

豊平川のサケ産卵環境改善区間における掘削路 閉塞後の環境変化計測

THE ENVIRONMENT CHANGE AFTER WITHOUT RUN WATER IN THE CHUM
SALMON SPAWNING ALCOVE, TOYOHIRA RIVER

片岡朋子¹・布川雅典²・有賀望³・谷瀬敦⁴・村山雅昭⁵

Tomoko KATAOKA, Masanori NUNOKAWA, Nozomi ARUGA, Atushi TANISE and Masanori MURAYAMA

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸1条 3-1-34)

²正会員 農博 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸1条 3-1-34)

³非会員 農修 札幌豊平川さけ科学館・札幌ワイルドサーモンプロジェクト (〒005-0017 札幌市南区真駒内公園2-1)

⁴正会員 工修 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸1条 3-1-34)

⁵非会員 工修 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸1条 3-1-34)

In alcove where chum salmon have spawned every year, the number of spawning beds decreased due to the accumulation of fine sediment. We made channel to make inflow and reduce the fine sediment. The flow path made salmon redds increased. In the following year, the artificial channel was closed due to the sedimentation caused by the flood. In order to understand effects of without inflow to the alcove on the number of redds, we measured spawning environmental variables. Half number of redds before channel closed were recognized, whereas almost variables (e.g. substrate, water depth, hyporheic temperature) were suitable for spawning, except for current velocity. Faster flow may be a necessary element to guide salmon to the alcove, and running water from the channel it is important for maintaining salmon spawning environment.

Key Words : *environmental rehabilitation, fine sediment, VHG, wild salmon*

1. はじめに

札幌市内を流れる石狩川支流豊平川では、毎年石狩川合流点から10 km上流より約11 kmの区間においてサケ (*Oncorhynchus keta*) の産卵が見られる。特に、12月から1月に産卵する後期群の産卵場は、湧水が豊富な扇端部に集中してみられる。このような場所に、砂州と河岸の間にできたくぼ地 (以下、alcoveとする。) ¹⁾ が存在する。このalcoveでは細粒土砂の堆積により、2013年から産卵床が年々減少していた²⁾。そのための産卵床環境を改善させる目的で、2017年9月にalcoveと豊平川本流とをつなぐ掘削路を造成した³⁾。その結果、細粒土砂は減少し、産卵床数が前年の2倍以上に増加した³⁾。

サケ科魚類を対象とした河川の修復は北米では1950年代から取り組まれており⁴⁾、多数の事例が報告され、効

果を上げてきた。国内では、豊平川支流真駒内川の岩盤河床区間で、礫の堆積を促す現地実験が行われ、サクラマス (*O. masou*) の産卵環境改善に効果があることが示されている⁵⁾。また、北海道中央部の当別川支流の溪流河川に木製構造物を設置し、サクラマス稚魚の生息密度の上昇に効果があった事例¹⁾ もある。サケ産卵場創出としては江戸時代に三面川に分流をつくったのがはじまりといえる⁶⁾。しかし、我が国において他のサケ科魚類に比べてサケの産卵環境を改善あるいは修復する事例は少ない。

これまで我が国ではサケの人工ふ化事業発展とともにサケ来遊数が飛躍的に増加した。その一方で、自然産卵による野生サケの存在は重要視されてこなかった。しかし近年、人工ふ化放流河川においても約3割が野生魚である⁷⁾ことや豊平川でも半数以上が野生魚であることが

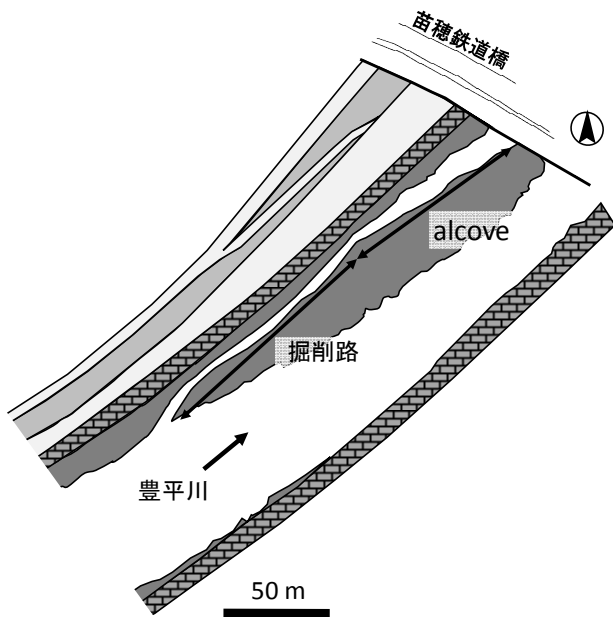


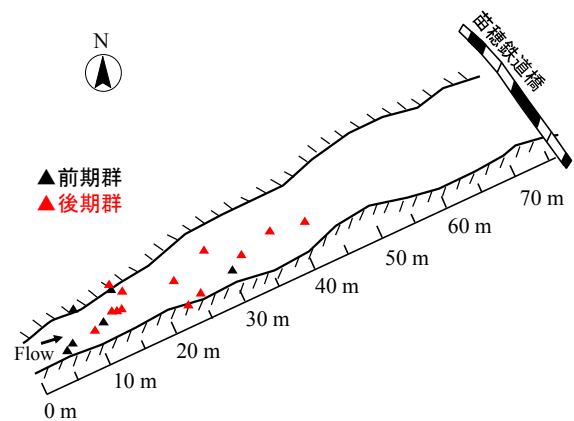
図-1 調査地点図

報告され、その存在が重要視されている⁸⁾。また、生物多様性国家戦略2012－2020では、さけます増殖事業でも野生魚との共存可能な放流事業の実施がもてられている。このことから野生魚の産卵環境改善や産卵場造成が重要となる。一方、河川行政では1997年の河川法改正にはじまり、現在では災害復旧事業も含めたすべての河川整備で河川生態系保全に配慮している^{9),10)}ようになった。このことから自然産卵場所の保全は重要な課題である。

また、「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業の実施について」¹¹⁾をうけて構造物への魚道の設置がなされ、北海道でもサケ科魚類の遡上が増加している^{12),13)}。このような遡上施設が機能する条件として、遡上魚を遡上施設に導く流れの創出が重要であるといわれている。この流れは呼び水とよばれ、これは魚の正の走流性を利用し、水の流れが刺激となって魚類を遡上設備へ誘導するものである¹⁴⁾。こうした構造物の改良はまた野生サケの自然産卵に向けて重要な取り組みである。

前述した豊平川で施工した掘削路⁹⁾は、2018年7月の出水により流入部が土砂堆積により閉塞し、alcoveへ河川水の流入はみられなくなった。堆積傾向の砂州に掘削路を造成した場合、このような現象は想定されるものの、掘削路による産卵床改善効果が閉塞後にすぐにみられなくなるかはよくわかっていない。今後このような産卵環境改善事業を行う上で、閉塞後におこる産卵環境の変化と産卵床数との関係は重要な資料となる。そこで、本研究では産卵環境を改善したalcoveにおいて閉塞前後で産卵床数と分布、さらに底質環境も含めた産卵床環境の変化について明らかにしたい。

a) 2017年 閉塞前



b) 2018年 閉塞後

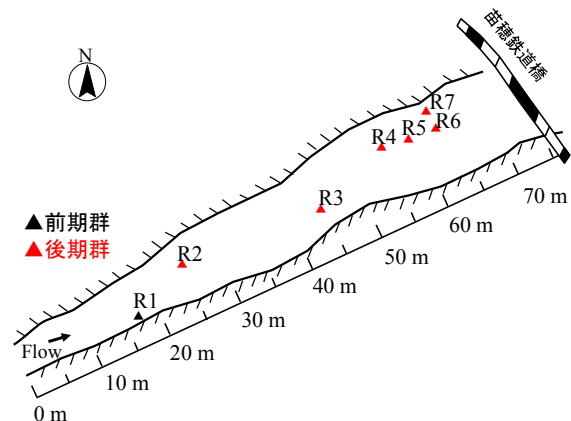


図-2 掘削路閉塞（2018年7月）前後のalcoveにおける産卵床の分布

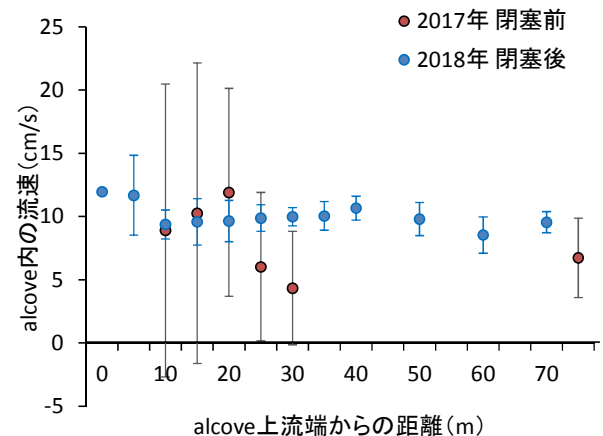


図-3 掘削路閉塞（2018年7月）前後のalcoveにおける流速。点は平均値、エラーバーは標準偏差を示す。

2. 方法

(1) 調査地概要

調査地は、石狩川支流豊平川で、石狩川との合流点か

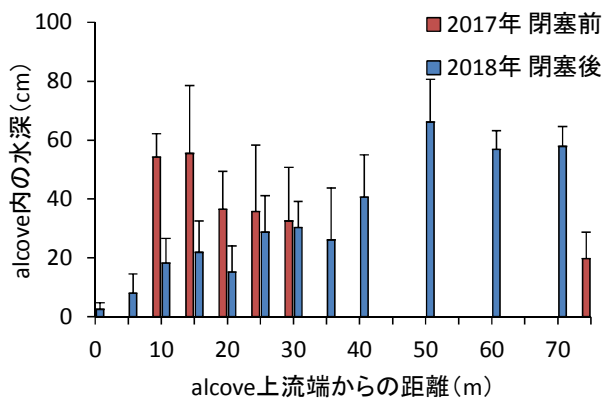


図-4 掘削路閉塞（2018年7月）前後のalcoveにおける平均水深。エラーバーは標準偏差を示す。

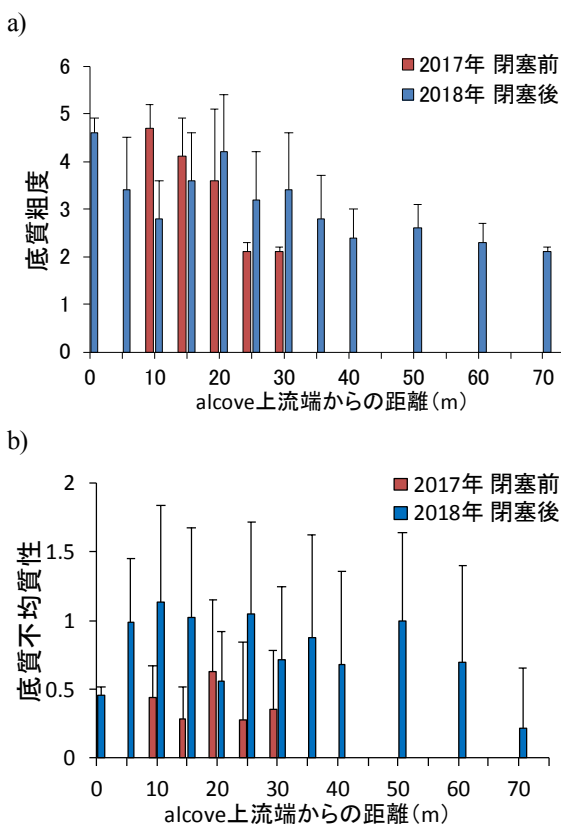


図-5 掘削路閉塞（2018年7月）前後のalcoveにおける底質粗度および底質不均質性。エラーバーは標準偏差を示す。

ら12.2 km上流に位置し、護岸と砂州に囲まれたalcove地形となっており、河床は細粒土砂で覆われていた。alcoveを囲う砂州は水面より高い比高をもつため、平水時は、alcove上流から河川水の流入はみられなかった。片岡らは本流からalcoveに流入があれば細粒土砂を流出させられると考え、2017年9月に掘削路を造成した³⁾（図-1）。河川水は掘削路を経てalcoveへ流入し、細粒土砂が減少することで産卵床数が増加した。その後、2018年7月4日から6日にかけて豊平川は過去10カ年で2番目の水位上昇¹⁵⁾を経験し、それに伴い掘削路の流入口に

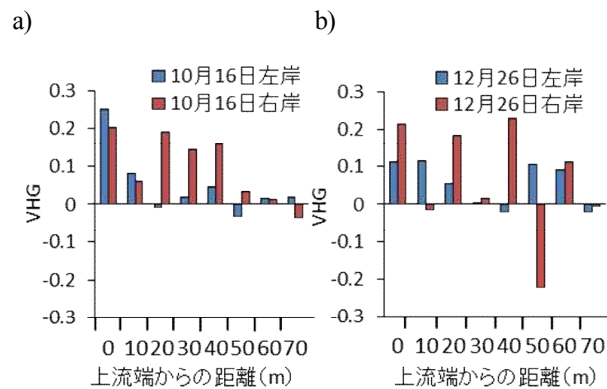


図-6 掘削路閉塞（2018年7月）後のalcove左右岸に設置された観測井における鉛直方向の動水勾配

土砂が堆積して掘削路は閉塞し、再び河川水の流入が途絶えた。

alcove上流端は、水面幅が約2.5 mあり、下流方向に沿って徐々に水面幅が広がりながら、上流端から25 m地点で水面幅が大きく拡幅して約9 mとなる。上流端から下流80 m付近で右岸にみられる砂州はなくなり、同時にこの砂州最下流端地点である苗穂鉄道橋下でalcoveは豊平川と接続する（図-1）。このため、豊平川の流量変動が生じた場合も、alcove内の水面勾配はほとんど変化がなかった。

閉塞前の2017年9月下旬から10月下旬にかけて、豊平川の水位は雁来観測所地点での2016年の平水位を下回る日が続き、同年の濁水位を下回る日もあった¹⁵⁾。雁来観測所の水位は、閉塞前の流速、水深および底質計測時には3.87 m、閉塞後は4.12 mで、閉塞後の方が約0.25 m水深が深かった。また、閉塞前および閉塞後の観測時水位はそれぞれ、雁来観測所における2016年の濁水位および平水位と同程度であった¹⁵⁾。また、閉塞後に行った鉛直方向の動水勾配および間隙水温計測時の水位は、2018年10月が4.22 m、12月が4.32 mで、2016年の雁来観測所における豊水位と同程度の水位であった¹⁵⁾。

(2) 調査方法

掘削路の流入口閉塞前後のalcoveにおけるサケ産卵床の数および分布と、産卵環境の変化を明らかにするため物理環境調査を実施した。

a) alcove内の産卵床数と分布

調査区間におけるサケ産卵床数は札幌市さけ科学館が実施している産卵床調査の結果²⁾を利用した。調査は当年9月から翌年1月まで毎年行われており、複数人で徒歩により河床を確認する方法で産卵床数を計数している。ここでは2017年9月から2019年3月までのデータを使用した。これらのデータの位置情報をもとにalcove内における産卵床の分布を明らかにした。また、9月から11月までに確認された産卵床を前期群、12月から1月までに確認された産卵床を後期群とした⁸⁾。

表-1 alcove内に確認された産卵床の確認日および産卵床に隣接する観測井の積算温度900℃到達日

産卵床	産卵床確認日	積算温度900℃到達日	備考
R1	2018年11月7日	2019年3月1日	
R2	2018年12月10日	2019年3月15日	
R3	2018年12月21日	2019年3月22日	
R4	2018年12月21日	-	2019年5月9日時点で798.5℃
R5	2018年12月10日	2019年4月1日	
R6	2018年12月21日	2019年4月12日	
R7	2019年1月8日	2019年5月2日	

Note: 3月22日以降の積算温度900℃到達日は、水温計測最終日の3月16日の日平均水温を代用して算出した。R4の産卵床は5月上旬までに900℃まで達することがなかったため、5月9日時点の積算温度を示した。

b) 流速、水深および底質

流速、水深および底質の計測は、閉塞前として2017年10月27日に、閉塞後として閉塞から3ヶ月経過した2018年10月20日にそれぞれ実施した。掘削路がalcoveへ接続する部分をalcoveの上流端（0 m地点）とした（図-2）。2017年の閉塞前は、上流端から10 mの地点から30 m地点までの区間と、75 m地点を計測対象区間および地点とした。計測は、この区間に5 m間隔でトランセクトをもうけ、トランセクト上に等間隔に4点の計測点をもうけておこなった。75 mはトランセクトが1本だけである。2018年の閉塞後は、0 m地点から70 m地点までの区間を計測対象とした。この区間に、40 mまでは5 m間隔で、40 m以降の区間では10 m間隔でトランセクトを設定した。トランセクト上に50 cm間隔に計測点を取り、各点における水深、流速、底質をInoue & Nunokawa（2002）¹⁶の示す格子枠を使用した手法（以下、INUグリッド法とする）により計測した。各計測点に、内部が0.1 m四方の25個の小格子で構成された0.5 m四方の格子枠を設置した。各小格子の優占する表面粒径を、目視により判断し、以下に示す7段階の粒径コードに分類した。

1；コンクリートブロック，2；砂もしくはそれより細かい（2 mm未満），3；小礫（2 mm以上16 mm未満），4；礫（16 mm以上64 mm未満），5；中礫（64 mm以上128 mm未満），6；大礫（128 mm以上264 mm未満），7；巨礫（264 mm以上）。

1地点につき25個の小格子の粒径コード平均値をその地点の粗度とし、その平均値に対する標準偏差を粒径サイズのばらつきの指標である不均質性とした。河床にコンクリートブロックがあった場合は、2018年ではコンクリートブロックがほとんどみられなかったためにコンクリートブロックが優占する小格子を含めている。

c) 鉛直方向の動水勾配および水温

閉塞後の河床に観測井を設置して、鉛直方向の動水勾配（VHG）と河床間隙水温を計測した。観測井はalcove上流端の0 m地点から下流70 mまでに設定したトランセクトのうち10 m毎にあるトランセクトの河岸際に設置した。観測井はト部（2015）¹⁷が鉛直方向の動水勾配を計測する際に使用した単管を参考に、長さ1 m、内径43.8 mmの単管に、末端から30 cmまでの間に直径8 mmの穴

を5 cm間隔で12カ所削孔したものを使用した。最上部の穴から河床までの深さを20 cmとなるようにハンマーで打ち込んだ。単管内と単管外の表流水と水位差（H）を単管内の河床面から削孔部までの距離（L）で除して動水勾配を算出した。式は次のとおり。

$$VHG = H / L \quad (1a)$$

河床間隙水の動水勾配は前期および後期群の産卵にあわせて、2018年10月16日と2018年12月26日に計測した。

間隙水温は観測井の河床下20 cmに自記水温計を設置して調査期間中計測した。それぞれの産卵床に最も近い観測井から得られた間隙水温を産卵床の間隙水温として用いた。これらのデータから産卵床が確認された日から稚魚が浮上するまでのそれぞれの日の日平均水温の積算温度を計算し、積算温度が900℃¹⁸になる日を算出した。産卵床の確認日はさけ科学館が産卵床を確認した日とした。計測期間の最終日は3月16日であることから、この日以降の日平均水温は、3月16日の日平均水温が5月上旬まで続くと仮定して積算温度900℃到達日を算出している。

3. 結果

(1) 掘削路閉塞前後の産卵床の数と分布

産卵床の数は、閉塞前は19カ所確認されたのに対し、閉塞後は7カ所に減少した（図-2）。豊平川に回帰したサケの個体数は閉塞前後で大きく変わらなかった。そのため、豊平川で確認された産卵床数は、閉塞前は626カ所、閉塞後は616カ所であり²、変わらなかった。閉塞前ではalcoveの上流側に、閉塞後のそれは下流側に多くみられた。閉塞前の産卵床は5 mから15 mまでの10 m区間に11カ所、15 mから40 m付近に8カ所確認された。閉塞後の産卵床は15 m 地点から25 m地点の間に2カ所、40 m地点から65 m 地点まで25 mの間に5カ所が確認された。

(2) 流速

閉塞前のトランセクトでの平均流速は、alcove上流端から10 m地点から20 m地点の区間で平均値が10 cm/s 前後、25 m、30 mおよび70 m地点で5 cm/s 前後だった

(図-2) . 但し, 10 m地点から20 m地点の間では, 右岸側で19.1 cm/sから25.2 cm/sだったのに対して, 左岸側は0.2 cm/sから0.6 cm/sであったために標準偏差が大きな値となった. 閉塞前には上流からの流水による水面の乱れが観察されるなど, 流速が大きな部分が20 m地点付近までの間でみとめられた. 一方で, 閉塞後には上流からの流水はなくなり, 水面を乱すほどの流速は観察されなかった. どの地点でもトランセクトでの平均値が全区間に渡って10 cm/s前後であり, 標準偏差も縦断的な値の変動がみられず, 大きな流速が部分的にも観察されなかったことが観測データからもわかる.

(3) 水深および底質

Bjornn et al. (1991) によると, 産卵床の水深は18.0 cm以上¹⁹⁾といわれている. 閉塞前は, 10 m地点と15 m地点の平均値は50.0 cm 以上であった(図-4) . 20 m地点から30 m 地点は下流方向へ徐々に浅くなるが30.0 cm以上であった. 75 m地点はもっとも浅いが平均値は18.0 cm 以上であった. 一方, 閉塞後は0 m地点と5 m地点は水深が浅く, それぞれ平均値は2.6 cmと8.0 cmであった. 10 m地点と15 m地点の間では平均値は18.0 cm以上あった. 20 m地点では平均値が15.3 cmだったが, トランセクト上の計測点の左岸側約半分が18.0 cm以上であった. 25 mより下流の区間の平均値はどの地点も20.0 cm以上であった.

閉塞前の10 m地点から20 m地点は小礫をはじめとする礫成分がみとめられ, これを反映して平均粗度は3以上を示した. 20 m地点より下流では河床の大部分が砂(< 2 mm) 成分となっていたことから底質粗度の平均値も2.0程度を示し, 不均質性も小さかった(図-5b) .閉塞後は, 0 mから10 mでは河床粒径は小さくなっているが, 礫成分が多くみとめられた.35 mから河床に砂(< 2 mm) 成分が多く混じるようになり, 70 m地点ではほとんど砂が河床を覆っていた. ただし, 40 m地点から60 m地点の間には砂に中礫および大礫が混じっていた. これらを反映して40 m点から60 m地点の間では, 平均粗度は2程度であるものの, 不均質性が70 m地点のそれより大きな値を示していた.

(4) 鉛直方向の動水勾配

閉塞後のalcoveでは全区間にわたり正のVHG値がみとめられた(図-6a) . 40 m地点までの区間で左右岸のどちらかで40 m以降より高い正の値を示した. 正の値は湧昇流があることを意味している¹⁷⁾. 一方で12月26日では70 m地点以外のすべての地点で左右岸どちらかに正の値がみられた(図-6b) . 0 m地点から20 m地点と40 m地点から60 m地点でも相対的に高い正の値が示され, ここでは湧昇流があったことを示している.

(5) 河床間隙水温

閉塞後の日平均積算温度を産卵床ごとにみると, 前期群の産卵床R1の積算温度は3月1日に900℃に達した(表-1) .一方で後期群の6カ所の産卵床(R2からR7)の積算温度は3月上旬から5月上旬までに900℃に達した.

4. 考察

閉塞前後での産卵床数の減少とその分布には違いが認められた. これまで本調査地での産卵床数の減少には細粒土砂の堆積が影響していると考えられてきた²⁰⁾. しかしながら, 今回の調査により閉塞後にalcoveの全区間にて細粒土砂の堆積は認められなかった(図-5a) . 閉塞後のalcove最上流より40 m地点から65 m地点付近に産卵床がみられたが, その付近の河床は砂成分が多くを占めているものの, 一部で中礫から大礫の河床底質がみられ, その位置で産卵床が確認されている(図-2b) . また, 閉塞後の水深は, alcoveの5 m地点までは水深が浅いものの, 10 m地点から70 m地点の区間は20 cm以上の水深があった. これは閉塞後のalcoveのほとんどの範囲で産卵床を作るのに十分な水深といわれている18.0 cm¹⁹⁾を上回っていたことを意味する.

閉塞後のalcoveの両岸の縦断方向10 m毎に設置された観測井で観測された前期群および後期群の産卵時期の垂直方向の動水勾配の値は, ほとんどの計測地点で正の値だった. これは, 閉塞後のalcoveにはサケの産卵環境として重要な湧昇流^{21), 22), 23)}が存在することを意味している. 後期群の産卵時期である12月26日の動水勾配の値は0 m地点から20 m地点までと40 m地点から60 m地点の区間で正の高い動水勾配が観測されている. しかし, この時期には, ほとんどの産卵床は40 m地点から60 m地点付近でしか確認されていない. これは, 産卵床の分布は湧昇流の存在だけが要因ではないことを意味している. また, この時期に作られた産卵床の間隙水温の日平均積算温度からこれらの産卵床の卵のふ化および浮上が稚魚のその後の生息に十分な期間に行われる可能性が高いことを意味しており, 産卵床環境は決して悪くないことがわかった. しかしながら, 産卵床数は閉塞前よりも減少していた.

眞山(2004)によると, サケやカラフトマス(*O. gorbuscha*)は流速の増加が刺激となって遡上行動が活発化する²⁴⁾. また, Weaver(1963)は大ダムの魚道に併設した実験水路によって, サケ科魚類が遡上する際に流速の速い方を選択すること, 流速の違いが大きいほど選択する個体数に顕著な違いが認められることを明らかにした²⁵⁾. このような魚類の行動から, 本調査地においても閉塞前は速い流速に誘導された個体が, alcoveの20 m地点まで遡上し産卵した結果, その地点付近の産卵床密度が高くなった可能性が考えられた. しかし, 閉塞後は産卵可能な環境がalcoveの上流側にあったにも関わらず,

刺激する流速がなかったことで上流側までたどりつかず、そのため、産卵床は下流部に集中したと思われる。

5. まとめ

豊平川におけるサケ産卵環境を改善したalcoveにおいて、産卵環境改善を目的とした掘削路が閉塞した。そこで、閉塞前後でalcove内の産卵床の数と分布、さらに産卵床環境の変化について明らかにし、これらの関係について考察した。その結果、閉塞前に比べて閉塞後の産卵床は半分以下となり、その分布はalcoveの上流側から下流側へと変化した。また、閉塞後の物理環境は流速を除き、閉塞前と同様に産卵場として適したものであった。閉塞前の流速は強い流れが認められたが、閉塞後はalcove全体に一律な流速となった。産卵床の数と分布の変化は、流れの有無によるものと考えられる。流速が、産卵場にたどり着くための刺激となる流水として機能しているならば、サケの産卵床数の増加には、流水を生み出し、維持する機能を持つ掘削路の再造成が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 柳井清治, 長坂有, 佐藤弘和, 安藤大成: 都市近郊溪流における木製構造物による流路とサクラマス生息環境の改善, 応用生態工学, vol.7, no.1, pp.13-24, 2004.
- 2) 札幌市さけ科学館: <https://salmon-museum.jp/> (平成31年3月25日確認)
- 3) 片岡朋子, 布川雅典, 谷瀬敦: 豊平川中流部における小規模掘削によるサケ産卵環境の創出, 北海道開発技術研究発表会, 環18, 2018.
- 4) Lister D. V., Finnigan R. J.: Rehabilitating Off-channel Habitat, Fish Habitat Rehabilitation Procedures, Chapter 7, Ministry of Environment, Lands and Parks and Ministry of Forests, pp.1-29, 1997.
- 5) 石山信雄, 渡辺恵三, 永山滋也, 中村太士, 剣持浩高, 高橋浩揮, 丸岡昇, 岩瀬晴夫: 河床の岩盤化が河川性魚類の生息環境に及ぼす影響と礫河床の復元に向けた現地実験の評価, 応用生態工学, no.12, vol.1, pp.57-66, 2009.
- 6) 埴山雅秀: サケ学への誘い, 北海道大学出版会, pp.601-639, 2018.
- 7) 森田健太郎, 高橋悟, 大熊一正, 永沢亨: 人工ふ化放流河川におけるサケ野生魚の割合推定, 日本水産学会誌, vol.79, no.2, pp.206-213, 2013.
- 8) 有賀望, 森田健太郎, 鈴木敏哉, 佐藤信洋, 岡本康寿, 大熊一正: 大都市を流れる豊平川におけるサケ (*Oncorhynchus keta*) 野生個体群の存続可能性の評価, 日本水産学会誌, vol.80, no.6, pp.946-955, 2014.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局: 多自然川づくり基本指針, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/press/200607_12/061013/index.html, 2006. (平成31年3月25日確認)
- 10) 国土交通省水管理・国土保全局: 美しい山河を守る災害復旧基本方針, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/measures-saigai/pdf/10.pdf, 2018. (平成31年3月25日確認)
- 11) 国土交通省水管理・国土保全局: 魚がのびりやすい川づくりの手引き, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kankyo/sakana_tebiki/index.html, 2005. (平成31年3月25日確認)
- 12) 有賀誠, 津田裕一, 藤岡紘, 本多健太郎, 光永靖, 三原孝二, 宮下和士: 石狩川におけるシロザケ *Oncorhynchus keta* の遡上行動—テレメトリーシステムの利用—, 応用生態工学, no.12, vol.2, pp.119-130, 2009.
- 13) 岡本康寿: 豊平川におけるシロザケ産卵床の分布 (1998,1999年度) —魚道の設置による分布状況の変化—, 札幌市豊平川さけ科学館, no.12, 2000.
- 14) 社団法人ドイツ水資源・農業土木協会 (DVWK): 多自然型魚道マニュアル, 中村俊六監修, 財団法人リバーフロント整備センター翻訳・編集, pp.49, 1998.
- 15) 国土交通省: 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/> (平成31年3月25日確認)
- 16) M. Inoue, M. Nunokawa: Effects of longitudinal variations in stream habitat structure on fish abundance: an analysis based on subunit-scale habitat classification, *Freshwater Biology*, vol.47, pp.1594-1607, 2002.
- 17) ト部浩一: 十勝川水系札内川における二次流路の環境特性, 北水試研報, No.88, pp.33-42, 2015.
- 18) 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, vol.3, no.1, pp.1-8, 2010.
- 19) Bjornn, T. C., and Reiser D. W.: Habitat requirements of salmonids in streams, In: Meehan WR (ed). *Influence of forest and rangeland management on salmonid fishes and their habitat*. American Fisheries Society Special Publication 19, Bethesda, Maryland, pp.83-138, 1991.
- 20) 片岡朋子, 布川雅典, 谷瀬敦: 豊平川中流部における小規模掘削によるサケ産卵環境の創出, 北海道開発技術研究発表会, 環18, 2018.
- 21) 佐野誠三: 北日本産サケ属の生態と繁殖について, さけ・ます・ふ化場研究報告, no.14, pp.21-90, 1959.
- 22) 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・ふ化場研究業績, 第209号, 1968.
- 23) 鈴木敏哉: 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.
- 24) 眞山紘: さけ・ます類の河川遡上生態と魚道, さけ・ます資源管理センターニュース, No.13, pp.1-7, 2004.
- 25) Weaver, C. R.: Influence of water velocity upon orientation and performance of adult migrating salmonids, *Fishery Bulletin*, vol.63, pp.97-121, 1963.

(2019.4.2受付)