

TIM の密着具合に関する研究

斎藤靖弘¹・鈴木悟²・小室貴紀³

1 博士後期課程電気電子工学専攻

2 博士前期課程電気電子工学専攻

3 電気電子情報工学科

A Study on Contact Condition of Thermal Interface Material

YASUHIRO SAITO¹, SATORU SUZUKI², TAKANORI KOMURO³

Abstract

Recently, the increasing performance of semiconductor devices has been accompanied by a simultaneous rise in the amount of heat they emit. When an electronic device is mounted on a metallic heat sink, a thermal interface material is required to handle the thermal energy emitted while simultaneously maintaining an acceptable level of electrical insulation. However, the thermal characteristics of thermal interface materials are strongly influenced by the manner in which they make contact with the heat sink.

We proposed measuring the thermal characteristics of a thermal interface material placed on an aluminum plate that had been machine-milled to form precise grooves designed to simulate heat sink surface roughness, and called it a “non-flat plate”. This plate had nine 1-mm-wide 0.3-mm-deep grooves situated 4 mm apart. When pressure is applied to the thermal interface material, the material penetrates into these grooves, thus increasing contact between the two materials and consequently decreasing thermal resistance. Then, by varying the groove shapes and applied pressure amounts, contact conditions can be precisely controlled. This allows complex thermal parameters to be measured with good repeatability.

Keywords: Thermal Interface Material, Thermal Contact Resistance, AskerC Hardness

1. まえがき

近年、素子の高集積化、高性能化による発熱量増加と共に、製品の小型化が進み発熱密度が増加するため、放熱対策が重要になってきた[1]。素子と放熱器の間に熱伝導材料:TIM (Thermal Interface Material)を挟むことによって素子から発生する熱を放熱器に逃がしやすくなる。実際の素子や放熱器の接触面では点接触が無数に存在し、接触している部分としていない部分が存在する。接触している面積は面の粗さと接触圧力によって変化する。よって、TIMの熱抵抗はTIM自身の特性以外にも材料間の密着具合でも変化するの、これらを考慮したTIMの評価が必要である。本研究ではTIMの密着具合の影響を含む評価を目的として評価システムを構築し、熱抵抗測定を行いTIMの密着具合に関する検討を行った。

2. 評価対象のTIMについて

素子-放熱器間に生じる接触熱抵抗を低減するには、接触面積を増加させるために面精度の向上や接触圧力の増大といった方法が存在するが、こうした方法は構造やコストの問題から実現できない場合が多く、接触熱抵抗の低減にTIMが使用されている。TIMの種類はグリースのようなペースト状のものと熱伝導シートのような固形のものに分けられる。グリースは熱抵抗を小さく抑えることができ、性能が良い反面、組み立て時に塗布作業が必要となり、作業によるばらつきも発生しやすい。また油成分の分離や固化などの経年変化も考慮する必要がある[2]。本論文では図1に示す複数のパワートランジスタなどの素子を1つの放熱器で冷却する場合を想定し、電気絶縁を確保しながら熱設計をする際に使用する熱伝導性と電気絶縁性の

両面を有しているシリコンシートタイプのTIMを用いた。本実験で使用したTIM(両材料の厚みは1mm)を図2に、特性を表1に示す。

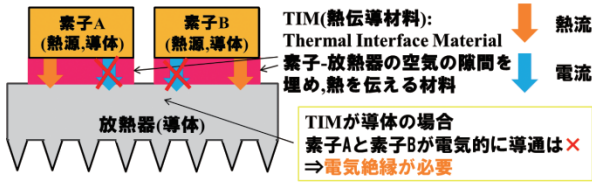
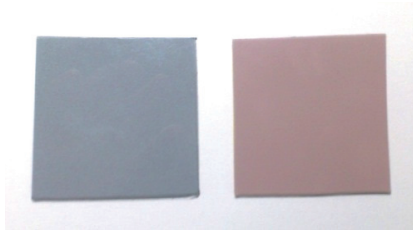


図1 電子機器の冷却



3M5519S TC100CAD

図2 使用したTIM

表1 TIMの特性

| Characteristic | TC100CAD | 3M5519S |
|------------------------------|----------|---------|
| Thermal Conductivity [W/m·K] | 3.2 | 4.9 |
| Dielectric Strength[kV/mm] | 11 | 3.5 |
| Hardness[AskarC] | C10 | C60 |

3. TIM を評価するシステムの構築

3.1 温度制御の方式

TIMの評価をするためには、正確に冷却も加熱もできるシステムが必要である。水流を用いた温度調整方式では水温を調整すれば冷却も加熱も可能である。以上の理由から本実験では温度制御が容易な水流での温度制御方式を採用した。実験で構築した全システムを図3に示し、写真を図4に示す。

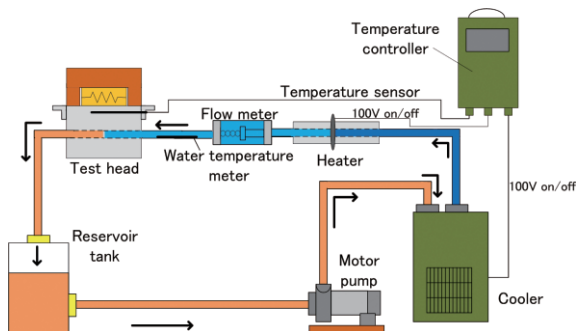


図3 構築したシステム

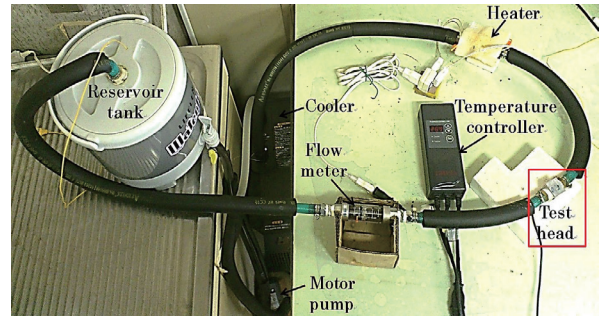


図4 温度調整システムの写真

3.2 温度調整ヘッドについて

当初は冷却器のみでシステムを構築したが、温度の設定範囲を広げる必要が生じたので、加熱器を使用した。加熱器を図5のような100V-100Wの30φバンドヒーターを金属パイプに巻きつけて用いた。

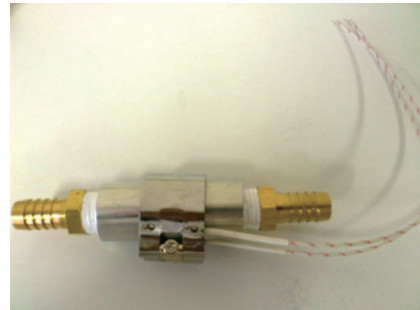


図5 加熱器

3.3 温度調整ヘッドについて

発熱体やTIMなどの測定物を置き、特性を測る部分を温度調整ヘッドと名付けた。ヘッド表面温度を一定に保つ必要があるので図6のように温度モニタを温度調整ヘッド表面の直近に埋め込んだ。

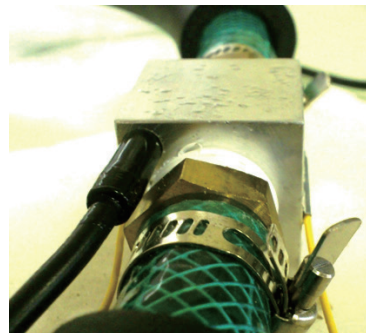


図6 温度調整ヘッドと温度モニタ

4. 構築した温度調整システムの評価

4.1 実験内容

上記のシステムを評価するために、図7のように温度調整ヘッドの上に抵抗器を設置し、電圧を印加して発熱させ、温度調整ヘッドがどれだけ熱吸収できるか実験した。このとき抵抗器と温度調整ヘッド表面の温度差を Δt_1 、温度調

整ヘッド表面と水温の温度差を Δt_2 とする。抵抗器と温度調整ヘッド表面の間には、シリコングリスを塗布した。また、抵抗器の上部には断熱材としてポリウレタンを設置した。抵抗器の総発熱量を変化させたときの各部の温度差を計測した。

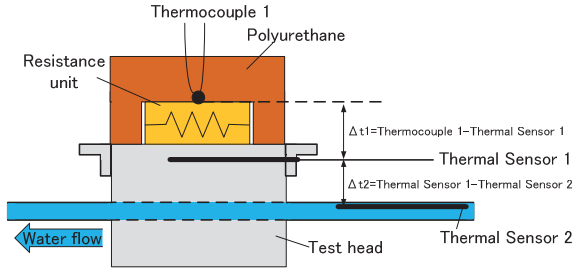


図7 温度調整システムの評価

4.2 実験結果

図8は温度調整ヘッド表面を室温より高い温度27[°C]一定に保ったときの結果である。抵抗器の総発熱量を増加させると、温度差は線形に増加することが確認できた。

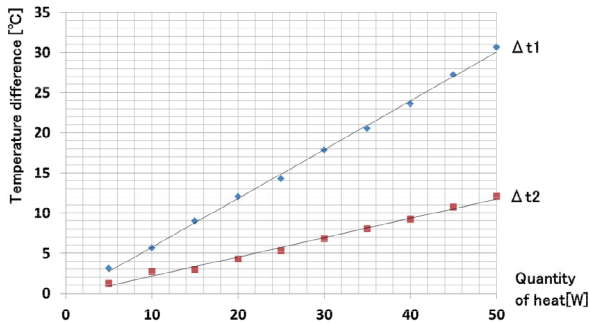


図8 実験結果 熱流 vs. 温度差

$$R_{\theta} = \frac{\text{温度差 } \Delta t [^{\circ}\text{C}]}{\text{総吸熱量 } Q [\text{W}]} \quad (1)$$

4.3 温度調整ヘッド表面温度による熱抵抗の変化

図8の傾きと(1)式より温度調整ヘッド表面から水までの熱抵抗 R_h [°C/W]、抵抗器から温度調整ヘッド表面までの熱抵抗 R_m [°C/W]を求めた。結果を表2に示す。

表2 各熱抵抗の結果

| Test head surface temperature [°C] | R_h [°C/W] | R_m [°C/W] |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| 27 | 0.612 | 0.242 |

表2の結果から、温度調整ヘッド表面温度が熱抵抗の温度依存性は少なく室温の影響を受けずに発熱量50[W]まで線形に推移することが確認できた。さらに、 R_h [°C/W]、 R_m [°C/W]の熱抵抗値も1[°C/W]未満で十分小さい値であ

ることから、構築したシステムを用いてTIMの評価が十分可能だと判断した。

5. 熱抵抗測定を用いたTIMの評価

5.1 提案手法の基本概念

図9は提案手法の基本概念を示す。材料間をただ接触させただけでは、接触面の凹部はTIMが埋まっておらず、空気の層が存在する。圧力を印加すると、凹部にTIMが密着し、空気の層が追い出される。凹凸板と圧力を管理することにより、再現性良く密着具合の影響を評価することが可能である。今回使用した凹凸板を図10に示す。

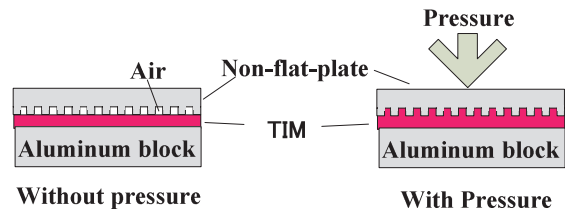


図9 TIMと凹凸板の密着モデル

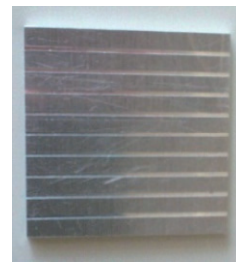


図10 凹凸板(Non-flat-plate)

5.2 実験内容と実験結果

図11はTIMを評価する際の実験構成を示す。抵抗器の発熱がアルミの凹凸板を通してTIMを伝わり、さらにその熱が、温度調整ヘッドから水に伝わる。凹凸板は30[mm]×30[mm]×3[mm]のアルミ板に4[mm]毎に幅1[mm]、深さ0.3[mm]の溝をフライス盤で製作した。

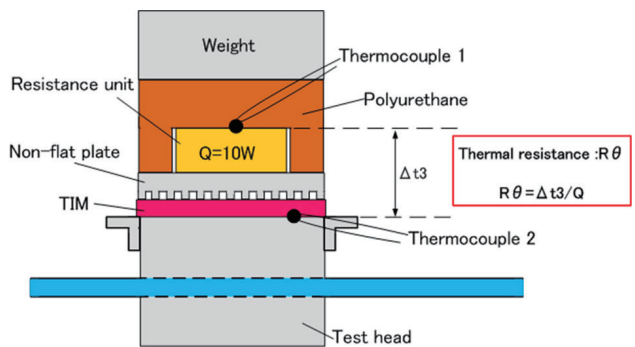


図11 熱抵抗測定の構成

この評価実験では熱電対2点の位置が重要である。熱抵抗の定義はある2点間の伝熱量(発熱量)Qに対し、その間

の温度差が ΔT であるとき、比例関係が存在する。これは温度差 ΔT を電位差 ΔV 、伝熱量 Q と電流 I が各々対応し、熱抵抗 R_θ と電気抵抗 R が類似している。つまり熱抵抗は電気抵抗に相当するもので熱の伝わりにくさを示す。熱抵抗を用いることにより、線形関係が近似的に成り立つ範囲で、電気回路と同様に熱抵抗の直列、並列の法則が適用でき熱回路網として取り扱える。熱電対1と熱電対2との温度差 Δt_3 はアルミの凹凸板自身の熱抵抗とTIM自身の熱抵抗、凹凸板とTIM間の接触熱抵抗が直列に含まれる[3]。しかし、アルミ凹凸板の熱抵抗は材料間の接触熱抵抗に比べ小さい。抵抗器に電圧印加後500[s]で温度差 Δt_1 が安定したと仮定し、500[s]時の温度差 Δt_1 と抵抗器の発熱量 Q より、TIM自身の熱抵抗と接触熱抵抗を含んだ熱抵抗を算出した。その結果を図12に示す。

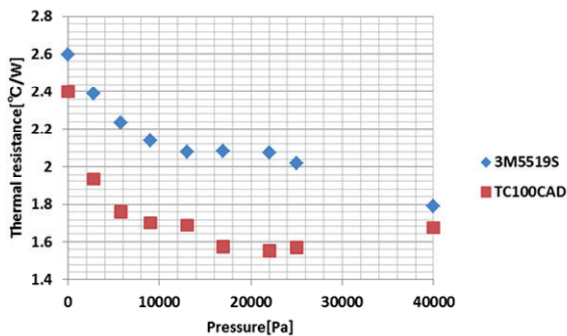


図12 熱抵抗測定の実験結果

図12より、TC100CADは圧力15000Pa付近で凹凸板とTIMが十分に密着し熱抵抗が安定している。TIMの硬度も材料間の接触熱抵抗に影響し、5000Pa以下の低圧力ではTC100CADよりも硬度が大きい3M5519SはTC100CADよりも接触熱抵抗が大きくなり、熱抵抗の飽和もTC100CADと比較して高い圧力で飽和したと推測できる。凹凸板を用いることによって、密着具合のような機械的現象による影響を制御して熱抵抗を再現性良く評価できることを明らかにした。

6. 過渡熱解析装置 T3Ster による熱抵抗測定

6.1 定常法と過渡熱測定法

第5章では構築した温度調整システムと凹凸板を用いて、熱抵抗を再現性良く評価できることを確認した。この温度調整システムを用いた熱抵抗測定は温度が一定になった段階で熱抵抗を測定する定常法と名付ける。

熱抵抗の評価には発熱源に大電流を加えて大発熱させ、微小電流に切り替えた瞬間の特性を測定する過渡熱測定の方法も存在する[4]。過渡熱測定法を用いた場合でも凹凸板と圧力を管理することにより、再現性良く密着具合の影響を評価可能か、メンター・グラフィックス株式会社の過渡熱解析装置 T3Ster を用いて検討を行った。

6.2 過渡熱測定法の測定原理

T3Ster は JEDEC 規格 (JESD51-1) に準拠した過渡熱測定法 (Static 法) の測定装置である。発熱源である素子は半導体で構成されている場合が多く、その半導体の PN ジャンクションに固定電流を流すことで、ジャンクションの温度と電位差との相関を見ることが可能である。電流を一定にした場合、温度と電圧には線形な関係があり、この関係を K ファクタという。

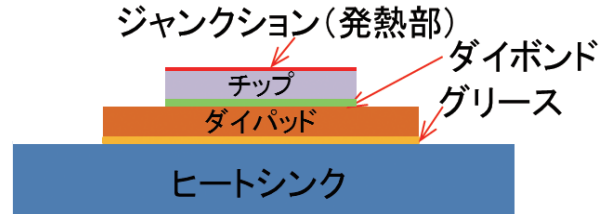


図13 過渡熱測定の例

図13に過渡熱測定の例を示す。まずは、発熱部に一定の電圧を加えて十分にジャンクション温度が上昇した段階で、 $1\mu s$ の立下りで微小電流に切り替える。この微小電流が上記で説明した一定電流に相当し、微小電流に切り替えた後の電圧を定常状態になるまで測定し、K ファクタで温度に変換して熱測定を評価することが可能である。この K ファクタで得られた結果は、時間 vs. 温度の過渡熱データである。この生データと T3Ster 専用のソフトウェアを用いることによって、熱抵抗 vs. 熱容量を算出できる。

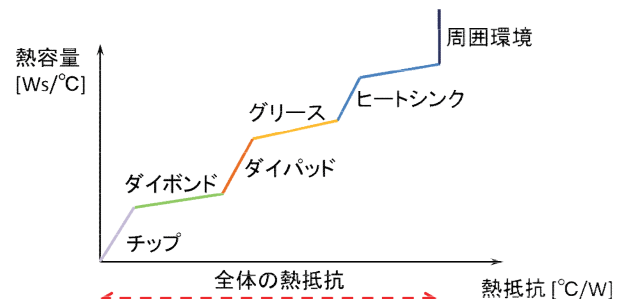


図14 過渡熱測定の例

図14に過渡熱測定の例を示す。横軸が熱抵抗、縦軸が熱容量で、原点が発熱源のジャンクションに相当する。まずは、最初はチップの熱特性が表れ、X 軸を見れば熱抵抗を求めることができ、Y 軸を読み取ればチップの熱容量を求められる。チップの次はダイボンド、ダイパッド、グリース、ヒートシンクと各部分の熱抵抗と熱容量が読み取れる。全ての要素の熱抵抗を加えた値が構造体の合成熱抵抗となる。熱が伝わりにくい部分は熱抵抗が大きいので傾きが小さいなり、逆に熱が伝わりやすい部分は熱抵抗が小さく傾きが大きくなる。さらにチップとダイパッド、ヒートシンクは接触の影響はなく材料自身の熱抵抗であるため、材料自身の熱抵抗以外にも密着要素があるダイボンドやグリースに比べ熱抵抗は小さい。周辺環境は熱容量が無限大である。

6.3 凹凸板を用いた過渡熱測定

図10に示す凹凸板と凹凸がない表面をフライス盤で研磨したFlat板を用いてTIMの密着具合に関する評価を行った。図15に実験構成、測定の様子を図16に示す。素子と凹凸板の間には接触の影響を少なくするためにシリコングリスを塗布した。

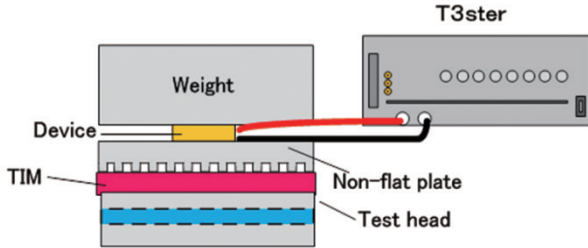


図15 過渡熱測定の実験構成

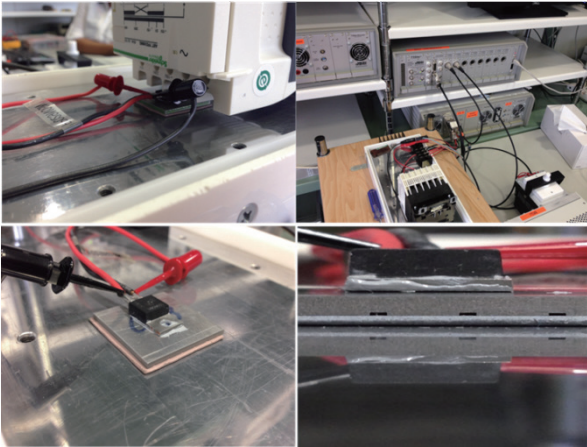


図16 測定の様子

T3Sterによって発熱源に大電流2.4Aを加えて定常状態になるまで300s電流を流しつづけ、 $1\mu s$ で微小電流10mAに切り替えた瞬間の電圧から電圧が定常状態になるまで測定する。発熱体の大きさは $10\text{mm} \times 15.5\text{mm}$ であり、印加圧力は 10290Pa 、Test headは 27°C 一定である。図17、18、19、20に過渡熱測定の実験結果を示す。さらに定常法の結果と過渡熱測定結果を比較するために、図12に示した結果を書き換えた結果を図21に示す。

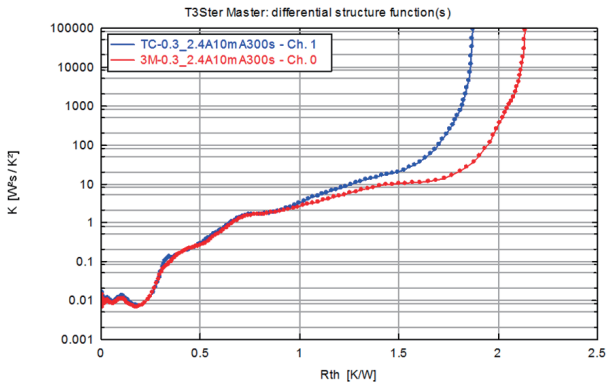


図17 熱抵抗 vs. Kファクタ 横一線1mm板

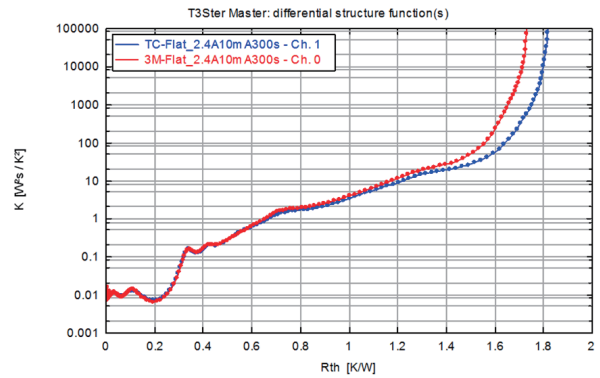


図18 熱抵抗 vs. Kファクタ Flat板

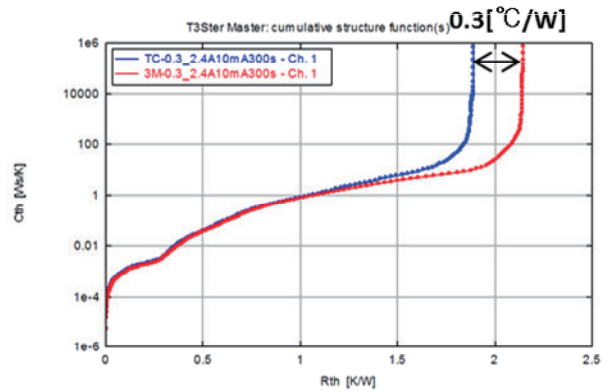


図19 熱抵抗 vs. 熱容量 横一線1mm板

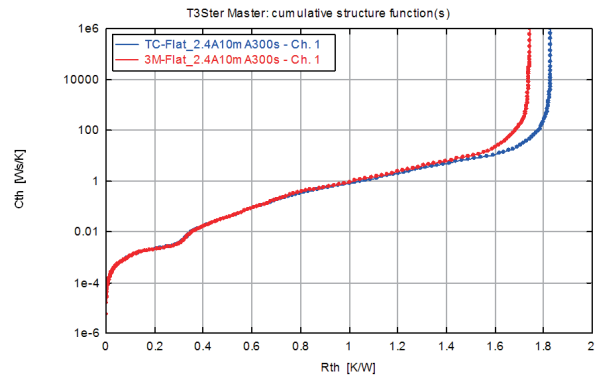


図20 熱抵抗 vs. 熱容量 Flat板

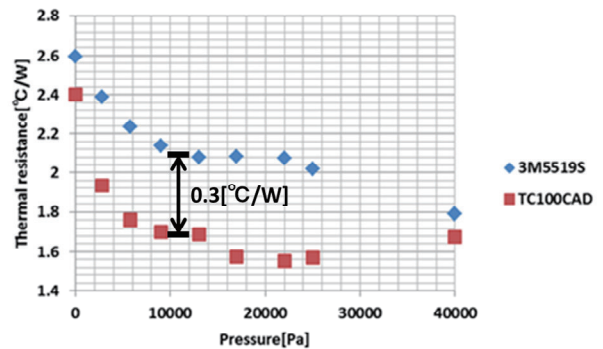


図21 10000Pa付近の材料による熱抵抗差 横一線1mm板

図 17～20 の実験結果から、Flat 板は TC100CAD よりも熱伝導率が良い 3M5519S のほうが、熱抵抗は小さい結果を得た。しかし、横一線凹凸板では 3M5519S より熱伝導率は劣るが材料硬度が小さい TC100CAD のほうが有利だということが明らかになった。さらに、印加圧力を 10290Pa として共通にした場合、図 17 の過渡熱測定で評価した材料による熱抵抗差の結果と図 21 の定常法で評価した熱抵抗差の結果と合っていることから、我々が構築した温度調整システムと凹凸板を用いて、定常法で評価した熱抵抗測定法の有効性を、過渡熱測定によって証明した。さらに、過渡熱測定を用いた場合でも凹凸板を用いた実験が有効であることも明らかにした。

6.4 過渡熱測定の繰り返し実験

凹凸板を用いた過渡熱測定の有効性を確かめるために 3M5519S と横一線 1mm 凹凸板を用いて、繰り返し測定を行った。

なお密着具合の影響を見るために凹凸板の向きを変えて測定した。対応図を図 22 に実験結果を図 23、24 に示す。

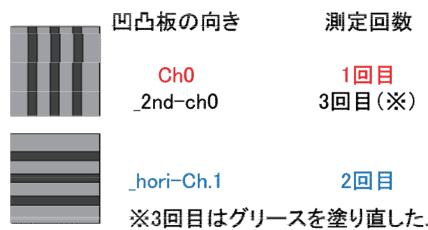


図 22 凹凸板の配置

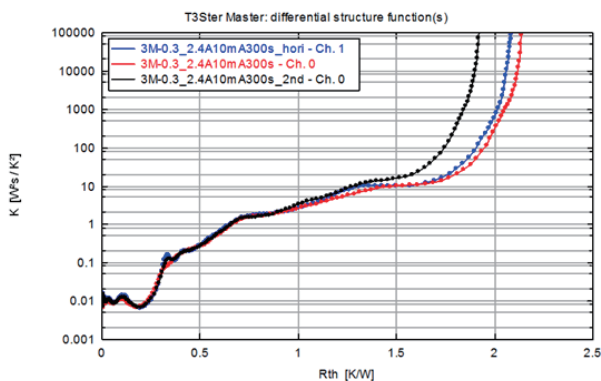


図 23 熱抵抗 vs. K ファクタ 繰り返し実験

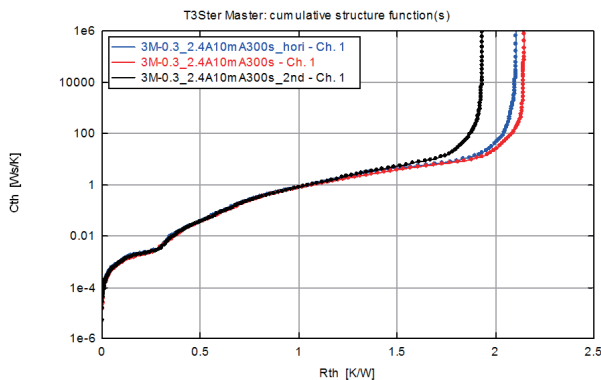


図 24 熱抵抗 vs. 熱容量 繰り返し実験

図 23、24 の結果から凹凸板の配置による熱抵抗の有意差はなく、合成の熱抵抗値は約 1.9～2.1 までばらついてはいるが、このバラつきには十分に小さいといえる。このばらつきの要因は発熱面と凹凸板の間にグリースを塗布するが、塗布の作業のバラつき要素を含んでいるので、密着具合の良い熱抵抗値 1.9 のデータのほうがより正しい評価ができていると推測できる。

7. 結論

TIM の密着具合の影響を含む評価を目的として評価システムを構築し、構築したシステムの評価を行った。温度調整ヘッド表面温度が熱抵抗の温度依存性は少なく室温の影響を受けずに発熱量 50[W] まで線形に推移することが確認でき、各熱抵抗値も 1[°C/W] 未満で十分小さい値であることから、構築したシステムを用いて TIM の評価が十分可能と判断した。

構築システムした温度調整システムと過渡熱解析装置 T3Ster を用いて熱抵抗測定を行い TIM の密着具合に関する検討を行った。その結果、両測定法で測定した結果の材料による熱抵抗差が合っていることから、我々が構築した温度調整システムと凹凸板を用いて、定常法で評価した熱抵抗測定法の有効性を、過渡熱測定によって証明し、定常法とはまったく測定原理が異なる過渡熱測定を用いた場合でも凹凸板を用いた実験が有効であることも明らかにした。今後は、過渡熱解析装置と凹凸板を用いて際に印加圧力を変化させたときの熱抵抗変化を測定しどのくらい圧力を加えると適切な密着具合を得られるかを検討する。

謝辞

本研究を進めるにあたり実験環境を提供してくださった、メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社の富田直人様、原智章様、楯朗様、バダラワ・ワサンタマーラー様、研究のご指導頂いたキーナスデザイン株式会社 橋純一様に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 石塚勝, "半導体・電子機器の熱設計&解析", 三松株式会社出版事業部, pp. 1, (2010. 10).
- [2] 浅井希企画編集, "失敗しない熱設計の進め方と放熱部材の選定・活用技術、測定・評価", 技術情報協会, pp. 34-35, (2011. 4)
- [3] 石原靖久, "ポリファイル", 株式会社大成社, Vol. 48, No. 9, pp. 16-20, (2011. 9)
- [4] メンター・グラフィックス・ジャパン, "ポリファイル", 株式会社大成社, Vol. 48, No. 9, pp. 40-41, (2011. 9)