.7~1.1mm と粗く、砂州の頂部側の内部に粗粒部が確認されている。

河岸粗度が異なる 2 つのケースで、ともに、砂州頂部で河床材料が細粒化し、前縁部の表層付近や砂州頂部外岸の内部において、粗粒材が多い箇所が確認された。しかし、これらは顕著な違いではなかった。その原因として、前述したとおり、本実験条件においては、等流時の川幅水深比 (B/h) α が 24 程度と大きく、側壁の影響が小さかったため⁵³⁾と考えられる。

7. 2. 3 砂州内部の分級機構

前述したとおり、砂州頂部側では、砂州頂部側の外岸の内部で河床材料の粗粒部が確認された。この砂州頂部の外岸側の内部の粗粒部は、縦断的に層状に連続していることが考えられる。この粗粒層が形成される機構として、①偏流の影響で掃流力が低下した箇所への粗粒分の堆積、②砂州移動時における前縁部の急勾配部に土砂が崩れ落ちる際に、粗粒材が細粒材よりも速く深部に到達する作用⁵²⁾、③「②」と同時に起きる表層粗粒部の砂州内部への埋没、が考えられた。

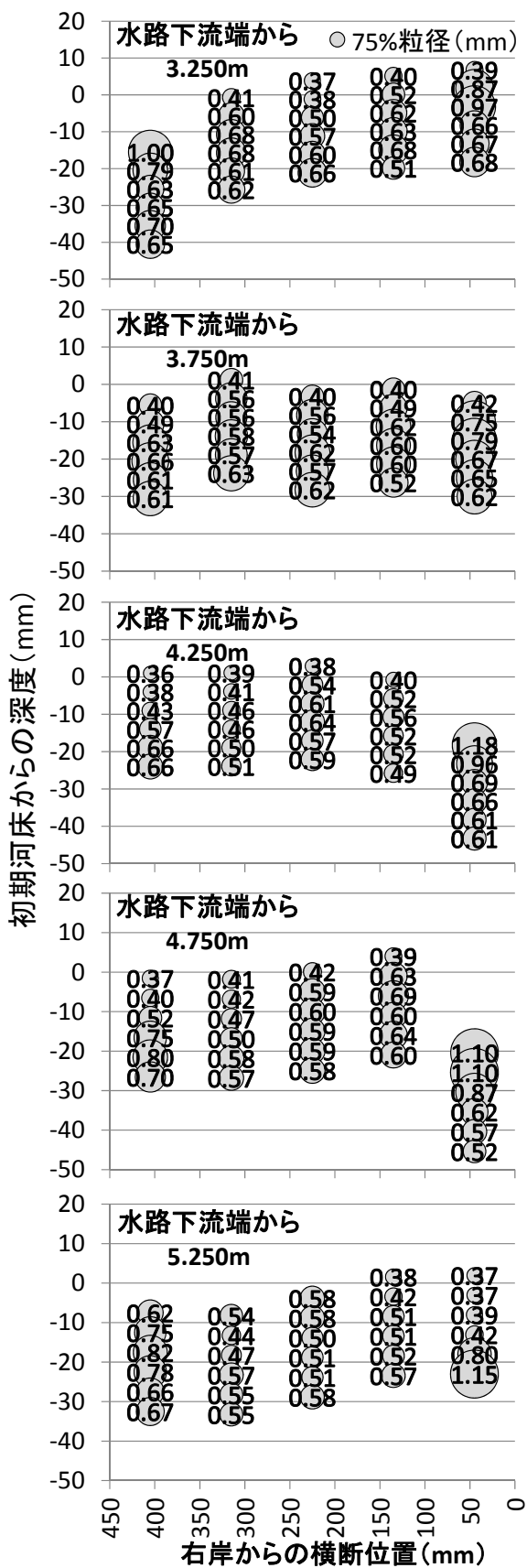


図-45 初期河床の粒度分布 (ケース1)

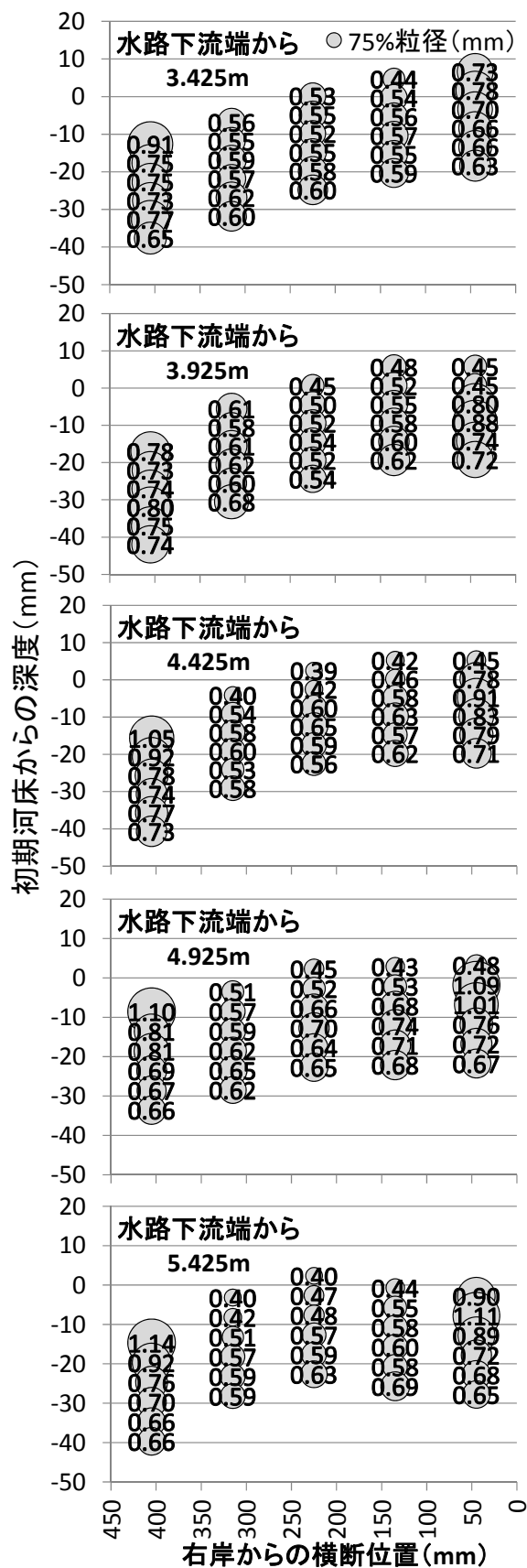


図-46 75%粒径分布 (ケース2)

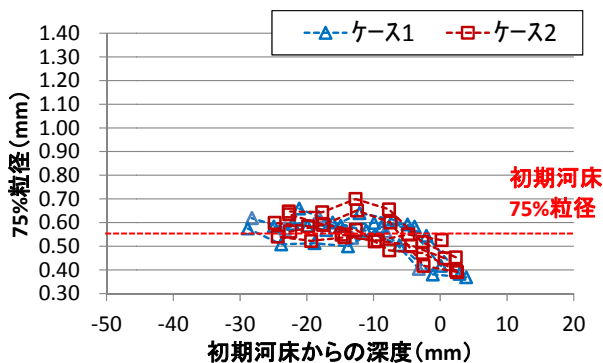


図-47 水路中心における深度と75%粒径の関係

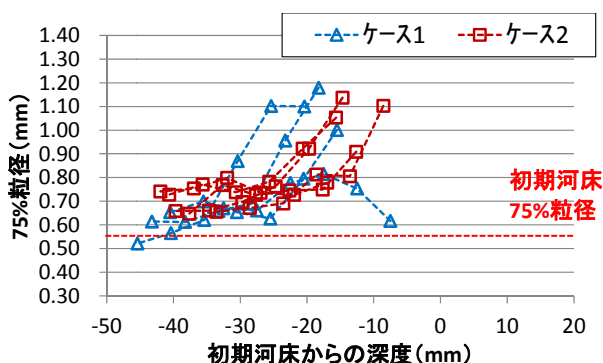


図-48 砂州前縁部側の外岸部における深度と75%粒径の関係

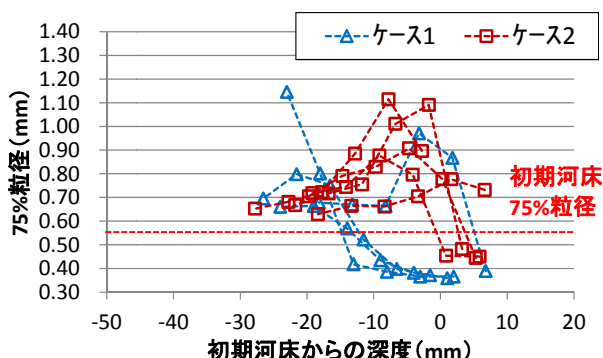


図-49 砂州頂部側の外岸部における深度と75%粒径の関係

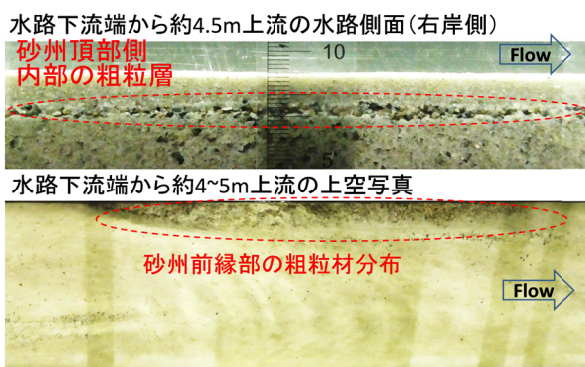


図-50 通水終了後の河床状況 (ケース1)

7. 3 本章のまとめ

護岸設置による河岸のマニング粗度の違いが砂州形状および河床材料の分級に及ぼす影響を把握するため、水理実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- ①河岸の粗度の違いによる砂州形状および河床材料の分級状況に、顕著な違いは確認されなかった。
- ②河岸の粗度に関わらず交互砂州の形成により、砂州の外岸側のかく乱を受けた深度の粒径が粗くなることが確認された。

本実験では、砂州が形成される出水時における河岸の粗度の影響を確認したものであるが、流量の条件により、河岸粗度が及ぼす影響も異なる可能性があり、今後の課題である。また、砂州頂部の外岸の内部に河床材料の粗粒層が確認され、これが浸透流の分布、産卵環境に影響している可能性があるが、詳細は今後の課題である。

8. PHABSIMによる産卵適地の将来予測

産卵環境に配慮した河川整備を行うには、整備後の産卵適地を予測し、整備方法の良否を検討する必要がある。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)⁵⁵⁾ 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⁵⁶⁾。近年では数値計算技術が進展しており、河道整備後の物理値を予測し、それを PHABSIM に用いることで、河川整備後の産卵適地の予測を行うことができると考えられる。

本研究では、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、その適応性を検討する。

8. 1 方法

8. 1. 1 対象箇所

対象河川は、シロザケの産卵が毎年確認される北海道の豊平川とした。対象区間は、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-51 に示す KP11.8~13.0 とした。なお、この区間の河床勾配は約 1/420 で、低水路幅は 60~70m 程度である。

8. 1. 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³⁰⁾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箇所を利用する前期群⁸⁾の

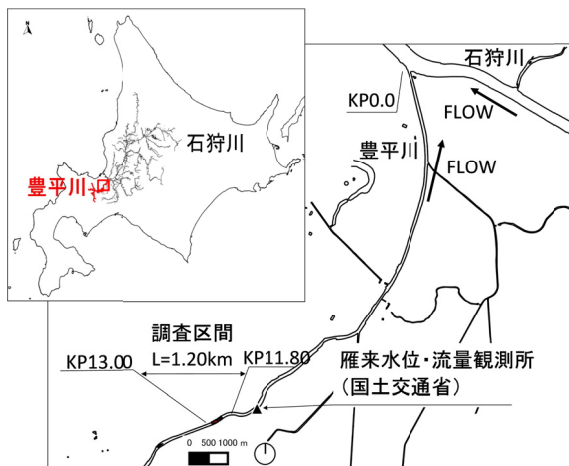


図-51 対象箇所

み対象とすることとし、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、GIS²⁹⁾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²⁶⁾を用いて、表-11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間隔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-52のとおり近似したものを用いた。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⁵⁷⁾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⁵⁸⁾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-11)。

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²⁴⁾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-53に示すとおり平成19年4

表-11 河床変動計算条件 (iRIC Nays2DH ソルバー²⁶⁾)

項目	計算条件
ソルバー	Nays2DH
ソルバー・タイプ	河床変動計算 移流項の差分法 河床材料の種類
	有効 風上差分 混合粒径
	交換層厚0.30m、 堆積層厚0.15m
	流砂の種類 乱流モデル
	掃流砂&浮遊砂 ゼロ方程式
	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	下流端水位
格子設定	格子サイズ マンニングの粗度係数
	約4×4m 河床 0.030 河岸護岸 0.025

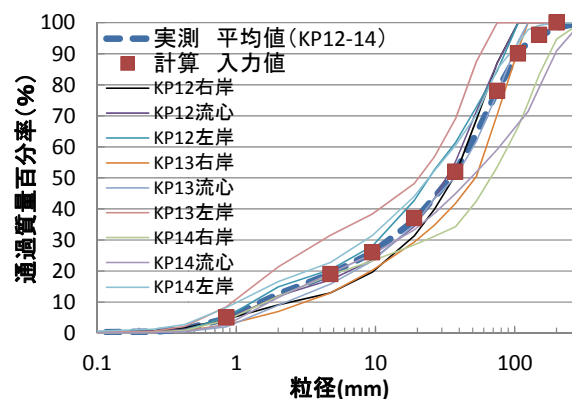


図-52 河床変動計算に用いた粒度構成

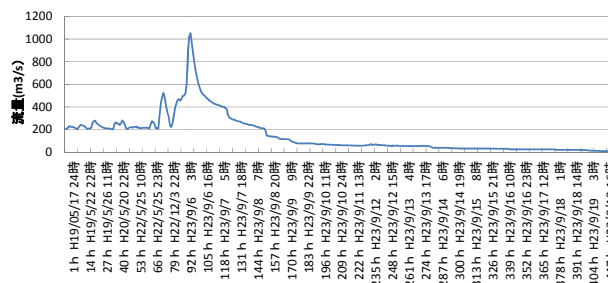


図-53 河床変動計算に用いた流量 (雁来水位流量観測所²⁴⁾)

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。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-3D・EL²⁹⁾を使用した。浸透流計算の条件を表-12に示す。計算格子は前述した河床変動計算を行った

表-12 浸透流計算の条件 (DTRANSU3D-EL²⁶⁾)

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20m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	$9.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$
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0.14m/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	流出入なし

平面格子データを、DTRANSU-3D・EL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。浸透流計算における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 $9.4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ を用いた²⁷⁾。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出入はないものとした。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、流出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(以降、浸透流速)を用いた。

c) PHABSIM

PHABSIMによる検討のイメージを図-54に示すが、①初めに現地調査などにより、対象とする生物が利用している箇所の物理環境値(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³⁾を作成する(図-54a)。適性基準は物理環境値に対する適性値(Suitability Index Value: 以降、SI値)⁵⁵⁾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

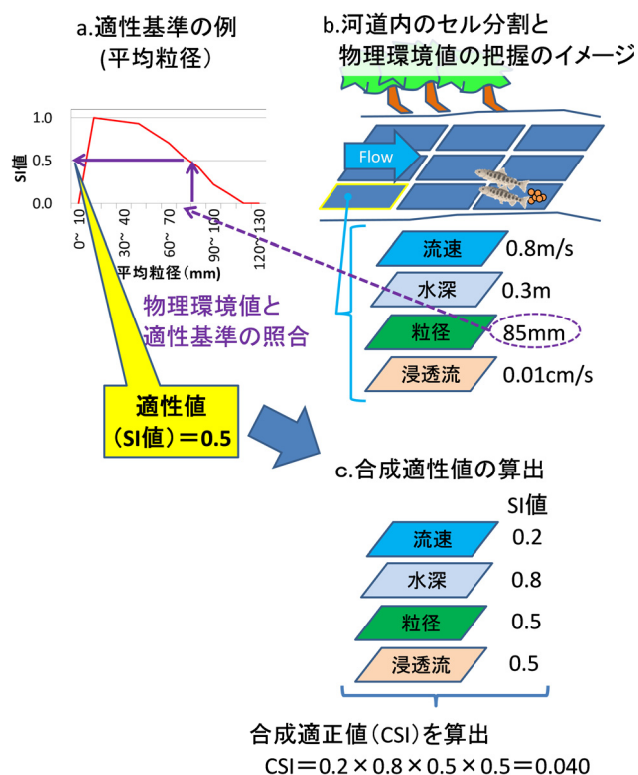


図-54 PHABSIMにおける河道内セルの合成適性値の把握イメージ

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-54b)。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-54ab)。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)⁵⁵⁾を算出する(図-54c)。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あれば、利用可能セルとするものがある⁵⁵⁾。

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⁵⁵⁾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⁵⁶⁾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⁵⁵⁾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⁵²⁾がある。例えば、河道内に様々な流速値が分布し、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、遅い流速箇所面積が小さい場合には、速い流速箇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(10)、(11)にて作成した。

$$c_i = \frac{SN_i}{EN_i} \quad (10)$$

$$SI3_i = c_i / c_{max} \quad (11)$$

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i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か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）⁵⁵⁾は、式(12)により各セルで算出した。

$$CSI = SI_a \times SI_b \times SI_c \quad (12)$$

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。

8. 1. 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-55に示す。数値計算と現地調査結果の比較は、図-55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滞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箇所をそれぞれ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 al²³⁾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-55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、札幌市豊平川さげ科学館¹⁵⁾が本調査と同年度に行った調査結果を用いた。

8. 2 結果と考察

8. 2. 1 数値計算結果と実測の比較

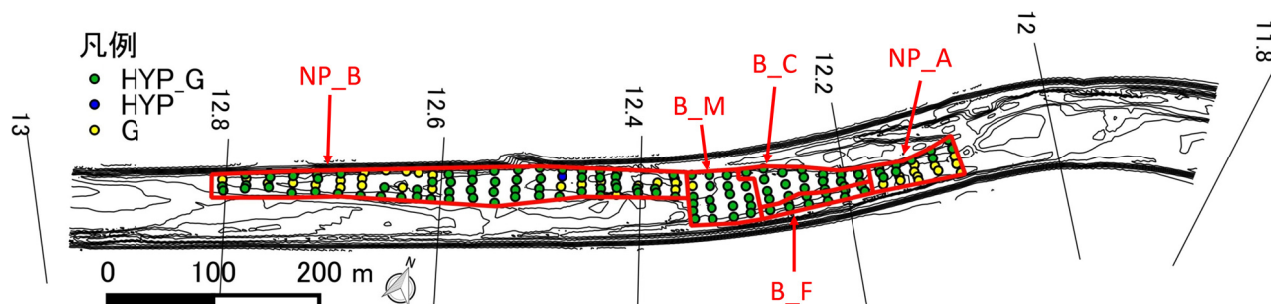


図-55 現地調査地点 ※G: 河床材料調査位置、HYP: 浸透流調査位置

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

a. 河床高 (H23 実測)

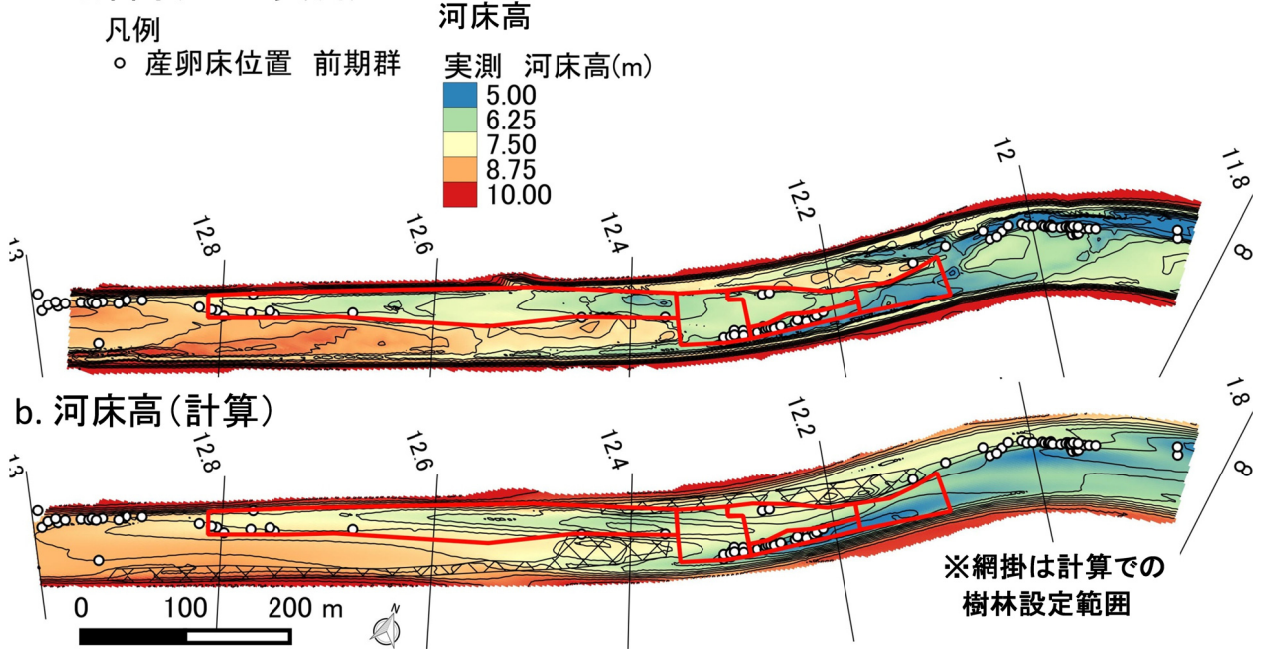


図-56 実測と数値計算の河床高の比較

a)河床高の比較

図-56a 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-56b 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-56b 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箇所に土砂が堆積し、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、計算では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、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。

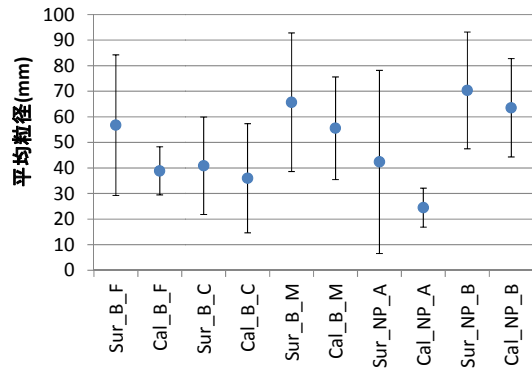


図-57 実測と数値計算の平均粒径の比較

※「Sur」、「Cal」はそれぞれ実測、計算値を示す。

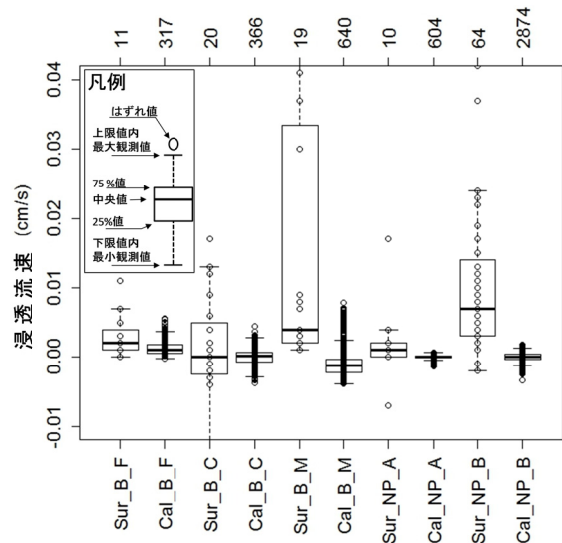


図-58 実測と数値計算の浸透流の比較

b)河床材料粒径の比較

図-55 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-57 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、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。

c)浸透流の比較

図-55 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-58 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、現地では河床面・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。

8. 2. 2 PHABSIMによる産卵適地の推定

a)適性基準 SI3 の補正

SI3 を図化したものを図-59a~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-59a 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¹⁰⁾。そのため、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-59b 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箇所を産卵環境として利用しているとの指摘があり¹⁰⁾、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。

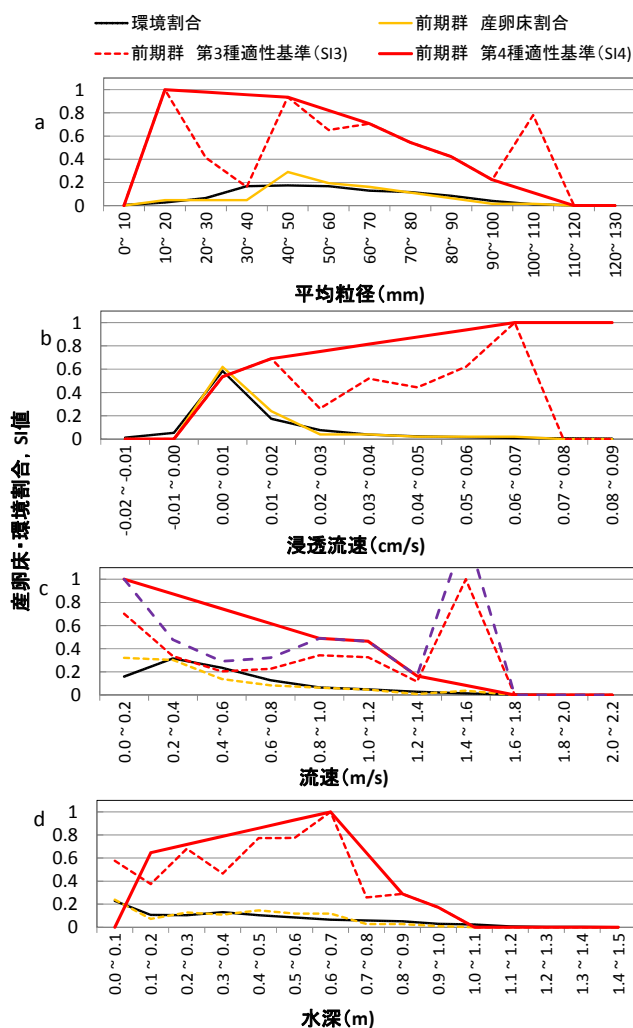


図-59 シロザケ産卵床の適性基準

流速の SI3 は、図-59c 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⁵⁹⁾。そのため、1.4~1.6m/sの凸を無視することとし、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-59c 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-59d 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)PHABSIM と産卵床位置の対応

PHABSIMにより算出したCSIと産卵床の分布を図-60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⁵⁵⁾、0.063以

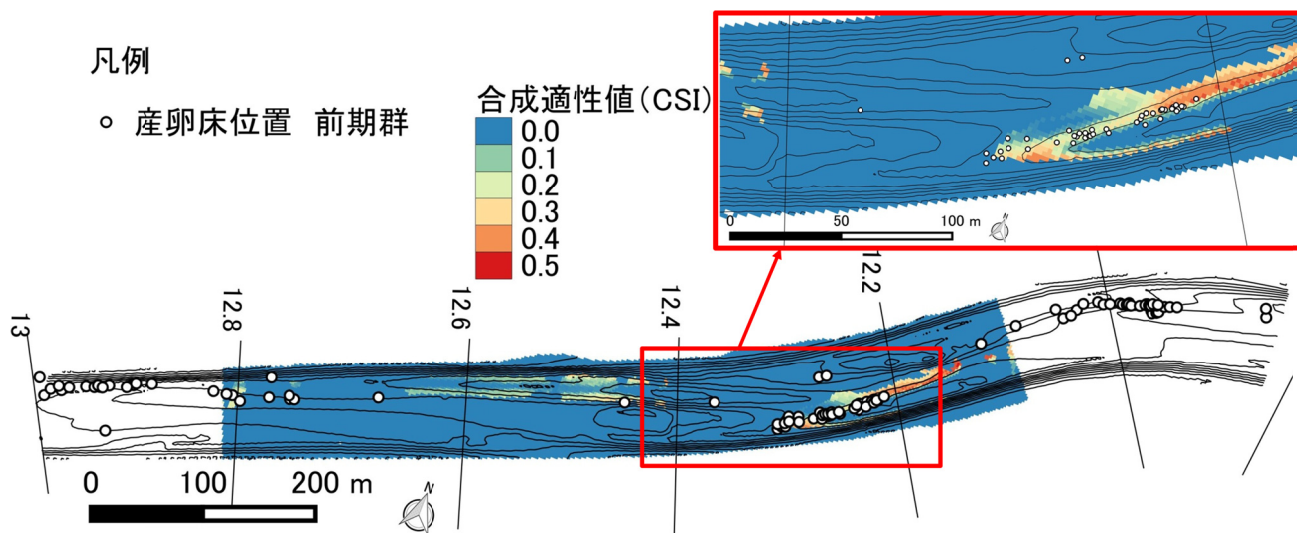


図-60 PHABSIMによる合成適性値と産卵床との対応

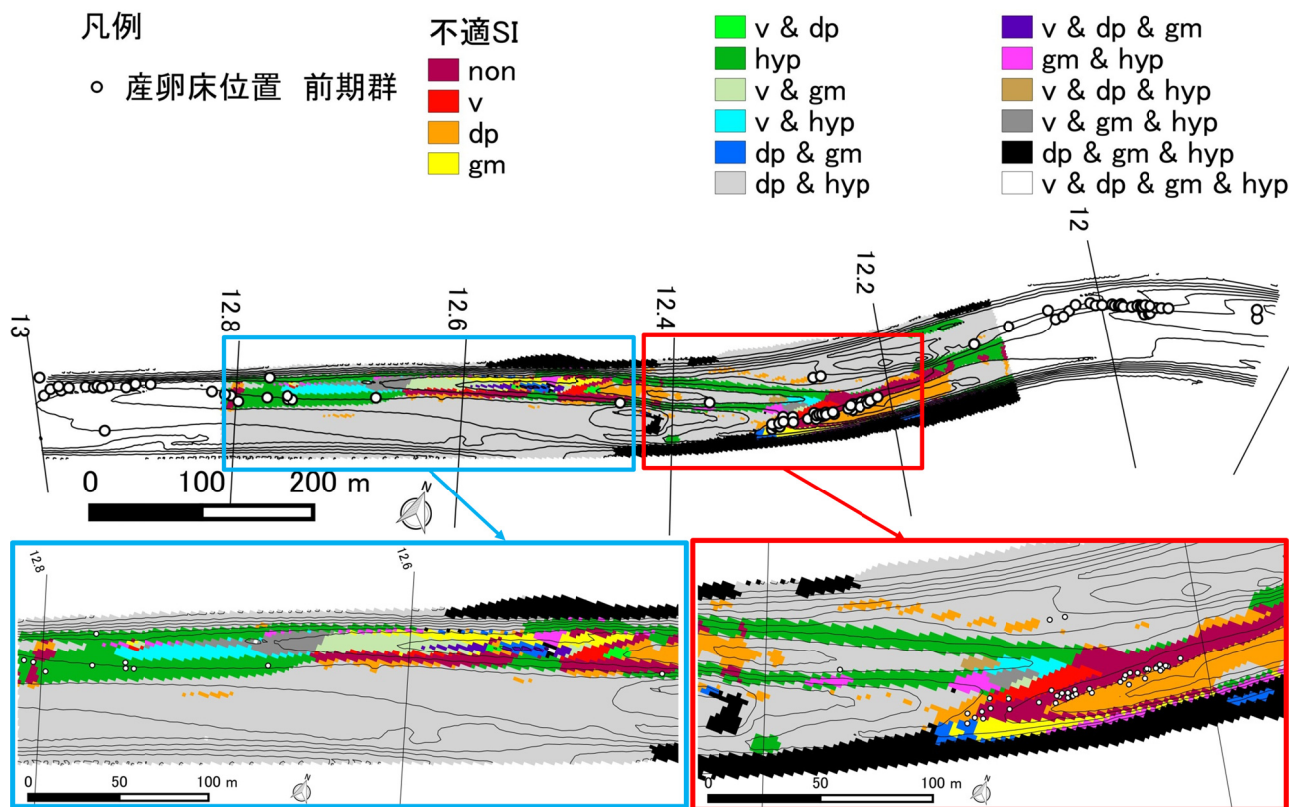


図-61 SI値が不適 (SI<0.5) な箇所とその項目 ※v: 流速、dp: 水深、gm: 河床材料の平均粒径、hyp: 浸透流

上がそれにあたる。KPI12.1~12.3 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。一方で、KPI12.4~12.7 付近においても CSI が 0.063 以上の箇所が確認されるが、産卵床はほとんど確認されない。

CSI のみの把握だと、物理環境要素の何が原因で CSI が低いのか分からず、河道改修方法の検討には不便である。そのため、例えば、SI が 0.5 未満の物理環境要素は

産卵場に適さないとし、図-61 に SI が不適 (0.5 未満) な物理環境要素とその範囲を示した。これより、CSI が高く産卵床が多く確認された KPI12.1~12.3 付近の砂州前縁部では、概ね全ての物理環境要素が産卵場に適している。一方で、KPI12.5~12.8 では流速もしくは河床材料が産卵場に不適な箇所が多く、比高の高い砂州により流路幅が狭窄していることが影響していると考えられる。このように、不適な SI を視覚的に把握できれば、例えば、

この箇所の高比の砂州を切り下げ、流路幅を広げて改善できないか、などの検討が容易となる。

8. 3 本章のまとめ

本研究では、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箇所以外は、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。

③CSI だけではなく、適性値 (SI) が低い物理環境要素とその範囲を可視化することにより、産卵環境の制限要因が明確になり、河道改修方法の検討がより容易となることが考えられた。

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。

9. シロザケ産卵床を考慮した自律的河道整備

本研究の成果より、シロザケ産卵床を考慮した自律的河道整備には、以下の点を考慮する必要があると結論された。

①河川縦断区間的な産卵適地の簡易評価手法として、Fredle 指数が 5mm 以上かつ 50%粒径が 80mm 以下の区間を抽出する方法を提案した (第 3 章)。この手法を用いて検討することにより、シロザケ産卵場として特に考慮すべき河川縦断区間の把握が可能となった。

②シロザケの産卵環境として、滞留時間の短い浸透流が溶存酸素の供給のため重要であるが、このような浸透流の発生に砂州地形が寄与していることが考えられた (第 4 章)。そのため、出水などのかく乱が生じた後にも、砂州が形成されている必要があり、河川整備においては、

交互砂州の発生区分²⁷⁾などによる検討から、出水時に砂州が発生する川幅を設定することが重要である。

③地下水などの滞留時間が長い浸透流は、卵の孵化に必要な積算水温確保のために重要であり、これが河床内に流入するためには、河岸と河床で礫が連続している必要がある。そのため、河道整備として、河岸と河床で礫が連続することを考慮する必要がある。また、浸透流が、外気に曝された砂州の中を流れる場合、礫厚が薄ければ外気温の影響で浸透流の水温が低下することが考えられる。本調査地を対象とした簡易な検討結果では、外気温が浸透流の水温に悪影響を及ぼさない礫厚として、1.9m あればその下部を流れる浸透流の水温は、産卵環境に悪影響を及ぼすほど低下しない結果となった。そのため、1.9m 以上の礫厚が必要と考えられるが、現地の積雪や浸透流の移動などを考慮することで、より詳細な礫厚条件が把握できると考えられる (第 5 章)。

④河道掘削や覆礫後に形成される砂州が、粗度の低い岩盤上で崩れて、砂州前縁部の露出部が拡大しない条件として、砂州波高程度の礫厚が必要である (第 6 章)。なお、礫厚の条件には「③」に示した外気温の条件もあり、どちらか大きい方を採用する必要がある。

⑤河川中上流域に多く設置されている護岸工による河岸の粗度低下の影響を、水理実験により検討した。その結果、砂州が形成されるような川幅水深比が大きい水理条件においては、河岸の粗度の影響は小さく、砂州形状や分級状況に影響を大きな及ぼさないことを確認した (第 7 章)。ただし、流量がより少ない際に、河岸の粗度の影響があることも想定され、今後の課題である。また、砂州頂部の外岸側に河床材料の粗粒層が縦断的に形成されることがあり、これが浸透流及び産卵環境に及ぼす影響についても、今後の課題である。

⑥平面 2 次元河床変動計算および 3 次元浸透流計算により、河川整備後の流速、水深、河床材料および浸透流の予測値を使用し、これを用いて PHABSIM に用いる手法を提案した。これにより、産卵適地の将来予測が可能であることが確認され、河川整備後の産卵適地変化の検討が可能となった (第 8 章)。

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 26 年度), <http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/H26salmon/h26salmon.htm>, (平成 27 年 3 月 20 日確認) .
- 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), 水産技術 3, pp.1-8, 2010.
- 3) 永沢亨: サケ科魚類のプロファイル-10 サケ. SALMON 情報 6, pp.22-25, 2012.
 - 4) 多自然川づくりポイントブック II, 財団法人リバーフロントセンター, 2008.8.
 - 5) 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・ますふ化場研究報告 14, pp.21-90, 1955.
 - 6) Kondolf M.G. & Wolman G.M.: The sizes of Salmonid Spawning Gravels. *Water Resource Research* vol.29 (7), pp.2275-2285, 1993.1.
 - 7) 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), pp.169-181, 2009.
 - 8) Lotspeich B.F. and Evers H. Fred.: A New Method for Reporting and Interpreting textural Composition of Spawning Gravel, united states departure of agriculture forest service pacific northwest forest and range experiment station, research, 1981.
 - 9) 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, pp.3-5, 2008,1.
 - 10) Geist D.R., Hanrahan T.P., Arntzen E.V., McMichael G. A., Murray C.J. & Chien Yi-Ju: 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*, 22, pp.1077-1085.
 - 11) Kondolf, M. G., Williams, J. G., Horner, T. C. & Mian, D.: Assessing Physical Quality of Spawning Habitat, *American Fisheries Society Symposium*, 65, 2008.
 - 12) Brunke M. and Gonser T.: The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, Vol.37, pp.1-33, 1997.
 - 13) Arrigoni A.S., Pool G.C., Mertens L.A.K., O'Daniel S.J., Woessner W.W and Thomas S.A.: Bufferd, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels, *Water Resources Research*, Vol.44, 2008. Arrigoni A.S., Pool G.C., Mertens L.A.K., O'Daniel S.J., Woessner W.W and Thomas S.A.: Bufferd, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels, *Water Resources Research*, Vol.44, 2008.
 - 14) 山本晃一: 構造沖積河川学—その構造と動態—, 山海道, 2004, 12.
 - 15) 札幌市豊平川さけ科学館, 札幌さけ情報 Blog.+Plus, http://www.sapporo-park.or.jp/blog_sake/
 - 16) 札幌市豊平川さけ科学館: 豊平川産及び琴似発寒川産シロザケ親魚の年齢と尾叉体長についての資料 (1995年度), 札幌市豊平川さけ科学館 館報 9: ページ数なし, 1997.
 - 17) Manly, B. F. J. McDonald, L. L. Thomas, D. L. McDonald, T. L. Erickson, W. P.: *Resource Selection by Animals*, Kluwer Academic Publishers, p.51, 2002.
 - 18) 清田雅史ら: 資源選択性の統計解析—I. 基礎的な概念と計算方法, *哺乳類科学* 44(2), pp.129-146, 2004.
 - 19) 清田雅史ら: 資源選択性の統計解析—II. 各種解析方法の紹介, *哺乳類科学* 45(1), pp.1-24, 2005.
 - 20) 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.
 - 21) 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, pp.23-27, 2012,7.
 - 22) 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.
 - 23) 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, pp.493-502, 2003.
 - 24) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
 - 25) 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.
 - 26) iRIC Project, <http://i-ric.org/ja/>
 - 27) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会, 1999.
 - 28) Para view, <http://www.paraview.org/>
 - 29) QGIS プロジェクト, <http://www.qgis.org/>
 - 30) 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, pp.130-138, 2004.
 - 31) Tonina D. and Buffington J. M.: Effects of stream discharge, alluvial depth and bar amplitude on hyporheic

- flow in pool-riffle channels, *Water resources research*, vol.47, 2011.
- 32) 北海道開発局旭川開発建設部, 河道管理ワーキング 議事概要資料,
http://www.as.hkd.mlit.go.jp/chisui04/ishikari_taisaku/index.html.
- 33) 平成 26 年度旭川道路事務所管内地質調査業務報告書(比布大橋), 旭川開発建設部旭川道路事務所, 2015,2.
- 34) 国土交通省国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス, <http://fgd.gsi.go.jp/download/>.
- 35) 岡山地下水研究会:実務者のための地下水環境モデリング, 付録, 技報堂出版, 2003,8.
- 36) 松島豊:溶存酸素量の異なる水環境におけるサケ仔魚の発育比較, 魚と卵, 162, pp.69-75, 1993.
- 37) Baxter, C.V. & Hauer, R.F.: Geomorphology, hypoxia exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.57, pp.1470-1481, 2000.
- 38) 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 39) 山本荘毅:地下水水文学, 「水文学講座 6」, 共立出版, p.141, 1992.
- 40) 佐渡公明:河川水の熱収支に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 330 巻, pp.69-79, 1982,3.
- 41) 榎根勇:水文学, 大明堂, p.90, 1980.
- 42) 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, pp.85-90, 2014,6.
- 43) 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, pp.229-234, 2014,6.
- 44) 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.
- 45) 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, pp.289-294, 2014,6.
- 46) 河村三郎:土砂水理学 1, 森北出版, 1982.
- 47) Nelson, P. A., and Seminara, G.: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channels, *Geophys. Res. Lett.*, 2012.
- 48) 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.
- 49) 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, pp.25-30, 1982,2.
- 50) 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, pp.S865-870, 2011,2.
- 51) 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.
- 52) Blom A. and Ribberink J.S., : Vertical sorting in bed form: Flume experiments with a natural and trimodal sediment mixture, *water resources research*, vol.39, no.2, 2003.
- 53) 禰津家久, 中川博次:開水路流れの三次元乱流構造(縦渦)とそれに及ぼす自由水面の影響, 京都大学防災研究所年報, 第 28 号 B-2, pp.499-522,1985.
- 54) 竹林洋史・江頭進治:混合砂河床における砂州の動態, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.727-732, 2001,2.
- 55) 玉井信行ら:河川生態環境評価法, 東京大学出版, pp.95-102, 2000,3.
- 56) 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, pp.507-512, 2013,6.
- 57) 国土地理院, 地図・空中写真閲覧サービス, <http://mapps.gsi.go.jp/>
- 58) 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.
- 59) 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, pp.87-101, 2010.

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

TANISE Atushi

YANO Masaaki

SUGIHARA Kouki

HAYASHIDA Kazufumi

TANAKA Tadahiko

Abstract : Surveys and researches were conducted to develop autonomous river channelization method, considering spawning environment of chum salmon. Therefore, following results were obtained. ①A method, using bed material index such as 50% grain size and Fredle index, which provide rough estimation of suitable spawning section on a river longitudinally was developed. This method enables to grasp section where considerations for spawning are needed. ②Bar morphology contributing to spawning environment by generating hyporheic flow was confirmed. Thus, it is important setting channel width considering to development of bar morphology in river channelization works. ③Alluvial thickness influencing temperature of hyporheic zone was confirmed. Thus, maintaining continuity of gravel and maintaining gravel thickness more than 1.9m upon groundwater level are important in channel excavation works for enhancement or bedrock covering works by gravel. ④bedrock exposer expansion on bar fronts was confirmed under thin gravel condition which alluvial thickness is about half of bar height. Thus, maintaining gravel thickness as bar height is important to prevent bedrock exposer expansion on bar fronts. ⑤River side roughness not influencing to bar morphology and bed material sorting remarkably was confirmed in the hydraulic condition that bar morphology is developed. ⑥To estimate suitable spawning area in detail, PHABSIM using physical value obtained by numerical calculation was developed. This model enables to estimate suitable spawning area after river works.

Key words : chum salmon spawning bed, bar morphology, hyporheic flow, bed material sorting