

クロマグロの遊泳解析に基づく魚型ロボットの開発

-実験による理論検証-

久貝克弥* 高橋明太郎** 松本勇樹**

Development of Fish type Robot based on the Analysis of Swimming Motion of Bluefin Tuna -Experimental Discussion-

Katsuya KUGAI* Meitarou TAKAHASHI** Yuuki MATSUMOTO

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 2-joint bending mechanism model. And several fish type robots are developed based on these studies. But almost all robots have spring held caudal fin, so they cannot confirm theoretical result by experimental way. Therefore, we developed a fish type robot which has caudal fin angle actuating mechanism and tail oscillating mechanism. We made some experiments about the relationship between the swimming motion scheme and the swimming speed.

Keyword Caudal fin, Lift and Drag Force, Fish type robot, Propulsive force

1. 緒言

ヒレによる推進は優れた特徴を持っている。スクリューのように海藻を巻き付けてしまったり、海底の沈殿物を巻き上げてしまい視界を悪くすることがない。しかしヒレによる推進はスクリューに比べて推進力や推進効率の面で劣ると思われる。そこで我々はクロマグロの優れた遊泳能力に着目した。クロマグロは最高 80km/h の高速で泳ぎ、太平洋を回遊できる効率を有している^[1]。

マグロやイルカの Calangiform 型の推進は東により 2 点ヒンジ機構によるモデル化が提案されている^[2]。Light Hill はこの機構に 2 次元振動翼理論を当てはめ、マグロの遊泳能力の正確な解析を試みている。中島と小野はスレンダボディ理論を 2 次元新動翼理論に組み合わせる解析方法を提案しており^{[3][4]}、フェザリングパラメータ $\theta=0.8$ において最も効率が良い遊泳動作を提唱している。

これらの研究では尾ヒレ角度の動作は sin 波として扱われているが、我々がクロマグロの遊泳をビデオ解析した結果では尾ヒレの角度動作は atan 波に近い結果となっており^[5]、sin 波に限定しない解析方法が必要と考えた。そこで我々はクロマグロの尾ひれのアスペクト比が大きいことから非定常性の効果が出にくいものと判断し、定常流における尾ひれの揚力と抗力を用いて、単純な幾何学計算により効率の良い推進が可能な尾ヒレの動作波形について検討した。その結果、進行方向に対する水の流入角度 θ_w に対して尾ヒレ角度 θ_f が $\theta_f/\theta_w=0.85$ となるように動作させることで最大推進効率が得られるという解析結果を得た^[6]。

これらの解析結果を実験的に確認するため、尾の揺動動作と尾ヒレ角度の動作をそれぞれ独立して能動的に制御できるマグロ型ロボットを開発した。このロボットは 2 点ヒンジ機構における任意の動作を生成できる。しかし 2 つのモータを位相遅れなく完全に同期させ、しかも高い周波数で往復運動する際の振幅減少を生じないように正確に制御することは容易ではない。本報では正確な制御を実現できるシステムの開発について述べるとともに、開発した

*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
生産システム専攻（機械系）

システムを用いて遊泳動作の違いによる遊泳速度の変化について実験的に検証した。

2. 方法

2. 1 マグロ型ロボットの開発

開発したマグロ型ロボットの概観を Fig.1 に示す。尾を揺動させるためにスコッチ・ヨーク機構を用いてモータの回転運動を往復運動に機械的に変換した。この機構により尾は正確な \sin 波で往復運動をすることができる。往復運動の振幅は機構のセッティングにより固定幅となるが、モータの回転速度により動作周波数を任意に設定することができる。ここでは全長 1.2m のクロマグロの 1/2 スケールを想定し、尾の揺動振幅を $\pm 0.04\text{m}$ とした。尾ヒレ角度の制御は並行リンク機構を用いてモータ角度を尾ヒレ角度に伝達するようにした。

当初このメカニズムは、スコッチ・ヨーク機構の支点動作角度をエンコーダにより検出することで、尾の揺動速度 V_y をシングルボードコンピュータに伝達し、尾ヒレの動作角度指令 θ_f を演算する方式としていた。制御システムの動作フローを Fig.2 に示す。

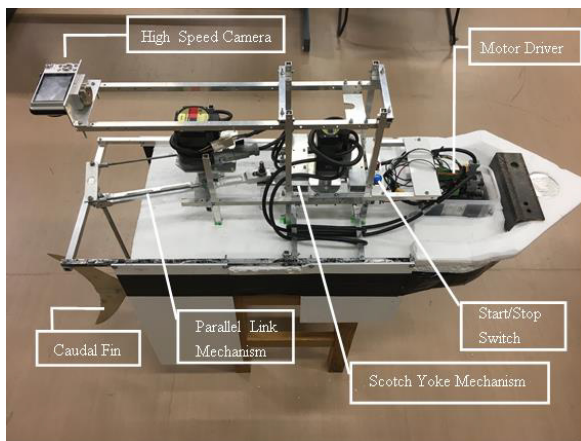


Fig.1 Overview of Fish Type Robot

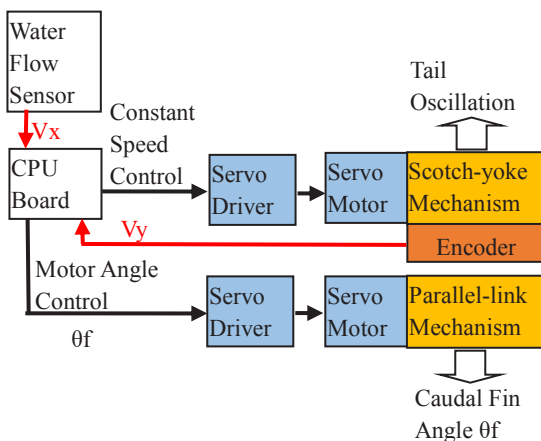


Fig.2 Original Controlling System

しかしながらこのシステムでは、生成しようとする動作に対して尾の揺動周波数が上がるにつれ、尾ヒレ角度動作の位相遅れと角度減少が著しくなるという致命的な欠陥が生じた。その原因は使用しているサーボモータの周波数特性の悪さ、およびセンサの情報をコンピュータで処理する時間の遅れであることが分かった。そこで、これらの問題を解決するために、まずモータには制御遅れが発生しないステッピングモータを採用した。更にステッピングモータのドライバには動作パターンを内部設定できるものを採用し、予め設定された動作を各々のモータに実行させるようにし、尾と尾ヒレのモータを同時起動させることで、あたかも同期をとっているような動きを実現させた。これらの対策により、動作振幅の減少や位相遅れの生じない設定通りの動作を実現することができた。このシステムの概要を Fig.3 に示す。

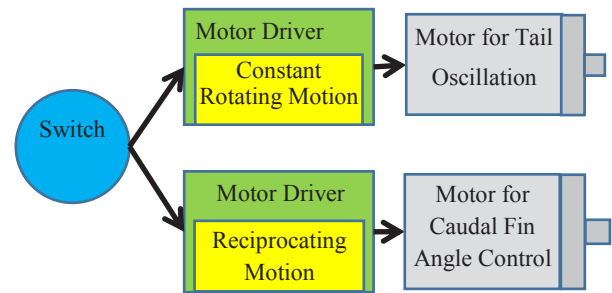


Fig.3 Synchronized Motion Control of Tail and Caudal Fin

次に使用した尾ヒレについて説明する。体長 1.2m のクロマグロの尾ヒレ形状を測定したデータより、1/2 スケールにおいて同一翼長、同一翼面積を持つ矩形尾ヒレを製作した。断面形状も測定データより比率を合わせて作成した。尾ヒレの平面形状を Fig.4 に、使用した断面形状（実測値）を Fig.5 に示す。

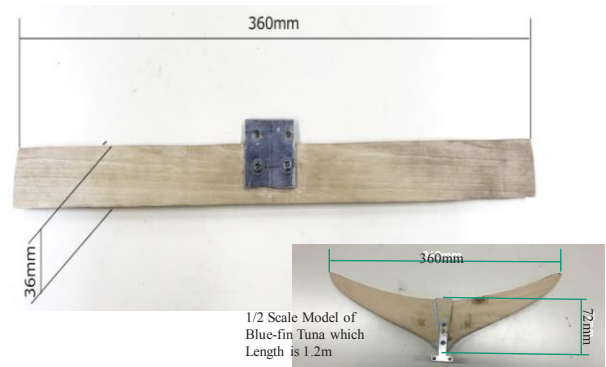


Fig.4 Appearance and Size of Caudal Fin

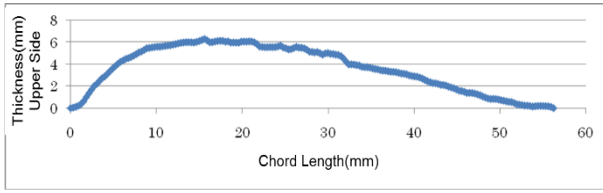


Fig.5 Cross-sectional Shape of the Caudal Fin of Blue-fin Tuna

尾ヒレを矩形で製作した理由は、これまでの解析的な研究が全て2次元理論をベースとしているため、正しく実験結果との比較ができるようにするためである。製作した尾ヒレの定常流における揚力と抗力を測定した。流速 1m/s での結果を Fig.6 に示す。

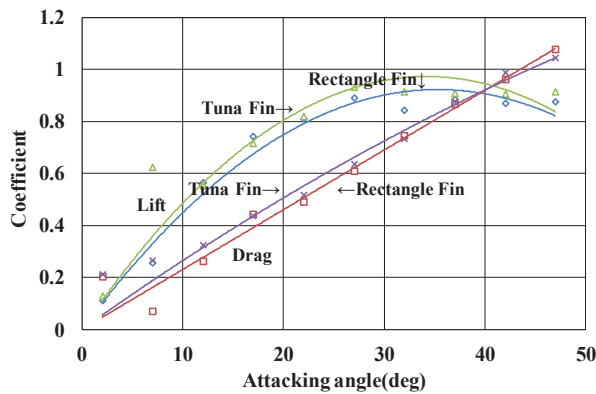


Fig.6 Lift and Drag Force Coefficient of Tuna and Rectangular Caudal Fin. (Flow speed 1m/s)

現状では駆動機構及び制御システム共に防水処理ができておらず、そのために Fig.1 に示したように駆動機構及び制御システムを船型のフロートの上に乘せ、尾ヒレのみを水中に配置する形態でマグロ型ロボットを製作している。マグロ型ロボットの全長は実測したクロマグロの 1/2 スケールである 0.6m としている。

マグロ型ロボットは水泳プール側面際を遊泳させ、プールサイドに設置したメジャーをビデオ撮影することで、遊泳速度の測定をしている。その様子を Fig.7 に示す。

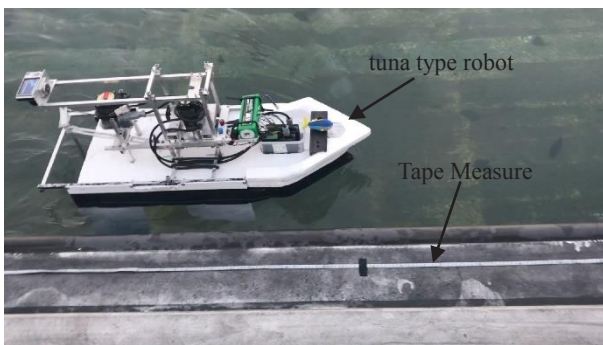


Fig.7 Measuring the Speed of Tuna Type Robot

また、尾ヒレの上方に固定された高速度カメラを用いて、尾と尾ヒレの動作の同期を確認している。

2.2 フェザリングパラメータによる尾ヒレ動作規範

中島と小野は尾ヒレの動作を Fig.8 のように規定した^[3]。ここで、

U : 遊泳速度

ω : 尾の揺動周波数

h : 尾の揺動振幅

α : 尾ヒレのピッチング動作幅

b : 尾ヒレのピッチング動作軸位置

$2a$: 尾ヒレ翼弦長

である。

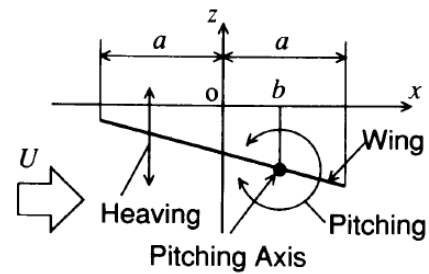


Fig.8 Determination of Caudal Fin Motion

動作は揺動 (Heaving) 動作とピッチング動作の組み合わせとなっている。揺動動作は水の流入速度 U に垂直な方向 Z への平行運動として定義されており、ピッチング動作は水の流入方向 x における b 位置を支点とする回転運動として定義されている。この動作は(1)式によって表すことができる。

$$z = h \cos \omega t + \alpha(x - b) \sin \omega t \quad (1)$$

この式において揺動動作とピッチング動作の位相差は 90 度で固定となっているように見えるが、 b の位置を変えることによって位相差を変更することができる。従って(1)式は任意の尾ヒレ動作を表現できることになる。

中島と小野は揺動幅とピッチング幅の比を表す無次元数としてフェザリングパラメータ θ を以下の式で定義した。

$$\theta = \frac{U\alpha}{\omega h} \quad (2)$$

彼らの報告では $\theta=0.8$ において推進効率が最もよくなるとされている。

2. 3 固定翼理論による尾ヒレ動作規範

マグロ型遊泳(Calangiform)において尾ヒレが往復運動をしながら一定速度で前進することを考える。この軌道はsin波で表される。このsin波の傾き角度は尾ヒレに入ってくる水の流入角度 θ_w となる。尾ヒレに揚力を発生させてそれを推進力にするには、尾ヒレの動作角度 θ_f は θ_w よりも絶対値で小さくなくてはならない。そこで我々は尾ヒレの動作規範として $\theta_f/\theta_w = \text{Const.} (<1)$ という考え方を提案した⁶⁾。推進力 F_x が揚力 L を利用してどのように生成されるかをFig.9に示す。

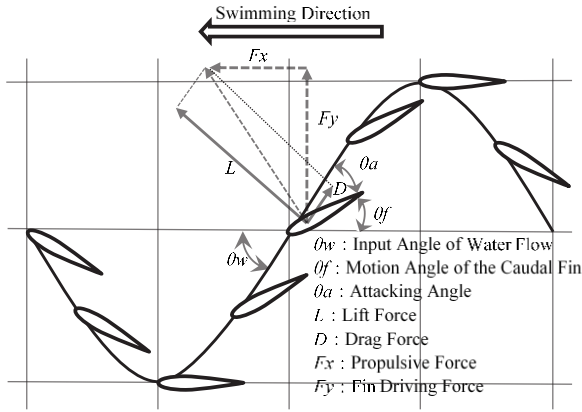


Fig.9 Caudal fin angle toward water flow to generate propulsive force

各パラメータの幾何学的関係は以下の式で表すことができる。

$$\theta_w = \text{atan2}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (3)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4)$$

$$\theta_a = \theta_w - \theta_f \quad (5)$$

$$D = f_d(V, \theta_a) \quad (6)$$

$$L = f_l(V, \theta_a) \quad (7)$$

$$F_x = -L \sin \theta_w + D \cos \theta_w \quad (8)$$

$$F_y = L \cos \theta_w + D \sin \theta_w \quad (9)$$

ここで V_x は遊泳速度、 V_y は尾の揺動速度である。また抗力 f_d と揚力 f_l の2つの関数はFig.6の測定結果を基に、水の流入速度 V を勘案したものとなっている。

我々は θ_f/θ_w の値を種々変化させ、(3)から(9)式の演算を行い、 F_x と F_y の平均値を求めた。Fig.10は $V_x=2.0\text{m/s}$ 、尾の揺動周波数5Hzにおける演算結果である。このケースにおいては、 $\theta_f/\theta_w=0.85$ にて最も推進効率が低い結果となった。

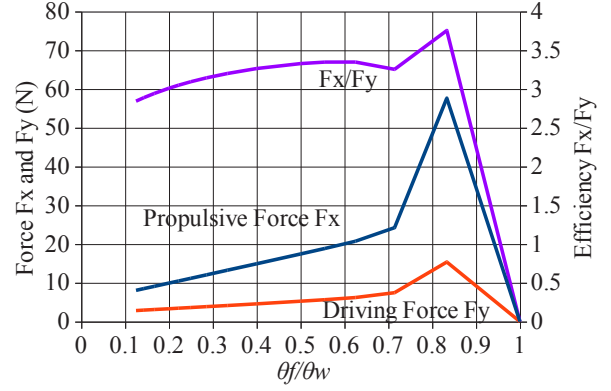


Fig.10 Propulsive Efficiency toward θ_f/θ_w

3. 結果

3. 1 尾ヒレ用モータの動作パターン

我々は尾ヒレ動作パターンのデータを尾の揺動周波数2Hzと5Hzの場合について以下の種類分準備した。

1) フェザリングパラメータによる尾ヒレ動作規範

$$\theta = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 \quad (10)$$

2) 固定翼理論による尾ヒレ動作規範

$$\theta_f/\theta_w = 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.9 \quad (11)$$

これらのパターンデータは角度と速度のデータから成り立つ。例としてFig.11に $\theta=0.4$ および 0.8 のデータ、Fig.12に $\theta_f/\theta_w=0.45$ および 0.85 のデータを示す。どちらも尾の揺動周波数を5Hzとして求めたものである。

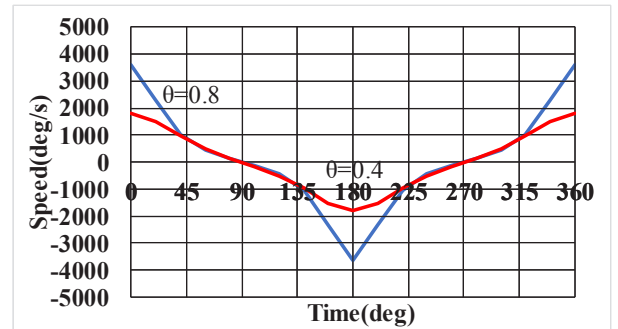
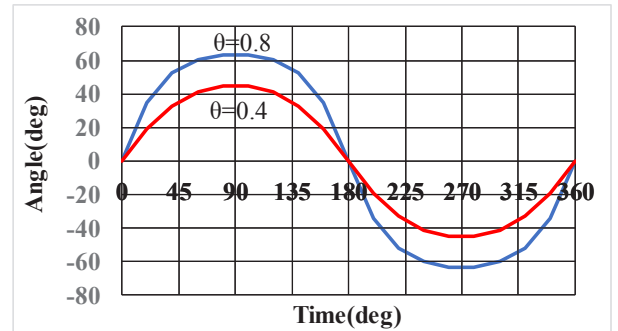


Fig.11 Caudal fin angle and speed pattern with $\theta=0.4$ & 0.8 in 5Hz tail oscillation

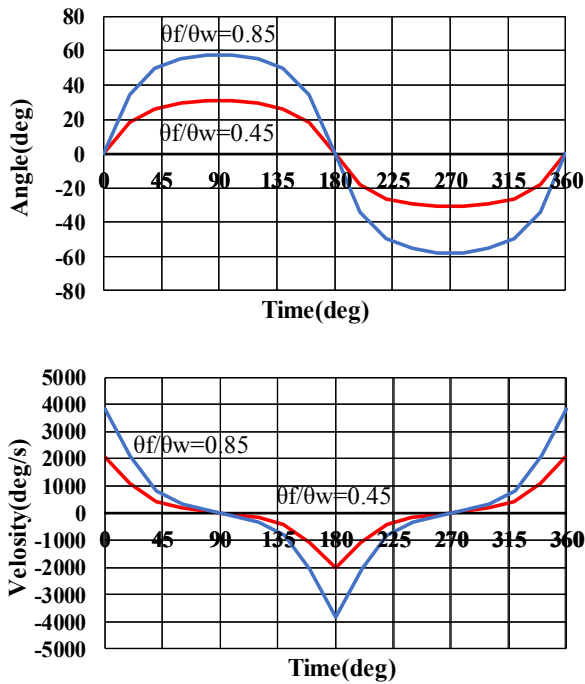


Fig.11 Caudal fin angle and speed pattern with $\theta f/\theta w = 0.45 \& 0.85$ in 5Hz tail oscillation

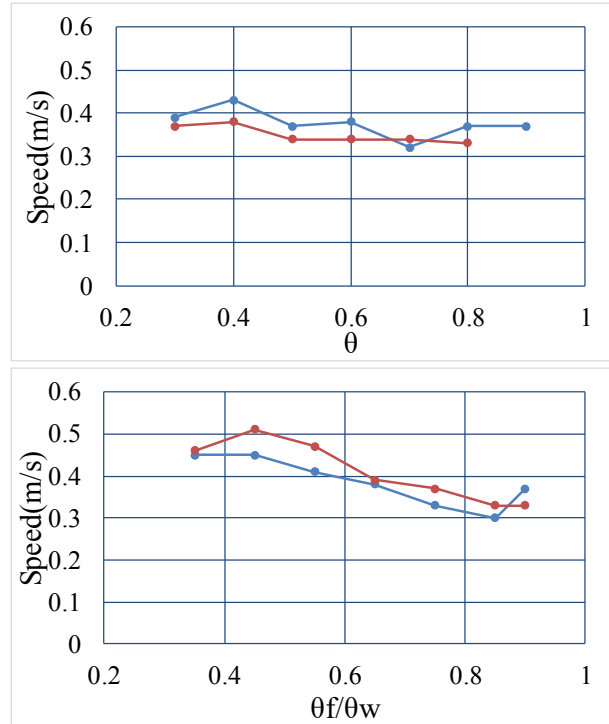


Fig.13 Relationship between θ or $\theta f/\theta w$ Value and Swimming Speed at 5Hz Tail Oscillation.

3. 2 遊泳速度

上記の動作データを尾ヒレ駆動用モータのドライバにインストールし、Fig.7 に示した方法で遊泳速度を測定した。

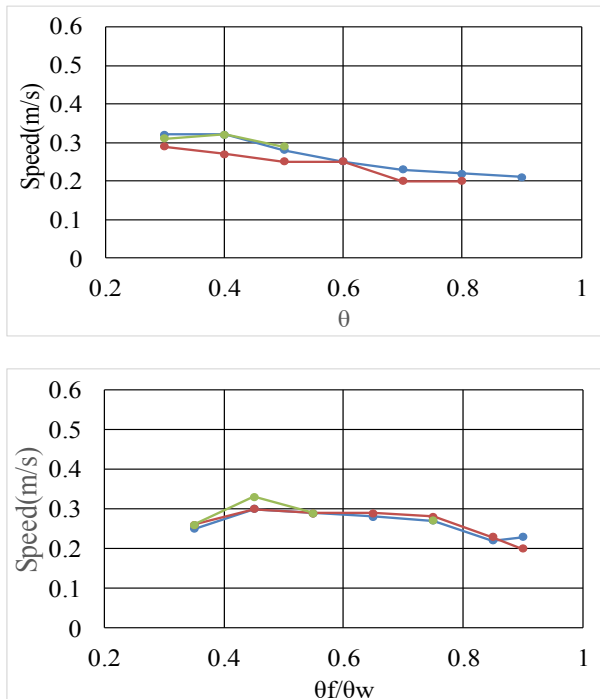


Fig.12 Relationship between θ or $\theta f/\theta w$ Value and Swimming Speed at 2Hz Tail Oscillation

Fig.12 は尾の揺動周波数が 2Hz のときの測定結果で、フェザリングパラメータ θ と遊泳速度との関係、 $\theta f/\theta w$ と遊泳速度との関係を示す。各々 2 本の線がプロットされているのは、同一条件で 2 度測定したためである。Fig.13 は同様に尾の揺動周波数が 5Hz のときのものである。

4. 考察

4. 1 解析結果と実験結果との比較

2. 2 および 2. 3 で述べたように解析結果では $\theta=0.8$ あるいは $\theta f/\theta w=0.85$ において最大の推進効率となることが示されている。それに対し実験結果では $\theta=0.4$ あるいは $\theta f/\theta w=0.45$ において遊泳速度が最大になっている。これは、定量的な比較ができていない、推進効率までは測定できていない、という現状を鑑みても実験結果は解析結果とは異なっているように思える。

考え直してみると、Fig.10 に示した推進効率の演算結果はクロマグロの遊泳を想定したパラメータ設定、即ち遊泳速度 $V_x=2.0\text{m/s}$ における結果であるため、マグロ型ロボットの遊泳実験で得られたほぼ 0.3m/s の速度での状況とは異なると思われる。そこで、遊泳速度 $V_x=0.3\text{m/s}$ 、揺動周波数 5Hz として再計算してみた。その結果を Fig.14 に示す。これより、推進効率は $\theta f/\theta w=0.8$ 辺りで最高になっているものの、推進力そのものは $\theta f/\theta w=0.5$ 辺りで最大値となった。

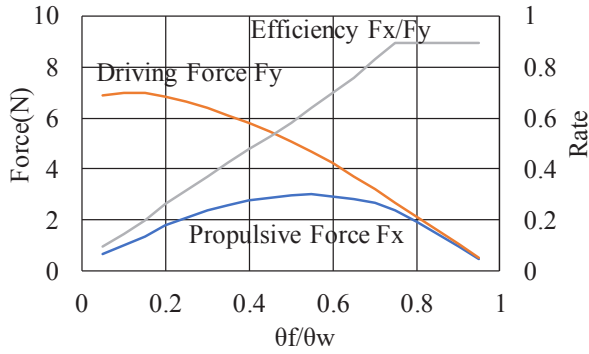


Fig.14 Propulsive Efficiency toward $\theta f/\theta w$ at Swimming speed 0.3m/s by using Wing Theory

この演算結果は Fig.13 の実験結果とかなり近づいてきている。このことを検証するために、遊泳速度 $V_x=0.3\text{m/s}$ 、揺動周波数 5Hz における $\theta f/\theta w=0.45$ および $\theta f/\theta w=0.85$ の尾ヒレ角度動作で水流に対する尾ヒレの迎角 θ_a を求めてみた。その結果を Fig.15 に示す。

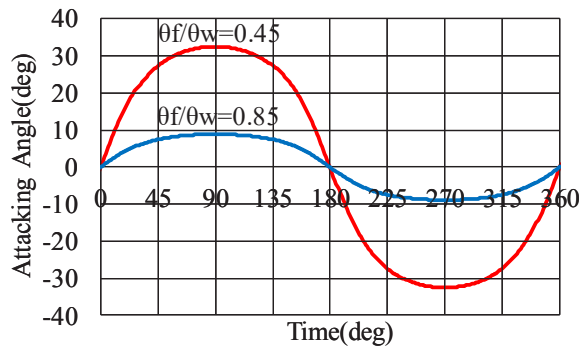


Fig.15 Attacking angle θ_a of caudal fin toward water flow under the condition of swimming speed is 0.3m/s, tail oscillation frequency is 5Hz.

この Fig.15 を揚力抗力測定結果の Fig.6 と共に見ると、 $\theta f/\theta w=0.45$ の尾ヒレ動作の方が揚力を大きく発生する迎角を長期間使っていることが分かる。ただし、この場合抗力も大きくなることから、尾の揺動用モータにかかる負荷も大きくなっているはずで、推進効率としてどうなるかは判別できない。今後尾の揺動用モータにかかる負荷を測定する手段を開発する必要がある。

4. 2 クロマグロとマグロ型ロボットとの比較

泳動数 Sw は尾の揺動 1 ビートにおいて遊泳進行する距離を胴体長との比率で表したものである。Bainbridge と永井はほとんどすべての魚で $Sw=0.6$ を示すことを報告している¹⁷⁾。この値に対してマグロ型ロボットの泳動数は

$$Sw = \frac{0.3(\text{m/s})}{2(\text{Hz}) \times 0.6(\text{m})} = 0.25 \quad (10)$$

となり、マグロ型ロボットの遊泳能力は魚のおよそ 40%しか発揮できていないことが分かる。

一方、Bainbridge はほとんどの魚で体長と尾の揺動振幅との比が 0.2 であるというデータを示しているが、我々が想定していた 1/2 スケールモデルでの値は $0.08\text{m}/0.6\text{m}=0.13$ と振幅が足りなかったことになる。これは今後の大きな修正課題である。これを鑑みて現状でのマグロ型ロボットの遊泳能力を判断するために、尾の揺動振幅基準の泳動数 Sw_b で評価することにした。魚の Sw_b は

$$Sw_b = \frac{Sw}{0.2} = \frac{0.6}{0.2} = 3.0 \quad (11)$$

となるが、マグロ型ロボットの Sw_b は

$$Sw_b = \frac{Sw}{0.13} = \frac{0.25}{0.13} = 1.9 \quad (12)$$

となり、マグロ型ロボットは魚のおよそ 60%の遊泳能力となっていることがわかる。

もちろん、この比較には胴体が受ける水からの抗力が影響し、魚の胴体抗力に対してマグロ型ロボットの胴体抗力がどの程度になっているかについても今後調査する必要がある。

5. 結言

開発したマグロ型ロボットの遊泳速度は尾の揺動周波数 5Hz において最大でも 0.5m/s 程度であった。これは尾の揺動振幅基準の泳動数 Sw_b において魚の約 60%の遊泳能力であることが分かった。

尾ヒレ角度の動作パターンについては解析結果である $\theta=0.8$ 或いは $\theta f/\theta w=0.85$ の動作では最大速度は発揮できず、 $\theta=0.4$ 或いは $\theta f/\theta w=0.45$ 付近で最大速度になることが分かった。ただしこれは解析結果と矛盾しているとは言え切れず、今後尾の揺動の負荷となる駆動力 F_y を測定する手段を開発し、推進効率を求めてから議論せねばならない。

また、現状のマグロ型ロボットの尾の揺動振幅がマグロ等の魚よりも小さいことが判明した。これは設計上のミスであり、今後改修してふさわしい振幅になるようにせねばならない。

謝辞

実験のために何度も名張市立つつじが丘小学校様にプールを借用させていただいた。そのおかげで本研究が推進できたと言える。ここに心より感謝申し上げる。

本校技術員の右松さん、天野さんにはロボットの部品調達や設計製作において多大なご協力をいただいた。ここに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Kato.N. et al., Aero Aqua Bio-Mechanics, Study Group of Aero Aqua Bio-Mechanisms (2010)
- [2] Azuma, A., The Bio kinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag Tokyo (1992)
- [3] Nakashima, M. and Ono, K., Dynamics of Two-Joint Dolphinlike Propulsion Mechanism (1st Report, Analytical Model and Analysis Method), Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series B), Volume62, Issue600, pp.136-143(in Japanese) (1996)
- [4] Nakashima, M. and Ono, K., Dynamics of Two-Joint Dolphinlike Propulsion Mechanism (2nd Report, Optimum Motion for Primary Body Form), Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series B), Volume62, Issue602, pp.67-74 (in Japanese) (1996)
- [5] Kugai, K. and Gomyouta, Y., Analysis of Swimming Ability of Blue Fin Tuna, Research Reports of Kindai University Technical College, No.2, pp.11-16(in Japanese) (2008)
- [6] Kugai, K. and Hamaguchi, R., Development of Fish type Robot based on the Analysis of Swimming Motion of Blue Fin Tuna, Research Reports of Kindai University Technical College, No.3, pp.13-17(in Japanese) (2009)
- [7] Tanaka, I and Nagai, M, Resistance and propulsion hydrodynamics (Learn from fast swimming ability of aquatic organisms), Ship and Ocean Foundation (in Japanese) (1996)