

魚道における個体ベース数理モデルによる魚類の遊泳行動シミュレーション

Numerical simulation of fish behavior in fishways by an individual based mathematical model

○泉 智揮*・BHATTA Arun*・吉岡秀和**・藤原正幸***

○Tomoki IZUMI, Arun BHATTA, Hidekazu YOSHIOKA, and Masayuki FUJIHARA

1. はじめに

環境との調和に配慮した農業農村整備事業の実施において、落差対策である魚道の整備は重要である。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、流れ場の予測とともに、魚類の遊泳行動をモデル化し予測することも有益である。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。この挙動解析モデルは、魚類個体を計算点として、ニュートンの第二法則をもとにした運動方程式により遊泳速度を求めるというものである。また、Fujihara and Akimoto[3]は、パーティカルスロット式魚道を対象に、大橋・清水[1]の挙動解析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できる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、著者らは、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]を用いて魚の挙動解析モデルの開発に取り組んでいる。

2. 流況解析モデル

支配方程式は、以下に示す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。MPS 法では、支配方程式中の勾配、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して離散化する。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、圧力勾配ゼロと流速 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

本研究では 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、ニュートンの第二法則をもとに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、以下のように表す。

* 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

$$|T_{cru}| = \frac{1}{2} \rho A C_d U_{cru}^2 \quad (6)$$

$$|T_{max}| = \frac{1}{2} \rho A C_d U_{max}^2 \quad (7)$$

これらの推進力の切り替えは、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。突進速度の持続可能時間は2秒とし、突進速度を使用した後は30秒間の休息を必要とする。休息中は巡航速度のみで遊泳し、30秒間の休息後は再び突進速度で遊泳できるものとする。なお、巡航速度および突進速度は、それぞれ体長の4倍($U_{cru}=4BL/s$)および15倍($U_{max}=15BL/s$)とする。

魚が進む向き θ は、流れに向かう方向 θ_0 に対して、標準偏差 σ の正規分布に従うと仮定したばらつきを与え、次式で決定する。

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

ここで、 R は正規乱数である。この標準偏差 σ については、巡航速度使用時には $\pi/6$ 、突進速度使用時には $\pi/18$ とする。

4. 適用例

ここでは、パーティカルスロット(VS)式魚道(ケース1)、階段式魚道(ケース2)、粗石付魚道(ケース3)への本解析モデルの適用例を示す。流況解析においては、MPS法の粒子径を5cmとし、流量はケース1で $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 、ケース2で $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 、ケース3で $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 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、各ケースにおいてさらに魚の体長について3ケース(体長0.1m, 0.2m, 0.5m)を考え、すべてのケースで100匹の魚を魚道の下流側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1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。魚類は主流に逆らって遡上していく様子がシミュレートされている。また、魚の体長が大きくなるほど、遡上数が多く、最後のプールに到達する時間が短いという現実的な結果が得られている。しか

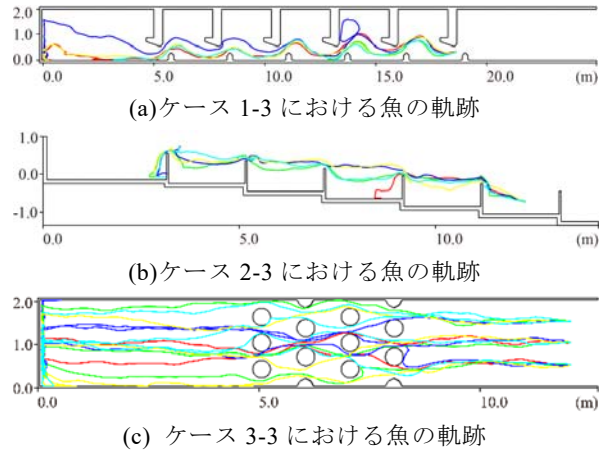


図1：挙動解析結果の一例

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	69	32.2
ケース 1-3	0.5	83	13.8
ケース 2-1	0.1	0	-
ケース 2-2	0.2	1	34.2
ケース 2-3	0.5	51	20.3
ケース 3-1	0.1	59	73.4
ケース 3-2	0.2	98	10.7
ケース 3-3	0.5	99	3.7

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

魚道における個体ベースの魚類の挙動解析モデルを用いてその遊泳行動のシミュレーション結果を示した。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, 水工論文集, **48**:1597-1602, 2004. [2] 藤井真一ら, 水工論文集, **53**:1249-1254, 2009. [3] Fujihara, M. and Akimoto, M., Fisheries Engineering, **47**(1):13-18, 2010. [4] Koshizuka, S., Tamako, H., and Oka, Y., Computational Fluid Dynamics J., **4**(1):29-46, 1996.