

魚道機能に関する実験的研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
 研究期間：平 20～平 23
 担当チーム：河川生態チーム
 研究担当者：三輪 準二，村岡 敬子

【要旨】

本研究では、魚類の遊泳行動に基づいた魚道および周辺設備の評価・設計に資するため、階段式魚道および粗石付き魚道の実物大模型を製作し、高速ビデオカメラを用いて魚類の遡上行動を解析した。また、観察窓を有する現地の魚道において、実験と同様の手法を実際の魚道内部における遡上行動の観察に適用した。本研究の結果、魚道内の微細な流れ場が特に小型魚や底生魚の遡上環境に大きく関与していることを明らかとするとともに、その改善策を提案した。また、魚類の移動経路が確保されていれば、魚道内の土砂堆積が許容できる場合もあることを示した。

キーワード：遊泳行動，高速ビデオカメラ，隔壁形状，維持管理，粗石

1. はじめに

河川に生活する魚類の多くは、繁殖、採餌、忌避行動などのため、こうした河川の上流あるいは横断方向の移動を行う。こうした、魚類が生活史を送るにあたって必要な移動が堰堤等人為的な構造物により妨げられる場合、可能な範囲で魚道の設置が検討される。以前はサケやアユといった水産的価値の高い魚種を中心に魚道が設置されてきたのに対し、近年では多様な魚種を対象に遡上を可能とならしめるべく、魚道の設計上さまざまな工夫がなされている。このうち、階段式魚道を含む全てのプールタイプの魚道では、隔壁部分にもっとも速い流速が生じ、魚の遡上のためには、この断面の流速を、魚の突進速度より小さくすることが必要とされている。しかしながら、既知の突進速度以上の流速が想定される魚道落差においても魚の遡上が確認されるなど、理論値と実現象に不整合な部分もあり、魚の遊泳行動に基づいた魚道の設計手法はまだ確立できていない。粗石付き魚道では、魚が遡上可能となる流れだけでなく、そのような流れを作るた

めに必要な粗度の規模や必要な密度に関する知見が系統だって整理されていない実情があった。さらに、こうして整備された魚道においても、非回遊魚を中心に「当該魚道においてどれだけの尾数が遡上・降下すべきか」が明らかではないため、設置された魚道が十分な機能を維持しているか否かを判断することが困難な実情がある。

本研究課題では、魚道内の遊泳能力や嗜好性に配慮した流れ場のあり方を示すとともに、既存魚道における流れの問題点を的確に把握・評価するための模型実験および現地調査を実施した。模型実験においては、魚類の遊泳行動に基づいた魚道の設計技術

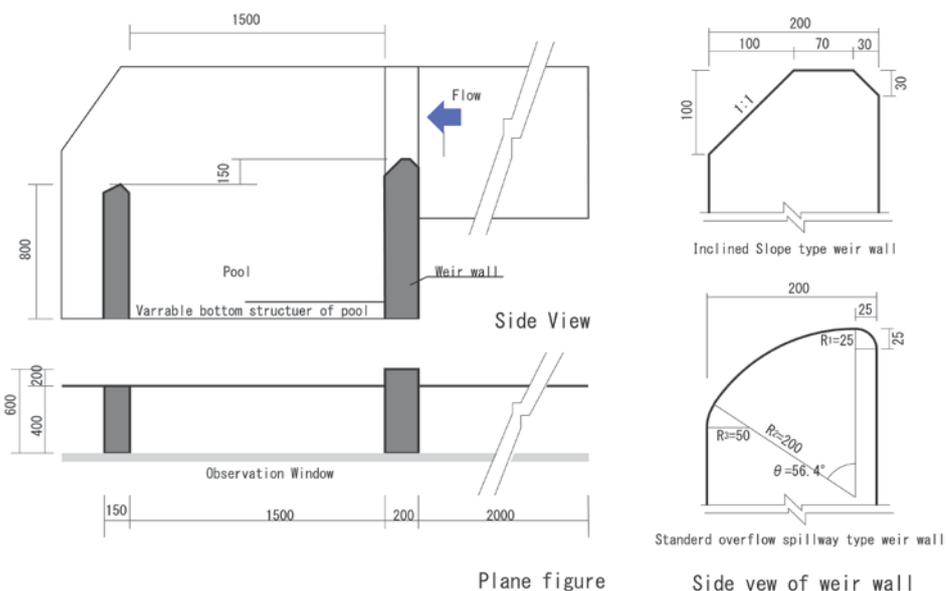


図-1 魚道模型図

を提案するために、階段式魚道および粗石付き魚道の実物大模型を作成し、隔壁や粗度周辺の複雑な流れ場におけるアユ、カジカ、イワナの遡上行動を高速ビデオカメラにより観察を行った。また、寒地土木研究所と連携し、北海道内における実際の魚道を対象に遺伝情報を用いた魚道評価を行った。

2. 研究方法

2.1 魚類の遊泳行動に関する模型実験

土木研究所内の実験水路に幅 40cm の木製二次元水路模型を製作し、その内部に階段式魚道、粗石付き水路の実物大模型を設置した (図-1)。階段式魚道模型の隔壁は、厚さ 20cm、越流水深 20cm、隔壁間落差 15cm、プール水深 40cm とし、隔壁頂部の形状 3 形状について実験を行った。また、粗石付き魚道においては、粗石の形状、高さ、配置、水深を変えたケースについて実験を行った。双方の実験共に、実験水路の観察窓の外側に取り付けられた暗室に携帯高速ビデオカメラ (ディテクト社製 Sport courder) を設置し、毎秒 200 コマ、解像度 640×480 ピクセルの設定で、魚の遡上行動前後の最大 12 秒にわたり撮影を行った。流況観察を目的に、天ぷら粉をトレーサーとしたレーザースリット光源による撮影をそれぞれの水理条件に対して行った。撮影した画像を基に、魚の運動軌跡を、二次元軌跡解析ソフトウェア (株ディテクト DIPP Motion Pro) を用いて軌跡を追跡した。軌跡から得られた移動距離に基づき移動速度 (XY 方向) を求めた。全ての検定は両側検

定とした。

2.2 現地調査

階段式魚道における魚類の遊泳行動実験と実地の魚道を遡上してきた魚の挙動等を比較するために、福井県九頭竜川鳴鹿大堰における観察窓付き魚道において同様の観察を行った。また、北海道内の農業水路において実施した、遺伝情報を用いた魚道評価の結果を踏まえ、現地の状況を確認した。

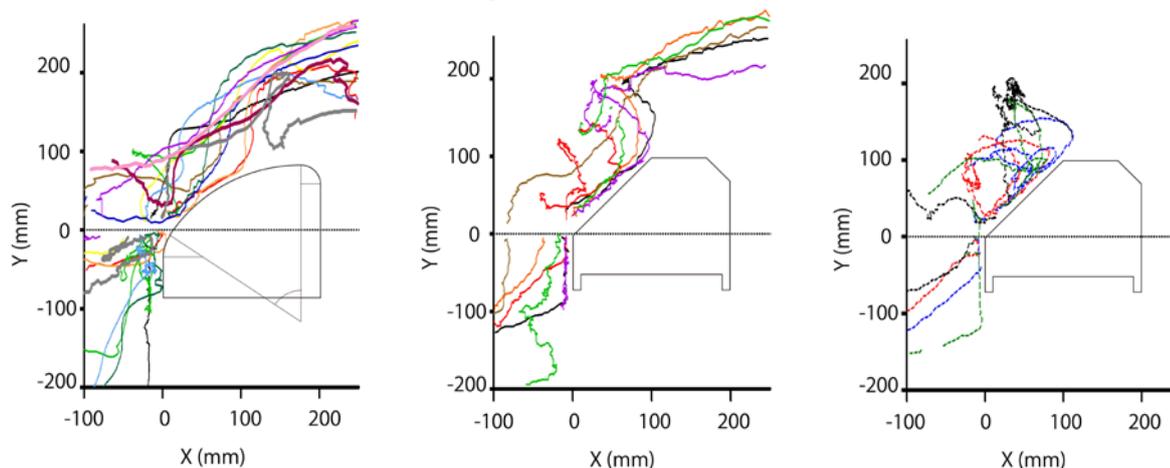
3. 研究結果

3.1 階段式魚道内の流れと魚類の遊泳行動に関する実験

(1) 隔壁周辺における魚類の遊泳行動に関する結果

実験結果の一例として、階落差 15cm、越流水深 10cm の条件における階段式魚道隔壁部周辺におけるアユの遡上軌跡を図-2 に示す。多くの個体の遡上軌跡は S 字カーブを描き、遡上軌跡の前半 (概ね $X \leq 50 \sim 70\text{mm}$ の範囲) において凹状を示した後、中盤 (概ね $X=50 \sim 120\text{mm}$ の範囲) で凸状となり、後半 (概ね $X > 100\text{mm}$) は水脈の上部に集まった。

同条件の切り欠き型隔壁を遡上したアユ ($n=5$, 実線)、遡上に失敗したアユ ($n=4$, 破線) 双方共に、隔壁上部に達することができたアユはいずれもナップの下面からアプローチを行った。1 個体を除く全ての個体の隔壁上の軌跡は、前半 (概ね $X < 60 \sim 100\text{mm}$) 切り欠きの斜面上に沿うが、遡上個体・遡上失敗個体共にその後、斜面から円弧を描くように隔壁表面より離れた。軌跡が斜面に沿っている間の平均移動



a) 標準越流頂型隔壁 (成功個体)

b) 切り欠き型隔壁 (成功個体)

c) 切り欠き型隔壁 (失敗個体)

図-2 隔壁上を遡上するアユの軌跡

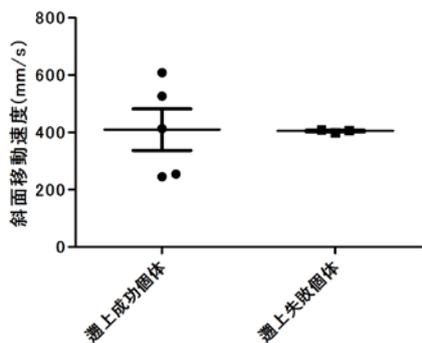


図-3 切り欠き型における斜面上の移動速度

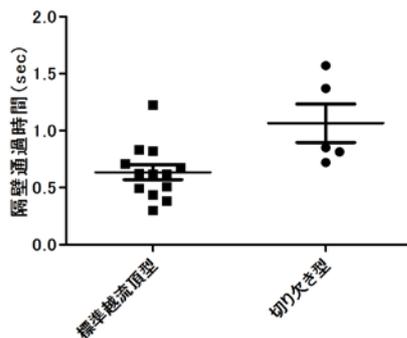


図-4 隔壁通過時間

速度は遡上の可否の間に差はなく(図-3, t 検定, $p=0.9639$), 成功個体で 244~608mm/s, 失敗個体で平均 399~408mm/sec であった. また, いくつかの個体においては斜面上を遡上してきた個体が, 勾配変化点($X=100\text{mm}$)付近において移動速度を突然小さくさせる様子が観察され, これは切り欠き型隔壁における他の実験条件においても同様であった. 一方, 体長が大きく遊泳力のあるイワナにおいては, このような状況はいずれも観察されず, 標準越流頂型隔壁, 切り欠き型隔壁の間に違いはみられなかった.

遡上に成功した個体が隔壁の通過に要した時間は標準越流頂型隔壁では $0.64 \pm 0.24\text{sec}$ に対して, 切り欠き型隔壁で $1.07 \pm 0.38\text{sec}$ 長く, 両者の平均値は有意に異なる結果(t 検定, $p<0.01$)となった(図-4). また, 標準越流頂型・切り欠き型越流頂双方共に, 隔壁へのアプローチに失敗した個体の多くは, ナップの境界部においてバランスを崩している状況が観察された.

階段式魚道においては従来いわれてきたように, ナップなど速い流れの境界付近において魚がバランスを崩すことによりスムーズな遡上が困難な状況がみられるだけでなく, アユのように小型の魚においては隔壁上におけるわずかな流れの変化部が遡上の

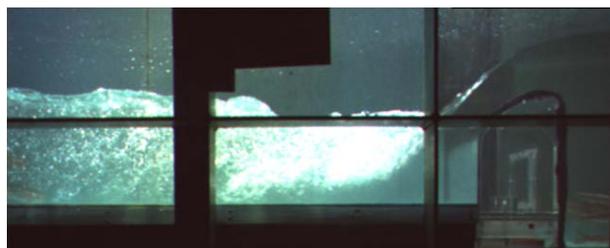
しやすさに大きく関与していることが明らかとなった. 多様な魚種の遡上環境の改善のためには, 越流水深や落差, あるいはプールへの越流水脈の突入流況だけでなく隔壁の微細な形状についても配慮が必要であるといえる.

(2) 浅い階段式魚道における魚類の遊泳行動

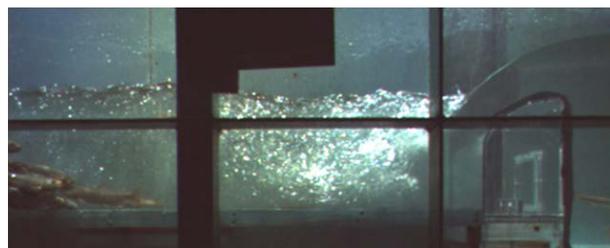
一般的な形状の階段式魚道においては, 隔壁を越流した

速い流れは, 拡散しながらプール底面に沿って流れ, プール内の浮遊魚はこの流れの上部の比較的緩やかな流れの領域に定位しようとする. プール水深が浅い場合には, 定位できるような流れの緩やかな領域が狭くなるため魚はより流速の小さい下流側に定位することとなり, 隔壁のアプローチが困難となる(図-5a). プールの床面が流れの一部を透過する場合には, 同じ水理条件においても底面に沿う流れは不透過の場合に比べ緩やかとなり, 魚はより隔壁に近い位置に定位可能であるとともに(図-5b), 隔壁へのアプローチも可能であった. このとき, 多くの浮遊魚は遡上経路を越流水脈の上部をとるが, 底生魚を含む一部の個体は, 底面に沿って越流水脈の下側に入り込み, 水脈の仮面もしくは隔壁沿いに遡上経路をとった.

プール内に土砂が堆積した場合においても, その流況は堆積量や堆積物の径等によって異なるものの, 今回の実験結果と同様に, 隔壁を越流下流れの一部が堆積物の間を流れ, 魚の移動経路上の流速が十分に遅くなる場合も考えられる. 魚道内の土砂堆積は維持管理上問題視されることが多いが, プール内水深が浅い場合であっても魚の移動経路となる流れが確保できていれば, 魚道の機能上はその状態を許容できると考えられる.



a) 底面不透過素材



b) 底面透過素材

図-5 プール水深が浅い魚道内でのイワナの定位位置 (プール水深 15cm, 落差 15cm)

3. 2 粗石付き魚道における魚類の遊泳行動に関する実験

粗石付き魚道は斜面上に配された石によって流速を低減する形式であり、その流れ場は粗石の大きさや配置によって変化する。また、石の裏側に形成される流れの緩やかな領域は遡上途中の魚の休憩場所として利用できるといわれている。一方で、浮遊魚・底生魚共に粗石周辺の流れの変化部でバランスを崩し遡上に失敗する個体が多くみられた。また、浮遊魚においては遡上経路となる流れが直線状に確保できているケースのほうが、千鳥状の遡上経路の場合よりも失敗する個体が少ない結果となった。

3. 3 現地調査の結果

(1) 観察窓付き魚道における観察

階段式魚道における魚類の遊泳行動実験でみられた、「階段式魚道隔壁上面に沿った流れの変化部において、アユがバランスを崩し、遡上に失敗する」現象が、福井県九頭竜川の鳴鹿大堰魚道においても観察された。

本魚道の設計条件である越流水深 0.13mの際には、ヨシノボリおよび5月期のアユは下流プールに斜めに突入する越流水脈の下部に遡上経路を選択し、流向の変化部付近で遡上に失敗する個体が多く観察された。ウグイ、オイカワおよび7月期のアユにおいてはこのような状況は観察されなかった。越流水深 0.30mでは、越流水脈のプールへの突入角度は浅く、流況も悪化するが、越流水脈の下部に塞き上げによる流速の緩い領域を利用し、アユ、ウグイ、オイカワが遡上するのが確認された。一方、ヨシノボリの遡上経路は、水表面の壁面沿いに移行するとともに、ウグイによる捕食圧を受けている様子が観察された。魚種や時期によっても、遡上しやすい流況が異なることが示唆された³⁾。

(2) 護岸と魚の遡上経路

北海道内における農業排水路において、遺伝情報を用いて魚類の移動環境を評価した結果、ハナカジカにおいて、堰堤の上下流の違いが検出されず、本排水路内において大きな移動障害環境が現状では認められない結果が得られた。本研究の成果を踏まえると、対象区間内の全ての堰堤に設置されている魚道の流れはハナカジカの遡上に向いていないと考え

られるが、本排水路の両岸は蛇かごで覆われており、水際まで植生が達していることから、降雨時などに水際を移動可能であったことが推察された。

4. まとめ

本研究では、魚類の遊泳行動に基づいた魚道および周辺設備の評価・設計に資するため、階段式魚道および粗石付き魚道の実物大魚道模型および実地の魚道における魚類の遡上行動を高速ビデオカメラにより解析した。本研究の結果、以下のことがわかった。

- 1) 階段式魚道および粗石付魚道双方の魚道形式とも隔壁底面や粗石周辺における流れの急変部が遡上に失敗する大きな要因である。
- 2) 階段式魚道においては、越流水脈が隔壁頂部に沿うような越流部断面形状とすることが、遊泳能力の小さい魚にとって重要である。
- 3) 浮遊魚の粗石付魚道における遡上経路は直線的であるほうがよい。
- 4) 魚道本体だけでなく周辺の護岸形状の工夫により魚の遡上環境を改善できる可能性がある。
- 5) 魚道の維持管理において、遡上経路が確保できれば土砂堆積が許容される場合がある。

今後は、これらの技術の実用化に向け、現場での適用を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 村岡敬子, 山下慎吾 他, 「カジカの集団の遺伝情報に見られた, 特異な繁殖履歴」, DNA 多型 Vol.19, pp105-109, 2011.11, 日本 DNA 多型学会
- 2) Department of Human Genetics University of Chicago and Department of Statistics University of Oxford, USA
- 3) 村岡敬子・篠塚由美 他, 「階段式魚道における流況と魚類の遡上経路」, 平成 24 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, pp41, 2012.3
- 4) 村岡敬子, 須藤勇二 他, 「遺伝情報を用いた魚道機能の検証」, 応用生態工学会第 14 回研究発表会講演集, pp75-76, 2010.9

EXPERIMENTAL STUDY OF FISH PASSAGE

Budgeted: Grant for operating expenses
General account

Research Period: FY2008-2011

Research Team: Water Environment Research Group
(River Restriction Research Team)

Author: MIWA Junji
MURAOKA Keiko

Abstract : In Japan, many fish passage have been designed and constructed on facilities which impede the movement of fishes, to facilitate their migration. Although the numbers of fishes migrating across fishways have been examined to evaluate fishways, such data is insufficient to verify the functions of fishways, because the number of migrating fish required in the ecosystem is not known. In this study, the objective of a fishway was defined as “preservation of the local population of fishes” , and the molecular biological method was used to evaluate fishways. And our results show that the molecular biological method can be used to evaluate fish migration, especially across fishways.

Also, the characteristics of fish swimming over the crests of three experimental weir designs were examined in this study. Fish behaviors were recorded using ultra high-speed cameras in a full-scale experimental weir. The swimming loci of the fish were traced by motion capture system and their movement distance, speed and acceleration in the nappe were estimated. The findings revealed that both of the high velocity characteristics and their stream lines of the nappe prevented fish from effectively using the weir as a fish ladder. The comparison of the swimming loci shows that differences of the stream line on nappe resulting from the different weir shapes were effectively for the passage route of small fish. The boundary line of the nappe flow acts as a barrier to relatively weak swimmers. The separated flow of the nappe in the low levels can produce a flow on the spot of the weir that is sufficiently weak for these weak swimmers to overcome. To consider adequate boulder arrangement and size, the swimming physiology of fish on a ramp fish passage were observed. Each species required different boulder arrangements based on their swimming physiology. More than 60 boulder arrangements of ramp fish passage were examined to consider the optimum flow based on their swimming physiology. In most of the experimental cases, they lose their swimming balance and fail to migrate in boundary flow currents and in the turbulent water around boulders. And the roughness on the surface of floor board is effective for sculpin's migration.

Key words : swimming performance, ultra high-speed camera, weir shape, fish ladder, ramp fishway