

翼表面のスキュタリングに及ぼす音響ライニングの効果

Effect of acoustic lining on scattering by an airfoil

○ 飯田 明由 (工学院大)

Akiyoshi Iida

Dept. of Mech. Eng., Kogakuin University, Tokyo 192-0015, Japan

Aerodynamic sound is generated by unsteady vorticity motions and acoustic scattering of the body surface. In order to evaluate the effect of acoustic lining on the body surface, edge-tone experiments were carried out with low-noise wind tunnel. The measured noise spectra show clearly that the amplitude peaks at the edge tone frequency and its higher harmonics are eliminated by both the porous liner and the pile fabric. The theoretical directivity of acoustic pressure is almost equal to the measured directivity of the hard surface. Aerodynamic sound can be reduced by the pile fabrics and porous material. However, the effect of acoustical absorption of the acoustic lining is not so large. Although the boundary layers are different of both cases, noise reduction effect and sound pressure directivity is almost same as the noise from airfoil with the pile fabrics and porous material. An effect of transformation of a boundary layer is dominant over noise reduction. However, effect of sound absorption is bigger than that of expectation.

1. 結論

低マッハ数流れ場に置かれた物体から発生する空力音は多くの工業製品で問題となっており、低減技術の開発が望まれている。新幹線のパンタグラフなどでは、パンタグラフ周囲の流れを改善する方法やパンタグラフ自体の騒音を減らすため、円柱部分に小孔を空ける方法など様々な対策がなされている。製品開発においてはできるだけ簡単な機構でかつ耐久性に優れた低騒音化技術が必要のため、小孔を空ける方法などが有効である。一方、円柱や翼の表面に柔毛をつけると空力騒音が低減することが、西岡ら¹⁾によって提案されている。物体表面に貼り付けられた柔毛は、境界層を変化させ、また、翼表面における圧力変動を緩和し、空力騒音を低減させていると考えられる。しかし、柔毛自体の騒音低減効果については不明な点も多い。たとえば、柔毛自体がどの程度、流れ場を変えており、どの程度、音響的なスキュタリングの効果を与えているのかについて定量的な評価は行われていない。そこで本研究では、翼表面のライニングの方法を変えた場合に空力音の発生にどのように影響を与えるかについて実験的に調べた。

2. 実験装置及び実験方法

実験には測定断面 500 mm × 500 mm、長さ 1500 mm の開放型測定部を持つ低騒音風洞を使用した。平均速度の非一様性及び主流の乱れ強度はそれぞれ 1 %, 0.5 % 以下である。最大風速 50 m/s における風洞の暗騒音は風洞中心から 1 m 点の位置において 60 dB (A) 以下である。風洞測定部の上面と下面に幅 1200 mm、長さ 1500 mm の平行平板を設置し、平行平板に垂直に 2 次元翼を取り付けて実験を行った。平行平板をとりつけるのは、風洞ノズル下流の渦と 2 次元翼の干渉を抑えるためである。また、上側の平板にはポーラス材を用いることにより、平板間での音の共鳴を抑制した。

実験には図 1 に示すコード長 $C = 100$ mm、翼厚 10 mm、スパン方向長さ 500 mm の 2 次元平板翼を使用した。前縁と後縁の形状は短径と長径の比が 1:4 の楕円断面である。前縁と後縁を除く平板部分（コード長 60 mm）にコード方向長さ 50 mm、幅 450 mm の開口部を設置し、この部分の材質を代えた場合に流れと空力音がどのように変化するか調べた。表 1 に材質と翼表面における性質を示す。アクリル板 (Solid) は最も一般的なケースであり、表面が平滑でかつ音響的な吸音率は 0 に近い。翼表面を通過する速度成分の効果を調べるため、厚さ 0.4 mm の

ステンレス板に直径 0.1 mm の小孔を一平方インチあたり 4096 個設けた表面が滑らかなスクリーンを空洞部の表面に貼り付けた。翼内部はアクリル板で仕切られており、吸音率はほぼ 0 である。このスクリーンの内面（空洞部）にポーラス材を貼り付けた場合、翼表面を通過する流れは抑制される。翼表面の吸音率は 300 Hz で 0.05, 1 kHz で 0.3 である。柔毛 (Pile Fabrics) を用いた場合は、翼表面を通過する流れの効果と吸音効果の組み合わせだった場合と考えられる。

各条件において迎角を 0~15 度まで変化させ、一様流速 20 m/s および 30 m/s で実験を行った。コード長に基づくレイノルズ数は 2×10^5 である。座標系は翼中心を原点として、主流方向に X 、鉛直方向を Y 、翼スパン方向を Z とした。

Table1 Boundary conditions of two-dimensional airfoil with acoustic lining

	Surface	Sound absorption	Permeability
solid	Smooth	Low	Low
Screen + Porous	Smooth	High	Mid
Screen	Smooth	Low	Low
Pile Fabrics	Rough	High	High

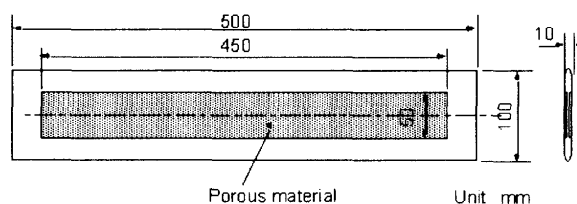


Fig.1 Two-dimensional airfoil with acoustic lining

3. 実験結果

風洞ノズル（高さ d ）から、 L だけ下流の位置に二次元翼が置かれている場合、エッジトーンの周波数は以下の式から求めることができる²⁾。

$$\frac{f_n L}{U_o} = 0.92 \sqrt{\frac{d}{L}} (n + 0.54)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

ここで d は風洞高さ、 U_o は主流流速、 f_n はエッジトーンの周

波数, n はエッジトーンモード数である。

図2及び3に示すように、アクリル板の場合、モード数3, 5のエッジトーンが発生している。一番高い周波数のピークは7次モードよりも3次モードの高調波の可能性が高い。風速が大きくなると5次以降の高次モードはほとんど見られなくなる。一方、ポーラス材の場合はモード数1が卓越している。柔毛材の場合は明確なピークが観察されない。

これらの違いが流れ場の変化によるものか、音響効果によるものかを調べるため、翼の音響特性を調べた。今、音の波長 k_0 、音響ライニングの厚さを l_B とすると、音響インピーダンスは以下の式で表すことができる。ここで、定数 a , b は実験定数である。垂直入射吸音率を α とすると、音響インピーダンスと垂直入射吸音率との間に以下の式が成り立つことから、実験により垂直入射吸音率を測定すれば、音響インピーダンスを求めることができる。ただし、ここで θ は物体に平行な面と観測点のなす角度である。

$$\zeta = 1 - i \left(\frac{a}{k_0 l_B} - b + 0.1 k_0 l_B \right) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{-4\Re(\zeta)}{(1 - \Re(\zeta) \sin \theta)^2 + (\Im(\zeta) \sin \theta)^2} \quad (3)$$

実験によりポーラス材や柔毛の吸音率を測定し、翼面におけるスカattering効果について調べた結果を図4に示す。

アクリル板を使用した Solid wall の場合、音響インピーダンスから求められる音の放射特性の理論値と実測値は、音の反射や気流の影響などから測定が難しい風洞後方のデータをのぞき良く一致する。

ポーラス材と柔毛を付けた場合の音の志向特性はほぼ Solid Wall の場合と同じである。音響インピーダンスの理論値の違いに比べ、実験によって得られた音のレベルは非常に小さい。したがって、ポーラス材や柔毛による音の低減効果は主に流れ場の変化に伴うものであり、音響的な影響は小さいものと思われる。ただし、流れの状態が異なるポーラス材と柔毛による志向特性がほとんど変わらないことから、流れ場の状態だけで音のレベルが決まっているわけではないようである。流れ場の違いによる音の発生は1次のモードで顕著であるが、それ以外の周波数では、表面が滑らかなポーラス材と柔毛で音のレベルがほとんど変わらない点が興味深い。

4. まとめ

音響特性の異なる二次元翼を用いて、物体表面の音響インピーダンスが異なる場合のエッジトーンについて調べ、以下の知見を得た。

- (1) アクリル板の場合、3次、5次の卓越した周波数成分が観察されるが、ポーラス材の場合は1次のモードが発生するが、それ以外は抑制される。柔毛の場合はエッジトーンが発生しない。
- (2) ポーラス材や柔毛の音の低減率は音響インピーダンスによる音の低減効果よりも大きい。

引用文献

- 1) 西岡ら, 流体力学会年會講演集, (1998), 59-61 Cantwell, B. J.: Organized motion in turbulent flow, Annual Rev. Fluid Mech., 13 (1981) 457-515.
- 2) Howe, M.S.: *Acoustics of Fluid-Structure Interactions* (Cambridge University Press, 1998), 480

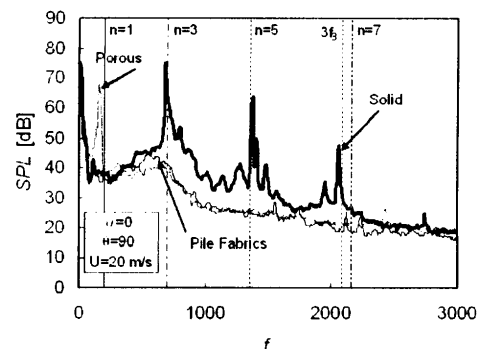


Fig.2 Measured spectra of edge tones for the airfoil at 0 angle-of-attack in a free-stream of $U_0 = 20$ m/s. The three continuous curves are the measured spectra of the sound pressure level at the microphone position directly overhead of the airfoil ($\theta = 90^\circ$) at a distance of 1 m.

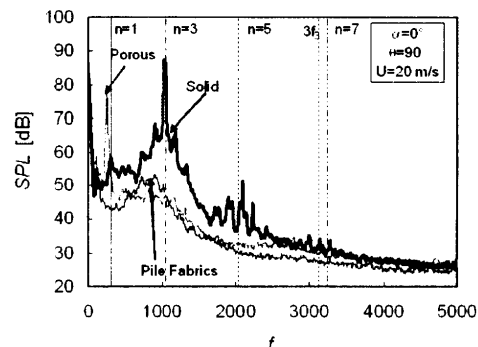


Fig.3 Measured spectra of edge tones for the airfoil at 0 angle-of-attack in a free-stream of $U_0 = 30$ m/s. The three continuous curves are the measured spectra of the sound pressure level at the microphone position directly overhead of the airfoil ($\theta = 90^\circ$) at a distance of 1 m.

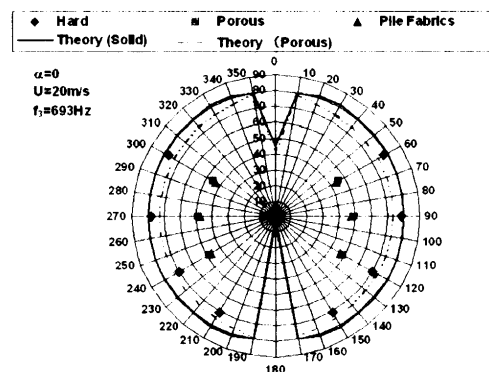


Fig.4 Acoustic pressure directivity for the interaction between a thin, hard airfoil with chord 10 cm at zero angle of attack. Two-dimensional airfoil with acoustic lining