

魚ロボットに関する基礎的研究

平田 宏一* , 春海 一佳* , 瀧本 忠教** , 田村 兼吉***

牧野 雅彦**** , 児玉 良明**** , 富田 宏***

Fundamental Study on Fish Robots

by

Koichi HIRATA, Kazuyoshi HARUMI, Tadanori TAKIMOTO,

Kenkichi TAMURA, Masahiko MAKINO, Yoshiaki KODAMA

and Hiroshi TOMITA

Abstract

Fish-like swimming mechanism has a strong possibility of high-speed and high-efficiency performance. The main purpose of this study is to get fundamental knowledge about the new propulsive mechanism. In this report, we developed several experimental fish robots, and investigated their propulsive and turning performance. Also we discussed a control method and a new power source for the fish-like swimming mechanism. Their main contents are as follows.

In order to investigate propulsive performance of the fish-like swimming mechanism, we developed a prototype fish robot. It has about 650 mm body length, and three joints of a tail moved by two servomotors with an original link mechanism. One can simulate the moving patterns of many degrees of freedom by it. In this report, we showed the experimental results of swimming speed measurements using two types of a tail fin.

After discussion of turning modes for a fish robot that uses tail swing, the prototype fish robot, which has 340 mm body length, was developed. Then we measured turning performance with the proposed turning modes. As the result, it was confirmed that the turning performance is dependent on the frequency, amplitude and leaning of the tail. Moreover, we made sure that the prototype fish robot turned quickly from straight propulsion and stationary state.

As one of the control methods of a fish robot, we discussed to apply of fuzzy theory with the focus on swimming speed and consumption of power. As the result of a simple simulation based on the measurements of an experimental fish robot, it was confirmed that a fish robot can be easily and suitably controlled by the fuzzy theory.

As one of the power sources for the fish-like swimming mechanism, we have examined to apply a special Stirling engine. The engine has a characteristic that the output power can be derived directly from oscillating motion of a piston. In the case of the fish-like swimming mechanism, the piston can drive the tail directly. A great deal of mechanical frictional loss can thus be reduced. This mechanism should result in high potential for efficiency.

* 環境・エネルギー研究領域

** 国土交通省（旧水海技術部，出向中）

*** 海洋開発研究領域

**** 知的乱流制御研究センター

目 次

1. 緒 言
2. 魚ロボットの運動と特徴
 - 2.1 魚ロボットの推進方法
 - 2.2 魚ロボットの旋回方法
 - 2.3 魚ロボットの運動制御
 - 2.4 魚ロボットの動力源
3. 推進性能実験用魚ロボット
 - 3.1 推進性能実験用魚ロボットの開発
 - 3.1.1 推進性能実験用魚ロボットの構造
 - 3.1.2 運動制御及び運動パターン
 - 3.2 推進性能実験用魚ロボットの推進性能
 - 3.2.1 実験方法
 - 3.2.2 周波数が速度に及ぼす影響
 - 3.2.3 位相差が速度に及ぼす影響
 - 3.3 推進性能実験用魚ロボットの抵抗測定
 - 3.3.1 実験方法
 - 3.3.2 実験結果
 - 3.4 まとめ
4. 旋回性能実験用魚ロボット
 - 4.1 旋回性能実験用魚ロボットの開発
 - 4.1.1 旋回性能実験用魚ロボットの構造
 - 4.1.2 運動制御及び運動パターン
 - 4.2 旋回性能実験用魚ロボットの性能
 - 4.2.1 直進性能実験
 - 4.2.2 旋回性能実験
 - 4.3 まとめ
5. 魚ロボットのファジィ制御
 - 5.1 回転式直流モータを使用した実験用魚ロボットの性能とモデル化
 - 5.2 ファジィ理論の制御規則
 - 5.3 計算方法
 - 5.4 計算結果及び考察
 - 5.5 まとめ
6. 魚ロボット用スターリングエンジンの検討
 - 6.1 セミフリーピストン形スターリングエンジン
 - 6.2 魚ロボットへの応用
 - 6.3 実験用スターリングエンジンの構造と性能
 - 6.3.1 実験用スターリングエンジンの構造
 - 6.3.2 測定装置及び実験方法
 - 6.3.3 実験用スターリングエンジンの性能特性
 - 6.4 魚の推進方法を利用した模型ボートの開発
 - 6.4.1 エンジン及び模型ボートの構造
 - 6.4.2 模型ボートの性能試験
 - 6.5 まとめ
7. 結 言
- 参考文献

1. 緒 言

省エネルギーの観点から、水上・水中の交通機関の高効率化が求められている。従来の船舶の推進に関する研究では、抵抗性能と推進性能を分離して取り扱い、それぞれの最適化を追求してきた。抵抗性能では、特に船型に起因する抵抗の研究が進み、その極小化が図られている。しかし、船舶の抵抗に大きく影響する摩擦抵抗を低減するのは極めて難しくなっているのが実情である。推進性能においては、1845 年、外輪船との綱引にスクリュープロペラ船が圧勝して以来、推進装置としてはスクリュープロペラ全盛という現状となった。さらなる効率化追求にはブレードスルー技術の必要性が認識されている。

本研究では、推進と抵抗の発生メカニズムが相互に干渉しあう魚の泳法について研究を行い、新しい高性能な推進装置開発のための基礎的な知見を得ることを主目的としている。本研究において得られた知見に基づいて開発される推進・旋回装置を利用することによって、高度な自律型海中ロボットの開発が可能になるものと考えている。

本研究では、実験ツールとして、魚の泳法を模擬するロボット(以下、魚ロボットと称す。)を開発し、本推進方法の推進性能ばかりでなく、大幅な性能向上が見込まれる旋回性能を含めた基本特性を評価する。さらに、魚ロボットの運動制御手法や動力源等の要素技術について検討する。

なお、本報告は、平成 11 年度に実施した重点基礎研究「自己推進運動体の効率的水中推進に関する基礎的研究」並びに平成 12 年度以降に実施している一般研究の研究成果の一部をまとめたものである。魚ロボットに関連する研究は一般研究で継続して行われているため、本報告はこれまでに得られた知見を中間報告として取りまとめたものと位置づけている。

2. 魚ロボットの運動と特徴

魚の泳法や魚ロボットに関する研究は、国の内外で活発に行われてきた¹⁾⁻³⁾。それらの研究の多くは、流体力学的な観点から、主として魚の推進効率の高さに着目している。本研究では、魚ロボットの推進性能ばかりでなく、旋回性能、制御及び動力源を含めた基本性能の評価と要素技術の構築を目指している。本章では、実験ツールとしての魚ロボットの設計指針を見出すため、実際の魚の泳法に基づき、魚ロボットの推進方法、旋回方法、制御手法及び動力源について検討する。

2.1 魚ロボットの推進方法

実際の魚は多種多様な方法で遊泳しているが、全ての魚に共通して言えることは、水を後方に押し出して推進しているということである。米国の動物学者 Breder は、尾ひれの長さや運動の程度によって魚の推進方法を図 2.1 に示すウナギ形、アジ形及びハコフグ形に分類した⁴⁾。ウナギ形は細長い体全体をくねらせて泳ぐ方法、アジ形は尾ひれと体の後半部を使用して泳ぐ方法であり、マス、コイ、カツオ及びマグロ等の高速魚がこれに分類される。ハコフグ形は体をほとんど使わずに尾ひれだけを動かして泳ぐ方法である。一方、魚の推進原理あるいは解析法として、進行波による推進、細長体理論及び振動翼理論等が提案されている¹⁾。

本研究では、これらの分類や推進原理に基づき、魚ロボットの推進方法を(1) 進行波による推進、(2) 体全体を利用する推進、(3) 振動翼による推進、(4) 振動板による推進の 4 種類に分類する⁵⁾。これは、主として魚ロボットにおける駆動機構の機械設計に着目して分類されているため、実際の魚の泳法や厳密な流体力学には必ずしも対応したものではない。しかし、このような分類を行うことで、魚ロボットの設計指針が明らかとなり、その開発を迅速に進めることができる。

尾ひれを運動させて推進する魚(水棲動物)には、クジラやイルカのように尾ひれを上下に運動させるものと図 2.1 に示した魚のように尾ひれを左右に運動させるものがある。推進性能において、両者の本質的な違いはないと考えられるが、本研究では次節に述べるように尾ひれの運動を利用した旋回性能について検討するため、尾ひれを左右に運動させる魚ロボットを対象としている。

(1) 進行波による推進

図 2.2 は細長い体に進行波を発生させて前進する推進方法であり、波の伝播を利用して推進している。推進力を得るためには、進行波の速度が前進速度よりも大きく、振幅を尾に向かって増加する必要がある。進行波による推進は、波の向きを急激に変化さ

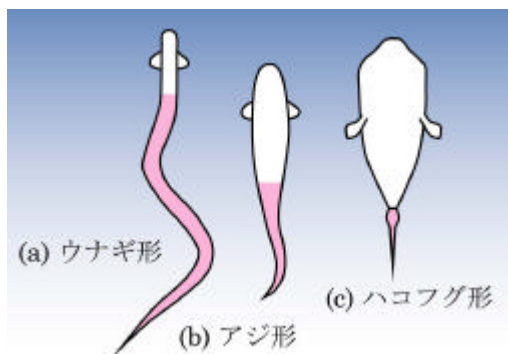
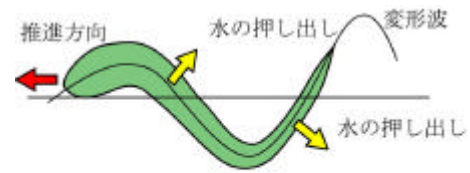
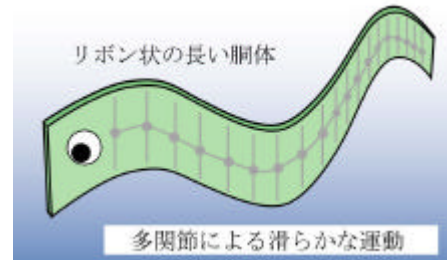


図 2.1 魚の泳法の分類

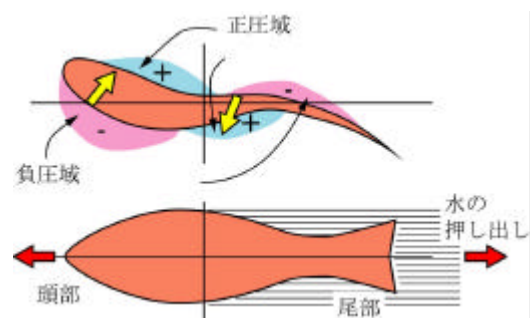


(a) 推進方法の概念図

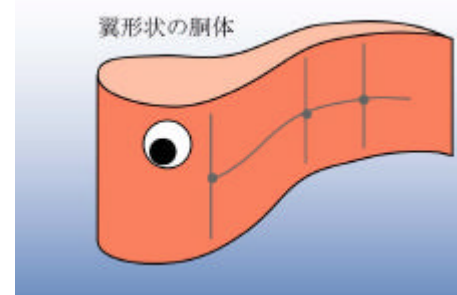


(b) 魚ロボットの概念図

図 2.2 変形波による推進



(a) 推進方法の概念図



(b) 魚ロボットの概念図

図 2.3 体全体を利用する推進

せることができ、前後の動き、すなわち細かい位置制御が容易であるという特徴がある。この推進方法を利用した魚ロボットは多関節による体全体の滑らかな運動を必要とし、それぞれの関節の制御はかなり複雑になる。しかし、適切かつ高度な制御を実現できれば、巧みな位置制御を必要とするような狭い水域で活動する海中ロボット等に利用できると考えられる。

(2) 体全体を利用する推進

図 2.3 に示す推進方法は、尾ひれの運動と体全体の運動の両方を利用し、水を後方に押し出して推進する。実際の魚としては、サケやマスがこの推進方法に分類される。図 2.3(a)は体全体の運動による圧力分布を模式的に表したものである。このように体全体に正圧域及び負圧域（あるいは作用・反作用の力）が存在し、それらの合力が前進方向の推進力となる。また、図 2.3(b)に示すように、体全体を 1 枚の翼と見なした場合、魚口ポット全体に対する翼面積が大きいことから、瞬発的な大きな推進力を発生でき、静止時からの高い加速性能を期待できる。また、推進力の方を任意に操作し、体全体の揚力を利用することで高い旋回性能を期待できること、動力源の出力を体全体の運動に分散できるため集中荷重が生じにくいこと等の利点がある。しかし、体全体を駆動するために必要なエネルギーが大きく、体全体に受ける水の抵抗が増大しやすいため、高速・高効率推進には適していないと考えられる。

この推進方法に分類されるサケやマス等の魚は、一般に三角形の尾ひれを有しており、後述する振動翼による推進に分類される魚が持つ三日月形尾ひれと大きく異なる形状である。本報告書の第 3 章では、推進性能実験用魚口ポットに形状が異なる 2 種類の尾ひれを取り付け、それらが推進性能に及ぼす影響を調べている。

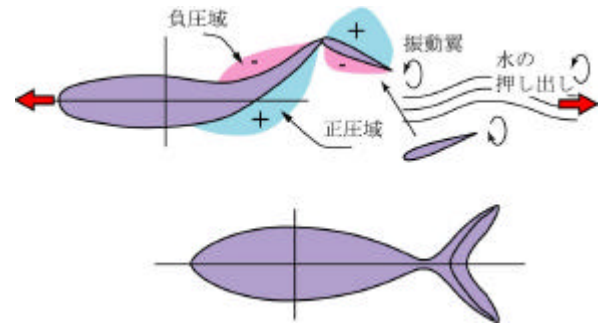
(3) 振動翼による推進

図 2.4 に示す振動翼による推進は、単独の翼と見なされる尾ひれを振動させることで生じる揚力を利用した推進方法である。振動翼の運動は、尾柄（胴体後部の尾ひれ付け根部分）の運動による尾ひれの平行運動（ヒービング運動）と尾ひれそのものの回転運動（フェザリング運動）とを重ね合わせたものであると見なせ、マグロやカツオ等の実際の魚ではこれらに 90 deg 程度の位相差を与えている¹⁾。また、これらの魚の尾ひれは、翼幅が大きく翼弦が小さい三日月形をしており、そのアスペクト比（＝翼幅 b / 翼弦 c ）は上述のサケやマスの三角形尾ひれと比べてかなり大きい。大きいアスペクト比の翼は、翼面積あたりの抵抗が小さく、揚力（推進力に相当）が大きいという特徴がある。すなわち、高い流体力学的特性を持つ尾ひれと抵抗が少ない流線形の胴体とを組み合わせることで、この推進方法の優れた特徴が活かされる。抵抗が小さい胴体と高性能な尾ひれによって魚口ポットの高速遊泳が可能となる。そして、魚口ポット全体から見ると翼面積が小さいため、尾ひれを駆動するのに必要なエネルギーは相対的に小さくなり、高効率推進が可能となる。しかし、本推進方法の問題点として、体全体に対する推進力が小さく、静止時からの高い加速性能が期待できな

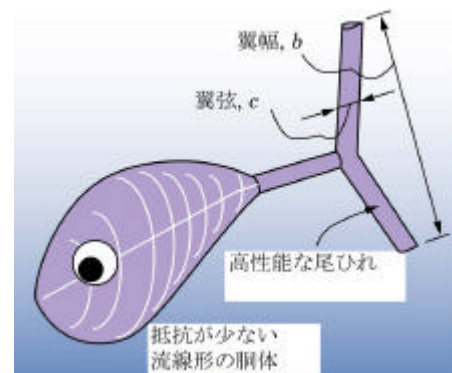
いこと、動力源からの駆動力が尾ひれ付け根の関節に集中するためその強度設計が重要になること等があげられる。

(4) 振動板による推進

図 2.5 に示す振動板による推進は、図 2.1(c)のハコフグ形と同様、体をほとんど使わずに板状の尾ひ

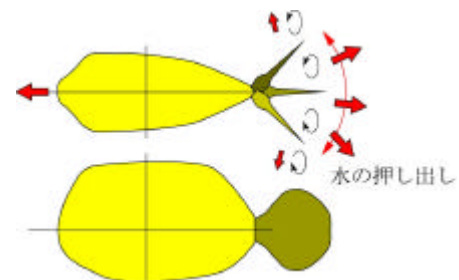


(a) 推進方法の概念図

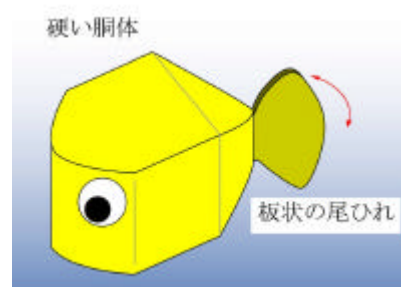


(b) 魚口ポットの概念図

図 2.4 振動翼による推進



(a) 推進方法の概念図



(b) 魚口ポットの概念図

図 2.5 振動板による推進

れだけを動かして推進する方法である。上述した尾柄の運動を利用する振動翼による推進方法と比較すると、ヒール運動がないことが特徴と言える。この方法は尾ひれの運動により押し出される水の向きが左右方向に分散されやすい。すなわち、後向きの一様な水の押し出しが難しいため、上述した(1)～(3)の推進方法と比べて、速度及び推進効率の点で劣っているのは明らかである。しかし、この推進方法は、関節が少ないことから駆動部での機械損失を小さくでき、機械効率の点で有利である。そして、機構が簡単にできることから小型の魚口ボットに適した推進方法であると考えられる。なお、この推進方法の性能向上策として、板状の尾ひれに適切な弾性を持たせ、押し出す水の向きを安定させる方法が考えられる。

2.2 魚口ボットの旋回方法

実際の魚は、胸ひれや腹ひれを巧みに利用しながら旋回している。本研究で開発する魚口ボットは、運動制御を簡略化するために、胸ひれ及び腹ひれの運動を利用しない形式を対象としている。魚口ボットが、図 2.3 に示す体全体の運動を利用できる場合、次の 3 種類に分類される旋回方法が可能と考えられる^{6),7)}。他に、これら 3 種類の組み合わせといった旋回方法も考えられるが、本分類によって魚口ボットの基本的な旋回性能を概ね把握できるものと考えている。なお、本報告書の第 4 章では、旋回性能を調べるために開発した旋回性能実験用魚口ボットにより、以下の旋回方法における旋回性能を測定している。

(1) 旋回モード A

図 2.6 に示す旋回モード A は、尾柄及び尾ひれの運動を左右どちらかに偏らせて運動させる旋回方法である。これは、尾柄及び尾ひれが推力を発生させながら、魚口ボットの頭部及び胴体が船舶における方向舵と同様の働きをすると考えられる。このように、推進と方向舵の 2 つの作用を考慮することで、旋回性能の解析や旋回角度の制御が比較的容易に可能であると考えられる。

(2) 旋回モード B

図 2.7 に示す旋回モード B は、魚口ボットを直進運動させた状態から、尾柄及び尾ひれを左右のどちらかに偏らせた状態で運動を停止させて旋回する方法である。この直進運動の慣性力を利用した方法は、体全体で発生する揚力を旋回に利用するため、上述した尾柄及び尾ひれを左右に偏らせながら旋回する方法より、旋回直径を小さくできると考えられる。また、静止状態の魚口ボットの体形を 1 枚の翼とみなすことで、その揚力及び抗力を概算し、さらに直進運動時の慣性エネルギー（速度）の兼ね合いを考

慮することで解析及び運動制御が可能であると考えられる。

(3) 旋回モード C

図 2.8 に示す旋回モード C は、魚口ボットを静止させた状態から、尾柄及び尾ひれを左右のどちらかに勢よく運動させて旋回する方法である。これは、主として運動部の慣性力及び抗力を利用し、重心周りの回転モーメントを発生させる方法である。静止時からの旋回が可能であり、旋回直径を最も小さくできると考えられる。しかし、強い慣性力を利用する場合、旋回角度の制御が困難であり、瞬時に旋回させるためには、尾柄及び尾ひれを駆動するための十分なトルクを有する動力源が必要となる。したがって、魚口ボットに使用する動力源のトルク及び運動速度等を十分に考慮する必要があると考えられる。

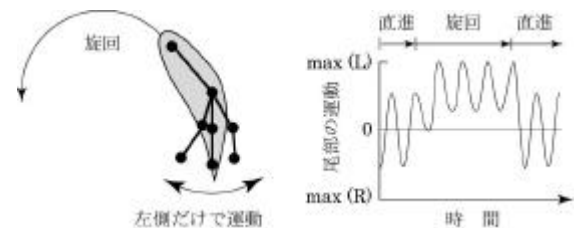


図 2.6 旋回モード A (尾柄・尾ひれの運動を左右に偏らせる方法)

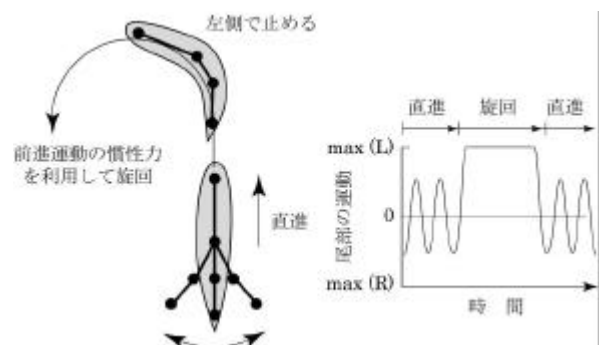


図 2.7 旋回モード B (直進運動の慣性力を利用する方法)

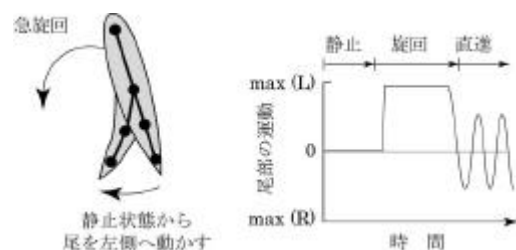


図 2.8 旋回モード C (往復部の慣性力及び抗力を利用する方法)

2.3 魚ロボットの運動制御

魚の泳法を模擬した推進装置は複雑な運動を有するため、魚ロボットの自律化を目指す場合、その最適化のための運動制御が極めて重要となる。以下、フィードバック制御と通信手段の有無に着目して、魚ロボットの開発手順を検討する。フィードバック制御とは、結果を確認して希望の結果よりはずれていればそれを修正するという自動制御を試みることである。すなわち、魚ロボットにセンサを搭載し、それにより検出される測定結果を次の運動に反映させることである。また、通信とは、外部（陸上）の操作者が主要な動作を指令することである。これらの有無を考えることで、図 2.9 に示す魚ロボットの開発手順が考えられる。

最初のステップとして、模型魚ロボットの開発がある。ここで「模型魚ロボット」とは、フィードバック制御及び通信手段を持たない魚ロボットである。この形式には、電源の投入と同時に一定の運動を行う魚ロボットやあらかじめ与えた時系列データに従って動作する魚ロボット等が含まれる。この形式の魚ロボットは、簡単に製作できるため、要素技術の動作確認等に適しており、外部に測定装置を設けることで、ある程度の性能を把握することも可能である。

次のステップとして、外部操作式魚ロボットの開発がある。ここで「外部操作式魚ロボット」とは、フィードバック制御を持たないが、通信手段を有するロボットであり、本報で述べる実験用魚ロボットがこれに当たる。この形式では、陸上の操作者が、進む、曲がる、速度を上げる、下げる等の主要な操作を行う。通信手段としては、無線（ラジオコントロール、R/C）あるいは有線がある。本報で述べる実験用魚ロボットはR/Cによる操作を行っているが、その場合、アンテナを水上に露出させる必要があり、実用的な通信方法ではない。

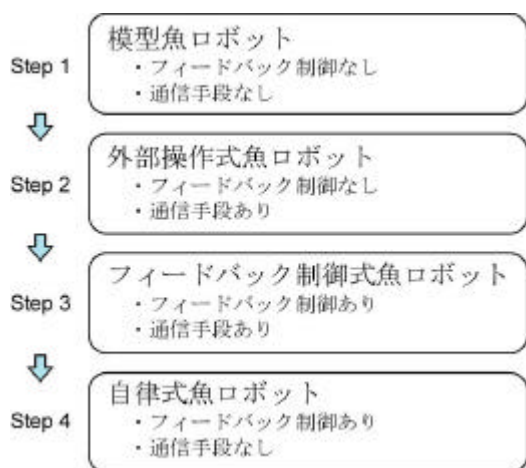


図 2.9 魚ロボットの開発手順

さらに、フィードバック制御式魚ロボットの開発がある。この「フィードバック制御式魚ロボット」とはフィードバック制御と通信手段の双方を有するロボットであり、魚ロボットに搭載されたセンサによる検出結果を利用して、尾部の振幅、周波数及び位相差等の運転パラメータの制御を行う。第 5 章では、運転パラメータを適切に設定するため、ファジィ理論を適用した運動制御法を提案している。しかし、魚ロボットにセンサを搭載することが困難であったため、実機による動作確認には至っていない。

本研究の最終目的である自律式魚ロボットは、フィードバック制御を有し、通信手段を持たない形式である。この形式は、運転パラメータを制御するためのセンサの他にも、位置センサ、障害物センサ及び深度センサ等の周囲の状況を把握するためのセンサが必要であり、高度な制御技術が必要不可欠である。また、魚ロボットの自律化を実現するためには、使用するアクチュエータ（動力源）、魚ロボットの用途、寸法及び構造等を踏まえた制御手法やそれら进行处理のためのコンピュータ技術が重要であり、解決すべき課題は極めて多い。

2.4 魚ロボットの動力源

従来のスクリュープロペラは回転運動を利用するのに対し、魚の泳法を模擬した推進方法は尾部の往復運動を利用している点が大きく異なる。一般的によく用いられているモータやエンジンは回転軸あるいはクランク軸の回転運動を動力として取り出している。そのような回転式のモータやエンジンを魚ロボットに利用する場合には、回転運動を往復運動に変換する機構が必要となる。魚の泳法を模擬した推進方法は、高効率推進を達成できる可能性がある。しかし、魚ロボットをシステムの観点から高性能化するためには、往復運動に適した動力源あるいは損失が少ない往復運動への変換機構の開発が重要である。

本研究では、魚ロボットの動力源として、R/C 用サーボモータを利用した形式、直流モータの回転運動を利用した形式及びスターリングエンジンを利用した形式について検討した。表 2.1 はそれらの特徴と魚ロボットへの適用性を検討した結果である。

R/C 用サーボモータは、比較的安価であり、無線操縦による取り扱いが容易である。また、位置制御機構（サーボ機構）が内蔵されているため、複雑な運動を必要とする魚ロボットへの適用が容易である。しかし、市販の R/C 用サーボモータは、内部に多くの減速歯車を有しているため機械的な損失が大きく、また回転速度及びトルクに制限を受けるため、魚ロボットの高速度・高効率化は難しい。

回転式直流モータは、多くの形式が市販されてい

表 2.1 魚ロボット用動力源の特徴

	種 類	取扱性	トルク特性	位置制御	効率	魚ロボットへの適用性
1	R/C 用サーボモータ				×	複雑な運動パターンを必要とする魚ロボットに適している。
2	回転式モータ	○		×	○	尾部を高い周波数で運動させることができるため、魚ロボットの高速度が可能である。
3	スターリングエンジン	×	○	×		高性能エンジンの開発によって長時間の航行が可能な魚ロボットを実現できる。

(○ : 優れている , ◯ : やや優れている , : 普通 , × : 劣っている)

るため、駆動トルクや回転速度の点で問題が生じることは少ない。しかも、消費電力の測定が容易であるため、実験用魚ロボットに適していると考えられる。しかし、位置制御機構を有していないため複雑な運動パターンを模擬することは難しい。

スターリングエンジンは高効率を達成しうる外燃機関であるため、高エネルギー密度の熱源を利用することで魚ロボットの長時間航行を実現できる可能性がある。しかし、電気エネルギーを利用した他の動力源と比べて、熱源及び排気ガスが取り扱いにくいことや出力制御が困難であること等、課題は多い。

一方、産業ロボットの分野では、電磁式、空気圧あるいは油圧のリニアアクチュエータや圧電効果あるいは超音波を利用したアクチュエータの開発が活発に行われている⁸⁾。表 2.1 に示した動力源や産業用ロボットの分野で開発が進められているアクチュエータは、それぞれ利点や問題点があるため、実用的な魚ロボットを開発する際には開発目的、用途、寸法あるいは航行時間や遊泳速度といった仕様について検討を行い、適した動力源を選択する必要がある。

なお、第 3 章及び第 4 章で述べる推進性能及び旋回性能を測定するための実験用魚ロボットは、尾部を任意の運動パターンで動かす必要があるため、その動力源には R/C 用サーボモータを使用している。第 5 章で述べるファジィ理論による運動制御シミュレーションでは、回転式直流モータを使用した実験用魚ロボットの試験結果を用いている。第 6 章では、新たな魚ロボット用動力源として、特殊なスターリングエンジンの採用を提案し、その適用性について検討している。

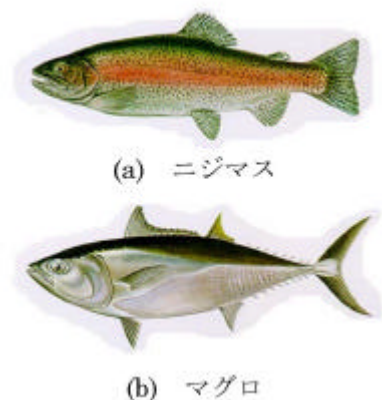
3. 推進性能実験用魚ロボット

本章では、魚の泳法を模擬した推進方法の推進性能を調べる実験ツールとして設計・試作した、全長約 650 mm の推進性能実験用魚ロボットを紹介する。

本推進性能実験用魚ロボットには自身の位置を検出するセンサ類が搭載されておらず、陸上の操作者が無線操縦する形式であり、図 2.9 における外部操作式魚ロボットに相当する。以下、魚ロボット開発の概要を述べる。そして、水槽実験により自航実験を行い、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のでその結果を示す^{9),10)}。さらに、推進性能実験用魚ロボットと同一形状のモデルを用いた曳航実験により抵抗を測定した結果について述べる¹¹⁾。

3.1 推進性能実験用魚ロボットの開発

図 3.1 は推進性能実験用魚ロボットの外形を決定する際に参考としたニジマス及びマグロの外観を示している¹²⁾。2.1 節に記したように、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。本章で設計・試作する推進性能実験用魚ロボットは、これら両者の尾ひれを用いた場合の基本的な推進性能を把握することを目指している。また、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、推進性能実験

図 3.1 推進性能実験用魚ロボットのモデル¹²⁾

用魚口ボットの動力源には、位置制御が容易なラジコン模型用（R/C）のサーボモータを用いることとした。

3.1.1 推進性能実験用魚口ボットの構造

図 3.2 に試作した推進性能実験用魚口ボットの構造、図 3.3 に外観、表 3.1 に主な仕様を示す。本推進性能実験用魚口ボットは、半回転楕円体状の頭部、円柱形状の胴部、円錐形状の尾柄及び尾ひれから構成されており、それらの主要寸法は図 3.2 に示す通りである。推進性能実験用魚口ボットの胴部には、尾柄及び尾ひれを駆動するための 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

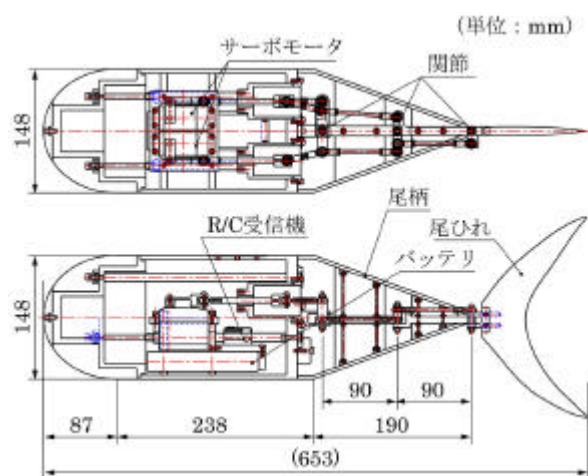


図 3.2 推進性能実験用魚口ボットの構造

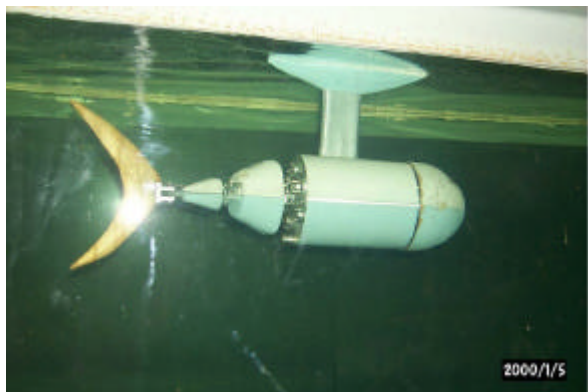


図 3.3 推進性能実験用魚口ボットの外観

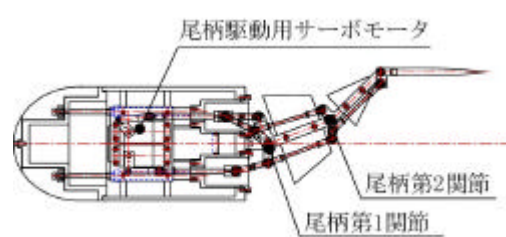
表 3.1 推進性能実験用魚口ボットの仕様

全 長	650 mm
重 量	5.7 kg
関節数	2
サーボモータ	フタバ, S3801×2
最大トルク	1.37 N・m (14.0 kgf・cm)
最高回転速度	0.26 sec / 60 degrees
バッテリー	7.2 V / 2000 mAh

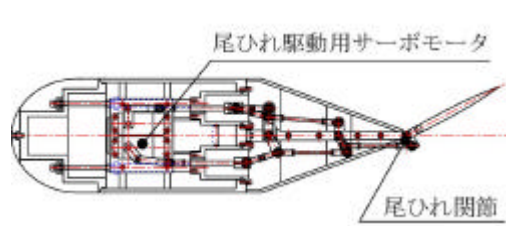
部と胴部の接合部にはニトリルゴム製の O リングを使用し、尾部のリンク機構に連結するロッド部には市販の滑り軸受（ASK 社）を用いることで胴部を水密構造としている。

図 3.4 は、推進性能実験用魚口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が実現できる。しかし、試作した魚口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 3.4(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、尾柄のしなやかな動きを実現している。また、図 3.4(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関節を駆動する。これにより、尾柄の運動に関わらず、尾ひれを任意の振幅で運動させることができる。

図 3.5 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の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っている。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（投影面積）は、図 3.1(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投影面積となるように図 3.1(b)のマグロの尾ひれを相似拡大させた寸法としている。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



(a) 尾柄の運動



(b) 尾ひれの運動

図 3.4 推進性能実験用魚口ボットの尾柄及び尾ひれの運動

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、本推進性能実験用魚ロボットにおいて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。

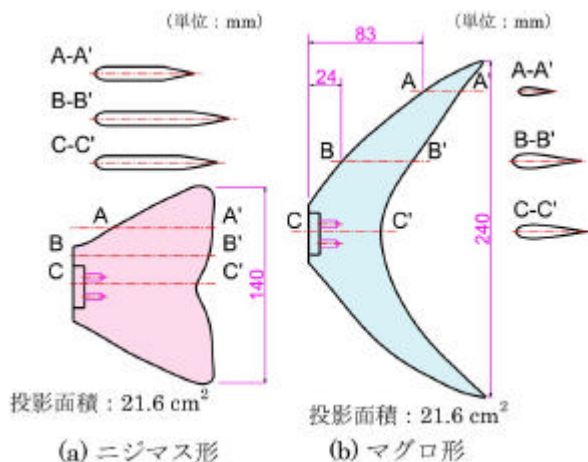


図 3.5 推進性能実験用魚ロボットの尾ひれの形状

3.1.2 運動制御及び運動パターン

図 3.6 に推進性能実験用魚ロボットの運動制御システムの構成を示す。魚ロボットの胴部に配置されたサーボモータは、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任意に設定できる。しかし、以下の自航実験に使用した制御プログラムはパーソナルコンピュータの実行速度による制限を受けるため、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フィードバック制御が今後の課題として残されている。

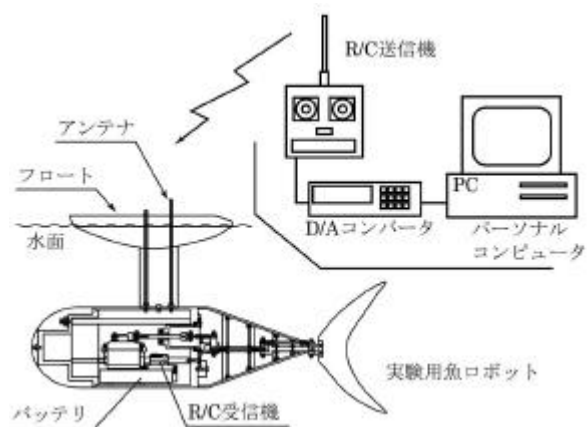


図 3.6 推進性能実験用魚ロボットの運動制御システムの構成

図 3.7 に推進性能実験用魚ロボットの運動パターンの概略を示す。運動パターンは多様に設定できるが、以下の自航実験では最も基本的な正弦波状の運動を与えている。図 3.7(a)に示す胴体中心軸に対する尾柄の変位 x_1 (mm) 及び胴体中心軸に対する尾ひれの変位角 x_2 (deg) は次式で表される。

$$x_1 = K_a A_{1\max} \sin 2\pi f t \quad (3.1)$$

$$x_2 = K_a A_{2\max} \sin(2\pi f t - b) \quad (3.2)$$

ここで、 f は運動の周波数(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及び尾ひれの最大振幅であり、 $A_{1\max}=80$ 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。図 3.7(b)の b は尾柄と尾ひれの位相差である。

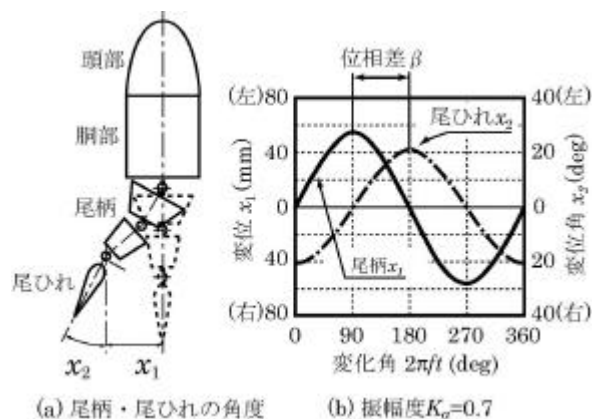


図 3.7 推進性能実験用魚ロボットの運動パターン

3.2 推進性能実験用魚ロボットの推進性能

推進性能実験用魚ロボットの自航実験時には、図 3.3 及び図 3.6 に示すように胴体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。水面から胴体中心軸までの深さ d は、後述する抵抗測定の結果、フロートを固定するためのストラットの影響及び実験に使用する尾ひれの形状等を踏まえて、胴体直径 $D=148$ mm の 1.5 倍としている。また、重力と浮力との釣り合いは、頭部及び胴体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。

3.2.1 実験方法

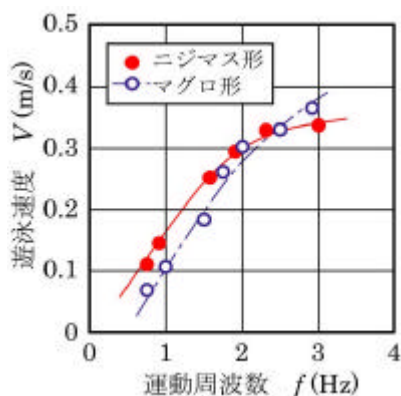
推進性能実験用魚ロボットの自航実験は、長さ 8 m、幅 0.9 m、深さ 1.2 m の水槽で行った。魚ロボットの航行を助走区間約 4 m で定常な状態とみなし、それ以降の 1.9 m の距離を進むのに要した時間をストップウォッチで測定し、遊泳速度 V を求めた。な

お、測定時の航行は厳密な定常状態ではないが、本推進性能実験用魚ロボットの基本性能を把握するためには十分な精度で測定できると考えられる。

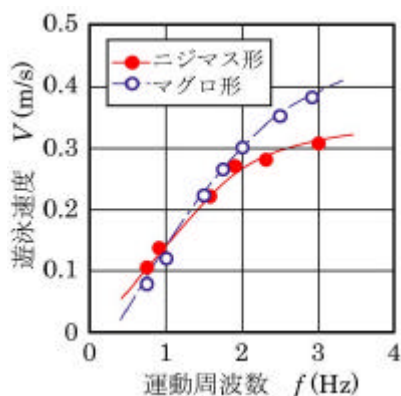
3.2.2 周波数が速度に及ぼす影響

図3.8に位相差 b 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 b が60 degの場合、周波数 f が比較的低い範囲において、ニ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。一方、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 がニジマス形尾ひれの場合よりも高い。また、この傾向は位相差 b が90 degの場合により顕著に現れている。

また、本実験において、推進性能実験用魚ロボットは、マグロ形尾ひれを使用し、運動の周波数 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るが、実際の魚が持続的に1秒間に体長の約2倍もの距離を進むこと¹³⁾を考えると、かなり低い値である。これは推進性能実験用魚ロボットの外



(a) 位相差 $b=60$ deg



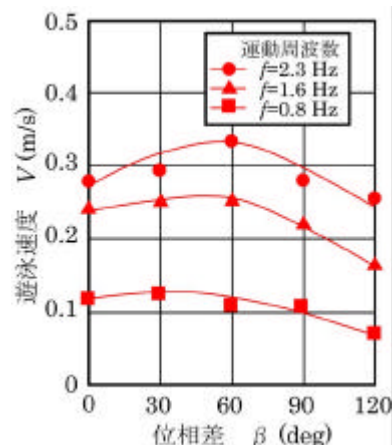
(b) 位相差 $b=90$ deg

図3.8 推進性能実験用魚ロボットの周波数と速度の関係

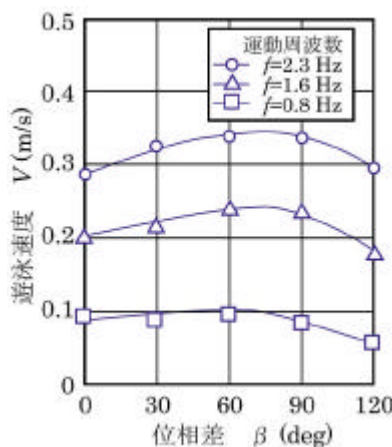
形や表面形状が高速遊泳に適しておらず摩擦抵抗が大きいことや設定可能な周波数がサーボモータの回転速度によって制限を受けていることに起因していると考えられる。

3.2.3 位相差が速度に及ぼす影響

図3.9に周波数 f を0.8, 1.6, 2.3 Hzとした場合の位相差 b 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 b が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 b 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 b が小さいほど尾ひれ後端の変位が大きくなるため、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 b が90 deg程度で最も大きい推進力が得られていると考えられる。



(a) ニジマス形尾ひれ



(b) マグロ形尾ひれ

図3.9 推進性能実験用魚ロボットの位相差と速度の関係

3.3 推進性能実験用魚ロボットの抵抗測定

魚ロボットの抵抗を測定することは、魚ロボット設計時における推進性能の予測や動力源の選定等に有用である。以下、前節に述べた推進性能実験用魚ロボットと同一の外形寸法を有するモデルを用い、没水深度を変えた曳航実験を実施した結果について述べる¹¹⁾。曳航実験に用いたモデルは駆動機構を持たず、尾部は直立状態で固定されている。

図 3.10 に示す実験装置を用い、本研究所内の三鷹第 3 船舶試験水槽(長さ 150m、幅 7.5m、深さ 3.5m)にて曳航実験を行った。抵抗測定には 3 分力計を用い、前後力、横力及びモーメントを測定しているが、本報では前後力のみについて述べる。

実験条件として、曳航速度 V を 0.2 ~ 4.2 m/s の範囲とし、水面から魚ロボットの胴体中心軸までの深さ d と魚ロボットの直径 D との比(以下、これを没水深度比 d/D と称する。)を 1.0、1.5 及び 2.0 の 3 通りに変化させた。本来、魚ロボットは深い水域を自律的に遊泳することを目的として開発されている。しかし、現開発段階の実験用魚ロボットは R/C 用アンテナが必要であり、浅い没水深度で運転しているため、比較的浅い没水深度において曳航実験を行った。本実験を行う際、一定の深さを保つために実験

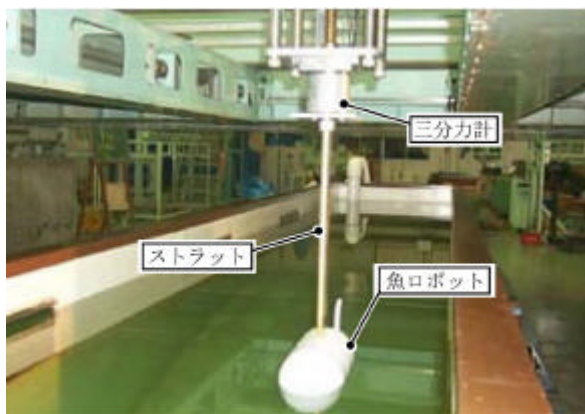


図 3.10 曳航実験装置の外観

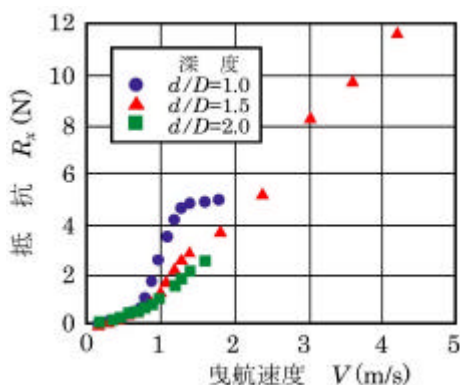


図 3.11 推進性能実験用魚ロボットの曳航速度と抵抗の関係

用魚ロボットにストラットを付けて曳航した。魚ロボットの抵抗 R_x は、ストラットと魚ロボットの両者を合わせた抵抗の測定結果からストラットだけで曳航した抵抗の測定結果を差し引くことによって求めた。

図 3.11 は、上記の方法で得られた曳航速度 V と魚ロボットの抵抗 R_x との関係を示している。これより、抵抗 R_x は、没水深度比 d/D が小さくなるに従って増加することがわかる。これは、没水深度比 d/D が小さくなるに従って、水面に表れる造波の影響が大きくなるためであると考えられる。

3.4 まとめ

本章では、推進性能を調べるために開発した実験用魚ロボットについて述べた。そして、2 種類の尾ひれを使用した自航実験を行った結果、以下のことが確認された。

- (1) 推進性能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。
- (2) 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。
- (3) 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。

本自航実験において、魚ロボッ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た。尾部を運動させた場合、自由表面の影響が大きく現れている可能性があるため、異なる尾ひれ形状の特性を詳細に比較することは難しい。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、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。

本推進性能実験用魚ロボットにおいて、尾部の駆動力や消費電力を測定するセンサが取り付けられていないため、推進効率を求めるには至らなかった。魚ロボットの高性能化あるいは運動の最適化を図る場合、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推進効率の評価が必要不可欠である。

また、曳航実験による抵抗測定を行ったが、その詳細な流体力学的解析には至っていない。さらに多くの抵抗測定実験を実施し、詳細な検討を行うことにより、魚ロボットの抵抗低減が可能になるものと考えている。

4. 旋回性能実験用魚ロボット

前章までに述べたように、魚の泳法を模擬した推進方法は、高速・高効率を実現する海中ロボットの

新しい推進方法として期待されている。一方、魚の優れた旋回性能に着目することで、海中作業用ロボットの高性能化が可能になると考えられる。本章では、旋回性能を調べるために開発した実験用魚ロボットについて概説し、直進時の遊泳速度並びに 2.2 節に述べた 3 種類の旋回方法における旋回性能を測定した結果^{6),7)}について述べる。

4.1 旋回性能実験用魚ロボットの開発

2.1 節及び 2.2 節に述べた魚ロボットの推進方法及び旋回方法について検討した結果、体高が高い体形（側扁形）の体形が急旋回や遊泳速度を変えるのに適していると考えられた。そのため、側扁形の体形を有するタイ¹²⁾の体形（図 4.1）を参考にして、旋回性能実験用魚ロボットの設計・試作を行うこととした。さらに、実験の容易性並びに使用する動力源の出力レベル等を考慮して魚ロボットの小型化を目指すこととした。また、構造を簡略化するために関節を 2 つとし、尾柄及び尾ひれを独立した 2 個のラジコン模型用（R/C）のサーボモータで駆動させることとした。

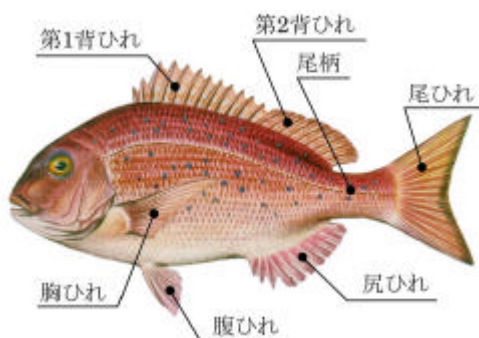


図 4.1 タイの外形¹²⁾

4.1.1 実験用魚ロボットの構造

サーボモータやバッテリーの配置、魚ロボットの体形、シール装置の配置、リンク機構の構成並びに尾柄・尾ひれの振幅の大きさ等を踏まえて、図 4.2 及び図 4.3 に示す旋回性能実験用魚ロボットを試作した。主な仕様を表 4.1 に示す。全長は約 340 mm であり、頭部に R/C 受信機、胴部にバッテリー及び尾柄を駆動させるサーボモータを配置し、尾柄には尾ひれを駆動させるサーボモータを内蔵している。リンク機構部の防水は、ゴム製の防水ブーツを使用している。関節の位置は、タイの体形を参考にして概ね決定しているが、関節数が少ないこと及び機械部品の形状等により制限を受けている。

頭部及び胴部の上部は、硬質発泡ウレタンを用いて外形を整えている。また、頭部及び胴部の下部には S45C 製のバランサ（おもり）を取り付けている。

運転時には魚ロボットの上部に取り付けたアンテナにバルサ製のフロートを取り付けることで浮力をバランスさせて、一定の深度で運動させる。往復運動を行う尾柄部の外形を整えるには極めて軟質な材料を用いる必要があるが、その材料の選定は難しい。以下の実験は、尾柄部の外形を整えない状態で行っている。また、尾ひれには軟質材料が適していると考えられているが¹⁴⁾、以下の実験においては、正確な運動パターンを与えるため、硬質の木材を使用している。

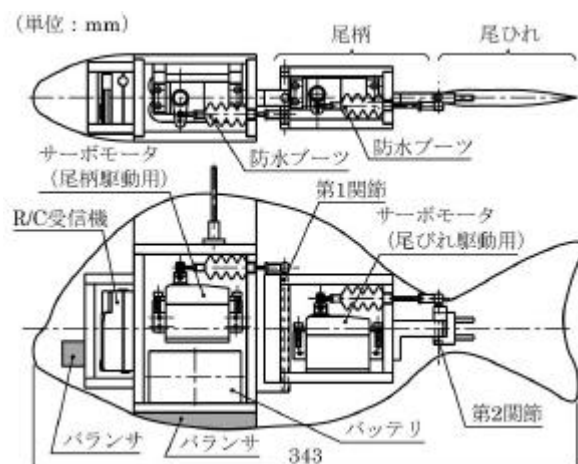


図 4.2 旋回性能実験用魚ロボットの構造

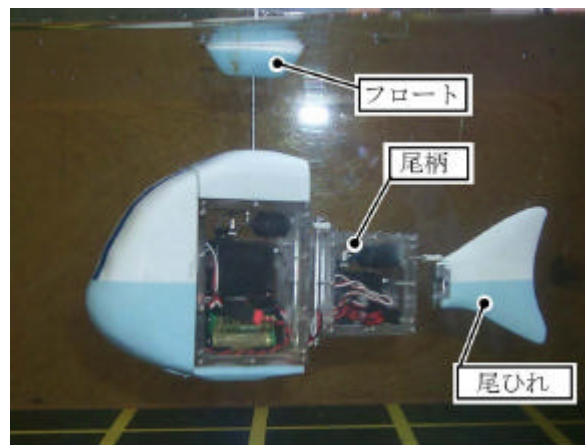


図 4.3 旋回性能実験用魚ロボットの外観

表 4.1 旋回性能実験用魚ロボットの仕様

全 長	340 mm
重 量	1.1 kg
排水容積	1100 cm ³
関節数	2
サーボモータ	フタバ, S148×2
最大トルク	0.29 N・m (3.0 kgf・cm)
最高回転速度	0.22 sec / 60 degrees
バッテリー	6.0 V

4.1.2 運動制御及び運動パターン

尾柄及び尾ひれを任意の運動パターンで運動させるため、第3章で述べた推進性能実験用魚ロボットと同様、R/C 送信機及び D/A コンバータを取り付けたパーソナルコンピュータで運動制御を行うこととした。

図4.4は、後述する直進運動及び図2.6に示した尾柄及び尾ひれの運動を左右どちらかに偏らせて運動させる旋回方法（旋回モードA）における運動パターンの概略を示している。胴体に対する尾柄の変位角 $x_1(\text{deg})$ 及び尾柄に対する尾ひれの変位角 $x_2(\text{deg})$ は次式で表される。

$$x_1 = K_a A_{1\max} \sin 2\pi f t + A_{1\max} (1 - K_a) K_i \quad (4.1)$$

$$x_2 = K_a A_{2\max} \sin(2\pi f t - b) + A_{2\max} (1 - K_a) K_i \quad (4.2)$$

ここで、 f は周波数(Hz)、 t は時間(sec)、 b は尾柄と尾ひれとの位相差である。 $A_{1\max}$ 及び $A_{2\max}$ は、リンク機構により制限を受ける尾柄及び尾ひれの最大振幅であり、以下の実験において $A_{1\max} = 30 \text{ deg}$ 、 $A_{2\max} = 40 \text{ deg}$ に設定している。 K_a は振幅の度合を表す係数（以下、振幅度と称す）であり、 $0 \sim 1$ の範囲で設定される。 K_i は偏りの度合を表す係数（以下、偏り度と称す）であり、 $-1 \sim 1$ の範囲で設定される。なお、直進時は $K_i = 0$ である。 K_a 及び K_i は尾柄と尾ひれとで独立して設定できるが、以下の実験では全て同一な値としている。

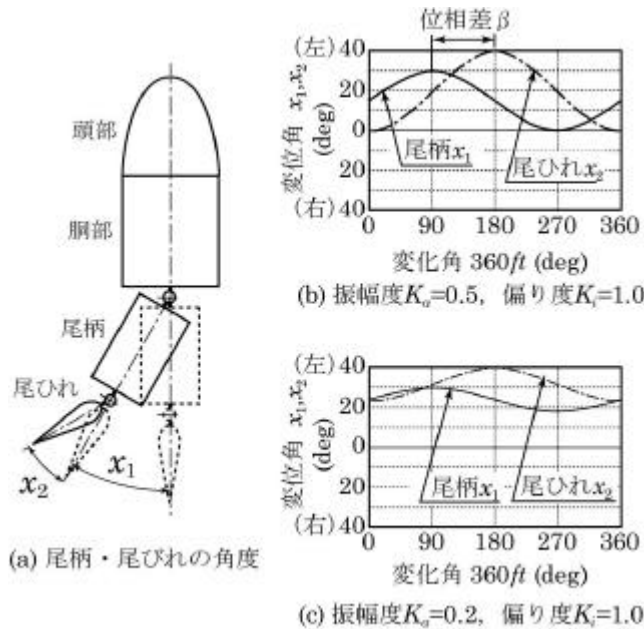


図4.4 旋回性能実験用魚ロボットの運動パターン

4.2 旋回性能実験用魚ロボットの性能

4.2.1 直進性能実験

旋回性能実験用魚ロボットを試作した後、周波数 f 、位相差 b 及び振幅度 K_a を変化させて直進時の速度 V を測定した。図4.5は振幅度 K_a をパラメータとした場合、周波数 f に対する速度 V の実験結果を示している。これより、速度 V は周波数 f の上昇に伴って増加しているが、高い周波数範囲においてその増加率は低下していることがわかる。同様に、速度 V は振幅度 K_a の上昇に伴って増加しているが、振幅度 K_a が大きい範囲においてその増加率は低下している。これは、旋回性能実験用魚ロボットが高速遊泳に適した体形でないこと、サーボモータの性能が十分ではなく高い周波数または大きい振幅とした場合、設定した運動を実現していないこと等に起因していると考えられる。

図4.6は振幅度 K_a をパラメータとした場合、位相差 b に対する速度 V の実験結果を示している。これより、位相差 b が $20 \sim 50 \text{ deg}$ において、最高速度が

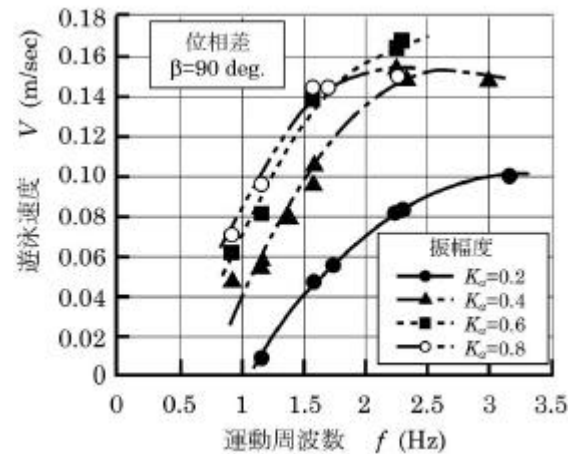


図4.5 旋回性能実験用魚ロボットの周波数と速度の関係

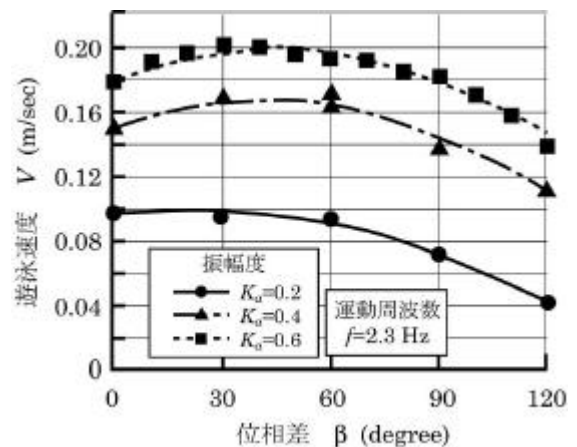


図4.6 旋回性能実験用魚ロボットの位相差と速度の関係

得られていることがわかる。これは尾ひれ後端の最大振幅が位相差 b の低下に伴って増加しているため、推進力が増加したことに起因していると考えられる。

以上の直進運動実験において、旋回性能実験用魚ロボットの最高速度は、振幅度 $K_a=0.6$ 、周波数 $f=2.3\text{ Hz}$ 、位相差 $b=20\text{ deg}$ において約 0.2 m/s であった。すなわち、実験用魚ロボットは1秒あたりに全長の約 0.6 倍の距離を進んでいることになり、実際の魚の速度と比べて決して速いとは言えない。これは、尾部の最高周波数がサーボモータの性能によって制限を受けていること、体形や尾柄の外形が適切でなく、実際の魚より抵抗が大きいこと等に起因していると考えられ、これらを改善することで高速化が可能であると考えられる。

4.2.2 旋回性能実験

旋回実験は $0.9\text{ m} \times 0.9\text{ m}$ 、深さ 0.4 m 程度の小型水槽で行い、水槽の上方約 2 m の高さに設置したビデオカメラで得られる画像により、旋回直径 D 、 360 deg の旋回を行う場合の旋回時間 T 及び旋回時の魚ロボットの姿勢を調べた。

(1) 旋回モード A

図 2.6 に示した尾柄及び尾ひれの運動を左右どちらかに偏らせて運動させる旋回方法(旋回モード A)における旋回実験は、位相差 b を 90 deg 一定とし、振幅度 K_a を $0.2 \sim 0.5$ 、偏り度 K_i を $0.6 \sim 1.0$ 、周波数 f を $1 \sim 3\text{ Hz}$ の範囲で測定を行った。実験結果の一例として、図 4.7 は旋回モード A における旋回実験時の合成写真を示している。これより、旋回性能実験用魚ロボットは概ね適切な円運動を行っていることがわかる。

図 4.8 は、周波数 f を 2.3 Hz 、位相差 b を 90 deg とし、偏り度 K_i をパラメータとした場合、振幅度

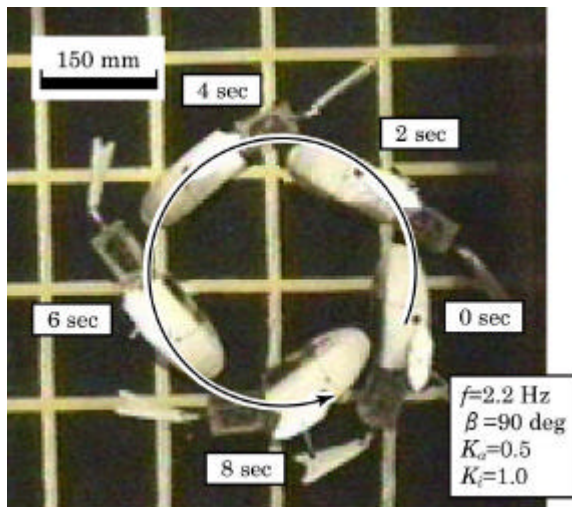


図 4.7 旋回性能実験用魚ロボットの旋回モード A における旋回実験の一例

K_a に対する旋回直径 D 及び旋回時間 T の実験結果を示している。これより、振幅度 K_a が小さいほど旋回直径 D は減少し、旋回時間 T が増加することがわかる。これは振幅度 K_a が小さいほど、魚ロボットの推進力が小さくなるものの、式 (4.1) 及び式 (4.2) からわかるように、尾柄及び尾ひれの偏りが相対的に大きくなるためであると考えられる。また、旋回直径 D は、偏り度 K_i の増大に伴い小さくなるが、偏り度 K_i が旋回時間 T に与える影響はかなり小さいことがわかる。

図 4.9 は、周波数 f を 2.3 Hz 、位相差 b を 90 deg とし、偏り度 K_i をパラメータとした場合、振幅度

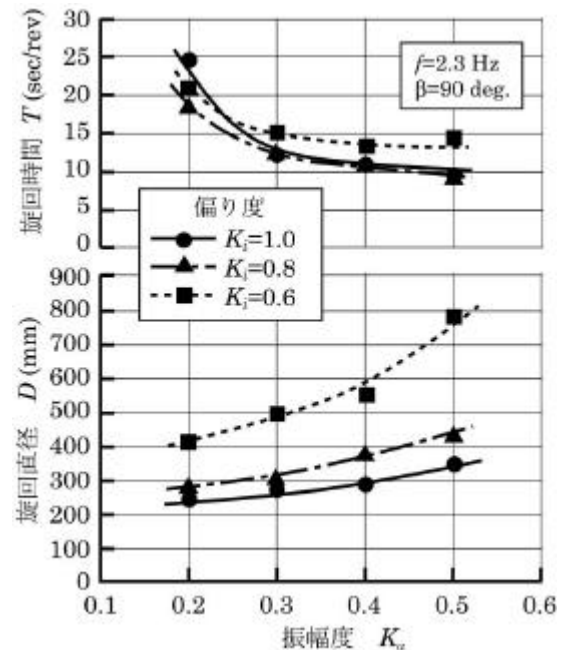


図 4.8 旋回性能実験用魚ロボットの振幅度と旋回直径及び旋回時間の関係 (旋回モード A)

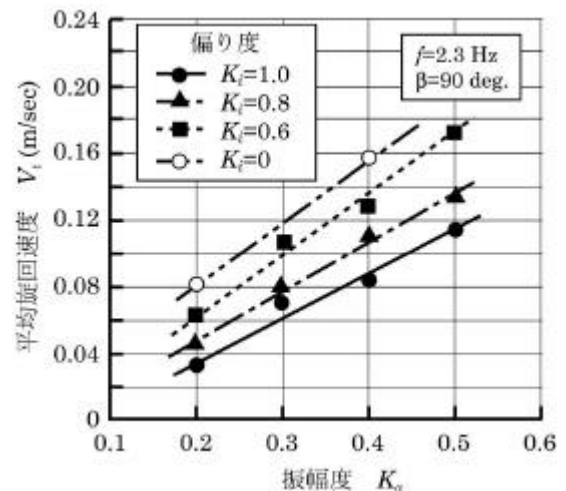


図 4.9 旋回性能実験用魚ロボットの振幅度と速度の関係 (旋回モード A)

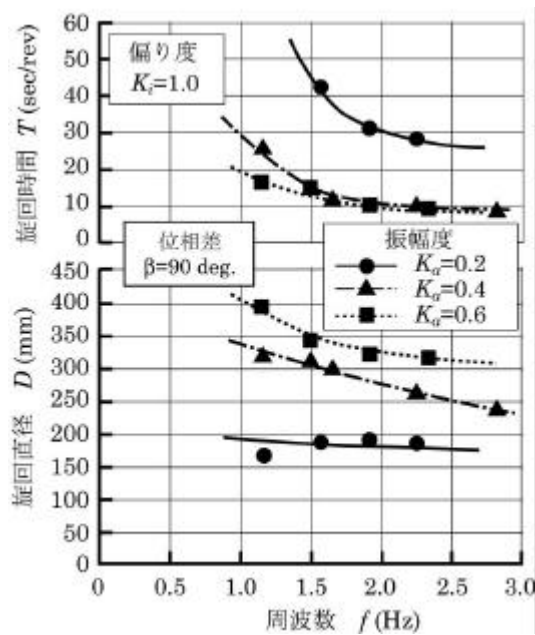


図 4.10 旋回性能実験用魚ロボットの周波数と旋回直径及び旋回時間の関係（旋回モード A）

K_a に対する平均旋回速度 $V_t (=2\pi D/T)$ の実験結果を示している。平均旋回速度 V_t は、振幅度 K_a の増大に伴い概ね直線的に上昇していることがわかる。また、平均旋回速度 V_t は、偏り度 K_i が小さいほど高くなっている。これは、振幅度 K_a が大きく、偏り度 K_i が小さいほど魚ロボットを前進させるための推進力が增大するためであると考えられる。

図 4.10 は、偏り度 K_i を 1.0、位相差 b を 90 deg とした場合、周波数 f に対する旋回直径 D 及び旋回時間 T の実験結果を示している。これより、旋回直径 D 及び旋回時間 T は周波数 f の上昇に伴い低下していることがわかる。すなわち、高い旋回性能を得るためには、周波数を高める必要があることを示している。

以上の実験より、魚ロボットの旋回性能は周波数 f 、振幅度 K_a 及び偏り度 K_i に大きく影響を受けることが確認された。これらのパラメータを適切に設定することで魚ロボットは高度な旋回性能を達成できるものと考えられる。

(2) 旋回モード B

図 4.11 は、図 2.7 に示した直進運動の慣性力を利用した旋回方法（旋回モード B）における実験結果を示している。本実験において、旋回性能実験用魚ロボットを約 0.15 m/s の速度で直進させ（図 4.11(a)）、尾部を中立状態で静止させた後、約 0.3 秒の間に尾柄及び尾ひれを左側に運動させた（図 4.11(b)~(c)）。その後、尾柄及び尾ひれを左側に傾けた状態で旋回させた（図 4.11(d)~(f)）。

図 4.12 は時間 t と尾柄及び尾ひれの変位角 x_1 ,

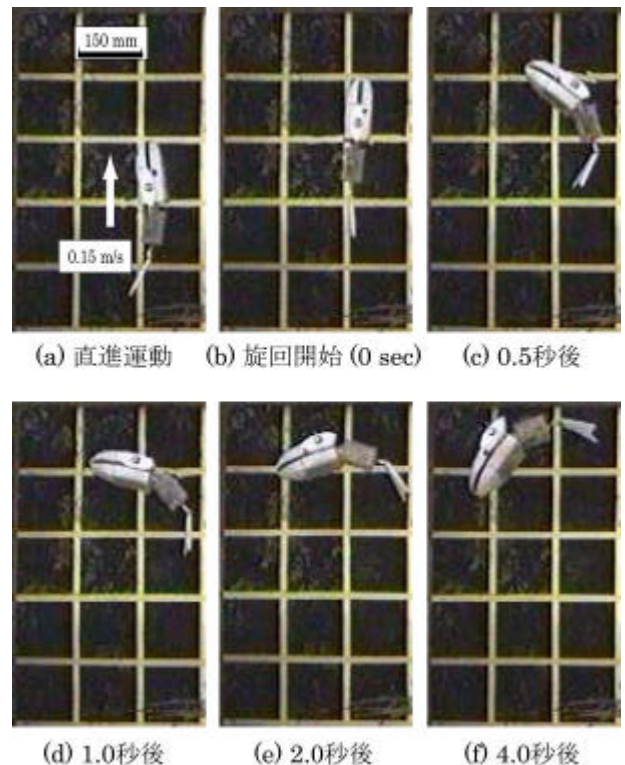


図 4.11 旋回性能実験用魚ロボットの旋回モード B における実験結果

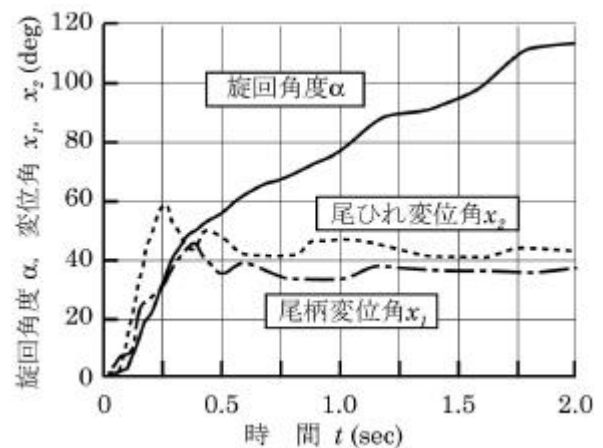


図 4.12 旋回性能実験用魚ロボットの旋回モード B における旋回角度及び変位角の時間変化

x_2 及び魚ロボットの旋回角度 α の関係を示している。運動開始から約 0.3 秒の間、魚ロボットは尾部の運動と同時に急旋回し、旋回角度 α は約 40 deg に達していることがわかる。その後、尾柄及び尾ひれを左側に傾けた状態で緩やかに旋回している。旋回モード B においては、尾部を偏らせることによって生じる流体力（翼の揚力に相当）が旋回性能に大きく影響を与えるため、魚ロボットの初期速度の影響を大きく受けるものと考えられる。

(3) 旋回モード C

図 4.13 は、図 2.8 に示した運動部の慣性力及び抗力を利用して回転モーメントを発生させる方法（旋回モード C）における実験結果を示している。本実験では、魚ロボットの尾柄及び尾ひれを右側に傾けて静止させた状態から、約 0.5 sec の間に左側に運動させて急旋回させた。図 4.13 より、旋回モード C における旋回直径は、旋回モード A 及び旋回モード B よりも小さくできることがわかる。

図 4.14 は時間 t と尾柄及び尾ひれの変位角 x_1 、 x_2 及び魚ロボットの旋回角度 α の関係を示している。運動開始から約 1 秒後には、魚ロボット胴部の旋回角度 α は約 100 deg にも達しており、この旋回方法は、旋回モード A 及び旋回モード B と比べて、かなりの急旋回が可能であることがわかる。しかも、静止させた状態からの旋回が可能であるため、海中ロボットとしての応用性も高いと考えられる。しかし、この方法は、強い回転モーメントが発生するため旋

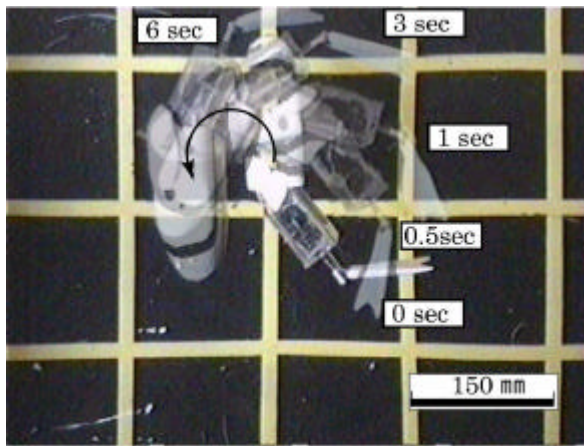


図 4.13 旋回性能実験用魚ロボットの旋回モード C における実験結果

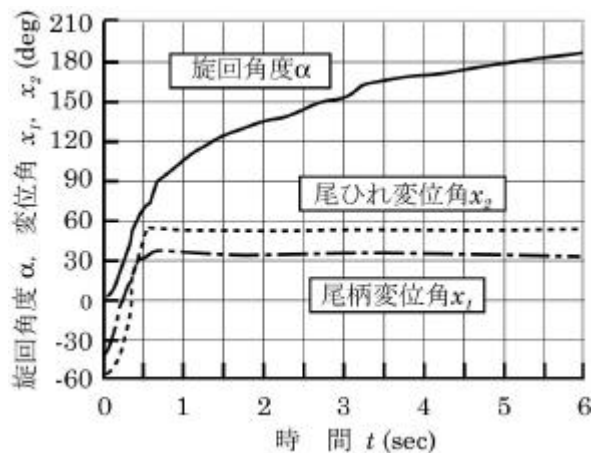


図 4.14 旋回性能実験用魚ロボットの旋回モード C における旋回角度及び変位角の時間変化

回角度の制御が困難であり、瞬時に旋回させるためには、尾柄及び尾ひれを駆動させるための十分なトルクを有する尾部の動力源が必要となる。

4.4 まとめ

本章では、旋回性能に着目した実験用魚ロボットを開発した。そして、魚ロボットは尾部の運動だけで様々な旋回が可能であることが確認された。様々な旋回方法において実験を行った結果を以下にまとめる。

- (1) 旋回モード A（尾柄・尾ひれの運動を左右に偏らせる方法）において、旋回直径は、振幅の減少及び偏りの増加に伴って減少する。また、旋回直径は周波数の上昇に伴って減少するが、その影響は小さい。
- (2) 旋回モード A において、旋回時間は周波数の上昇及び振幅の増加に伴って減少し、偏りの影響をほとんど受けない。
- (3) 旋回モード B（直進運動の慣性力を利用する方法）における旋回直径は旋回モード A よりも小さい。
- (4) 旋回モード C（往復部の慣性力及び抗力を利用する方法）によって、魚ロボットは静止した状態からの急旋回ができる。

魚ロボットの旋回性能は様々なパラメータの影響を受けるため、高度な制御手法が必要であると考えられる。また、高い旋回性能を有する魚ロボットを開発するためには、旋回性能の詳細な解析が必要不可欠であると考えられる。

5. 魚ロボットのファジィ制御

従来の工学的制御手法は、対象とする物理現象を高精度かつ正確に解析することにより得られる制御手法であり、現象に関する知見が十分得られており何らかの定式化が可能な場合、最適制御するのに有効な手法である。しかし、魚ロボットの運動パターンはかなり複雑であり、その運動性能を解析的に解くことは極めて困難であるので、従来の制御手法が魚ロボットの制御に適しているとは言い難い。これに対して、より人間に近い知的な制御を目指し、ファジィ理論、ニューロ及び遺伝的アルゴリズム等を利用した新しい制御手法が注目を浴びている。これらの手法は、高い精度性や確実性を要求せず、取り扱いやすさ、低コストを達成するために不正確性や不確実性をどこまで許容できるかを探り、低精度な計算により、問題解決が試みられる¹⁵⁾。したがって、魚ロボットのように現象が複雑で、高精度な解析が難しい物理現象を扱う場合に有効な手法であると考えられる。

本章では、魚ロボットの速度 V と消費電力 W_e に着目したファジィ理論の適用方法を検討する¹⁶⁾。さらに、試作した実験用魚ロボットの実験結果に基づく簡易的なシミュレーション計算によってその適用性について考察する。

5.1 回転式直流モータを使用した実験用魚ロボットの性能とモデル化

ファジィ理論の適用方法を検討するに当たって、動力源として回転式直流モータを使用した実験用魚ロボットの実験結果に基づき、速度 V と消費電力 W_e の実験式を作成する。図 5.1 及び図 5.2 に試作した実験用魚ロボットの構造並びに外観、表 5.1 に主な仕様を示している¹⁷⁾。魚ロボットの内部には R/C 受信機、直流モータ用のアンプ及びバッテリーが配置され、周波数の調整は無線 (R/C) により行われる。また、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おり、クランクの寸法を変更することにより尾ひれの振幅 A を 3 種類に設定できる。

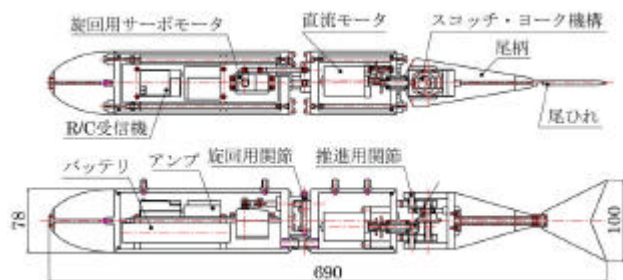


図 5.1 直流モータを使用した実験用魚ロボットの構造



図 5.2 直流モータを使用した実験用魚ロボットの外観

表 5.1 直流モータを使用した実験用魚ロボットの仕様

全 長	700 mm
重 量	3.5 kg
排水容積	3500 cm ³
関節数	2 (推進用1, 回転用1)
直流モータ (推進用)	マブチRS-540SH
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 (回転用)	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

ッチ・ヨーク機構が用いられており、クランクの寸法を変更することにより尾ひれの振幅 A を 3 種類に設定できる。

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られ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、推進速度 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。

図 5.3 は、尾ひれの振幅 A を 5 deg, 10 deg 及び 15 deg とした場合、周波数 f に対する速度 V の実験結果を示す。これより、速度 V は、周波数 f 及び振幅 A の増加に伴い上昇していることがわかる。また、図中に実験結果を最小二乗法により処理した実験式 (5.1) を図示している。若干の相違はあるものの、実験式は概ね実験結果を模擬していることがわかる。

$$V = 1.05 \times 10^{-3} \cdot A^{1.06} \cdot f^{1.54} \quad (5.1)$$

図 5.4 に尾ひれの振幅 A を 5 deg, 10 deg 及び 15

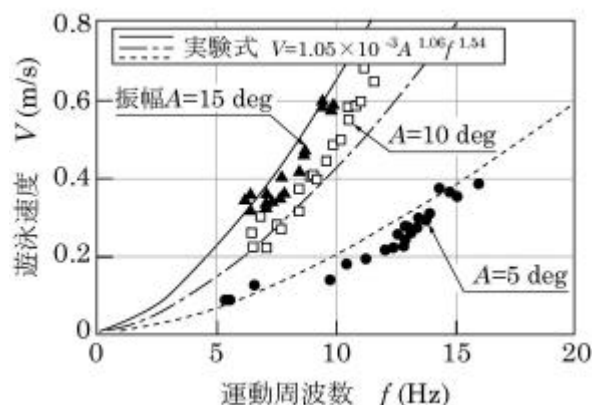


図 5.3 直流モータを使用した実験用魚ロボットの周波数と速度の関係

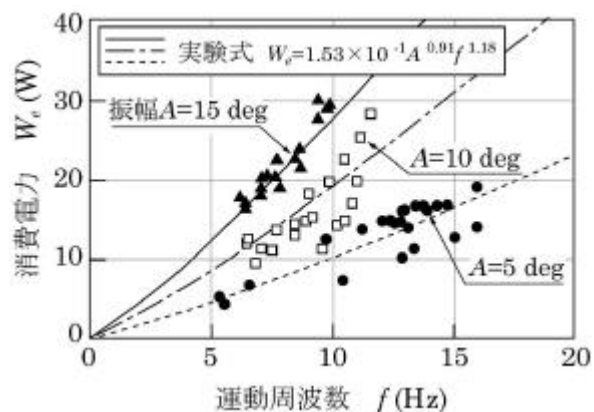


図 5.4 直流モータを使用した実験用魚ロボットの周波数と消費電力の関係

deg とした場合, 周波数 f に対する消費電力 W_e の実験結果を示す。これより, 消費電力 W_e は, 速度 V と同様, 周波数 f 及び振幅 A の増加に伴い, 上昇していることがわかる。図中, 最小二乗法により処理した実験式(5.2)を図示しており, 実験式は概ね実験結果を模擬していることがわかる。

$$W_e = 1.53 \times 10^{-1} \cdot A^{0.91} \cdot f^{1.18} \quad (5.2)$$

なお, 式(5.1)及び式(5.2)は魚ロボットの性能を十分な精度で模擬できるものではないが, ファジ理論を利用した魚ロボットの運動制御の適用性について検討するには十分であると考えている。また, 速度 V の測定値が魚ロボットに搭載されたマイクロコンピュータに取り込まれていないことや運転中に振幅 A を変化させることができないこと等の構造上の問題から, 現状では実機によるフィードバック制御を実現できない。したがって, 上記の実験式を利用したシミュレーション計算によって, 魚ロボットの速度 V と消費電力 W_e に着目し, 周波数 f 及び振幅 A を制御変数したファジ理論の適用方法を検討する。

5.2 ファジ理論の制御規則

ファジ理論は, 厳密な数値ではなく, 主観的な考えに基づく制御規則(ルール)を定め, 制御手順を決める手法である。したがって, 以下の検討においては, 数値による記述ではなく, 「速い」, 「遅い」, 「大きい」, 「小さい」といった曖昧かつ定性的な特性に着目する。

図 5.3 及び図 5.4 に示した実験結果に基づき, 魚ロボットの特性を考えた場合, 振幅 A を大きくすると速度 V 及び消費電力 W_e は大きくなり, 振幅 A を小さくすると速度 V 及び消費電力 W_e が小さくなる。同様に, 周波数 f を高くすると速度 V 及び消費電力 W_e は大きくなり, 周波数 f を低くすると速度 V 及び消費電力 W_e が小さくなる。これらを踏まえた主観的な考えに基づき, 次の 8 つの制御規則を適用する。

速度 V が速くて, 消費電力 W_e が小さいならば, 周波数 f を変えない。

速度 V が速くて, 消費電力 W_e が大きいならば, 周波数 f を低くする。

速度 V が遅くて, 消費電力 W_e が小さいならば, 周波数 f を高くする。

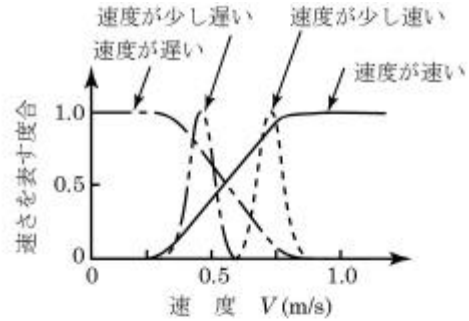
速度 V が遅くて, 消費電力 W_e が大きいならば, 周波数 f を高くする。

速度 V が少し速くて, 消費電力 W_e が少し小さいならば, 振幅 A を変えない。

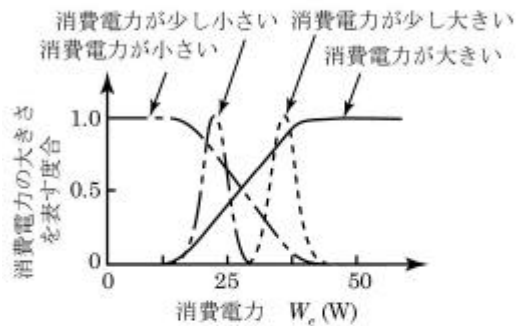
速度 V が少し速くて, 消費電力 W_e が少し大きいならば, 振幅 A を小さくする。

速度 V が少し遅くて, 消費電力 W_e が少し小さいならば, 振幅 A を大きくする。

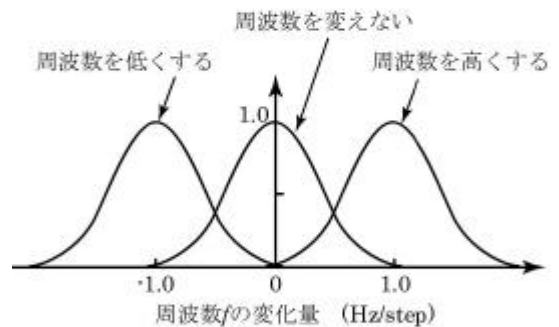
速度 V が少し遅くて, 消費電力 W_e が少し大きいならば, 振幅 A を大きくする。



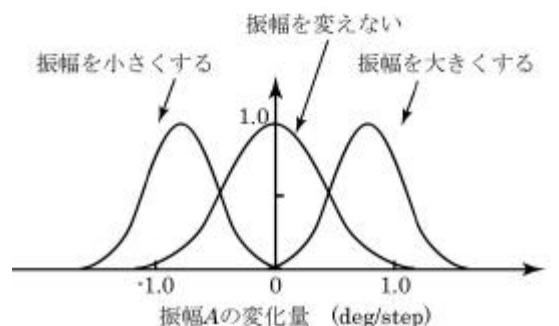
(a) 速度



(b) 消費電力



(c) 周波数の変化量



(d) 振幅の変化量

図 5.5 メンバシップ関数

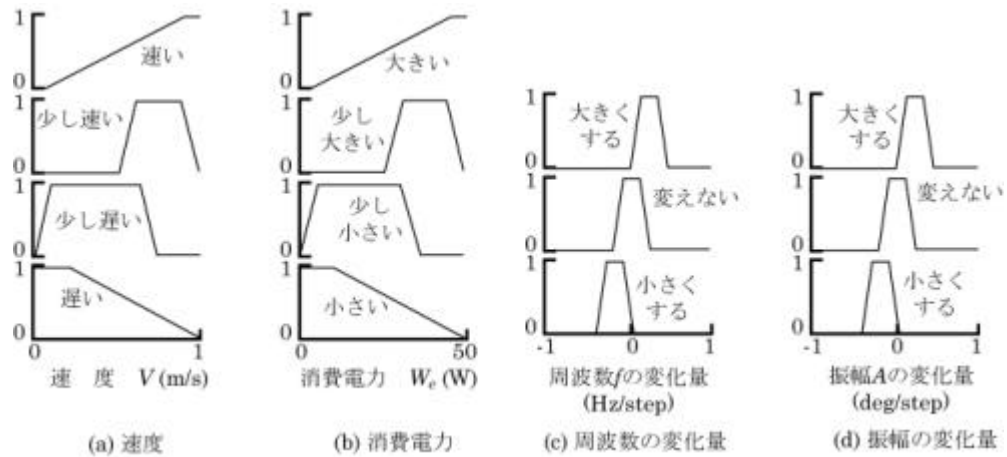


図 5.6 シミュレーションに用いたメンバーシップ関数

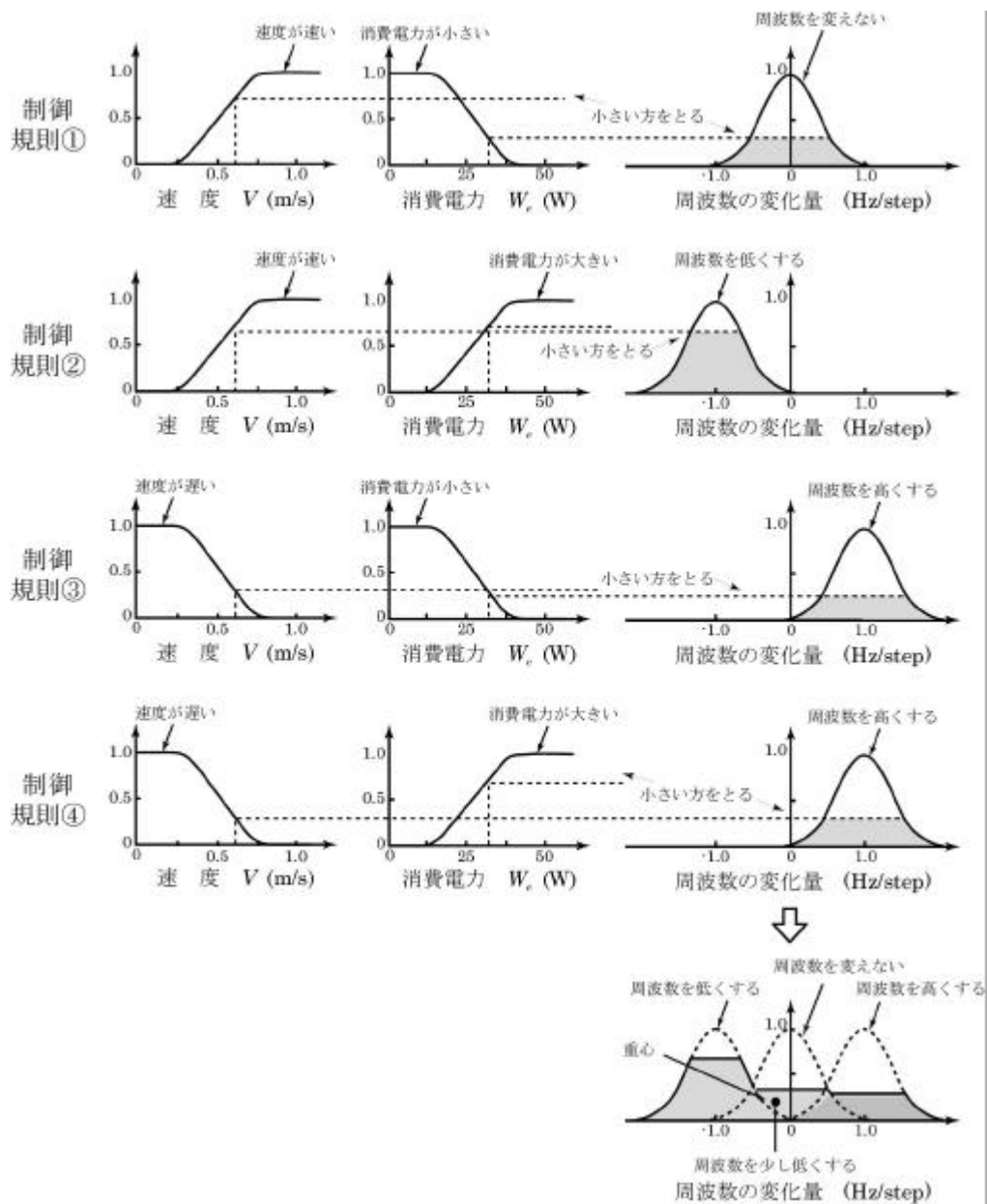


図 5.7 ファジィ理論の計算方法

5.3 計算方法

ファジィ理論を適用するに当たって、それぞれの変数の大きさを 0～1 の範囲で示したメンバーシップ関数を決定する必要がある。図 5.5 は、速度 V 、消費電力 W_e 、周波数 f の変化量及び振幅 A の変化量を表したメンバーシップ関数である。同図のメンバーシップ関数は模式的に表したものであり、以下のシミュレーション計算においては、計算を簡単にするため、図 5.6 に示す直線状のメンバーシップ関数を用いる。図 5.7 は、制御規則 ～ におけるファジィ理論の計算方法を示している¹⁸⁾。同図に示すように、それぞれの制御規則の結果を重ね合わせ、重なった部分の重心を求めることで周波数 f の制御量が求められる。同様に、制御規則 ～ より、振幅 A の制御量を求めることができる。

5.4 計算結果及び考察

図 5.8 は、初期条件を $f=2$ Hz、 $A=2$ deg とした場合の計算結果である。これより、計算開始後、周波数 f 及び振幅 A は上昇し、さらに計算を続けると約 80 回の計算から振幅 A がわずかに低下していることがわかる。100 回の計算後は、周波数 10.7 Hz、振幅 14.5 deg、速度 0.68 m/s、消費電力 28.5 W に

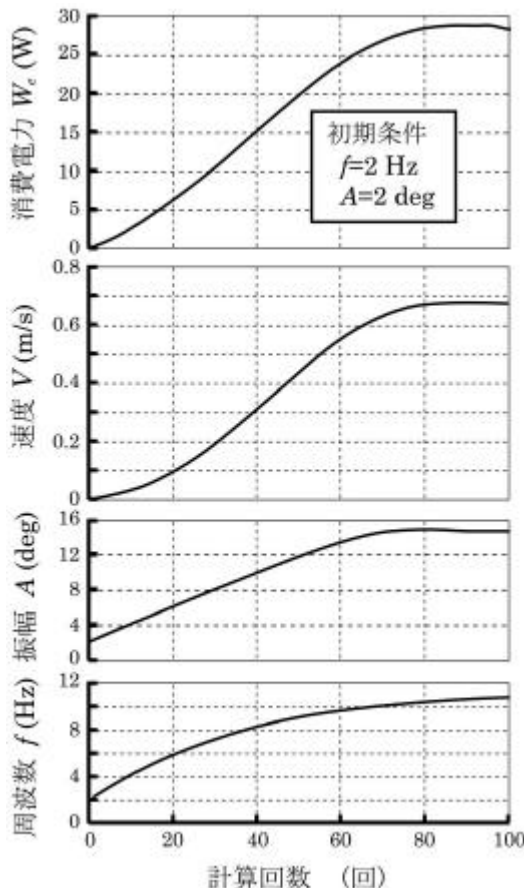


図 5.8 ファジィ制御適用計算結果の一例

ほぼ収束している。

図 5.9 は、図 5.6(a)及び(b)のメンバーシップ関数の波形をそのままとし、横軸の数値を比例変化させた場合の 100 回後の計算結果である。すなわち、これは速度 V 及び消費電力 W_e の大きさを表す度合を変化させることに相当する。これより、ファジィ理論を用いることで、周波数に対する適切な振幅を求めることができ、魚ロボットの運動制御が容易になると考えられる。図 5.8 及び図 5.9 は、概ね実状に適した運動制御であると考えられるが、設定するメンバーシップ関数によって収束する値が大きく異なるため、メンバーシップ関数の適切な設定が必要不可欠である。

5.5 まとめ

以上、魚ロボットの運動制御に用いるファジィ理論の適用方法について検討し、簡易的なシミュレーション計算を行った。その結果、8 つの制御規則を用いることで魚ロボットのファジィ制御が可能であり、魚ロボットの運動制御が容易になることが確認された。また、同様の手法により、尾柄と尾ひれとの位相差及び振幅を制御変数としたシミュレーション計算も行っており¹⁶⁾、その適用性についても確認されている。

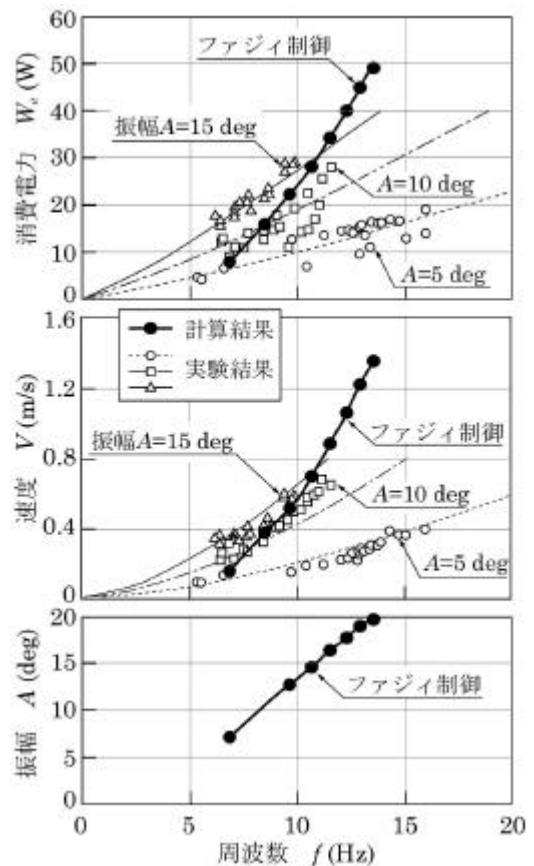


図 5.9 シミュレーション計算の結果

さらに多くの経験的なデータベースを構築することで、制御規則及びメンバーシップ関数の設定が容易かつ適切になると考えている。一方、ファジィ制御には学習機能が基本的になく、得られる解が最適であるかは保証されない。ニューロ等の手法を取り入れることで運動制御の最適化が図られるものと考えられる。

6. 魚ロボット用スターリングエンジンの検討

2.4 節に述べたように、魚ロボットに用いる動力源には様々な形式が考えられる。それらの動力源にはそれぞれの利点や問題点があるため、開発する魚ロボットの用途や寸法等について検討を行い、適した動力源を決定する必要がある。本章では、魚ロボットの動力源の一つとして提案しているセミフリーピストン形スターリングエンジンについて概説する。さらに、2 種類のスターリングエンジンの運転結果に基づき、本エンジンの魚ロボットへの適用性について検討する¹⁹⁾⁻²¹⁾。

6.1 セミフリーピストン形スターリングエンジン

図 6.1 は本研究で対象としているセミフリーピストン形スターリングエンジンの基本構造を示している。これは、ディスプレイサを電気モータで駆動することで生じる圧力変化によって、パワーピストンが一自由度振動系を構成して往復運動するため、ピストンの往復運動を直接動力として利用できるという特徴がある。圧力変化の周波数が振動系の共振周波数と一致した場合、パワーピストンのストロークが増大するとともに、両ピストンに適切な位相差が生じ、一般のスターリングエンジンと同様の熱サイクルを構成する。なお、ディスプレイサの両端の圧力差は小さいため、ディスプレイサを駆動する電気モータの消費エネルギーは極めて小さくてすむ。

従来より、セミフリーピストン形スターリングエンジンの開発は活発に行われており、特に宇宙用発電システムの動力源として活発な研究開発が進められてきた²²⁾。それはピストンの往復運動でリニア発電機を駆動し、電気エネルギーを得るものであり、

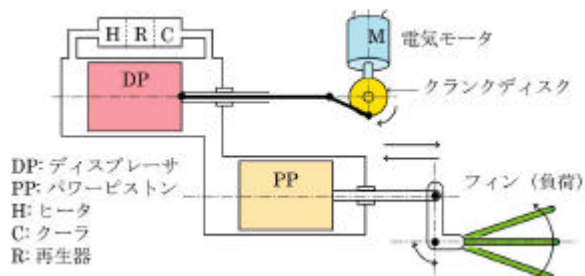


図 6.1 セミフリーピストン形スターリングエンジンの基本構造

本研究で提案するように、往復運動を直接動力として利用するものではない。

6.2 魚ロボットへの応用

従来から開発されている海中ロボットは、一般に蓄電池を用いた電気モータを動力源としているが、蓄電池はエネルギー密度が低く長時間の航行は困難である。一方、スターリングエンジンは海中動力源としての研究開発が活発に行われてきた²³⁾。それは、高エネルギー密度の熱源を用いることで長時間の航行が可能となること、熱源に燃焼ガスを使用した場合でも、連続的な高圧燃焼が可能のため、海中への排気ガスの放出が比較的容易であること等の利点を有するためである。

前章までに述べた魚ロボットは、最高 3 ~ 10 Hz 程度の周波数で尾部を左右に往復運動させて推進する。現在の船舶用推進装置に用いられているスクリュプロペラは回転運動を利用しているのに対し、魚ロボットの推進方法は往復運動を利用していることが大きく異なる特徴である。

一般の回転式エンジンはピストンの往復運動をクランク機構により回転運動へ変換している。そのため、回転式エンジンを魚ロボットに適用する場合、回転運動を往復運動へと変換する必要がある。一方、セミフリーピストン形スターリングエンジンは、ピストンの往復運動を直接尾部の往復運動に利用できるため、クランク機構や出力伝達部での機械損失を大幅に低減できる可能性がある。

また、魚ロボットに用いるセミフリーピストン形スターリングエンジンは、従来から開発されているスターリングエンジンに比べて、かなり低い周波数（最高 3 ~ 10 Hz）で運転されるため、熱交換器での圧力損失及びディスプレイサに作用する慣性力がかなり小さくなり、ディスプレイサの駆動エネルギーを大幅に低減できると予想される。さらに、セミフリーピストン形スターリングエンジンは、回転運動を有する他のエンジンと比べて、往復運動の周波数制御が容易である。これらの理由から、セミフリーピストン形スターリングエンジンは魚ロボットに適した動力源であると考えられる。

6.3 実験用スターリングエンジンの構造と性能

パワーピストンの往復運動から直接動力を取り出す場合の動作を確認し、魚ロボットへの適用性を検討するため、実験用スターリングエンジンの設計・試作を行い¹⁹⁾、様々な運転パラメータがエンジン特性の及ぼす影響を測定した²⁰⁾。

6.3.1 実験用スターリングエンジンの構造

図 6.2 に実験用スターリングエンジンの構造、表

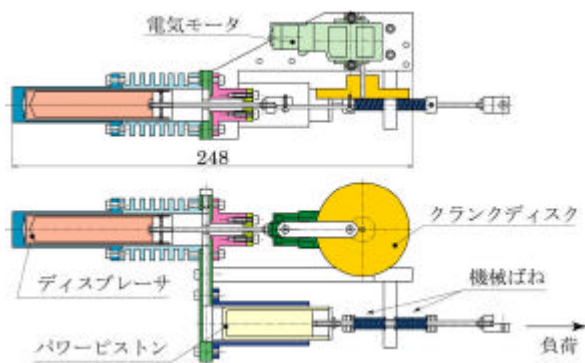


図 6.2 実験用スターリングエンジンの構造

表 6.1 実験用スターリングエンジンの仕様

エンジン形式	γ 形
ディスプレイサ	
ピストン径	18 mm
ストローク	16 mm
パワーピストン	
ピストン径	20 mm
ストローク	~ 20 mm
往復部質量	46.6 g
周波数	0 ~ 12 Hz
作動ガス	空気
平均圧力	101.3 kPa (大気圧)
加熱形式	電熱線
冷却形式	空冷 (自然放熱)

6.1 に主な仕様を示す。ディスプレイサとシリンダの間には 1 mm の隙間があり、再生器を省略した簡単な構造としている。ガス漏れの影響及び摩擦の影響を極力抑えるため、パワーピストンにはガラス製の注射器を流用している。パワーピストンのロッドには 2 本の機械ばねが取り付けられており、運転時にはパワーピストン端部にリンク機構を介してアルミニウム合金製のフィン(厚さ 3 mm)を取り付け、それを水中で往復運動させることで負荷が与えられる。

6.3.2 測定装置及び実験方法

図 6.3 に測定装置系統を示す。ディスプレイサの上死点信号及び回転角はフォトマイクロセンサにより検知され、パワーピストンのストロークはレーザ式変位センサを用いて測定される。また、ガス温度は K 熱電対により測定され、作動ガス圧力はひずみゲージ式圧力センサを用いて測定される。

表 6.2 に実験条件を示す。実験に使用した機械ばね及びフィンはそれぞれ 3 種類である。これらのばね定数 k 及びフィンの長さ L_{fin} を変化させることによって振動系の特性を調整できる。また、加熱源には電熱線を使用し、膨張空間ガス温度 T_E が 600 に

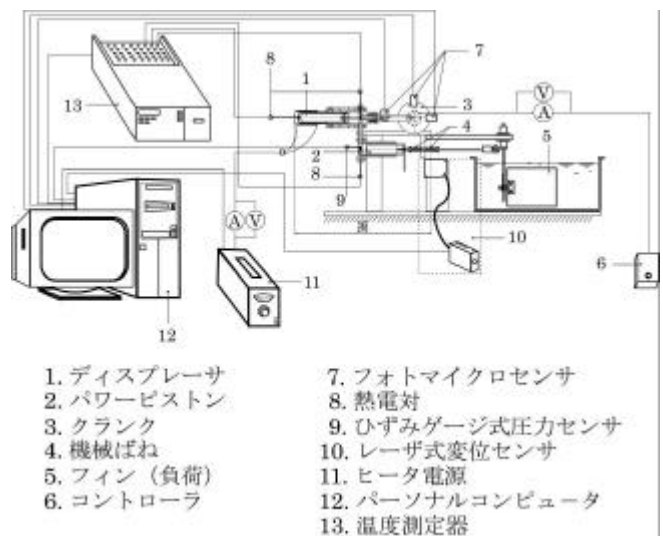


図 6.3 実験測定装置系統

表 6.2 実験用スターリングエンジンの実験条件

機械ばね	
ばね定数 k	80.2 N/m 210.8 N/m 340.4 N/m
フィン	
高さ×長さ	50×50 mm (28.2 g)
(往復部等価質量)	50×75 mm (63.5 g)
	50×100 mm (112.9 g)
膨張空間ガス温度 T_E	600

なるように入熱量を調整した。

6.3.3 実験用スターリングエンジンの性能特性

図 6.4 は、ばね定数 k をパラメータとした場合の周波数 f に対するパワーピストンのストローク S_t の実験結果を示している。これより、パワーピストンの運動には共振点が存在し、ばね定数 k が大きくなるに従って、共振周波数が高くなり、ストローク S_t が減少していることがわかる。図 6.5 は、フィンの寸法をパラメータとした場合の周波数 f に対するパワーピストンのストローク S_t の実験結果を示している。フィンの寸法を変化させることによってフィンによる往復部質量が変化するため、これは振動系の減衰力と質量を変化させたことに相当する。これより、フィン寸法を大きくするに従って、共振周波数は低下し、ストロークの最大値が減少していることがわかる。

セミフリーピストン形スターリングエンジンは共振状態で運転させることで、適切な作動空間を構成する。上記の実験より、パワーピストンの共振周波数は、往復部質量 m 、ばね定数 k 及び減衰力(尾部の駆動力)に大きく影響を受けることが確認された。すなわち、エンジン設計において、それらを適切に

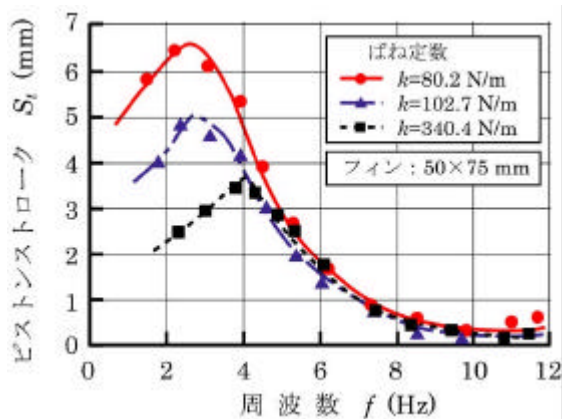


図 6.4 実験用スターリングエンジンのピストンストロークに及ぼすばね定数の影響

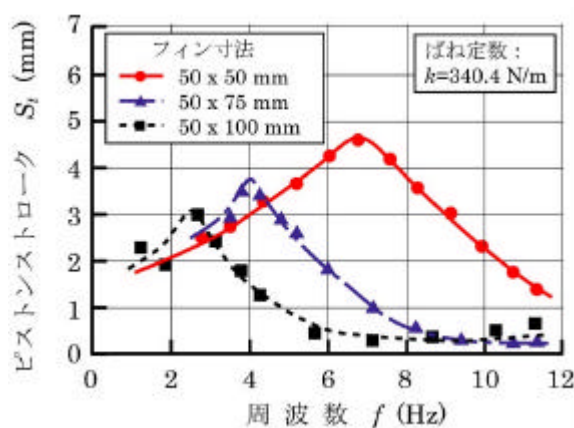


図 6.5 実験用スターリングエンジンのピストンストロークに及ぼすフィン寸法の影響

設定することが重要である。

一方、本研究では、セミフリーピストン形スターリングエンジンの振動系に関するシミュレーション計算を行った¹⁹⁾。計算結果の定性的な傾向は実験結果によく一致したが、共振周波数の計算結果は実験結果の約 3~4 倍程度となることが確認された。シミュレーションにおいて、減衰力を一定速度で運動する平板の抗力に置き換えたが、本実験のようにフィンを往復運動させた場合には、渦の発生等によってその特性は大きく異なる可能性がある。また、実際の魚口ボットに適用した場合には、周囲の流れが大きく異なると考えられるため、各パラメータの設定あるいは制御方法についてさらに詳細な検討が必要である。

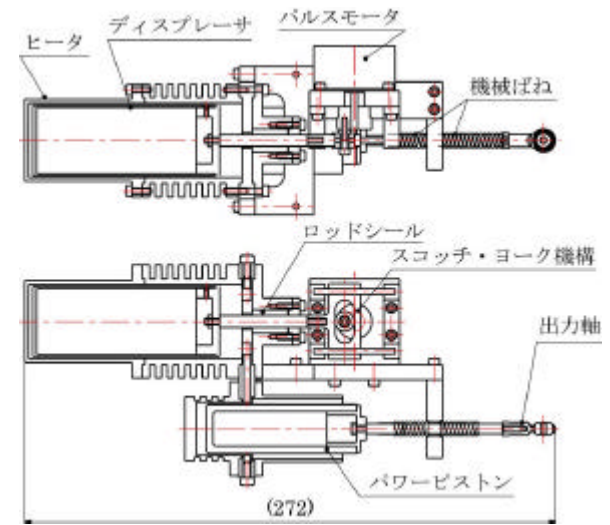
6.4 魚の推進方法を利用した模型ボートの開発

前章までに述べた実験用魚口ボットの実験より、魚口ボットの遊泳速度は尾部の周波数、振幅及び尾ひれの形状等に大きく影響を受けることが確認できたものの、尾部の駆動力を測定するには至っていない。本来ならば、推進効率や駆動力等の特性を十分

に把握した後、新たな動力源について検討し、設計を進めることが望ましい。しかし、セミフリーピストン形スターリングエンジンの出力特性や魚口ボット尾部の流体力に起因する尾部の駆動力の解析は極めて複雑であり、現状のシミュレーション計算でそれらを詳細に検討することは難しい。そこで、実験的にエンジンの特性や問題点を明らかとするため、模型レベルのスターリングエンジンを魚の推進方法を利用した模型ボートに搭載することとした。

6.4.1 エンジン及び模型ボートの構造

図 6.6 に模型ボート用スターリングエンジンの構造と外観、表 6.3 に主な仕様を示す。基本構造は図 6.2 に示した実験用スターリングエンジンと同様であり、ヒータ並びにディスプレイサは従来の模型エンジンに用いられている簡易的な構造とし、再生器は取り付けられていない。ディスプレイサの駆動には、周波数の設定が容易なパルスモータを使用した。パルスモータの周波数(回転数)はマイクロコンピュータにより 0.5 Hz から 4.0 Hz まで 0.5 Hz 刻みで任意に設定できる。ディスプレイサの駆動機構にはスコッチ・ヨーク機構を採用し、小型化を試みた。



(a) 構造



(b) 外観

図 6.6 模型ボート用スターリングエンジン

表 6.3 模型ボート用スターリングエンジンの仕様

エンジン形式	γ 形
目標出力	2 W / 5 Hz
ディスプレーサ ピストン径 ストローク ピストン駆動機構	36 mm 10 mm スコッチ・ヨーク機構
パワーピストン ピストン径 最大ストローク（設計値）	27.5 mm (~15 mm)
作動ガス	空気
平均圧力	101.3 kPa（大気圧）

ディスプレーサのロッドシールには市販の滑り軸受（ASK 社）を使用した。パワーピストンには 50 ml の注射器を流用し，ロッドの一端には 2 本の機械ばね（ $k = 360 \text{ N/m}$ ）が取り付けられている。

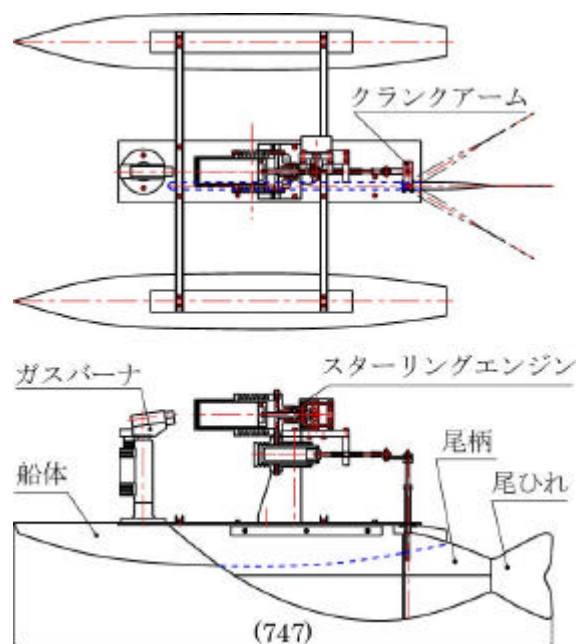
図 6.7 に試作した模型ボートの構造及び外観を示す。模型ボートは、船体の安定性や推進装置（尾ひれ）の配置を考慮し，双胴船とした。エンジンは模型ボートのほぼ中央に配置され，その前方の小型ガスバーナによって，ヒータを直接加熱する。船体の中央後部には，魚を模擬した推進装置を取り付けている。推進装置とパワーピストンのロッドとはクランク機構を介して結合され，クランクアーム長さを調整することで尾部の振幅を調整できる構造としている。なお，以下の実験においてはクランクアーム長さを 20 mm 一定とした。尾柄の材質には硬質の木材を使用し，尾ひれには軟質のポリプロピレン板（厚さ 0.75 mm）を使用した。エンジンを含めた模型ボートの総重量は約 2 kg である。

上述の通り，セミフリーピストン形スターリングエンジンの振動特性は，往復部質量，ばね定数及び減衰力に大きく影響を受ける。以下の実験では，図 6.8 に示す 4 種類の尾ひれを用いることで振動特性を変化させ，パワーピストンの共振周波数や模型ボートの速度に及ぼす影響を調べた。4 種類の尾ひれは，相似形状をしており，Type B，Type C 及び Type D の尾ひれはそれぞれ Type A の尾ひれの 80 %，60 %及び 40 %の寸法としている。

6.4.2 模型ボートの性能試験

模型ボートを試作した後，長さ 10 m，幅 3 m の水槽で運転試験を行った²²⁾。実験において，ガスバーナの入熱量を一定とした。模型ボートの速度 V は，約 3 m の助走区間を運転させた後，1 m の距離を進むのに要した時間を測定することにより求めた。

図 6.9 は，4 種類の尾ひれを用いた場合の周波数 f に対する模型ボートの速度 V の実験結果を示している。これより，本実験における最高速度は，Type B



(a) 構造



(b) 外観

図 6.7 試作した模型ボート

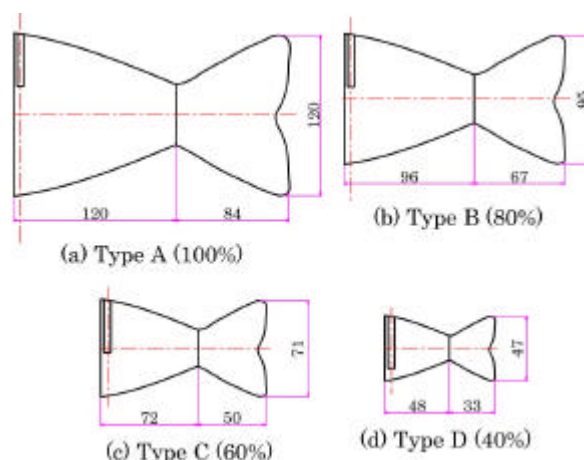


図 6.8 模型ボートの尾部の形状

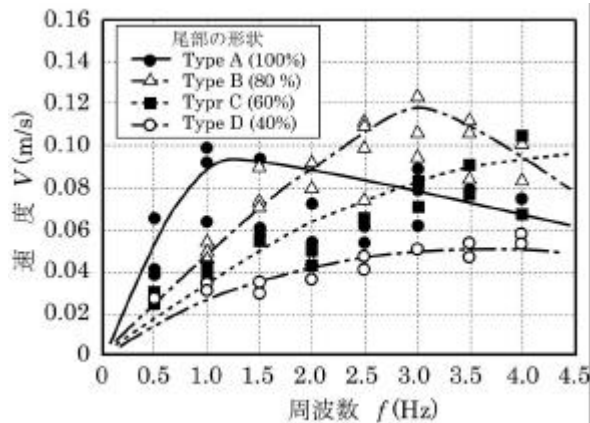


図 6.9 模型ボートの尾部周波数と速度の関係

(80%)の尾ひれを用いた場合、周波数3 Hzにおいて約0.12 m/sであることがわかる。模型ボートや尾ひれの寸法などから考えて、この速度が十分であるとは言い難い。ばね定数やピストン往復部質量等の条件を適切に設定することで、さらなる高速化が可能であると考えられる。また、実験結果のばらつきが大きいのは、模型ボートが風等の外乱の影響を大きく受けていることや、模型ボートの直進性が低く測定時に適切な進路を保つことができなかったことに起因すると考えられる。

一方、パワーピストンのストロークは、最高速度が得られる周波数よりも低い周波数で大きくなることが目測により確認された。このことは、最高速度が得られた周波数よりも低い範囲に共振周波数があることを示している。すなわち、周波数が高くなるに従って尾部の振幅が減少したため、推進力の大幅な増加が得られなかったものと考えられる。

以上に記した周波数と模型ボートの速度との関係は、共振周波数に大きく影響を受けているのは明らかである。それを詳細に評価するためには、パワーピストンのストローク変化や作動空間内の圧力変化を測定する必要がある。上述の運転試験では、それらの測定には至らなかったが、それらを測定すると同時にばねの復元力や尾ひれの減衰力を適切に制御することで、魚の泳法を模擬した推進装置の高性能化が図られると考えられる。

6.5 まとめ

本章では、セミフリーピストン形スターリングエンジンの魚口ロボットへの適用性について検討し、本エンジンの基本特性を把握するため、実験用スターリングエンジンによる動作確認を行った。さらに、セミフリーピストン形スターリングエンジンを搭載した模型ボートを試作し、運転試験を行った。それらの結果、エンジン設計や最適運動制御に有用な性能解析には至らなかったものの、本エンジンについ

ての様々な知見が得られたと考えている。

魚の泳法を模擬した推進方法は、高い推進効率を達成しうると考えられるが、従来の回転式モータあるいはエンジンを利用する場合、回転運動を往復運動に変換する必要があるため、そこでの損失を考慮すると推進システムとしての効率が大幅に低下する可能性がある。ピストンの往復運動を直接動力として利用できるセミフリーピストン形スターリングエンジンが適用できれば、高性能な推進システムの開発が可能であると考えられる。ただし、エンジンを低い周波数で運転させることに起因するエンジンの大型化や使用する熱源の選定等、多くの課題が残されており、それらを解決するための新しい技術が必要不可欠である。

7. 結 言

本研究では、数種類の実験用魚口ロボットを設計・試作し、それらの基本性能を測定した。また、魚口ロボットの運動制御法としてファジィ理論の適用性について検討し、魚口ロボットに用いるための新しい動力源を提案した。これらの実験的研究により、ハード面・ソフト面を含めて様々な知見が得られたものと認識している。しかし、本研究で目指している新しい高効率推進方法としての評価及び自律型海中ロボットの開発には至っていない。以下、今後の研究に残された課題並びに今後の研究の方向性についてまとめる。

本研究では、魚口ロボットの推進方法及び旋回方法について検討を行い、数種類の実験用魚口ロボットを設計・試作した。実験用魚口ロボットの設計の際には、尾部の抗力を簡易的に見積もることで、魚口ロボットの寸法や使用する動力源を決定した。しかし、推進力や抵抗に関する詳細な解析が行われなかったため、魚口ロボットの遊泳速度や旋回性能を含めた設計手法や性能予測法の確立には至っていない。魚口ロボット並びに魚の泳法を模擬した推進方法の高性能化を図り、最適設計を行うためには、周囲の流れを把握するための詳細な解析が必要であり、シミュレーションコードの開発や流れの可視化等が有用であると考えられる。また、試作した実験用魚口ロボットの問題点を踏まえて、新たな魚口ロボットを開発することにより、設計手法の確立に有用なデータが得られると考えられる。

本研究では、実験用魚口ロボットの推進性能（直進時の性能）及び旋回性能（旋回直径と旋回時間）を測定した。魚の泳法を模擬した推進装置を海中ロボットに適用する場合、上下運動を含めた3次元運動が必要不可欠である。現在、上下運動の方法について検討を進めているが、実機による動作確認には至

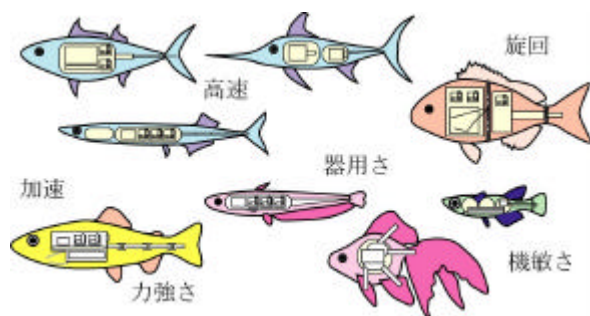


図 7.1 多形式の魚口ロボット

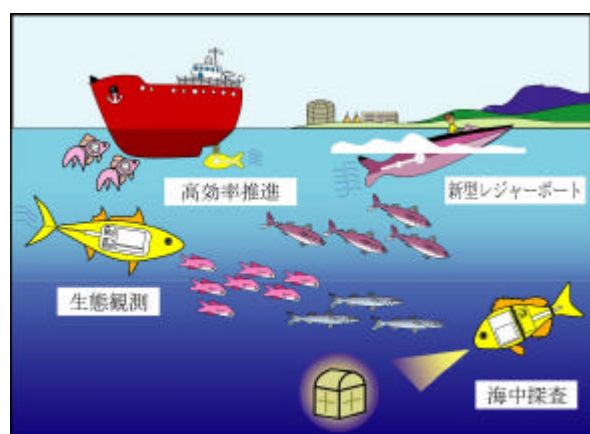


図 7.2 将来の魚口ロボット

っていない。

本研究で開発した実験用魚口ロボットは、自律制御及び最適制御には至らなかった。魚ロボットの自律化を実現するためには、高度なコンピュータ制御技術とセンサ技術が必要不可欠であると考えている。

現状では、魚の泳法を模倣した推進方法を利用することによって、海中ロボットの飛躍的な高性能化が可能であるとは断言できない。しかし、実際の魚が高度な遊泳性能を有していることは明らかであり、図 7.1 に示すような高速性、旋回性、加速性及び機敏性等に優れた様々な形式の魚口ロボットを開発する必要があると考えている。これらの魚ロボットの開発を実現できれば、図 7.2 に示すような船舶への適用や海洋調査、生態観測、海中作業を目指した高性能海中ロボットの実現が可能になるものと確信している。

最後に、本研究を進めるに際し、実験の遂行等に協力頂いた当時東京電機大学工学部機械工学科研修生の植木原明氏、藁科真一氏、宇田敏樹氏、吉田誠氏、杉浦忠氏、小宮一郎氏に深くお礼申し上げます。実験用セミフリーピストン形スターリングエンジンの開発並びにシミュレーションを検討して頂いた東京電機大学工学部山下巖教授、魚口ロボットを数値流体力学的な観点から検討して頂いた当時名古屋工業

大学工学部劉浩助教授、魚ロボットのコンピュータ制御に協力頂いた電気通信大学大学院情報システム学研究科菅原研博士並びに実験の遂行や解析に協力頂いた当研究所諸氏に深く感謝いたします。また、インターネットを通じて有用な助言を頂いた Keith Nichols 氏をはじめ、諸外国の皆様には深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 東昭：生物の動きの事典，朝倉書店（1997），p.141-183
- 2) 永井實：イルカに学ぶ流体力学，オーム社（1998）
- 3) Proceedings of First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms (2000)
- 4) 加藤一郎：動物のメカニズム，朝倉書店（1980），p.36-37
- 5) 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），p.29-32
- 6) 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），p.68-71
- 7) HIRATA, K., TAKIMOTO, T. and TAMURA, K.: Study on Turning Performance of a Fish Robot, First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms (2000), p.287-292
- 8) 大熊繁：ロボット制御，オーム社（1998）
- 9) HIRATA, K.: Development of Experimental Fish Robot, Sixth International Symposium On Marine Engineering (2000), p.711-714
- 10) 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），p.163-166
- 11) 瀧本忠教，平田宏一，牧野雅彦：魚ロボットの抵抗測定と流体力学的検討，日本設計工学会東北支部，平成 12 年度研究発表講演会（2000），p.84-87
- 12) 岩井保，久田迪夫，安部義孝，太田一男，桜井淳史：学研の図鑑 魚，学研（1998）
- 13) 文献(2)の p.8
- 14) 一色尚次，森川裕久，加藤恒，柵原浩，和田裕：振動翼推進の研究，日本船用機関学会誌，第 14 巻，第 7 号（1979），p.85-91
- 15) 萩原将文：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム，産業図書（1998）
- 16) 平田宏一，春海一佳：ファジィ理論を利用した魚ロボットの運動制御，日本設計工学会東北支部，平成 11 年度研究発表講演会（1999），

- p.72-75
- 17) 平田宏一：高速化を目指した実験用魚ロボットの開発，日本設計工学会，平成 13 年度春期研究発表講演会講演論文集 (2001)，p.163-166
 - 18) 文献(15)の p.85-91
 - 19) 平田宏一，植木原明，山下巖：魚ロボットに用いるセミフリーピストン形スターリングエンジン，日本機械学会第 3 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集 (1999)，p.77-78
 - 20) 平田宏一：実験用セミフリーピストン形スターリングエンジンの性能特性，日本船用機関学会第 64 回マリンエンジニアリング講演論文集 (2000)，p.105-108
 - 21) 平田宏一，小宮一郎，杉浦忠，山下巖，セミフリーピストン形スターリングエンジンを用いた魚ロボットの開発，日本機械学会第 4 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集 (2000)，p.93-94
 - 22) Hoshino, T., Fujiwara, T., Ogiwara, S. and Eguchi, K.: Performance Evaluations of Space-Based Stirling Engine - NALSEM 500, 8th International Stirling Engine Conference (1997), p.133-138
 - 23) Tsukahara, S., Kuwabara, M., Hirata, K., Kumakura, T. and Isshiki, N.: Stirling Power System for Underwater Application, 6th International Stirling Engine Conference (1993), p.421-426