

魚群遊泳運動の流体力学的特性の 数値シミュレーション研究

東北大学 情報科学研究科 矢田貝 弦

東北大学 流体科学研究所 服部 裕司

Yuzuru Yatagai
School of Information Sciences,
Tohoku University

Yuji Hattori
Institute of Fluid Science,
Tohoku University

1 緒言

魚まわりの流れの調査・研究は、生物学的な興味や工学的応用への期待から広く行われている。Breder ら [1] は魚の泳法を運動方法によってアジ型 (Carangiiform), ウナギ型 (Anguilliform), ハコフグ型 (Ostraciiform) に分類した。このうちアジ型に分類されるいくつかの魚は群れを形成して遊泳する。さらに、そのスケールや形状もさまざまであり、魚群形成の目的は様々あると考えられる。

なぜ魚が魚群を形成するのかについて、Weihs ら [2] は魚が群れを形成するときの流体力学的利点を提唱した。そして、魚をダイヤモンド状に配置したときに最も高い効率を得られることを示した。この考えに基づき Bergmann ら [3] は、3 匹の魚群まわりの数値シミュレーションを行い、単独で遊泳したときに比べて最大で 16 % エネルギーを節約できることを示した。

しかし、これまでの魚群研究では、最適な魚の配置に関して詳細に調査している例が少ない。また、魚どうしの相互作用が、どのようにして高い効率に結びつくのか明らかになっていない。魚群が高効率を生み出すメカニズムや魚群の最適な配置に関して、未だ解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、まず単体の魚まわりの流れを 2 次元数値シミュレーションによって詳細に調査する。これにより魚の後流構造や渦列の挙動をみる。そして、いくつかの配置パターンについて魚群まわりの流れを計算する。これにより、魚群の配置と効率の関係を明らかにするとともに、後続魚まわりの流れが配置を変えることでどのように変化するのかをみる。また、流れと魚の相互作用の様子を詳細に分析し、魚群の利点がどのようにして得られるのかについて考察する。

2 計算手法

本研究では、複数で運動する物体まわりの流れを計算するのに適した Volume Penalization (VP) 法を用いて物体を表現する。支配方程式は、2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に VP 項を加えた以下の方程式である。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\chi(\mathbf{x})}{\eta} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_b) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\chi(\mathbf{x})$ はマスク関数、 η は浸透率、 $\mathbf{u}_b$ は物体の速度、 Re はレイノルズ数である。VP 法ではマスク関数により、物体領域と流体領域を識別する。本研究で用いるマスク関数は、固体領域 Ω_b で 1、流

体領域 Ω_f で 0 となるようなステップ関数

$$\chi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{x} \in \Omega_b \\ 0 & \mathbf{x} \in \Omega_f \end{cases} \quad (3)$$

に、計算安定化のためのフィルタリングを施して 0 と 1 の境界を滑らかにした関数である。

x 方向 (流れ方向) の空間離散化は 6 次精度コンパクト差分法, y 方向にはスペクトル法を用い, エイリアシング誤差除去のために 2/3 則打ち切り法を適用する. 時間発展には 4 次精度 Runge-Kutta 法を用いる.

計算格子は, 流れ方向である x 方向に不等間隔格子, y 方向に等間隔格子を用いる. 不等間隔格子は物体近傍で格子間隔 $\Delta x_{min} = 0.0044L$ となり遠方で粗くなるように設定する. ここで, L は魚の体長である. また, $\Delta y = 2\pi/N_y$ と定義する. 格子点数は $N_x = 1500$, $N_y = 1024$ とし, 浸透率は $\eta = 1.0 \times 10^{-3}$ とする.

物体にかかる力 $\mathbf{F}$ は, 外力項である VP 項によって,

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega_b} \frac{\chi(\mathbf{x})}{\eta} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_b) d\Omega \quad (4)$$

で求める. 抗力係数および効率以下の通り定義する.

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}(\rho U^2 L)} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\bar{T}U}{\bar{P}} \quad (6)$$

ここで $\bar{T}$ は 1 周期で時間平均した推力, $\bar{P}$ は 1 周期で魚が尾びれ運動のために消費するパワーである.

3 問題設定

本研究では Fig.1 で示すように, Kármán-Treftz 変換で作成した翼断面形状を 2 次元魚モデルとして使用する. そして翼中心線を

$$y(x, t) = \alpha(x) \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right) \right] \quad (7)$$

$$\alpha(x) = c_1 + c_2 x + c_3 x^2 \quad (8)$$

にしたがって動かすことで遊泳運動をモデル化する. ここで, λ , f は波長, 振動数であり, $\lambda = 1.1L$, $f = 1.0$, 定数 $c_1 = 0.02$, $c_2 = -0.01$, $c_3 = 0.05$ とする. 物体の速度 $\mathbf{u}_b$ は翼中心線の速度を与える.

$$u_b = 0 \quad (9)$$

$$v_b = -2\pi f \alpha(x) \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right) \right] \quad (10)$$

魚の配置に関する係数 S , D は Fig.1 のとおり定義する. 本研究では, S を $S = 0.5L$ で固定し, D のみを $D = 0.02L$ の範囲で変化させて計算する. また, 魚群の計算を Fig.1(a)(b) のとおり, 後続魚を遊泳させる遊泳ケースと, 後続魚を静止させる静止ケースについて計算する.

Reynolds 数と Strouhal 数は,

$$Re = \frac{LU}{\nu}, \quad St = \frac{fA}{U} \quad (11)$$

で定義し, $Re = 1000$, $St = 0.54$ で計算を行う.

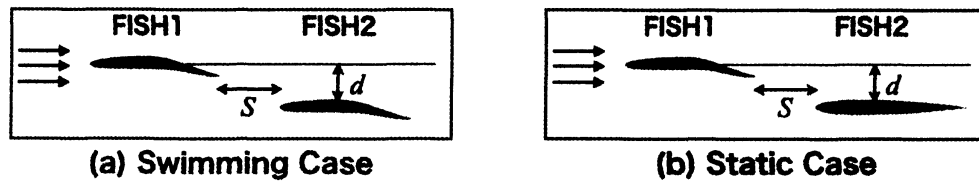


Figure 1: Dimension of the fish models and arrangement.

4 結果

4.1 単独での遊泳

Fig.2 に単独で遊泳する魚まわりの渦度場の分布と渦の中心の奇跡を示す。Fig.2 より、後方に逆カルマン渦列が発生しており、先行研究と同様の現象を捉えた。さらに、魚からおおよそ $0.5L$ 以上後方では渦は平行に移動していることが分かる。

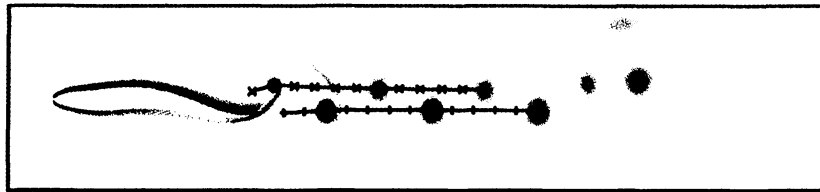


Figure 2: Vorticity field and trajectory of vortices in solo swimming.

4.2 2匹での遊泳

Fig.3 に時間平均した抗力係数 C_D を、Fig.4 に効率を後続魚 Fish2 の位置 D の関数としてそれぞれ示す。時間平均は T を周期として $t = 9T - 10T$ で行った。実線は後続魚の抗力係数/効率である。さらに Fig.3 中の破線は静止ケースの抗力係数の変化を表している。また、Fig.4 中の破線は単数遊泳における魚の効率を示している。

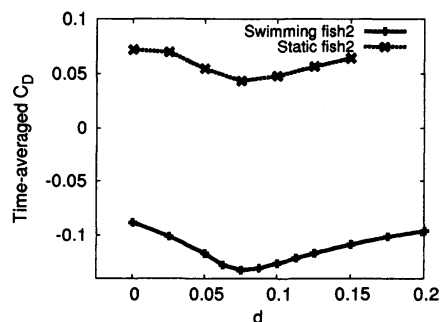


Figure 3: Time-averaged drag coefficient in swimming and static case.

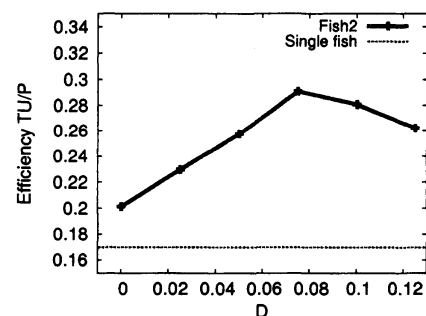


Figure 4: Efficiency of fish2 in swimming case and single fish.

Fig.3 より, $D = 0.075L$ のとき後続魚の抗力係数が最も小さくなる. また, Fig.4 より, 同じ位置で効率が最大となる. Fig.5 に $D = 0$ と $D = 0.075L$ の場合の渦度場を示す.

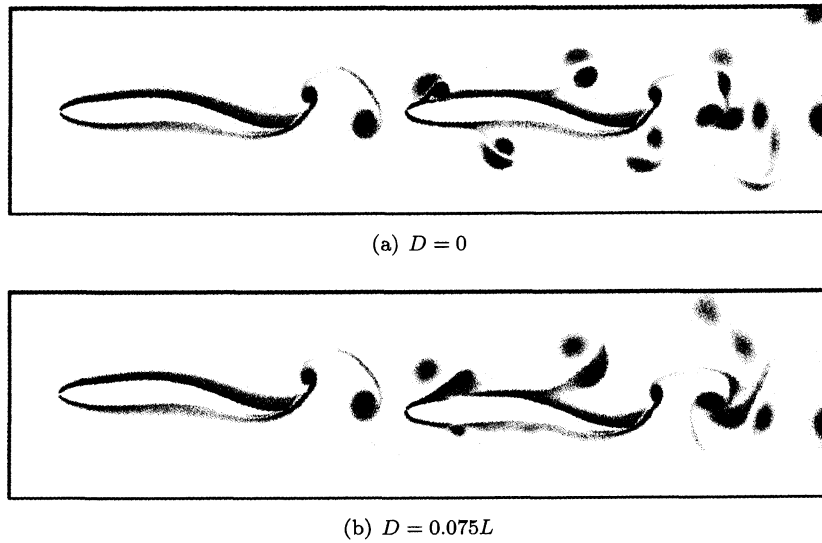


Figure 5: Vorticity field in tandem swimming for (a) $D = 0$ and (b) $D = 0.075L$.

Fig.5(a) より, $D = 0$ のときには後続魚に渦が上下交互に衝突し, それにより対となった渦が巻き上がる様子が見られる. 一方, Fig.5(b) より, 最も効率が向上した $D = 0.075L$ のときには下側の渦が主に衝突し, $D = 0$ の場合と比べて, より魚のボディに密着した渦が巻き上がって後方へと流れさる様子が見られる.

次に静止ケースについて, 抗力の圧力成分と粘性成分に分解したときの抗力の時系列変化を Fig.6 に示す. 実線, 破線, 一点鎖線はそれぞれ全抵抗, 圧力抵抗, 粘性抵抗を表す. Fig.6 より, 全抵抗の変動は圧力抵抗が支配的となっていることが分かる. さらに D が増加するに従って変動の特徴が変化することが分かる. ここで, $D = 0$ と $D = 0.075L$ について, 圧力抵抗が低下している時の圧力分布を Fig.7 に示す. Fig.6, Fig.7 より, どちらも後続魚の頭部付近に低圧部が形成されている時に圧力抵抗が低下していることがわかる. 特に $D = 0.075L$ では, 頭の前方が低圧となっている. この前方魚が放出する渦によってできた低圧部を利用することで, 後続魚の抵抗が減少し, 効率が向上すると考えられる.

5 まとめ

1 匹および 2 匹の 2 次元魚モデルまわりの流れを計算し, 抵抗や効率, 流れ場の配置間隔 D 依存性を調査した. その結果, (1) 魚群を成すことで後続魚の抵抗が減少し効率が向上することを確認し, (2) 抵抗・効率ともに極値をとる位置 $D = 0.075L$ があることを明らかにした. さらに (3) 後続魚の抵抗変動は圧力抵抗が支配的となることがわかった. その圧力抵抗が減少するタイミングと後続魚頭部付近で低圧部が形成されるタイミングが一致することから, (4) 後続魚は前方魚がつくる流れ・渦による低圧部を利用することで効率を向上させていると結論づけた.

今後は 3 次元においても魚まわりの流れを計算し, 2 次元との後流構造の違いを求め, 3 次元においても効率が向上するのかを確認していく予定である.

References

- [1] Breder, C. M., Zoo-logica, 4 (1926), pp. 159-297
- [2] D. Weihs, Nature, 241 (1973), pp.290
- [3] M. Bergmann, A. Iollo, J. Comp. Phys., 230 (2011), pp.329-348

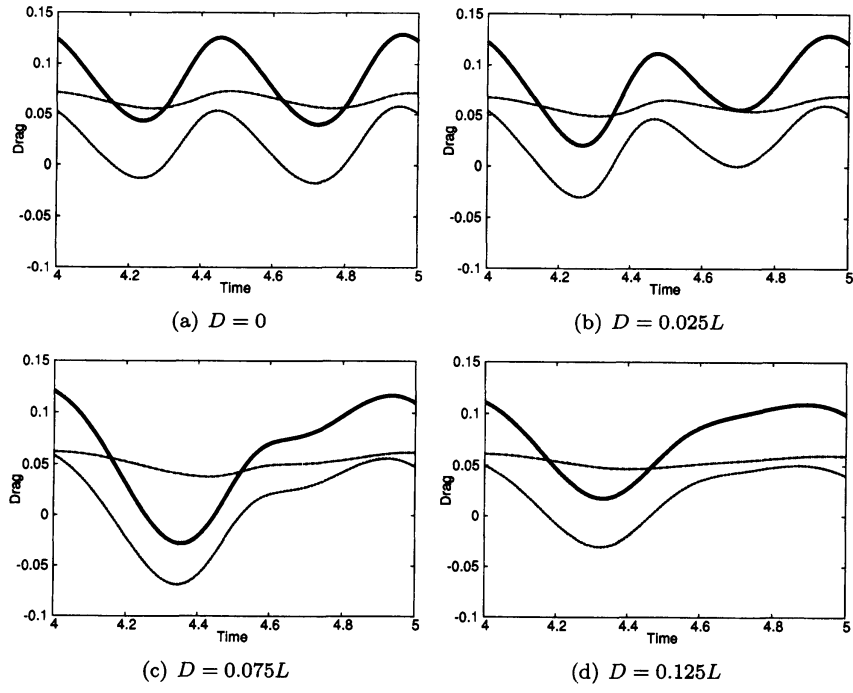


Figure 6: Time history of drag coefficient. Solid, broken and dot-and-dash lines show the total drag, pressure drag and viscous drag, respectively.

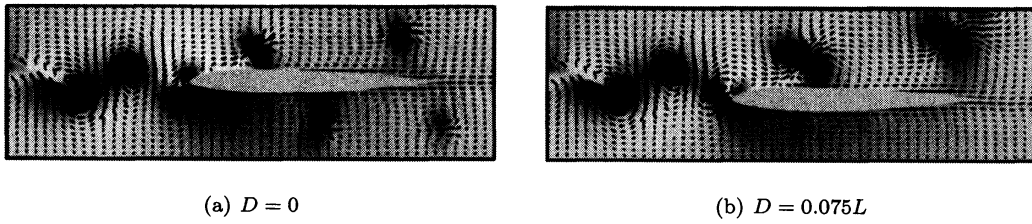


Figure 7: Pressure field at (a) $t/T = 4.2$ and (b) $t/T = 4.3$, when T is the oscillation period of the tail.