胸鰭運動装置の流体力学的特性

正員 加藤 直三*

稲葉 忠彦**

Hydrodynamic Characteristics of Apparatus of Pectoral Fin Motion

by Naomi Kato, *Member* Tadahiko Inaba

Summary

This paper deals with experimental and analytical analyses of fish pectoral fin motion and performance tests of apparatus of pectoral fin motion from viewpoint of maneuverability of underwater vehicles.

Observation of pectoral fin motion of Black Bass revealed that the combination of feathering motion and lead-lag motion of a pair of pectoral fins generates the fish motion of advancing, backward swimming, hovering and turning.

The apparatus making the feathering motion and the lead-lag motion of the pectoral fin generates thrust force in a certain range of phase difference between both motions.

The unsteady vortex-lattice method including the effect of viscosity can express fairly well the unsteady forces acting on a pectoral fin model with feathering and lead-lag motions in a range of the phase difference between both motions where it exerts thrust force.

The fish model consisting of fish body model and a pair of the apparatus of pectoral fin motion can not only swim forward and backward and turn in the same position, but also swim in the transverse direction.

1. 緒 言

水中探査ロボットが複雑な海底を探索する場合、海底に生息する魚のようにホバリングや素早い旋回など細かい運動が要求される。また腕付き水中ロボットが浮いた状態で作業を行う場合、ロボット本体の細かな制御が必要となる¹⁾。

本研究は、従来から水中ロボットの運動制御に用いられているスクリュウ型スラスタや翼に代わる新しい操縦装置を考案することを目的としている。具体的には、魚の胸鰭に着目してその観察と解析に基づいて胸鰭運動装置の開発を行う。

推進の観点から振動翼として魚の尾鰭の運動を扱う多く

の研究²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾があるが、尾鰭の運動機構を主スラスタとして水中ロボットに適用するのは、それに誘起されるロボット本体の振動やスクリュウ式推進器との競合のため容易ではない。一方、魚の胸鰭の運動を浮遊状態での水中ロボットの操縦や安定化へ利用する観点からの研究はほとんどない。スクリュウ式スラスタは、水中ロボットが停止状態でその位置や姿勢を保持する場合、正負の推力を迅速に発生するのが難しいという欠点を持っている。したがって、スクリュウ式スラスタを浮遊状態での水中ロボットやそれに装着している腕の操縦や安定化に利用すると精度が得られないことになる。魚の胸鰭の運動を浮遊状態での水中ロボットの操縦や安定化へ利用する観点からの研究はほとんどない。

上記の水中ロボットの操縦性能の観点から、魚が停止状態でその運動を制御するのに重要な役割をすると見られる胸鰭の運動に着目して、その運動の観察と解析、それに基づく胸鰭運動装置単独の流力特性及び胸鰭運動装置一対を左右に装着した魚型水中ロボットの自航・操縦性能につい

* 東海大学海洋学部船舶工学科

** 東海大学海洋学部大学院海洋工学専攻

て述べる。

2. 魚の胸鰭の運動の実験解析

2.1 供試体

実験に使用した魚は、オオクチバス（通称 ブラックバス, Fig.1⁶⁾ 参照）という魚である。選んだ理由は、簡単に手に入り実験に使用しても耐える体力を持っており、しかも湖や沼に生息するこの魚の胸鰭が発達して大きく観察しやすいからである。Fig.2に実験に用いたブラックバスの胸鰭の大きさを示す。

2.2 実験装置

魚の運動の自由度を減らし観察しやすくするため、2つの水槽の製作を行った。1つめの水槽は、魚が前進と後退しかできないように細長くした。サイズは、長さ 1000 mm×幅 100 mm×高さ 100 mm。2つめの水槽は、魚が旋回運動のみできるようにした平たい水槽である。サイズは、長さ 450 mm×幅 450 mm×高さ 100 mm。2台の 8 mm ビデオを水槽の横と上に設置して、胸鰭の運動の観察を水平方向と鉛直方向の両方向から同時に行った。

2.3 解析方法

胸鰭の観察からその運動が主にフェザリングとリード・ラグの2つの運動モード (Fig.3 参照) から成り立っていることがわかったため、前進、後退、旋回の各状態で2つの運動の角度をビデオ画像 (30 コマ/秒) から求めた。

(i) フェザリング

ビデオ画像 (上画像) 上の胸鰭の翼幅 x と次の関係式を用いてビデオ画像上の翼弦長 y を求める。

Fig.1 Black Bass (*Micropterus salmoides*)

Fig.2 Dimensions of pectoral fin of a Black Bass

$$x : y = 23 : 25 \quad (1)$$

次に、Fig.4に示すビデオ画像上の鰭の翼弦長の写影長さ z とビデオ画像上の翼弦長 y から次式を用いてフェザリング角 α を求める。

$$\alpha = \sin^{-1}(z/y) \quad (2)$$

(ii) リード・ラグ

Fig.4に示すように、リード・ラグ角 β をビデオ画像 (上画像) から読みとる。

(iii) 無次元振動数と位相差

無次元振動数 K を魚の速度 U (ビデオ画像上で計測) と胸鰭の角速度 ω から次式を用いて求める。

$$K = c \times \omega / U \quad (3)$$

フェザリングを基準としたリード・ラグとフェザリングの位相差 $\Delta\phi$ は、それぞれの角度が最大となる時間の差 Δt と運動周期 T から次のように求める。

$$\Delta\phi = \Delta t / T \times 360^\circ \quad (4)$$

Fig.3 Definitions of feathering motion and lead-lag motion

Fig.4 Definitions of angles of lead-lag and feathering

2.4 実験結果

(i) 前進時の胸鰭の運動

実験解析から得られた前進時の魚の全長 ($L=0.39$ m) を用いたレイノルズ数と無次元振動数 σ の関係を Fig. 5 に示す。東の著書⁷⁾によると, Yates⁸⁾ は何種類かの魚の全長を用いたレイノルズ数と無次元振動数の関係を調べ, 魚種に関係なくレイノルズ数が増加するとともに無次元振動数は 10 に近づくことを述べている。この図からブラックバスにおいてもそのことが言えることがわかる。Fig. 6 に $K=4.69$ における胸鰭の運動の時刻歴の一例を示す。両運動モードとも運動範囲が 80° 以内にほぼ収まっている。

(ii) 後退時の胸鰭の運動

Fig. 7 に $K=6.25$ における後退時の胸鰭の運動の時刻歴の一例を示す。リード・ラグの最大角度が 100° を越えており, そこではフェザリング角度が正から負の値に変わる。

(iii) 旋回時の胸鰭の運動

Fig. 8 に右旋回時の胸鰭の運動の時刻歴の一例を示す。右と左の胸鰭の運動の位相差は約 180° であり, 左右逆の動きをしている。後退時のリード・ラグとフェザリングの位

Fig. 7 Motion of pectoral fin in backward swimming condition

Fig. 5 Reduced frequency of Black Bass against Reynolds number

Fig. 6 Motion of pectoral fin in advancing condition

Fig. 8 Motion of pectoral fin in right turning condition

相差の関係から、回転時の両側の胸鰭は後退の推力を発生していると推察される。この時、魚はその場回頭をしていることから、胸鰭が発生する負の推力を打ち消す正の推力を尾鰭が出していると考えられる。

3. 胸鰭運動装置単独の流体力試験

胸鰭運動装置を魚模型に組み込む前に、リード・ラグ運動とフェザリング運動の位相差、無次元振動数、胸鰭の厚さの影響について装置単独の流体力試験を回流水槽（長さ2.2 m×幅1.4 m×深さ0.9 mの観測部）にて実施した。

3.1 胸鰭運動装置

Fig. 9 に示す一对の胸鰭運動装置を製作した。装置は左右それぞれ2つのサーボモータを持ち、各々のサーボモータに角度検出用のポテンシオメータを取り付けた。これらのモータをパーソナル・コンピュータによってPD制御則を用いて制御した。左右各々の2つのモータがリード・ラグ運動とフェザリング運動に対応する。この装置はモータの性能の範囲で任意の運動を作ることが可能であるが、ここでは魚の胸鰭運動の観察から、正弦運動を用いた。この実験では、Fig. 2 に示した胸鰭の6.2 倍の大きさ (Fig. 2 に定義の翼弦長を0.155 m) のステンレス板 (厚さ0.6 mm) を用いた。

3.2 実験方法

無次元振動数を変化させるために、装置への流入流速を一定 (0.17 m/s) とし、装置の運動周期を変化させて行った。

リード・ラグ角 β (Fig. 4 参照) は 20° から 90° の正弦運動を、フェザリング角 α は 0° から 70° の正弦運動を行った。

Fig. 10 に定義された流体力を測定するため、3分力計にて (F_x, F_z, M_y) を測定するための固定装置と、(F_x, F_y, M_z) を測定するための固定装置の2種類の固定装置を用意した。そして2回にわたって各々の固定装置と胸鰭運動装置を水槽に没水させた。胸鰭単独の特性を調べるため、装置に胸鰭を装着した状態の値から、装置から胸鰭を外した状態の値を差し引いた。

3.3 実験結果の表現

(i) 流体力係数

Fig. 9 Apparatus of pectoral fin motion

無次元振動数 $K=2, 3, 4$ に対する流体力 F_x, F_y, M_z を無次元係数 $C_x (= F_x / 0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S)$, $C_y (= F_y / 0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S)$, $C_z (= M_z / 0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S)$ (ρ : 流体密度, S : 胸鰭の面積) で表現する。

(ii) 推進効率

装置の推進効率は次のように表される。

$$\eta = \frac{A}{B}$$

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T F_x \cdot U dt - \frac{1}{T} \int_0^T F_{x0} \cdot U dt$$

$$B = \frac{1}{T} \int_0^T (M_z \cdot \dot{\phi}_L) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{M_y \cdot \dot{\phi}_F}{\cos \phi_L} \right) dt - \frac{1}{T} \int_0^T (M_{z0} \cdot \dot{\phi}_L) dt - \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{M_{y0} \cdot \dot{\phi}_F}{\cos \phi_L} \right) dt \quad (5)$$

ここで、 F_{x0}, M_{y0}, M_{z0} は装置から胸鰭を外した状態での流体力を、 $\dot{\phi}_L$ はリード・ラグ運動の角速度を、 $\dot{\phi}_F$ はフェザリング運動の角速度を、 ϕ_L はリード・ラグ角を、 T は運動周期を表す。

4. 魚の胸鰭に加わる流体力の数値シミュレーション

魚の胸鰭に加わる流体力の数値シミュレーションに、著者が以前剥離流の解析のために開発した非定常渦格子法⁹⁾を用いる。

4.1 基礎式

非粘性流における平板まわりの渦流場の速度はグリーンの定理をベクトルポテンシャル場に適用すると次のように表される。

$$\frac{1}{4\pi} \nabla_P \wedge \left\{ \int_S \frac{\vec{T}s(Q)}{r_{QP}} dS_Q + \int_{V\omega} \frac{\vec{\omega}(Q)}{r_{QP}} dV_Q \right\}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} \{ \vec{n}_P \wedge \vec{T}s(P) \} + \vec{V}e(P) & P \in S \\ \vec{V}e(P) & P \in Oe \end{cases} \quad (6)$$

ここで S は平板表面を、 $V\omega$ は渦領域を、 Oe は平板の外側の領域を、 $\vec{T}s$ は渦面の強さを、 $\vec{\omega}$ は $V\omega$ における渦度

Fig. 10 Definition of coordinate system

Fig. 11 Arrangement of vortex sheet

を, $\mathbf{r}_{QP}$ は速度を求める点 P と渦特異点上の点 Q との距離を, $\mathbf{\tilde{v}}_e$ は平板の外側の領域における速度を, $\mathbf{\tilde{n}}_P$ は平板における法線ベクトルを, $\wedge$ はベクトルの外積を表す。

物体表面境界条件は, 次のように表される。

$$(\mathbf{\tilde{U}} - \omega_{fin} \wedge \mathbf{\tilde{r}}_P + \mathbf{\tilde{v}}_P) \cdot \mathbf{\tilde{n}}_P = 0 \quad (7)$$

ここで, $\mathbf{\tilde{U}}$ は流入流速ベクトルを, ω_{fin} は鰭の角速度ベクトルを, $\mathbf{\tilde{r}}_P$ は点 P の位置ベクトルを, $\mathbf{\tilde{v}}_P$ は(6)式より得られる速度ベクトルを表す。

鰭の正面を(+), 背面を(-)の記号で表すと, 非定常ベルヌーイの定理から, 鰭表面の圧力差係数は次のように表される。

$$\Delta C_p = \frac{p_- - p_+}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2} = (W_+/U)^2 - (W_-/U)^2 - \frac{2}{U^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\phi_- - \phi_+) \quad (8)$$

ここで p は圧力を, ρ は流体密度を, W は鰭表面上の流速, ϕ はポテンシャルを表す。上式を変形すると次のようになる。

$$\Delta C_p = \frac{2}{U^2} \cdot (W_{0Y} \cdot \gamma_z - W_{0Z} \cdot \gamma_Y - \frac{\partial \Gamma}{\partial t}) \quad (9)$$

ここで Fig. 11 に示すように, W_{0Y} と W_{0Z} はそれぞれ鰭上の Y 軸方向および Z 軸方向の接線速度の平均値を, γ_Y と γ_z はそれぞれ y 軸および z 軸方向の束縛渦の線密度を,

$$\Gamma = \phi_- - \phi_+ \quad (10)$$

を表す。

時間 t における時間 t_0 に放出された自由渦線分の誘起速度は粘性影響を加味して次のように表現する (Fig. 12 参照)。

$$|w| = \Gamma_f \cdot |\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2| / r \cdot (1 - \exp(-r^2 / 4\nu_E(t - t_0))) \quad (11)$$

ここで ν_E は有効動粘性係数を表す。

4.2 計算手順

鰭平板が静止状態から瞬間的に速度 U で動きだすとする。このときの計算手順は次のようである。

(1) 鰭平板を台形をした幾つかのパネルに分割する。それぞれの台形の周辺に渦輪を配置する。

Fig. 12 Induced velocity from a vortex filament

(2) 各々のパネルの図心 (標点) で渦輪からの合速度をビオ・サバールの法則を用いて求める。物体表面境界条件から束縛渦輪の強さを求める。

(3) 翼端周辺の各パネルの端部上で合速度を求め, その合速度に沿って自由渦輪を放出する。自由渦輪の強さを, 数値計算の安定性の問題から, 翼端での $\Delta C_p = 0$ という Kutta 条件から求める方法をとらず, 翼端周辺の束縛渦輪の強さと同じにとる。

(4) (2) と (3) の手順を繰り返す。

各流体力係数を次式を用いて求める。

$$C_x = F_x / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) = \sum_j \Delta C_{pj} \cdot \cos nx \cdot S_j / S$$

$$C_y = F_y / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) = \sum_j \Delta C_{pj} \cdot \cos ny \cdot S_j / S$$

$$C_z = F_z / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S) = \sum_j \Delta C_{pj} \cdot \cos nz \cdot S_j / S$$

$$C_{my} = M_y / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c) = \sum_j (X_{0j} \cdot \Delta C_{pj} \cdot \cos nx - X_{0j} \cdot \Delta C_{pj} \cdot \cos nz) \cdot S_j / (S \cdot c)$$

$$C_{mz} = M_z / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c) = \sum_j (X_{0j} \cdot \Delta C_{pj} \cdot \cos ny - Y_{0j} \cdot \Delta C_{pj} \cdot \cos nx) \cdot S_j / (S \cdot c) \quad (12)$$

ここで, $\cos nx, \cos ny, \cos nz$ は標点での法線ベクトルの固定座標系での成分を表す。

5. 実験結果と数値計算結果の比較

5.1 数値計算の詳細

Fig. 2 に定義の翼弦長を 1.55 としたときの計算対象の胸鰭の形状とパネル分割 (55 分割) を Fig. 13 に示す。このときの一樣流速を 1.0 とした。(11) 式における有効動粘性係数を $\nu_E = 5000 \cdot \nu$ (ν : 動粘性係数) とした。時間ステップ Δt を 0.0811 とし, (3) 式で定義される無次元振動数 $K = 2, 3, 4$ について各々 2 周期分の計算を行い, 流体力は最後の 1 周期分の平均値として求めた。

5.2 流体力係数の比較

Fig. 14 にリード・ラグとフェザリングの位相差が 60° の

Fig. 13 Division of pectoral fin

Fig. 14 Comparison of hydrodynamic force coefficients during one cycle of pectoral fin motion between numerical simulation and experiment

場合で無次元周期 1.57 の場合の一周期にわたる流体力係数 C_x , C_y , C_z の時間変化について実験値と計算値との比較を示す。 C_x の実験値に関して、リード・ラグが最大値から最小値に至る間において、推力が発生していることがわかる。 C_y , C_z の実験値については、リード・ラグ運動がその最小値を過ぎたあたりで、最小値を示している。 C_x の計算値において、最初の 1/4 周期あたりで大きな変化が見られるのは、自由渦が鰭平板に接近したためである。

Fig. 15 Comparison of mean hydrodynamic coefficient C_x between numerical simulation and experiment

Fig. 15 にリード・ラグとフェザリングの位相差に対する一周期平均の流体力係数 C_x (推力係数) の理論値と計算値との比較を示す。実験では、無次元振動数が大きくなるほど C_x の最大値が大きくなり、位相差 30° から 90° あたりで最大値となる。計算では、その最大値やその位相差については実験結果とほぼ一致しているが、位相差が負の領域では一致度はあまりよくない。

Fig. 16, 17, 18, 19 にそれぞれリード・ラグとフェザリングの位相差に対する一周期平均の流体力係数 C_y , C_z , C_{my} , C_{mz} の実験値と理論値との比較を示す。 C_y , C_z , C_{my} に関して、実験値では大部分の位相差の領域で負の値を示している。 C_{mz} は C_x の変化に対応して変化している。すなわち、 C_x の正の値の領域では C_{mz} は負の領域の値となっている。また無次元振動数の C_x と C_{mz} への影響も相関をもっている。 C_y , C_z , C_{my} の理論値は位相差が負の領域で実験値との差が大きくなる傾向にある。

Fig. 16 Comparison of mean hydrodynamic coefficient C_y between numerical simulation and experiment

Fig. 17 Comparison of mean hydrodynamic coefficient C_z between numerical simulation and experiment

Fig. 18 Comparison of mean hydrodynamic coefficient C_{my} between numerical simulation and experiment

Fig. 19 Comparison of mean hydrodynamic coefficient C_{mz} between numerical simulation and experiment

Fig. 20 Comparison of thrust efficiency between numerical simulation and experiment

Fig. 20 に推進効率に関する実験値と理論値との比較を示す。実験値から推進効率が最大となるリード・ラグとフェザリングの位相差は80度付近であることがわかる。 $K=4$ では広い領域にわたって推進効率が正となっている。理論値は $K=4$ の場合、ほぼ実験値に一致しているが、 $K=3$ では位相差が 0° から 60° の範囲で実験値より下回っている。これは、(5)式の定義から、その範囲において C_x の実験値と理論値の不一致によるものと思われる。

6. 胸鰭運動装置付き魚型水中ロボットの自航および操縦試験

6.1 魚模型

Fig. 21 にFRPで製作した魚模型の外形を示す。平面図の形状はNACA 0018翼型を採用した。一対の胸鰭運動装

Fig. 21 Configuration of fish model

置は魚模型の船首から1/4長さのところに装着した。胸鰭運動装置付き魚模型は水中でほぼ中性浮力になるようにバラスト調整を行った。Fig. 22に胸鰭運動装置付き魚模型の写真を示す。

6.2 実験方法

実験は Fig. 23 に示す計測台車を回流水槽のレールの上に設置し、魚型水中ロボットの二次元運動（前後、横、回転方向）を計測した。

リード・ラグ運動とフェザリング運動を胸鰭運動単独試験の場合と同様な振幅を持った正弦運動とした。

胸鰭運動装置の質量は両側合わせて2.8 kg、胴体の容積は0.030 m³、胴体の質量は3.55 kg、計測台車の質量は7.0 kg、計測台車と水槽レールとの摩擦は0.49 Nである。

6.3 実験結果

Fig. 23 と Fig. 24 にそれぞれ胸鰭の運動周期1.5秒と2.0秒においてその振幅の変化に対する前進時における移動距離と速度変化を示す。このときの両側の胸鰭運動装置のリードラグとフェザリングの位相差は60°とした。胸鰭の運動振幅を大きくするほど、前進速度が大きくなり移動

Fig. 22 Fish robot with apparatus of pectoral fin motion

Fig. 23 Carriage for measurement of two-dimensional movement of fish robot

Fig. 24 Measured data of swimming of fish robot in forward direction ($T=1.5$ sec)

Fig. 25 Measured data of swimming of fish robot in forward direction ($T=2.0$ sec)

Fig. 26 Comparison of movement of fish robot in forward swimming between measurement and simulation

Fig. 27 Loci of fish robot in turning condition

距離も増える。また運動周期を短くするほど、速度が増し、移動距離が増える。

この実験値と比較するためシミュレーションを行った。前進方向の運動方程式は次のように表される。

$$(m + A_{11})\dot{u} = F_{Hb} + F_{Hf} + F_{fric} \quad (13)$$

ここで、 m は胴体内部の流体質量を含んだ装置全体の質量、 A_{11} は胴体の付加質量、 u は前進速度、 F_{Hb} は胴体の前進方向の流体力、 F_{Hf} は胸鰭運動装置により発生する $\dot{u}$ に比例する項も含んだ流体力、 F_{fric} は計測台車の水槽レールとの摩擦を表す。 A_{11} は Hess-Smith 法によるポテンシャル流計算から求めた。 F_{Hb} は胴体単体の流体力試験より求めた。 F_{Hf} は単体の胸鰭運動装置の流体力計算から求めた。ただし、左右の相互干渉や胴体との相互干渉を無視している。

Fig. 26 に胸鰭運動の周期 1.5 sec と 2.0 sec における魚型ロボットの移動距離の実験とシミュレーションとの比較

Fig. 28 Loci of fish robot in laterally moving condition

を示す。ただし、両側の胸鰭運動装置のリードラグとフェザリングの位相差を 60° 、運動振幅を 35° とした。シミュレーション結果はほぼ実験値と一致している。

Fig. 27 に出発から 20 秒間の左旋回時の魚型水中ロボットの軌跡を示す。図では上側を前部としている。このときの胸鰭運動の周期は 2.0 sec、右側の胸鰭運動装置のリードラグとフェザリングの位相差を 60° 、左側の位相差を -120° とした。ほぼその場回頭をしている。平均 $4.5^\circ/\text{sec}$ の旋回角速度となっている。

Fig. 28 に出発から 20 秒間の平行横移動時の魚型水中ロボットの軌跡を示す。このときの胸鰭運動の周期は 2.0 sec、右側の胸鰭運動装置のリードラグとフェザリングの位相差を 60° 、運動振幅を 35° 、リードラグの運動の中心軸を 140° とし、左側の位相差を 60° 、運動振幅を 35° 、リードラグの運動の中心軸を 55° とした。幾つかの胸鰭運動装置のパラメータを調整することによって、平行横移動が可能になることがわかる。

結 論

水中ロボットの操縦性能の観点から、魚が停止状態でその運動を制御するのに重要な役割をすると見られる胸鰭の運動に着目して、その運動の観察と解析、それに基づく胸鰭運動装置単体の流体力特性及び胸鰭運動装置一対を左右に装着した魚型水中ロボットの自航・操縦性能について実験解析と理論解析を行った結果、次の結論を得た。

- 1) 魚の胸鰭の 2 種類の扇ぎかた（リード・ラグ運動、フェザリング運動）の組み合わせによって魚の低速時の前進、後進、旋回の運動を作り出している。
- 2) 胸鰭のリード・ラグ運動とフェザリング運動を模擬する胸鰭運動装置によって駆動される胸鰭型平板は、ある範囲の両者の運動の位相差において推力を発生する。
- 3) 粘性の影響を加味した非定常渦格子法は、推力を発生するリード・ラグ運動とフェザリング運動に位相差の

領域において、胸鰭型平板の非定常流体力をよく表現する。

- 4) 胸鰭運動装置を組み込んだ魚型ロボットは、前進、後退、旋回ができるばかりでなく、横移動も行うことができる。

参 考 文 献

- 1) 加藤直三, D. M. Lane: 水中ロボットの多腕協調制御, 日本造船学会論文集, 第 178 号, pp. 675-684
- 2) H. Hertel: Structure-Form-Movement, Reinhold Publishing Corporation, N. Y., (1966), pp. 166-168
- 3) 一色尚次, 森川裕久: , 日本造船学会誌, 第 642 号, (1982), pp. 2-9
- 4) 田中一朗, 永井實: 抵抗と推進の流体力学—水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ—, シップ・アンド・オーシャン財団, (1996), pp. 178-195
- 5) D. S. Barrett and M. S. Triantafyllou: The Design of Flexible Hull Undersea Vehicle Propelled by an Oscillating Foil, Proc. of 9th Int. Symp. on Unmanned, Untethered Submersible Technology, (1995), pp. 111-123
- 6) 原色魚類大図鑑, 北龍館, (1987), pp. 505
- 7) A. Azuma: The Biokinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag (1992)
- 8) G. T. Yates: Hydromechanics of Body and Caudal Fin Propulsion, P. W. Webb, D. Weihs (eds) Fish Biomechanics, Pragaeyer, New York (1983), pp. 177-213
- 9) N. Kato, M. Yamaguchi: The Vortex on a Submerged Solid of Revolution, 2nd Int. Symp. on Ship Viscous Resistance, (1985), pp. 22: 1-22: 22