

エージェント法行動選択に基づく個体ベースモデルを用いた 3次元魚体泳動解析の試み

新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露一寛

1. はじめに

現在、わが国において魚道を設計する場合、実物大または模型による実験・試験を事前に行なうか、既に設置されている魚道の中から類似の環境で実績を上げているものを採用することが多い。しかし、実験には多くの費用と時間を要する上、実績を上げている魚道をそのまま別の環境に設置しても、期待する効果を上げられない事例も多い。そこで本研究では、計算力学手法を援用した魚道の設計手法を構築することを最終的な目標とし、今回は簡単な3次元流れ場における魚体泳動シミュレーションを試みる。

2. 3次元流れ場のモデル化

本研究では、流れ場は3次元非圧縮粘性流体の定常流としてモデル化する。支配方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\nabla_x \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0, \\ \nabla_x \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) &= -\nabla_x p + \nabla_x \cdot (\mu \nabla_x \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g},\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}$, p はそれぞれ流速、圧力であり、 ρ は質量密度、 μ は粘性係数、 $\mathbf{g}$ は物体力である。

流れの諸方程式はコロケート格子を用いた有限体積法¹⁾で離散化する。その結果、運動方程式(3)の保存形式は、

$$\begin{aligned}\sum_{\text{all faces}} \rho u_n (u_i)_f A &= - \sum_{\text{all faces}} p n_i A \\ &+ \sum_{\text{all faces}} \mu u_{i,k} n_k A + \rho g_i \Delta \Omega,\end{aligned}\quad (2)$$

となる。ここで、 $\mathbf{n}$ はコントロールボリューム (CV) 表面の単位外向き法線ベクトル、 A は CV 構成面の面積、 $(u_i)_f$ は表面流速、 $\Delta \Omega$ は CV 体積であり、 $u_n = u_k n_k$ である。拡散項に現われるフラックス $u_{i,k} n_k$ は、隣接する CV 図心点間での法線方向の中央差分近似で与える。一方、移流項に現われる CV 表面流速は、線形補間と1次風上近似を組み合わせて近似評価する。その結果、

$$A_P u_i^{(P)} = \sum_{nb} A_{nb} u_i^{(nb)} - S(p) + S_v, \quad (3)$$

を得る。ここで、 S_v , $S(p)$ はそれぞれ生成項、圧力項であり、流速成分に付された上添え字 (P), (nb) は、それぞれ対象としている CV, 対象 CV と隣接している CV の各図心点における流速成分であることを表わしている。

本研究では、式(3)の近似解を PISO 法¹⁾に基づく反復計算によって求める。なお、PISO 法における圧力修正方程式の離散化においては、圧力振動を防止する目的で Rhie-Chow の補間¹⁾を採用する。

3. 魚体泳動のモデル化

魚体泳動は、エージェント法による行動選択に基づく個体ベースモデル²⁾を用いてモデル化することとした。魚体の位置は Lagrange 記法に基づき次式で更新する。

$$\mathbf{x}_f^{(k+1)} = \mathbf{x}_f^{(k)} + \Delta t (\mathbf{u} + \mathbf{u}^{(k)}), \quad (4)$$

ここで、 (k) は時間ステップ、 Δt は時間刻み、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトルであり、 $\mathbf{x}_f$ は魚体の位置ベクトル、 $\mathbf{u}_f$ は魚体の泳動速度ベクトルである。式(4)から、魚体の泳動行動の決定は、各時刻における魚体の泳動速度ベクトルの決定に帰着することとなる。なお、今回は河川回遊魚における降下行動を対象とし、受容した外的刺激をもとに泳動行動を決定する方法²⁾を以下に示す。

(1) 外的刺激の受容

泳動行動の判断材料となる外的刺激として、流速、流体のひずみ速度、圧力を考える。各個体には物理刺激の知覚域を定義し、自身の位置での刺激だけでなく、物理量の変化の度合いも感知できるようにモデル化する。本研究では、知覚情報を評価する点を魚体長に基づき与えている。なお、ひずみ速度は空間の勾配情報であるため、刺激評価点での流速成分の中央差分で与えることとした。

次に、物理刺激を生体内での知覚情報に変換する。ひずみ速度については、Weber の法則に倣い、 S_0 を刺激の基準値として

$$I(t) = \log \left[\frac{S(t)}{S_0} \right], \quad S(t) = \sum \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right|, \quad (5)$$

なる強度情報に置換する。圧力については、水頭 $d(t) = p(t)/\rho g$ に換算して評価する。

(2) 行動選択のモデル化

本研究では、文献²⁾のエージェントモデルを用いて魚体泳動行動を決定する。降下行動のシミュレーションにおける行動パターンとして、流下方向に泳動する (エージェ

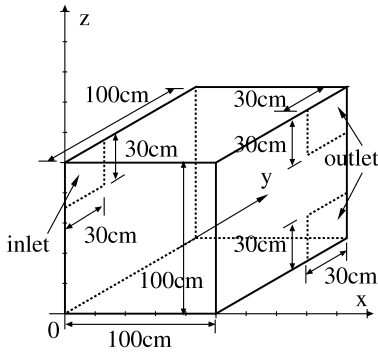
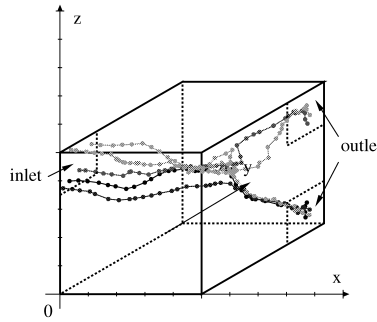
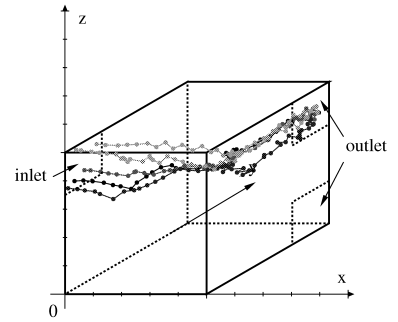


図-1 流れ場の境界条件.

図-2 5個体の泳動軌跡 ($k_2 = 6$, B_0 , B_1 が選択).図-3 5個体の泳動軌跡 ($k_2 = 2$, B_0 , B_1 , B_2 が選択).

ント: B_0), ひずみ速度を最小とし, 流速の増す方向に泳動する (B_1), 順化水深 d_a となる深さへ泳動する (B_2), の3種類を考える. B_0 – B_2 の行動は, B_0 , B_1 のいずれかが選択され, 状況に応じて B_2 も同時に選択されるようにモデル化する. 上記 B_0 , B_1 については, 次式で定義される評価関数値 U_i が大きいものを選択する.

$$\begin{aligned} U_i &= P_i(t) \cdot u_i, \\ P_i(t) &= (1 - m_i)e_i(t) + m_i \cdot P_i(t - \Delta t), \\ e_i &= \begin{cases} 0, & I(t) < k_i I_a(t), \\ 1, & I(t) \geq k_i I_a(t), \end{cases} \quad (6) \\ I_a(t) &= (1 - m_s)I(t) + m_s I_a(t - \Delta t). \end{aligned}$$

ここで, u_i , m_i , m_s は定数であり, k_i は閾値, $P_i(t)$ は選択確率, $I_a(t)$ は順化刺激強度である.

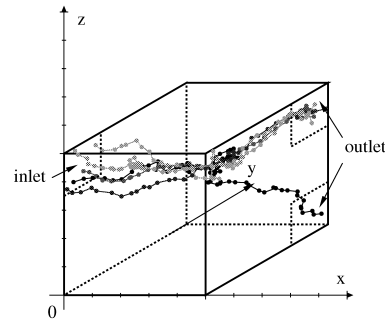
一方, B_2 は, 式 (6) 第1式の U_2 が $U_2 > 0$ となる場合を選択される. ただし, e_2 , $d_a(t)$ は次式で与える.

$$\begin{aligned} e_2 &= \begin{cases} 0, & |d(t) - d_a(t)| < k_2, \\ 1, & |d(t) - d_a(t)| \geq k_2, \end{cases} \quad (7) \\ d_a(t) &= (1 - m_d)d(t) + m_d d_a(t - \Delta t). \end{aligned}$$

なお, 泳動速度の大きさ $\|u_f\|$ は, 魚体長を L_f として平均値 $3L_f$, 標準偏差 L_f (ともに単位時間当たり) なる正規分布に従うように与える. また, 泳動方向は上記アルゴリズムで完全に決定することが可能であるが, 各個体の行動選択のゆらぎを考慮するために, 泳動方向ベクトル各成分が正規分布に従って変動するように与える.

4. 解析結果

今回は, 当該モデルの定性的な挙動を確認する目的で, 図-1 に示す閉領域の3次元流れ場を考え, 流れと魚体泳動の連成解析を試みた. なお, 流入境界では一様分布の流入流速を与え, 流入流速の大きさ, ρ , μ は, Reynolds 数が50程度となるように与えた. 解析においては, 魚体長の平均値を8cmとし, 5個体を対象領域内で泳動させた. なお, 泳動行動選択に関するパラメータは, $k_1 = 0.55$,

図-4 方向選択のゆらぎが大きい場合の泳動軌跡 ($k_2 = 6$, B_0 , B_1 が選択).

$u_0 = 0.35$, $m_0 = 1.00$, $u_1 = 0.55$, $m_1 = 0.80$, $u_2 = 0.99$, $m_2 = 0.935$ とし, $\Delta t = 0.2(\text{sec})$ で20(sec)の解析を行った.

解析によって得られた魚体の泳動軌跡を図-2, 図-3, 図-4に示す. k_2 を大きく設定した場合, 泳動における水深変動が許容されるため, 各個体の泳動軌跡は初期位置に概ね依存して決まることが見てとれる. 一方, k_2 を小さく設定した場合, 順化水深を維持する泳動行動が卓越するため, いずれの個体についても流入口の高さから大きく外れることなく上側の流出口に到達することがわかる. また, 方向選択のゆらぎを大きくすると, 各個体の領域内の滞留時間が長くなる傾向にある. なお, いずれの結果においても, 流出口の到達位置は流出流速が大きくなる流心位置に集中しており, B_1 の行動選択が適切に機能していることが確認できた.

5. まとめ

今回は, 当該モデルによる解析結果の定性的な挙動を確認するにとどまった. 今回は, 自由表面流れにおけるシミュレーションや乱流モデルの導入, 魚体の群れや遡上行動のモデル化に取り組む予定である.

参考文献

- 1) Lai, Y.G.: Unstructured grid arbitrarily shaped element method for fluid flow simulation. *AIAA J.*, Vol.38, pp.2246-2252, 2000.
- 2) Goodwin, R.A., Nestler, J.M., Anderson, J.J., Weber, L.J., Loucks, D.P.: Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-Agent method (ELAM). *Ecol. Model.*, Vol.192, pp.197-223, 2006.