推進用振動翼の実験的研究*

森川 裕久**・ 沢田 雅***・ 一色 尚次****

Experimental Study on a Harmonically Oscillating Propulsion Wing

By Hirohisa Morikawa, Tadashi Sawada, Naotsugu Isshiki

The present study is begun with the idea based on the propulsive method by oscillating a caudal fin, as a result of examining conventional propulsion systems of a ship in terms of safety, energy saving and environmental integrity. The purpose of this study is experimentally to pursue the problem which an oscillating wing is practically applied to the propulsion system of a ship.

In this work, a simple two-dimensional oscillating wing model is analysed macroscopically; the basic experiment is carried out by use of both an apparatus oscillating a wing harmonically and a circular stream water tank.

Consequently, experimental results are in good agreement with numerical analysis for low reduced frequency; the relationship between wing's motion and its thrust has been clarified; the optimum value of phase lag $\varphi = 60^\circ$ causing a maximum coefficient of thrust is present; when the optimum value of phase lag is $\varphi = 90^\circ$ and that of reduced frequency is $\Omega = 0.6 \sim 0.8$, an efficiency of propulsion of a single wing indicates the value of about 53%.

1. 緒 言

現在、省エネルギー、公害等の問題が提起されており、あらゆる技術の見直しが行われている折、燃料の大部分を石油に依存する船舶においても燃費の改善が求められている。船舶の推進性能に関して種々の研究が行われており、推進器についてみると新たなプロペラの開発や、例えば、低回転大直径プロペラなど従来のプロペラの高効率化のための研究^{1,2)}が進められているが、実用化に当たってはまだまだ多くの問題が残されている。一方、レジャー用ボートなどのスクリュプロペラによる死傷事故の多発からより安全な推進器の開発が求められていた。そこで、目を転じて推進器の原点に戻り生体の機能に学ぶ意味から、水棲動物の推進方法についても見直してみる必要があるのではないだろうか。水中での生物の推進方法には種々の方式があり、その中で特に、尾びれによる推進方法をとるイルカやカジキの類は高速で遊泳することが知られている³⁾。筆者らは、水棲動物の尾びれの揺動による推進方法に着目し、翼を振動させることによ

り推進力を得ることを考えた。魚の泳ぎの解析や推進力に関する理論的研究は、M. J. Lighthill⁴⁾、T. Yao-Tsu Wu⁵⁾など既に数多く^{6,7)}行われているが、本研究は生体現象を工学に応用しようとする一つの試みとして、振動翼を実際の船舶の推進器に応用する際の問題点を実験的に研究することを目的としており、推進用振動翼の実用性を研究しようとする点^{8,9,10)}が他の研究と異なる。

本方式により実用可能な推力を得ることが可能ならば、高速魚の遊泳から高い推進効率が予想され、スクリュプロペラの回転による巻き込みの危険や水の攪はんによる水質汚染を防止でき、キャビテーションを起こさず、振動翼の翼挙動変化による後進が可能となり、浅瀬用小形船舶やレジャー用ボート、又、大形低速タンカーなど幅広い用途が期待できる。

筆者らは、高速魚の尾びれを二次元翼とみなし、翼自体に可撓性をもたない剛体翼が振動する際の推力発生機構について巨視的に理論解析し、剛体翼の挙動と推力との関係についての概念をはっきりととらえるため、先に報告¹⁰⁾したような剛体翼に可撓性のあるバネを取り付け、翼の振れ角に位相の遅れを生じさせる方式では、翼の挙動が複雑に変化するので、本報では、剛体翼が厳密に正弦波状のヒービング振動と位相を遅らせたピッチング振動を行う方式により一段と高度な翼挙動を実現し、翼の挙動を任意に決定できる振動発生装置を製作して基礎実

* 原稿受付 昭和 57 年 11 月 10 日

昭和 57 年春季学術講演(昭和 57 年 5 月 26 日)

** 正会員 秋田大学(秋田市手形学園町 1-1)

*** 秋田大学(秋田市手形学園町 1-1)

**** 正会員 東京工業大学(東京都目黒区大岡山 2-12-1)

験を行った。その結果、最大推力と最大推進効率を得る翼挙動等、推進用振動翼の推進性能についての知見を得たので、ここに報告したい。

2. 振動翼の理論解析

2.1 二次元振動翼モデルの理論解析 魚の尾びれは可撓性のある弾性翼であり、主に推力発生に寄与している尾びれの後縁部分の動きを、位相差をもちながら振動する翼自体変形しない二次元の剛体翼にモデル化し、巨視的に解析する。図1に二次元振動翼モデルの座標を示す。非粘性非圧縮性流体中にある翼厚の極めて薄く、また質量の極めて小さい二次元平板翼を考え、翼まわりの流れはポテンシャル流として翼後縁ではクッタ・ジュウコフスキーの条件が成り立っていると仮定する。流体中の翼に働く力は、非定常のベルヌーイの式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} q^2 + H + \frac{p}{\rho} = C(t) \quad (1)$$

を用い、翼面上の圧力分布を求め、それを翼弦上で積分して得られる。ここで、 Φ は速度ポテンシャル、 q は翼面上の流速、 p は翼面上の圧力、 ρ は水の密度、 H は外力による圧力ヘッド、また $C(t)$ は無限上流での一定値である。推力 F_F は一樣流 U_∞ に向う方向の分力として求まり、又、横力 F_C は一樣流と垂直方向の分力として求まる。翼弦中心での相対的な流速を U 、その時の瞬間的迎え角を α 、翼弦長を $2C$ 、翼幅を L とし、 β は一樣流方向に対する翼の振れ角、 $\dot{U}$ 、 $\dot{\alpha}$ は各々時間に関する微分を表わすとして、推力 F_F は、

$$\begin{aligned} F_F &= F_V + F_J \\ &= -\pi \rho L C^2 (\dot{U} \sin \alpha + \dot{\alpha} U \cos \alpha) \sin \beta \\ &\quad - 2\pi \rho L C U^2 \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

横力 F_C は、

$$\begin{aligned} F_C &= -\pi \rho L C^2 (\dot{U} \sin \alpha + \dot{\alpha} U \cos \alpha) \cos \beta \\ &\quad - 2\pi \rho L C U^2 \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

となる。上式より、推力 F_F は仮想質量効果によって得られる推力 F_V と定常翼まわりの循環に比例する揚力によって得られる推力 F_J とからなる。

平均推力 $\bar{F}_F$ は、推力 F_F の一周期にわたる時間平均した値で、

$$\bar{F}_F = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau F_F dt \quad \text{但し、} \tau: \text{周期} (= \frac{2\pi}{\omega}) \quad (4)$$

図1 二次元振動翼モデルの座標

であり、また推力係数 c_F は、翼面積を S とすると、

$$c_F = \frac{\bar{F}_F}{1/2 \rho U_\infty^2 S} \quad (5)$$

で表わされる。

ここで、翼前縁のヒービング振動変位 A と翼のピッチング振動振れ角 β が角速度 ω で次式のように正弦波状の振動をするとき、

$$A = A_0 \sin \omega t \quad (6)$$

$$\beta = \beta_0 \sin (\omega t - \varphi) \quad (7)$$

推力の理論値が計算できる。但し、 A_0 はヒービング振動の最大変位、 β_0 はピッチング振動の最大振れ角、又、 φ は翼の振れの位相遅れ角である。

なお、翼に働く横力 F_C を用いて理論的な振動翼の推進効率が計算で得られる。推進効率は、翼を駆動するのに必要な動力に対する翼の推進動力との比で、ここでは次式のように定義できる。

$$\eta = \frac{\bar{F}_F \times U_\infty}{P} \times 100 (\%) \quad (8)$$

但し、 $P = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau F_C v dt$ 、 v は、翼の駆動振れ速度である。

3. 基礎実験

3.1 実験装置、及び実験方法 実験装置全体の概略図を図2に、その写真を図3に示す。外形 $3\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ の回流水槽に翼を振動させるための振動発生装置、及び水流発生装置が設置されており、翼は $1.2\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ (深)の実験水路内で振動する。水流は貫流式羽根車で発生させ、流速分布は整流板と整流用ハニカムを使用して一樣とし、流速は約 35 cm/s まで出せる。図4に翼のヒービング振動とピッチング振動を実現できる振動発生装置を示す。振動発生装置の動力として、出力 400 W の交流無段変速機を使用している。電動機の回転は、弾性継手、Vプーリー④を介してヒービング振動用スコッチヨーク円板⑤、及びピッチング振動用スコッチヨーク機構⑦に伝えられ、⑤のヒービング振動用スコ

- ①交流無段変速機、②弾性自在継手、③振動発生装置台、④Vプーリー、⑤翼ヒービング振動用スコッチヨーク円板、⑥翼ヒービング振動用スコッチヨークスライド、⑦翼ピッチング振動用スコッチヨーク機構、⑧レール、⑨水流発生用羽根車、⑩交流無段変速機、⑪整流板、⑫整流用ハニカム、⑬観測窓、⑭翼、⑮ヒービング振動変位検出器、⑯翼の振れ角検出器

図2 実験装置概略図

図3 基礎実験装置

①翼, ②振動発生装置台, ③車輪, ④Vプーリー,
⑤ヒービング振動用スコッチヨーク円板, ⑥ヒービング振動用スコッチヨークスライド, ⑦ピッチング振動用スコッチヨーク機構, ⑧レール

図4 振動発生装置

ッチヨーク円板に取り付けられたピンが垂直に固定されたスコッチヨークスライド⑥の溝に沿って回転することにより、カムフォロアを車輪③として使用した振動発生装置台②はレール⑧上を往復運動しヒービング振動が行われる。一方、ピッチング振動用スコッチヨーク機構⑦により、回転運動を翼の取り付けられた駆動軸のねじれ方向の運動に変換し翼のピッチング振動を実現している。ヒービング振動に対するピッチング振動の位相遅れ角 φ は、⑤のスコッチヨーク円板のピンの位置を変えることにより変化できる。

図5に測定用系統図を示す。駆動軸は、振動発生装置より水面に対し垂直に出ており、軸の水面上部には翼面に働く力を測定するためのひずみゲージが貼り付けられており、軸上端にはポテンショメータと歯車を用いたピッチング振動振れ角検出器が取り付けられている。又、振動発生装置には、ラックとピニオンギヤとポテンショメータを用いたヒービング振動変位検出器が取り付けられている。使用した翼は、翼弦長 100 mm, 翼幅 280 mm, 翼厚 10 mm のアクリル製平板翼である。

実験方法は、あらかじめ流速をピトー管と傾斜型マンオメータを用いて測定しておき、流速一定として、ヒービング振動の最大変位 A_0 、ピッチング振動の最大振れ角 β_0 、及び位相遅れ角 φ を各々決め、電動機のコントローラを操作することにより所定の振動数にセットして翼を振らす。翼面に働く力は力測定部で検出し、翼のヒービング振動変位、及びピッチング振動振れ角は各々の検出器と直流増幅器を通して電磁オシログラフに記録する。推力は記録された波形を読み取り計算し、その結果を積分して平均推力を得た。

実験結果は、翼の非定常の度合いを表わす無次元のパラメーターである無次元振動数 $Q(=C\omega/U_\infty)$ を用いて整理している。

3.2 実験結果

3.2.1 一周期における翼挙動と推力波形 一樣流速を一定とした場合の一周期における翼の挙動と推力波形を図6に示す。同図上のグラフは翼のヒービング振動変位 A とピッチング振動振れ角 β の変化状況を実線で示し、又、計算によって得られた翼弦中心での相対的迎え角 α を破線で示している。同図下のグラフ中の○記号は推力 F_F の実験値を表わし、破線は計算値を表わす。又、一点鎖線と二点鎖線は、それぞれ仮想質量効果によって得られる推力 F_V と定常翼まわりの循環による揚力によって得られる推力 F_J の計算値である。計算値と実験値の推力波形はほぼ近い形を示しており、推力 F_F は F_V と F_J の両者の和として発生している様子が分かる。計算値の最大推力値は実験値より約 20% 小さく、一方、最小推力値は実験値より大きくなっており、この条件の場合、推力の計算値は一周期にわたってほとんど正の値となっている。最大推力の発生時期は翼のピッチング振動で最大に振れた位置より ωt にして約 20° 遅れている。最大

図5 測定用系統図

図6 翼の挙動と推力波形

推力を発生するのは、翼前縁で発生したはく離領域が拡大し翼後縁に移動して、このはく離領域で形成された渦が、翼後縁の振動で蓄積された仮想質量効果によるエネルギーを得て後縁より離脱して巻き上がっている状態となっている時であり、最小推力を示す実験値が負の値となっているのは、翼に対する相対的迎え角 α が大きく、翼後縁付近の広い領域ではく離が起こっている時であり、計算値と実験値とのずれの主な原因は、後流の渦の影響を含めて本理論の非粘性の仮定とクッタ・ジュウコフスキーの条件が成り立っていないためであると思われる。

3.2.2 推力係数と無次元振動数との関係 翼挙動を規定するパラメーターが一定の場合の推力係数と無次元振動数との関係を図7に示す。図中の記号は種々の流速での実験値を表わし、又、実線は計算値を表わす。無

次元振動数が増加するにしたがい、推力係数は増大し、計算値は実験値よりいくらか大きい、推力係数と無次元振動数との関係は両者とも $c_F \propto \Omega^{2.8}$ となり、翼挙動を規定するパラメーターである A_0 , β_0 , ϕ が変化してもほぼ同様の傾向を示す。

3.2.3 推力係数と位相遅れ角との関係 流速、及びヒービング振動最大変位を一定とした場合の各無次元振動数での推力係数と位相遅れ角との関係を図8、図9、図10に示す。各図中の記号は実験値で実線は計算値である。全体的に計算値は実験値より大きくな

っており、又、各無次元振動数において推力係数を最大とする最適位相遅れ角が存在する。低無次元振動数域では最適位相遅れ角 $\phi=60^\circ$ 付近であるが、無次元振動数が高くなるにしたがい、最適位相遅れ角はやや小さくなり、この傾向は計算値と実験値とではほぼ一致している。

各無次元振動数においてピッチング振動最大振れ角 β_0 が大きくなるにしたがい、推力係数の値は増加する。また各ピッチング振動の最大振れ角 β_0 において、位相遅れ角が 55° 付近より小さい範囲で計算値と実験値とのずれが大きくなっているのは、翼の振れ角が大きくなり、または位相の遅れ角が小さくなると相対的迎え角が大きくなって前縁ではく離した渦が急激に成長し翼全面に広がり翼には抵抗として働くからであると考えられる。ヒービング振動の最大変位が一定とした場合、図8の場合のようにピッチング振動の最大振れ角 β_0 が小さく、無次元振動数が低く、かつ、位相遅れ角 ϕ が 90° に近い領域では相対的迎え角が小さく、計算値と実験値はほぼ一致し、

図7 推力係数と無次元振動数との関係

図8 推力係数と位相遅れ角との関係

図10 推力係数と位相遅れ角との関係

図9 推力係数と位相遅れ角との関係

図11 平均推力と一様流速との関係

る場合、本グラフ上に各流速での船体抵抗を表す曲線が加えられ、希望する対水速度を得るのに必要な平均推力と船体抵抗のつり合う振動数を求めることができる。

3.2.5 推進効率と無次元振動数との関係 流速、及びヒール振動最大変位を一定とした場合の各位相遅れ角における推進効率と無次元振動数との関係を図12、図13、図14に示す。図中の記号は実験値を表わし、実線は計算値を表わす。各位相遅れ角において推進効率を最大とする最適無次元振動数が存在し、又、推力を最大とする最適位相遅れ角 $\varphi = 60^\circ$ より $\varphi = 90^\circ$ の方が無次元振動数 $\Omega = 0.6 \sim 1.0$ 付近で高い推進効率を示している。これは、特に無次元振動数 $\Omega = 1.0$ 以下では、最適位相遅れ角 $\varphi = 60^\circ$ と $\varphi = 90^\circ$ での推力に大きな差はなく、即ち、ほぼ同じ推力を発生するのに必要な翼を駆動するための動力が $\varphi = 90^\circ$ の場合の方が減少するからである。図12、図13に示すようにピッチング振動の最大振れ角 β_0 が小さく、また位相遅れ角が $\varphi = 60^\circ$ より大きくなると実験値は

理論のクッタ、ジュコフスキーの条件が局部的に成り立っていると考えられる。

3.2.4 平均推力と流速との関係 翼挙動を規定するパラメーターを一定とした場合の平均推力と流速との関係を図11に示す。図中の記号は実験値であり、振動数を一定とした時、即ち、翼が一定速度で振動している時は流速の増加にしたがい平均推力は減少し、ついに負の推力になる。実際に振動翼を船用推進器として使用する

図 12 推進効率と無次元振動数との関係

図 13 推進効率と無次元振動数との関係

図 14 推進効率と無次元振動数との関係

計算値に近づき、傾向もほぼ一致するが、ピッチング振動の最大振れ角 β_0 が大きく (図 14), 又, 位相遅れ角が小さい場合, 翼面上のはく離の影響が大きくなり, 実験値は計算値よりだいぶ小さくなる。

無限流体中において翼を単独で振動させた場合における最大推進効率 η が約 53% と計算により得られたが, モーターボートなどを使用されているスクリュープロペラの推進効率の 40%~50% よりやや良好な程度であり, 一方, 省エネルギー用に開発が進められている低回転の大直径プロペラの推進効率 60%~70% に比べるといくらか低いように思われるが, 推進用振動翼を実際の船舶の推進器に応用する際には, 振動翼を無限流体中において単独で使用するのではなく, 船体のヨーイングやピッチングなどの揺れを防ぐために垂直に取り付けた 2 翼を位相反転して左右に振らす形式か, または船底の鏡像効果を考慮して船底下の水平翼を上下に振らす形式が考えられ, 振動翼を単独翼として使用する場合より, 推力の向上と大きな推進効率が期待できる。

4. 結 論

安全性と省エネルギーを目ざして推進用振動翼を実際の船舶の推進器に応用する際の問題点を調べるため小形水槽上での基礎研究を行った。

以上の結果をまとめると, (1) 振動翼を巨視的に理論解析した結果, 推力は仮想質量効果によって得られる推力と定常翼まわりの循環に比例する揚力によって得られる推力とからなり, 振動翼の推力発生機構をある程度説明できた。(2) 翼に正弦波状のヒービング振動と位相を遅らせたピッチング振動を重ねて行かせた結果, 推力係数は無次元振動数の約 2.8 乗に比例し, 又, 推力係数を最大とする最適位相遅れ角が存在し, その値はほぼ 60° である。(3) 一方, 推進効率を最大とする最適位相遅れ角と最適無次元振動数が存在し, 位相遅れ角 $\varphi = 90^\circ$ 並びに無次元振動数 $\Omega = 0.6 \sim 0.8$ で推進効率約 53% が得られ, 小形船舶のスクリュープロペラの推進効率 40%~50% に匹敵し, 推進用振動翼が低速用船舶の推進器として有望であり, 今後, 振動翼推進器として開発を進めることにより, 更に推進効率の向上が期待でき, 実用化できる可能性があることを意味する。

現在, あらゆる技術の見直しがなされている折, 本研究は工学の原点である生体の機能に着目し, それを実際の機械に応用しようとする試みの一つとして意味があると考えられる。以上により, 推進用振動翼の推進性能についての知見を得たので, 今後, この基礎研究結果を踏まえた実船実験へと進むことを期待したい。

最後に, 本研究を進めるにあたりご協力いただいた秋田大学鉱山学部機械工場技官の鎌田朝吉氏, 又, 吉田公氏 (新菱冷熱 (株)), 藤原修氏 (盛岡工業高校) に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 山崎隆介, 他 2 名, 西部造船会会報, 第 53 号(1977)
- 2) 門井弘行, 日本造船学会誌, 第 622 号, 2 頁(1981)
- 3) J. Gray, Scientific American, Vol. 197, No. 2 (1957)
- 4) J. Lighthill, Mathematical Biofluidynamics, (1975), Soc. for Industrial and Applied Mathematics.
- 5) T. Yao-Tsu Wu, J. Fluid Mech., Vol. 10, p. 321 (1960)
- 6) M. Chopra, J. Fluid Mech., Vol. 74, Part 1, p. 161 (1976)
- 7) Kambe, Chopra, J. Fluid Mech., Vol. 79, Part 1, p. 49 (1977)
- 8) 一色尚次, 金属, 第 44 卷, 第 11 号, 61 頁(1974)
- 9) 一色尚次, 金属, 第 46 卷, 第 12 号, 65 頁(1976)
- 10) 一色・森川・他 3 名, 日本船用機関学会誌, 第 14 卷, 第 7 号, 85 頁(1979)

国際会議の情報

米国造船造機学会 SNAME 開催の会議

THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS
One World Trade Center, Suite 1369, New York, NY 10048

SNAME MEETINGS

The following list includes those meetings in which SNAME participates jointly with other societies or co-sponsors. Does not include local SNAME Section meetings.

DATE	EVENT	LOCATION
1983		
April 5-8	SNAME 1983 Spring Meeting/STAR Symposium	Washington, DC
May 2-5	Offshore Technology Conference	Houston, TX
September 11-17	8th Congress of Pan American Institute of Naval Engineering	Crystal City, VA
November 9-12	SNAME 91st Annual Meeting	New York, NY
1984		
April 11-14	SNAME 1984 Spring Meeting/STAR Symposium	Los Angeles, CA
April 30-May 3	Offshore Technology Conference	Houston, TX
May 15-16	Propellers '84	Virginia Beach, VA
October 22-23	Ship Structure Committee Symposium	Washington, DC
November 7-10	SNAME 92nd Annual Meeting	New York, NY
1985		
May 12-15	Offshore Technology Conference	Houston, TX
May 21-26	SNAME 1985 Spring Meeting/STAR Symposium	Norfolk, VA
November 13-16	SNAME 93rd Annual Meeting	New York, NY
1986		
May 5-8	Offshore Technology Conference	Houston, TX
May 20-23	SNAME 1986 Spring Meeting/STAR Symposium	Portland, OR
November 19-22	SNAME 94th Annual Meeting	New York, NY
1987		
November 11-14	SNAME 1987 Spring Meeting/STAR Symposium SNAME 95th Annual Meeting	Philadelphia Section New York, NY
1988		
May 2-5	Offshore Technology Conference SNAME 1988 Spring Meeting/STAR Symposium	Houston, TX Pittsburgh, PA
November 16-19	SNAME 96th Annual Meeting	New York, NY
1989		
May 1-4 (tentative)	Offshore Technology Conference SNAME 1989 Spring Meeting/STAR Symposium	Houston, TX New Orleans, LA
November 15-18	SNAME 97th Annual Meeting	New York, NY