28 Weis-Foghメカニズムの 2次元モデルにおける流れ

神戸大学工学部 薦原道久[○] 木村雄吉

Flows in a two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism

by Michihisa Tsutahara* and Takeyoshi Kimura*

Flow patterns in a two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism are investigated by the discrete vortex method and a flow-visualization technique using tracers of aluminum particles. Two cases of the wing motion, that is, the opening and the closing cases are studied and the results of the two methods agree well with each other. In the opening case, the flow separates at the leading edge and forms a large separation bubble, and then reattaches on the wing. When the wing translates, the separation bubble moves with the wing. In the closing case, a jet is produced between the two wings and a separation bubble near the trailing edge moves downstream. A jetlike region of a high speed flow is also detected on the backside of the wing.

1. 緒言

Weis-Foghメカニズム¹⁾は、体長1mmほどの小バチの静止飛行を観察することにより発見された、新しい非常に効率のよい揚力発生メカニズムである。我々は、このメカニズムの2次元モデル²⁾を、渦糸近似法³⁾による数値計算と、アルミ粉末トレーサ法による流れの可視化により調べた。ここでいう2次元モデルとは、Fig. 1に示すように2枚の翼がそれらの後縁を接して回転して開き、そして並進運動に移る場合(開く場合)と、これとは逆に、ある開き角をもって2枚の翼が並進運動しつつ近づき、前縁を接してその回りに回転して閉じる場合(閉じる場合)とに分けられる。ポテンシャル流れでは、これら2つの場合流れのパターンは同じで、流れの方向が逆になるだけであるが、実際には両者の流れのパターンは大きく異なり、これらは、渦糸近似法によってもよくシミュレートされた。

Fig.1 Two-dimensional model of the Weis-Fogh mechanism

* Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai, Nada, Kobe 657 Japan

2. 渦糸近似法による計算

計算は、両翼が接して回転している場合と、離れて並進運動している場合とに別けて行う。いずれの場合も両翼が対称に運動しているので、対称軸を固体壁として解析する。開く場合と閉じる場合とでは、同じ解析であるので、ここでは開く場合について述べる。平板翼を有限個の束縛渦で近似し、各タイムステップ毎に翼の前縁付近から渦を放出することになると、 n 個放出渦が流れ場にある時の複素ポテンシャルは

$$F(z) = \sum_{j=1}^m i\kappa_j \{\log(z - z_j) - \log(z - \bar{z}_j)\} + \sum_{l=1}^n i\tilde{\kappa}_l \{\log(z - \tilde{z}_l) - \log(z - \bar{\tilde{z}}_l)\} \quad (1)$$

と表わされる。ここで m は翼面上の束縛渦の数であり、 κ_j はそれらの強さ、 $\tilde{\kappa}_l$ は放出渦の強さを表わしている。

新たに発生する渦と束縛渦の強さは、

Fig. 2 に示される翼面上 m 個の点での、
流れの関数の値

$$\Psi = \int_0^r (-\Omega \cdot r) dr = -\frac{1}{2}\Omega r^2 \quad (2)$$

と、後縁での流速が 0 という条件

$$\text{Real} \left\{ \frac{dF}{dz} \right\}_{z=0} = 0 \quad (3)$$

から決定される。ここで Ω は、翼の回転の角速度である。

翼が並進運動している時は、渦は各タイムステップ毎に、翼の前縁および後縁からそれぞれ 1 つずつ放出する。前と同様これらの渦の強さを決定するのに m 個の点で

$$\Psi = \Psi_0 - V \cdot r \cdot \cos\alpha \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、 V は翼の並進速度であり、 Ψ_0 は後縁での流れの関数の値である。そして、後縁での速度の翼面に垂直な成分から

$$- \text{Im} \left\{ \frac{dF}{dz} \right\}_{z=z_t} e^{i\alpha} = V \cdot \cos\alpha \quad (5)$$

と、Kelvin の循環定理から、翼が分離した後は翼上の束縛渦と新しい放出渦との全体の循環は変化しないという事から

$$\sum_{j=1}^m \kappa_j + \sum_{l=1}^n \tilde{\kappa}_l = -\frac{\Gamma}{2\pi} \quad (6)$$

(a) Rotating Wing

(b) Translating Wing

Fig.2 Bound and free vortices

○: Vortices

×: Points where the boundary conditions are applied

という条件を用いる。ここで Γ は翼が分離する時の翼面上の束縛渦と放出渦を合わせた循環である。

計算では、束縛渦の数 m を20個、渦放出の時間間隔 Δt を0.05、翼前縁あるいは後縁と放出渦の発生位置との距離 d を0.008とした。

3. 可視化実験

実験はアルミ粉末トレーサー法を用いて、対称に運動している2枚の翼まわりの流れを観測した。実験装置の概略はFig. 3に示すように、浅底水槽(1200mm x 930mm x 200mm)に翼の駆動装置を設置し、垂直上方から写真撮影をおこなった。水槽は両側の壁面がアクリルで作られており、両側からスリット状に照明光をあてる。

観測する流れ場全体にわたって、水槽上面にアクリルの板を置き、自由表面の影響がないようにしてある。翼はレール上をベルトを介して直流モーターで駆動され、Fig. 1に示されるような動きをする。2台のモーターを用いているが、それぞれの翼はベルトを介して、連動するようにしてある。

Fig.3 Experimental apparatus

3. 結果および考察

ここでは、数値計算によって得られた結果と、可視化による写真を比較し、それらについて考察する。なお実験は、翼の前縁の平均の移動速度と翼弦長 c を基準にとった Reynolds 数は、15000である。Fig. 4に開き角が 45° で、回転して開いた後並進運動に移り、2枚の翼の後縁間の距離が、翼弦長の0.7倍まで離れる際の、3つの時刻での流れのパターンを示している。左側は、計算によって得られた渦の位置と流線であり、可視化写真との一致は非常によい。前縁から剝離した流れは、前縁の内側に大きな渦塊を形成し、翼に再付着している(b参照)。そして、離れるに従いその渦塊は翼とともに移動し、後縁付近からも、渦が流れに出ていくのがよく分る(c参照)。Fig. 5は、Fig. 4におけるものと正反対で、翼が並進運動して近づき、そして回転して閉じるもので、5つの時刻におけるパターンを示している。翼が動きだしてしばらくたつと、前縁、後縁から渦を放出し、翼背面(翼の後流側の面)に大きな2つの渦塊を形作る。翼が回転する

Fig.4 Flow patterns of opening case. In this figure the lower edge corresponds to the leading edge

時には、両翼の間からジェットが生じるが、これは初め後縁の背面側にあった渦領域を強めるとともに、この渦により誘導されて、下流で広がっている（c～d参照）。また、翼背面にも、前縁、後縁の渦塊の間に、非常に速度の大きなジェットが生じている。閉じた後しばらく時間がたつと、後縁にあった渦塊は、左右のお互の誘導速度で、下流に流れていくのが分る。この、閉じる際のジェットは、小バチが大きな揚力を得ている原因であると考えられている。

Fig.5 Flow patterns of closing case.

4. 結論

- (1) Weis-Foghメカニズムの2次元モデルでの流れが、渦糸近似法による数値計算と、流れの可視化により調べられ、両者の一致は極めてよい。
- (2) 開く場合には、前縁付近の渦塊は翼とともに移動し、流れは翼に再付着する。
- (3) 閉じる場合、両翼の間から強いジェットが生じるが、翼背面にも、非常に速度の大きな流れが現れる。
- (4) 一般に渦糸近似法は、ある程度計算時間がたった後でなければ、満足できる結果が得られないとされているが、今回のような、翼のスタート時のシミュレートも可能である事が分った。

最後に、数値計算、可視化実験に御協力頂いた、長谷川幸芳君、中務鉄也君、南里一生君、そのほか当時学生として本研究に携わった諸君に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Weis-Fogh, T., J. Exp. Biol., Vol. 59 (1973), pp. 169-230.
- 2) Lighthill, M. J., J. Fluid Mech., Vol. 60, Pt. 1 (1973), pp. 1-17.
- 3) 有江幹男、木谷勝「剝離流れ」、谷一郎編「境界層」 丸善 (1984), pp. 139-195.