

定常法熱伝導率計測装置を用いたプリント配線基板の面内方向熱伝導率計測

畠山 友行^{†a)} 石塚 勝[†]

Measurement of In-Plane Thermal Conductivity of Printed Circuit Board with Steady State Thermal Conductivity Measurement Method

Tomoyuki HATAKEYAMA^{†a)} and Masaru ISHIZUKA[†]

あらまし 電子機器の小型化・高密度実装化に伴い、プリント配線基板 (Printed Circuit Board: PCB) を通しての放熱の重要性が増している。本論文では、材料の熱伝導率計測手法として一般的に用いられている定常法熱伝導率計測装置を用いて、プリント配線基板の面内方向熱伝導率計測手法を紹介するとともに、単純な配線を施した PCB の面内方向熱伝導率計測結果を紹介する。

キーワード プリント配線基板, 面内方向熱伝導率, 定常法熱伝導率計測装置, CFD 解析

1. ま え が き

近年、電子機器きょう体内部は、電子部品の高密度実装化により熱環境が厳しくなっており、多種多様な放熱手法が用いられている。電子機器の小型化が進むにつれ、ファンなどの冷却デバイスの設置が難しい場合も生じており、電子部品が設置されているプリント配線基板 (Printed Circuit Board: PCB) が放熱経路の一つとして重要となっている。PCB は、ガラスエポキシなどの樹脂材料に、銅配線が施されている場合が多い。PCB を放熱経路として考える際には、エポキシ樹脂の熱伝導率は $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度 [1] と低いことから、エポキシ樹脂のみからの放熱は期待できず、銅配線を通じての放熱が重要となる。そのため、電子機器の熱設計のためには、PCB の熱伝導率の予測が重要となる。ここでいう PCB の熱伝導率とは、樹脂部と銅配線部の両方の熱伝導性を考慮した熱伝導率を表す。電子機器の熱設計は、数値シミュレーションを用いて行われる場合が多い [2]~[5]。現在は、PCB の詳細な配線情報をシミュレーションモデルに取り込む技術が発展しており [6]、シミュレーションにて PCB 詳

細を取り込み PCB の放熱性能を予測することが可能である。しかし、近年の PCB は配線が複雑で、多層配線になっている場合もある。そのため、シミュレーションに取り込むデータ量が膨大となる場合もあり、計算負荷が懸念される。計算負荷を低減させるためには、PCB の樹脂部と銅配線部の双方を考慮した有効熱伝導率を把握し、有効熱伝導率を与えたシンプルな板として PCB をモデル化する手法が考えられる。しかし、PCB の複雑な銅配線の影響を正確に考慮した有効熱伝導率を簡易に求めることは困難である。そのため、PCB の有効熱伝導率の予測手法は確立されておらず、配線量や配線パターンと有効熱伝導率の関係を、実験によって把握することが求められる。特に、平板材料の面内方向の熱伝導率の計測手法は確立されておらず、PCB の面内方向の有効熱伝導率を計測されている例は少ない [7], [8]。

そこで本論文では、特殊な装置を用いることなく PCB の面内方向有効熱伝導率を計測することを目的とし、定常法熱伝導率計測装置と CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) 解析を併用して、PCB の面内方向有効熱伝導率を計測する手法の提案を行い、PCB の配線量と面内方向有効熱伝導率の関係性を示す [9], [10]。

[†] 富山県立大学工学部, 射水市

Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu-shi, 939-0398 Japan

a) E-mail: hatake@pu-toyama.ac.jp

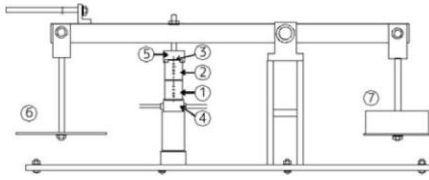


図1 定常法熱伝導率計測装置

Fig.1 Steady state thermal conductivity measurement apparatus.

2. 実験装置

図1に、本研究で用いる定常法熱伝導率計測装置を示す。実験装置は、天秤型の定常法熱伝導率計測装置である。図1において、1番と2番は真鍮ロッドであり、それぞれに4本の熱電対が設置されている。真鍮ロッドのサイズは、直径40mm、高さ45mmである。4番は冷却ブロックであり、温度一定の冷却水が流れている。3番はフィルムヒーターであり、直流安定化電源によって電力を印加し加熱を行う。5番はアクリルブロックであり、ヒーターで発生した熱を上方へ逃がさないための、断熱ブロックの役割を担っている。これら1, 2, 3, 4, 5番で構成される部分が、熱伝導率を計測するためのテストセクションである。7番はバランス用の錘、6番は錘を乗せるための台である。6番の台に錘を載せない状態では、7番のバランス用の錘により、テストセクションには圧力が印加されない状態となる。6番に錘を乗せた場合、錘の分だけテストセクションに圧力が印加される。以降、1番の真鍮ロッドを冷却ロッド、2番の真鍮ロッドを加熱ロッドと呼ぶ。

測定の際には、測定サンプルを冷却ロッドと加熱ロッドの間に設置し、6番に錘を乗せて適切な圧力をテストセクションに印加し、3番のヒーターを発熱させる。4番の冷却ブロックは、冷却水により一定温度に保たれているため、1番及び2番の真鍮ロッドに温度勾配が生じる。この温度勾配を、熱電対によって計測することによりサンプルの熱伝導率が計測できる。

図2に、テストセクションに生じる温度勾配のイメージを示す。加熱・冷却ロッドそれぞれに設置された各4本の熱電対によって計測された温度勾配を、最小2乗近似により求める。求めた温度勾配からフーリエの法則を用いて、加熱・冷却ロッドそれぞれを流れる熱流 Q_{upper} , Q_{lower} を求める。

$$Q_{upper}, Q_{lower} = -A_{rod} \lambda_{rod} \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

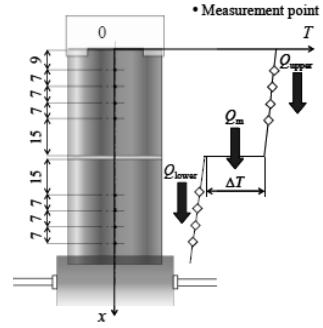


図2 計測原理

Fig.2 Measurement principle.

ここで、 A_{rod} はロッドの断面積、 λ_{rod} はロッドの熱伝導率である。サンプルを流れる熱流は、これらの熱流の平均値とする。

更に、ロッドの温度勾配からサンプル上下面の温度差 ΔT を求め、次式よりサンプルの熱抵抗 R を算出する。

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (2)$$

ここで、 Q はサンプルを流れる熱流である。また、熱伝導率を求めたい場合は、計測された熱抵抗 R から、次式を用いることにより熱伝導率 λ を求めることが可能である。

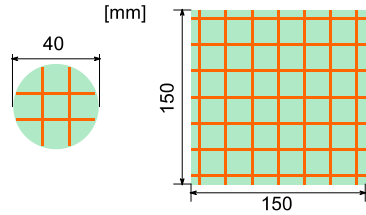
$$\lambda = \frac{L}{RA} \quad (3)$$

ここで L はサンプルの厚さ、 A はサンプルの断面積である。ただし、本計測装置で求めることが可能な熱抵抗または熱伝導率は、サンプルを熱流が通過する方向の熱抵抗または熱伝導率であるため、一般的にはサンプルの厚さ方向の熱抵抗若しくは熱伝導率である。

3. 面内方向熱伝導率計測手法

図1, 2に示した実験装置で計測できる熱伝導率は、サンプルの厚さ方向の熱伝導率である。つまり、PCBを計測対象とした場合、PCBの厚さ方向の熱伝導率が計測できる。本研究では、PCBの面内方向の熱伝導率を計測するために、次に示す手法を用いる。

真鍮ロッドと同一の径をもつPCBと真鍮ロッドの径よりも大きなPCBを準備する。本研究では、図3に示すように、真鍮ロッドの径と同一の径である直径40mmの円盤状のPCBと、ロッドの径よりも大きなサンプルとして一辺150mmの四角形のPCBを用いる。いずれのPCBも、厚さは1.6mmである。



(a) 円盤 (a) Circle
(b)四角形 (b) Square

図3 本研究で用いる2種類のPCB
Fig.3 Two types of PCB in this study.

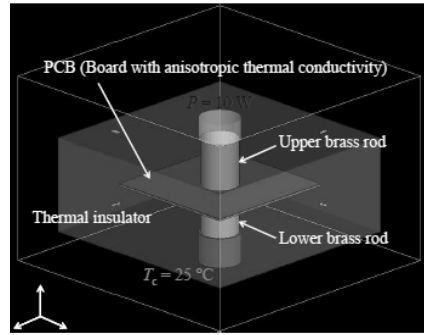
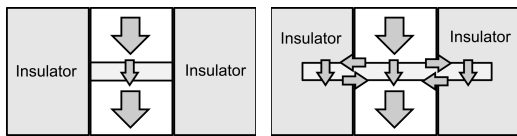


図5 CFD解析モデル
Fig.5 Model of CFD analysis.



(a)円盤 (a) Circle
(b)四角形 (b) Square

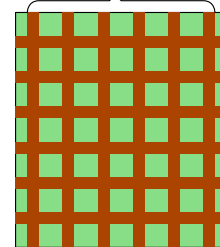
図4 熱流のイメージ
Fig.4 Heat flow in each case.

ロッドと同一の径をもつ PCB の熱抵抗を、図 1, 2 に示す実験装置を用いて計測すると、図 4(a) に示すように、熱流は PCB 厚さ方向にのみ流れるため、PCB の厚さ方向の熱抵抗が計測される。次に、真鍮ロッドよりも大きな四角形の PCB を計測すると、図 4(b) に示すように、PCB に施されている銅配線の熱拡散により、熱流は PCB の面内方向に拡散されながら、厚さ方向に通過する。そのため、四角形の PCB を計測した際には、面内方向熱拡散の影響を含んだ熱抵抗が計測される。いずれの計測の場合も、ロッド及び PCB の周囲は断熱材で覆い、熱の逃げを防いでいる。

このような計測を行うことにより、PCB 厚さ方向のみの熱抵抗と、面内方向熱拡散の影響を含む熱抵抗の2種類の熱抵抗が計測できる。しかし、この時点では、PCB の面内方向のみの熱伝導率は特定できない。そこで、CFD 解析を併用する。

図 5 に、CFD 解析モデルを示す。CFD 解析の際には、四角形の PCB を用いた場合の実験装置のテストセクションをモデル化する。四角形の PCB の一辺の長さは、実験と同様に 150 mm とする。このとき、配線はモデル化せず、PCB は一枚の板としてモデル化を行う。板には、厚さ方向と面内方向で異なる熱伝導率を与える。厚さ方向の熱伝導率は、ロッドと同一径の PCB を用いた実験結果から得られた熱伝導率を与

N : The number of copper wire



W : Wire width
図6 配線数 N と配線幅 W
Fig.6 Definitions of N and W.

える。一方、面内方向の熱伝導率はパラメータとする。板の面内方向の熱伝導率をフィッティングパラメータとして変化させ、実験における温度計測点と同一箇所の点における温度を用いて、実験と全く同一の手順で熱抵抗を求め、実験結果と比較し、実験結果と同一の値が得られた際に与えていた板の面内方向の熱伝導率を、PCB の面内方向の熱伝導率と特定する。

つまり、実験と CFD 解析を併用することによって、PCB 面内方向の熱伝導率が特定できる。

4. 測定対象 PCB

本研究では、一辺 150 mm、熱伝導率 $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ のガラスエポキシ樹脂の表裏面に、数種類の $35 \mu\text{m}$ 厚の銅配線を施した PCB を用いて、面内方向熱伝導率の計測を行った。配線パターンは、図 6 に示すように、一辺の配線の本数を N、一本あたりの配線幅は W とし、表 1 に示す 10 種類を考慮した。表 1 には、それぞれの場合の銅配線の割合も示している。また、参考値として、配線がない場合及び、ベタ銅 (配線率 100%) の場合の計測も行った。ロッドと同一径の PCB は、一

表 1 PCB の配線パターン
Table 1 Details of wiring pattern of PCB.

PCB	W [mm]	N [-]	Copper area ratio [%]
1	0.1	10	1.33
2	0.1	50	6.56
3	0.1	100	12.89
4	0.1	500	55.56
5	0.5	10	6.56
6	0.5	50	30.56
7	0.5	100	55.56
8	1	10	12.89
9	1	50	55.56
10	1	100	88.89
11	Without copper wire		0
12	Covered with copper film		100

辺 150 mm の中心を、直径 40 mm にくり抜くことで作成した。

本研究では、ヒータの発熱量は 10 W、テストセクションへの印加圧力は 31 kPa とした。

5. 結果及び考察

図 7 に、円盤状 PCB と四角形 PCB を用いた場合の計測結果を示す。図において、縦軸は計測された熱抵抗であり、横軸は PCB 表裏面に施されている銅配線の割合を示す。図中、四角のプロットが、円盤状 PCB の熱抵抗計測結果を、丸のプロットが、四角形の PCB を用いた場合の計測結果を示す。グラフから明らかのように、円盤状の PCB の結果は、銅配線の割合によらず一定値を示している。先にも述べたとおり、円盤状の PCB を用いた場合、PCB の厚さ方向のみの熱抵抗が計測される。本実験で用いた PCB 表裏面に施されている配線は、熱伝導率の高い銅であり、厚さは $35 \mu\text{m}$ と非常に薄い。そのため、銅配線の厚さ方向の熱抵抗は非常に小さくなり、ガラスエポキシ樹脂の熱抵抗が支配的となる。その結果、銅配線の割合によらず、厚さ方向の熱抵抗は一定値となる。一方で、四角形の PCB の熱抵抗は、配線割合が多くなるにつれて小さな値を示している。これは、図 4 (b) に示したように、四角形の PCB を用いた場合、加熱ロッドから流入した熱は、PCB 表面の配線を伝わり面内方向に拡散されつつ PCB を厚さ方向に通過するためである。配線割合が大きくなるにつれて、面内方向の熱拡散がより促されることとなる。面内方向の熱拡散が促される

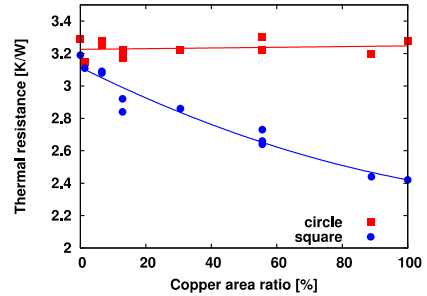


図 7 配線割合と熱抵抗計測結果の関係
Fig. 7 Relationship between wiring ratio and measured thermal resistance.

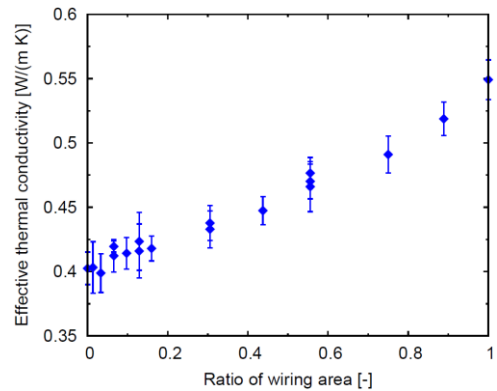


図 8 配線割合と厚さ方向有効熱伝導率の関係
Fig. 8 Relationship between wiring ratio and effective thermal conductivity in out-of-plane direction.

と、PCB を厚さ方向に通過する熱流が通る面積が大きくなり、結果として PCB 上下面の温度差は小さくなる。よって、銅配線によって面内方向の熱拡散が促されれば促されるほど、計測される熱抵抗は小さくなる。

この熱抵抗を、熱流が径 40 mm のロッド表面に対応する面積のみを通過するとして、厚さ方向有効熱伝導率に換算すると図 8 のようになる。四角形の基板の場合、面内方向の熱拡散の影響を含む値であるため、有効熱伝導率という表現を用いている。

図 9 は、解析によって得られた厚さ方向有効熱伝導率と、実験によって得られた厚さ方向有効熱伝導率を比較した結果である。縦軸は、実験及び解析によって得られた厚さ方向有効熱伝導率であり、下側の横軸は、解析モデルにおいて板状の計測サンプルに与えた面内方向の熱伝導率を、上側の横軸は、実験サンプルの配線割合を示す。つまり、グラフの上下を比較することにより、配線割合と、基板の面内方向有効熱伝導率の

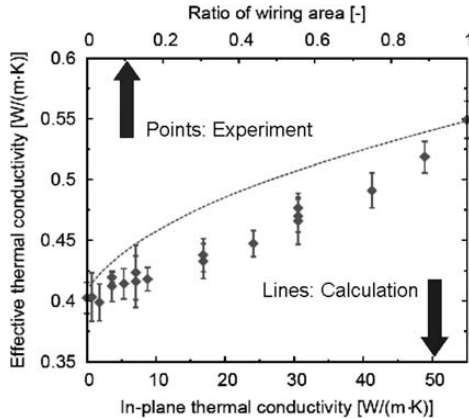


図9 配線割合と PCB 面内方向有効熱伝導率の関係
Fig.9 Relationship between wiring ratio and in-plane effective thermal conductivity of PCB.

関係が把握できる。グラフから、配線割合が20%の場合、面内方向熱伝導率は10 W/(m·K)程度、80%の場合、面内方向熱伝導率は45 W/(m·K)程度となることがわかる。

本論文で紹介した手法を用いることにより、基板の配線割合と面内方向有効熱伝導率の関係性を把握することが可能となる。熱設計の初期段階などで、基板の複雑なモデル化を避け、簡易的に熱設計を行いたい場合、基板を一枚の板としてモデル化し、本手法によって得られた面内方向有効熱伝導率を用いることにより、面内方向熱拡散の影響を考慮した熱設計が可能となる。

6. む す び

本論文では、プリント配線基板(Printed Circuit Board: PCB)の配線量と面内方向有効熱伝導率の関係性を測定する手法の紹介と、PCB配線量と面内方向有効熱伝導率の関係の一例を紹介した。PCBの表裏面に配線が施されている場合、配線が20%程度の場合、面内方向熱伝導率は10 W/(m·K)程度、80%の場合には45 W/(m·K)程度となることが明らかとなった。

文 献

- [1] 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第5版, 丸善, 2009.
- [2] J. Fernandes, S. Ghalambor, A. Docca, C. Aldham, D. Agonafer, E. Chenelly, B. Chan, and M. Ellsworth, "Combining Computational Fluid Dynamics (CFD) and Flow Network Modeling (FNM) for design of a Multi-Chip Module (MCM) cold plate," Proc. InterPACK2013, IPACK2013-73294, 2013.
- [3] G. Shankaran, B. Dogrouz, and R. Magargle, "Using state-space models for accurate computations of

transient thermal behavior of electronic packages," Proc. ITherm2014, pp.990-997, 2014.

- [4] 小泉雄大, 畠山友行, 福江高志, 石塚 勝, "軸流ファンのMRF法シミュレーションによるPQ特性," 第49回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C323, 2012.
- [5] 大串哲郎, 村上政明, 池島 薫, 高野公敬, 桃瀬一成, "電子機器冷却におけるCFDを用いた逆解析から得られる感度情報の有効活用," MES2015 講演論文集, pp.131-134, 2015.
- [6] G. Shankaran, B. Dogrouz, and D. Araujo, "Orthotropic thermal conductivity and joule heating effects on the temperature distribution of printed circuit boards," Proc. ITherm2010, 2010.
- [7] 大串哲郎, 小林 孝, 青木久美, 田中浩和, 平田拓哉, "プリント基板などの平板熱伝導率測定法の研究(1):フィン温度分布フィッティング法の数値解析による測定誤差の検討," 日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.79-80, 2011.
- [8] 青木久美, 大串哲郎, 小林 孝, 田中浩和, 平田拓哉, "プリント基板などの平板熱伝導率測定法の研究(2):フィン温度分布フィッティング法による熱伝導率測定結果," 日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.81-82, 2011.
- [9] T. Hatakeyama, M. Ishizuka, S. Nakagawa, Y. Nakano, M. Hirokawa, and T. Tomimura, "Measurement technique of in-plane thermal resistance of PCB," Proc. AJTEC2011, AJTEC2011-44271, Hawaii, USA, March 2011.
- [10] 畠山友行, 石塚 勝, 中川慎二, 中野雄太, 富村寿夫, "実験とCFD解析によるPCB有効熱伝導率評価," 第32回日本熱物性シンポジウム, pp.416-418, 横浜, Nov. 2011.
(平成27年4月20日受付, 10月9日公開)



畠山 友行

富山県立大学工学部機械システム工学科
講師。



石塚 勝 (正員)

富山県立大学学長。