

第3章 生体における推進機構の解明

渡辺 昌宏

3.1 はじめに

水棲生物や魚類は、進行波的に伝播する波動運動をその魚体上の頭から尾ひれへ発生させ、高性能かつ高効率の水中移動を行っている^{(1)~(4)}。特に、これらの水中移動メカニズムにおいて、柔軟な尾ひれの進行波的な波動運動は、推力の発生に重要な役割を果たしていると考えられる。そして、この水中推進機構の特徴は、図1に示すように柔軟なひれの運動で発生した流体流れの影響が、変動流体力として再びひれの弾性変形および運動にフィードバックされる流体力フィードバックを伴う点にあり、著者らはこの流体力フィードバックが、柔軟な尾ひれの波動運動および魚類の高性能な推力発生メカニズムに、重要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら、この波動運動による推進性能と、ひれの柔軟性が推力発生に及ぼす影響は未解明な部分が多い。

著者らは、この波動運動による推力発生メカニズムの解明は、高性能の水中推進機構および使用エネルギーに制限がある自立型水中移動ロボットの開発に有益な知見をもたらすと考える。しかしながら、この波動運動により水中推進特性と、ひれの柔軟性が推力発生に与える影響は未解明な部分が多い。

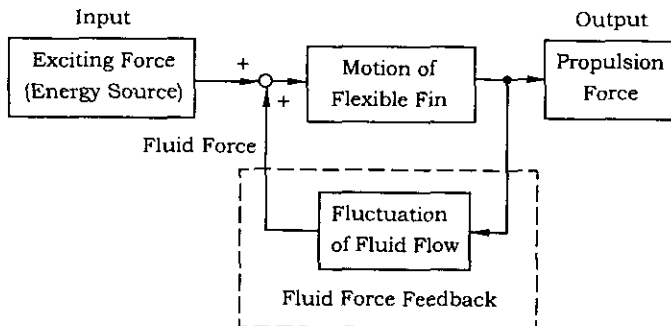


Fig.1 Mechanism of fish locomotion by using flexible caudal fin

これまでに、魚類の水中推進メカニズムや振動する剛体翼および弾性翼による推進特性について、多くの研究が報告されている^{(4)~(22)}。また、振動翼やボディーの屈曲運動を利用した水中推進機構や水中移動ロボットおよび人工魚の開発と研究については、いくつか報告がされている^{(23)~(26)}。

しかしながら、柔軟な魚のひれの様な流体カフィードバックを伴って大きく変形し、かつ波動的に運動する柔軟なフィン（以下、弾性平板と呼ぶ）により発生する推力の特性および推進特性は明らかにされていない。また、流体流れの様子と推進効率および弾性平板の波動運動との関係について考察した研究は、著者らが調べた限り見あたらない。

そこで、本研究は水中で振動的に扇ぎ運動する剛体翼のボディー後縁に、柔軟な魚の尾ひれをモデルにした弾性平板を取付けた水中移動ロボット（以下、ロボットと呼ぶ）を製作し、弾性平板の波動運動によって発生する推力、およびロボットの推進速度と推進効率を実験的に明らかにした。また、泳動するロボット周りの流体流れの可視化を行い、流体流れの様子と推進効率および弾性平板の波動運動との関係を考察した。

3. 2 実験装置

図2と図3に柔軟な魚の尾ひれをモデルにした弾性平板を装着したロボットの機構と写真を示す。弾性平板の波動運動は、水路内静水中で扇ぎ運動するロボットのボディーである剛体翼（図2中②）の後縁に、弾性平板（①）を取付けて発生させる。水路は深さ500mm、幅500mmで、水面波の影響がほぼなくなる水深まで、ロボットを沈めて実験を行った。

剛体翼（以下、翼と呼ぶ）の扇ぎ運動は、魚の尾ひれの付け根部分の運動機構をモデルにした2リンク機構（⑦と⑧）の第2リンク（⑧）に翼を取付けて、各リンクを2つのDCモータ（④と⑤）で正弦波的に振動させることで発生させた。第1モータと第2モータの間のリンク長さは90mmで、第2モータの回転軸は翼の先端位置

にある。ここで、第1モータと第2モータの回転角度 $\theta_1(t)$ と $\theta_2(t)$ を、正弦波的に $\theta_1 = \Theta_1 \sin(2\pi ft)$, $\theta_2 = \Theta_2 \sin(2\pi ft - \phi)$ と位相差 ϕ を付けて駆動することにより、翼にヒービング運動とピッチング運動を組み合わせた扇ぎ運動をさせることができる構造となっている。また、モータの回転角度はパーソナル・コンピュータを用いて制御した。

翼の形状は代表的な対称翼である NACA0012 型翼とし、翼上下の両端部にフローガイド (③) を取り付けて、発生した水の流れが翼の幅方向 (図2中の鉛直方) に流れるのを防ぐ構造とした。ここで、弾性平板を取り付ける翼は長さ 120mm, 幅は 180mm で、軽量化のためアルミ合金で製作されている。弾性平板の材質にはリン青銅を使用し、その長さ L_p と曲げ剛性 EI を変化させて実験を行った。ここで、曲げ剛性は弾性平板の厚さを変えて変化させた。さらに、実験は扇ぎ運動の振動数 f を変化させてそれらの影響を調べた。

まず始めに実験は、ロボット上部を固定した状態 (泳動しない状態) で、ロボットに発生する推力と横力を測定した。ここで、推力と横力はロボット上部に取り付けた軸を固定して (台車⑩を固定して)、その軸の根元部分に貼り付けた半導体ひずみゲージ (⑨) で測定した。ここで、力を精度良く測定するために、軸とロボット系の固有振動数が扇ぎ運動の振動数より十分高くなるように注意して、軸の径を太く設計した。また、ひずみゲージを軸の推進方向とそれと直角方向に貼り、ロボットに発生する推力と、それに伴ってロボットが横方向に受ける横力を測定した。

また、ロボットが泳動している時の推進速度と推進効率を測定する実験は、ロボットをベアリングを介して移動できる軽量の台車 (⑪) に取り付け、その台車を水面上の2本の移動レール (⑫) 間に設置して行った。ここで、推進速度 U は台車に結びつけた重さの無視できる軽量の細いワイヤーを介して回転するエンコーダーの回転角度信号を、ノイズを除去した後に平滑化微分⁽²⁷⁾して求めた。また、推進効率を求めるには、ロボットの泳動中での消費パワー P を求める必要がある。本実験ではこの消費パワーを DC モータの回転

角速度と、モータの回転軸付近に貼った半導体ひずみゲージ (⑩) で測定したトルクの積を時間積分して求めた。

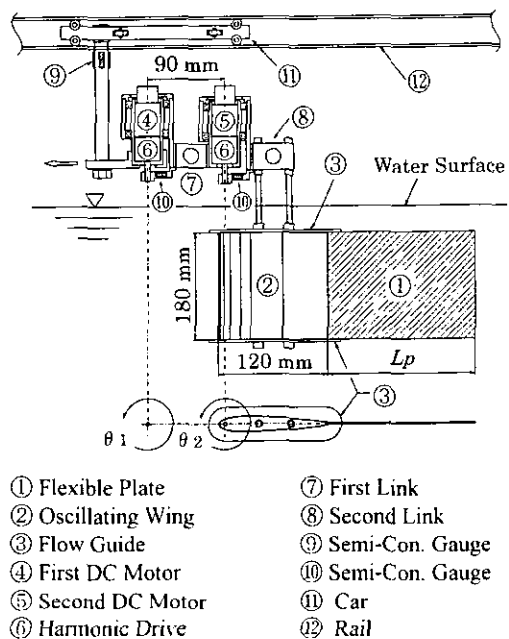


Fig.2 Experimental setup

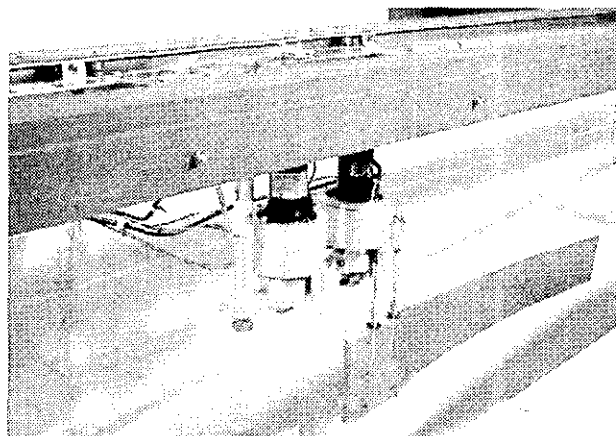


Fig.3 Photograph of experimental setup

3. 3 実験方法

実験はロボット上部を固定した状態（泳動しない状態）での推力の特性を調べた。ここで、ロボット上部に取り付けた軸を固定し、弾性平板の長さ L_p を 0~400mm、翼の扇ぎ運動の振動数 f を 0.4, 0.6, 0.8Hz と変化させて行った。また、曲げ剛性 EI は 1.41×10^{-3} ~ 1.24×10^{-1} [Nm²] の範囲で 5 通りに変化させて、それらの推力 F_p と横力 F_s への影響を調べた。

ここで、推力 F_p と横力 F_s は翼の扇ぎ運動により時間と共に変動する値となる。特に、推力 F_p は扇ぎ運動が始まると平均推力 \bar{F}_p が発生し、その平均推力周りで変動する。また、横力 F_s は零の値を中心に変動する。

このため、本研究では推力特性を評価する値として、横力変動の大きさを表す標準偏差値 F_s^* と平均推力 \bar{F}_p との比 Ra 値を、以下の式 (1) の様に定義して実験結果を整理した。

$$Ra = \bar{F}_p / F_s^* \quad (1)$$

ここで、横力変動が小さく、また平均推力が大きい場合には、この Ra 値が大きくなる。つまり、このことはロボットに作用する流体力ベクトルがロボットの推進方向に向くため、推力特性が良いことを意味する。また、実験は 2 つの DC モータの位相差 ϕ および角度振幅 Θ_1, Θ_2 を、それぞれ $\phi = 0^\circ$, $\Theta_1 = \Theta_2 = 6.0^\circ$ 一定として、ロボットの運動が安定してから測定を開始した。

また、次にロボットが泳動している時の水中推進性能である推進速度と推進効率を調べる実験を行った。この実験では、ロボットを台車に取り付けて泳動できる状態にし、その時のロボットの推進速度 U , 消費パワー P を測定した。ここでも、推進速度 U および消費パワー P は、翼の扇ぎ運動により時間的に変動する値となることから、それぞれの時間平均 \bar{U} , \bar{P} をパーソナル・コンピュータで計算し、それらの値から推進効率 η を以下の式 (2) より求めた。

$$\eta = \bar{U} \cdot \bar{D} / \bar{P} \quad (2)$$

ここで、 \bar{D} はロボットが流体から受ける流体抗力 D の時間平均を意

味するが，泳動中のロボットに作用する流体抗力 D を直接測定することは難しい．そのため，本研究ではおもりを用いてロボットに取り付けた細いワイヤーをプーリーを介して一定の力で引っ張り，定常（引張り力と流体抗力が釣り合った）状態となった時のロボットの速度を測定した．そして，この時の定常速度と引張り力より，平均推進速度 \bar{U} で泳動中のロボットに作用する平均流体抗力 \bar{D} を求めた．ただし，この平均流体抗力を測定する実験では，なるべく泳動中にロボットに作用する平均流体抗力に近い値を測定するために，2つのモータの角度をそれぞれ角度振幅 $\theta_1(t)$ と $\theta_2(t)$ の標準偏差角で翼を傾けて行った．

3. 4 流れの可視化方法

さらに，高い効率を得るための推進メカニズムの解明のためには，ロボット特に推力を発生している弾性平板周りの流体流れと，弾性平板の運動との関係を知る必要がある．そこで，本研究は弾性平板の運動および推進効率と，ロボットが泳動している時の弾性平板周りの流体流れの様子との関係を，流体流れの可視化を行って考察した．流れの可視化はトレーサ粒子として蛍光ポリスチレン・ビーズを煮沸して水面に浮かべ，水路上部に設置した2台のブラックライトより紫外線をあてることで，泳動中のロボットおよび弾性平板周りの流れの様子を調べた．ここで，流れの様子を調べる実験は，ロボット（および弾性平板）の上部が少し水面上に出るようにして行ったため，水面下の厳密な3次元の流れ場と異なっていると思われるが，定性的な流れ場に関する考察は可能と考える．また，流れの様子はデジタル・ビデオカメラを用いて観測した．

3. 5 実験結果および考察

3. 5. 1 推力および横力の時刻歴波形

代表的な推力 F_p と横力 F_s の時刻歴波形を図4に示す. ここで, 図4は弾性平板の長さ $L_p=300\text{mm}$, 翼の振動数 $f=1.0\text{Hz}$, 位相差 $\phi=0$ 度の場合であり, 図4(a)は推力, (b)は横力を示す. また, 図5にこれら推力と横力の時刻歴波形を周波数解析した結果(パワースペクトル密度)を示す. この他のパラメータにおいても, 推力と横力は同様な時刻歴波形を示したので, ここでは一例のみ示す.

この結果より, 扇ぎ運動が始まると共に平均推力 \bar{F}_p が増加することが分かる. また, 推力は平均推力周りで変動していることが分かる. また, 横力も変動するがその平均値は静止時から変化しない. さらに, 横力の変動する振動数は翼の振動数 $f=1.0\text{Hz}$ に等しいが, 推力が変動する振動数は主に翼の振動数の2倍である 2.0Hz が支配的である. これは, 扇ぎ運動の1周期中に2度弾性平板から後方に水が押し流され, その反力として1周期中に2度推力が増加するためであると考えられる.

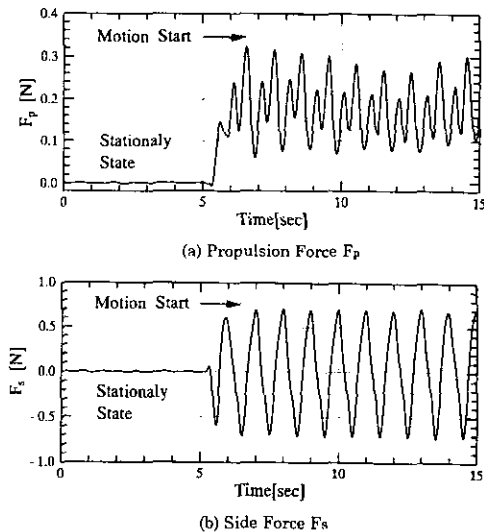


Fig.4 Time histories of propulsion force and side force for frequency $f=1.0\text{Hz}$

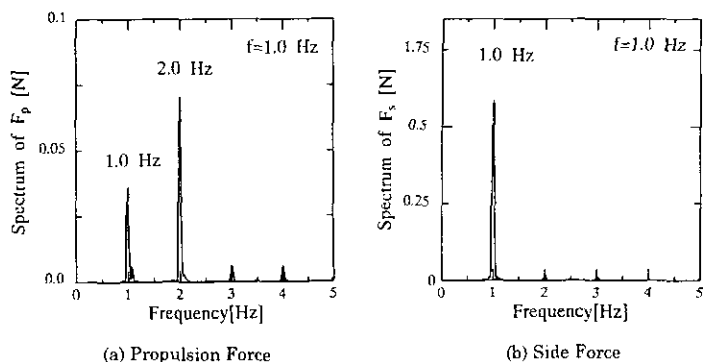


Fig.5 Power spectrum density of propulsion force and side force for frequency $f=1.0\text{Hz}$

3. 5. 2 弾性平板の曲げ剛性の影響

図6にロボット上部を固定した状態で、弾性平板の長さ L_p と曲げ剛性 EI を変化させた場合の横力変動の大きさ（標準偏差値） f_s^* と平均推力 \bar{F}_p との比である Ra 値を示す。実験は弾性平板の長さ L_p を $0\sim 400\text{mm}$ 、曲げ剛性 EI を表1に示す様に記号 A~E を付けて $1.41 \times 10^{-3} \sim 1.24 \times 10^{-1} [\text{Nm}^2]$ の範囲で5通りに変化させて行った。ここで、弾性平板は A から順に曲げ剛性が小さくなる。また、図6の結果はロボットの扇ぎ運動の振動数を 0.8Hz とした場合である。

図6より、弾性平板を長くして行くと、 Ra 値は単調に増加せず、極大値と極小値をとることが分かる。ここで、本研究が行った実験パラメータにおいては、弾性平板を長くして行くと、 Ra 値の変化と共に図7に示す(a)~(e)の5つのモードで弾性平板が運動することが観測された。

図7 (a)の R-mode は平板がほとんど変形しないと見せる剛体平板の運動であり、平板の長さが短い場合に観測された。また、これ以外の運動は平板が柔軟に変形する弾性運動モードである。このうち図7 (b)の T1-mode と図7 (d)の T2-mode は、それぞれ半波長以下および半波長以上の波が後方に伝播する進行波的な波動モードで、それぞれ弾性平板を長くした場合に Ra 値が第1番目と2番目の極大値付近で観測された。つまり、弾性平板に進行波的な波動運動が

発生すると横力変動に対して推力の大きさが増加することが分かる。これは、進行波的に伝播する弾性平板の波の運動により周りの流体を後方にうまく押し出す（多くの運動量を与えている）ことが理由と考えられる。

また、図7 (c)の S1-mode と図7 (e)の S2-mode は、片持ち梁の2次と3次の固有振動モードに似た定在波モードで、それぞれ図6の Ra 値が極小値付近で観測された。このことから、弾性平板を長くしてもその運動が定在波的な運動であると、横力変動に対する推力の大きさは低下してしまうことが分かる。これは、弾性平板の運動が節を持った定在波運動である場合には、周りの流体を後方にうまく押し出せないことが理由と考えられる。

さらに、図6より曲げ剛性が $1.55 \times 10^{-2} [\text{Nm}^2]$ の弾性平板Cを用いた場合に、最大値が他の弾性平板と比べて最も大きい値となった。このことからロボットが横力変動に対して大きな推進方向の力を得るためには、平板には適度な柔軟性が必要であることが分かる。

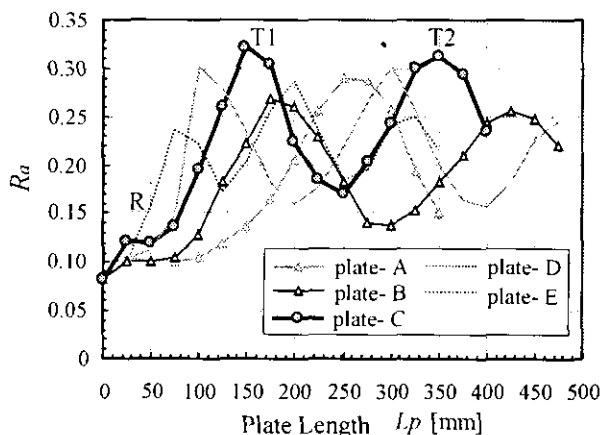


Fig.6 Variation of ratio Ra with varying flexural rigidity EI and length Lp of flexible plate

Table 1 Flexural rigidity EI of flexible plate

Plate	Flexural rigidity	C	$1.55 \times 10^{-2} \text{ Nm}^2$
A	$1.24 \times 10^{-1} \text{ Nm}^2$	D	$6.71 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$
B	$4.46 \times 10^{-2} \text{ Nm}^2$	E	$1.41 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$

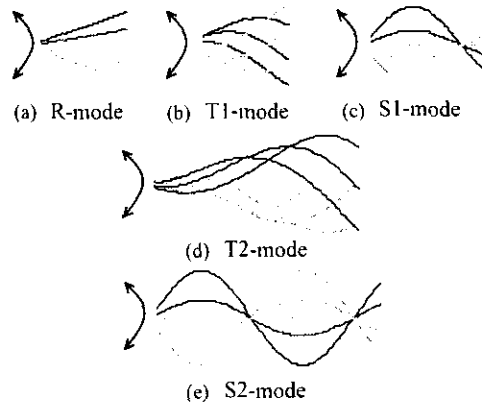


Fig.7 Motion patterns of flexible plate

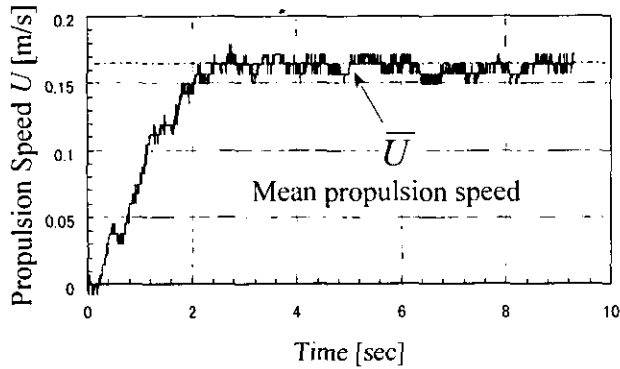


Fig.8 Time history of propulsion speed of robot

3. 5. 3 推進速度と消費パワー

図8に代表的な泳動するロボットの推進速度の時刻歴波形を示す。この図よりロボットの運動は、静止状態から加速して最終的に等速

運動になることが分かる。このため、以下ではこの等速運動での速度をロボットの平均推進速度 \bar{U} として測定した。また、以下の泳動実験では 3. 5. 2 節で述べた Ra 値の最大値が大きかった弾性平板 C を用いた。

図 9 と図 10 に平板長さ L_p と扇ぎ運動の振動数 f を変化させた場合のロボットの平均推進速度 \bar{U} と平均消費パワー \bar{P} の変化を示す。また、図中の記号は各実験パラメータで観測された図 7 に示した弾性平板の運動モードを示す。特に、T1-mode および T2-mode の波動運動が観測されたパラメータにはハッチングをして示した。

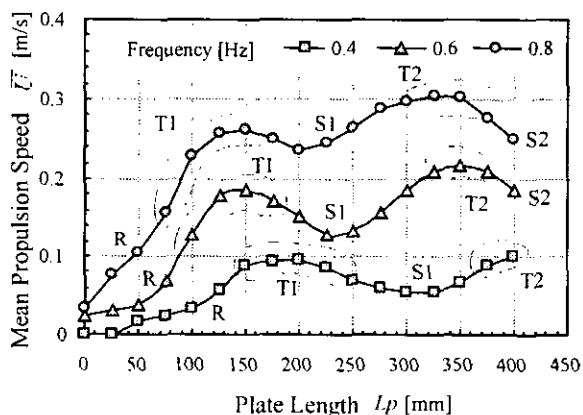


Fig.9 Variation of mean propulsion speed \bar{U} with frequency f and flexible plate length L_p

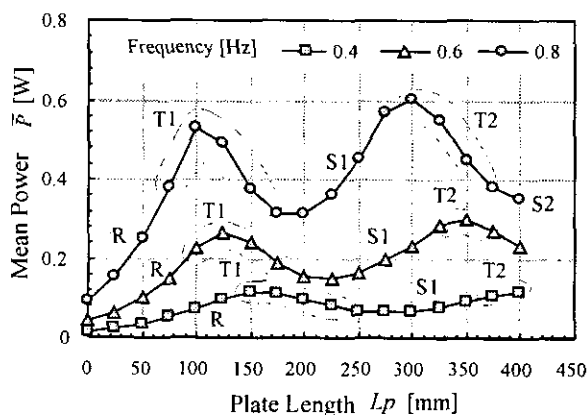


Fig.10 Variation of mean consumed power \bar{P} with frequency f and flexible plate length L_p

図9より平均推進速度 \bar{U} は弾性平板を長くすると単調に増加せず、T1-mode および T2-mode が発生する時に極大値となり、S1-mode が発生している時に極小値となることが分かる。つまり、弾性平板が進行波動的な波動運動する時に平均推進速度が大きくなっている。これは、ロボットが泳動状態にあっても弾性平板の波動運動により周りの流体をうまく後方に押し出しているためと考えられる。また、扇ぎ運動の振動数が高いほど平均推進速度は大きいことが分かる。ここで、最大平均速度は、扇ぎ運動が 0.8Hz で弾性平板が T2-mode の波動運動をしている時に約 0.3m/s であった。

一方、図10より平均消費パワー \bar{P} も、弾性平板を長くして行くと、単調に増加せず、極大値および極小値を持つ曲線となることが分かる。ここで、弾性平板が短い場合には平板はほとんど変形しない R-mode で運動するが、この時には平均消費パワーは弾性平板が長くなるに従って増加する。そして、弾性平板の運動が T1-mode に遷移する付近で極大値となるが、その後は T1-mode の運動の場合には平均消費パワーは減少して行く。これは、弾性平板が T1-mode の波動運動をする場合には、平板が弾性変形することにより平板に作用する流体力ベクトルが進行方向を向き、そのため横力が小さくなったことが理由と考えられる。また、この T1-mode が発生する付近では推力が大きくなることから、図9で示したように平均推進速度は極大値となることが分かる。

さらに、弾性平板が長くなり S1-mode の定在波運動に遷移すると平均消費パワーは極小値となる。これは弾性平板に作用する横力が、平板上の節を挟んで互いに逆位相で運動する部分でキャンセルするためと考えられる。ただし、この場合には弾性平板全体に作用する推進方向の流体力（推力）も小さくなってしまうことから、平均推進速度も極小値となっている（図9参照）。さらに、弾性平板が長くなるに従って平均消費パワーは再び増加するが、T2-mode の波動運動に遷移する付近で最大値となり、その後は平板が長くなるに従って減少する。ここで、T2-mode が発生している時の弾性平板の長さは、T1-mode が発生している時の長さより2倍ほど長いにもかかわらず、T2-

mode での平均消費パワーは T1-mode での平均消費パワーと比較して、同程度かそれより少し大きいくらいである。これは、弾性平板上に半波長以上の T2-mode の波の運動が発生すると、弾性平板に作用する横力が互いに平板上の逆位相で運動する部分でキャンセルするためと考えられる。図 11 にこの半波長以上の波の T2-mode で運動するロボットの連続写真を示す。ここで、図中の連続写真(1)～(6)は 1/6sec 間隔に撮影したものである。

また、図 9 と図 10 を比較すると平均推進速度 \bar{U} と平均消費パワー \bar{P} が極大値および極小値となる弾性平板の長さは必ずしも一致せず、推進効率を高くする最適な弾性平板の長さが存在することが分かる。推進効率については 3. 5. 5 節で説明する。

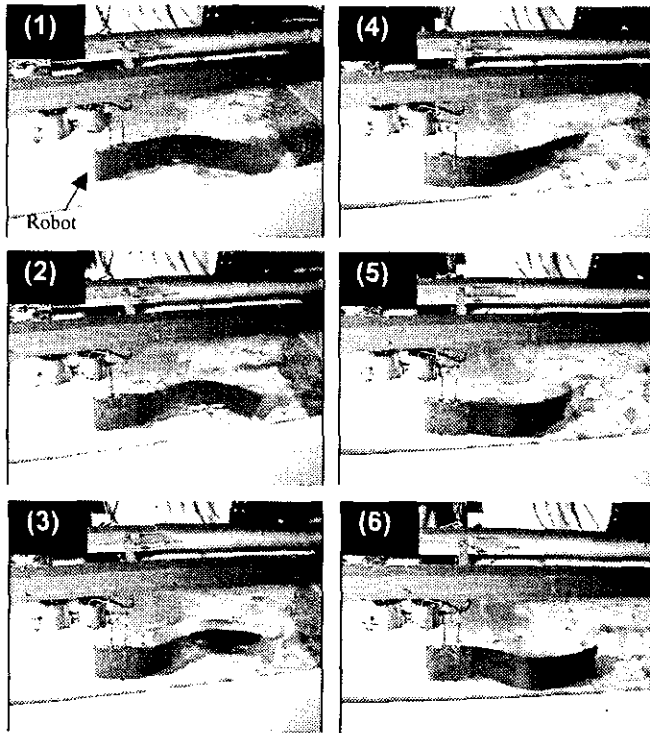


Fig.11 Photographs of T2-mode motion of swimming robot

3. 5. 4 流体抗力

図12に弾性平板がない場合 ($L_p=0$) と、平板の長さ L_p が 200mm と 400mm の弾性平板を取り付けた場合のロボットを引張る速度と平均流体抗力 \bar{D} の関係を示す。図中の曲線は、測定したデータから最小自乗法で求めた近似曲線であり、以下の推進効率を計算する時に用いた平均流体抗力と平均推進速度の関係を表す抗力-速度曲線である。

図12より、流体抗力はロボットの推進速度が速くなるほど、また平板を長くするほど大きくなることが分かる。また、測定した長さ以外の弾性平板を持つロボットに作用する流体抗力は、これらのデータから補間法を用いて求めた。

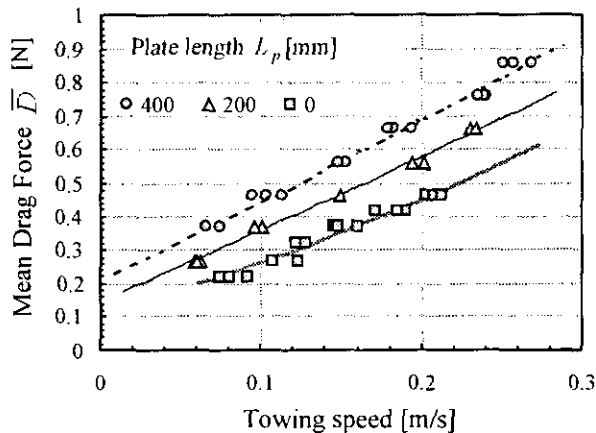


Fig.12 Relationship between mean body drag \bar{D} and towing speed

3. 5. 5 推進効率

図13に弾性平板の長さ L_p とロボットの扇ぎ運動の振動数 f を変化させた場合の推進効率 η を示す。ここで、図中には各実験パラメータで観測された弾性平板の運動モードを示す。

図13より推進効率は、図9と図10の結果から予想されるように、弾性平板を長くすると極大値および極小値をとることが分かる。

特に、弾性平板が長くなり T1-mode の波動運動が発生すると、剛体モードの R-mode に比べて、効率は急激に高くなるのが分かる。さらに、弾性平板が長くなり、弾性平板の運動が T1-mode から S1-mode に遷移する付近、また T2-mode で弾性平板が運動している付近で極大となる。そして、この2つの極大値を比較すると、半波長以上の波の運動である T2-mode で運動している場合の方が、半波長以下の T1-mode で運動している場合よりも大きく、その値は扇ぎ運動の振動数が $f = 0.8\text{Hz}$ の時に、推進効率 η は約 62% と高い値となるのが分かる。つまり、弾性平板に T2-mode の波動運動が発生すると推進効率は高くなるのが分かる。これは、弾性平板に T2-mode の波動運動が発生する場合には、推進速度が大きく、その割に横力が小さくモーターの消費パワーが小さくて済むことが理由と考えられる。

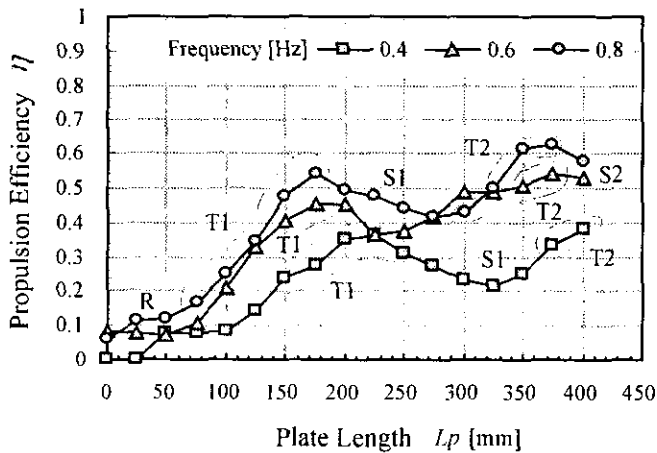


Fig.13 Propulsion efficiency η with varying plate length L_p and frequency f

3. 6 弾性平板の運動と流体流れの様子

図 1 4 (a)～(c)に、弾性平板が R-mode, T1-mode, および T2-mode で運動している時のロボット周りの流体流れの様子を示す。また、図 1 5～1 7 にそれぞれの連続写真を示す。ここで、図中の連続写真(1)～(6)は 1/6sec 間隔に撮影したものである。

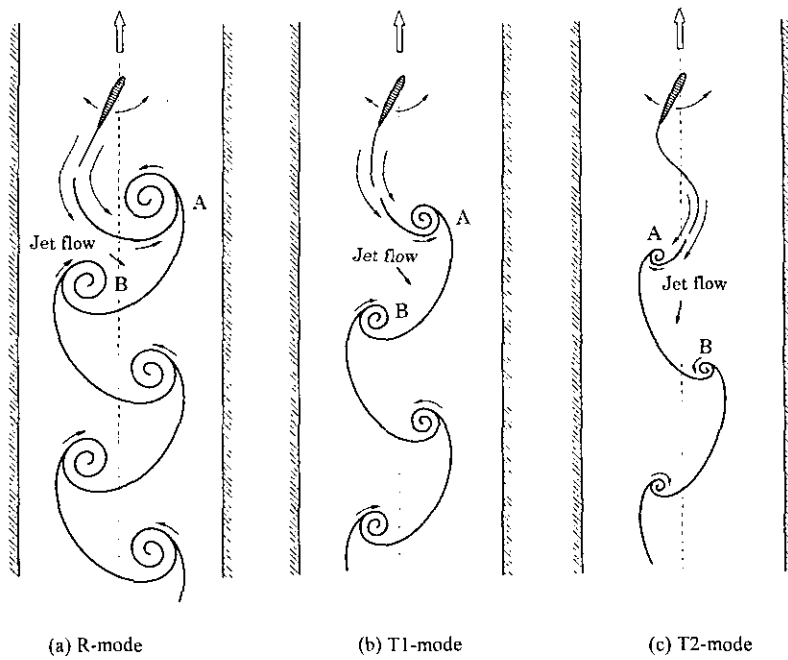


Fig.14 Flow patterns around swimming aquatic mobile robot

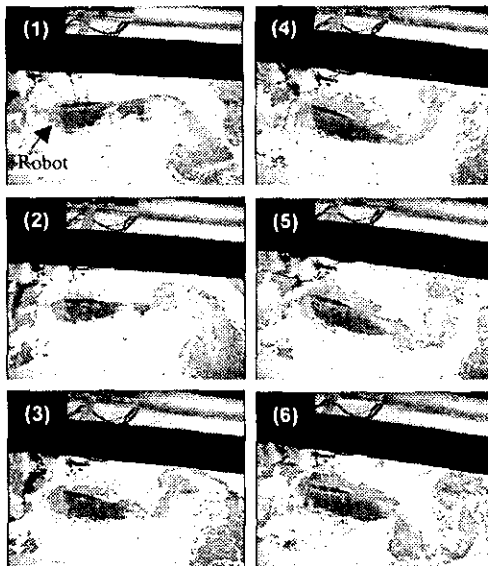


Fig.15 Photographs of flow pattern around R-mode motion of swimming robot

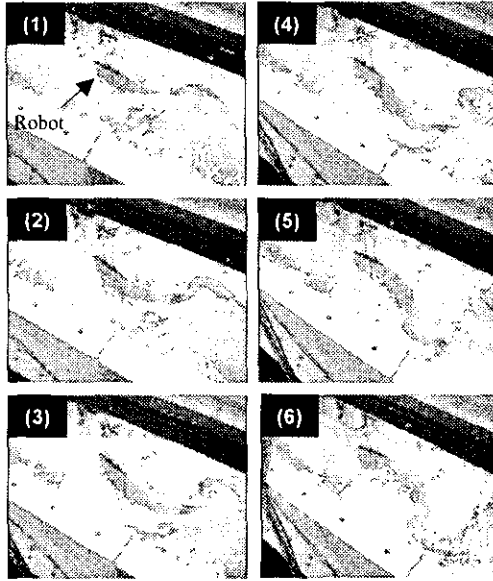


Fig.16 Photographs of flow pattern around
T1-mode motion of swimming robot

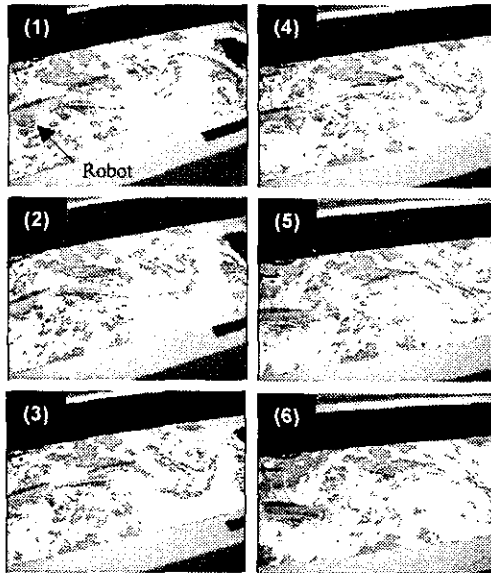


Fig.17 Photographs of flow pattern around
T2-mode motion of swimming robot

これらの流体流れの観測結果より、平板が R-mode の剛体平板の運動を行っている時よりも、波動運動の T1-mode および T2-mode の運動を行っている方が、弾性平板の後縁から剥離する渦の規模が小さく、流体流れは弾性変形した平板に沿って滑らかに後方に押し流される様子が分かる。特に、弾性平板が半波長以上の波動運動である T2-mode で運動する場合には、渦の発生と規模は剛体平板の R-mode で運動する場合に比べて極めて抑制される。ここで、発生する渦のエネルギーはロボットが水中を移動する際に、流体中に放出するエネルギー損失と考えられる。このために、T2-mode の波動運動の時に最も推進効率が高くなったと考えられる。このことから、弾性平板が変形し波動運動する場合には、エネルギーの損失である渦の発生を抑え、かつ滑らかな後方への流体流れを作るために、ロボットの推進効率が高くなることが分かる。

また、流れの可視化実験では弾性平板から剥離する渦の回転方向は、一様流中の円柱後流にできるカルマン渦の回転方向と逆向きであることが観測された。このため、ロボットのすぐ後方に形成される2つの渦（図14中の渦Aと渦B）の間の流れは、後方へのジェット流となっていることが分かる。この後方へのジェット流はロボットを前方に押し推進力を生み出すものと考えられる。

特に、図14(a)および図15に示すように平板が R-mode で運動する場合には、2つの渦（AとB）の規模が大きく、それらの距離が近いために速い流速のジェット流が観測された。しかしながら、この R-mode で運動する平板の後方にできるジェット流の向きは、絶えずロボット後方に向いているわけではなく、大きく蛇行しながら押し出されている。また、この時の平板の後方流れは T1-mode および T2-mode の波動運動に比べ乱れており、エネルギーの損失が大きいと思われる。このために、R-mode の運動の場合には、流れの乱れと横力変動は大きくなるが、ロボットを推進させる推力は大きくなり推進効率が低いと考えられる。

一方、弾性平板が T2-mode の波動運動をしている場合には、図14(c)および図17に示すように、2つの渦（AとB）の規模は小

さく、それらの距離が離れているために、ジェット流の蛇行は小さくその向きはロボット後方に向いている。また、流れの乱れは少なく、ジェット流は弾性平板の後縁から滑らかに放出されている。このために、得られる流体力ベクトルはロボット推進方向を向き、T2-modeの波動運動の時にロボットの推進効率が高くなったと考えられる。

3. 7 ま と め

本研究は、振動的に扇ぎ運動する翼の後縁に、柔軟な魚の尾ひれをモデルにした弾性平板を取付けた水中移動ロボットを製作し、その弾性平板の波動運動によって発生する推力、および推進速度と効率を実験的に明らかにした。また、ロボット周りの流れの可視化を行い、推進効率と弾性平板の運動および流体流れの関係を考察した。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 横力変動に対して推力の大きさを増加させるためには、弾性平板に適度な柔軟性が必要である。

(2) 推進速度と推進効率を増加させる最適な弾性平板の長さとの運動モードが存在する。

(3) 弾性平板の進行波的な波動運動を利用するとロボットの推進速度と推進効率は増加する。特に、弾性平板に1波長以上の波のT2-modeの波動運動が発生する場合には推進効率は高くなる。

(4) 本研究で調べたパラメータの範囲では、弾性平板にT2-modeの波動運動が発生する場合には、扇ぎ運動の振動数が0.8Hzの時に、水中移動ロボットの最大推進速度は約0.3 m/s、最大推進効率は約62%と高い効率となる。

(5) 弾性平板が変形し波動運動を行うと、その周りの流体流れは弾性平板に沿って滑らかに後方に押し流されジェット流を形成する。また、この時は弾性平板後縁から剥離する渦の規模と乱れが抑制され推進効率は高くなる。

参考文献

- (1) 神部 勉, 動物の流体力学的運動, 日本航空宇宙学会誌, 25-277, (1977), 53-62.
- (2) H. ヘルテル著 (土屋 喜一 訳), バイオエンジニアリング (生物の形と運動に学ぶ), (1985), 朝倉書店, 105-168.
- (3) 田中一朗, 永井寛, 抵抗と推進の流体力学 (水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ), (1996), シッフ・アント・オシヤン財団, 9-38.
- (4) 東 昭, 生物の動きの事典, (1997), 朝倉書店, 141-183.
- (5) M. J. Lighthill, Note on the Swimming of Slender Fish, *Journal of Fluid Mechanics*, **9** (1960), 305-317.
- (6) M. J. Lighthill, Aquatic Animal Propulsion of High Hydromechanical Efficiency, *Journal of Fluid Mechanics*, **44** (1970), 265-301.
- (7) M. J. Lighthill and R. Blake, Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 1. Biological Background, and Analysis by Elongated-body Theory, *Journal of Fluid Mechanics*, **212** (1990), 183-207.
- (8) M. J. Lighthill, Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 2. The Pressure Distribution Arising in Two-dimensional Irrotational Flow From a General Symmetrical Motion of a Flexible Flat Plate Normal to Itself, *Journal of Fluid Mechanics*, **213** (1990), 1-10.
- (9) M. J. Lighthill, Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 3. Momentum Enhancement in the Presence of a Body of Elliptic Cross-section, *Journal of Fluid Mechanics*, **213** (1990), 11-20.
- (10) M. J. Lighthill, Biofluidynamics of Balistiform and Gymnotiform Locomotion. Part 4. Short-wavelength Limitations on Momentum Enhancement, *Journal of Fluid Mechanics*, **213** (1990), 21-28.
- (11) T. Yao-Tsu Wu, Swimming of a Waving Plate, *Journal of Fluid Mechanics*, **10** (1960), 321-344.
- (12) T. Yao-Tsu Wu, Hydromechanics of Swimming Propulsion. Part 1. Swimming of a Two-dimensional Flexible Plate at Variable Forward Speeds in an Inviscid Fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, **46** (1971), 337-355.
- (13) T. Yao-Tsu Wu, Hydromechanics of Swimming Propulsion. Part 2. Some Optimum Shape Problems, *Journal of Fluid Mechanics*, **46** (1971), 521-544.

- (14) T. Yao-Tsu Wu, Hydromechanics of Swimming Propulsion. Part 3. Swimming and Optimum Movements of Slender Fish with Side Fins, *Journal of Fluid Mechanics*, **46** (1971), 545-568.
- (15) 小林 俊一, 菅波 正幸, 池谷 光荣, 屈曲運動生物を模倣した水中推進機構のシミュレーション (水ヘビの屈曲運動の場合), *機論*, 58-546, C(1992), 526-531.
- (16) 小林 俊一, 屈曲運動生物を模倣した水中推進機構の推進力特性, *機論*, 60-579, B(1994), 3613-3617.
- (17) 中島 求, 小野 京右, 屈曲形水中推進機構の研究 (第2報, 3関節モデルの流体力特性解析), *機論*, 60-569, B(1994), 141-146.
- (18) 中島 求, 小野 京右, 屈曲形水中推進機構の研究 (第3報, 3関節モデルの消費エネルギー・推進効率特性解析), *機論*, 60-569, B(1994), 147-153.
- (19) 中島 求, 伊井 剛, 小野 京右, 2関節イルカ形水中推進機構の実験的研究 (第1報, 小形機による実験), *機論*, 66-643, B(2000), 695-702.
- (20) 中島 求, 徳尾 健一郎, 小野 京右, 2関節イルカ形水中推進機構の実験的研究 (第2報, 自航式大型実験機による実験), *機論*, 66-643, B(2000), 703-709.
- (21) 森川 裕久, 一色 尚次, 沢田 雅, 本沢 養樹, 振動翼推進に関する研究 (フィンシップ (振動翼推進船) の開発), *日本舶用機関学会誌*, 18-5(1983), 393-400.
- (22) 森川 裕久, 沢田 雅, 一色 尚次, 推進用振動翼の実験的研究, *日本舶用機関学会誌*, 18-4(1983), 303-309.
- (23) 福田 敏男, 川本 敦史, 新井 史人, 松本 英雄, 流体内マイクロ移動ロボットに関する研究 (第1報, 水中マイクロ移動ロボットの機構と遊泳実験), *機論*, 60-569, C(1994), 204-210.
- (24) M.S. Triantafyllou and G.S. Triantafyllou, An Efficient Swimming Machine, *Scientific America*, March (1995), 40-48.
- (25) 寺田 侑二, 水中アニマトロニクスを試み, *日本ロボット学会誌*, 18-2(2000), 195-197.
- (26) 寺田 侑二, 山本郁夫, 弾性振動翼とその人工魚への応用, 作業船,

248(2000), 24-27.

- (27) 渡辺 昌宏, 林 健一, 村松 功一, 小林 信之, 坂井 高章, 柔軟な魚の尾ひれの運動をモデルにした弾性平板の進行波的波動運動による推力特性 (第 1 報, 静水中での推力測定), 機論, No. 00-0670. (67-655, C(2001)に掲載予定)
- (28) 南 茂夫, 科学計測のための波形データ処理, (1986), CQ 出版社. 93.