

魚道における魚の挙動に関する研究

A study on the fish movement through the fishway

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 藤井真一(Shinichi Fujii)
 北海道大学工学研究科 正員 清水康行(Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

魚道は、堰・床止め・ダムといった河川横断構造物において、河川の上下流方向の連続性を確保し、魚の遡上・降下を可能にすることを目的に設置される。ただし、効果的な魚道を設置することは難しく、現在使われている魚道の中には、施工後、問題が発生し、新たに作りかえることが計画されているものも多く存在する。厚別川の魚道では、落差工に対し下流側に魚道が突出しているタイプのため、魚道外側の落差工直下部に進入した魚類が魚道を確認できず遡上できなくなっている、流速が速く流れが逆巻いている、休息場がないことなどが問題となっている。

魚道を設置する際には、実験や数値計算などによって事前に流況や魚の挙動を把握する必要がある。しかし、実験には多くの費用と時間を要するので、数値計算によって魚道における魚の挙動を再現できれば、魚道の設計において有効な手段となり得る。

大橋・清水¹⁾は、どのような魚道が魚の遡上にとって効果的であるのかを調べるために、水の流れを計算した後、魚の動きを数値計算に取り込み、定量的に把握しようとした。しかし、魚の遡上に問題の生じる魚道については、あまり研究されていない。

本研究では、魚の遡上に問題が生じるシミュレーションを再現できるかを確認するために、魚にとって魚道の確認が困難になってしまう図-1のような魚道の条件において、計算させた。

図-1 厚別川第22号落差工魚道(平成4年度新設)²⁾

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D^x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D^y \quad (3)$$

ここで、 x, y は直交系の座標、 u, v はそれぞれ x 方向、 y 方向の水深平均の流速、 h は水深、 H は水位、 ρ は密度、および g は重力加速度を表す。また τ_x, τ_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の河床せん断力であり、Manningの式を使って次のように示される。

$$\tau_x = \frac{\rho g n_m^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{\rho g n_m^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

ここで n はManningの粗度係数であり、 $n=0.01$ で計算した。また D_x, D_y は拡散項を表し、それぞれ次のように示される。

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(hu)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(hv)}{\partial y} \right] \quad (7)$$

ここで ν_t は渦動粘性係数であり、以下の式で示される。

2. 流れの計算方法

2.1 流れの基礎式

流れの計算は平面2次元、非定常、非圧縮流れの基礎式として、以下の連続の式および運動の式をもとに行うが、運動方程式は移流項とそれ以外の項に対して分離解法を用いる。移流項には高精度の数値計算法として知られるCIP法を用い、拡散項には中央差分法を用いる。詳細は清水³⁾によるものとする。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

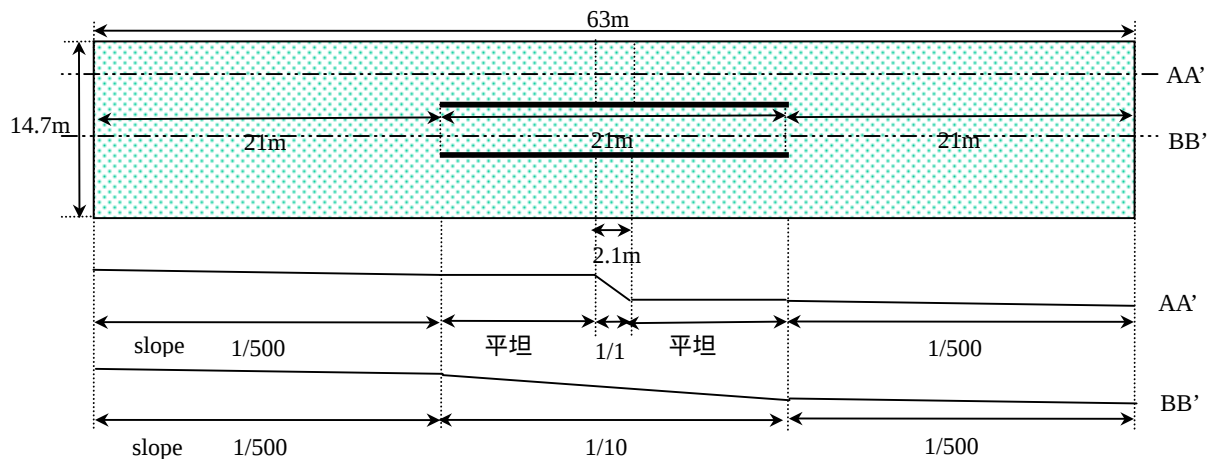


図-2 計算水路

$$v_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (8)$$

ここで κ はカルマン定数 (=0.4) で、 u_* 摩擦速度は以下の式で表される。

$$u_* = \frac{gn_m^2(u^2 + v^2)}{h^3} \quad (9)$$

2.2 計算水路

図-2 に計算する水路の形状を示す。水路長は 63m、水路幅は 14.7m である。

川幅中央部は傾斜を 1/10（緩勾配部）にしており、外側部は傾斜を 1（急勾配部）にして計算している。緩勾配部は魚道を想定しており、急勾配部は落差工を想定したものとなっている。

2.3 境界条件

境界条件は上流で一定流量 $0.40\text{m}^3/\text{s}$ を与え、下流で水深を与える。側壁および、非越流の隔壁およびその周りで $u=0, v=0$ と設定した。

2.4 計算条件

計算は 31 秒間行い、時間間隔は $\Delta t=0.01\text{sec}$ に設定した。グリッドは x 方向に 210 個、 y 方向に 49 個に区切った。初期状態の流れは不安定なので、流れの安定した 20 秒から 30 秒までを取り出し、その流れを 20 回繰り返すことにより、安定した 200 秒の流れを作り出した。

3. 魚の動きの計算方法

本研究では、以下に示す魚の遊泳特性と計算方法を用い魚の挙動を計算した。

3.1 魚の遊泳についての特性

中村⁴⁾、廣瀬・中村⁵⁾および板沢・羽生⁶⁾らによると、魚の遊泳には以下の特性がある。

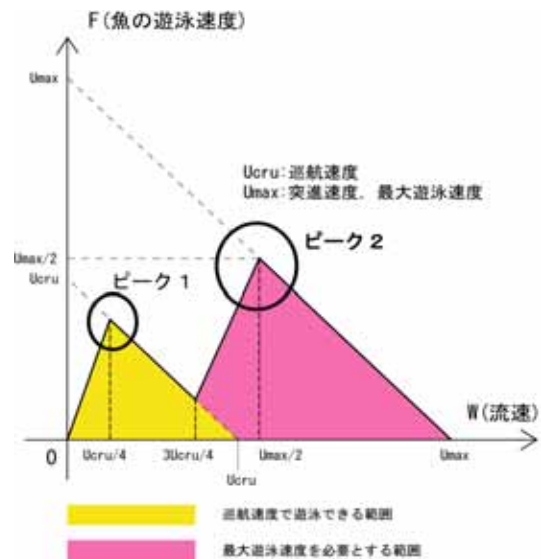


図-3 魚の遊泳速度と流速の関係

3.1.1 遊泳方法

魚は体の側面方向への流れに弱いので、常に体を流れと平行に保ちながら遡上しようとする。また、流れの急な場所を遡上しようとする時、堰の直下や直上といった自然にあらざる特殊な状況下では、自らの体長の長さ分しか、流れを認識できなくなるのではないかと想定されている。そこで、本研究では魚は流れに平行に遡上していくように計算をした。

3.1.2 魚の筋肉

魚は普通筋と血合筋という 2 種類の筋肉を持っている。血合筋は、酸素が供給され続ける限り働き続ける筋肉である。それに対して、普通筋は数秒程度しか使えない筋肉であり、危険からの逃避や、急流遡上などの緊急時に血合筋と併用して使われる。

本研究では酸素が供給され続けると仮定する。また、普通筋は 5 秒間および 8 秒間継続できるように計算した。さらに、使い切った後は 10 秒たった 1 秒間だけ使えるように設定した。

3.1.3 遊泳速度

魚の遊泳速度は、血合筋のみを使った場合と血合筋と普通筋をあわせて使った場合によって違いが出てきて、前者の場合を巡航速度と呼び、後者の場合を突進速度と呼ぶ。巡航速度は魚の体長を L とすると、 $(2 \sim 4) \times L$ /秒、突進速度は $(8 \sim 12) \times L$ /秒といわれている。

本研究では、比較的体長のあまり大きくない $L=25\text{cm}$ の魚を対象にした。これは、ニジマスおよびウグイをモデルにしてある。巡航速度は $4 \times L$ /秒、突進速度は $12 \times L$ /秒としたので、巡航速度と突進速度はそれぞれ 1.0m/s および 3.0m/s で計算する。

3.2 魚の遊泳速度と流速の関係

魚の遊泳速度と流速の関係は大橋・清水ら¹⁾によるものと同様の方法で求めたが、データを図-3のように、一部改正した。それにより、魚の遊泳速度と流速の関係は以下の式で表される。

$$W \leq \frac{U_{cru}}{4} \Rightarrow F = 3W \quad (10)$$

$$\frac{U_{cru}}{2} < W < \frac{3}{4}U_{cru} \Rightarrow F = U_{cru} - W \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{4}U_{cru} < W \leq \frac{1}{2}U_{max} \\ \Rightarrow \frac{1}{4}U_{cru} + \left(\frac{2U_{max} - U_{cru}}{2U_{max} - 3U_{cru}} \right) (W - \frac{3}{4}U_{cru}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$W \leq \frac{U_{max}}{2} \Rightarrow F = U_{max} - W \quad (13)$$

ここで F, W はそれぞれ、魚の速度の大きさおよび流れの速度の大きさであり、以下の式で表される。 U_f, V_f, U_w, V_w をそれぞれ魚の x 方向の速度、 y 方向の速度、流れの x 方向の速度、および y 方向の速度とする。

$$F = \sqrt{U_f^2 + V_f^2} \quad (14)$$

$$W = \sqrt{U_w^2 + V_w^2} \quad (15)$$

4. 計算結果

図-4 および図-5 に、水路に 5 匹の魚を配置した時の流れの様子、および魚の挙動を示した。普通筋を 5 秒間継続できるとした時の結果を図-4 で示し、8 秒間継続できるようにした時の結果を図-5 で示した。また、図-4 および図-5 では、a) で $t=0\text{sec}$ 、b) で $t=37.8\text{sec}$ 、c) で $t=72.3\text{sec}$ の計算結果を示した。

図-4 の条件では、魚道部に進入した 3 匹の魚はそのまま遡上し、図-5 の条件では、魚道部に進入した 3 匹の魚のうち、1 匹しか遡上できなかった。また、そのうちの 2 匹は急勾配部（落差工部）に迷いこみ、残りの 2 匹は普通筋を使いきっても遡上することができなかった。図-4 および図-5 両条件の時、共に急勾配部に進入した魚は遡上できなかった。

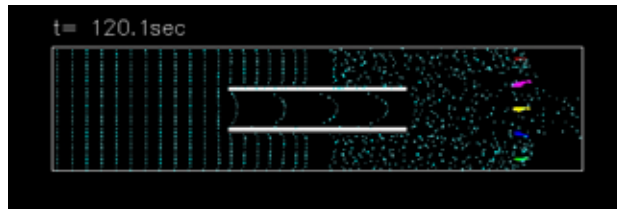
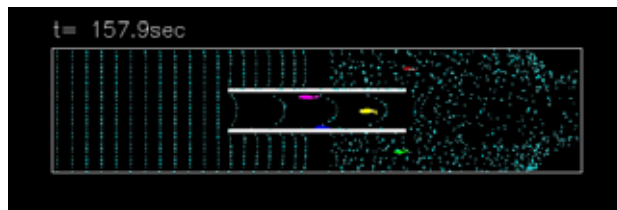
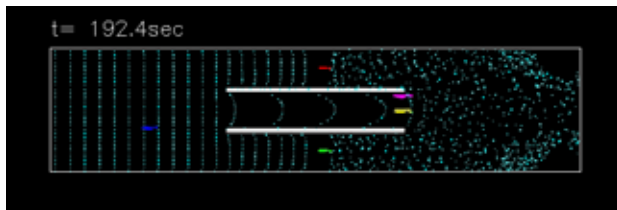
a) $t=0\text{sec}$ b) $t=37.8\text{sec}$ c) $t=72.3\text{sec}$

図-4

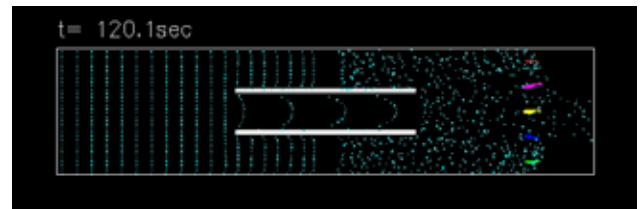
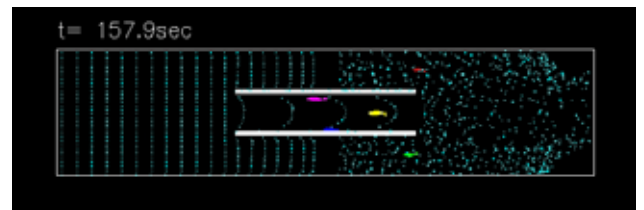
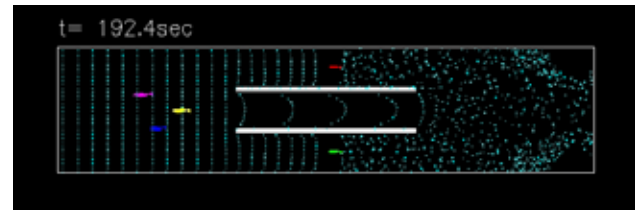
a) $t=0\text{sec}$ b) $t=37.8\text{sec}$ c) $t=72.3\text{sec}$

図-5

5. 考察

図-1の魚道では、魚道外側の落差工直下部に進入した魚類が魚道を確認できない、流速が速く流れが逆巻く、及び休息場がないので一気に遡上しなければならない、などの問題が生じている。

計算結果では、落差工を仮定した急勾配部直下に入りこんでしまった魚がとどまってしまう、魚道を発見できない様子を再現できた。また、魚の普通筋継続時間を8秒間にすると、魚は魚道を遡上することができたが、魚の普通筋継続時間を5秒間にすると、遡上できない魚が現れた。この違いが生じた原因は、魚道での流速が速い部分では、普通筋を5秒使用するだけでは、魚道を上りきることができなかったためである。このように、遊泳力の弱い魚が、流速が速いために、遡上を困難にしている様子を再現することができた。

これらのことから、本研究では、数値計算で実現象と同様の問題を再現することができたといえる。

6. おわりに

本研究の目的は、実現象における魚道の問題点を数値計算によって再現するものであった。

今回の結果は一例ではあるが、実現象を再現することができたと言える。このことにより、本研究が、魚が遡上できない魚道の、設計上の問題点を指摘するツールの

一つになる可能性を示した。更にこの数値計算法を信頼性の高いものにしていくために、様々な魚道を再現していく必要がある。

本研究では流れの計算を平面2次元の計算で行ったが、魚道内の流れは3次元性が強く、浅水流理論に基づく流れの計算だけでは十分ではない。それゆえ、今後の課題として、鉛直2次元の計算を行い、その結果を考慮する必要がある。

7. 参考文献

- 1) 大橋弘道・清水康行, 数値計算による魚道内における魚の挙動の解析, 水工学論文集, 第48巻, 2004
- 2) 北海道札幌土木現業所, 厚別川(特対)改修工事フォロー調査, 2002
- 3) 清水康行, 連続床止めを有する複断面河道における流れと河床変動の計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.683-688, 1999
- 4) 中村俊六, 魚道のはなし, 1995
- 5) 廣瀬利雄・中村中六, 魚道の設計, 1994
- 6) 板沢靖男・羽生功, 魚類生態学, 1991