

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

(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
札幌開発建設部河川計画課 三浦 剛志
(独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム 矢部 浩規

異なる形式の魚道が設置された石狩川旧花園頭首工周辺において、2010年から2012年の9月から11月に産卵期であるシロザケ66尾を用いて遡上行動調査を行った。調査にはバイオテレメトリー手法を採用し、シロザケに電波発信機と超音波発信機の両方を装着した。各魚道内でシロザケを放流した結果、ロックランプ魚道の遡上成功割合が高かった。バーチカルスロット魚道に放流したシロザケは、著しく通過時間が大きく、ロックランプ魚道に比べエネルギー消費が大きかった。旧花園頭首工の500m下流から放流したシロザケは、1:3の割合でバーチカルスロット魚道よりもロックランプ魚道の方に到達するシロザケの割合が大きかった。ロックランプ魚道は、バーチカルスロット魚道と比較し魚道内を速やかに通過できエネルギー消費も少ないことから、シロザケは効率的に遡上できることが示唆された。

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¹⁾。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¹⁾。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

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いくつも設置され、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)}、異なる場所の魚道と比較したもの^{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. 調査方法

(1) 研究範囲

石狩川は、流域面積14,330km²、幹川流路延長268km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（魚道入り口が見つけやすい）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) 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

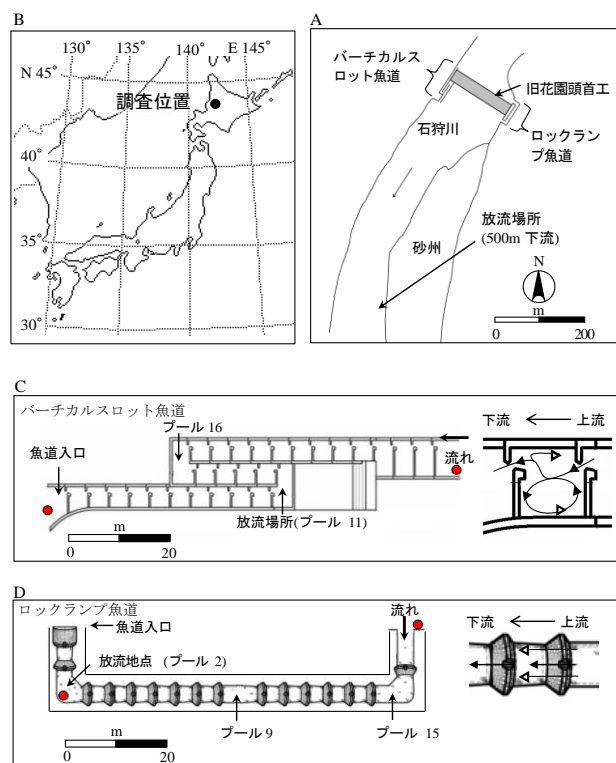


図-1 旧花園頭首工の概略図 (A)、発信機を装着した魚は旧花園頭首工の500m下流より放流された。Bは調査地を示す。Cはバーチカルスロット魚道の概略図を示す、発信機を装着した魚は流速の遅いプール11より放流された（矢印の位置）。Dはロックランプ魚道の概略図を示す。発信機を装着した魚は、各魚道内の流速の遅いプールより放流された（矢印の位置）。右側の図は、バーチカルスロット魚道およびロックランプ魚道の代表的なプールの一般的な平面的流況を示す。魚類は、各魚道内の白三角部分に多くの時間定位する。●は超音波受信機の設置位置を示す。

ザケは66尾（オス39尾、メス27尾；平均体長60.2±6.3cm、平均体重2.67±0.82kg）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。

(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



図-2 発信機装着状況

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²⁹⁾、河川内に設置したいけすで養生後、放流を行った。

(4) データの収集

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。

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

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。

(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(平均体長: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。

3. 結果

(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

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魚道における平均遊泳速度

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)
<i>P</i> value	>0.05	>0.05	< 0.003 **	< 0.04 ***

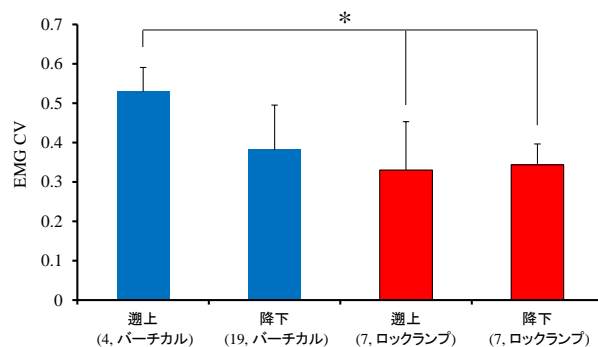
*カッコ内の数字は、解析に用いた魚の数を示す。

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

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



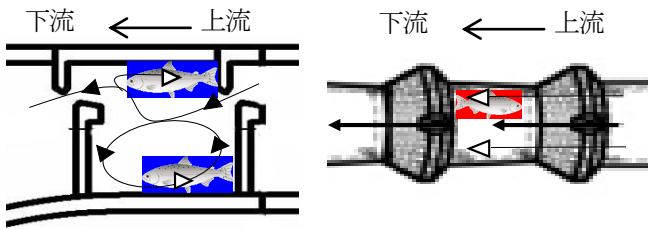
図－3 2つの魚道の遡上時と降下時におけるEMG値の変動係数

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 $P < 0.03$)

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 $P < 0.03$)。



図—4 各魚道内におけるシロザケの定位方向

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²⁹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 Rand¹⁹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つ

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需要である。

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、ロック魚道内のボトルネックが明らかになるなど、どの魚道にも長所短所がある。たとえば、旧花園頭首工の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。このように形式が異なる魚道を設置することは、不慮の事故にも備えることができる。そのため、水産有用種や貴重種が遡上しなければならない河川横断工作物には、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。

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。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Orsbom JF. Fishways—historical assessment of design practices. In: M. J. Dadswell, R. J. Klauda, C.M. Moffitt, R. L. Saunders, R. A. Rulifson, Cooper JE, eds. *Common strategies of anadromous and catadromous fishes*. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society 1987:122-30.
- 2) Baumgartner LJ, Marsden T, Singhanoung D, Phonekhampheng O, Stuart IG, Thomcraft 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 RL. 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, Bjornn 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. *Memoirs of National Institute of Polar Research*. 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_{O_2} performance and MO_2 in chum salmon, *Oncorhynchus keta*. *Fish Physiol Biochem (in printing)*. 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;7(6(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 edn ed: Lewis Publishers, Boca Raton. 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: A.J. Haro, K.L. Smith, R.A. Rulifson, C.M. Moffitt, R.J. Klauda, M.J. Dadswell, et al., eds. *Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment. American Fisheries Society Symposium, Bethesda, MD 2009*.

Kazufumi Hayashida, Tsuyoshi Miura, Hiroki Yabe