

高速化を目指した実験用魚ロボットの開発

平田宏一（正，海上技術安全研究所）

1. まえがき

近年，海洋開発や海洋環境保全の観点から，海中技術開発が極めて重要な課題となっている．そのような背景に基づき，著者らは魚と同等の運動性能を有する自律型海中ロボットの開発を目指し，魚の泳法を模倣したロボット（魚ロボット）の実験的研究を進めている．そして，現在までに推進性能や旋回性能といった魚ロボットの基本特性について様々な知見が得られている^{1),2)}．

本報では，魚ロボットを高速化するための方法について検討し，高速化を目指した実験用魚ロボットの設計・試作を行う．さらに，実験用魚ロボットの尾ひれの周波数や振幅が遊泳速度及び消費電力に及ぼす影響を測定し，設計計算法の妥当性について検討する．

2 魚ロボットの高速化

現在までに基本特性が測定されている魚ロボットの実験結果に基づき，魚ロボットを高速化する方法について検討する．図1は，著者らによって開発された魚ロボットの構造及び実験結果の一例を示している¹⁾．これより，魚ロボットの速度は，尾ひれの周波数の上昇に伴って増加していることがわかる．また，本魚ロボットはラジコン模型用（R/C）のサーボモータによって尾部を駆動している．しかし，R/Cサーボモータは回転速度と最大トルクの制限により尾ひれを高い周波数で運動

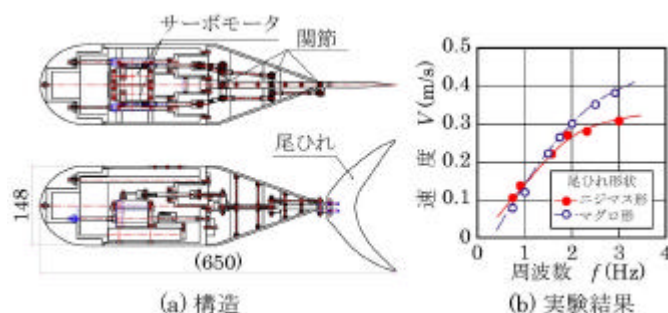


図1 実験用魚ロボットの構造と性能¹⁾



図2 サンマの形状³⁾

させることは難しい．以上の考察より，本報で設計・試作する実験用魚ロボットの尾部の駆動源には，高回転・高出力が得られる回転式直流モータを使用し，尾ひれの周波数を高めることとした．

一方，魚ロボットを高速化するためには，水の流体抵抗による損失を低減する必要がある．そのためには，前方投影面積が小さく，進行方向に細長い体形が適していると考えられた．そこで，実験用魚ロボットの形状は，図2に示すサンマの形状³⁾を参考にすることとした．

3 実験用魚ロボットの設計・試作

3.1 基本構造

以上の検討に基づき，図3に示す実験用魚ロボットの基本構造を決定した．本実験用魚ロボットは，胴体前部，胴体後部及び尾部で構成され，それらの間に旋回用関節及び推進用関節が取り付けられている．魚ロボットは，尾部に多くの関節を設け，実際の魚のように滑らかな運動を行わせることが望ましい．しかし，駆動源に回転式直流モータを用いる場合，高速な回転運動を尾部の滑らかな往復運動に変換する機構が複雑になり，製作が困難になると考えられたため，本実験用魚ロボットは1つの推進用関節を有する構造としている．また，胴体前部に配置したサーボモータにより，旋回用関節を操作することで遊泳時の進路を調整できる構造としている．

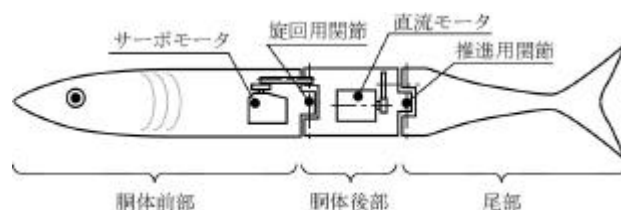


図3 実験用魚ロボットの基本構造

3.2 設計計算

実験用魚ロボットの寸法並びに駆動源や駆動機構の仕様を決定するに当たって，尾部の最高速度・最大荷重に着目した簡易的な設計計算を行った．図4の計算モデルに示すように振動する尾部を1枚の平板と仮定すると，関節に作用する最大トルク及び出力（仕事率）は以下のように求められる．

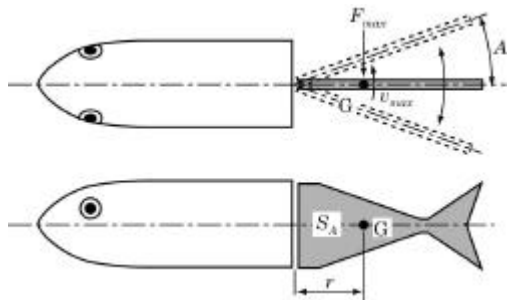


図4 簡易設計計算モデル

平板の重心を G とし、点 G の最高速度 v_{max} を次式で近似する。

$$v_{max} = 2\pi f r \sin A \quad (1)$$

ここで、 f は尾ひれの周波数(Hz)、 r は関節から重心 G までの回転半径(m)、 A は振幅(deg)である。

重心 G に作用する最大荷重 F_{max} は平板の面積 S_A を用いて次式で算出される。

$$F_{max} = C_D \frac{1}{2} \rho v_{max}^2 S_A \quad (2)$$

ここで、 C_D は抵抗係数 ($=1.2$)、 ρ は水の密度 ($=1000 \text{ kg/m}^3$) である。

したがって、関節に作用する最大トルク T_{qmax} 及び最大出力 W_{max} は次式で求められる。

$$T_{qmax} = F_{max} r \quad (3)$$

$$W_{max} = 2\pi T_{qmax} f \quad (4)$$

図5は、最終的に決定した実験用魚ロボットの寸法 ($S_A=108.8 \text{ cm}^2$, $r=95 \text{ mm}$) に基づき、振幅 A を 5, 10 及び 15 deg とした場合の周波数 f に対する最大トルク T_{qmax} 及び最大出力 W_{max} の計算結果を示している。同図には、駆動機構の減速比 d をパラメータとした場合の直流モータ（マブチモータ製、540SH-7520）のトルク・出力特性を併記している。なお、モータ特性はカタログ値⁴⁾から推測した値である。これより、最大トルク T_{qmax}

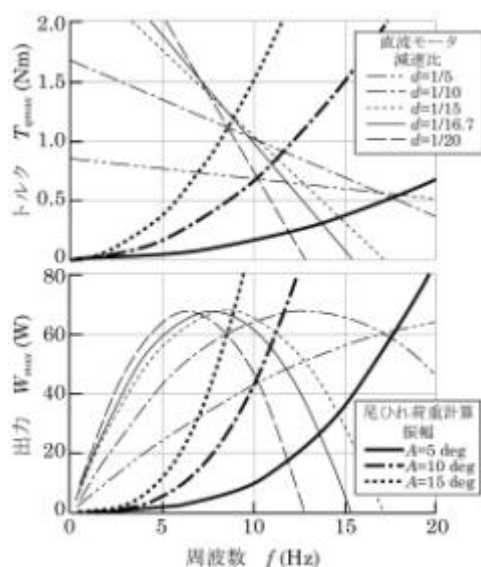


図5 計算結果

及び最大出力 W_{max} は、周波数 f が及び振幅 A の増加に伴い、急激に増加することがわかる。同図において、最大トルク T_{qmax} 及び最大出力 W_{max} の計算結果が直流モータの特性を下回る範囲が、尾部の駆動可能範囲である。また、直流モータの最大出力時の回転数は約 8000 rpm (133 Hz)、最高効率時の回転数は 13000 rpm (217 Hz) であり、その範囲で運転することが望ましい。以上の計算結果及び駆動機構の構造等を踏まえて、減速比 d を $1/16.7$ とし、尾部を最高 8~13 Hz 程度の周波数で振動させることとした。

3.3 実験用魚ロボットの試作

図6及び図7は、以上の検討結果に基づき試作した実験用魚ロボットの外観及び構造を示している。表1は主な仕様を示している。前述の通り、本実験用魚ロボットは、胴体前部、胴体後部及び尾部から構成されており、回転式直流モータで尾部を振動させることにより推進力を発生し、旋回用サーボモータにより進路調整（旋回）を行う。

胴体前部は、直径 80 mm のアルミニウム合金 (A2017) を中ぐり加工により製作されており、その内部には R/C 受信機、直流モータ用アンプ、バッテリー及び旋回用サーボモータが配置されている（図8）。旋回用サーボモータにつなげられたロッドは市販のすべり軸受によってシールされ、胴体後部に接続される。なお、魚ロボットの試作直後に行った試運転において、旋回用関節の剛性不足が確認されたため、以下の実験においては、胴体前部と胴体後部の間に板ばね（SUS304、厚さ 0.5 mm）を挟むことで強度の向上を図っている。

胴体後部には、直流モータと減速機構の平歯車



図6 実験用魚ロボットの外観

表1 実験用魚ロボットの仕様

全長	690 mm
重量	3.5 kg
関節数	2 (推進用1, 旋回用1)
直流モータ (推進用)	マブチ 540SH-7520
定格回転数	13000 rpm
定格トルク	0.0259 N·m
減速比	1/16.7
尾ひれの定格周波数	13 Hz
サーボモータ (旋回用)	フタバ, S9450
最大トルク	0.784 N·m (8.0 kgf·cm)
最高回転速度	0.10 sec / 60 degrees
バッテリー	7.2 V / 2000 mAh

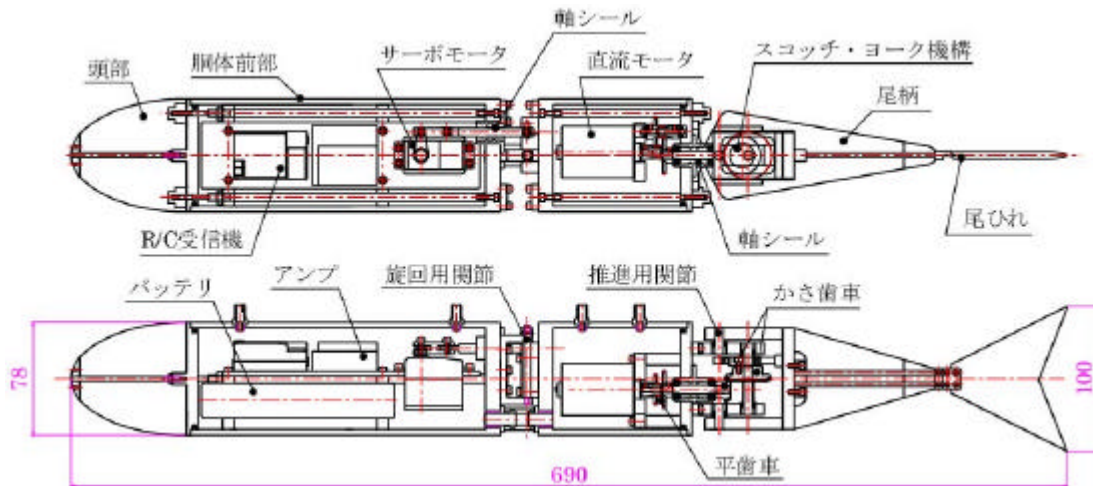


図7 実験用魚ロボットの構造

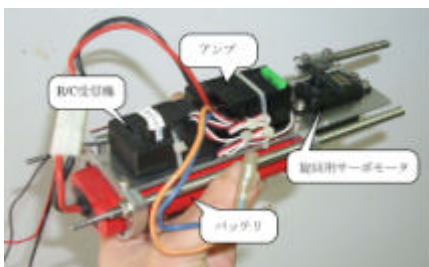


図8 R/C 受信機、バッテリー及びサーボモータ

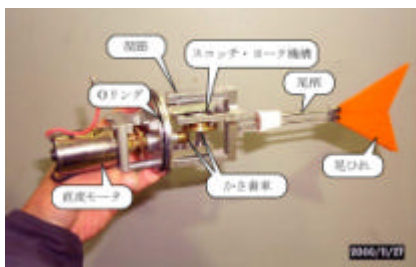


図9 直流モータ及び減速機構

が配置されている（図9）。胴体前部のアンプと直流モータとの配線はシリコンゴム製のホースにより防水されている。減速機構は4段の平歯車及び回転方向を変えるための1組のかき歯車で構成されており、前述の通り減速比を $1/16.7$ としている。回転運動を往復運動に変換する機構には、スコッチ・ヨーク機構が用いられている。スコッチ・ヨーク機構は小型化が可能であるため、サンマのような細長い体形に適合しやすいと考えられたためである。尾ひれの振幅 A は、スコッチ・ヨーク機構のクランク寸法を変更することで設定できる。以下の実験においては、振幅 A を 5, 10 及び 15 deg とする 3 種類のクランクを使用している。

尾部は硬質発泡ウレタン製の尾柄と軟質のポリプロピレン製の尾ひれとで構成される。尾ひれの外側には、ステンレス鋼の薄板（SUS304、厚さ 0.5 mm）により補強されている。

本実験用魚ロボットは、外部から R/C 送信機に

より無線操縦される。そのため、魚ロボットの上部に黄銅製のパイプを取り付けて無線用のアンテナを水面上に露出させる必要がある。また、魚ロボットを一定の深度に保つために発泡ウレタン製のフロートが取り付けられている。フロートの上部には、測定用マイクロコンピュータが配置されている。

3.4 測定装置

本実験用魚ロボットは、直流モータの減速機構に取り付けたフォトマイクロセンサの信号及びアンプと直流モータの間に取り付けた抵抗の両端の電圧をマイクロコンピュータで処理することにより周波数 f 及び直流モータの消費電力 W_e を測定できる。また、遊泳速度 V は、1 m 間隔に設置した赤外線センサの間を通過する時間をタイマで測定することにより求められる。

4. 実験用魚ロボットの性能

実験用魚ロボットを試作した後、長さ 10 m、幅 3 m、深さ 1 m の水槽で実験を行った。周波数、速度及び消費電力は、約 5 m の区間を助走させた後、概ね一定速度の条件で測定した。

4.1 周波数が速度に及ぼす影響

図 10 は、尾ひれの振幅 A を 5, 10 及び 15 deg とした場合の周波数 f と速度 V の関係を示している。これより、速度 V は、周波数 f が高く、振幅 A が大きくなるに従って増加していることがわかる。また、振幅 $A=10$ deg における速度は振幅 $A=5$ deg における速度の約 3 倍にも達しているのに対し、振幅 $A=15$ deg における速度には大幅な増加が見られない。これは、魚ロボットの没水深度が浅いため、振幅を大きくするに従って、尾ひれの運動によって水面に生じる波による抵抗（造波抵抗）が増加したためであると考えられる。また、

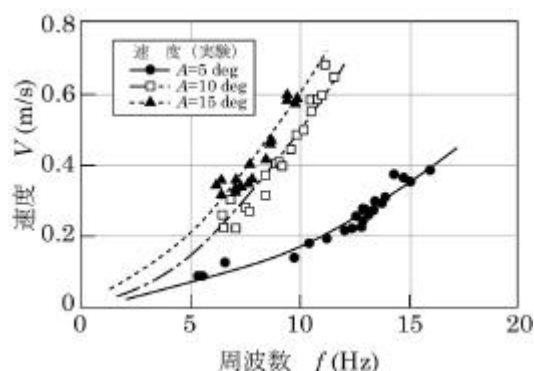


図 10 周波数と速度の関係

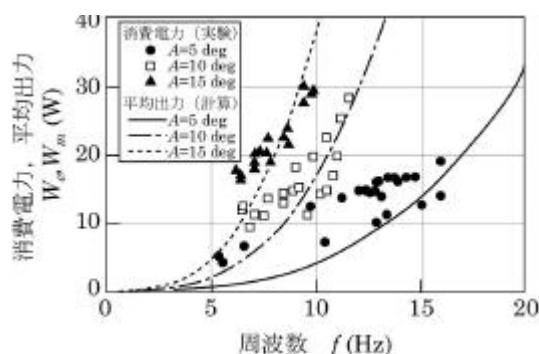


図 11 周波数と消費電力、平均出力の関係

旋回用関節の剛性が不足しているため、旋回用関節が尾ひれの振動の影響を大きく受け、適切な姿勢を保つことができなかったことも適切な推進力が得られなかった原因の一つであると考えられる。

本実験において、実験用魚ロボットの最高速度は、振幅 $A=10$ deg、周波数 $f=11$ Hz のとき、約 0.68 m/s であった。これは、概ね 1 秒間に魚ロボットの全長とほぼ同じ距離を進む速度であり、実際の魚と比べると決して速いとは言えない。しかし、図 1 に示した魚ロボットの速度の約 2 倍に達しており、尾ひれの周波数を高めることは魚ロボットの高速化に有効であることが確認された。

前述の設計計算において、尾ひれの振幅が 5 deg の場合には約 13 Hz 以下、10 deg の場合は約 10 Hz 以下及び 15 deg の場合は約 9 Hz 以下の周波数で運動できると予測された（図 5 参照）。本実験結果は、計算結果をやや上回っているものの、概ね設計計算の結果と一致しており、本報で述べた計算法は駆動源及び駆動機構の仕様を決定する際に有用であると考えられる。ただし、実機における魚ロボット周りの水の流れと計算における仮定とは大きく異なっているのは明らかであり、魚ロボットの詳細な特性を見積もるためには、水の流れを考慮した解析が必要である。

4.2 周波数が消費電力に及ぼす影響

図 11 は、尾ひれの振幅 A を 5、10 及び 15 deg とした場合の周波数 f と消費電力 W_e の関係を示

している。同図には、式 (1)～(4) において最高速度 v_{max} を平均速度に置き換えて計算した平均出力 W_m を併記している。これより、消費電力 W_e は、速度 V と同様、周波数 f が高く、振幅 A が大きくなるに従って急激に増加していることがわかる。また、振幅 A の増加に伴う消費電力 W_e の増加率は、前節で述べた速度 V の増加率と比べてかなり大きい。すなわち、振幅 A を増加させた場合、消費電力 W_e が大幅に増加するにも関わらず、速度 V の増加は少ないことを示しており、尾ひれの運動が推進力へ変換される際の効率は振幅 A の増加に伴い低下しているものと考えられる。

実測の消費電力 W_e は尾部を振動させるためのエネルギー（計算値に相当）に駆動機構の損失を加えたものになるが、本実験結果は計算による平均出力 W_m と同程度である。すなわち、本報に述べた計算法により、大まかな消費電力を推定できるものと考えられ、今後の魚ロボットの設計に有効であると考えられる。

5. あとがき

本報では、魚ロボットの高速化を目指し、全長約 700 mm の実験用魚ロボットを設計・試作した。そして、尾ひれの周波数及び振幅が速度及び消費電力に及ぼす影響について実験を行った結果、以下のことが確認された。

- (1) 尾ひれの周波数を高め、振幅を増加させることで魚ロボットの高速化が可能である。
- (2) 消費電力は、周波数及び振幅の上昇に伴い増加する。
- (3) 本実験用魚ロボットの運転可能な周波数は、設計計算の結果と同程度である。
- (4) 消費電力の実験結果は、尾部の荷重計算に基づく平均出力と同程度である。

一方、本研究により、魚ロボットの高速化における様々な問題が明らかとなった。旋回用関節の剛性向上や造波抵抗の低減等により、さらなる魚ロボットの高速化が可能になると考えられる。また、測定方法や測定装置の高精度化を図り、詳細な推進性能を評価することで、魚ロボットの高性能化が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 平田宏一：実験用魚ロボットの推進性能、日本設計工学会平成 12 年度春期研究発表講演会講演論文集(2000)、163-166。
- 2) 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。
- 3) 岩井保、他 4 名：学研の図鑑 魚、学研(1998)。
- 4) マブチモータ：http://www.mabuchi-motor.co.jp/、(2001)。