

# 遊泳するクロマグロ幼魚の推進力と抗力の算出

田村優美子<sup>1\*</sup>, 高木 力<sup>2</sup>

(環境グループ)

<sup>1</sup>近畿大学博士研究員, <sup>2</sup>近畿大学大学院農学研究科

\* 0644660006t@nara.kindai.ac.jp

太平洋クロマグロ *Thunnus orientalis* は太平洋を回遊する優れた遊泳能力を有している。マグロ類の遊泳は、尾鰭と尾柄周辺を主に振動させる遊泳様式 Thunniform に分類される<sup>1</sup>。この遊泳様式と形態機能がマグロ類の遊泳能力に寄与していることが予想される。本種の遊泳能力を解き明かすことで行動生態を把握するだけでなく、生物行動的側面から養殖施設などの最適設計に重要な知見を提供することができる。魚が遊泳する時、魚体には遊泳運動によって推進力が発生するとともに流体抵抗が生じる。これまでに行ったクロマグロ遊泳時の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析では<sup>2,3</sup>、高流速域において抗力が推進力に対して卓越すると仮定して抗力係数の算出を行った<sup>4</sup>。しかし、本種の遊泳能力を解き明かすためには、推進力と抗力を正確にそれぞれ評価しなければならない。本研究では、CFD 解析により魚体表面上の要素 1 つ 1 つに作用する流体力ベクトルを推進方向と抗力方向に分離抽出することで、全体の推進力と抗力を算出した。

## 材料および方法

CFD 解析を用いてクロマグロの推進力と抗力を算出するためには、実際の魚体運動を表現する遊泳運動関数を求めなければならない。本研究では、定常流(流速 0.46–0.73 m/s)を発生する回

流水槽で定位して遊泳するクロマグロ幼魚(全長 TL 18.5 cm)の遊泳運動を高速デジタルビデオカメラにより上方から 110 Hz で記録した。画像解析により吻端から尾鰭先端までの体軸の振幅、尾鰭振動数、体軸上の進行波長を計測し、遊泳速度ごとに遊泳運動関数を求めた。CFD 解析で重要となる正確な魚体形状モデルは、非接触 3 次元レーザーデジタイザで本種幼魚(TL 22.5 cm)を計測したデータをから作製した。得られた遊泳運動関数に基づいて魚体モデルが運動するように解析条件を設定し、計算流速を遊泳速度の 0.5-2.0 倍に変化させて CFD 解析を行った。魚体表面上のすべて要素に作用する圧力と粘性応力を算出し、それぞれを推進方向と抗力方向に分離抽出することで、魚体に作用する推進力と抗力を算出した。

## 結果

遊泳運動計測の結果、遊泳速度が速くなるにつれて尾鰭振動数は増加するが、尾鰭振幅はほとんど変化しなかった。

CFD 解析結果から、推進力は時間経過に伴って周期的に変化するが、抗力は時間経過に関わらずほぼ一定の値であることが示された。遊泳速度 0.46 m/s の時、最大推進力は最小推進力の 3.9 倍だった。魚体表面に作用する流体力ベクト

ルが推進方向に傾斜していれば、その一部は推進力となる。CFD 解析で得られた推進力が最小となる時の圧力分布は、尾鰭が流れと平行に位置し、推進力を発生していないことを表した。一方、推進力が最大となる時の圧力分布は、尾鰭の Leading 面と Trailing 面で最も大きな圧力差が生じ、流体力ベクトルが推進方向に傾斜することを示した(Fig.1)。また、魚体後方側面にも推進方向へ傾斜する流体力ベクトルが作用することが明らかになった。この結果から、推進力が最大となる時、推進力は主に尾鰭で発生され、魚体後方側面もこれに寄与することが示された。

尾鰭振動 1 周期分を時間平均した推進力  $FT$  と抗力  $FD$  を算出すると、計算流速が実験時の遊泳速度と一致する時、 $FT$  と  $FD$  はほぼ同じ大きさだった。これは本解析が流体現象を精度良く表現していることを表し、その形態を持つ個体の遊泳様式が合理的であることを示している。計算速度だけを変化させて  $FT$  と  $FD$  を求めると、速度が速くなるにつれて  $FD$  と  $FT$  ともに増加することが明らかになったが、 $FD$  の増加率が  $FT$  よりも大きかった。今回の CFD 解析結果から本種遊泳時の抗力係数を算出すると、尾鰭振動を伴わないグライド時と比較して 1.8–2.0 倍になることが明らかになった。

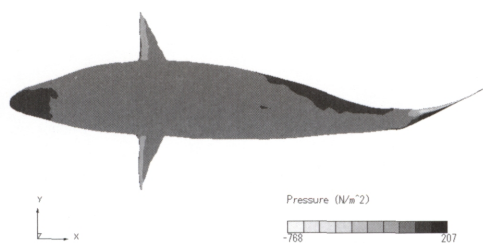


Fig. 1: The pressure distribution on swimming bluefin tuna (total length, 22.5 cm) when the thrust force is maximal at a flow speed of 0.46 m/s.

考察

尾鰭振動数と振幅、遊泳速度の関係から、遊泳速度は振幅よりも尾鰭振動数によって調整されていることが示唆された。CFD 解析結果から、計算速度が速くなるにつれて抗力だけでなく推進力も増加することが明らかになった。

ウナギなどの魚体前方から波状運動する遊泳様式 anguilliform では、遊泳運動を伴わないグライド時と比較して、遊泳運動による抗力増加が 3 倍以上になることが予想されている<sup>5</sup>。CFD 解析で得られた本種の遊泳運動による抗力増加率が 1.8–2.0 だったことから、本種の遊泳様式と形態の組み合わせは anguilliform と比較して遊泳運動による抗力増加が小さいことが示唆された。Weihs の予想<sup>5</sup>に基づくと、抗力増加率 1.8–2.0 の本種幼魚はグライドを利用した移動は尾鰭を振動させて水平に移動するよりも約 30% 運動エネルギーを節約できる可能性が示された。

## 文献

- [1] C. C. Lindsey “Form, function, and locomotory habits in fish” In: Hoar WS, Randall DJ (eds) *Fish Physiology*, vol VII. Academic Press, New York, pp. 1-100, 1978.
- [2] Y. Tamura *et al.*, “Functional morphology of swimming bluefin tuna based on CFD analysis: I. Effects of morphology on hydrodynamic characteristics” *Proceeding of The Third International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms ISABMEC* 2006.
- [3] T. Takagi *et al.*, “Functional morphology of swimming bluefin tuna based on CFD analysis: II. Efficiency of glide and

- tail-beat swimming modes” *Proceeding of The Third International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms ISABMEC* 2006.
- [4] Nishio and Nakamura, “A study on the propulsive performance of fish-like motion using waving wing model” *J. Soc. Naval Architects of Japan* vol. 191, pp. 17-24, 2002 (in Japanese).
- [5] D. Weihs, “Mechanically Efficient Swimming Techniques for Fish with Negative Buoyancy” *J. Mar. Res.* vol. 31, pp. 194-209, 1973.