

布の厚さ方向および面内方向の熱伝導率測定

知能機械工学科 大村高弘

1. はじめに

現在、世界的に使用されている保護熱板法や熱流計法による熱伝導率測定では、布1枚の熱伝導率を測定することは非常に難しく、数枚から十数枚を重ねて測定するのが一般的である。そのため、布の重ね面に空気層が生じてしまい、重ね枚数によって熱伝導率が変化してしまっている。それ故、ハンドブック¹⁾などに記載されているデータを扱う場合、どのような条件で測定したかを十分吟味しなければならない。さらに、布の面内方向の熱伝導率は、ほとんど測定例が無く、様々な編み方をした布を下着として使用した場合、熱がどのように広がっていくか、温度分布がどのように変化するかを知ることは非常に難しいと考えられる。特に宇宙服では、断熱性能のみならず、冷却性能や通気性など、日常で感じる心地よさが重要とされている。そのためには、布を構成する繊維の素材やその太さ(径)だけではなく、繊維同士の絡み合いの様子や、布の表面性状など、様々な要素と着心地の良さとの関係を検討する必要がある。その関係を把握するために必要なファクターの一つとして熱伝導率(布1枚)があり、しかも厚さ方向と面内方向の熱伝導率を測定することが必須である。本研究では、既に考案した熱流分離法を応用して、布1枚の厚さ方向及び面内方向の熱伝導率を同時に測定する方法を検討した。

2. 測定原理

(1) 厚さ方向の熱伝導率測定

本研究で用いる熱伝導率測定方法は、安価で簡便かつ正確に測定できる方法として提案した熱流分離法であり、既にいくつかの断熱材に対して適用し、その測定結果が、広く使用されている保護熱板法(GHP法)²⁾や、周期加熱法と±10%以内で一致することが示されている²⁾。以下に、簡単に測定原理を示す。

熱流 Q が試験体に流入し、それが試験体の厚さ方向の熱流 Q_t と、それ以外の方向へ分離して流れる熱流 Q_{loss} の和になると仮定できれば、以下の式が得られる²⁾。

$$\lambda = \lambda_t + a\Delta\theta^2 \quad (1)$$

ここで、係数 a を次式のようにおき、また、熱流 Q より得られる係数を λ 、求めるべき厚さ方向の熱伝導率を λ_t 、試験体の厚さ方向の温度差 $\Delta\theta$ に対する面内方向の温度差 $\Delta\theta_{loss}$ との比を θ (無次元温度変数)とした。

$$a = \frac{H \cdot d}{S} \quad (2), \quad \theta = \frac{\Delta\theta_{loss}}{\Delta\theta} \quad (3)$$

$\Delta\theta$ を変化させることで θ を変化させ、対応する λ を θ に対し

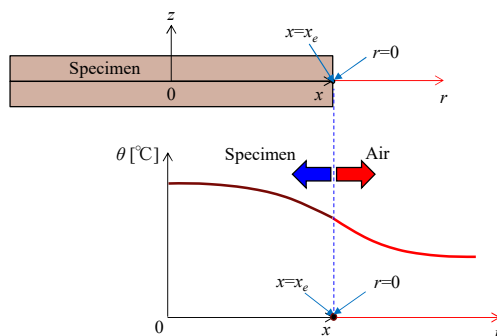


Fig.1 Temperature changes inside the specimen and near the side one

てプロットすると近似直線が得られる。その切片が厚さ方向の熱伝導率 λ_t になる。ここでは、高温側の表面温度を 5°C ずつ上昇させて、 $\Delta\theta$ を3段階に変化させた。

(2) 面内方向の熱伝導率測定

図1に、試験体内部の面内温度分布 $\theta = \theta_a(x)$ と、試験体側面付近の空気温度分布の模式図を示す。式(4)は、試験体側面からの放熱を表す式である。したがって、側面の温度を θ_e 、周囲雰囲気温度を側面から試験体外部方向に向かった位置 r の関数として $\theta = \theta_a(r)$ とすれば、次式が成り立つと考えられる³⁾。

$$Q_{loss} = H(\Delta\theta_{loss})^2 = \lambda_{air} \left. \frac{d\theta_a}{dr} \right|_{r=0} S_p \quad (4)$$

ここで、 λ_{air} は空気の熱伝導率、 S_p は試験体側面の面積である。一方、試験体側面からの放熱との関係で、

$$\lambda_p \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_e} S_p = \lambda_{air} \left. \frac{d\theta_a}{dr} \right|_{r=0} S_p \quad (5)$$

となる。ここで、 λ_p は面内方向の熱伝導率、 $d\theta/dx$ は試験体面内の温度分布を中心からの距離 x の関数として表し、それを x で微分した結果である。よって、式(5)より面内方向の熱伝導率 λ_p は、

$$\lambda_p = \lambda_{air} \frac{|d\theta_a/dr|_{r=0}}{|d\theta/dx|_{x=x_e}} \quad (6)$$

となる³⁾。

3. 測定装置

図2に、布を測定装置に設置したときの模式図を示す。装置は、約 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ のサイズの3つのヒータと試験体を重ねるだけの簡単な構造である。Heater 1 と Heater 2 の温度が同じになるように Heater 2 の温度を制御することで、Heater 1 で発生した熱のほとんどが試験体内へ流入されている。また、布は低温側と高温側の二段構成となっており、それぞれの中心にある布を挟むように K 熱電対(素線 $\phi 0.32\text{ mm}$)を配置して布1枚の熱伝導率を測定する。その熱

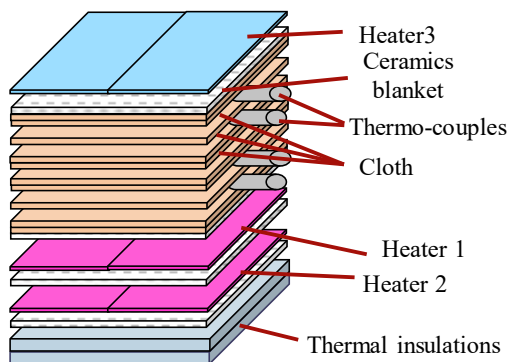


Fig. 2 Schematic diagram of measurement apparatus

電対は、布 1 枚の上下面中央に設置され、さらにその上下から必要な枚数の同じ布を重ねた。そして、試験体の厚さ D を、(布一枚の厚さ)+(熱電対の中心 0.32mm) $\times 2$ とした。

4. 試験体

宇宙飛行士が肌着として一般的に使用しているとされているシャツ(アウトラスト)を試験体とした。アウトラストのサイズと密度を表 1 に示す。ここでは、7 枚を一組にしてヒータ 1(高温側)の上に重ね、さらにその上に 7 枚を重ね、その上から低温側のヒータ 3 を設置して測定した。同様にして 9 枚の場合も測定した。アウトラスト 7 枚重ねの寸法や密度を表 1 に、9 枚のそれを表 2 に示す。さらに、いずれの重ね枚数においても、アウトラスト 1 枚の厚さは、高温側が 0.35mm 、低温側が 0.34mm である。これは、7 枚重ねを測定した後に、高温側および低温側に追加で 2 枚ずつ重ねたためであり、中央の一枚は変わらないためである。

5. 結果と考察

図 3 に、 $45\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ の温度範囲におけるアウトラストの面内方向およびアウトラスト 1 枚の厚さ方向の熱伝導率 λ_p と λ_t をそれぞれ示す。○印が 7 枚重ねで測定した 1 枚の厚さ方向の熱伝導率、●印が 9 枚重ねで測定した 1 枚の厚さ方向の熱伝導率、△印が 7 枚重ねで測定した場合の面内方向の熱伝導率、▲印が同じく 9 枚重ねの場合の面内方向の熱伝導率である。図 4 より、1 枚の厚さ方向の熱伝導率は、7 枚重ねで測定しても 9 枚重ねであってもほぼ同じ結果となり、 $45\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ の温度範囲での平均値は約 $0.098\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となった。

一方、面内方向の熱伝導率は、7 枚重ねと 9 枚重ねで大凡 $0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の差があり、7 枚重ねでの測定結果の方が大きくなった。この原因として、布を重ねたときにできる空気層の存在が考えられる。アウトラストは、非常に柔らかくてしなやかに変形するため、重ね面に存在する空気層も波打ったような状態となっていると考えられる。そのため、平板状の空気層ではなく、面内方向には空気が存在する部分と布の部分とが混在した複雑な伝熱経路が出来ていたと考えられる。

6. まとめ

宇宙飛行士が一般的に着用しているとされるアウトラストの

Table 1 Outlast 7-shirts

Position	Mass [g]	Size [mm ³]	Density [kg/m ³]
High temperature side	22.05	150×150 ×3.13	313
Low temperature side	21.7	150×150 ×3.13	308

Table 2 Outlast 9-shirts

Position	Mass [g]	Size [mm ³]	Density [kg/m ³]
High temperature side	28.3	150×150 ×4.10	307
Low temperature side	28.9	150×150 ×4.13	311

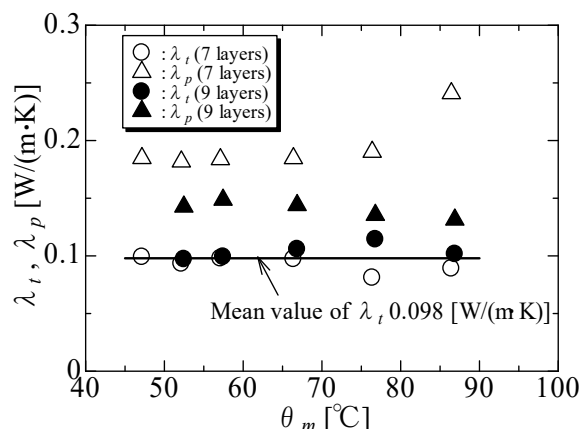


Fig. 3 Thermal conductivities of Outlast

厚さ方向および面内方向の熱伝導率を、熱流分離法を用いて同時に測定した。その結果、厚さ方向の熱伝導率は $45\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ の温度範囲でほぼ一定であり、約 $0.098\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であった。一方、面内方向の熱伝導率は、布の重ね枚数によって異なり、試験体の面内に空気が存在する複雑な伝熱経路が生じていた可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 榊養賢堂, 熱物性ハンドブック, 550-551, (2008).
- 2) 大村他, 熱物性 Vol. 34, No. 4, 137-146 (2020).
- 3) 近藤他, 第 41 回熱物性シンポジウム, A315 (2020).

研究者紹介

大村 高弘

おおむら たかひろ

知能機械工学科 教授
博士(工学)

専門分野 熱工学

研究課題 熱伝導率測定方法に関する研究

キーワード 熱伝導率, 断熱材, 周期加熱法, 熱流分離法, 熱伝導解析

