

# 海上技術安全研究所における魚口ボットの開発\*

## Development of Fish Robots at National Maritime Research Institute

平田 宏一\*\*  
( Koichi HIRATA )

### 1.はじめに

近年、海洋開発や海洋環境保全の観点から、海中作業ロボットの開発が活発に進められている。そして、海中ロボットの高性能化・高機能化が極めて重要な課題となっている。一方、海中には様々な種類の魚が生活している。それぞれの魚は、体形や運動形式が異なり、それぞれ特有の優れた遊泳能力を有している。そのような生物の優れた特徴をロボット開発に活かすことで、様々な用途に使用できる高性能な海中作業ロボットを実現できると考えられる。著者らは、高い遊泳性能を有する海中作業ロボットの開発並びに新しい船舶用高性能推進装置の開発を目指して、魚の泳法を模擬したロボット（魚口ボット）の研究を進めてきた<sup>1)</sup>。本報では、魚口ボットの推進方法や運動性能について概説する。そして、著者らが現在までに開発してきた魚口ボットの構造や性能について解説する。

### 2.魚口ボットの推進原理と運動性能

魚の泳法や魚口ボットに関する研究は、国内外で活発に行われてきた<sup>2),3)</sup>。それらの研究の多くは、主として魚の推進効率の高さに着目している。しかし、魚口ボットは、推進性能ばかりでなく、旋回運動や上下運動といった運動性能の高さも期待できる。以下、魚口ボットの推進方法、旋回方法及び上下運動方法を機械設計の観点から分類し、それらの特徴について検討する。

#### 2.1 魚口ボットの推進方法

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。著者らは魚口ボットを設計

するに当たって、その推進方法を、(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種類に分類した。これらは魚口ボットの構造や機能を検討するために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。

#### (1) 進行波による推進

図1(a)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、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口ボットは多関節

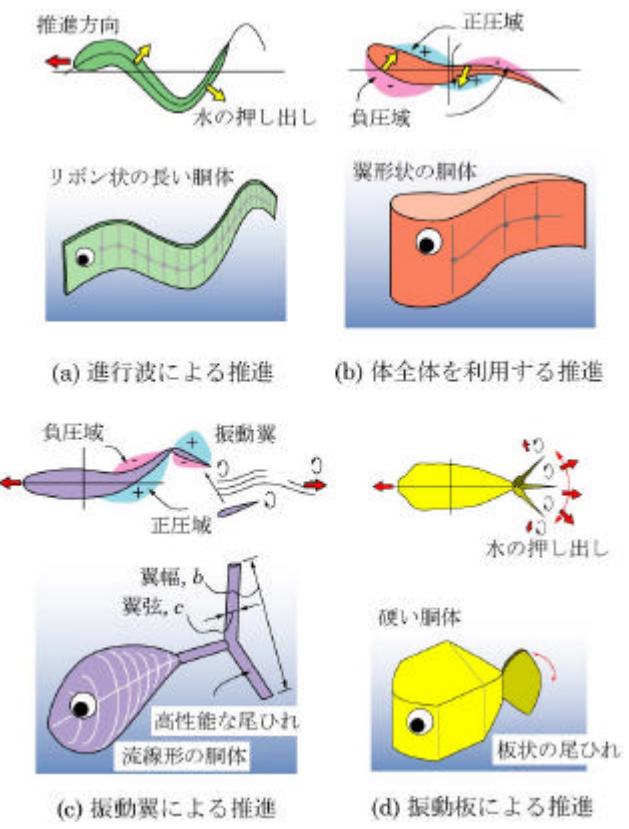


図1 魚口ボットの推進方法<sup>1)</sup>

\* 原稿受付 2002年12月21日

\*\* 海上技術安全研究所  
(〒181-0004 三鷹市新川6-38-1)

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作業ロボットに利用できると考えられる。

#### (2) 体全体を利用する推進

図1(b)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。同図に示すように、体全体を1枚の翼と見なした場合、魚口ロボ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、推進力の方向を任意に操作し、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くこと等の利点があげられる。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。

#### (3) 振動翼による推進

図1(c)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（ヒーヴィング運動）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<sup>2)</sup>。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ロボットの高速遊泳が可能となる。そして、魚口ロボ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ること、動力源からの駆動力が尾ひれ付け根の関節に集中すること等があげられる。

#### (4) 振動板による推進

図1(d)に示す振動板による推進は、体をほとんど使わずに板状の尾ひれだけを動かして推進する方法である。上述した振動翼による推進方法と比較すると、ヒーヴィング運動がないことが特徴である。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。そのため、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ロボットに利用できる推進方法であると考えられる。

## 2.2 魚口ロボットの旋回方法

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。本報で紹介する魚口ロボットでは、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。魚口ロボットが尾部の運動だけを利用して旋回する場合、旋回方法は次の3種類に分類される<sup>4)</sup>。

#### (1) 旋回モードA

図2(a)に示す旋回モードAは、尾部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、尾部が推力を発生させながら、魚口ロボットの頭部及び胴体が船舶における方向舵と同様の動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

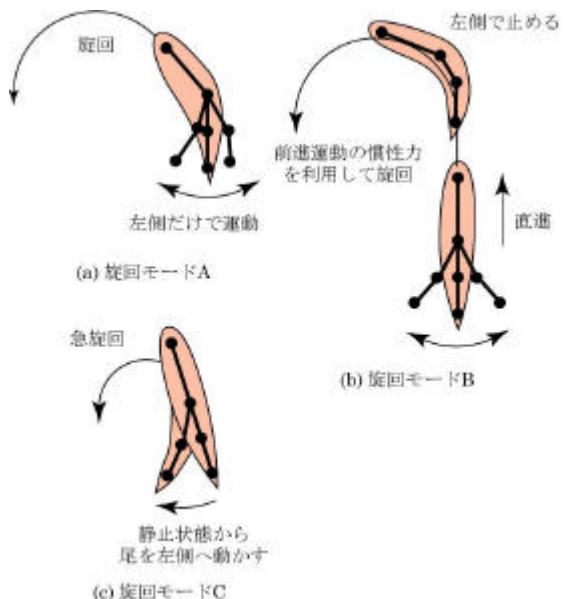


図2 魚口ロボットの旋回方法<sup>4)</sup>

図 2(b)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、尾部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。この方法は、体全体で発生する揚力を旋回に利用できるため、上述した旋回モード A より、旋回直径を小さくできる。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、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(c)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、尾部を左右のどちらか一方に勢い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。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、尾部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。

## 2.3 上下運動のためのメカニズム

海中作業用の魚口ボットを実現するためには、高性能な 3 次元運動（前進、旋回、上下運動）が必要不可欠である。以下、魚口ボットの上下運動メカニズムとして、(1) 浮き袋を用いる方法、(2) フィンを用いる方法、(3) 上下方向の関節を取り付ける方法、(4) 重心位置を移動する方法を検討する。

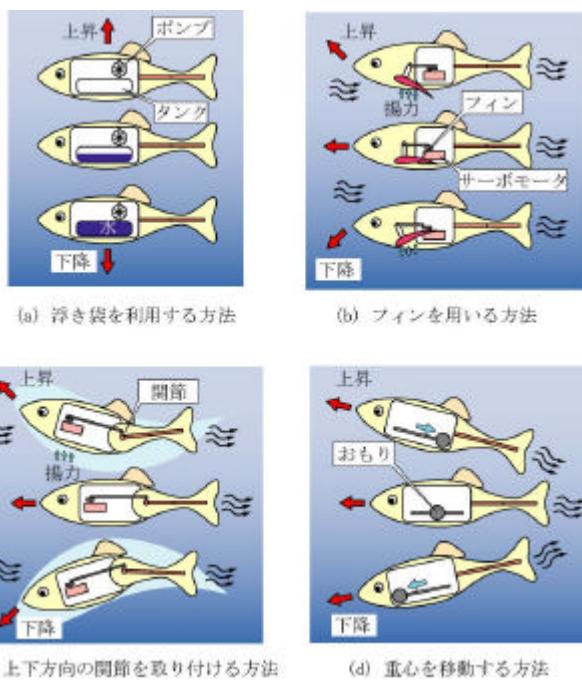


図 3 魚口ボットの上下運動メカニズム<sup>1)</sup>

### (1) 浮き袋を利用する方法

図 3(a)は、魚口ボットにタンクとポンプを搭載し、タンク内に水を流入・流出させることで重力と浮力のバランスを変化させる方法である。すなわち、タンク内に水が満たされている場合は浮力よりも重力が上回り魚口ボットは降下し、タンク内に空気が満たされている場合は重力よりも浮力が上回り魚口ボットは上昇する。この方法は、垂直な上下運動が可能であり、最も確実で正確な深度調整ができると考えられる。しかし、ポンプ能力の制限による応答性の低さ、圧縮空気の保守、タンクとポンプを搭載することによる魚口ボットの大型化などの問題が生じると考えられる。

### (2) フィンを用いる方法

図 3(b)は、魚口ボットにフィン（翼）を取り付け、その揚力を利用して上下運動を行う方法である。航空機の主翼や水平尾翼と同様、フィンを取り付ける位置や操作によって、多様な運動を実現できると考えられる。しかし、高速遊泳時においては早い応答性と高い運動性能が期待できる。しかし、フィンの揚力を利用するため、ある程度以上の遊泳速度が必要であり、細かい位置制御には適していない。

### (3) 上下方向の関節を取り付ける方法

図 3(c)に示すように、魚口ボットに上下方向の関節を取り付けることによって上下運動が可能となる。図 2 に示した旋回方法のように、魚口ボットの体全体を翼の形状に変化させることができれば、高速遊泳時において早い応答性と高い運動特性が期待できる。また、体全体の揚力を発生させなくても、尾部から発生する推進力の方向を変化することで上下運動を行うことができると考えられる。

### (4) 重心を移動する方法

図 3(d)は、魚口ボット内部のおもりを前後に移動させることで、魚口ボットの体勢を変化させ、尾部の推進力によって上下運動する方法である。重心移動の装置は魚口ボットの内部だけに配置できるので、水密シールや機構の点から最も簡単な方法であると考えられる。早い応答性並びに適切な上下運動を実現するためには、重心と浮心のバランス調整が重要である。

## 3. 実験用魚口ボットの設計・試作例

以上のように、魚口ボットには様々な形式があり、要求される推進性能や運動性能によって、それぞれの特性をしっかりと考へた上で、設計を進める必要がある。以下、著者らがそれらの特性を調べるために設計・試作した、いくつかの実験用魚口ボットを紹介する。

### 3.1 推進性能を調べるための実験用魚口ボット

魚口ボットの推進性能は、尾柄と尾ひれとの位相差や周波数、振幅等の運動形式に大きく影響を受ける。以下、運動形式と推進性能の関係を調べるために設計・試作した2種類の実験用魚口ボットを紹介する。

#### 3.1.1 実験用魚口ボットPF-600

図4に示す実験用魚口ボットPF-600は、多様な運動形式を模擬するため、回転角度制御が容易なラジコン模型用(R/C)のサーボモータを動力源としている。PF-600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が搭載されている。サーボモータは、パソコン制御によるR/C送信機により遠隔操縦され、各関節を任意の運動形式で動かすことができる。尾柄駆動用サーボモータは、尾柄の2つの関節を駆動し、尾ひれ駆動用サーボモータは、尾柄部の2つの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、尾ひれを任意に運動させることができる。

図5は、実験結果の一例として、尾柄と尾ひれとの位相差を90degとした場合、尾部の周波数に対する速度の関係を示している。本実験では、断面を比較的平面状とした三角形尾ひれと断面が翼形状をした三日月形尾ひれの2種類の尾ひれを用いた。これより、周波数が比較的

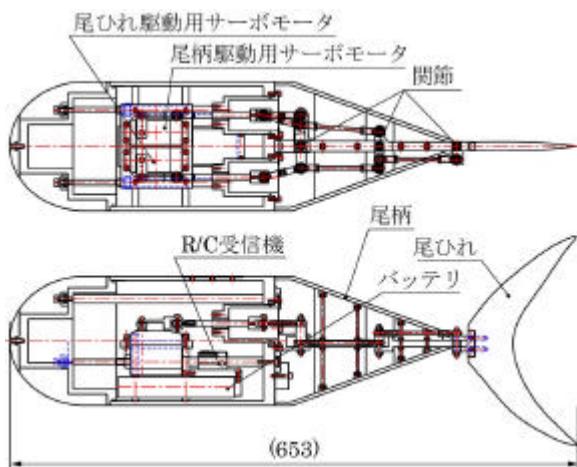


図4 実験用魚口ボット PF-600 の構造<sup>5)</sup>

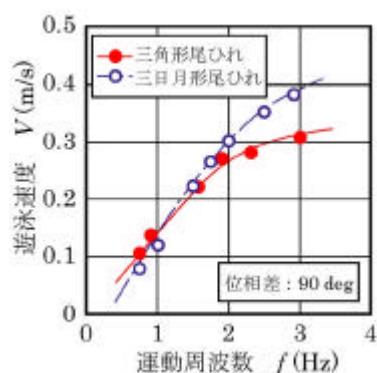


図5 PF-600 の実験結果<sup>5)</sup>

高い範囲においては、三日月形尾ひれを用いた場合の速度が三角形尾ひれの場合よりも高いことがわかる。このような実験により、尾ひれの形状や尾部の運動形式が推進性能に及ぼす影響を調べることができた。また、一連の実験において、PF-600の最高速度は約0.4 m/sであった。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<sup>3)</sup>を考えると、かなり低い値である。これはPF-600の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に起因していると考えられる。

#### 3.1.2 実験用魚口ボットPF-700

図5からもわかるように、魚口ボットの速度は、尾ひれの周波数の上昇に伴って増加する。また、PF-600で用いた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させることは難しい。図6に示す実験用魚口ボットPF-700は、高速化を目指して設計・試作した魚口ボットであり、動力源に直流モータを使用することで、最高10 Hz程度の周波数で尾ひれを運動させることができる。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7は実験結果の一例として、尾ひれの片側振幅を5、10及び15°とした場合の周波数と速度の関係を示している。これより、速度は、周波数が高く、振幅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10°における速度は振幅5°における速度の約3倍にも達し

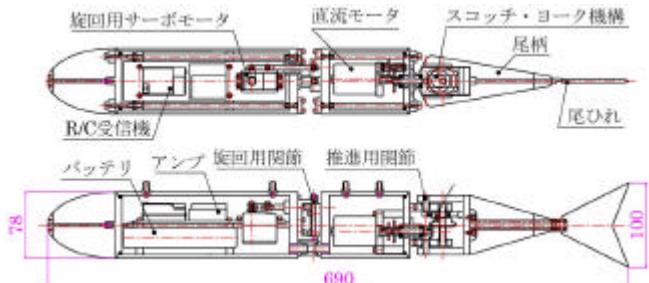


図6 実験用魚口ボット PF-700 の構造<sup>6)</sup>

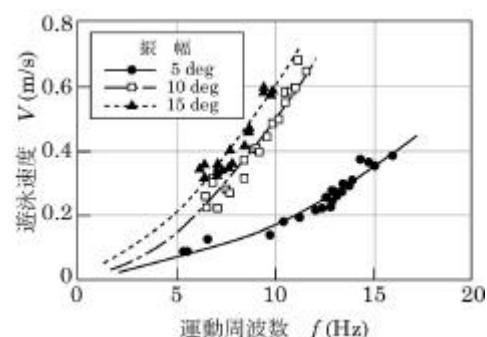


図7 PF-700 の実験結果<sup>6)</sup>

ているのに対し、振幅  $15^\circ$  における速度には大幅な増加が見られない。これは、実験時の魚口ボットの没水深度が浅かったため、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。本実験において、PF-700 の最高速度は、振幅  $10^\circ$ 、周波数  $11\text{ Hz}$  のとき、約  $0.68\text{ m/s}$  であった。これは、PF-600 の約 2 倍であり、尾ひれの周波数を高めることは魚口ボットの高速化に有効であることが確認された。

### 3.2 旋回性能を調べるために実験用魚口ボット

図 8 に示す実験用魚口ボット PF-300 は、2.2 節に述べた旋回性能を調べるために設計・試作した魚口ボットである。2.1 節及び 2.2 節に述べた魚口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、PF-300 の形状は、側扁形の体形を有するタイプの体形を参考にした。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 つの R/C サーボモータで駆動させることとした。全長は約  $340\text{ mm}$  であり、頭部に R/C 受信機、胴部にバッテリ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。これらの形状や配置は、魚口ボットの体形、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決定している。

図 9 は、2.2 節に述べた旋回モード A～C における旋回実験時の合成写真を示している。これらの実験より、PF-300 は高い旋回性能を有していることが確認できた。特に、旋回モード C では、かなりの急旋回が可能であり、しかも、静止させた状態からの旋回が可能であるため、海中作業ロボットとしての応用性も高いと考えられる。

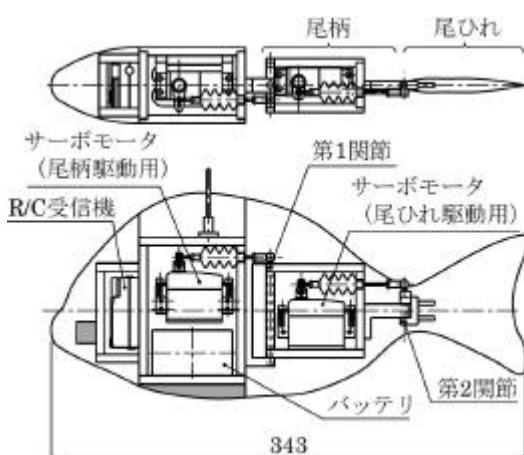
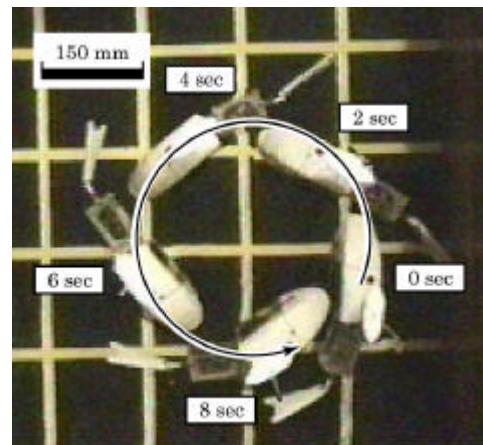
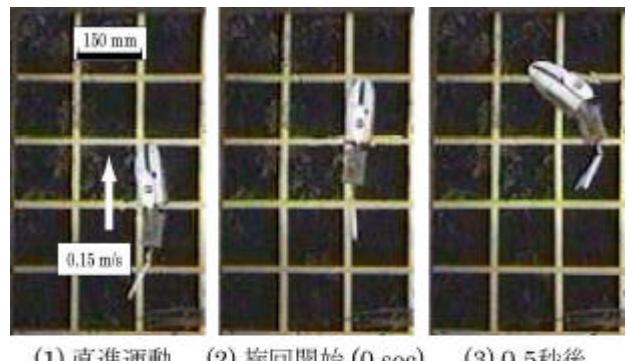


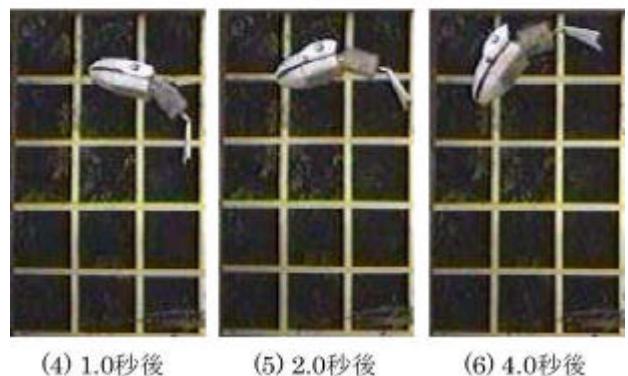
図 8 実験用魚口ボット PF-300 の構造<sup>4)</sup>



(a) 旋回モード A

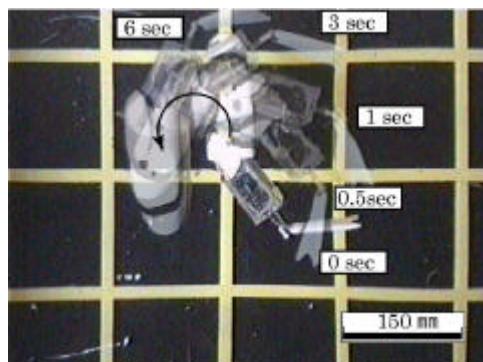


(1) 直進運動 (2) 旋回開始 (0 sec) (3) 0.5秒後



(4) 1.0秒後 (5) 2.0秒後 (6) 4.0秒後

(b) 旋回モード B



(c) 旋回モード C

図 9 PF-300 による実験結果の一例<sup>4)</sup>

### 3.3 上下運動メカニズムを搭載した魚口ボット

以上で紹介した3種類の魚口ボットは上下運動メカニズムを有しておらず、上部に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た。以下で紹介する魚口ボットは、2.3節で述べた上下運動メカニズムを搭載している。

#### 3.3.1 実験用魚口ボットPPF-09

図10に示す魚口ボットPPF-09は、頭部に取り付けたフィンを動かすことにより、上下運動を行うことができる構造としている。基本構造は図8に示したPF-300と同様であり、2つのサーボモータで2つの関節を駆動している。PPF-09の正確な測定は行っていないが、直進時の最高速度は約0.4m/s、旋回モードAにおける最小旋回直径は約400mmであった。上下運動については、1m程度の助走をつけ、ある程度の速度になると、上下方向の運動が可能であった。しかし、深度方向の応答性はかなり遅く、実際の魚のような機敏な運動には至らなかった。これはPPF-09の遊泳速度が十分ではなかったこと、水中重量と比べて浮力をやや大きくしていること等に起因していると考えられる。

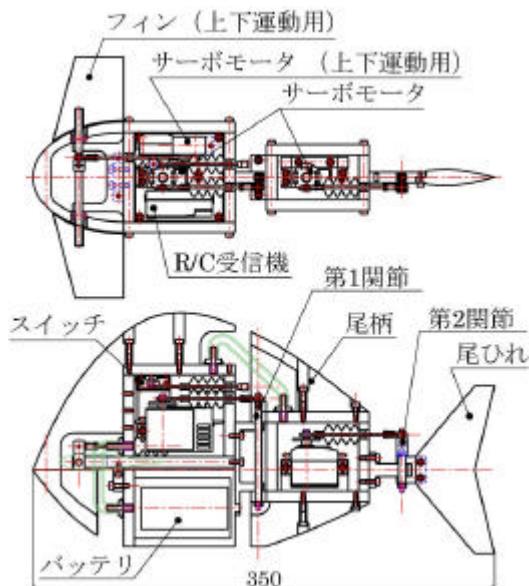


図10 実験用魚口ボット PPF-09 の構造<sup>1)</sup>

#### 3.3.2 実験用魚口ボットUPF-2001

図11に示す実験用魚口ボットUPF-2001は、上述のPPF-09と同様、頭部のフィンにより上下運動を行う。本魚口ボットは、動力源として直流モータを使用しており、2つの関節を動かす特殊な尾部駆動機構を採用している。図12に示す尾部駆動機構は、比較的簡単な構造であるが、高い周波数で、しかも適切な位相差で運動する。しかし、2.2節で述べたような尾部の運動による旋回を実現できなかったため、頭部下方に旋回用フィンを取り付けることで、方向修正程度の旋回性能を期待した。

図13は実験結果の一例として尾部の片側振幅を5、10及び15°とした場合、周波数に対する遊泳速度の関係を示している。これら一連の実験より、速度が約0.6m/sを超えると、魚口ボットは安定した水平遊泳ができなくなり、フィンの動作に関わらず水中に潜る現象が見られた。この現象は、胴体形状による流体力の他、浮力と重力の関係等が影響しているものと考えられる。また、旋回運動については、フィンによって働く力が魚口ボットを旋回させる方向に働くかず、魚口ボット自体をローリング

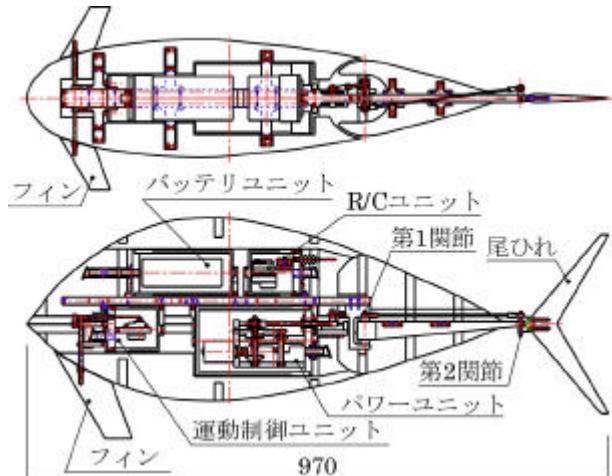


図11 実験用魚口ボット UPF-2001 の構造<sup>7)</sup>

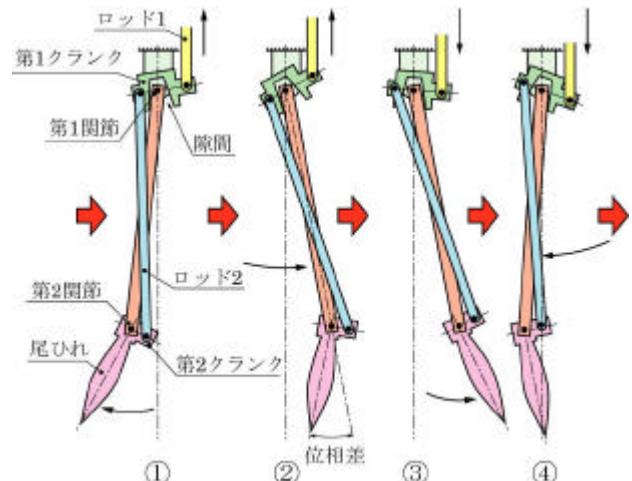


図12 UPF-2001 の尾部駆動機構<sup>7)</sup>

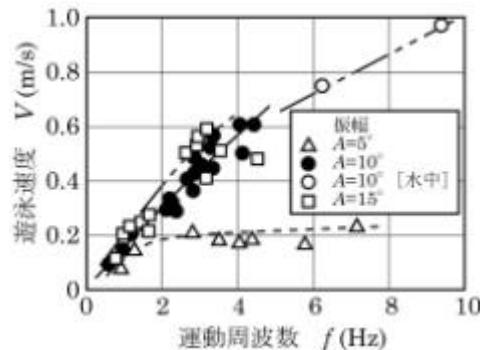


図13 UPF-2001 の実験結果<sup>7)</sup>

グさせる結果となり、期待した運動を実現できなかった。このように、フィンによる旋回運動及び上下運動については安定した操作特性が得られず、今後の課題として残されている。

### 3.3.3 その他の上下運動メカニズム

図14は、図3(c)に示した上下方向の関節を用いて上下運動を行う魚口ボットである。胴体内部に配置されたサーボモータを用いて、尾部を回転させることができ、図2に示した旋回方法と同様の原理によって上下運動を行う。図15に示す魚口ボットは、図3(d)に対応しており、おもりを前後に移動することで、魚口ボットを前後に傾斜させて上下運動を行う。なお、これら2種類の魚口ボットは、現在製作を検討している段階であり、これらの運動性能を把握するにはまだ至っていない。

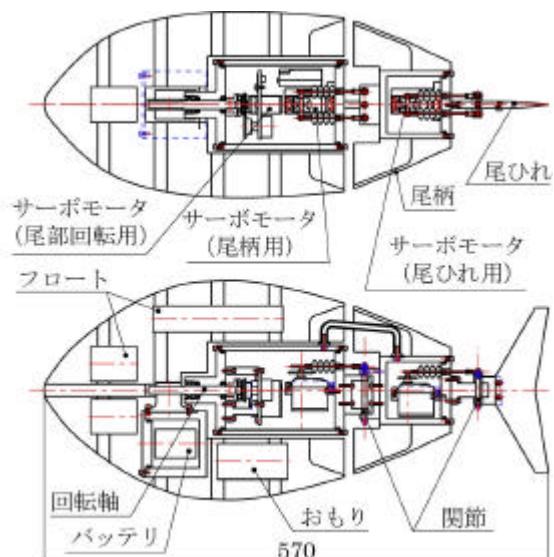


図14 上下方向の関節を用いた魚口ボット

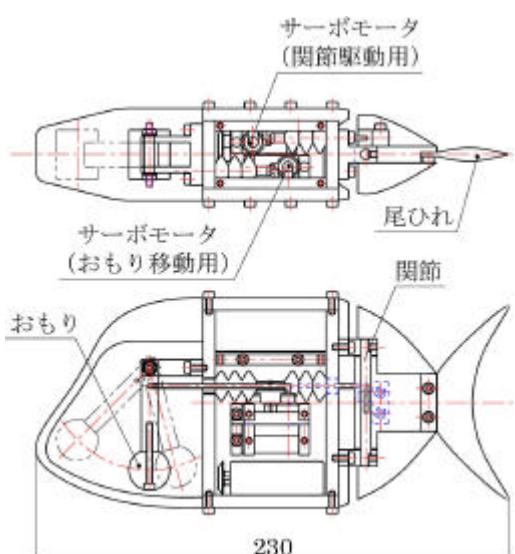


図15 おもりを移動して上下運動を行う魚口ボット

## 4.魚口ボットを実用化するための課題

本報で述べた魚口ボットは、まだ実験室レベルであり、実海域での海中作業に利用するまでは多くの課題を乗り越えなければならない。以下、魚口ボットを実用技術とするために必要な課題をあげておく。

### (1) 運動性能の向上

実験用魚口ボットの遊泳実験によって、魚口ボットが高い運動性能を有する可能性があることが確認されてきた。しかし、実際の魚と同等の機敏な動きは実現できていない。特に、上下運動は重力、浮力及び遊泳時の流体力に大きく影響されるため、その運動制御は極めて難しい。機械設計手法、流体力学的解析、さらに運動制御技術を高度化し、運動性能をより高める必要がある。

### (2) 推進効率と海中動力源

実際の海中作業では、長距離移動あるいは長時間連続航行が要求されることがある。そのような場合、魚口ボットの推進効率を向上させる必要があり、使用する動力源の高性能化が重要となる。特に、魚口ボットは、従来の船舶に広く用いられている回転式のスクリュープロペラとは異なり、尾部の往復運動を利用して推進している。高効率推進のためには高効率な往復式動力源の開発が必要不可欠である。

### (3) 水中計測技術と水中通信技術

海中作業では、周囲の状況を把握するための計測が必要であり、その計測結果を何らかの方法で伝達する必要がある。水中では電波を通しにくいため、そのような水中での計測や通信は陸上と比べて極めて難しい。海中作業の一例として、水中写真撮影などがあげられるが、リアルタイムの動画を陸上に通信することは極めて困難であるのが実情である。

### (4) 位置制御技術

海流中の魚口ボットは、自身の位置や向きを保持し、静止することは難しい。海洋機器の保守や点検に魚口ボットを用いる場合、そのような位置制御が必要となることがあり、そのためには上述の水中計測技術や運動性能の高度化が重要な課題である。

### (5) 海中作業への適用と設計技術

実際の海中作業は多種多様であり、それぞれの用途に適した魚口ボットを開発する必要がある。そのためには、第2章で述べたような魚口ボットの特徴を踏まえて、設計手法を確立させる必要がある。魚口ボットは実際の魚の運動を模擬するだけではない。一つの機械として、あるいは海中作業ロボットとしての設計が重要である。

## 5. おわりに

本報では、魚口ボットの推進性能や運動性能について、機械設計の観点から解説した。そして、著者らが現在までに開発してきた魚口ボットの構造や性能について述べた。現時点の魚口ボットはまだ実験段階にあり、多くの課題とともに、多くの発展性が残されている。多くの方々がこのような夢のある課題に興味を抱き、研究・開発を進めていただければ幸いである。そして、図 16 に示すように、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作業ロボットの実現が可能になるものと確信している。

著者らは、1種類だけの完成された実用魚口ボットの開発を目指しているわけではなく、図 17 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ボットを開発する必要があると考えている。今後、さらに多くの魚口ボットを提案し、魚口ボットの性能評価並びに高性能化を進めていきたいと考えている。それらの最新情報については、著者らが公開しているホームページ<sup>1)</sup>をご覧いただきたい。

### 参考文献

- 1) 平田宏一：魚口ボットホームページ，  
<http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>
- 2) 東昭：生物の動きの事典 朝倉書店，(1997) ,141-183 .
- 3) 永井寛：イルカに学ぶ流体力学，オーム社(1998) .
- 4) HIRATA, K., TAKIMOTO, T. and TAMURA, K.: Study on Turning Performance of a Fish Robot, First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms, (2000), 287-292.
- 5) HIRATA, K.: Development of Experimental Fish Robot, 6th International Symposium On Marine

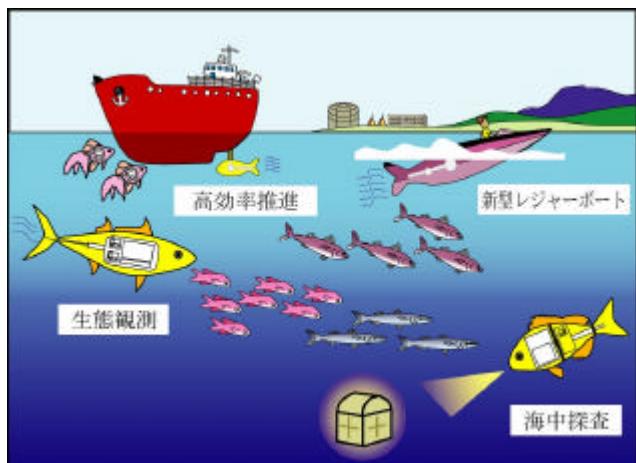


図 16 将来の魚口ボット<sup>1)</sup>

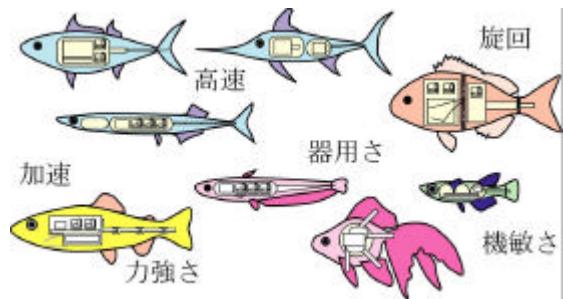


図 17 多形式の魚口ボット<sup>1)</sup>

Engineering, (2000), 711-714.

- 6) 平田宏一：高速化を目指した実験用魚口ボットの開発，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) , 69-72 .
- 7) 平田宏一，河合秀祐：多用途化を目指したユニット式魚口ボットの開発，日本設計工学会平成 14 年度春期研究発表講演会講演論文集，(2002) , 115-118 .