

# 博士論文

接触状態を考慮した熱伝導材料の  
評価手法に関する研究

Studies on evaluation methods of thermal interface  
material including contact condition

神奈川工科大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻博士後期課程

1392001 齋藤 靖弘

指導教員 小室 貴紀 教授

提出年月日 平成 28 年 3 月 18 日

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 本研究で用いる熱パラメータについて	2
1.3 熱伝導材料の種類と特徴	3
1.3.1 サーマルグリース	4
1.3.2 熱伝導シート	5
1.3.3 シリコンパッドシート	6
1.4 熱伝導材料の熱特性に関する評価方法	6
1.4.1 トランジスタ法	7
1.4.2 モデルヒーター法	8
1.4.3 ASTM D5470 規格	8
1.4.4 JEDEC51 規格	9
1.5 熱伝導材料の密着性に関する評価法	10
1.6 本研究の目的と構成	12
参考文献	16
<b>第2章 新しい熱抵抗測定の評価用治具とその特性評価</b>	<b>18</b>
2.1 はじめに	18
2.2 表面粗さを制御する凹凸板の提案	19
2.3 本研究で使用した実験設備について	20
2.4 評価対象の熱伝導材料	22
2.5 凹凸板を用いた熱抵抗測定の方法	23
2.6 実験結果と考察	24
2.7 素子や放熱器の表面粗さについて	26
2.8 金属メッシュを用いた熱抵抗測定の実験	28
2.9 金属メッシュを用いた熱抵抗測定の実験結果と考察	28
2.10 まとめ	31
参考文献	32
<b>第3章 熱伝導材料の静電容量測定</b>	<b>34</b>
3.1 はじめに	34

3.2 静電容量測定に関する予備実験	34
3.3 凹凸板を用いた Type2-TIM の静電容量測定	43
3.4 接触状態に直接関連する静電容量	46
3.5 凹凸板を用いた静電容量測定の理論モデル	52
3.6 金属メッシュを用いた静電容量測定の実験構成	54
3.7 静電容量測定の実験結果	55
3.8 金属メッシュを用いた静電容量測定の理論モデル	57
3.9 まとめ	58
参考文献	60
<b>第 4 章 本研究で提案した熱伝導材料の評価手法の応用例</b>	<b>61</b>
4.1 サーマルグリースの BLT 評価	61
4.2 BLT と静電容量の同時測定の実験構成	63
4.3 BLT と静電容量の同時測定の実験結果	65
4.4 熱抵抗と静電容量の関係	67
4.5 サーマルグリースの静電容量測定に関する理論モデル	69
4.6 高硬度 Type2-TIM の評価	70
4.7 Type2-TIM の熱伝導率と厚さから熱抵抗を算出	71
4.8 まとめ	72
参考文献	73
<b>第 5 章 結論</b>	<b>74</b>
<b>謝辞</b>	<b>75</b>
<b>本研究に関する論文</b>	<b>76</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

1980年代までは定量的な放熱対策を行わなくても余裕があるため、熱が原因で電子機器の性能に直接影響を及ぼすことは少なかった。1990年代から熱対策が必要であるという社会的な共通認識が形成されていった。このような契機は電子機器の高集積化、高性能化が進んでいることによる[1]。現在も高機能、高性能化に加えて小型化も進んでおり、発熱密度の増加だけでなく、放熱に必要な表面積の減少をもたらしている[2]-[3]。発熱密度や実装部品点数の増加が加速し、結果として高密度実装下での冷却が困難になっている[4]。

図 1.1 に示すように、電子機器の冷却は放熱器による自然空冷のみでは放熱限界となり、ファンなどによる強制空冷が広く適用されている[5]。

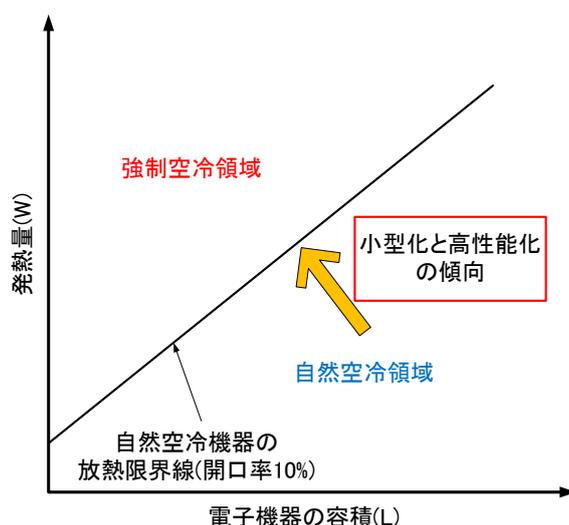


図 1.1 電子機器の小型化、高性能化と発熱量の関係

強制空冷領域と自然空冷領域を区切った直線は自然空冷で放熱に必要な通気口が全体の表面積に対して 10%、形状が立方体、電子機器による温度上昇の上限が 25℃といった一般的な電子機器を仮定した。この 25℃は熱設計でよく使われる目標値である。この線より上に位置する身近な電子機器の例としてノートパソコンやデスクトップパソコンなどが挙げられる。放熱限界を超えてしまうと様々な問題が発生する。例えば、素子の誤動作や性能の低下、高温によるやけどの危険性があり、最悪の場合は壊れる[6]。白熱電球に比べれば低消費電力である LED 電球でさえも放熱対策を怠ると性能の低下や寿命が短くなる[7]。

また、製品開発の現場で熱設計の重要さが浸透していないことも問題である。一例として電気設計者は、試作評価後に熱問題がある場合のみ熱対策を実施すればよいという考え方や、熱設計は他分野だと思っている人が多い。電気設計者と機械設計者間の技術の会話

のやり取りは消費電力と温度上昇のみで、放熱の議論があまりされていないのが実状である。熱はパワートランジスタなどの素子から発生するので、機器の総発熱量を決めるのは電気設計者である。熱の問題が発生するタイミングが開発の最終段階に近づくにつれ、素子を実装された回路が完成しており、電気設計者側からは熱対策を行うことが難しくなる。機械設計者が放熱器を大型化、あるいは放熱器自体の数を増やして熱対策を行って解決する。このような後から行う放熱対策を防ぐためには、開発の初期段階から電気設計者と機械設計者が情報を共有して、適切な熱設計を行うことが求められている[8]-[9]。

## 1.2 本研究で用いる熱パラメータについて

本研究では熱パラメータを使用しているため、ここでは熱パラメータについて説明する。熱が伝わる形態には熱伝導、対流、ふく射の3形態がある。そのうちの熱伝導は、固体内あるいは静止している気体、液体内において行われる伝熱形式である。一般に固体内部の温度分布は固体の位置および時間で変化する。このような場合を非定常熱伝導というが、熱伝導の基本となるのは時間に対して温度が一定となる定常熱伝導である。

定常熱伝導時に熱の伝わる方向が1軸方向のみの場合を1次元定常熱伝導という。実際の熱伝導は1次元定常熱伝導ではないが、他軸方向による影響が十分少ないことを検証したうえで近似的に1次元定常熱伝導と見なして解析を行えば、温度分布を容易に把握できるので、現在でもこの手法が多く利用されている。

電子機器内部の素子は、使用することにより熱を発する発熱源である。そのため、素子から放熱器あるいは空気までの放熱特性を把握することは重要である。この放熱特性を示す熱パラメータが熱抵抗である。熱抵抗の定義は、ある2点間の伝熱量(=発熱量) $Q[W]$ に対し、その間の温度差が $\Delta T[^\circ C]$ であるとき、比例関係が存在する。図1.2に示すように温度差 $\Delta T[^\circ C]$ と電位差 $\Delta V[V]$ 、伝熱量 $Q[W]$ と電流 $I[A]$ 、熱抵抗 $R_\theta[^\circ C/W]$ と電気抵抗 $R[\Omega]$ が各々対応している。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。この熱伝導の法則をフーリエの法則といい、(1.1)式にフーリエの法則を定義する[10]。本研究における熱抵抗の計算はこの法則に基づいている。

$$R_\theta = \frac{\Delta T}{Q} [^\circ C/W] \quad (1.1)$$

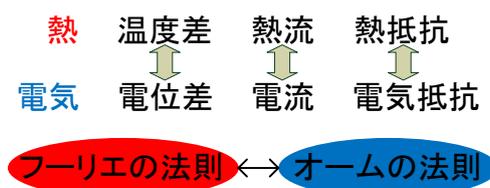


図 1.2 熱と電気のアナロジー

熱パラメータの熱抵抗は、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[11]。また、物質内部において熱流が流れる際に、熱の伝わりやすさを表す熱パラメータを熱伝導率という。これは電気パラメータの導電率(電気伝導率)に相当する。

### 1.3 熱伝導材料の種類と特徴

1960年代から現在に至るまで、電子機器から発生する熱を逃がすために熱伝導材料 Thermal Interface Material (以後 TIM と略す)を使用して、放熱対策を行っている場合が多い[12]。この TIM も用途に応じて様々な種類が存在し、以下の3種類に分けられる。

Type-1 は、サーマルグリースのようなペースト状の材料、Type-2 はシリコンパッドシートや熱伝導シートのような軟らかい固形の材料、Type-3 は非圧縮性の固体と ASTM D5470-12 規格で定義されている[13]。TIM としては Type-1 のサーマルグリースが長い歴史を有しているが、パワートランジスタや電源のように熱伝導性と電気絶縁性が同時に要求される場合には、両者の特性を有する Type-2 の熱伝導シートやシリコンパッドシートが登場して電子機器業界からの支持を得た[14]。しかし、熱伝導シートやシリコンパッドシートはペースト状のサーマルグリースと異なり固体であるため、TIM 層の厚さ分の熱抵抗と接触面の凹凸による接触熱抵抗も発生し、全熱抵抗が増加する[15]。近年は熱的制約が厳しいことから、定量的な放熱対策を行う必要が増えてきている。これは接触熱抵抗値が小さい Type-1 のサーマルグリースも例外ではなく、グリース厚(TIM 自身の厚さ分)による熱抵抗の低減が求められている。このように素子から放熱器、基板から筐体など、接触により熱を伝える部分では、それぞれの接触状態によって熱の伝わり方が大きく異なってくる[16]。しかし、接触状態は制御不能な複数の要素(TIM の硬度や粘度や厚さ、素子や放熱器の表面粗さや反り、ネジの締め付け具合や印加圧力)で変動するので再現実験が困難かつ、このような実装状態下における放熱特性は TIM メーカーと放熱器メーカーの境界領域であり定量的な検証がされていない。素子と放熱器を直接接触させると、隙間に空気の層が存在する。素子と放熱器の間に TIM を挟むことによって空気よりも熱伝導率が良い TIM が隙間を埋めることで素子から発生する熱を逃がしやすくなる。TIM の構成は基油に高い熱伝導率を持ったフィラーが充填されている(図 1.3)。

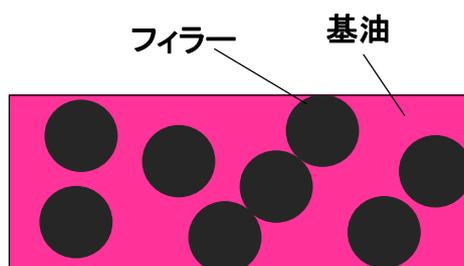


図 1.3 TIM の構成

フィラーは導電性系フィラー(金属の粒)と電気絶縁系フィラー(セラミックなどの粒)に分けられる。導電性系フィラーにはアルミ、銅、銀、カーボン材料などが使用されている。電気絶縁系フィラーとしては酸化アルミニウム、シリカ、窒化アルミ、窒化ホウ素などが挙げられる[17]。フィラーの直径は 2~100  $\mu\text{m}$ 、形状は球状のものから破砕形状まで、メーカーによって様々なバリエーションが存在する。高分子材料のみで TIM を構成すれば、軟らかく成形性に優れるが、熱伝導率は金属材料に比べて圧倒的に低い。現在、市販されている TIM は高い熱伝導率を持ったフィラーを配合することによって、高い熱伝導性と素子や放熱器に対しての密着性を併せ持っている。実際に接触熱抵抗を低減する際には、TIM は Type-1 と Type-2 が使用される。代表的な TIM の特徴を表 1.1 に示す。以下に各種 TIM の特徴と用途について詳しく説明する。

表 1.1 各種 TIM の特徴

種類	特徴
サーマルグリース(Type1-TIM)	ペースト状、低熱抵抗、取扱いが困難
熱伝導シート(Type2-TIM)	電気絶縁性、高耐熱性、取扱いが容易
シリコンパッドシート(Type2-TIM)	柔軟性、高電気絶縁性

### 1.3.1 サーマルグリース

Type1-TIM のサーマルグリースはペースト状であるため、素子やヒートシンクの表面の凹凸に追従して密着することで、熱抵抗を小さく抑えることができる。一方で、Type2-TIM に比べて熱抵抗は抑えることができるが、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。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[18]。

一般に、サーマルグリースの熱伝導率と粘度との間には密接な関連があり、各材料メーカーのサーマルグリースを比較すると、熱伝導率が高いグリースは低いグリースと比較して、粘度が高くなる傾向がある。これは TIM(複合材料)の熱伝導率が高いグリースほど、フィラーの充填率(体積分率)が高くなっているのが原因である。また、熱伝導率の指標のみでサーマルグリースを採用すると、実装した際の全熱抵抗はもう一方のサーマルグリースよりも大きくなる場合がある。これは高い熱伝導率で粘度が大きいサーマルグリースよりも低い熱伝導率だが粘度は小さいサーマルグリースのほうが同じ圧力を印加した場合には、グリースの膜厚は薄くなるためである。(1.2)式のようにグリースの膜厚 $t[m]$ と TIM 自身の熱抵抗 $R_{\theta TIM}[\text{C}/\text{W}]$ の間には比例関係があり、グリースの膜厚 $t[m]$ と熱伝導率 $\lambda[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ とは反比例の関係が成立する。

$$R_{\theta TIM} = \frac{t}{\lambda A} [\text{C}/\text{W}] \quad (1.2)$$

よって、仮に熱伝導率が 2 倍良くても、粘度が大きくなりグリースの膜厚が 3 倍になると全熱抵抗は大きくなる。放熱グリースを選定する際には熱伝導率だけではなく、粘度も参考にしうえて熱抵抗を評価する必要がある。ここまで行ってもグリースの塗布作業のバラつきが生じ、また同じ素子やヒートシンクの型番であっても表面粗さが異なるので、熱抵抗が安定しないことが多い。サーマルグリースはパソコンの CPU、LED からの放熱用に用いられてはいるが、電気絶縁性が要求される場合は TIM 単体では使用できない。表 1.2 に導電性系フィラーと電気絶縁系フィラーの並列等価抵抗(電気絶縁抵抗)値に関する測定結果を示す。なお、グリースの膜厚は 100  $\mu\text{m}$  以下である。

表 1.2 導電性系フィラーと電気絶縁系フィラーの電気絶縁抵抗(実測)

フィラーの種類	導電性系フィラー	絶縁系フィラー
電気絶縁抵抗[m $\Omega$ ]	49	973

表 1.2 より、電気絶縁系フィラーを使用したサーマルグリースもグリースの膜厚が薄いため、TIM 単体では電気絶縁を確保できないことがわかる。セラミックは高電気絶縁性と高熱伝導性の両面を兼ね備えているが、セラミック自身が硬いので、単体で使用した場合は接触熱抵抗が大きくなる。グリースの表面凹凸追従性、セラミックの高熱伝導性と高電気絶縁性を利用するために、セラミックとサーマルグリースを併用して使用されるケースも多い。

### 1.3.2 熱伝導シート

熱伝導シートは熱伝導性、電気絶縁性を有していて、固体で形状が変化しにくいので取扱いが容易である。そのため、1.3 節でも述べたように、パワートランジスタや電源の周辺で使用されている(図 1.4)。熱伝導シートの厚さは 0.1mm から 1.0mm 以上まで様々であるが、サーマルグリースの膜厚と同様に、熱伝導シートの厚さが薄くなるほど、TIM 自身の熱抵抗は小さくなる。しかし、同時に TIM の厚さが薄くなると電気絶縁抵抗は小さくなるため、実装する際に、熱特性と電気特性の両面を考慮して材料を選定する必要がある。

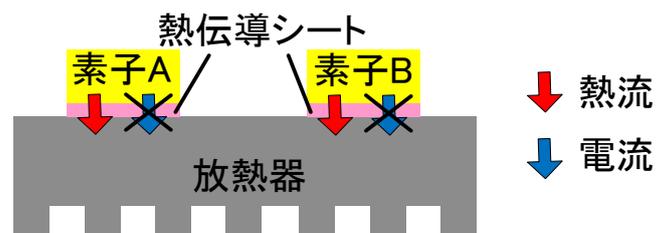


図 1.4 熱伝導と電気絶縁の両立

### 1.3.3 シリコンパッドシート

シリコンパッドシートは熱伝導シートと同様に熱伝導性、電気絶縁性、耐熱性を有した TIM である。熱伝導シートと異なる点は、TIM 自身が軟らかいため、(低硬度あるいは超低硬度)発熱体や放熱器との密着性が良い。しかし、変形しやすい材料であるため、フィルムシートで保護して提供されている。シリコンパッドシートは、その良好な密着性により、発熱体や放熱器との間の接触熱抵抗は減らすことはできるが、熱伝導シートと比べて TIM 自身の厚さが厚くなる傾向があるため、TIM 自身の熱抵抗についても注意が必要である(図 1.5)。

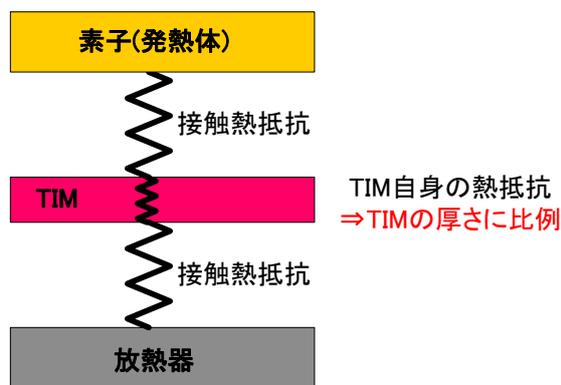


図 1.5 シリコンパッドシートの全熱抵抗

## 1.4 熱伝導材料の熱特性に関する評価方法

近年、TIM が熱的に厳しい条件下で使用されることが増えてきているので、接触状態の改善をさらに考慮した TIM の開発が進んでいる。1.3 節で述べたように、TIM には Type1 のサーマルグリース、Type2 の放熱シートやシリコンパッドシートなど様々なものがあるだけでなく、複数の物質が積層された TIM など多様である。TIM 単体の熱特性は熱伝導率で評価されている。熱伝導率が大きいほど、TIM 単体の熱的性能が良いことを示す。熱伝導率の測定法は定常法、パルストラランジェント法、レーザフラッシュ法など様々な方法が存在する[19]。表 1.3 に、代表的な熱伝導率測定法をまとめた。

表 1.3 代表的な熱伝導率測定法の特徴

測定法	特徴
定常法	精度が良い、大きな試料が必要、測定に時間がかかる
パルストラランジェント法	小さな試料、ジュール熱による周期加熱
レーザフラッシュ法	小さな試料、光による周期加熱
ホットディスク法	Type1-TIM に有利、ジュール熱によるステップ加熱

定常法を用いて正確な測定結果を得るためには、TIM の厚さを増やして十分長い距離で温度差を発生される必要がある。試料としては、50mm～300mm 角で厚さ 20mm が一般的である。他の熱伝導測定法と比べて時間はかかるが、より正確な実験結果が得られる。

パルストラランジェント法は非定常の接触加熱、レーザフラッシュ法は非定常の非接触加熱に分類される。この 2 種類の方法は赤外放射計や反射率変化を用いて測定を行うため、十分な温度応答を生じさせる必要があるため、10mm 角で厚さが 1～5mm の小さい試料を使用する。接触加熱はヒーターなどによるジュール熱を利用した加熱、非接触加熱はランプやレーザなどの光による加熱を利用している。

ホットディスク法は、半導体技術を利用して製作した螺旋状のパターンに、一定電流を流してジュール熱を発生させる。このジュール熱による温度上昇と螺旋状のパターンの物性値から熱伝導率を算出する。この螺旋状のパターンがホットディスクセンサであり、加熱面と温度センサの役割を果たす。ペースト状である Type1-TIM の熱伝導率測定にも使用できるので、材料メーカーがホットディスク法で評価した熱伝導率をカタログ値に記載していることが多い。

しかし、測定法の違いにより熱伝導率の値が大きく異なる場合がある。評価対象の TIM の形状などの特徴を検討して測定対象に合った評価方法を選択することが重要である。TIM メーカーが適切な測定法で熱伝導率の真値を公開していても、ユーザーの実測結果と TIM メーカーのカタログ値が異なることも多い。この原因は、熱伝導率の測定が実装状態(接触状態)を反映していないことにある[20]。TIM の形状、密着性を含めた実装条件に近い熱特性を示すパラメータは熱抵抗であり、各材料メーカーもカタログに記載していることが多い。熱抵抗は値が小さいほど、実装時における熱特性が良好であることを示す。

以下では、各種 TIM の実装時における熱特性に関する評価方法を紹介する。

### 1.4.1 トランジスタ法

トランジスタ法では、図 1.6 に示すように、評価対象の TIM を TO-3P、TO3PL、TO-220 のトランジスタと放熱器の間に挟んで、ネジ(所定のトルク)で固定する。

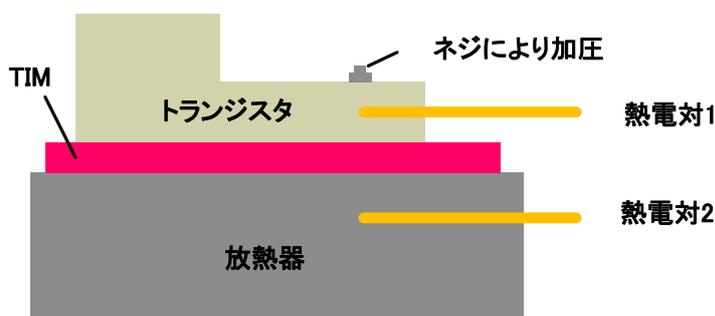


図 1.6 トランジスタ法を用いた Type2-TIM の熱抵抗測定

トランジスタに電力を加え、温度が定常になるまで 5~10 分待ったうえで、トランジスタと放熱器の温度を測定して熱抵抗を求める。特徴は実装環境下に近い環境で熱特性を得られるが、定常状態での温度を測定するために時間を要する。

## 1.4.2 モデルヒーター法

モデルヒーター法では、発熱体として金属ケースの中にヒーターを埋め込んだモデルヒーターを使用する。図 1.7 に示すように、TIM をモデルヒーターと放熱器の間に挟んで所定の荷重を加え、モデルヒーターに電力を印加する。温度が定常になるまで 5~10 分待ったうえでモデルヒーターと放熱器の温度を測定し熱抵抗を求める。特徴はトランジスタ法と同様、実装状態に近い環境で熱特性を得られるが、定常状態での温度を測定するために時間を要する。

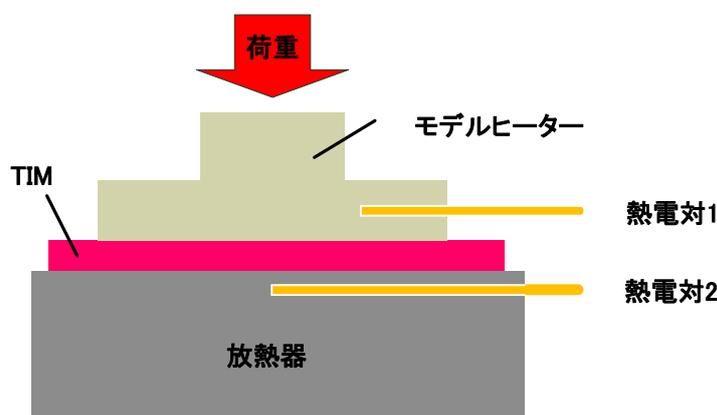


図 1.7 モデルヒーター法を用いた Type2-TIM の熱抵抗測定

## 1.4.3 ASTM D5470 規格

図 1.8 に示すように、上部メーターバーと下部メーターバーの間に TIM を挟み、上部メーターバー側のヒーターに電力を加える。下部メーターバー側のテストヘッドは一定温度に保たれている。上部メーターバーと下部メーターバーの位置と温度の関係から、TIM の熱抵抗を求める。T1~T4 には熱電対が取り付けられており、この評価方法の特徴は、トランジスタ法やモデルヒーター法と異なり、上部メーターバー側の印加圧力を変えることができるので、印加圧力に対しての熱抵抗を再現性良く評価することが可能である。一方、デメリットは、直線近似の精度を確保するために、細長い形状のメーターバーが必要であることや温度測定に時間がかかることである[21]。

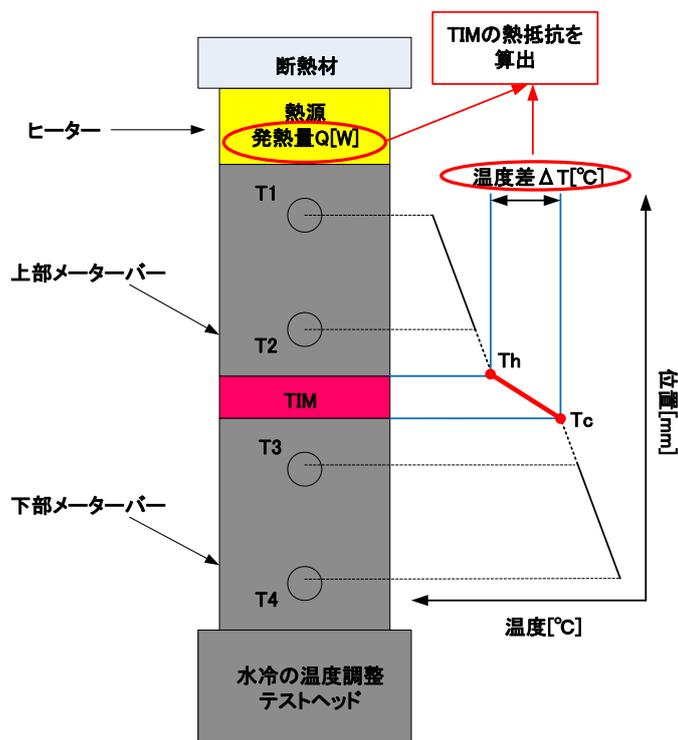


図 1.8 ASTM D5470 に準拠した熱抵抗測定の実例

### 1.4.4 JEDEC51 規格

JEDEC51-1 Static 法と JEDEC51-14 一次元放熱経路を持つパッケージの熱抵抗測定法は、JESDC 準拠の過渡熱測定規格である。JESD51-1 は、発熱源である素子が半導体で構成されている場合が多いことを利用して、半導体の PN ジャンクションに一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、温度と電圧との間には、線形な関係がある。図 1.9 に過渡熱測定の実例を示す。

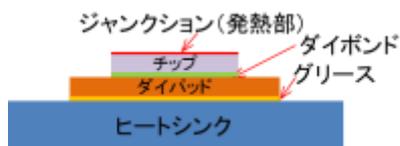


図 1.9 過渡熱測定の実例

まず、発熱部に一定の電圧を加え、ジャンクション温度が十分に上昇した段階で、 $1\mu\text{s}$  の立下りで微小電流に切り替える。この微小電流が上記の一定電流に相当する。次に、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、温度係数から電圧を温度に変換する。この一連の値が、時間変化に対する温度の過渡熱データである。以上から、この

データにより、熱抵抗と熱容量の関係を算出することができる[22]。

図 1.10 に過渡熱測定の実例を示す。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。まずチップの熱特性が現れ、横軸から、その熱抵抗を求めることができ、縦軸からはチップの熱容量が求められる。続いて、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評価できる。

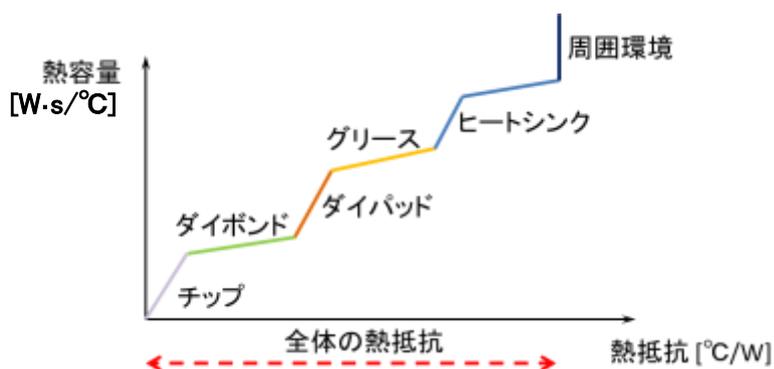


図 1.10 過渡熱測定の実例

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くなり、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、ダイパッド、ヒートシンクは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。なお、周辺環境は熱容量が無限大である。JEDEC51-14 では、ジャンクションからチップ表面までの熱抵抗を求める測定規格が追加されている[23]。これにより、発熱体の内部温度が測定できるメリットがある。また、発熱体表面から放熱経路までの熱抵抗も求めることができる。しかし、実際には接触状態の部分(グリース)が埋もれて把握できないことが多い。この過渡熱測定評価法も熱抵抗を測定するのに時間がかかる。

## 1.5 熱伝導材料の密着性に関する評価法

1.4 節でも述べたが、TIM 単体の熱特性は熱伝導率、TIM の実装時における熱特性は、密着性を含めた実使用条件に近い熱抵抗で表現される。しかし、TIM メーカーのカタログに記載されている熱抵抗の値は、特定の条件下での熱特性を示しているため、ユーザーが実装した際の熱抵抗と同じになるとは限らない。TIM メーカー側もユーザーが様々な素子や放熱器を使用するので、自社で製造する TIM 単体の熱特性は熱伝導率で保障しても、熱抵抗までは保障できない。ユーザーは実装する素子や放熱器の形状、電気絶縁の必要性に加えて密着性も含めて熱設計、熱対策を行っている。ペースト状の Type1-TIM は粘度、固体の Type2-TIM は硬度がカタログに記載されている。この粘度と硬度は TIM が素子や放

熱器の凹凸に対する密着性を示すパラメータで、密着性が良ければ熱抵抗を低減できる。ここでは、ペースト状の Type1-TIM より密着性が悪い、固体の Type2-TIM を評価するうえで重要となる、硬度に関する評価法について述べる。Type2-TIM の熱伝導シートやシリコンパッドシートの密着性は、AskerC 硬度(JIS K 7312)と密接な関係を持っている。海外の硬度指標はASTM(アメリカ材料試験協会)の Shore OO なども挙げられるが、Shore OO も AskerC も、数値が大きくなるほど、材料の硬度が硬いことを示す[24]。日本国内で提供されている Type2-TIM は、JIS K 7312 の附属書 2 スプリング硬さ試験タイプ C 試験方法(日本ゴム規格 SRIS 0101 膨張ゴムの物理試験方法)に準拠した測定法で、硬度を示していることが多い。この規格では、測定対象である TIM は厚さ 10mm 以上にして硬度を測定する(図 1.11)。

図 1.12 に、一般的な AskerC 硬度計の原理を示す。この硬度計はデュロメータと呼ぶこともある。AskerC 硬度計の押針の先端の形状は円形で、直径は 5.08mm である。その押針をスプリングの力で材料の表面を押しつけて変形を与え、材料の抵抗力とスプリングの力が安定した状態で、押針の押し込み深さをもとに硬度を測定する。

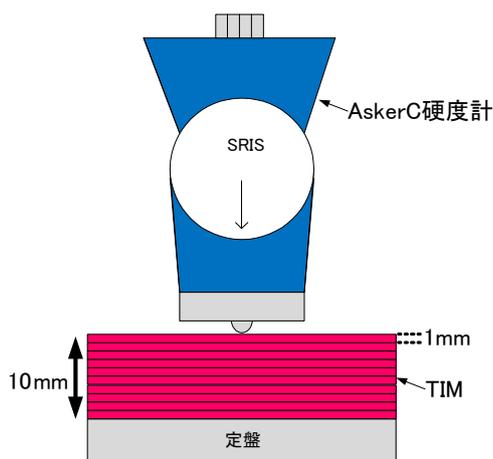


図 1.11 Type2-TIM の AskerC 硬度に関する試験方法

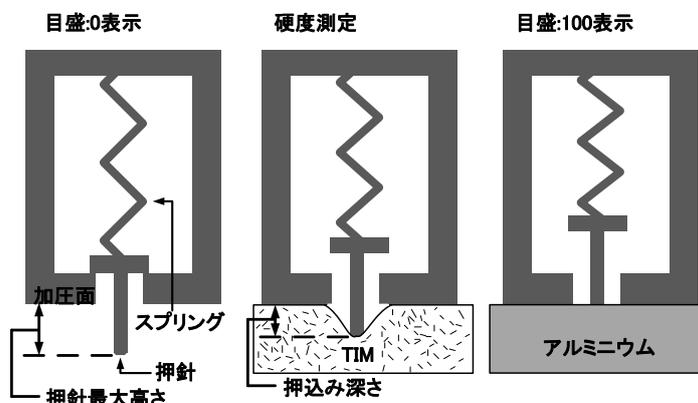


図 1.12 AskerC 硬度測定の方法

硬度計の目盛が 0 のときの押針の先は、加圧面から 2.54mm だけ突き出ている、目盛が 100 のときは加圧面と同一平面上になる。測定する材料が軟らかい(硬度が小さい)場合、材料の抵抗力とスプリングの力が安定するまで時間を要するので、AskerC 硬度の評価は、加圧面を密着してから一定時間後の硬度を記録する必要がある[25]。AskerC 硬度の評価で、TIM の厚さを 10mm より薄くするにつれて、素子や放熱器の凹凸に対する密着性が低下する。しかし、薄い TIM であってもその厚さと素子や放熱器の凹凸の比が十分に小さく、AskerC の押針の直径よりも十分無視できる程度の大きさであれば、TIM の裏面の放熱器や電子部品による硬度の影響を受けずに相対的に材料は軟らかく見える。よって低硬度 TIM のほうが高硬度の TIM よりも小さい圧力で、微細な凹凸に追従することが予測できるので、AskerC 硬度が Type2-TIM の密着性に関する目安になっている。

しかし、実際には Type2-TIM を 10mm 以上の厚さで使用すると、密着性は良いが TIM 自身の熱抵抗が増えるので、現実的ではない。さらにこの硬度測定も、実装環境で直接測定した特性ではない。また、接触状態を考慮した TIM の特性を求めるには、AskerC 硬度は材料の硬度を知る目安で AskerC 硬度のみで電子部品や放熱器の表面形状で変化する接触状態を予測するには不十分である。したがって、実際の実装環境や条件に適した TIM の評価法について、さらなる検証が必要である。

## 1.6 本研究の目的と構成

TIM を使用せずに素子や放熱器を接触させた場合、点接触が無数に存在していて、素子と放熱器の接触面を拡大すると、接触している部分としていない部分がある。比較的高い接触圧力でも、金属表面の接触の実面積はわずかである[26]。素子と放熱器が接触している接触面積は面の粗さと接触圧力によって変化する。このような接触状態に関する実験、理論検討も行われている[27]。TIM を使用して圧力を加えるほど、TIM は接触していない隙間に入り込みやすくなるが、同時に機械的な負荷が強くなると基板などの欠損の原因になる。材料間の接触状態が良く、良好な放熱経路が得られ、機械的な負荷が少なくとも済む適切な圧力が得られる接触状態が存在する。しかし、この適切な接触状態は、熱源や放熱器の表面粗さ、間に挟む TIM によって変化するので定量的に評価するのは困難である。また、接触熱抵抗の予測式などが様々提案されているが、接触熱抵抗はそのときの接触状態で変化するので、そのまま利用できるとは限らず、接触熱抵抗を推定するには注意が必要である[28]。接触面における熱現象、すなわち接触熱抵抗を把握することは、電子機器からの放熱を総合的に評価する上で極めて重要である。

この接触熱抵抗は素子や放熱器までの合成熱抵抗に含まれていて、接触熱抵抗値は材料単体の熱抵抗に比べて圧倒的に小さい。しかし、素子が高発熱のパワーデバイスである場合、わずかな接触熱抵抗(接触状態)の変化によって、素子の温度上限を超えて壊れてしまう危険がある。

(1.3)式より、素子の発熱量 $P$ が 300W の場合、接触熱抵抗 $R_{\theta c}$ がわずか 0.1°C/W 上昇するだけで、素子の温度 $T_e$ は 30°Cも増加する。 $T_e$ は放熱面積を増やすことにより下げることが可能だが、高密度実装により放熱スペースを確保することが困難である。したがって、接触状態を正確に評価することは、今後さらに重要な課題になるといえる。

$$T_e = R_{\theta c}P \quad (1.3)$$

本研究ではこれらの問題を解決するために2つの提案を行った。

1つ目の提案は表面粗さを正確に制御して、接触熱抵抗を定量的に示す評価法である。

2つ目の提案は、接触熱抵抗を熱的な測定によって把握するには、最低でも数分間を必要とするので、静電容量測定によって接触熱抵抗を含んだ実装状態を高速に評価する手法である。

本論文は以下に述べる5章から構成した。

第1章では、TIMの評価法に着目した背景と本論文の構成について説明をする。

第2章では、本研究で使用する評価システムの精度を検証したうえで、凹凸板を使用したType2-TIMの熱抵抗測定について述べる。Type2-TIMは固形のシート状で、熱伝導性と電気絶縁性を有しているため、電気絶縁が必要な電子機器の放熱対策で多く使用されている。しかし、このような実装状態におけるType2-TIMの熱特性を再現性良く評価することは困難であり、熱設計のマージンが増えて製造コストが増加する。本章では2種類のType2-TIMと凹凸板を使用して熱抵抗測定を行った。評価結果から、接触状態を再現性良く評価することが可能となった。これにより、従来のAskerC硬度によるType2-TIMの選定方法に加え、接触状態を考慮した熱抵抗値を示すことができたので、熱設計のマージンを減らしてコスト低減が期待できる。

また、金属メッシュを用いたType2-TIMの評価法について述べている。金属メッシュは線の太さと隙間が正確かつ細かく管理されているため、素子や放熱器の表面粗さを再現することができる。また、金属メッシュのメッシュ数と各加工法による表面粗さとの対応を示した。その結果、Type2-TIMを用いる際に、接触する金属表面をどの程度滑らかに加工する必要があるかが判明した。金属表面を滑らかに加工するほどコストがかかるが、必要十分な方法を選択できる。

第3章では、凹凸板と金属メッシュを使用した静電容量測定について述べる。実装状態におけるType2-TIMの熱特性を測定するためには時間がかかってしまうので、量産検査での評価法としては使用することはできない。現状では製品不良や寿命低下の確率を減らせていない。そこで、静電容量測定によって接触状態を高速に評価する新たな手法を提案し検証を行った。その結果、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量で表示したところ両者の間に相関が得られた。さらに印加圧力による静電容量の変化には、TIMの厚さや測定器自身の誤差による影響のみではなく、接触状態による影響が含まれていることが明らかになった。この

ことから、電子機器の出荷時に、熱特性を測ることなく放熱不良が検出できる可能性がある。したがって、電子機器の初期不良や性能劣化を抑えることが期待できる。

第4章では、本研究で提案した評価法の応用例として、Type1-TIMの評価と高硬度Type2-TIMの評価について述べる。Type1-TIMはペースト状であるため、固形のType2-TIMよりもTIM自身の熱抵抗を小さくできるので、電気絶縁を要求されない状況下での使用が増えてきている。サーマルグリースのようなType1-TIM自身の熱抵抗を可能な限り小さくするためには、サーマルグリースの膜厚を最適に管理することが重要である。サーマルグリースの膜厚を熱抵抗測定によって把握するには最低でも数分間を必要とし、量産時の評価としては実用的ではない。本章では静電容量測定を用いて膜厚を把握することにより、サーマルグリースの状態を迅速に評価する手法を提案する。提案手法を検討した結果、Type1-TIMを使用した場合でも、Type2-TIMと同様に静電容量を実測すれば、熱抵抗を間接的に把握できる見通しを得た。さらに、グリース塗布時のミスにより発生するボイド(空気の層)を検出できる可能性もあるので、電子機器の不良製品を出荷前に取り除くことが期待でき、製造コストの低減に貢献できる。Type1-TIMは自動車関連の電子部品から発生する熱を除去するために使用されている。今後、発熱源である電子部品の数が増えていく傾向があるので、提案手法の有用性がさらに高まると思われる。その他、高硬度Type2-TIMの評価や熱抵抗の理論解析を、各章の複数の実験データを用いて考察を行った。

第5章は結論で、本研究の成果をまとめる。

図1.13に本研究の構成と目的に関する流れを示す。

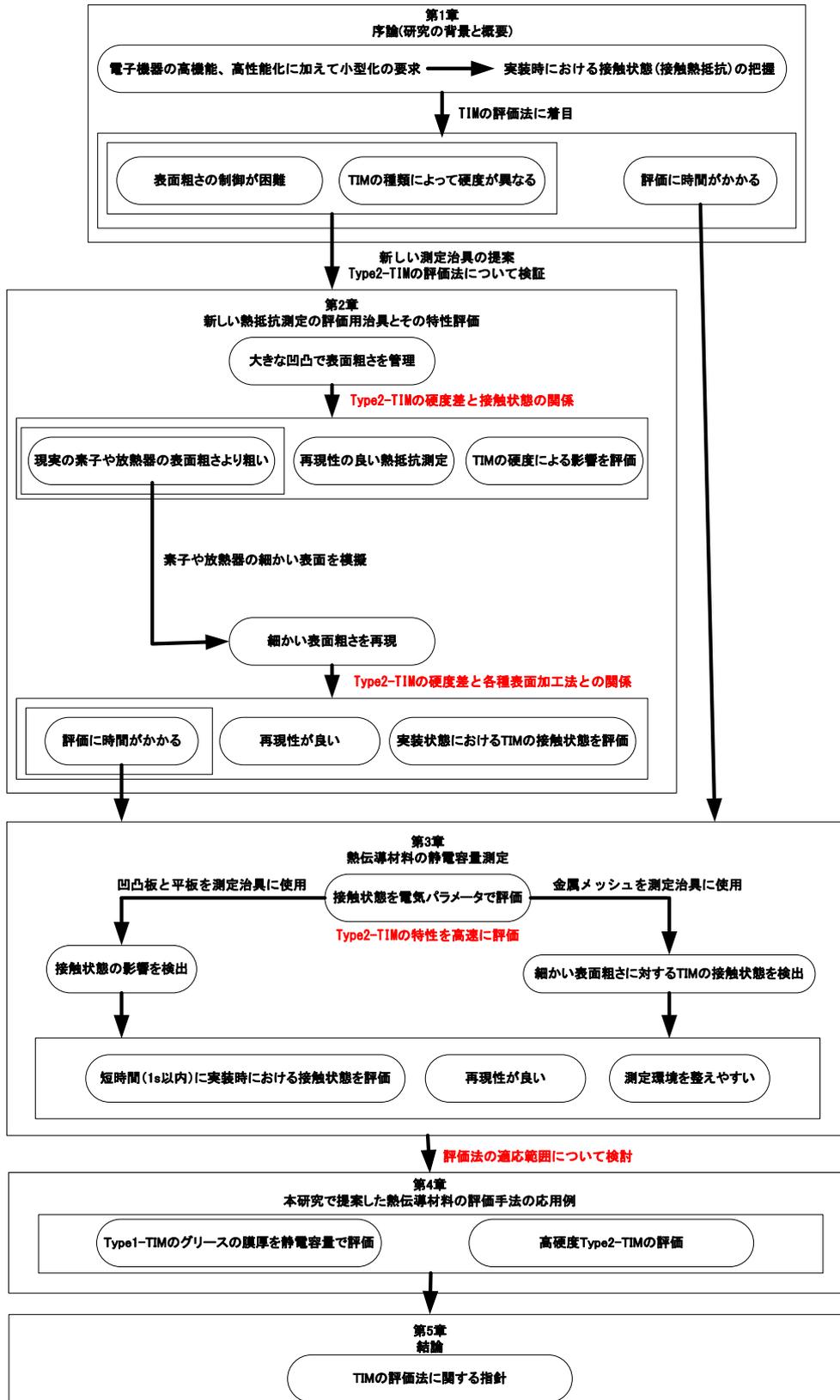


図 1.13 本研究の構成と目的

## 参考文献

- [1] 高松 伴直,久野 勝美,廣畑 賢治,“電子機器用小形熱輸送デバイスの開発”, 電子情報通信学会論文誌, エレクトロニクス J95-C(11), pp.418-426(2012.1)
- [2] 富沢 祐介,黒田 明慈,佐々木 克彦,海藤 義彦,松田 和幸,“高熱伝導材料を用いたスマートフォンケースの表面温度評価”, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013 講演論文集,pp.255-256(2013.10)
- [3] 餅川 宏,“パワーエレクトロニクスを支えるデバイスの進化と実装・回路・製作技術の発展”, 東芝レビュー,Vol.69,No.4,pp.2-7 (2014.4)
- [4] 谷津 なつき,福江 高志,廣瀬 宏一,“電子機器冷却への応用に向けた脈動流の基礎伝熱特性の解明(実験による円柱障害物まわり $\sigma$ ) 流動・伝熱特性”, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2014, B131-1-B131-2(2014.11)
- [5] 国峰 尚樹,“日経エレクトロニクス NE Academy”, 日経 BP 社,pp.96-102(2013.9)
- [6] 伊藤 謹司,国峰 尚樹,“電子機器の熱対策設計第 2 版”, 日刊工業新聞社,pp.1-3 (2006.8)
- [7] 羽深 等,“電子機器における電子回路実装の重要性”, 第 27 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会論文集,p.756 (2013.3)
- [8] 藤田 哲也,“熱設計プロセスのシステム化アプローチ”, 第 11 回熱設計・対策技術シンポジウム資料(2011.7)
- [9] 山形 孝雄 監修,“デザインウェーブマガジン”, CQ 出版社,pp.90-100(2007.3)
- [10] 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.2-3 (2010.10)
- [11] 石塚 勝,“図解入門よくわかる電子機器の熱設計”, 株式会社秀和システム, pp.96-97(2009.11)
- [12] 畠山 友行,“放熱と冷却技術”, エレクトロニクス実装学会誌,Vol.15,No. 5, pp.383-386 (2012.8)
- [13] ASTM D5470-12, “Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials”, pp.504-509 (2012.2)
- [14] 浅井 希 監修,“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”, 株式会社技術情報協会,pp.114-116(2011.4)
- [15] 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)
- [16] 日本機械学会,“伝熱工学”, 丸善株式会社,No.7, pp.195-197 (2011.1)
- [17] 新井 保 監修,“日本プラスチック工業連盟誌”, 株式会社工業調査会, Vol.60,No.9, pp.18-23(2009.9)
- [18] 柳浦 聡,廣井 治,“熱伝導グリースの信頼性評価技術”, 三菱電機技報,Vol.87,No.8, pp.37-40 (2013)

- [19] 大串 哲郎, “定常法による厚さ方向および面内方向熱伝導率測定法～TIM や多層プリント配線板の熱伝導率測定”, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.18, No1, pp.61-65(2015.1)
- [20] 谷口 彰敏 監修, “EV・HEV 車に向けた材料・部品の放熱・冷却・耐熱技術”, 株式会社情報機構, pp.46-48(2012.3)
- [21] ワタタマーラー.バダラワ, “T3Ster の基礎”, Mentor Forum 2014 - パワーデバイスの最新熱解析テクノロジーとパワーサイクル試験評価資料(2014.10)
- [22] Andras Vass-Varnai, ”A possible method to assess the accuracy of a TIM tester”, ICEP2013Proceeding, WD1-3, pp.86-95(2013.4)
- [23] “JEDEC Standard JESD51-14, Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path” JEDEC, JESD51-14 (2010)
- [24] “テックロック ゴム・プラスチック軟質物硬さ計製品カタログ 2014-2015”, p.5(2014)
- [25] 日本規格協会 監修, “JIS バンドブック 26 プラスチック I (試験)”, 日本規格協会, pp.2058-2059 (2013.1)
- [26] C.V.Madhusudana, “Thermal Contact Conductance”, Springer”, pp.1-5(1996)
- [27] Gregory Le Meur, Brahim Bourouga, Jean-Pierre Bardon, “Microscopic analysis of interfacial electrothermal phenomena-definition of a heat generation factor”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.387-401 (2005.10)
- [28] 富村 寿夫, “接触熱抵抗の測定と低減”, 2012年エレクトロニクス実装学会 最先端実装技術シンポジウム予稿集(2012.6)

## 第2章 新しい熱抵抗測定の評価用治具とその特性評価

### 2.1 はじめに

発熱する電子部品と放熱器の間には、電気絶縁性と熱伝導性を両立可能な熱伝導シートやシリコンパッドシートの TIM が多く用いられているが、各接触部には接触熱抵抗が存在する[1]。TIM 自身の熱伝導率が大きく、厚さが薄いほど TIM 自身の熱抵抗は小さくなるが、熱伝導率の良い TIM は高硬度になる傾向があり、密着させるためには大きな圧力を必要とする。さらに、発熱体である素子と放熱器の間に TIM を挟んだ熱抵抗は、TIM の物性や厚さ以外にも、素子や放熱器の実装表面における微細な凹凸(表面粗さ)に追従することによる接触状態でも変化するので、TIM 自身の硬度による追従性の評価が必要である。

しかし、高い熱伝導率の TIM を使えば放熱特性が高まるとは限らない。材料間の接触熱抵抗を減らすためには、TIM 自身の柔軟性も必要である[2]。さらに素子や放熱器の表面は完全な平面ではなく、制御することのできない微細な凹凸が存在する(図 2.1)。この微細な凹凸は接触熱抵抗に影響する要素であるが、電子部品や放熱器が同じ型番でも、微細な凹凸は個体ごとに異なっている。

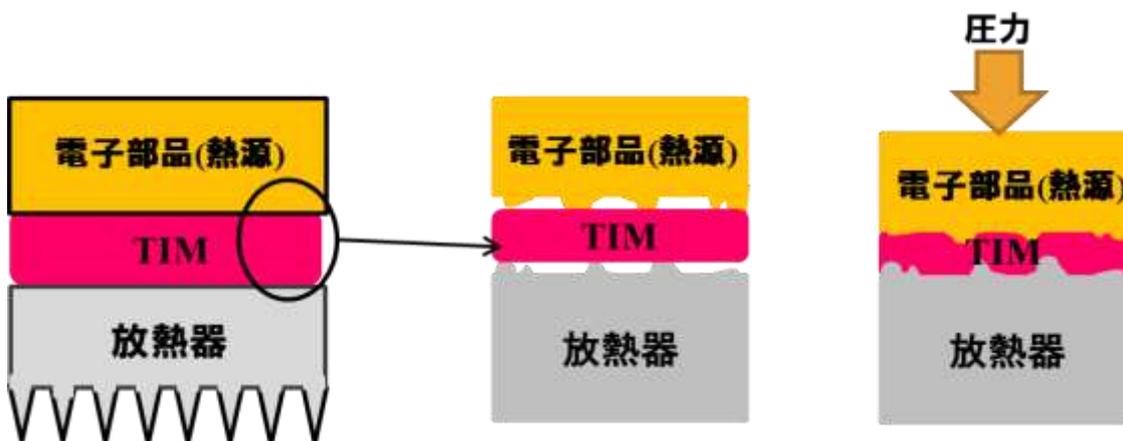


図 2.1 TIM と各接触部の表面について

現在の Type2-TIM の選定基準は、TIM 自身の熱伝導率と TIM の厚さを 10mm 以上にして実測した AskerC 硬度のみで接触状態の影響を予測するが、あくまでも TIM 単体の特性である。よって、実装時に使用する TIM の厚さ(0.3mm~2.0mm)で接触状態を考慮した熱特性の評価ができていない。接触状態を含んだ TIM の特性を評価するためには、TIM の厚さ、TIM 自身が本質的に持っている硬度、素子や放熱器の表面粗さ、TIM を密着させるための印加圧力を定量的に把握する必要がある。しかし、素子や放熱器の表面粗さを制御することは困難である。

## 2.2 表面粗さを制御する凹凸板の提案

素子や放熱器の表面粗さを制御することが困難であるため、実装状態を考慮した Type2-TIM の熱特性に関する評価が困難となっている。

そこで、TIM 単体の熱伝導率や硬度だけではなく、接触状態を考慮した TIM の熱特性に関する評価法を提案する。機械加工で作った大きな表面粗さを持つ凹凸板を測定治具にして、熱抵抗測定を行う。凹凸板の概念を図 2.2 に示す。図の左側の圧力なしの状態では、接触面の凹部には TIM が充填されておらず空気が存在する。圧力を印加すると凹部にも TIM が侵入し、その空気が追い出される [3]-[4]。

本研究で使用した凹凸板を図 2.3 に示す。50mm×50mm×3mm のアルミニウム板に 4mm 毎に幅 1mm、深さ 0.3mm の溝をフライス盤で加工した。機械加工で作った大きな表面粗さを持つ凹凸板を用いることにより、管理できる表面粗さに対する TIM の接触状態を再現性良く評価することを目的とした。

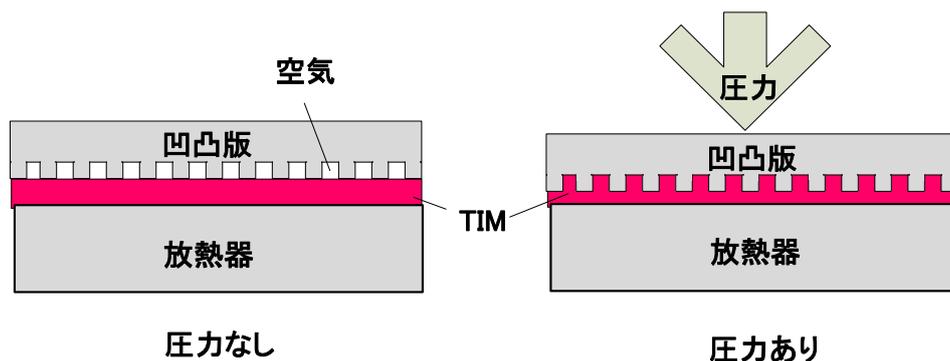


図 2.2 凹凸板の概念

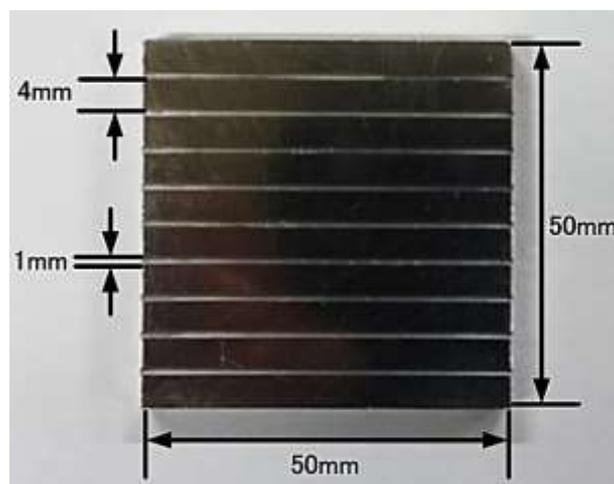


図 2.3 凹凸板

## 2.3 本研究で使用した実験設備について

TIM の評価をするためには、冷却も加熱も正確に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 2.4 に示す。

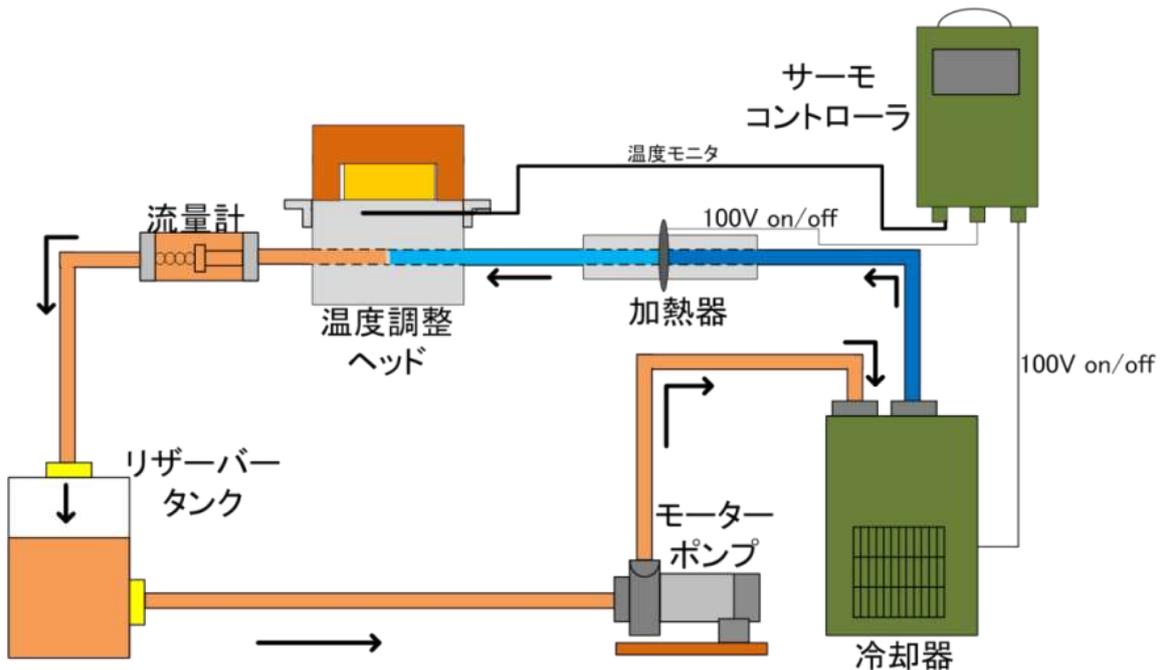


図 2.4 構築したシステム

加熱器は 100V-100W の 30φ バンドヒーターを金属パイプに巻きつけて製作した。

TIM などの被測定物を置き、その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、温度モニタを温度調整ヘッド表面の直近に埋め込んだ。

温度調整システムを評価するために、図 2.5 に示す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の程度熱吸できるか実験した。このとき、抵抗器と温度調整ヘッド表面の温度差を  $\Delta T_1 [^{\circ}\text{C}]$ 、温度調整ヘッド表面と水温の温度差を  $\Delta T_2 [^{\circ}\text{C}]$  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て 3kPa の圧力を加えた。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。温度測定には 3 本の K 型熱電対を使用し、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 2.6 に熱流と温度差に関する実験結果を示す。

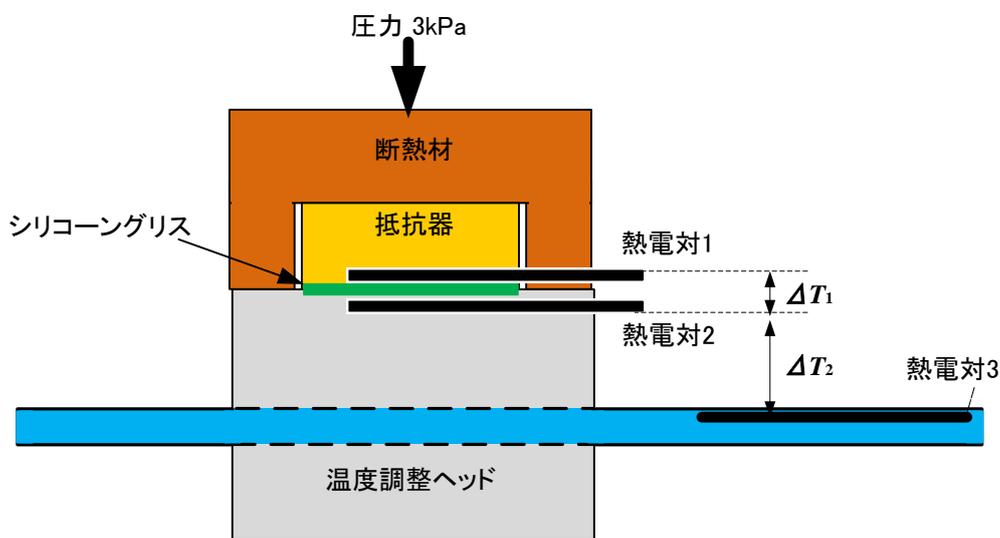


図 2.5 温度調整システムの評価

ここで、温度調整ヘッドの表面温度は、室温より高い温度  $27^{\circ}\text{C}$  一定に保った。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。

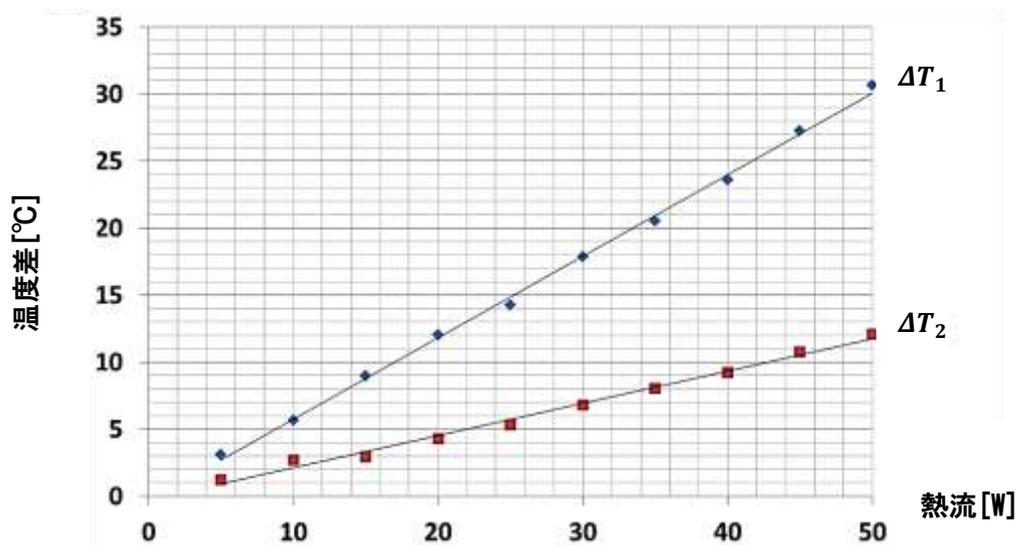


図 2.6 熱流と温度差の関係

図の  $\Delta T_1$  と(2.1)式より、抵抗器から温度調整ヘッド表面までの熱抵抗  $R_{\theta m}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ]、同様に図の  $\Delta T_2$  と(2.2)式より、温度調整ヘッド表面から水までの熱抵抗  $R_{\theta h}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ] を求めた。各熱抵抗値を表 2.1 に示す。

$$R_{\theta m} = \frac{\Delta T_1}{Q} [\text{°C/W}] \quad (2.1)$$

$$R_{\theta h} = \frac{\Delta T_2}{Q} [\text{°C/W}] \quad (2.2)$$

表 2.1 各熱抵抗の測定結果

温度調整ヘッドの 表面温度 [°C]	$R_{\theta m}$ [°C/W]	$R_{\theta h}$ [°C/W]
27	0.242	0.612

表に示す結果より、 $R_{\theta m}$  と  $R_{\theta h}$  の熱抵抗値は 1°C/W 未満であり、室温までの熱抵抗に比べて十分小さい値である。したがって、構築したシステムは室温に対しての温度依存性を十分無視できるので、TIM の評価が可能だと判断した。

## 2.4 評価対象の熱伝導材料

本研究では、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、熱伝導性と電気絶縁性を有している TIM として、シリコンパッドシートを評価した。使用した TIM の厚さは 1mm であり、その特性を表 2.2 に示す。表に示す AskerC 硬度は材料硬度の要素で、数値が大きいほど硬い材料である[5]。

3M5519S は Type2-TIM の中では AskerC 硬度が比較的大きく、TC100CAD は硬度が小さい。この硬度が小さいほど低圧力で TIM が変形しやすく、TIM 自身の厚さが薄くなる。表 2.2 の電気絶縁は TIM の厚さが減ると減少するので、電気絶縁の視点からも Type2-TIM を選定する必要がある。

表 2.2 TIM の特性(メーカーのカatalog値)

特性	3M5519S	TC100CAD
熱伝導率 [W/(m・K)]	4.9	3.2
電気絶縁[kV/mm]	3.5	11
AskarC 硬度[-]	C60	C10

## 2.5 凹凸板を用いた熱抵抗測定の方法

図 2.7 に TIM を評価する際の実験方法を示す。抵抗器の発熱がアルミの凹凸板を通して TIM に伝わり、さらにその熱が温度調整ヘッドから水に伝わる。この評価実験では熱電対 2 点の位置が重要である。

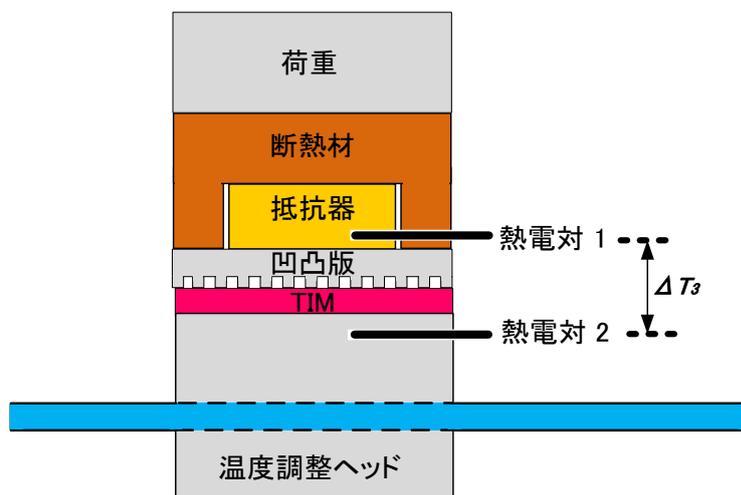


図 2.7 凹凸板を使用した TIM の熱抵抗測定

熱電対 1 と熱電対 2 との温度差  $\Delta T_3$  [°C] 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。しかし、アルミニウム凹凸板自身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 500s で温度差  $\Delta T_3$  が安定したと仮定し、500s 時の温度差と抵抗器の発熱量より、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。温度調整ヘッド表面は水流の温度制御方式を用いて、室温 (実験時は 23°C) より高い温度 27°C 一定に保った。なお、抵抗器の発熱量  $Q$  は直流電源で電圧を制御して電流を調整した上で、電圧と電流の積の値が 10W になるように設定した。温度測定には USB 接続タイプの 8ch 熱電対データロガーを用い、熱電対は K 型熱電対を使用した [6]-[7]。通常、Type2-TIM はその硬度や表面粗さの影響を受けるため、適切な接触圧力を得るためには 300kPa 前後の印加圧力が必要であるとされている [8]。しかし、100kPa 以下の低圧力では、接触状態 (接触熱抵抗) などの要素により熱抵抗が安定しない。Type2-TIM の場合、各材料メーカーの熱抵抗測定時の印加圧力は以下の通りである。信越化学工業は 29.8~275.8kPa、電気化学工業は 98.7~490.35kPa、Berquist 社は 68.95~1379kPa、富士高分子工業は 100kPa~1000kPa の印加圧力下での熱抵抗測定結果がカタログに記載されている [9]-[13]。しかし、本実験では凹凸板を用いた接触状態を含んだ熱抵抗測定の再現性を確認するために、印加圧力はカタログ値よりも低い 1kPa~23.5kPa とし、5 回の繰り返し測定を行った。

## 2.6 実験結果と考察

図 2.8 に凹凸板を使用した TIM の熱抵抗測定結果を示す。図から、どちらの TIM 材でも、圧力 15kPa 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ことがわかる。

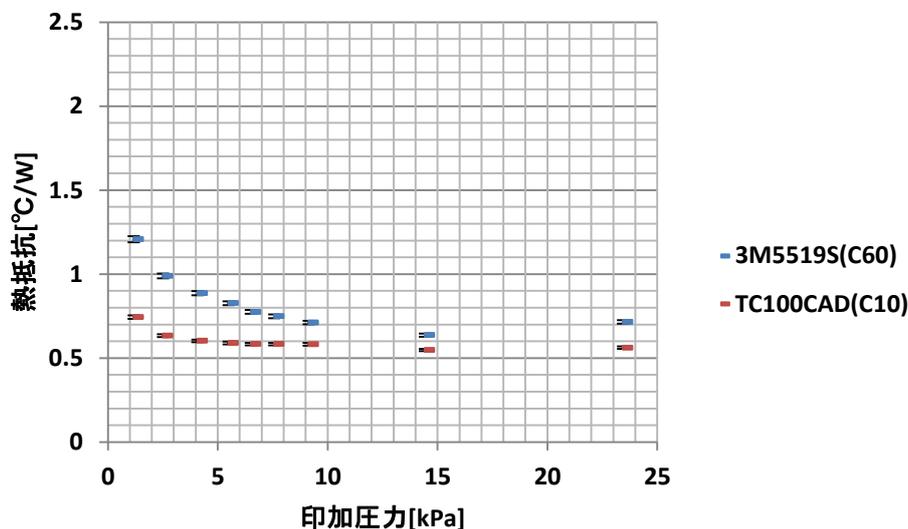


図 2.8 凹凸板を使用した TIM の熱抵抗測定(実験結果)

TIM の硬度も材料間の接触熱抵抗に影響し、5kPa 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、熱抵抗は TC100CAD と比較して高い圧力で飽和した。また 5 回の繰り返し測定の結果、熱抵抗値は最悪でも±1.47%以内に収まることを確認した。定常法の熱抵抗測定法を用いて TIM の特性を評価した場合、温度を測定する熱電対や印加圧力の均一性、素子や放熱器の表面粗さ等の影響で 5~20%の測定誤差が発生する[14]。熱抵抗測定では接触熱抵抗、TIM 自身の熱抵抗、測定系から空気までの熱抵抗など様々な要素により現象を再現させることが困難であったが、凹凸板を用いることにより接触状態を制御して、熱抵抗を再現性良く評価できることを明らかにした。

また、本研究で評価した Type2-TIM の 3M5519S は、Type2-TIM の中では比較的 AskerC 硬度が大きく、TC100CAD は硬度が小さい。1.5 節でも述べたが、材料の熱伝導率と材料の硬度には密接な関係がある。凹凸板を測定治具に使用した場合、低硬度の Type2-TIM のほうが高硬度の Type2-TIM よりも低圧力で熱抵抗の減少率が小さい。そこで、図 2.8 に示した 2 種類の Type2-TIM の熱抵抗実験結果を把握したうえで、メーカーカタログ値で TIM 自身の熱伝導率と AskerC 硬度のみが既知である 3 種類目の Type2-TIM を評価した。使用した Type2-TIM は電気化学工業の FSL100BH であり、メーカーのカタログ値を表 2.3 に、熱抵抗測定の実験結果を図 2.9 に示す。

表 2.3 TIM の特性(メーカーのカatalog値)

特性	FSL100BH
熱伝導率 [W/(m・K)]	4.0
電気絶縁[kV/mm]	10
AskarC 硬度[-]	C30

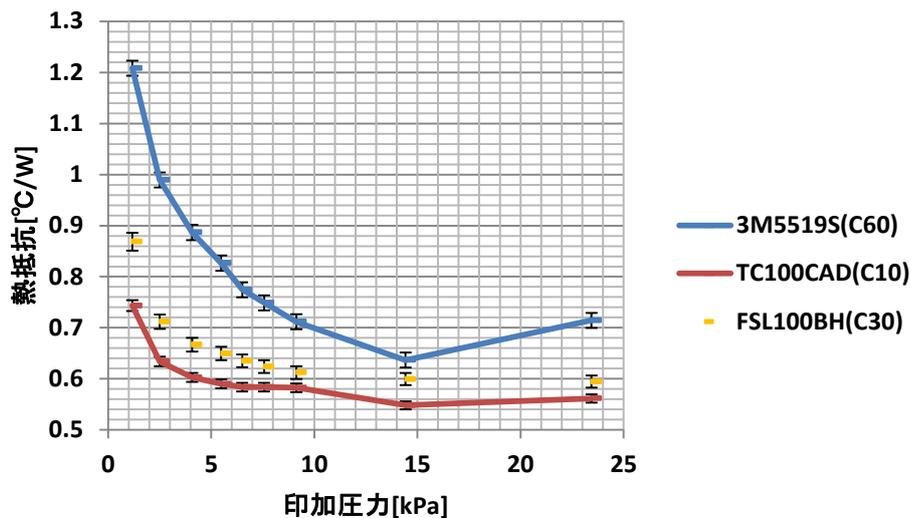


図 2.9 熱伝導率と硬度が異なる Type2-TIM の熱抵抗実験結果

図から FSL100BH の熱抵抗値は 3M5519S より小さく、TC100CAD よりも大きい。表 2.2 と表 2.3 より、熱伝導率は 3M5519S、FSL100BH、TC100CAD の順に大きく、AskerC 硬度の大きさも同様である。凹凸板を測定治具にして熱抵抗測定を行った場合、Type2-TIM 自身の AskerC 硬度が小さいほど熱抵抗も小さくなった。

また、3 種類の Type2-TIM に共通して印加圧力を増加すると熱抵抗が減少して印加圧力を増すほど、熱抵抗の減少が小さい傾向を得た。特に印加圧力が 10kPa 付近までの低圧力下では AskerC 硬度が小さい Type2-TIM のほうが熱抵抗の減少は小さくなっている。このような傾向から、凹凸板を測定治具とした熱抵抗測定は Type2-TIM の AskerC 硬度を実装状態で評価できたといえる。

## 2.7 素子や放熱器の表面粗さについて

素子や放熱器の表面にある微細な凹凸は完全には再現できないので、意図的に付けた大きな凹凸に対する接触状態を評価して、接触熱抵抗の定量化を行った。従来は 10mm 以上の厚さで実測した AskerC 硬度のみで接触熱抵抗の影響を予測するしかなかったが、この評価法を用いることにより、実装時に使用する TIM の厚さで接触状態を評価することができた。しかし、凹凸板に意図的に付けた凹凸は、当然、実際の素子や放熱器の持つ表面粗さよりも大きい。接触状態を含んだ熱設計に関する研究は国内外の学術研究会でも、多くなっている[15]-[17]。接触熱抵抗を含んだ熱特性の計測技術も従来の評価法の精度を再検証する研究や新しい評価法に関する開発が増えてきているが、測定精度の検証が必要である[18]。第 1 章でも述べた接触熱抵抗の問題は、電子機器の熱設計全般にかかわる問題である。現在、接触熱抵抗を小さく抑えることが電子機器の熱設計の大きな課題であるが、放熱器や発熱体である素子の表面粗さが定量化できないため、接触熱抵抗の予測が困難であることが問題となっている。

そこで、本研究では図 2.10 に示すような入手しやすい金属メッシュを用いて実験を行った。金属メッシュは線の太さと隙間が正確に細かく各規格で定義されている[19]-[21]。この金属メッシュを用いることによって、凹凸板と同様に、再現性良く接触状態の影響を評価できる(図 2.11)[22]-[24]。この金属メッシュを測定治具として利用する目的は、実装時における Type2-TIM の特性を、素子や放熱器の現実に近い表面粗さを再現したうえで評価することで、試作回数や余計なマージンを減らすことにある。本研究で使用した金属メッシュの形状を表 2.4 に示す。メッシュ数を  $M[-]$ 、線径を  $d[\text{mm}]$ 、目開きを  $O[\text{mm}]$ 、空隙率を  $A[\%]$  と定義し、各パラメータの関係式を(2.3)式と(2.4)式に示す。

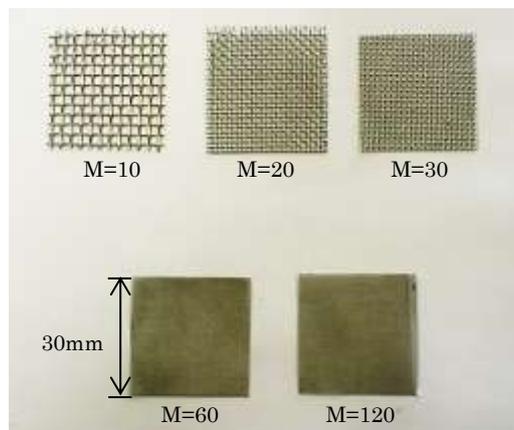


図 2.10 金属メッシュ

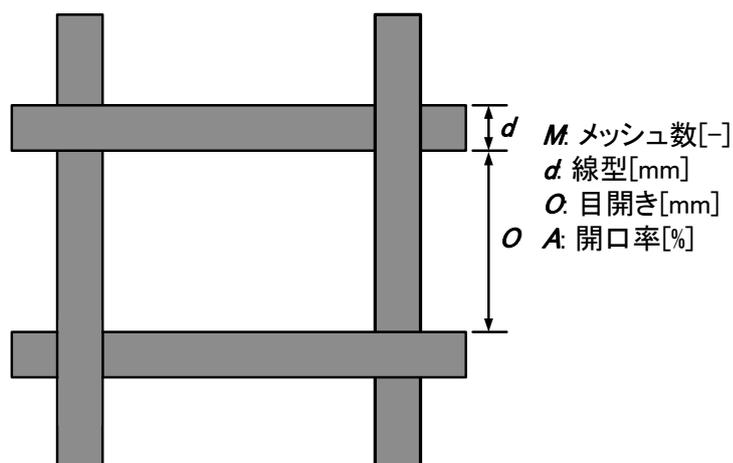


図 2.11 金属メッシュの構造

表 2.4 各金属メッシュの形状

$M$ [-]	$d$ [mm]	$O$ [mm]	$A$ [%]
10	0.465	2.08	66.7
20	0.295	0.98	58.9
30	0.207	0.64	57.1
60	0.132	0.29	47.4
120	0.077	0.13	40.5

$$O = \frac{25.4}{M} - d \quad (2.3)$$

$$A = \left(\frac{O}{O+d}\right)^2 \times 100 \quad (2.4)$$

表に示すように、メッシュ数  $M$  が大きくなるほど隙間  $O$  が狭くなり、微細な凹凸になる。したがって、金属メッシュは細かい凹凸でも、アルミ板をフライス盤で加工した凹凸板と同様に、表面粗さを管理できる素材といえる。

吉田ら[25]は、金属メッシュを用いて、Type2-TIM である熱伝導シートの熱的な接触状態の実験を報告している。この報告では、材料設計の視点から、熱伝導シートに添加する球状熱伝導性フィラーの充填量を変化させて接触熱抵抗を測定、熱伝導性と電磁波吸収特性を両立させる最適化について検討されている。本研究では、Type2-TIM であるシリコンパッドシートを評価対象とする。シリコンパッドシートに圧力が加わった際の接触状態の変動を、再現性良く評価する手法を新たに提案する。なお、材料メーカーの試験法と同様な形状にするために金属メッシュの大きさは  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$  とした。

## 2.8 金属メッシュを用いた熱抵抗測定の実験

図 2.12 に金属メッシュを用いた熱抵抗測定の実験系を示す。金属メッシュは両面が凹凸面となっている。そのため接触熱抵抗が 2 ヶ所(TIM を金属メッシュの上下で 2 枚使用)で生じるため、凹凸板を使用した実験との対応を確保するために、熱抵抗値を 1/2 にした値を用いる。

加熱開始 500s 後の熱電対 1 と熱電対 2 の温度差ならびに抵抗器の発熱量 10W 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。温度調整ヘッド表面は温度 27°C 一定に保ち、実験の再現性を確認するために 5 回の繰り返し測定を行った。

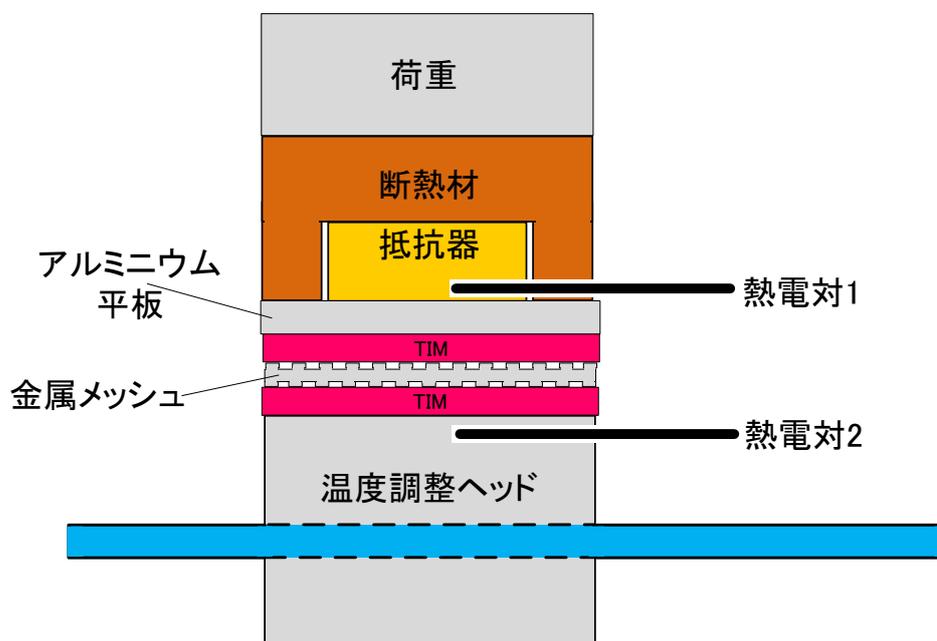


図 2.12 金属メッシュを測定治具にした熱抵抗測定の実験系

## 2.9 金属メッシュを用いた熱抵抗測定の実験結果と考察

図 2.13 に 3M5519S を使用した場合の実験結果を示す。実験の圧力範囲では、金属メッシュのメッシュ数  $M$  が大きくなるほど熱抵抗が減少する傾向が得られた。また、一番粗い 10 メッシュと一番細かい 120 メッシュでの熱抵抗差は、印加圧力を増やすほど小さくなった。

同様に、図 2.14 に、TC100CAD を使用した際の実験結果を示す。印加圧力 20kPa 以上では、10 メッシュの粗い表面粗さであっても、細かい表面粗さを用いた場合と同様に TIM が隙間を埋めるので、60 メッシュ、120 メッシュなどの細かい表面粗さを使用した場合の熱抵抗との差はわずかであった。

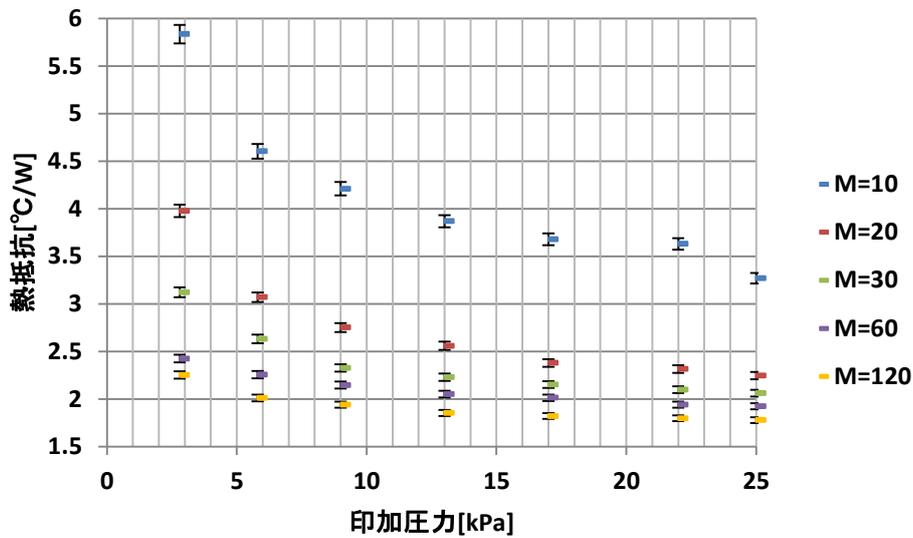


図 2.13 印加圧力と熱抵抗(3M5519S)

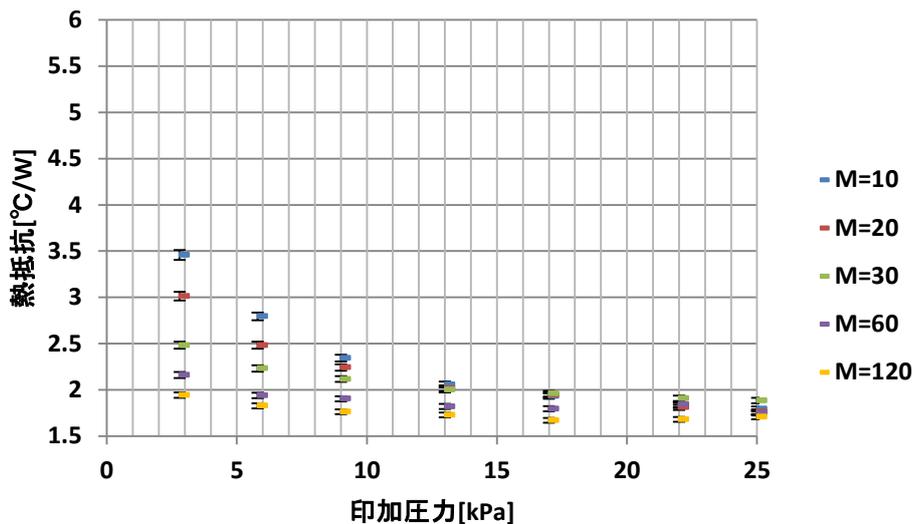


図 2.14 印加圧力と熱抵抗(TC100CAD)

この熱抵抗差(温度差)は使用した熱電対の測定誤差の範囲内であるから問題にならない。図 2.14 に示した TC100CAD の実験結果からは、25kPa の低圧力下でも表面粗さの影響は少なくなり、60 メッシュと 120 メッシュの熱抵抗の間には有意差がないことが確認できる。したがって、低硬度である 1mm 厚の TC100CAD を使用した場合、60 メッシュよりも細かい表面研磨により放熱器や素子の表面を平面に近づけても、熱的な性能には影響がないと予測できる。

金属メッシュと実際の機械加工で発生する表面粗さの関係を検討する。金属メッシュの断面図を図 2.15(A)に示す。

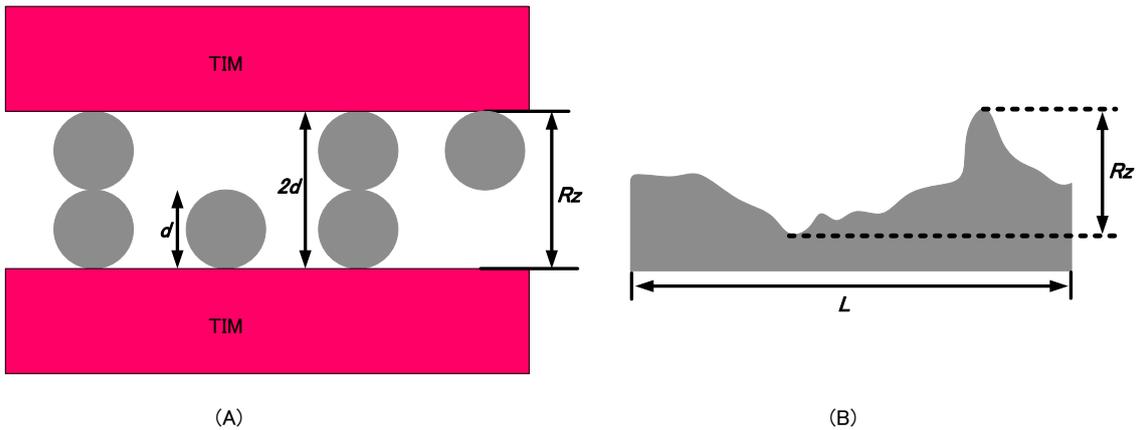


図 2.15 金属メッシュの表面粗さと  $Rz$ (JIS B 0601-2001)との関係

金属メッシュの線径の 2 倍の長さが凹凸面の凹部に相当するため、図 2.15(B)に示すように、表面粗さ規格 JIS B 0601-2001[26]の  $Rz$  で表現することができる。金属メッシュは、両面が凹凸面となっていて TIM を 2 枚使用しているため、TIM1 枚分からみた  $Rz$  は 1/2 とする。この関係に基づいて、表 2.5 に示す金属メッシュのメッシュ数  $M$  と各加工法との対応関係を作成した。

表 2.5 金属メッシュと各種機械加工の関係

$M$ [-]	$d$ [mm]	$Rz$ [-]	加工法
10	0.465	465s	凹凸板相当
20	0.295	295s	加工なし(かなり荒れた表面)
30	0.207	207s	加工なし(荒れた表面)
60	0.132	132s	フライス削り(コスト極小)
120	0.077	77s	フライス削り(コスト小)
150	0.060	60s	フライス削り(コスト小)
180	0.050	50s	フライス削り(コスト小)
250	0.040	40s	フライス削り(コスト小)
300	0.030	30s	研削(コスト小)
400	0.026	26s	研削(コスト小)
635	0.020	20s	研削(コスト中)

表より、60 メッシュと 120 メッシュの表面粗さ  $Rz$  は 77s~132s の範囲であり、フライス盤削りの表面粗さに相当する[27]。低硬度 Type2-TIM の TC100CAD を 25kPa の印加圧力で使用する場合、放熱器と素子の表面粗さをフライス盤による表面加工よりも微細にしても、熱特性が向上しないことが示せる。

このように、金属メッシュを用いることによって平面に近い微細な表面粗さを模擬した金属メッシュを使用した場合でも、TIM の材料硬度による影響を確認することができた。本研究で使用した TC100CAD は、Type2-TIM パッドシートの中では低硬度のものであり、3M5519S は高硬度の材料である。さらに金属メッシュを用いた熱抵抗測定の結果は、±1.68%の誤差範囲で再現できた。以上から、どの Type2-TIM のパッドシートを用いた場合でも、本手法を用いることが可能である。

## 2.10 まとめ

実装環境においては、素子や放熱器の表面は完全な平面ではなく、Type2-TIM の硬さや印加圧力などにより熱抵抗が複雑に変化する。そのため、接触熱抵抗を含む熱的な現象を再現性良く評価することは困難であった。

そこで本章では凹凸板を用いて、接触状態を定量的に評価する方法を提案し、検証を行った。その結果、TIM と放熱器を組み合わせて実装する場合に、重要なパラメータでありながら定量的な評価が難しかった接触状態に関して、再現性のある実験を行うことが可能になった。

従来は 10mm 以上の厚さで実測した AskerC 硬度のみで接触熱抵抗の影響を予測するしかなかったが、本評価法を用いることにより、実装時に使用する TIM の厚さで接触状態を評価することができる。このことから、TIM 単体の熱伝導率や硬度だけではなく接触状態の指標を得られるので、TIM を開発する際に役に立つことが期待できる。

金属メッシュは、規格で線の太さと隙間が正確かつ細かく管理されている。本研究では、金属メッシュを測定治具として、Type2-TIM の熱抵抗測定を繰り返し行い、再現性の良い結果を得た。さらに、金属メッシュのメッシュ数と各加工法での表面粗さとの対応を示したうえで、熱伝導性と電気絶縁性を必要とする電子機器と放熱器の間で一般的に使用される 1mm 厚の Type2-TIM は素子や放熱器の表面を 60 メッシュ相当よりも細かくしても、熱特性が向上しないことを明らかにした。表面を研磨するほど、コストがかかるので、有効な指標を示すことができた。また、設計段階で取り込みにくい接触熱抵抗によって大きなマージンをとって製造コストや製品の大型化を余儀なくされていたが、本評価法を用いることにより、熱的なマージンを減らすことも期待できる。

## 参考文献

- [1] 犬塚 由美子 監修, “日本プラスチック工業連盟誌”, 株式会社工業調査会, Vol.61, No.5, pp.38-39(2010.5)
- [2] 斎藤 靖弘, 江元 博幸, 辻 裕樹, 小室 貴紀, “伝熱材料を評価するための新しい手法”, 第 27 回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会資料 pp.46-48(2013.3)
- [3] 斎藤 靖弘, 辻 裕樹, 江元 博幸, 小室 貴紀, “伝熱材料を評価するためのシステムの研究”, 第 60 回応用物理学会春季講演大会講演予稿集, 28p-B7-6(2013.3)
- [4] Yasuhiro Saito, Yuuki Tuji, Hiroyuki Emoto, Takanori Komuro, New Method for Evaluating Heat Transfer Material, ICEP2013 Proceeding, WD1-1, pp.74-79(2013.4)
- [5] 日本規格協会編集, “JIS バンドブック 26 プラスチック I (試験)”, 日本規格協会, pp.2058-2059, (2013.1)
- [6] “NEW Horizons (OMEGA 社製品カタログ Spring/Summer2013)”, p.121(2013.4)
- [7] “KEYSIGHT TECHNOLOGIES 高性能熱電対セット(J&K)”  
<http://www.keysight.com/ja/pd-792200-pn-U1180A/temperature-sensors-and-probes?cc=JP&lc=jpn>
- [8] 石塚 勝 監修, “熱設計技術解析ハンドブック”, 三松株式会社, pp.396-398(2008.10)
- [9] “信越シリコーン 放熱シリコーンゴム加工品製品カタログ”, pp.25-33(2015.7)
- [10] “信越シリコーン製品情報”  
<https://www.silicone.jp/products/function/heat/index.shtml>
- [11] “デンカ放熱シート & デンカ放熱スペーサー 総合カタログ”, pp.7-13(2014.10)
- [12] “Bergquist Sil-Pad セレクションガイド”, pp.50-73(2011.8)
- [13] “富士高分子工業 製品一覧サーコン放熱シリコーンゲル GR”  
[http://www.fujipoly.co.jp/products/sarcon\\_02\\_01/index.htm](http://www.fujipoly.co.jp/products/sarcon_02_01/index.htm)
- [14] “メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社 熱流体解析および熱抵抗測定 T3Ster DynTIM Tester サーマルインタフェースマテリアルの熱特性評価”  
<http://www.mentorg.co.jp/products/mechanical/micred/dyntim/>
- [15] 畠山友行, “サーマルマネージメント研究の動向”, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.19, No1, pp.62-64(2015.1)
- [16] K.Azuma, T.Hatakeyama, S.Nakagawa, “Measurement of Surface Roughness Dependence of Thermal Contact Resistance under Low Pressure Condition”, ICEP-IAAC2015 Proceeding, TD1-2 (2015.4)
- [17] 富村寿夫, 吉富健太, 都泰完, 小糸康志 “異種材料間の低圧力下での接触熱抵抗に関する実験的研究”, 熱工学コンファレンス 2015 講演論文集, A124(2015.10)

- [18] T.Hara,W.Badalawa,Y.Luo, “Variations of Temperature Sensitivity Measurements of Several Packages under Different Environments”, ICEP-IAAC2015 Proceeding,TD1-4 (2015.4)
- [19] 日本規格協会編集, “JIS ハンドブック / 日本規格協会編 鉄鋼Ⅱ 棒・形・板・帯/ 鋼管/線・二次製品”, 日本規格協会, p.3360(2009)
- [20] 石川金網株式会社 技術情報 金網関連規格  
<http://ishikawa-kanaami.com/technology/standard/>
- [21] ASTM E2016-11, “Standard Specification for Industrial Woven Wire Cloth”, DOI: 10.1520/E2016-11 (2011)
- [22] 鈴木 悟, 斎藤 靖弘, 小室 貴紀, “金属メッシュを用いた伝熱材料の評価”, 第 24 回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集,pp.69-72(2014.9)
- [23] 斎藤 靖弘,小室 貴紀, “伝熱材料の密着度を定量的に評価するための新しい手法”, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.16 No7,pp.521-527(2013.11)
- [24] Yasuhiro Saito, Satoru Suzuki, and Takanori Komuro,“Evaluation of Thermal Interface Material with Electric Capacitance Measurement”, IEEE CPMT Symposium Japan pp.11-14(2014.11)
- [25] 吉田隆彦, 上利泰幸, 吉門進三, “電磁波吸収複合ゴム材の吸収特性と接触熱抵抗の評価”, 電気学会論文誌 A Vol.132 No2,pp.180-186(2012.9)
- [26] 日本規格協会編集, “製品の幾何特性仕様 (GPS) –表面性状：輪郭曲線方式–用語, 定義及び表面性状パラメータ”, 日本規格協会, pp.1-28(2013.3)  
<http://www.jisc.go.jp/app/pager?id=1644726>
- [27] “やさしい実践 機械設計講座” <http://kousyoudesignco.dip.jp/seizu7.html>

## 第3章 熱伝導材料の静電容量測定

### 3.1 はじめに

第2章の実験では、凹凸板を用いて、凹凸板と温度調整ヘッド間の Type2-TIM の接触状態を再現性良く評価した。接触熱抵抗を熱的なパラメータ以外で評価する手法は多数報告されている[1]-[4]。本章では、電気パラメータを用いて TIM の実装状態の熱的な特性を判断する新しい評価方法を提案する。図 3.1 に示す(A)のように凹凸板と放熱器に相当するアルミブロック間を、図 3.1 (B) に示すように凹凸板と放熱器を電極、TIM を誘電体とした電気的なコンデンサに見立てた。熱的な定常測定法で接触熱抵抗の評価を行う場合、各部の温度が定常状態に達するまで待つ必要があるため、最低でも数分間かかる。一方、静電容量は金属板の間にある物質(TIM と空気、金属板の内側の形状)の影響を受けるので、接触熱抵抗との間には相関があると考えられる。接触状態を静電容量で計測すれば、短時間で効率的に TIM の接触状態を評価することが可能であり、本研究ではその検証を行った。

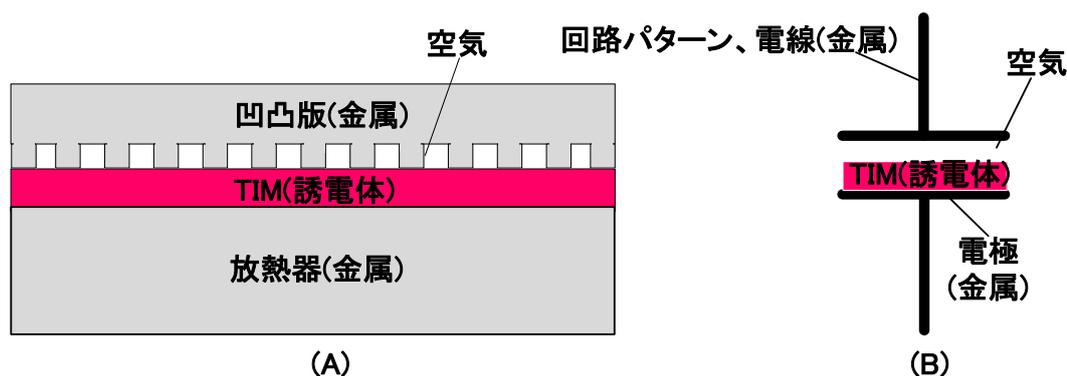


図 3.1 電気的手法で TIM の接触状態を評価する方法

### 3.2 静電容量測定に関する予備実験

TIM の接触状態を電気的に評価するためには、TIM 間の静電容量を測定すればよい。静電容量測定には LCR メーターを使用する。しかし、TIM 間の接触状態に関連する静電容量だけではなく、ケーブルと測定治具の接触などの要素を含んだ静電容量値も加わった静電容量値が表示される。測定精度を向上させるためには、実際の測定環境下に対応した LCR メーターのオープン補正とショート補正を行う必要がある[5]。静電容量測定を用いて TIM の評価を行う場合、どの周波数で TIM を測定すれば、接触状態を正確に評価できるかをオープン補正とショート補正を行ったうえで検討した。

図 3.2 に示す構成で、印加圧力を変化させ、周波数を 100Hz～5MHz の間で変えることにより、計 100 点での静電容量を測定した。さらに、凹凸板凹部の空気による影響を確認するために、熱伝導板は凹凸板とアルミニウム平板の 2 種類を使用した。実験結果を図 3.3～図 3.6 に示す。

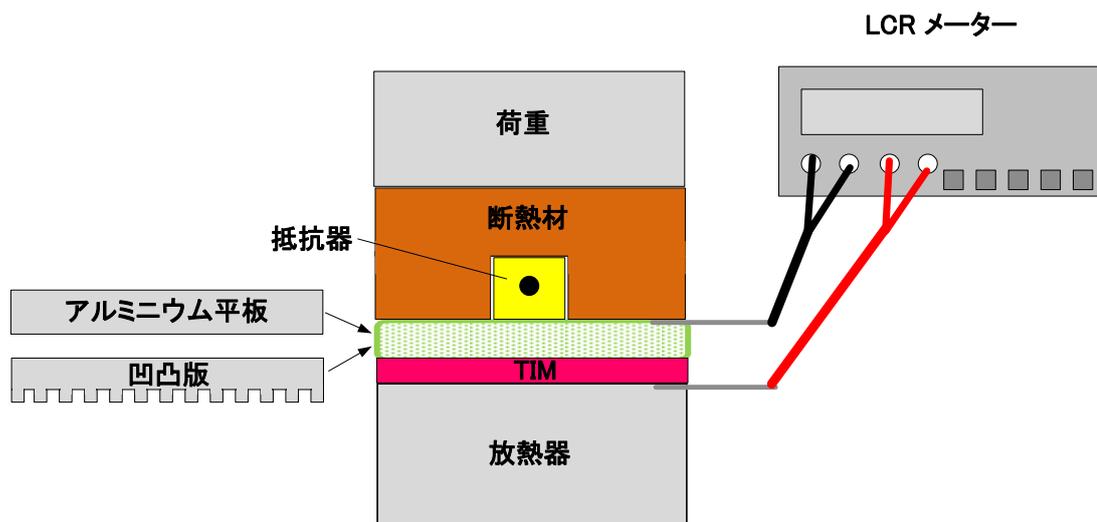


図 3.2 TIM の評価 静電容量測定装置構成

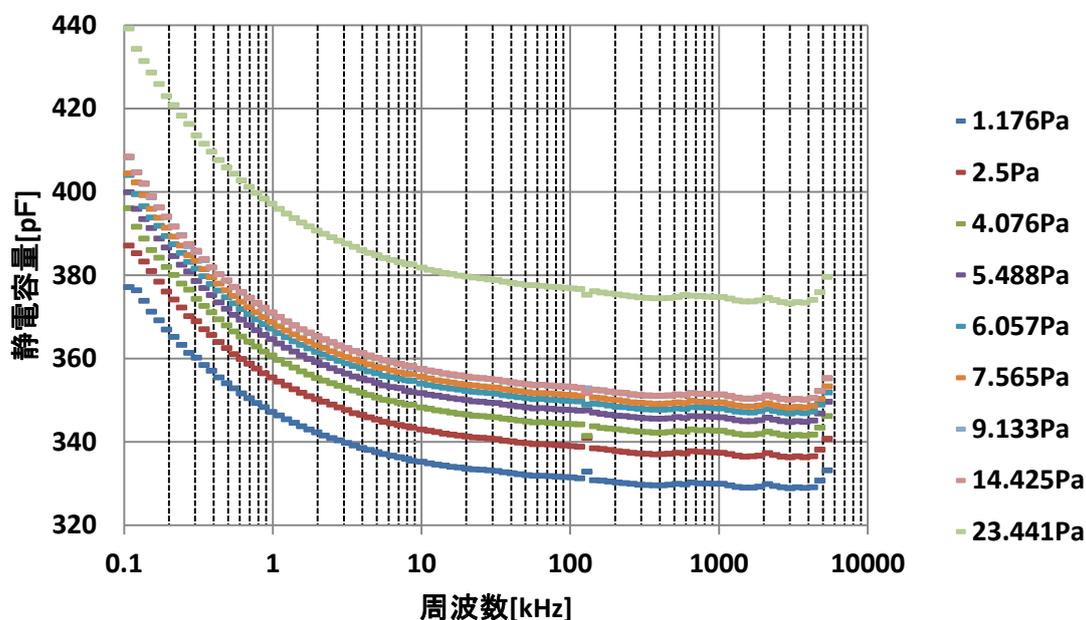


図 3.3 アルミニウム平板の場合の周波数と静電容量の関係(3M5519S)

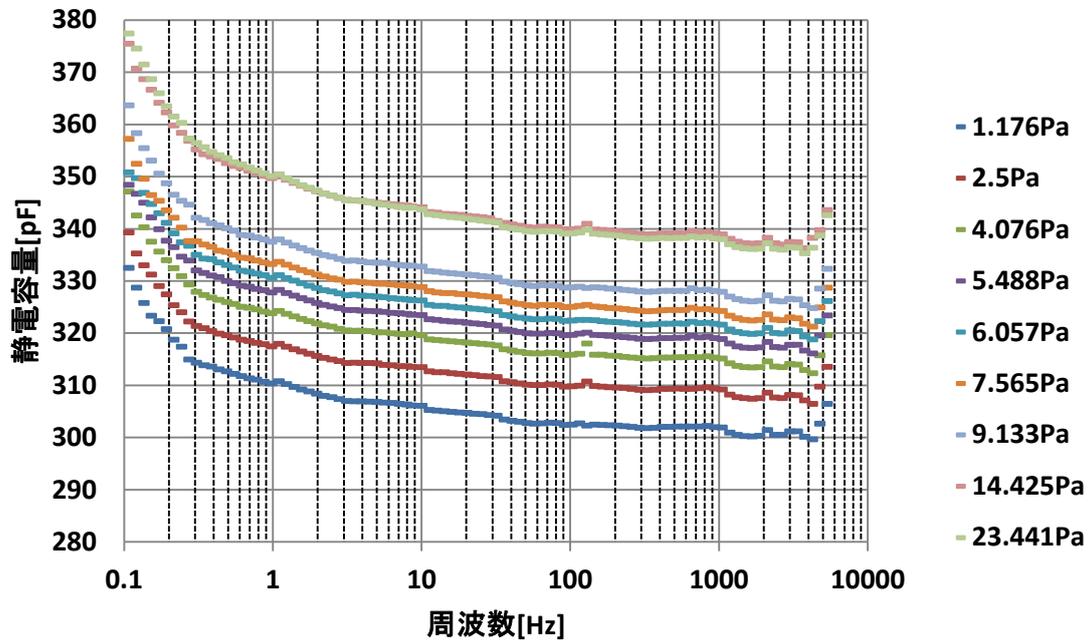


図 3.4 凹凸板の場合の周波数と静電容量の関係(3M5519S)

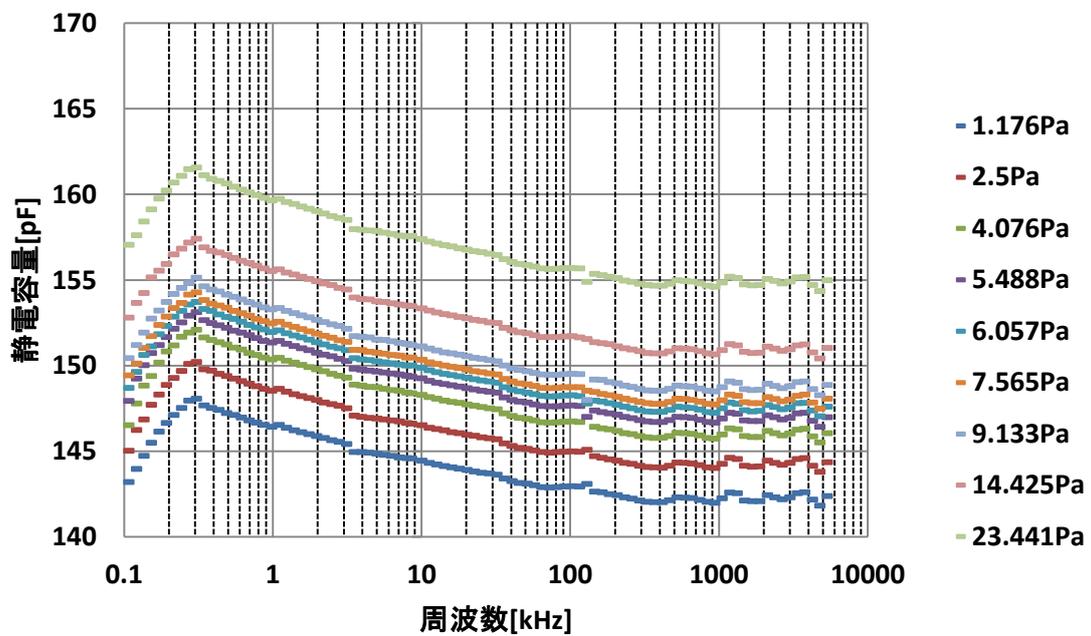


図 3.5 アルミニウム平板の場合の周波数と静電容量の関係(TC100CAD)

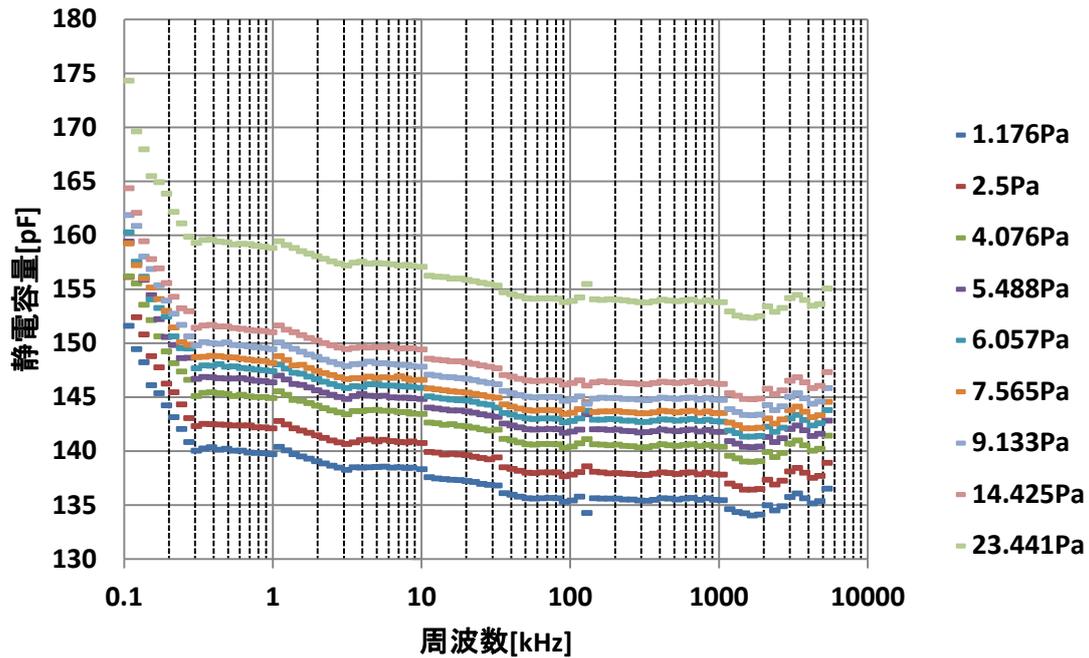


図 3.6 凹凸板の場合の周波数と静電容量の関係(TC100CAD)

図より、全ての場合において、圧力の変化による周波数特性は不変で、図 3.3、図 3.4、図 3.6 の条件では測定周波数を高くすると静電容量が減少する傾向が得られた。しかし、図 3.5 の条件では、300Hz 付近までは静電容量が増加し、それ以降は、周波数を高くすると静電容量が減少した。この原因としては、電極構造に相当する放熱器(アルミブロック)とアルミニウム平板による影響、また TIM 自身の性質による影響だと考えられる。本研究で使用した Type2-TIM の場合、300Hz~5MHz 間であれば、どの測定周波数でも、静電容量測定を用いて接触状態を正確に評価できる見通しが得られた。図 3.7 と図 3.8 に、アルミニウム平板の静電容量と凹凸板の静電容量との差を示した。この静電容量値が電極構造(表面粗さ)による差を示す。

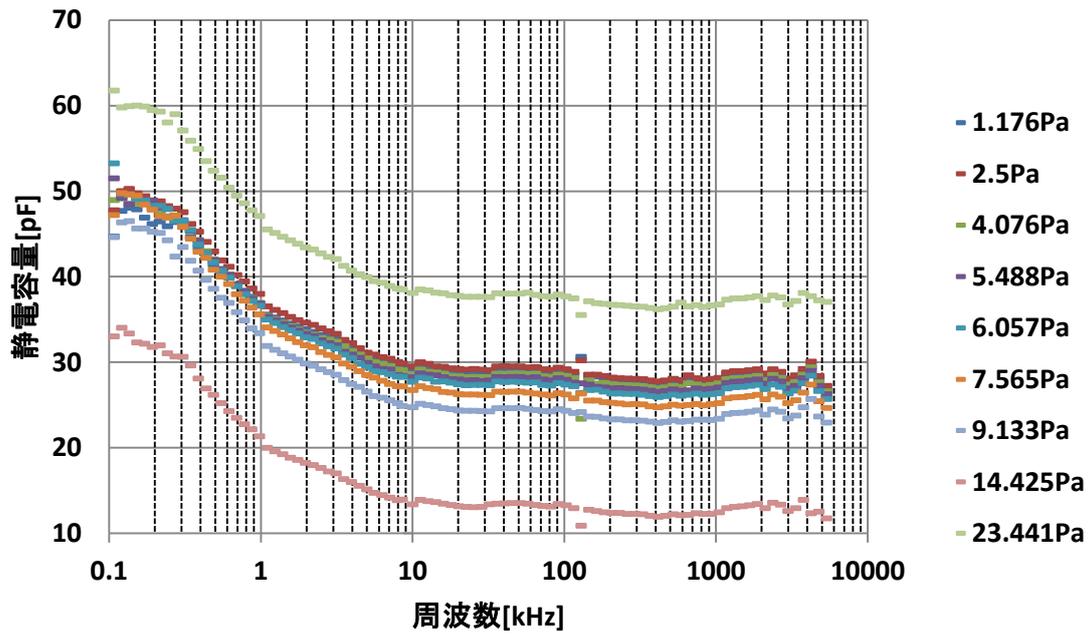


図 3.7 アルミニウム平板と凹凸板の静電容量差(3M5519S)

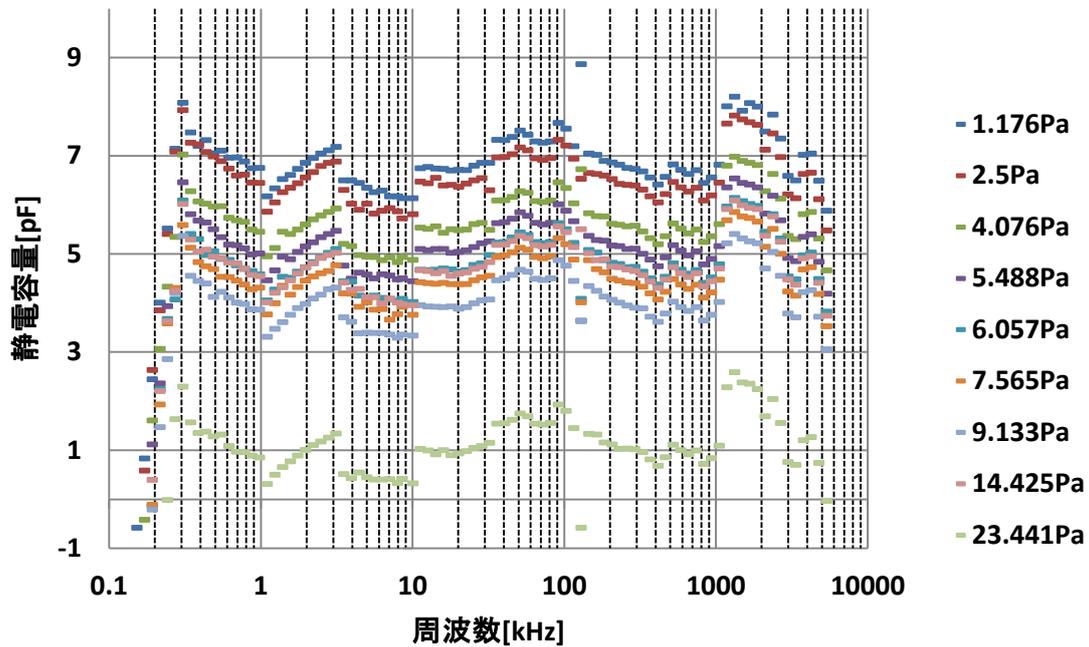


図 3.8 アルミニウム平板と凹凸板の静電容量差(TC100CAD)

この結果、3M5519S の場合、300Hz 以上では、周波数を高くすると静電容量差が減少する。一方、TC100CAD は 300Hz～5MHz の範囲で、静電容量の差に関する周波数依存性が 3M5519S に比べて小さいことを確認した。図 3.4～図 3.6 の実験結果から、測定周波数を

8kHz に固定して、横軸を圧力、縦軸を静電容量とした場合の結果を図 3.9～図 3.10 に、測定条件の詳細を表 3.1 に示す。

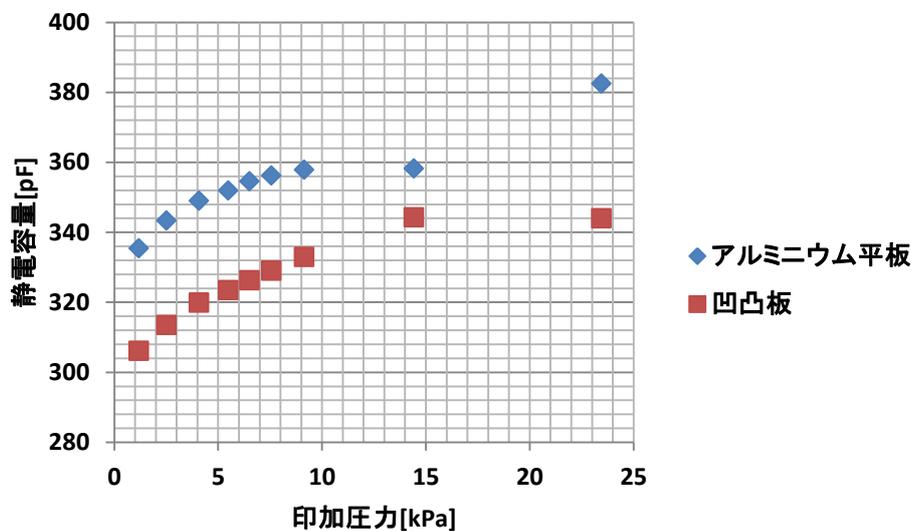


図 3.9 圧力と静電容量(3M5519S)

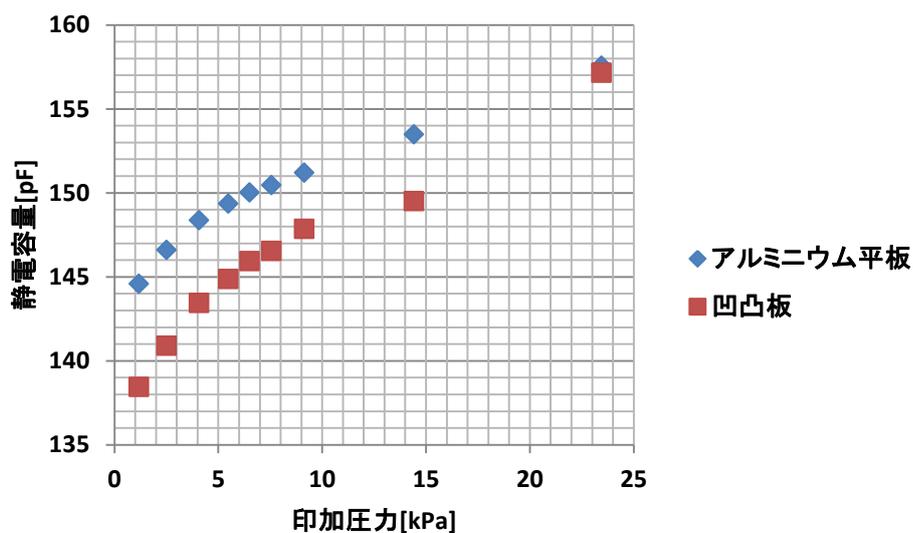


図 3.10 圧力と静電容量(TC100CAD)

表 3.1 測定条件

印加電圧[V]	1
測定スピード[ms]	140
温度[°C]	25.5
湿度[%]	40
レンジ[MΩ]	0.1 or 1

図 3.9 と図 3.10 に示す実験結果より、両材料共に圧力を増加させることによって TIM が凹凸板の形状になじんだため、静電容量が増加する傾向を得た。印加圧力を増加させることで最終的に静電容量が飽和することが予測できる。

TIM に圧力を加えて接触状態を変化させながら材料間の静電容量測定を行った際に、TIM 材の硬度が静電容量測定にどの程度影響するかを把握するために実験を行った。また、圧力によって静電容量が変動したのか、測定器の測定誤差により静電容量が変動したかを検証する必要がある。表 3.1 に示す印加電力は LCR メータが測定対象に加える電圧、測定スピードは LCR メータが測定対象に電圧を加えて、インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  を測定して静電容量を計算して表示するまでにかかる時間である。測定周波数を 8kHz にした理由を結論から述べると、静電容量測定が再現性良く行える測定周波数だからである。LCR メーターで測定対象の静電容量を求める場合、インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  を測定して静電容量を計算で求めている。測定対象の特性にも影響するので一概にはいえないが、測定周波数が変化すると  $Z$  と  $\theta$  の値も変化する傾向にある。LCR メーターなどの測定器は測定環境に応じて測定器メーカーが測定確度を保証している。インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  の測定確度を求めないと静電容量の測定確度は求まらないので、まずは、インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  の実測値とメーカーの基本確度係数よりインピーダンスの基本確度と位相の基本確度を求めた。基本確度係数とは、LCR メータの測定端子までの誤差要因で測定器自身の確度を示す係数である。各周波数における印加圧力変化時の静電容量(測定レンジ)に対応した基本確度係数については記載を省略する。各測定周波数における静電容量の測定確度は以下のよう

- ① インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  の実測値とメーカーの基本確度係数より、インピーダンス  $Z$  の基本確度[%]と  $\theta$  の基本確度[deg]を求める。
- ② ①で求めた基本確度と測定環境などの係数により、インピーダンス  $Z$  の測定確度[%]と位相  $\theta$  の測定確度[deg]を求める。
- ③ 測定確度からインピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  の取り得る範囲の値を求める。インピーダンスと位相の最大値と最小値をそれぞれ求める ( $\theta$  は絶対値)。
- ④ インピーダンス  $Z$  と位相  $\theta$  の範囲から静電容量の取り得る範囲の値(静電容量の最小値～静電容量の最大値)を求める。この範囲が静電容量の測定確度となる。

図 3.4～図 3.6 の実験環境では LCR メーターの測定レンジが 0.1～1M $\Omega$  であった。この条件で測定器メーカーの取扱説明書に記載されている測定確度に関する記述を考慮した結果、8kHz を測定周波数で使用することが望ましいと判断した[6]。そこで、測定周波数 8kHz で 6 種類の Type2-TIM の静電容量を測定したうえで、測定時の測定確度を求め、測定時の値が中心値であることを仮定し、測定誤差で取り得る値を表示した。静電容量値は圧力印加後 500s の値を用いた。評価する TIM の特性を表 3.2、実験構成を図 3.11 に示す。

表 3.2 TIM の特性(形状は全て 50mm×50mm×1mm)

材料	熱伝導率[W/(m・K)]	Asker C[-]
3M5519S(3M)	4.9	60
TC100CAD(信越化学工業)	3.2	10
FSL100B(電気化学工業)	3	25
FSL100BH(電気化学工業)	4	30
FSL100BS(電気化学工業)	2.5	8
COH-4000(Taica)	6.5	74

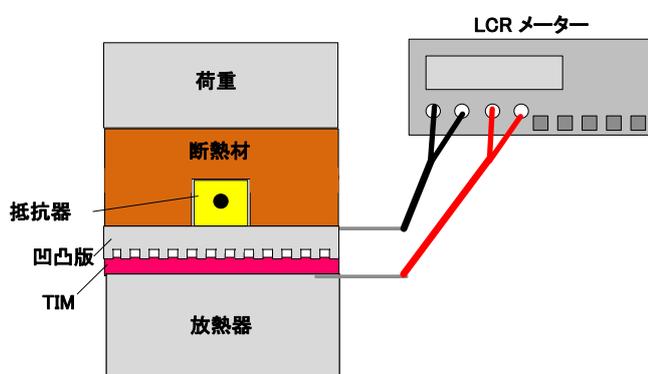


図 3.11 凹凸板を用いた静電容量測定(実験構成図)

LCR メーターの測定周波数は前述した確度仕様の都合から 8kHz を使用した。実験結果を図 3.12 と図 3.13 に示す。

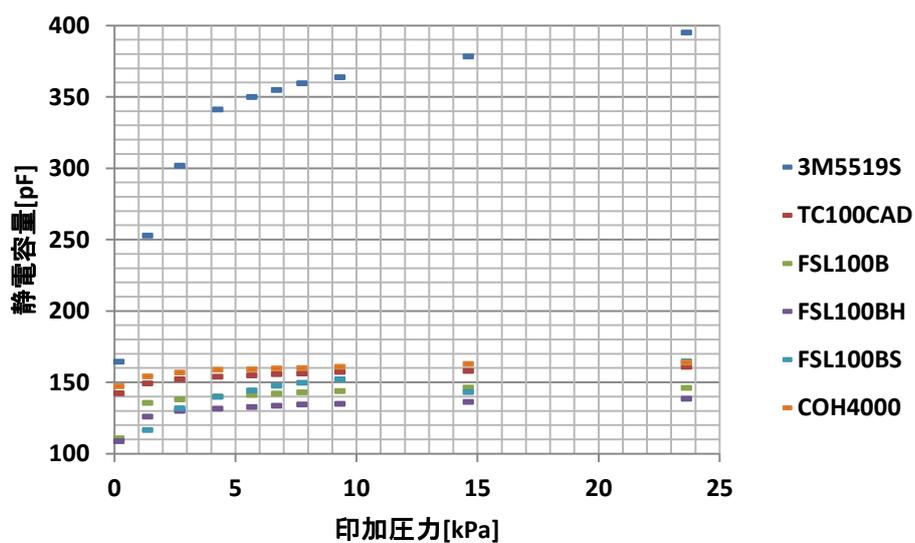


図 3.12 実験結果 印加圧力と静電容量

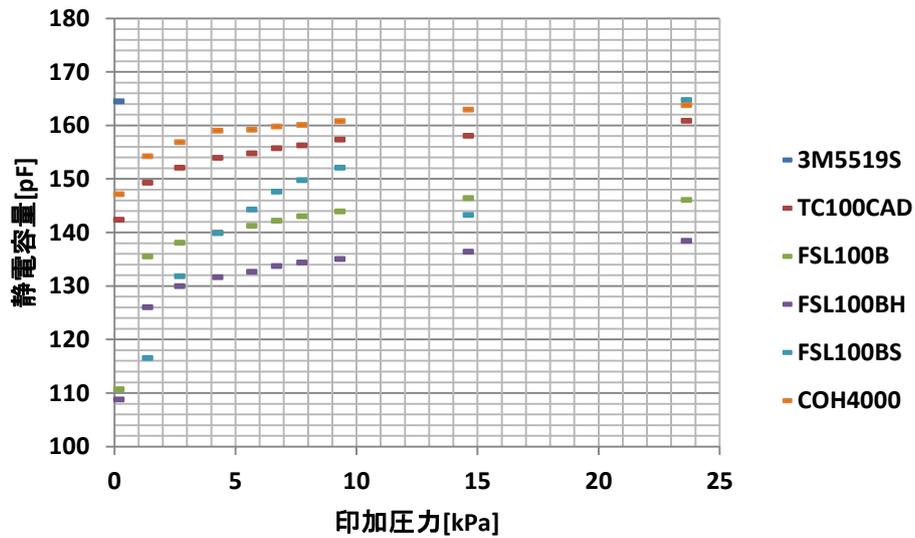


図 3.13 実験結果 印加圧力と静電容量 (図 3.12 のデータを縦軸 100pF~180pF に拡大)

図 3.11 に示す構造で圧力を印加して材料間の静電容量測定を行った際に、圧力によって静電容量が変動したのか、測定器の測定誤差により静電容量が変動したかを検証する必要がある。図 3.12 に示す実験結果より、様々な Type2-TIM のシリコンパッドシートを静電容量測定で評価したが、印加圧力を増加すると静電容量も増加する傾向を得た。図 3.14 と図 3.15 に示す解析結果より測定周波数が 8kHz の場合、測定器によるデータのばらつきが最大で中心値±0.25%以内と微小であり、圧力増加による静電容量の変化と比較して十分小さいことを確認した。

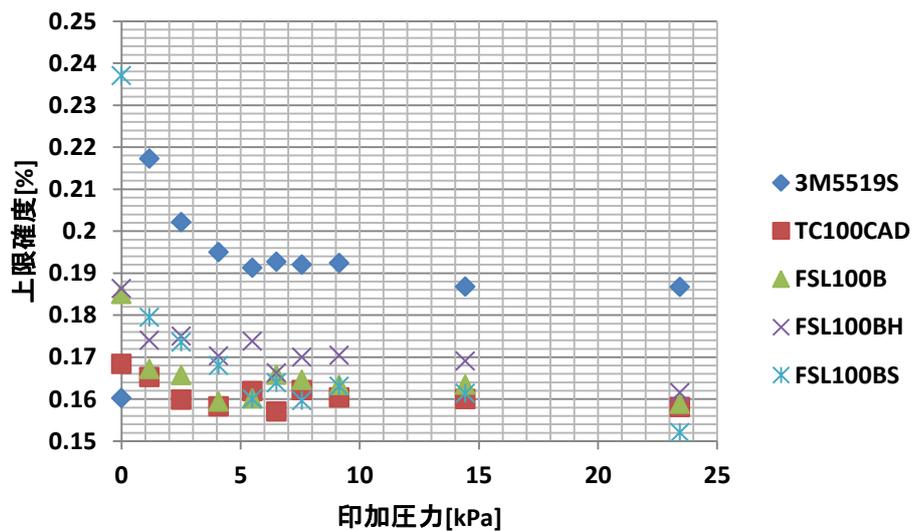


図 3.14 印加圧力と静電容量の上限確度

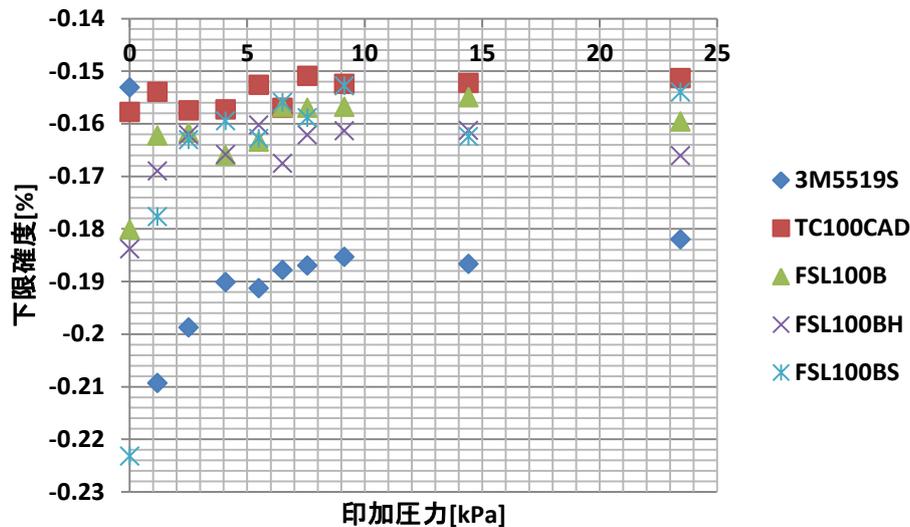


図 3.15 印加圧力と静電容量の下限確度

また、下限確度よりも上限確度が大きい原因は測定系に微小な寄生容量が加わった影響だと考えられるが、上限確度と下限確度の差はわずかで十分無視できる。

### 3.3 凹凸板を用いた Type2-TIM の静電容量測定

3.2 節の予備実験結果を考慮して熱抵抗と静電容量に相関の確認するために実験を行った。3.2 節の図 3.11 に示す実験構成で印加圧力を変化させたときの静電容量を測定した。実験で用いた TIM と凹凸板は、接触熱抵抗と静電容量の相関実験のため、第 2 章の熱抵抗測定と同じ物を使用した。測定周波数は測定器の確度仕様の都合上 8kHz とした。

図 3.16 に凹凸板を使用した Type2-TIM の静電容量測定の実験結果を示す。両材料共に圧力を増加させることによって TIM が凹凸板の形状になじむため、静電容量が増加し最終的に飽和するはずである。しかし、3M5519S は TC100CAD よりも硬度が大きいため、低圧力では凹凸板の隙間が埋まりきらず、空気の層が残ったことで静電容量が飽和しなかった。さらに、印加圧力を増加させることで最終的に静電容量が飽和することが予測できる。これは印加圧力によって空気(誘電率が 1)が追い出され、TIM(誘電率が空気より大きい)が入り込み、材料間の静電容量や TIM の厚さが変化したと推測できる[7]-[9]。また、今回の圧力範囲では 3M5519S の静電容量値は TC100CAD の静電容量値よりも全ての測定点において高かった。メーカーカタログ値からも熱伝導率は 3M5519S のほうが TC100CAD よりも高いことから、高い熱伝導率の TIM のほうが誘電率の低いシリコンなどの高分子材料に高誘電率のフィラーが高密度に充填されている[10]。また、フィラー材の充填率と TIM の誘電率が公開されている場合、フィラー材単体の影響を予測することが可能である。

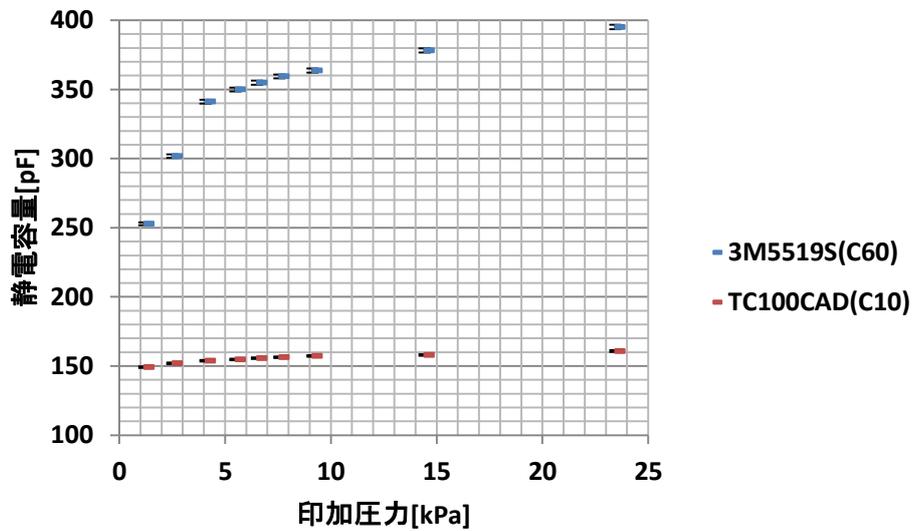


図 3.16 凹凸板を使用した TIM の静電容量測定 実験結果

提案手法の有効性を確認するために凹凸板の熱抵抗測定結果を 2.6 節の図 2.8 から引用して、凹凸板の静電容量測定結果は図 3.16 に示す実験結果より引用し、横軸の圧力を共通パラメータとして、縦軸を熱抵抗と静電容量の 2 軸で表示した結果を図 3.17、図 3.18 に示す。さらに、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量としてグラフに表示した結果を図 3.19 に示す。

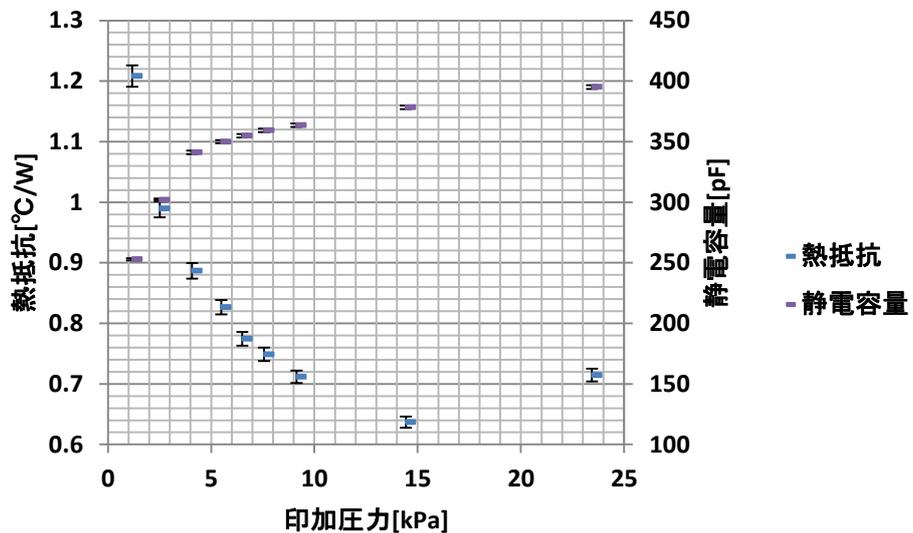


図 3.17 熱抵抗と静電容量の相関(3M5519S)

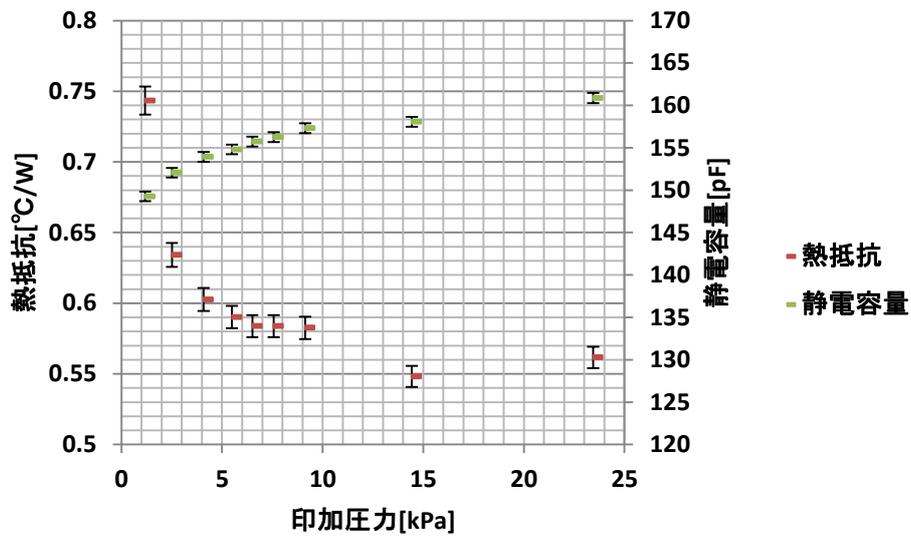


図 3.18 熱抵抗と静電容量の相関(TC100CAD)

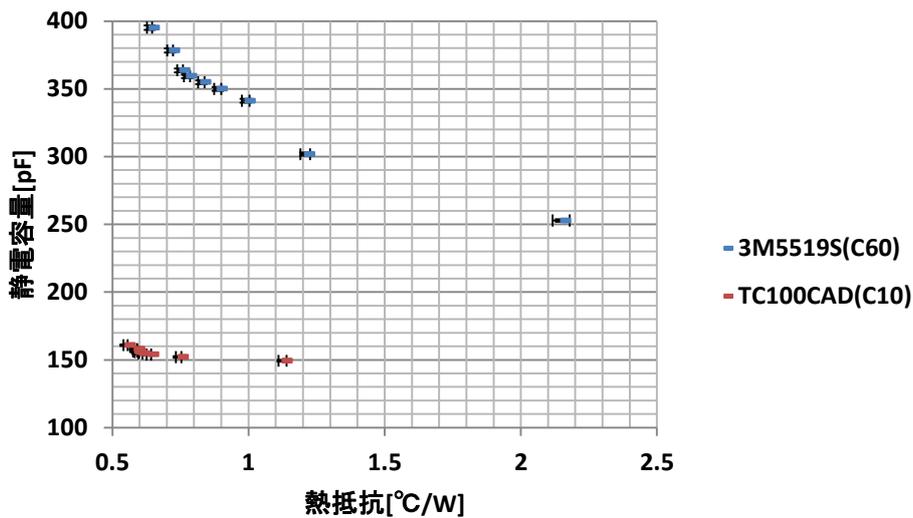


図 3.19 熱抵抗と静電容量

図 3.19 に示す実験結果より熱抵抗が増加すると、静電容量が減少する傾向が得られた。一度、評価対象の TIM の熱抵抗と静電容量を実測すれば、次回からは直接熱抵抗を測定しなくても静電容量測定を行うだけで短時間で評価が行える。静電容量の測定スピードは 140ms なので、1 データを測定するのに 500s 以上かかる熱抵抗測定より圧倒的に早く TIM の接触状態を評価できる。

### 3.4 接触状態に直接関連する静電容量

Type2-TIM の静電容量測定時における静電容量の変化は TIM の厚さ、TIM 自身の誘電率、材料間の隙間から抜ける空気の影響による 3つの要素が関連していると考えられる[11]。

3.3節の図 3.9 と図 3.10 に示す実験結果より表面粗さの違いから静電容量の差を確認できた。この静電容量の差は電極構造による値、空気が抜けることによる値の合計だと仮定する。接触状態に関連がない電極構造による値を把握し分離する必要があるため、図 3.20 に示す構成で実験を行った。TIM の面積と空気の面積は 1:1 であるが、3.2 節の図 3.2 に示す実験構成と同じ荷重を使用した場合には、2 枚の 12.5mm×50mm の短冊形状の TIM に加わる圧力は 1 枚の 50mm 角の TIM に加わる圧力の 2 倍となることを考慮した。そのうえで短冊形状の TIM を 2 枚使用した際の静電容量  $C_{sl}$  に関する実験を行った。実験結果を図 3.21、図 3.22 に示す。

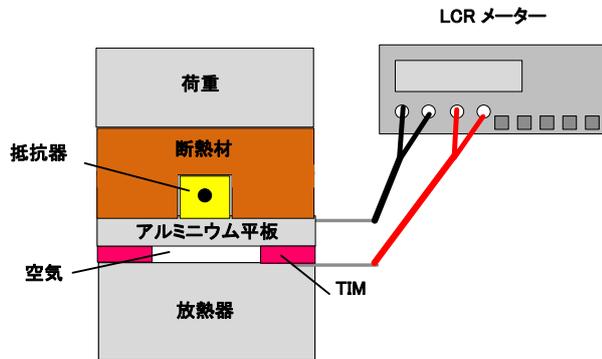


図 3.20 TIM の短冊形状に関する実験

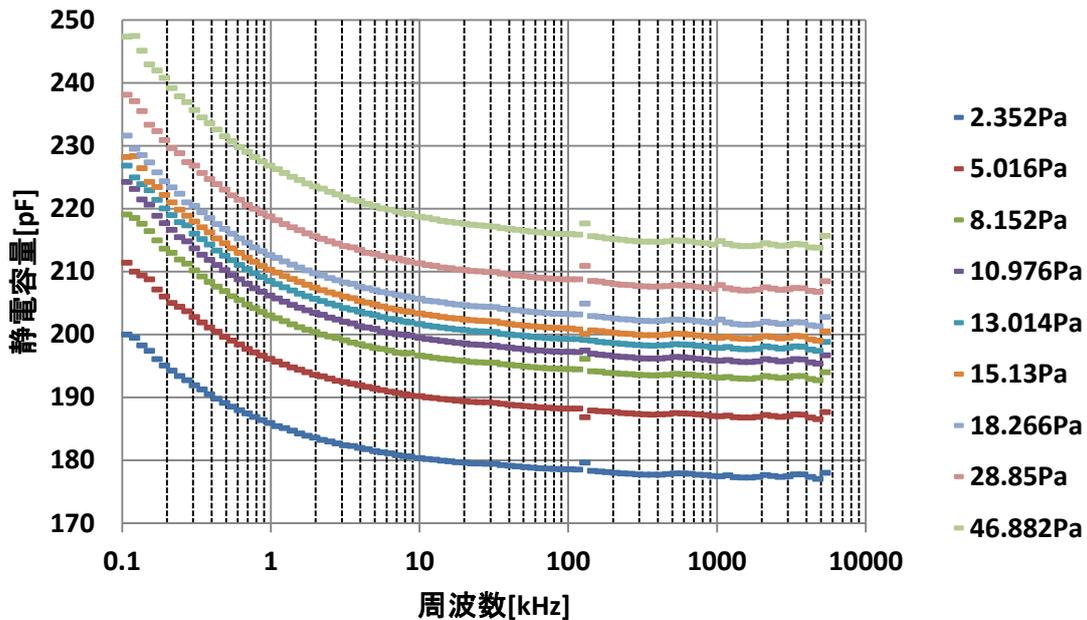


図 3.21 短冊 TIM 実験結果(3M5519S)

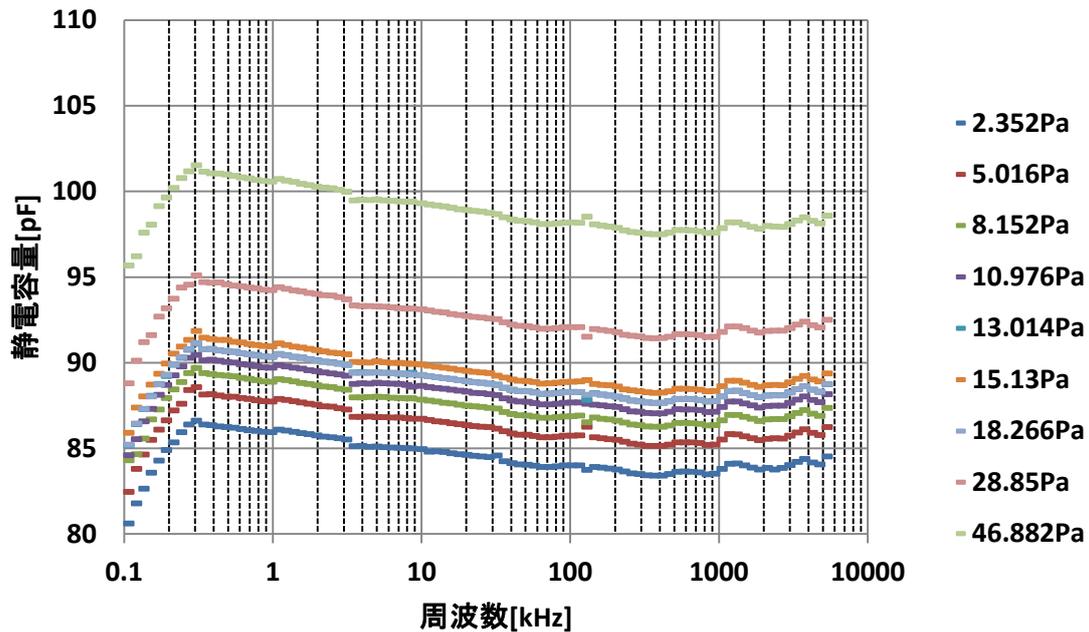


図 3.22 TIM 短冊実験(TC100CAD)

3.2 節の図 3.3～図 3.6 に示す実験結果と同様に図 3.21 と図 3.22 に示す実験結果も、圧力の変化による静電容量の周波数特性は共通していることが確認できた。静電容量の周波数特性が共通になっている理由は、測定系の形状 TIM 変化による静電容量のみが変化してその他測定系の要素が共通しているからである。

この条件で求めた 8kHz 時の静電容量値を用いた際に、50mm 角と短冊形状の印加圧力が同じであれば TIM の厚さも同じであると仮定する。50mm 角の TIM 使用時の静電容量、2.5mm×50mm×1mm の短冊形状 TIM を 2 枚使用した際の静電容量を  $C_{Fl}$ 、 $C_{Sl}$  とすると、それぞれは(3.1)式、(3.2)式で表せる。

$$C_{Fl} = \epsilon_{TIM} \epsilon_0 \frac{S}{t} \quad (3.1)$$

$$C_{Sl} = (\epsilon_{TIM} + 1) \epsilon_0 \frac{S}{2t} \quad (3.2)$$

真空の誘電率  $\epsilon_0$  は  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m、電極面積  $S$  は 50mm 角、 $t$  は TIM の厚さとした。

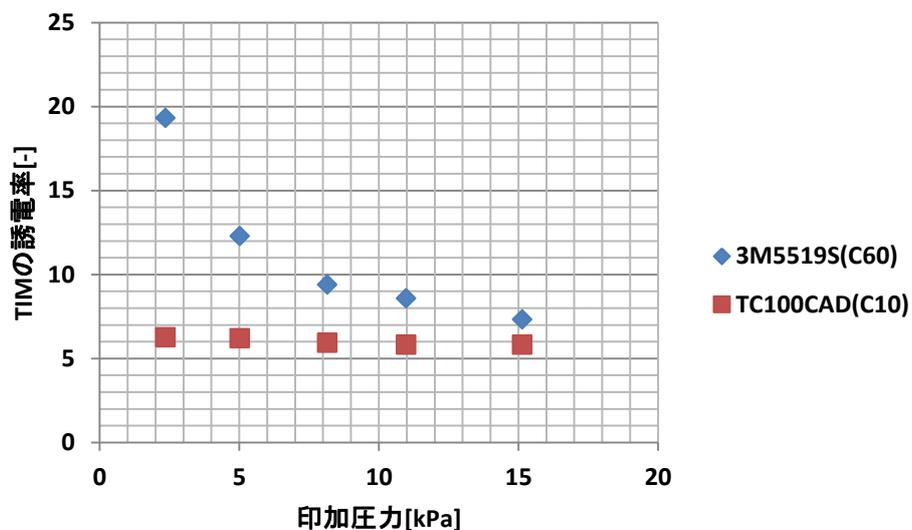


図 3.23 圧力と TIM の誘電率

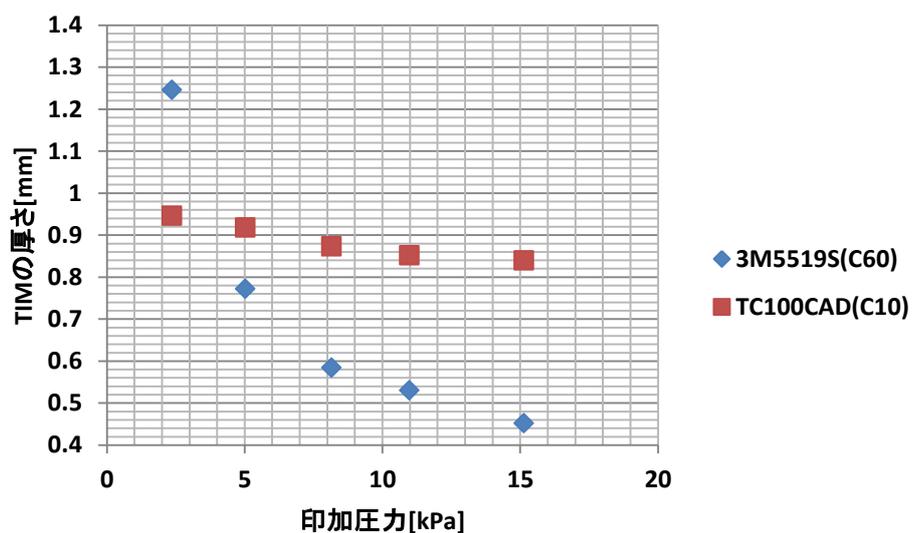


図 3.24 圧力と TIM の厚さ

図 3.23 より、TC100CAD は圧力が変化しても誘電率は±4%以下の範囲内であるが、3M5519S に関しては圧力が増加すると誘電率が大きく減少していて、15.13kPa 時の誘電率は 2.352kPa 時の誘電率と比較して約 40%減少している。また、図 3.24 に示す結果より TC100CAD の厚さは、15.13kPa 時の厚さと 2.352kPa の厚さを比較すると、12%程度減少しているが、3M5519S は 65%近く大幅に減少している。TC100CAD に関しては誘電率、TIM の厚さ共に妥当な値を得たが、3M5519S の厚さ、誘電率に関しては検討が必要である。3M5519S のカタログ値には ASTM D150 規格に準拠した誘電率測定した値が 19.5 と記載されている[12]。図 3.23 に示す解析結果の印加圧力 2.352kPa の誘電率は 19.32 とメーカーカタログ値に近い。しかし、さらに印加圧力を増加すると 3M5519S の誘電率は減少する。

そこで、図 3.25 に示すようにレーザー変位計を用いて TIM の厚さを直接測定して再度検討を行った。TIM 厚の測定はレーザー変位計(KEYENCE IA-030)を使用した[13]。圧力印加時における TIM 厚の変化と静電容量を測定した。

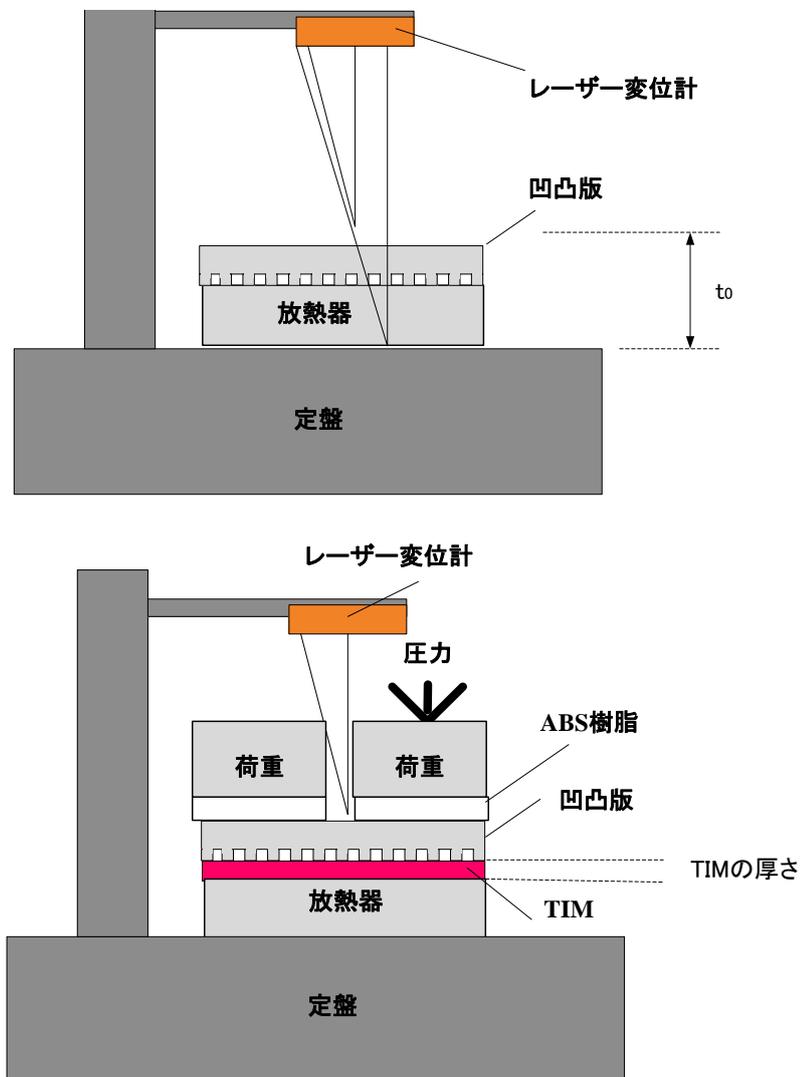


図 3.25 TIM の厚さ測定

図 3.25 に示すように TIM 厚測定の手順は、放熱器 と凹凸板の厚さを  $t_0$  として基準に設定し、放熱器 と凹凸板間に評価対象の TIM を挟み、500s 圧力印加後にレーザー光を凹凸板表面に合わせて TIM の厚さを測定した。さらに、印加圧力は 2.508kPa、5.488kPa・・・14.425kPa と印加圧力を徐々に増やした際の厚さ特性を順特性、14.425kPa、5.488kPa・・・2.508kPa と印加圧力を徐々に減らした際の厚さ特性を回復特性として、各特性を測定した。実験結果を図 3.26、図 3.27 に示す。

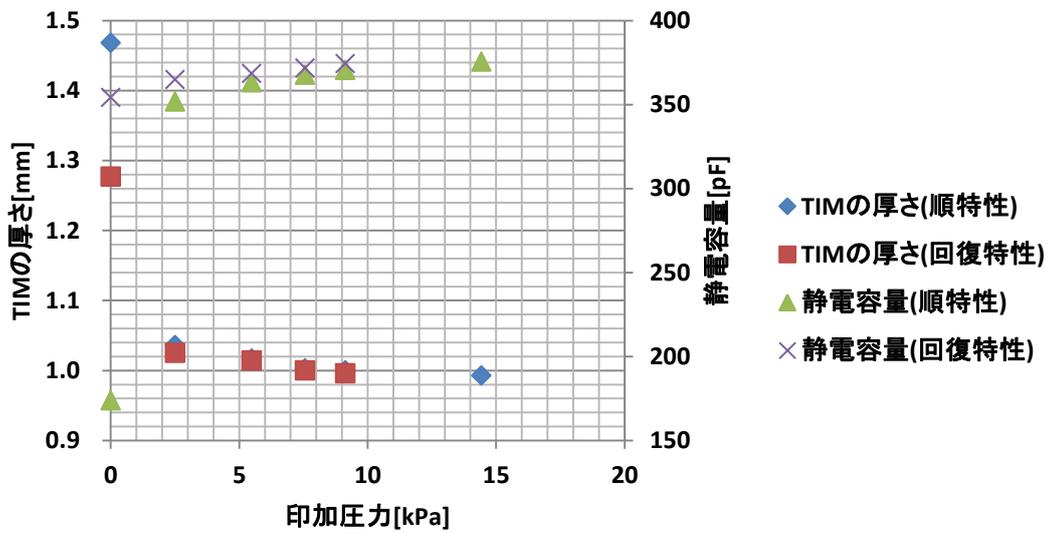


図 3.26 TIM の厚さ、静電容量 同時測定(3M5519S)

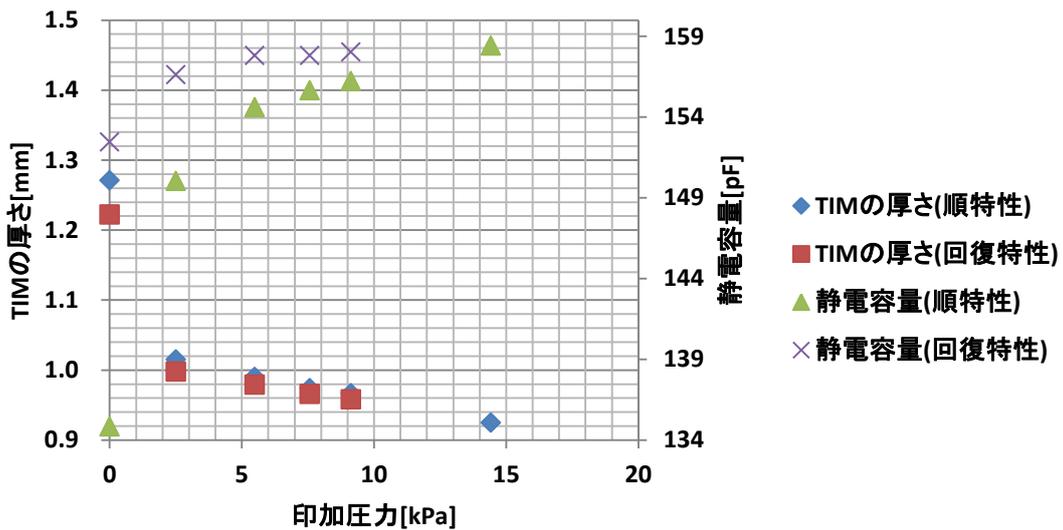


図 3.27 TIM の厚さ、静電容量 同時測定(TC100CAD)

図 3.26 と図 3.27 に示す実験結果より、両材料共に圧力増加により(以下、順特性)、TIM 厚が減ることや材料間の空気抜けによって静電容量が大幅に増加する。圧力を解除することによる静電容量の減少(以下、回復特性)は順特性の静電容量の増加に比べ小さく、TIM 厚による影響が支配的だと仮定すると、図 3.28 に示すモデルで説明することができる。

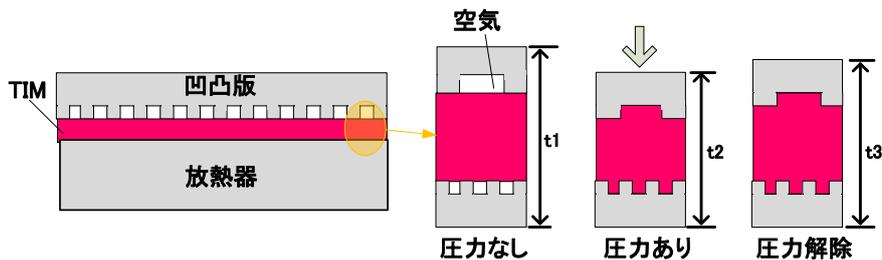


図 3.28 Type2-TIM の密着のイメージ

凹凸板と放熱器の間には微小な隙間があり、その隙間には空気が存在する。そこに圧力を印加することによって、隙間の空気が抜け TIM が埋まり、さらに TIM が軟らかい材料なので圧力によって TIM 自身の厚さが薄くなる。材料間に印加した圧力を解除した場合、空気の隙間が発生することなく密着したまま、厚さだけが復元(回復)したと推測できる。これは印加圧力による静電容量の変化が厚さによる影響だけで説明できないので、接触状態による影響も含まれていると予測する。

そこで、2.6 節の図 2.8 に示す熱抵抗測定の実験結果より、TC100CAD は 5kPa 付近、3M5519S は 14kPa 付近で熱抵抗が飽和している。この結果から接触状態に直接影響を与える静電容量は熱抵抗が飽和する圧力まであり、熱抵抗が飽和する印加圧力までは TIM 自身の密度による変化が少ないと仮定した。しかし、これ以上の圧力は TIM の厚さが減少することや TIM 自身の密度が変化することにより静電容量が増加すると仮定する。表 3.3、表 3.4 は圧力変化時における厚さ、静電容量の増減を示している。表 3.3、表 3.4 で使用する最小圧力は 0Pa が望ましいが 0Pa の場合、TIM の置き方等(初期条件)を一定に制御することが困難なため、初期圧力は 2.508kPa を使用した。

表 3.3 厚さ、静電容量 圧力変化と増減 順特性

印加圧力の変化	2.508kPa→14.425kPa	2.508kPa→5.488kPa
TIM の厚さ[%]	-4.151	-2.463
静電容量[%]	6.741	3.046

表 3.4 厚さ、静電容量 圧力変化と増減 回復特性

印加圧力の変化	14.425kPa→2.508kPa	5.488kPa→2.508kPa
TIM の厚さ[%]	3.122	1.904
静電容量[%]	-2.815	-0.643

表 3.3 に示す順特性結果より、どちらの材料でも厚さの減少分よりも静電容量の増加分のほうが大きいので、静電容量の増加は TIM 厚の変化のみによる影響でなく接触状態の影響が含まれていると考えられる。さらに、表 3.4 の回復特性結果からは厚さの増加分よりも静電容量の減少分のほうが小さく、接触状態(密着性)が維持されていると考えられる。

### 3.5 凹凸板を用いた静電容量測定の実験モデル

3.3 節の図 3.16 に示す凹凸板の静電容量測定に関する理論モデルを構築する。平板コンデンサの式を(3.1)式のように定義する。メーカーカタログによって誘電率が明らかになっている 3M5519S を用いて解析を行った。3.4 節の図 3.26 に示す印加圧力と厚さ測定の結果から、低圧力下では TIM の厚さは 1mm と定義した。凹凸板の形状に対応したコンデンサのモデルを立てて検証を行った。モデルの構造を図 3.29 に示す。

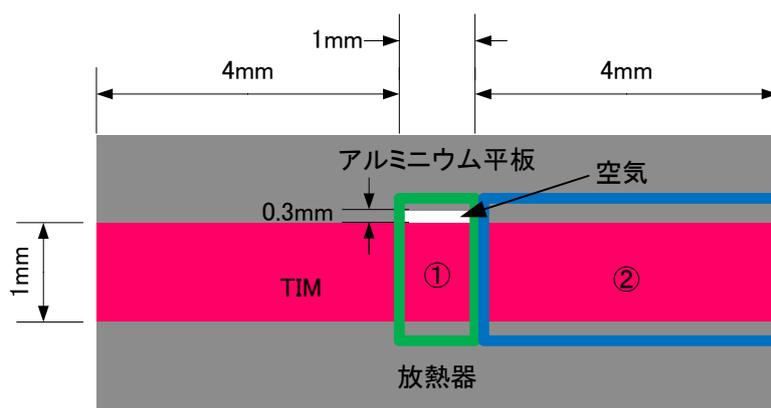


図 3.29 凹凸板の構造

(3.1)式を用いて計算を行った結果、3M5519S の平板コンデンサの理論値は 431.63pF となった。図 3.29 に示す構造内の凹凸板凹部(①の部分)は、空気層 0.3mm と TIM 厚 1mm が誘電体のコンデンサ、凹凸板凸部(②の部分)は TIM 厚 1mm が誘電体のコンデンサである。①と②の比率は凹凸板の凸部と凹部が 4:1 であるため、図 3.30 に示す電気等価回路モデルを立てた。各部を(3.3)式~(3.6)式を用いて求めた。 $C_{TIM1}$ は図 3.29 の②、 $C_{TIM2}$ と  $C_{air}$ は図 3.29 の①の構造に相当する。

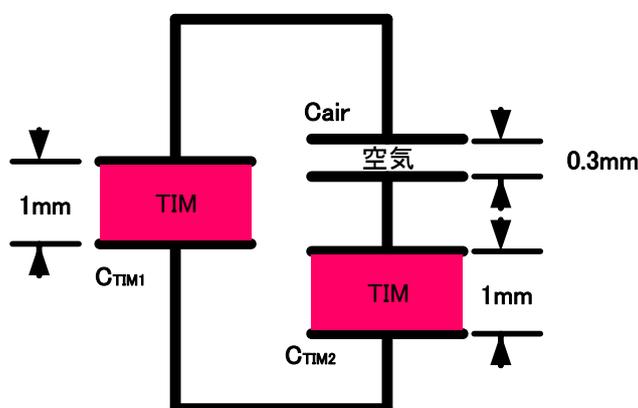


図 3.30 凹凸板を用いた静電容量測定の実験モデル

$$C_{TIM1} = \frac{4 \times 431.63}{5} \quad (3.3)$$

$$C_{TIM2} = \frac{1 \times 431.63}{5} \quad (3.4)$$

$$C_{air} = \frac{\epsilon_0 S_{air}}{0.3 \times 10^{-3}} \quad (3.5)$$

$$C = C_{TIM1} + \left( \frac{C_{air} C_{TIM2}}{C_{air} + C_{TIM2}} \right) \quad (3.6)$$

図 3.30 に示す電気等価回路の合成静電容量  $C$  を式(3.3)～式(3.6)を用いて求めた結果、352pF になった。この値は 3.3 節の図 3.16 に示す実験結果の 6kPa 付近の静電容量値に近い。さらに圧力を加えることで平板コンデンサの式で求めた理論値は 431.63pF に近づくとと思われる。この電気等価回路モデルの妥当性を検証するために、3.4 節の図 3.26 に示す各印加圧力における TIM の厚さを(3.1)式に代入して静電容量の理論値を求めた。誘電率が既知の 3M5519S で解析を行った。3M5519S の誘電率は 19.5 とし、解析を行った結果を図 3.31 に示す。

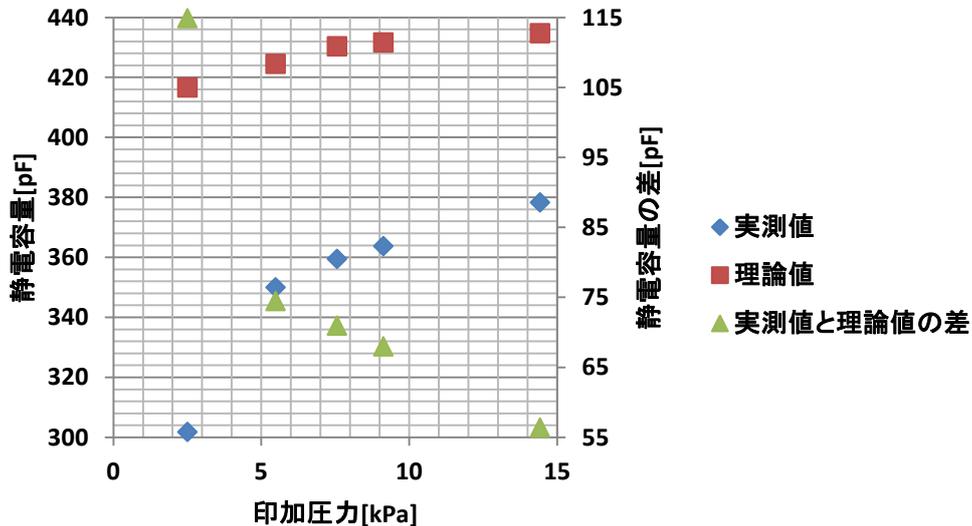


図 3.31 電気等価回路モデルの検証結果(3M5519S)

図 3.31 に示す実測値の結果は、3.3 節の図 3.16 の結果を引用した。静電容量の理論値と実測値を比較すると、全ての印加圧力範囲で理論値のほうが大きい。理論値の平板コンデ

ンサモデルの表面は電極間に空気が入っていない状態で TIM 厚の圧力依存が考慮されているが、実測では凹凸板を使用しているので、隙間に空気の影響で実測値が理論値よりも小さくなったことが考えられる。理論値と実測値の差を求めた結果、印加圧力が増えるほど静電容量の差は小さくなった。これは実測で使用する凹凸板の表面に TIM が追従していることがいえる。

### 3.6 金属メッシュを用いた静電容量測定の実験構成

凹凸板と同様に金属メッシュを使用した際にも接触状態を静電容量測定により把握することを目的として実験を行った。金属メッシュの場合、凹凸板と異なり TIM を 2 枚使用するため、アルミニウム平板、TIM、金属メッシュで等価的なコンデンサとなり、さらに金属メッシュ、TIM、放熱器でも等価コンデンサとなる。LCR メーターから見ると 2 つのコンデンサが直列に接続しているように見える(図 3.32)。

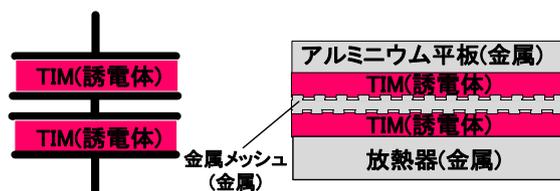


図 3.32 金属メッシュを使用した際の等価コンデンサモデル

2.9 節の図 2.13 と図 2.14 に示す金属メッシュを使用した熱抵抗測定の実験結果より、どちらの材料も圧力を共通としてメッシュ数を変化させて熱抵抗を確認した結果、60 メッシュで熱抵抗が飽和していることがわかる。そこで、静電容量測定実験で使用する金属メッシュは 60 メッシュのみで検証を行った。金属メッシュを使用した静電容量測定の実験構成を図 3.33 に示す。

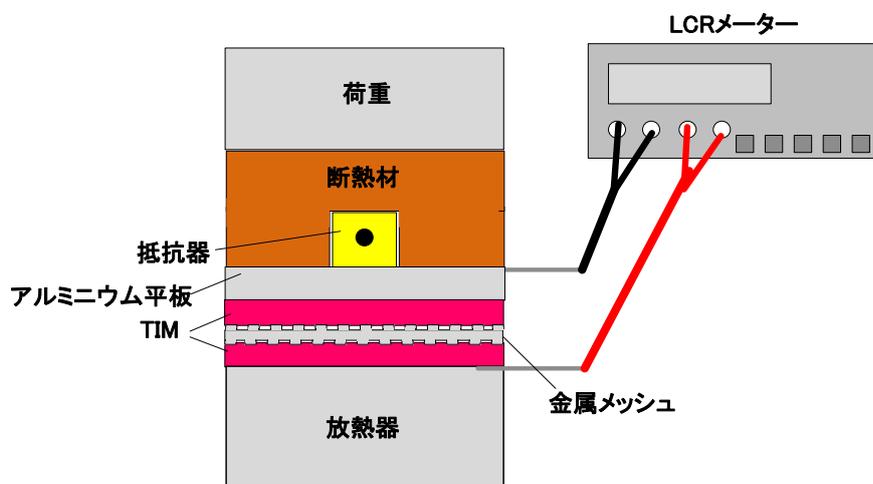


図 3.33 金属メッシュを用いた TIM の評価実験構成(静電容量測定)

測定周波数は 8kHz として、LCR メーターのケーブルはそれぞれアルミニウム平板と放熱器に接続した。静電容量は圧力印加後 500s 後の値を使用した。

### 3.7 静電容量測定の実験結果

図 3.34 に圧力印加時における静電容量測定の実験結果を示す。図 3.35 は 3M5519S、図 3.36 には TC100CAD の熱抵抗測定結果(2.8 節の図 2.12 に示す実験構成で行った実験結果)も静電容量測定との比較のために表示した。

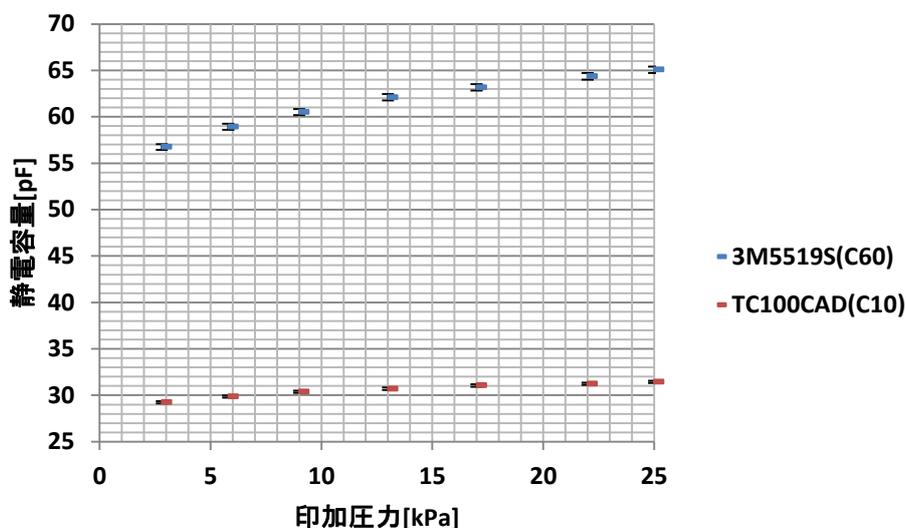


図 3.34 印加圧力と静電容量(金属メッシュ使用時)

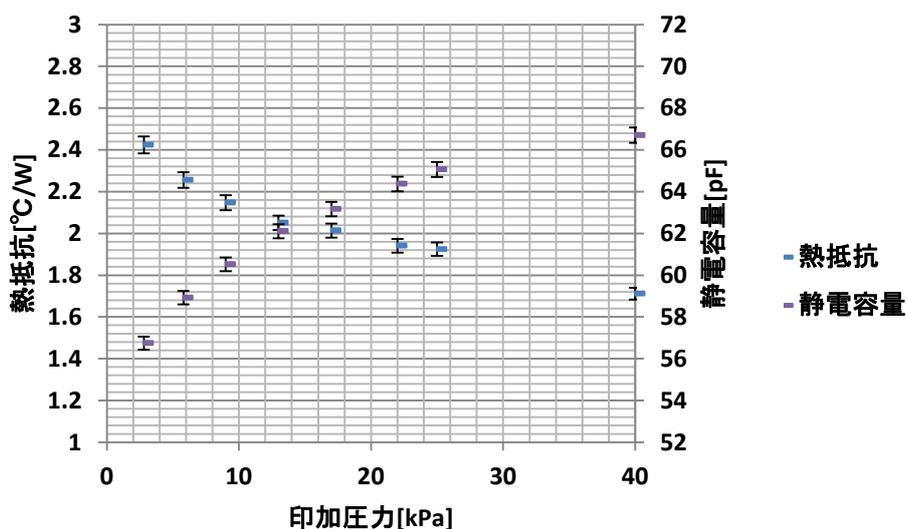


図 3.35 熱抵抗と静電容量の相関(3M5519S)

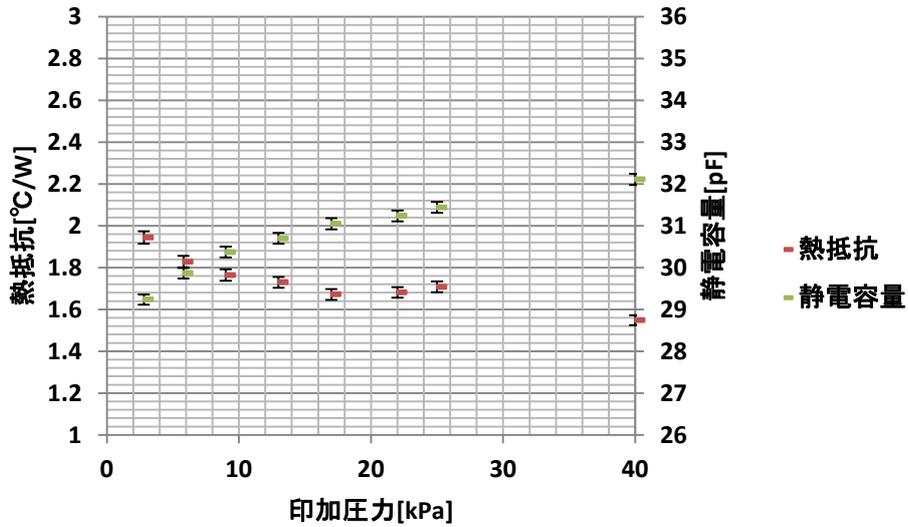


図 3.36 熱抵抗と静電容量の相関(TC100CAD)

図 3.35 と図 3.36 に示す実験結果より、両材料とも印加圧力増加により熱抵抗は減少して、静電容量は増加する傾向を得た。さらに、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量としてグラフに表示した結果を図 3.37 に示す。

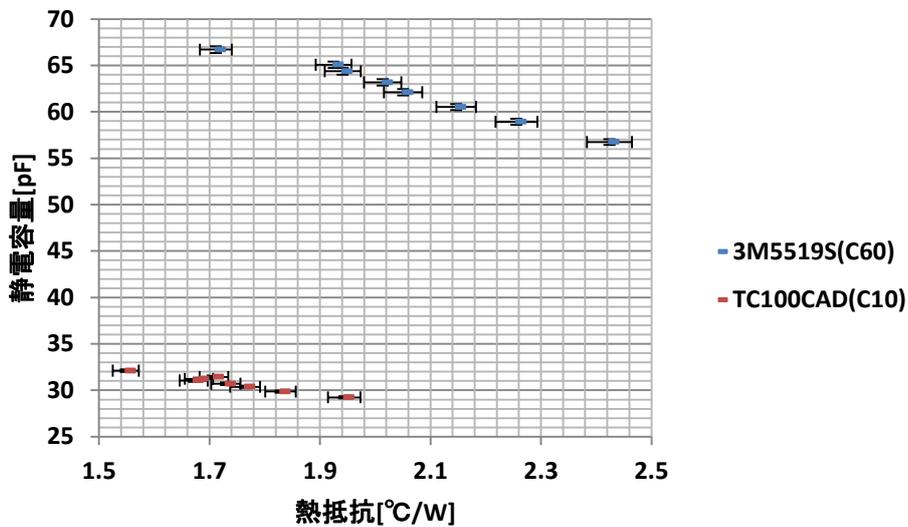


図 3.37 熱抵抗と静電容量の関係（金属メッシュを使用）

図 3.37 に示す熱抵抗測定と静電容量測定の 5 回の繰り返し実験データより、3M5519S の熱抵抗の誤差は±1.68%、静電容量の誤差は±0.55%である。TC100CAD は熱抵抗の誤差は±1.52%、静電容量の誤差は±0.42%となった。この結果から、シリコンパッドシートとの接触状態を考慮した熱抵抗が 0.1°C/W オーダーの変化をした場合でも静電容量で検出することが可能であるので、TIM の特性劣化を検出するには十分な精度を有している。

### 3.8 金属メッシュを用いた静電容量測定の実験モデル

凹凸板の静電容量測定と同様に金属メッシュを用いた場合でも静電容量測定に関する理論モデルを構築する。まずは平板コンデンサの式を用いて解析を行った。平板コンデンサの式を 3.4 節の(3.1)式のように定義する。凹凸板と同様に解析対象は 3M5519S とする。式(3.1)の  $t$  は TIM の厚さに相当するが、低圧力下では TIM 自身の変形がないと仮定して TIM の厚さ  $t$  を 2mm とした。3.4 節の(3.1)式に上記の条件を代入した結果、静電容量の理論値は 77.69pF となり、実測値の最大値 66.7pF より大きい。実測値より大きい理由を検討するために、金属メッシュの形状に対応した理論モデルを立てて検証を行った。60 メッシュの金属メッシュを使用した際の理論モデルを図 3.38 に示す。

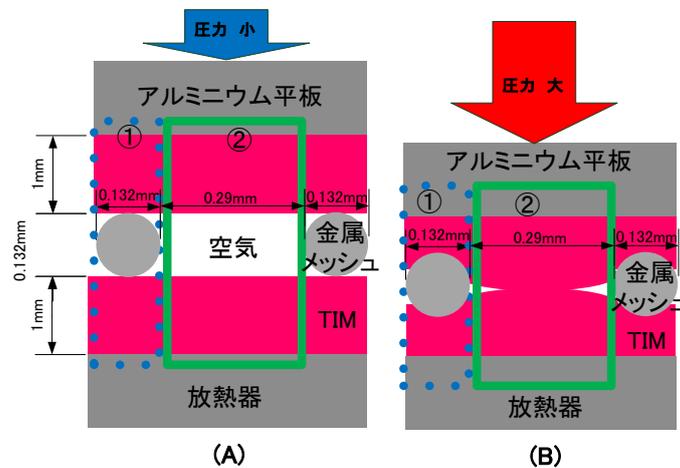


図 3.38 金属メッシュの理論モデル(60 メッシュ)

図 3.38 に示す理論モデル内の②は TIM の厚さ 1mm が誘電体のコンデンサである。①と②の比率は空隙率  $O$  と線径  $d$  で管理されているため、図 3.39 に示す等価回路モデルを立てた。金属メッシュの線は球形だが、今回はモデルを簡略化して検討しやすいように金属メッシュの形状を正方形にした。

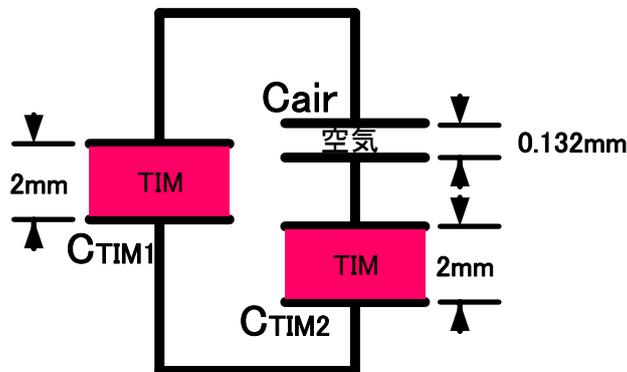


図 3.39 金属メッシュを用いた静電容量測定の実験モデル(60 メッシュ)

各コンデンサを求める式を式(3.7)～式(3.10)に示す。図 3.38 に示す理論モデル(A)の①の部分は、金属メッシュの空気層 0.132mm と TIM 厚 1mm が誘電体のコンデンサ、②の部分は、金属メッシュと TIM 厚 1mm が誘電体のコンデンサである。①と②の比率は金属メッシュの空隙率から空隙 47.4:固体 52.6 であるため、図 3.39 に示す電気等価回路モデルを立て、式(3.7)～式(3.10)に定義した。凹凸板の静電容量解析と同様に合成静電容量を求めて 60 メッシュ時の静電容量を算出する。

$$C_{TIM1} = \frac{52.6 \times 77.69 \times 10^{-12}}{100} = 40.87[\text{pF}] \quad (3.7)$$

$$C_{TIM2} = \frac{47.4 \times 77.69 \times 10^{-12}}{100} = 36.83[\text{pF}] \quad (3.8)$$

$$C_{air} = \frac{47.4 \times 60.37 \times 10^{-12}}{100} = 28.62[\text{pF}] \quad (3.9)$$

$$C = C_{TIM1} + \left( \frac{C_{air} C_{TIM2}}{C_{air} + C_{TIM2}} \right) = 56.98[\text{pF}] \quad (3.10)$$

図 3.39 に示す金属メッシュ等価回路の合成静電容量  $C$  を式(3.7)～式(3.10)を用いて求めた結果、56.98pF となった。この値は 3.7 節の図 3.35 に示す実験結果の 2.8kPa 付近の静電容量値に近い。2.8kPa 以上の圧力を加えることで、図 3.38 に示す理論モデル(B)のように、金属メッシュの隙間に TIM が入り込むことや TIM 厚が減ることで実測値の最大値 66.7pF に近づくとと思われる。図 3.38 に示す理論モデル(A)の理論値と実測値が合わない要因は、誘電率の変化を考慮していないことが挙げられる。金属メッシュの電気等価回路モデルで求めた静電容量の理論値と平板コンデンサの式で求めた理論値の範囲内に実測の静電容量値が収まっている。TIM の誘電率等の物性が事前にわかれば、熱的に十分な接触状態を得られる静電容量値を予測することが可能である。Type2-TIM のシリコーンパッドシート誘電率に関してはメーカーが公表していない場合もあるが、ASTM D150 規格に準拠した誘電率測定で把握することができる[14]。

### 3.9 まとめ

接触状態を熱的な測定によって把握するには最低でも数分間を必要とする。そこで、管理した表面粗さを凹凸板と金属メッシュにより再現したうえで、静電容量測定を用いて高速に接触熱抵抗を考慮した TIM の評価手法を提案した。その結果、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量で表示したところ相関を得た。さらに印加圧力による静電容量の変化が TIM 厚や測定自身の誤差による影響のみではなく接触状態による影響が含まれていることが明らか

かになった。さらに熱抵抗測定と静電容量測定の誤差範囲であれば、TIM の設置忘れや TIM の亀裂等の不良を検出するのは十分な精度を有する。よって、製品の出荷検査(不良検出)などで高速に接触状態を確認する場合に応用できる見通しを得た。

## 参考文献

- [1] 富村寿夫, “超音波による金属間の接触熱コンダクタンスの評価”, 九州大学機能物質科学研究所報告, Vol.10, No.1, pp.41-44 (2013.2)
- [2] HENGEVELD Derek W., DOYLE Derek T., REYNOLDS Whitney D., TAFT Kevin J., “Ultrasonic Characterization as a Correlating Metric for Evaluating Thermal Contact Resistance”, Vol.53, Vol.3, pp.2723-2731 (2012)
- [3] 吉瀬 幸司, “金属接触部における熱抵抗と電気抵抗の温度依存性”, 日本機械学会講演論文集, Vol.79, No.798, pp.73-81 (2013.2)
- [4] 水原 清司, “接触電気抵抗による接触熱抵抗の評価法”, 日本機械研究所所報, Vol.43, No.5, pp.28-40 (1989.9)
- [5] “Agilent Technologies インピーダンス測定ハンドブック”, (2003.11)
- [6] “HIOKI 3532-50 LCR ハイテスタ 取扱説明書”, pp.59-183(2011.2)
- [7] 桂井 誠 監修, “ハンディブック 電気”, オーム社, pp.50-52(2003.12)
- [8] 砂川 重信, “電磁気学の考え方”, 岩波書店, pp.37-38(1996.3)
- [9] 相田 貞蔵, 河野 宣之, 江端 正直, 釘沢 秀雄, “電子計測 基礎と応用”, 培風館, pp.16-19(1996.9)
- [10] 谷口 彰敏 監修, “熱伝導性フィラーと高放熱複合材料技術、およびその応用化事例”, 株式会社情報機構, pp.4-10(2013.2)
- [11] 斎藤 靖弘, 鈴木 悟, 小室 貴紀, “静電容量測定による TIM の評価について”, 第 27 回 回路とシステムワークショップ論文集, pp.144-149(2014.8)
- [12] “3M Thermally Conductive Silicone Interface Pads 5519 and 5519S” (2013.12)
- [13] “KEYENCE Japan CMOS レーザアナログセンサ ヘッド IA-030  
[http://www.keyence.co.jp/appli/appli\\_sensor/ia/ia\\_030/](http://www.keyence.co.jp/appli/appli_sensor/ia/ia_030/)”,
- [14] ASTM D150-11, “Standard Test Method for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation”, pp.28-47 (2012.2)

## 第4章 本研究で提案した熱伝導材料の評価手法の応用例

### 4.1 サーマルグリースの BLT 評価

第3章までは Type2-TIM のシリコーンパッドシートを評価対象として測定法を提案、検証を行ってきた。本章では提案した TIM の評価手法の応用例として、Type1-TIM を評価した。評価対象にした Type1-TIM はサーマルグリースとする。サーマルグリースのような Type1-TIM はペースト状であるため、固形の Type2-TIM よりも TIM 自身の熱抵抗を小さくできるので、TIM を使用して電気絶縁を要求されない状況での使用が増えてきている。サーマルグリースのような Type1-TIM 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。

2003 年頃までの Type1-TIM に関する研究は Type1-TIM 自身の熱伝導率についての研究報告がほとんどであった。熱設計の最終目標はシステム全体の熱抵抗の低減である。従来よりも熱伝導率の良い Type1-TIM を材料メーカーが開発して、ユーザーがその TIM 実装してもシステムの熱抵抗が依然よりも低減しないことが多くなった。このシステムの熱抵抗については TIM 自身の熱伝導率だけではなく、TIM 自身の膜厚(BLT: Bond Line Thickness)や TIM の熱伝導率を上げるフィラーの形状と体積充填率、基油の粘度にも依存すると報告されている[1]-[4]。Type1-TIM が使用される IGBT モジュールを適応した電力変換システムの熱設計を例に挙げると、放熱経路において最も熱抵抗が大きいのは TIM である。システム全体での高効率を行うためには、TIM 自身の熱抵抗を可能な限り小さくする必要がある [5]-[7]。フィラーの形状とフィラーの体積充填率、基油の粘度は TIM 単体の特性で材料メーカーの配合によって決まるが、実装時の Type1-TIM 自身の熱抵抗を低減させるためにはサーマルグリースの膜厚を最適に管理することが重要である(図 4.1)[8]-[9]。

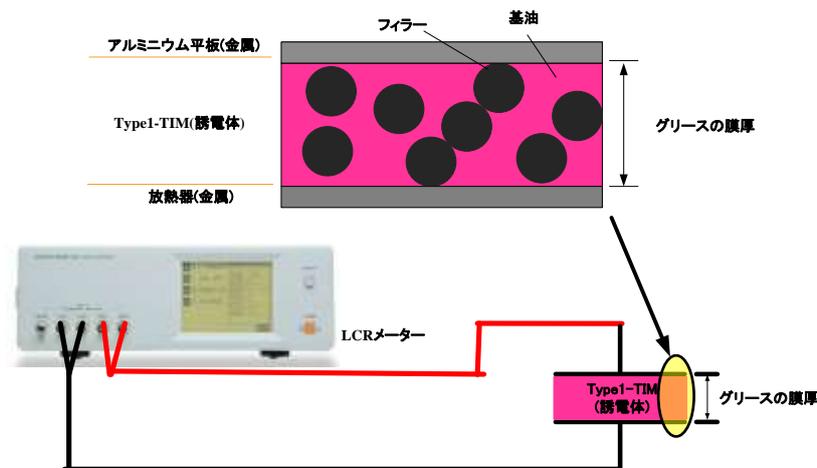


図 4.1 サーマルグリースのコンデンサモデル

サーマルグリースの膜厚を熱抵抗測定によって把握するには最低でも数分間を必要とし、量産時の評価としては実用的ではない。本章では静電容量測定を用いて膜厚を把握することにより、迅速にサーマルグリースの状態を評価する手法を提案した。

Type1-TIM のサーマルグリースも素子と放熱器の間に塗布されると、TIM 自身は誘電体であるため、等価的なコンデンサモデルに置き換えることができる。サーマルグリースの膜厚が薄くなると、熱的にはTIM 自身の熱抵抗は減少して、電気的には静電容量が増加することが予測できる。

図 4.2 に示すように TIM 自身の熱抵抗を最小にするためにはサーマルグリースの膜厚を最小にするのが望ましい(Minimum BLT)。サーマルグリースに含まれるフィラーの粒径により最小膜厚が決まるが、グリースの膜厚を熱抵抗測定によって把握するには最低でも数分間を必要とし、量産時の評価としては実用的ではない。本章では静電容量測定を用いて膜厚を把握することにより、迅速にグリースの状態を評価する手法を提案し、その有効性を検討する。Type1-TIM のサーマルグリースの場合、**BLT**が薄くなることで電気絶縁がとれなくなり静電容量が測定できなくなるので、放熱器を模擬したアルミニウムブロックに 30  $\mu\text{m}$  の硬質アルマイト加工を行った。静電容量  $C_s$  と **BLT** の関係式を(4.1)式に示す。

実際の放熱器にはアルマイト加工をするものが多いので、この実験構成でも評価に問題ない[10]-[11]。

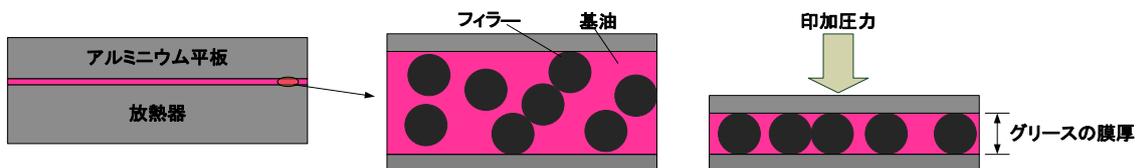


図 4.2 印加圧力とグリースの膜厚の関係

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{BLT} \quad (4.1)$$

なお、評価に用いたサーマルグリースは電気化学工業製 GFC-N8 を用いた。その特性を表 4.1 に示す。粘度は数値が大きいほど、粘りが強い液体であることを示す。今回評価するサーマルグリースの熱伝導率と粘度は Type1-TIM の材料としては一般的な特性である。

表 4.1 グリースの特性

材料	熱伝導率[W/(m・K)]	粘度[Pa・s]
GFC-N8	3	450

## 4.2 BLT と静電容量の同時測定の実験構成

図 4.3 に **BLT** と静電容量の同時測定の実験構成を示す。**BLT** の測定はレーザー変位計 (KEYENCE IA-030) を使用した。レーザー変位計の測定精度は  $\pm 1\mu\text{m}$  であるので、サーマルグリースの膜厚変化を余裕も持って測定することが可能である。

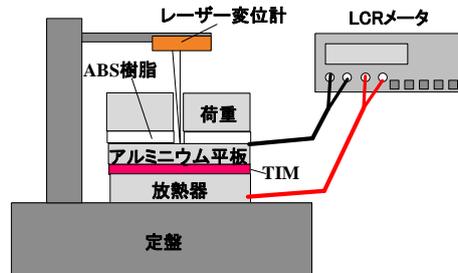


図 4.3 BLT 変化時における静電容量と並列等価抵抗の実験構成

放熱器は  $30\mu\text{m}$  の硬質アルマイト加工をして電気絶縁を確保している。サーマルグリースの詳しい塗布方法を図 4.4 に示す。緑色の物体は 3D プリンタで製作した治具である。治具を放熱器に設置して、サーマルグリースを塗布すると、サーマルグリースの初期厚さを  $0.4\text{mm}$  に固定することができる。

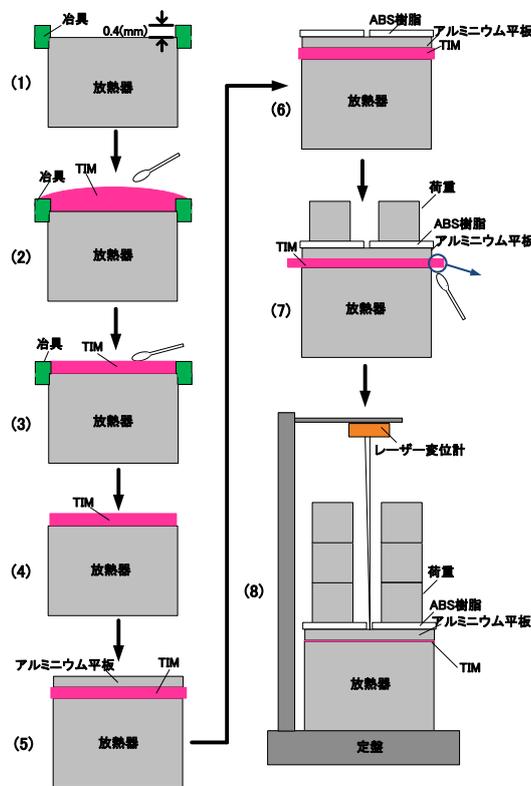


図 4.4 サーマルグリース膜厚管理の手順

図 4.4 よりサーマルグリース膜厚( $BLT$ )管理の手順について説明する。

- (1) 放熱器(下部電極)に治具をセットする。
- (2) サーマルグリース( $TIM$ )を塗布する。
- (3) スプーンを使用してグリースをすりきり状態にする。
- (4) 治具を取り外す。
- (5)  $TIM$ の上にアルミニウム平板(上部電極)を設置する。
- (6) アルミニウム平板の上に測定治具である ABS 樹脂を設置する。
- (7) ABS 樹脂の上に必要な荷重を加える。その際に端から流出したサーマルグリースをふき取った上で、100s 後の  $BLT$  と静電容量を測定する。
- (8)  $BLT$  と静電容量  $C_s$  の測定が終了したら、次の荷重を加える。

図 4.3 に示す構成で圧力を加えることによって、 $BLT$  変化時における静電容量  $C_s$ 、さらに  $BLT$  が変化した際の  $TIM$  自身の絶縁抵抗に相当する等価並列抵抗  $R_p$  を図 4.5 のように表現することができる。

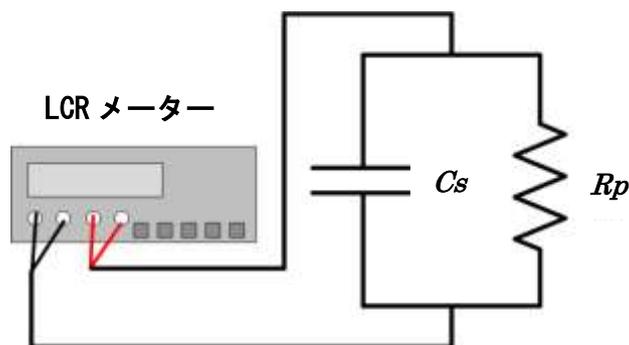


図 4.5 静電容量  $C_s$  と等価並列抵抗  $R_p$

$BLT$  と静電容量  $C_s$  の相関関係が成立するかを確認するために実験を行った。 $BLT$  は前述した通りレーザー変位計で確認し、静電容量  $C_s$  と等価並列抵抗  $R_p$  は LCR メーターを用いて同時に測定を行った。なお、3.2 節の Type2-TIM と同様に LCR メーターの周波数範囲は測定確度検証のため、100Hz~100kHz とした。改めて周波数走査を含めた測定を行う理由は、Type1-TIM と Type2-TIM とでは形状が異なるため念のため評価した。

また、レーザー変位計はグリース( $TIM$ )がない状態でレーザー変位計の基準設定を行い、 $TIM$  の厚さだけを検出できるようにした。そのうえで、サーマルグリースの膜厚を電気的な評価法で電極間の要素を把握するためにグリースを塗布していない状態での静電容量  $C_s$  と等価並列抵抗  $R_p$  も評価した。こうすることで、放熱器表面のアルマイト分の特性を把握してアルマイト分の静電容量と Type1-TIM の静電容量測定に必要な電気絶縁が確保できているかを確認することができる。

### 4.3 BLT と静電容量の同時測定の実験結果

図 4.6 に *BLT* 変化時における周波数と静電容量の実験結果を示す。荷重により膜厚を制御した。測定範囲の周波波数帯域に共通して *BLT* が減少すると静電容量  $C_s$  が増加しアルマイトのみの静電容量に近づくことが明らかになった。

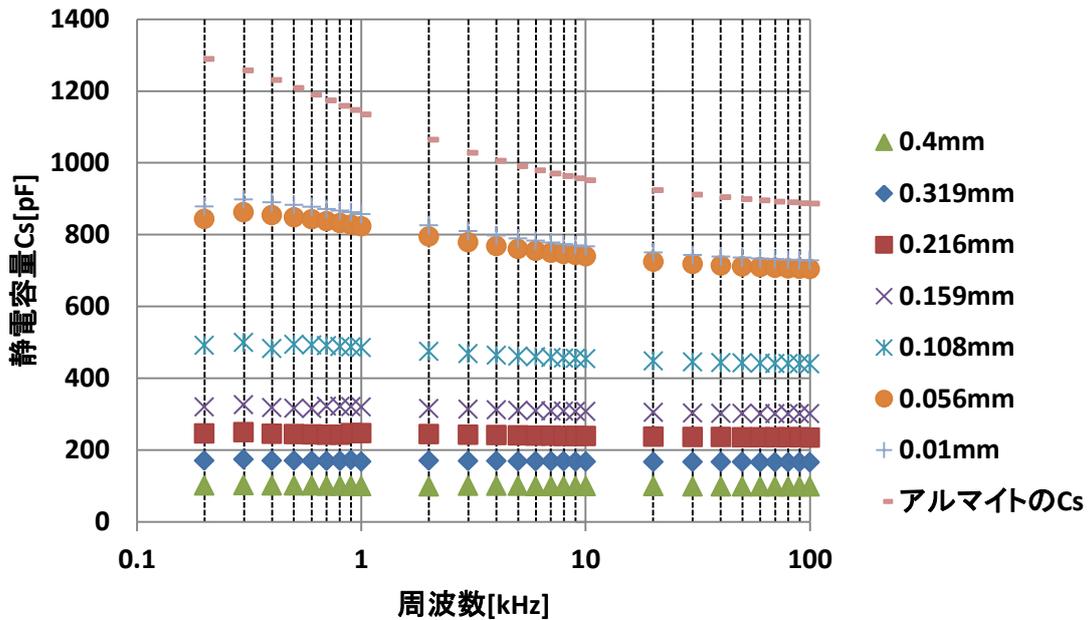


図 4.6 *BLT* 変化時における周波数と静電容量  $C_s$

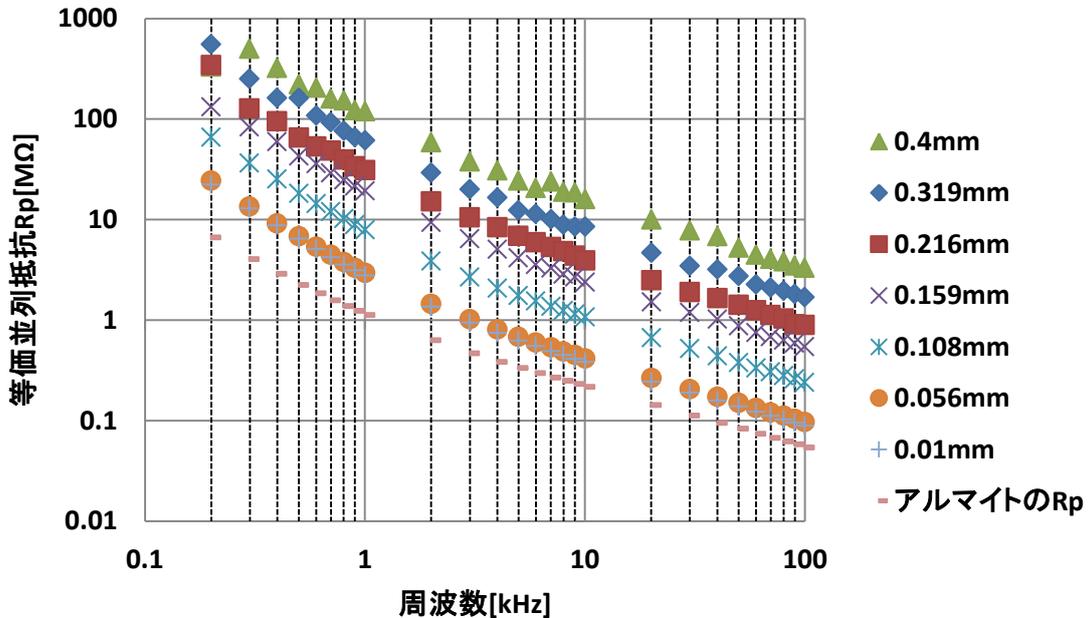


図 4.7 *BLT* 変化時における周波数と等価並列抵抗  $R_p$

静電容量増加の要因は  $BLT$  が減少ことによって電極間距離が近くなった結果と考えられる。さらに、図 4.7 に  $BLT$  変化時における周波数と並列等価抵抗  $R_p$  の実験結果を示す。 $BLT$  が小さくなると等価並列抵抗  $R_p$  が減少しアルマイトのみの等価並列抵抗に近づくことが明らかになった。等価並列抵抗  $R_p$  は材料間の絶縁抵抗を示し、実験では  $BLT$  が小さくなることによって電気絶縁抵抗が減少したことが考えられる[12]。また、周波数 500Hz 以下では  $R_p$  のばらつきが目立つ。この原因としては治具を含めた測定対象が LCR メーターからみるとコンデンサのため、低周波領域では等価並列抵抗  $R_p$  と並列関係であるグリースの容量性リアクタンス  $X_c$  が大きいことが挙げられる。 $BLT$  が小さくなると静電容量  $C_s$  が増加し、容量性リアクタンス  $X_c$  が減少するので  $BLT$  が小さい状態なほど  $R_p$  のばらつきが少ないと考えられる。

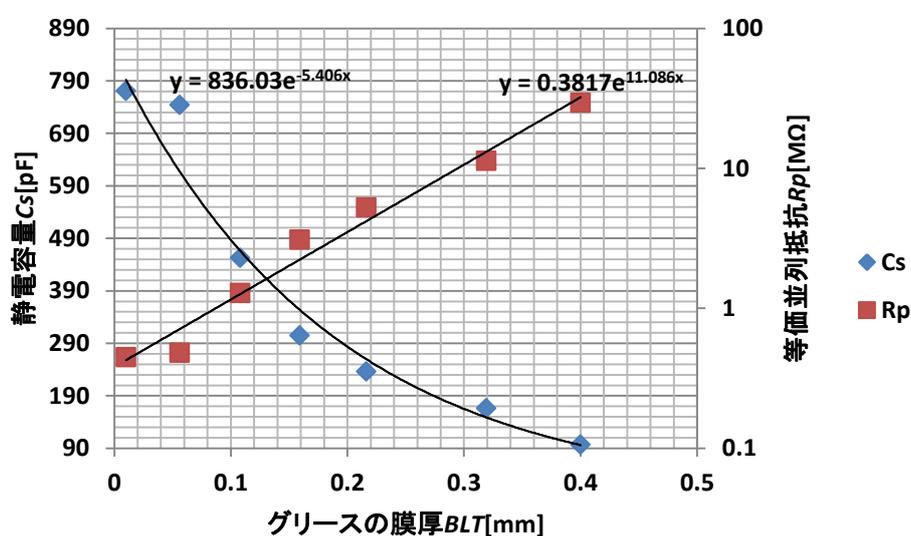


図 4.8  $BLT$  変化時における静電容量  $C_s$  と等価並列抵抗  $R_p$  (測定周波数 8kHz)

図 4.8 に示す実験結果は測定周波数を 8kHz 一定にして、各グリースの膜厚  $BLT$  における  $C_s$  と  $R_p$  を 100 回平均したデータである。その結果、 $C_s$  と  $R_p$  のばらつきは 1% 以下と非常に小さく、良好な再現性を確認した。また、 $C_s$  は指数関数でフィッティングしている。平板コンデンサモデルが成立しているのであれば、 $BLT$  と  $C_s$  の関係は反比例になるはずである。 $BLT$  が 0.05mm 付近まであれば、線形近似が成り立つが 0.1mm 付近では合わない。これは、膜厚が薄い領域ではグリースを構成するフィラーと基油の関係が  $BLT$  が大きい状態と違うことが原因だと考えられる。

## 4.4 熱抵抗と静電容量の関係

Type2-TIM と同様に Type1-TIM に関しても熱抵抗と静電容量に相関を見るための実験を行った。図 4.9 に示す構成で印加圧力を変化させたときの熱抵抗を測定した。実験で用いた TIM とアルミニウム平板は接触熱抵抗と静電容量の相関実験のため、4.2 節の図 4.3 と同じ物を使用した。500s 時の温度差(熱電対 1 と 2 の差)と抵抗器の発熱量  $Q$  (10W) 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。**BLT** を測定するために、まずは温度調整ヘッド、アルミニウム平板、抵抗器の厚さ  $t_0$  を測定してレーザー変位計の基準設定を行った。そのうえで温度調整ヘッド上に Type1-TIM を塗布することにより **BLT** を測定した。

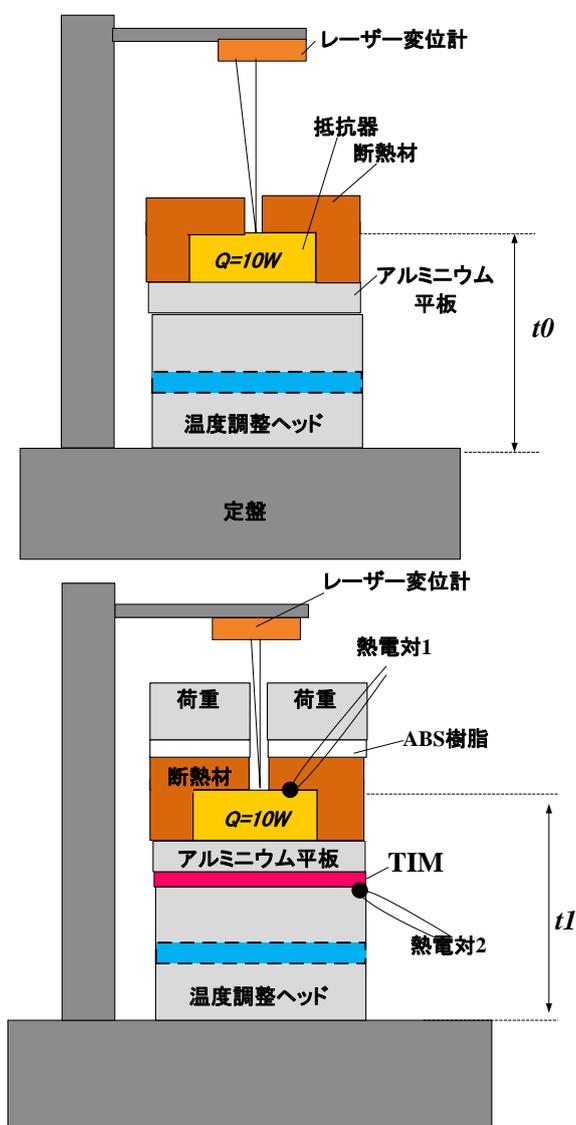


図 4.9 **BLT** と熱抵抗の同時測定

図 4.10 に **BLT** 変化時における熱抵抗の実験結果を示す。静電容量の実験結果は 4.3 節の図 4.8 に示すデータを引用した。熱抵抗と静電容量ともにサーマルグリースの膜厚(**BLT**) が共通であるため、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量で表示した結果を図 4.11 に示す。

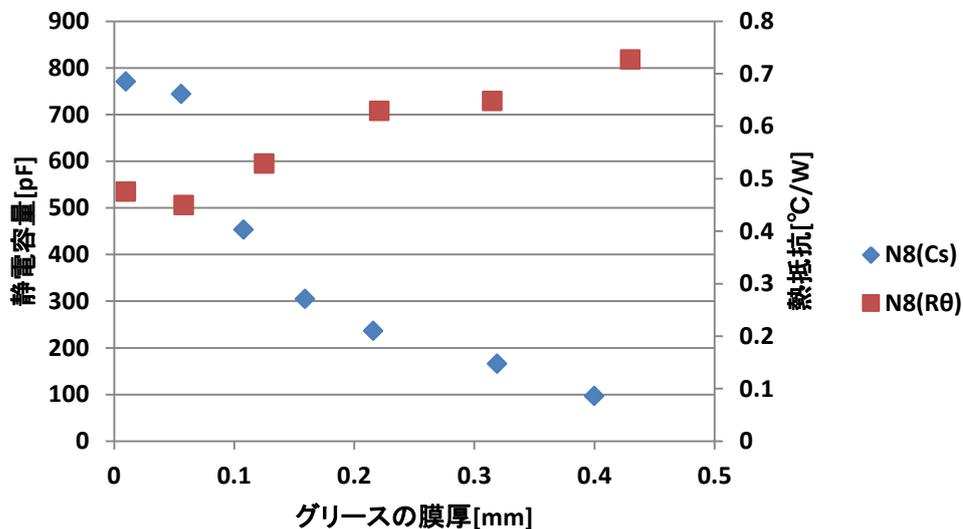


図 4.10 熱抵抗と静電容量の相関(Type1-TIM)

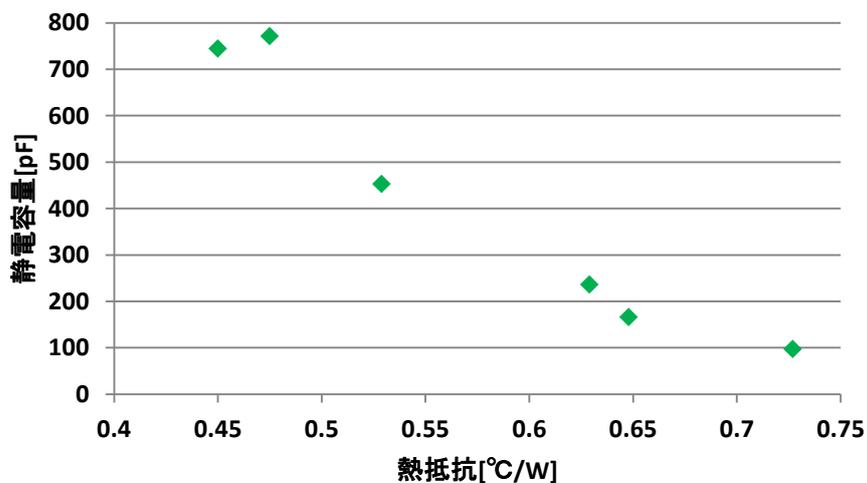


図 4.11 熱抵抗と静電容量(Type1-TIM)

図 4.11 の実験結果より、当初の予想通りサーマルグリースの膜厚(BLT)が薄くなると、熱的には TIM 自身の熱抵抗は減少して、電気的には静電容量が増加する傾向を得た。Type2-TIM は印加圧力を制御して実験を行っていたが、Type1-TIM は荷重を加えた上でサーマルグリースの膜厚を調整した。したがって熱抵抗と静電容量のグリース膜厚条件が完全には一致していない。しかし、図 4.11 より Type1-TIM を使用した場合には熱抵抗と静電容量の相関を確認した。静電容量の増加分で十分熱抵抗の減少を検出することが可能である。よって、静電容量を実測すれば熱抵抗を間接的に把握できる見通しを得た。

## 4.5 サーマルグリースの静電容量測定に関する理論モデル

Type1-TIM の静電容量測定に関する理論モデルを構築する。Type1-TIM のコンデンサのモデルを立てて検証を行った。理論モデルを図 4.12 に示す。さらに(4.2)式～(4.4)式を用いて各 BLT の静電容量の理論値を求めた。Type1-TIM の誘電率は絶縁系のフィラーとシリコーンの複合材料であることから 8.5、アルマイトの誘電率は 8.0 に設定した。理論モデルの解析結果を図 4.13 に示す。

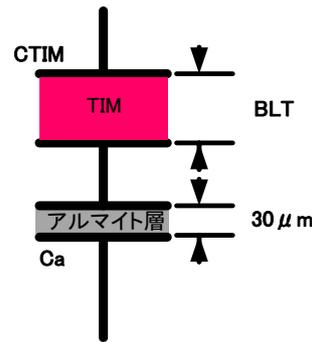


図 4.12 Type1-TIM の静電容量測定に関する理論モデル

$$C_{TIM} = \epsilon_{TIM} \epsilon_0 \frac{S}{BLT} = \frac{8.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 9 \times 10^{-4}}{BLT} \quad (4.2)$$

$$C_a = \epsilon_a \epsilon_0 \frac{S}{30 \times 10^{-6}} = \frac{8.0 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 9 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-6}} = 2124.96 [\text{pF}] \quad (4.3)$$

$$C = \frac{C_{TIM} C_a}{C_{TIM} + C_a} \quad (4.4)$$

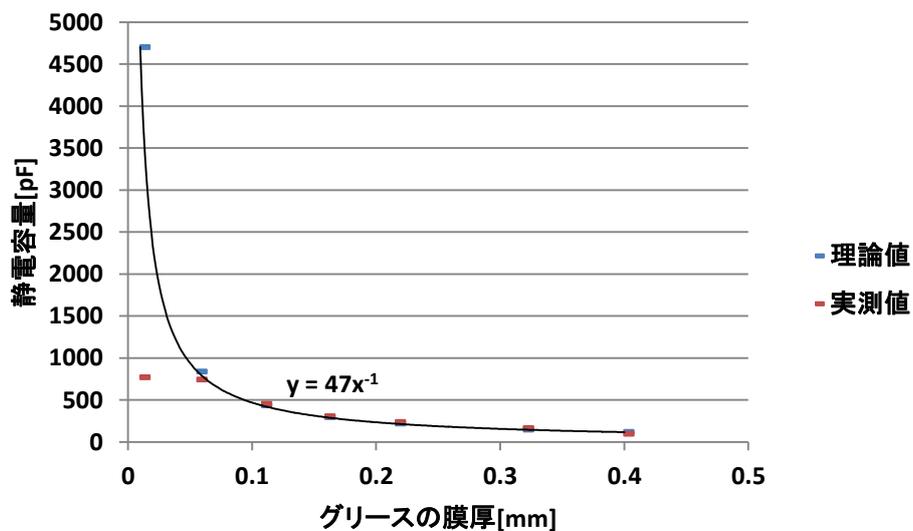


図 4.13 GFC-N8 静電容量の *BLT* 依存性

図 4.13 に示す解析結果より  $BLT > 0.1\text{mm}$  おいて  $\pm 10\%$  以内に理論値と実測値が合っている。 $BLT$  が  $0.01\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$  付近では理論値と実測値が大きくずれている。この原因は実験時の加圧が安定しないこと、グリース自身のフィラーの充填率やフィラーごとに形状が同じではなく  $BLT$  の減少で容量値が増加しないことが考えられる。しかし、図 4.13 に示す熱抵抗と静電容量の実験結果と理論解析で得た精度でも、実装時の Type1-TIM の塗り忘れやネジなど加圧の加圧不足に関する接触状態の不良は検出することが可能である。

## 4.6 高硬度 Type2-TIM の評価

2.6 節の図 2.8 に示す実験結果の考察で  $15\text{kPa}$  付近の圧力で 2 種類の Type2-TIM の熱抵抗は飽和しているように見える。また、 $23\text{kPa}$  付近の 3M5519S の熱抵抗は  $15\text{kPa}$  よりも上昇している。しかし、3.3 節の図 3.26 に示す 3M5519S の印加圧力と TIM の厚さの関係をみると  $15\text{kPa}$  でも TIM の厚さは薄くなっている。そこで、高硬度 Type2-TIM と凹凸板を使用した場合は、接触面凸部の細かい表面粗さが残る面に密着するためにも圧力が必要と仮定して高硬度 Type2-TIM のモデルを立てた。平面に近い凹凸板凸部の微細な表面粗さを金属メッシュにより再現した。金属メッシュは線径と空隙率が細かく管理されているので、凹凸板の表面よりも細かい凹凸を再現することが可能である。高硬度 Type2-TIM である 3M5519S を用いて印加圧力を増やした上で熱抵抗測定の実験を追加した。実験構成は 2.5 節の図 2.7 と概ね同様であるが、温度調整ヘッドと TIM の形状を  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$  に変更して発熱体である抵抗も小さくした。実験結果を図 4.14 に示す。この実験結果より、①の  $24\text{kPa} \sim 40\text{kPa}$  付近で熱抵抗が一度飽和したように見える。しかし、さらに圧力を加えると熱抵抗は減少して最終的には②の  $50\text{kPa}$  付近で熱抵抗が完全に飽和したといえる。

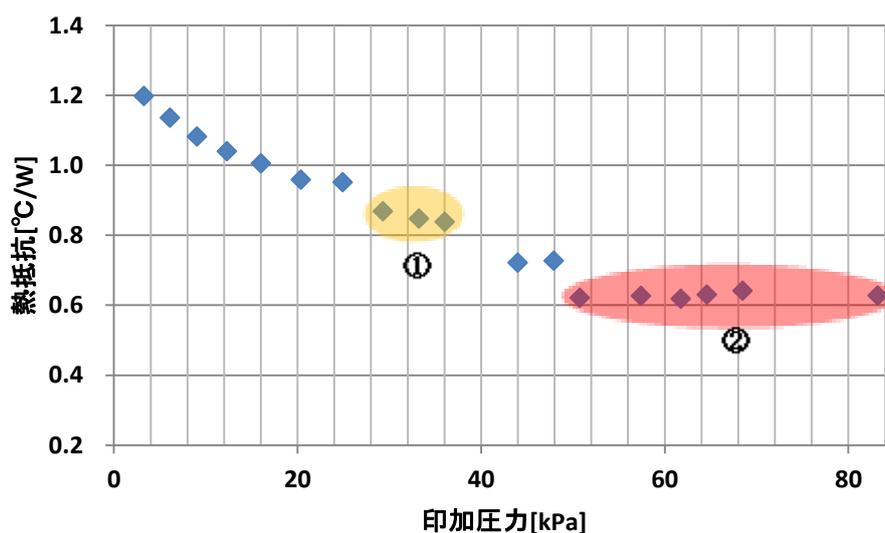


図 4.14 高圧力印加時における熱抵抗 (3M5519S)

また、厳密に印加圧力による Type2-TIM の変形を考えると、TIM が凹凸板の凹部や凸部の細かい表面に追従すること以外にも、凹凸板と放熱器の周囲に排除されることも考慮しなければならない。しかし、凹凸板のような粗い表面粗さを持った測定治具を使用して印加圧力が小さい場合は周囲に排除される影響は表面が平面に近い治具に比べて少ないことが考えられる。その理由として平面に近い表面粗さを持った素子と放熱器の間に Type2-TIM を挟んで高圧力を加えた場合、TIM の厚さはゼロに近づく。本論文では言及しなかったが、Type2-TIM のカタログ値に圧縮率というパラメータがある。圧縮率は圧縮する前の TIM の厚さと圧縮後の TIM の厚さの関係を示す。Type2-TIM の推奨圧縮率はおおむね 10%とされているが、この要素からも上記の検討が可能である。

#### 4.7 Type2-TIM の熱伝導率と厚さから熱抵抗を算出

3.4 節の図 3.26、図 3.27 から印加圧力と各 TIM の厚さ $t$ の関係がわかる。そこで、カタログ値の熱伝導率 $\lambda$ と面積 $A$ を(4.5)式に代入して解析を行った。解析結果を図 4.15、理論値と実測値の差を図 4.16 に示す。実測値は 2.6 節の図 2.8 に示すデータを引用した。

$$R_{\theta} = \frac{t}{\lambda A} \quad (4.5)$$

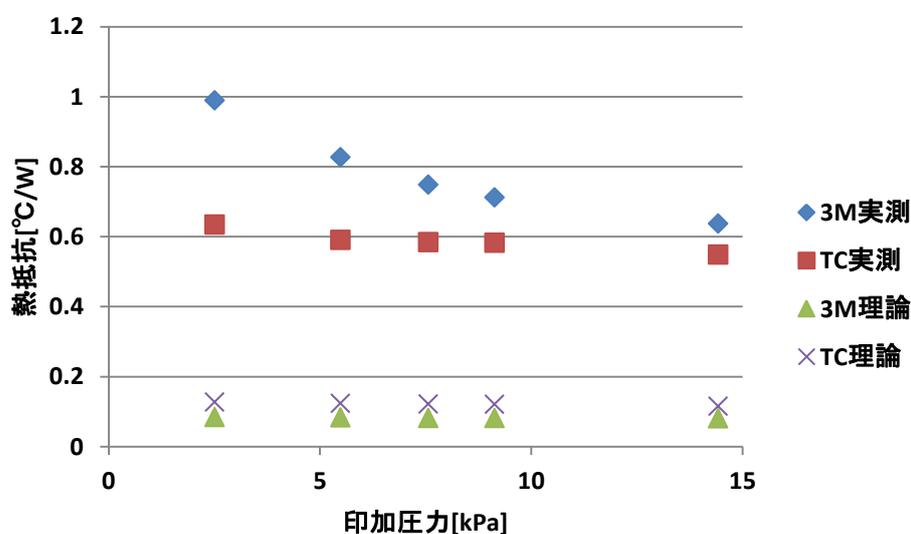


図 4.15 熱伝導率と厚さから熱抵抗を算出

図 4.15 に示す結果から、3M5519S、TC100CAD とともに実測値のほうが熱抵抗が大きくなった。この原因は理論値の表面粗さが凹凸板の表面粗さに対応していないことが考えられる。

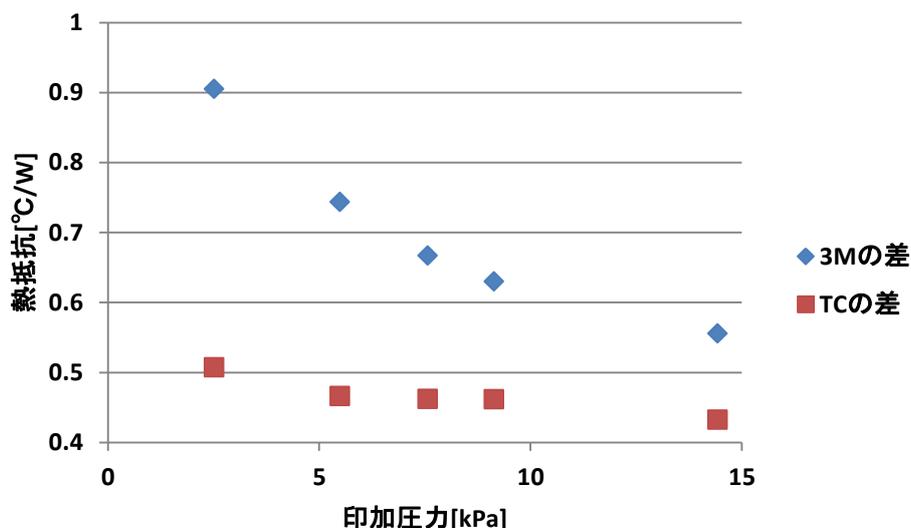


図 4.16 理論値と実測値の差

図 4.16 に示す実験データより、2 種類の TIM に共通して印加圧力を増やすほど熱抵抗の差は減少した。TC100CAD よりも AskerC 硬度が大きい 3M5519S のほうが印加圧力増加に対して熱抵抗の減少が大きい。この熱抵抗が接触状態に関連する熱抵抗で TIM 自身の AskerC 硬度の影響を強く受けていることが読み取れる。

## 4.8 まとめ

電気的手法を用いて Type1-TIM の膜厚を把握することにより、短時間で接触状態を評価することを目的として実験を行った。その結果、*BLT* が減少すると静電容量が増加し、レーザー変位計を用いることによって最小 *BLT* 状態における静電容量の値を確認した。また、等価並列抵抗 *R<sub>p</sub>* を測定することによって *BLT* 変化時のグリース自身の電気絶縁を求めた。電子機器の冷却ではシステム間の意図しない短絡を防ぐために発熱源である素子とヒートシンク間に絶縁が求められることが多い。ヒートシンクはアルマイト処理された物を想定し、今回の実験では電極の片面を 30 μm の硬質アルマイト処理を施すことにより電気絶縁を確保した。また、*BLT* を変化させた際の熱抵抗測定を行い、Type1-TIM でも静電容量と熱抵抗の相関を確認した。これにより、電子機器の初期不良による製造コストの増加を抑え、電子機器の小型化に貢献できる。Type1-TIM は自動車関連の電子部品から発生する熱を逃がしているために使用されている。今後、発熱源である電子部品の部品点数が増えていく傾向があるので、提案手法の有用性がさらに高まると思われる。その他の応用例として、高硬度 Type2-TIM の評価と熱抵抗の理論解析を各章の複数の実験データを用いて考察を行った。その結果、Type2-TIM と凹凸板を利用した際の接触状態に関連する結果を得ることに成功した。圧縮率等も考慮したうえで解析を行うことで接触状態の影響を把握できる可能性がある。

## 参考文献

- [1]Suddith,R.D“A Generalized Model to Predict the Viscosity of Solutions with Suspended Particles. I”, J Appl Polym Sci, Vol.48 No.1, pp.25-36(1993.4)
- [2]Xu,Y.,Luo,X.,and Chung, D., “Sodium Silicate Based Thermal Interface Material for High Thermal Contact Conductance”,ASME J.Electron.Packag,Vol.122 No.2, pp.128-131(2000.6)
- [3] Prasher R S, Koning P, Shipley J, Devpura A “Dependence of Thermal Conductivity and Mechanical Rigidity of Particle-Laden Polymeric”, Trans ASME J Electron Packag, Vol.125 ,No.3,pp.386-391(2003.9)
- [4] Prasher R S, Shipley J, Prstic S, Koning P, Wang J - L, “Thermal Resistance of Particle Laden Polymeric Thermal Interface Materials”, Trans ASME J Heat Transf , Vol.125 ,No.6,pp.1170-1177(2003.12)
- [5] Nishimura Yoshitaka, Nishizawa Tatsuo, Mochizuki Eiji, Goto Tomoaki, Takahashi Yoshikazu, “Development of a New-Generation RoHS IGBT Module Structure for Power Management”, Trans Jpn Inst Electron Packag , Vol.1 No.1,pp.40-47 (2008.12)
- [6] 西村 芳孝,大野田 光金, 百瀬 文彦, “IGBT モジュールのサーマルマネジメント技術”, 富士電機技報 Vol.82 No.6,pp.423-427(2009.11)
- [7] 百瀬 文彦,西村 芳孝 , 望月 英司, “エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体 IGBT モジュールの高信頼性実装技術” ,富士電機技報 Vol.85 No.6,pp.408-412(2012.11)
- [8] “モメンティブ・パフォーマンス・マテリアルズ・ジャパン合同会社 放熱用シリコン製品カタログ” ,pp.1-10(2015.8)
- [9] 谷口 彰敏 監修, “熱伝導性フィラーと高放熱複合材料技術、およびその応用化事例” , 株式会社情報機構,pp.80-86(2013.2)
- [10] Nilles, M.J., and Van Sciver, S.W., “Effect of Oxidation and Roughness on Cu Contact Resistance from 4 K to 290K”, Advances in Cryogenic engineering,Vol. 34,pp.443-450 (1988)
- [11] “水谷電機株式会社 ヒートシンクに関する基礎情報”  
<http://www.mizuden.co.jp/heatsink-info.html>
- [12] 桂井 誠 監修, “ハンディブック 電気” , オーム社,pp.156(2003.12)

## 第5章 結論

表面粗さを正確に制御した凹凸板を用いて、接触状態を定量的に示す評価法を提案して検証を行った。その結果、TIM と放熱器を組み合わせて実装する場合に、重要なパラメータでありながら定量的な評価が難しかった接触状態に関して、再現性のある実験を行うことが可能になった。この評価法を用いることにより、従来は 10mm 以上の厚さで実測した AskerC 硬度のみで接触熱抵抗の影響を予測するしかなかったが、実装時に使用する TIM の厚さで接触状態を評価することができる。これにより、TIM 単体の熱伝導率や硬度だけではなく接触状態の指標を得られるので TIM を開発する際に役に立つことが期待できる。

金属メッシュは線の太さと隙間が正確に細かく管理されているので、素子や放熱器の表面粗さを再現することができることを繰り返し実験で確認した。また、金属メッシュのメッシュ数と各加工法での表面粗さとの対応を示したうえで、熱伝導と電気絶縁を必要とする電子機器と放熱器間で一般的に使用される 0.3mm 厚～1mm 厚の Type2-TIM は素子や放熱器の表面を 60 メッシュ相当よりも細かくしても熱特性が良くなることを明らかにした。表面粗さを細かく研磨するほど、コストがかかるので有効な指標を示すことができた。また、設計段階で取り込みにくい接触熱抵抗によって大きなマージンをとって製造コストや製品の大型化を減らすことも期待できる。

Type2-TIM の接触状態を熱的に測定すると時間がかかってしまうので、静電容量測定によって高速に接触状態を評価する新たな手法を提案して検証を行った。その結果、横軸を熱抵抗、縦軸を静電容量で表示したところ相関を得られた。さらに印加圧力による静電容量の変化が TIM の厚さや測定自身の誤差による影響のみではなく接触状態による影響が含まれていることが明らかになった。静電容量を測定して熱抵抗を求める手法は、短時間で実装状態の製品の放熱特性を把握することができる。この手法により電子機器の出荷時に放熱不良が検出できる可能性があり、電子機器の初期不良や性能劣化を抑えることが期待できる。また、Type2-TIM を使用した際の接触状態の評価手法について述べたが、Type1-TIM の評価についても静電容量測定の検証を行った結果、Type1-TIM を使用した場合でも静電容量を実測すれば熱抵抗を間接的に把握できる見通しを得た。Type1-TIM は自動車関連の電子機器から発生する熱を逃がしているために使用されているので、有用性が高いと思われる。また、各章の複数の実験データを用いて考察を行った結果、Type2-TIM と凹凸板を利用した際の接触状態に関連する結果を得ることに成功した。

以上のことから TIM と放熱器を組み合わせて実装する場合に、重要なパラメータでありながら定量的な評価が難しかった接触状態に関して、合理的な評価方法を新たに提案してその有効性を確認した。今回提案した手法を応用することにより、素子と放熱器間の接触状態を正確に盛り込んだ現実的なシミュレーションや設計を行えるようになり実用的に有用になると思われる。よって、本研究で提案した TIM の評価法は熱設計や量産検査などの現場で実装時における TIM の特性を把握できる有用な技術であることを明らかにした。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた神奈川工科大学工学部電気電子情報工学科 小室貴紀 教授に心より感謝いたします。群馬大学工学部電気電子工学科 小林春夫 教授からは同年代の学生との交流機会を増やすために学会の紹介や自分の研究を聞いていただく機会を頂き、心より感謝いたします。材料の提供をしてくださった電気化学工業株式会社 米村直己氏に心より感謝いたします。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 代表取締役 橘 純一氏に心より感謝いたします。

さらに本研究室 1 期生の須田耕太さんの構築した温度調整システムを軸に改良して TIM 材の評価システムを構築しました。さらに、工作工場の技官の方、KAIT 工房の技官の方には温度調整システムの備品や本研究の要である凹凸板製作の支援をいただきました。

最後になりましたが、電気電子工学専攻の先生方、小室研究室のみなさんに大変お世話になりました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

## 本研究に関する論文

### 論文

[1] 斎藤 靖弘,小室 貴紀, “伝熱材料の密着度を定量的に評価するための新しい手法”, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.16 No.7,pp.521-527(2013.11)

### 国際会議(査読付)

[1] Yasuhiro Saito, Satoru Suzuki, Takanori Komuro, “The detection of minimum BLT condition with electrical capacitance measurement”, ASME InterPACKICNMM2015-48303, pp.1-5 (2015.7)

[2] Yasuhiro Saito, Satoru Suzuki, and Takanori Komuro, “Evaluation of Thermal Interface Material with Electric Capacitance Measurement”, IEEE CPMT Symposium Japan pp.11-14(2014.11)

[3] Yasuhiro Saito, Hiroyuki Emoto, Yuuki Tuji, Takanori Komuro, “New Method for Evaluating Heat Transfer Material”, ASME InterPACK2013, IPACK2013-73051, pp.1-7 (2013.7)

[4] Yasuhiro Saito, Yuuki Tuji, Hiroyuki Emoto, Takanori Komuro, “New Method for Evaluating Heat Transfer Material”, ICEP2013 Proceeding, WD1-1, pp.74-79(April 2013)

### その他(講演会、研究会、口頭発表)

#### ■国内学会発表

[1] 斎藤 靖弘,鈴木 悟, 小室貴紀, “放熱グリースの最小 BLT 状態を静電容量で評価する方法”, 第 5 回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所合同研究発表会,pp.143-144(2015.3)

[2] 斎藤 靖弘, 鈴木 悟, 小室貴紀, “TIM の接触熱抵抗に関する研究”, エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム 2015,pp.323-326(2015.2)

[3] 鈴木 悟, 斎藤 靖弘, 小室 貴紀, “金属メッシュを用いた伝熱材料の評価”, 第 24 回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集,pp.69-72(2014.9)

[4] 斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀, “Thermal Interface Material の静電容量測定に関する検討”, 第 24 回 マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集,pp.53-56(2014.9)

[5] 斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀, “静電容量測定による TIM の評価について”, 第 27 回 回路とシステムワークショップ論文集,pp.144-149(2014.8)

[6] 鈴木 悟,斎藤 靖弘,小室 貴紀, “水冷温度調整システムを用いた伝熱材料の評価”, 第 4 回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所合同研究発表会, 第 4 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会資料,pp.41-42(2014.3)

- [7] 斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室貴紀,“TIM の硬度測定に関する検討”,第 4 回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所合同研究発表会,第 4 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会資料,pp.37-38(2014.3)
- [8] 斎藤 靖弘,辻 裕樹,江元 博幸,小室 貴紀,“伝熱材料を評価するためのシステムの研究”,第 60 回応用物理学会春季講演大会講演予稿集,28p-B7-6,(2013.3)
- [9] 斎藤 靖弘,江元 博幸,辻 裕樹,小室 貴紀,“伝熱材料を評価するための新しい手法”,第 27 回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会資料,pp.46-48,(2013.3)
- [10] 斎藤 靖弘,江元 博幸,辻 裕樹,小室 貴紀,“伝熱材料の密着度を定量的に評価するための検討”,“第 3 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会資料”,pp.28-29(2013.2)
- [11] 斎藤 靖弘,小室 貴紀,“伝熱材料を評価するシステムの検討”,第 25 回 回路とシステムワークショップ論文集,pp.331-336(2012.7)

#### ■展示会講演

- [1] 斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室貴紀,“放熱グリースの最小 BLT 状態を静電容量で評価する方法”,JPCA Show 2015 アカデミックプラザ講演論文集,AP-16,pp.1-5(2015.6)
- [2] 斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀,“TIM を評価するための新しい手法”,JPCA Show 2014 アカデミックプラザ講演論文集,AP-14,pp.1-5(2014.6)
- [3] 斎藤 靖弘,“伝熱材料の密着度を定量的に評価するための検討”,JPCA Show 2013 アカデミックプラザ講演論文集,AP-30,pp.1-6(2013.6)

#### ■記事掲載

- [1] Yasuhiro Saito, Takanori Komuro, “전열재료를 평가하기 위한 새로운 방법”,表面実装技術 3 月号(韓国紙: 尖端社),pp.28-35(2014.3)

#### ■受賞

- [1]斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀,優秀論文発表賞,第 5 回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所合同研究発表会(2015.3)
- [2]斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀,アカデミックプラザ賞,JPCA Show 2014(2014.6)
- [3]斎藤 靖弘,鈴木 悟,小室 貴紀,優秀論文発表賞,第 4 回電気学会東京支部栃木支所・群馬支所合同研究発表会(2014.3)