

MPS 法を用いた魚道の流況解析と魚の挙動解析 Numerical analysis for flow fields and fish behavior in fishways

○泉 智揮*・尾崎浩平*・吉岡秀和**・藤原正幸***

○Tomoki IZUMI, Kohei OZAKI, Hidekazu YOSHIOKA, and Masayuki FUJIHARA

1. はじめに

農業農村整備事業の実施においては、環境との調和への配慮が求められており、その一つとして、河川や水路における魚道の設置が挙げられる。これまで、魚道に関する研究については、魚道内の流況に関するものや魚類の遊泳行動に関するものなど多くの知見が蓄積されている。魚道の設計においては、魚類の挙動をモデル化し予測することは有益である。大橋・清水[1]、藤井ら[2]は、階段式魚道を対象に、それぞれ水平2次元、3次元の流況解析をもとにした魚の挙動解析モデルを提案している。Fujihara and Akimoto[3]は、バーティカルスロット式魚道を対象に、大橋・清水[1]のモデルにおいて遊泳方向の決定に乱数を与え、生物学的な不確実性を考慮した魚の挙動解析モデルを提案している。これらのモデルは、流況解析において格子法を用いているが、本研究では、格子生成や移流項の取扱い、自由水面を有する流れを解析するうえで有利な粒子法の一つである MPS (Moving Particle Simulation) 法[4]を用いたモデルを提案する。

2. 流況解析モデル

支配方程式は、以下に示すような非圧縮性を仮定した連続式と運動方程式である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 ρ は水の密度、 t は時間、 \mathbf{u} は流速ベクトル、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトルである。

上記の支配方程式に対して、式中の勾配、発散、ラプラシアンといった微分演算子に粒

子間相互作用モデルを適用する MPS 法を用いて離散化する。

MPS 法における境界条件には、壁境界、自由水面境界、流入・流出境界を設け、壁境界では、圧力勾配ゼロ、流速 0 m/s、自由水面境界では圧力 0 Pa、流入境界では任意の流速を与える。なお、MPS 法では、自由水面は粒子数密度に基づいて判定される。

3. 挙動解析モデル

ここでは Fujihara and Akimoto[3]のモデルを採用する。すなわち、魚道内の魚の挙動は流れに強く影響を受けるので、ニュートンの第2法則を基とした以下の運動方程式により魚の遊泳速度を求める。

$$m\frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{T} - \mathbf{D} \quad (3)$$

ここで、 m は魚の質量、 \mathbf{U} は遊泳速度ベクトル、 \mathbf{T} は魚の推進力ベクトル、 \mathbf{D} は魚にはたらく抗力ベクトルである。

抗力は次式で表される。

$$|\mathbf{D}| = \frac{1}{2}\rho AC_d |\mathbf{U}_r|^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_r = \mathbf{U} - \mathbf{u} \quad (5)$$

ここで、 A は流れ方向に関する魚体の射影面積、 C_d は抗力係数、 \mathbf{U}_r は相対速度ベクトルである。

推進力については、魚は一般に普通筋と血合筋を用いて巡航速度および突進速度で遊泳することが知られているため、それぞれ U_{cru} および U_{max} として、以下のように表す。

$$|\mathbf{T}_{cru}| = \frac{1}{2}\rho AC_d U_{cru}^2 \quad (6)$$

$$|\mathbf{T}_{max}| = \frac{1}{2}\rho AC_d U_{max}^2 \quad (7)$$

* 愛媛大学大学院農学研究科, Graduate School of Agriculture, Ehime University

** 島根大学水圏エコシステムプロジェクトセンター, Fisheries Ecosystem Project Center, Shimane University

*** 京都大学大学院農学研究科, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

キーワード: 魚道, 数値解析, 粒子法

これらの推進力の切り替えは流速によって行い、ここでは大橋・清水[1]に倣い、流速が巡航速度の0.8倍以上で T_{max} を使用する。しかしながら、突進速度で遊泳できる時間には限度があるので、持続可能時間を設定し、突進速度を発揮できない場合は T_{cru} を使用する。

魚が進む向き θ は次式で決定する。

$$\theta = \theta_0 \pm \sigma R \quad (8)$$

ここで、 θ_0 は流れに向かう方向、 σ は標準偏差、 R は正規乱数である。

4. 解析条件および解析結果

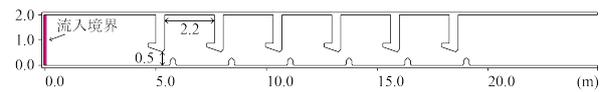
ここでは、パーティカルスロット (VS) 式魚道 (ケース 1) および階段式魚道 (ケース 2) に本解析モデルを適用する。各魚道の諸元を図 1 に示す。流況解析においては、MPS 法の粒子径を 5cm とし、ケース 1 では流量 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 、ケース 2 では流量 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ を与え、計算時間ステップを $1 \times 10^{-3}\text{s}$ として、定常状態になるまで計算する。魚の挙動解析においては、各ケースに対して、さらに魚の体長について 4 ケース (体長 0.1m, 0.2m, 0.4m, 0.8m) を考える。各ケースについて、5 匹の魚を最下流のプールに配置し解析を実行する。

挙動解析の結果として、魚の軌跡の 1 例を図 2, 3 に示し、また、それぞれのケースにおける上流端プールに到達した魚の遡上数と所要時間を表 1 にまとめる。

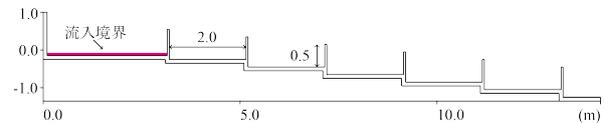
VS 式魚道では、魚がプールの滞留域を利用しながら遡上していく様子が、階段式魚道では、表面流に沿って遡上する様子がシミュレートできている。また、両魚道とも魚の体長が大きくなるほど最後のプールに到達する時間が短く、一般に魚の遊泳速度は魚の体長に比例して大きくなるため、現実的な結果が得られているといえる。しかしながら、解析ケースの中には、遡上途中で同じ場所から動かなくなってしまうなどの不自然な挙動を示すケースもみられた。今後、これらの点に加え、より現実的な解析ができるよう、現地観測結果等も踏まえた検証が必要である。

5. まとめ

魚道における魚の挙動解析モデルについて、既往モデルの流況解析手法を格子法から粒子法の 1 種である MPS 法に変更したモデルを



(a)VS 式魚道



(b)階段式魚道

図 1: 魚道の諸元

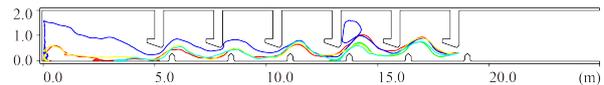


図 2: ケース 1-3 における魚の軌跡

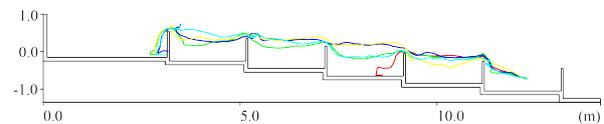


図 3: ケース 2-3 における魚の軌跡

表 1: 解析条件に対する遡上数と所要時間

解析条件	体長 (m)	遡上数 (匹)	所要時間 (s)
ケース 1-1	0.1	0	-
ケース 1-2	0.2	3	30.7
ケース 1-3	0.4	4	14.2
ケース 1-4	0.8	4	8.7
ケース 2-1	0.1	0	-
ケース 2-2	0.2	0	-
ケース 2-3	0.4	4	27.8
ケース 2-4	0.8	5	4.94

提案した。今後は現地観測結果等も踏まえた本モデルの検証が課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H03073 を受けた。

引用文献

[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, 水工論文集, **48**:1597-1602, 2004. [2] 藤井真一・木村一郎・清水康行・清治真人, 密度関数法を用いた階段式魚道における魚の挙動の 3 次元シミュレーション, 水工論文集, **53**:1249-1254, 2009. [3] Fujihara, M. and Akimoto, M., A numerical model of fish movement in a vertical slot fishway, *Fisheries Engineering*, **47**(1):13-18, 2010. [4] Koshizuka, S., Tamako, H., and Oka, Y., A particle method for incompressible viscous flow with fragmentation, *Computational Fluid Dynamics J.*, **4**(1):29-46, 1996.