

OpenFOAM を用いた魚類のうねり動作に関する流体解析

澄川太皓^{1†} 福江高志² 三好扶¹

¹岩手大学 ²金沢工業大学

Fluid analysis of Fish with Undulation using OpenFOAM

Hiroaki SUMIKAWA^{**} Takashi FUKUE^{**} Tasuku MIYOSHI^{*}

^{*}Iwate University ^{**}Kanazawa Institute of Technology

Abstract

The objective of this research is to explore a change of shapes and swimming motions of fishes against the living conditions from the viewpoint of fluid dynamics and the propulsion efficiency through 3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis. In order to investigate the relationship between the swimming motions of the fishes and the flow phenomena around the fish, a representation of the undulation of the fishes in the analytical model is effective for clarifying the complex flow pattern around the fishes. In this report, the undulation of the fish was calculated by using OpenFOAM 4.1. Especially, in order to represent the undulation, pimpleDyMFoam and myAngularOscillatingVelocity (Remodeling solver) were used. Through the investigation, the proposed combination can be applied to the flow analysis around the moving fishes.

Keywords: Fluid analysis, Morphological Fish, OpenFOAM, pimpleDyMFoam, Mesh deformation

1. はじめに

流体力学的特性と生物の形状や泳動作には密接な関係がある。形状の点では、カツオ、マグロ、マカジキ[硬骨魚]、大型のサメ[軟骨魚]、鯨目[哺乳類]など、異なる種に属していても生活様態が同じような動物群は、尾鰭のアスペクト比が同じであったり、尾鰭の断面図が翼の断面図と酷似していたりするなど環境に合わせた類似の形態を示す^[2-4]。また、環境によって形状を変化させた別の例として、一度陸に上がった鳥類が海に帰ってきたとき、空では揚力を生み出すために必要だった翼幅を水中では抵抗を減らすために小さくしていることがあげられる^[5]。背鰭の形状も魚類によって異なり、とげの背鰭が進行を促進する渦を生成するなどその形状によって流体力学的特性が異なる^[6]。泳動作の点では、細長い魚体全体をくねらせて泳ぐウナギ型(anguiliform)、尾鰭と体の後半部を使用して泳ぐアジ型(carangiform)、体をほとんど使わずに振動翼のような尾鰭だけを動かして泳ぐハコフグ型(ostraciiform)など泳法が大きく分けられており、種によっても泳法に差異がある^[7,8]。また泳ぐ際の筋肉の使い方も魚種によって異なる^[9]。他にも、群れや摂食行動など、生活様式にも流体力学的特性が関係していると考えられる。群れに関しては前方の魚の発生させた渦を利用して推進効率を上げるなどの報告があり、群れを形成する魚類と形成しない魚類では流体力学的特性が異なる可能性がある^[10]。また、魚類の摂食行動の際に発生する流れについて述べたもの論文もあり食べ方や食べるものなども魚類の形態に影響を及ぼしている可能性がある^[11]。一方、魚類の流体力学的特性を示す指標としては、レイノルズ数やスィミング数、抗力係数などを用いた研究もあるが^[12]、魚類の形態学的分類は今もなお現在進行形で改変されており、目・科・属レベルでの正確な分類を実施するうえで多くの指標が必要な状況である。

そこで本研究では、3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーション技術を援用し、泳法や形状、生息域や生活様式などの異なる様々な魚類の流体力学的特性を再現することで、魚類の形態学的分類に用いることの可能な新しい流体力学的評価指標の確立を目指すこととした。特に OpenFOAM4.1 を用いたメッシュモーフイングの解析事例が少ないため、本稿では OpenFOAM4.1 のメッシュモーフイングソルバを用いた、Thunnus(以後マグロと明記)のうねり動作再現と、現状の課題について報告する。

[†] E-mail address of corresponding author: hiroakisumikawa@gmail.com

2. 解析手法

2.1. マグロの数値モデル

図 1 に本稿で用いたマグロの解析モデルを示す. blender2.79^[12] と snappyHexMesh により生成した. blender 2.79 により, 体長 0.69 m, 高さ 0.33 m, 幅 0.17 m のマグロの 3 次元ポリゴンモデル (STL) を作成し, snappyHexMesh に取り込み直交格子を生成した.

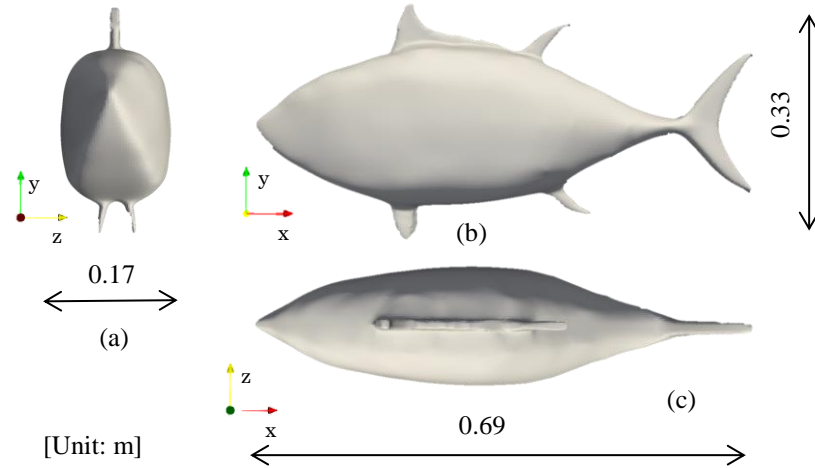


Fig. 1 Analytical model of *Thunnus* : (a) is front view, (b) is side view, and (c) is top view.

魚類の遊泳動作はいくつかの論文にて数学モデルが提案されている^[6,13]. 本稿では特に BHAGAT の提案する泳動作式^[13]を組み込んだ改造ソルバである myAngularOscilatingVelocity を参考にし, 泳ぎにおけるマグロの水平方向の変形量 z をモデル化した.

$$z = ax^2 + bx \quad (1)$$

なお x は x 軸方向の任意の点, a, b は固有値を表しており, 今回は $a=0.05, b=0.4$ としている.

2.2. 解析手法

OpenFOAM 4.1 内の pimpleDyMFoam を用いた非定常の流れ解析を行った. 支配方程式は次に示す連続の式および Navier-Stokes 方程式である.

連続の式 :

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

Navier-Stokes 方程式 :

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

なお \mathbf{u} は速度ベクトル, p は静圧, ν は動粘度, \mathbf{I} は単位テンソルである. 本稿では, 研究の初期段階として, マグロの変形による流れ場への影響を解析できるようにする技術構築を目的としたため, 乱流モデルを用いず層流解析を行った.

図 2 に解析モデルおよび境界条件を示す. snappyHexMesh で作成したモデルの格子総数は 1,169,188 とした. 内訳は六面体が 1,093,872 格子, 三角柱が 10,525 格子, くさび状四面体が 26 格子, 多面体が 64,765 格子である. 作動流体は水として, 流入流速 1.0 m/s の一様流下にマグロが遊泳しているとした. 代表寸法をマグロの体長(0.69)とし, このときの Reynolds 数は 6.9×10^5 である. したがって, 境界条件としてはモデルの入口 (図 2 青面) に流入条件として速度一定 (1.0 m/s), モデルの出口 (図 2 赤面) に自由流出条件を与えた. そのほかの上下左右の面 (図 2 緑面) は, 解析の簡易化のために滑りなし壁面境界とした. なお, マグロの表面についても, 同様に滑りなし境界とした.

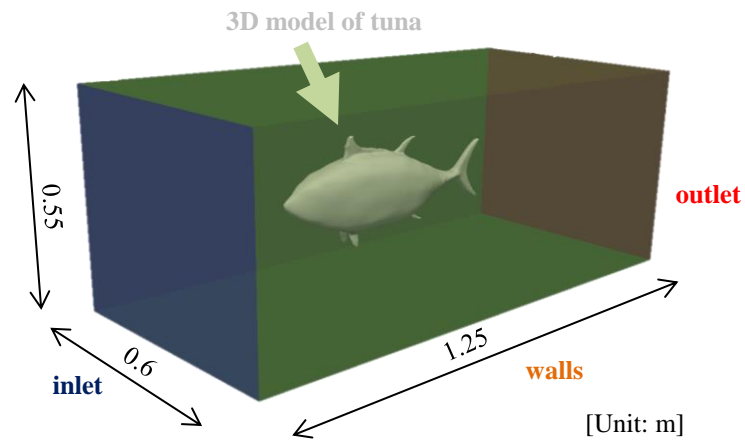
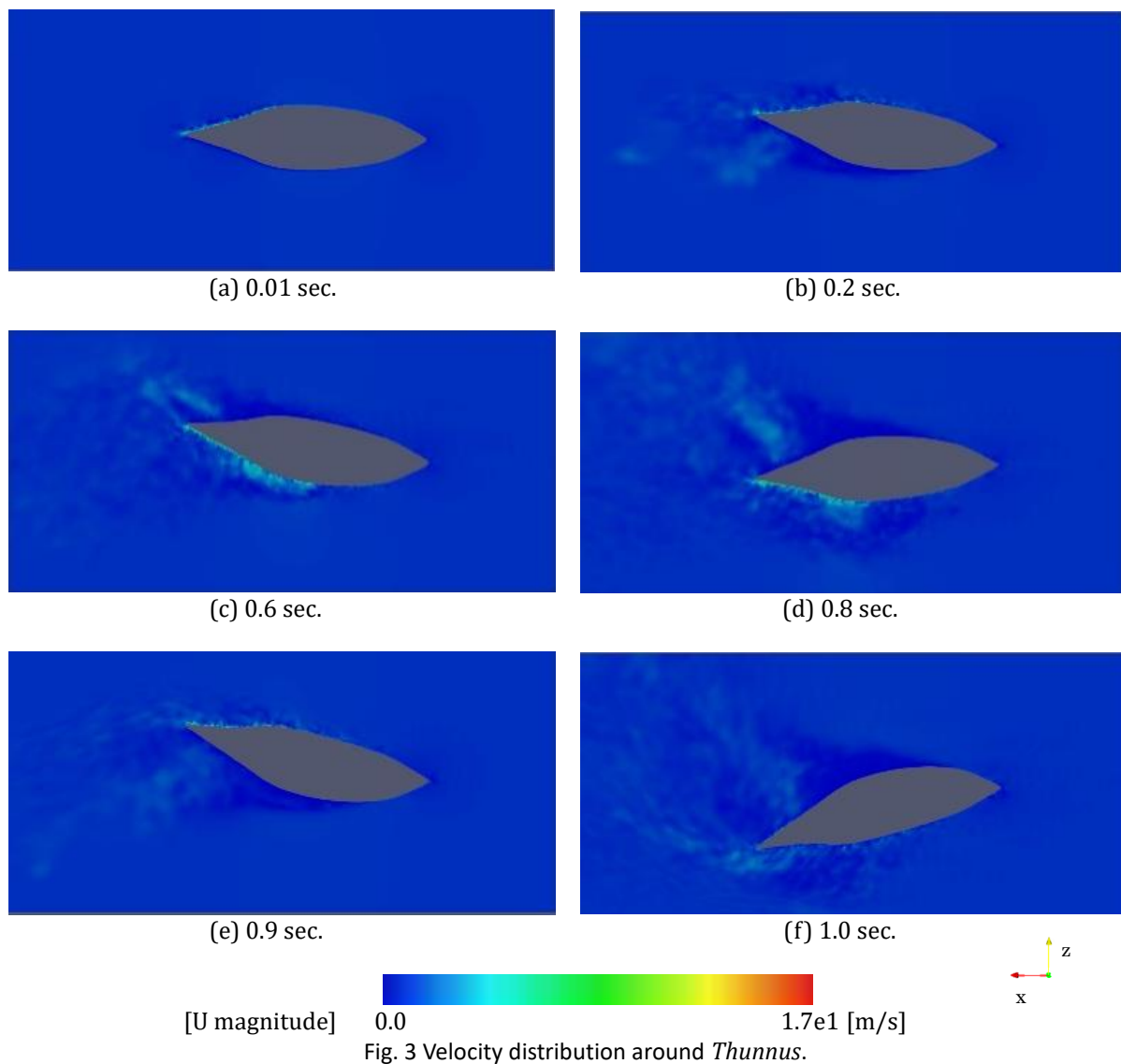


Fig. 2 Dimensions and boundary conditions of analytical model.

3. 解析結果および考察

3.1. 速度分布

図 3 に、本稿の解析で得られたマグロ周囲の速度分布の変化について示す。

Fig. 3 Velocity distribution around *Thunnus*.

なお、(a)～(f) までの秒数は、解析開始（を振り出し始めて）からの経過実時間を示している。泳動作における速度分布の時間変化を可視化することが出来た。(a) の 0.01 sec. では、泳動作の開始と同時に、尾鰭の動作方向の水を吐き出すような形になり、うねる方向の胴体の側面に、速度の高い領域が発生していることがわかる。このうねり動作の進捗とともに、流体の速度分布が変化すると同時に、うねる方向と反対側には、はく離領域が形成されていることが確認できる。一方、0.6 sec. 以降の、うねり方向が反転してからは、逆に反対側の胴体、つまりうねる方向に高い速度の領域が見受けられ、かつうねりによって吐き出された水が、泳ぐ向きと反対側に流出していつている様子が再現できた。

このような傾向は、本稿での解析条件と類似の解析を行っている BHAGAT [13] の既報とも類似のものである。一方で、BHAGAT の解析は、本稿での動作より高い周波数の運動を解析しており、その結果として本稿の解析結果の方が、胴体のうねりにより水の流速が影響を受ける範囲が拡大している傾向がある。一方で、本稿での解析結果を見ると、最大流速が 17 m/s と、付与した流速に比べ極めて高くなった。その要因は、図 3 に示したように、胴体の近傍で、格子の不連続性に伴う計算の不安定性により発生していると思われる局部的な高速流である。このことは解析精度の低下にもつながっており、かつ BHAGAT の既存報告との類似性がとれない部分がある一つの原因と考えており、今後の改善が必要と考える。

3.2. 遊泳により発生する圧力差

次に、入口側（図 2 青面）と出口側（図 2 赤面）で発生した平均圧力の差について評価したものを図 4 に示す。なお、面の圧力については次式により動圧と静圧の和を平均して算出している。なお ρ は密度、 p_1 は出口側の平均圧力、 p_2 は入り口側の平均圧力、 u_1 は出口側の平均速度、 u_2 は入り口側の平均速度である。

$$\Delta p = \left(\frac{1}{2} \rho u_1^2 + p_1 \right) - \left(\frac{1}{2} \rho u_2^2 + p_2 \right) \quad (4)$$

今回の解析では inlet よりも outlet の圧力のほうが高い結果となった。また、モデルの泳動作によって圧力差が変化した。圧力差は最大値、最小値ともに尾鰭の振幅が最大となる前後で最大となっており（図 4）、この結果は Michele らの論文内で述べられている [14]、推力の最大値は尾鰭の振幅の最大値の前後に現れるという解析結果と一致するため妥当性があると考えられる。

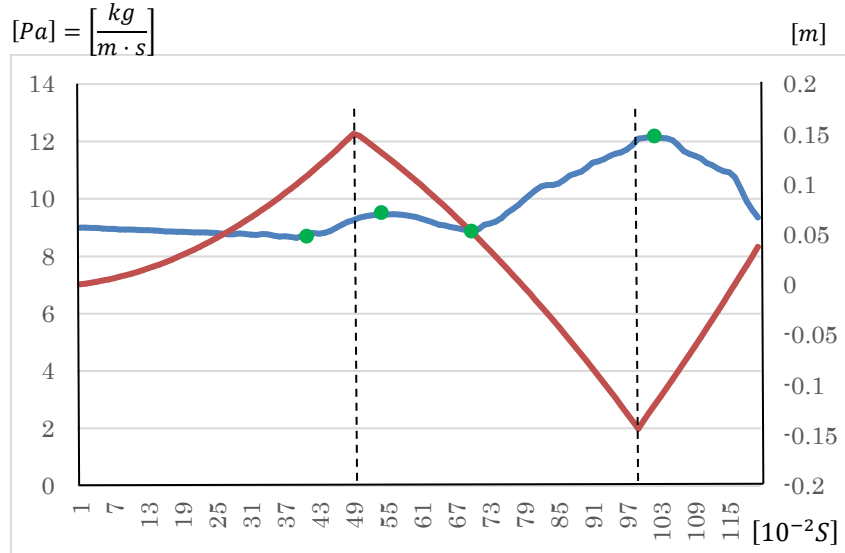


Fig. 4 Time series of differential pressure (blue line) and caudal fin amplitude (red line).
:green points means the inflection point of differential pressure.

4. 結言

本稿では OpenFOAM 内の pimpleDyMFoam を用いた魚類の泳動作再現手法の途中段階について紹介した。本稿の手法では速度分布や速度の大きさの部分において先行研究と差異が出ているため改善が必要であると考えられる。しかし、圧力差においてはモデルの変形の影響を反映した結果を見ることができたため、OpenFOAM 4.1 を用いたメッシュモーフ解析の基礎を構築することができたと考える。

参考文献

- [1] 塚本勝巳, 魚類の遊泳運動:水中への適応, 比較生理生化学, Vol.10, No. 4 (1993).
- [2] 神部勉, 動物の流体力学的運動, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 25, No. 277 (1977).
- [3] 梅谷陽二, 田口幹, 形態工学の幼芽, 計測と制御, Vol. 15, No. 10 (1976).
- [4] F. E. Fish, Secondary Evolution of Aquatic Propulsion in Higher Vwetebrates:Validation and Prospect, Integrative and Comparative Biology, Vol. 56, No. 6 (2017), pp. 1285-1297.
- [5] E. G. Drucker and G. V. Lauder, Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: experimental analysis of wake forces in sunfish, The Journal of Experimental Biology, Vol. 204 (2001), pp. 2943-2958.
- [6] Z. Gui, Z. Yang, L. Shen and H. Z. Jiang, “complex model analysis of the movements of swimming fish propelled by body and/or caudal fin”, Wave Motion, Vol. 78 (2018) pp. 83-97.
- [7] 劉浩, 遊泳・飛翔生物の運動の非定常性と波動性について, バイオメカニズム学会誌, vol. 34, No. 3 (2010).
- [8] C. S. Wardle, J. J. Videler and J. D. Altringham, Tuning in to fish swimming waves: Body form, swimming mode and muscle function, The Journal of Experimental Biology, Vol. 198 (1995), pp. 1629-1636.
- [9] C. K. Hemelrijk, D. Reid, H. Hildenbrandt and J. Pading, The increase efficiency of fish swimming in a school, Fish and Fisheries, Vol. 16 (2015), 511-521.
- [10] S. W. Day, T. E. Higham, R. Holzzman and S. V. Wassenbergh, “Morphology, Kinematics, and Dynamics:The Mechanics of Suction Feeding in Fishes, Integrative and Comparative Biology”, Vol. 55, No. 1 (2018), pp. 21-35.
- [11] M. Gazzola, M. Argentina, and L. Mahadevan,” Scaling macroscopic aquatic locomotion”, nature Physics, Vol. 10, No. 10 (2014).
- [12] 大河原浩一, はじめよう！作りながら楽しく覚える Blender, 株式会社ラトルズ.
- [13] S. BHAGAT, “Make a fish swim”, A course at Chalmers University if Technology Taught by Håkan Nilsson, on the Web., http://dx.doi.org/10.17196/OS_CFD#YEAR_2017. (accessed 2018-11-12)
- [14] M. Cyratolo, and L. Teresi, “Modeling and simulation of fish swimming with active muscles”, Journal of Theoretical Biology, Vol. 409 (2016) pp. 18-26.