

TS Waves in a Boundary Layer over Pile-Fabric-Covered Flat Plate

○西岡通男, 明石田貴宏, 坂上昇史, 嶋原孝佳 (阪府大工)

Michio NISHIOKA, Takahiro AKASHIDA, Shoji SAKAUE and Takayoshi SHIGIHARA

Dept. of Aerospace Eng., Osaka Prefecture University, Osaka 599-8531, Japan

The present paper describes the aerodynamic effect of pile-fabrics and its modeling. To verify this modeling, a laminar boundary layer and TS waves over a pile-fabrics covered flat plate are calculated on the basis of boundary layer equations and the OS equations including the drag terms due to the pile-fabric filaments, and the results are compared with the corresponding experiments.

1. はじめに

一般に、亜音速域における空力騒音は物体表面の圧力変動によるが、その圧力変動は流れの中の渦度変動に由来する。Howeの方程式¹⁾

$$\frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \rho_0 \cdot \text{div}(\omega \times u) \quad (1)$$

右辺の音源項が示すように、流れ場の渦度の時間的、空間的变化が重要である。亜音速域での空力騒音を低減する一つの方法として、流れ場の渦度を弱め、渦度変動を緩和することが考えられる。すなわち、渦度を緩和すれば、空力騒音が減ることになる。その具体的な方法として著者らは物体表面に柔毛繊維を貼る方法を提案した²⁻⁷⁾。ここでは、局所速度に比例した抗力を発生する抵抗体として柔毛繊維をモデル化することの妥当性を調べている。すなわち、単位体積あたり $\mu\alpha U$ の抗力が働くとし、係数 α については、繊維の本数の y 変化を考慮した次式を用いる。

$$\alpha = \pi n \cdot \exp(-7(y/h)^5) \quad (2)$$

ここで、 μ は粘性係数、 U は局所速度、 n は柔毛繊維の単位面積あたりの最大本数、 h は柔毛繊維の平均高さである。実験では、柔毛壁に沿う層流境界層とそこに発達するTS波動について風洞実験で観察・計測した。その結果を対応する計算結果と比較し、このモデルの有効性を確認した。

2. 実験装置および測定方法

風洞は下流端で室内大気に開放する測定部断面220mm×300mmの吹き出し式である。流速3m/s以下における主流の乱れ強さは0.3%未満である。柔毛は、繊維長さ約10mm、繊維直径約10 μ m (約50 μ mが10%程度)、面密度 n が約100本/mm² のものを使用した。図1に示すように、境界層板には側壁からの乱れを防ぐためのアクリル板を設置した。図2上側の写真はこのアクリル板がない場合の流れであり、下側の写真は有る場合で、二次元的なTS波が維持されていることがわかる。

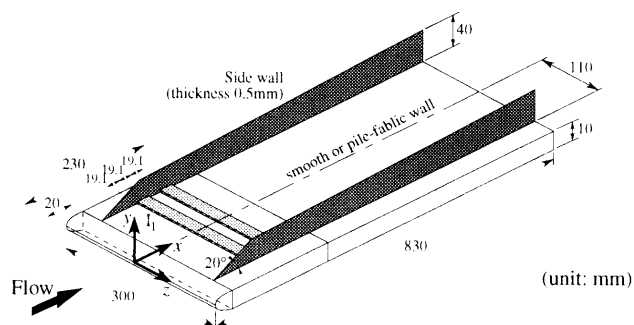


Fig.1 Schematic of experimental apparatus.

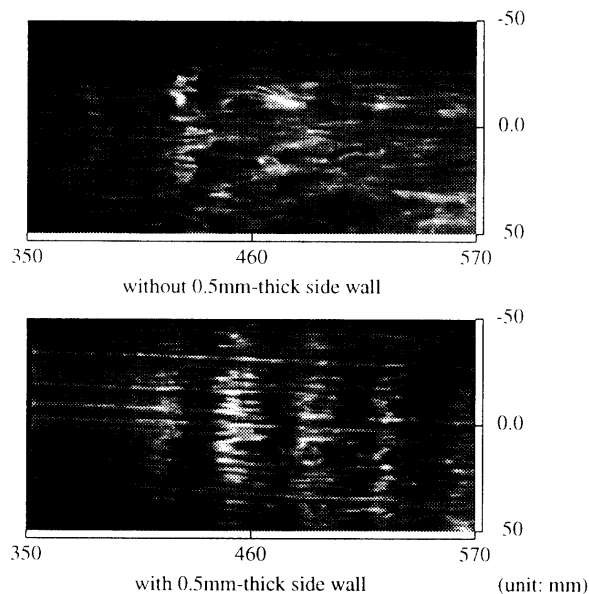


Fig.2 Effect of side wall for maintaining TS wave two-dimensional.

このようなTS波を作りだすために流れ場の中にトリップ (図1参照) を設置し、下流側からスピーカーで音波攪乱を与え、熱線流速計による計測とスモークワイヤ法による可視化で実験を行った。トリップの材質はステンレス鋼で、高さは流れが剥離して測定部に影響が出ないようにするため1mmとし、音波に対する受容性を考慮して設計した。

3. 実験結果および考察

3-1. 柔毛壁に沿う流れの計算との比較

柔毛壁層流境界層の速度分布について実験と計算の比較を図3に示す。柔毛の面密度分布を(2)式で表すことで、境界層方程式の解は測定結果とよい一致を見せている。

抵抗体に見立てた柔毛項を含むN-S方程式に二次元微小攪乱のフーリエ成分を加えて線形化すると

$$ikR[(U-c) \cdot (\phi'' - k^2 \phi) - U'' \phi] = \phi^{iv} - 2k^2 \phi'' + k^4 \phi + \left[k^2 \beta \phi - \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y} \phi' + \alpha \phi'' \right) \right] \quad (3)$$

となる。ここで α, β は柔毛繊維の x, y 方向の抗力項の係数であり ($\beta = \alpha/2$)、(3)式は、柔毛項が0の場合はOrr-Sommerfeld方程式と等しい。(2)式の面密度分布を導入し線形安定解析を行い、TS波動の振幅・位相分布の比較を行った結果を図4に、スモークワイヤ法による可視化を図5に示す。実験で得られたTS波動は二次元的で、計算とほぼ一致しているが、 $y=10$ mm付近から位相分布のずれが大きくなっている。これは、音波による寄与 (TS波動に音波が重畳された信号を熱線

が検出している)が原因である。振幅分布に関して、 $y=10\text{mm}$ 付近の第一ピークと $y=17\text{mm}$ 付近の第二ピークとの比や位相が変化する $y=14\text{mm}$ 付近の振幅が0となる位置など、良い一致がみられた。また、 $f=20\text{Hz}$ の時の波長 λ は、実験、計算値とも 40mm と一致した。増幅率(無次元)は、実験で0.0103であるのに対し、計算値は0.0209($x=305\text{mm}$)となり共に増幅であった。この結果から柔毛壁を抵抗体として考えたモデルは実験で観察されたTS波の挙動をよくとらえているといえる。

3-2. 柔毛壁に沿う流れと滑面との比較

壁による不安定性の違いを図6,7に示す。 $U=2.0\text{m/s}$ の実験条件下で滑面壁に沿う流れは静かであるが、柔毛壁に沿う流れは乱れている。線形安定解析から得られた周波数に対する増幅率を図8に示す。滑面壁に沿う流れでは微小攪乱に対し全ての周波数において減衰であるが、柔毛壁に沿う流れでは 7Hz から 29Hz の周波数で増幅となる。このことから柔毛壁に沿う流れは滑面壁に沿う流れよりも不安定と言える。これは、速度分布(図3)が柔毛の先端付近で柔毛繊維の抗力により変曲

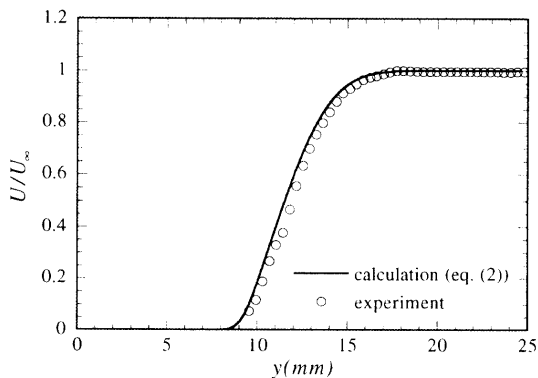


Fig.3 Velocity distribution of boundary layer over pile-fabric wall.
 $U = 2 \text{ m/s}$, $(x, z) = (330 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$.

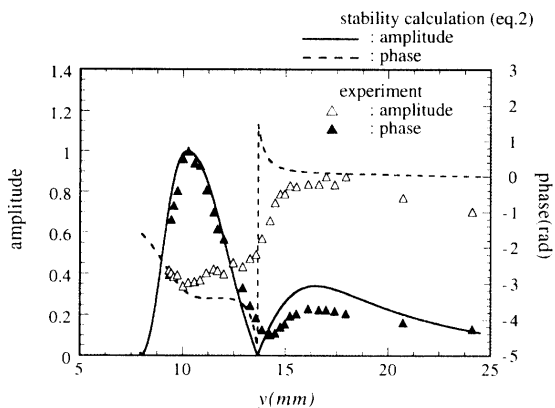


Fig.4 Amplitude and phase distributions of T-S wave.
 $U = 2 \text{ m/s}$, $(x, z) = (330\text{mm}, 0\text{mm})$, $f = 20 \text{ Hz}$.

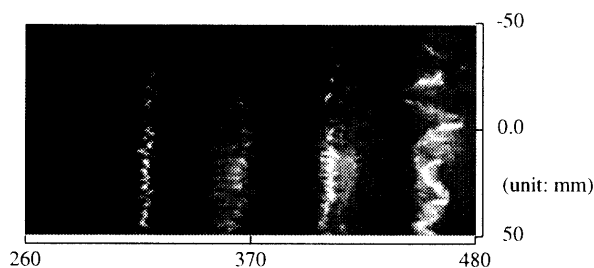


Fig.5 Smoke-wire visualization of TS waves over pile-fabric wall.

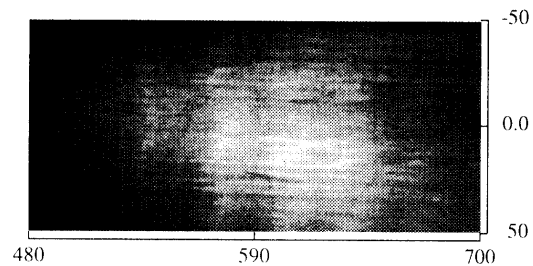


Fig.6 Flow over smooth wall. (unit: mm)

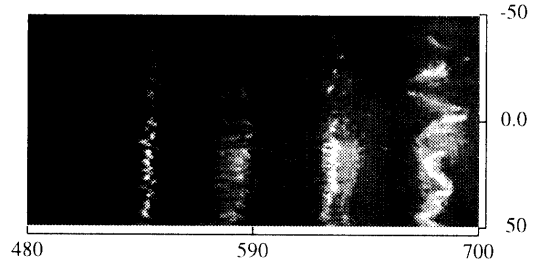


Fig.7 Flow over pile-fabric wall. (unit: mm)

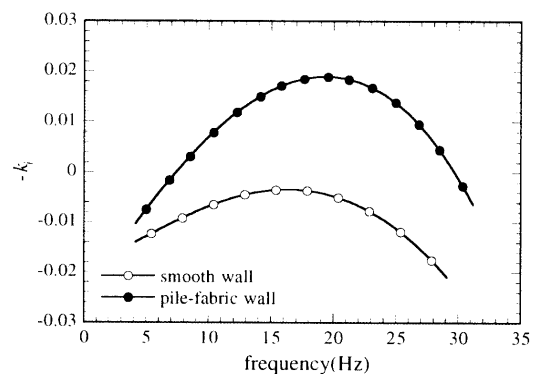


Fig.8 Growth rate vs. frequency ($U = 2 \text{ m/s}$, $x = 330\text{mm}$).

点を持ち、この変曲点に伴う変曲点不安定により柔毛壁に沿う流れは滑面壁に沿う流れに比べて不安定になっている。

本研究は部分的に文部科学省の科学研究費(課題番号12125203)の援助を受けた。

参考文献

- 1) Howe, M.S.: Contributions to the Theory of Aerodynamic Sound, with Application to Excess Jet Noise and the Theory of Flute, J. Fluid Mech., 71 (1975), 625-763.
- 2) 西岡通男, 平井誠: 柔毛壁乱流境界層について, 日本流体力学会誌, 別冊15 (1996), 117-118.
- 3) 西岡通男, 久米司: 柔毛の空力騒音低減効果に関する研究, 日本流体力学会誌, 別冊16 (1997), 225-226.
- 4) Nishioka, M.: Manipulation of Near-Wall Vorticity Fluctuations for Aerodynamic Noise Suppression, Advances in Turbulence Research-1998, 45-49.
- 5) Nishimura, M., Kudo, T. and Nishioka, M.: Aerodynamic Noise Reducing Techniques by Using Pile-Fabrics, AIAA paper 99-1847, 1999.
- 6) Nishioka, M.: Vorticity Manipulation as an Effective Means for Aerodynamic Noise Suppression, Proc.8th Asian Congress of Fluid Mechanics, 1999, 973-983.
- 7) 西岡通男: 柔毛を用いた空力騒音の抑制手法, 日本航空宇宙学会誌, 48, 554 (2000), 175-179.