# TIMの密着具合に関する研究

斎藤靖弘<sup>1</sup>·鈴木悟<sup>2</sup>·小室貴紀<sup>3</sup>

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 SAITO<sup>1</sup>, SATORU SUZUKI<sup>2</sup>, TAKANORI KOMURO<sup>3</sup>

## 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できる。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 でも変化するので、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 業者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ーンシートタイプの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 2 使用した TIM

表 I 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30 φ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Δt1、温度調 整ヘッド表面と水温の温度差をΔt2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[℃] 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。





#### 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 Rh[℃/W]、抵抗器から温度調整ヘッド表面まで の熱抵抗 Rm[℃/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	Rh	Rm
temperature [°C]	[℃/ ₩]	[℃/\]
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、Rh[℃/W]、 Rm[℃/W]の熱抵抗値も1[℃/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。



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 $\Delta T$ であるとき、比例関係が存在する。これは 温度差 $\Delta T$ を電位差 $\Delta V$ 、伝熱量Qと電流Iが各々対応し、 熱抵抗R $\theta$ 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、並列の法則が適応で 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 $\Delta$ t3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 ベ小さい。抵抗器に電圧印加後500[s]で温度差 $\Delta$ t1が安 定したと仮定し、500[s]時の温度差 $\Delta$ t1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よりも 接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、1µs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 10mm×15.5mm であり、印加 圧力は 10290Pa、Test head は 27℃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 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 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[℃/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冨田 直人 様、原 智章 様、楫 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 橘 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",株式会社大成北,Vol.48,No.9,pp.40-41,(2011.9)