

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360416

研究課題名 (和文) 屈曲型側ヒレ推進機構をもつ水中移動体の運動に関する研究

研究課題名 (英文) On the motion of the under-water vehicle with undulating side fins

研究代表者

戸田 保幸 (TODA YASUYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20172166

研究成果の概要：

本研究では、イカやエイなどを模擬した側ヒレによる運動機構に着目し側ヒレ推進機構を有する実用的な人工水中移動体を作成するための基礎的研究を行った。本研究以前は側ヒレ型推進については世界でも例が無く、本研究では主に運動性能について検討を行った。本研究以前に作成していた模型に対し重心移動が可能な装置などを搭載して運動について検討した。また新しい模型を作製し実験を行った。成果の発表は途中段階であるが、作成した模型は多くの注目を浴び報道等されている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2007年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：海洋工学 海洋利用 生物模倣型推進器 側ヒレ 水中移動体 CFD

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初までには生物の動きを模した海中を動き回る人工水中移動体の研究とし、魚のヒレ運動などが模擬され水中ロボットも作られてきていた。例えば MIT では 1980 年代よりマグロを模した Robo-tuna の研究がされ、200 年代には東京工業大学のいるかロボットのように尾ビレを用い高速で遊泳するタイプのロボットの研究がなされていた。

一方胸鰭を用いて泳ぐバスなどを模擬したものが詳細な操縦運動可能な水中ロボットとして東海大学、大阪大学において研究され多くの成果が公開されていた。また MIT においてもこの流れで 4 つの羽ばたき翼を持った水中移動体が研究されていた。ほかにも海底を歩くロブスター型ロボットなどが Northeastan 大学で開発され、成果が公表されていた。しかし海中の生物の運動推進装置は様々な形態があるにもかかわらず翼タイ

プのヒレを用いるものだけで、イカの巡航状態や1部のエイなどが行っている側ヒレを波のように動かし推進運動する物についての研究はなく、それまでには研究代表者らの研究のみであった。海洋環境をよりよく知るための観測装置としては複雑な海底地形を詳細な制御で動く水中移動体が必要であり、海中の生物の様々な動きについて検討する必要がある、研究代表者らはより海中観測に適した推進器として屈曲型側ヒレの推進メカニズムについて研究をはじめていたが他には見当たらなかった。

2. 研究の目的

海中・水中の生物は、同じ流体中を運動する生物でありながら、大気中を飛翔する生物のほとんどが羽ばたき運動であるのに対し、様々な運動機構を持つ。これは浮力により重力に逆らって飛翔するための揚力を必要としないためである。このように様々な運動機構を持つものはそれぞれ生息する場所に応じて巧妙な動きをする。このような海中生物の動きを模倣し、同様の動きが可能な水中移動体が作成され実海域で動き回れるようになれば、様々な応用範囲が開かれると考えられる。本研究は、イカの巡航状態やある種のエイなどが有する側ヒレによる運動機構に着目し、側ヒレ推進機構を有する実用的な人工水中移動体を作成するための基礎的研究を行おうとすることを目的とした。本研究の後、実用化研究が行われ実海域で使用可能なものが作成されれば、複雑な水中構造物のモニタリングや、複雑地形周辺の観測などこれまでの水中移動体では困難な場合にも適用可能と考えられる。研究開始時点までは推進機構としての働きや基本的な運動を行うモードについては研究しており、この研究機関内にはより詳細な運動制御を行うためのヒレの制御やセンサーからの情報を元に制御するためのヒレの制御方法、重心、浮心の移動も含めた運動制御方法などの基礎的研究を行うことを目的とした。

具体的には

- (1) 研究開始時までには推進メカニズムについて研究を行ってきた模型に対し、制御コンピュータ部及びソフトウェアを改良しより細かな運動制御を可能にし、実験を行い側ヒレ推進器の有利な点を調査すること。また重心、浮心の移動が可能な装置を搭載し横傾斜、縦傾斜等も簡単に行えるよう改良することを目的とした。
- (2) 既存の模型を用いて行える研究は重心移動装置などは外付けで限界があるので、初年度より実海域での試験を想定した新たな模型の設計、部分的な製作を行い、最終年度に完成を目指し、試験を行い実用化に対する

問題点を調査することを目的とする。

- (3) センサーの取り付けについては目を考え CCD カメラの映像を見て操縦し実用的な水中移動体設計への基礎データを得ることを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 研究前に側ヒレによる平面内の前後進、及び1か所での旋回運動について研究を行ってきた模型では、重心が浮心より低く設定されていたため、長さ方向の軸周りの大角度回転運動などは復元力のため困難となっていた。垂直壁観測のためには 90 度回転した状態のまま走行できるなども重要であると思われるそこで既存模型に外部から制御可能な重心高さ調整装置を取り付けローリングやピッチング運動を容易にして予備実験を行う。用いてきたサーボモータユニットを用いて重心移動装置を作成するため十分な重心移動を得るための設計を行い外付けにより動かす装置を取り付けた。
- (2) 主に前後進、その場旋回など1つの運動だけを取り上げてきたが、2つ以上の運動を組み合わせた運動をさせるためのヒレ運動モードを考え、実際に水槽実験を行った。
- (3) 第1段階の水中移動体に積み込むセンサーとして既存模型に目に対応するステレオ視用の2台の CCD カメラを取り付けその信号についても現在の模型の持っている無線信号受信用浮体より無線で転送可能とするための装置を作成した。このカメラの画像による運転が可能か調査した。
- (4) 側ヒレの進行波運動を最適化するため、大きな波振幅を扱える CFD を構築し計算を行った。また流体力の推定と比較するため模型を拘束し流体力を計測した。
- (5) (1)-(4)の予備的調査を元に、重心移動距離などを決定し、浮力制御装置、重心移動装置を内蔵し 32 本のヒレ骨でヒレの形状を制御する模型を設計制作した。この模型にはより高度な制御が可能なマイクロコンピュータを積み込みその信号を外部のコンピュータとやり取りするために浮体内に無線 LAN 装置を積み込んだものを製作した。
- (6) 新しい模型を用いて流体力計測、自由航走試験を行った。
- (7) 大きさの違った模型による流体力の計測結果から、ヒレのパラメータと流体力係数の関係について考察した。
- (8) 浮力調整装置の設計を行い、模型に取り付け試験を行った。

4. 研究成果

- (1)側ヒレ推進機構をもつ模型に外付け重心移動装置を取り付けることにより様々な運動が可能になることが示された。進行中に 90 度回転して垂直な壁にへばりついて前後進

可能なことや、180度長さ方向の軸周りに回転し背面で遊泳することが可能なことなど確認した。図1に自動重心移動装置を示し、図2に重心を上げて横回転（ローリング）運動を容易にした状態での運動の例として壁にはり付いて前進するものを示す。

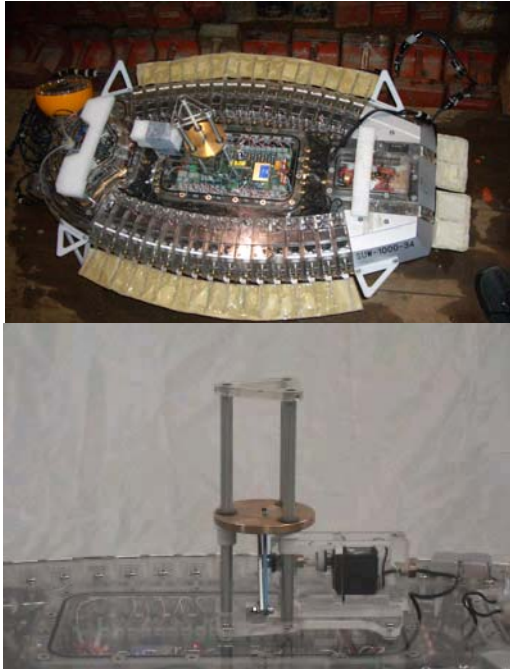


図1 重心上下移動装置（上：模型全景、下重心上下移動装置拡大図）

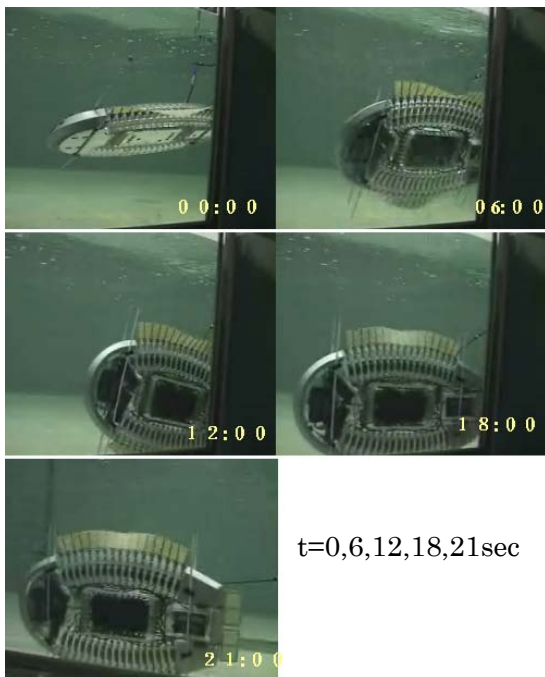


図2 90度回転して進行する様子

ここに示した運動の他にヒレの動きを工夫することにより3自由度方向どの方向にもヒレのみで進行でき3軸周りの回転も可能なこ

とが確認できた。その他に尾ヒレとの組み合わせでの運動、横方向の動きと反対側の側ヒレを楫のように使うことにより狭い範囲で比較的容易に深さを変更する運動などが可能になった。図3に例として横方向運動により深さを変化をさせる場合を示す。

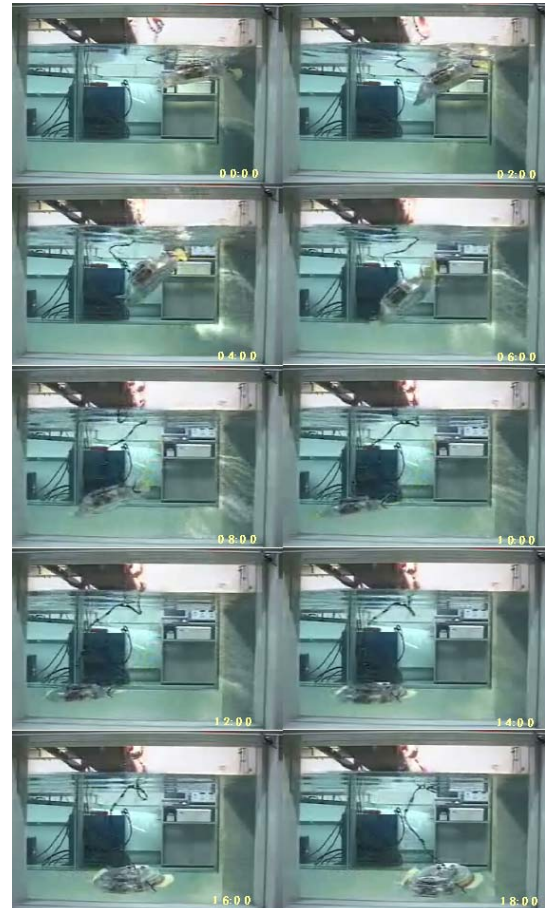


図3 横運動による深さ変更

(2) 水中移動体に積み込むセンサーとして既存模型に目に対応するステレオ視用の2台の CCD カメラを取り付けその画像により模型の制御を行った。その結果障害物をくぐる、ものを発見しその物体に近づく、水中に作られた通路を航走するなどが十分に可能なことがわかった。なおこれを行うために模型の制御をジョイパッドにより可能なように制御プログラムを改良した。

図4に取り付けられた右目と左目に対応する CCD カメラと LED ライトを模型につけたところ及び右目、左目の画像を示す。また図5に障害物の下をくぐる様子を右目の画像と水槽の窓から撮った画像を示す。図5はセンサーからの画像のみを見ながらジョイパッドを用いて操縦したもので視界が確保できれば十分に操縦可能であることがわかった。このほかに通路を水槽内に作ったものや図4に示すような物体を発見しその近くま

で接近する操縦が可能になったことがわかった。

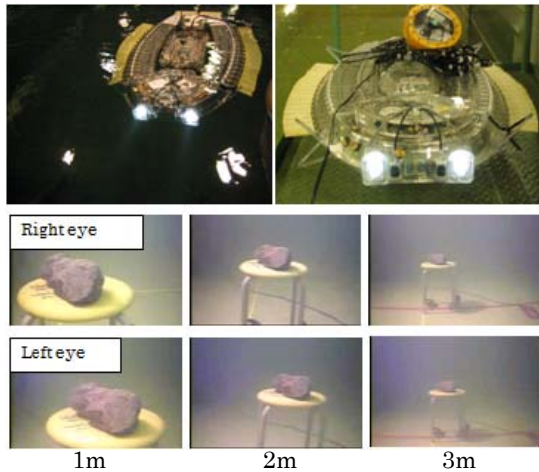


図4 CCDカメラ、LEDライトと画像

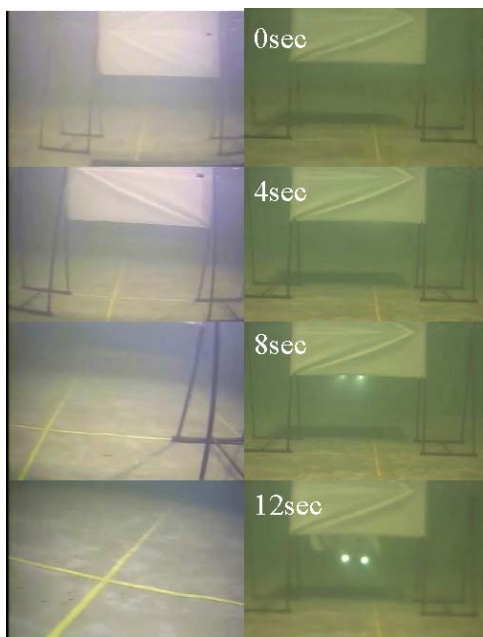


図5 障害物を見た画像（左）と潜り抜けている様子。

3) 拘束模型試験によりヒレの発生する流体力を計測し、ヒレの出す流体力の基本的性質を明らかにした。またCFD計算を運動する側ヒレがついた模型周りの流れを計算するプログラムを作成し、実験結果と比較検討した。CFDを用いて十分にヒレの発生する流体力を推定することが可能であることが明らかになった。図6に流体力の計測を曳航水槽で行った時の状況を示す。図7には模型の長さ方向の力（推力）を無次元化したものと無次元化した前進速度との関係を示す。また横方向、上下方向の力及び3軸周りのモーメントについても計測し同様の形で整理した。

図7に示すように周波数が異なっても無次元化すれば1本の曲線になることがわかる。また側ヒレは前進中に反対方向に進行波を

作るように運動させれば非常に大きい制動力を出すことがわかる。また他方向の力、モーメントについても無次元化することにより同様の特性を知ることができた。



図6 拘束模型による流体力計測

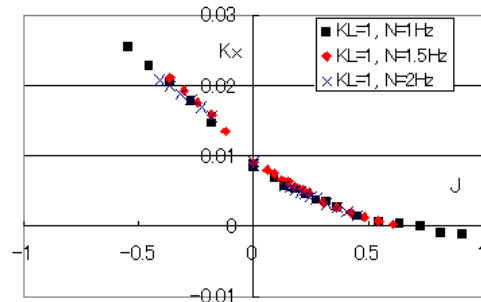


図7 無次元化した推力と前進速度の関係

図8にCFDによる運動する側ヒレ周りの流れ場を示す。図に示すようにヒレ後方に流速の速い部分があり推力を発生していることがわかる。また流体力は図7とほぼ一致する結果が得られている。

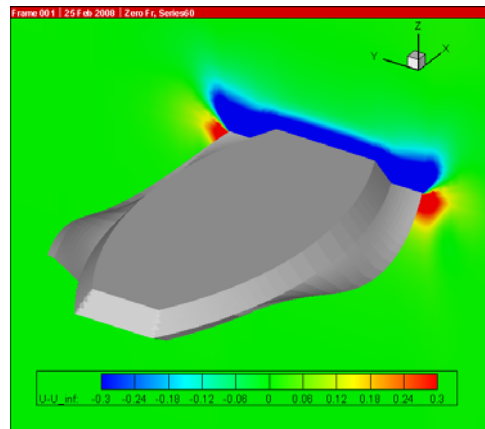


図8 無次元周波数5 流れ方向速度

(4) これまでの検討により、より大型（長さ1.4m）の模型を作製した。図9に模型の写真を示す。図9に示すように既存の模型と同等のユニットを用い、34個のユニットの左右それぞれ16本の骨により側ヒレの運動を制御する形式である。また陸上制御コンピュータと模型内部のマイクロコンピュータの通信は既存の模型のRS-232C方式より通常の無線

LAN のポートを用いた通信方式とした。

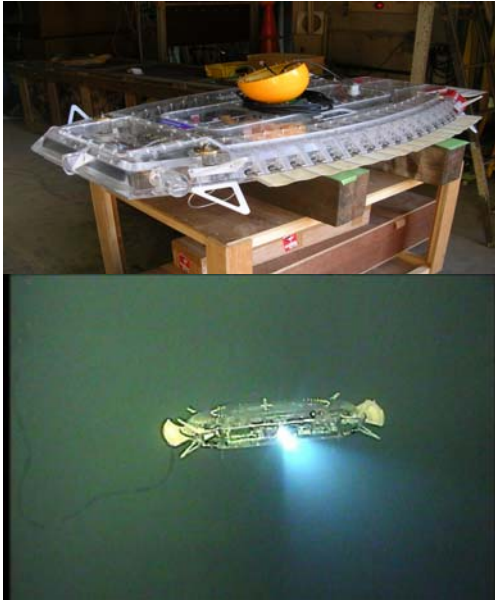


図 9 新模型

新模型は図 10 に示すように重心を 3 方向に移動させるための装置を搭載した。また空気だめの体積をピストンにより変更して浮力を調整するための装置を取り付けている。

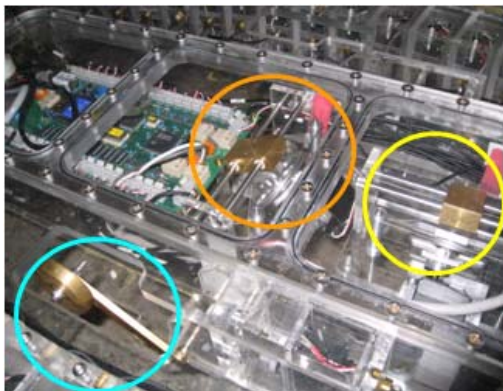


図 10 重心の 3 方向移動装置

無線 LAN 装置に変更することで通信が安定し長さ 100m、深さ 4.35m の水槽全体を 1 個所から制御することが可能になった。また浮力調整装置により側ヒレを動かさずにグライダーのように上下することも可能であることが確認された。また既存の模型で確認されたモードはすべて可能であり、深く潜ることが可能になったことにより円運動をしながら潜るといった観測に有効であると思われるモードでの運動も確認された。図 11 にらせん状運動をさせているときの模型の動きを示す。図には後で示すシミュレーションの結果も示しているが、図から深い水槽でらせん

運動をしながら少しずつ深さを変更して観測するモードの一部が示されている。



図 11 らせん状運動の一部

(5) 新模型による流体力の計測を行い、運動シミュレーションのための基礎データを得た。図 12 に示すように新模型は長さが異なるので無次元化した流体力は既存模型とは異なるが同じ波形状で動かしている場合を図で比較すると、新模型についても周波数に関係なく 1 本の曲線上にデータが集まり同じ傾向を示している。

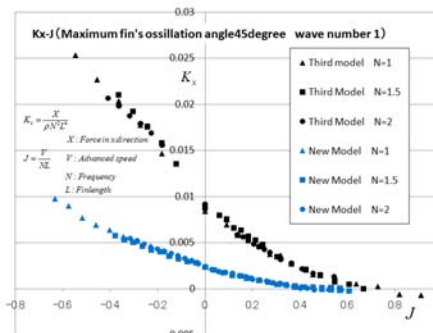


図 12 新模型の流体力と既存模型のヒレ流体力との比較

また簡単な考察により側ヒレの発生する無次元推力は側ヒレのアスペクト比(長さとの比)の 3 乗に比例することがわかりこの

関係を考慮すれば（アスペクト比の 3 乗 $1/3 \cdot 47^2$ ）2つの模型の値はよく一致しており、これまでの試験結果からでも新模型の推力特性は推定可能であることがわかった。これから大きく変更しなければヒレの形状が変化したときの流体力の変化は推定可能であることがわかった。このほかにヒレの進行速度と模型の進行速度の差で流体力の性質があらわされることなど簡単な考察と実験結果により明らかとなった。

(6) 両方の模型に対して得られた流体力などを用いて6自由度の運動方程式を解き運動を推定する方法を作成した。この方法により推定した運動は自由航走模型の運動とよく一致しており。様々なヒレモードに対する運動が推定可能なことを示している。図11の左側に推定した結果の例を示している。また図13には図3に示す運動を推定した場合の定量的比較を示している。

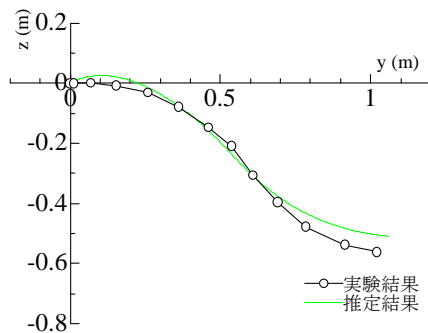


図13 横方向深度変更時の重心奇跡

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Yasuyuki Toda, Masashi Danno, Kazushi Sasajima and Hiroshi Miki, Model Experiments on the Squid-Like Under-Water Vehicle with two Undulating Side Fins, Proc. of The 4th International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms、2009、Abstract 査読有 (採択済)
- ② 戸田保幸、屈曲型側ヒレ推進機構をもつ水中移動体、日本マリンエンジニアリング学会誌、第43巻、103-107、2008
- ③ Yugo Sanada, Yasuyuki Toda, Takeshi Nagasawa, Takehiro Shibuya, A Fundamental Study on Instability of Stratified Shear Flow in Gravity-Currents、OCEANS' 08 MTS、2008、有

- ④ Yasuyuki Toda, Hirofumi Ikeda, Naoto Sogihara, The Motion of a Fish-Like Under-Water Vehicle with two Undulating Side Fins、Proc. of The Third International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms、2006、abstract 査読有

[その他]

新聞報道

読売新聞 2006年10月16日朝刊 32面科学面
静岡新聞 2006年12月10日朝刊 25面科学面
等に紹介された。

テレビ等

2008年8月17日テレビ朝日系「ネーチャー先生」などで紹介される。

Ocean' s08 (2008年4月8-11日) で行われた
Aqua Robot CompetitionのBiomimetic Robot
Groupにて第1位を得た

実験の動画などは下記ホームページにて公開している。

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~toda>

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/naoe/naoe3/>

本研究が始まる以前は本研究で取り扱うようなあ屈曲型ヒレによる推進は世界中でほとんど取り扱われていなかったが現在はシンガポール、中国などで同様の研究が開始されているが本研究のように自由に動く模型等はまだ作成されていない。また本研究の側ヒレ状の動きを人工筋肉で作ろうとする動きも英国、日本で開始されており今後の協力関係が望まれる。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸田 保幸 (TODA YASUYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号:20172166

(2) 研究分担者

松村 清重 (MATSUMURA KUIYOSIGE)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号:10135668

眞田 有吾 (SANADA YUGO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号:30467542

(3) 連携研究者