

生物模倣型水中ロボットの開発と数値シミュレーション



研究ノート

鈴木博善*

Development of Biomimetic Underwater Vehicle and Numerical Simulation

Key Words : CFD, Mechanical Pectoral Fin, Biomimetic, Underwater Vehicle, Active Pneumatic Fin

1. はじめに

水棲生物は、何億年もの間、環境に適応しながら進化し、それぞれの環境のもとで様々な運動形態を獲得しながら生き続け、今日を迎えている。それだけに我々が、環境に適応した水棲動物たちが持つ機能から学ぶことは多い。

水棲生物のうち、魚に注目してみよう。さんご礁や岩礁地帯で魚が遊泳する様子を観察すると、波浪や潮流等の外乱が存在する流れの中でも、非常に高い操縦性能を示すことはよくご存じであろう。

このように、魚が持つ機能を機械、とりわけ水中ロボットに応用しようという試みが広く行われており、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学部門でも、私の属する加藤教授のグループと戸田教授らのグループが、それぞれ魚の胸鰭を推進装置として用いる水中ロボット、イカの側鰭を模した推進機構を有する水中ロボットの研究開発を行っている。

ここでは、これまでに私たちの研究室で行われた研究のうち、魚の胸鰭運動を模擬する装置（3軸胸鰭運動装置）による流体力計測の結果、これを搭載した水中ロボットに関する研究、および、これに深く関連する研究の一端を紹介する。

2. 魚の胸鰭運動

これまでの生物学的研究から、魚の胸鰭動きは、上下振動を主体したものと前後振動を主体としたものに分類できることがわかっている。

前者は、胸鰭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の字を描くものである。胸鰭から発生する上下方向の揚力の前進方向成分を推力として用いていることから、揚力型とも呼ばれる。一方、後者の胸鰭運動は、胸鰭を後ろに掻いたとき（パワーストローク）に前後方向にほぼ鉛直に起った胸鰭に加わる抗力を利用して推力を発生させることから、抗力型と呼ばれる。

3. 胸鰭運動装置

魚の胸鰭の運動は、鰭自体が変形するものを除くと、Rowing運動、Feathering運動、Flapping運動で構成される（Fig. 1）。

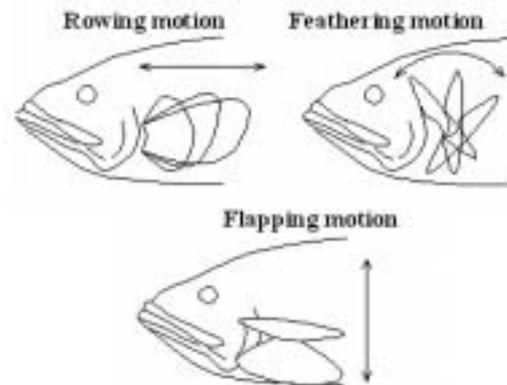


Fig. 1 Fin motion of a fish

私たちの研究室では、実際に生きた魚の胸鰭の動きを観察することで、これらの運動が鰭の運動中心からのオイラー角（Fig. 2 および式（1））で表現



* Hiroyoshi SUZUKI

1966年12月生

大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻博士前期課程修了（1992年）

現在、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学部門、准教授、博士（工学）、海洋工学、数値流体力学

TEL : 06-6879-7589

FAX : 06-6879-7594

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

できることを示した。

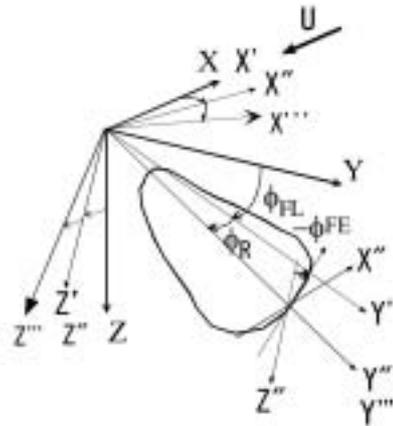


Fig. 2 Coordinate system and Euler's angles

$$\begin{aligned}
 R &= R_0 - R_A \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t) \\
 FE &= FE_0 - FE_A \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t + \phi_{FE}) \quad (1) \\
 FL &= FL_0 - FL_A \cdot \cos(\omega_{fin} \cdot t + \phi_{FL})
 \end{aligned}$$

ただし、ローイング角を R 、フェザリング角を FE 、フラッピング角を FL とし、それぞれの角度の添字 0 は初期角度、A は振幅である。 ω_{fin} は振動周波数であり、 ϕ_{FE} 、 ϕ_{FL} は Rowing 角からの Feathering 角、Flapping 角の位相差を示す。これらの鰭運動を 3 軸で表現する装置（3 軸胸鰭運動装置：BIRDFIN）(Fig. 2 参照)を開発し、胸鰭による流体力を計測し、その流力特性を明らかにした¹⁾。

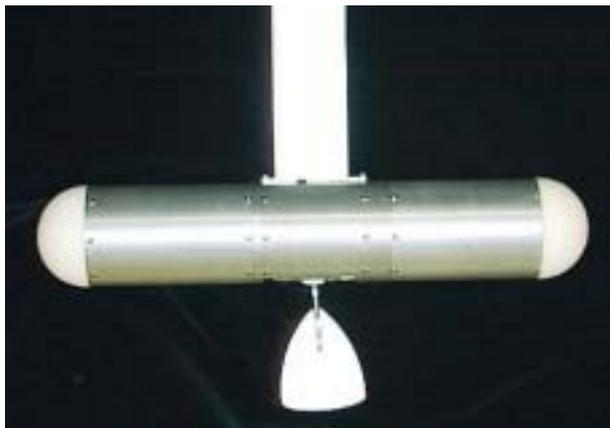


Fig. 3 Mechanical pectoral fin device BIRDFIN

同時に、この 3 軸胸鰭運動装置を計算モデルとして CFD 解析や可視化実験も行い、推力発生メカニズム、流場の特徴などを検討した。以下に、計測と CFD による鰭が発生する時間平均流体力を示す。紙面の関係上、推進方向の流体力のみとする。

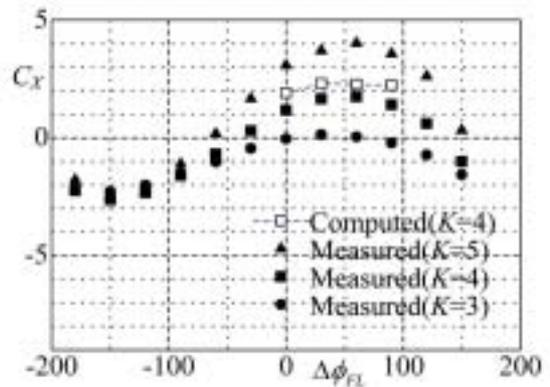


Fig. 4 Time-averaged Hydrodynamic coefficient distribution

ただし、鰭は抗力型で作動している状態で、式(1)の角度パラメータ $R_0, R_A, R, FE_0, FE_A, FL_0, FL_A$ は、それぞれ 30, 30, 0, -30, 30, 0, 20, 90 とし、位相差 ϕ_{FL} を -180 ~ 150 まで変化させている。 ω_{fin} は 4 (1/sec) である。

次に ϕ_{FL} を 0 にした場合の実験値と CFD による計算値の比較を示す。

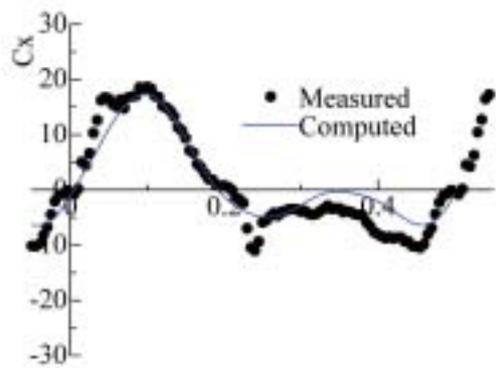


Fig. 5 Time-varied hydrodynamic force coefficient distribution

ここで、Fig. 4 中の K は無次元周波数で、一様流速を U 、鰭のコード長を c としたとき、 $K = \omega_{fin} \cdot c / U$ として定義し、流体力係数は、計測された流体力を F_x 、水の密度を ρ 、鰭の面積を S とするとき、 $C_x = F_x / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S)$ として定義した。

実験結果より、鰭運動の位相差を変更するだけで前進後退できること、無次元周波数が大きくなれば、(周囲の流体の速度が遅ければ) 大きな流体力を発生することなどがわかる。流体力の時系列については、前半の 0 ~ 0.25 秒の間がパワーストロークにあたるので、この間は大きな推力が得られるのに対し、後半の 0.25 ~ 0.5 秒の間は、抵抗を小さくしながら初

期位置に鰭を戻す動作(リカバリーストローク)を行うのみであるため、推力は発生せず、抵抗が発生する。

CFDの結果は、計測値をよく説明することがわかる。

4. 水中ロボット“PLATYPUS”²⁾

胸鰭で推進、運動制御を行う水中ロボットは、その高い運動性能、操縦性能から、いままでの水中ロボットでは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を可能にするものと期待される。

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を図ることができる。

このような目的のため、前記の3軸胸鰭運動装置を2対用いて開発された水中ロボットがPLATYPUSである。これは、初期形状がカモノハシに似ていたことから名付けられた名称であるが、現在は改造のため、カモノハシには見えにくい。PLATYPUSの写真と主要目をそれぞれFig. 6とTable. 1に示す。



Fig. 6 A photo of underwater vehicle PLATYPUS

Table. 1 Principal particulars of PLATYPUS

Length of the fuselage [m]	1.36
Diameter of the fuselage [m]	0.12
Mass of the fuselage [kg]	14.5
Chord length of each pectoral fin [m]	0.08
Span length of each pectoral fin [m]	0.1
Thickness of each pectoral fin [m]	0.0005

このほか、PLATYPUSには、深度センサー、姿勢センサー(3軸角速度、3軸傾斜角)、胸鰭根元に力センサー、レーザー距離計、位置計測用ピンガーが装備されている。

PLATYPUSの推進性能や運動性能の確認のため、大阪大学船舶海洋試験水槽や他の施設で静止流体中での推進性能と旋回性能、平水中/潮流中で海洋構造物に見立てた円柱周りの運動制御実験を行った。実験結果の一例として、潮流中で海洋構造物に見立てた円柱周りの運動制御を行った結果を示す。潮流は水槽中で船外機(5台)を作動させることにより再現している。

Fig. 7は、PLATYPUSの重心の軌跡である。潮流の上流側から円柱の周り検査し、潮流を利用しながら、一旦下流側まで移動してから上流に戻り、再度検査を開始するという繰り返し動作を行うような制御アルゴリズムを用いている。この場合、PLATYPUSの頭部に取り付けられたレーザー距離計が指し示す円柱上の点はFig.8のようになる。

実際は、レーザー距離計ではなく水中カメラやソナー等のある程度撮像範囲が広いものが用いられるであろうから、円柱の半周をほぼ検査可能であると考えられる。

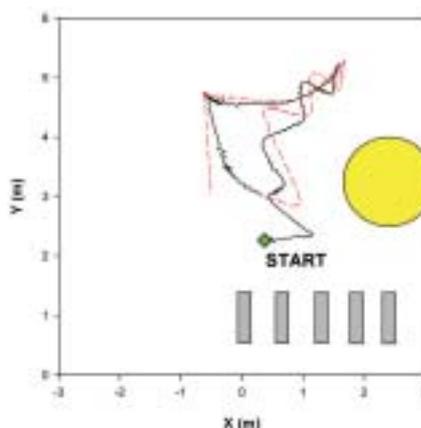


Fig. 7 Trajectory of PLATYPUS in water current

5. 水中ロボット周りの流れ解析と運動シミュレーション³⁾

胸鰭を有する水中ロボットの実用化を目指すには、効率の良い設計手法が必要である。すなわちロボット全体に加わる流体力の推定を行い、水中ロボットの運動シミュレーションが可能になれば、制御

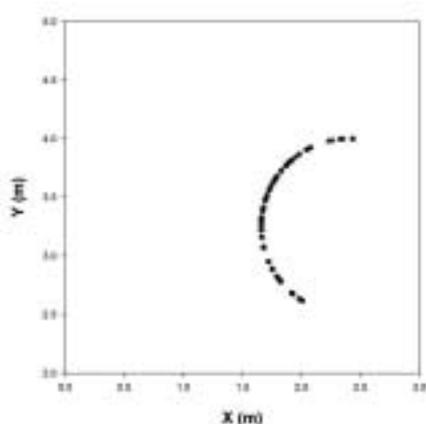


Fig. 8 All the hit points by the laser range finder during the 1st and 2nd routines of the guidance and control.

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。

このため、胸鰭運動装置付き水中ロボットのモデルとして前述のPLATYPUSを考え、胸鰭運動装置付き水中ロボットのためのCFDを基礎とした運動シミュレーション手法の開発を行ってきているが、いずれは設計ツールにしたいと考えている。

この支配方程式は、下記のような流場の支配方程式（NS方程式，連続の式）と6自由度の運動方程式であるが，これらは，水中ロボットに固定した座標系（機体固定座標系）で定義され，解かれることとなる。

$$m \left(\frac{d}{dt} \mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V} \right) = \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{h} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{h} = \mathbf{G}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Rn} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (3)$$

$$\mathbf{K} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{V}}{dt}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

ここで，水中ロボットの質量を m ，水中ロボットの速度ベクトルを \mathbf{V} ，角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}$ ，水中ロボットに働く流体力を \mathbf{F} ，流体力モーメントを \mathbf{G} ，角運動量を $\mathbf{h} (= \mathbf{I}_0 \times \boldsymbol{\omega})$ ，慣性テンソルを \mathbf{I}_0 ，流体の速度ベクトルを \mathbf{u} ，圧力を p ，レイノルズ数を Rn ，水中ロボットの運動を示す体積力を \mathbf{K} ，位置ベクト

ルを \mathbf{r} とした。

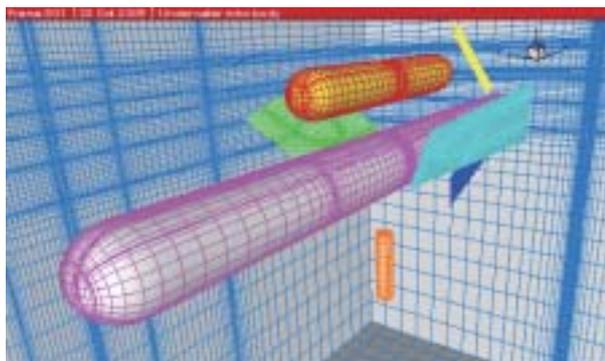


Fig. 9 Computational grid of PLATYPUS

4枚の鰭に同じ動作をさせた場合の運動シミュレーションの結果を示す。それぞれ胸鰭を揚力型と抗力型で作動させた場合である。実機実験で4枚の胸鰭を抗力型で作動させると，鰭により回頭モーメントが発生し旋回する。揚力型の場合は，回頭モーメントが発生しないので直進する。数値運動シミュレーションでは，これらの様子がよく再現できていると考えられる。

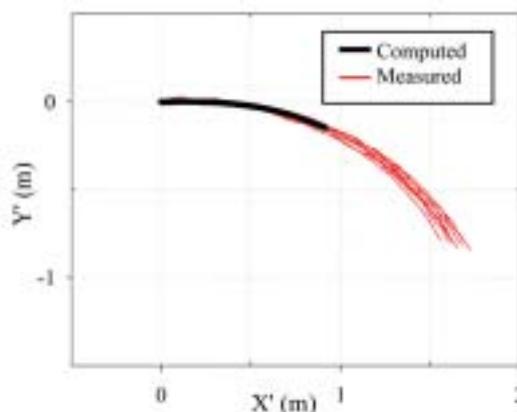


Fig.10 Trajectory of PLATYPUS with the drag-based swimming mode

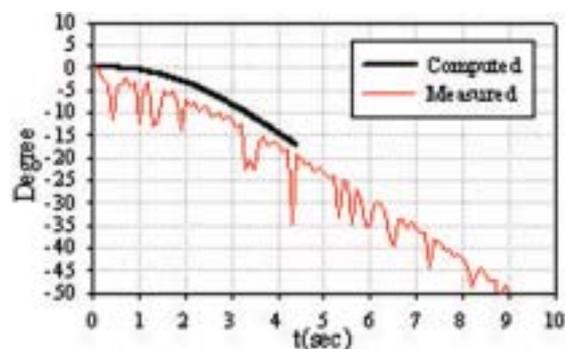


Fig.11 Time series of the heading angle of PLATYPUS with the drag-based swimming mode

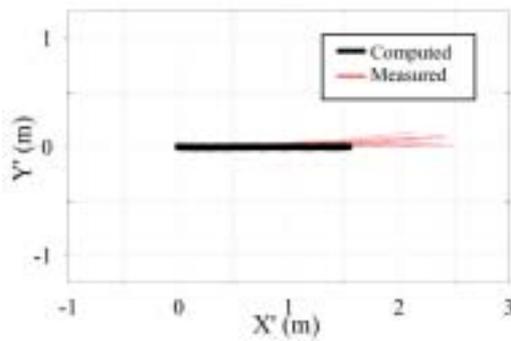


Fig.12 Trajectory of PLATYPUS with the lift-based swimming mode

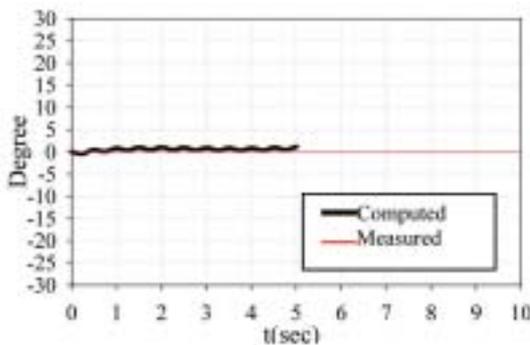


Fig.13 Time series of the heading angle of PLATYPUS with the lift-based swimming mode

最近では、このCFDコードにファジーアルゴリズムを付け加え、簡単な制御もコンピュータ上で行うことができるようになった。計算時間や計算精度に、未だ改良の余地があるが、とりあえずの枠組みは示すことができたと考えている。

6. 空気圧アクチュエータ鱭⁴⁾

胸鱭が進化を遂げれば、手や腕になるであろう。そのように考えれば、胸鱭に把持機能を持たせることに、何の不思議もない。このような観点から胸鱭自体の作動を実現させるべく、アクチュエータとしてFMA (Flexible Micro Actuator) を使用したものを紹介する。

FMAは、岡山大学の鈴森教授によって開発された空気圧アクチュエータの一種である。これには様々な種類のものがある。その中でもFMAをはじめとする空気圧ゴム人工筋は、軽量かつ高出力であり、ロボットハンドや管内移動ロボットに応用されている。FMAの特徴として、1) 構造が簡単で小型化が容易である、2) 衝動部がないため動作が滑らかである、3) 動きが柔軟で、壊れやすいものを

ソフトに扱える、が挙げられる。上記の特徴から Fig.14に示すようにシリコンゴム製のチューブ内に3つ空気室を持っており、チューブ周りに繊維を巻くことによって幅方向への膨張を拘束している。3つの空気室内の圧力を制御することによって、FMA自体の伸縮運動を含む3自由度を持つ。

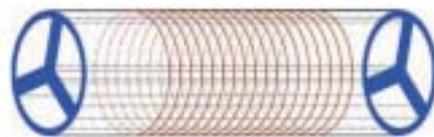


Fig.14 Flexible Micro Actuator

これを3セット用いて鱭としたものがFig.15に示す空気圧アクチュエータ鱭である。



Fig.15 Active Pneumatic Actuator Fin

空気圧アクチュエータ鱭は3本のFMAとその3本を覆うシリコン膜および水掻き部と翼根部から構成されている。鱭の根元部分からシリコンゴム製のチューブが出ており、FMAの各空気室に繋がっている。チューブに圧搾空気を送り込むことにより屈曲・伸展運動を発生させることができる。

これを用いた把持実験はまだ行っていないが、鱭としての推力発生の確認は実施した。Fig.16に一樣流中での推力計測結果を同条件下で鱭装置のモータのみで運動を行った場合、剛体平板の鱭による最適化された揚力型鱭運動を行った場合の推力係数とともに示す。図中のFlapping motion+Feathering motionが、Flapping運動を前述の胸鱭運動装置で行い、Feathering運動は、空気圧アクチュエータ鱭を作動させることで実現したもの、Flapping motionは、鱭は空気圧アクチュエータ鱭であるが、これは何の動作もせず、Flapping運動を胸鱭運動装置で行ったもの、Lift-based swimming mode by a rigid finとあるのは、鱭として剛体平板を用いたものである。

Fig.17は静水中での推力計測実験の結果である。

これらの計測結果から一様流中での推力係数 C_x 、静水中での推力係数 C_{x0} とともに剛体平板の鰭を用いた場合の推力係数より小さい値をとることがわかる。

7. おわりに

これまで私たちの研究室で実施してきた生物模倣型水中ロボットに関する研究の一端を紹介させていただいた。これらのロボットが水中で自由自在に泳ぐ姿を夢想しながら、本稿を終わることにする。

参考文献

- 1) H. Suzuki, N. Kato, " A Numerical Study on Unsteady Flow Around a Mechanical Pectoral Fin," International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.15, No.3, 2005, pp.161-167.
- 2) Y. Ando, T. Shigetomi and N. Kato, " Biology-inspired Precision Maneuvering of Underwater Vehicles-Part 4 ", The Proceedings of The Fifteenth (2005) International OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, pp557-564, 2005
- 3) H. Suzuki, N. Kato, T. Katayama, Y. Fukui, " Motion Simulation of an Underwater Vehicle with Mechanical Pectoral Fins Using a CFD-based Motion Simulator ", Proceedings of Underwater Technology '07, pp384-390, 2007
- 4) 有吉友和, 加藤直三, 鈴木博善, 安藤義人, 鈴森康一, 神田岳文, 遠藤聡, " 生物模倣型水中ロボットのための弾性体胸鰭アクチュエータ ", 日本船舶海洋工学会論文集第5号(投稿中)

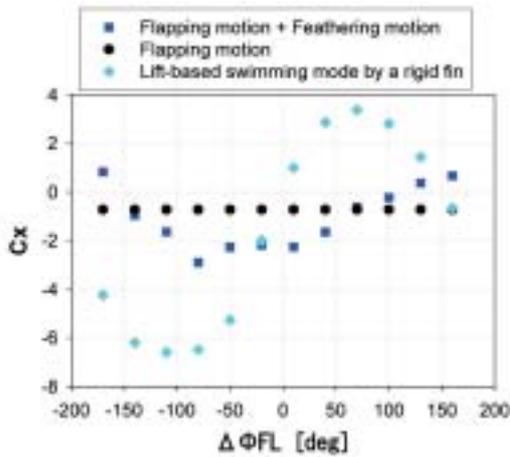


Fig.16 Experimental results in uniform flow

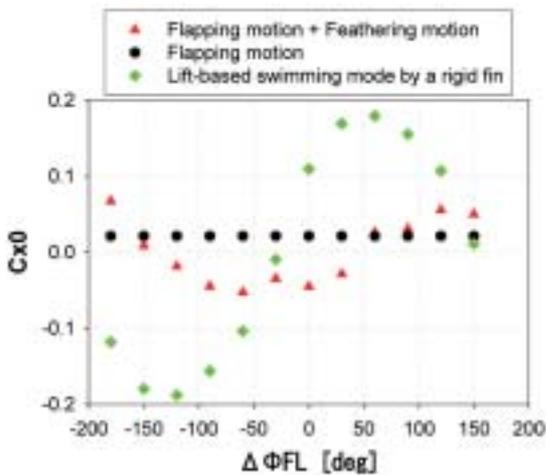


Fig.17 Experimental results in still water