

オニイトマキエイの胸鰭の羽ばたきフェーズが速度・表面圧力分布に与える影響
Effect of the flapping phase of pectoral fin to the distribution
of velocity and surface pressure in *Manta birostris*

○清水朋佳*, 福江高志*, 三好扶*

○Tomoka Shimizu*, Takashi Fukue*, Tasuku Miyoshi*

*岩手大学

*Iwate University

キーワード: 数値流体力学(Computational Fluid Dynamics), 流体的特性(Fluid dynamic characteristics), 羽ばたき推進(Flapping propulsion), 速度分布(Distribution of velocity), 表面圧力分布(Distribution of surface pressure)

連絡先: 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5

岩手大学大学院 総合科学研究科 理工学専攻 三好研究室
清水朋佳, Tel&Fax: 019-621-6357, E-mail: g0317082@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

海棲動物類は進化の過程で種特有の機能や形態を獲得しており,これはそれぞれの環境に適応した結果である.したがって,海棲動物類の機能や形態を模し,これを工学的に応用できれば新しい技術開発につながる事が期待できる.例えばサメ肌に着目すると,そのリブレット構造を持つ競泳着は流体抵抗が少なくでき,泳速度の向上に資することが報告されている¹⁾.

マンタ類(オニイトマキエイ,ナンヨウマンタ)は,胸鰭の羽ばたきによって推進する海棲動物類の中では最大種である.したがって,マンタ類の羽ばたき推進から得られる知見は,例えば海中での推進効率や推進器開発でのイノベーション創出が期待できる.一方,オニイトマキエイは絶滅危惧Ⅱ類に分類されるなど,海棲動物の生態調査,行動学的調査,身体動作学を含む運動生理学は不明な点が多く,個体数が減少し,国際自然保護連合(IUCN)²⁾が作成したレッドリストに掲載されている生物については研究が困難であるためその調査は難航している.このため,マンタ類の泳動作に関する研究はCFD(Computational Fluid Dynamics)解析に頼らざるを得ない³⁾.

マンタ類胸鰭の骨格は軟骨組織で構成され,その羽ばたき動作はMobuliform型(数珠型)と呼ばれ身体中央から鰭先端部方向に連続して伝えられる.この様式は鳥の羽ばたき動作と類似する⁴⁾.また,彼らの遊泳方法はRajiform型と呼ばれる胸鰭の流れに沿って波打たせながら伝播させ,加えて羽ばたきながら推進をする⁵⁾.Liuら(2015)は高い推進効率はヒレ先端の柔軟性により生み出されていると述べられている⁶⁾.Fishら(2016)はオニイトマキエイの羽ばたきに関して胸鰭の運動学の計算とモデルを使用したシミュレーション解析により,鰭の前縁部分で推力を生成し,高速に遊泳した際に高い推進効率を生み出すと述べている³⁾.オニイトマキエイ,鳥,あるいは飛翔昆虫に共通する羽ばたき動作による推進力生成だが,オニイトマキエイは羽ばたき動作中の鰭の変形様式が鳥や飛翔昆虫とは全く異なる.鳥や昆虫では翅が上から下に羽ばたく場合(以下,下降挙動とする)と,下から上に羽ばたく場合(以下,上昇挙動とする)では翅の慣性力によるたわみ(曲率変化)が受動的に生じる⁷⁾.しかしながら,オニイトマキエイは下降挙動の場合に胸鰭の前縁の曲率が大きく変化し,上昇挙動の場合はその曲率がほとんど生じない.した

がって、オニイトマキエイが羽ばたき動作を行う際に生じる前縁部の曲率変化は、羽ばたきによる慣性力の影響を受けた受動的変化というより、むしろ自発的に胸鰭の曲率を変化させることで、推進効率を含めた流体力学的な効果を向上させている可能性が高い。そこで本研究では、オニイトマキエイの胸鰭の形状の変化が彼らの推進や姿勢の安定性などにどのような影響を与えているのかを解明し、その特徴を記述することを目的とする。本稿では羽ばたき挙動を一定時間で区切り、各瞬間のオニイトマキエイのモデルを作成した。その後3D-CFD解析を行い、鰭の形状による流速と表面圧力への影響を考察する。

2. モデルの設計

3D-CFD解析を行うためにモデルを作成し、STLデータに変換した後、解析ソフトウェアに挿入した。対象となるモデルは左右対称の、トビエイ目トビエイ科オニイトマキエイ属のオニイトマキエイとし、Fig.1に示す⁵⁾。実際に遊泳している場面を撮影した映像に専用画像解析プログラムをMatlab R2016b(Mathworks)で開発し、各胸鰭の角度と距離を測定した値をモデルに用いた。

2.1 モデルの作成

作成にはBlender2.78a(Blender)を使用した。基準となるオニイトマキエイを作成し、その後Boneと呼ばれる骨構造をFig.2のように配置した。モデルの翼幅方向をx軸、全長方向をy軸、全高方向をz軸とする。原点はFig.2に黄色の点で示す。各モデルの胸鰭の角度はこの骨構造の角度を変えることによって表現できる。

撮影した映像からオニイトマキエイの羽ばたき1周期を9種類に分けてモデルを作成した。Fig.3に基準となるオニイトマキエイのモデルを後方部から見た場合を示す。また、Fig.4に撮影した映像とオニイトマキエイのはばたきを再現したモデルを示す。このときManta1~5の動きを下降挙動、Manta5~9の動きを上昇挙動とする。モデル化に当たりオニイトマキエイの翼幅を1.6[m]とした。これは尾を除く全長の1.5倍とする。アスペクト比は3.85とした⁸⁾。

3. モデルの解析

本稿では生物のモデルを剛体と考え、FlowDesigner2017(株式会社アドバンスドナレッジ研究所)を用いてモデルの正面から一様の水を流入するシミュレーションを行い、得ら



Fig.1 *Manta birostris*

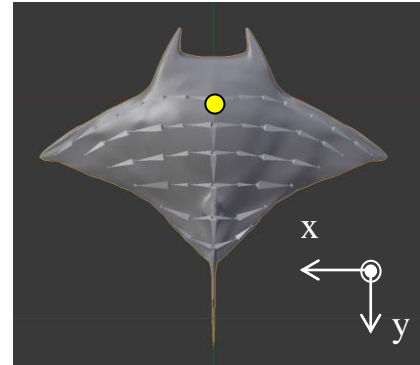


Fig.2 Structure of Bone

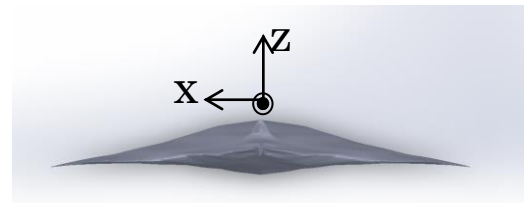


Fig.3 Standard Manta model

れた結果から各モデルの流速と表面圧力の変化の評価を行うこととする。

流路は2[m]平方かつ奥行2.5[m]の直方体を設定し、メッシュ数を8437500個とした。このとき、STLデータとして入力したモデルは原点が $x=1$ [m]、モデルの最前方部が $y=1$ [m]、最下方部が $z=0.85$ [m]の位置に配置した。解析条件として流路には定常かつ一様流の流体を流速0.5[m/s]で流入した。このときの流体は水に設定し、高レイノルズ数型/k- ϵ モデルの乱流を用いて解析を行った。

4. 解析結果

本節ではManta1,3,5,7,9の結果を用いる。

4.1 流速の変化における解析結果

Fig.5,6,7はモデルの後方部から $y=0.90$ の断面を見た場合の速度分布である。Fig.5よりManta3のように胸鰭がz軸正方向にあり、かつ下降挙動のとき、胸鰭の下側の流速が大きくなる。特に胸鰭中間部あたりの前縁部変曲点から根元の間にも最も速度が速い地点が存在している。Fig.6よりManta5のように胸鰭がz軸負方向にあるとき、

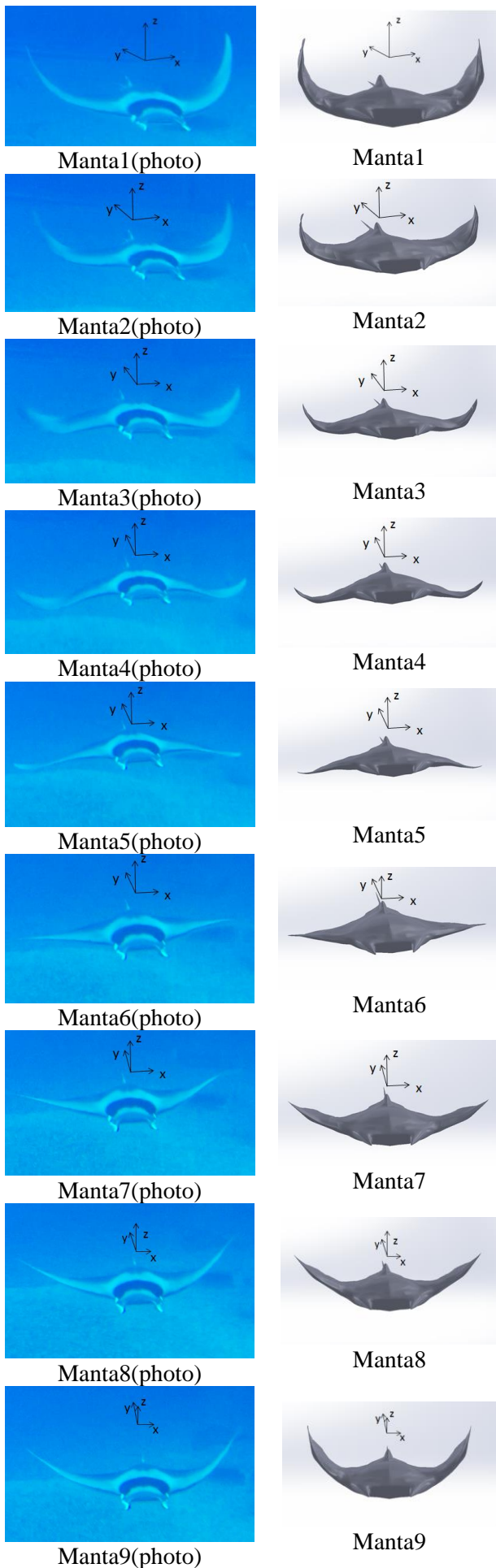


Fig.4 Behavior of Manta(left:photo, right:model)

体の上下の面での速度は同様の分布を示している. Fig.7より Manta7のように胸鰭がz軸方向にあり,かつ上昇挙動のとき, Manta1,3と少し異なり速度の分布が胸鰭先端の下側まで全体的に広がっており, 速度変化は下降挙動のときよりも小さい. すべてのモデルの共通点は胸鰭の下面の流れは速度が大きい地点に流れるため結果的に体中心方向に流れた.

Fig.8,9はモデルの後方部から $y=1.10$ の断面を見た場合の速度分布で,それぞれManta1, 5である. この胸鰭先端部の反時計回りの渦は, Manta1,3,7,9の場合に生じ, Manta5のときは発生しなかった.

Fig.10,11はモデル後方部から $x=1.40$ を垂直に見たときのManta1とManta5の速度ベクトルの変化である. この結果から胸鰭がz軸正方向にあるとき翼上面上に分岐点が発生し,それ以上の速度ベクトルは左側,それ以下の速度ベクトルは右側に移動するためFig.10のような3次曲線のような変化が生じる. 一方Fig.11のように胸鰭がz軸負方向にあるとき分岐点より下側の流れが極端に体中心方向に進む.

Fig.12はManta1のモデルの $y-z$ 平面から $x=1.50$ の断面を見たときの図である. ヒレの裏側に時

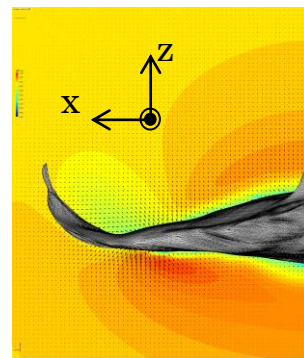


Fig.5 Velocity distribution of Manta3 ($y=0.90$)

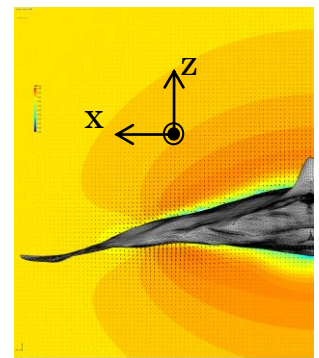


Fig.6 Velocity distribution of Manta5 ($y=0.90$)

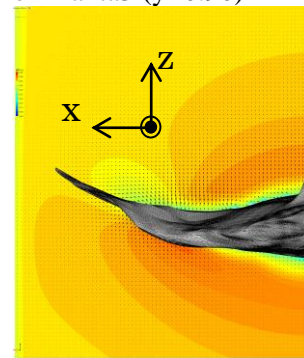


Fig.7 Velocity distribution of Manta7 ($y=0.90$)

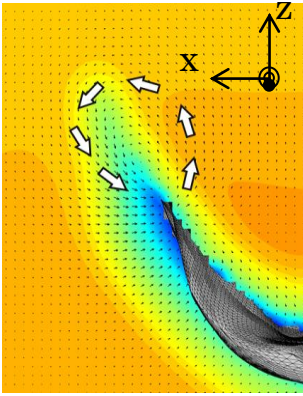


Fig.8
Velocity distribution at tip of Manta1 (y=1.10)

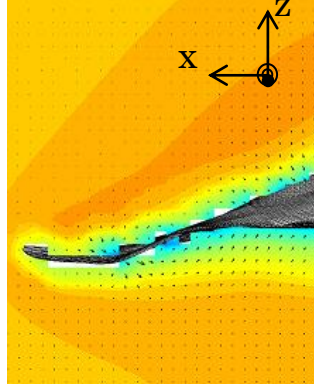


Fig.9
Velocity distribution at tip of Manta5 (y=1.10)

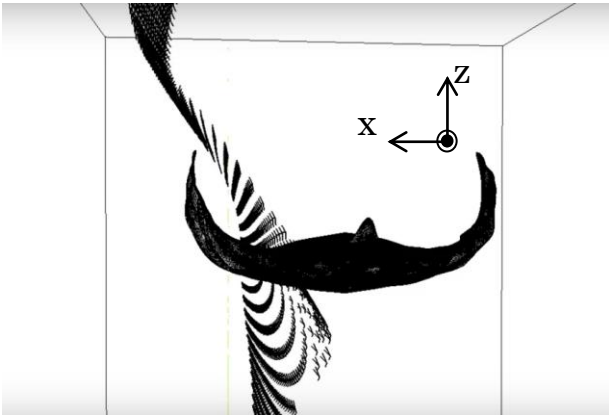


Fig.10 Velocity vector of Manta1 (x=1.40)

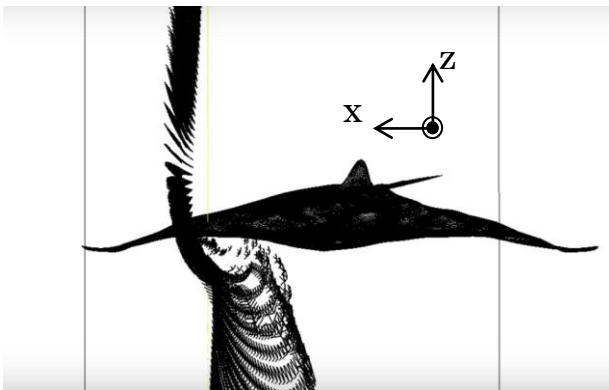


Fig.11 Velocity vector of Manta5 (x=1.40)

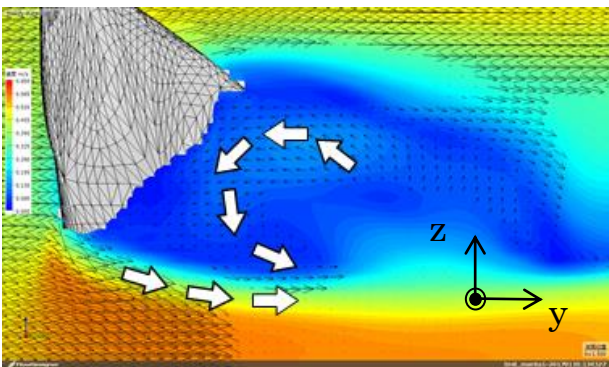


Fig.12 Vortex of Manta1 (x=1.50)

計回りの渦が生じている. この現象はヒレの前縁で速くなった流れがヒレの下側をから巻き込むことによってヒレの裏側の滞った部分に渦を作る.

4. 2 表面圧力の変化における解析結果

Fig.13,14にManta1の体の上面と下面を見たときの図を, Fig.15,16にManta5の体の上面と下面を見たときの図を示す. この結果から胸鰭がz軸正方向にあるManta1の場合ほど,胴体上面の前方部の圧力が大きいことが分かる. またFig.13より前縁部の圧力も大きくなるが,胸鰭の下面の前縁部付近は急激に負圧に変化する. 一方のManta5の場合は胸鰭の前縁に圧力がかかっているが,下面前縁部の付近の圧力はManta1ほどの急激な変化はなかった. 各モデルを比較したとき,体の前方部以外の表面圧力は胸鰭の角度が変化しても大きな違いは見受けられなかった.

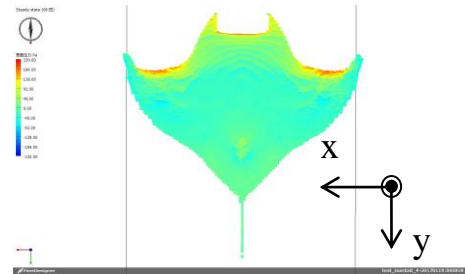


Fig.13 Surface pressure of Manta1 (up)

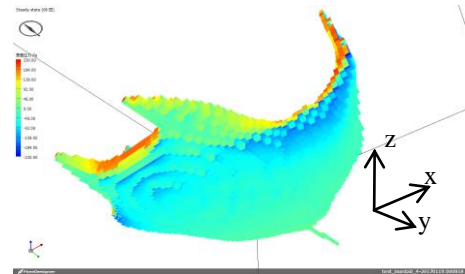


Fig.14 Surface pressure of Manta1 (downside)

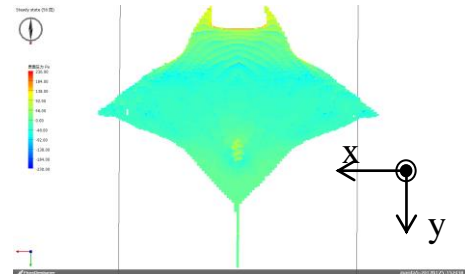


Fig.15 Surface pressure of Manta5 (up)

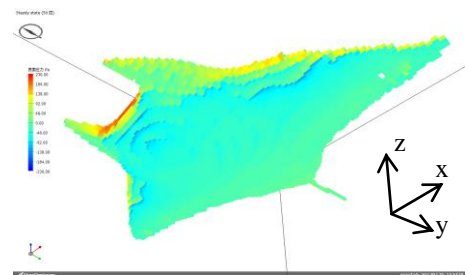


Fig.16 Surface pressure of Manta5 (downside)

5. 考察

速度分布の結果から、下降挙動の特徴は胸鰭の下面を通り尾に向かって流れるが、特に胸鰭の前縁部変曲点から付け根の間に流速が大きくなる点が生じる。速度の変化が大きい場所は渦が生じやすいため、マンタのヒレが前縁で加速した部分に生じる渦をつかみ、昆虫と同じく渦を押し出すことで推進力を得ていると考えられる。また、胸鰭の下面には中心方向に流れが生じるので押した渦は尾に集まりながら後方に流れ、徐々に尾に平行に流れていくと考えられる。下降挙動の際には上昇挙動の場合よりも胸鰭の下に速度の速い分布があるので、圧力が低くなり胸鰭がz軸負方向に引かれる。そのため、推進で自分が下降挙動の際の羽ばたく力に加え、圧力の低下によって胸鰭をz軸負方向に引く力も存在するためより強い力で後方に渦を押し出すことができると予想される。

一方上昇挙動の特徴は胸鰭下面の速度の変化が小さいため、渦を発生させずかつz軸負方向に胸鰭を引っ張る力が小さい。そして胸鰭根元から先端まで同様の速度が広がり、上昇するほどその速度は大きくなる。そのため上昇挙動は下降挙動を開始する位置まで胸鰭の下面を引っ張る力を抑えていることが予想される。

胸鰭先端に生じる渦については反時計回りに流れるため、Fig.10に示す分岐点の上側を外方向に移動させ、胸鰭下面の体中心に向かう流れにより分岐点の下側は体の中心方向に向かう流れに変化する。これにより速度ベクトルは3次元的な曲線に変化する。さらに胸鰭先端の渦により、胸鰭先端の回転と下面の流れが生じ、胸鰭の下面に回り込むような流れが渦を生成し、推進力に利用できると考える。

また、Fig.11のときに分岐点の上側で渦が発生せず、下側の流れが大きくなり中心方向への流れができています。

これらの現象から、彼らの羽ばたき動作は下降挙動の際に大きな推力を発生させ、推力が体中心に集まり後方に流れるような流れを作る。また、上昇挙動の際には胸鰭下面を下方向に引っ張る力を少なくしながら徐々に下面の速度を大きくし、下降挙動の準備をしていることが示唆される。

6. 結言

本稿ではオニイトマキエイの遊泳方法の解析を行うために、オニイトマキエイのモデルを作成し、3D-CFDを用いて解析を行った。解析結果により、下降挙動と上昇挙動で異なる分布が見

受けられたので、速度の変化と表面圧力の結果からその現象の違いを考察した。

今後は旋回時のフェーズや胸鰭変曲点の角度を変化させた場合の流体解析を行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、株式会社海遊館、西田氏、藤田氏、北谷氏に撮影の協力と知識の提供を頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

- (1) M, Shimomura, Science & Technology Trends, May, 2010, 9-28
- (2) “The IUCN Red List of Threatened Species”, <<http://www.iucnredlist.org/details/198921/0A>> [Accessed February 5, 2017]
- (3) Fish, F.E., Shereiber, C.M., Moored, K.W., Liu, G., Dong, H. and Bart-Smith, H. :”Hydrodynamic Performance of Aquatic Flapping: Efficiency of Underwater Flight in the Manta”, Journal of Aerospace, 2016.
- (4) Rosenberger, L.J. Pectoral fin locomotion in batoid fishes: Undulation versus oscillation. J. Exp. Biol. **2001**, 204, 397–394.
- (5) Low, K.H. :”Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots”, J. Mechanism and Machine Theory, **2009**, 44, 615–632.
- (6) Liu, G., Ren, Y., Zhu, J., Bart-Smith, H. and Dong, H. :”Thrustproducing mechanisms in ray in ray-inspired underwater vehicle propulsion”, Theoretical and Applied mechanics letters, **2015**, 5, 54–57.
- (7) Kim, J.K., Lee, J.S. and Han, J.H. :”Passive Longitudinal Stability in Ornithopter Flight”, J. guid. Control Dyn. **2012**, 35, 669–674
- (8) Fontanella, J.E., Fish, F.E., Barchi, E.I., Campbell-Malone, R., Nichols, R.H., DiNenno, N.K. and Beneski, J.T. :”Two- and three-dimensional geometries of batoids in relation to locomotor mode”, J. Exp. Mar. Biol. Ecol. **2013**, 446, 273–281.