

## CFD 解析によるトビエイ目の移動能評価

### Evaluation of spatial maneuverability of batoid fishes in myliobatiformes by CFD analysis

○奈良岡桂和\*, 澄川太皓\*, 三好扶\*

○Yoshikazu Naraoka\*, Hiroaki Sumikawa\*, Tasuku Miyoshi\*

\*Iwate University

キーワード : rajiform, mobuliform, OpenFOAM,

数値流体解析(Computational Fluid Dynamics), 重合格子法(overset grid)

連絡先 : 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5

岩手大学 理工学部 システム創成工学科 機械科学コース 三好研究室

奈良岡 桂和, Tel&Fax:019-621-6357, E-mail:s0717057@iwate-u.ac.jp

## 1. 緒言

魚類は主に無顎類, 顎口類に分けられ, 顎口類はさらに硬骨魚類, 軟骨魚類の2つに分類される。硬骨魚類の多くは, 体と尾鰭をうねらせるように遊泳し, その形状は左右に平たい側扁のものが多い。一方, 軟骨魚類は形状や遊泳法が特徴的である。我々は, 硬骨魚類と比べて胸鰭が左右に大きく発達し, 主にその胸鰭を用いて遊泳を行う軟骨魚類のトビエイ目に着目した。トビエイ目の遊泳法は種によって異なり, 胸鰭を前方から後方へ波打たせるようにして推進する方法と, 鳥のように胸鰭を羽ばたかせながら推進する方法の2つに大別される。一般に, 前者を *rajiform* と呼び, 後者を *mobuliform* と呼ぶ<sup>1)2)</sup>。トビエイ目のエイは, 遊泳法だけでなく胸鰭形状や

生息域にも差が見られる。*rajiform* 型のエイは半円形の胸鰭形状を有しており(図 1), 生息域としては底生のものが多い。一方, *mobuliform* 型のエイは横幅の広い三角形の胸鰭形状を有しており(図 2), 海底から離れて遊泳する姿が多く確認されている<sup>2)</sup>。

トビエイ目のエイの数値解析を用いた研究は既に行われており, *rajiform* 型のエイの先行研究として, Bottom II ら<sup>3)</sup>によって前縁渦による推力生成メカニズムが明らかにされている。また, *mobuliform* 型のエイの先行研究として, Huang ら<sup>4)</sup>により胸鰭の振幅・振動数と推進効率の関係やエイ後方の 3 次元渦構造が示され, Shimizu<sup>5)</sup>らにより胸鰭の屈曲角度がもたらす速度・圧力分布への影響やピッチ方向の姿勢制御との関係が示されている。しかしながら, 未だ解明されて

いないことも多く、我々が調べた限り、エイの胸鰭形状と遊泳法に関する流体力学的特性は明らかにされていない。そこで、我々は胸鰭形状と遊泳法に関して、「半円形の胸鰭形状と rajiform のモーシヨンの組み合わせを持つエイは底生のため、上下方向の移動より前後方向の移動に適しており、三角形の胸鰭形状と mobuliform のモーシヨンの組み合わせを持つエイは、海底から離れて遊泳を行うことから前後方向の移動より上下方向の移動に適している」と仮説を立てた。この仮説を検証するには、胸鰭形状と遊泳法の組み合わせによるエイの移動能を評価する必要がある。ここで、エイの移動能を「前後方向と上下方向に移動する能力」と定義する。

本研究では、エイのモデルを用いて CFD(Computational Fluid Dynamics:数値流体解析)を行い、揚抗比によって胸鰭形状と遊泳法の組み合わせによるエイの移動能を評価する。

## 2. 解析モデル

簡易モデルはオープンソースの 3 次元モデリングソフトウェアである blender2.78<sup>6)</sup>を用いて作成する。本研究では、半円形の胸鰭形状を持つアカエイ(学名：*Dasyatis akajei*)と三角形の胸鰭形状を持つウシバナトビエイ(学名：*Rhinoptera javanica*)をモデルとし、blender2.78 で作成したモデルと寸法を図 3、図 4 に示す。なお、モデル全長方向を X 軸、横方向を Y 軸、高さ方向を Z 軸とする。

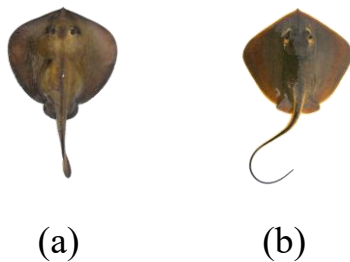


Fig.1 Pectoral fin shape of a rajiform ray :

(a) *Urolophus aurantiacus*<sup>7)</sup>, (b) *Dasyatis akajei*<sup>8)</sup>

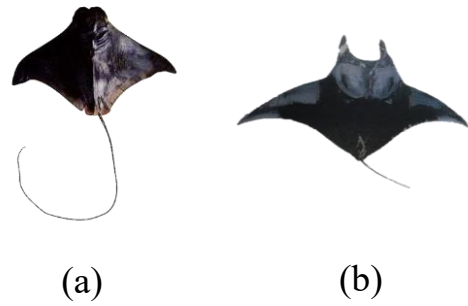


Fig.2 Pectoral fin shape of a mobuliform ray :

(a) *Rhinoptera bonasus*<sup>9)</sup>, (b) *Mobula birostris*<sup>10)</sup>

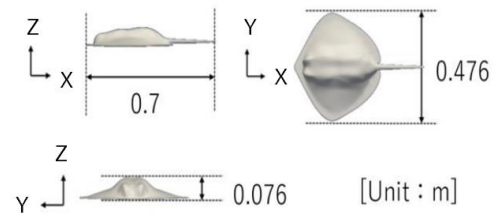


Fig.3 The whole body of *Dasyatis akajei* (semi-circular model)

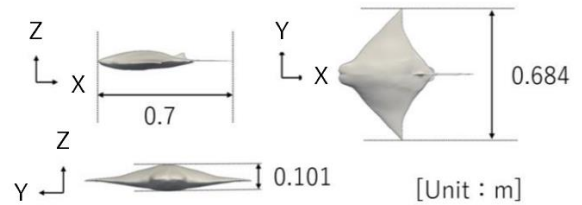


Fig.4 The whole body of *Rhinoptera javanica* (triangle model)

## 3. モデルの解析

単位面積あたりの抗力(式 1)と揚力(式 2)を定義し、移動能を評価する際に用いる揚抗比を式(3)に示す。

$$D = \int_A P_x dA / A_x \quad (1)$$

$$L = \int_A P_z dA / A_z \quad (2)$$

$$\frac{\bar{L}}{\bar{D}} = \frac{\frac{1}{3T} \int_0^{3T} |L|}{\frac{1}{3T} \int_0^{3T} |D|} \quad (3)$$

ただし、 $P_x$ ,  $P_z$ はそれぞれ X 軸, Z 軸方向の圧力の大きさ,  $A$  は表面積,  $dA$ は微小面積,  $A_x$ ,  $A_z$ はそれぞれ X 軸, Z 軸から見たモデルの投影面積,  $T$ は周期を表している。

ここで用いる揚抗比  $\bar{L} / \bar{D}$  は, エイが生み出す前後方向の力の大きさと上下方向の力の大きさのどちらが大きいかを表す指標で, 揚抗比が 1 より大きい場合, エイが発揮する上下方向の力が支配的である事を意味し, 1 より小さい場合は, エイが発揮する前後方向の力が支配的である事を意味する。

流体解析には, オープンソースの 3 次元熱流体解析ソフトウェアである OpenFOAM-v1806+<sup>11)</sup>を用いる。流れは層流の水(動粘度  $1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ )と仮定する。流体の支配方程式は下記に示す連続の式(式 4)とナビエ・ストークス方程式(式 5)である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = & -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) \\ & + \nabla \cdot \left[ \nu \left\{ (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで,  $\mathbf{u}$ は速度ベクトル,  $p$ は静圧,  $\nu$ は動粘度,  $\mathbf{I}$ は単位テンソルである。解析には重合格子法を用いており, ソルバに魚類の遊泳モーションライブラリを導入した環境を構築した。

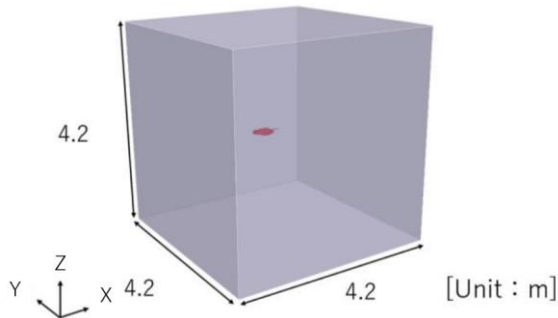


Fig.5 The analysis region

また, エイのまわりの 3 次元的な渦構造を可視化するために渦度テンソル(式 6)と変形速度テンソル(式 7)を定義し, 速度勾配テンソルの第 2 不変量である  $Q$ (式 8)を導出する。

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (8)$$

ただし,  $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$  である。

解析領域は, 図 5 に示すような一辺の長さ 4.2[m]の立方体とし, モデルは剛体として考え, 解析領域の中央付近に配置する。モデル前方の面を流入条件, その他の面を自由流出条件とし, 解析モデル表面は滑りなし壁面とした。本研究では, 単にエイが発揮する力を調べるため, 前方からの流速は与えていない。

本研究では, 半円形の胸鰭形状を持つアカエイと三角形の胸鰭形状を持つウシバナトビエイの 2 つのモデルに対して **rajiform** と **mobuliform** の 2 つのモーションを与えた合計 4 つの解析を行う。

## 4.解析結果と考察

半円形モデルと三角形モデルに **rajiform** と **mobuliform** のモーションを与えた時の揚抗比の結果を下の表 1 に示す。表 1 より, 実際のアカエイのモデルと遊泳法の組み合わせである半円形モデルに **rajiform** のモーションを与えた時の揚抗比が最も小さく, 実際のウシバナトビエイのモデルと遊泳法の組み合わせである三角形モデルに **mobuliform** のモーションを与えた時の揚抗比が最も大きくなるのがわかった。この時, 揚抗比の値が 1 未満になったのは半円形モデルに **rajiform** のモーションを与えた時のみであった。また, 4 つの揚抗比の結果を比較した際に, **rajiform** に比べ **mobuliform** のモーションを与えた時

の方が揚抗比は大きくなった。

図 6, 図 7 はそれぞれ半円形モデルに **rajiform** のモーシヨンを与えた場合と三角形モデルに **mobuliform** のモーシヨンを与えた場合の始めと終わりの時刻における 3 次元的な渦構造を表す。ここで, 半円形モデルと三角形モデルまわりの 3 次元的な渦構造を比べると, 時間の経過によるそれぞれの渦の発達の様子が大きく異なることがわかる。半円形モデルに **rajiform** のモーシヨンを与えた場合(図 6), 渦は後方(x 軸正の方向)に発達しているが, 三角形モデルに **mobuliform** のモーシヨンを与えた場合(図 7), 渦は上下方向に発達していることが確認できる。

半円形モデルと **rajiform** の組み合わせの揚抗比が小さくなったのは, 図 6 より, 主に後方(x 軸正の方向)に渦が発達していることから流体を後方に押し出していると考えられ, その反力である x 軸負の方向の力(推力)が上下方向の力に比べて大きくなったことが原因であると考えられる。一方, 三角形モデルと **mobuliform** の組み合わせの揚抗比が大きくなったのは, 図 7 より, 主に上下方向に渦が発達していることから流体を上下方向に押し出していると考えられ, その反力(上下方向)が前後方向の力に比べて大きくなったことが原因であると考えられる。また, **rajiform** に比べ **mobuliform** のモーシヨンを与えた場合の揚抗比が大きいことから, 揚抗比の増加には胸鰭形状より遊泳法が影響している可能性が高いといえる。

生物学的には, 海底から離れて遊泳するウシバナトビエイが持つ胸鰭形状と遊泳法は空間移動に適しており, 底生のアカエイが持つ胸鰭形状と遊泳法は平面移動に適していることが示唆された。

Table 1 Lift-drag ratio of two models and two motion combinations

	rajiform	mobuliform
半円形モデル	0.792	1.833
三角形モデル	1.555	2.372

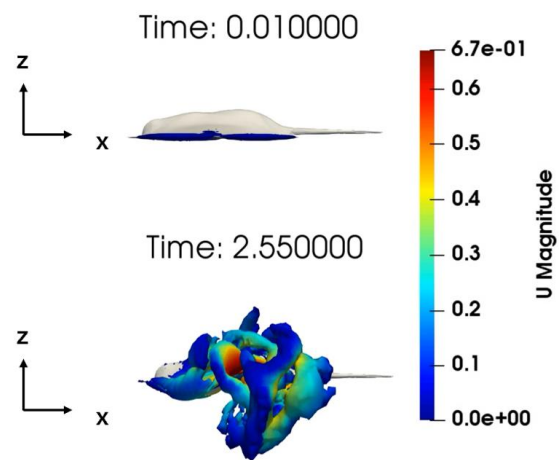


Fig.6 Three-dimensional vortex structures around *Dasyatis akajei* ( $Q=4$ )

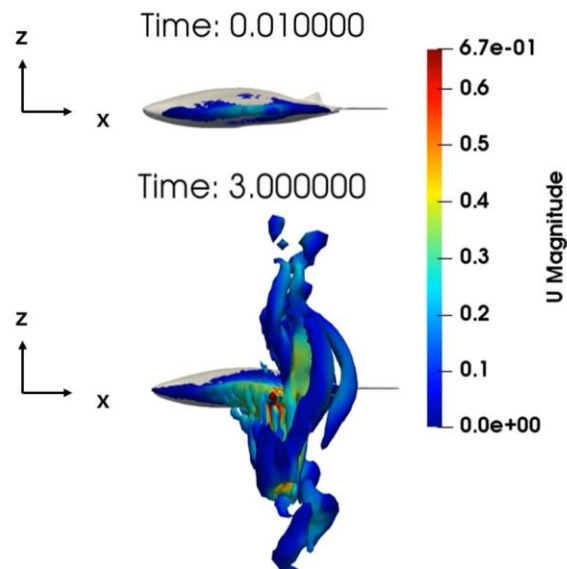


Fig.7 Three-dimensional vortex structures around *Rhinoptera javanica* ( $Q=4$ )

## 5. 結言

本研究では、半円形のモデルと三角形のモデルに対して rajiform と mobuliform のモーションを与えた CFD 解析を行い、揚抗比を用いてエイの胸鰭形状と遊泳法の組み合わせによる移動能の評価を行った。結果として、仮説通り半円形の胸鰭形状と rajiform の遊泳法の組み合わせは上下の移動に比べて前後の移動に適しており、三角形の胸鰭形状と mobuliform の遊泳法の組み合わせは前後の移動に比べて上下の移動に適しているということがわかった。

本研究では、エイの上下方向、前後方向に関する移動能の評価をおこなったが、今後はエイの方向転換といった旋回能に関する評価を行う研究を検討している。

## 参考文献

- 1) L. J. Rosenberger, Pectoral fin locomotion in batoid fishes : undulation versus oscillation, *The Journal of Experimental Biology*, 204, 379/384(2001)
- 2) J.E.Fontanella , F.E.fish , E.I.Barchi , R.C.Malone, R.H.Nichols, N.K.DiNenno, J.T.Beneski : Two- and three-dimensional geometries of batoids in relation to locomotor mode, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* , 446 , 273/281(2013)
- 3) R. G. Bottom II, I. Borazjani, E. L. Blevins, G. V. Lauder : Hydrodynamics of swimming in stingrays : numerical simulations and the role of the leading-edge vortex, *J. Fluid Mech*, 788, 407/443(2015)
- 4) Qiaogao Huang , Dong Zhang , Guang Pan : Computational Model Construction and Analysis of the Hydrodynamics of a *Rhinoptera Javanica*, *IEEE Access*, 8(2020)
- 5) Shimizu. T, Miyoshi. T : Postural control in the pitch direction using flexion angles of the root and fin tip of the pectoral fin in *Mobula japonica*, *Journal of Aero Aqua Biomechanisms*, 8 -1, 6/12(2019)
- 6) blender, <https://www.blender.org/download/releases/2-78/>,(参照日 2021/2/19)
- 7) web 魚図鑑, <https://zukan.com/fish/interna16549>, (参照日 2021/2/12)
- 8) web 魚図鑑, <https://zukan.com/fish/interna1405>, (参照日 2021/2/12).
- 9) 国立研究開発法人水産・教育機構 開発調査センター, <http://jamarc.fra.affrc.go.jp/database/zukan/f/f-1/f-m020/f-086.htm>, (参照日 2021/2/12)
- 10) 上野輝彌, 坂本一男 : 新版 魚の分類の図鑑\_\_世界の魚の種類を考える, 24/25, 東海大学出版部(2005)
- 11) )The open source CFD toolbox, <https://www.openfoam.com/releases/openfoam-v2012/>, (参照日 2021/2/5)