

# テレメトリーを用いた石狩川流域における シロザケの遡上行動の評価

(独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム ○林田 寿文  
明治コンサルタント(株) 有賀 誠  
北海道開発局札幌開発建設部河川計画課 佐藤 耕治

石狩川を遡上するシロザケ親魚に発信機を装着し、流域全体の産卵遡上行動解析を行った。放流は、石狩川河口と中流（たっぷ大橋KP45付近）の2地点から行い、構造物のない区間と魚道などの変化区間での遡上行動を比較した。その結果、石狩川全域でのシロザケの遡上行動を定量的に把握でき、魚道内での遡上速度の低下や神居古潭などの急峻区間で遡上をあきらめその下流で産卵することが確認できた。テレメトリーにより遡上行動の詳細な把握や魚道評価が可能となる。

キーワード：シロザケ、バイオテレメトリー、産卵遡上行動、魚道、石狩川

## 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<sup>1)</sup>。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<sup>1)</sup>。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<sup>2,3)</sup>、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<sup>4)</sup>は、石狩川A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<sup>5)</sup>。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-1）。石狩川ではA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B頭首工の水門は、シロザケ遡上期には開いている）。A頭首工は、バーチカルスロットとロックランプの2つの

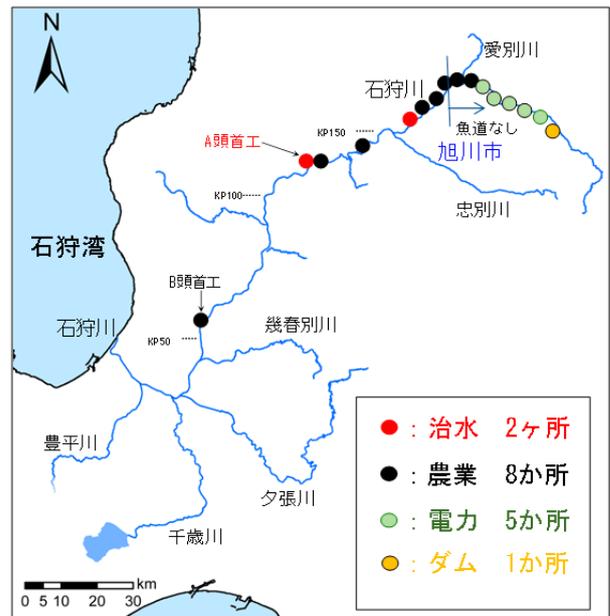


図-1 石狩川流域平面図 丸は石狩川における河川横断構造物の設置位置を示す。丸の色の違いは主な目的の違いを示す

魚道が設置されている。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。

## 2. 調査方法

### (1) 調査範囲

石狩川は、流域面積 14,330 km<sup>2</sup>、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-1）。シロザケの遡上時期には、A頭首工が最初に遭遇する魚道を通過しなければならない横断工作物となる（図-1）。A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、A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。

### (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、A頭首工魚道のの上流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基のの合計25箇所に設置した（写真-2、図-2）。なお、石狩川河口は川幅が広いいため左右岸に1基づつ、A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



写真-1 シロザケへの発信機装着状況

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で、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。

### (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が可能である。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が記録することから、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-1）。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<sup>10</sup>。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



写真-2 超音波受信機  
河川内に沈めて設置

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（図-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<sup>9)</sup>、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。

### 3. 結果

#### (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-3）。

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時間以上を要したことが確認された（図-4）。

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-5に示す。最も遡上速度が大きかったのは、放流地点から真勲別（KP6付近）間であり平均で3.17 km/hであった。真勲別～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

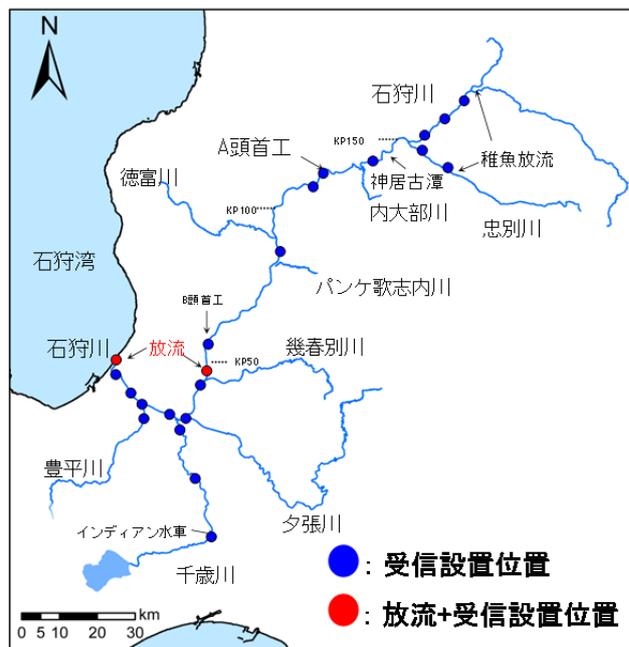


図-2 石狩川流域平面図 ●は超音波受信機の設置位置を示す。●は発信機付シロザケの放流箇所および受信機設置位置を示す。

とが明らかになった（ $P < 0.01, 0.05$ ）。

#### (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-6）。各個体の最終到達地点は、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、A頭首工下流（KP121km付近）が3尾、B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ク歌志内川（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。

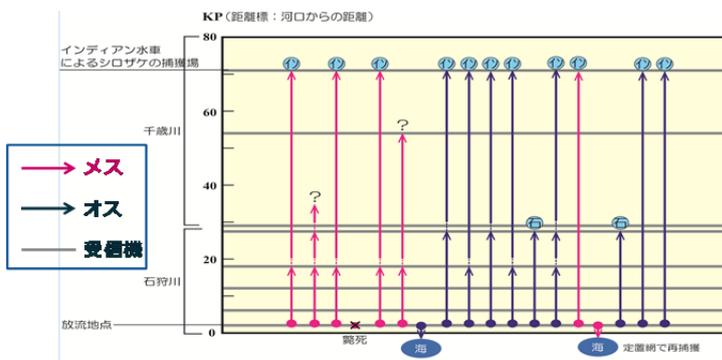


図-3 河口放流魚の遡上行動

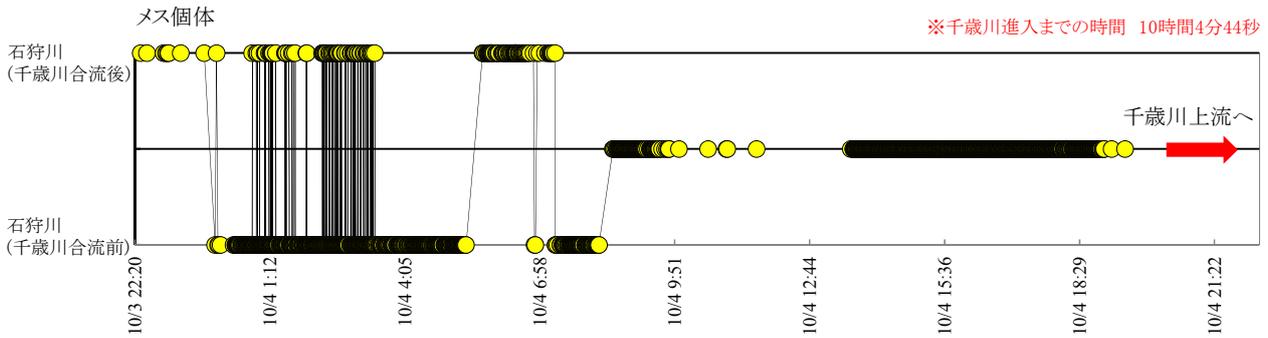


図-4 石狩川と千歳川の合流点付近のシロザケの遡上行動

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-7に示す。図-7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～真敷別間で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、突峭山（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、A頭首工魚道内における遡上速度を見ると、A魚道～上流左岸（左岸魚道）で0.10 km/h、A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）真敷別まで、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。

#### 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。

##### (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<sup>7)</sup>。一方、石狩川上流に遡上したシロザケ

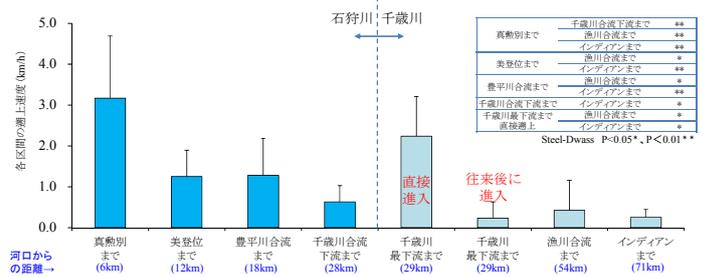


図-5 石狩川河口から千歳川インディアン水車までの遡上速度

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を往來を繰り返しながら千歳川に進入した群に分けた

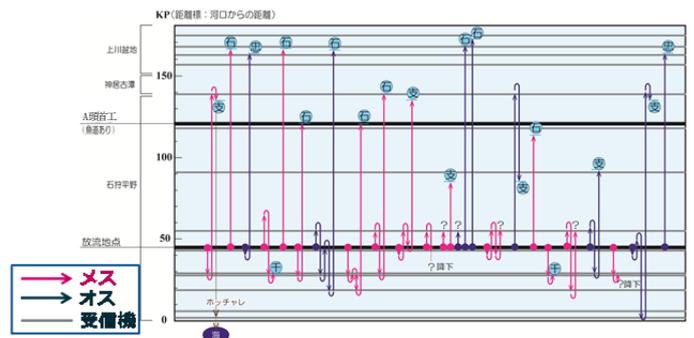


図-6 石狩川中流放流魚の遡上行動

を四千尾と仮定すると、千歳川への遡上割合は約98%になる。この98%と13尾/18尾≒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<sup>8)</sup>。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<sup>9)</sup>。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±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。

## (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(A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(B頭首工+降下)に遡上した個体が32%の割合であった。北海道水産研究所では、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、

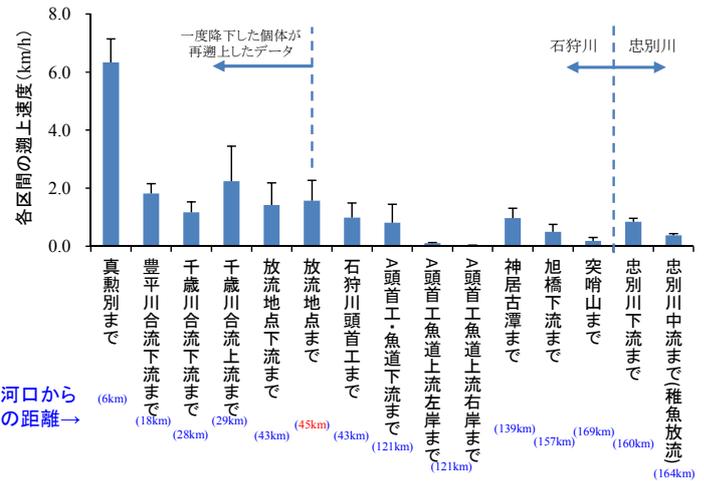


図-7 石狩川全体における遡上速度

例えば徳富川合流点付近を通過する際にすりこま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。

## (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。

## (4) A頭首工の魚道評価

平成22-24年のA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<sup>4)</sup>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場合には、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、A 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、バイオテレメトリス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) 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<sup>10,11)</sup>、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。

## 謝辞

本研究は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター上田宏教授の御指導・御協力の下、実施している。北海道開発局札幌開発建設部、旭川開発建設部から調査の許可とアドバイスをいただきました。豊平川さけ科学館には、シロザケ運搬をしていただきました。日本海さ

け・ます増殖事業協会には、インディアン水車で発信機付シロザケの採捕をしていただきました。北海道大学宮下和土教授より、超音波受信機の一部を貸与いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Orsbom 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  $U_{O_2}$  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, Hiraiishi 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, Moffitt 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.