



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	レーザーフラッシュ法による熱伝導率データの信頼性におよぼす試験片の状態の影響
Author(s)	大久保, 賢二; 寺田, 芳弘; 毛利, 哲雄 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 175, 97-106
Issue Date	1995-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42458
Type	departmental bulletin paper
File Information	175_97-106.pdf



レーザーフラッシュ法による熱伝導率データの信頼性におよぼす 試験片の状態の影響

大久保 賢 二 寺 田 芳 弘
毛 利 哲 雄 鈴 木 朝 夫

(平成 7 年 6 月 21 日受理)

Effects of Sample Conditions on the Reliability of Thermal Conductivity Data taken by the Laser-flash Method

Kenji OHKUBO, Yoshihiro TERADA, Tetsuo MOHRI and Tomoo SUZUKI

(Received June 21, 1995)

Abstract

The laser-flash method is very convenient way to measure thermal conductivity. It requires a coin-shaped specimen $10\text{ mm}\phi \times 2\text{ mm}$ in size. In some intermetallic compounds, however, brittleness can interfere with preparation of a sample with good geometry. The effects of the parameters of specimen thickness, surface shape and surface condition were investigated using the well-established materials; copper, brass and alumina, which have representative levels of high, medium, and low thermal conductivities, respectively. Thermal conductivity was found to be sensitive not to thickness or shape, but to surface condition in every material.

1. 緒 言

金属間化合物は次世代の高温構造用材料として注目されており、高温強度および延性の向上を目指して、現在、引張り特性やクリープ特性などの機械的性質が活発に調査・報告されている^{1)~6)}。ジェットエンジンのタービンブレードをはじめとする高温耐熱材料は、高温使用中に局所的な高温領域（ホットスポット）を形成し、局所的な材質劣化を招くことが予想される。高温耐熱材料は優れた機械的性質だけではなく、良好な熱伝導率を備えていることも必要である。しかし、金属間化合物における熱伝導率の系統的な検討はこれまでほとんど行われていない。これは、大半の金属間化合物は脆く、棒状の試料を必要とする従来の方法での熱伝導率測定は極めて困難なためである⁷⁾。

最近、熱伝導率の測定法としてレーザーフラッシュ法が開発された。レーザーフラッシュ法は、計測に必要な試料が 1 円玉サイズと小さいこと、赤外線検出器を用いた非接触温度測定が可能であること、測定時間が短時間であることなど利点の多い測定方法である⁸⁾。とくに、1 円玉サイズ

試料の作成は脆性材料においても容易であり、これにより金属間化合物の熱伝導率測定は従来より簡単に行えるようになった。現在、これを用いて金属間化合物の熱伝導率の系統的な調査を開始している^{9,10)}。しかし、一部の金属間化合物は極めて脆いため、規定のサイズ(10mm ϕ $\times$ 1~3 mm)に試料を切り出すことができない場合が生じる。試料の状態が規定からはずれた場合、その不正さが熱伝導率の計測値に及ぼす影響は明らかではない。これらの影響をまず明確にしておく必要がある。

本研究では、レーザーフラッシュ法により求めた熱伝導率値に及ぼす i) 試料厚さの影響, ii) 試料形状の影響, および iii) 試料の表面状態の影響について熱伝導率の既知の物質について検討する。用意した材料は、熱伝導率の高い純銅、中程度の7-3黄銅、および低いアルミナの3種類である。

2. 実験方法

レーザーフラッシュ法による熱伝導率測定の概略を図1に示す。レーザーフラッシュ法では、厚さ一定の円盤状試料の片面にレーザーパルス照射し、反対面の温度履歴曲線を赤外線温度感知器により求める。図1に得られる温度履歴曲線をあわせて示す。この温度履歴曲線は、熱拡散方程式の解である式(1)により表すことができる¹¹⁾。

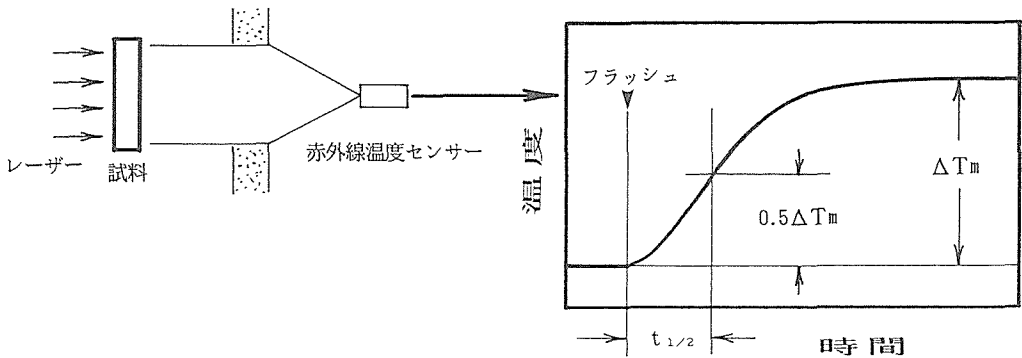


図1 レーザーフラッシュ法による熱伝導率の測定機構の概略図。

$$\Delta T = \Delta T_m \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \pi^2 \alpha t / L^2) \right\} \quad (1)$$

ここで、 ΔT は試料の上昇温度、 ΔT_m は最大上昇温度、 α は試料の熱拡散率、 t はパルス照射後の経過時間、 L は試料の厚さである。図1の温度履歴曲線において、 $\alpha t / L^2 = 0.1388$ のとき $\Delta T / \Delta T_m = 0.5$ となることが Parker らによって示されている¹²⁾。したがって、試料の上昇温度 ΔT が ΔT_m の半分に達するまでの時間($t_{1/2}$)を計測すれば、熱拡散率 α は式(2)により求めることができる。

$$\alpha = 0.1388 L^2 / t_{1/2} \quad (2)$$

また、試料の最大上昇温度 ΔT_m は、比熱容量 C_p と式(3)の関係にある¹¹⁾。

$$C_p = Q / \rho \cdot L \cdot \Delta T_m \quad (3)$$

ここで、 ρ は試料の密度、 Q はレーザーパルス当てたときに試料が吸収する熱量である。吸収熱量 Q は本研究で用いたレーザーフラッシュ装置において1.5Jである。温度履歴曲線から熱拡散率

α および比熱容量 C_p を求めることにより、熱伝導率 λ は式(4)により算出することができる¹¹⁾。

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho \quad (4)$$

熱伝導率測定用の試料は、いずれも直径10mm ϕ の棒材を所定の厚さ、および形状にファインカッターを用いて切り出した後、試料の表裏面の平行を自動研磨機により整えたものである。平行の精度は厚さの0.5%以内である。純銅と黄銅はいずれも fcc 単相であり結晶粒径は純銅で約100 μ m、黄銅で約20 μ m である。レーザーフラッシュ法による熱伝導率の測定は ULVAC 社製の TC-7000 により室温で行った。また、本研究で用いた3種の材料、すなわち純銅、黄銅、およびアルミナの密度はデータブックからの値を採用した¹³⁻¹⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 試料厚さの影響（熱拡散率，熱容量，熱伝導率）

純銅，黄銅，およびアルミナにおける熱拡散率 α と試料厚さ L の関係を図2に示す。純銅においては、厚さ1mm以下の範囲で熱拡散率 α は試料厚さ L の増加にともない増加する。厚さ1mm以上になると α は $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ と一定となっている。本測定装置において推奨している試料厚さ L は1～3mmであるが、純銅においては L が5mmとなっても熱拡散率 α は $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ で一定となる。黄銅，およびアルミナにおいても、熱拡散率は厚さ1mm以下の範囲で試料厚さの増加に伴い増加し、厚さ1～4mmの範囲において α はそれぞれ0.3および $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ でほぼ一定となる。

本研究において使用したすべての材料において試料厚さ L が1mm以下の範囲で L の増加に伴い熱拡散率が増加するのは、円盤状試料に発射されるレーザーパルスに時間的な幅があるためである¹⁶⁾。すなわち、検出面における温度上昇曲線が式(1)で表現されるための必要条件是、受光面へのレーザーエネルギー授与が無限小時間の間に行われることである。しかし、実際の測定において、1回のレーザーパルスによるエネルギー授与時間は有限であり、本実験装置においては0.5msとなっている。純銅の場合を例にとると、試料厚さが3mmと厚い場合には検出面における温度上昇が完了するのに要する時間 t_e は約50msであり、レーザーエネルギー授与時間に比べ100倍も大きい。これに対し、試料厚さが0.5mmの場合には t_e は3msとエネルギー授与時間のわずか6倍となり、レーザーエネルギー授与時間が問題となる。試料の温度上昇はパルスの前面が試料に達した時点で開始する。このため、 L が小さい場合には図1で示した温度上昇曲線は相対的に下方向に遷移し、 $t_{1/2}$ は本来の値よりも長時間側に遷移してしまう。このため、熱拡散率 α は試料厚さ L が減少するに伴い減少するものと考えられる。

各試料における熱容量 C_p と試料厚さ L の関係を図3に示す。純銅においては、試料厚さ5mm以下の範囲で熱容量は $0.4 \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ の一定値を示す。また、黄銅，およびアルミナにおいては厚さ4mm以下の範囲で、熱容量はそれぞれ0.39および $0.8 \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ の一定値を示す。いずれの材料においても、熱容量は試料厚さによらず一定となる。

以上の熱拡散率 α および熱容量 C_p の測定結果から式(4)を用いて純銅，黄銅，アルミナの熱伝導率を算出できる。なお、純銅，黄銅，アルミナの密度は、それぞれ、8.93, 8.55, 3.99 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ である¹³⁻¹⁵⁾。得られた熱伝導率を試料厚さに対して示したのが図4である。純銅においては試料厚さ1mm以下の範囲で熱伝導率 λ は試料厚さ L の増加に伴い増加する。厚さ1mm以上において λ は $420 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ で一定となる。黄銅およびアルミナにおいても、熱伝導率は試料厚さ1mm以下の範囲で厚さの増加に伴い増加し、厚さ1mm以上において λ はそれぞれ110および $35 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ でそれぞれ一定となる。熱伝導率の試料厚さに対する変化は、いずれの材料においても熱拡散率の場合と同

様であり、熱伝導率は比熱容量よりも熱拡散率による影響が大きい。いずれの材料においても、試料厚さ1~4mmの範囲において熱伝導率は一定となる。

高温耐熱材料を含む多くの材料は多元合金であり、その熱伝導率は最大でも $100\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 程度である。本研究で用いている黄銅の熱伝導率の値に代表される程度である。試料厚さ1~3mmの範囲であれば熱伝導率は問題なく測定できることになる。なお、マニュアルで定められた試料厚さは1~3mmであるが、2~3mmの範囲に試料厚さを調整することが好ましい。

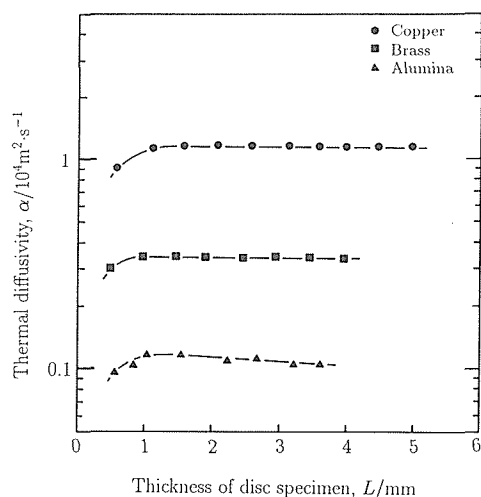


図2 純銅，黄銅，およびアルミナにおけるレーザーフラッシュ法により測定した熱拡散率と試料厚さの関係。

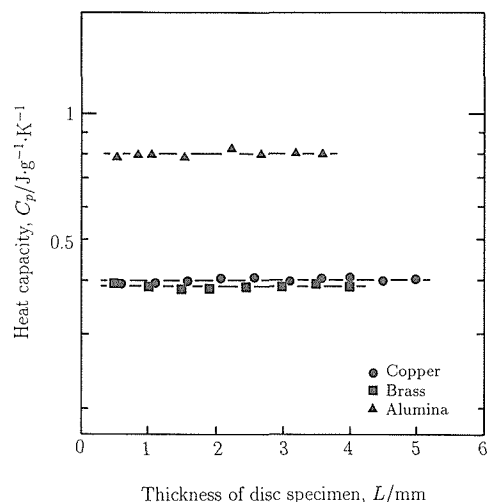


図3 純銅，黄銅，およびアルミナにおけるレーザーフラッシュ法により測定した熱容量と試料厚さの関係。

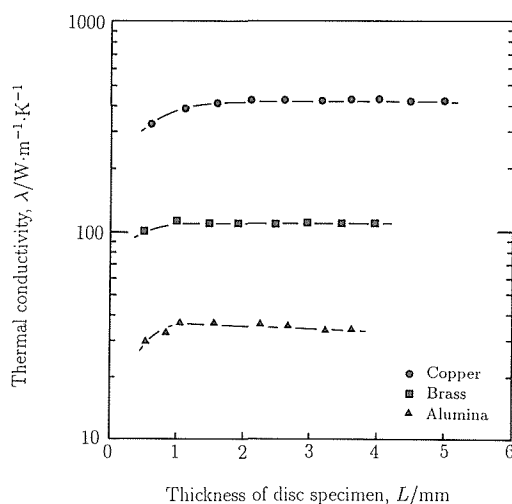


図4 純銅，黄銅，およびアルミナにおけるレーザーフラッシュ法から求めた熱伝導率と試料厚さの関係。各材料の密度はデータブック¹³⁻¹⁵⁾から検索した。

3.2 試料形状の影響（熱拡散率，熱容量，熱伝導率）

一部の金属間化合物は非常に脆く，規定の円形形状に成形できないという問題が現実が生じている。準備した試料の形状を図5に示す。図5のdを10～5mmに変えることにより様々な形状の試料を作成した。これらの形状を持つ試験片は，円形試料の両端をファインカッターで切断することにより得た。規定サイズの10mm ϕ の面積を1としたときの面積比を試料幅 w に対して示したものが表1である。なお，試料幅が5mm以下になると発射されたレーザー光が直接赤外線検出器に入り検出器を壊す可能性があるため試料幅は5mm以上とした。これまで熱伝導率の測定を行った材料の中で最も脆いものでも短片5mm以上の健全な楕円板を切り出すことは容易であり，実際的にも試料幅 w が5mm以上の場合について検討すれば十分である。w=5mmのとき試験片の面積比は0.6にまで減少する。

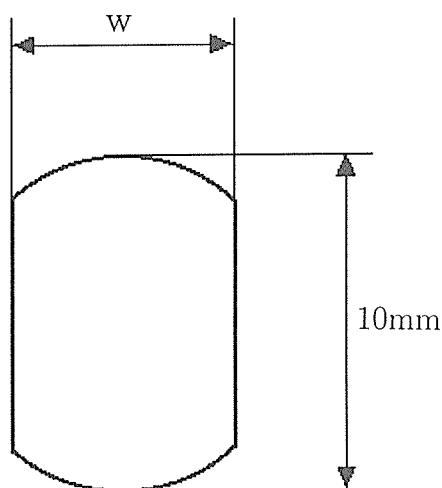


図5 実験において用いた試料の形状。試料幅 w が5～10mmの場合について検討を行った。

表1 試料幅 w を変えたときの試料表面の面積比。
面積比は直径10mmの円盤状試料の面積で規格化して示した。

w (mm)	10	9	8	7	6	5
面積比	1	0.95	0.88	0.81	0.71	0.60

黄銅における熱拡散率と試料幅 w の関係を図6に示す。なお，試料幅 w は10mmを基準としているため，図中右方向ほど w が減少するように横軸をとっている。試料幅が10mmから5mmに減少しても熱拡散率 α は $0.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ で一定である。熱容量 C_p と試料幅 w の関係を図7に示す。試料幅が0.5まで減少しても比熱容量も $0.39 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ で一定となる。以上求めた熱拡散率および比熱容量の結果から熱伝導率を算出した。熱伝導率を試料幅に対して示したのが図8である。熱伝導率も試料幅が10～5mmの範囲で $110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ の一定値を示す。以上の結果から，試料形状が厳密に円形でなく多少欠けていても，面積比0.6以上であれば十分に信頼できる熱伝導率の測定値が得られると結論できる。

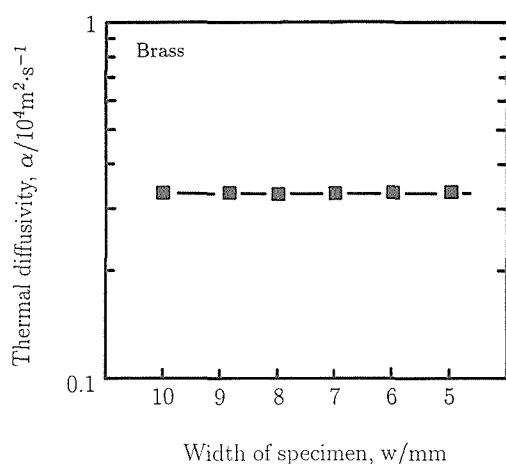


図6 黄銅の試料形状を変えたときのレーザーフラッシュ法により測定した熱拡散率と試料幅 w の関係。

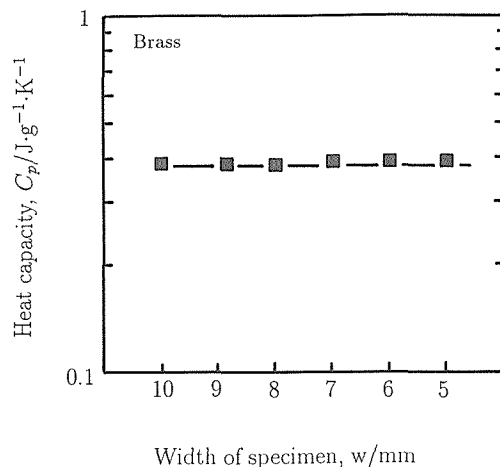


図7 黄銅の試料形状を変えたときのレーザーフラッシュ法により測定した熱容量と試料幅 w の関係。

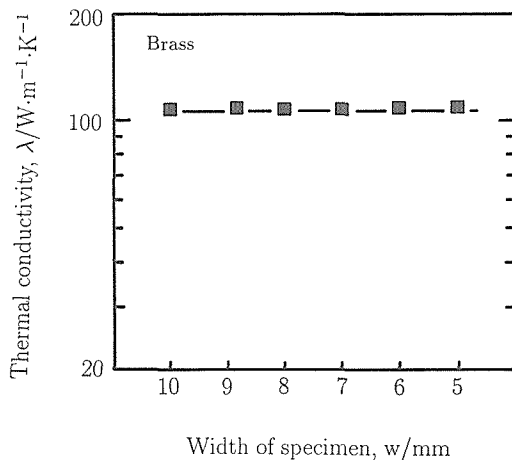


図8 黄銅の試料形状を変えたときのレーザーフラッシュ法により求めた熱伝導率と試料幅 w の関係。

3.3 試料の表面状態の影響（熱拡散率，熱容量）

熱拡散率 α を測定する場合，試料のレーザー受光面および検出面をグラファイトスプレーで黒化処理してから測定に供することがマニュアルにおいて定められている。受光面および検出面に黒化処理を施す場合と施さない場合において，得られる熱伝導率が異なるか否かを調べた。試料として10mm $\phi \times 2$ mmの円盤状の純銅を用いた。表2に表面黒化処理状態と得られた熱拡散率データを示す。検出面に黒化処理を施していない試料は，受光面における処理の有無によらず熱拡散率を求めるに必要な温度上昇を検出できないことがわかる。これは，本実験装置における赤外線検出器の性能に依存する問題である。光沢を持った金属表面の温度上昇を感知するに十分な性能を持

つ検出器を用いれば検出面に黒化処理を施さなくても熱拡散率の計測は可能であると考えられる。

表2 レーザーフラッシュ法により測定した純銅試料の熱拡散率データ。受光面および検出面に表面黒化処理を施す場合と施さない場合の計4種類のパターンについて検討を行った。

表面黒化処理		熱拡散率 ($10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
受光面	検出面	
無	無	検出不可
有	無	検出不可
無	有	1.192
有	有	1.197

検出面に表面黒化処理を施した試料はいずれも熱拡散率が測定される。両面に黒化処理を施した試料における熱拡散率 $1.197\times 10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ は、検出面のみ黒化処理したときの熱拡散率 $1.192\times 10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ に比べわずかに大きい、その差は1%以下と非常に小さい。しかし、両面黒化処理材は、5回の測定値のばらつきが $\pm 2\%$ と小さいのに対し、検出面のみの黒化処理材では $\pm 8\%$ と両面黒化処理材に比べそのばらつきは4倍も大きくなる。以上の結果から、熱拡散率を測定する際の表面黒化処理は受光面と検出面の両面に施すことが最適との結論が得られる。

本装置では、室温における熱容量測定の際に試料のレーザー受光面に熱吸収板として $12\text{mm } \phi \times 0.5\text{mm}$ のカーボンプレート（グラッシーカーボン）をグリースで貼り合わせ測定に供することがマニュアルで定められている。これに対し、高温における熱容量測定においては、試料のレーザー受光面をグラファイトスプレーで黒化処理して測定に供しなければならない。これは、グラッシーカーボンを試料に貼り合わせる際に用いるグリースが、高温では接着剤の役割を果たさなくなるためである。本節では、室温の熱容量測定にあたって熱吸収媒体として、i) グラッシーカーボンを使用した場合、ii) グラファイトスプレーで黒化処理した場合、iii) 処理をまったく施さなかった場合で得られる熱容量値を調査した。なお、試料として $10\text{mm } \phi \times 2\text{mm}$ の純銅を用いた。

得られた熱容量の結果を表3に示す。グラッシーカーボンを熱吸収媒体として使用したときの熱容量は $0.397\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ である。グラファイトスプレーで表面黒化処理を施した場合の熱容量は $0.431\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ で、グラッシーカーボンを使用した場合に比べ約10%大きい。これは、グラッシーカーボン板の直径が $12\text{mm } \phi$ であるのに対し、グラファイトスプレー処理の場合、直接試料にスプレーするためレーザー受光面積が $10\text{mm } \phi$ と小さくなるためである。熱吸収量が小さいと試料の温度上昇も小さく、このため熱容量が相対的に大きくなるものと考えられる。熱吸収媒体として何も用いなかった場合、得られた熱容量は $3.415\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ と、グラッシーカーボンあるいはグラファイトスプレーを用いた場合の約10倍の値を示した。これは、熱吸収媒体を用いないとレーザー光が金属表面で反射し熱がほとんど吸収されず、比熱容量が大きく見積もられるためである。

表3 レーザーフラッシュ法により測定した純銅試料の熱容量データ。熱吸収媒体の有無を含め計3種類の場合について検討を行った。

熱吸収媒体	結果 ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
グラッシーカーボン	0.397
グラファイトスプレー	0.431
無処理	3.415

表3の各熱容量値を用いて純銅の熱伝導率を式(4)から算出した。なお、純銅の室温における密度は $8.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ であり、熱拡散率は表2において求めた純銅の値 $1.197 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ を用いた。熱吸収媒体としてグラッシーカーボンを用いた場合、熱伝導率は $425 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ となり文献値¹⁷⁾とよく一致する。しかし、熱吸収媒体としてグラファイトスプレーを用いた場合には、熱伝導率は $461 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ となり文献値に比べ15%大きくなる。以上の結果から、室温において熱容量を測定する場合には、熱吸収媒体としてグラッシーカーボンを用いるのが最適であると結論できる。また、高温においてグラファイトスプレー処理した試料について得られる熱容量データは15%程度の誤差を含んでいることを認識すべきである。

4. 金属間化合物における熱伝導率測定

まず最初にレーザーフラッシュ法により計測した熱伝導率の測定精度を、純金属および単相合金を用いて検討した。なお、円盤状試料はいずれも $10 \text{ mm } \phi \times 2 \sim 3 \text{ mm}$ となるように作成し、熱拡散率および熱容量測定にあたって試料表面に両面黒化処理およびグラッシーカーボンの貼り合わせをそれぞれ行った。11種類の純金属と2種類の単相合金におけるレーザーフラッシュ法により求めた熱伝導率 λ_e と文献値 λ_d ¹⁷⁾の関係を図9に示す。なお、計測はいずれも室温において行ったものである。すべてのデータ点は、 $\lambda_e = \lambda_d$ を示す直線とよく一致する。この結果から、本レーザーフラッシュ測定装置により求めた熱伝導率の値は、十分に信頼できると判断できる。

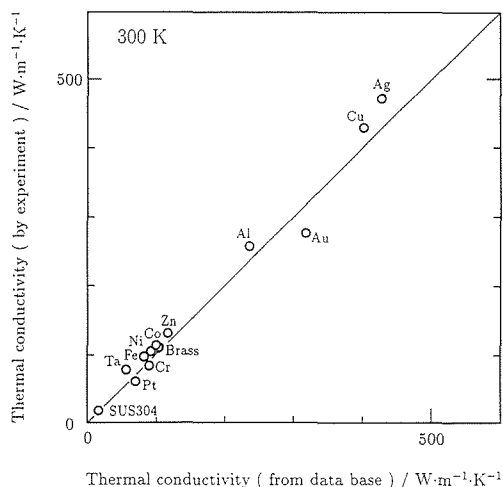


図9 純金属および単相合金における、レーザーフラッシュ法により求めた熱伝導率と文献値¹⁷⁾との比較。測定はすべて室温で行っている。

この装置を用いて B2型、および L1_2 型の結晶構造を持つ各種金属間化合物の熱伝導率を系統的に調査している^{9,10,18)}。図10は8種類の B2型金属間化合物および L1_2 型金属間化合物 Ni_3Al の化学量論組成における熱伝導率 λ を電気伝導率 σ に対して示したものである。ここで、金属間化合物の熱伝導率は本レーザーフラッシュ装置で測定した値であり、電気伝導率は既往のデータである¹⁹⁻²⁷⁾。研究者の名前を各データ点に略記してある。純金属の室温における熱伝導率 λ は、電気伝導率 σ と式(5)に示す比例関係にある。

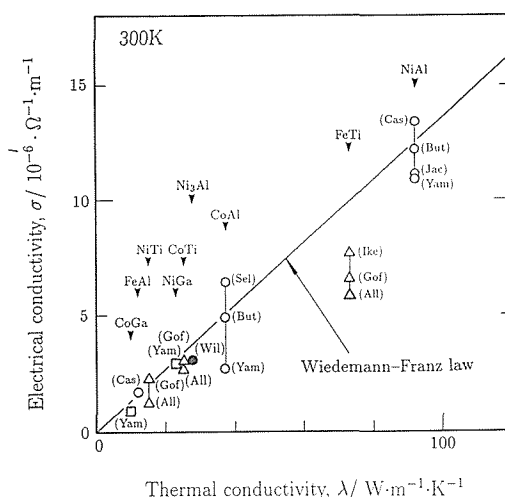


図10 8種類のB2型金属間化合物とNi₃Alの化学量論組成におけるWiedemann-Franz則。熱伝導率データはレーザーフラッシュ法により得たものであり、電気伝導率データはJacobiら¹⁹⁾、Yamaguchiら²⁰⁾、Butlerら²¹⁾、Caskeyら²²⁾、Sellmyerら²³⁾、Goff²⁴⁾、Allgaier²⁵⁾、Ikeda²⁶⁾、Williamsら²⁷⁾により報告された値を用いた。各プロットには個々の電気伝導率データを報告した研究者の名前を併せて記している。

$$\lambda = L \cdot T \cdot \sigma \quad (5)$$

ここで、 L はローレンツ数といわれる定数で、 T は絶対温度である。この関係は、Wiedemann-Franz則として広く知られている²⁸⁻³⁰⁾。図中の直線は、300KにおけるWiedemann-Franz則を示したものである。NiAl、CoAl、およびFeAlの電気伝導率データには研究者によってばらつきがあるが、図中に示したすべての金属間化合物におけるプロットはWiedemann-Franz則を示す直線とよく一致する。この結果は、化学量論組成の金属間化合物における電気伝導・熱伝導のメカニズムが純金属の場合に類似していることを示している。本論文で検討した結果を参考にしながら今後も各種金属間化合物の熱伝導率を系統的に調査していく予定である^{31,32)}。

6. 結 論

高温耐熱材料において重要な物理的性質である熱伝導率を簡便に測定する方法として、近年、レーザーフラッシュ法が開発された。レーザーフラッシュ法において用いる試験片は10mm ϕ × 1~3mmの円盤状試料であり、その作成は従来の測定法に要するものより容易である。しかし、一部の金属間化合物は脆く所定のサイズの試験片を準備できない状況も生じてくる。本研究では、レーザーフラッシュ法による熱伝導率測定に伴う不確定要因として、i) 試料厚さ、ii) 試料形状、iii) 試料の表面状態の3項目に着目し、その熱伝導率に及ぼす影響について検討し、以下の結論を得た。

1. 試料厚さ L は、熱伝導率の大きい場合でも小さい場合でも1mm以上が適切で3mmを多少越えても熱伝導率が測定可能である。最も適切な試料厚さは2~3mmである。
2. 試験片の表面形状に多少不整があっても両面が平行であれば面積率0.6までは、適切な熱伝導率測定が可能である。
3. 熱拡散率の測定を行うときには、試料の両面に黒化処理を施すことが好ましい。熱容量の測

定を行うときには、受光面にグラッシーカーボンを貼ることが好ましい。高温における熱容量測定においてはグラッシーカーボンを使用することができないが、得られる熱容量データには約15%の誤差が含まれている。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費重点領域研究「金属間化合物」(No06215101)による援助のもとで行われたものであり、ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) D. B. Miracle: *Acta Metall. Mater.*, 41 (1993), 649.
- 2) 譚 毅, 篠田哲守, 三島良直, 鈴木朝夫: *日本金属学会誌*, 57 (1993), 582.
- 3) K. J. Hemker, M. J. Mills and W. D. Nix: *Acta Metall. Mater.*, 39 (1991), 1901.
- 4) R. L. Fleischer, R. D. Field and C. L. Briant: *Metall. Trans. A*, 22A (1991), 403.
- 5) T. Tsujimoto and K. Hashimoto: in *High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys 3*, MRS Symp. Proc., 133 (1989), 391.
- 6) G. Sauthoff: *Z. Metallkde.*, 80 (1989), 337.
- 7) 眞島正市: *工業測定便覧*, コロナ社, (1954).
- 8) 日本原子力研究所編: *JAERI-M レポート*, 93-244, (1993).
- 9) Y. Terada, K. Ohkubo, K. Nakagawa, T. Mohri and T. Suzuki: *Intermetallics*, 3(1995), 347.
- 10) Y. Terada, T. Mohri and T. Suzuki: in *High Temperature Ordered Intermetallic Alloys 6*, MRS Symp. Proc., 364 (1995), 201.
- 11) 安積忠彦: *金属*, 1992 (9), 1.
- 12) W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott: *J. Appl. Phys.*, 32 (1961), 1679.
- 13) 東京天文台編: *理科年表*, 丸善, (1995), p.438.
- 14) E. A. Brandes, ed., *Smithells Metals Reference Book*, Butterworth, London, (1983).
- 15) 軽金属協会編: *アルミニウムハンドブック*, 朝倉書店, (1963), p.9.
- 16) T. Azumi and Y. Takahashi: *Rev. Sci. Instrum.*, 52(1981), 1411.
- 17) C. Y. Ho, R. W. Powell and P. E. Liley, ed., *Thermal Conductivity of the Elements: A Comprehensive Review*, Americal Institute of Physics, New York, (1975).
- 18) S. Hanai, Y. Terada, K. Ohkubo, T. Mohri and T. Suzuki: *Intermetallics*, to be published.
- 19) H. Jacobi, B. Vassos and H. J. Engell: *J. Phys. Chem. Solids*, 30 (1969), 1261.
- 20) Y. Yamaguchi, D. A. Kiewit, T. Aoki and J. O. Brittain: *J. Appl. Phys.*, 39 (1968), 231.
- 21) S. R. Butler, J. E. Hanlon and R. J. Wasilewski: *J. Phys. Chem. Solids*, 30 (1969), 1929.
- 22) G. R. Caskey, J. M. Franz and D. J. Sellmyer: *J. Phys. Chem. Solids*, 34 (1973), 1179.
- 23) D. J. Sellmyer, G. R. Caskey and J. M. Franz: *J. Phys. Chem. Solids*, 33 (1972), 561.
- 24) J. F. Goff: *J. Appl. Phys.*, 39 (1968), 2208.
- 25) R. S. Allgaier: *J. Phys. Chem. Solids*, 28 (1967), 1293.
- 26) K. Ikeda: *Phys. Stat. Solidi (b)*, 62 (1974), 655.
- 27) R. K. Williams, R. S. Graves, J. F. Weaver and D. L. McElroy: in *High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys*, MRS Symp. Proc., 39 (1985), 505.
- 28) J. M. Ziman: *Principles of the Theory of Solids*, Cambridge University Press, London, (1964).
- 29) F. J. Blatt: *Physics of Electronic Conduction in Solids*, McGraw-Hill, New York, (1968).
- 30) C. Kittel: *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons, New York, (1953).
- 31) K. Ohkubo, Y. Terada, T. Mohri and T. Suzuki: *Intermetallics*, to be published.
- 32) J. Nakata, Y. Terada, K. Ohkubo, T. Mohri and T. Suzuki: *Intermetallics*, to be published.