

## 8.3 冷水性魚類の産卵床を考慮した自律的河道整備に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水環境保全チーム

研究担当者：矢部浩規、渡邊和好、矢野雅昭、  
渡邊尚宏、佐藤好茂

### 【要旨】

河岸形状、粗度を変数として単一粒径による移動床水理模型実験を行った。その結果、河岸形状により砂州の波高発達が抑制される条件では、波高発達が抑制されない条件に比べ、砂州の移動速度が速いことが確認された。また、河岸の粗度が小さいほど河岸近傍の流速が速い傾向にあり、河床材料が粗粒化することが示唆された。豊平川におけるシロザケ産卵床が確認される区間において、マーカー埋設調査により土砂交換厚を調査した結果、流速が速い個所では 20~30cm 以上の土砂交換厚であり、シロザケが産卵時に卵を埋設する深さ程度は土砂が交換していることが示唆された。また、産卵床が多い個所では、融雪出水時に単列砂州が発生する河道条件であったが、産卵床が少ない個所では、砂州非発生の河道条件であった。このことから、融雪出水時に砂州非発生条件とならない河道条件とすることが産卵環境に寄与することが示唆された。

キーワード：護岸、交互砂州、土砂交換厚、産卵環境、選択性指数

### 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、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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。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<sup>3)</sup>、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。シロザケの産卵が確認される河川中流域では、土地利用のため、堤防の造成による河道断面の形成や護岸工などが行われてきた。このことを踏まえ、産卵環境に配慮した河道整備手法の検討においても、このような現状の河道状態を考慮する必要がある。

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。

本年度は河岸形状と粗度が河床地形、流速分布に及ぼす影響の検討と、現地河川のシロザケが産卵を行う区間での、出水時の土砂交換厚を把握した。また、過年度に実施した簡易な縦断的な産卵適地の推定手法の結果を定量的に評価するため、選択性指数を導入した。以降、これらについて詳細に述べていく。

## 2. 護岸工が河床地形、流速分布に及ぼす影響の検討

### 2.1 目的

河川上・中流域では、出水時に河岸浸食が発生しやすく、護岸工がなされることが多い。しかし、護岸工の設置により河岸の粗度が低下し、護岸工近傍の流速が速くなる可能性がある。さらに、掃流力の分布が変化して、河床地形や河床材料に影響が及ぶことも考えられる。

河床地形や河床材料は、サケ科魚類の産卵環境に重要な要素であり<sup>4)</sup>、護岸工によりどのような影響を受けてきたのか把握することは重要である。

本章では、移動床水理模型実験により、護岸工による河岸の粗度の変化と河岸形状が、流速分布と河床地形にどのような影響を及ぼすかを移動床水理模型実験により

検討し、流速分布から河床材料の粒径への影響を考察するものである。

2. 2 方法

実験水路は、移動床部の延長が 43.25m、幅 0.7m であり、粒径 0.77mm の珪砂を厚さ 10cm で敷き均したものである。また、河床勾配は 1/200、流量は 0.006m<sup>3</sup>/s であり、交互砂州の発生区分<sup>9)</sup>により交互砂州が発生する条件となっている。実験条件の変数は、河岸形状と河岸部のマンニングの粗度係数とした。河岸断面形状を図-1 に示すが、断面 A は固定床部が法尻を境に鉛直下方に連続する形状で、砂州が十分発達する条件とした。断面 B はより実河川に近い条件と考えられる河岸法面が河床内部まで連続した条件とした。実験ケースは表-1 に示すが、断面 A では河岸部の粗度が異なる 2 ケース、断面 B では河岸部の粗度の異なる 4 ケースの実験を行った。粗度は棧粗度により付加することとし、式(1)に示す足立の式<sup>9)</sup>により、相当粗度を算出し、高さ 2mm もしくは 3mm の棧粗度の設置間隔を変更することで設定した。なお、相当粗度は、式(2)、(3)<sup>9)</sup>によりマンニング粗度に変換した。

$$\frac{k}{h_g} = 30m \left( \frac{R}{h_g} \right)^{-\theta} \quad (1)$$

ここに、 $h_g$  は棧の高さ、 $m$  は  $0.79(h/h_g)^{-0.29}$ 、 $\theta$  は  $0.02 \times (h/h_g)^{0.8}$ 、 $h$  は棧間隔、 $R$  は径深、 $k$  : 相当砂粒粗度である。

$$\varphi = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k} \quad (2)$$

$$n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{g}\varphi} \quad (3)$$

ここに、 $R$  は径深、 $\varphi$  は流速計数、 $g$  は重力加速度、 $n$  はマンニング粗度である。

砂州の半波長、波高、移動速度の時系列変化を把握するため、30 分間隔で、水路下流端からの砂州の先端位置と波高を計測した。そして、隣り合う砂州の先端位置の差から各砂州の半波長を算出した。また、30 分毎の各砂州の先端位置の移動距離より砂州の移動速度を把握した。波高は、砂州の先端位置から 5cm 下流の深掘れ部と 5cm 上流の頂部の標高差から算出した。これらの計測は下流端から 17.1m 上流までの範囲で行った。

形成された河床地形における流速分布を把握するため、2 次元電磁流速計による流速計測を、水路下流端から 5 半波長分行った。流速計測は表-1 に示す通水時間の後に、河床をセメント固化した状態で実験流量を通水し、図-1 に示す横断地点において縦断間隔 30cm で計測した。

2. 3 実験結果と考察

2. 3. 1 砂州の半波長、波高、移動速度

移動床通水中における時系列の砂州の半波長、波高、移動速度の計測値の平均値を図-2a~c に示す。なお、ケース 1 で若干の欠測が生じている。

表-1 実験ケース

ケース	断面	流量 (m <sup>3</sup> /s)	勾配	移動床部 マンニング粗度 ※粒径から算出	河岸部(護岸) マンニング粗度 ※目標値	粒径 (mm)	移動床時 通水時間
1	A	0.0060	1/200	0.014	0.009	0.77	9時間44分
2	A	0.0060	1/200	0.014	0.012	0.77	9時間6分
3	B	0.0060	1/200	0.014	0.009	0.77	7時間30分
4	B	0.0060	1/200	0.014	0.012	0.77	8時間10分
5	B	0.0060	1/200	0.014	0.014	0.77	9時間30分
6	B	0.0060	1/200	0.014	0.019	0.77	9時間30分

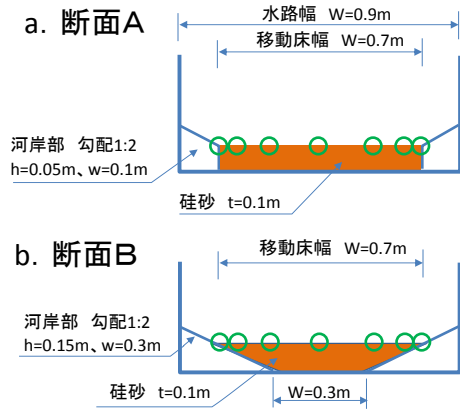


図-1 河岸断面と流速計測位置

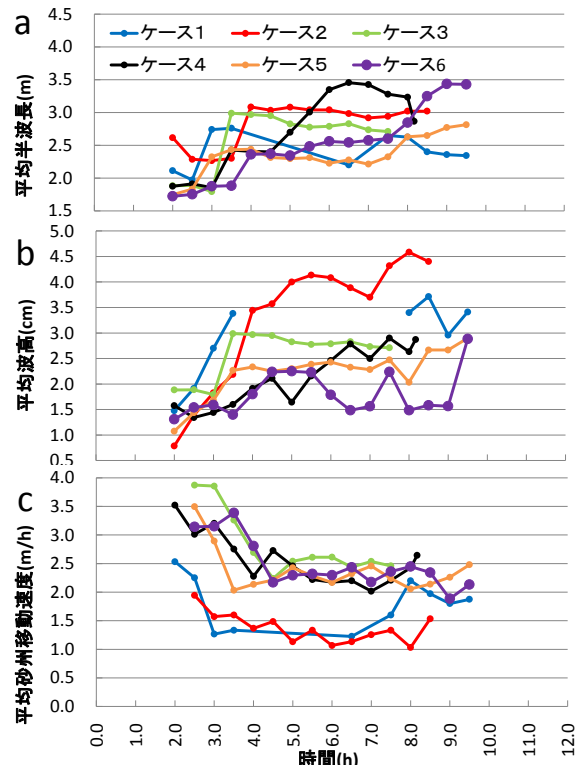


図-2 平均半波長・波高・砂州移動速度の時系列変化

半波長の時系列変化を図-2aに示す。断面Aでは2ケースのみではあるが、粗度が小さいケースの方が、平均半波長が1川幅分程度短い。一方、断面Bのケースについては、断面Aのケースよりも粗度の幅が大きいが、粗度の違いによる明確な傾向は確認されなかった。

波高の時系列変化を図-2bに示す。断面Bの全てのケースで断面Aのケースより波高が小さく、波高はほぼ同一の値であった。断面Bの波高が断面Aよりも小さい原因として、断面Bでは固定床河岸部が河床内まで連続しているため、砂州前縁線側の淵部が河床内の固定床河岸に到達し、十分発達できなかったためだと考えられる。砂州の移動速度の変化を図-2cに示す。断面Bの全てのケースが断面Aよりも速かった。砂州の移動速度と水量との関係を、簡易に砂州の前縁で粒子がトラップされることにより生じるとすると、式(4)により表現可能とされる<sup>7)</sup>。

$$V_b = (1 - \lambda) \frac{q_b B}{Z_b l_{bf}} \quad \dots (4)$$

ここに、 $V_b$ は砂州の移動速度、 $\lambda$ は河床を構成する材料の空隙率、 $q_b$ は流砂量、 $B$ は川幅、 $Z_b$ は波高、 $l_{bf}$ は砂州前縁の長さである。この式(4)より、砂州の移動速度は波高に反比例することが分かる。本実験で、断面Bの砂州の移動速度が断面Aよりも速かった原因として、固定床河岸部が河床内にまで連続していることにより、波高の発達が抑制され低くなり、それに伴い、式(4)の関係から、移動速度が速くなったと考えられる。

### 2. 3. 2 粗度の違いによる護岸近傍流速について

各横断位置における流下方向流速および横断方向流速の平均値を図-3に示す。これより流下方向流速が横断方向流速よりも1オーダー程度大きく、流下方向流速は河岸付近で速くなっている。また、最外岸側(法尻付近)の流下方向の平均流速(図-3上図)を左右岸で平均して比較すると、断面Aのケース1,2で、それぞれ30、9cm/sであり、断面Bのケース3~6で、それぞれ39、38、37、34cm/sであり、河岸の粗度が小さいほど流速が速くなっている。河床材料の移動の有無は掃流力と限界掃流力の大小関係で決まり、粒径から算出される限界掃流力がその場の掃流力よりも小さい河床材料は定位できない<sup>8)</sup>。掃流力は平均水深流速の2乗に比例することから<sup>9)</sup>、護岸の設置により河岸の粗度が小さくなり、流速が速くなる場合、河岸付近の河床材料が粗粒化することが示唆される。

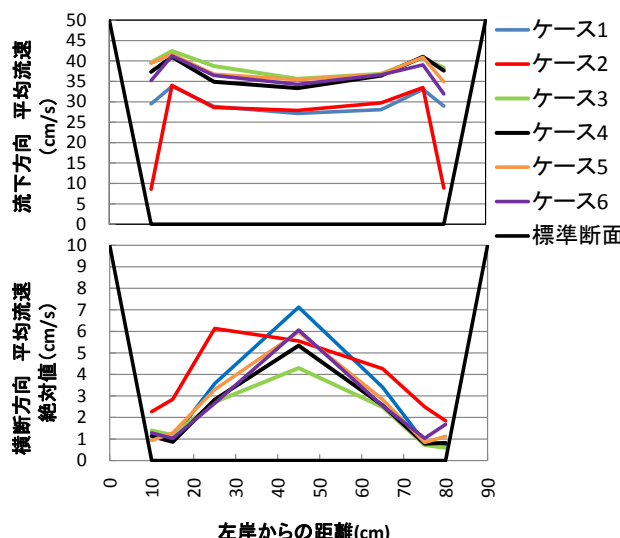


図-3 流下方向および横断方向流速の平均値

## 3. シロザケ産卵区間における土砂交換厚について

### 3. 1 目的

サケ科魚類の産卵環境に重要な要素の一つとして、浸透流が挙げられ、浸透流の形成には砂州などの河床微地形と河床材料の透水係数が重要であることが知られている<sup>8)</sup>。しかし、細粒分が流下し、礫の間隙に堆積することにより、透水係数と浸透流が低下し<sup>9)</sup>、卵の生存率が低下することが知られている<sup>10)</sup>。そのため、透水性の面から、河床材料が定期的にフラッシュされ、入れ替わることが望ましいと考えられる。シロザケの産卵環境の視点では、卵の埋蔵の深さは20~30cmとの報告があることから<sup>11)</sup>、この程度の厚さの入れ替わりが必要である可能性がある。

本章では、豊平川中流域において融雪出水による土砂が入れ替わる厚さ(以降、土砂交換厚)を、マーカー埋設調査により把握し、シロザケの産卵環境との関係を考察した結果について述べる。

### 3. 2 方法

#### 3. 2. 1 調査河川

石狩川の1次支川である豊平川で、現地調査を行った。豊平川は、流路延長72.5km、流域面積902km<sup>2</sup>の一級河川である。調査区間は、礫床の横断工作物の影響が少ない区間である、図-4に示す石狩川との合流点をKP0.0(KP:上流方向を正、単位km)として、KP11.8~13.05の区間を対象とした。なお、この区間の平均河床勾配は約1/420で、低水路幅は60~70mである。また本調査結果より、調査区間の50%粒径の中央値は87mmであることを確認している。

#### 3. 2. 2 調査内容

現地調査は、融雪出水における土砂交換厚を把握するため、融雪出水前である平成 23 年秋～冬期と、融雪出水後である平成 24 年度夏期において調査を行った。調査は、融雪出水による地形変化と河床材料の粒径変化を把握するため、横断測量調査と河床材料調査を行い、土砂交換厚を把握するため、マーカー埋設調査を行なった。図-5 にこれらの調査地点を示す。

横断測量は、縦断間隔 10m で行っており、平成 23 年度は後述する流況計算を行うため、平成 23 年 11 月 3～14 日に KP11.80～13.05 の 126 測線を調査した。平成 24 年度には、河床地形による出水による影響の特徴を把握するため、7 月 6～19 日に、図-5 に示す調査区間内の 3 区間 KP11.85～12.26、12.42～12.56、12.67～12.86 において 77 測線の横断測量を行った。横断測量結果は、GIS<sup>12)</sup>を用いた三角形分割補間法により平面的に補間し、1×1m メッシュの河床地形図を作成した。また、GIS<sup>12)</sup>に平成 23、24 年度の河床地形図を取り込み、標高差を算出して河床変動量を把握した。

河床材料調査は縦断間隔 20m に測線を設け、水路を等分するよう 1 横断当り 4～5 地点で行った。調査区間は平成 23、24 年度ともに平成 24 年度の横断測量と同様の 3 区間とし、平成 23 年度は 11 月 19 日～12 月 21 日に 175 箇所の調査を、平成 24 年度は 7 月 6～10 日に 176 箇所の調査を行った。河床材料は、河床面から最大 30cm 程度の深さまでを採取した。粒度分析は、直径 75mm 未満の成分はふるい分け分析で行い、75mm 以上の成分は現地で礫径を計測した。そして、ふるい分け分析と礫径計測の結果を、同一の粒径加積曲線に取りまとめ、平均粒径を算出した。

マーカー埋設調査は、融雪出水前に河床内にマーカーを埋設し、出水後に洗掘位置を確認するもので、河床材料調査箇所の近傍において 176 箇所を行った。マーカーの埋設は、平成 23 年 12 月 1 日～平成 24 年 1 月 25 日に、内径 25mm の鋼管を河床面から 40cm の深さまで貫入し、その中にカラー着色した 3～12mm の砂利を投入し、鋼管を引き抜くことで行った。また、マーカー埋設位置は

RTK-GPS により、その位置と標高を記録した。融雪出水後の平成 24 年 7 月 4～11 日にマーカー埋設位置の河床の標高および掘削して探索したマーカーの頂部の標高（以降、マーカー洗掘位置）を計測した。本研究では、出水後の河床材料の透水性とその厚さが生物生息環境に重要であると考え、出水後河床高からマーカー洗掘位置までの深度を土砂交換厚とした。図-6 にこれらの位置関係を示す。なお、マーカーの確認作業については、融雪出水前の河床高からマーカー埋設深である 40cm 以上の河床低下していた箇所では行っていない。また、河床の土砂堆積が水中で 30cm 以上、地上部の場合 50cm 以上生じた箇所についてはマーカーを確認するための掘削が困難であるため実施していない。それ以外の箇所についても、原則として水中で 30cm 以上、地上で 50cm 以上掘削してもマーカーが確認されない場合は、その箇所の調査を中

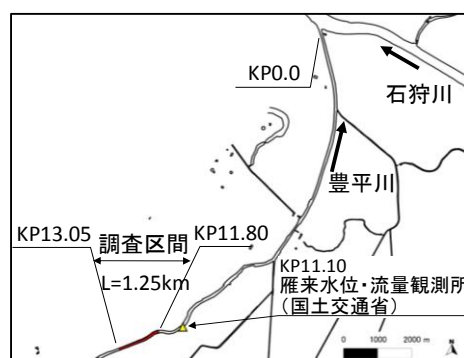


図-4 豊平川における調査区間

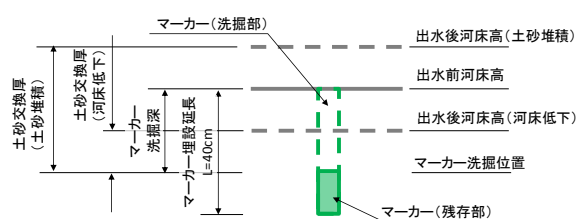


図-6 マーカー埋設、土砂交換厚概念図

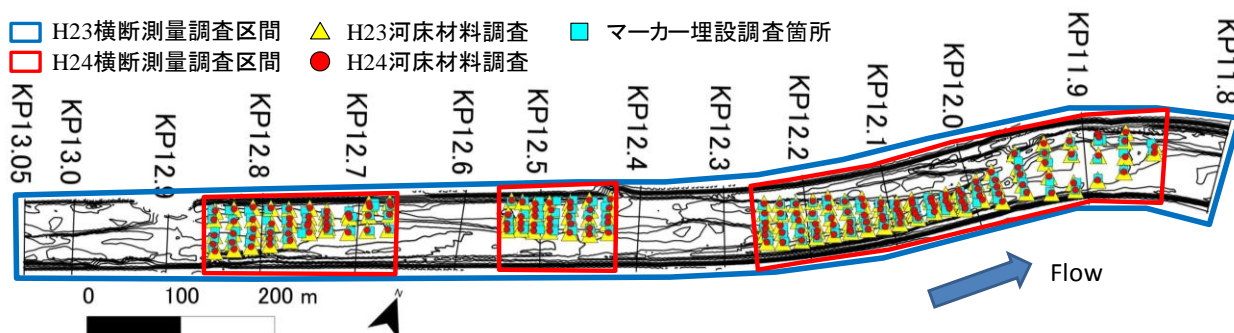


図-5 調査区間における各調査地点

表-2 iRICによる流況計算条件

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

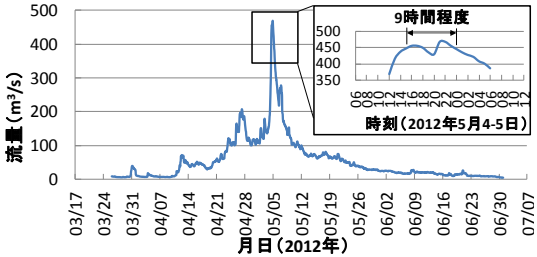


図-7 調査地近傍の流量観測結果 (国土交通省雁来水位流量観測)

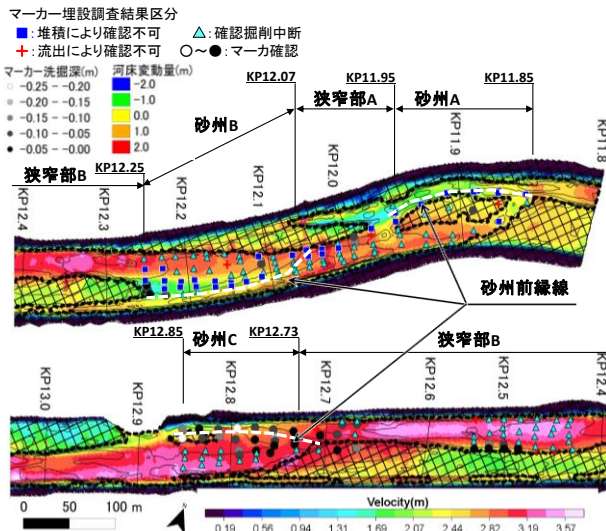


図-8 流況計算による流速と河床地形区分 (450m³/s時)  
※マーカ埋設調査結果併記

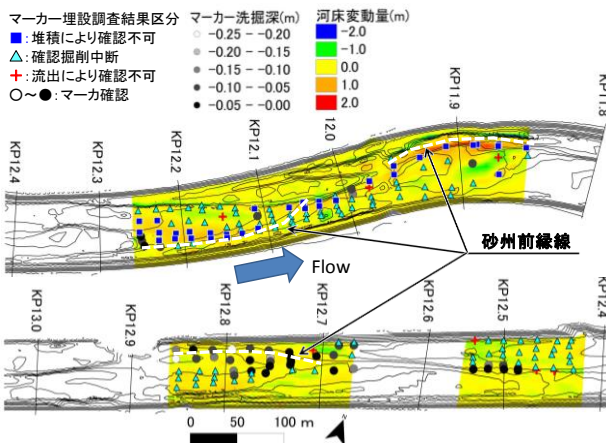


図-9 河床変動量およびマーカ埋設調査結果

断している。

### 3. 2. 3 解析内容

#### a) 流況計算

出水時の流況は流況計算で把握することとし、図-4に示す調査区間のやや下流の KP11.10 に位置する国土交通省の雁来水位流量観測所で観測された流量を用いた。流況計算には iRIC を使い、ソルバーは平面 2 次元モデルの Nays2D を用いた<sup>13)</sup>。計算条件は表-2 に示すとおりであり、計算格子は融雪出水前の平成 23 年度の横断測量結果から作成した。マンシングの粗度係数は、現地河川が玉石や雑草が多いことから、水理公式集<sup>5)</sup>から概ね判断し 0.035 とした。設定流量は、河床の洗掘深が最大であると考えられる後述する融雪出水のピーク流量の 450m³/s を用いた。また、計算結果の流速、水深は GIS<sup>12)</sup>に取り込み、計算格子と同程度のサイズである 2×2m メッシュのデータとした。

#### b) マーカ埋設調査箇所の流速把握

マーカ埋設箇所の流速を把握するため、マーカ埋設箇所において GIS<sup>12)</sup>に取り込んだ流況計算結果の値を抽出した。

### 3. 4 結果と考察

#### 3. 4. 1 融雪出水による河床変動と流況

国土交通省雁来水位流量観測所における融雪出水時の流量を図-7 に示す。これより、融雪出水の最大流量が 450m³/s であり、50m³/s、100m³/s の流量が長期に及んでいたことが分る。図-7 の右上に示すとおり、450m³/s 時の継続時間は 9 時間程度であった。

#### a) 河床地形区分による流況と河床変動

450m³/s 流下時の流況計算結果とマーカ埋設調査結果を併記したものを図-8 に示す。なお、平水流量 (14.44m³/s) において冠水しない箇所を黒い網掛部として示してある。

平成 23 年の地形状況より、下流から砂州 A、狭窄部 A、砂州 B、狭窄部 B、砂州 C に地形を区分した (以降、河床地形区分)。砂州 A および砂州 B、C は、それぞれ、河道の湾曲部および直線部に位置し、平水時において概ね砂州頂部から前縁線が冠水する箇所である。狭窄部 A、B は樹林化した高比高の砂州により、平水流量では川幅の半分程度しか冠水しない箇所である。なお、これらの箇所の内、狭窄部 A と砂州 B、狭窄部 B と砂州 C は、過去の航空写真 (2005 年) では、それぞれ一つの砂州であった。しかし、現状の平水時の冠水状況や融雪出水時の流況は、砂州部と狭窄部で特徴が異なるため、本研究では別の区分とした。

図-8より、450m<sup>3</sup>/s 流下時は、砂州Cと狭窄部Bに流速3~4m/sの速い流れが生じ、狭窄部Bでは平水流量で冠水する位置（黒網掛部以外）に速い流れが生じている。砂州Bでは上流の狭窄部Bからの速い流れが若干減速しつつも、一定の幅で流下し、図-8に示す白色破線の砂州前縁線の下流端を横切り、狭窄部Aに続いている。狭窄部Aと砂州Aについても、狭窄部B、砂州Bと同様の傾向がみられる。これらの流速が速い箇所では、河床を30cm程度掘削してもマーカーが発見されなかった箇所が多い。一方、砂州前縁線の上・中流部では流速が比較的遅く、図-9から確認されるとおり、砂州A、Bでは土砂堆積が大きい。また、この位置は30cm以上の土砂堆積が確認されたため、マーカーの確認を行っていない箇所が多い。一方、砂州Cでは、前縁線以外で探索掘削によりマーカーを確認できなかったが、前縁線付近では、河床変動量も小さく、マーカーを確認することができた。

b)河床材料調査結果

融雪出水前後の河床材料の平均粒径と標準偏差を、河床地形区分別に確認した結果を図-10に示す。全ての河床地形区分で、10~30mm程度小さくなっており、地点による大きな傾向の違いは確認されない。

3. 4. 2 融雪出水による土砂交換厚

a)マーカー埋設調査結果

マーカー埋設調査結果を、河床地形区分毎に取りまとめ、河床変動量、流量450m<sup>3</sup>/s流下時の流速を記したものを図-11に示す。横軸の、①「マーカー確認」は、融雪出水後にマーカーの洗掘位置を確認できた箇所、②「調査中断」は、融雪出水後に河床を水中で30cm、地上部で50cm掘ったがマーカーを確認できず調査を中断した箇所、③「河床低下流出」は、融雪出水後の河床高が、融雪出水前の河床高よりも40cm以上低下していた箇所、④「堆積確認不可」は、融雪出水後の河床が水中部で30cm、地上部で50cm以上堆積していたため調査を行わなかった箇所である。また、左側の縦軸の「マーカー洗掘深-河床変動量」は、①「マーカー確認」では図-11に示すとおり、出水前河床高とマーカー洗掘位置の差の平均値と標準偏差を、②「調査中断」では出水前河床高からマーカー探索のために掘削した深度の平均値と標準偏差を表している。なお、河床変動量と流速についても、平均値と標準偏差により表している。また、各河床地形区分において、各マーカー調査の区分が占める割合について、「地点数割合」として併記した。

図-11に示す地点数割合から、「マーカー確認」は、砂

州Cでは河床地形区分の中で最も多く、60%を占め、次に狭窄部Bで多く、30%程度を占め、砂州A、B、狭窄部Aでは10%を切っている。「調査中断」は全ての河床地形区分で多く、砂州A、B、Cでそれぞれ47%、55%、37%、狭窄部A、Bでそれぞれ59%、61%となっており、狭窄部が砂州部よりも若干多い傾向にある。「堆積確認不可」は砂州A、B、狭窄部Aのみで確認され、それぞれ42%、33%、30%となっている。「河床低下流出」は、全ての河床地形区分で少ないか、もしくは確認されず、狭窄部Bの9%が最も多い。

河床地形区分別で流速の平均値を見ると、砂州Cと狭窄部Bがその他よりも大きく、全体的に下流ほど小さくなる傾向が見られる。また、各マーカー埋設調査の区分の、全体的な傾向として、「調査中断」と「河床低下流出」の流速が「マーカー確認」や「堆積確認不可」よりも大きく、砂州A、Bでこの傾向が顕著である。

本研究におけるマーカーが確認できた箇所（「マーカー

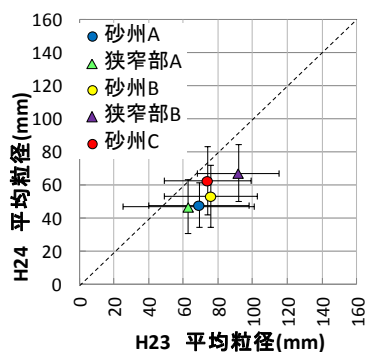
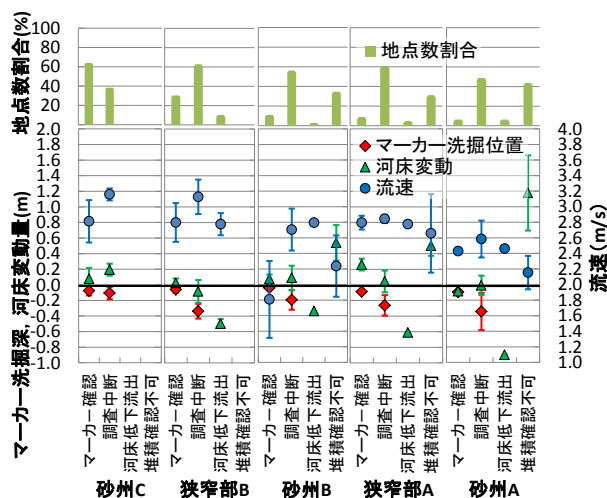


図-10 融雪出水前後の平均粒径の変化



※「調査中断」は、マーカーの探索掘削を中断した出水前河床高からの深度。

図-11 河床地形区分によるマーカー埋設調査結果 (出水前河床高を基準とした洗掘深)と河床変動量、流速

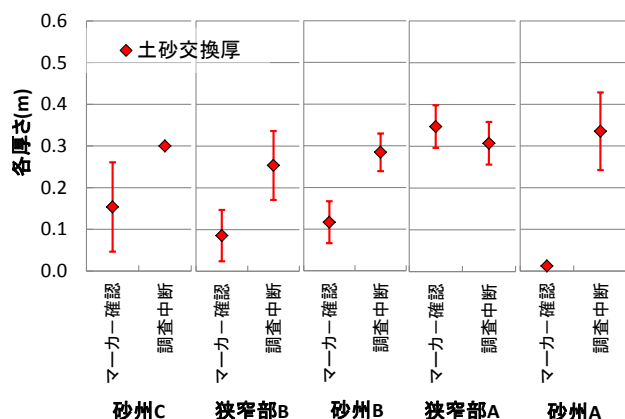


図-12 河床地形区分による土砂交換厚と推定掃流砂層厚、砂堆洗掘深の平均値と標準偏差

確認)では、図-6に示すとおり、出水後河床高からマーカー洗掘位置までの深度を土砂交換厚としている。一方、全調査数量の中で多くを占めている「調査中絶」地点においては、土砂交換厚は、出水後河床高からマーカー探索のために掘削した深度以上であると考えられる。この場合、図-12に示すとおり、砂州Cの土砂交換厚は「マーカー確認」地点で0.15m、「調査中絶」地点で0.30m以上であり、狭窄部Bでは「マーカー確認」地点で0.09m、「調査中絶」地点で0.25m以上となる。砂州Bでは「マーカー確認」地点で0.12m、「調査中絶」地点で0.28m以上であり、狭窄部Aでは「マーカー確認」地点で0.35m、「調査中絶」地点で0.31m以上となる。砂州Aでは「マーカー確認」地点で0.01m、「調査中絶」地点で0.34m以上となる。

「調査中絶」地点の多くは図-8に示すとおり、狭窄部や砂州上の主流部であり、速い流れが生じている箇所である。この箇所の土砂交換厚が20~30cm以上であった。一方で、図-8, 9に示すとおり、砂州の前縁線の上・中流部では流速が遅く、砂州A, Bで堆積が著しく、マーカー確認を行っていない。また、砂州Cの前縁線においても、比較的流速が遅く、河床変動量が少なく土砂交換厚を把握(河床地形区部の平均0.15m)できている。このことから、砂州部では、流速分布や河床変動量が部位により異なり、土砂交換厚が狭窄部よりも多様であることが考えられる。

本調査では、狭窄部や砂州上の主流部では土砂交換厚が20~30cm以上となっており、シロザケの卵の埋設深さ(20~30cm程度)<sup>11)</sup>以上は土砂交換がされていると考えられる。

#### 4. 縦断的な産卵床の分布の簡易評価手法について

##### 4.1 目的

サケ科魚類の産卵環境には、複数の物理環境要素が影響するが<sup>4)</sup>、河床材料もその一つとして挙げられ、著者らは過年度に河床材料の粒径を用いた簡易な縦断的な産卵適地区間を推定する手法を提案した<sup>14)</sup>。しかし、この時点では推定した区間がどの程度利用されているのか定量的に評価するところまでは至らなかった。

本章では、この著者らが提案した手法<sup>14)</sup>により抽出した縦断的な産卵適地の区間が、どの程度利用されているかを定量的に表すため、選択性指数による評価手法を導入したことについて述べる。

#### 4.2 方法

##### 4.2.1 簡易な縦断的な産卵適地区間の推定手法の概要

河床材料に起因した産卵環境への悪影響として、①細粒分が多すぎることにより空隙が減少し、透水性が低下し、浸透流が発生し難くなること、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。そのため、この2つの制限要因がない箇所が産卵適地となる可能性がある。

本研究では、細粒分の指標として、Fredle 指数<sup>15)</sup>を用いることとした。Fredle 指数は、式(5)に示すとおり河床材料の平均粒径に比例し、式(6)のふるい分け係数に反比例する<sup>15)</sup>。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。

$$f_i = d_g / s_o \quad (5)$$

$$s_o = \sqrt{d_{75} / d_{25}} \quad (6)$$

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<sup>16)</sup>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。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、産卵環境の評価に用いた。

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。Kondolf & Wolman<sup>17)</sup>は、サケ科魚類が産卵に利用できる河床材料を50%粒径で評価し、体長の1/10倍程度までの50%粒径が利用可能であることを述べている。豊平川においては、例えばシロザケの3歳魚の体長は、平均65cm、範囲54.7~79.5cmである<sup>18)</sup>。そのため、産卵床造成が可能な50%粒径の最大値は80mmとなる。よって、本研究では、産卵環

境として50%粒径が80mm以下であることが必要であると  
し、産卵環境の評価に用いた。

これらをまとめると、本研究では河床材料による縦断的  
なシロザケの産卵環境について、Fredle指数が5.0mm以上  
かつ50%粒径が80mm以下の区間を「良区間」とした。

4. 2. 2 評価区間の選択性指数

簡易な縦断的な産卵適地区間を推定する手法により得  
られた「良区間」とそれ以外の区間である「その他区間」  
の利用状況を定量的に評価するため、この区間の選択性  
を確認することを行った。これは、「良区間」が真に産卵  
環境として良好ならば、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(7)に示す選択性指数<sup>19, 20, 21)</sup>により評価する  
こととした。

$$\hat{W}_i = o_i / \pi_i \quad (7)$$

ここで、 $\hat{W}_i$ は選択性指数、 $o_i$ はある階級の環境に属する  
産卵床数の全産卵床数に対する割合、 $\pi_i$ はある階級の環  
境に属する箇所数の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 $o_i = \pi_i$  ( $\hat{W}_i = 1$ )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<sup>19, 20, 21)</sup>。式(8)、(9)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<sup>19, 20, 21)</sup>。

$$\hat{W}_i \pm z_{\alpha/(2I)} se(\hat{W}_i) \quad (8)$$

$$se(\hat{W}_i) = \sqrt{o_i(1 - o_i) / (u\pi_i^2)} \quad (9)$$

ここで、 $z$ は標準正規分布表における確率変数、 $\alpha$ は有意水  
準でここでは0.05、 $I$ は資源カテゴリ数で、ここでは「良  
区間」と「その他区間」の2つ、 $se(\hat{W}_i)$ は $\hat{W}_i$ 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  
性指数は、河床材料調査と産卵床調査の両調査が行われて  
いる区間を対象として算出した。

4. 3 結果と考察

簡易な縦断的な産卵適地の推定は、既往調査結果を利用  
して行った。本稿では、表-3に示すとおり、河床材料調査  
と産卵床位置調査の時期が近い、豊平川と漁川において検  
討した。なお、豊平川においては、平成23年9月に1000m<sup>3</sup>/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  
討した。その結果を図-13~15に示す。この推定から得ら

れた「良区間」と「その他区間」の選択性指数の算出に用  
いたデータを表-4に示し、図-16にそれぞれの選択性指数  
を示す。表-4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-16)。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-16)。このことから、「良区間」  
では「その他区間」よりも選択的に産卵場として利用され  
ており、産卵環境として良好であることが考えられる。た  
だし、この縦断的な産卵適地の推定における「良区間」の  
選択性指数は評価区間内における条件での値であり、評価  
区間の設定により値が変わる。本事例では、既往調査結  
果を利用して行った検討であるため、産卵床調査がなされ  
た範囲における「良区間」の選択性を評価したことになる。  
本事例による評価区間の設定以外でも、例えば、全河川流  
路延長の中での「良区間」の選択性の評価などを行うこと

表-3 使用データおよび調査機関

水系	河川名	横断測量	河床材料調査	産卵床位置調査
石狩川水系	豊平川	H23	H23	H20~H23
		国土交通省 北海道開発局	国土交通省 北海道開発局	札幌市 豊平川さけ科学館
石狩川水系	漁川	H17	H17	H23~24
		国土交通省 北海道開発局	国土交通省 北海道開発局	国土交通省 北海道開発局

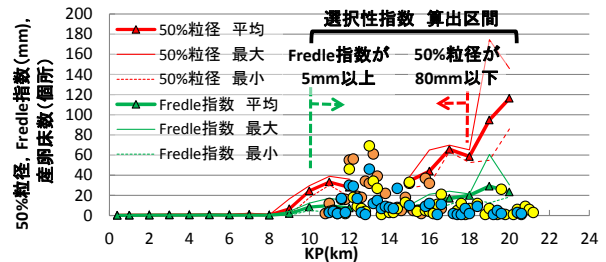


図-13 Fredle指数、50%粒径、産卵床の縦断分布  
(豊平川H23. 9出水前)

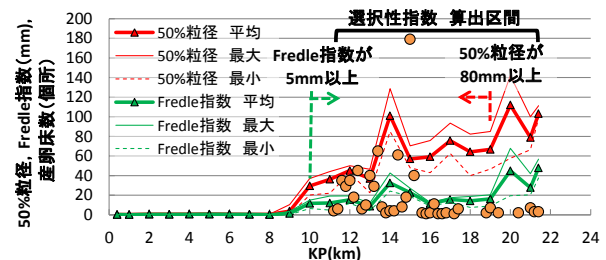


図-14 Fredle指数、50%粒径、産卵床の縦断分布  
(豊平川H23. 9出水後)



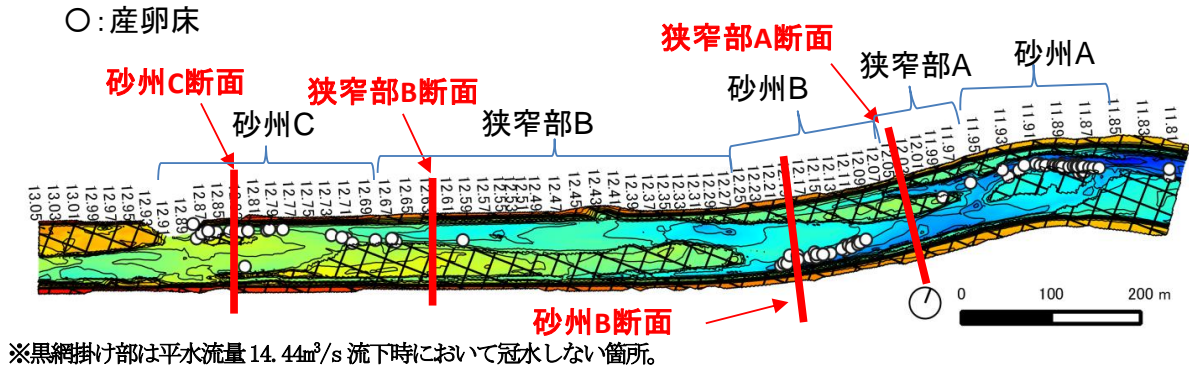


図-17 河床形状と産卵床位置

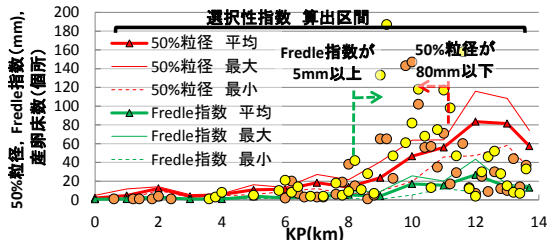


図-15 Fredle指数、50%粒径、産卵床の縦断分布 (漁川)

表-4 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					
	全区分 (箇所)		良区分		その他区分		全区分 (km)		良区分		その他区分	
	箇所数 (箇所)	割合	箇所数 (箇所)	割合	箇所数 (箇所)	割合	延長 (km)	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		

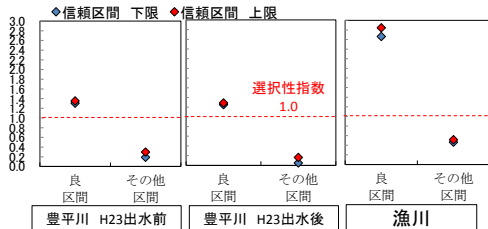


図-16 選択性指数による産卵環境評価手法の評価

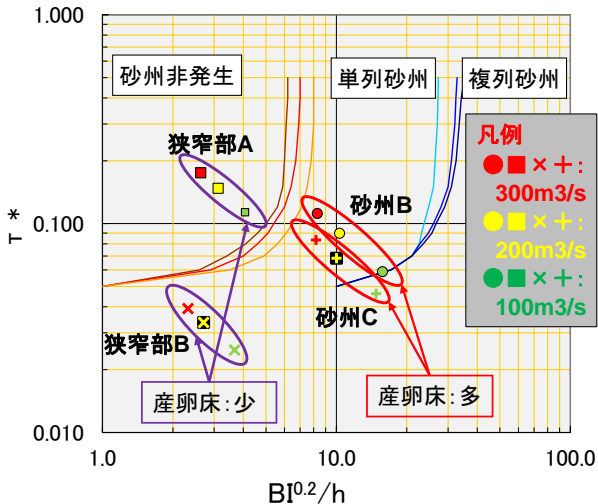


図-18 産卵床が多い(少ない) 個所の交互砂州の形成領域区分

も考えられ、目的に応じて適切に設定すると良い。

### 5. 産卵床環境に適した河道条件の検討

過年度の現地調査により、図-17に示すとおり豊平川の河床地形と産卵床分布の関係を検討した。その結果、平水流量時に広い範囲で冠水する砂州の前縁線付近に産卵床が多いことを確認した<sup>4)</sup>。一方で、平水流量時に冠水しない高比高の砂州により、主流部が狭窄している個所では産卵床があまり確認されなかった<sup>4)</sup>。

本章では、交互砂州の形成領域区分<sup>5)</sup>により、これらの個所の特徴を整理し、産卵環境に適した河道条件を考察するものである。

#### 5.1 方法

前述したとおり、平水流量時に広い範囲で冠水する砂州の区間と平水流量時に冠水しない砂州の影響で狭窄した区間とで産卵床分布が異なっていた(図-17)。図-8に記載した河床地形区分の同様のものを図-17に併記し、さらに狭窄部A、B、砂州B、Cの代表断面の位置も併記した。これらの代表断面を、川幅、水深、勾配、粒径から判別される交互砂州の形成領域区分<sup>5)</sup>により検討した。検討対象とした流量は、積雪寒冷地においては河道形成に影響すると考えられる融雪出水期の流量とした。2003~2012年の各年の4~6月の最大時間流量の平均値は171m³/s、最大値は364m³/sであり<sup>2)</sup>、融雪出水期の流量として100, 200, 300m³/sを検討に用いた。そして、流況計算により検討に必要な各断面の主流幅と、その水深を把握した。流況計算には、iRICのNAYS2Dソルバー<sup>13)</sup>を用い、計算格子は、図-17の河床地形から作成した。その他の計算条件を表-2に示す。検討に用いた勾配は、各河床地形区分の上下流端の最深河床高の標高差と区間距離から算出した。粒径は、過年度調査時に河床材料調査を各断面で5点行っており、そ

の結果から得られた50%粒径の各断面の平均値を用いた。

## 5. 2 結果と考察

各断面の、融雪出水時の交互砂州の発生区分を検討した結果を図-18に示す。これより、産卵床が多く確認された砂州B、Cの断面は単列砂州の発生条件となっていることが分かる。一方で、狭窄部Aは砂州非発生条件となっている。また、狭窄部Bでは、 $300\text{m}^3/\text{s}$ 流下時においても無次元掃流力 $\tau_*$ が0.05以下であり、河床材料が移動しないが、流量が増加して無次元掃流力が増加したとしても砂州非発生条件となることが分かる。

このことから、単列砂州、砂州非発生などの条件は産卵環境と関係があることが示唆される。この原因として、河床地形により、浸透流の発生状況や河床材料の粒径が異なることが考えられる。しかし現段階では詳細な検討は行っておらず、詳細は今後の課題である。融雪出水時において砂州が発生条件であることが産卵環境に良いとすると、川幅を調節することや、高比高の砂州により河道断面が狭窄している箇所を除去することが、産卵環境の改善になる可能性が示唆される。

## 6. おわりに

本研究課題に関する平成25年度の成果として、以下のものがあげられる。

### 6. 1 河岸形状と粗度が河床形状と流速分布に及ぼす影響

①粗度による砂州の半波長の違いを検討した結果、砂州が十分発達することができる河岸形状の条件では、粗度が大きい方が波長は長くなった(1川幅程度)。一方、波高発達が抑制される河岸形状の条件では、粗度の変化による波長の変化は明確ではなかった。

②河岸形状により砂州の波高発達が抑制される条件では、波高発達が抑制されない河岸形状の条件と比べ、砂州の波高が小さく移動速度が速いことが確認された。

③河岸部の流速は、河岸粗度が低下するほど、速くなる傾向であった。そのため、護岸の設置により河岸部の粗度が低下する場合、河岸近傍の河床材料が粗粒化することが考えられる。なお、波高が十分発達することができる河岸条件では、粗度の違いによる流速差が大きかったが、波高発達が抑制される河岸条件では小さかった。

### 6. 2 河床地形による土砂交換厚

①河床形状の異なる区間の河床内にマーカーを埋設し、融雪出水による土砂交換厚の把握を試みた。その結果、狭窄部や、その下流に連続する砂州上の主流部では高流速部が生じており、土砂交換厚が0.2~0.3m以上であった。

②砂州部においては、主流部で土砂交換厚が大きい一方、前縁線の上・中流部で流速が遅く、堆積が著しく、マーカーを確認できない箇所が確認された。また、マーカーを確認できた砂州前縁線では、土砂交換厚が平均0.15m程度であり、砂州上の主流部よりも薄かった。このことから、砂州前縁線では、土砂交換厚は小さいことが考えられ、砂州部では、部位によりその流況分布が異なるため、狭窄部よりも多様な土砂交換厚を持っていると考えられた。

③狭窄部や砂州上の主流部では、土砂交換厚が20~30cm以上となっており、シロザケの卵の埋設深さ(20~30cm程度)<sup>1)</sup>以上は、土砂交換がされていると考えられる。

## 6. 3 縦断的な産卵適地推定区間の選択性指数

①簡易な縦断的なシロザケの産卵適地の推定手法により、評価された区間の実際の利用状況を定量的に評価するため、選択性指数により評価を行った。産卵床調査が行われている区間での河床材料の条件が良好な区間の選択性指数を算出した結果、選択性が確認され、評価対象とした区間の中では、より産卵に適した区間であることが示唆された。

## 6. 4 産卵環境に配慮した河道整備手法の検討

産卵床が多く確認された箇所では、融雪出水時に単列砂州の形成条件になっているが、産卵床が少ない箇所では、高比高の砂州により主流幅が狭窄し、砂州非発生領域となっていた。このことから、融雪出水時に砂州の発生条件となることが産卵環境に好ましいことが考えられた。そのため、川幅の調整や高比高砂州の除去など行うと産卵環境の改善になる可能性が示唆された。

## 謝辞

資料の提供を戴いた、札幌市豊平川さけ科学館、札幌開発建設部、帯広開発建設部、釧路開発建設部に記して謝意を表す。

## 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, 第19巻, pp507-512, 2013,6.

### 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

- 5) 水理公式集, 社団法人 土木学会, 1999.
- 6) 水理公式集, 社団法人 土木学会, 1985.
- 7) 渡邊康玄: 中規模河床形態の形状特性と河川地形, 2008 年度(第44回)水工学に関する夏期研修会講義集 Aコース, 土木学会 水工学委員会・海岸工学委員会, 2008,8.
- 8) Geist D.R., Dauble D.D.: Redd Site Selection and Spawning Habitat Use by Fall Chinook Salmon, The Importance of Geomorphic Features in Large Rivers, Environmental Management, Vol.22(5),pp.655-669,1998.
- 9) 村上まり恵, 山田浩之, 中村太士: 北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究, 応用生態工学会, 4(2), pp.109-120, 2001, 7.
- 10) Yamada, H. Nakamura, F. : Effects of fine sediment accumulation on the redd environment and the survival rate of masu salmon (*Oncorhynchus masou*) embryos, Landscape and Ecological Engineering, 5, 2009,7.
- 11) 小林哲夫: サケとカラフトマスの産卵環境, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 第22号, pp.7-13,1968.
- 12) QGIS, <http://www.qgis.org/>
- 13) iRIC, <http://i-ric.org/>.
- 14) 矢野雅昭, 矢部浩規, 佐藤好茂: 複数河川でのセグメントスケールからみたシロザケの産卵環境の特徴, 北海道開発技術研究発表会論文, 第56回, 2013,2.
- 15) 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.
- 16) 鈴木俊哉: 自然再生産を利用したサケ資源保全への取り組み, SALMON情報, No.2, pp3-5, (独) 水産総合研究センター, 2008.1.
- 17) Kondolf M.G. & Wolman G.M. : The sizes of Salmonid Spawning Gravels. Water Resource Research vol.29 (7), pp2275-2285, 1993,1.
- 18) 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.
- 19) Manly, B.F.J. McDonald, L.L. Thomas, D.L. McDonald, T.L. Erickson, W.P. :Resource Selection by Animals, Kluwer Academic Publishers, p51,2002.
- 20) 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), pp129-146,2004.
- 21) 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), pp1-24,2005.
- 22) 国土交通省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>

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

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Watershed Environmental  
Engineering Research Team

**Author** : YABE Hiroki

WATANABE Kazuyosi

HAYASHIDA Kazufumi

YANO Masaaki

WATANABE Naohiro

SATOU Yoshishige

**Abstract** : Flume experiments with uniformed grain and a varying rivage shape and manning roughness were carried out. The results showed that, in the cases with the rivage shape that restrain bar height growth, moving velocity of bars were greater than the cases with rivage shape that not restrain bar height growth. And the results also showed that the lower was the manning roughness of rivage, the greater were the velocity around rivage. This result suggested that grain size become coarser. For the purpose of understanding the thickness of riverbed material exchange, we conducted buried marker surveys in the Toyohira river. The results showed that the places with high flow velocity had more than 20-30cm thickness of riverbed material exchange that is about same as buried depth of Chum salmon eggs. And the place with a lot of spawning redds was in river condition that form bar morphology. But the place with less spawning redds was in river condition that do not form bar morphology. This results suggest that provisioning river condition that form bar morphology, contributes spawning environments.

**Key words** :Bank protection, Alternate bars, bed material exchange thickness, spawning environment, Selective index.