

コンピューターシミュレーションによる効果的な魚道的设计

design of effective fishway using computer simulation

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 大橋弘道 (Hiromichi Ohashi)

北海道大学工学部土木工学科 正員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

河川改修により河床の傾斜が急になる, また人工の構造物などにより流れが複雑になるなどの理由により, 魚の遡上が困難になることが頻繁に見られる. そこで, 効果的な魚道を設計することは大変重要な課題である.

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, 魚の動きを数値計算に取り込み, 定量的に把握することは1つの有効な手段である.

本研究では試験的に既存の真駒内川にあるアイスハーバー型の魚道(図-1)をもとに水路の形状を決定し, 魚が水路をどのように遡上していくかを数値計算した.



図-1 真駒内川第5・6号落差工

2. 流れの計算について

2. 1 計算のモデル

流れの計算は2次元, 非定常, 非圧縮流れの運動方程式および連続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.

詳細は清水ら(1)によるものとする.

2. 2-1 計算水路

図-2は計算する水路の形状を示しており, 水路長30m, 水路幅3mである. 水路の中に2×4個の構造物があり, この障害物のある場所では水は流れないものとし, 越流もできないものとする.

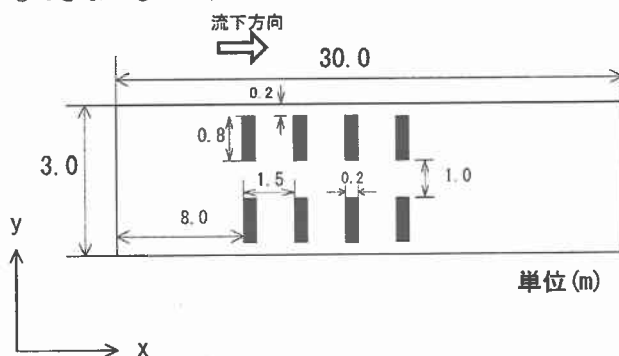


図-2 計算水路

2. 2-2 水路の境界条件

境界条件は上流で一定流量を与え, 下流で一定水深を与える.

障害物のある場所では水が流れないので, $u=0, v=0$ と境界条件を設定する.

2. 3-1 水理条件

流量は $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ で与え, 河床勾配は $1/1000$ に設定した. また壁面および河床のマニング粗度係数 $n=0.01$ で計算した.

2. 3-2 計算条件

数値計算では計算時間 $etime=50\text{s}$, 時間刻み $dt=0.001\text{s}$ で, グリッド数は x 方向に 150 個 y 方向に 15 個で区切った.

2. 4 流れの計算結果

上記のモデルで計算した結果の流速ベクトルを図-3に示す.

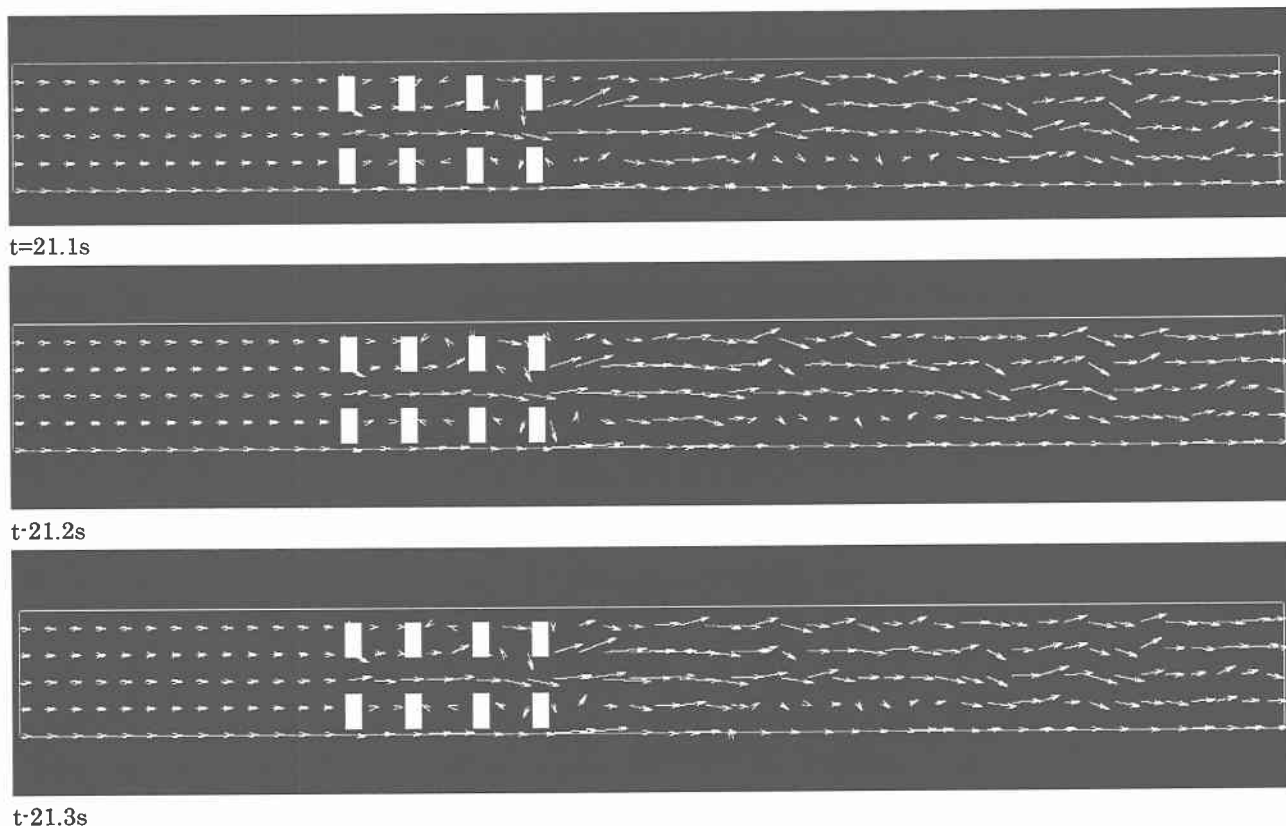


図-3 流れの流速分布

3. 魚の計算

3. 1 魚の動きの特性

板沢, 羽生ら(2)によれば魚の動きの特性は以下のものがある。魚は横からの流れに対して弱いので、常に体を流れの方向と平行に保とうとする。つまり魚が河川を遡上する際は流れを横切るようなことはせず、常に流れに沿って、流れとは正反対に遡上していくことになる。

次に、一般的に回遊魚は2種類の筋肉を持っていて、それは酸素の供給さえあれば比較的疲れることなく長時間使いつづけていられる血合筋と、瞬間的には大きな力が発揮できるが、使えば体に乳酸がたまって疲れとして出てきて長時間は維持することができない普通筋がある。通常、魚は普通筋を使わず、血合筋のみをつかって泳いでいる。普通筋が使われるのは危険からの逃避や、急流遡上のどの緊急時のみだけである。よって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、前者の場合の速度を巡航速度(U_{cru})と呼び、後者の場合のそれを最大遊泳速度(U_{max})、または突進速度と呼ぶ。巡航速度は魚種によっても違いが出てくるが、通常2~4 BL/s (ここで BL とは魚の体長, body length) である。突進速度はこれも魚種によって違いが出てくるが、10BL/s 前後である。また突進速度は前述の普通筋の関係で、数秒間しか維持できない。

このような魚の動きの特性をもとに、魚の動きの条件を設定して、流れの中でどのように遊泳するのかを計算する

3. 2 魚の動きの計算方法

まず、魚が流れに沿って正反対に遡上していくという特性から、以下の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} U_f &= -\alpha U_w \\ V_f &= -\alpha V_w \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 α は定数。また、 U_f , V_f , U_w , V_w はそれぞれ魚の x 方向の速度、 y 方向の速度、流れの x 方向の速度、 y 方向の速度である。

次に巡航速度 U_{cru} 、突進速度 U_{max} を設定する。本研究では例として $U_{cru}=4BL/s$ 、 $U_{max}=12BL/s$ とする。それをもとに魚の遊泳速度の大きさを設定する。図-4は廣瀬, 中村ら(3)による流速と魚の遊泳速度の関係で、それによると魚の遊泳速度には2つのピークが見られ、第1のピークは血合筋のみを使用した巡航速度でのものであり、第2のピークは普通筋を使用した突進速度であり、短時間だけ維持できるものである。また第1のピークまでは流速と遊泳速度とが比例関係にあるのがわかる。これは遅い流れの中では魚の遊泳速度も遅くなることを意味する。

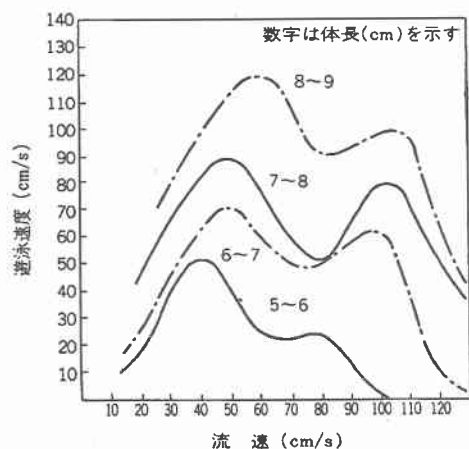


図-4 稚アユの遊泳速度と流速の関係

この図-4をもとに流速に対しての魚の遊泳速度を数値化するために、図-5では流速と魚の遊泳速度の関係を簡潔にもとめた。

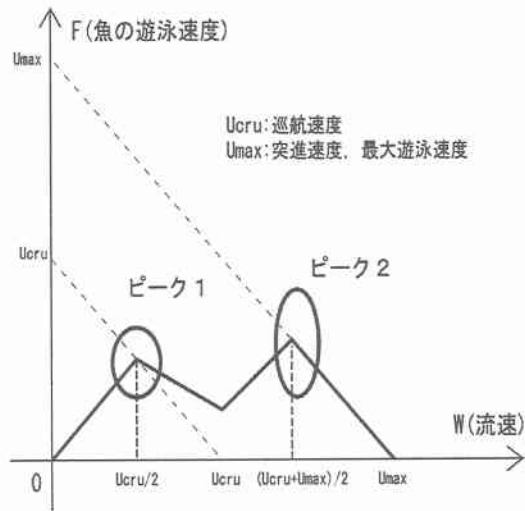


図-5 遊泳速度と流速の関係

先の図-3が体長によって遊泳速度が変化していたが、図-4では魚の巡航速度（ U_{cru} ）および突進速度（ U_{max} ）と流速の関係を導いた。この関係を式にして表すと次のようになる。

$$W \leq \frac{U_{cru}}{2} \Rightarrow F = W \quad (2)$$

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

$$U_{min} < W \leq \frac{U_{cru} + U_{max}}{2} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \frac{U_{cru}}{4} + \left(\frac{2U_{max} - 3U_{cru}}{2U_{max} - 2U_{cru}} \right) (W - U_{cru}) \quad (5)$$

$$W \leq \frac{U_{min} + U_{max}}{2} \Rightarrow F = U_{max} - W \quad (6)$$

ここで F , W はそれぞれ

$$F = \sqrt{Uf^2 + Vf^2}, \quad (7)$$

$$W = \sqrt{Uw^2 + Vw^2} \quad (8)$$

で表される。

3. 3 魚の初期条件

この計算では4匹の魚で計算した。

表-1は、それぞれの魚の計算開始時間、初期座標、体長を示す。体長が0.25mと0.35mの魚はウグイをモデルに0.55mと0.65mの魚はサケやサクラマスモデルにしている。

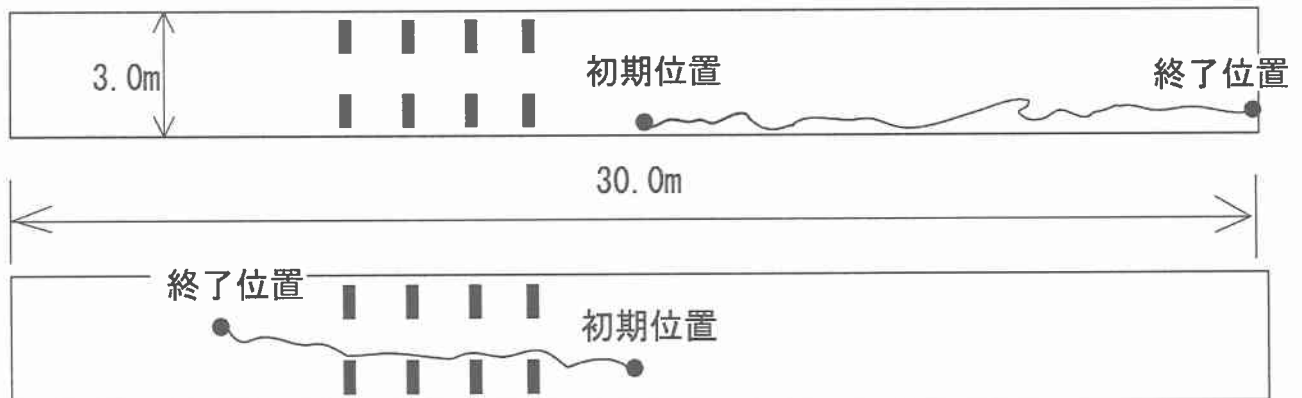
魚の計算を $t=0$ から行わないのは、流れがある程度収束してから魚の計算を行うということを考慮したものである。また、本研究の計算では魚の巡航速度（ U_{cru} ）、最大遊泳速度（ U_{max} ）をそれぞれ4BL/s、12BL/sで設定した。また最大遊泳速度（ U_{max} ）は瞬間的にのみ発揮する遊泳速度なので、計算の中で U_{max} を発揮できる時間を5秒間とした。 U_{cru} 以上の速度で5秒間遊泳した場合それ以降は U_{cru} 以下の速度で泳ぐことをよぎなくされている。

表-1 魚の初期条件

魚の番号	計算開始時間	初期位置(m)		体長(m)
		x座標	y座標	
1	5	17	0.4	0.25
2	5	17	1.5	0.65
3	5	17	2	0.35
4	5	17	2.6	0.55

4. 計算結果

以上の流れと魚の遊泳についての計算し、その結果を図-5に示す。図-6は上から魚の番号順に魚の動きを水路の中にプロットして線で結んだものである。なお横軸、縦軸の値は、それぞれ x 方向、 y 方向のグリッド数を示している。また水路中の黒い長方形の部分は障害物を示している。



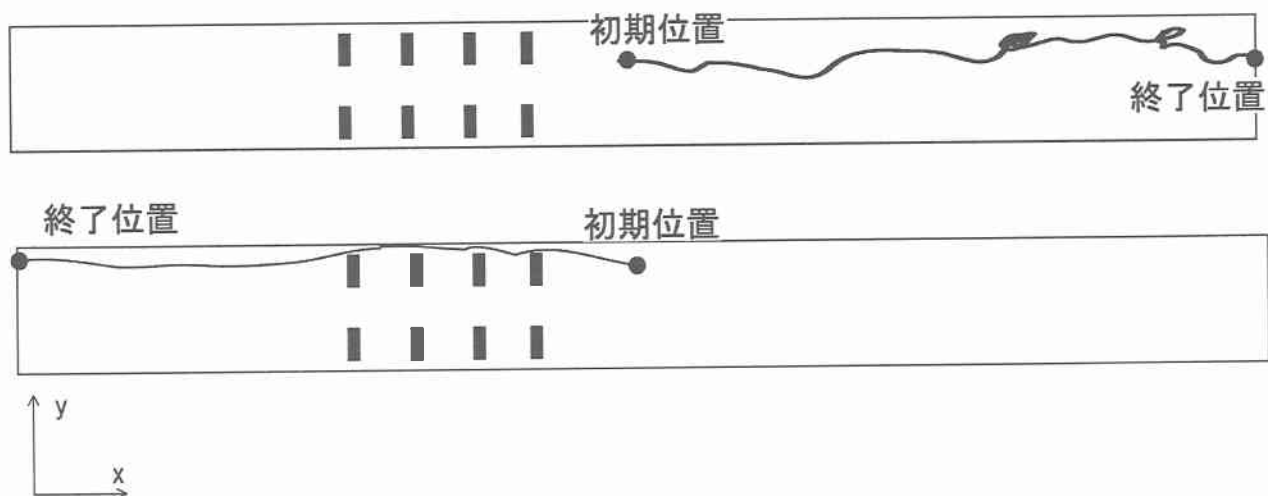


図-6 魚の水路の中での動き

上記の図から番号2と4の魚は構造物の部分の遡上に成功したが、番号1と3の魚は構造物の部分はおろか、逆に流下方向へ押し戻されているのが見て取れる。

また上の図からは読み取ることができないが、障害物の間を通過するとき、その流速が大きくなっている部分では魚が上流へ行ったり、押し戻されたりという言ったり着たりの状態が、番号2の魚では特に顕著に見て取ることができた。

5. 考察

障害物の部分を上りきった魚と流れに押し戻された魚との違いをあげてみると、上りきった番号2と4の魚は体長がそれぞれ0.65m、0.55mで設定されていた。

たのに対して押し戻された、番号1と3の魚は体長が0.25mと0.35mであった。これは先に魚の特性の部分でも述べたが、魚の遊泳速度を決定付ける巡航速度と最大遊泳速度がどちらもその魚の体長に比例しているからである。単純計算で体長0.6mの魚は体長0.3mの魚の倍の遊泳速度が発揮できることになる。

また最初に魚の特性として設定した流れに沿って平行に遡上していくという点では流れとあわせたシミュレーションを見ても容易に確認することができた。その点では最初の目的である魚の動きを数値化して定量的に把握することは達成できた。

6. あとがき

本研究では一定勾配の水路に障害物を置いただけという実河川に比べて大変簡略化されたものであるが、今後は障害物の形状、河床および水路の形態を複雑にし、落差工を設けることなどで、少しでも実河川の形態に近づけたもので計算していくことが重要である。

と同時に魚の計算においても詳しく魚の生態、および遊泳定理を調べることで、より本物の魚に近い動きが計算で導くことができるはずである。

7. 参考文献

- 1) 清水康行, 連続床止め工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

- 2) 板沢靖男・羽生功, 魚類生理学, 1991
- 3) 廣瀬利雄・中村中六, 魚道の設計, 1994
- 4) 中村中六, 魚道のはなし, 1995