

# 遊泳するエイ周りの流れのシミュレーション

理学専攻 情報科学コース 鈴木 友香 (指導教員: 河村 哲也)

## 1 はじめに

水棲動物(魚類)の遊泳は、身体の形状や筋力の強さ、ヒレの動かし方、水の流れといった要素が関わり、複雑である。本研究では、この中のヒレの動かし方に注目した。水棲動物の遊泳方法は、大きく分けて4種類ある。[1] 細長い体全体をくねらせながら泳ぐウナギ形。[2] 体の後半部と尾ヒレを共に動かして泳ぐアジ形。[3] 体は動かさずに尾ヒレだけを動かして泳ぐハコフグ形。[4] 大きな胸ヒレを前から波打つように動かして泳ぐエイ形である。このように水棲動物の遊泳方法は多様である。本研究では、あまり研究例がないことに加え、その形状や遊泳運動が他の魚と異なり特殊であるエイに注目した。本研究では、数値シミュレーションを用いてエイのヒレの動きと推進速度の関係を考察することを目標とする。

## 2 モデル化

本研究では、エイを正方形の厚みのない板と仮定しモデル化した。正方形を45°回転させて1つの頂点を前とし、前から流速を与えた。板の中心を原点として、モデル化した。板の対角線を背骨として固定し、ヒレの各点を波打つように上下に振動させる動きを組み込んだ。

## 3 計算方法

### 3-1 計算格子

計算格子は、格子数を91×91×31とし、直方体をベースとして、エイの運動にしたがって変形させた。格子のX, Y方向は端に向かうほど格子間隔が大きくなる不等間隔格子を用い、中央付近では等間隔格子を用いた。またZ方向はエイに近いほど格子間隔が細かい不等間隔格子を用いた。この計算格子のX, Y方向の格子番号36-56, Z方向の格子番号16の部分を実際のエイの板とした。板の一辺の長さを2としたとき、物理領域全体の一辺の長さは55である。

### 3-2 支配方程式

本研究では、エイ周りの3次元流れを解析する。流れは非圧縮性流体として扱った。非圧縮性流体の流れは、連続の方程式とナビエ・ストークス方程式を支配方程式として解くことができる。

ここではこれらの方程式を差分法を用いて解いた。さらに本研究では、計算格子をエイの動きに合わせて移動させているため、格子の移動の効果を方程式に組み込んだ。

### 3-3 格子の動かし方

本研究では、モデルの動きとして下記の値を組み込み計算した。

$$\begin{aligned} \text{周期} &: 1 \\ \text{波長} &: \frac{2}{1.5} \\ \text{レイノルズ数} &: 500 \\ \text{はばたきの角度} &: -30^\circ \sim 30^\circ \end{aligned}$$

またエイ表面の格子番号X, Yについて $36 \leq X \leq 56$ ,  $36 \leq Y \leq 56$ として、物理座標は $-1 \leq x \leq 1$ ,  $-1 \leq y \leq 1$ とした。

以下の式でエイの表面のz成分を決めた。

$$z = -a \cdot \sin\left(\frac{5\pi}{180} \cos(0.15\pi t)\right) \cdot \frac{x-y}{\sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{30\pi}{180} \cos\left(0.15\pi t - 1.5\pi\left(\frac{X-36}{20} + \frac{Y-36}{20}\right)\right)\right)$$

aは最大振幅, tは時間である。この式の前半部分は前から背骨に沿った進行波の式であり、後半部分はヒレのはばたきの動きの式である。

### 3-4 流れの条件

図1に示す境界条件を与えた。これはエイの遊泳速度約0.57, 迎角約10°に相当する。

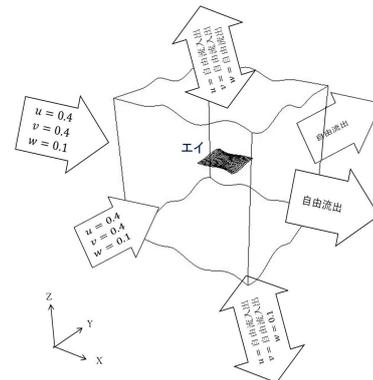


図1: 境界条件のイメージ図

3-1から3-4を踏まえて、板の周囲の流れを解析し、板の上面と下面にかかる圧力の差を求め、そこからエイが受ける時々刻々の流体力を計算した。

## 4 結果と考察

本研究において得られた結果を示す。

以下ではまず初期状態の板面上の格子(図2)を示す。格子の左側にある小さな四角は、四角がある面がエイの頭であり上の面であることを示す。次に、このモデルが受ける流体力の時間変位を表したグラフを示す(図3)。ここでは正の値となっているときは、このモデルは抵抗を受けていて、負の値となっているときは推力を持っているとみなすことができる。

図4はエイの運動の1周期間でのエイ表面の圧力分布を示す。[1]から[10]で1周期間を等分割している。この圧力分布は、上の面の圧力から下の面の圧力を引いた圧力差を示す。赤に近いほど上の面の圧力の方が大きく、青に近いほど下の面の圧力の方が大きいことを示す。

図5では、図3のグラフで抵抗のピーク(A)と推力のピーク(B)になっているときのエイの表面の圧力分布を示す。図5の[1]を見ると後ろ側が青くなっていることから、下の面の方が圧力が大きいことがわかる。そのためこの状態では下から上に押されている状態であるとみなすことができる。また[2]を見ると後ろ側が赤くなっていることから、上の面の方が圧力が大きいことがわかる。そのためこの状態では上から下に押されている状態であるとみなすことができる。

## 5 おわりに

本研究では、モデル化したエイのヒレのはばたき1周期の中で、どのような動きをしているときに推力の位相、抵抗の位相となるかが分かった。今後は推力が大きく出るようにヒレの動かし方を変え、エイが高速で泳ぐメカニズムを解明したい。

## 参考文献

1. エアロ・アクアバイオメカニズム研究会, "エアロアクアバイオメカニクス," 森北出版 (2010)
2. R.G.Bottom II, I. Borazjani, E. L. Blevins and G. V. Lauder, "Hydrodynamics of swimming in stingrays: numerical simulations and the role of the leading-edge vortex," J.Fluid Mech. (2016), vol.788, pp.407-443.
3. 河村哲也, "流体解析 I," 朝倉書店, (1996), ISBN4-254-11402-8

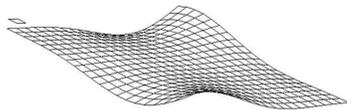


図 2: エイのモデルの初期状態の表面格子

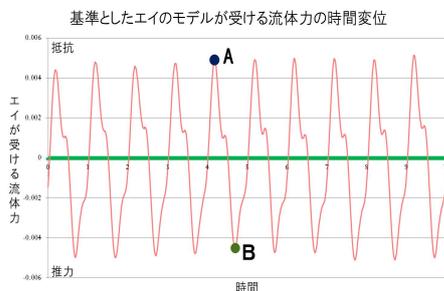


図 3: モデルが受ける流体力の時間変位のグラフ

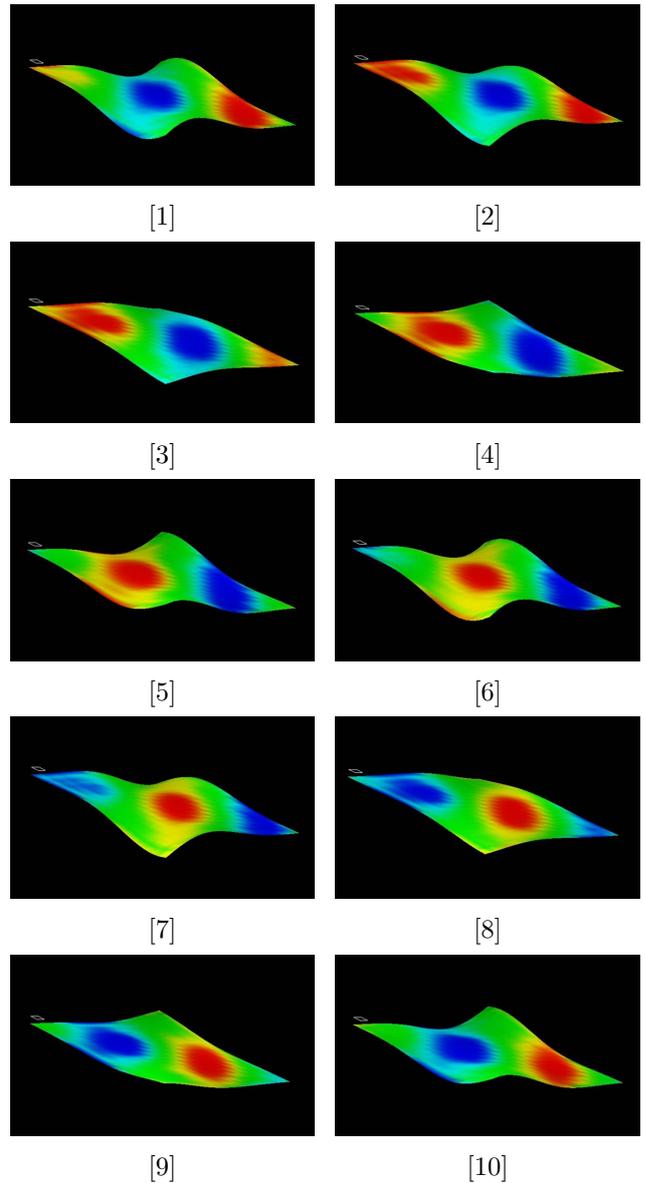


図 4: エイのモデルの表面圧力分布

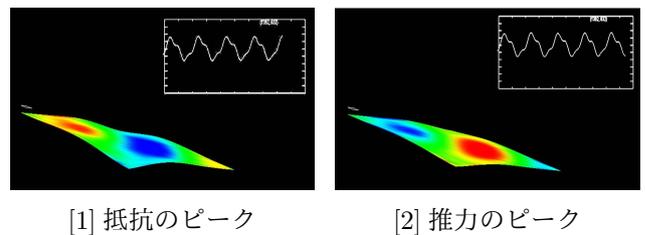


図 5: ピークにおけるヒレの動き