点接触式温度プローブによる固体熱3定数の測定法 (温度プローブの改良)

Measuring Method of Three Thermophysical Parameters of Solids by a Thermal Probe with Instantaneous Point Contact (Improvement of Thermal Probe)

高橋一郎*、佐藤健一**

Ichiro Takahashi, Ken-ichi Sato

点接触式温度プローブによる熱3定数の測定法は温度プローブが一様温度に加熱できて、その感温部を適当な接触圧で被測定物体表面へ点接触させることを要する。これまでの温度プローブがその要件をどの程度満たし得るかを検討し、本報では熱電対温度プローブの改良と、それを格納するプローブホルダーを開発した。温度プローブの加熱方法に関しては、軸方向に生ずる温度分布が熱物性測定にいかに影響するかを実測と理論解析によって調べた。また、適切な加熱量を検討するため、被測定物体への伝熱量とプローブ加熱量との関係を調べた。測定時の接触熱抵抗の影響度を理論解析した結果、本測定法は適切な接触圧が付加できるため熱抵抗の影響を容易に軽減できる。

The measuring method of three thermophysical parameters (thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity) of solids by a thermal probe with instantaneous point contact has been developed. The thermal probe is required to be uniformly preheated for the measurement. A compact probe holder is also required, which makes it easy for the tip of the probe to touch on a testing surface with a suitable contact-pressure. In this paper, the influence of an initial temperature distribution in the thermal probe on the temperature-response is discussed from the experimental and analytical results. A heated region of the probe is clarified. Influence of thermal contact-resistance between the tip of the probe and the testing surface is analytically examined. This method can reduce the influence to a negligible small. The probe is improved under the necessary conditions, and then the probe holder that is adaptable and easy for anyone to handle is developed.

[**Keywords:** three thermophysical parameters, solids, point contact method, thermal probe]

1. はじめに

近年、各種工業部材の熱伝導率、熱拡散率、比熱容量(本研究ではこれらをまとめて熱3定数と呼ぶことにする)を現位置で同時測定できる方法[1,2]が開発され、その実用化が期待されている。この点接触式温度プローブによる固体熱3定数の測定法では非定常温度応答から接触面積(半径)と熱3定数が同時に求められるため、接触面積

が熱物性値を算出する上で影響を与えない。また、温度プローブを加熱する場合は、被測定物体に対し適当な温度差をつければよく、正確な温度設定を要しないなどの利点がある。これまでは測定原理と被測定物体に関する測定要件、および適用範囲などが検討されてきた[1,2]。しかし、温度プローブへの要件については十分検討されていない。本報は、K熱電対を用いた温度プローブを対象として、温度プローブが満たすべき要件、すなわち温度プローブの加熱位置と加熱量、被測定面とプローブ感温部との接触熱抵抗軽減などについて、実験と理論解析により検討したものである。その結果から、温度プローブを改良し、操作性の良いプローブホルダーを開発した。

* 山形大学工学部機械システム工学科、〒992-5180 米沢市城南4-3-16 Dept. of Mech. Systems Engng. Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa 992-8510
FAX: 0238-26-3205, E-mail: it@yz.yamagata-u.ac.jp

** 山形大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

Fig.1 Thermal penetration area in the probe

2. 熱電対温度プローブ側の温度浸透深さ

測定直前に温度プローブを室温より高い一定温度に保つために、プローブを外部ヒーターで加熱している。しかし、一定発熱源が感温部近くに存在することによる温度応答への影響をできるだけ避けなければならない。そのためには測定時間内におけるプローブ側の温度浸透深さ(初期温度より 0.1K 以上の温度変化が現れる位置 r)を考慮して、ヒーターを感温部からある程度離して取り付けることが重要と考えられる。

プローブ側の温度変化の理論解 [1]から、温度浸透深さの時間変化を求めると Fig.1 が得られる。図の横軸は接触点からの距離であり、縦軸は温度浸透に要する時間である。この計算ではK熱電対を用いた温度プローブを想定し、プローブ側の熱伝導率と熱浸透率値にクロメルの値を用いた。また、各被測定材側のそれらは文献値[3]によった。図中に示す接触半径 r_0 は実際の感温部寸法から見積もった値である。Fig.1 から明らかなように、接触半径の大きいほうが熱移動量が多く温度変化も深く浸透する。被測定物体にもよるが、測定時間の 10 s 以内に温度変化が現れるのは先端から 10 mm 程度までである。したがって、外部ヒーター取り付け位置をプローブの先端から 10 mm 程度離すことが必要である。

3. プローブ側の初期温度分布

3. 1 実測による温度分布

§ 4 で詳述するが、測定時に被測定物体側へ流入する熱量は微小であり、外部ヒーターによる加熱量はほとんど

Fig.2 Thermal probes

プローブホルダー側への熱損失となる。したがって、ヒーターの加熱量を少なくするには熱損失を低減する工夫が必要である。一方、感温部から離れた位置にヒーターを取り付けた場合、プローブ温度は先端部で一様にならず温度分布が生じる。そこで、この初期温度分布の存在による温度応答への影響度を調べた。

Fig.2 に示す Type-A の温度プローブは既報[1]のそれと同様の寸法であるが、加熱部の軸方向温度分布が計測し易いように作ったものである。先端から 8 mm の位置に加熱部長さ 100 mm を設けた。全長 125 mm のステンレスK熱電対(線径 0.13 mm)に線径が 0.076 mm のK熱電対を接続している。この先端からプローブ表面の数箇所に線径 0.05 mm のK熱電対を取り付け、それを直径 40 mm 、長さ 130 mm の発泡スチロール製断熱ホルダーに格納した状態で温度分布を測定した。感温部はその先端を被測定面へ接触させるため、ホルダーからわずかに露出させている。この温度プローブでは、初期温度差 $\Delta T = 30\text{ K}$ を保つのに 0.61 W の加熱量を要し、Fig.3 に示すような温度分布が生じている。

Fig.2 の Type-B はK熱電対(線径 0.076 mm)をセラミックス細管に通し、それをステンレス管に入れて固定したものである。加熱部長さは 13 mm で、樹脂製ホルダー(§ 3-2 で詳述)に入れて感温部先端をキャップでカバーした。

Fig.3 Initial temperature-profile in Type-A probe

Fig.4 Initial temperature-profile in Type-B probe

Type-B の軸方向温度分布は Fig.4 のようになった。先端部における温度勾配が Type-A のそれより格段に小さくなっていることが分かり、初期温度差 $\Delta T = 30\text{K}$ を保つときの加熱量も 0.13W と Type-A に比べ激減した。

3. 2 初期温度分布の温度応答への影響

測定時、温度プローブ側に Fig.3 に示するような初期温度分布が存在する場合の温度応答を理論解析によって調べた。プローブを他端が一定温度に加熱されたフィンと考えると、問題となる先端から加熱部における温度分布は式(1)のような指数関数で表せる。すなわち、

$$T_p(r,0) = T_{p0} + P[1 - \exp\{-S(r - r_1)\}] \quad (1)$$

既報[1]の測定理論では支配方程式が球座標系の伝熱モデルによっているため、この温度分布も同じ座標系で与える。したがって、 r はプローブ先端からの距離を表し、 r_1 は感温点位置である。 P と S はヒーター加熱部

の最高温度とその最高温度が維持される位置によるパラメータである。Fig.3 の一点鎖線は $\Delta T = 30\text{K}$ の場合の式(1)による $T_p(r,0)$ であり、 Δ 印の実測点との比較のため同図に示したものである。その他の条件は

$$T_s(r,0) = T_{s0} \quad (2)$$

$$T_p(\infty, t) = T_{p0} + P \quad (3)$$

$$T_s(\infty, t) = T_{s0} \quad (4)$$

このほか、プローブと被測定物体の接触界面 $r = r_0$ における温度と熱流の連続条件を付与することによって、既報[1]の支配方程式を解けば、プローブ感温点 $r = r_1$ における温度が次式のように得られる。すなわち、

$$T_p^* = \left[\frac{\beta}{\eta(\beta+1)} - \frac{P\{Sr_0 + \beta\} \exp\{-S[r_0 - r_1]\} - P\beta}{\eta\Delta T(\beta+1)} \right] \times \text{erfc}\left(\frac{C}{\sqrt{t}}\right) + \left[\frac{\zeta - \beta}{\eta(\beta+1)(\zeta+1)} + \frac{P\{Sr_0(\zeta+1) - (\zeta - \beta)\} \exp\{-S(r_0 - r_1)\} + P(\zeta - \beta)}{\eta\Delta T(\beta+1)(\zeta+1)} \right] \times \exp\left(X^2 - \frac{C^2}{t}\right) \text{erfc}(X) \quad (5)$$

ここで、各パラメーターは、 $\Delta T = T_{p0} - T_{s0}$

$$X = \frac{C}{\sqrt{t}} + \frac{(\beta+1)(\eta-1)}{2C(\zeta+1)} \sqrt{t}$$

$$\eta = \frac{r_1}{r_0}, \quad C = \frac{r_1 - r_0}{2\sqrt{a_p}}, \quad \beta = \frac{\lambda_s}{\lambda_p}, \quad \zeta = \frac{\xi_s}{\xi_p}$$

この温度応答解において各[]内の第 2 項が初期温度分布による影響度を表している。ところで、式(1)によるプローブ初期温度分布では、感温点 $r = r_1$ での温度勾配が $\partial T_p / \partial r = PS$ である。よって、この温度勾配を小さくするためには PS を小さくしなければならない。

加熱部最大温度 P は初期温度差 ΔT と連動して変化する。しかし、無次元温度応答には ΔT による影響がほとんど現れない[2]。したがって、 P より S のほうが温度応答への影響が大きいと考えられる。Fig.3 の加熱部最高温度位置から $S[\text{mm}^{-1}]$ を見積ると 0.06 となる。この条件下の式(5)による理論温度応答は、熔融石英の測定では Fig.5 となり、また純アルミニウムでは Fig.6 のようになる。アルミニウムではこの初期温度分布によって温度応答がわずかに低くなるだけであるが、熔融石英の場合は

Fig.5 Theoretical temperature-responses

Fig.6 Theoretical temperature-responses

影響が顕著に現れている。つまり、熱浸透率が低い非金属材料ではプローブ温度が逆に上昇し、無次元温度 T_p^* が時間経過に伴い低下する現象が現れることが分かる。

Type-B 温度プローブでは先端の露出部分をキャップで覆うことにより、**Type-A** に比べ P は 3 分の 1 に、 S 値は 5 分の 1 程度になった。この場合の計算結果は省略するが、理論温度応答曲線では初期温度分布による影響がほとんど無視できるオーダーになった。

プローブ先端をキャップで覆うようにしたプローブホルダーの断面構造を Fig.7 に示す。これにはマイクロスイッチが組み込まれており、プローブ感温部が被測定面へ接触する時点と温度応答開始点とを対応づけることができる。また、透明アダプターと被測定面との接触面に熱電対を取り付けて被測定物体の初期温度 T_{s0} を測定している。測定時に、このホルダーのグリップ部を手で押し下げると、内側ホルダーが迫り出してキャップを押し下げ、感温部先端が被測定面へ接触する仕組みである。

(a) Preheating (b) Measuring
Fig.7 Newly developed thermal probe-holder

測定時のプローブ先端と測定面との接触圧は透明アダプターのねじ込み量によって調節する。このプローブホルダーは樹脂製であり、小型軽量化を図ったものである。

4. 接触界面における伝熱量

接触面(接触半径 r_0)を通る伝熱量 $Q(t)$ は $r=r_0$ における熱流束に半球面状伝熱面積 $2\pi r_0^2$ を乗じて得られる。その熱流束は

$$q(t) = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \quad (6)$$

この $\partial T_s / \partial r$ は既報[2]に示された被測定物体側の非定常温度の理論解 $T_s^*(r, t)$ を用いて算出できる。一例として、JIS SUS304 試料に対し K 熱電対プローブを $\Delta T=30K$ 、 $r_0=0.168 \text{ mm}$ で接触させた場合について Fig.8 に示す。この図のように、 $Q(t)$ は接触直後に大きくなり約 0.1 s

Fig.8 Heat transfer rate from the probe to the sample

経過後にほぼ一定量となる。この傾向は被測定物の材質によらず全ての場合に見られる。1 s 後の $Q(\dot{\theta})$ は JIS SUS304 の場合 7.4mW、熔融石英では 1.3mW、アルミニウムでは 12.6mW であった。前述のように Type-B 温度プローブでは初期温度差 $\Delta T=30\text{K}$ を保つための加熱量が 0.13W であり、それと比べると $Q(\dot{\theta})$ はその 1～10% 程度になっている。

5. 接触熱抵抗の影響

被測定面と温度プローブとの接触界面における接触熱抵抗が温度応答へ影響する度合いを理論解析によって調べる。

接触界面では温度の不連続があるとして、接触熱コンダクタンス h を以下のように定義する。ただし、 h は非定常伝熱場でも一定であり、界面における熱流量は連続と仮定する。

$$r=r_0 \text{ で、 } \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = h(T_p - T_s) \quad (7)$$

そして、測定理論[1]の初期条件及び境界条件と同じく、

$$T_p(r, 0) = T_{p0}, \quad T_s(r, 0) = T_{s0} \quad (8)$$

$$T_p(\infty, t) = T_{p0}, \quad T_s(\infty, t) = T_{s0} \quad (9)$$

以上の条件下で、プローブ感温点 ($r=r_1$) における温度応答の理論解を求めると次式を得る。

$$\begin{aligned} T_p^* = & \frac{C_6}{\eta C_2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{C}{\sqrt{t}} \right) - \exp \left(C_1^2 - \frac{C^2}{t} \right) \operatorname{erfc}(C_1) \right\} \\ & + \frac{C_7}{\eta C_4} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{C}{\sqrt{t}} \right) - \exp \left(C_3^2 - \frac{C^2}{t} \right) \operatorname{erfc}(C_3) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、各パラメータは、

$$\begin{aligned} C_1 = & \frac{C}{\sqrt{t}} + \frac{C_2 \sqrt{a_p t}}{C_5}, \quad C_3 = \frac{C}{\sqrt{t}} + C_4 \sqrt{a_p t} \\ C_2 = & \frac{r_0}{2} \left[\zeta(\alpha+1) + \alpha\beta + 1 \right. \\ & \left. - \sqrt{\{\zeta(\alpha+1) + \alpha\beta + 1\}^2 - 4\alpha\zeta\{\beta(\alpha+1) + 1\}} \right] \\ C_4 = & \frac{r_0}{2C_5} \left[\zeta(\alpha+1) + \alpha\beta + 1 \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \sqrt{\{\zeta(\alpha+1) + \alpha\beta + 1\}^2 - 4\alpha\zeta\{\beta(\alpha+1) + 1\}} \right]$$

$$C_5 = \zeta\alpha r_0^2, \quad C_6 = \frac{r_0 \zeta C_2 - \beta C_5}{C_2 - C_4 C_5}$$

$$C_7 = \frac{\beta - \zeta C_4 r_0}{C_2 - C_4 C_5}, \quad C = \frac{r_1 - r_0}{2\sqrt{a_s}}, \quad \alpha = \frac{\lambda_p}{hr_0}$$

この無次元パラメータ α が接触熱抵抗の影響度を決定づける。被測定物体を JIS SUS304 とし、プローブ側の熱伝導率と熱浸透率にクロメル値を与えた場合、Fig.9 のような理論温度応答が得られる。これより、 α が大きくなるほど温度応答が遅れ、 T_p^* が小さくなることがわかる。

接触半径が $r_0=0.168 \text{ mm}$ の K 熱電対で $\alpha=7.5$ の場合は $h=10^4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ になる。 h は表面粗さにもよるが、この値は通常の金属同士の平面接触界面において 10MPa 程度の接触圧をかけた場合に相当する[4]。本測定では接触面積が微小であるため、プローブへ 1 N 程度の荷重をかけても接触圧が 10MPa 以上となる。したがって、 α が 7.5 より小さくなるように接触させることは容易である。

Fig.9 Influence of thermal contact-resistance upon temperature response

6. 装置構成

本測定法的全装置構成を Fig.10 に示す。これらは小型軽量であり、携帯が容易で操作も簡単である。改良した温度プローブを用いて金属及び非金属材料の常温における温度応答を測定した結果を Fig.11 に示す。これらは、各 5 回の測定値を重ね書きしたものであり、これらの温度応答曲線から熱 3 定数(熱伝導率、熱拡散率、比熱容量)を算出した結果は再現性が約 10% 程度に収まっている。

Fig.10 Measuring system of this method

Fig.11 Measured temperature-responses

7. おわりに

点接触式温度プローブによる固体熱3定数の測定法において、温度プローブに対する諸要件を検討した。その結果を基にして温度プローブを改良し、操作性の良いプローブホルダーを開発した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) プローブに外部ヒーターを取り付ける場合、温度プローブ側の温度浸透深さを考慮すると、先端から 10 mm 程度離す必要がある。
- (2) 温度プローブに存在する初期温度分布の影響を軽減する工夫が必要である。それには、被測定物体と接触する直前までプローブ感温部を露出しないようにキャップをすることが効果的である。

- (3) 金属試料の場合、温度プローブ先端と被測定面との接触熱コンダクタンスは $h=10^4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 以上を必要とする。この h は通常 10MPa 程度の接触圧下で実現できる大きさであるが、本測定法では接触面積が微小であることから、この条件を容易に満たすことができる。

【謝辞】

本研究は米沢電線(株)の研究助成を受けて遂行されたことを記し謝意を表します。また、実験に協力された本学大学院学生、熊野和浩君に感謝致します。

NOMENCLATURE

- a : thermal diffusivity, $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 $C, C_1 \sim C_7$: constant
 erfc : complementary error-function,

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du$$

 h : thermal contact-conductance, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
 P : parameter defined in Eq.(1), K
 $Q(r)$: heat transfer rate at $r=r_0$
 r : radial distance
 r_0 : radius of hemispherical contacting surface, mm
 r_1 : position of temperature sensing point, mm
 S : parameter defined in Eq.(1), mm^{-1}
 T : temperature, K
 T_p^* : dimensionless temperature,

$$= (T_p - T_{p0}) / (T_{s0} - T_{p0})$$

 ΔT : initial temperature-difference, $= T_{p0} - T_{s0}$
 t : time, s
 α : dimensionless parameter, $= \lambda_p / (h \cdot r_0)$
 β : dimensionless parameter, $= \lambda_s / \lambda_p$
 ζ : dimensionless parameter, $= \xi_s / \xi_p$
 η : dimensionless parameter, $= r_1 / r_0$
 λ : thermal conductivity, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 ξ : thermal effusivity, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}^{-1}$

Subscript

- s : values of testing sample
 p : values of thermal probe

参考文献

- [1] 高橋一郎、榎森正晃；熱物性、13(1999),246-251.
- [2] 高橋一郎、榎森正晃；熱物性、13(1999),252-257.
- [3] 日本機械学会編；「伝熱工学資料」(改訂第4版)(養賢堂、1996).
- [4] M.R.Sridhar, M.M. Yovanovich ; Trans.ASME, J.Heat Transf.,118(1996),3-9.

[Received May 10, 2002, Accepted Sept. 19, 2002]