Weis-Fogh (ヴァイスフォー) メカニズム を応用した船舶の推進*

葛原 道久**・木村 雄吉**
盧 基徳***

Ship's Propulsion Using the Weis-Fogh Mechanism

By Michihisa Tsutahara, Takeyoshi Kimura, Ro Kideok

A two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism, which is a mechanism of hovering flight of small insects, is applied to ship propulsion. A model of the propulsion mechanism consisting of one or two wings in a square channel is proposed. The thrust and the drag on the wing, which are defined, respectively, the force in the direction of progress of the ship and that of movement of the wing, are measured. The propulsive efficiency is calculated and is high when the moving speed of the wing is small compared with the advancing speed of the ship. A model ship equipped with this propulsion mechanism is made and working tests performed. The applicability of this propulsion mechanism to actual ships is expected to be good.

1. 緒 言

Weis-Fogh メカニズムは、Encarsia Formosa と呼ばれる小バチの静止飛行の際の、翅の動きを解析する事により発見された。新しくかつ非常に効率のよい、揚力の発生メカニズムである¹⁾²⁾。このメカニズムの原理を図1に示す。小バチは、その胴体を垂直に保って翅を水平面で回転運動させる事により、静止飛行を行っている。まず翅が胴体の背側で打ちあわされる。そして翅は後縁を接した状態で開き、その後ある迎え角を保ちつつ水平面内を移動する。そして、胴体の腹側で翅を折り返し、再び水平面内での移動の後、背側で打ちあわされるといふ運動をくり返す。下の図は、この運動の2次元モデルを示している。

一般に、翼が静止状態から運動を始める時、翼まわりに充分な循環を形成するためには、ある程度の距離で移動する事が必要である (Wagner Effect)。しかるに、このWeis-Foghメカニズムにおいては、図1に示すように翼が後縁を中心に開いた時、すでに2枚の翼には互いに逆方向の循環が形成され、それにより充分な揚力が得られるものと思われる。そして、翼が閉じる時に翼間の流体を下方へ押し出す事により生じるジェットも、揚力に寄与している。また、翼まわりの流れは

非定常であり、これによる非定常力もうまく揚力の増加に用いられているようである。

図1 小バチの静止飛行

このメカニズムそのものの研究はいくつかなされており、Lighthill²⁾は上述した2次元モデルでポテンシャル流れを仮定し、翼まわりに大きな循環の生じる事、また前縁付近の剥離泡や、3次元のモデルでの流れについても考察している。Maxworthy³⁾は2次元モデルと、小バチの翅の動きをシミュレートした3次元モデルの模型を用いて、翼まわりの流れを観測し、2次元モデルでは翼まわりの循環は、Lighthillの非粘性モデルで得られるものよりも大きい事を示した。Haussling⁴⁾は、時間的に変化する境界適合座標を用いて、差分法で2次元モデルでの流れを数値計算し、翼が閉じる時に生じるジェットをシミュレートしている。またEdwardsとCheng⁵⁾は、翼の前縁に生じる剥離泡を単一の渦糸で近似し流れ場を求め、Maxworthy³⁾の可視化で得られた流れ場とよい一致が得られたと報告している。

このメカニズムの力学的特性としては、葛原と木村⁶⁾が、ポテンシャル流れという仮定で等角写像を用いた解析を行っており、翼の回転および並進運動での加速度の効果についても考察した。SpeddingとMaxworthy⁷⁾

* 原稿受付 昭和62年12月26日

昭和62年秋季学術講演 (昭和62年10月7日)

** 正会員 神戸大学 (神戸市灘区六甲台町)

*** 神戸大学大学院 (神戸市灘区六甲台町)

は2次元の流れ場を、可視化と画像処理の技術を用いてより詳細に調べるとともに、翼に働く揚力の測定も行った。蔦原、木村⁸⁾は最近、渦糸近似法を用いた数値計算で、2次元の流れ場と、翼に働く揚力、抗力、モーメントを計算している。それによると、揚力は翼の開き角が 90° 付近で最大となり、閉じる時は翼間からジェットが生じるものの、揚力は増大しないという結果が得られ、これは前述のSpeddingとMaxworthyの測定結果とも一致する。

実際の小バチの運動では、翅の動きは400Hz程度で、翅の翼弦長と前縁の平均の移動速度でとったReynolds数は約30であるが、その平均の揚力係数は3~4程度¹⁾ また翅まわりの繊毛を翼面積に含めた値でも1.6以上であり⁹⁾、このReynolds数での定常な翼に比べ非常に高く、効率よく揚力を発生させているのが分る。そして、このメカニズム自体は慣性力を利用しており、空気中よりも水中、またスケールの小さな小バチの翅よりも大きな翼において、より有効に作用すると考えられる。

しかるに、このメカニズムの工学的応用を目指した研究は少なく、FurberとFfowcs Williams¹⁰⁾が軸流ポンプの静翼、動翼の間隔を小さくする事により、効率が上がったと報告しているが、これがWeis-Fogh効果であるか否かについては明確でない。蔦原、木村は、このメカニズムの2次元モデルの船舶の推進機構への応用¹¹⁾¹²⁾¹³⁾とともに、ポンプへの応用¹⁴⁾も試みている。

ここでは、このメカニズムの船舶の推進機構のモデルと、その特性実験、そして推進装置を設置した模型船の特性について述べ、新しい推進機構の実用化の可能性について考察する。

2. 推進機構のモデル

我々は、上述したWeis-Foghメカニズムの二次元モデルを、船舶の推進機構に応用すべく、図2に示すような推進機構のモデルを考えた。これはモデルを垂直上方から見た図で、2枚の翼を水路内で、所定の動きをさせる事により、図の上方向、即ち船の推進方向の推力が発生する。翼は、図に示すP点が、船の進行方向と垂直方向に往復運動する事により回転して開き、並進的に移動し、そして回転して閉じるという過程をくりかえす。ここでは(a)、(e)を開く過程、(b)、(f)を並進運動の過程、そして(c)、(g)を閉じる過程と呼び、(a)から(d)あるいは(e)から(g)に至る過程を翼の運動の1行程と呼ぶ事にする。水路の壁を考える事により、2枚の翼だけでなく、翼と壁の間でも、上述したと同じメカニズムで推力が生じる。

図2のモデルでは、2枚の翼が左右対称に運動しているが、鏡像を考えると、対称軸を団体壁面であると考えてもよく、次に述べる特性実験では、この図の左あるいは右半分を考えたモデル、即ち水路内の1枚の翼のモデルについて行っている。しかし、模型船での実験には、このモデルでは、翼の移動にともない、船体が左右に振

動するので、図2に示されるような2枚の翼が対称に運動するモデルを用いている。

図2 推進機構のモデル

3. 推進機構の特性実験

上述した1枚翼のモデルで、翼に働く推力と抗力を図3のように定義する。翼が右へ移動する時は、抗力の符号は逆になる。この推力と抗力を直接測定するために、長さ9mの曳行水槽を用いた。曳行水槽の台車に図4に示す推進装置を取り付け、翼を運動させつつ台車を一定速度 U で曳行し、その時に翼に働く力を翼上部のロッドに取り付けたひずみゲージで測定する。ゲージからの出力は250倍に増幅されAD変換ボードを通してパーソナルコンピュータ(PC8001)に入力し、後述する平均の揚力係数や、推進効率の計算を行った。

翼の往復運動は、直流モーターの回転をリミットスイッチとリレー回路を用いて反転させる事により行っている。これまでの報告では^{12),13)}、翼は水面から少し出しており、水面の影響があつて、実験データを整理するパラメータとしてFroude数が入っていた。今回は翼上面はアクリルの板で覆い、翼も完全に水没している。上面のアクリル板には、翼の駆動と推力、抗力測定に用いるロッドと後述する、翼角度設定用の鎖が移動するためのスリットが設けられている。

図3 翼に働く推力と抗力

図4 推力, 抗力測定用推進装置

図5 翼の構造

翼は図5に示すような弦長167 mm, 幅300 mm, 厚さ14 mmで, 木製であり, P点の移動にともない, 翼に働く流体力のモーメントにより開き, 閉じる時は翼前縁が壁面に接する事により, 強制的に閉じられる。翼の開き角度は翼端に取り付けられた鎖の長さを調節する事により行っている。

実験は, 翼弦長 c と水路幅 h との比 c/h , 翼の(P点の)移動速度 V と船の進行速度 U との比 V/U , 開き角 α をパラメータとして整理した。

図6に, $c/h = 0.367$, $\alpha = 30^\circ$ での翼の運動の4行

(A) Thrust coefficient

(B) Drag coefficient

図6 推力係数と抗力係数の時間変化

程(2往復)における推力係数と抗力係数の時間履歴を示す。ここで推力係数と抗力係数はそれぞれ次式で定義され, これらは翼の運動につれて変化し, 時間の関数である。

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 S}, \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (1)^{*1}$$

ここで, T , D はそれぞれ推力, 抗力で, ρ は流体の密度, S は翼の面積を表す。開く過程の初期において推力が負になる事がある。しかし, それ以外では1行程におけるこれらの値の変動はそれ程大きくはない。また抗力係数の符号が変わっているのは, 翼の移動方向が左, 右変化しているためであるが, 絶対値も少し異なっており, これは装置が原因で翼の左右の移動速度が異なっているためであり, 今, 左方向では $V/U = 1.52$, 右方向では $V/U = 1.57$ である。これは推力係数についても同様であるが, 右方向, あるいは左方向だけをとると, データの再現性は非常によく, これらは別の測定値として整理している。

図7には, $c/h = 0.42$ での推力係数を開き角 $\alpha = 10^\circ$, 15° , 30° に対し V/U を横軸にとって示してある。水面の影響があった前の報告¹²⁾に比べデータは比較的良好に

*1 ここでの推力, 抗力係数の定義において文献¹²⁾および¹³⁾では, 分母の U^2 が V^2 と記されているが, これは誤りで, U^2 を用いて無次元化した値が記されていたので, ここで訂正する。

乗っており、 V/U の増加とともに推力係数も単調に増加するが、 α が小さい時の方が増加の割合は大きい。図8

には同じパラメータでの抗力係数を示したが、抗力係数も揚力係数と同様の特性を示す。

図7 平均推力係数

図8 平均抗力係数

上述したように、翼を開く、また閉じる際には、翼の回転に特に動力を用いているわけではなく、動力はP点の直線往復運動にのみ用いられている。したがってこの装置の推進効率 η は次式で定義される。

$$\eta = \frac{\bar{C}_T U}{\bar{C}_D V} \quad (2)$$

図9に上述の推力係数、抗力係数と同じパラメータでの推進効率を示す。開き角が小さい時 V/U が0.3付近で効率が上がるが、 V/U の増加とともに急激に減少する。開き角が大きくなると効率の高い領域は広がるが、最高効率の値は少し減少し、最高効率となる V/U は少し大きくなるようである。

図9 推進効率

ここには示していないが、 45° では効率曲線はなめらかになるものの最高効率は60%以下に下がる。最高効率となる V/U は0.5以下であり、船の進行速度に対し、翼の移動速度のほうがずっと小さい事を意味し、後述するようにこの推進機構の長所である。

特性実験で得られた最高の推進効率は、開き角 15° で $c/h = 0.37$, $V/U = 0.35$ での値で約80%であった水面があった前の報告¹²⁾より、5%程最高効率も上っているようである。

図10 模 型 船

開き角を固定して3通り変化させ実験を行った。それぞれの場合での船体の進行速度 U 、翼の移動速度 V 、および推進効率 η を表1に示す。ここで、推進効率の計算は、翼に働く力を直接測定できなかったので(2)式で用いた翼に働く平均推力の代りに、船体の抵抗を用いて

$$\eta = \frac{\text{船体の抵抗} \times U}{\text{翼に働く抵抗力} \times V} \quad (3)$$

として計算した。

船体の抵抗は、翼が閉じて側板に接した状態で船体を速度 U でけん引し、その時の力をばね秤で測定する事により求めた。また翼に働く抵抗力は、流水路にこの船体を固定し、水流の速度を U とした時に、翼をモーターから切り離れた状態で糸でけん引し、移動速度が V になるような張力を測定した。張力の測定は滑車を用いて重りを落下させる方法をとった。重りはほぼ一定速度で落下し、糸の張力は重りに働く重力に等しく、これを翼に働く抵抗力とした。

表に示すように、翼の開き角度を固定した際の模型船の最高効率は45%程度であった。表には以前行った、翼の開き角を固定せず、ばねにより運転中に角度が自動的に調節されるようにしたものも示してある。モーター駆動用の電池等が他と異なっており、特に翼の移動速度が他の開き角を固定したものとは大きく異なっているが、推進効率は53%程になっている。このときの平均の開き角

4. 模型船の走行実験

ここで述べた推進機構が、実際の船舶でどのように有効に働くかを調べるため、図10に示すような模型船を試作しその特性を調べた。船体は双胴船とし、二つの胴の間に図2で示したような、2枚翼の推進装置を取り付けている。翼の駆動は3節で述べたのと同様の装置で行っており、水路の壁面に対応して胴体の内側に側板を設置している。

は約 40° で、船が発進の際に加速するときには、やや大きな値となる。また、船体を強制的に止めて運転する時も、大きな開き角となり、加速度あるいは船体の抵抗などにより、開き角を自動的に調整している事が分かる。この事が効率の増加にも関連しているものと思われる。

模型船の走行実験中、目視で判断する限りでは、翼の一行程内の運動にともなう加速、減速は見られなかった。また翼駆動用モーターへの入力電圧と電流を測定した結果から、動力の負荷も一行程内でほとんど変化しない事が分かった。

表1 模型船での実験値

	開き角を固定した場合			ばねを用いた場合
開き角 α	15°	30°	45°	約 40° (平均)
$U(\text{m/sec})$	0.54	0.55	0.57	0.59
$V(\text{m/sec})$	0.32	0.35	0.43	0.19
η (%)	43	45	36	53

今回の模型船の実験は、本推進機構の諸特性を調べるのが目的でなく、実船への応用の可能性を判断するためのものであり、操縦性、振動その他実船において重要となる問題については、この後の研究に待ちたい。

5. 結論と展望

小バチのはばたきの機構を、船舶の推進機構に応用すべく、推進機構のモデルを提示し、その力学的特性を調べるとともに模型船を試作し、実船への応用の可能性を検討した。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 翼に働く、推力および抗力は翼の移動速度の増加にともない単調に増加する。
- (2) 特性実験で得られた推進効率率は80%であった。
- (3) 最高効率を出す時の翼の移動速度は、船の進行速度に比べ小さい。
- (4) 模型船の走行実験では、翼の動きにともなう加速、減速は見られなかった。
- (5) また動力の負荷も一行程内でほとんど変化しない。

これらの結論から、この推進機構が翼の変則的な運動にもかかわらず、船体は比較的スムーズに走行し、動力の負荷の変動も小さいなど、予想される欠点もそれ程でなく、優れた特性を示す事が分かった。またこの装置を多段直列に設置し、これらの翼の運動の位相をずらせる事により、翼の運動にともなう加速を減少する事ができる。一方結論(3)について、これは船の進行速度が大きな値となるまで、キャビテーションの発生が抑えられる可能性を示唆しており、この推進機構が低速のみならず、むしろ高速船において優れた特性を持つ可能性がある事を示している。

文 献

- 1) Weis-Fogh, T., J. Exp. Biol. 59 (1973), 169.
- 2) Lighthill, M. J., J. Fluid Mech., 60-1 (1973), 1.
- 3) Maxworthy, T., J. Fluid Mech., 93-1 (1973), 47.
- 4) Haussling, H. J., J. Comput. Phys., 30-1 (1979), 107.
- 5) Edwards, R. H. & Cheng, H. K., J. Fluid Mech., 120 (1982), 463.
- 6) 鳶原・木村, 航字誌, 32-362 (昭59), 154.
- 7) Spedding, G. R., & Maxworthy, T., J. Fluid Mech., 165 (1986), 247.
- 8) 鳶原・木村, 航字誌, 35-407 (昭62), 596.
- 9) Ellington, C. P., Swimming and Flying in Nature, Wu. T-Y. ed., Vol. 2, (1975), 783.
- 10) Furber, S. R., & Ffowcs Williams, J. E., J. Fluid Mech., 94-3 (1979), 519.
- 11) 鳶原・木村, 機論 B, 51-470 (昭60-10), 3137.
- 12) 鳶原・木村, 機論 B, 52-477 (昭61-5), 2143.
- 13) Tsutahara, M., & Kimura, T., J. Fluids Engr., ASME, 109 (1987), 107.

14) 鳶原・木村, 機論 B, 54-498 (昭63-2), 393.

〔質 疑 応 答〕

質問者 西川栄一

〔質問〕 ユニークな御研究を聞かせて頂き、ありがとうございます。サイドボードを設けるといのが、効率を上げる上で大事な idea だと思いますが、サイドボードを設けなかった場合、性能はどの程度のものでしょうか。

〔回答〕 ご指摘のように、サイドボードを設けるのが、このメカニズムを有効に働かせる上で重要な要因です。もし、サイドボードがなければ、2枚の翼は遠ざかったあとと適当な場所で角度と移動方向を反転させる必要がありますが、その際翼まわりの循環の逆転にともない、大きな渦を放出しますが、これは損失となります。また、反転後、翼に揚力(推力)が発生するためには、ある程度翼の移動が必要であり(Wagner効果)、普通の単独翼の場合と変わらなくなります。

実験で、このサイドボードの効果を、ない場合と比較して検討いたしておりますが、以上の理論的な推察からかなりの性能の低下があると考えております。

これについては、現在実験的に検証中です。

また、船体内のダクト中にこの推進機構を用いる場合、または双胴船に用いる場合など、自然にサイドボードの効果はあり、実船に採用するモデルとしては、我々の提案したモデルが最も自然なものと思います。

質問者 杉田英昭

〔質問〕 現在のスクリュプロペラの推進効率と比較されても決して劣っていませんが、効率曲線が鋭い山形になっており、最適点からずれますと効率が急激に悪くなっています。この点についてのご意見をおうかがいたい。

〔回答〕 ご指摘のように、翼の開き角を一定に保った場合の特性曲線は、特に開き角が小さい時に鋭い山形となっておりますが、運転条件により適宜開き角を変化させる事により、比較的広い範囲での効率の高い運転が可能です。しかし、それでもスクリュプロペラと比べると効率の高い範囲が狭いという事は否めません。

翼に弾性等のフレキシビリティを持たせる事により、かなり改善されるのではないかと考えております。