

魚の胸ひれ運動と水中ロボットへの応用

Motion of Pectoral Fin of Fish and Its Application to Underwater Robots

加藤直三*, 鈴木博善*
*大阪大学大学院工学研究科

Naomi Kato* and Hiroyoshi Suzuki*
*Graduate School of Engineering, Osaka University

E-mail: kato@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

1 はじめに

地球には海、川、湖沼の中で生きる数万種におよぶ動物たちの世界がある。かれらは何億年もの悠久の歴史を進化しながら生きぬいてきて、それぞれの環境のもとで色々な運動形態を持って生きている。水中ロボットの開発の歴史はわずか40年ほどしかなく、水棲動物たちの歴史から見れば、一瞬の出来事にしかすぎない。それだけに水棲動物たちの持つ色々な機能から学ぶことは多い。

近年、母船とケーブルで結ばれていない自律型水中ロボット (AUV) の開発が盛んになってきた。これまで開発されてきた AUV は一定速度で進む巡航型のものである。水棲動物でいえば、マグロやカツオなどがそれに当たる。AUV が潮流中を浮遊状態である場所にとどまって海底などの観察を行ったり、海中・海底ステーションとドッキングをしたりする場合、姿勢を安定化する必要がある。また AUV が浮遊状態において腕で物をサンプリングする場合は腕の動きによる反作用で体が動いてしまい姿勢制御がさらにむづかしくなる。従来はスクリー式の推進機を幾つも水中ロボットに付けて位置や姿勢の制御を行っていた。しかし、AUV が停止状態で位置や姿勢の制御を行う場合、スクリー式推進機には正負の推力を迅速に発生するのが難しく、これによって波浪や潮流の非定常の外乱の中では、細かな位置や姿勢の制御を行うのが難しいという欠点がある。さんご礁や岩礁地帯での魚の遊泳を見ると、波浪や潮流の外乱の中でも、非常に高い操縦性能を示している。

そこで、この停止状態での姿勢制御を水棲動物ではどのように行っているのかを見るために、研究室の学生たちに淡水魚のブラックバスを近くの沼で釣ってもらい、その泳ぎ方の観察を行った。観察から胸ひれで前後方向に水をかいたり (前後運動)、付け根を中心にひねったり (回転運動)、上下方向に振ったり (上下運動) する動きが、素早い旋回や姿勢の保持に役立っていることを突き止めた。これまで、このような操縦性能の観点から水棲動物の運動機構の研究はあまり行われていなかった。

2 胸ひれ運動

2.1 三次元胸ひれ運動

これまでの生物学的研究から、魚の胸ひれの動きは、上下振動を中心とした型（ここでは、A型と以下呼ぶ）と、前後振動を中心とした型（ここでは、B型と以下呼ぶ）に分かれる。A型のものは、長く翼形状をしていて、B型の胸ひれの形状は、短く丸くなっている。A型の胸ひれの運動は、胸ひれを前後方向にほぼ水平に保ち、それにひねりを加えながら、上下方向に8の字を描いていることがわかっている。一方、ブラックバスはB型に属する。A型の胸ひれの運動は、胸ひれから発生する上下方向の揚力の前進方向成分を前進する力として用いていることから、揚力型とも呼ばれている。これは、鳥の羽ばたきによる飛行と同じ原理だ。一方、B型の胸ひれの運動は、胸ひれを後ろにかいたとき（パワーストローク）に前後方向にほぼ鉛直にたてた胸ひれに加わる抗力を利用して前進する力を発生させることから、抗力型と呼ばれている。

揚力型の胸ひれの三次元運動について、Westneat ら[1]はベラ科の魚を用いてその胸ひれの周囲にマーカーを取り付けてその動きの可視化を行った。揚力型の場合、8字に上下に運動し、遊泳速度が増すにつれ、上下運動の振幅が大きくなることを明らかにした (Fig.1 参照)。

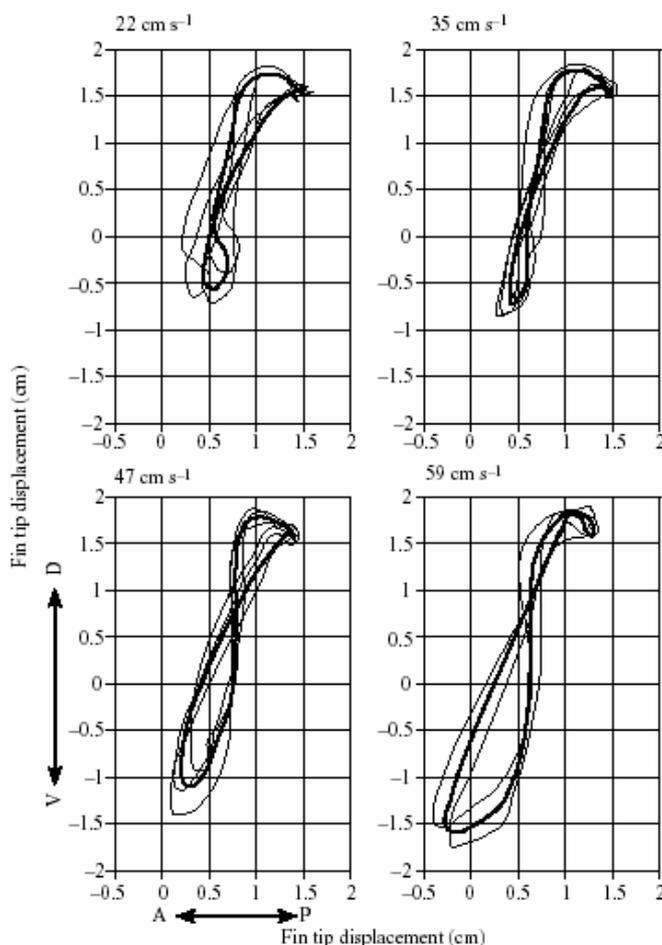


Fig. 1. Left lateral view of fin tip displacement, relative to the body of the fish (the fin base), projected onto the sagittal plane for one individual (A, anterior; P, posterior; D, dorsal; V, ventral) (Walker and Westneat [1]).

抗力型の胸ひれの三次元運動について、Lauder ら[2]はバスを用いてその胸ひれの周囲にマーカーを取り付けてその動きの可視化を行った。その結果、抗力型の胸ひれの三次元運動は複雑で、単純に前後運動とひねりだけではないこと、前方方向への移動時においても推力を出している可能性あることを明らかにした。Kato[3]は、Lauder らと同じくバスを用いて胸ひれの動きの可視化を行い、さらにそのデータからオイラー角を求めて、胸ひれの動きを表現した。その結果、抗力型の胸ひれの三次元運動においても、前後運動、ひねり、上下運動を行っていること、さらに伸縮運動も加わっていることを明らかにした (Fig.2 参照)。

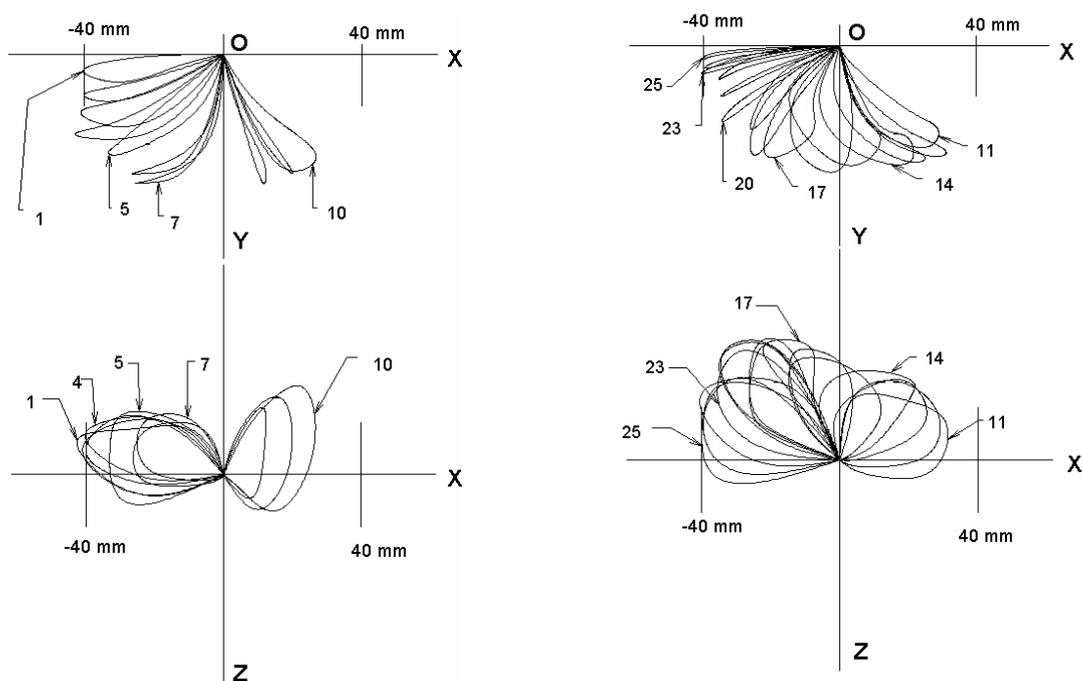


Fig.2 Motion of pectoral fin of Bass in backward swimming condition (positive X direction : forward direction) (from Kato[3])

2.2 胸ひれまわりの流れ

Drucker ら[4]は PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて、クロマスの胸ひれ後方の流れの渦構造を解析した。低速では、渦が振り下げ時に両側の胸ひれから放出され、振り下げからひねりが入って振り上げに移る時点で、左右一対の渦輪が形成されることを明らかにし、高速遊泳時には、さらに振り上げ時に、渦が放出され、振り下げ時に形成された渦輪に結合することを明らかにした。また、渦循環の計算から、胸ひれが発生する流体力を推定し、横力が推力の 1.25 倍に達することを示した。

Wilga ら[5]は水平状態で遊泳中、胸ひれを揚力面として用いるチョウザメを対象として、胸ひれの役割を PIV 法による流れの三次元解析と筋電図計測によって調べた。その結果、チョウザメが水平状態で遊泳中、胸ひれは負の迎角をもった姿勢を保っているが、大きな揚力は発生させていないこと、胸ひれの後半部がフラップとして動き、頭や胴体の上げ下げを起こして上昇・下降運動を誘起していることを明らかにした。

2.3 胸ひれ運動の流体力学

Walker ら[6]は揚力線理論を用いて、胸ひれの上下振動による揚力型と、前後振動による抗力型の流体力学的特性の差異を論じ、揚力型のほうが低速から高速の遊泳速度にわたって、効率がよいことや、抗力型は低速においてパワーストローク時に揚力型より大きな推力を発生することを明らかにして、抗力型は加速、旋回、操縦時に使われると考察した。

Ramamurti ら[7]は自動適合格子付非構造格子 NS ソルバーを用いて、胸ひれを含むベラの周りの定常、準定常、非定常流れの計算を行い、定常状態、準定常状態、非定常状態の推力と揚力の特性比較を行った。前縁からの巻き込み渦が顕著であるであることを示した。

2.4 胸ひれの役割

はこぶぐはほぼ全長にわたって前後方向に曲がらない“はこ”のような胴体を持っていて、静止してその場で旋回することができる。これは、胸ひれ（抗力型）の役割が大きく、左右の胸ひれの前後方向の推力を逆方向に出すことで可能となる。一方、揚力型の胸ひれ運動をもつベラ科の魚は、胸ひれを使ってその場に静止することはほとんどしないことが報告されている。これらのことから、揚力型の胸ひれ運動は、ある速度での前進やある半径を持った旋回をするのに使われ、抗力型の胸ひれ運動は、静止してその場で前後したり、旋回することに使われるということになる。これらから、胸ひれは魚の操縦や位置保持に重要な役割を果たしていることになる。

3 胸ひれ運動装置

胸ひれの前後運動、ひねり運動、上下運動を独立に作り出せる小型の胸ひれ運動装置“Birdfin”を開発した (Fig. 2)。この装置の胴体の直径は 0.1m で、長さは 0.53m である。

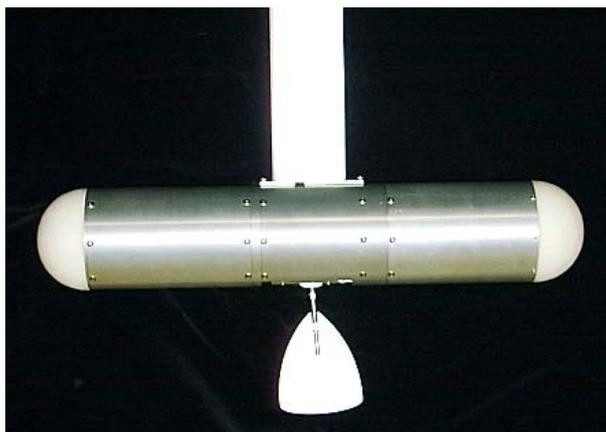


Fig.3 Three-motor driven mechanical pectoral fin
“Birdfin” (動画 [birdfin.wmv](#))

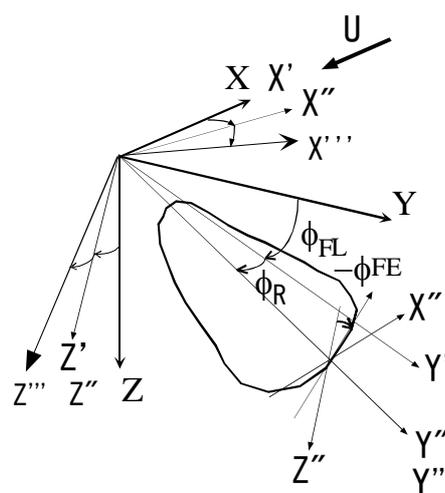


Fig.4 Notation of flapping, rowing
and feathering

この装置には、ひれの根元にひれに加わる垂直力とひねり軸まわりのトルクのカセンサーが、

支持棒の上部に 6 分力計が、各モーターの回転角度を計測するポテンショメータが、取り付けられている。ローイング運動は -60° to 70° の範囲を、フラッピング運動は -60° to $+60^\circ$ の範囲を フェザリング運動は -180° to 180° の範囲を最大 3 Hz で動かすことができる。ローイング角度を ϕ_R で、フェザリング角度を ϕ_{FE} で、フラッピング角度を ϕ_{FL} で定義する (Fig.4)。これらの角度は次式に従って正弦運動とした。

$$\begin{aligned}\phi_R &= \phi_{R0} - \phi_{RA} \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t) \\ \phi_{FE} &= \phi_{FE0} - \phi_{FEA} \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FE}) \\ \phi_{FL} &= -\phi_{FLA} \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FL})\end{aligned}\quad (1)$$

3. 1 胸ひれ運動装置 “Birdfin” の流力特性 [8]

胸ひれ運動装置 “Birdfin” を用いて、揚力型と抗力型の胸ひれ運動の水流中と静水中の流体力学的な特徴を以下の 5 点について実験的に調べた。実験は観測部が長さ 2.1 m、幅 1.4 m、水深 0.9 m の回流水槽で行った。

- (1) 水流中と静水中における抗力型運動の胸ひれに加わる流体力への上下運動の影響
- (2) 水流中と静水中における揚力型運動の胸ひれに加わる流体力
- (3) 水流中における無次元周波数の影響
- (4) 静水中における周波数の影響
- (5) 静水中における非周期的なひねり運動の影響

実験の結果、次の結論が得られた。

- (1) 抗力型運動の胸ひれの推進力係数は、水流中、静水中とも、前後運動とひねり運動の組み合わせよりもそれらに上下運動を加えた方が大きくなる。
- (2) 水流中において、上下運動とひねり運動を組み合わせる揚力型運動では、推進効率が 40% に達する。
- (3) 水流中において無次元周波数を大きくすると、推進係数や推進効率が大きくなる。
- (4) 静水中における周期的な前後運動と非周期的 (ほぼ一定角を保つ) なひねり運動の組み合わせは、上下、左右方向に推力を出さずに、前進方向の推力を出す。

3. 2 胸ひれ運動の最適化 [9]

非線形最適化手法を用いて、水流中と静水中における胸ひれ運動の最適化を行った。流速は 0.2 m/s で運動周波数は 1.25 Hz とした。静水中では、運動周波数は 1.0 Hz とした。揚力型と抗力型の流体力学的な特徴を調べ、上下方向にはなるべく力を発生させず、かつ前進方向に最大の推力を出すための胸ひれ運動の最適条件を水槽実験から求めた。Table 1 に揚力型 (L-type) と抗力型 (D-type) の初期値を示す。その結果、装置の運動範囲内において、一様流中では、揚力型が抗力型より大きな推力を出し、一方、静止中では、抗力型が揚力型より大きな推力を出すことがわかった。Fig. 5 に一様流中での揚力型の一周期当たりの平均推進力係数と上下力係数の収束の様子を示す。このときの一周期のひれの運動を示す ([動画 movie_lift.wmv](#))。ただし、左側が前方、右側が後方を示す。Fig. 6 に静水中での抗力型の

一周期当たりの平均推進力係数と上下力係数の収束の様子を示す。このときの一周期のひれの運動を示す ([動画 movie_drag.wmv](#))。

Table 1 Initial conditions

	ϕ R0	ϕ RA	ϕ FEO	ϕ FEA	$\Delta \phi$ FE	ϕ FLA	$\Delta \phi$ FL
D_type	20.0	20.0	-20.0	20.0	85.0	20.0	0.0
L_type	0.0	5.0	-90.0	30.0	0.0	30.0	90.0

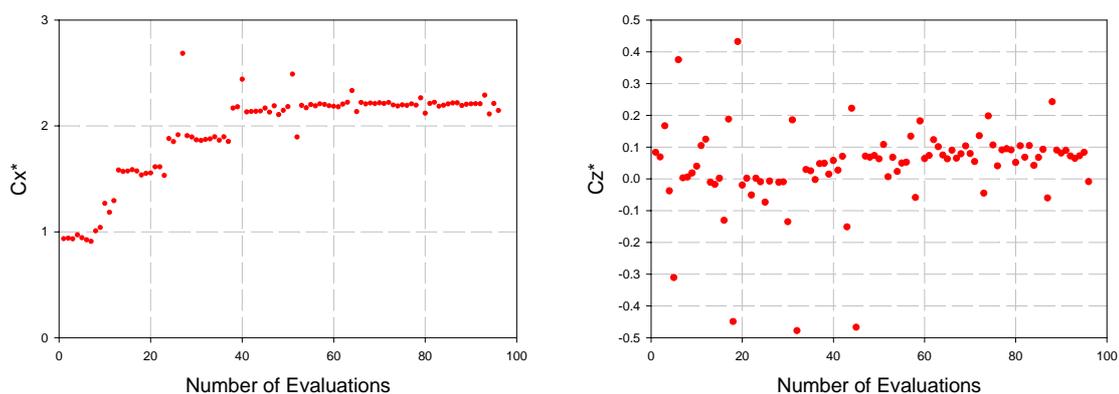


Fig. 5 Optimization of motion parameters for maximum C_x^* with uniform inflow and initial motion pattern of lift-based swimming mode

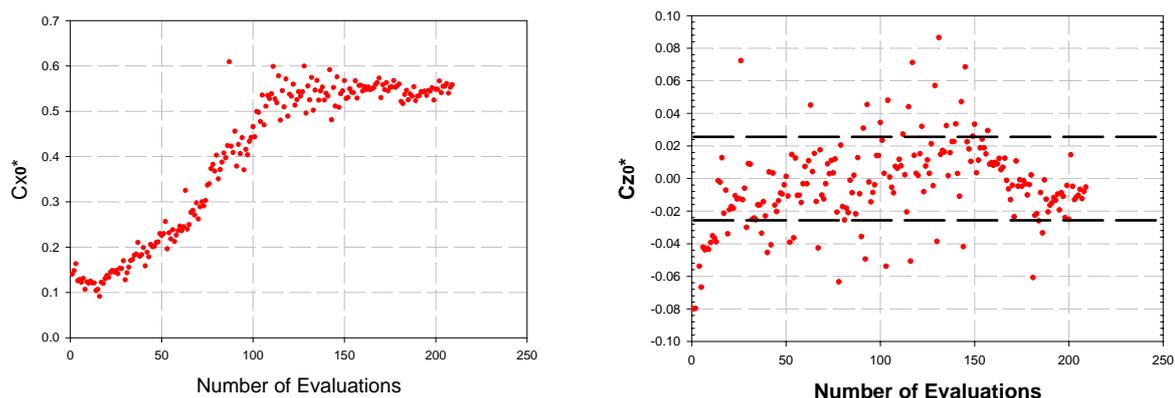
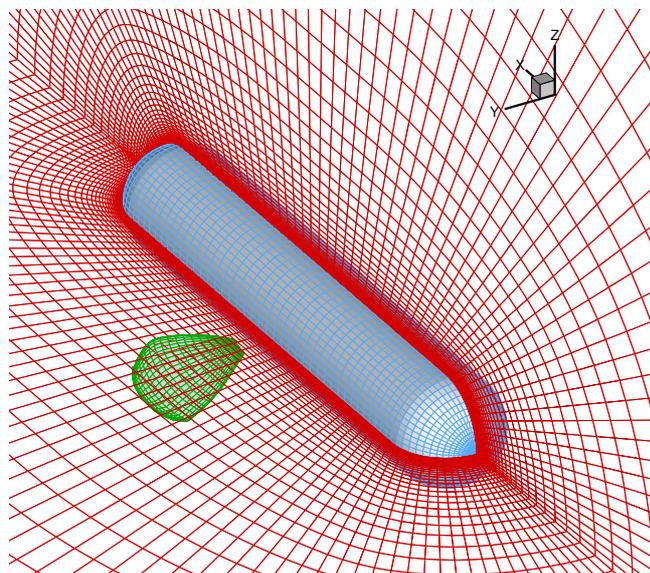


Fig. 6 Optimization of motion parameters in still water for maximum C_{x0}^* from the initial parameters for drag-based swimming mode

3. 3 胸ひれ運動装置まわりの流れの数値計算[10]

NS ソルバー (構造格子 : Over-set Grid 法 (マルチブロック BFC ; Chimera 格子)、離散化法 : 12points Finite Analytic 法、流場解法 : PISO type 1Step Procedure、非定常計算法 :



Dual-Time-Stepping) を用いて胸ひれ運動装置まわりの流れの数値解析を行った。計算格子は、Main block で $80 \times 61 \times 63$ (最小格子間隔: 0.0001)、Sub block で $57 \times 49 \times 42$ (最小格子間隔: 0.001) とした (Fig. 7 参照)。胸ひれは胴体の右側に付いているとしている。計算条件として、 $Rn=20,000$ (層流 ; 一様流、鰭コード長 base)、一様流速 $=0.251\text{m/s}$ 、運動周波数 2Hz 、1 周期あたり 400 ステップ数、鰭と本体を結ぶロッドの影響を無視するとした。数値計算に用いた胸ひれ運動装置の運動パラメータを Table 2 に示す。

Fig.7 Grids for numerical computations

Table 2 Fin motion parameters for numerical computations

ϕ_{R0}	ϕ_{RA}	ϕ_{FE0}	ϕ_{FEA}	$\Delta \phi_{FE}$	ϕ_{FLA}	$\Delta \phi_{FL}$
30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	20.0	90.0

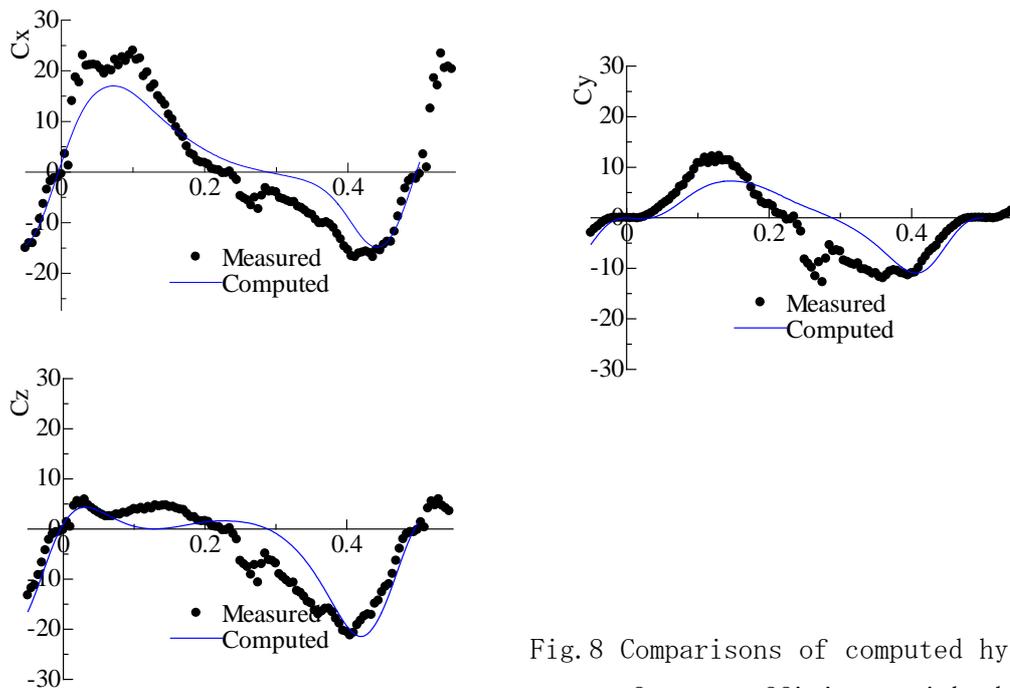


Fig.8 Comparisons of computed hydrodynamic force coefficients with the measured coefficients during one period

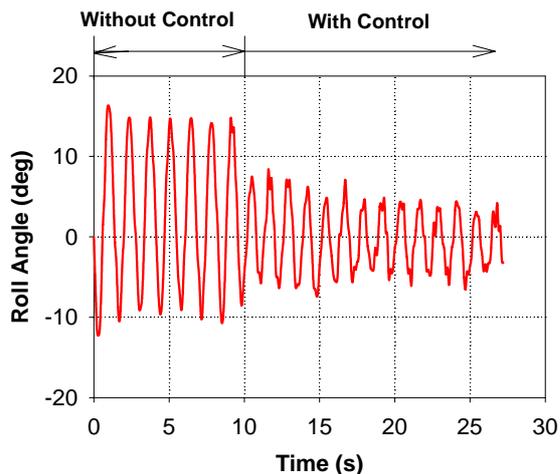


Fig. 11 Time variation of roll angle at the wave period of 1.5 s and the fin motion frequency of 3 Hz

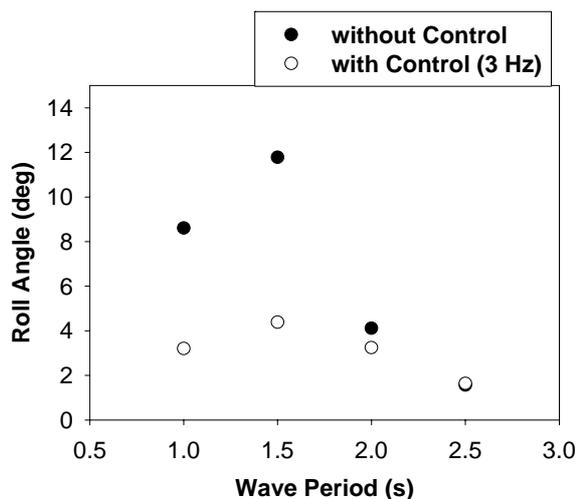


Fig.12 Effect of control of roll motion in beam waves

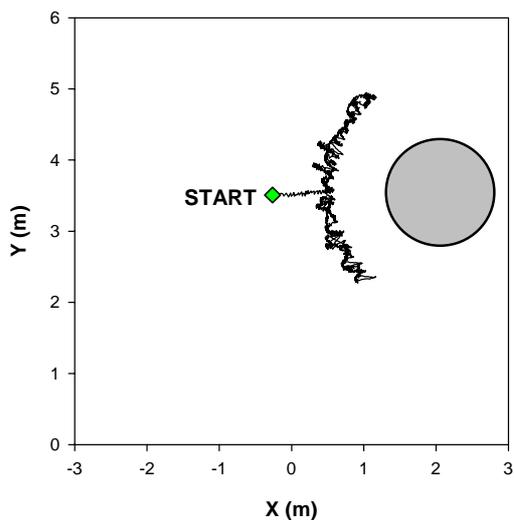


Fig. 13 Loci of underwater robot in X-Y plane around a circular cylinder in still water

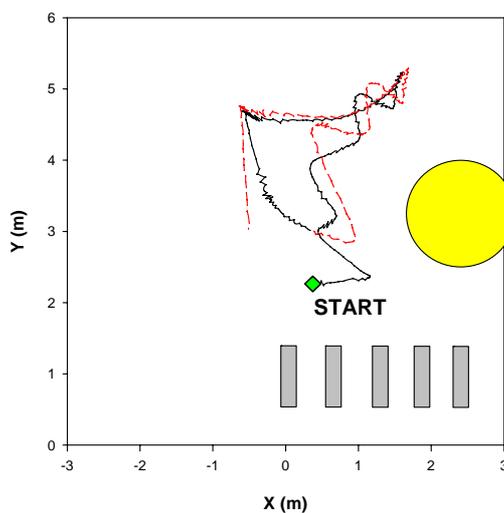


Fig. 14 Loci of underwater robot in X-Y plane around a circular cylinder in water currents
(— : 1st routine 、
- - - : 2nd routine)

数 0.5 秒~2.5 秒) に平行において実験を行った。そのときの固有周期は 1.5 秒であった。胸ひれの動きには、最適化された抗力型のパラメータを用い、それを 90 度回転して上下方向に推力を出すように設定した。ひれ運動周波数は 2Hz と 3Hz を用いた。波が入射後、10 秒後にロール制御を行った。ロール制御では、を操作量とした。Fig. 11 に、ひれ運動周波数 3Hz、波周期 1.5 秒におけるロール角の時系列データを示す。制御開始後、急激にロール運動が減少するのがわかる。Fig. 12 に、ひれ運動装置が非作動時とひれ運動周波数 3Hz におけるロール運動の比較を示す。周期 2 秒以下で制御効果があることがわかる。特に、水中ロボットの

固有周期と一致する波周期では、ロール運動が 2/3 に減少させることができることがわかる。このときの動画を示す ([wave.wmv](#))。

次に、外乱の中で、ホバリング状態を中心とした姿勢・誘導制御性能を調べることを目的として、港湾における構造物の脚柱の検査を想定して、潮流中において円柱まわりに水中ロボットの機首を円柱表面に向けて、なるべく一定距離を保ちながら、移動させる実験を行った。この実験では、胸ひれ運動は揚力型を用いた。これは、抗力型を後部ひれに用いると、ピッチング運動を伴うためである。潮流がない場合は、後部ひれで距離と方位角の制御を行い、前部ひれで横移動制御を行った。この場合は、精度よく一定距離 0.95m を保って、左右に移動できることがわかる (Fig. 13)。誤差平均 0.00m、誤差標準偏差 0.11m の誤差範囲に収まった。一方、潮流中においては、推力不足から流れに逆らった横移動制御が不可能であったため、上流側から潮流に流されながら、円柱表面と一定距離を保つように移動し、その後、いったん円柱から大きく離れて、出発点に戻り、また潮流に流されながら、円柱表面に沿って移動する方法を採用した。Fig. 14 に潮流を発生させる船外機の位置と 2 往復した水中ロボットの軌跡を示す。平均水流は 0.2 m/s であった。誤差平均 0.06m、誤差標準偏差 0.22m の誤差範囲に収まった。円柱表面との距離精度は落ちるものの、潮流中においても、円柱まわりの誘導制御が可能であることがわかる。このときの動画を示す ([cylinder.wmv](#))。

5 今後に向けて

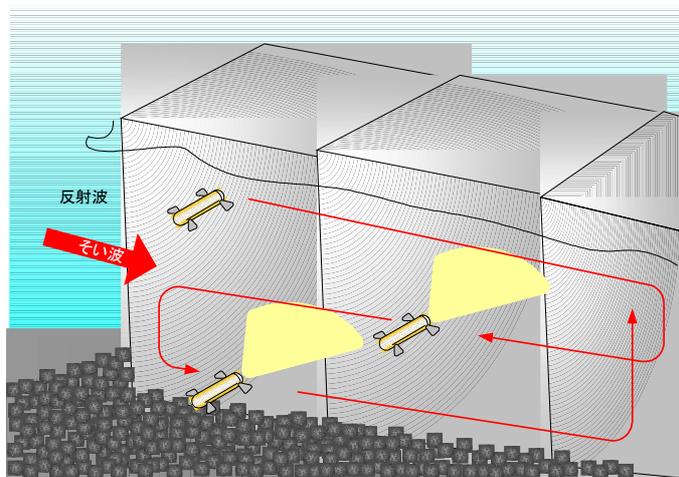


Fig.15 Image of inspection of coastal structures in waves by the underwater robot “PLATYPUS”

この水中ロボットは、基本性能として、いままで難しいとされてきた潮流中や波浪中における港湾構造物まわりの遊泳が可能である (Fig. 15 参照)。複雑な構造物あるいは波浪中で動揺するブイ等にダイバーが接近するのは危険であり、これをロボットが代行することにより、作業の安全性の向上およびメンテナンスの効率化が図ることができる。また、応用機能として、1) マルチナロービーム・センサー等を搭載して、崩落した護岸等の詳細データを取得すること、2) 超音波探傷基等を搭載して、構造物の塗膜厚さの計測、あるいはコンクリートの剥落情報を収集して、構造物診断データの収集を行ない、構造物の診断をよりの確なものとするができる。今後、このような分野での実用化を計って行くことを考えたい。その際、ここで説明した数値計算手法をさらに発展させ、ロボット全体に加わる流体力の推定を行い、運動シミュレータに用いることができれば、制御性能を考慮した水中ロボットの精度の高い設計が可能となる。

この水中ロボットは、基本性能として、いままで難しいとされてきた潮流中や波浪中における港湾構造物まわりの遊泳が可能である (Fig. 15 参照)。複雑な構造物あるいは波浪中で動揺するブイ等にダイバーが接近するのは危険であり、これをロボットが代行することにより、作業の安全性の向上およびメンテナンスの効率化が図ることができる。また、応用機能として、1) マルチナロービーム・センサー等を搭載して、崩落した護岸等の詳細データを取得すること、2) 超音波探傷基等を搭載して、構造物の塗膜厚さの計測、あるいは

参考文献

- [1] Westneat, M. W. and Walker, J. A., "Motor Patterns of Labriform Locomotion: Kinematic and Electromyographic Analysis for Pectoral Fin Swimming in the Labrid Fish *Gomphosus Varius*, *J. Experimental Biology*, Vol. 200, (1997), 1881-1893.
- [2] Lauder, G. V., "Pectoral Fin Locomotion in Fishes: Testing Drag-based Models Using Three-dimensional Kinematics", *Amer. Zool.* (1996), 36:567-581.
- [3] Kato, N., "Pectoral fin controllers", In *Neurotechnology for biomimetic robots* (Eds. Ayers, J., Davis, J. J. and Rudolph A.), MIT Press, (2002), 325-347
- [4] Drucker, E. G. and Lauder, G. V., "Locomotor Forces on a Swimming Fish: Three-Dimensional Vortex Wake Dynamics Quantified Using Digital Particle Image Velocimetry", *J. Exp. Biol.*, 202, (1999), 2393-2412.
- [5] Wilga, C. D. and Lauder, G. V., "Locomotion in Structure: Function of the Pectoral Fins", *J. Exp. Biol.*, 202, (1999), 2413-2432.
- [6] Walker, J. A. and Westneat, M. W., "Mechanical performance of aquatic rowing and flapping", *Proc. R. Soc. Lond., B* 267, (2000) 1875-1881.
- [7] Ramamurti, R., Sandberg, W. C., Löhner, R., Walker, J. A., and Westneat, M. W., "Fluid dynamics of flapping aquatic flight in the bird wrasse: three-dimensional unsteady computations with fin deformation", *J. Exp. Bio.*, Vol. 205, (2002), 2997-3008.
- [8] Kato, N., H. Liu and H. Morikawa, "Biology-Inspired Precision Maneuvering of Underwater Vehicles", *Proc. of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, Vol. 2, (2002), 269-276.
- [9] Kato, N. and Liu, H., "Optimization of Motion of a Mechanical Pectoral Fin", *JSME Int. J., Series C*, Vol. 46, NO. 4, (2003), 1356-1362.
- [10] 鈴木博善、加藤直三、"胸鰭運動装置周りの流れの数値計算", 第 14 回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会予稿集(2004)
- [11] Kato, N., H. Liu and H. Morikawa, "Biology-Inspired Precision Maneuvering of Underwater Vehicles(part 2)", *Proc. Of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference*, (2003), 269-276.
- [12] Kato, N., H. Liu and H. Morikawa, "Biology-Inspired Precision Maneuvering of Underwater Vehicles", In *Bio-Mechanisms of Swimming and Flying* edited by Kato, N., Ayers, J. and Morikawa, H., Springer-Verlag, (2004), 111-125.
- [13] Kato, N., Y. Ando and T. Shigetomi, "Precision Maneuvering of Underwater Robot by Mechanical Pectoral Fins", *2004 International Symposium on Underwater Technology (IEEE)*, (2004), 303-310.