

11.4 氾濫原における寒冷地魚類生息環境の影響評価・管理手法に関する研究

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、林田寿文、
矢野雅昭、水垣滋

【要旨】

氾濫原における寒冷地魚類の生息環境の影響評価・管理手法の確立のため、以下の4項目について調査研究を行った。1) 寒冷地魚類の行動特性と河川構造物による影響の把握、2) テレメトリーシステム等を用いた、流れに対する魚類の生理・行動学的影響の把握、3) 氾濫原における「移入種・外来種」の侵入状況及び影響の把握、4) 健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法の開発。この結果、健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法として、テレメトリーシステム等を用いた調査方法を開発することができた。

キーワード：氾濫原、テレメトリーシステム、魚類調査、河川連続性、旧川群

1. はじめに

氾濫原における様々な人間活動により、動植物の生息場環境は大きなダメージを受けてきた。特に、サケ科魚類のように河川と海とを往復する生物にとって、頭首工や樋門などの河川構造物により、「回遊・産卵」などを妨げられることは、その種の衰弱・絶滅を招くことにつながる。

また、サケ科魚類は「人工孵化放流事業」や「自然産卵に向けた取組み」が進められており、氾濫原全体の「河川流路網の連続性」がより強く河川管理者に求められている。さらに、「孤立水域」である旧川や干潟等では、孤立前の魚類等の種の保存がなされているが、近年、人による外来種等の移入の影響で大きく生態系が変化している。このため、「河川流路網」と「孤立した水域」を合わせた氾濫原全体の水環境の「面的」な変遷を把握し、魚類にとってより良い物理的・生態学的環境の検討を行い、河川管理に反映する必要がある。

1. 1 魚道の概要

水域の連続性は、魚類をはじめとした水生生物にとって重要である。特にダムや頭首工のような河川構造物による生息場の分断は、しばしば魚種やそのほかの生物の減少や絶滅を引き起こす。このような水域連続性の欠如は、個体群の減少・生活史の変化・河川全体や流域全体の生息数の改変・遺伝子構造の変化をもたらす可能性がある。そのため、世界中の

河川構造物には魚道が設置されてきた。魚道は約50年前から徐々に機能が改良され、設置数も増やしており、近年では魚道研究も水工学と生物学の連携がとられるようになってきた。しかしながら、河川によって生息する魚が異なるなどの理由から、遡上や降下に対して最も効果的な魚道形式がどれなのかが不明であるという問題点があった。また、魚道内の水深や流速などの水理的条件だけで魚の遡上が可能かを判定するような試みもなされてきた。その結果、多くの魚が遡上することができない魚道が数多く存在しているのが現状である。また、魚道内の魚の行動はほとんど把握できておらず、魚道建設後に魚道が遡上という観点で機能しているかの評価がされることはほとんどなかった。つまり、今までの調査技術では魚道内や河川内の魚類の行動を連続的に調査することは難しいということである。そのため、これらの問題に対して、魚道通過の評価、とくに魚道内や河川流域全体における魚道の評価を行う必要があった。そこで、バイオテレメトリー機器を、魚類の行動把握が可能なツールとして選択し研究を行った。

1. 2 バイオテレメトリーの概要

近年の電子工学の発達により、バイオテレメトリー手法は動物の居場所、行動、遊泳時の生理条件を研究者が把握することを可能とした。バイオテレメトリー手法は、遊泳時には目視では確認できない魚

からのデータが得られ、魚の行動や体調に影響を与えず、また、今まで行ってきたような魚にリボンタグなどのマークを付け再採捕する方法よりも多くのデータ取得が可能である。バイオテレメトリー手法は、海外では主に水域に生息する生物に対して行われており、自然環境下における様々なデータを取得してきた。近年、バイオテレメトリー機器のサイズや重さが減少しつつあり、より小型の生物にも装着が可能となってきた。バイオテレメトリー機器は、動物の位置情報に加え、経験水温、経験水深、加速度、心拍数などのデータも得ることが可能である。このデータ情報は、超音波や電波の信号を利用し遠隔的に得ることが可能である。超音波信号は、水中の中でのみ利用することができ、電波発信機は、空中と淡水中で利用することができる。生理学的なテレメトリーは、魚の行動レベルと運動代謝（酸素消費量）との比較を行うために用いられてきた。筋電位発信機（EMG）は、魚の筋肉の動きは把握できるため、遡上する際の河川構造物の調査に用いられている。バイオテレメトリー手法を研究に用いることは、生態学、生理学、行動学の知見を大幅に改善させた。

1. 3 本研究の目的

本研究の目的は、バイオテレメトリー手法を用いた研究や魚類研究などを行うことで、「寒冷地魚類の行動特性と河川構造物による影響の把握」、「テレメトリーシステム等を用いた、流れに対する魚類の生理・行動学的影響の把握」、「氾濫原における「移入種・外来種」の侵入状況及び影響の把握」、「健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法の開発」を行うことを目的としている。

以上のことから、「魚類の健全な河川流路環境」、及び「孤立水域における魚種」を保全することにより、氾濫原全体で種の保存がなされた、健全な水環境を取り戻すための評価・管理手法の提案を行う。また、本研究成果を、魚類の種の保全のあり方（河川整備計画等）だけでなく、具体的な河川改修計画、河川構造物の設計指針にも反映させる。

本研究は上記の目標に対し以下のように設定した。

1) 「寒冷地魚類の行動特性と河川構造物による影響の把握」について、美利河ダム周辺（減水区間、魚道、上流区間）のサクラマス親魚における産卵遡上特性とダムが実施する弾力管理放流の遡上促進効果を調査した。

2) 「テレメトリーシステム等を用いた、流れに対する魚類の生理・行動学的影響の把握」について、美利河ダムの魚道や河川構造物（分水施設）の魚類通過の機能評価を行うため、サクラマス幼魚の降下行動を調査した。

3) 「氾濫原における「移入種・外来種」の侵入状況及び影響の把握」について、石狩川旧川群に生息する魚類について、移入種・外来種の侵入状況および在来種の生息状況の長期的変遷の把握および評価を行った。

4) 「健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法の開発」について、石狩川河口から発信機付シロザケを放流し上流産卵場までの産卵遡上行動の把握を行った。

2. 寒冷地魚類の行動特性と河川構造物による影響の把握

2.1 はじめに

河川横断工作物は、回遊魚や生息魚類の生息場や産卵場までの往来を制限したり完全に不可能にしたりする。そのため、特にサケ科魚類のような遡河回遊魚が産卵場まで到達できるように、河川横断工作物には様々な魚道が設置された。魚道の目的は、ストレス・怪我・遡上遅れ・致死ができる限り少なく、魚類を短時間で上流へ遡上させることである¹⁾。この目的を達成するために、魚道内流速を魚類の遊泳力よりも低くする必要ある²⁾。これは、魚道内の流水の持つエネルギーを制御・分散しなければならないことを意味している。プールタイプ（バーチカルスロット型魚道やロックランプ魚道など）の魚道でも、同じように魚道内のエネルギーの制御・分散が必要とされる³⁾。そのため、水理的な魚道研究が行われ、その成果として工学的観点の魚道が数多く建設された。

サケ科魚類における魚道の野外調査は、今まで数多く行われ、魚道は入り口に進入しづらく魚道内を遡上が困難であるという多くの報告がされている^{2,4)}。今までの魚道調査として、魚道の上下流でトラップ調査、ビデオ撮影、魚類調査（電気ショッカーを使用）などが行われてきた。その後、魚道の効率の良さを示す遡上率という考え方を取り入れてきた⁵⁾。この遡上数や遡上率は、魚道の短期間の成果を把握する上では便利ではあるが、魚道入り口への進入状況、魚道の通過時間は不明のままであり、魚類は上流へ向かっているのか下流へ向かっているのかもわからない。一方、近年のバイオテレメトリー技術の発展により、自然環境下における魚の行動を把握することが可能になった^{6,7)}。そのため、魚道内でも魚類の行動を詳細に調査することが可能になった。

本研究で用いた Electromyogram (EMG) 発信機は、遊泳する魚類の筋肉活動の強度を把握することができ⁸⁾、サケ科魚類の調査に広く使用されてきた^{9,12)}。魚類の遊泳行動は、巡航速度と突進速度の2つに分類され、魚は周辺環境に応じて遊泳速度を使い分ける¹⁰⁾。魚が体内に持つエネルギーは、遡上行動時にどの速度を選択するかにより大きく影響を受ける^{13,14)}。そのため、様々な魚類の遊泳行動を評価するた

めに、発信機から得られた EMG 値より遊泳行動、エネルギー代謝を推定し魚類の行動を評価してきた。

シロザケ (*Oncorhynchus keta*) は、北海道に広く分布する遡河回遊魚である^{15,16)}。この種は、採餌するために海へ降下しその後再生産のために生まれた母川へ遡上を行う。そのため、シロザケは河川の連続性の分断に大きな影響を受ける。成熟したシロザケが魚道を最小限の努力で遡上できることが重要である。日本では、河川や比較的小さい構造物である床止めで、バイオテレメトリー手法を用いたシロザケの行動が報告されている^{17,18)}が、大型構造物におけるシロザケの遡上行動についてはほとんど知られていない。

石狩川はシロザケにとって重要な生息場である。石狩川には、頭首工と呼ばれる河川横断工作物が多く設置され、頭首工には魚道も設置されている。石狩川では旧花園頭首工が、シロザケが上流へ遡上する際に最初に通過しなければならない河川横断工作物である。旧花園頭首工は、バーチカルスロットとロックランプの2つの魚道が設置されている。右岸のバーチカルスロット魚道は、入り口が頭首工から 60m 下流に位置し、魚類が魚道の入り口を見つけられず、頭首工直下で顔を出すなどの迷走も見られる。そのため、左岸には魚道入口の見つけやすいロックランプ魚道が設置されている。

既往の魚道研究では、1つの構造物に設置された1つの魚道の評価したもの^{19,20)}、異なる場所の魚道を比較したもの^{21,22)}がほとんどである。1つの構造物に設置した2つの魚道の有効性を比較した研究はほとんどないのが現状である。

本研究の目的は、2つの魚道の有効性を評価するために旧花園頭首工に回帰したシロザケの遡上行動比較することである。我々は、シロザケの2つの魚道の入り口の進入状況と、通過状況（遊泳速度、通過時間、エネルギー消費）を把握するため、バイオテレメトリー手法を用いた。本研究の結果は、魚道がシロザケの遡上行動に与える影響に関する知見となり、ダムのような河川横断工作物で分断された河川を魚道で連結する際の有益な情報となる。

2.2 調査方法

2.2.1 研究範囲

石狩川は、流域面積 14,330 km²、幹川流路延長 268 km の一級河川である。研究範囲は、石狩川旧花園頭首工周辺である（図-1）。花園頭首工（2000年以

降は旧花園頭首工, KP 121.4) は 1964 年に深川市に建設された。シロザケは、石狩川上流の上川盆地で産卵していたが、頭首工建設後は 36 年間魚類の遡上が完全に不可能となっていた。その後、2000 年には、頭首工の機能が不要となり床止め部のみが残され

(高さ: 4.3m)、同時に、シロザケなどの魚類が上流へ移動できるようバーチカルスロット魚道が右岸側に設置された。バーチカルスロット魚道は、28 のプールから成り、そのうち 2 つのプール (プール 11, 16) は 180° 進行方向が反転する。延長は 127m、幅員 4m (上流 3 つのプールは 7.5m)、勾配 1/20 である (図-1)。また、2011 年にはロックランプ魚道 (魚道入り口がみつけやすい) が、左岸側に建設された。16 のプールから成り、そのうち 2 つ (プール 2, 15) が 90° 曲がり、1 つ (プール 9) は魚類の休憩プールとして設置されている。延長は 85.2m、幅員 6m、勾配 1/16 である (図-1)。

2.2.2 シロザケ採捕と調査方法

調査は 2010~2012 年の 8 月から 11 月に実施した。シロザケは 66 尾 (オス 39 尾、メス 27 尾; 平均体長 60.2 ± 6.3 cm、平均体重 2.67 ± 0.82 kg) を用いた。本研究で用いるシロザケは、魚道の上流端に仕掛けたトラップ、刺網を用いて採捕された。

2 つの魚道の有効性を評価するため 2 つの実験を行った。1 つ目は、遡上してきたシロザケがどちらの魚道を選択するかを把握するため、旧花園頭首工の 500m 下流から発信機を装着したシロザケを放流した (図-1)。2 つ目は、シロザケの遊泳行動を把握するため、魚道内部に発信機を装着したシロザケを放流し追跡を行った (図-1)。この調査により魚道の通過時間や遊泳速度の把握が可能となる。

2.2.3 発信機装着

電波発信機のデータは陸上で人が魚を追尾し捕捉することができる。電波は数百 m 離れても受信できるため、河川近傍の道路上からでも電波の確認は可能である。河川水中内に設置した超音波受信機は、自動的に超音波発信機のデータとして通過時間と ID を記録することから、固定局として有効である。シロザケには電波と超音波の両方の発信機を装着し、超音波による受信機間の行動と、電波による行動の把握を同時に行う両方発信機の特徴を活かすことを試みた。

電波発信機は、位置のみを測定できる MCFT 発信機 (以下、MCFT とする、MCFT2-3EM, Lotek 社製: 直径 12mm、全長 5mm、重量 10g) と、自由遊泳する

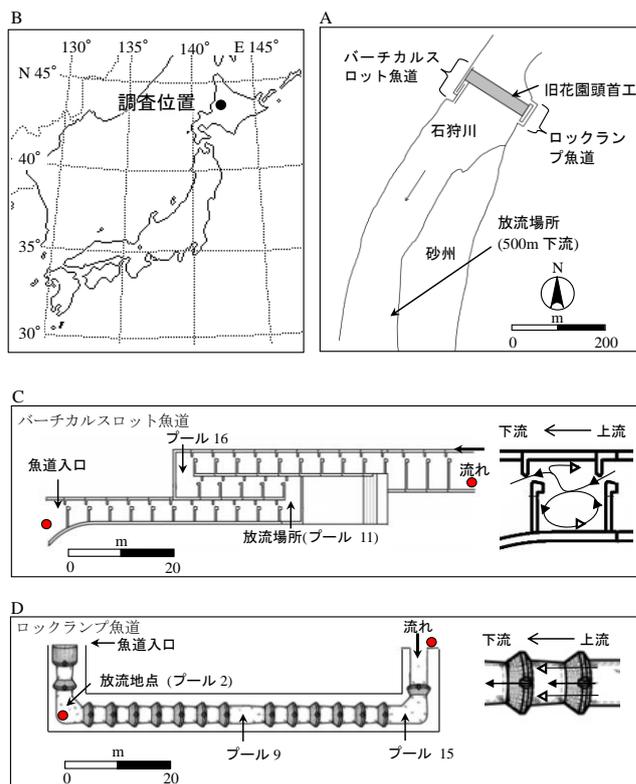


図-1 旧花園頭首工の概略図 (A)、発信機を装着した魚は旧花園頭首工の 500m 下流より放流された。B は調査地を示す。C はバーチカルスロット魚道の概略図を示す。発信機を装着した魚は流速の遅いプール 11 より放流された (矢印の位置)。D はロックランプ魚道の概略図を示す。発信機を装着した魚は、各魚道内の流速の遅いプールより放流された (矢印の位置)。右側の図は、バーチカルスロット魚道およびロックランプ魚道の代表的なプールの一般的な平面的流況を示す。魚類は、各魚道内の白三角部分に多くの時間定位する。●は超音波受信機の設置位置を示す。

魚の筋肉活動の強度と位置を測定できる EMG 発信機 (以下、EMG とする、CEMG-R11-35, Lotek 社製、直径 11mm、全長 62mm、重量 12g) の 2 種類を使用した。両電波発信機ともに 2 秒間隔でデータが発信される。MCFT は旧花園頭首工下流より各魚道の選択性の把握を行うために 24 尾に装着した。EMG は各魚道内でのシロザケの遊泳能力の把握をするために 42 尾に装着した。採捕したすべてのシロザケに、超音波発信機 (V9-2L-R64K 型, Vemco 社製: 直径 9mm、全長 29mm、重量 4.7g) を装着した。超音波発信機は 69kHz・142db の超音波を 10~30 秒間隔で発信するように設定されている。

各発信機は背ビレの前側の部分に外部装着した(図-2)。外部装着は短期間での調査に適しており、装着するストレスが体内装着や胃内装着と比較して少ない¹⁰⁾。各発信機を装着するために、シロザケに麻酔(FA100, 田辺製薬,大阪)を0.5ml/lの濃度で約4分間施した。麻酔の際は、石狩川の水を使用した。麻酔後、シロザケは手術台に乗せられ、手術が行われた。電波発信機に取り付けた2本のロックタイを、それぞれステンレスニードルの後ろに差し込み、背部の筋肉に貫通させた。その後、ステンレスニードルだけを取り外し、電波発信機とは魚体の反対側で超音波発信機をロックタイに通し、ロックタイのタイを通すことで両発信機の固定を行った。魚体の左側が電波発信機、右側が超音波発信機となる(図-2)。MCFTは本体とエポキシコーティングされた1本のアンテナから構成されている。EMGは、本体とエポキシコーティングされた1本のアンテナと2本の電極から構成され、各電極の先にはチップ(真鍮製, 直径5mm×φ1mm)が付いている。2つのチップは皮下注射ニードルを用い、魚体のうち、頭から7割程度の側線部の皮下に1cm離して埋め込まれた。電極は植物や流下物などが引っかかり魚体からチップが外れることを防止するために、4箇所を魚の皮膚と縫合した。装着手術時間は超音波+MCFTで約1分間、超音波+EMGで約4分間を要する。手術終了後、回復のために6~24時間²³⁾、河川内に設置した生簀で養生後、放流を行った。

2.2.4 発信機装着

電波発信機からの信号は、電波受信機(SRX_600, Lotek社製)と八木アンテナの組み合わせにより受信が可能である。電波の強度と指向性により魚の位置を取得できることから、電波発信機から発信されるデータを基に1日1回、河川・魚道内におけるシロザケの位置出しを行った。EMG装着魚は魚道内に放流後(図-1)、そのまま追尾を行った。EMG値は、0~50(単位なし)の相対値で発信され、受信機に記録される。また、魚道内におけるシロザケの消費エネルギーを比較するため、エネルギーインデックス(EI)が計算された。EIは、EMG値と各場所に滞在した合計時間を乗じる以下の公式により算出される²⁴⁾。本研究では、各魚道のエネルギーインデックス(単位なし)を比較するため、1mあたりの値を以下の式により算出した。

$$EI = \text{平均EMG値} \times \text{合計滞在時間 (h)} \cdots (1)$$



図-2 発信機装着状況

超音波発信機からの信号は、超音波受信機(VR2W, Vemco社)をバーチカルスロット魚道とロックランプ魚道の下流端・上流端にそれぞれ1箇所合計4箇所に設置(図-1)し、データを受信した。超音波データは3日に一度回収を行った。

2.2.5 EMG値の遊泳速度への校正

EMG値は魚の遊泳速度と相関がある¹¹⁾ことから、流速可変式回流水槽を用い、EMG値と遊泳速度の校正実験を行った。ただし、旧花園頭首工周辺に回流水槽を設置することが困難であったため、豊平川で採捕した産卵間近のシロザケ8尾(平均体:62.1±4.9cm、平均体重=1.9±0.7kg, オス4尾, メス4尾)にEMG発信機を装着し、校正実験を行った。校正実験は回流水槽の設置してある千歳サケのふるさと館(千歳市)の敷地内で行われた。実験には千歳川の水を用い、実験毎に回流水槽内の水を交換した。流速は0m/sからスタートし、120cm/sまで30cm/sごとに流速を上げた。EMG値は10データを得た段階で、水槽内の流速を次の流速へ上げた。得られたEMG値と流速の関係を整理するため、散布図を作成し回帰直線を求めた。

2.3 結果

2.3.1 バーチカルスロット魚道とロックランプ魚道内における遡上行動

バーチカルスロット魚道に放流した26尾のシロザケのうち、4%がそのまま遡上に成功、4%が魚道外へ降下した後再びバーチカルスロット魚道を遡上、15%が魚道外へ降下した後ロックランプ魚道を遡上、31%が魚道内で数段のプールを遡上と降下を繰り返し結局魚道外へ降下、46%が放流後そのまま魚道外へ降下した(表-1)。バーチカルスロット魚道を遡上成功する割合は小さく、降下する割合は非常に大きかった。また、数段のプールを遡上と降下を繰り返すシロザケの割合は大きかった。ロックランプ魚道に放流した17尾のシロザケのうち、29%がそのまま遡上に成功、6%が魚道外へ降下した後バーチカル

表 - 1 調査尾数、平均体長 (±標準偏差)、平均体重 (±標準偏差)、バーチカルスロット魚道、ロックランプ魚道、旧花園頭首工500m下流で放流した各シロザケ群の行動状況

放流場所	尾数	体長 (cm)	体重 (kg)	行動状況			
				魚道上流へ遡上	魚道外へ降下後、バーチカルスロット魚道を遡上	魚道外へ降下後、ロックランプ魚道を遡上	魚道内で数段の遡上と降下を繰り返し、その後魚道外に降下
バーチカルスロット魚道	26	62.3 ± 6.6	2.75 ± 0.83	4%	4%	15%	31%
ロックランプ魚道	16	58.5 ± 5.4	2.61 ± 0.86	31%	6%	13%	19%

放流場所	尾数	体長 (cm)	体重 (kg)	行動状況		
				バーチカルスロット魚道を遡上	ロックランプ魚道を遡上	各魚道への接近なし
500 m 下流	24	57.3 ± 5.1	2.54 ± 0.77	17%	50%	33%

表 - 2 魚道内における平均遊泳速度、通過時間、1 mあたりのエネルギーインデックス (±標準偏差)

	平均遊泳速度 (BL s ⁻¹)		魚道の平均通過時間 (分)	魚道1mあたりのエネルギーインデックス(EI)
	隔壁遡上時	プール定位時		
バーチカルスロット魚道	1.71 ± 0.40 (4)	0.80 ± 0.47 (4)	160 ± 52 (6)	12.54 ± 5.61 (4)
ロックランプ魚道	1.67 ± 0.24 (7)	0.67 ± 0.11 (7)	82 ± 42 (14)	5.28 ± 4.53 (7)
P value	>0.05	>0.05	<0.003 **	<0.04 ***

*カッコ内の数字は、解析に用いた魚の数を示す。

** Students t test, *** Welch's t test

スロット魚道を遡上、12%が魚道外へ降下した後再びロックランプ魚道を遡上、18%が魚道内で数段のプールを遡上と降下を繰り返し結局魚道外へ降下、35%が放流後そのまま魚道外へ降下した(表-1)。ロックランプ魚道の遡上に成功する割合は大きかった。

旧花園頭首工の下流500mより放流したシロザケ24尾のうち、17%がバーチカルスロット魚道の上流端まで遡上、50%がロックランプ魚道の上流端まで遡上、33%が両魚道への接近がなかった(表-1)。下流に放流したシロザケの内、バーチカルスロット魚道とロックランプ魚道の割合は1:3であった。

バーチカルスロット魚道とロックランプ魚道の隔壁遡上時及びプール内での定位時の遊泳速度には顕著な差は見られなかった(表-2)。各魚道の平均通過時間は、バーチカルスロット魚道が160 ± 52分、ロックランプ魚道が82 ± 42分となり、バーチカルスロット魚道の方が優位に大きかった(Student's t-test P < 0.003)。各魚道の1mあたりのEIは、バーチカルスロット魚道が12.54 ± 5.61、ロックランプ魚道が5.28 ± 4.53とバーチカルスロット魚道の方が優位に大きかった(Welch t-test P < 0.04)。

2つの魚道の遡上・降下時におけるEMG値の変動係数を図-3に示す。最も大きい変動係数は、バーチ

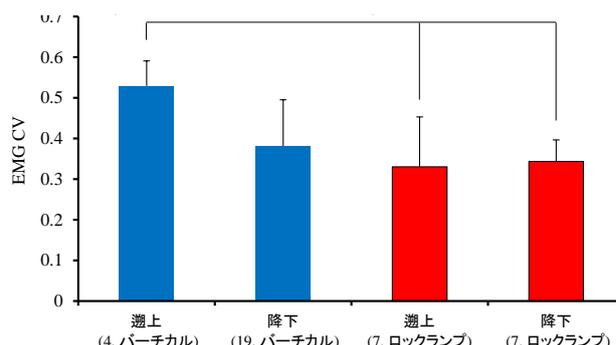


図 - 3 2つの魚道の遡上時と降下時におけるEMG値の変動係数

カッコ内の数字は、解析尾数と魚道タイプを示す
* : データ同士の優位な差を示す

(Tukey-Kramer test P < 0.03)

カルスロット魚道の遡上時であり、バーチカルスロット魚道の降下時、ロックランプ魚道の遡上時、そしてロックランプ魚道の降下時と続く。ロックランプ魚道の遡上時・降下時の変動係数はほとんど同じであり、そして、バーチカルスロット魚道の遡上時の変動係数と比べそれぞれ優位に小さいことが明らかになった(Tukey-Kramer test P < 0.03)。

2.4 考察

本研究は、石狩川旧花園頭首工に設置されたタイプの異なる2つの魚道におけるシロザケの遡上行動

を、バイオテレメトリー手法を用いて調査した。その結果、2つの魚道内におけるシロザケの遊泳の違いが明らかになった。ロックランプ魚道に放流したシロザケは、上流への遡上成功率が高く、魚道外へ降下した魚の割合は比較的小さかった。また、バーチカルスロット魚道の通過時間は、ロックランプ魚道と比較して大きいことが明らかになった。この原因として、魚道内の水理特性の違いである可能性が考えられる。魚道内の平面的な流況を考えた場合、バーチカルスロット魚道は大部分を反時計回りの流れが占め、ロックランプ魚道の流れはいつも下流を向いている。魚は向流性(流れに向かって泳ぐ性質)により、バーチカルスロット魚道内では、下流を向いて定位し、一方、ロックランプ魚道内では、上流を向いて定位する(図-4)。この結果、バーチカルスロット魚道内では、上流へ遡上する際にシロザケは180°の反転が各プールで必要となる。加えて、バーチカルスロット魚道の遡上時のEMGの変動係数は、ロックランプ魚道と比較して著しく大きい

(Tukey-Kramer test $P < 0.03$) ことから、バーチカルスロット魚道の方が遡上する際、困難であると考えられる。加えて、バーチカルスロット魚道内で放流後にシロザケは、頻繁に水面上に頭を上げているのが確認された。サケ科魚類は、海洋で地磁気、日長(日の出と日の入り)、太陽コンパス、磁気コンパスを用いて航海することが知られている²⁵⁾が、湖や河川では目視でも方向を確認すると報告されている²⁶⁾。そのため、魚道内で進む(上流)方向に迷った場合、目視により現在位置の確認をしながら遡上を行うと考えられる。そのため、バーチカルスロット魚道内では、魚はどちらが上流かを判断しづらい状況にあったと考えられるため、放流後一度降下して再遡上する割合と、魚道内で遡上と降下を繰り返す行動の割合が高かったと考えられる。加えて、目視を用いてもどちらが上流か不明の場合、魚は上流方向の判断がつく場所まで降下すると考えられる。

Hinch and Rand¹³⁾ や Pon ら²⁷⁾ は、バーチカルスロット魚道にベニザケを放流した後、魚は約50%が降下したが、テレメトリー研究を行う上で、これはよく起きることと報告している。この原因も、魚道内の水理的な原因により魚が降下してしまった可能性が考えられる。また、魚道内の遊泳速度には、魚道ごとの違いは確認されなかったが、エネルギーインデックスではバーチカルスロット魚道が有意に大きいことが確認された(Student t test $P < 0.003$)。つま

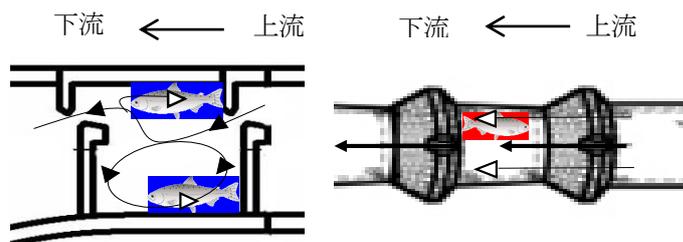


図-4 両各魚道内におけるシロザケの定位方向の違い(左:バーチカルスロット、右:ロックランプ)

り、バーチカルスロット魚道は、1つのプールの滞在時間が大きかったため、魚道の遡上時間がロックランプ魚道よりも大きかった。これらのことから、シロザケの遡上効率という点から考えるとロックランプ魚道はバーチカルスロット魚道よりも優れた構造になっていると考えられる。

500m下流からシロザケを放流した結果、ロックランプ魚道の遡上選択率が高いことが明らかになった。この原因として、バーチカルスロット魚道の入口が頭首工から約60m離れていることが考えられる。魚は右岸の入口を見つけられないまま遡上してしまうと、頭首工により遡上を妨げられてしまう。そして左岸から遡上したシロザケも右岸の魚道入口を発見することは難しい。魚道に進入できないシロザケは、頭首工自体を遡上しようと頭首工直下で何度も飛び跳ねる姿が観察された。一方、ロックランプ魚道の入口は、頭首工直下に集まったシロザケが入口を発見しやすい位置にあるため、多くのシロザケがロックランプ魚道を選択したものと考えられる。ただし、バーチカルスロット魚道とロックランプ魚道のシロザケの到達割合は1:3であり、バーチカルスロット魚道が全く機能していないわけではないことが判明した。今後の課題として、バーチカルスロット魚道の改良を行い、シロザケを安定的に遡上させる工夫を行うことも重要である。

本研究では、1つの河川横断工作物に設置された形式の異なる2つの魚道の機能の比較を行った。その結果、ロックランプ魚道の遡上効率の良さが明らかになった。しかしながら、どの魚道にも長所短所がある。たとえば、バーチカルスロット魚道は水位変動に強く^{28,29)}、ロックランプ魚道は土砂堆積が少なく魚道閉塞がしづらいという特徴がある³⁰⁾。一方で、バーチカルスロット魚道は土砂堆積や流木による閉鎖に弱く、ロックランプ魚道は水位変動(水位が低いと魚の遡上が困難になる)に弱い。そのため、石狩川旧花園頭首工のように形式が異なる魚道を設

置することは、不慮の事故により魚が遡上不能になる可能性をより減らすことができる。水産有用種や貴重種が遡上しなければならない箇所には、異なるタイプの魚道を左右岸に設けることが望ましい。

魚道は、全世界で膨大な数が設置されているが^{11, 31)}、その機能について判明していないことは数多くある。そのため、魚道の特性をより正確に解析するために、様々な魚道内における様々な魚類の遊泳行動を評価すべきである。魚道内や周辺の魚類の遊泳行動データを収集することは、魚道の入り口へ魚を導き、魚道内をスムーズに移動させるためにとっても重要である。

参考文献

- 1) Orsborn JF. Fishways—historical assessment of design practices. In: Dadswell MJ, Klauda RJ, Moffitt CM, Saunders RL, Rulifson RA, Cooper JE, eds. *Common strategies of anadromous and catadromous fishes, Proceedings of an international symposium*. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society 1987:122-30.
- 2) Baumgartner LJ, Marsden T, Singhanouvong D, Phonekhampheng O, Stuart IG, Thorncraft G. Using an experimental in situ fishway to provide key design criteria for lateral fish passage in tropical rivers: a case study from the Mekong River, Central Lao Pdr. *River Res Appl*. 2012 Oct;28(8):1217-29.
- 3) Bestgen KR, Mefford B, Bundy JM, Walford CD, Compton RI. Swimming performance and fishway model passage success of Rio Grande silvery minnow. *Trans Am Fish Soc*. 2010 Mar;139(2):433-48.
- 4) Naughton GP, Caudill CC, Peery CA, Clabough TS, Jepson MA, Bjorn TC, et al. Experimental evaluation of fishway modifications on the passage behaviour of adult Chinook salmon and steelhead at Lower Granite Dam, Snake River, USA. *River Res Appl*. 2007 Jan;23(1):99-111.
- 5) Santos JM, Ferreira MT, Godinho FN, Bochechas J. Efficacy of a nature-like bypass channel in a Portuguese lowland river. *J Appl Ichthyol*. 2005 Oct;21(5):381-8.
- 6) Cooke SJ, Hinch SG, Wikelski M, Andrews RD, Kuchel LJ, Wolcott TG, et al. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends Ecol Evol*. 2004 Jun;19(6):334-43.
- 7) Ueda H. Recent biotelemetry research on lacustrine salmon homing migration. *Mem Natl Inst Polar Res*. 2004;58:80-8.
- 8) Weatherley AH, Rogers SC, Pincock DG, Patch JR. Oxygen consumption of active rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson, derived from electromyograms obtained by radiotelemetry. *J Fish Biol*. 1982;20(4):479-89.
- 9) Pon LB, Hinch SG, Cooke SJ, Patterson DA, Farrell AP. A comparison of the physiological condition, and fishway passage time and success of migrant adult sockeye salmon at Seton River Dam, British Columbia, under three operational water discharge rates. *N Am J Fish Manage*. 2009 Oct;29(5):1195-205.
- 10) Hinch SG, Rand PS. Optimal swimming speeds and forward-assisted propulsion: energy-conserving behaviours of upriver-migrating adult salmon. *Can J Fish Aquat Sci*. 2000 Dec;57(12):2470-8.
- 11) Roscoe DW, Hinch SG. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish Fish*. 2010 Mar;11(1):12-33.
- 12) Mallen-Cooper M, Brand DA. Non-salmonids in a salmonid fishway: what do 50 years of data tell us about past and future fish passage? *Fish Manag Ecol*. 2007 Oct;14(5):319-32.
- 13) Hinch SG, Rand PS. Swim speeds and energy use of upriver-migrating sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): role of local environment and fish characteristics. *Can J Fish Aquat Sci*. 1998 Aug;55(8):1821-31.
- 14) Standen EM, Hinch SG, Healey MC, Farrell AP. Energetic costs of migration through the Fraser River Canyon, British Columbia, in adult pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and sockeye (*Oncorhynchus nerka*) salmon as assessed by EMG telemetry. *Can J Fish Aquat Sci*. 2002 Nov;59(11):1809-18.
- 15) Miyakoshi Y, Urabe H, Saneyoshi H, Aoyama T, Sakamoto H, Ando D, et al. The occurrence and run timing of naturally spawning chum salmon in northern Japan. *Environ Biol Fishes*. 2012 May;94(1):197-206.
- 16) Morita K, Saito T, Miyakoshi Y, Fukuwaka MA, Nagasawa T, Kaeriyama M. A review of Pacific salmon hatchery programmes on Hokkaido Island, Japan. *ICES J Mar Sci*. 2006;63(7):1353-63.
- 17) Makiguchi Y, Konno Y, Konishi K, Miyoshi K, Sakashita T, Nii H, et al. EMG telemetry studies on upstream migration of chum salmon in the Toyohira River, Hokkaido, Japan. *Fish Physiol Biochem*. 2011 Jun;37(2):273-84.
- 18) Makiguchi Y, Nii H, Nakao K, Ueda H. Migratory behaviour of adult chum salmon, *Oncorhynchus keta*, in a reconstructed reach of the Shibetsu River, Japan. *Fish Manag Ecol*. 2008 Oct-Dec;15(5-6):425-33.
- 19) Caudill CC, Daigle WR, Keefer ML, Boggs CT, Jepson MA, Burke BJ, et al. Slow dam passage in adult Columbia River

- salmonids associated with unsuccessful migration: delayed negative effects of passage obstacles or condition-dependent mortality? *Can J Fish Aquat Sci.* 2007 Jul;64(7):979-95.
- 20) Bunt CM, Cooke SJ, McKinley RS. Assessment of the Dunnville fishway for passage of walleyes from Lake Erie to the Grand River, Ontario. *J Gt Lakes Res.* 2000;26(4):482-8.
- 21) Bunt CM, Castro-Santos T, Haro A. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Res Appl.* 2012 May;28(4):457-78.
- 22) Franklin AE, Haro A, Castro-Santos T, Noreika J. Evaluation of nature-like and technical fishways for the passage of alewives at two coastal streams in New England. *Trans Am Fish Soc.* 2012;141(3):624-37.
- 23) Hayashida K, Nii H, Tsuji T, Miyoshi K, Hamamoto S, Ueda H. Effects of anesthesia and surgery on U_{crit} performance and MO_2 in chum salmon, *Oncorhynchus keta*. *Fish Physiol Biochem (in press)*. 2012.
- 24) Scruton DA, Booth RK, Pennell CJ, Cubitt F, McKinley RS, Clarke KD. Conventional and EMG telemetry studies of upstream migration and tailrace attraction of adult Atlantic salmon at a hydroelectric installation on the Exploits River, Newfoundland, Canada. *Hydrobiologia.* 2007 May;582:67-79.
- 25) Quinn T, Dickerson B, Vollestad L. Marine survival and distribution patterns of two Puget Sound hatchery populations of coho (*Oncorhynchus kisutch*) and Chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) salmon. *Fish Res.* 2005;76(2):209-20.
- 26) Ueda H. Physiological mechanism of homing migration in Pacific salmon from behavioral to molecular biological approaches. *Gen Comp Endocrinol.* 2011;170(2):222-32.
- 27) Pon LB, Hinch SG, Cooke SJ, Patterson DA, Farrell AP. Physiological, energetic and behavioural correlates of successful fishway passage of adult sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* in the Seton River, British Columbia. *J Fish Biol.* 2009;74(6):1323-36.
- 28) Clay CH. Design of Fishways and Other Fish Facilities. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 1995.
- 29) Rajaratnam N, Vandervinne G, Katopodis C. Hydraulics of vertical slot fishways. *J Hydraul Eng-Asce.* 1986 Oct;112(10):909-27.
- 30) Yasuda Y, Ohtsu I, Takahashi M. New portable fishway design for existing trapezoidal weirs. *J Environ Eng Sci.* 2004 Sep;3(5):391-401.
- 31) Castro-Santos T, Cotel A, Webb PW. Fishway evaluations for better bioengineering: an integrative approach. In: Haro AJ, Smith KL, Rulifson RA, Moffit CM, Klauda RJ, Dadswell MJ, et al., eds. *Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment*. Bethesda, MD: American Fisheries Society Symposium 2009:557-75.

3. テレメトリーシステム等を用いた、流れに対する魚類の生理・行動学的影響の把握

3.1 はじめに

サケ科魚類の行動パターンは、一般的に河川降下、海洋での採餌、航海、産卵のための河川遡上という4つのカテゴリに分類される¹⁾。このカテゴリのうち、河川降下は河川内でふ化したサクラマスなどの幼魚が成長するため春に海へ降下するものである。北海道では、サクラマス幼魚のすべてのメスがスマルト化（銀化）し降下する²⁾ことから、より多くの個体が海で成長し再び河川へ遡上し産卵できるよう、河川横断構造物や魚道などを速やかに通過し海へ降下することが重要である。降下行動を起こすサクラマス幼魚は、外観の特徴からスマルト度1~4で評価され、スマルト度1:ヤマメ（パー）、スマルト度2:背ビレのみ先端付近が黒色、スマルト度3:背ビレ及び尾ビレの先端付近が黒色だが腹ビレが黄色を帯びている、スマルト度4:完全に銀化していることを示す。幼魚のスマルト化とは、元々備わっていない海水適応能力が高まったことを示す³⁾。また、スマルト化していた個体も7月を過ぎるとスマルト度1に戻るとされている⁴⁾。河川内でのサクラマスの既往研究としては、幼魚の越冬環境⁵⁾、スマルト期（降下期）の生理・生態⁶⁾、親魚の生態（遡上時期・遡上数、卵）⁷⁾などが数多く報告されているが、幼魚（スマルトやヤマメ）の降下行動に関する研究はほとんどないのが現状である。

北海道後志利別川流域に生息するサクラマスは、主に8月~10月に各支川、魚道の多自然部、ダム湖へ流入するチュウシベツ川などへ遡上し産卵後、11月~12月にふ化、3月~5月にふ上、4月~10月に成長、11月~3月に越冬を行い、4月~6月にスマルト化（銀化）して降下を行うことが知られている。東北では秋季に降下する個体がわずかに確認されるが⁸⁾、一般的にサクラマス幼魚は、ふ化約15か月後のスマルト化した個体が、融雪時期に降下行動を示すものと考えられている。

北海道レッドデータブック⁹⁾によるとサクラマスは、保護に留意が必要とされる留意種に指定されている。そのため、美利河ダムでは魚道を建設し、サクラマスなど回遊魚の移動範囲の回復に努めてきた。魚道の上流接続地点は、ダム湖ではなくチュウシベツ川の上流地点であったため、この接続箇所には、スマルトなどの降下魚を

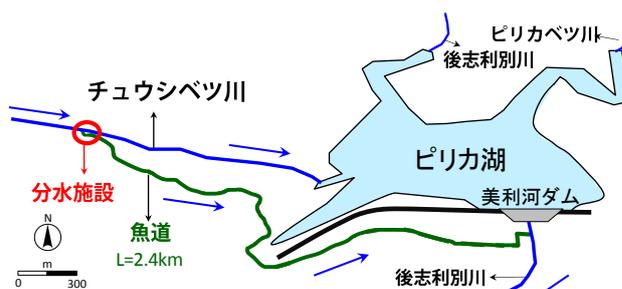


図-5 調査位置図

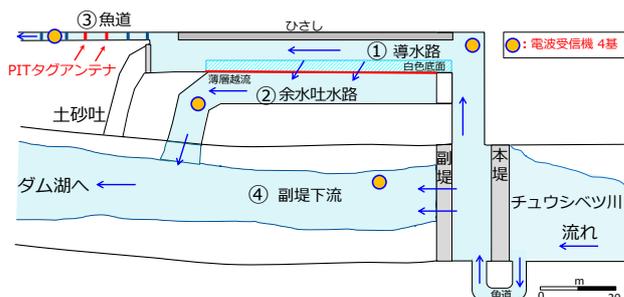


図-6 分水施設の詳細図

ダム湖ではなく魚道に導入するための分水施設がわが国で初めて設置されている（図-5、6）。しかし、分水施設では、融雪出水期のチュウシベツ川の流量が大きい場合、降下魚を含んだ流水が副堤下流（図-6; ④）からダム湖へ流下する可能性が懸念されていた。降下魚がダム湖へ降下してしまうと、海への降下が不可能となる。これまでダム管理所では、降下魚の行動を把握するため、リボンタグなどを装着した降下魚を分水施設内で放流し、ビデオカメラによる分水施設の機能調査を数年にわたり実施してきたが、降下魚の融雪出水時のチュウシベツ川から魚道までの降下状況、魚道内への降下割合と降下ピーク時期、7月以降の降下行動の有無などが未解明であった。

美利河ダムにおけるサクラマス幼魚の降下行動を定量的に解明するため、バイオテレメトリー機器であるPITタグ（Passive Integrated Transponder Tag、Biomark社）システムと電波追跡システム（Lotek社）を用いてチュウシベツ川から分水施設への降下状況、ダム湖への降下状況、魚道内への降下状況、降下行動と流量との相関状況を解析し、分水施設が降下魚に与える影響の評価を行った。バイオテレメトリーは、発信機を魚類に装着し行動や位置情報などの情報を取得する近年発達した技術である¹⁰⁾。

本研究の結果は、河川横断構造物での回遊魚行動の定量的評価を可能にするばかりでなく、分流施設

の新規建設（例えば、美利河ダムの魚道延伸や他ダムでの計画検討）を行う際の基礎資料を提供し、サクラマス幼魚、特にスモルトの降下行動の解明にも有益な情報となる。

3.2 調査研究方法

3.2.1 研究範囲および分水施設の機能

後志利別川は、北海道せたな町において日本海に注ぐ、幹川流路延長 80km、流域面積 720km² の一級河川である¹¹⁾。後志利別川の河口から 51.5km 地点に位置する美利河ダムは平成 3 年に完成し、魚道は平成 17 年に設置された。ダム直上にはピリカ湖（湛水面積 1.85km²、総貯水容量 18 百万 m³）と呼ばれるダム湖が存在する。ダム湖内の流れはほとんどなく、仮に魚道をダム湖に直接連結すると、降下魚が魚道入口を発見できない恐れがあったことから、チュウシベツ川の水を魚道へ分流入させる工夫が必要となった。そのため、魚道上流とチュウシベツ川の接続地点には、分水施設が魚道建設と同時に設置された。本研究の調査範囲はチュウシベツ川および分水施設を対象とした（図-5）。

分水施設では、チュウシベツ川から降下してきた流水や魚が、副堤下流やダム湖へ降下しないように、2つの堰（本堤・副堤）と魚道で導水路側へ導かれている。また、魚道内の流量を一定（0.5m³/s）に保つため、導水路の余水は余水吐水路からダム湖へ流下させている。降下魚が余水吐水路からダム湖へ降下しないように、導水路（図-6；①）は、1）図-6内の赤ラインに向かって導水路の水深を次第に浅くする（薄層越流）、2）薄層越流底面部の明度を上げるため白色（図-6斜線部）にする、3）余水吐水路の反対側をひさして明度の低い陰影部を創出する、という構造になっている。これは、サクラマス幼魚が明度の低い場所に入ると明度の高い場所に出るのをためらい¹²⁾、水表面を避けることから浅い箇所を忌避するという性質を活用して降下魚が余水吐水路に近寄らなくしたものである。また、スモルトの降下数が多いと想定された4月から6月の3か月間、夜間（日没～日出）に白色底面部をライトアップして明度を上げ、降下魚を24時間余水吐水路側に近寄せない取り組みを実施している。

調査を行った2013年の忠志別観測所で記録されたチュウシベツ川の時刻流量（1/1～12/31）を図-7に、分水施設入口時刻流量（4/11～7/2）を図-8に、チュウシベツ川の水温（1/1～12/31）を図-9に示す。

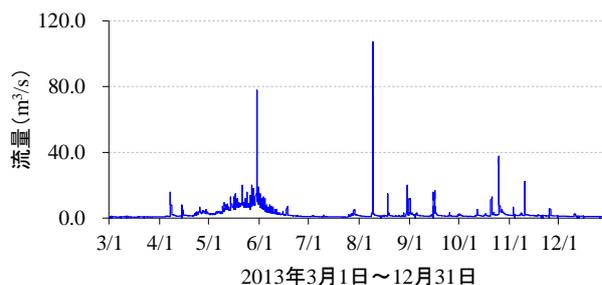


図-7 チュウシベツ川時刻流量（忠志別観測所）

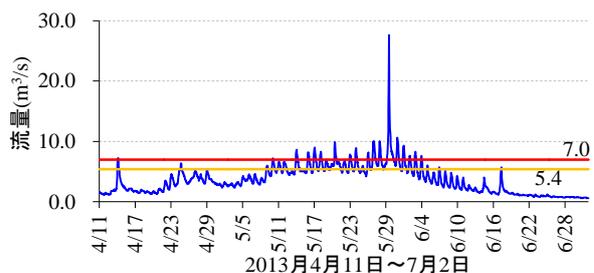


図-8 分水施設入口時刻流量



図-9 チュウシベツ川の水温

調査期間中のチュウシベツ川の流量は、4月中旬から5月下旬にかけて徐々に上昇し、6月下旬まで融雪出水の影響による流量の増加があった。融雪期終盤の5月30日には、まとまった降雨があり77.8m³/sが流下した。融雪期間における分水施設入口の流量は、気温の影響で日変動を示し、4月中旬から6月下旬まで増水していた。分水施設的设计流量は5.4m³/sであり、この流量以下であれば、副堤下流にはほとんど水が流れない。一方、流量が7.0m³/sを超えると、スモルトが副堤下流や余水吐水路に落下してしまう可能性が指摘されていた。5月上旬から6月上旬までは、常時5.4m³/sを上回り、その間、流量が7.0m³/sを超えた時期が数多くあった。調査期間中のチュウシベツ川の水温は、3月上旬から上昇し、8月中旬から下がり始めた。チュウシベツ川の年間の水温変化は、0.1°Cから22.3°Cの範囲であった。

3.2.2 調査機器装着とサクラマス幼魚放流

サクラマス幼魚の降下行動を解明するために、2種類のバイオテレメトリー機器を使用した。

1つ目の機器として、サクラマス幼魚の長期的な降下時期・時間を把握するため PIT タグシステム¹³⁾を使用した。PIT タグシステムは、PIT タグが装着された魚が固定式のアンテナ付近を通過することで、個体識別と通過日時の記録が自動的に可能となる。PIT タグのアンテナ (Biomark 社) は、魚道の隔壁上部と潜孔部にそれぞれ2基ずつ設置した (図-6)。2セット設置することで、魚の上・下流へのいずれかの移動が判断可能となる。チュウシベツ川と魚道内で、電気ショッカー、タモ網、魚道内トラップを用いて採取したサクラマス幼魚 514 尾 (平均尾叉長±標準偏差 10.9±4.14cm、平均体重±標準偏差 13.8±4.90g) には、PIT タグ (幅 2.1mm、長さ 12mm、重量 0.1g、Biomark 社) を装着した。装着方法は、専用ガンを用いて魚の左側腹腔内に挿入後、2~3mm の傷口部を生物用接着剤で固定し、外見から PIT タグ装着魚と判断できるようにボンタグを背ビレ基部に装着した。PIT タグ装着後、ヤマメ 286 尾 (スモルト度 1) を 3 月 30 日、スモルト 215 尾 (スモルト度 2~4) を採捕してから 1~2 日以内の 4 月 25 日から 5 月 21 日の間に放流を行った。スモルト度 1 の個体は、放流後速やかに降下するか不明であるのに対し、スモルト度 2 以上の個体は速やかに降下を行う³⁾と考えられたことから、スモルト度の 1 と 2~4 を分けて解析を行った。放流は、チュウシベツ川の採捕した場所の近傍で行った。ただし、分水施設内で採捕された個体は、分水施設の 30m 上流より放流した。おおよその放流場所は、スモルト度 1 の個体が分水施設の 600m 上流地点付近、スモルト度 2 以上の個体が分水施設の 30~50m 上流地点であった。PIT タグアンテナでの受信は 2013 年 3 月 30 日から 11 月 11 日まで連続的に実施した。

2つ目の機器として、サクラマス幼魚の降下行動 (特にダム湖への進入状況) を広範囲に把握するために電波追跡システムを使用した。電波発信機は、個体識別と位置を把握できるタイプ (NTQ-2、重量 0.3g、Lotek 社) を使用した。5 秒間隔でデータが発信され電池寿命は約 30 日間である。電波発信機は、分水施設内に設置した魚道トラップで採捕した 52 尾 (平均尾叉長±標準偏差 13.4±1.05cm、平均体重±標準偏差 25.9±5.87g、平均スモルト度: 3.8) に装着した。発信機を装着するために、スモルトに麻酔 (FA100、田村製薬) を 0.5ml/l の濃度で約 1 分間施した後、スモルトを手術台に乗せ手術を行った。殺菌したメスで左腹を開腹後、発信機本体を挿入し、

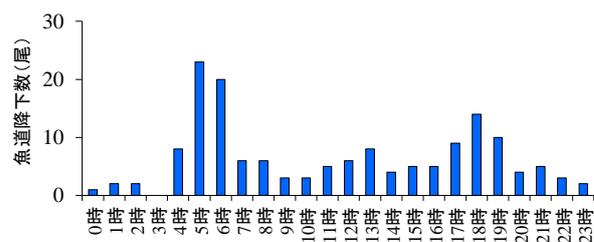


図-10 降下魚のアンテナ通過時間帯 (PIT タグ)

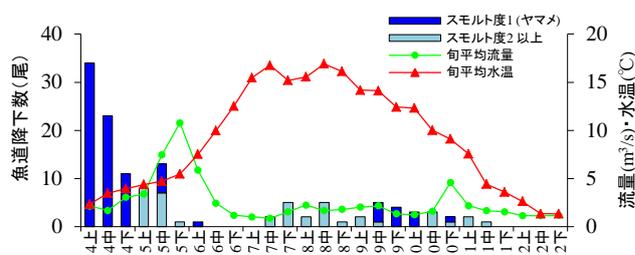


図-11 降下魚の降下時期 (PIT タグ)

開腹部を手術用の針と糸により縫合、あるいは生物用接着剤により固定した。装着後の傷口には、化膿を防ぐため抗生物質を塗布した。手術後 6 時間以上 14) 河川内で馴致後、分水施設の 30m 上流より放流を行った。放流は、流量が 7.0m³/s を超えて魚がダム湖への降下が懸念されていた 5 月 16 日から 6 月 11 日の間で約 4 日ごとに合計 6 回行った。放流個体は、1 回あたり 9 尾程度とした。電波発信機の信号 (個体識別 ID と時刻) は、電波受信機 (SRX_600、Lotek 社) と八木アンテナのセットで受信が可能となる。このセットを分水施設内に 4 か所設置した (図-6)。電波受信機による電波受信は、2013 年 5 月 16 日から 6 月 30 日まで連続的に実施した。

3. 3 結果

3.3.1 PIT タグによるサクラマス幼魚降下行動把握

図-10 に、PIT タグを装着した幼魚が魚道に設置した PIT タグアンテナを通過した時間帯を示す。2つのアンテナのうち上流側のアンテナのデータを解析に使用した。通過尾数が、最も多かったのは 5 時台で、続いて 6 時台、18 時台、19 時台の順であった。

図-11 に、PIT タグを装着した幼魚のスモルト度 (放流時期) の違いによるアンテナ降下時期を示す。スモルト度 1 の魚は、放流してから 10 日間以内の 4 月上旬が最も魚道通過数が多く、続いて 4 月中旬、下旬となっており、次第に降下数は減少していったが降下は 6 月上旬まで続いた。その後、降下する個体が確認されなくなったが、9 月中旬・下旬、10 月

下旬に再び降下が確認された。スモルト度2以上の魚は、5月上旬・中旬に降下する個体が多く、その後、降下個体が確認されなくなったが、9月中旬から11月上旬に再び降下が確認された。幼魚全体の降下行動は、4月上旬から11月中旬まで幅広く確認されたが、5月中旬までの降下行動は融雪出水のピーク以前に起き、5月下旬以降水温が約5°Cを超えると降下個体は減少することが明らかになった。一方、秋には、11月下旬以降水温が約5°Cを下回ると降下行動はほとんど確認できなくなった。

3.3.2 電波発信機によるサクラマス幼魚降下行動把握分析の結果

図-12に、電波発信機を装着して放流した52尾の通過地点の割合を示す。1尾は放流地点での滞留が確認されたため解析からは除外した。その1尾を除く全51尾の放流地点から各通過地点の割合をみると、副堤下流(図-6;④)に降下した個体が11.8%、分水施設内(図-6;①)に降下した個体が88.2%、余水吐水路(図-6;②)に降下した個体が7.8%、魚道(図-6;③)に降下した個体が80.4%であった。多くの個体が分水施設内に降下でき、流量が大きい時期であっても、その大部分が魚道に到達できることが明らかになった。また、分水施設に進入出来た個体45尾での割合をみると、魚道に到達できた個体は91.1%であり、導水路に進入出来れば、ほとんどの個体が余水吐水路へは降下せずに魚道を通過することが明らかになった。

図-13に、スモルトが降下した際の各地点での流量頻度分布を示す。どの流量で魚が各地点に到達したかを示すものである。I：放流地点での流量は、4~12m³/sの範囲にあり、9m³/s時に最も多くの個体が放流された。また、7m³/s以上の流量で69%の個

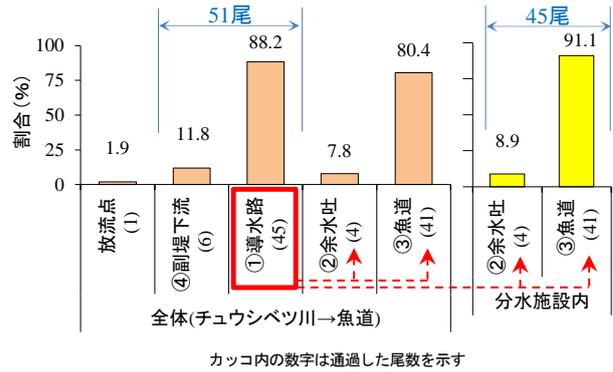


図-12 降下魚の各地点通過割合

体が放流された。II：副堤下流に降下した個体は、5~12m³/sまでの範囲であったが、流量帯ごとで各1尾ずつの降下であった。副堤下流でほとんどの降下魚が確認された流量は7m³/s以上であった。III：導水路に降下した際の流量は、4~12m³/sの範囲であり、9m³/s時が最も多く、5~8m³/sでも5~8尾と多い傾向にあった。通過は12m³/sでも3尾確認できた。分水施設的设计取水量(5.4m³/s)を超えた6m³/s以上の時に67%の個体が降下していた。7m³/s以上での副堤下流と導水路の降下数を比較すると、導水路へ降下する個体が多く、副堤への降下は少ないことが明らかになった。IV：余水吐水路に降下した個体は、4~8m³/sの範囲に分布していた。降下した個体は、流量帯ごとでそれぞれ1~2尾であった。V：魚道を通過した個体は、3~10m³/sの範囲に分布し、6m³/sが最も多かったが、8m³/s以下でも比較的多かった。7m³/s以上での余水吐と魚道の降下数を比較すると、魚道へ降下する個体が多く余水吐水路への降下は少ないことが明らかになった。

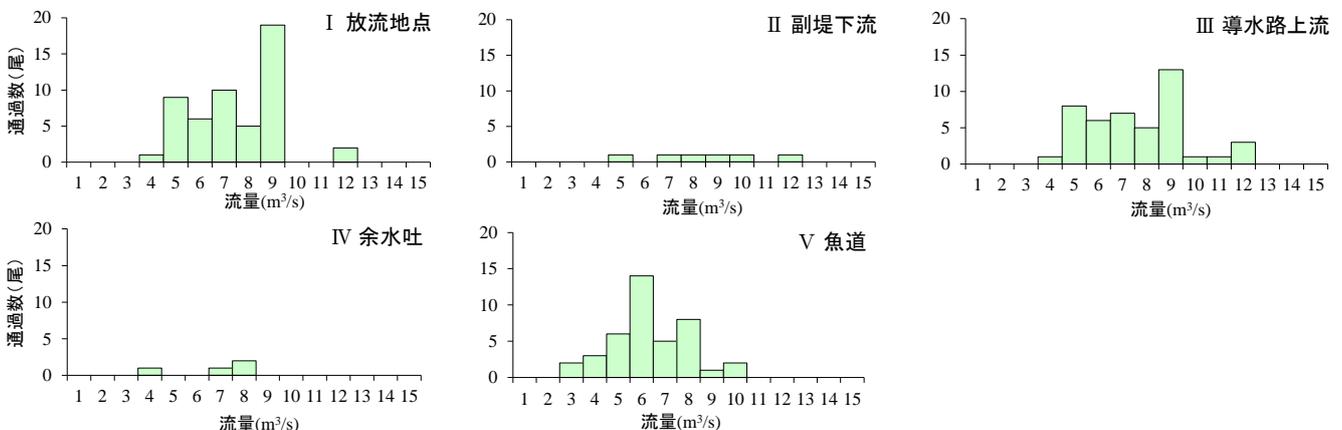


図-13 各地点のスモルト降下魚の流量頻度分布

3.4 考察

本研究では、美利河ダム上流に設置された分水施設周辺におけるサクラマス幼魚(スモルト・ヤマメ)の降下行動を、小型バイオテレメトリー機器(PITタグシステム・電波追跡システム)を用いて調査した。その結果、各発信機が持つ特性に応じたサクラマス幼魚の降下行動を明らかにすることができた。

3.4.1 PITタグによるサクラマス幼魚降下行動把握

降下魚が1日の中で5~6時と18~19時に2回降下のピークがあることが明らかになった。幼魚(ヤマメ)は、日中採餌を行い夜間は流れの緩い場所で滞留することが知られている¹⁵⁾。したがって、今回の行動パターンは、日出の前後に降下し摂餌を活性化させ、日没頃になると夜間の滞留箇所を探し移動する個体が多かったものと考えられる。サクラマス親魚の遡上活動も同様に日中に活性化し、夜間に停滞する日周変化を持つ¹⁶⁾ことから幼魚の降下と親魚の遡上の時間帯はほぼ同じであることが示唆された。また、この降下ピークの2つの時間帯に加え、6月上旬で幼魚のうちスモルトの降下は終わることが明らかになった。この結果、経費のかかるライトアップをスモルトの降下時間や時期に合わせて実施することが可能になる。つまり、現在は6月末まで一晩中行っているライトアップを、降下数の多い朝方と夕方に、6月上旬までにすることで大幅なコスト削減が可能となる。今後、スモルトの降下時期の年間変動を詳細に把握することや、分水施設内のライトアップを完全に止めた場合の降下行動の検証もコスト削減などの効率的な分水施設運用には必要である。

PITタグを装着・放流した際のスモルト度の進行度合いに違いはあるが、サクラマス幼魚は4月上旬から11月中旬まで幅広い降下行動をとることが明らかになった。スモルト度1の個体は、4月上旬、中旬に数多く降下することが明らかになった。既往調査による美利河ダム周辺のスモルト化した幼魚の降下行動は、おおよそ4月下旬から6月上旬まで観察されている。また、既往研究では、北海道内のスモルトの降下ピークは5月上旬から6月下旬とされる¹⁷⁻¹⁹⁾。そのため、3月中旬にPITタグを装着したこれらのサクラマス幼魚は、4月上旬や中旬ではまだスモルト度1であり、銀化が始まり降下を開始したとするには少し時期が早いと考えられる。しかし、PITタグを装着した際、ほとんどの幼魚の外見は河

川残留個体に特有の黒ずんだ色合いがほとんど見られず、1~2か月後にはスモルト度が進むと想定されていた。このことから、銀化が起きる前から生息場を次第に下流へ移し、海水への適応が完了し次第すぐに海へと降下できるよう、少しでも海に近付くため下流へ降下している可能性が考えられた。今までの降下行動調査では、スモルト度2以上になる時期から始めていたが、スモルト降下行動の詳細な把握には4月当初からの調査が必要であることが示唆された。

春季の降下行動が終わった後、スモルト度1の個体は、9月中旬から10月下旬、スモルト度2以上で7月中旬から11月上旬まで、降下行動が確認された。7月以降の魚はいずれもスモルト度1のヤマメである⁴⁾と考えられたため、このヤマメ個体の夏期以降の降下行動についてはチュウシベツ川の生息場の量や質に原因がある可能性がある。魚道が接続するチュウシベツ川は、分水施設の上流約2km地点に魚道のない治山ダムが設置されており、魚はこの地点より上流には移動出来ない。また、ヤマメは越冬を行う場合、流速が緩くエネルギー消費を低く抑え、捕食の危険性が少ない生息場を選ぶことが知られている^{20, 21)}。そのためチュウシベツ川の2km区間だけでは幼魚の生息数に対する生息場が不足しており、下流に生息場を求めて移動している可能性がある。幸い、美利河ダム魚道の延長2.4kmの内2.0kmは勾配の緩い(1/2000)多自然魚道でありヤマメの生息場には最適な箇所が存在する。魚道の多自然型部は、産卵場だけではなく越冬環境としても機能を有すると考えられたため、この機能を解明するため魚道の最下流地点にもPITタグのアンテナを2013年9月に設置した。今後、測定データを解析することで、降下魚の行動を蓄積することができ、分水施設や魚道のより詳細な評価が可能となることが期待されている。また、美利河ダム上流のヤマメの生息場拡大のため、ダム管理計画である魚道の後志利別川までの延伸は急務である。

スモルト度2~4の個体は、5月中に降下行動を示したが、一部は7月以降も検知され海に降下せず河川残留していた。本来、スモルト度進んだ個体は、速やかに降下行動を示すとされる³⁾が、降下行動をとらなかった原因として、降下を誘発するきっかけがなかったことが一因と考えられる。通常、降下を誘発するきっかけは、流量や濁度¹²⁾とされるが、5月末の大きい出水の流量ピーク前後10日間に降下

魚は全くアンテナに検知されていなかったように、本調査時の流量・濁度と降下行動の相関関係はほとんど見られなかった。木曾は、千曲川などではスマルト個体が降下を途中で止めて河川内にとどまると定性的に述べている⁸⁾。そのため、後志利別川でも同様にスマルト化魚類の降下行動の停止が起きていたと考えられる。この原因の1つは、5月末の出水以降の水温上昇が挙げられる。この出水を境に周辺の雪が消えチュウシベツ川の流量が減少し、水温が6月上旬で7°Cを超え、スマルトの降下は大幅に減少した。宮越ら²²⁾による後志利別川下流部の研究では、水温が6°C以上になると移動が止まると報告している。そのため、この出水時、分水施設の上流にいた個体は、スマルト度4であったとしても降下のタイミングを逃したのではないかと推察された。

分水施設の詳細な評価を行うには、降下タイミングの把握も重要である。そのため、融雪出水ピーク前に大部分が降下したことなどの原因解明には、降下魚の血液成分³⁾などの生理学的変化を詳細に解析し、また、単年度の調査結果だけではなく継続的な調査が必要である。

3.4.2 電波発信機によるサクラマス幼魚降下行動把握

本研究では、電波受信機の使用方法として、本来の可搬で使用するアンテナを設置型の固定局として使用することで、連続的な分水施設内のスマルトの降下行動の把握に成功した。

分水施設の30m上流から放流したスマルトは、調査中で最も流量の大きい期間であったにも関わらず、約90%の個体が分流水路内の導水路に導かれ、約80%の個体が魚道に到達した。本年度のような流況パターンにおいては、大部分の降下魚は副堤下流・ダム湖へは降下せず魚道を降下することが明らかになった。チュウシベツ川から魚道への降下率について適正值などの基準はないが、網やスクリーンなどの仕切がない構造で導水路進入率や魚道の降下率はいずれも80%を超え、良好な値だと考えられる。

放流地点、副堤下流、導水路内、余水吐水路、魚道の各地点におけるスマルト降下魚の流量頻度分布を見ても同様のことが言え、チュウシベツ川の流量が7.0m³/sを超えると、ダム湖へ降下する懸念があったが、調査期間中の流量も2.21~30.4m³/s(平均6.70m³/s)の範囲にあったにも関わらず、副堤下流からダム湖への降下個体は少なく、降下魚が導水路上流に到達した際の流量は7.0m³/sを超えていること

が多かったが、大部分の魚が魚道へ降下することが明らかになった。

本研究結果から、薄層越流などの工夫を施した美利河ダム分水施設は、降下魚にとって十分機能しているものと判断できる。今後は、副堤下流と余水吐水路へ降下魚が降下しない流量の閾値の年間変動を把握することが、分水施設を設計・改良する際の参考となる。また、今後も継続調査を実施し、降下魚の降下期間およびピークをとらえ、チュウシベツ川の分水施設の副堤からダム湖へオーバーフローする流量との関係を解析することにより、年間変動を踏まえた分水施設の機能を評価する必要がある。

本研究では降下行動による評価を行ったが、サクラマス親魚などの遡上魚の行動データも含めた評価が、本来の分水施設評価となる。PITタグは電池が内蔵されていないため長期間の観測が可能であり、PITタグを装着した幼魚が翌年の秋にサクラマスの親魚となって魚道を遡上した際にその個体識別と日時を記録することも可能である。今後は、美利河ダム魚道の上下流に設置しているPITタグシステムの測定を継続し、データの取得・解析を行い降下行動と遡上行動を合わせた評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Ueda H. Physiological mechanism of homing migration in Pacific salmon from behavioral to molecular biological approaches. *Gen Comp Endocrinol.* 2011;170(2):222-32.
- 2) 眞山紘. サクラマス生態ノート. 魚と卵. 1990;159:7-21.
- 3) McCormick SD, Hansen LP, Quinn TP, Saunders RL. Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can J Fish Aquat Sci.* 1998;55:77-92.
- 4) 熊崎博, 田代文男. アマゴの増殖に関する研究-XXXVI アマゴおよびヤマメの相分化に及ぼす飼育条件の影響について. 岐水試研報. 1988;33:1-20.
- 5) Miyakoshi Y, Sasaki Y, Fujiwara M, Tanaka K, Matsueda N, Irvine JR, et al. Implications of Recreational Fishing on Juvenile Masu Salmon Stocked in a Hokkaido River. *N Am J Fish Manage.* 2009 Feb;29(1):33-9.
- 6) Ohji M, Arai T, Miyazaki N. Differences of tributyltin accumulation in the masu salmon *Oncorhynchus masou* between sea-run and freshwater-resident types. *J Fish Biol.* 2006 Mar;68(3):931-9.
- 7) Morita K, Nagasawa T. Latitudinal variation in the growth and maturation of masu salmon (*Oncorhynchus masou*) parr. *Can J Fish Aquat Sci.* 2010 Jun;67(6):955-65.

- 8)木曾克裕. 二つの顔を持つ魚サクラマス: 成山堂書店
2014.
- 9)北海道レッドデータブック. <http://rdb.hokkaido-ies.go.jp/>
2001.
- 10)Cooke SJ, Hinch SG, Wikelski M, Andrews RD, Kuchel LJ,
Wolcott TG, et al. Biotelemetry: a mechanistic approach to
ecology. *Trends Ecol Evol.* 2004 Jun;19(6):334-43.
- 11)北海道開発局. 後志利別川水系河川整備計画. 2007.
- 12)眞山紘. 魚道型実験水路におけるサクラマス幼魚の遡
上行動. さけ・ますふ研場. 1987;41:137-53.
- 13)J.M. Roussel, A. Haro, Cunjak RA. Field test of a new
method for tracking small fishes in shallow rivers using
passive integrated transponder (PIT) technology. *Can J Fish
Aquat Sci.* 2000;57:1326-9.
- 14)Hayashida K, Nii H, Tsuji T, Miyoshi K, Hamamoto S, Ueda
H. Effects of anesthesia and surgery on U_{crit} performance
and MO_2 in chum salmon, *Oncorhynchus keta*. *Fish Physiol
Biochem.* 2013;39:907-15.
- 15)眞山紘, 大熊一正. 河川滞留期サクラマス幼魚の摂餌
生態. マリーンランディング計画 (サクラマス) プログ
レスレポート, 北海道さけ・ますふ化場. 1983; 3:21-8.
- 16)Banks JW. A review of the literature on the upstream
migration of adult salmonids. *J Fish Biol.* 1969; 1: 85-136.
- 17)小林美樹, 岩見俊則, 岡田鳳二, 永田光博. サクラマス
の生態学的研究 I 古宇川に放流した池中継代サクラ
マスの降下行動について. 北海道立水産孵化場研報.
1988;43(43):57-64.
- 18)眞山紘. サクラマス *Oncorhynchus masou* の淡水域の生
活および資源培養に関する研究. 北海道さけ・ますふ
化場研報. 1992; 46: 1-156.
- 19)Koyama T, Nagata M, Miyakoshi Y, Hayano H, Irvine JR.
Altered smolt timing for masu salmon *Oncorhynchus masou*
resulting from domestication. *Aquaculture.* 2007 Dec; 273
(2-3): 246-9.
- 20)Cunjak RA, Prowse TD, Parrish DL. Atlantic salmon (*Salmo
salar*) in winter: 'the season of parr discontent'? *Can J Fish
Aquat Sci.* 1998;55(S 1):161-80.
- 21)Cunjak RA. Winter habitat of selected stream fishes and
potential impacts from land-use activity. *Can J Fish Aquat
Sci.* 1996; 53 (S1): 267-82.
- 22)宮越靖之, 松枝直一, 武藤悟一, 菅原敬展, 田中敬子,
坂本準. 尻別川本支川におけるサクラマスの遡上時期.
北海道水産孵化場研報. 2009; 63: 15-9.

4. 氾濫原における「移入種・外来種」の侵入状況及び影響の把握

4.1 はじめに

石狩川では、1910年に北海道庁による組織的河川改修が始まり、2010年には治水事業100周年を迎えたり。100年前の石狩川は原始河川で迂曲蛇行を繰り返し、毎年のように氾濫したため、氾濫原での居住地と農地の確保を目的とした事業の1つで蛇行部をショートカットする「捷水路事業」が1918年より開始された¹⁾。現在では、石狩川流域には石狩川から人為的に切り離された旧川（以下、「ショートカット湖沼」）や石狩川から自然に短絡した旧川（以下、「自然短絡湖沼」）、石狩川氾濫原の名残である後背湿地などの池沼群が数多く存在している。

石狩川の池沼群は石狩川などより切り離されてから数十年以上が経過し、池沼生態系の遷移が起っていると想定される。しかし、池沼群全体を対象とした魚類調査は、約30年前の1977年（昭和52年）に、ショートカット湖沼と自然短絡湖沼の25旧川でのみ実施され（以下、「S52調査」）、後背湿地は対象とされていない²⁾。その他の魚類調査は一部の池沼での実施に留まっており、広域の調査にはなっていない。S52調査から30年近く経過しているが、池沼群の魚類の生息状況の変化は全く把握されていない状態にあった。

氾濫原などを含む水域は多様な生態的機能を有しており、その生態的機能の保全は生物多様性にとって重要な項目の一つであると共に、氾濫原保全の重要性を既往研究は示唆している³⁾⁴⁾。河川における生物多様性の確保には、氾濫原を含む流域全体の環境の現状を把握することが必要であり、その対象の継続調査が有効である。河川の環境調査としては、河川水辺の国勢調査が継続的に実施されているが、河川・ダムを主に対象としており流域全体には及んでいない。生物多様性の持続的保全のためには、調査を流域全体に広げ、守るべき生物と排除すべき生物の存在を明らかにすることが重要である。

この様な状況の中、石狩川周辺の池沼群における魚類の生息状況の把握を目的に、2003年（平成15年）から2005年（平成17年）、石狩川のショートカット湖沼、自然短絡湖沼、後背湿地の全44池沼で魚類調査が実施された。この内、S52調査と同じ25旧川を抽出し（以下、「H17調査」）、約30年経過した魚類相の比較を行った。その際、魚類の攪乱状況か

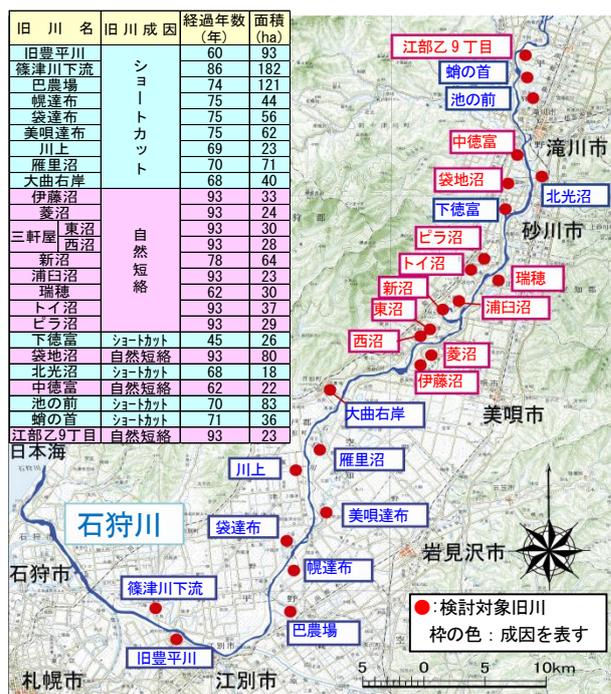


図-14 旧川群位置図

ら旧川群のグループ化を試み、生息魚類相から旧川間の類似度を算定した。近年、移入種の増加による生物の固有性および地域性が脅かされていることから、本論文では移入種に主眼を置き解析を進め、魚類相の変遷を考察した。

4.2 研究方法

4.2.1 調査地および旧川群の概要

石狩川は、その源を大雪山系の石狩岳（標高1,967m）に発し、石狩平野で雨竜川、千歳川、豊平川など多くの支川を合せ、日本海に注ぐ、流域面積14,330km²（全国2位）、幹川流路延長268km（全国3位）の一級河川である。

本論文で対象とした旧川群は、雨竜川との合流点から下流に位置し、ショートカット湖沼が13カ所、自然短絡湖沼が12カ所の計25旧川である（図-14）。

旧川経過年数として、ショートカット湖沼は文献⁵⁾、自然短絡湖沼は文献⁵⁾と1947年、1963年、1977年、2000年の航空写真より推定した。1916年以前に成立した旧川は93年間以上経過していることから、便宜上93年と記述した。一番新しい旧川でも60年間が経過しており、ショートカット湖沼より自然短絡湖沼において経過年数が多い傾向にある。

湖面面積は、1/2500図面をプランイメータにて算出した。

4.2.2 魚類調査

表-2 S52からの攪乱状況

	ピラ沼	鱒の首	瑞穂	新沼	袋地沼	袋達布	美唄達布	巴農場	雁里沼	中徳富	下流	篠津川	西沼	平均	旧豊平川	伊藤沼	9丁部乙	川上	北光沼	大曲右岸	トイ沼	東沼	幌達布	池の前	平均	菱沼	浦臼沼	下徳富	平均
S52調査からの種数増加率 (増加種数/全体確認種数)	71.4%	66.7%	78.6%	78.6%	80.0%	93.8%	91.7%	81.8%	83.3%	72.7%	77.8%	75.0%	79.3%	83.6%	50.0%	55.6%	54.5%	54.5%	64.3%	60.0%	60.0%	62.5%	64.3%	58.9%	33.3%	55.8%	46.7%	45.2%	
S52調査からの増加移入率 (増加移入種数/増加種数)	40.0%	33.3%	36.4%	45.5%	50.0%	60.0%	45.5%	66.7%	60.0%	62.5%	57.1%	55.6%	51.0%	65.7%	60.0%	60.0%	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	55.6%	60.0%	55.6%	66.3%	75.0%	40.0%	42.9%	52.6%	

また、旧川群の分類を行うため、その各数値を基に、非類似度としてユークリッド距離を用いたウォード法によるクラスター分析を行い、デンドログラムを作成した。

3) 共通種数による類似度

各旧川の魚類相の類似性を調べるため、各旧川における魚種の共通組成から、各旧川間の類似度をJACCARDの共通係数 (CC)⁶⁾により求めた。旧川の成因特性 (ショートカット、自然短絡、全旧川) と生息魚種の特長 (移入種、在来種、全種類) の関係性を把握するために、それぞれの特性で類似度の平均値を算出し、結果を比較した。JACCARDの共通係数は、 $CC=c/(a+b-c)$ ($0 < CC < 1$ 、1であれば種組成は同一)で算出される。ただし、a:旧川Aの種数、b:旧川Bの種数、c:旧川AB間での共通種数で示される。類似度が1に近づくほど、2旧川間の魚種構成が類似していることを示している。

4. 3 結果

4.3.1 魚類調査

魚類調査および文献調査の結果、H17調査では8科23種の魚類が確認された(表-1)。確認種数が多い旧川は16種の袋達布、14種の新沼などで、少ない旧川は8種の篠津川下流・菱沼などであった。S52調査では7科14種の魚種が確認された(表-1)。確認種数が多い旧川は8種の菱沼などで、少ない旧川は1種の袋達布などであった。S52調査と比較してH17調査は大幅に生息種数が増加していた。

全旧川での確認魚種の内、在来種はヤチウグイやフクドジョウなどの15種が確認された。ウグイとエゾウグイについてS52調査では区別されていないことから、ウグイ属として扱った。国内移入種はコイ、ゲンゴロウブナ、モツゴ、タモロコ、ドジョウ、ナマズの6種、国外外来種はタイリクバラタナゴ、ソウギョ、カムルチーの3種が確認され、計9種が移入種であった。H17調査では、全9種の移入種が確認され、移入種が多い旧川は、9種の袋達布、7種の大曲右岸・北光沼であった。S52調査では、6種の移入種が確認され、移入種が多い旧川は、5種の下徳富などであった。

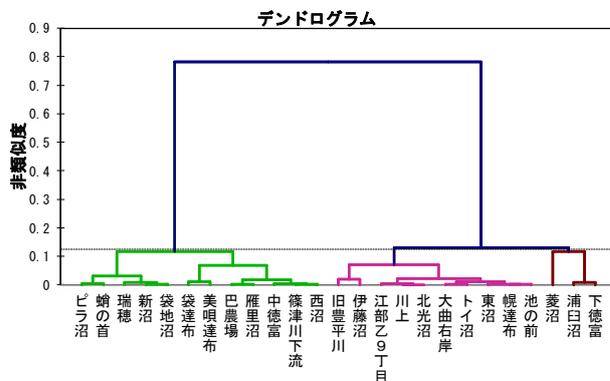


図-16 旧川のグループ分け

表-3 各旧川の平均類似度

	H17調査旧川の平均類似度			S52調査旧川の平均類似度		
	移入種	在来種	全種類	移入種	在来種	全種類
ショートカット	0.670	0.503	0.564	0.292	0.275	0.233
自然短絡	0.602	0.564	0.564	0.682	0.400	0.424
全旧川	0.644	0.535	0.565	0.403	0.350	0.325

河川型はウグイ属など7種、池沼型はギンブナなど16種、貝依存型はタイリクバラタナゴの1種であった。

図-14、表-1より、旧川の位置(上流か下流か)と生息種数の比較を行ったが、S52調査、H17調査共に、旧川の位置と生息種数の間には相関が見られなかった。

4.3.2 分析の結果

1) 旧川全体での魚種の把握

年代別での各魚種の確認旧川数を図-15に示す。

H17調査ではギンブナ、モツゴ、タイリクバラタナゴが25旧川全てで確認されている。ウグイ属、ドジョウ、ジュズカケハゼも確認旧川数が20旧川を越え、現在の石狩川旧川群の主要構成種となっている。確認旧川数が少ないのは、ヌマチチブ、ソウギョ、エゾトミヨで、これらの種はS52調査では確認されなかった。S52調査でイトヨ(型不明)は、1旧川で確認されたが、H17調査では確認されなくなった。

S52調査で、確認旧川数が多いのはギンブナ、モツゴ、ウグイ属、トウヨシノボリで、10旧川を超えていた。確認できなかった種はタイリクバラタナゴ、タモロコ、ソウギョなど10種であった。

S52調査とH17調査を比較すると、イトヨ(型不明)とコイを除く魚種が、順調に確認旧川数を増や

していた。移入種ではコイとソウギョを除く7種が、確認旧川数を大幅に増やしていた。

2) 攪乱状況の把握と旧川群の分類

S52 調査からの種数増加率、S52 調査からの増加移入種率を表-2に示し、クラスター分析の結果を図-16に示した。表-2では、クラスター分析の結果を踏まえて3グループに分けて整理した。S52 調査からの種数増加率が大きい旧川は袋達布、美唄達布、雁里沼などであり、中でも袋達布や美唄達布では90.0%を超えていた。S52 調査で魚種がほとんど確認されていない旧川に、急激な魚種の増加が起きたと推察される。種数の増加率が小さい旧川は、菱沼、下徳富などであった。S52 調査からの増加移入種率が大きい旧川は、旧豊平川、伊藤沼、菱沼などであり、75.0%を超えていた。移入種の大幅な増加が起きたと推察され、移入種増加率が最低の蜻の首でも33.3%であった。

S52 調査からの種数増加率と増加移入種率の特性から、旧川群は3グループに分けられた(図-16、表-2)。それぞれ左から第1、第2、第3グループとすると、第1グループの特性は、S52 調査からの種数増加率が最も高く、加えてS52 調査の生息数割合が低いことがあげられる。S52 調査には生息魚種が少なく、H17 調査では大幅に生息魚種数が増加し、増加した魚種の約1/2が移入種の旧川群だと整理できる。第2グループは、増加移入種率が高いことがあげられる。S52 調査の生息魚種数とS52 調査からの生息魚種数の増加は平均的だが、増加した種数の約2/3が移入種の旧川群と整理できる。第3グループの特性は、S52 調査からの生息種増加率が最も低いことがあげられる。S52 調査の生息魚種数が元々多く、S52 調査からの増加種数が少ないが、増加種数の約1/2が移入種である旧川群と整理できる。

3) 共通種数による類似度

各旧川における魚種の共通組成から、旧川の成因特性と、生息魚種の特性ごとに各旧川間の類似度の平均値を求め、表-3に整理した。

移入種の類似度：H17 調査の内、ショートカット湖沼での類似度が最も大きく、その他も0.600を超えていた。S52 調査ではショートカットと自然短絡湖沼間での類似度に約2.3倍の大きな差が見られた。H17 調査とS52 調査を比較すると、ショートカット湖沼が約2.3倍、全旧川が約1.6倍高くなっており、自然短絡湖沼では約0.9倍と逆に類似度が低下していた。

在来種の類似度：H17 調査の内、自然短絡湖沼での類似度が最も大きく、その他も0.500を超えていた。S52 調査ではショートカットと自然短絡湖沼間で約1.5倍の差があったが、移入種ほどの大きい差ではなかった。H17 調査とS52 調査を比較すると、類似度はショートカット湖沼が約1.8倍、自然短絡湖沼と全旧川が約1.5倍高くなっていた。

全種類の類似度：H17 調査のショートカット湖沼、自然短絡湖沼、全旧川でほぼ同じ値であった。S52 調査では、ショートカットと自然短絡湖沼間での類似度に約1.8倍の差が見られた。H17 調査とS52 調査の類似度を比較すると、ショートカット湖沼が約2.4倍、自然短絡湖沼が約1.3倍、全旧川が約1.7倍高くなっていた。

4. 4 考察

4.4.1 魚類調査

本調査の結果より、S52 調査とH17 調査における生息魚類相の違いが明らかとなった(表-1)。S52 調査の生息魚種が7科14種に対し、H17 調査では8科23種と大幅な種数の増加がみられた。このことから、旧川群は大幅に生息種数を増加させる環境下にあることが推察された。

対象とする旧川群は石狩川の中下流に位置し、本川から切り離された後数十年が経過し、河川とは異なる生態系が形成され、池沼独自の生態系が構築されてきたことによると考えられる。ウグイ属・トウヨシノボリを除く河川型魚種はS52 調査時点にもほとんど確認されておらず、H17 調査でも確認頻度が低いことと関係していると推測される。河川型の移入種であるソウギョも同様の傾向を示していた。同じ河川型ではあるが、ウグイ属については幼稚魚期に分散する傾向があり、遊泳力に優れていることや、雑食性で食域が広く、止水域でも生息が可能なことから、水路網を介して本川から旧川に侵入し、定着していると推測される⁷⁾。この生態的特性が両調査において本種の確認頻度が高いことと関係していると考えられる。トウヨシノボリについては、遊泳力に優れないが腹の吸盤を使い、急勾配の水路や流速の早い場所も移動可能なことから旧川に侵入した可能性のほか、旧川に閉じ込められた段階から河岸の礫などを利用して再生産を行っている⁸⁾と推測される。

一方、魚類の移動性に関する生態的特性や人による各種の利用形態から、旧川群における移入種の分

布までの経緯を考察すると、主に食用や釣魚としての放流と、流入出水路を介しての侵入が考えられる。コイ、ゲンゴロウブナ、カムルチーなどは日本各地で古くから食用や釣魚として利用され、石狩川旧川群においても釣り人や関係機関などによる放流の可能性が高いと推測される。昭和52年の段階で袋達布、雁里沼、東沼などでコイとフナ属の放流が確認されており²⁾、移入種は古くから定着していることが推察される。下徳富、川上、北光沼では、S52調査で多くの種が確認されている。これらの旧川は昭和52年までに、埋立てによる湖面の消失が進行しており、移入種の定着と人為的な環境改変の間には、強い関わりがあることが示唆される。H17調査で移入種の生息種数が多かった袋達布、川上、雁里沼などでは、昭和52年の時点で既に漁業権が設定され、定期的な放流もなされていた。

タイリクバラタナゴ、モツゴ、タモロコなどの小型移入種については、釣りや水産物としての利用価値は低いことから、旧川への意図的な放流ではなく、他の放流魚に混入して北海道に移入し、旧川周辺に発達する水路を介して分布域を拡大したと推測される。この3種は緩流域を主要な生息域とし、旧川周辺の用水路内においても多数の生息が確認されている。

4.4.2 分析結果の考察

1) 旧川全体での魚種の把握

図-15に各魚種の確認旧川数を示した。S52調査からH17調査で大幅に確認旧川数を増やした魚種はタイリクバラタナゴ(25旧川増加)、ジュズカケハゼ(21旧川増加)、ドジョウ(20旧川増加)、タモロコ(18旧川増加)、ナマズ(14旧川増加)などであった。図-15に示すように増加上位の大部分が移入種であり、各旧川での移入種の構成比が高くなる要因となっていた。

これら移入種の内、特異的な繁殖生態を持つタイリクバラタナゴによるイシガイ類への関係と、大型捕食性魚類であるカムルチーによる在来生物への影響について、以下に考察する。

タイリクバラタナゴはS52調査では確認されていないが、H17調査では全ての旧川で確認され、急激に確認旧川数を増加させた。本種はイシガイ類の鰓内で産卵するという特異的な繁殖生態を有し、繁殖にはイシガイ類が不可欠である⁹⁾。イシガイ類は、幼生がヨシノボリ類に寄生するという特異的な生活史を有し、繁殖にはヨシノボリ類が不可欠である¹⁰⁾。

本調査でイシガイ類は、S52調査の2旧川から、H17調査の19旧川と確認旧川数を大幅に増加させた(表-1)。トウヨシノボリは、S52調査の13旧川から、H17調査の22旧川と確認旧川数をイシガイ同様に増加させた(表-1)。このイシガイ類とトウヨシノボリの確認旧川数の増加も、本種の生息域拡大の一因であると推測される。

Stańczykowskaらの研究¹¹⁾では、湖全体のイシガイ類の密度が0.4(個体/m²)の時、春～秋の6カ月間に乾燥重量で約2.5tの浮遊物が除去された報告がある。イシガイ類は微細ベントスをこし採る濾過型の摂食形態を持ち、旧川における水質・底質の浄化に大きく寄与している。そのため、分布域を拡大している本種のイシガイ類への過剰な産卵がイシガイ類の斃死を起こした場合には、旧川群の水質悪化が懸念される。

カムルチーはS52調査の2旧川から、H17調査の10旧川と確認旧川数を増加させ、釣り人への聞き取り結果から判断すると、他の旧川においても、本種が生息する可能性は高いと推測される。

本種は繁殖の際、水草が繁茂する緩流域で、水草を用いたドーナツ状の浮き巣を造巣する¹²⁾。本種が確認された10旧川の内、袋達布、大曲右岸、下徳富を除く7旧川でヒシなどの浮葉植物群落が形成されており、本種の繁殖環境は整っている。本種はルアーフィッシングの対象魚でもあり、袋達布や大曲右岸などの公園整備が進んだ旧川では、釣り人の放流による持続的な個体侵入の可能性が考えられる。

調査を行った旧川群では、本州で猛威を振るうオオクチバスやブルーギルなどの捕食圧の高い種は確認されていない。しかし、本種は魚類や両生類、大型底生動物、小型の水鳥などを捕食する大型の肉食性魚類であり¹⁴⁾、在来の生物群集に与える影響は大きいと推測されることから、今後、その生息域拡大に注意が必要な種である。

2) 攪乱状況の把握と旧川群の分類

表-2は、S52調査からの攪乱状況より分類された3グループの種数増加率と増加移入種率を示している。いずれのグループにおいても魚種増加による攪乱を示唆している。在来種・移入種を問わず、侵入方法が確立され、侵入した種にとっての生息環境が備わっており、定着する傾向にあると考えられる。

石狩川流域は治水事業により、辺り一面の湿地帯から北海道を支える一大農業地帯へと変貌した⁵⁾。当該調査地の石狩川では左右岸とも大正時代より、

幹線用水路が設置され、流域の農地へ水を供給してきた。そして、余水は付近の池沼に流出されている。この排水形態が旧川群への魚類の供給経路となる。農業水路ネットワークの経路や位置関係、旧川自体の埋め立てなどの人為的影響があることから、各旧川での魚種数の増加に違いが生じると考えられる。

現在、石狩川では河床低下により各旧川との水位差が数十 cm から数 m に達し、本川との水系の連続性が分断される傾向にある。連続性が確保されなければ、少雨などで旧川水が枯渇し、特に浅い旧川では魚類の生息環境に大きなダメージを与えることが想定される。グループ間の攪乱状況の違いを生んだ原因は、①池沼群の人為的なショートカット、自然短絡、古い時代に自然形成などの成立要因、②人間による旧川の使われ方、③本川との接続方法、④本川からの距離、⑤水位変動、⑥水質などが関係していると推測される。各グループの移入種の変動を把握することは、旧川群全体の生息魚類相を予測する上でも重要だと考えられる。今後、旧川群の地形形状や水文等の物理的環境を把握し、魚類群集形成に関わるこれら因果関係の解明が必要がある。

3) 共通種数による類似度

表-3 では、各旧川における魚種の共通組成から、旧川の成因特性と、生息魚種の特性ごとに各旧川間の類似度の平均値を示した。

旧川の成因特性として、ショートカット湖沼の類似度では、移入種 (0.292→0.670)、在来種 (0.275→0.503)、全種類 (0.233→0.564) と、S52 調査から H17 調査で上昇が著しい。自然短絡湖沼の類似度では移入種 (0.682→0.602) がわずかに減少し、在来種 (0.400→0.564) と全種類 (0.424→0.562) の類似度がわずかに上昇している。ショートカット湖沼は成立してからの経過時間が短く、人為的な影響が強く残ることから、移入種が侵入しやすい環境が整い、移入種の侵入により在来種および移入種の構成の類似度が高まる、魚種構成の均質化が起きたと推測される。自然短絡湖沼は旧川が成立してからの経過時間が長く、成因も人為的影響が比較的少ないことから、魚種の侵入・定着速度はショートカット湖沼と比較すると遅く、魚種構成の均質化が進まなかったと推測される。

生息魚種の特性として、移入種・在来種・全種類共に S52 調査の類似度はばらついていたが、H17 調査の類似度では差がなくなりつつある。S52 調査は偏りのある魚種構成であったのに対し、H17 調査で

は、まんべんなく旧川へ魚種が侵入し、旧川の成因に限らず、魚類相の類似度を高めていることを示している。移入種の類似度が在来種に比べ高い値を取っており、9 種の移入種が要因となり、魚種構成が均質化したことを示唆している。

石狩川の旧川群は移入種の生息種数が中心となり次第に生息魚種数を増やし、特にショートカット湖沼では魚種構成が均質化している。自然短絡湖沼では、移入種が S52 調査時点で 0.682 と高い類似度を示したが、H17 調査では 0.602 と低下している。この原因の一つとして、S52 調査では、モツゴが自然短絡 12 旧川中 10 旧川で確認され、モツゴ以外の移入種が少なかったことが高い類似度を示した要因だと推察される。その後、タイリクバラタナゴ、ドジョウ、ナマズを中心に様々な移入種が大幅に侵入し、各自然短絡湖沼の魚種構成が変化した結果、H17 調査で類似度を下げたが高い類似度を維持したと推察される。

モツゴは他の放流魚に混じって移入したことが推測されるが、確認旧川数は S52 調査時点で既に 17 旧川に上り、H17 調査時には全 25 旧川で確認されている。他の移入種と比較するとモツゴの分布拡大速度が速いことがうかがえ、容易に生息域を拡大できる種だと推測される。今回調査を行った自然短絡湖沼は比較的近接して存在することから、モツゴは短時間で分布を拡大でき、S52 調査時にも自然短絡湖沼でモツゴの確認旧川数が多かった理由だと考えられる。

4. 5 まとめ

石狩川本川、旧川群、旧川群の近傍を流れる中小支川、農業用水路を介した水路網などによる水域の連続性は魚類の移動を促進させる。一方で、本川と旧川群の切り離しの年数がより長い旧川ほど本川との水位差が大きい傾向にあり、魚類の移動は容易ではない。そのため、旧川群の魚類の生息場の拡大は農業用水網が中心であると考えられるが、未だ解明には至っていない。魚類の生息場を保全する上で、旧川群と他水域とを積極的に接続すべきかどうかは、旧川群に生息する魚類がどのような移動形態を取り、どのような生活史を持つかを解明する必要がある。

今後の課題として、確認された移入種をどのように対処していくかがあげられる。移入種の駆除は費用がかかり、駆除をやめると元の状態に戻ってしまう。有効な解決策を見つけるのは容易ではない。特

に本州で問題になっているオオクチバスなどの外来種は池沼型の魚種が多く、新たな移入種の侵入・生息も危惧される。旧川の生態系はどのようにあるべきか議論が必要である。

本研究は、石狩川の旧川群における S52 調査と H17 調査の魚類相を把握し、S52 調査から各旧川に生息する魚類相にどのような変化が起きたかを検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- ①旧川群に生息する魚類相は S52 調査から H17 調査で大幅にその種数を増やした。
- ②各旧川ともに移入種の侵入が顕著であり、在来種の生息場を脅かす可能性がある。
- ③調査した旧川群は 3 つのグループに分けられる。
- ④H17 調査の結果、旧川群の魚種構成は均質化した。

今後、旧川群の生息魚種相はどのように変化していくかは不明である。これを把握するためには、より多くの池沼群で魚類相を経年的に把握する必要がある。また、旧川と後背湿地の全 44 池沼群の調査を行ったデータを基に、旧川と後背湿地との比較を行い、両者の特性を考察していく必要がある。

参考文献

- 1)岡崎文吉：石狩川治水計画調査報文，1909.
- 2)北海道開発局石狩川開発建設部：石狩川水圏生態調査資料 その 2 石狩川旧川編，pp155-179,1979.
- 3)綾史郎,河合典彦,小川力也,紀平肇,中西史尚,竜門俊次：淀川における水位の変化と魚類の産卵行動,河川技術論文集,Vol.10,pp333-338,2004.
- 4)傳田正利,天野邦彦,原田守啓：過去の河川氾濫状況の定量的復元と氾濫原が有していた魚類避難場の機能検証,水工学論文集,第 53 卷,pp1195-1200,2009.
- 5)山口甲,品川守,関博之：捷水路（財）北海道河川防災研究センター,1996.
- 6)木下新作：生態学研究法講座 14 動物群集研究法 I - 多様性と種類組成 -, pp.130-133, 共立出版, 1976.
- 7)酒井治己：ウグイ属,川の生物図鑑（リバーフロント整備センター）山海社,pp560-561,1996.
- 8)越川敏樹：トウヨシノボリ,日本の淡水魚(川那部浩哉・水野信彦編),山と溪谷社,pp594-597,1989.
- 9)前畑政善：タイリクバラタナゴ,日本の淡水魚(川那部浩哉・水野信彦編),山と溪谷社,pp360-363,1989.
- 10)紀平肇：イシガイ,川の生物図鑑(リバーフロント整備センター),山海社,pp560-561,1996.
- 11)Staćzykowska,A., Ławacz,W., Mattice, J., Lewandowski, k. : Bivalve as a factor effecting circulation of matter in Lake Mikołajskie (Poland), Limnologia, Vol.10, pp347 - 352, 1976.
- 12)前畑政善：カムルチー,日本の淡水魚(川那部浩哉・水野信彦編),山と溪谷社,pp470-472,1989.

5. 健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法の開発

5.1 はじめに

河川横断工作物は、回遊魚や生息魚類の生息場や産卵場までの往来を制限したり完全に不可能にしたりする。そのため、特にサケ科魚類のような遡河回遊魚が産卵場まで到達できるように、河川横断工作物には様々な形式の魚道が設置されてきた。魚道の目的は、ストレス・怪我・遡上遅れ・致死ができる限り少なく、魚類を短時間で上流へ遡上させることである¹⁾。この目的を達成するために、魚道内流速を魚類の遊泳力よりも低く設定する必要がある²⁾。これは、魚道内の流水の持つエネルギーを制御・分散しなければならないことを意味している。そのため、室内水路を用いた魚の遊泳速度や突進速度を参考に水理的な魚道研究が行われ、その成果として水理（工学）的観点から設計された魚道が数多く建設された。しかしながら、魚道を設置したが魚類がほとんど遡上しない魚道も存在することから、魚道の設計にあたっては、水理的知見だけではなく、魚の遊泳行動から判断した機能評価が重要であると考えた。

近年のバイオテレメトリー技術の発展により、自然環境下における魚の行動を把握することや^{2,3)}、魚道内における魚類の行動を詳細に調査することが可能になった。林田ら⁴⁾は、石狩川旧花園頭首工周辺において、バイオテレメトリー機器を用いたシロザケの産卵遡上行動の調査を行い、頭首工に設置された2つの魚道の機能比較を行った。このように魚道内の遊泳行動は少しずつ解明されてきた⁵⁾。また、河川内における魚類の遊泳行動は、遡上速度や往来状況など未解明な事柄が多いのが現状であり、魚道機能評価として、単に遡上の可否を論ずるのではなく、構造物のない河川内の遊泳行動との比較が魚道の有効性や機能の評価のためには必要と考えた。

石狩川はシロザケ (*Oncorhynchus keta*) にとって重要な生息場である。石狩川には、頭首工・床止め・ダムなどの河川横断工作物がいくつも設置され、各横断工作物には魚道も設置されている（図-17）。石狩川では旧花園頭首工が、シロザケが上流へ遡上する際に最初に通過しなければならない河川横断工作物である（その下流の石狩川頭首工の水門は、シロザケ遡上期には開いている）。旧花園頭首工は、バーチカルスロットとロックランプの2つの魚道が設置

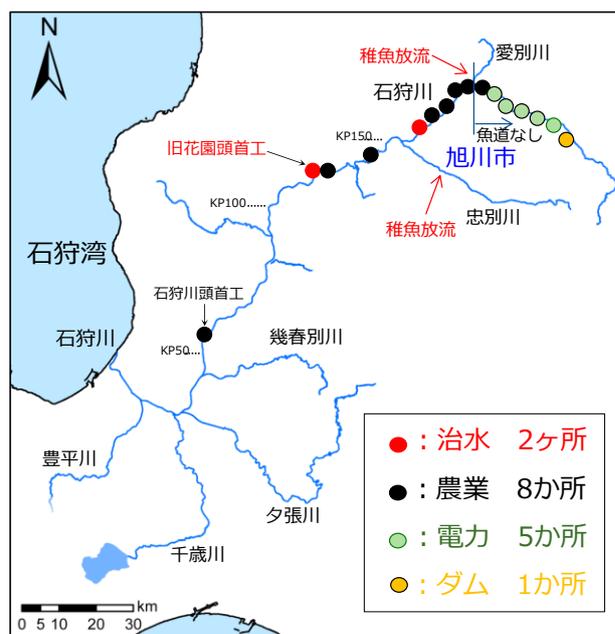


図-17 石狩川流域平面図 丸は石狩川における河川横断構造物の設置位置を示す。丸の色の違いは主な目的の違いを示す

されている。これらの魚道の評価を行うため、流域全体に遊泳行動を把握することとした。

本研究は、石狩川河口で放流し千歳川に遡上する群（横断工作物なし）と、石狩川中流で放流し石狩川上流や忠別川へ遡上する群（愛別川と忠別川の稚魚放流地点までに頭首工と床止めが6基）を設定し、テレメトリーを用いた遡上行動調査を行った。本結果は、石狩川という大河川で水産有用種であるシロザケの遡上行動を評価し、構造物のない河川における遊泳行動と横断工作物付近や魚道内の遊泳行動を比較することにより、河川横断工作物、魚道、各支川が与える影響に関する知見となり、ダムや頭首工のような河川横断工作物で分断された河川を魚道で連結する際の有益な情報となる。

5.2 調査方法

5.2.1 調査範囲

石狩川は、流域面積 14,330 km²、幹川流路延長 268 kmの一級河川である。調査範囲は、石狩川流域（下流端は石狩川河口、上流端は2009～2011年に稚魚の放流を行った愛別川合流点および忠別川ツインハープ橋付近）とした（図-17）。シロザケの遡上時期には、旧花園頭首工が最初に遭遇する魚道を通すなければならない横断工作物となる（図-17）。旧花園頭首工（KP 121.4）は1964年に深川市に建設された。シロザケは、石狩川上流の上川盆地で産卵し

ていたが、旧花園頭首工建設後は36年間魚類の遡上
が完全に不可能となっていた。その後、2000年には、
頭首工の機能が不要となり床止め部のみが残され
(高さ：4.3m)、同時に、シロザケなどの魚類が上
流へ移動できるようバーチカルスロット魚道が右岸
側に設置された。また、2011年にはロックランプ魚
道（魚道入り口がみつけやすい）が、左岸側に建設
され、今では旭川市街まで数多くのシロザケが遡上
している。

5.2.2 シロザケ採捕と調査方法

調査は2013年9月から12月に実施した。シロザケは43尾（オス24尾、メス19尾）を用いた。本研究で用いるシロザケは、河口で放流した個体（18尾、オス8尾メス10尾、平均体長：61.9±3.4 cm、平均体重：3.69±0.53 kg（平均±SD））を、石狩湾漁業協同組合の定置網で採捕された個体を購入し使用した。中流で放流した個体（25尾、オス9尾メス16尾、平均体長：58.8±6.9 cm、平均体重：3.34±0.90 kg（平均±SD））は、旧花園頭首工魚道の upstream 端に仕掛けたトラップを用いて採捕されたものを使用した。発信機から発信する超音波信号は、超音波受信機

（WHS3250, Lotek社）で受信した。超音波受信機は、石狩川19基、豊平川1基、千歳川3基、忠別川2基の合計25箇所に設置した（写真-1、図-18）。なお、石狩川河口は川幅が広いので左右岸に1基ずつ、旧花園頭首工は左右岸に魚道があるため魚道の左右岸上下流の4基を設置した。超音波データは一か月に一度回収を行った。個体ごとの2つの超音波受信機間の通過時間から遡上速度の算出が可能となる。遡上速度を算出する際、降下している際のデータを除き、遡上時のデータのみを使用した。

電波受信機（SRX_600, Lotek社製）と八木アンテナを組み合わせることにより、電波の強度と指向性により魚の位置を取得できる。これを用いて中小河川に入り込んだシロザケの位置出しを行い、超音波受信機に検知されない個体の補足を行った。

5.2.3 MM発信機装着

シロザケに装着した発信機の電波は、陸上で人が追尾し魚を捕捉することができる。電波は数百m離れても受信できるため、河川近傍の道路上からでも電波の確認は可能である。河川水中内に設置した超音波受信機は、自動的に超音波発信機のデータとして通過時間とIDを記録することから、固定局として有効である。シロザケには電波と超音波の両方の機能を持つ発信機を装着し、超音波による受信機間の

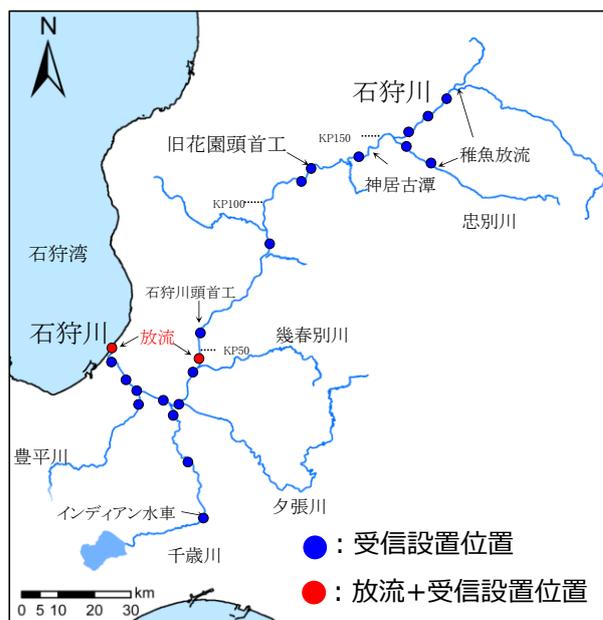


図-18 石狩川流域平面図 ●は超音波受信機の設置位置を示す。●は発信機付シロザケの放流箇所および受信機設置位置を示す。



写真-1 超音波受信機
河川内に沈めて設置



写真-2 シロザケへの発信機装着状況

行動と、電波による行動の把握を同時に行う両方の発信機の特徴を活かすことを試みた。

発信機（MM-MRC-11-45（以下、MM発信機）、Lotek社製：直径12mm、全長78mm、重量16g）は、電波と超音波の信号を両方とも出力することができるタイプを使用した。電波によるデータは5秒間隔、超音波は10秒間隔で発信される。MM発信機は、採捕したすべてのシロザケ43尾の背ビレ前側部に外部装着した（写真-2）。外部装着は短期間での調査に適しており、装着するストレスが体内装着や胃内装着と比較して少ない¹⁰⁾。MM発信機を装着するために、

シロザケに麻酔（FA100, 田村製薬）を0.5ml/lの濃度で約4分間施した。麻酔の際は、石狩川の水を使用した。麻酔後、シロザケは手術台に乗せられ、手術が行われた。MM発信機に取り付けた2本のロックタイを、それぞれステンレスニードルの後ろに差し込み、背部の筋肉に貫通させた。その後、ステンレスニードルだけを取り外し、MM発信機と反対の魚体側でロックタイのタイを通しMM発信機の固定を行った（写真-2）。MM発信機は本体とエポキシコーティングされた1本の電波用アンテナから構成されている。装着手術時間および体長体重測定などを合わせて約2分間を要する。手術終了後、回復のために6~24時間⁹⁾、河川内に設置したいけすで養生後、放流を行った。放流は採捕した日と同日であり、河口（KP2.0付近、左岸）地点が2013年9月30日、中流（たっぷ大橋上流、右岸、船着き護岸）地点が2013年10月23、24日に実施した。

5.3 結果

5.3.1 河口放流魚の遡上行動

石狩川河口から放流した18尾のシロザケは、13尾が千歳川に遡上し、うち11尾が千歳川のシロザケ採捕施設であるインディアン水車（石狩川河口から約71km上流地点）で採捕された。また、千歳川に進入せずに石狩川の上流へと遡上した個体が2尾確認され、1尾はKP44付近の石狩川頭首工付近、もう1尾はKP150の旭川市街にまで遡上を行った。放流後、海へ降下した個体が2尾おり1尾は海の定置網に再び採捕された。河口付近で斃死した個体が1尾確認された（図-19）。

放流した個体は、大きな範囲での遡上と降下を繰り返す行動は確認されなかったが、石狩川と千歳川の合流点付近では、千歳川に遡上する前に何回も往來を繰り返し、ある個体は千歳川侵入までに10時間

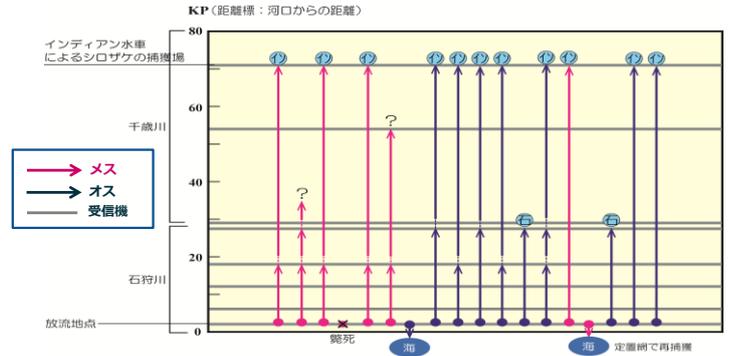


図-19 河口放流魚の遡上行動

以上を要したことが確認された（図-20）。

河川内に設置した超音波受信機が取得したデータから算出した、石狩川と千歳川の区間ごとのシロザケの遡上速度を図-21に示す。最も遡上速度が大きかったのは、放流地点から真敷別（KP6付近）間で平均で3.17 km/hであった。真敷別～美登位（KP12付近）間と美登位～豊平川合流（KP18付近）間は約1.3km/h、豊平川合流～千歳川合流下流（KP28付近）間は0.63 km/hであった。石狩川の上流に向かうほど遡上速度が遅くなることが明らかになった。

千歳川に進入する際、合流点付近で往來を繰り返し千歳川に進入するかを探るような行動が見られた個体の遡上速度は0.23km/hであり、迷うことなく千歳川に進入した個体群の遡上速度2.24km/hと比べて有意に大きかった（ $P < 0.05$ ）。千歳川に進入した個体の遡上速度は、千歳川最下流～漁川合流（河口から約54km）は0.42km/h、漁川合流～インディアン（河口から約71km）0.25km/hであり、石狩川内の遡上速度と比較して、有意に小さいことが明らかになった（ $P < 0.01, 0.05$ ）。

千歳川に進入した個体の遡上速度は、千歳川最下流～漁川合流（河口から約54km）は0.42km/h、漁川合流～インディアン（河口から約71km）0.25km/hであり、石狩川内の遡上速度と比較して、有意に小さいことが明らかになった（ $P < 0.01, 0.05$ ）。

5.3.2 中流放流魚の遡上行動

石狩川中流地点（KP45付近、石狩川たっぷ大橋上流）から放流した25尾のシロザケは、多様な遡上行動をとることが確認された（図-22）。各個体の最終

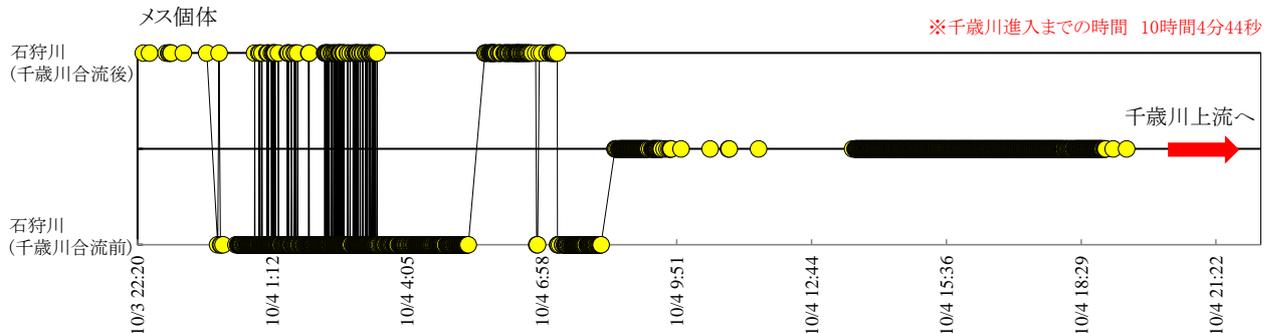


図-20 石狩川と千歳川の合流点付近のシロザケの遡上行動

到達地点は、神居古潭を遡上しKP150より上流に到達した個体が5尾、忠別川の放流点（河口から約164km）に遡上した個体が2尾、神居古潭下流（KP139km付近）が1尾、旧花園頭首工下流（KP121km付近）が3尾、石狩川頭首工（KP43km付近）下流が4尾であった。中小支川に遡上した個体も確認でき、神居古潭の下流に位置する内大部川（KP135付近で合流）に3尾、新十津川町で石狩川に合流する徳富川（KP93 付近で合流）、砂川遊水地付近を流れるパンケ歌志内川（KP85付近で合流）の砂川市街で2尾が確認された。また、放流点よりも下流に降下した個体は、4尾確認され、うち2尾が千歳川に進入していた。

河川内に設置した超音波受信機が取得したデータから算出した、石狩川と忠別川の区間ごとのシロザケの遡上速度を図-23に示す。図-23中で放流地点よりも下流地点のデータは、シロザケが石狩川を大きい範囲で遡上と降下を繰り返しており、データ取得することが出来たものである。最も遡上速度が大きかったのは、河口～真勲別間で6.33 km/hであり、河口放流魚と同様にこの区間が最大となっていた。全体をみても千歳川合流上流（KP 29付近）で若干の遡上速度の上りはあるものの、突哨山（KP 169付近）まで上流に向かって遡上速度が低下していることが確認された。忠別川に進入してもその傾向は変わらず、忠別川の稚魚放流地点で0.38 km/hとなっていた。

一方、旧花園頭首工魚道内における遡上速度を見ると、旧花園魚道～上流左岸（左岸魚道）で0.10 km/h、旧花園魚道～上流左岸（左岸魚道）で0.02 km/hであった。両魚道の遡上速度と有意な差があるのは、1）真勲別まで、2）豊平川合流下流まで、3）千歳川合流上流まで、4）放流地点までの4区間であったが、全区間と比べても遡上速度は低いことが明らかになった。

5. 4 考察

これまでシロザケなどを対象とした遡上行動に関する調査は、ほとんどが上流域や下流域といった限定的な地域あるいは魚道周辺といった特定の地区内での実施されたものだった。本調査では、下流（河口）～上流（産卵域）までの本来の生息空間（利用空間）を対象として広域的なシロザケの遡上行動の把握を、バイオテレメトリー手法を用いて試みた結果、石狩川河口から放流したシロザケが、千歳川インディアン水車まで遡上する行動と、石狩川中流の

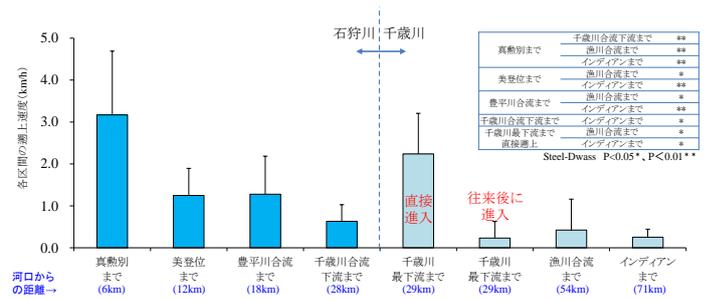


図-21 石狩川河口から千歳川インディアン水車までの遡上速度

青に着色したバーは石狩川内、緑に着色したバーは千歳川内の遡上速度を示す。千歳川最下流までが2つあるのは、迷わず千歳川に進入した群と合流点付近で往來を繰り返しながら千歳川に進入した群に分けた。

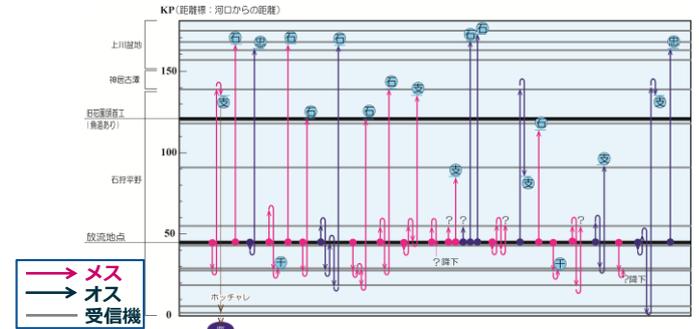


図-22 石狩川中流放流魚の遡上行動

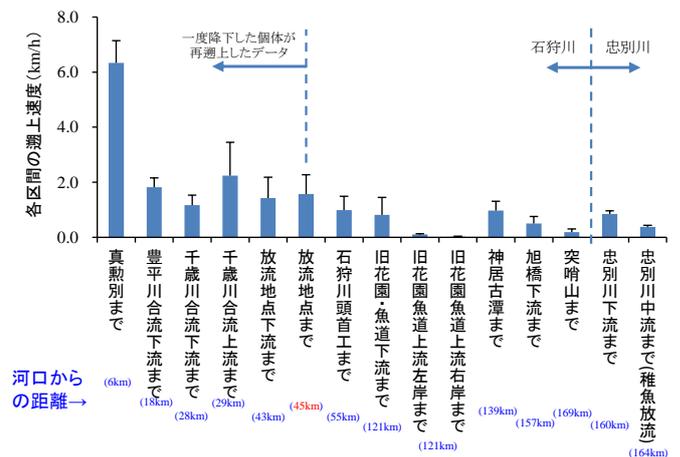


図-23 石狩川全体における遡上速度

たっぷ大橋上流より放流したシロザケが石狩川流域を遡上する行動などの特性が明らかになった。

5.4.1 河口放流魚の遡上行動

18尾放流した個体のうち、13尾が千歳川に進入した（11尾はインディアン水車まで到達し再捕獲）。

2013年、千歳川インディアン水車では約19万尾のシロザケが捕獲された⁷⁾。一方、石狩川上流に遡上したシロザケを四千尾と仮定すると、千歳川への遡上数割合は約98%になる。この98%と13尾/18尾 \approx 72%を比較すると、本調査の結果は、千歳川に遡上する割合が少ないと考えられる。しかし、本調査は、石狩川定置網で採捕したシロザケを漁業組合から購入したため、本来石狩川に遡上しない個体にも発信機を付けた可能性が考えられる。そのため、2尾は放流後再び海へ降下し、1尾が河口付近で斃死するということが生じたと考えられる。石狩川を遡上する意志を持った個体を採捕するのが望ましいが、石狩川河口でシロザケを一定数採捕することは大変難しい。現在は千歳川上流のインディアン水車での再採捕率は72%だが、再採捕できるシロザケの割合をより増やすことが確認出来れば、今まで河川内に放流することをためらってきた高額で再回収が必要な機器を用いて色々な事が解明できる。例えば、シロザケに加速度ロガーを使用した場合、いつ、何回産卵をしたかなどを解析することが出来る⁸⁾。現在、このロガーの使用場所は、実験室や野外でも網などで仕切られた場所が主である。今後、石狩川河口から千歳川の範囲で新しい機器を入れ新しい知見を得ることも、自然河川におけるシロザケの行動を把握するには有効である。

千歳川合流点付近でのシロザケの迷走が確認された。最終的に千歳川を遡上したにも関わらず、最初は千歳川を通り過ぎてしまう個体が5尾確認された。この5尾ともに合流点付近を何度も往來を繰り返していた。シロザケは河川の匂いの違いをかぎ分け、母川に遡上する⁹⁾。そのため、千歳川の匂いを確認するのに時間がかかった可能性もある。迷走した5尾の千歳川合流点付近に接近してから、千歳川に進入するまでの時間が平均17時間40分 \pm 15時間07分と1日弱かかることが確認された。豊平川合流点でも、一度豊平川に進入するもののすぐに石狩川に戻り上流へ遡上するという行動も確認された。そのため、シロザケは河川を遡上する際、各支川の匂いを嗅ぎ分けながら遡上していることが示唆された。そして、母川の匂いを感知できた個体は、遡上速度を上げ母川に進入することも確認された。構造物がなく河口から比較的近い位置(約28km)で合流する河川に置いては、シロザケが遡上する際に時間を要するような事柄は母川の匂いの検知だけだと考えられる。

5.4.2 中流放流魚の遡上行動

中流で放流した25尾の最終到達地点の割合を見ると、石狩川上流(石狩川上流+忠別川)に遡上した個体が28%、石狩川中流(石狩川中流(旧花園頭首工周辺など)+支川(内大部川、徳富川、パンケ歌志内川))に遡上した個体が40%、石狩川中下流(石狩川中流(石狩川頭首工)+降下)に遡上した個体が32%の割合であった。北海道区水産研究所では、2009~2011年に50万尾のサケ稚魚の放流を忠別川支川ポン川と石狩川支川愛別川で行っており、放流稚魚の主群の回帰は2012~2015年まで続くことが予想される。しかし、本調査の結果では、石狩川の放流地点付近に遡上できたシロザケは28%に留まっている。また、シロザケ稚魚の放流を行っていないと考えられる内大部川、徳富川、パンケ歌志内川の各支川への遡上も確認されている。そのため、シロザケは、母川には遡上するもののすべての個体が放流地点まで回帰しない可能性が示唆された。シロザケ稚魚は、ふ化後に母川の匂いを刷り込みながら降下することが知られている。その刷り込みのタイミングが個体ごとにばらつき、例えば徳富川合流点付近を通過する際にすりこまれれば徳富川に遡上する可能性があると考えられる。いずれにしても、全個体が放流場所へ戻らず流域の中で産卵箇所にはばらつきを持たせることは、シロザケが安定的に再生産する上で重要であると考えられる。

5.4.3 シロザケの遡上速度

河口放流個体も中流放流個体も、上流へ遡上するにつれて遡上速度が低下することが明らかになった。考えられる原因として、シロザケが下流にいるほど流入してくる支川の数が増え、母川の匂いを感知しづらくなるという可能性がある。河口の放流地点では、匂いを感知するまで時間がかかったが、上流に遡上するほど母川水の割合は増え認識度が上昇したため、無駄なエネルギーを使う探索行動を行う必要がなくなり遡上速度が下がると考えられる。実際、千歳川に進入すると著しく遡上速度は低下していた($P < 0.01, 0.05$)。もう一つの考えられる理由は、河川勾配が上流ほど急になるということである。石狩川の河川高水勾配では、石狩川河口でレベル、KP50で1/4152、KP100で1/1835、KP150で1/1598、愛別川合流点付近で1/203となっている。また河川は上流に進むほど水深が浅くなる。このように物理環境の違いにより小さくなる可能性がある。また、シロザケの生殖腺の発達具合により産卵場までの到達

時間を調整している可能性も考えられる。いずれの理由にしても、本来遡上速度が速くなければならない下流側（例えば河口付近）に河川横断工作物が設置されてしまうと、流域全体の遡上を阻害される恐れがあるので、十分遡上に配慮した魚道を設置しなければならないことが示唆された。

5.4.4 旧花園頭首工の魚道評価

平成 22-24 年の旧花園頭首工における左右岸のタイプの異なる魚道を対象とした研究⁴⁾では、両者に遡上効率の違いはあるものの遡上可能（遡上時間は 80 分～160 分程度）との評価となっている。しかし、この評価はあくまでも魚道周辺の空間スケールでの見方である。

本調査でも左右岸の魚道入口部および出口部に超音波受信機を設置している。この結果を見ると、左岸のロックランプ魚道が 67% の使用頻度、遡上平均時間 55.3 分と右岸のバーチカルスロット型魚道を大きく上回っており、上記の既存研究を支持するものであった。一方、流域レベルの広域スケールで見ただけでは、魚道入口を見つけられずに時間を費やし、産卵場への到達が遅れるという「遡上遅延の影響」も考える必要がある。KP150 より上流の石狩川上流へ遡上した 7 個体のうち、旧花園頭首工を挟んで明瞭な遡上の遅延が認められたのは 2 個体で、その遅延は 1～2 日間だった。遅延が認められた 2 個体についても、放流地点から産卵可能域である上川盆地までの所要時間が 5～10 日間程度であることを考えれば、産卵適期を外してしまうほどの遅延とは考えにくい。サケの遡上行動に関する知見を魚道設計に活かし、遡上遅延がないような位置、構造としていくには、「どのような流れを認識し、どのような遡上ルートで魚道入口に到達しているか?」「それはどのような（微）地形的特徴を有しているか?」といったことを明らかにしていくことが重要である。本調査の流域スケールの調査とは異なるが、少なくとも河川のリーチスケール程度でサケの遡上行動を面的にとらえていく必要がある。石狩川のような河川規模を対象とした場合、こうした遡上行動の把握には、バイオテレメトリーシステムを用いた詳細な行動追跡調査が有効と考える。

5.5 まとめ

本研究では、バイオテレメトリー調査としてシロザケに発信機を装着し、石狩川流域全体の遡上行動の把握を行った。その結果、1) 流域全体の遡上行動

を勘案した魚道評価の可能性を見出した、2) 石狩川流域全体を大きな範囲で遡上と降下を繰り返し産卵適地に到達、3) 稚魚放流していない河川への遡上・産卵を確認、4) 上流に向かうにつれ遡上速度が低下するということが明らかになった。魚道は、全世界で膨大な数が設置されているが^{10,11)}、その機能について判明していないことは数多くある。そのため、魚道の特性をより正確に解析するために、様々な河川や魚道内における様々な魚類の遊泳行動を、バイオテレメトリー機器を使用して評価すべきである。より多くの河川や魚道内の魚類の遊泳行動データを収集することは、流域全体の魚類保全を行う上で、魚道の評価を的確に行う上で重要である。

参考文献

- 1) Orsborn JF. Fishways—historical assessment of design practices. In: Dadswell MJ, Klauda RJ, Moffitt CM, Saunders RL, Rulifson RA, Cooper JE, eds. *Common strategies of anadromous and catadromous fishes, Proceedings of an international symposium*. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society 1987:122-30.
- 2) Cooke SJ, Hinch SG, Wikelski M, Andrews RD, Kuchel LJ, Wolcott TG, et al. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends Ecol Evol*. 2004 Jun;19(6):334-43.
- 3) Ueda H. Recent biotelemetry research on lacustrine salmon homing migration. *Mem Natl Inst Polar Res*. 2004;58:80-8.
- 4) 林田寿文, 三浦剛志, 矢部浩規. バイオテレメトリーによる石狩川旧花園頭首工に設置された 2 つの魚道のシロザケ遡上行動調査. 平成 24 年度技術研究発表会. 2012.
- 5) Miyoshi K, Hayashida K, Sakashita T, Fujii M, Nii H, Nakao K, et al. Comparison of the swimming ability and upstream-migration behavior between chum salmon and masu salmon. *Can J Fish Aquat Sci*. 2013;70:1-9.
- 6) Hayashida K, Nii H, Tsuji T, Miyoshi K, Hamamoto S, Ueda H. Effects of anesthesia and surgery on U_{crit} performance and MO_2 in chum salmon, *Oncorhynchus keta*. *Fish Physiol Biochem*. 2013;39:907-15.
- 7) 千歳サケのふるさと館. <https://www.city.chitose.hokkaido.jp/tourist/salmon/> 2014.
- 8) Tsuda Y, Kawabe R, Tanaka H, Mitsunaga Y, Hiraishi T, Yamamoto K, et al. Monitoring the spawning behaviour of chum salmon with an acceleration data logger. *Ecol Freshw Fish*. 2006 Sep;15(3):264-74.

- 9) Ueda H. Physiological mechanism of homing migration in Pacific salmon from behavioral to molecular biological approaches. *Gen Comp Endocrinol.* 2011;170(2):222-32.
- 10) Castro-Santos T, Cotel A, Webb PW. Fishway evaluations for better bioengineering: an integrative approach. In: Haro AJ, Smith KL, Rulifson RA, Moffit CM, Klauda RJ, Dadswell MJ, et al., eds. *Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment*. Bethesda, MD: American Fisheries Society Symposium 2009:557-75.
- 11) Roscoe DW, Hinch SG. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish Fish.* 2010 Mar;11(1):12-33.

来種に対して果たす役割を詳細に得ることが可能となると考えられる。

4) 石狩川河口から発信機付シロザケを放流し上流産卵場までの産卵遡上行動の把握を行った結果、石狩川流域全体における、河川横断構造物がシロザケの産卵遡上行動に与える影響を解明できた。

以上より、健全な魚類の生息環境を面的に連続して確保する氾濫原管理手法として、テレメトリーシステム等を用いた調査方法を開発することができた。

6. プロジェクト⑩-4 氾濫原における寒冷地魚類生息環境の影響評価・管理手法に関する研究のまとめ

本研究の結果、テレメトリーシステムを用いた調査方法は、河川流域全体における縦断的・横断的な連続性の評価を行うことができる方法として提案することができた。以下に、2章から5章のまとめを示す。

- 1) 「寒冷地魚類の行動特性と河川構造物による影響の把握」について、美利河ダム周辺（減水区間、魚道、上流区間）のサクラマス親魚における産卵遡上特性とダムが実施する弾力管理放流の遡上促進降下を調査した結果、美利河ダムの魚道や弾力管理放流は、サクラマス親魚をダム上流まで阻害なく通過させ、産卵遡上の補助になっていることを解明できた。
- 2) 「テレメトリーシステム等を用いた、流れに対する魚類の生理・行動学的影響の把握」について、美利河ダムの魚道や河川構造物（分水施設）の魚類通過の機能評価を行うため、サクラマス幼魚の降下行動を調査した結果、魚道や分水施設などの河川構造物は、サクラマス幼魚の降下行動に影響を与えないことを解明できた。
- 3) 「氾濫原における「移入種・外来種」の侵入状況及び影響の把握」について、石狩川旧川群に生息する魚類について、移入種・外来種の侵入状況および在来種の生息状況の長期的変遷の把握および評価を行った結果、石狩川旧川群について、約30年間で在来種と比較して外来種・移入種は、生息旧川数を大幅に増やしていることを解明できた。

ただし、この石狩川旧川群の研究ではテレメトリーシステムは用いてないが、今後テレメトリーシステムを用いることで、旧川群が貴重種や移入種・外

STUDY ON IMPACT ASSESSMENT AND MANAGEMENT TECHNIQUE OF THE COLD-WATER FISH IN THE FLOOD PLAIN

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Watershed Environmental Engineering

Research Team

Author : HIRAI Yasuyuki

TANISE Atsushi

HAYASHIDA Kazufumi

YANO Masaaki

MIZUGAKI Shigeru

Abstract :

This research was conducted in four systems to establish impact assessment and management technique of the cold-water fish in the flood plain: 1) comprehension of adverse consequence that in-river barriers gives to cold-water fish, 2) comprehension using telemetry system of behavioral physiology influence that river-flow gives to cold-water fish, 3) comprehension of the invasion situation of introduced species and alien species in the flood plain, 4) development of the flood plain management technique to secure the desirable fish biotope. As a result, it was concluded that investigation method using telemetry systems was extremely useful as a way to secure the desirable fish biotope.

Key words: flood plain, telemetry system, fish investigation, river continuity, oxbow lake