

短線加熱法による極微細単線の熱伝導率測定 : 第1報:測定法の理論的検討

張, 興
九州大学機能物質科学研究所

藤原, 誠之
九州大学大学院総合理工学部研究科

藤井, 丕夫
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/7891>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 12 (1), pp.29-36, 1998-07-31. 九州大学機能物質科学研究所

バージョン :

権利関係 :

短線加熱法による極微細単線の熱伝導率測定 —第1報：測定法の理論的検討—

張 興・藤原 誠之*・藤井 丕夫

Short-Hot-Wire Method for Measuring Thermal Conductivity of a Fine Fiber (The 1st Report: Theoretical Analysis of Measurement Method)

Xing ZHANG, Seiji FUJIWARA and Motoo FUJII

In this paper, a new short-hot-wire method for measuring thermal conductivity of a fine fiber is proposed. This method is based on the theoretical solution of one dimensional steady heat conduction along the hot-wire and fiber. The hot-wire generates a uniform heat flux by supplying constant electric current, and both ends of wire are maintained initial temperature. Fiber is attached to the center area of hot-wire. By using short-hot-wire technique, the fiber temperature at the attached point and heat rate to the fiber can be accurately obtained when the average temperature and heat rate of the hot wire are measured. Therefore, the thermal conductivity of fiber can be easily estimated. According to the theoretical analysis, this method can obtain thermal conductivity in the range up to 1000 W/mK within an error of $\pm 1\%$ for the fiber of 10~30 μm in diameter.

1. 緒言

近年、炭素繊維素材やアモルファス金属細線など、熱的特性、電気的特性、磁気的特性に優れた様々な機能性線材が開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。これらの線材の特性評価は、線材の分子構造とも関連させて種々の観点から検討されているが、熱的特性すなわち熱伝導率は重要な評価項目の一つとなっている。しかし、直径が数十 μm 程度以下の極微細な線材について、熱伝導率を測定することは非常に困難で、信頼性の高い測定法は確立されておらず、極微細な線材に対して精度良く熱伝導率を求めるための新しい測定法の開発が望まれている。

一般的に熱伝導率の測定法は、定常法と非定常法とに分けられる。これらの測定法の基本原理は、いずれも直接通電あるいはヒータやレーザなどにより測定試料に熱量を加え、試料に生じる温度勾配や非定常温度応答を測定することによって、熱伝導率あるいは温度伝導率を求

めるものである。従って、加熱量と温度そして測定の際の熱損失を正確に測定、評価する必要がある。

測定試料の熱伝導率が非常に高く、しかも、径が非常に細い線材の場合、その熱伝導率を測定する際に以下のような問題が生じる。

- ・微小熱量計測：測定試料が極微細であるため、加熱量も非常に小さくなり、測定が困難となる。
- ・高精度な温度計測：測定試料の熱伝導率が高いため、同一熱流束に対する温度勾配が非常に小さくなる。従って、非常に高い精度の温度計測を必要とする。しかも、測定試料が極微細な場合、温度計測がさらに困難となる⁽³⁾。

従来の研究では、多数の極微細な線材を束ねた形に成形した試料について測定を行うことにより、上記の困難を回避している例が多い。しかし、このような測定法の場合、測定結果に繊維素材間の空気層あるいは充填材の影響を正しく評価するといった新たな困難が生じるため、繊維素材そのものの熱伝導率を精度良く求めるには限界がある。

レーザを用いて、極微細な単線に関して温度伝導率を

受理日 1998年6月22日

* 九州大学大学院総合理工学部研究科

測定した研究例⁽⁴⁾はあるが、直接熱伝導率を測定するものではないため、熱伝導率を求める際に比熱の測定誤差の影響が含まれる。一方、極微細な単線に関して熱伝導率を直接測定した研究例⁽⁶⁾も見られるが、その測定法は非常に複雑な試料の懸架部を有し、測定そのものもかなり難しい手法によるものである。また、電氣的に不良導な繊維素材に対しては適用できない等の問題点もある。

本研究では、以上の背景を踏まえ、比較的簡便な測定装置で電氣的に良導および不良導な極微細単線そのものの熱伝導率を直接測定する方法を開発する。本報では提案する測定法の特性および精度について理論的に詳細に検討した結果を報告する。

使用記号

Bi	: ビオー数, 式(6)
B_1, B_2	: 式(12)
C_1, C_2	: 式(12)
D_1, D_2	: 式(12)
Fo	: 式(12)
h	: 熱伝達率
L	: アスペクト比 ($=l/r_p$)
l	: 熱線の長さ
m_f	: 式(8)
m_h	: 式(8)
q_v	: 単位体積あたりの発熱量
R_c	: 熱伝導率比, 式(5)
R_d	: 半径比, 式(5)
R_p	: 温度伝導率比, 式(5)
Ri	: 初期温度測定時の熱線部の電気抵抗値
Rt_0	: 0°Cにおける熱線部の電気抵抗値
r	: 半径方向座標
S	: 測定部の感度 ($=dT/d\lambda\rho$)
S_1, S_2	: 式(13)
T	: 温度
T_v	: 定常時における体積平均温度
t	: 時間
U, V	: 式(13)
X	: 無次元長さ方向座標
x	: 長さ方向座標
β	: 抵抗の温度係数
λ	: 熱伝導率
θ_v	: 定常時における無次元体積平均温度

θ	: 無次元温度, 式(6)
θ_v	: 非定常時における無次元体積平均温度

添字

f	: 試料細線
h	: 熱線
$h1$: 熱線部 I
$h2$: 熱線部 II

2. 測定原理

Fig. 1 に新しく考案された極微細線の熱伝導率測定部の物理モデルを示す。測定部は一様体積発熱をする熱線部と測定試料である極微細線部から構成されている。測定試料は、熱線部の中央付近に取り付けてあり、熱線を直接通電加熱することにより、測定試料へ熱量を加えることができる。

本法の測定原理は、Fig. 1 の測定系において、熱線部をステップ状に発熱させた場合の熱線の体積平均温度に関する非定常および定常熱伝導の理論解と測定により得られる熱線の体積平均温度上昇の経時変化およびその定常値を比較することにより、測定試料である極微細単線の熱伝導率を求めるものである。

熱線としては、非定常細線法に用いられる白金細線が考える。白金細線を用いた場合、直接通電により一様な体積発熱が得られ、しかも白金は温度に対する電気抵抗値の依存性が非常に優れているため、高精度な温度計測（相対値としては $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内）が可能である。白金細線（熱線）の体積平均温度 T_v は、通電加熱時の白金細線部の電気抵抗値 Ri を測定することにより、次式で算出される。

$$T_v = \frac{1}{\beta} \left(\frac{Ri}{Rt_0} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで、 Rt_0 は 0°C での白金細線の電気抵抗値、 β は温度係数 [$1/^\circ\text{C}$] であり、あらかじめ検定して求めておく。

このように、本測定法では試料細線への加熱源および温度センサとして白金細線を用い、加熱量と温度計測を高精度に行なうことにより、従来から困難とされてきた極微細な線材の熱伝導率の直接測定を試みる点に特徴がある。なお、本測定法において試料細線を固定するフレーム部を電気絶縁すると、試料細線の電気伝導性の如何

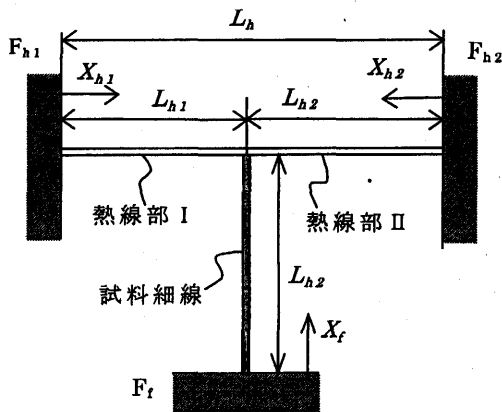


Fig. 1 Physical model.

に関わらず熱伝導率を測定することが可能となる。

3. 理論解析

3. 1 基礎式

Fig. 1 に示す測定部モデルについて熱伝導の理論解析を行なう。図において、熱線への試料細線取付け部より左側を熱線部 I、右側を熱線部 II と呼ぶことにする。熱線の加熱は、測定部全体の温度が雰囲気温度と等しくなった後、つまり測定系が熱平衡の状態から開始する。

熱線を取り付けるフレーム F_{h1} 、 F_{h2} (リード端子) および試料細線を取り付けるフレーム F_f (熱伝導率が高く、熱容量が大きい材質を適用する。) は、熱線および試料細線と比して熱容量が十分に大きいため、熱線加熱後もこの部分の温度は初期温度 T_0 に保たれると仮定する。

熱線および試料の半径方向の温度分布を無視し、フレームへの熱線および試料細線取り付け部を原点として軸方向に座標をとると、熱線部 I、II および試料細線に対する無次元の熱伝導方程式は次式で与えられる。

熱線部 I に対して

$$\frac{\partial \theta_{h1}}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_{h1}}{\partial X_{h1}^2} - 2Bi \cdot \theta_{h1} + \frac{1}{R_c} \quad (2)$$

熱線部 II に対して

$$\frac{\partial \theta_{h2}}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta_{h2}}{\partial X_{h2}^2} - 2Bi \cdot \theta_{h2} + \frac{1}{R_c} \quad (3)$$

試料細線部に対して

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial Fo} = \frac{1}{R_p} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X_f^2} - 2 \frac{R_c R_d}{R_p} Bi \cdot \theta_f \quad (4)$$

ここで、パラメータ R_c 、 R_p は試料細線に対する熱線の

熱伝導率および温度伝導率の比、 R_d は試料細線に対する熱線の半径比であり、次式で定義される。

$$R_c = \frac{\lambda_h}{\lambda_f}, \quad R_p = \frac{\alpha_h}{\alpha_f}, \quad R_d = \frac{r_h}{r_f} \quad (5)$$

また、無次元の温度 θ 、フーリエ数 Fo 、ビオ一数 Bi および座標 X は、それぞれ次式で定義される。

$$\theta = \frac{T - T_0}{\frac{q_f r_h^2}{\lambda_f}}, \quad Fo = \frac{\alpha_h t}{r_h^2}, \quad Bi = \frac{hr_h}{\lambda_h}$$

$$X_{h1} = \frac{x_{h1}}{r_h}, \quad X_{h2} = \frac{x_{h2}}{r_h}, \quad X_f = \frac{x_f}{r_h} \quad (6)$$

Bi の中に含まれる熱伝達率は、自然対流によるものと放射によるものを全て含んでいるものとし、熱線と試料細線周りの熱伝達率は等しいと仮定した。

初期条件および境界条件は以下の通りである。

初期条件 $Fo = 0$ で

$$\theta_{h1} = \theta_{h2} = \theta_f = 0$$

境界条件および接続条件 $Fo > 0$

$$\theta_{h1} = \theta_{h2} = \theta_f = 0; \quad X_{h1} = X_{h2} = X_f = 0$$

$$\theta_{h1} = \theta_{h2} = \theta_f; \quad X_{h1} = L_{h1}, \quad X_{h2} = L_{h2}$$

$$\left. \frac{\partial \theta_f}{\partial X_f} \right|_{X_f = -L_f} = -R_c R_d^2 \left[\left. \frac{\partial \theta_{h1}}{\partial X_{h1}} \right|_{X_{h1} = -L_{h1}} + \left. \frac{\partial \theta_{h2}}{\partial X_{h2}} \right|_{X_{h2} = -L_{h2}} \right] \quad (7)$$

非定常の温度応答の解は、式(2)、(3)および(4)を離散化し数値解析により求めた。

3. 2 定常熱伝導の解析解

本測定法では、最終的に上記の熱伝導方程式の定常解に基づいて熱伝導率を求めることになる。そこで、ここでは熱伝導方程式の定常解について示しておく。

$$m_f = \sqrt{2R_c R_d Bi}, \quad m_h = \sqrt{2Bi} \quad (8)$$

とおき、式(2)、(3)、(4)に式(7)の境界条件を適用すると、定常時の局所温度は以下のように求められる。

$$\theta_f = B_1 e^{-m_f \cdot X_f} + B_2 e^{m_f \cdot X_f} \quad (9)$$

$$\theta_{h1} = C_1 e^{-m_h \cdot X_{h1}} + C_2 e^{m_h \cdot X_{h1}} + \frac{1}{2R_c Bi} \quad (10)$$

$$\theta_{h2} = D_1 e^{-m_h \cdot X_{h2}} + D_2 e^{m_h \cdot X_{h2}} + \frac{1}{2R_c Bi} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= S_2 / S_1 \\
B_2 &= -B_1 \\
C_1 &= \frac{2B_1 \sinh(m_f L_f) + U(1 - e^{m_h L_{h1}})}{2 \sinh(m_h L_{h1})} \\
C_2 &= -C_1 - U \\
D_1 &= \frac{2B_1 \sinh(m_f L_f) + U(1 - e^{m_h L_{h1}})}{2 \sinh(m_h L_{h2})} \\
D_2 &= -D_1 - U
\end{aligned} \tag{12}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
S_1 &= 2[\sinh(m_f L_f) \{ \coth(m_h L_{h1}) + \coth(m_h L_{h2}) \} \\
&\quad + \frac{\cosh(m_f L_f)}{V}] \\
S_2 &= -U[e^{m_h L_{h1}} \{ 1 - \coth(m_h L_{h1}) \} + e^{m_h L_{h2}} \{ 1 - \\
&\quad \coth(m_h L_{h2}) \} + \coth(m_h L_{h1}) + \coth(m_h L_{h2})] \\
U &= \frac{1}{2R_c \cdot Bi}, \quad V = \sqrt{R_c \cdot R_d^3}
\end{aligned} \tag{13}$$

3.3 非定常数値解析結果

Fig. 2 に非定常温度応答の数値解析結果を示す。縦軸は次式で示す加熱時における熱線の無次元体積平均温度から熱線の初期温度を差し引いたもの（無次元の体積平均温度上昇量）で、横軸はフーリエ数 Fo を対数目盛りでプロットしている。

$$\begin{aligned}
\theta_{vh} &= \frac{1}{L_h} \int_0^{L_h} \theta_h dX \\
&= \frac{1}{L_{h1} + L_{h2}} \left(\int_0^{L_{h1}} \theta_{h1} dX_{h1} + \int_0^{L_{h2}} \theta_{h2} dX_{h2} \right)
\end{aligned} \tag{14}$$

解析は熱線として白金を用いた場合を想定して行っており、熱線のアスペクト比 L_h （長さ/半径）は 330、試料細線のアスペクト比 L_f は 165 である。解析条件は温度伝導率比 R_p （熱線の温度伝導率/試料細線の温度伝導率）を一定とし、熱伝導率比 R_c （熱線の熱伝導率/試料細線の熱伝導率）をパラメータとして計算を行った。つまり熱線部の熱伝導率を一定として、試料細線の熱伝導率を変化させた場合の解析結果である。

熱線の体積平均温度は、加熱開始とともに上昇して行き、 Fo 数が約 10^6 （有次元量に直すと 0.9 秒）の所でほぼ定常に達している。非定常時においては、 Fo 数の

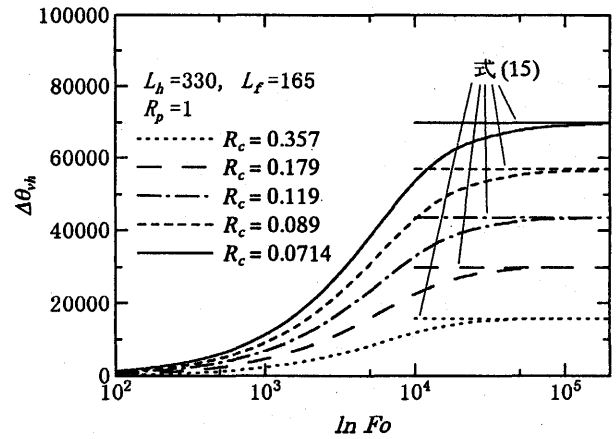


Fig. 2 $\ln Fo$ vs. $\Delta\theta_{vh}$ at different thermal conductivity ratios R_c .

対数目盛りに対する熱線の無次元体積平均温度上昇の勾配は R_c により異なっている。 Fo 数に関しては熱線の温度伝導率で無次元化しているため、試料細線の温度伝導率の影響は含まれない。従って、実験で得られる有次元の熱線体積平均温度上昇の経時変化と数値解析による無次元体積平均温度の経時変化を比較することにより、試料細線の熱伝導率が求まる。

一方、定常時の熱線温度に着目すると、熱線の体積平均温度は R_c （熱線の熱伝導率は一定であるため、 R_c の変化は試料細線の熱伝導率の変化を示す。）により変化することが分かる。この変化の傾向を縦軸に定常時における熱線の無次元体積平均温度 θ_{vh} 、横軸に熱伝導率比 R_c をとり、Fig. 3 に示す。 θ_{vh} は R_c に対し単調に増加することが分かる。従って、 θ_{vh} が分かると R_c （試料細線の熱伝導率）が求まる。そして、試料細線の R_c が 0.2 以下の小さい領域では θ_{vh} の勾配が大きく、 R_c が約 0.2 以上と大きくなるとともに勾配が小さくなっていることから、 R_c の値により、 θ_{vh} の R_c の変化に対する感度が異なることを示している。この感度は、細線の熱伝導率の測定精

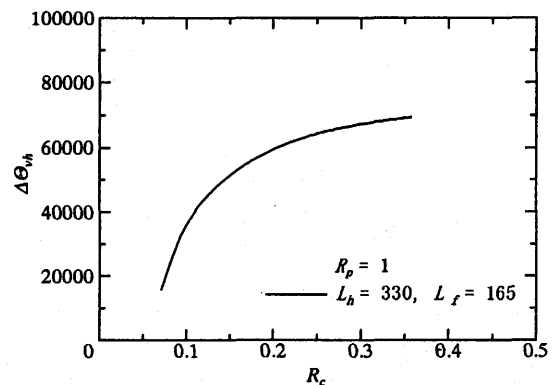


Fig. 3 Effect of thermal conductivity ratios R_c on θ_{vh} .

度に顕著な影響を与え、感度の詳細については後述する。

4. 熱伝導率の算出法

Fig. 2に本計測系における熱線部の体積平均温度非定常の経時変化を示した。そして、熱線の温度の非定常経時変化、あるいは定常時の値から試料細線の熱伝導率が原理的に求まることを示した。実際の熱伝導率の算出法は以下のような手順となる。

まず、非定常の経時変化より熱伝導率を算出する場合について考える。Fig. 1の測定部を組み立てる場合、熱線部と試料細線部を高熱伝導率の伝熱セメント等で接続する必要がある。しかし、伝熱セメント等で接続した場合、接続部の熱容量が熱線の体積平均温度の経時変化に大きな影響を与える。この熱容量の影響を実験において定量的に見積もるのは非常に困難と予想される。従って、非定常法による測定法は現実的ではないと考えられる。

一方、熱線体積平均温度の定常値には接続部の熱容量が影響してこないため、試料細線の熱伝導率測定法として大いに期待できる。この場合、熱伝導率は、Fig. 4に示すフローチャートの手順で算出される。なお、定常時の熱線の無次元体積平均温度は、式(10)、(11)および(14)により次式で与えられる。

$$\Theta_{vb} = \frac{1}{L_{h1} + L_{h2}} \left\{ -\frac{C_1}{m_h} e^{-m_h L_{h1}} + \frac{C_2}{m_h} e^{m_h L_{h1}} + \frac{C_1}{m_h} - \frac{C_2}{m_h} - \frac{D_1}{m_h} e^{-m_h L_{h1}} + \frac{D_2}{m_h} e^{m_h L_{h1}} + \frac{D_1}{m_h} - \frac{D_2}{m_h} + \frac{1}{2R_c Bi} (L_{h1} + L_{h2}) \right\} \quad (15)$$

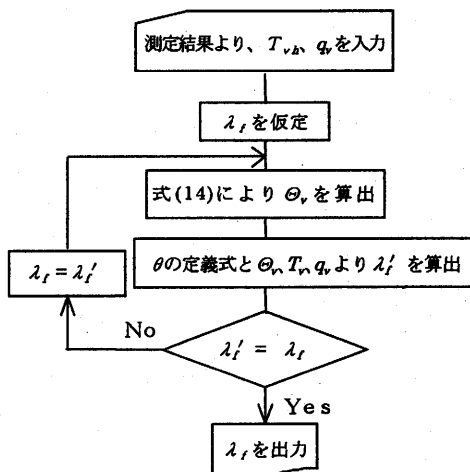


Fig. 4 Flow chart for estimating λ_f

試料細線の熱伝導率の算出手順は以下の通りである。

- (1) 測定により得た定常時の発熱量 q_v と熱線部の体積平均温度 T_v を入力する。
- (2) 試料細線の熱伝導率の第一近似値として λ_f を仮定する。
- (3) 式(15)により、定常時における熱線の無次元体積平均温度 Θ_v を求める。
- (4) 上記の Θ_v と q_v 、 T_v から、無次元体積平均温度の定義式により試料細線の熱伝導率 λ_f' を求める。
- (5) λ_f と λ_f' を比較し、両者が等しくない場合は熱伝導率の第一近似値 λ_f を λ_f' に入れ替えて(3)へ戻り、 λ_f と λ_f' が等しくなるまで繰り返す。

Fig. 2より、熱線の体積平均温度が定常状態に達するまで、 Fo で 10^5 程度(有次元に直すと 0.9 秒)となっており、この時間が測定に要する時間の目安となる。

5. 種々の影響因子と測定精度

3.3節で、熱線部の無次元体積平均温度 θ_{vb} の定常値 Θ_{vb} は熱伝導率比 R_c に依存し、 R_c の変化に対する Θ_{vb} の感度は R_c の大きさにより異なることを示した。しかし、 R_c と Θ_{vb} はともに λ_f の関数となっているため、この感度と λ_f との関係についてはより詳細に検討する必要がある。本節では半径 $15 \mu\text{m}$ ほどの試料細線に対し、半径 $15 \mu\text{m}$ の熱線部で測定部を構築した場合を例に取って、有次元量により感度を分析するとともに、熱線部の熱伝導率、熱線部の長さ、試料細線の取付け位置、試料細線の形状(長さ、半径)、細線周りの熱伝導率が定常時における熱線の体積平均温度上昇 ΔT_{vh} に与える影響を検討する。

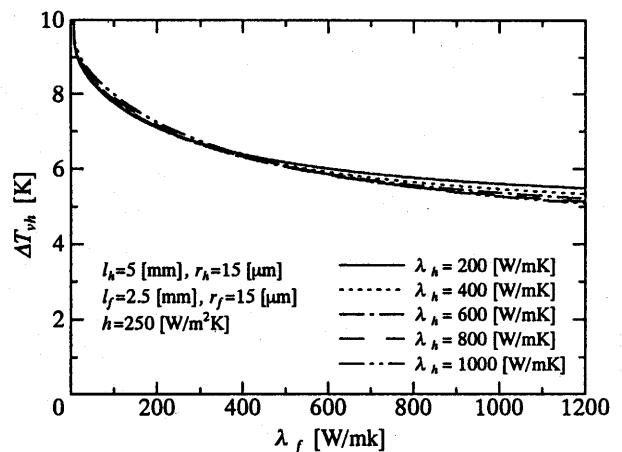


Fig. 5 λ_f vs. ΔT_{vh} at different thermal conductivities of hot-wire.

Fig. 5 に熱線の熱伝導率 λ_b の影響を示す。縦軸は定常時における熱線の体積平均温度上昇量 ΔT_{wh} 、横軸は試料細線の熱伝導率 λ_f である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_b=15 \mu\text{m}$, $l_b=5\text{mm}$
 試料細線 : $r_f=15 \mu\text{m}$, $l_f=2.5\text{mm}$
 細線周りの熱伝達率: $h=250\text{W/m}^2\text{K}$

熱線の体積発熱量 q_v は、それぞれの λ_b の計算に対して、 $\lambda_f=0\text{W/mK}$ の時、 ΔT_{wh} が $10[\text{K}]$ となるよう異なる値を設定した。例えば、 λ_b が白金の熱伝導率に相当する 71.4W/mK の時の発熱量は $7.45 \times 10^8\text{W/m}^3$ である。

λ_f が 200W/mK 以下の低い領域では、 λ_f の増加にとともに、 ΔT_{wh} が急激に低下し、 λ_f が 500W/mK 以上と比較的高くなると λ_f の増加に対してその低下割合は緩やかになる。また、 ΔT_{wh} に対する λ_b の影響は顕著ではない。

Fig. 6 に ΔT_{wh} を λ_f で微分したものの絶対値で定義される測定感度 S と試料細線の熱伝導率の関係を示す。感度 S は、各試料細線の熱伝導率 λ_f において λ_f の単位変化に対する ΔT_{wh} の変化を表す。つまり、本測定法における原理的な測定精度の指標となる。

計算条件は Fig. 5 の場合と同じであるが、感度は無次元温度の定義から分かるように体積発熱量に比例するため、加熱量はそれぞれの λ_f に対して ΔT_{wh} が $10[\text{K}]$ となるように設定した。なお、Fig. 7~11 においても、加熱量は同様な手法で設定した。

感度は、試料細線の熱伝導率 λ_f が低い領域では急激に低下し、 λ_f が高くなるにつれ、低下の割合が緩やかになる。そして、 λ_f が 1000W/mK のときに、感度は 0.001 程度となる。熱線に白金細線を用いた場合、温度の測定

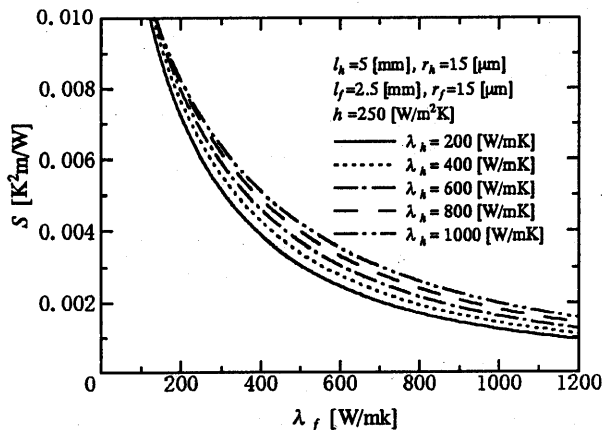


Fig. 6 λ_f vs. S at different thermal conductivities of hot-wire.

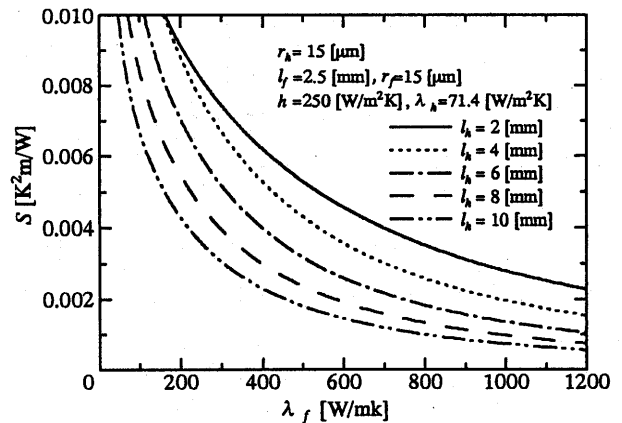


Fig. 7 λ_f vs. S at different length of hot wire.

精度は $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以上あるため、 $S = 0.001$ とは、仮に温度測定に誤差が $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 生じた場合でも、 λ_f には $\pm 10\text{W/mK}$ ($\pm 1\%$) しか誤差がないことを示している。また、熱線の熱伝導率 λ_b の影響に関して見ると、 λ_b が高いほど感度は高くなっている。

Fig. 7 に熱線部全体の長さ l_b (熱線部 I と熱線部 II の長さの和) の影響を示す。縦軸は感度、横軸は試料細線の熱伝導率である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_b=15 \mu\text{m}$, $\lambda_b=71.4\text{W/mK}$
 試料細線 : $r_f=15 \mu\text{m}$, $l_f=2.5\text{mm}$
 細線周りの熱伝達率: $h=250\text{W/m}^2\text{K}$

熱線部の長さが短いほど感度は高く、計算条件のような測定系で熱伝導率が 1000W/mK の試料細線に関し $\pm 1\%$ 以上 ($S > 0.001$) の測定精度を保つには、熱線の長さを 8mm 以下とする必要がある。

Fig. 8 に熱線部に対する試料細線取り付け位置の影響を示す。縦軸は感度、横軸は試料細線の熱伝導率である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_b=15 \mu\text{m}$, $\lambda_b=71.4\text{W/mK}$
 試料細線 : $r_f=15 \mu\text{m}$, $l_f=2.5\text{mm}$

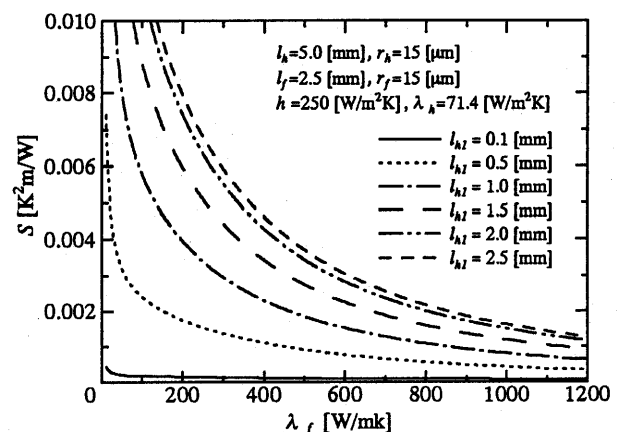


Fig. 8 λ_f vs. S at different attached positions.

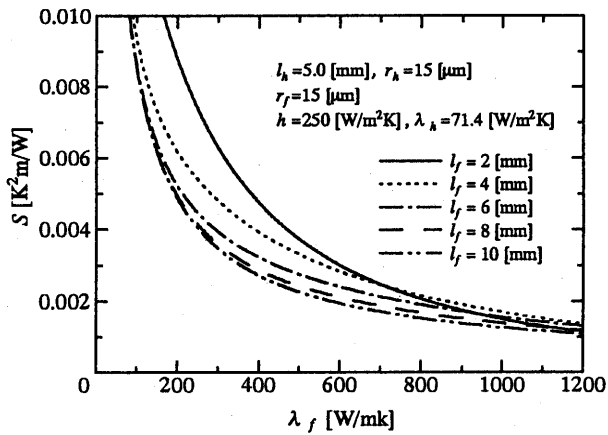


Fig. 9 λ_f vs. S at different length of fiber.

細線周りの熱伝達率: $h=250\text{W/m}^2\text{K}$

熱線部全体の長さは 5mm とし、熱線部 I と熱線部 II の長さの割合を変えて計算を行った。

試料細線は熱線の中央に取り付けた場合が最も感度は高くなっている。また、試料細線の取付け位置が熱線の中央から外れるほど感度の低下率が大きくなっている。計算条件のような測定系で熱伝導率が 1000W/mK の試料細線に関し ±1% 以上の測定精度 ($S > 0.001$) を保つには、試料細線の取付け位置のずれは 1.5mm 以内に押さえる必要がある。

Fig. 9 に試料細線の長さの影響を示す。縦軸は感度、横軸は試料細線の熱伝導率である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_h = 15\ \mu\text{m}$, $l_h = 5\text{mm}$, $\lambda_h = 71.4\ \text{W/mK}$

試料細線 : $r_f = 15\ \mu\text{m}$

細線周りの熱伝達率: $h=250\text{W/m}^2\text{K}$

試料細線の熱伝導率が低い領域では、感度に試料細線の長さの影響があるが、 λ_f が 800W/mk 以上では、試料細線の長さの感度への影響は小さい。なお、 $\lambda_f=1000\text{W/mK}$ における感度は 0.001 以上 (λ_f に対して ±1% 以内) である。

Fig. 10 に試料細線の半径の影響を示す。縦軸は測定部の感度、横軸は試料細線の熱伝導率である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_h = 15\ \mu\text{m}$, $l_h = 5\text{mm}$, $\lambda_h = 71.4\ \text{W/mK}$

試料細線 : $l_f = 2.5\text{mm}$

細線周りの熱伝達率: $h=250\text{W/m}^2\text{K}$

試料細線の熱伝導率が低い領域では熱線試料細線の半径が大きいほど感度は高くなっているが、試料細線の熱伝導率が高くなるにつれ傾向が逆転し、試料細線の半径

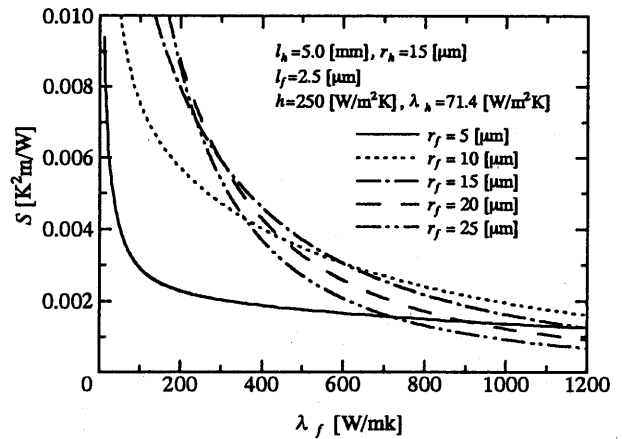


Fig. 10 λ_f vs. S at different radii of fiber.

が小さいほど感度が高くなっている。従って、測定試料の半径が固定された場合、熱線の半径は、試料細線の熱伝導率にしたがって適切な値に設定する必要がある。なお、 $\lambda_f=1000\text{W/mK}$ における感度は 0.001 以上 (λ_f に対して ±1% 以内) ある。

Fig. 11 に細線周りの熱伝達率の影響を示す。縦軸は感度、横軸は試料細線の熱伝導率である。計算条件は以下に示す通りである。

熱線 : $r_h = 15\ \mu\text{m}$, $l_h = 5\text{mm}$, $\lambda_h = 71.4\ \text{W/mK}$

試料細線 : $l_f = 2.5\text{mm}$

感度は細線周りの熱伝達率が低いほど高く、この傾向は試料細線の熱伝導率の値に依存しない。また、細線周りの熱伝達率が 500W/m²K 以下においては、 $\lambda_f=1000\text{W/mK}$ の試料細線に対する感度は 0.001 以上 (λ_f に対して ±1% 以内) を得ている。

以上の結果より、本測定法により直径 30 μm、熱伝導率 1000W/mK のような極微細で高熱伝導率な試料細線に対し、理論的には ±1% 程の精度 ($S > 0.001$) で熱伝導率が測定できることが明らかとなった。しかし、感度は

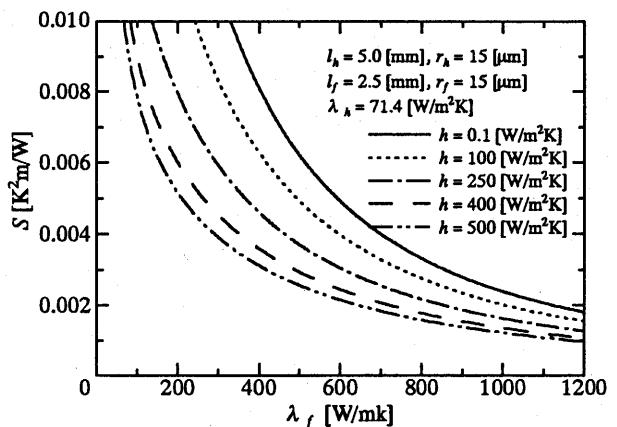


Fig. 11 λ_f vs. S at different heat transfer coefficients.

試料細線の径、熱伝導率により異なるので、精度のよい測定を行なうには計算と実験を比較しながら測定部を製作する必要がある。

6. 結言

極微細な細線の熱伝導率の新しい測定法を提案し、測定精度に関して理論的に検討した。主な結論を列挙する。

- 1) 本測定法の基本となる測定部における熱伝導の理論解を求め、一様発熱する熱線部の体積平均温度上昇量の定常値から試料細線の熱伝導率が求められることを明らかにした。
- 2) 直径 $30\mu\text{m}$ の試料細線を例にとり、本測定法における種々の影響因子と測定精度との関係を理論的に明らかにした。
- 3) その結果、本測定法により直径 $10\sim 30\mu\text{m}$ 、熱伝導率が 1000W/mK の試料細線に関し $\pm 1\%$ 程度の精度で熱伝導率が測定できる目処を得た。

本報では、理論的に本測定法の可能性を検討した。しかし、実際に測定を行なう場合は、熱線と試料細線間の接触熱抵抗、細線周りの熱伝達率、正味の熱線部の長さ等を厳密に検定する必要がある。

引用文献

- (1) D. D. Edie, K. E. Robinson, O. Fleurot, S. P. Jones and C. C. Fain, *Carbon*, 32, 1045 (1994).
- (2) S. H. Yoon, Y. Korai and I. Mochida, *Carbon*, 31, 849 (1993)
- (3) I. Hatta, H. Yao, R. Kato and A. Maesono, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 29, 2851 (1990).
- (4) T. Yamane, S. Katayama and M. Todoki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 80, 4365 (1996).
- (5) L. Piraux, J-P. Issi and P. Coopmans, *Measurement*, 5, 2 (1987).