不織アルミニウム繊維層の有効熱伝導率特性*

菅原 征 洋^{*1}, 吉 木 祐 也^{*2}Characteristics of the Effective Thermal Conductivity for
a Weavless Aluminum Fiber LayerMasahiro SUGAWARA^{*3} and Yuya YOSHIKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Akita University,
1-1 Tegata-Gakuencho, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

A Weavless Aluminum Fiber Layer (WAFL) is a wool made of Aluminum fibers with the diameter of about 120 μm , which are used as an air filter of cooking room's ventilators and also sound absorption materials. This paper is concerned with the experimental study of the effective thermal conductivity of WAFL, λ_e . The effective thermal conductivity in this paper is evaluated for the heat transfers in the direction of perpendicular to the WAFL placed horizontally. As the results, it is seen that the thermal conductivity of WAFL is comparatively low notwithstanding to have a very high thermal conductivity of Aluminum base material, and also that the effective thermal conductivity increases monotonically with increasing the compression on WAFL.

Key Words: Effective Thermal Conductivity, Aluminum Fiber, Weavless Wool, Compression Effects, Insulator

1. ま え が き

線径 120 μm 程度の不織アルミニウム繊維層 (Weavless Aluminum Fiber Layer, WAFL と略記) は吸音材やちゅう房の換気用フィルタなどに利用されている事例がある。しかしながら, セラミックス繊維質断熱材などのような非金属繊維層の熱物性や用途などに関する研究は例えば文献(1)~(4)に報告されているが, 一種の金属繊維である WAFL の熱環境での特性や利用があまり報告されていない。これは多分に WAFL の有効熱伝導率やその他の熱物性がよく知られていないことが大きな理由であると思われる。本報告は WAFL の有効熱伝導率を平板直接法で測定してその特性を吟味したものであり, WAFL を有効に利用するうえで有益な資料となると考える。

記 号

A: 単位セルモデルの並列部寸法比(図 6 参照)

 A_s : 繊維同士の接触面積寸法比(図 6 参照)

B: 単位セルモデルの直列部寸法比(図 6 参照)

Q: 主ヒータの供給電力(熱量)

S: 測定部試料面積 (=15×15 cm)

t: 試料厚さ

T: 温度

 ε : 空げき率 [式(2)] λ_e : 有効熱伝導率 ρ : (かさ)密度

添 字

Al: アルミニウム

g: 気相(空気)

S: 固相(アルミニウム)

2. 不織アルミニウム繊維層の概要

図 1 にアルミニウム繊維の顕微鏡写真を示す。これは WAFL の空げき部に液状プラスチックを浸透させて固化し, 適当な寸法に切断して断面のバフ仕上げを行って写真撮影しやすいようにエッチングしたものである。物差しの最小メモリーは 10 μm であるので, 繊維の直径は 120 μm 程度であることがわかる。また, 長手方向の繊維も見える。図 2 はこのような繊維を適当な密度に不織布のように軽く圧縮して成形した

* 原稿受付 2002 年 7 月 18 日。

^{*1} 正員, 秋田大学工学資源学部(☎ 010-8502 秋田市手形学園町 1-1)。^{*2} サンリツハイブリッド(株)(☎ 732-0052 広島市東区光町 1-2-5 M ビル光町 5 F)。

E-mail: sugawara@ipc.akita-u.ac.jp

Fig. 1 A microphotograph of a weavless aluminum fiber layer (a minimum scale is 10 μm)

Fig. 2 A surface view of a weavless aluminum fiber layer

WAFLの表面模様である。ノギスにより加圧力を手による感触で特定して測定した厚さが約6 mmの標準試料で空げき率 ϵ は約0.92程度であり、空気の占める空げき体積が大変大きい。換気用フィルタに用いられているWAFLはバインダで成形しているが、本研究で用いた試料はバインダ処理はされておらず、純アルミニウム繊維層である。

3. 実 験

3.1 測定装置と測定方法 図3に測定装置の概要を示す。測定方法は平板直接法であり、加熱・冷却板用の銅板は厚さ10 mmの厚いものを用い等温になるように配慮した。主ヒータ部の伝熱面形状は正方形であり、その面積 S は15×15 cmである。主ヒータ周りの補助ヒータ部は外寸法216×216 mmの正方形の輪であり、これの外縁と内縁の距離は3 cmであっ

Fig. 3 A schematic view of the measurement equipment for the effective thermal conductivity

て、主ヒータ部と補助ヒータ部のすきま(空気層)は3 mmにした。さらにこれらの両ヒータ部銅板の各側面の中央を1本のステンレス製ボルトで連結して固定した。これによって、スペーサ厚さで試料厚さを規定したWAFLの有効熱伝導率の測定を可能にした。スペーサの寸法は、外寸法が補助ヒータ部銅板と同じ216×216 mmで幅が8 mmの正方形の輪である。その材質は、厚さ5 mmのものはベークライト板製、厚さ3 mmと1 mmのものはアクリル板製、厚さ0.2 mmのものは塩化ビニルフィルム製である。両ヒータには装置寸法に適合するように特注の厚さ1.5 mmのラバー電気抵抗ヒータを用いた。面積49×49 cmで厚さ約6 mm、質量約430 gのちゅう房などの換気に用いられているフィルタを母試料とし、これから測定装置に適合する面積のものを2枚切り出して測定用試料とした。一般に繊維状の試料の厚さを特定することは難しいので、各種厚さのスペーサを用意して、スペーサ厚さを試料厚さとみなして測定を行った。このとき、母試料の厚さよりも厚い $t=8$ mm付近から測定開始し、徐々に t を小さくして有効熱伝導率 λ_e を測定した。このとき、スペーサを入れることによる接触熱抵抗を軽減するために、一度所定の厚さ t で測定終了したら、この厚さよりも厚い場合の測定は行わず、一方的に厚さ t を小さくして測定した。試料厚さ t の大きさによっては各種厚さのスペーサを重ねることがあるので8個のクランプで試料厚さが変わらず λ_e の安定するトルクで締めつけた。主ヒータの供給電力(熱量) $Q(W)$ はあらかじめ検定した電流計、電圧計で測定し、加熱面温度 T_1 と冷却面温度 T_2 は熱電対を両銅板内部に埋め込んでポータブルハイブリッドレコーダ(横河3038)で測定した。 λ_e は次に示すフーリエの法則より算定した。

$$\lambda_e = \frac{Q \times t}{2S(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、WAFL 表面のランダムな物理的性質のため試料高温側表面温度と試料低温側表面温度の測定は難しく、試料表面と加熱・冷却銅板表面との接触状態はアルミニウム繊維同士が重なって層をなす試料の内部状態と類似して接触熱抵抗が小さいと考えられるので、ならされた試料表面温度とみなされる加熱面温度 T_1 と冷却面温度 T_2 を用いて式(1)より λ_e を算定した。また、 λ_e は放射伝熱量も含んだ値である。測定試料温度は試料平均温度 $(T_1 + T_2)/2$ が 50°C 付近になるように配慮した。 λ_e に対する放射熱成分の割合は Rosseland⁽⁵⁾ の放射伝導率の概念を用いてセラミックス繊維層の平均減衰係数⁽⁶⁾⁽⁷⁾ を参考にすると、数%と推定された。

3・2 測定の不確かさ評価 測定値の信頼度を吟味するため、アメリカ機械学会性能試験規約の計測の不確かさ (Measurement Uncertainty)⁽⁸⁾ に沿って検討してみた。各計測器のかたより誤差は標準計器で取り除いたが、計測器の最小目盛にかかわる感度はテイラー展開に基づいて予測して正確度に組み込んだ。同一試料、同一測定条件で測定を9回繰返して相対精密度を計算して、相対正確度と相対精密度を組み込んだ相対不確かさは99%包括度で5.4%と推定された。カタログ値が $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ である市販のガラス板(旭硝子、ソーダ石灰ガラス)を測定したところ $0.993 \sim 1.028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の値が得られた。これより、本測定装置は熱の良導体の金属板は無理としても、比較的に高い数 W 程度の熱伝導率の測定が可能と思われる。

一般に繊維質試料は純金属板などのように密度やその他の物性は均一でないで、同じ条件の試料を用意して λ_e を測定することは大変難しい。試料をランダムに抽出して測定を試みたが、測定値にばらつきが大きくなることは避けられなかった。このため試料間の相対不確かさは99%包括度で約38%程度の値を示した。この値は少し大きいように思えるが、繊維状の試料の特質から考えて許容されると思う。

4. 結果と考察

図4にWAFLの有効熱伝導率 λ_e と試料厚さ t との関係、図5には λ_e と密度 ρ の関係を示す。繊維質試料は前述のごとく一般に不均質であり、同じ母試料から切り出した試料でも密度や平均厚さも微妙に異なるものである。図4、5に示されている結果はすべての測定値をそのままプロットしたものである。図4、5

Fig. 4 Effect of sample thickness t on the effective thermal conductivity λ_e

Fig. 5 Correlation of the effective thermal conductivity λ_e and density ρ

中の試料(sample)の番号は生データファイルとの整合性のため便宜上つけたものであって大きな意味はない。例えば sample 14 と sample 15 は異なる母試料から切り出した試料であり、sample 16-1 と sample 16-2 は同じ母試料から切り出した試料である。

試料厚さ t が 6 mm 付近から圧縮の影響を受けて λ_e は $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 付近より大きくなり始め、 $t=3 \text{ mm}$ では約10倍の $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ まで上昇している。すなわち、試料を徐々に圧縮していくと次第に λ_e が上昇するという挙動を示す。これまで、繊維質多孔層の λ_e に関する推定式は粒子層などの多孔層を除いては極めて報告例が乏しく、その中で、充てん粒子層から繊維層の広範囲にわたって吟味している田中・千阪の推定式⁽⁹⁾ を参考までに次に示す空げき率 ε とともに図4、5中に示してみた。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{Al}}} \dots\dots\dots (2)$$

試料によって多少傾向は異なるが試料厚さ 6 mm 付近までは、田中らの推定式による結果 [約 $0.07 \text{ W}/$

($\text{m}\cdot\text{K}$)] と近い値を示している。田中らの推定値は約 30%ほど低く予測している。図 5 に示すように WAFL の密度 ρ が増せば、それだけ熱の良導体であるアルミニウムの体積が増すので λ_e の値が大きくなるのは理解できるが、田中らの推定値と比較してもその上昇率がかなり大きいのが特徴である。セラミックス繊維質断熱材の λ_e については今駒ら⁽¹⁰⁾ も実験と解析の両方から検討を行っている。彼らの取扱いの特徴は、有効熱伝導距離を導入して熱流方向に傾いた繊維が λ_e に影響を及ぼすという概念である。彼らの実験データをみると、大気圧下で、密度 183 kg/m^3 の λ_e は $0.063 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であり、これを田中らの推定式で計算してみると約 $0.048 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ なる値を示した。この場合も田中らの推定値は 25%程度低めの予測となっている。これらの吟味から、圧縮効果の小さい領域での WAFL の λ_e はほぼ妥当な測定値であると考えられる。田中らの推定式はどちらかといえば過小推定気味であるものの、圧縮効果のない領域では比較的信頼度の高い推定式といえよう。

上記報告例の対象としている材質はセラミックス(今駒ら)や積層金網(田中ら)のような比較的に硬い材料であるが、本研究で対象としているのは比較的に軟らかいアルミニウムである。したがって、繊維と繊維の接触状況が硬い材質のときと異なって、こうした圧縮による λ_e の上昇挙動が現れたのではないかとと思われる。繊維同士の接触が熱移動に及ぼす影響を予測することは大変難しく、当面は実測に頼らざるを得ないであろう。田中らの推定式にかかわるモデルは繊維同士が点接触していると考えている。一方、今駒らの近接繊維同士間の熱移動モデルは繊維の円断面を等価正方形断面に近似して、繊維と繊維のすきまを満たしている物体の伝導、放射伝熱そして熱伝達率と接触面積一定と仮定した対流伝熱を組合せて伝熱量を推定している。これらのモデルによって本研究の λ_e の挙動を正しく推定することは難しいように思える。田中らの推定式は比較的に簡単な表現で利用しやすい利点があると思われるので、これをベースにして、WAFL が水平に置かれた場合で、これに垂直に熱が移動する場合の検討を行ってみる。図 6 は田中ら⁽⁹⁾ の単位セルモデルを拡張したものである。この拡張モデルを説明する前に、田中らのモデルについて彼らの論文から要約して簡単に述べる。図 6 の A_δ は本研究の拡張モデルの繊維同士の接触面積寸法比であるが、まず A_δ を零として一点鎖線で描かれた矩形モデルを基本的なモデルとして考える。多孔質の熱伝導は①体積(二次元モデルなので面積となる) $A \times 1$ の気相部分を伝わる部

Fig. 6 Developed unit cell model to consider contact area rate A_δ between fibers

分と② $(1-A) \times (1-B)$ の固相部分と $(1-A) \times B$ の近接固相間の気相部分を直列として伝わる部分とに分けて考える。そして熱は①と②を並列として伝わりと考えると λ_e を定義する。この矩形モデルの固相同士は非接触であるので λ_e を過小に評価する。この欠点を補うため田中らは②の部分に対して図 6 の太い斜線で示したモデルを考え固相同士が点接触するように考え ($A_\delta=0$)、さらに広範囲な空けき率に適合できるように気相流路の相当直径を導入することによって寸法比 A と B を評価した。本研究で A_δ は繊維(固相)の圧縮による λ_e の上昇効果を組み込むために導入したものである。このように試みると、田中らの推定式の誘導と同様な取扱いで次に示す含有気体(空気)の熱伝導率 λ_g で無次元化された推定式が得られる。

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_g} = A + A_\delta \frac{\lambda_s}{\lambda_g} + (1-A-A_\delta) \times \frac{\log \left\{ 1 + B_\delta \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_g} - 1 \right) \right\}}{B_\delta \left(1 - \frac{\lambda_g}{\lambda_s} \right)} \quad \text{..... (3)}$$

ここに

$$A = \frac{2\varepsilon}{3-\varepsilon}, \quad B = \frac{\varepsilon}{3}, \quad B_\delta = \frac{2B(1-A)}{1-A-A_\delta}$$

であり、 λ_s は金属(アルミニウム)の熱伝導率である。 $A_\delta=0$ のとき $B_\delta=2B$ となって、田中らの推定式と一致する。式(3)の右辺第 2 項は繊維同士が接触している部分(図 6 中で破線より右側の部分)の熱伝導効果を並列に組み込んだものである。この項が図 5 に示されているような WAFL の密度増加による λ_e の増加の要因になっていると推定できる。図 7 は図 5 で示されているすべての測定データ λ_e を式(3)に代入して A_δ を逆算して ρ との関係を図示したものである。図 7

Fig. 7 Correlation of the contact area rate A_δ and density ρ

中の実線は A_δ と ρ の関係を最小二乗法によって次に示す二次式で近似した結果である。

$$A_\delta = 7.19 \times 10^{-5} - 6.13 \times 10^{-6} \rho + 3.09 \times 10^{-8} \rho^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

この A_δ と ρ (すなわち ϵ) の関係を式(3)に代入して図示したのが図5中の太い実線である。図5より、田中らの式を発展させた式(3)により、WAFLの有効熱伝導率 λ_e を本実測範囲内で推定できると思われる。

5. む す び

本研究は不織アルミニウム繊維層(WAFL)が水平に置かれた場合(横繊維層)でこれに垂直方向の有効熱伝導率 λ_e はその密度(圧縮効果)によって顕著に変化

することがわかった。密度が小さい場合(空げき率が大)は中温域の保温材としての利用が考えられ、他の断熱材と合板にするなどの併用を考えれば温度範囲の広い伝熱制御にも用途が広がると思われる。WAFLはリサイクル可能でしかも腐蝕しにくく軽量であるため、これの熱物性が徐々に明らかになれば多様な熱環境での利用が考えられる。

終わりに、本研究の端緒を与えていただいた北海道大学名誉教授 関信弘先生、図1の写真撮影にご協力いただいた秋田大学工学資源学部 田中學教授、試料を提供していただいた株式会社アルム、実験装置の作製などにご協力いただいた秋田大学工学資源学部 藤田忠、加藤隆一の両技官に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 丸山仁志・Netsu Bussei, 6-1 (小特集)(1992), 32-36.
- (2) 渋谷幸広・Netsu Bussei, 6-1 (小特集)(1992), 37-42.
- (3) 田北善暉・Netsu Bussei, 6-2 (小特集)(1992), 118-127.
- (4) Takahashi, K., Yamada, E. and Fujieda, A., *Proc. 3rd Jpn. Symp. Thermophys. Propert.*, (1982), 150-153.
- (5) Özisik, M. N., *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection.*, (1973), 318, John Wiley & Sons.
- (6) Kamiuto, K., Kinoshita, I., Miyoshi, Y. and Hasegawa, S., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 19-6 (1982), 460-468.
- (7) 尚熙善・今駒博信・岡崎守男, 化学工学論文集, 15-1 (1989), 52-59.
- (8) 日本機械学会編, 計測の不確かさ, (1987), 12, 丸善.
- (9) 田中誠・千阪文武, 化学工学論文集, 16-1 (1990), 168-173.
- (10) 今駒博信・尚熙善・岡崎守男, 化学工学論文集, 15-1 (1989), 44-51.