

積層造形用材料の各種物性測定に関する研究
 金属粉末およびレーザー焼結材の熱伝導率

金沢大学 古本達明 上田隆司 細川 晃 田中隆太郎

金沢大学大学院 Yassin Abdullah 塚本 卓 松下電工株式会社 阿部 諭

Study on the measurement of physical properties in the materials for rapid prototyping
 Thermal conductivity of metal powder and sintered materials

Kanazawa University Tatsuaki FURUMOTO, Takashi UEDA, Akira HOSOKAWA, Ryutaro TANAKA

Kanazawa university graduate school Yassin Abdullah, Takashi TSUKAMOTO, Matsushita Electric Works, Ltd. Satoshi ABE

A simple measurement method of a thermal conductivity in fine metal powder for rapid prototyping is proposed. When the heating time to the metal powder t is short enough compared with the time until the metal powder reaches the maximum temperature T ($t/T < 0.1$), and the measurement depth from a surface Z is longer than the diameter of the heat source a ($Z/a > 1.23$), it is shown that the thermal conductivity of a metal powder can be calculated precisely by measuring the time that the temperature reaches the maximum value. As work materials, SCM powder and copper powder are used. As a result, the thermal conductivity of a metal powder and a sintered material are quite small compared with that of a metal, and the materials, the shapes and the diameter of a metal powder have little influence on the thermal conductivity.

1. 緒言

金属粉末をレーザー焼結して高精度金型を造形するには、レーザー光の吸収・透過特性や生じた熱の熱伝導特性を把握することが重要となる。本研究では、粉末表面に照射したレーザー光で生じた熱が、内部の一定距離離れた位置まで伝導する時間を測定することで、簡易的に粉体の熱伝導率を算出する手法を提案する。そして、粒径や材質の異なる粉末の熱伝導率を測定し、その特性を調べた。また、これらの粉末をレーザー焼結した試料についても熱伝導率測定を行ったので、以下に報告する。

2. 熱伝導率測定の理論的検討

図1(a)に示す半無限体の物体表面上の点熱源から瞬間的に加熱されるモデルにおいて、加熱 t 秒後の深さ z の位置における温度上昇 ΔT_p は、温度伝導度を $\kappa(\text{m}^2/\text{s})$ として次式で表される¹⁾。

$$\Delta T_p = \frac{Q}{4(\pi\kappa t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \quad (1)$$

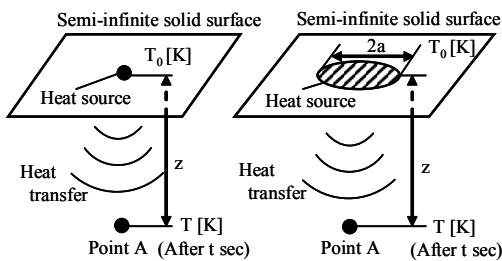
本式の Q は、瞬間点熱源モデルの発熱量を $Q_p(\text{J})$ 、密度を $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、比熱を $C(\text{J}/\text{kgK})$ として、 $Q_p = Q\rho C$ を満足する値である。深さ z の位置が最高温度に到達するまでの時間 t_{pmax} は、式(1)から $d(\Delta T_p)/dt = 0$ で求め、整理すると以下の式が得られる。

$$t_{pmax} = \frac{z^2}{6\kappa} \quad (2)$$

また、最高温度 T_{pmax} は、以下の式で表される。

$$T_{pmax} = \frac{0.147Q}{z^3} \quad (3)$$

一方、図1(b)に示す半無限体の物体表面に存在する半径 a の円熱源から瞬間的に加熱されるモデルにおいて、加熱 t 秒後の深さ z の位置における温度上昇 ΔT_c は、以下の式で表される¹⁾。



(a) point source (b) disc source
 Fig.1 Model of heat source at semi-infinite solid

$$\Delta T_c = \frac{q}{\sqrt{\pi\kappa t}} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right\} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) \quad (4)$$

本式における q とは、瞬間円板熱源モデルにおける発熱量を $Q_c(\text{J})$ として、 $Q_c = \pi a^2 q \rho C$ 次式を満足する値である。このとき、深さ z の位置が最高温度に到達する時間は、式(4)から $d(\Delta T_c)/dt = 0$ で求め、整理すると以下の式が得られる。

$$\frac{z^2}{4\kappa t} - \frac{1}{2} = \frac{a^2}{4\kappa t} \frac{\exp(-a^2/4\kappa t)}{1 - \exp(-a^2/4\kappa t)} \quad (5)$$

このとき、 $a^2/4\kappa t < 0.1$ の条件を満たせば、式(5)の右辺は 1 に近似できる。したがって、瞬間円板熱源における深さ z の位置での最高到達時間 t_{cmax} は、式(5)を整理して式(2)と同様になる。以上の結果から、 $a^2/4\kappa t < 0.1$ を満足する場合、すなわち $Z/a > 1.22$ を満たせば、瞬間円板熱源を瞬間点熱源と見なすことができる。

図1(a)に示す点熱源から連続的に加熱されるモデルにおいて、加熱 t 秒後の深さ z の位置における温度上昇 ΔT_{cp} は、以下の式で表される⁶⁾。

$$\Delta T_{cp} = \frac{q'}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}} \quad (6)$$

本式における q' とは、式(1)で用いている Q について、加熱時間を Δt として、 $Q = q' \Delta t$ を満足する値である。ここで、加熱時間が有限時間 Δt 秒である場合、加熱開始 t 秒後の深さ z の位置における温度上昇 $\Delta T_{cp}'$ は、次式で表される。

$$\Delta T_{cp}' = \frac{q'}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}} - \frac{q'}{2\pi\kappa z} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa(t - \Delta t)}} \quad (7)$$

また、深さ z の位置が最高温度 T_{cpmax} になるとき、加熱する有限時間 Δt を $\Delta t = \beta t$ と定義し、式(2)、式(7)から次式が得られる。

$$T_{cpmax} = \frac{3Q}{\pi\beta z^3} \left(\operatorname{erfc} \sqrt{1.5} - \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{1.5}{1-\beta}} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\beta \leq 0.1$ を満たせば式(8)は式(3)で得られた瞬間点熱源における最高温度 T_{pmax} と等しくなる。したがって、加熱する有限時間 Δt と、深さ z の位置が最高温度に到達する時間 t_{cpmax} が、 $\Delta t/t_{cpmax} \leq 0.1$ 次式を満たせば、連続熱源を瞬間熱源と見なせる。

これらの結果から、被測定材料の熱伝導率 K は式(2)を整理して次式で算出できる。すなわち、深さ z の位置での最高到達時間 t_{cmax} を測定することで、粉末の熱伝導率が算出できる。

Table 1 Heat source for measuring thermal conductivity

Laser type	Yb: fiber (CW)	
Wavelength	λ	1075 nm
Spot size	2a	3.5 mm
Irradiation time	Δt	3 sec
Irradiation energy	E	26.1 J

Table 2 Specification of the metal powder

Material	SCM		Cu	
Shape	regular			
Particle diameter [μm]	30	10	30	10
Specific heat ⁸⁾ C [J/g·K]	0.46		0.38	
Bulk density (measured) ρ [kg/m ³]	4688	4690	4688	4783

Table 3 Specification of the laser for sintering the powder

Laser type	Yb: fiber (CW)	
Wavelength	λ	1075 nm
Laser power	P	200 W
Spot size	2a	84 μm

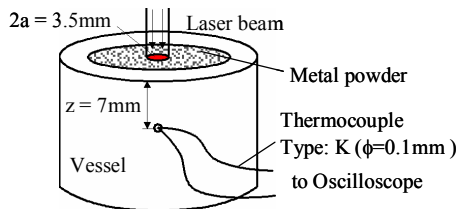


Fig.2 Schematic illustration of experimental set-up

$$K = \frac{z^2 \rho C}{6t_{cmax}} \quad (9)$$

3. 実験方法

3.1 金属粉末の熱伝導率測定

熱伝導率測定方法を図2に示す。熱源として表1に示すファイバレーザを用い、熱電対は粉末表面から7mmの位置に固定する。レーザ照射に起因して粉末内部が温度上昇することで生じる起電力をオシロスコープで出力させ、レーザ照射開始から熱電対の出力が最大になるまでの時間 t_{cmax} を計測する。なお、レーザのビーム径 2a は 3.5mm で、粉末表面からの測定深さ z が 7mm であるため、 $Z/a=4$ となり、前述した条件を十分満たしている。

測定した金属粉末は SCM 粉末と銅粉末であり、共に平均粒径が 10 μm と 30 μm で球形状のものを用いた。熱伝導率の算出に必要な比熱 C は文献より引用し²⁾、かさ密度 ρ は、表2に示すように各粉末を 10ml のメスシリンダ内部に充填し、その重量を精密天秤で測定して算出した実測値を用いた。

3.2 焼結材料の熱伝導率測定

SCM 粉末に銅粉末を混合した試料をレーザ焼結して、レーザフラッシュ熱定数測定装置を用いて熱伝導率測定を行った。測定は、金属光造形複合加工機を用いて 10×10×3mm の大きさに造形した試料について、試料表面を切削加工して仕上げたものを用いた。本加工機のレーザ仕様を表3に示す。

4 実験結果および考察

4.1 金属粉末の熱伝導率

図3は、球形状の SCM 粉末および銅粉末を用いて熱伝導率を測定した結果である。文献より引用した各材料の熱伝導率も併せて示す²⁾。銅の熱伝導率は、SCM 材のそれと比較して約 10 倍大きいにもかかわらず、各粉末における熱伝導率は 0.14~0.18W/mK と著しく小さい。また、材質による違いがほとんど

Table 4 Heat source for measuring thermal conductivity

Form	Powder	Sintered	Bulk(SCM)
Density ρ [kg/m ³]	4200	7400	7800
Thermal Conductivity K [W/mK]	0.14	8.04	40

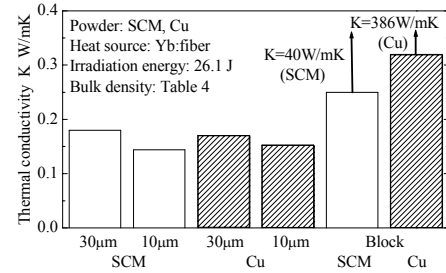


Fig.3 Comparison between SCM powder and copper one

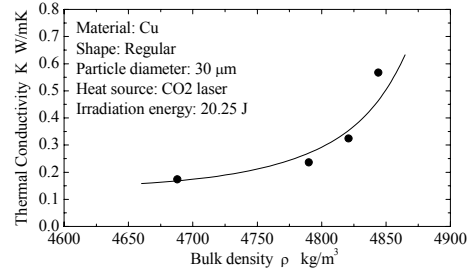


Fig.4 Relation between the bulk density and thermal conductivity

無い。これは、各粉末中に介在する空隙の影響によると考えられ、空隙に存在する空気熱伝導率が小さく³⁾、熱抵抗が大きくなって熱伝導特性が低下したためと考えられる。

そこで、かさ密度の異なる試料を作成して熱伝導率を測定した結果を図4に示す。図より、かさ密度が大きくなるにつれて熱伝導率も上昇していることから、粉末の熱伝導率が、内部の空隙に起因する熱抵抗に大きく影響を受けることがわかる。

4.2 焼結金属の熱伝導率

表4は、金属粉末のレーザ焼結前後における熱伝導率を比較した結果である。焼結材の熱伝導率が著しく大きくなっている。しかしながら、バルク材と焼結材の熱伝導率は、密度がほぼ等しいにもかかわらず焼結材の熱伝導率は 1/5 以下である。これは、焼結材料が積層構造物であり、積層による界面の存在によって熱伝導特性が悪くなったためと考えられる。

5. 結言

本研究では、金属粉末における熱伝導率の簡易的測定手法の提案を行うと共に、金属粉末や焼結材料の熱伝導率を測定した。以下に、得られた結果を要約する。

- 1) 半無限体の材料表面において、円板熱源を点熱源と見なせる条件、および連続熱源を瞬間熱源とみなせる条件を見出し、簡易的な熱伝導率測定手法を提案した。
- 2) 金属粉末の熱伝導率は粉末内部の空隙の影響を受け、また、焼結材料の熱伝導率は積層構造の界面の影響を受けて、各バルク材の熱伝導率と比較して小さくなる。

謝辞

本研究は、戦略的基盤技術力強化事業[金属光造形複合加工技術の高度化による革新的金型製造法の研究開発](H15-17)、地域新生コンソーシアム[金属光造形と成形技術の高度化による企業連携グリッドモデル構築](H18)による成果である。

参考文献

- 1) H.S.Carlslaw and J.C.Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press (1959) p.255.
- 2) 日本機械学会編：機械工学便覧、丸善(株)(1987)A6-176.
- 3) 日本機械学会編：伝熱工学資料(改訂第4版)、丸善(株)(1986) p.329.