

3次元点群モデルを用いた 全断面魚道評価のための簡便な機能把握手法の提案

林田寿文・阿部謙三・萱場祐一

1. はじめに

全断面魚道の内、近年では小割したランダムな形状のプールに落差をつけたウロコタイプ（以下「ウロコ」とする。）（図-1）は景観性に優れ、流況も多様であることから数を増やしている。ただし、ウロコは構造の複雑さから流況計算も困難であり機能評価が難しい。また、設置した粗石が出水時に流出することもあり、当初の設置状況から経年的に変化する。そのため、既存のウロコが、現状で魚道として十分機能しているかを把握する手法が求められている。

本研究は、全断面魚道のうちウロコを対象として、調査が比較的簡単な物理環境面から魚道機能の簡便な把握手法の提案を目的とした。これにより、魚道の既往評価で行われてきた魚類の遊泳行動や遡上数の調査をすることなく、簡易的に魚道評価が可能となることが期待される。具体的には近年普及が進むドローン（UAV）による空撮写真から、対象魚道の3次元点群モデルを作成し、プール間落差、水脈の流下方向の変動、水脈数に基づき、魚道機能の把握を行うことを試みた。また、対象魚道機能の把握結果を参考に、ウロコを設計する際の留意点を取りまとめたので報告する。

2. 調査方法

調査は岐阜県中央部の竹原川に設置されているウロコ（図-1）を選定した。魚道延長29.9 m、総落差高2.87 m（勾配1/10.4）であり、全21個のプールから構成されている（図-1）。ここで、水面標高のほぼ同じ範囲を1つのプールとして設定した。最上段を1番プールとし、下流側に向かって番号を振った（図-1 赤ライン）。魚道機能の把握としてプール形状や流況の把握を行うため、以下のデータ取得・解析を行った。UAV空撮、測量の現地調査は、令和2年11月6日に実施した。

2.1 3次元点群モデル作成のための機器と方法

魚道の3次元点群モデルを作成するため、UAV（DJI社製 Mavic 2 Pro）による空撮を行った。撮影前に写真測量（SfM解析）の基準点とするため、対空標識を魚道内および魚道周辺に5か所設置した（図-1）。本魚道では116枚の写真を撮影した。各対空標識の緯度経度・高度は、RTK測量にて計測した。測量機器はW-band RTK-GNSS（DG-PRO1RWS：ビズステーション社製）を用いた。詳細な測量方法については、ビズステーション社が提供する方法¹⁾を参照した。

UAVによる空撮写真と基準点の測量データを用いたSfM解析により、3次元点群モデルおよびオルソ画像の作成を行った。作成にはAgisoft社のソフトウェアMetashape Professionalを用いた。

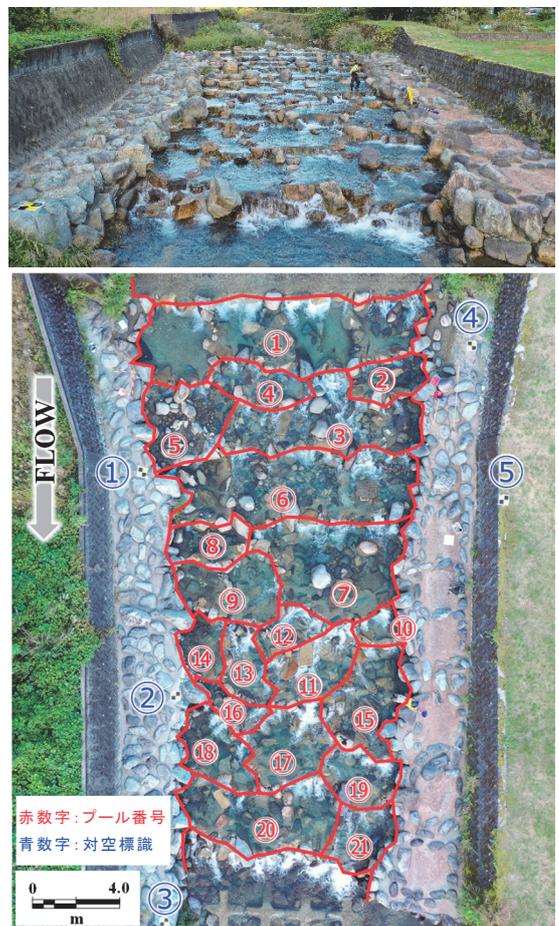


図-1 評価に用いたウロコタイプ全断面魚道
（上図は下流から見た状況）

作成方法は、3Dモデル作成マニュアル「ドローン測量の方法」²⁾を参照した。

2.2 プール間落差の計測

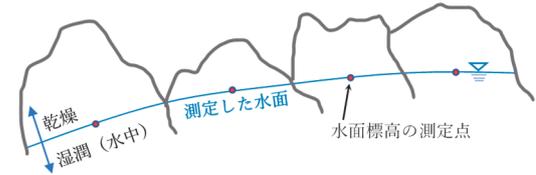
魚道において魚類の遡上に重要である隣接するプール間落差を評価するため、2.1で作成した3次元点群モデルから、各プールの水面標高を求めた(図-2)。プール間落差は、魚道の直上流地点の水位を基準として、隣接して水の流入出があるプール間の水面標高の差を算出することで求めた。

2.3 水脈角度・流入流出プール数・水脈数の計測

2.1で作成したオルソ画像より、プール間を下流する水脈の角度を算出し、移動経路の多様性などのように寄与しているかを評価した。水脈角度の算出は、図-3のとおり行った。そして、面積や水脈数が異なるプール間での水脈角度のバラツキの比較評価を可能にするため、各プールから流出する水脈角度の変動係数(CV、以下「変動係数」とする。)を求めた。また、各プールにおける流出水脈角度を求めた水脈の数を算出した。平面で見た水脈角度は、図-3 中図の様に設定した。変動係数が大きいほど、また、水脈数が多いほどプール間で多様な移動経路が形成されているといえる。すなわち、変動係数の大きさは遡上可能なプールの下流横断方向の角度の拡がりに関連し、水脈数の多さはプール間の遡上経路数と関連する。

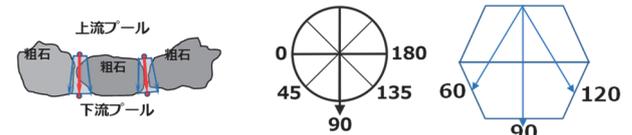
この2つの違いを具体的に示す。例えば、水路タイプである階段式魚道はどのプールも90°にしか流下しないため、全プールにおいて変動係数が小さく水脈数も1つになる。また、全断面のうち四角形状の同一プールが一定の落差で連続する多段式魚道は、水脈数が魚道の全幅にいくつか形成される可能性があるものの水脈角度はほぼ90°であり変動係数は0に近づく。ウロコの場合は、水脈が下流横断方向に拡散するため変動係数が大きく、かつ、水脈数も多くなる特徴を有する。

変動係数が小さい魚道は遡上経路が一对のプール間に形成されるため、1つのプールが土砂閉塞などにより機能しなくなると遡上困難となるが、変動係数が大きく水脈数が多い場合には、あるプールが土砂閉塞などにより機能しなくなった場合でも、いくつかの代替経路が存在するため魚道全体としての機能は維持されるメリットがある。このように変動係数と水脈数の双方で魚道进行评估することにより、魚道の遡上機能の頑強性がある



- 水面よりも上に出ている粗石の、乾燥と湿潤部分の境界線を水面とした
- 1プールで測定した10点の平均値を水面標高とした

図-2 各プールの水面標高測定方法



- 下流プールと隣接する辺で、水面よりも上の礫と礫の間の流れを1つの水脈とする
- 水脈は台形状となる
- 台形の上辺と下辺の各中心点を結んだ赤線における角度を算出した
- 平面で見た水脈角度
- 下流に流下する流れは90°
- 正六角形の想定水脈
- 水脈角度は、最上流端の辺の中心点を始点として0°から180°の間にある各辺の中央点に向かう3つの水脈を想定した

図-3 プール間の水脈角度の求め方(左図)、設定した角度(中図)、想定した正六角形(ハニカム)の角度の求め方(右図)

程度評価することが可能になると推察される。

次に各プールに対して水が流入してくるプール数、および、水が流出していくプール数を算出した。隣接する標高の高いプールから水が流れ入ってくることを流入、標高の低いプールへ水が流れ出ていくことを流出と定義した。加えて、正六角形(ハニカム型)の形状を想定し、1つのプールから3つのプールへ流出水脈がある場合の変動係数を算出した(図-3 右図)。この値と各プールの変動係数を比較することで、移動経路の多様性を評価することとした。

3. 結果

3.1 プール間落差の計測

図-4は、プール間落差の分布を示す。魚道の下流から魚道内へ遡上するための落差(魚道入口:20番、21番プールへ)は、それぞれ約52 cmと約63 cmであった(図-4 赤色)。魚道全体でのプール間落差は、25~29 cmに最も多く分布しており8箇所あった。落差10 cm以内は全体の約11%、落差20 cm以内は全体の約38%、落差30 cm以内は全体の71%を占めていた。魚道内からの出口の落差は約31 cmであった(図-4 紫色)。

3.2 水脈角度、流入出プール数、水脈数の計測

下流プールへの水脈角度の変動係数を図-3に示す。最も大きいプールは12番、続いて4番、7番であった。最も小さいプールは21番、続いて5番、

11番であった。

3方向の水脈がある場合（正六角形（ハニカム型））の変動係数（0.272）を参考値として図-5 緑線で示した。この値と本魚道の値を比較すると、ほとんどのプールでこの数値を上回っていた。また各プールに対する水脈の流入・流出プール数を図-5に示した。流入・流出プール数はともに1~4個の範囲にあった。変動係数と流入・流出プール数の相関性は確認できなかった。

変動係数と水脈数を図-6に示す。水脈数が最も大きかったのは1番の12、続いて3番の11、7番の7であった。水脈数は各プールとも3以上であった。変動係数と水脈数を比較すると、12番の様に変動係数が大きく水脈数が少ない場合や、21番の様に両方小さいプールもあり、変動係数と水脈数の相関性は確認できなかった。

4. 考察

4.1 プール間落差の把握

UAVの空撮写真より作成した3次元点群モデルから、全断面魚道の機能に重要な要素であるプール間落差を効率的に把握できた。つまり、魚類が魚道内の遡上を成功させるにはプール間落差が大きなポイント³⁾であるが、このデータを短時間で評価できることが明らかになった。

次に、本魚道のプール間落差の具体的な評価を行う。魚類が魚道内へ遡上できるかを考えた場合、入口落差が重要になる。本魚道の場合、魚道入口での落差は50 cm以上あり、河川に住む大部分の魚類（体長30cm以下）が魚道内へ遡上することが困難もしくは不可能であると評価できる⁴⁾。魚道内全体のプール間落差を見ても20 cm以上あるプールは全体の約6割におよび、遊泳力の小さい魚が容易に遡上出来る環境ではない可能性がある⁴⁾。魚道から上流への出口プールについても落差が30 cm以上あり、魚類は魚道内から魚道上流へ遡上しづらいことも明らかになった⁴⁾。ウロコのプール間落差は、設計時（建設完了時点）から様々な要因を受け変化することがある。本手法により、魚道の機能としてその時々々のプール間落差の把握を行うことができた。

4.2 水脈角度、流入出プール数、水脈数の把握

本魚道は、3方向（正六角形型）を基準とした水脈角度の変動係数を用いて評価した場合、多く

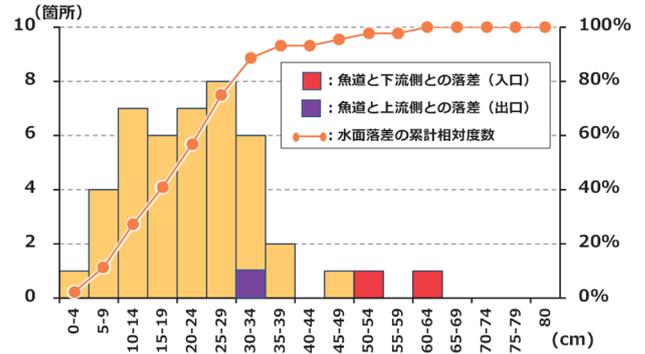


図-4 プール間落差の分布

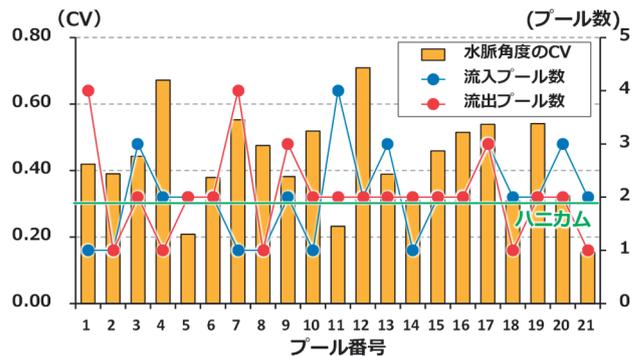


図-5 水脈角度の変動係数 (CV)、流入・流出プール数の比較

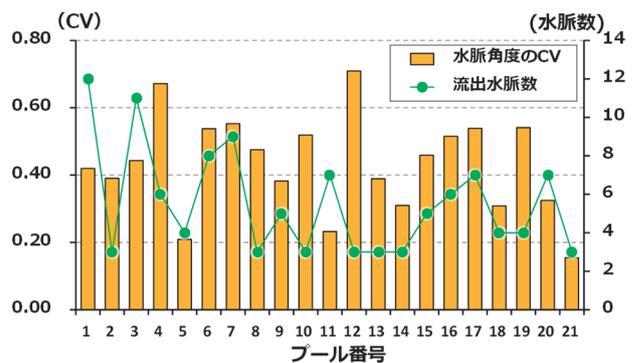


図-6 変動係数(CV)と水脈数の比較

のプールがこの数値を上回っていた。変動係数の大きさは、流入・流出プール数の多寡と関係する。また、水脈数の多さは各プールの形状に関係する。変動係数が大きく、流入プール数が多い場合には上流プールへの多様な遡上ルートの確保に寄与している。また、流出プール数や流下水脈数が多い場合にはプールに対する集魚効果に寄与していることになる。仮に流入プール・水脈数が少なく流出数が多いプールを考えた場合、プールの中に魚が集まる一方で遡上経路の選択機会が乏しい状況だと考えられる。しかしながら、流入・流出プール数は、どちらかのみを増やすことが困難であり、魚道全体では流入・流出数は概ね近づく傾向にある。一方、水脈数は、水脈が流下する箇所の形状の工夫次第で増やすことが可能となる。そのため、

変動係数が縦断方向に高く推移、もしくは、水脈数が多いほど、当該魚道の遡上経路は魚道全体で確保されているといえる。ウロコ以外のほかの魚道は変動係数が小さいため、魚道全体で魚類の遡上経路に関する評価を行う上では、水脈数で行うことが適していると考えられる。水脈を90°で流下させるタイプ同士の比較では、階段式よりも多段式の方が水脈数（遡上経路）は多く、魚に遡上ルートを選択性を与えているといったことも理解することができる。

本魚道は、下流方向への水脈数は3つ以上の経路が形成されていることが分かった。本結果は魚類の遡上という観点では、1つもしくは複数のプールから魚類遡上が可能であることを示すものであり、ウロコの優位性を示す結果であると考えられた。ただし、水脈角度の変動係数を詳細に見ると、変動係数が小さく下流方向への水脈が少ないプールも散見された。これらのプールの平面形状は四角状で構成され、水脈が下流側の直線部分からのみ流下するため、変動係数が0に近くなることが理解できた。例えば、5番、18番のプールはこのような平面形状に近く、水脈が下流側の直線部を中心に通過するため変動係数は小さかったが、4番、12番などのように平面形状が四角状ではなく、多角形や円形に近い形状で、水脈が通過する辺が2辺以上ある場合には変動係数が大きくなっていった。これらの事実は、ウロコを評価する場合には、個々のプールの平面形状に着目することが重要であることを示唆している。

以上より、プール間落差に起因するプール間の遡上の容易さに加えて、プール形状も評価対象とすることにより、遡上経路の多様性を評価できることが示唆された。そのため、本手法により算出された水脈角度、流入出プール数、水脈数の把握により、遊泳能力や遊泳タイプの異なる様々な魚

類に対する遡上可能性を、ある程度推定することが可能であると考えられた。

5. まとめ

本稿ではウロコの魚道機能の把握を事例的に行った。この結果、ウロコに限らず全断面魚道を設計する際には、魚道内に配置するプールは減勢効果を低下させないことなどを配慮しつつ、水脈角度に幅が生じるよう四角形以上の多角形の形状のプールを設置すべきことが重要であることが示唆された。加えて水脈数を多くするための工夫も必要である。これらを配慮することにより、移動経路の多様性が増し、経路延長が大きくなることから移動経路の勾配を緩やかにすることも可能となる。本手法の具体的な使い方として、「遊泳力の小さな魚種のための最小落差ルートの把握」や、「魚道下流の河床低下などで生じた大きな落差の改良などの維持管理の提案」も可能となる。

本手法は安価で簡単に魚道機能の把握ができるため、今後の幅広い現場実装が期待される。

謝 辞

本研究遂行にあたり、自然共生研究センター各位には調査の協力、日本工営（株）佐藤隆洋氏には測量機器をご紹介いただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) ビズステーション株式会社ブログ: <https://drogger.hatenadiary.jp/entry/static>
- 2) 清川勝一土地家屋調査士事務所HP: https://note.com/note_kakuyo/n/n08753a2bbd38
- 3) 和田吉弘: 魚道の設計で知っておきたいこと、応用生態工学 3(2)、225～230、2000。
- 4) 鬼束幸樹ら: 階段式魚道におけるプール間落差と遡上率の関係、応用力学論文集Vol.11、677～688、2009

林田寿文



土木研究所流域水環境研究グループ自然共生研究センター 主任研究員、博士（環境科学）
Dr. HAYASHIDA Kazufumi

阿部謙三



研究当時 土木研究所水環境研究グループ自然共生研究センター交流研究員、現 共和コンクリート工業（株）
ABE Kenzo

萱場祐一



研究当時 土木研究所 水環境研究グループ長、現 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会学専攻教授、博士（工学）
Dr. KAYABA Yuichi