

クロマグロの遊泳能力解析に基づく魚ロボットの開発

久貝 克弥* 三輪 祐希**

Development of Fish type Robot

based on the Analysis of Swimming Motion of Blue Fin Tuna

Katsuya KUGAI* Yuuki MIWA **

The swimming motion of Tuna type fishes has excellent ability for its speed and efficiency. And some studies have been reported about the most efficient swimming motion by using numerical analysis on two dimensional oscillated wing theory. And several fish type robots are developed based on these studies, but almost all robots have spring held tail fin. Because the tail of tuna type fishes is very smart, and very difficult to implement the tail fin angle actuate mechanism. So, these fish type robots cannot confirm theoretical result by experimental way.

So we designed and developed smart tail fin angle actuating mechanism which can swim maximum 2.0m/s as reported in previous reports^{7) 8) 9) 10)}. And made some experiments about the relationship between the swimming motion scheme and the swimming speed. So, this paper studies about the difference of the propulsive force between tuna type tail fin and rectangular type tail fin by experimental and numerical way.

Keyword : Fin, Lift, Drag, Robot, Swim, Propulsive force

1. 緒言

生物が持つ優れた構造や機能を模倣し、技術開発やモノづくりに生かすバイオミメティクスの分野に対する注目が近年高まっている。本研究では水中を高速で泳ぐことができるマグロに着目し、その形状や動作を調べるとともに、効率の良い遊泳動作について検討し、それらの動作を再現できる魚型ロボットの開発を行う。

マグロやイルカの Calangiform 型推進に関しては、東が 2 点ヒンジ機構にモデル化して解析している¹⁾。Lighthill は 2 次元振動翼理論を 2 点ヒンジ機構でモデル化される尾ヒレ動作の解析に適用し、より正確な解析結果が得られるようになった。また東工大の中島らは尾ヒレを振る反動で頭が振れることも考慮に入れた推進体全体の動力学特性を明らかにしている^{2) 3) 4)}。

しかし、中島らが製作したイルカ型ロボットに代表

されるように、マグロやイルカは胴体の後尾が極端に細い形状をしており、その中に高いトルクを発生させる駆動メカニズムを組み込むことが困難であるため、尾ヒレと胴体の繋ぎがバネになっていることが多く、現実的にはバネの弾性最適値を求める方向での研究が主流である^{5) 6)}。

そこで本研究では尾ひれと胴体との繋ぎを能動的に制御する機構を開発することで先行研究の評価と確認を行い、効率の良い尾ヒレの動かし方を実験的に模索することを目的としている。これまでに尾ヒレの推進力推定⁷⁾およびマグロ胴体の抵抗力測定結果⁸⁾に基づき、目標遊泳速度を 2m/s とした魚ロボットの推進機構を設計・製作した⁹⁾。また、その推進機構を用いていくつかの遊泳動作形態を実行し、推進力の違いについて比較した¹⁰⁾。本報ではクロマグロの尾ヒレ形状の特性を知るべく、同一翼長、同一翼面積、同一翼型の矩形尾ヒレとの違いについて実験および数値解析により検討したので、その結果を述べる。

2. 尾ヒレ形状の違いによる推進力比較

2.1 尾ヒレ駆動機構

先に報告した¹⁰⁾ように、図 1 に示す尾の揺動と尾ヒレ角

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

**近畿大学工業高等専門学校 専攻科

生産システム工学専攻 機械系

度を独立して制御できる機構を開発した。尾の揺動はモータの定速回転をスコッチヨーク機能により往復回転に変換するもので、理想的な正弦波で揺動できる。尾ヒレの角度は平行ブロックの隙間を制御することにより、おが水流に押されて平行ブロックの隙間がなくなる様に傾くことで、隙間を角度に変換している。

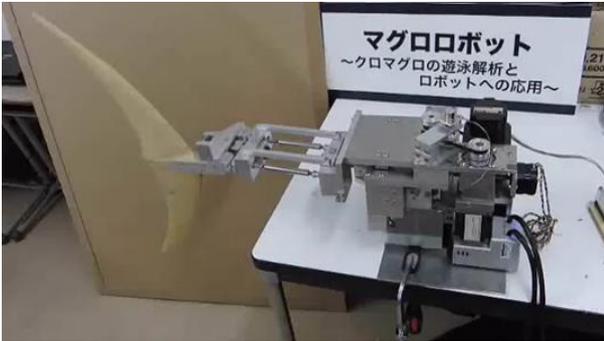


図1 尾ヒレ駆動機構の概観

2.2 船型ロボット

図1の機構はまだ防水構造の開発が終わっていないので、それまでに、本来の目的である遊泳動作の違いによる推進力の違いを調べるため、推進機構をフロートの上に設置し、尾ヒレのみを水中に沈めて動作させ推進する船型ロボットを製作した。その概要を図2に示す。

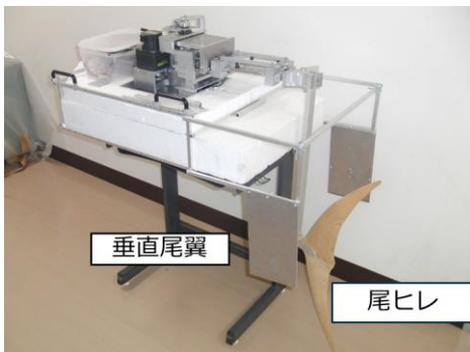


図2 船型ロボットの概観

発泡スチロールで船の胴体を製作し、駆動機構から下に伸びる棒材で尾ヒレを固定した。また、本来のマグロロボットであれば、胴体前半部分が尾ヒレ動作の反動を抑えてくれるのだが、船の場合は尾ヒレ動作の反動を受け止めることができないと思われるため、水中に垂直尾翼を2枚装着した。

2.3 尾ヒレ形状の違いによる推進力比較

この船型ロボットでは、本来のマグロロボットに対し、水から受ける推進時の抵抗力が異なるため、定量的な推進力比較はできない。しかし船型ロボットの遊泳速度を測定することで、推進力の違いを相対的に比較することはできると考え、プールを利用しての遊泳実験を行った。

遊泳速度はプールサイドに設置したメジャーと遊泳中

の船型ロボットとを同時にビデオ撮影することで、単位時間当たりの移動距離から求めた。実験の様子を図3に示す。

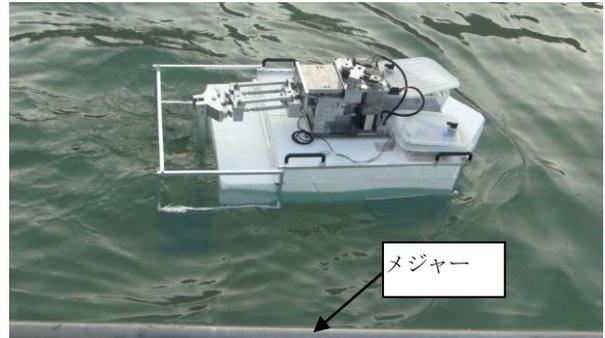


図3 船型ロボットによる実験の様子

このような方法で、推進用の尾ヒレを図4に示すクロマグロ実寸サイズの尾ヒレ（以降マグロ尾ヒレと呼ぶ）と、図5に示す同一翼長、同一翼面積、同一翼型の矩形形状の尾ヒレ（以降矩形尾ヒレと呼ぶ）とで遊泳速度の違いを調べた。その結果を図6に示す。

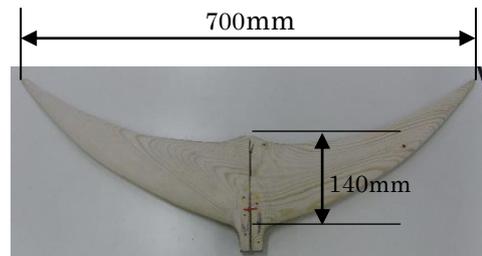


図4 マグロ尾ヒレ

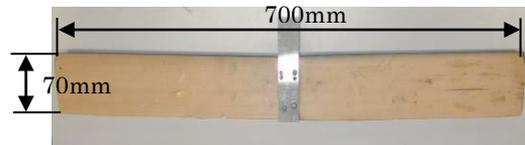


図5 矩形尾ヒレ

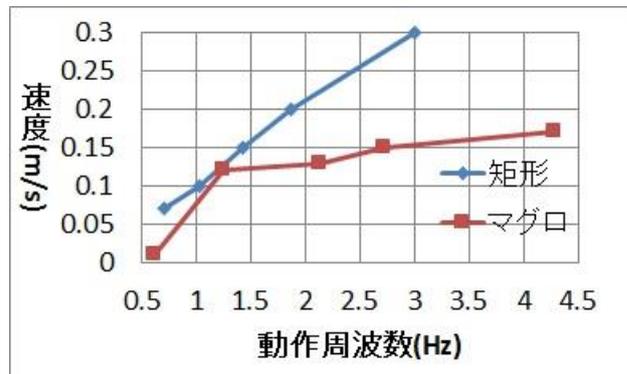


図6 マグロ尾ヒレと矩形尾ヒレでの遊泳速度の違い

これより、我々の予想に反しマグロ尾ヒレよりも矩形尾ヒレのほうが速い遊泳速度になるという結果が得られた。マグロの尾ヒレは長い生物の進化過程において、高速・高効率遊泳に適した形状となっているはずであり、単純な矩

形形状の尾ヒレよりも推進能力が優れているはずだと考えていたが結果は逆となった。

3. 遊泳速度の違いが生じる原因の調査

3.1 揚力・抗力の違い

その原因を調べるため、まずマグロ尾ヒレと矩形尾ヒレに発生する揚力・抗力の比較を行った。実験装置は図7に示すように、水泳用のプールを利用してプールサイドを台車がモータにより等速で移動し、平行リンク構造の測定部を介して尾ヒレを水中に固定し、進行方向に対する迎え角をさまざまに設定できる。尾ヒレに発生する揚力と抗力は平行リンク機構を介して2つのフォースゲージにより独立して測定できる。

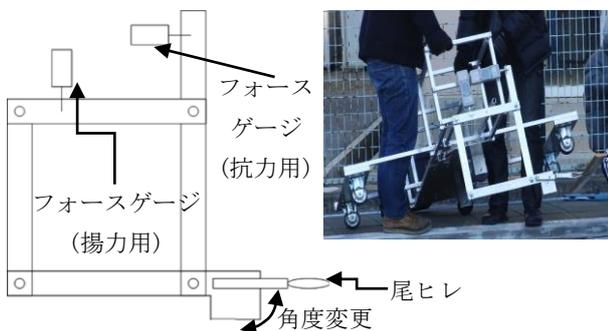


図7 尾ヒレの揚力・抗力測定装置

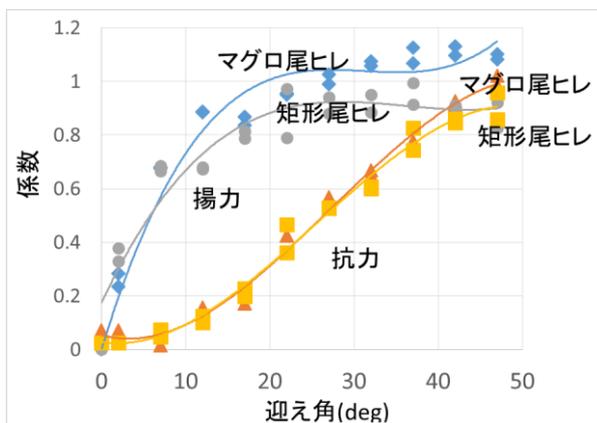


図8 揚力・抗力測定結果

測定結果を図8に示す。これより揚力に関しては若干マグロ尾ヒレのほうが高く、抗力に関しては両者に差がないことが分かった。つまり、図8の結果からは図6に示されているマグロ尾ヒレと矩形尾ヒレの推進速度の違いを説明できないことが分かった。

3.2 後退角の影響

そこで、マグロ尾ヒレに後退角が付いていることが推進速度の違いを生んでいると推定し、後退角の有無での推進力の違いを数値計算した。図9に示す振幅80mm、周波数2Hzのcos波形で尾ヒレ揺動動作を行った場合、先に我々が提唱した $\theta_f / \theta_w = 0.85$ (θ_f :尾ヒレ角度, θ_w :

水の入力角度)の制御則における理論上の尾ヒレ角度動作は図10のようになる。

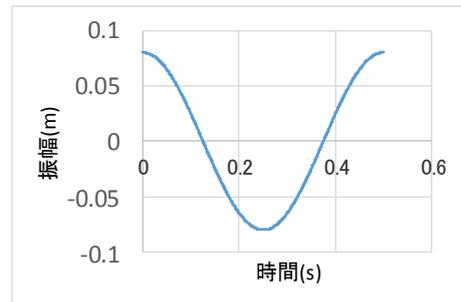


図9 数値計算における尾ヒレ揺動動作

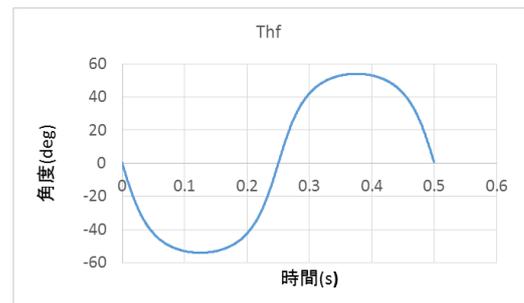


図10 $\theta_f / \theta_w = 0.85$ における尾ヒレ角度 θ_f

このとき、後退角を想定して尾ヒレ角度動作中心から尾ヒレ前縁までの距離を変化させた場合において、実際の流速 V 、流入角度 θ_w 、 θ_f / θ_w を数値計算により求めた。その結果を図11から図13に示す。ここで、遊泳速度は0.5m/s、尾ヒレの揺動は振幅0.08mで周波数2Hzとした。

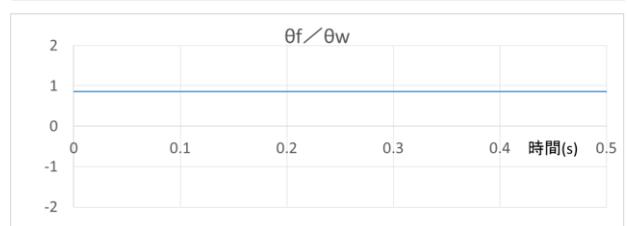
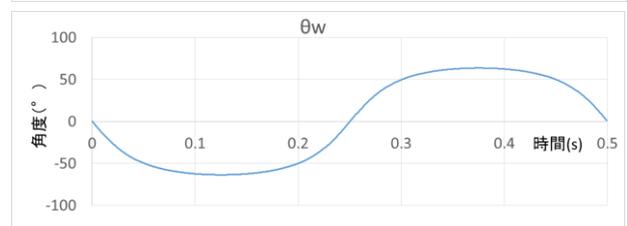
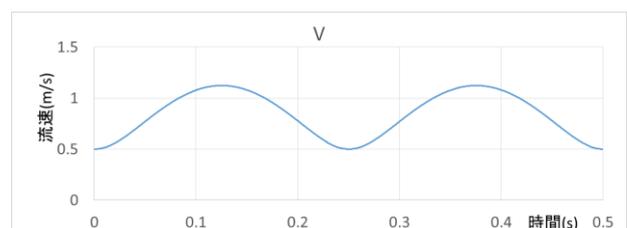


図11 尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離0mm

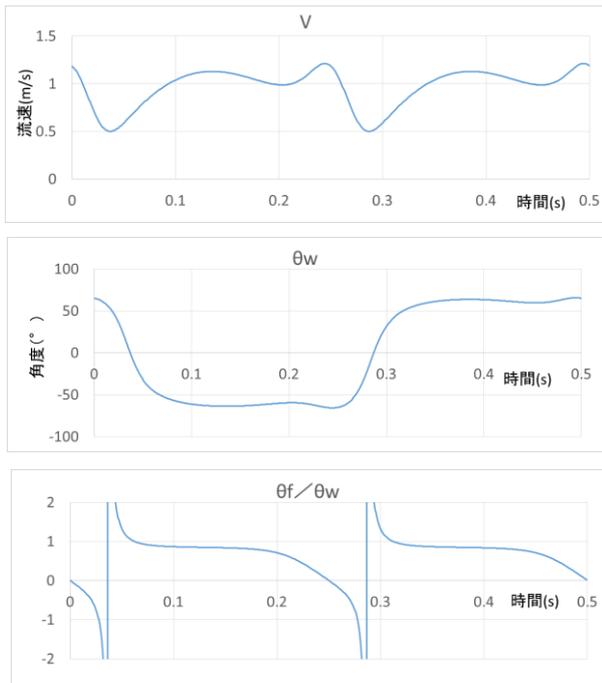


図 1 2 尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離 50mm

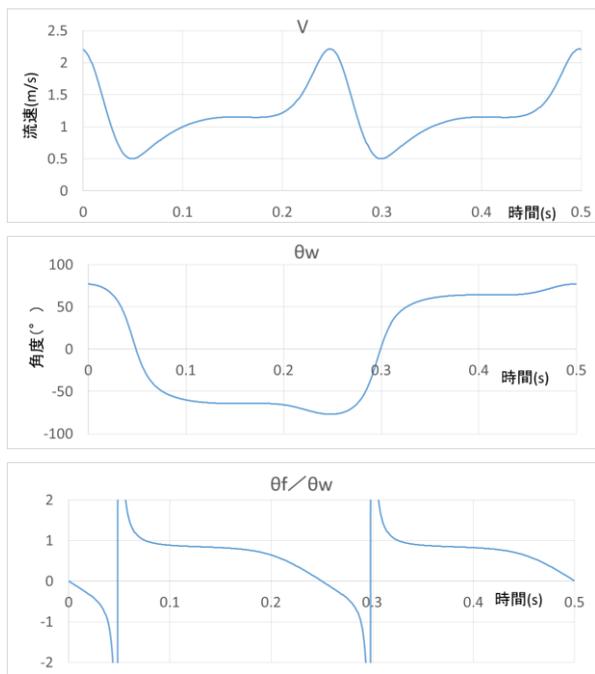


図 1 3 尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離 100mm

後退角により尾ヒレ前縁が尾ヒレ角度動作中心から離れるにつれ、尾ヒレ前縁に対する水の入力角度が変わっていき、図 1 0 に示すように尾ヒレ角度 θf を尾ヒレ角度動作中心における水の入力角度から算出する制御方法では、後退角を持った前縁においては水の入力角度に対して適正な尾ヒレ角度にならないことがわかる。言い換えると、尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離が離れるほど $\theta f / \theta w$ が最適値である 0.85 からずれる時間が長くなってしまふ。

その結果、尾ヒレによる推進力は表 1 のように尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離が離れるにつれ減少することが分かった。

表 1 尾ヒレ角度動作中心から前縁までの距離と推進力 (遊泳速度 0.5m/s, 尾ヒレの揺動 0.08m 2Hz)

前縁までの距離(mm)	推進力(N/m ²)
0	128
50	112
100	60

4. 結言

これまで、尾ヒレ角度動作中心における水の入力角度を基準に推進力が最大となる尾ヒレ角度の最適値を数値計算で推定し、それに基づいて尾ヒレ駆動機構を制御してきた。この考え方は先行研究²⁾でも同様であった。しかし、その方法では後退角を持つマグロ尾ヒレにとって、前縁が尾ヒレ角度動作中心から離れるにつれ、水の入力角度に対する尾ヒレの角度が最適値にはならなくなり、推進力が減少することが分かった。

今後はマグロ尾ヒレの後退角を考慮した尾ヒレ角度制御方法の検討が必要である。またこれと平行して、先行研究で提案されているフェザリングパラメータによる尾ヒレ角度の制御方法²⁾における後退角の影響や、尾ヒレをバネで保持した際の後退角の影響についても考察して行きたい。

参考文献

- 1) A. Azuma : The Biokinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag Tokyo,
- 2) 中島ら：2 関節イルカ型水中推進機構の動力学解析 (第 1 報, 解析モデルおよび理論解析法) , 日本機械学会論文集 (B 編) 66 巻 643 号, 2000 年 3 月
- 3) 中島ら：2 関節イルカ型水中推進機構の動力学解析 (第 2 報, 基本形状に対する最適運動) , 日本機械学会論文集 (B 編) 66 巻 643 号, 2000 年 3 月
- 4) 中島ら：2 関節イルカ型水中推進機構の動力学解析 (第 5 報, 第 2 関節がばね支持のモデル解析) , 日本機械学会論文集 (B 編) 66 巻 643 号, 2000 年 3 月
- 5) 平田宏一, 実験用魚ロボットの推進性能 日本設計工学会 2000 年度春期研究発表講演会 (2002)
- 6) 中島 求, 魚・イルカの遊泳運動の面白さ バイオメカニズム学会誌 Vol. 28, No1 (2004)
- 7) 久貝ら：クロマグロの遊泳能力解析, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要第 2 号, 2009 年 1 月
- 8) 久貝ら：クロマグロの遊泳能力解析に基づく魚ロボットの開発, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要第 3 号, 2010 年 1 月
- 9) 久貝ら：クロマグロの遊泳能力解析に基づく魚ロボットの開発, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要第 5 号, 2012 年 1 月
- 10) 久貝ら：クロマグロの遊泳能力の解析とロボットへの応用 (第 2 報), 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 Vol. 6, p93-94, 2008 年 8 月
- 11) 川内啓二, 揚力と抗力 [特集] 乗り物の流体力学 ながれ 21 (2002)
- 12) 神部勉：動物の運動力学の流体力学, 日本物理学学会誌第 33 巻第 6 号, 1978 年
- 13) 理科年表：大気圧下での水の密度, 粘性係数, 同粘性係数, 国立天文台編, 丸善 1922 年
- 14) 加藤宏編：ポイントを学ぶ流れの力学, 丸善株式会社, 1989 年発行
- 15) 河内啓二：[特集] 乗り物の流体力学 揚力と抗力, ながれ 21 (2002) 323-329, 2002 年
- 16) 岡野ら：バイオメレトリーによる養殖クロマグロの遊泳行動に関する研究, 近畿大学農学部紀要第 39 号 78~82 (2006) , 2006 年
- 17) 前田弘：翼のはなし, 養賢堂, 2000 年 06 月
- 18) 久貝ら：クロマグロの遊泳能力解析と魚ロボットへの応用, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要第 8 号, 2014 年 3 月