

高速遊泳魚の尾鰭の運動解析

平山元朗*¹, 永松哲郎*¹, 上田耕平*¹

Study on Tail Motion of High-Speed Swimming Fish

Motoaki Hirayama*¹, Tetsuo Nagamatsu*¹, and Kohei Ueda*¹

Keywords : Tail fin, Oscillating fin, Tail shape, Lift, Machine fish

Abstract

It is well known that fishes and cetaceans can achieve extraordinary propulsive performance, acceleration and maneuverability. The present study gives an attention to the propulsion of carangiform swimming motion which produces thrust mainly by oscillating the tail fin. The two-point hinge oscillating wing theory is adopted to simulate the motion of tail fin, which is coupled with swaying and yawing motions. Parameters of the theory are an advance speed, frequency of the tail fin, amplitudes of swaying and yawing motions, and phase lag between both motions. Experiments were conducted to obtain the lift and drag coefficients against angles of incidence for 6 kinds of tail fin and a rectangular wing. As examples, the amplitudes and phase lag of swaying and yawing motions are analyzed from video records of swimming fishes. Based on the above theory and experiments, parametric calculations were made in order to obtain data for design of a robotic machine fish. It is found that there exists a proper choice among frequency, amplitudes and phase lag of oscillating motions.

魚の泳ぎ方はアメリカの動物学者 Breder によるウナギ型 (Anguilliform), アジ型 (Carangiform) およびハコフグ型 (Ostraciiform) に大別されるのが一般的のようである¹⁾。カツオ, マグロ, コイ等, 中~高速で泳ぐ魚はアジ型に分類され, これらの魚は紡錘形をした魚体の後半の約1/3を振動させて, アスペクト比の高い尾鰭によって推進力を得ている。

イルカは魚類ではないがこれらの高速遊泳魚と類似した体形をしており, やはり高速で泳ぐことで知られている。1936年, 英国の生理学者 James Gray は17ノットで航走している船に追いつき追い越して行くイルカの群れを見て驚いた。彼はイルカと同じ大きさと同形をした模型の流体抵抗を計測して, その速度で泳ぐに必要なパワーを推定すると, 単位重量あたりの筋肉が発生するパワーが陸上の哺乳動物の数倍になることが分かった²⁾。これが「グレイのパラドックス」といわれるもので, 高速遊

泳魚にも当てはまる, 今でも未解決の謎である。この問題は次の3つの課題に分けて考えられる。

- 1) これらの水棲動物の抵抗が異常に小さい。
- 2) これらの水棲動物の筋力が異常に強い。
- 3) これらの水棲動物の推進効率が異常に高い。

まず, 魚・イルカの流体抵抗が小さい原因として, これらの表皮が弾性体であることや魚体表面の粘液, 表面波動などが挙げられている³⁾。これらの魚の低抵抗の原因について多くの研究がされている⁴⁻⁸⁾が, まだ「グレイのパラドックス」を説明するには到っていない。最近の研究でサメの表皮が微小な突起で覆われており, これがりブレットと呼ばれる境界層制御装置と同じ効果により摩擦抵抗を小さくしている可能性が指摘されている⁹⁾。そのほか, 摩擦抵抗低減に関する研究に新しい取り組みも見られ¹⁰⁾, やがて魚・イルカの低抵抗の謎が解明される日が来ることが期待される。

*¹ 鹿児島大学水産学部環境情報科学講座 (Environmental and Information Sciences, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890-0056 Japan)

第2の課題である水棲動物の筋力が陸上の哺乳動物よりも数倍ものパワーを発揮するかどうかはまだ分かっていないようである。

一方、アジ型泳法の推進は推進効率が高いのではないかと予想されて、これまでもいくつかの研究がされている。尾鰭の運動の理論的研究として非定常翼理論をベースとした大振幅非線形理論¹¹⁾や、尾鰭を弾性体として取り扱った非定常翼解析¹²⁾、Vortex Lattice 法¹³⁾、尾鰭の運動を2関節運動とした振動翼解析¹⁴⁾、魚の胴体の運動も考慮したイルカの尾鰭の解析¹⁵⁾等がある。最近ではCFD(数値流体力学)による解析も試みられている^{16,17)}。また、魚の尾鰭の推進法を船¹⁸⁾や人工魚への適用を試みた実験的研究^{19,21)}も行われている。

マグロやイルカなどの水棲動物は、高速で泳ぐだけでなく、停止、後進、急旋回等の運動性能もきわめて優れており、まだまだ人工魚の性能は遠く及ばず、生物に学ぶところは多い。そこで、本研究では海洋資源調査や海中構造物の点検などのための人工魚開発の第1ステップとして、推進装置としての尾鰭に対応する振動翼の設計資料を得るために実施したものである。

尾鰭の推進理論

アジ型魚の推進運動は基本的には尾鰭が翼として作用する推進力に基づくもので、魚体の後半約1/3とその後の尾鰭を2点ヒンジの振動翼とみなすことができる²⁰⁾。

すなわち、尾鰭は左右(または上下)運動と回転運動を同時に行っており、2つの運動の位相差や振幅、振動数などを適当に選ぶことにより大きな推力を得たり、高い効率の推進をしたりしている。尾鰭の運動は非定常運動であるが、ここでは準定常的に扱った永井¹⁴⁾の2点ヒンジ振動翼理論に倣って展開する。座標系および2点ヒンジ振動翼モデルをFig.1に示す。第1ヒンジ点は魚体の後端から約1/3の位置に当たり、第2ヒンジ点が尾柄に当たる。第1ヒンジと第2ヒンジ間をアームと呼び、その長さを R で表す。 U_∞ は魚の進行速度を表わし、その方向に x 軸をとり、 x 軸と直交して尾鰭の振動する方向に y 軸をとる。アームの振れ角を θ 、翼(尾鰭)の振れ角を β 、それぞれの振幅を θ_0 、 β_0 、両者の運動の位相差を ε とし、振動の角速度を $\omega = 2\pi f$ として、 θ と β を次のように表す²³⁾。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_0 \sin(\omega t) \\ \beta &= \beta_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで t は時間を表す。また、 θ と β は反時計回りを

正符号とする。

第1ヒンジの点を原点に取り、翼の1/4弦長点を翼運動の代表点と考えて、その座標 (x, y) と移動速度 (u, v) を求めると

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cos \theta + \frac{c}{4} \cos \beta \\ y &= R \sin \theta + \frac{c}{4} \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{dx}{dt} = -R\theta_0\omega \sin \theta \cos(\omega t) \\ &\quad - \frac{c}{4}\beta_0\omega \sin \beta \cos(\omega t + \varepsilon) \\ v &= \frac{dy}{dt} = R\theta_0\omega \cos \theta \cos(\omega t) \\ &\quad + \frac{c}{4}\beta_0\omega \cos \beta \cos(\omega t + \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。ここで c は翼弦長である。

したがって、1/4翼弦長点での翼への流入速度 U とその角度 α_v は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{(U_\infty - u)^2 + v^2} \\ \alpha_v &= \tan^{-1} \frac{v}{U_\infty - u} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

よって、1/4翼弦長点での U と翼のなす角、すなわち迎角 α は

$$\alpha = \alpha_v + \beta \quad (5)$$

となる。ここで、 α および α_v はFig.1に示す方向が正符号である。

次に、翼の運動によって生じる流体力について考える。翼が上記の迎角によって発生する揚力 L と抗力 D は揚力係数 C_L と抗力係数 C_D を使って次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{2} C_L \rho U^2 S \\ D &= \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、 ρ は流体密度、 S は翼面積である。また、

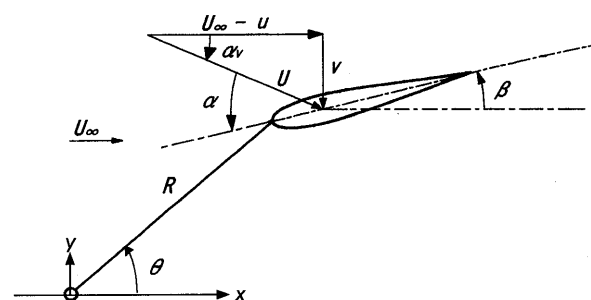


Fig. 1 Definition sketch of the co-ordinate system.

C_L と C_D は実験により求めることにする。

さらに、翼が非定常運動する事により付加質量力 F が生じる。付加質量は直径が翼の弦長 c に等しく、長さが翼幅 (スパン) b と同じ円柱の流体質量で近似できるので、 F はこの付加質量に、翼面に法線方向の加速度を乗じることで求められる。

$$F = \frac{\pi}{4} \rho b c^2 \frac{d(U \sin \alpha)}{dt} \quad (7)$$

付加質量力 F の方向は翼面に法線方向であることを考慮して、揚力 L と抗力 D および付加質量力 F の進行 (x 軸) 方向成分、すなわち推力 T と横 (y 軸) 方向成分、すなわち横力 Y を求めると次のようになる。

$$T = L \sin \alpha_v - D \cos \alpha_v - F \sin \beta \quad (8)$$

$$Y = L \cos \alpha_v + D \sin \alpha_v + F \cos \beta$$

したがって、振動翼の1周期間 τ で発生する平均推力 T_m および推力係数 C_T は

$$\left. \begin{aligned} T_m &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T dt \\ C_T &= \frac{T_m}{\frac{1}{2} \rho U \&S} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる。なお、1周期間の平均横力はゼロとなる。

尾鰭の流体力計測

アジ型遊泳魚の尾鰭の形状はさまざまである。浅い川に住んで比較的低速で泳ぐフナの尾鰭は矩形翼に近く、海洋を高速で回遊するマグロやカツオは三日月形状で、後退角とアスペクト比が大きな翼形状になっている。このように高速で遊泳する魚とそうでない魚の尾鰭の形状はかなり異なっている。このような形状の違いと翼特性との関係は興味のあるところであるが、これまでそのような実験データは少ない。また、魚は胸鰭や腹鰭等と尾鰭を使って急速旋回や急発進などを行っているが、このようなときの尾鰭は大迎角になっていると想像される。そこで、いくつかの代表的な魚の尾鰭形状について、大迎角までの揚力・抗力の計測を行った。

実験に使った6種の尾鰭模型を Fig.2 に示す。尾鰭模型のスパンは全て0.2m としている。また、比較のために同じスパンの矩形翼 (アスペクト比が4.9) についても計測を行った。実物の尾鰭は翼厚比が4~20%程度の翼断面をしているが、本実験では厚さ2mmのアルミ平板を使用しているため、平均的な翼厚比は4~7%程度である。イルカの尾鰭についての実験²⁴⁾によると、尾鰭の平面形状と断面形状を実物と相似にした翼と平面形状のみを相似とした平板翼とを比較すると、揚力はほぼ

等しいが、抗力は平板翼の方が大きくなっている。

翼特性計測の実験施設は鹿児島大学共同利用施設大型回流水槽である。没水深度を0.2m にとって供試翼を水平に設置し、供試翼の尾柄に繋がる部位の前縁から約1/4弦長の位置に直径10mm、長さ350mmのアルミシャフトを取り付け、それを水面上の3分力計に連結した。迎角はシャフトと供試翼の連結部を回転可能として、 $-20 \sim 60^\circ$ まで変えた。供試翼の揚力 L と抗力 D は供試翼の計測値からシャフトのみの計測値を差し引いて求めている。流速は1.2m/sで、平均的な翼弦長に基づくレイノルズ数は約 $5 \sim 6 \times 10^5$ 程度である。計測した揚力 L と抗力 D は (6) 式にしたがって無次元化した。各供試翼についての C_L 、 C_D の計測結果を Fig.3~9 に示す。なお、これらの模型のアスペクト比 A は次式で定義した。

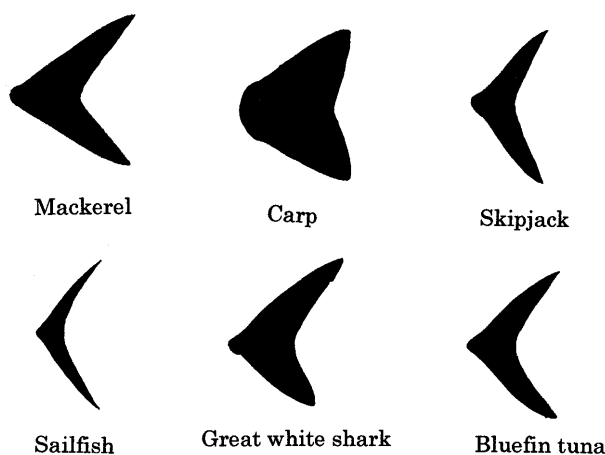


Fig. 2 Models of tail fin wing.

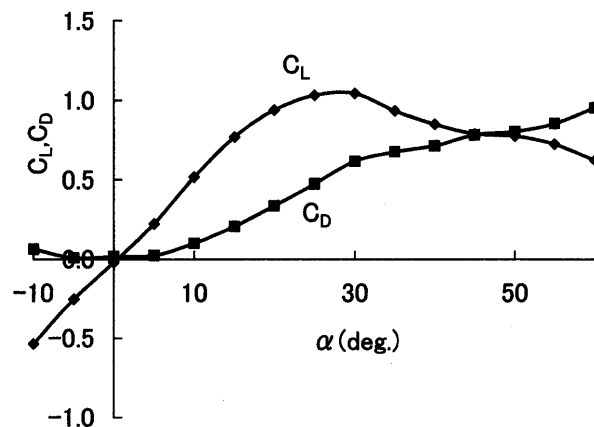


Fig. 3 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of mackerel.

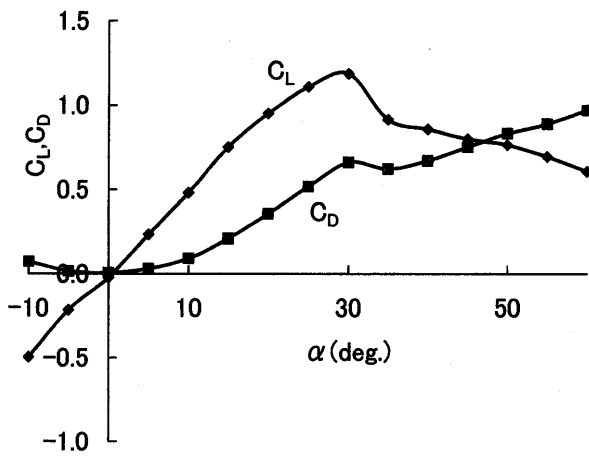


Fig. 4 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of carp.

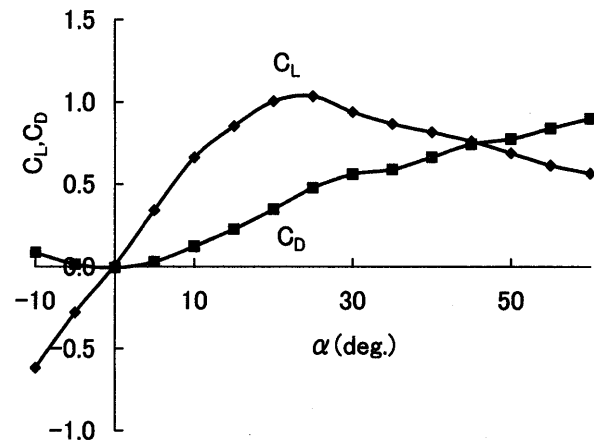


Fig. 7 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of great white shark.

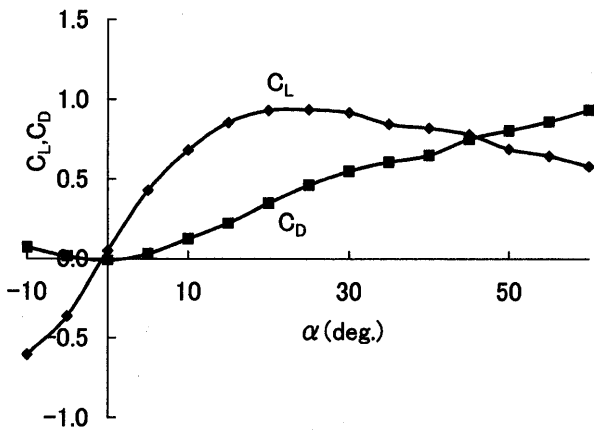


Fig. 5 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of skipjack.

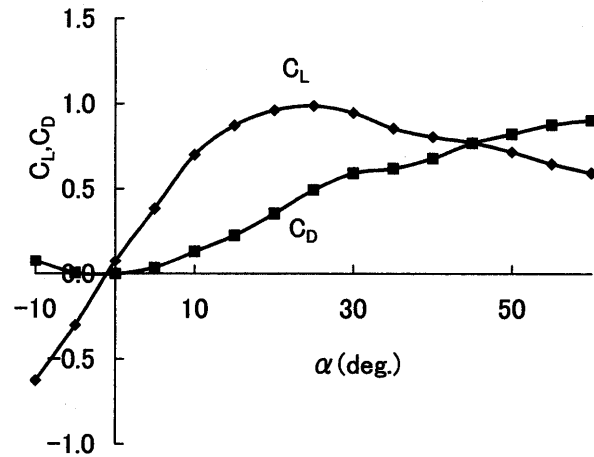


Fig. 8 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of tuna.

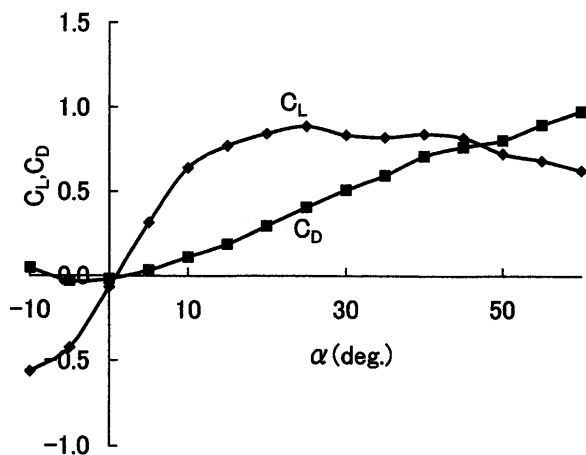


Fig. 6 Lift and drag coefficients measured for the tail fin wing of sailfish.

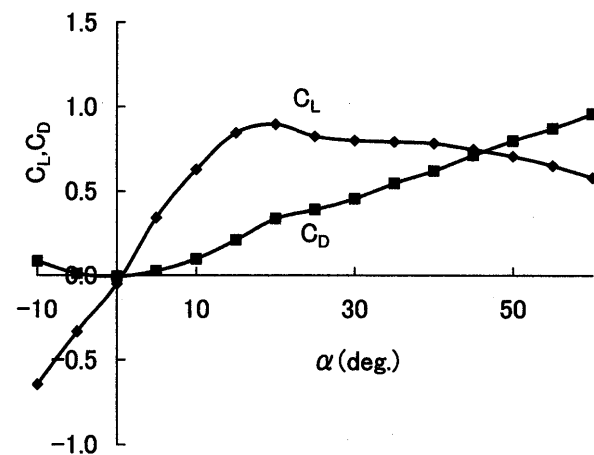


Fig. 9 Lift and drag coefficients measured for the rectangular wing.

$$A = \frac{b^2}{S} \tag{10}$$

ここで、 b はスパン、 S は翼面積である。

アスペクト比が小さいコイは最大揚力係数 C_{Lmax} が大きく、失速する迎角も大きい。一方、アスペクト比が大きいカツオやバショウカジキは揚力勾配が大きい。これらの特性は一般的な翼特性と一致している。矩形翼と比較すると、尾鰭翼の方が最大揚力となる迎角が大きい。また、バショウカジキは最大揚力付近がなだらかな曲線となっており、大きな迎角でも失速することなく大きな揚力を得ている。カツオやクロマグロにも若干そのような傾向が見られるのは興味深い。抗力については断面形状が翼型でないため、迎角が大きいところで大きな値となっており、どの尾鰭翼でも比較的単調な増加曲線となっている。

尾鰭翼の揚力勾配を矩形翼と比較して Fig.10 に示す。同図にはアスペクト比に対する揚力勾配の変化を把握するために、カツオの尾鰭翼と矩形翼について翼幅を2倍にしてアスペクト比を2倍とした翼についての実験結果も記載している。また、揚力勾配に対するアスペクト比 A と後退角 Λ の影響を表す理論式²⁰⁾

$$\frac{dC_L}{d\alpha} = 2\pi \cos \Lambda \frac{A}{A+2 \cos \Lambda} \tag{11}$$

を実線で記入している。

Fig.10 から、マサバとコイの揚力勾配は他の尾鰭翼と矩形翼に比べてやや小さくなっていることが分かる。また、高速遊泳魚といわれるカツオやクロマグロ、バショウカジキの揚力勾配は矩形翼と同等で、高速遊泳魚の尾

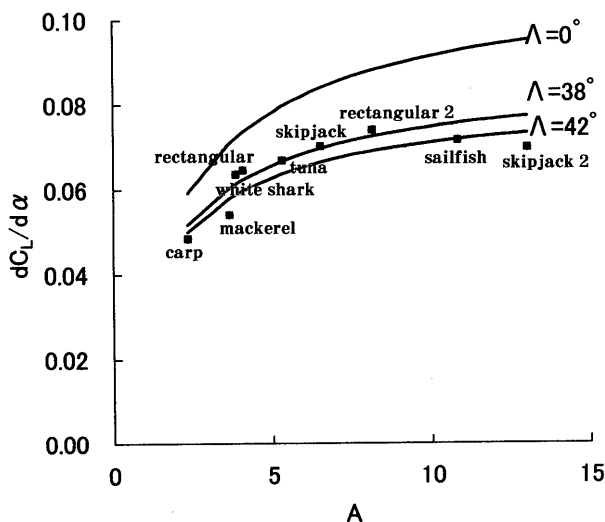


Fig.10 Comparison of lift-curve slope among the tail fin wings.

鰭の形状が高い揚力勾配を得ることにはなっていない。

遊泳魚の運動解析

本理論では遊泳魚の運動を規定するパラメータは前進速度 U_∞ 、体長 L 、尾鰭の振動数 f 、アーム（体長の後半1/3）の振れ角の振幅 θ_0 、尾鰭の振れ角の振幅 β_0 と位相遅れ ε である。このうち、前進速度 U_∞ 、体長 L 、尾鰭の振動数 f については魚種ごとにほぼ一定の関係があって、無次元係数 $K = U_\infty/fL$ は約0.7~1.1で、その値は魚の大きさ、断面形状、肥満度などに関係していると考えられている²⁰⁾。一方、尾鰭の振幅については体長の20%程度との報告はあるが、本理論に対応する θ_0 、 β_0 、 ε についてのデータは見当たらない。そこで、Kaparang によるマアジとハマチの稚魚についての遊泳運動の記録²¹⁾から、これらのパラメータを解析することにした。遊泳運動の記録は鹿児島大学水産学部の小型回流水槽で海水を使って行われたものである。小型回流水槽の観測部は長さ×幅×水深=1.3m×0.3m×0.2mで、流速は最大0.85m/sである。

マアジの遊泳運動の観測記録例²¹⁾を Fig.11 に示す。体長 $L=0.298\text{m}$ 、前進速度 $U_\infty=0.575\text{m/s}$ 、尾鰭の振動

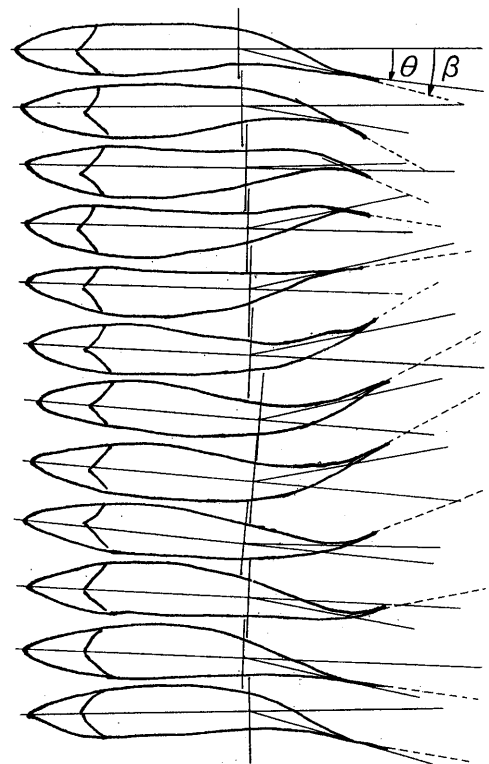


Fig.11 Records of swimming motion of Japanese horse mackerel.

数 $f=3.3\text{Hz}$ のほぼ1周期の運動状態の記録から、図示するように体長の後半1/3の振れ角 θ と尾鰭の振れ角 β を読み取り、これを (1) 式に当てはめて Fig.12 のような周期運動図を作成し、これより θ_0 , β_0 , ε を求めた。ハマチの稚魚についても同様の解析を行った。また、体長や前進速度、振動数が不明であるが、参考のために Nekton²⁸⁾ に記載のマアジ属とチヌ属の魚についても同様の方法で θ_0 , β_0 , ε を解析した。これらの解析結果を Table1 に示す。

無次元係数 K はマアジが0.585と文献²⁶⁾ よりも小さくなっているが、ハマチの稚魚は0.74~0.89となって既存のデータとほぼ一致している。 θ_0 は全ての解析例で20

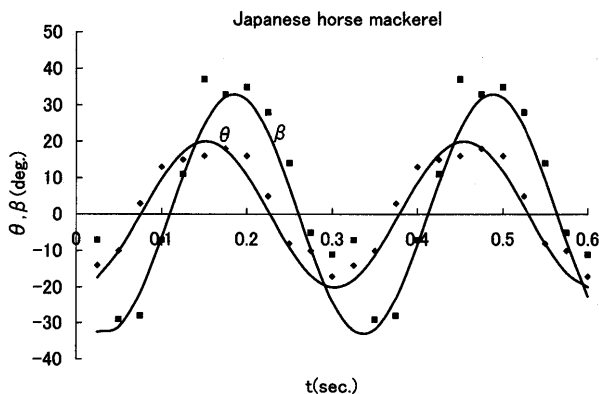


Fig.12 Variation of oscillating angles of tail and tail fin for one period.

Table 1 Fish swimming motion analysis

Source	Kaparang ²⁷⁾		Nekton ²⁸⁾		
	Japanese horse mackerel	Yellowtail	<i>Trachurus mediterraneus ponticus</i>	<i>Diplodus annularis</i>	
L (m)	0.298	0.173	—	—	—
U_∞ (m/s)	0.575	0.575	0.85	—	—
f (Hz)	3.3	4.5	5.5	—	—
$K=U_\infty/fL$	0.585	0.739	0.893	—	—
θ_0 (deg.)	20	20	25	20	20
β_0 (deg.)	33	33	40	40	40
ε (deg.)	320	300	310	300	290
T^* (g)	5.3	1.4	1.9	—	—
F_x^* (g)	2.6	0.4	1.0	—	—
T_m (g)	7.9	1.8	2.9	—	—
C_r	0.308	0.208	0.230	—	—
R_f (g)	4.8	1.9	3.7	—	—

~25°である。 β_0 は33~40°で、 θ_0 の2倍程度の値となっている。また、ハマチの稚魚は前進速度が高い方が K が大きく、 θ_0 も β_0 も大きくなっている。すなわち、魚が前進速度を上げるときは、尾鰭の振動数を速度比例よりもやや小さめに増やすと共に振れ角の振幅 θ_0 と β_0 を大きくしていることになる。位相遅れ角 ε は290~320°で、定常理論から予想される最適な位相遅れ角270°よりも大きな値になった。この理由は非定常影響の他に、遊泳運動の記録や解析誤差なども一因と考えている。今後さらに解析例を増やして検討したい。

尾鰭翼の発生推力の計算

尾鰭の推進理論にマアジの尾鰭翼の特性計測結果を用いて、Table1 のマアジとハマチの稚魚について尾鰭の平均推力を計算した。ここで、魚の体長と尾鰭のスパンの比は日本産魚類大図鑑²⁹⁾ を参照して、4.0として尾鰭の大きさを決めた。計算結果を Table1 に記載しているが、 T^* は尾鰭翼の揚力と抗力による推力成分で、 F_x^* は付加質量による推力成分を示している。また、奈良迫の実験³⁾ を参考にして推定した抵抗 R_f も記入している。マアジの場合、平均推力 T_m は抵抗 R_f より大きな値になっている。この差異の原因の一つは K の値が他のデータに比べて小さい、すなわち尾鰭の振動数が多いために推力が大きくなっていることによる。このような遊泳状態は通常とは異なる状態であろうが、抵抗は通常の直進している状態を想定して推定しているため、両者に差異が生じたものと予想される。ハマチの稚魚については T_m と R_f はほぼ同程度の値になっている。尾鰭翼の非定常運動による付加質量力の推力成分 F_x^* は平均推力 T_m の1/3~1/4程度となっている。

次に、体長が0.6mのカツオの人工魚を想定して、尾鰭の設計資料を得るためにパラメトリックな計算を行った。まず、日本産魚類大図鑑²⁹⁾ を参考に、体長と尾鰭のスパンの比を4.0として尾鰭翼のスパン b 、翼面積 S をそれぞれ $b=0.152\text{m}$ 、 $S=0.003546\text{m}^2$ と設定した。平均翼弦長 c は次式で定義した。

$$c = \frac{S}{b} \quad (12)$$

また、奈良迫のカツオのデータ³⁾ をもとに人工魚の寸法を設定し、その抵抗係数 $\left(= \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} \right)$ を推定して Table2 に示す。

尾鰭翼の振動の振幅を $\theta_0=20^\circ$ 、 $\beta_0=35^\circ$ と設定して、 K および ε をパラメータとして計算した推力係数 C_T を

Fig.13 に示す。K が小さい方が C_T は大きくなっている。すなわち一定速度に対して尾鰭の振動数を上げると推力が増すことになる。また、推力が最大となる位相差は、K が大きいときは 270° 付近にあるが、K が小さくなると次第に大きくなる。これは付加質量の項によるもので、 F_x は ϵ が大きいほど、また K が小さいほど大きくなるためである。Table1 に示す魚の尾鰭運動の解析結果で ϵ が 270° よりも大きいことと定性的に符合している。尾鰭翼の迎角 α と推力係数 C_T の 1 周期間 τ の変動を $K = 0.8$ の場合で位相差 ϵ が 270° と 300° について Fig.14(a) (b) に示している。 $\epsilon = 270^\circ$ の場合は迎角が $\pm 10^\circ$ 以下で、変動が小さいのに対して、 $\epsilon = 300^\circ$ の場合は迎角の変動が大きい。推力係数 C_T は $\epsilon = 270^\circ$ の場合は 1 周期

間全てでほぼ正符号であるのに対して、 $\epsilon = 300^\circ$ の場合は正負に大きく変動している。最大推力になるのはいずれの場合も $1/2\tau$ と 1τ に近い時で、尾柄の振動が $\theta \approx 0$ の時で、尾鰭の横方向の速度が最大になる付近である。

推力係数 C_T と尾鰭翼の振幅 θ_0 と β_0 との関係について Fig.15 に示す。 θ_0 が大きくなると C_T は単純に増加するが、 C_T が正になるのには β_0 との適合性がある、 β_0 が大きい時には θ_0 を大きく取らないと推力は正值にならない。Table1 に示す魚の解析例の $\theta_0 = 20^\circ$ 、 $\beta_0 = 35^\circ$ というのは適当な数値のように考えられる。最後に、カツオの人工魚を遊泳させるためには尾鰭翼をどのように運動をさせればよいかについて検討する。これまでの計算結果から $\theta_0 = 20^\circ$ 、 $\beta_0 = 35^\circ$ 、 $\epsilon = 270^\circ$ を先ず設定

Table 2 Dimensions of robotic machine fish

Length (m)	0.600		
Breadth (m)	0.098		
Height (m)	0.143		
Wetted surface (m ²)	0.1645		
Displacement volume (m ³)	1.856×10^3		
Area of tail fin (m ²)	0.00355		
Span of tail fin (m)	0.152		
Estimated resistance coefficient	0.304		
Parameters of motion of tail fin	K=0.79		
	$\theta_0=20(\text{deg.})$		
	$\beta_0=35(\text{deg.})$		
	$\epsilon=270(\text{deg.})$		
Swimming velocity (m/s)	1.0	2.0	3.0
Frequency of tail fin (Hz)	2.0	4.2	6.3

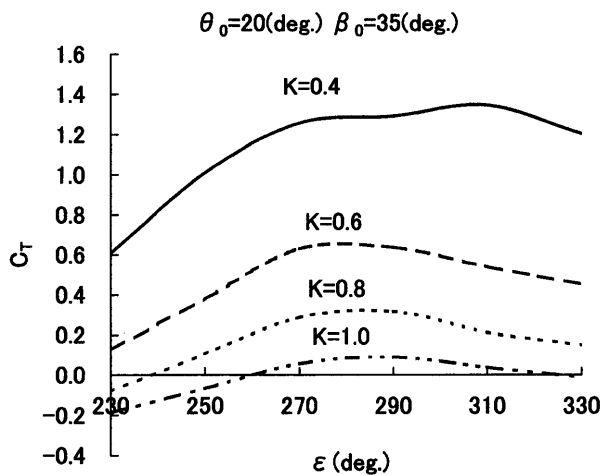


Fig.13 Calculated thrust coefficients vs phase lag between swaying and yawing motion of the tail fin wing.

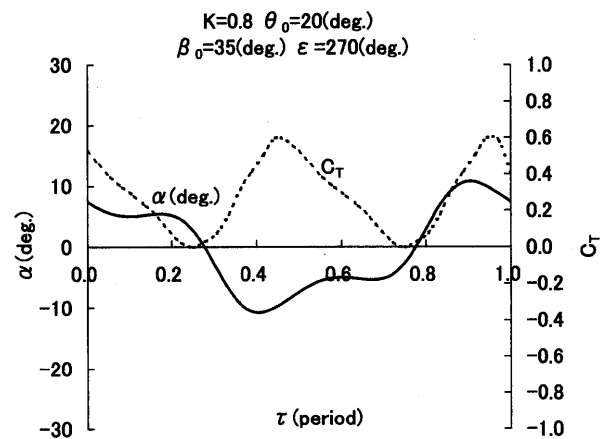


Fig.14(a) Variation of angle of incidence and thrust coefficient in case of $\epsilon = 270$ deg. for one period.

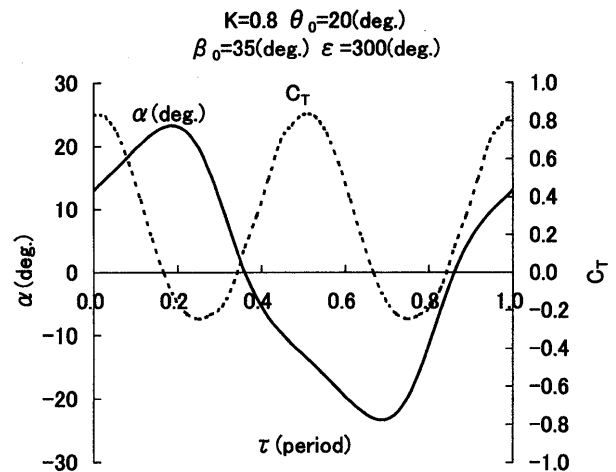


Fig.14(b) Variation of angle of incidence and thrust coefficient in case of $\epsilon = 300$ deg. for one period.

する。Fig.16 に示すような $C_T \sim K$ の曲線から、Table 2 に示す抵抗係数と等しい値の C_T から K を読み取ると、 $K=0.79$ を得る。したがって、人工魚の前進速度を1~3 m/s にする時の尾鰭の振動数は Table 2 に示すような値で制御すればよいことになる。 θ_0 、 β_0 、 ε の設定を変えた場合についても、また人工魚の尾鰭の大きさや前進速度などを変えた場合についても同様の計算から、尾鰭の設計や運動の制御についての検討が出来る。

まとめ

魚類やイルカなどの水棲動物は水中で極めて高い運動性能を発揮することが知られている。そこで、海洋資源調査や海中構造物の点検などに、これらの水棲動物を真似た高性能の人工魚の開発が考えられる。本研究はその

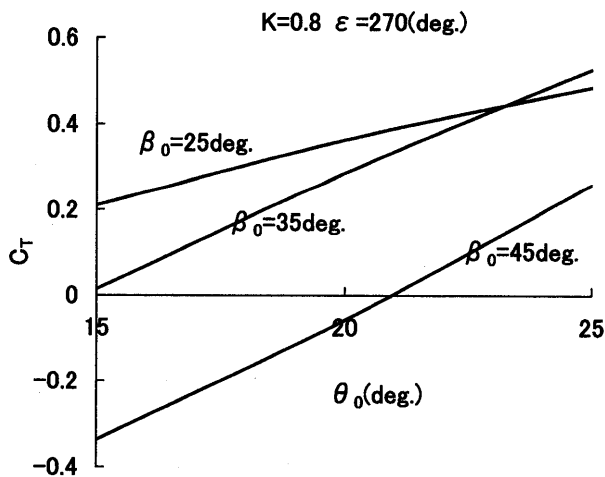


Fig.15 Effect of amplitude of oscillating fin on thrust coefficients.

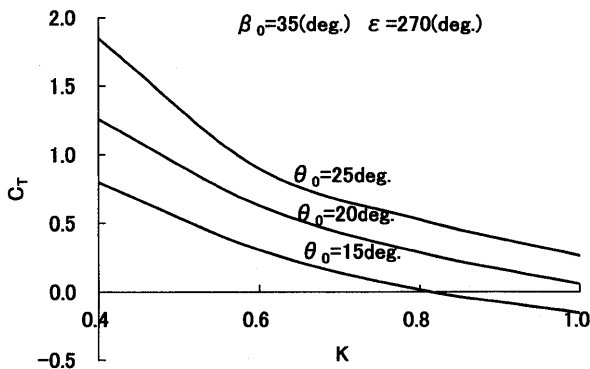


Fig.16 Thrust coefficient vs non-dimensional velocity coefficient K .

推進方法について検討したもので、まずカツオやマグロのような高速遊泳魚の尾鰭の運動を2点ヒンジの振動翼でモデル化し、推力発生計算式を導いた。すなわち、魚体の後半1/3の振れと尾鰭の振れの2つの連成振動として、それぞれの振幅や位相差、振動周波数等を適当に設定することにより推力を得る推進法である。これらのパラメータ設定の参考にするために、実際の魚の遊泳運動の記録を解析した。さらに、魚の尾鰭形状をした6種の翼について揚力と抗力の計測を行い、翼特性を把握した。これらのデータをもとに、体長が0.6mのカツオ型の人工魚を想定して、その尾鰭の運動特性について検討し、人工魚の遊泳速度に対する尾鰭翼の振動数、振幅、位相差などの設計資料を得た。なお、本検討では、尾鰭翼のモーメントを計測できなかったため、尾鰭振動の推進装置としての効率を算定できなかった。推進装置の最適設計には、いろいろな設計条件を考慮する必要があるが、推進効率は重要な要素であるから、今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 千田哲資 (1983): 魚類の遊泳研究前史. 海洋科学, 154, 180-183.
- 2) J. Gray (1936): Studies in animal locomotion, VI, The propulsive powers of the dolphin. *J. Exp. Biology*, 13, 192-199.
- 3) 奈良迫嘉一 (1976): 遊泳魚体の低抵抗性に関する基礎的研究. 鹿児島大学水産学部紀要, 25, 2.
- 4) M.O. Kramer (1960): Boundary layer stabilization by distributed damping. *J. Amer. Soc. Naval Engrs*, 72, 25-33.
- 5) 奈良迫嘉一 (1972): 魚の抵抗について (第1報). 西部造船会会報, 44, 1-23.
- 6) 田古里哲夫, 芦立 勲 (1969): 小型管摩擦計の試作とそれによる魚の抵抗に関する一実験. 日本機械学会講演論文集, 216, 63-66.
- 7) M. W. Rosen and N. E. Cornford (1971): Fluid friction of fish slimes, *Nature*, 234, 49-51.
- 8) 種子田定俊, 天本 肇, 石井幸治 (1975): 進行波表面の乱流境界層. 九州大学応用力学研究所報, 42, 11-22.
- 9) D. W. Bechert, G. Hoppe, and W-E. Reif (1985): On the drag reduction of the shark skin, AIAA-85-0546.
- 10) 永松哲郎 (1999): 摩擦抵抗低減法に関する研究動向. 日本造船学会誌, 836, 113-123.
- 11) T. Kambe (1978): The dynamics of carangiform swimming motions, *J. Fluid Mech.*, 87, 533-560.
- 12) 工藤達郎 他 (1984): 弾性部を有する振動翼による推進に関する研究 (第1報) 線形理論による解析. 日本造船学

- 会論文集, **156**, 82-91.
- 13) W. Potze (1990): On optimum large-amplitude sculling propulsion by wings of finite span, *J. Ship Research*, **34-1**, 14-28.
 - 14) 永井 實 他 (1996): 振動翼推進機構の研究. 日本機械学会論文集, **62**, 200-206.
 - 15) 中島 求, 小野京右 (1996): 2 関節イルカ形水中推進機構の動力学解析 (第 1 報). 日本機械学会論文集, **62**, 3044-3051.
 - 16) T. A. Videv, Y. Doi, and K. Mori (1993): Numerical study on flow and thrust produced by heaving and combined oscillations of 2D hydrofoil. 日本造船学会論文集, **714**, 50-70.
 - 17) T. Nakaoka and Y. Toda (1994): Laminar flow computation of fish-like motion wing. Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, 530-538.
 - 18) 一色尚次, 森川裕久 (1982): 振動翼推進の研究について. 日本造船学会誌, **642**, 684-691
 - 19) M. Nagai, I. Teruya, and K. Isaka (1990): Experimental study on an oscillating wing propulsive ship. First Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, 417-422.
 - 20) M. S. Triantafyllou and G. S. Triantafyllou (1995): An efficient swimming machine. *Scientific American*,
 - 21) 寺田郁二 他 (1998): 振動翼推進システムの開発とその応用. 三菱重工技報, **35**, 132-135.
 - 22) 東 昭 (1986): 生物・そのすばらしい動き. 共立出版
 - 23) T. Nagamatsu (1994): Flow around elastic oscillating foil, Korea-Japan Joint Workshop on CWC, 163-170.
 - 24) 平野 進: いるかの推進運動について(2) - 尾鰭の定常特性 -. 関西造船協会誌, **165**, 65-71.
 - 25) 比良二郎, 瀧澤英一: 流体力学の基礎と演習. 廣川書店, 139.
 - 26) 梨本勝昭 (1983): 魚の遊泳速度と尾部の振動数. 海洋科学, **15-4**, 184-188.
 - 27) F. E. Kaparang (2000): Fundamental Studies on the Underwater Sound Produced by Fish School. 鹿児島大学大学院連合農学研究科 博士論文.
 - 28) Yu. G. Aleyev (1977): Nekton, Dr. W. Junk b.v., Publishers, The Hague.
 - 29) 檜山義夫, 安田富士郎 (1971): 日本産魚類大図鑑, 講談社, 11-112