

平板弾性翼による Wake Deflection の抑制

Control of wake deflection by elastic wing

○ 飯間 信 (北大電子研)

Makoto IIMA*

* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo, 606-0812, Japan

Heaving plate in uniform flow can generate an asymmetric wake pattern. We analyze this phenomena, wake deflection, by discrete vortex method. Comparison between rigid plate and elastic plate reveals that the separation property is different between these plates. In particular, the elastic plate generates coherent vortices of smaller circulation than the rigid plate due to its eight-figure tip motion. This motion makes the critical heaving amplitude larger, which enables the elastic wing to control the occurrence of the wake deflection.

1. 結論

本論文では wake deflection と呼ばれる現象を解析する。これは、一様流中の対称翼を流れと垂直な方向に振動させた時にできる後流の渦列が、流れ方向と一定角度を持って並ぶ現象を指す。

Wake deflection は 1950 年に最初に文献に現れた¹⁾。Jones ら²⁾は実験により後流の渦パターンを wake deflection を含む 4 種類に分類し、振動数と振幅に対する相図に描いた。また離散渦法による 2 次元非粘性流体の数値計算を行い、渦パターンが実験と非常に近いこと (実験の Reynolds 数は $5 \times 10^2 - 5 \times 10^4$) と、この場合は wake deflection と、ある 2 重渦列の 2 種類の渦パターンしか観測されないことを示した。

しかし、彼らの実験や数値計算は、振動翼としての特性の解析が主眼であり、渦パターンの変化という観点からの解析は定性的な分類に留まっている。また、直接数値計算の場合³⁾は前縁剥離渦が後縁からの剥離渦パターンを乱す。

一方、剥離渦が関わる対称性の破れの例として、ある 2 次元対称はばたきモデルによる、はばたき運動に伴う翅からの剥離渦と重心運動の相互作用の研究例がある⁴⁾。この場合、剥離渦、翅、重心運動の動的相互作用により、はばたき運動が対称でも重心運動は非対称 (重心の平均速度が非ゼロ) になりうる。

このような非対称性の起源は興味深いが分かっていない。しかし、単純な運動から起こる wake deflection でさえ、その起源が翼の運動のどんな特性で決まり、その影響がどこに現れるかは明らかではない。ここでは翼の物性に着目し、その物性を弾性体に変更することで剥離挙動を変化させ、その影響を渦パターンの対称性の破れ/回復と言う形で明確に見ることとし、対称性の破れと関係のある量を同定する。

以上をふまえて、ここでは、翼と剥離渦の相互作用が翼の物性によりどのように変化するかを、離散渦法による数値計算で調べる。特に、1) 渦パターンの転移の特性、特にその転移点が翼の物性により変化すること、2) その原因は翼の物性に起因する剥離特性の違いによることを示す。

2. 手法

考えている状況は、図 1 に示した通りである。一様流中の平板が、一様流に垂直に振動 (平板の y 座標を $H(t)$ としたとき、 $H(t) = h \sin \omega t$) するときの、後流の渦パターンを、離散渦法⁵⁾による数値計算で調べる。また剥離は後縁からのみ起きるとした。これは翼の前縁剥離渦の影響を取り除くためである。平板はパネル法で表現し、境界渦は等間隔に配置した。剛体翼の場合、 i 番目の境界渦が初期位置 $(x_i, 0)$ とすると、時刻 t では

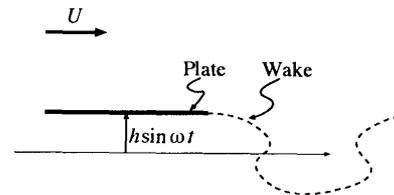


Fig.1 Configuration of the plate oscillating perpendicular to the uniform flow. Wake separated from the trailing edge forms coherent vortices, which make vortex patterns.

$(x(t), y(t)) = (x_i, H(t))$ と与えられるものとして計算する。

弾性翼の場合は、翼をバネ-ビーズモデル (弾性体をバネで繋がれた質点で表現) で近似する。質点にかかる力は、1) i 番目と $(i+1)$ 番目の質点の相対位置ベクトル r_n の大きさ $l_n \equiv |r_n|$ と、質点間距離の自然長 l_0 の差に比例する力 $T_n \equiv k(l_n - l_0)/l_0 \hat{r}_n$ (k は比例定数; $\hat{r}_n \equiv r_n/l_n$)、2) i 番目の質点における曲がり角 $\Delta\theta_n$ 方に比例するモーメント $M_n \equiv K\Delta\theta_n/l_0$ による力の 2 種類を仮定する⁶⁾。本モデルでは、各境界渦をビーズと同一視する。前縁で $y = H(t)$ で表される運動を与え、かすがい止め境界条件を課すことで翼の振動と翼の変形を駆動する。

本研究では、振動振幅 h のみを変化させる。その他のパラメータは以下の通りである。一様流速 $U = 1$ 、空気の密度 $\rho = 1$ 、翼長 $c = 0.5$ 、振動数 $\omega = 12$ 、境界渦の個数 $N_r = 80$ (剛体翼の場合)。弾性翼の場合は質量 $m = 0.6$ 、バネ定数 $k = 100$ 、ずれ弾性率 $K = 8$ 、ビーズの数 (=境界渦の個数) $N_e = 20$ 。

剥離渦の運動は時間刻み $\Delta t = T/200$ ($T = 2\pi/\omega$: 振動周期) の 4 次の Runge-Kutta 法を用いて計算した。弾性翼の場合、翼の運動は、時間刻み $\Delta t' = \Delta t/100$ の 4 次の Runge-Kutta 法を用いて渦運動と交互に (渦運動 1step \rightarrow 弾性運動 100step) 計算した。剥離した渦は翼の先端から一様流方向に距離 $L_1 = 5$ 以上離れると近傍の同符号の渦と一つの渦にまとまり、その渦は $L_2 = 15$ 以上離れると消失するというモデルを用いた。

3. 結果

渦パターンの対称性を表す指標として、Symmetry Index $SI \equiv \left| \frac{1}{M} \sum_{j \in \mathcal{M}} y_j \right|$ (\mathcal{M} は剥離渦の集合、 y_j は j 番目の剥離渦の y 座標、 M はその個数) を定義する。渦列が対称の場合 $SI \approx 0$ である。図 2 に定常状態の SI を h の関数として示す。剛体翼の場合、wake deflection は $h_0 \approx 0.1$ での SI の転移として表現されており、文献 2, 3 とほぼ整合的である。なお、これらの文献では刻み幅が粗く、変化を定性的な記号のみで表わしているの

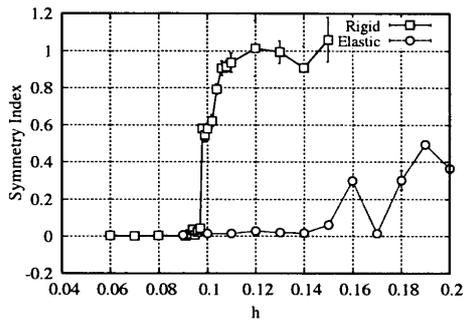
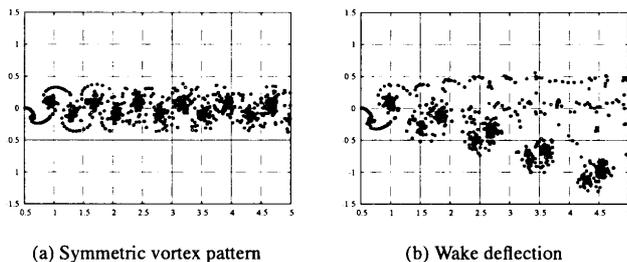


Fig.2 Symmetry index for both cases of rigid wing and elastic wing.



(a) Symmetric vortex pattern

(b) Wake deflection

Fig.3 Typical vortex pattern in the case of rigid wing.

Open circle and closed circle indicate separation vortex of positive and negative circulation, respectively.

転移の様子は明確ではない。本報告では定量的指標により、転移が急激であり SI の有限の飛びがあることが明らかとなった。

図 3(a) には、剥離渦が流れに沿った二重渦列を形成する場合 ($h = 0.08$) を、また図 3(b) では wake deflection の場合 ($h = 0.12$) の典型的な渦の場を示した (共に剛体翼)。wake deflection では、2つの符号が異なる渦が対となって vortex dipole を形成し、その運動方向が一樣流とある角度をなしている。

弾性翼の場合、 $h_0 < h < h_1 = 0.15$ で $SI \approx 0$ なので、この範囲では弾性翼により wake deflection が抑制されている (図 2)。変化が起きるのは $h \approx h_1$ だが、その変化は剛体翼ほど急激ではない。また $h > h_1$ の時、 SI は有限の値をとって時間的にゆっくり変動し、計算時間 (200T) 内に収束しなかった。

弾性翼自身の振動の最大振幅は、前縁を原点とした移動座標系から見たとき、 $h_0 < h < h_1$ の範囲で鉛直方向では 0.37% - 0.78%、水平方向で 4.2% - 6.4% (共に c に対する比) であり、変動は大きくはない。また、計算範囲の h において変化は単調で、 SI との相関は見られなかった。

wake deflection が起こる具体的な機構は、文献 2,3 には記述がない。ここでは wake deflection と相関を持つ量を探し、剛体翼と弾性翼でその量がどう異なるかを考察することで wake deflection を理解することを試みる。

剥離渦が巻き上がって出来た秩序渦の循環の強さ Γ は、剛体翼でも弾性翼でも h の単調増加関数であり、 SI との相関はない。ただし、 h を固定したときの大きさは剛体翼の方が大きく、 SI が転移を起こす h の値における Γ の大きさはほぼ同じである。

一方、発生する渦度場の揺らぎに関しては差が見られた。各時刻で発生した剥離点渦の循環の時間的揺らぎをフーリエ展開で解析すると、剛体翼の場合は周期 $1/3T$ に対応する成分が SI と相関がある。これは揺らぎのピークの中で 3 番目に小さい。

しかし、弾性翼の場合はこのような傾向は見られない。

弾性翼の場合は、先端の振動が SI の転移と相関がある。フーリエ解析によれば、先端はおおむね 8 の字型に運動している。これにより加わった先端の水平速度が剥離点の対気速度を減少させた結果、 Γ が減少したと考えられる。 $h \approx h_1$ での転移に対応する振動モードは、鉛直方向では周期 $T/2$ 、水平成分では周期 T の成分である。これらはほぼ同期しており、 $h \approx h_1$ で強くなる。これは 8 の字を横にした形の振動を表している。特に、水平方向の周期 T の振動成分は、鉛直変動が最大と最小になる場所で符号の違う水平速度を表す。これにより渦パターンの非対称性が生じたと理解することが出来る。

4. まとめ

wake deflection を生み出す原因を剛体翼、弾性翼のそれぞれの場合に対して振動振幅を変動させて調べ、異なる量が対称性の崩れと相関をもつことを見いだした。

直接的な原因は振動振幅の増大に伴う秩序渦の循環の増大である。この強さがある限度を超える時、2重渦列の不安定化が起こり、wake deflection が起こる。弾性翼の場合は、翼自身の弾性振動により剥離渦の循環は相対的に小さくなるため、剛体翼よりも大きな振幅になるまで不安定性は起きない。

wake deflection が起きる時、剛体翼では剥離渦の時間的な揺らぎにその影響が現れる。 $T/2$ 周期成分の強化と渦パターンの非対称性が関係している。一方弾性翼の場合は先端の軌跡にその影響があらわれる。弾性翼の先端は 8 の字型の運動を行っているが、非対称モードとして横向きに周期 T のモードが励起されることが渦パターンの非対称性と関係している。

このように、対称性の破れを引き起こす wake deflection を例にとり、1) 翼の物性は剥離の特性を変え、非対称性の発現と関係がある指標を変えること、2) 特に、翼の物性を剛体から弾性体に変更することで、渦パターンの非対称性が起きる臨界振動振幅がより増大し、wake deflection が抑制されること、が分かった。

本研究は文部科学省科学研究費若手研究 (B)15740230(2003-2004) の助成を受けた。また、住友財団基礎科学助成金 (020757) の助成を受けた。

引用文献

- 1) J. B. Bratt. Flow patterns in the wake of an oscillating aerofoil. *Aeronautical Research Council, R&M*, page 2773, March 1950.
- 2) K. D. Jones, C. M. Dohring, and M. F. Platzer. Experimental and computational investigation of the knoller-beta effect. *AIAA Journal*, 36(7):1240-1246, Jul. 1998.
- 3) G. C. Lewin and H. Haj-Hariri. Modeling thrust generation of a two-dimensional heaving airfoil in a viscous flow. *J. Fluid Mech.*, 492:339-362, 2003.
- 4) Makoto Iima and Tatsuo Yanagita. Is a 2d butterfly able to fly by symmetric flapping? *J. Phys. Soc. Japan*, 70(1):5-8, 2001.
- 5) J. Katz and A. Plotkin. *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, second edition, 2001.
- 6) K. Nishinari. Discrete modeling of a string and analysis of a loop solution. *J. Appl. Mech.*, 65:737-747, 1998.