

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### ケブラー布の透過速度計測

伊藤 美月, 石橋 孝介, 森 浩一,  
中村 佳朗, 橋本 敦, 浦 弘樹

2014年9月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Expoloration Agency

# ケブラー布の透過速度計測\*

伊藤美月<sup>\*1</sup>、石橋孝介<sup>\*1</sup>、森浩一<sup>\*1</sup>、中村佳朗<sup>\*1</sup>、橋本敦<sup>\*2</sup>、浦弘樹<sup>\*3</sup>

## Measurement of Transpiration Velocity through Kevlar Cloth\*

Mitsuki ITO<sup>\*1</sup>, Kosuke ISHIBASHI<sup>\*1</sup>, Koichi MORI<sup>\*1</sup>,  
Yoshiaki NAKAMURA<sup>\*1</sup>, Atsushi HASHIMOTO<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

In order to measure aeroacoustic noise in wind tunnel, a Kevlar wall technique is proposed. The Kevlar wall can keep the flow in the test section and it is acoustically transparent. JAXA installed the Kevlar wall in the test section of 2m×2m low speed wind tunnel. We measured transpiration velocities through Kevlar clothes for wall interference correction. It is found that the relationship between differential pressure and transpiration velocity can be modeled with an equation proposed by Devenport et al. Non-dimensional constants of the equation were obtained for two types of Kevlar clothes, and the transpiration velocities were modeled. In addition, the Kevlar cloth is stretched when it is used in wind tunnel, and therefore effects of the tension on the transpiration velocity were also investigated. However, we found that the tension does not affect the transpiration velocities.

### 概要

機体騒音を計測する風洞試験で、ケブラー布を測定部の風洞壁に用いる方法が提案されている。壁のように流れを維持することが可能で、音は風洞の外に設けられた無響音室で計測することができる。JAXAでは、ケブラー壁を2m×2m低速風洞に導入した。ケブラー壁による壁干渉を補正するため、ケブラー布の透過速度の計測をした。Devenportらが提案している近似式を用いて、圧力差と透過流速の関係を精度良くモデル化できることが分かった。織り方の異なる2種類のケブラー布に対し、それぞれ無次元定数を求め、透過流速をモデル化することができた。さらに、風洞では強く引っ張られた状態で使用されているため、引張力の影響も調査した。その結果、引張力はあまり影響しないことが分かった。

---

\* 平成 26 年 6 月 16 日受付 (Received)

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻  
(Department of Aerospace Engineering, Nagoya University)

\*2 航空本部 数値解析技術研究グループ  
(Numerical Simulation Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

\*3 航空本部 風洞技術開発センター  
(Wind Tunnel Technology Center, Institute of Aeronautical Technology)

## 1. はじめに

航空機は、ICAOの規制によって騒音レベルが制限されており、空港によっては騒音レベルに応じた空港使用料が課金される。そのため、今後開発される航空機では、さらなる騒音低減が求められている。また、近年ではエンジンの低騒音化により、高揚力装置<sup>1</sup>や脚<sup>2</sup>などから発生する機体騒音も問題となっている。それらの機体騒音の把握には、風洞試験による騒音計測が重要な技術となる。

機体騒音の実験を行う風洞は、測定部が開放型のものがよく用いられる。しかし、開放型風洞で高揚力装置を試験すると、壁がないため流れを大きく曲げてしまい、飛行状態を模擬できない。さらに、吹き出し口から伸びる自由せん断層が吸い込み口に干渉することで、対象模型以外の騒音が発生してしまう。一方、固体壁で囲む密閉型の風洞では、壁があることで流れを維持することができるが、風洞壁の反射音のため計測精度を下げってしまう。

上記の問題を解決するために、ヴァージニア工科大学では、ケブラー布を測定部の風洞壁に用いる方法を提案している<sup>3</sup>。ケブラー布は流れをほとんど通さないが、音を透過させる。そのため、壁のように流れを維持することが可能で、音は風洞の外に設けられた無響音室で計測することができる。現在、JAXAでも同様のケブラー壁を2m×2m低速風洞に導入し<sup>4</sup>、機体騒音の研究開発に使用されている。

しかし、ケブラー布を用いても壁干渉が起こるため、それは補正する必要がある。通常、壁干渉補正法では、線形ポテンシャル方程式を用いて風洞内の流れ場を解析し、壁による影響を推算する。その際に、ケブラー布の透過流が問題となる。ケブラー布は流れをほとんど通さないが、平織りで無数の穴が開いており、小さい透過流は生じる。壁干渉の解析では、この透過速度のモデリングが重要となる。JAXAではヴァージニア工科大学と異なる仕様のケブラー布を使用しているため、これまでに報告されているモデル<sup>3</sup>がそのまま使用できない。

そこで、本報告では、JAXA低速風洞のケブラーにおける透過速度を計測する。織り方の異なる2種類のケブラー布を使用し、その影響を調査する。加えて、風洞では強く引っ張られた状態で使用されているため、引張力の影響も調査する。

## 2. 実験方法

### 2.1. ケブラー布と引張条件

本実験では織り方の異なるケブラーAとBの2種類のケブラー布を用いる。両者ともに、原糸は高弾性率の Kevlar 49、織度は 215 dtex、厚さは約 1mm である。ケブラー布の隙間の幅を  $L$ [m](図1)とすると、ケブラーAは  $L=1.200 \times 10^{-4}$ m、ケブラーBは  $L=1.519 \times 10^{-4}$ m である。それぞれに対して、空隙率(全体の面積に対する隙間の面積の割合)は、2.8%と4.3%である。ケブラーBの方がAに比べて隙間が大きい。これらの隙間の幅や空隙率は、引っ張らない状態で計測したものであり、引張力を加えると、これらの値は変化する。

引張力に関して、一方向にかける場合と、二方向にかける場合の2ケースを実施した(図2)。一方向の場合は、幅250mmのケブラー布に対して、片側の130mmを固定し、もう片方から引っ張る。二方向の場合は、これと同様に、縦と横の二方向に対して引っ張る。

表1に本実験で計測した条件の一覧を示す。ケブラーAとBに対して、引張なしの場合と引張力10kgfで一方向・二方向の場合をそれぞれ計測した。ケブラーBに関しては、引張力を20kgfにした条件でも計測した。それぞれの条件において、計測した空隙率も表1に示されている。ばらつきがあったので、1ケースにつき5回計測を行い、平均値をとった。一方向に引っ張ると空隙率は小さくなるが、二方向に引っ張ると空隙率は大きくなるのが分かった。引張力を10kgfから20kgfに大きくすると、その傾向が顕著になることが一方向の場合には確認できるが、二方向の場合にはほとんど変わらなかった。二方向の場合には、引張力が大きいケースで空隙率が少し小さくなっているが、実際には測定ごとのばらつきがあるので、ほとんど同じ空隙率だと解釈すべきだと思われる。

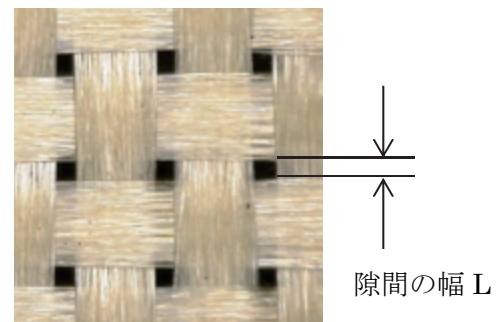


図1 ケブラー布の拡大図

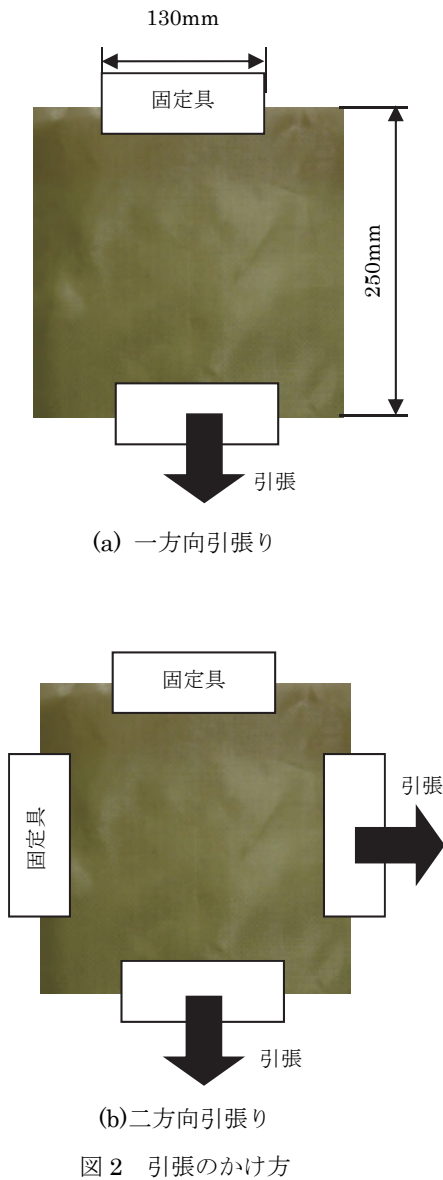


表 1 実験条件

製品		空隙率[%]	引張力[kgf]
A	case1	2.8	なし
	case2	2.6	10(一方向)
	case3	3.3	10(二方向)
B	case4	4.3	なし
	case5	4.1	10(一方向)
	case6	3.4	20(一方向)
	case7	4.8	10(二方向)
	case8	4.7	20(二方向)

## 2.2. 透過速度の計測方法

本実験では、遷音速風洞の多孔壁の流量計測をするために作成した装置<sup>5</sup>を流用する。図3に実験装置を示す。プレナムチャンバーには、直径20mmの孔がある。この孔に、図2のように引張力をかけたケブラー布をエポキシ樹脂系接着剤で空気が漏れ出ないように貼り付ける。こうすることで、風洞のケブラー壁を介して圧力差がある状態を模擬している。

流量計 (azbil 製 Digital Mass Flow Controller CMQ-V) でケブラー布を通過する流量を調整し、大気圧とプレナムチャンバー内の差圧を差圧計 (azbil 製 差圧発信機 DSTJ3000) で測定する。それにより、差圧と流量 (流速) の関係を求める。プレナムの大きさは、流量計から流れ込んだ流れが、孔へ到達する前に十分に拡散する大きさにした。

ケブラーは風洞壁として使用されるため、実際は、風洞内の流れに接する状態で透過する。そのため、主流の速度や、壁面近傍の境界層厚さなどが透過速度に影響する。しかし、本実験では、遷音速風洞の装置を流用しているため、それを再現するのが不可能であった。よって、今回は無風の状態、ケブラーの織り方の違いや、引張力の影響を調査する。

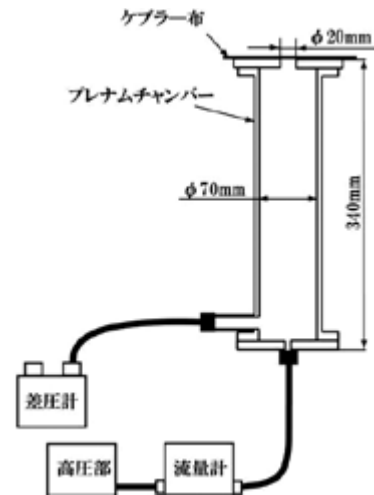


図 3 実験装置

## 3. 透過速度の経験式

ケブラー布の透過速度に関して、下記の経験式が Devenport らによって提案されている<sup>3</sup>。

$$\frac{V}{U_\tau} = E \left( \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_\tau^2} \right)^n \quad (1)$$

$V$ は透過速度[m/s],  $U_\tau$ は粘性スケールの速度で $v/L$ である。ここで、 $L$ はケブラー布の隙間の幅[m] (図 1),  $\nu$ は空気動粘性係数[m<sup>2</sup>/s]である。 $\Delta p$ は圧力差[Pa],  $\rho$ は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]である。さらに、 $n$ と $E$ は無次元定数で、ケブラー布の仕様(空隙率など)や風洞内の流れの干渉によって異なる。圧力差と速度の関係は、式(1)より、

$$V = C \Delta p^n \quad (2)$$

とまとめることができる。ここで、

$$C = E \left( \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U_\tau^2} \right)^n U_\tau \quad (3)$$

である。実際に計測データから無次元定数 $n$ と $E$ を求める際は、式(2)を用いて最小二乗法等で実験データにフィッティングして $C$ と $n$ を求め、その後式(3)から $E$ を求める。

文献3では、空隙率6%のケブラー布( $L = 3.534 \times 10^{-4}$  m)の透過速度をモデル化し、無次元定数として、 $n = 0.5734$ ,  $E = 0.0176$ を得ている。

#### 4. 結果

図4に、計測して得られた流速と圧力差の関係を示す。ここでは、引張力をかけていないcase1とcase4の実験結果を示す。式(1)において、case1では $E=0.0855$ ,  $n=0.5734$ , case4では $E=0.0100$ ,  $n=0.5734$ にすると実験値に良く合うことが分かった。文献3とは異なるケブラー布であるが、 $n$ は同じ値で近似可能であることが分かった。case4は空隙率が大きいので、予想通りcase1に比べて無次元定数 $E$ が大きく、流速が速くなることが確認できた。図4には、文献3のDevenportらの結果も示している。無次元定数の $n$ が同じなので勾配も同じである。しかし、 $E$ は異なるので、グラフはシフトしている。文献3の結果は、空隙率の大きい6%のケブラー布を使用しているため、同じ圧力差でも流速が速い(流量が多い)。

図5に空隙率と無次元定数 $E$ の関係を示す。織り方の異なるケブラーAとBでは、定数も異なる。しかし、同じ織り方であれば、引張力を加えて空隙率を変化させても、無次元定数 $E$ の値は、大きく変わらないことが分かった。

二方向引張りの場合、引張力がないときよりも空隙率が大きくなったにもかかわらず、流速は速くならなかった。反対

に、空隙率が大きいほど $E$ は小さくなる傾向にある。これは図6のケブラー布の断面図に示すように、二方向引張では平行する繊維束の間隔は広くなるが、交差する繊維束の間隔は狭くなる。そのため、結果的に流路面積は大きくならなかったと考えられる。また、図4には、文献3のDevenportらの結果も示している。文献3では風洞内の主流との干渉を考慮している。本実験ではそれを考慮しなかったが、そこまで $E$ の値は大きく変わらないことがわかった。その影響は大きくないと思われるが、さらなる調査は今後の課題である。

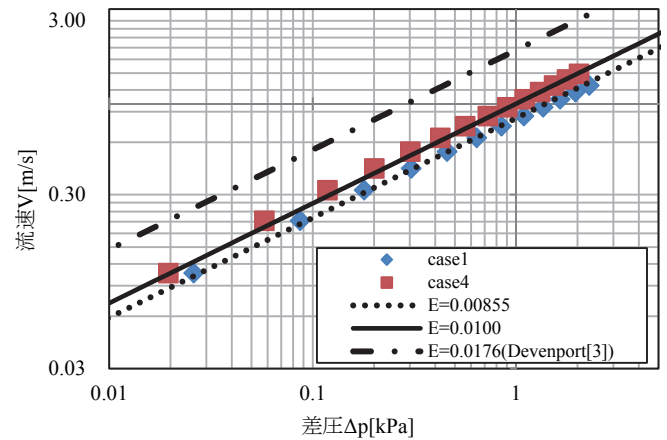


図4 流速と差圧の関係

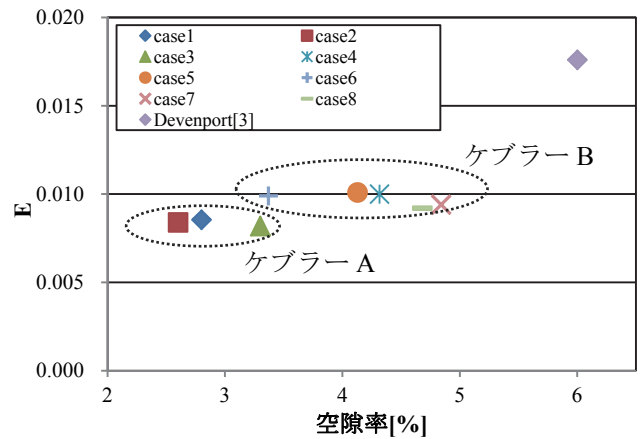
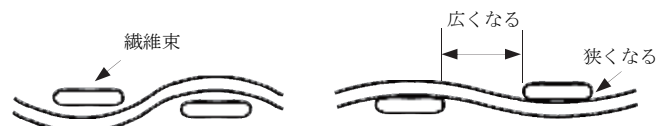


図5 空隙率と無次元定数 E の関係



(a) 引張力なし (b) 二方向引張り

図6 ケブラー布の断面図

## 5. まとめ

JAXA 低速風洞のケブラー布における透過速度を計測した。文献 3 で提案されている式(1)で、圧力差と透過流速の関係を精度良く近似できることが分かった。織り方の異なる 2 種類のケブラー布に対し、無次元定数を求め、流速をモデル化することができた。このモデルを使用することで、壁干渉解析が可能になる。さらに、風洞では強く引っ張られた状態で使用されているため、引張力の影響も調査した。二方向に引っ張ると空隙率が大きくなるが、流速には影響しないことが確認できた。ケブラー布の織り方は流速に影響するが、引張力はあまり影響しないことが分かった。

## 参考文献

- [1] Y. Yokokawa, M. Murayama, Y. Ito, H. Ura, D.-Y. Kwak, H. Kobayashi, S. Shindo, K. Yamamoto, Noise Generation Characteristics of a High-lift Swept and Tapered Wing Model, AIAA paper 2013-2062 (2013).
- [2] M. Murayama, Y. Yokokawa, H. Kato, H. Ura, H. Uchida, K. Yamamoto, K. Abe, L. Wu, Computational and Experimental Study on Noise Generation from Tire-Axle Regions of a Two-Wheel Main Landing Gear, AIAA paper 2011-2821 (2011).
- [3] W. J. Devenport, R. A. Burdisso, A. Borgoltz, P. Ravetta, M. F. Barone, Aerodynamic and Acoustic Corrections for a Kevlar-Walled Anechoic Wind Tunnel, AIAA paper 2010-3749 (2010).
- [4] T. Ito, H. Ura, K. Nakakita, Y. Yokokawa, W. F. Ng, R. A. Burdisso, A. Iwasaki, T. Fujita, N. Ando, N. Shimada, K. Yamamoto, Aerodynamic/Aeroacoustic testing in Anechoic Closed Test Sections of Low-speed Wind Tunnels, AIAA paper 2010-3750 (2010).
- [5] 石橋孝介, 香山寛人, 森浩一, 中村佳朗, 風洞壁面上の単一孔を通過する流れに関する研究, 第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010 論文集, JAXA-SP-10-012 (2011).

