

実験用魚ロボットの推進性能

平田宏一（正，船舶技術研究所）

1. まえがき

海中技術は，海洋開発や海洋環境保全において極めて重要であり，そのような観点から，海中ロボットの開発が盛んに行われている^{1),2)}．本研究は，魚の泳法を模擬し，魚と同等の運動性能を有する無策無人海中ロボット（魚ロボット）の開発を目指しており，推進特性，旋回特性及び運動制御といった魚ロボットの基本特性を評価することを主目的としている．

本報では，魚の泳法の基本的な原理を解明し，魚ロボットの高効率推進の可能性について検討するため，全長が約 600 mm の実験用魚ロボットを設計・試作した．そして，試作直後の予備試験により尾ひれの形状や運動パターンが遊泳速度に及ぼす影響を測定した．

2. 実験用魚ロボットの設計・試作

2.1 設計指針

実際の魚の泳法は，体全体を波打たせて泳ぐウナギの泳法や長いひれを波打たせて泳ぐカレイの泳法など，多種多様である．本研究では，ニジマスやマグロのように尾部を左右に運動させて推進する魚の泳法を対象としている．図 1 に実験用魚ロボットのモデルとしたニジマス及びマグロの外

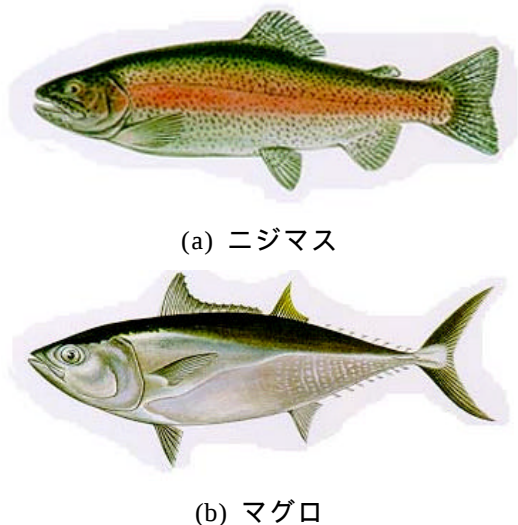


図 1 実験用魚ロボットのモデル³⁾

観を示す³⁾．両者は尾ひれの形状に外観上の特徴があり，三角形の尾ひれを持つニジマスは加速性に優れ，三日月形の尾ひれを持つマグロは高速かつ高効率な遊泳に適しているという特徴がある．本報で設計・試作する実験用魚ロボットは，これら両者の基本的な特性を把握することを設計指針としており，今後の高性能魚ロボットの開発に貢献することを目指している．

実験用魚ロボットの基本設計を進める以前に，数種の小型魚ロボット^{4),5)}を試作して，その性能特性を測定した結果，魚ロボットの高速性や効率性に着目した場合，尾部を駆動する動力源には回転式モータが適していると考えられた．しかし，魚ロボットの運動パターンと運動特性との関係を詳細に検討するためには，複雑かつ多様な運動を模擬する必要がある．そこで，実験用魚ロボットの動力源には，比較的位置制御が容易なラジコン模型用（R/C）のサーボモータ（双葉社，S3101）を用いることとした．

2.2 基本構造

図 2 に試作した実験用魚ロボットの構造，図 3 に実験用魚ロボットの外観を示す．実験用魚ロボットの胴部には，尾部を駆動させるための 2 つのサーボモータ，R/C 受信機及びバッテリーが搭載されている．頭部と胴部の接合部にはニトリルゴム製の O リングを使用し，尾部のリンク機構に連結するロッド部には市販の滑り軸受（ASK 社）を用いることで水密構造としている．

運転時には，図 3 に示すように実験用魚ロボッ

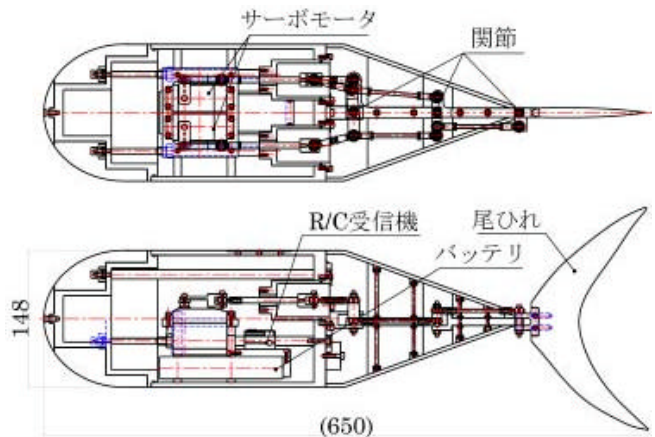


図 2 実験用魚ロボットの構造

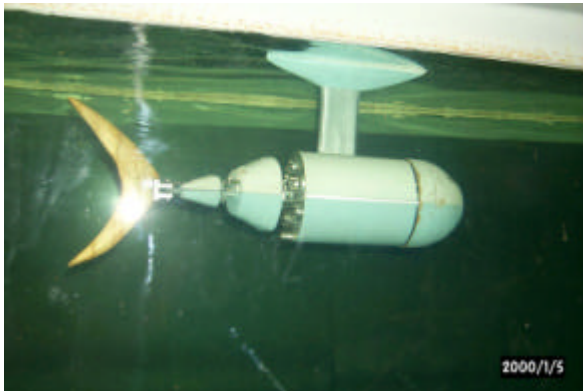


図3 実験用魚ロボットの外観

トの上部にバルサ製のフロートを取り付け、一定の深度で遊泳させる。また、重力と浮力との釣り合いは、頭部及び胴部の後端にステンレス鋼製のおもりを取り付けて調整している。

2.3 尾柄及び尾ひれのリンク機構

図4は、実験用魚ロボットの尾柄及び尾ひれの運動を示している。魚の泳法を模擬する場合、関節が多いほど滑らかな運動を実現できる。しかし、試作した魚ロボットにおいては構造を簡略化するため、関節を3つとしている。図4(a)に示すように、尾柄駆動用サーボモータは、尾柄の2つの関節（尾柄第1関節、尾柄第2関節）を駆動する。リンク機構のクランクアーム長さやロッド長さを調整することで、尾柄のしなるような動きを実現している。また、図4(b)に示すように、尾ひれ駆動用サーボモータは、尾柄第1関節及び尾柄第2関節に設けた回転自由なクランクを介して尾ひれ付け根の関節（尾ひれ関節）を駆動する。これに

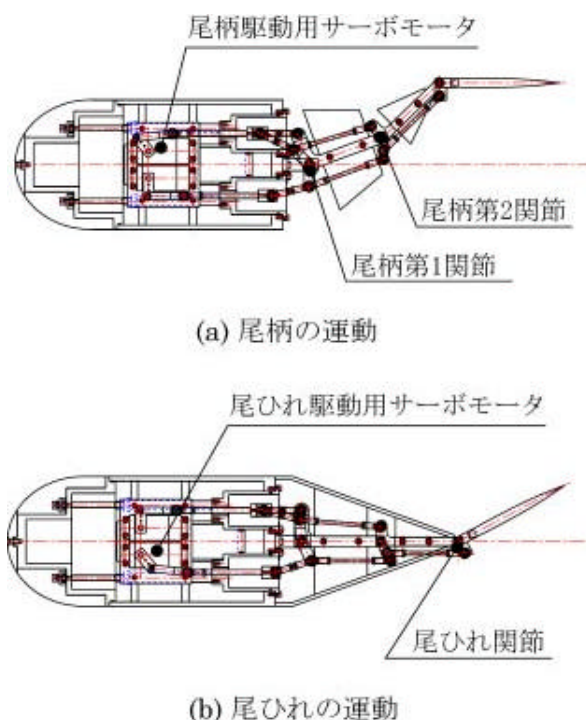


図4 尾柄及び尾ひれの運動

より、尾柄の運動に関わらず、尾ひれを任意の振れ角で運動させることができる。

2.4 尾ひれの形状

図5に実験に使用した尾ひれの形状を示す。尾ひれは、マグロ形とニジマス形の2種類を試作した。これらの材料には硬質な木材を使用している。前述の通り、マグロ形尾ひれとニジマス形尾ひれとは形状が大きく異なり、またニジマス形尾ひれの断面は比較的平面状としており、マグロ形尾ひれの断面は翼形状としている。ニジマス形尾ひれの大きさ（面積）は、図1(a)に示した実際のニジマスの形状・寸法に基づいており、マグロ形尾ひれは、ニジマス形尾ひれと同一の面積となるように図1(b)のマグロの尾ひれを相似拡大させた寸法としている。

また、尾ひれで発生する推進力等を流体力学的な観点から評価する場合には、両者の関節の位置や尾柄部の形状を詳細に検討し、決定する必要がある。しかし、以下の実験ではそれらについての考慮はなされておらず、関節や尾柄の形状は加工性や浮力と重力の調整のしやすさを重視して決定している。

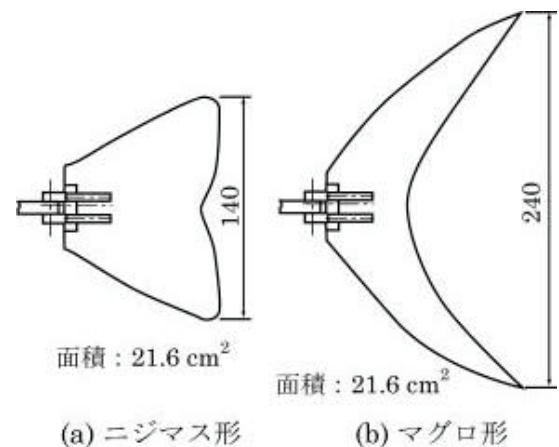


図5 尾ひれの形状

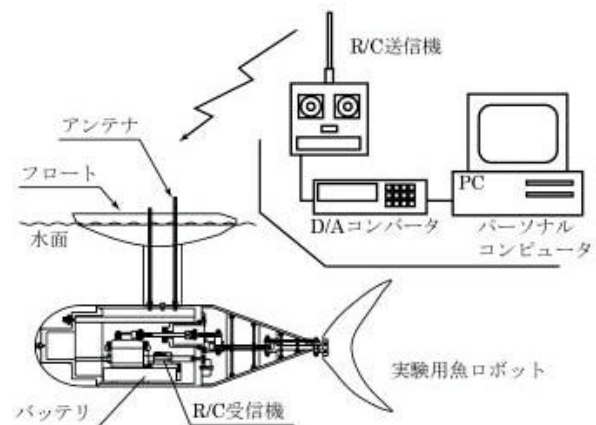


図6 運動制御システムの構成

2.5 運動制御

図6に魚ロボットの運動制御システムの構成を示す。魚ロボットのサーボモータは、R/C送信機とD/Aコンバータを取り付けたパーソナルコンピュータにより制御される。魚ロボットの運動は運動制御プログラムによって多様に設定できるが、現状の制御プログラムは高い周波数における制御信号の発生に若干の問題があり、設定した通りの運動を必ずしも実現していない。高度な制御プログラムの開発や関節の回転角度の測定と制御が今後の課題として残されている。

2.6 運動パターン

図7に実験用魚ロボットの運動パターンの概略を示す。実験用魚ロボットの運動パターンは多様に設定できるが、以下の実験では最も基本的な正弦状の運動を与えている。胴部中心軸に対する尾柄の振れ幅 A_1 (mm) 及び胴部中心軸に対する尾ひれの振れ角 A_2 (deg) は次式で表される。

$$A_1 = K_a A_{1\max} \sin 2\pi f t \quad (1)$$

$$A_2 = K_a A_{2\max} \sin(2\pi f t - \beta) \quad (2)$$

ここで、 f は周波数(Hz)、 t は時間(sec)、 $A_{1\max}$ 及び $A_{2\max}$ はリンク機構により制限を受ける尾柄の最大振れ幅及び尾ひれの最大振れ角であり、 $A_{1\max}=80$ mm、 $A_{2\max}=30$ deg に設定される。 K_a は、振幅の度合いを表す係数(0~1)であり、尾柄と尾ひれとを独立して設定できるが、以下の実験ではすべて同一な値($K_a=0.7$)としている。 β は尾柄と尾ひれの位相差である。

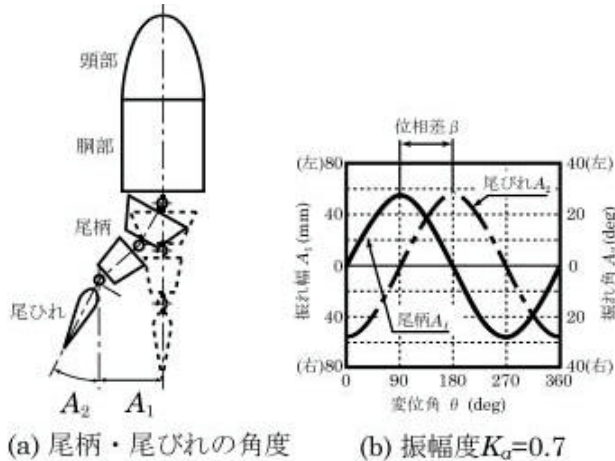


図7 実験用魚ロボットの運動パターン

3. 実験用魚ロボットの性能試験

3.1 実験方法

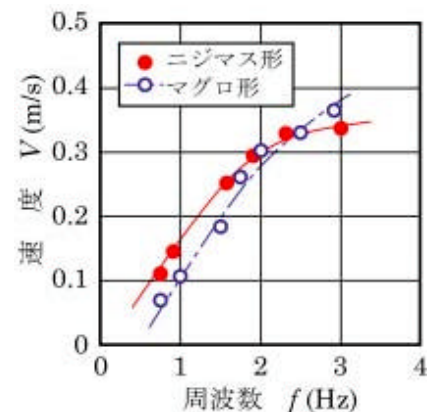
実験は長さ 8 m、幅 0.9 m、深さ 1.2 m の水槽で行った。魚ロボットを助走区間約 4 m で定常な

状態とし、1.9 m の距離を進むのに要した時間をストップウォッチで測定し、遊泳速度を求めた。

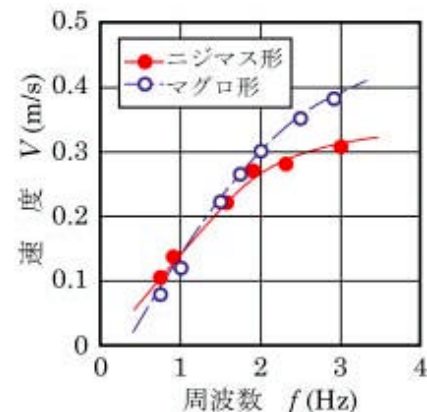
3.2 周波数が速度に及ぼす影響

図8に位相差 β を 60 deg 及び 90 deg とした場合の周波数 f に対する速度 V の実験結果を示す。これより、位相差 β が 60 deg の場合、周波数 f が比較的低い範囲において、マジマス形尾ひれを用いた場合の速度 V はマグロ形尾ひれを用いた場合よりも高いことがわかる。また、周波数 f が比較的高い範囲においては、マグロ形尾ひれを用いた場合の速度 V がマジマス形尾ひれの場合よりも高く、その傾向は位相差 β が 90 deg の場合に顕著に現れている。これは、断面が翼形状をしているマグロ形尾ひれにおいて、低い周波数では尾ひれの運動により生じる揚力の効果が小さいためであると考えられ、マグロ形尾ひれは、高い周波数での運動に適しているものと考えられる。

また、本実験において、実験用魚ロボットは、マグロ形尾ひれを使用し、周波数 f が約 3 Hz の場合、約 0.4 m/s の最高速度が得られた。これは 1 秒間に体長の約 0.7 倍の距離を進んでいることになり、実際の魚が持続可能な速度として 1 秒間に体長の約 2 倍もの距離を進むことを考えると²⁾、かなり低い値である。これは実験用魚ロボットの



(a) 位相差 60 deg



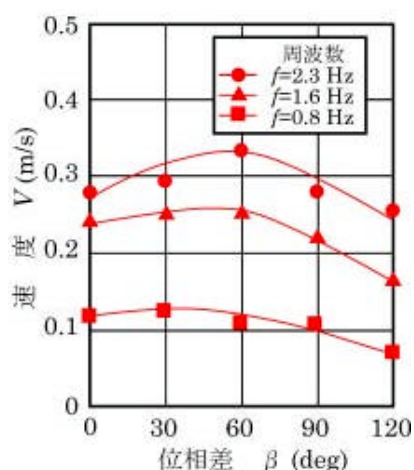
(b) 位相差 90 deg

図8 周波数と速度の関係

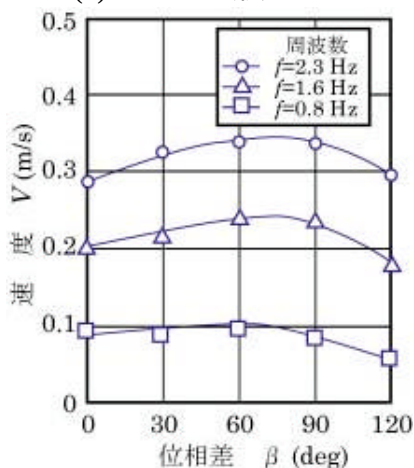
外形や表面形状が高速遊泳に適しておらず摩擦抵抗が大きいことや設定可能な周波数がサーボモータの回転速度によって制限を受けていること等が原因であると考えられる。

3.3 位相差が速度に及ぼす影響

図 9 に周波数 f を 2.3, 1.6, 0.8 Hz とした場合の位相差 β に対する速度 V の実験結果を示す。これより、ニジマス形尾ひれを用いた場合、位相差 β が約 60 deg 程度で最高速度が得られていることがわかる。一方、マグロ形尾ひれを用いた場合、最高速度が得られる位相差 β は、ニジマス形尾ひれを用いた場合よりもやや大きく、90 deg 程度である。これは、ニジマス形尾ひれを用いた場合には、位相差 β が小さいほど尾ひれ後端の振れ幅が大きくなるため、比較的小さい位相差で大きい推進力が得られるためであると考えられる。一方、マグロ形尾ひれの場合、尾ひれの運動により生じる揚力の影響を大きく受けるため、位相差 β が約 90 deg 程度で最も大きい推進力が得られるためであると考えられる。



(a) ニジマス形尾ひれ



(b) マグロ形尾ひれ

図 9 位相差と速度の関係

4. あとがき

実験用魚ロボットを設計・試作し、試作直後の予備試験を行った結果、以下のことがわかった。

実験用魚ロボットは、マグロ形尾ひれを使用した場合、最高 0.4 m/s 程度の速度が得られる。マグロ形尾ひれは、周波数が比較的高く、位相差が 90 deg 程度の場合に高い速度が得られる。

ニジマス形尾ひれは、周波数が比較的低く、位相差が 60 deg 程度の場合に高い速度が得られる。

実験用魚ロボットの周波数の上限は 3 Hz 程度であり、運動制御プログラム及びサーボモータの回転速度によって制限を受けている。

また、実験用魚ロボットを設計・試作し、性能試験を進めるに当たって、R/C 装置を用いた無線操縦では詳細なデータ測定が難しいこと、現状の尾柄形状では詳細な流体力学的な評価が難しいこと等、魚ロボットの研究開発における様々な問題点が明らかになった。それらを踏まえて、今後は回流水槽等を用いた詳細な性能実験、流体力学的な解析並びに消費電力や尾柄及び尾ひれの駆動部に作用する荷重の測定と効率の評価を進める予定である。

参考文献

- 1) (社)日本造船学会海中技術専門委員会：海中技術一般，成山堂(1992)。
- 2) 永井實，イルカに学ぶ流体力学，オーム社，1998。
- 3) 岩井保，他 4 名：学研の図鑑 魚，学研(1998)。
- 4) 平田宏一：小型魚ロボットの設計・試作，日本設計工学会平成 11 年度春期研究発表講演会講演論文集，No.99 - 春季(1999)，29-32。
- 5) 平田宏一，藁科真一：実験用魚ロボットの旋回性能に関する研究，日本設計工学会東北支部，平成 11 年度研究発表講演会(1999)，68-71。