多関節翼を用いた魚類型推進に関する研究

正員 西 尾 茂*

中 村 研**

A Study on the Propulsive Performance of Fish-Like Motion Using Waving Wing Model

by Shigeru Nishio, *Member* Ken Nakamura

Summary

Propulsive performances of fish-like motion have been investigated using waving wing model. It has been said that the fish-like motion achieves high propulsive performances compared with the artificial propulsion systems such as motor and propeller. Present paper describes the analyzed results of hydrodynamic force and flow-field measurement using waving wing model. The waving wing model was designed and made so as to analyze the basic characteristics of fish-like propulsion in two-dimensional case. The authors have proposed the definition of dynamic drag coefficient, which enables to know the resistance characteristics of waving-motion object. The basic data was collected in the simple cases, and that has been used to estimate the thrust forces under self-propulsive condition. The results of the analysis of hydrodynamic force have also been considered in connection with the flow field measured by particle image velocimetry (PIV) system.

1. 緒 言

ヒレの往復運動や体躯の屈曲により遊泳を行う魚類の推進は、モータとプロペラを用いる通常の船舶の推進に比べて高い効率を実現していると言われ、これまで多くの研究がなされてきた（例えば、田中、永井¹⁾の解説、中島²⁾）。本問題は、グレイのパラドックスなどとして一般にも広く知られているが、現象が非定常であることと、魚類の運動を模擬すること自体が簡単でないために、未解決の問題が多く残されている。流体力学的な検討は、定量的な測定が 1950 年入って行われているが、1970 年代に入ってから Lighthill³⁾、Wu⁴⁾ の理論的な研究がきっかけとなり種々の研究がなされてきたが、流体の粘性を本格的に取り入れた解析が進められるようになったのは最近になってからである。近年の CFD 技

術を活用した戸田⁵⁾ 6)、土井⁷⁾らの研究や、詳細な実験データに基づく中島⁸⁾ 9)の報告など、精力的な研究が進められている。

魚類型推進は、一般の船舶の推進と異なり主船体にあたる抵抗体とプロペラにあたる推進器の区別が明確でないため、抵抗と推力を個別に調査し、自航状態でそれらの相互作用を検討をするという従来の船舶で用いられてきた解析方法をそのまま適用することはできない。さらに、対象が生体である場合には、プロペラの回転数やピッチ角に相当する遊泳運動を固定し、荷重量を変えて試験を行うことも容易でなく、これらに替わり模型を利用した何らかの試験方法を考案しなければならない。

そこで、本研究では 2 次元ではあるが魚類型推進を忠実に再現し、基礎的な推進特性の検討が可能な多関節翼模型¹⁰⁾を設計・製作し、それを用いて実験流体力学の立場から検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 多関節翼模型

魚類型推進は、本来 3 次元の流場に基づく機構であるが、本研究では同推進機構の基礎的な特性と分析方法を

* 神戸商船大学

** 三井造船(株)

検討するため、2次元の多関節翼模型を用いた。Fig.1(a)に実験で使用した翼模型の断面形状を示す。イルカやクジラの体の細長比は約1/6といわれているが、模型断面に採用した翼型 NACA0018 の細長比はイルカのそれとほぼ同じとなっている。実験に用いた翼の弦長は $C=150\text{ mm}$ ，没水部分のスパンは $B=200\text{ mm}$ である。翼断面には Fig.1(b)に示すような関節を4つ設け、各関節は最大 30° まで屈曲できるようにした。本模型は、これらの関節を駆動することにより、推進運動中に自由にキャンパーラインを変化させることができる。

Fig.1 Cross section of waving wing model.

(a) NACA0018, (b) Detail of joint part.

実験は Fig.2(a)に示すように、小型回流水槽(観測部: $1000 \times 300 \times 300\text{ mm}$)において行なわれ、翼模型は、リニアウエイ、支持棒を介して回流水槽に垂直に取り付けられた。翼全体は $3/4$ 弦長の位置で支持される。支持軸回りの回転運動ならびに流れに垂直な方向の並進運動は図中⑤、⑥に示すサーボモータを駆動して行うことができ、関節は図中①～④に示す翼模型上に設置した軽量サーボモータを用いて運動を用いて行われる。関節の屈曲運動と支持軸の運動を駆動するモータは、Fig.2(b)に示すように各系統独立にパーソナルコンピュータ(PC)から直接制御できる。したがって、翼はサージ運動を除き非正弦運動を含む任意の周期運動をすることが可能となっている。

Fig.2(a) Experiment in circulating water channel.

Fig.2(b) Control system of waving wing model.

2.2 可視化実験

可視化実験は、観測部深さ方向中央位置にレーザシート光を水平に照射し、流体に蛍光染料で染色したナイロン粒子(平均直径 $250\text{ }\mu\text{m}$ ，比重 1.02)を懸濁して行った。そして、流れ場を観測部底面から観測することにより、トレーサ粒子の運動から流れのパターンを見ることができた。Fig.3に可視化実験で得られた画像の例を示す。また、可視化された流れ場は、VTR やスチルカメラで記録するとともに、CCD カメラで画像データとして取り込み、粒子画像流速測定法(PIV)の入力に用いた。

Fig.3 Visualized flow field around waving wing model.

2.3 流体力計測

魚類型推進の場合、船舶の主船体とプロペラの関係のように抵抗体と推進器の区別が明確でないことは、自航速度が判っても、抵抗値とそれにバランスする水力の両者ともが不明のままである。また、仮に模型に対する動力からの入力が計測できても、内部の機械的損失の推定が難しいので、この方法による推力の推定は簡単ではない。さらに、推進効率を求める際に必要な、進行方向に対して直角方向の流体力の計測は、模型の自重による慣性力からの分離が問題となり、精度良く横力を求めるにも多くの課題がある。しかし、少なくとも進行方向の流体力が計測できれば、拘束試験による自航速度の推定や、一様流速の違いによる荷重量を変更した試験が可能となり、推進特性を分析するため重要な基礎データが得ら

れる。そこで、Fig.4 に示すような流体力計測機構を作成した。

Fig.4 Experimental set-up of hydrodynamic force measurement.

本実験では、翼模型の寸法があまり小さくなく、自航状態の流速も小さいことから、計測される流体力が小さいため、必要な精度を確保するには計測機構内部でのロスをなるべく小さくしなければならない。そのため、リニアウェイから翼模型までの装置全体をブランコ状の台に載せ、比較的長いアームの両端に低抵抗のベアリングを入れることにより、機械損失の軽減をはかった。その上で、懸架台に最大容量 500gf の検力計を取り付け、進行方向の流体力計測を行った。模型は計測する流体力に対して直角方向に運動するが、横方向の力は懸架台のフレームとガイドバーで受け持たれており、模型の慣性力が検力計の計測値に現れること少なくしている。

Table 1 に、流体力計測の実験条件を示す。本論における計測では、翼運動の振幅分布ならびに振動波形は一定とし、運動周期 T 、翼前後端の運動位相差 ϕ_d 、一様流速 U を変化させ、計測を行った。

Table 1 Experimental condition of hydrodynamic force measurement.

Oscillating period: T (sec)	1, 2
Phase delay: ϕ_d (deg)	0, 52, 104, 156, 180
Uniform flow speed: U (sec)	0.05 ~ 0.35
Reynolds number: R_n	$6.6 \times 10^3 \sim 4.6 \times 10^4$
Froud number: F_n	0.04 ~ 0.29

2.4 PIV 画像解析

2.2 節で述べた可視化実験で観測される流場をデジタル画像として記録し、PIV 解析に供した。本論で用いた PIV アルゴリズムは、相関領域サイズなどのパラメータ最適機能を加えた相関法と勾配法を組み合わせ、著者らの 1 人が開発した高精度高解像度アルゴリズム¹¹⁾である。この方法は、粒子画像の誤対応率を低く抑えたま

ま、空間解像度と速度ベクトル精度の両者の特性を高くとることができるものである。Fig.5 は、 640×480 画素の画像 2 枚から得られた瞬時ベクトル分布で、相関領域を 11×11 画素と極力小さくした例であり、1 つの画像から 10000 ベクトル以上の計測値が得られている。また、勾配法を用いたサブピクセル解析を行っているので、計測ベクトルの精度は理論値では $1/100$ 画素、実際の計測でも 0.1 画素以下の精度が得られている。

Fig.5 Measured velocity field with high performance PIV system.

3. 翼運動データの生成

多関節翼は通常の振動翼とは異なり、運動中に時系列でキャンバーラインを変化させることができる。したがって、各周波数 ω の周期運動をする場合、翼各部の変位は(1)式のように表すことができる。

$$\eta(x, t) = f(x) \cdot g(\omega, t) \quad (1)$$

$f(x)$ は翼面上の振動運動振幅分布を表し、 $g(\omega, t)$ は周期運動を波形を表す。一般的には、時系列で振幅分布 $f(x)$ が変化することも考えられ $f(x, t)$ と表現することも考えられるが、本論では運動振幅分布は時間的には変化しない場合に限るため、(1)式の表現を採用する。

ニジマスの遊泳運動の観測結果¹⁰⁾によると、 $f(x)$ は指数関数の和で近似できることが報告されており、本論文ではこれに従い(2)式の関数を用いる。

$$f(x) = A \cdot \{\exp(a(x - x_0)) + \exp(-b(x - x_0))\} \quad (2)$$

x_0, a, b, A の係数は、具体的には従来の魚類遊泳の観測結果を基に定めることとなり、ここでは x_0 は $3/4$ 弦長の位置にとり、 a, b, A は翼の前端、後端、 $3/4$ 弦長位置の振幅を指定することにより定める。本論文では、ニジマスの観測結果¹⁰⁾ から得られたデータを基に、振幅を増幅して現象の観察が容易になるように考慮して運動データを作成した。

周期運動の波形を定める $g(\omega, t)$ は、本研究で用いるモデルの制御系では PC 上で生成される任意の波形を用いることができる。実際の魚類の推進でも正弦運動に限らない波形が用いられているものと考えられるが、本論では基礎的な推進特性を検討するという立場から、 $g(\omega, t)$ に関しては正弦運動に限り、(3)式に示される進行波の形をとる。

$$g(\omega, t) = \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

Fig.6 に(1),(2),(3)式を用いて生成された各関節における1周期の運動データの一例を示す。このデータは $\omega = 2\pi$, $k = \pi$ であり、本論で用いた実験条件の中では運動波形の進行速度が最も遅く、翼面上の起伏が大きくなる場合である。

Fig.6 Data for waving wing motion.

4. 推力特性の分析

本章では、2.3 節で述べた流体力計測結果の分析とその検討について述べる。Fig.7(a),(b)に、 $T = 2s$ における有次元値と無次元値の計測結果を示す。Fig.7(a)は、一樣流速 $U(m/s)$ に対する進行方向流体力 $F_x(N)$ を示す。また、Fig.7(b)の横軸に翼の無次元進行速度である泳動数 $S_w = UT/L$ をとり、縦軸は無次元化された流体力 C_x を示す。ここで、泳動数 S_w は生物の遊泳解析の際に、1周期の泳動運動で体長の何倍の距離を進むかを示す係数として用いられてきたが、係数としては振動円柱後流の解析などに用いられてきた Keulegan-Carpenter 数 (K_c 数) と同じものである。また、流体力の無次元数は、 $C_x = F_x / (1/2 \cdot \rho U^2 B a_{TE})$ で定義する。ここで、 ρ は流体の密度、 B は翼没水部のスパン長さ、 a_{TE} は翼後端に現れる翼運動の最大振幅である。したがって、 C_x はスパン長さと最大振幅で囲まれる面積を前方投影面積と考えて無次元化した流体力係数である。

翼の振動運動により推進を行う本実験の場合、抵抗と推力は変動を繰り返し、自航試験の場合はサージ運動を

しながら前進するが、拘束運動の場合には計測される流体力に大きな変動が見れる。泳動運動1周期中の特性変化も重要な要素のひとつではあるが、本論では変動成分の解析は後の課題とし、基礎的な平均成分を解析対象とする。そのため、Fig.7 に示す計測結果は、 $T = 2$ における30秒間の平均値である。

Fig.7 Hydrodynamic characteristics of waving wing.

- (a) Hydrodynamic force and advance speed,
(b) Non-dimensional force performance.

本実験で計測される流体力は、翼が一樣流から受ける抵抗と翼が発生する推力の和であり、 $F_x = 0$ における一樣流速を、そのときの泳動運動で得られる平均自航速度と考えることができる。Fig.7(a)で示す計測結果から求められる平均自航速度 $U_{self}(m/s)$ の変化は、Fig.8 に示すようになる。Fig.8の横軸は運動位相差 $\phi_d(deg)$ を示し、縦軸は U_{self} を示すもので、2つの実線は異なる2つの運動周期の場合の計測結果である。運動周期が2倍も違う本計測の場合、 T の違いが自航速度を決める主たる要因になっており、 ϕ_d の変化の影響より卓越している。

次に、自航速度を無次元数で表現した結果を Fig.9 に示す。自航速度の無次元数は泳動数 S_w であるが、無次元数で検討することにより、推進特性の ϕ_d への依存性をより明確に見ることができる。有次元の U_{self} で検討したときには、運動周期の短い、すなわち素早い遊泳運動の方が得られる自航速度は速いというごく単純な結論を得るにとどまっていたが、運動周期 T を用いて無次元化したときには、運動周期の長い方が高い S_w を示すという結果が得られている。これは、低速で遊泳した方が効

Fig.8 Estimated averaged advance speeds at self-propulsive condition.

率の上では有利であるという傾向を示すものと考えられる。一方、遊泳動作の違いを示す ϕ_d の S_w への依存性であるが、 $\phi_d = 0$ すなわち剛体ピッチング翼に近い比較的小さい領域では、 S_w は大きい値を示しており、 ϕ_d が大きくなるにつれて S_w は小さくなるという傾向を示す。受動的な翼変形をするフレキシブル翼に、ここで得られて結果をあてはめると、剛性の高い翼のほうが同じ運動パターンならば高速で遊泳することができることを示している。ただし、本実験の場合は、運動振幅を一定にして計測を行っているため、それぞれの運動を駆動するための入力エネルギーは異なっており、 S_w の違いがそのまま効率を示している訳ではないことに注意をしなければならない。

Fig.9 Estimated swimming number at self-propulsive condition.

さて、Fig.7 で示した流体力は、抵抗と推力の和であるから、翼がどれほどの推力を発生しているのかは不明である。また、自航速度もそれぞれの運動パターンにより異なるため、単純にこれらの推進特性を比べることができない。そこで、まず本実験結果から運動パターンによる抵抗特性の推定を行い、これを基に解析を進める。Fig.7(b)に示した無次元流体力において、推力が卓越する自航速度より低速の領域では、流体力係数 C_x は大きく変化する。一方、泳動数 S_w が 2.0 より大きい高速の領域では抵抗成分が支配的となり、 S_w の違いによる C_x の

変化は小さくなる。この S_w が大きい領域では、翼に対する流入速度の違いにより多少推力の発生量は変化するであろうが、抵抗成分の方がずっとそれよりも大きく、 C_x は抵抗係数と同じものと見なすことができると考えられる。そこで、本論で得られた計測値のうち S_w が 2.0 以上の領域における流体力係数を、運動位相差 ϕ_d で整理すると Fig.10 に示すようになる。

Fig.10 Estimated dynamic drag coefficient.

ここで示されている計測値は、 $T = 1s, 2s$ の場合の $S_w = 2.0 - 5.0$ の範囲の値であるが、同じ ϕ_d であれば T, S_w によらず C_x の変化は少ない。また、どの (S_w, T) の組み合わせでも ϕ_d に対しては同じ特性を示している。これらから、高泳動数領域における流体力特性は、 ϕ_d の変化に対して共通の抵抗特性の違いを示しているものと考え、これを動的抵抗係数 C_{dd} と呼ぶ。本論では、Fig.10 に示す $S_w = 2.0 - 5.0$ の領域における C_x の計測結果から各 ϕ_d における平均値を求め、これにより C_{dd} を定義した。 C_{dd} は、剛体ピッチング翼にあたる $\phi_d = 0$ の場合に最も小さい値を示しており、 ϕ_d が大きくなるにしたがって C_{dd} も大きくなる傾向にある。これは、 ϕ_d が大きくなると翼面上に現れる波数が増え、翼面の起伏が激しくなることから、抵抗値が大きくなるという傾向を示しているものと考えられる。

これまでの過程では、遊泳動作の違いによる自航速度 U_{self} と抵抗特性 C_{dd} の変化について分析を進めてきたが、これを利用して翼の発生する推力の推定を行う。自航状態では翼が受ける抵抗 D_r と翼が発生する推力 T_h がバランスしており、 U_{self} と C_{dd} から推力特性を推定できる。推力減少率に相当する推力発生と抵抗増加の相互干渉は小さいとし、高泳動数領域における C_{dd} が自航状態でも適用できるものと仮定すると、 T_h は次のように表すことができる。

$$T_h = \frac{1}{2} \rho U_{self}^2 B a_{TE} \cdot C_{dd} \quad (4)$$

Fig.11 Estimated thrust performance at self-propulsive condition.

さらに、 T_h の無次元数をプロペラ単独試験におけるスラスト係数(例えば、田中、安部¹⁰⁾に習って、翼後端振幅 a_{TE} 、振動周期 T を用いて $K_T = T_h / (\rho a_{TE}^4 / T^2)$ と定義し、これの ϕ_d に対する変化を求めるとFig.11に示すようになる。この結果によると、振動周期の長い $T=2s$ の結果の方がどの ϕ_d でも高い K_T 値を示している。 ϕ_d の変化に対しては $\phi_d=0$ から $\phi_d=\pi/3$ 付近まで増加傾向を見せたあと、緩やかに減少をする。これにより、剛体翼より波状運動をする翼の方が同じ振幅分布でも大きな推力を発生する可能性を示している。一方、 ϕ_d の増加により波状運動の位相速度が遅くなると発生する推力はかえって小さくなってしまいうことも示している。ただ、ここでも前述と同様に翼面上の振幅分布を同一とし

て ϕ_d を変化させているだけなので、入力に相当する運動に必要なエネルギーはそれぞれの運動で異なっていることには変わりなく、Fig.11の特性がそのまま推進効率を表していないことに注意を要する。また、自航状態における抵抗特性も、推定精度を上げるためには推力減少率などで表される影響も考慮する必要があると考える。

5. 流場計測結果

前節では流体力計測結果から多関節翼の推進特性について検討を進めたが、本節ではPIVにより得られた速度場と前節で得られた推進特性との関係を検討する。本節で示す計測値は、翼まわりの流場の周期性を利用し、翼運動の位相を基にした条件付サンプリングで得られる位相平均速度場である。Fig.12に、PIV解析で得られた速度ベクトル分布ならびにその微分値から得られる渦度場を示す。本計測結果は、 $\phi_d=\pi$ 、 $T=1s$ 、 $U=0.14\text{ m/s}$ の場合であり、自航状態を保っている。計測結果は、上図の速度場と渦度場が翼後端を振幅下端まで振り下ろした時刻におけるものであり、下側の図がそこから振幅中心まで翼を振り上げたものである。翼後端から放出された反時計回り渦が後流において明確な渦核をもつ流場に成長する過程をみることができる。また、先に放出されている時計回りの渦との間には、2つの渦の誘導速度により加速流が形成されているのを見ることができる。渦度分布においては、渦核の形成過程はさ

Fig.12 Measured velocity and vorticity distribution at $\phi_d=\pi$, $T=1s$.

らに明瞭に確認することができ、後流における渦の配置や、渦の拡散・減衰の様子も観察できる。また、本計測で用いたアルゴリズムが高い空間解像度を持っているため、物体近くの流れ場も計測できており、翼面で発達する境界層の一部も捉えることができています。しかし、本計測は回流水槽の観測部にレーザシート光を照射し、シート光に平行な速度成分のみを抽出しているため、翼後流において流場の変化が3次元方向に進んでいる場合には、渦自身は減衰しなくても、渦度ベクトルの向きが変わりシート光面で見える渦度が小さくなる影響を含んでいるので、流場分析の際には考慮が必要である。

Fig.13 Measured vorticity distribution at $\phi_d = 0.29\pi$.

(a) $T = 1s$, $U = 0.18m/s$, $S_w = 1.2$,

(b) $T = 2s$, $U = 0.098m/s$, $S_w = 1.3$.

次に、Fig.13に異なる振動周期であるが、ほぼ同じ泳動数 S_w の場合の計測結果を示す。もともと S_w の定義が K_c 数と同様の形をしているため、振動円柱後流の研究でも知られているように、後流の幾何学的パターンは同じとなっている。これは Fig.9 でも示したように、同じ翼運動パターンで振動周期だけを変えた場合に、自航状態で得られる泳動数が近い値を示していることと一致する。Fig.13 で示す渦度は無次元化されており、2つの渦度場を相対評価をすることができるが、翼直後の渦度は運動周期の長い $T = 2s$ の方が若干高いように思われ、Fig.9 で示される自航状態における S_w の値が、 $T = 1s$ の場合より 20%程度大きな値を示す要因のひとつを示しているものと思われる。

次に、高泳動数の場合の計測例を示す。Fig.14 は、 $S_w = 4.0$ の場合であり境界層で生成された渦度が後流に放出されているが、渦核を形成するような流場はみられず、翼後端の軌跡をなぞるように伴流が形成されている。これは、翼面の摩擦で損失した運動量がそのまま後流に輸送されており、流体力計測で計測される時間平均値は、これらの損失エネルギーの総和が現れているものと考えられる。

Fig.14 Measured vorticity distribution at high swimming number

6. 結 言

多関節翼模型を用いて、魚類型推進特性の検討を、流れの可視化実験、流体力計測、流場計測の結果から行った。翼推進方向の流体力計測から、平均自航速度を推定するとともに、高泳動数領域における流体力特性から振動運動をする物体の抵抗特性の推定を行った。その上で、自航状態における推力を簡易推定するとともに、翼運動の違いによる推力発生量の違いを検討した。本論では、振幅分布、振動周期などは、一定もしくはごく限られた範囲にとどめ、翼前後端における遊泳運動位相を変えた推進特性の変化を検討した。

本論で得られた成果をもとに、今後は多関節翼運動に関係する多くのパラメータを系統的に検討することにより、さらに詳しい特性を明らかにしたいと考える。また、翼進行直角方向の流体力計測や、それに替わる物理量の計測を考え、推進効率の算出とその特性が検討できる手法の考察も重要な課題である。

謝 辞

本論を終えるにあたり、本研究の一部が造船学術研究推進機構の補助を受けて行われたことを記し、関係各位に感謝を表す。ヤマハ発動機、秋吉 洋氏(研究当時、大阪府立大学大学院在学)には、多関節翼模型の作成にあたっては多大なご協力をいただいた。ここに深く感謝する。また、大阪府立大学、奥野武俊教授ならびに東京大学、

杉井康彦助手(研究当時, 大阪府立大学大学院在学)には, 研究全般にわたってご支援, ご協力をいただいたことに感謝する。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 中島 求: 屈曲型水中推進機構の最適運動に関する研究, 東京工業大学博士論文, (1998).
- 3) Lighthill, M.J.: Aquatic Animal Propulsion of High Hydromechanical Efficiency, Jour. of Fluid Mechanics, Vol.44, No.2, (1970), pp.265-301.
- 4) Wu, T.Y.: Hydromechanics of Swimming Propulsion, Part 1 Swimming of a Two-Dimensional Flexible Plate at Variable Forward Speeds in an Inviscid Fluid, Jour. of Fluid Mechanics, Vol.46, No.2, (1971), pp.337-355.
- 5) Nakaoka, Y., Toda, Y.: Laminar Flow Computation of Fish-Like Motion Wing, Proc. of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, (1994), pp.530-538.
- 6) 戸田保幸, 杉口貴志, 檜枝俊輔: 屈曲型側ヒレによる推進の基礎的研究 - 平板端部の側ヒレ周り流れの数値計算による検討 -, 関西造船協会講演概要集第17号, (2001), pp.39-42.
- 7) Chen, Z., Doi, Y.: Numerical Investigation on Propulsion by Undulating Plate, Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.188, (2000), pp.259-366.
- 8) 中島 求, 小野京右: 屈曲形水中推進機構の研究 (第2報, 3関節モデルの流体力特性解析), 日本機械学会論文集, Vol.60, No.569, B, (1994), pp.141-146.
- 9) 中島 求, 小野京右: 屈曲型水中推進機構の研究 (第4報, 3関節モデルの三次元離散渦法による解析), 日本機械学会論文集, Vol.60, No.580, B, (1994), pp.4095-4101.
- 10) 西尾 茂, 秋吉 洋: 多関節翼まわりの流れの可視化, 可視化情報学会, Vol.16, Suppl. No.1, (1996), pp.247-250.
- 11) Sugii, Y., Nishio, S., Okuno, T., Okamoto, K.: A Highly Accurate Iterative PIV Technique Using a Gradient Method, Measurement Science and Technology, Institute of Physics, Vol.11, No.12, (2000), pp.16666-1673.
- 12) 平石智徳: ニジマスノ遊泳形状モデル, 回流水槽懇談会資料, (1981).
- 13) 田中 拓, 安部光弘: 推進性能試験の方法とその応用, 日本造船学会試験水槽委員会第一部会シンポジウム「船型開発と試験水槽」, (1983), pp.29-67.