

# 新たなデバイス熱特性の 評価手法としての熱過渡解析法

Thermal transient characterization methodology for new evaluation  
approach of thermal characteristics

○清水 互、中村 隆治、久保田 英久、村原 大介、小田 民子、矢部 一博  
○Wataru Shimizu, Takaharu Nakamura, Daisuke Murahara, Hidehisa Kubota, Tamiko Oda, Kazuhiro Yabe

沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部 構造解析グループ  
Structural Analysis Group, Reliability Technology Department,  
Oki Engineering Co., Ltd.

## 【要旨】

半導体素子や実装基板等の熱抵抗測定を行う場合、これまでは主に熱電対と PN 接合部の温度パラメータを併用する評価が用いられてきた。最近では、これらの従来手法に比べ、測定精度がより優れた熱特性の評価手法として、熱過渡解析装置による評価が注目されている。ここでは熱過渡解析装置を用いた評価事例としてパワーLED (LED 電球) の熱過渡特性解析結果とその結果に関する考察、ならびに新たな試みとして減圧条件下での熱過渡特性解析を行った結果、得られた知見について報告する。

## 1. はじめに

近年は、電子機器の中でも、車載品をはじめとした消費電力の大きいパワーデバイスや、高性能化が目覚ましい CPU、発展著しい高輝度 LED 等、発熱量の大きいデバイスが増加してきている。これらの素子単体もしくは素子の実装に関して、様々な制限から放熱対策が充分にとられていない場合が多く見受けられる。一般に広く知られていることであるが、半導体素子では接合温度 ( $T_j$ ) の増加に伴い、短寿命化・故障率の増加 (信頼性の低下) が顕著な問題となって現れてくる。そのため、素子や電子機器システムの設計に際しては、信頼性確保の観点からも熱の問題は避けて通れない重要な課題となっている。

この様な状況下において、従来の熱電対

と PN 接合部の温度パラメータを併用する評価手法<sup>[1]</sup>では、熱電対の埋め込み再現性等に起因する測定精度の問題が無視できない状況となってきている。さらに配置した温度センサ (熱電対や PN 接合部) 部の飽和温度から熱抵抗を算出しているため、温度センサを配置できない箇所の熱抵抗を評価することが不可能であった。

これに対して熱過渡解析装置は、熱の変化を過渡的に測定・解析することで、半導体素子の内部構造や実装部材の各種構成材毎の熱抵抗をそれぞれ分離可能な構造関数 (熱抵抗-熱容量特性) を高精度に取得可能とする特長を持っている<sup>[2]</sup>。

本稿では未だ普及が途上である熱過渡解析装置を用いた評価事例として、LED 電球の熱過渡特性解析結果とその結果に関

する考察を、この構造関数をはじめとする結果を用いながら解説する。

また、熱過渡特性解析の特徴を引き立たせる新たな試みとして、減圧条件下での熱過渡特性解析を行なった。これにより、従来はパッケージ各表面から大気中へ放出されている熱の流れを遮断することで新たに増えてくる挙動に関して、得られた知見を報告する。

## 2. LED 電球の評価事例

ここ最近、家庭への普及が急速に伸びてきている LED 電球について、メーカーからは低消費電力と長寿命がメリットとして掲げられていることが多い。LED はその発光原理から長寿命であるが、この寿命は LED 素子の温度と密接に関係している。そのため、素子温度が上昇するにしたがい寿命が急速に低下する（信頼性が低下する）。ここでは市販されている複数品種の LED 電球の熱特性を評価した結果について解説し、これを元に熱設計や熱的な作り込み品質について考察を行う。

最初に熱過渡特性解析装置と、付随する設備を図 1 に示す。



図 1 熱過渡特性解析システム概図

設備は、熱過渡特性装置とコントロール PC、外部電源、ならびに評価被検体を外部環境（温度変化や気流など）から遮断するためのチャンバー、恒温槽などから構成されている。基本的にこれらの設備を用い

て評価を実施しているが、3 節で述べる減圧条件下での評価に際しては、別途真空チャンバーを使用している。

これらの設備を用いて、4 社の LED 電球について熱過渡特性解析を行った結果の構造関数を、図 2 に示す。グラフは X 軸が熱抵抗、Y 軸が熱容量を示しており、グラフ右端の急激に熱容量が大きくなる場所が大気、左端が発熱源 (LED チップ) と対応している。すなわち熱流に沿った熱的構造をグラフとして示している図である。途中の傾きが変わるところが材質差等で現れる熱的な構造の変化点を示す。

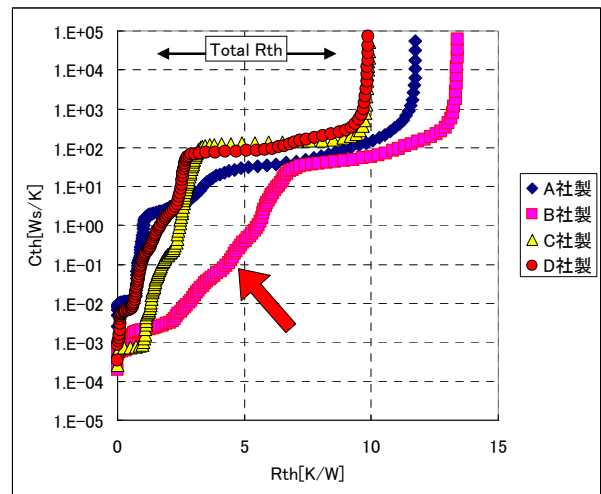


図 2 LED 電球の構造関数

また、構造の変化点を顕著に見えるようにするため、図 2 のグラフを微分化したものを図 3 に示す。

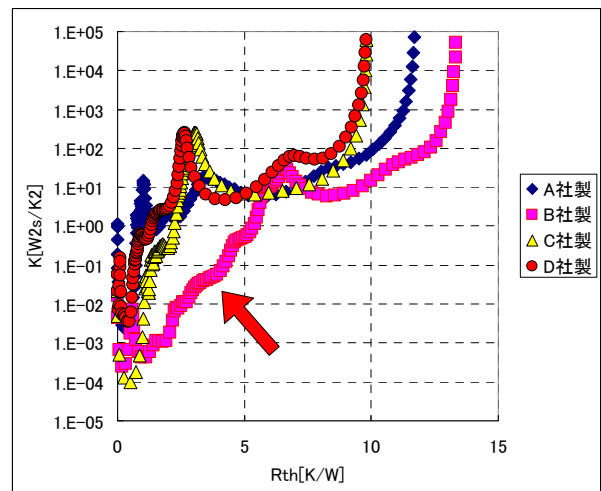


図 3 LED 電球の構造関数 (微分)

図2から、C、D社製のLED電球が10[K/W]程度の総熱抵抗 (Total Rth) を、またA、B社製がそれぞれ12[K/W]と13[K/W]程度を示していることが読み取れる。A社は放熱フィンレス構造、B社は軽量型放熱フィンを採用しており、その結果としてC、D社と比べて比較的高い熱抵抗を示しているものと考えられる。軽量型放熱フィンを採用しているB社製品に関してはフィン領域箇所 (図2の赤矢印部) の熱抵抗-熱容量の傾きが比較的小さいことから、放熱フィンとLED側との接続部に熱抵抗が高くなる要因が包含されていると考えられる。また図3の微分グラフで同箇所 (赤矢印部) を確認すると微小な変化点が複数見られる。本製品はLED素子の実装部からフィンまでに複数の接合箇所を有する構造である事から、該領域の高熱抵抗要因はそれぞれの接合箇所のサイズに起因しているものと推定される。この結果より、これら接続箇所の接続状態を見直すことで、より以上の放熱性改良が可能であると考えられる。これに対し、B社製品以外の構造関数には、高熱抵抗領域と低熱抵抗領域の変曲点が比較的是っきりと確認可能である。これらはその位置から、LED素子-実装基板間、基板-ヒートスプレッダー間、ヒートスプレッダー-フィン間等、熱抵抗と熱容量の関係が大きく変化する領域を指し示している事が解る。図4にLED電球の断面構造模式図を、図5に構造関数上の構造毎の領域 (D社製の例) を、それぞれ示す。

ここで、B社製品は他社製品に比べて駆動電力が比較的低電力なLED素子を採用していることから、駆動条件下の熱的に飽和した状態における接合温度の上昇 ( $\Delta T_j$ ) は50°C程度であり、他社製品と比べて遜色のない結果となっていた (図6)。

以上、得られた総熱抵抗と  $\Delta T_j$  を、表1にまとめて示す。

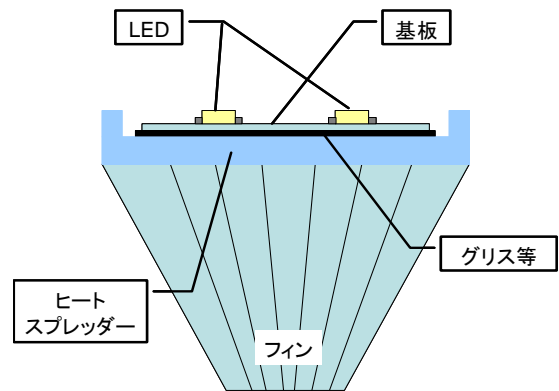


図4 LED電球の断面模式図例

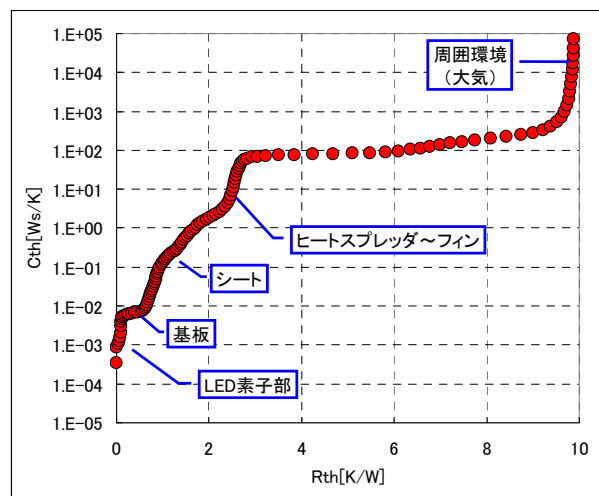


図5 構造関数上の領域

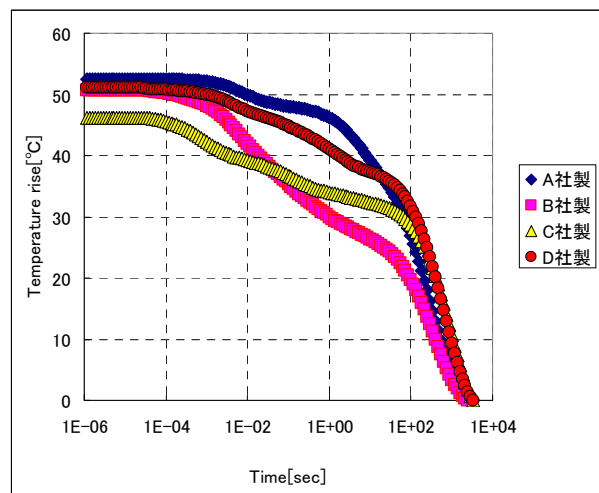


図6 LED電球の温度変化

表1 LED電球評価データ

	A社製	B社製	C社製	D社製
Total Rth [K/W]	11.75	13.39	9.92	9.88
$\Delta T_{jmax}$ [°C]	52.41	50.68	46.10	51.08

これらの結果から、各社とも  $\Delta T_j \approx 50^\circ\text{C}$  前後とほぼ共通した値が得られていることがわかる。これは室温  $\approx 30^\circ\text{C}$  環境下で接合温度  $\approx 80^\circ\text{C}$  程度となる設計であり、一般民生用としては信頼性的に問題とならない適切な熱設計であると考えられる。この中でも C 社製は他社に比べて数  $^\circ\text{C}$  のアドバンテージがあることから、より高輝度（高発熱）な LED を採用する際においても熱的な設計変更によらず信頼性低下の懸念を少なく済ませられると考えられる。

### 3. 減圧条件下での熱過渡特性解析

本熱過渡解析装置を用いた評価では、総熱抵抗の取得以外にも、構造関数から得られる情報を元にチップからパッケージ最表面、あるいは素子を実装している基板やヒートシンクまでの間での熱抵抗の高い領域や、製造バラツキの大きい領域を特定する用途があげられる。例えば半導体素子中のダイボンド材の不均一性（ボイドの介在等）と熱抵抗の関係評価や、チップ接合材の開発・評価用途への適用などが考えられる。このような評価を特に精密に行う場合、実際に評価したい領域（例えばダイボンド材）の熱特性に重畳されて、熱的に並列に接続されている他領域（例えばパッケージ表面からの熱放出）の熱特性が重なって見えてきてしまうため、ターゲットとする構造部の熱的構造が不明瞭となることが判明した（図7）。

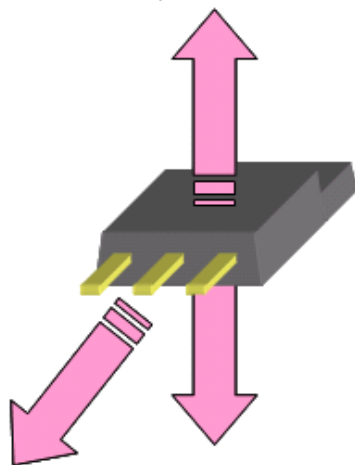


図7 熱経路例

このような問題を回避するためには評価を行いたい熱流路に対し、できるだけ熱を流し易くするために熱容量の大きいヒートシンクを設ける等で、比較的特定方向の熱評価が可能となるが（図8）、この方法を用いた場合においても他経路からの熱放出を完全に除外することはできず、また用いるヒートシンクの熱容量が大きいほど、熱過渡特性を測定するにあたり必要とされる温度の S/N 比が十分に得られない（素子温度の上昇が充分でない）という問題が生じる。

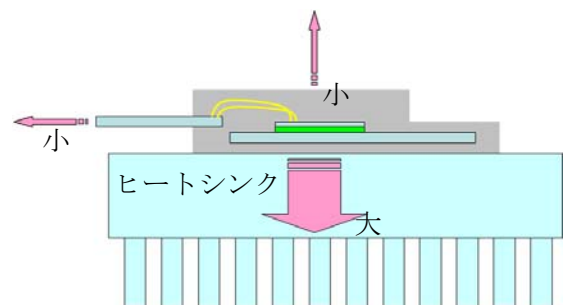


図8 ヒートシンクを用いた場合の熱経路例

そこで熱容量の大きいヒートシンクを用いる手法の発展案として、他の熱経路を完全に遮断し、特定の熱流路のみの熱特性評価を行うために、減圧条件下での熱過渡特性解析を行った。

#### 3.1 解析方法

解析に用いた素子は TO-220 タイプパッケージのパワー MOSFET で、これを熱伝導性グリスを介してヒートシンクに接続し、ボルトにより固定することで熱結合性を確保した。このサンプルを真空チャンバー中に設置し、減圧条件（真空度）と熱抵抗の関係、ならびに構造関数の傾向変化を見るために、常圧 ( $10^3$ )、 $10^{-1}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-5}$  [Torr] 近辺での評価を行った。

### 3.2 評価結果

図9に得られた構造関数を、また図10に構造関数の微分化グラフを示す。

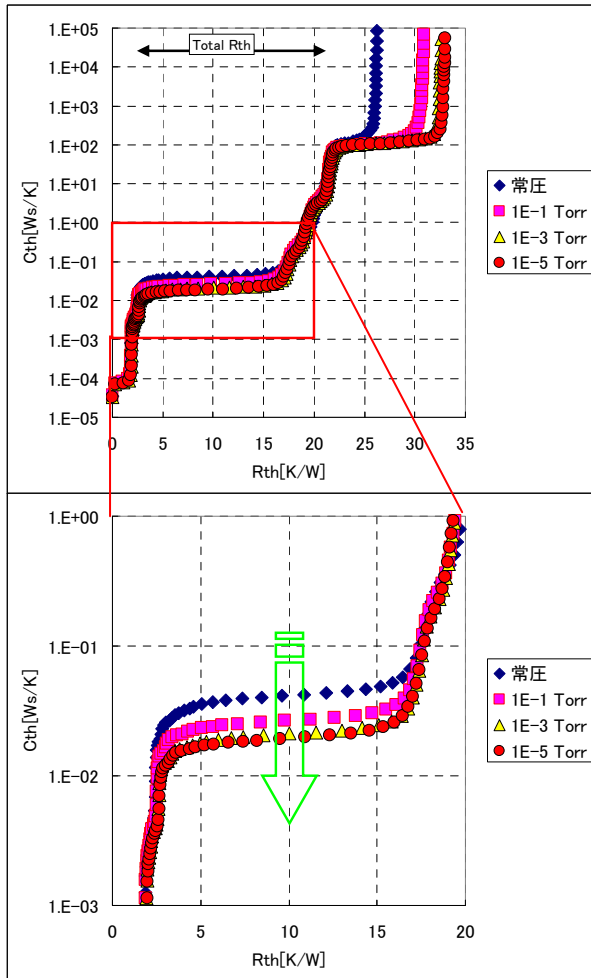


図9 構造関数の気圧による変化

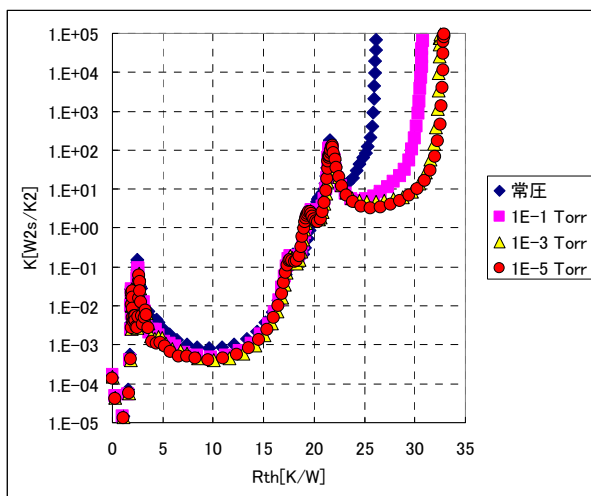


図10 構造関数の気圧による変化 (微分)

熱過渡特性解析の結果、気圧による構造関数の変化は大きく二点に現れていることが確認された。

一点目は総熱抵抗 (Total Rth) であり、気圧の低下に伴い熱抵抗が増加していく傾向が確認される。図11に、図8の結果から得られた気圧に対する総熱抵抗の変化を示す。

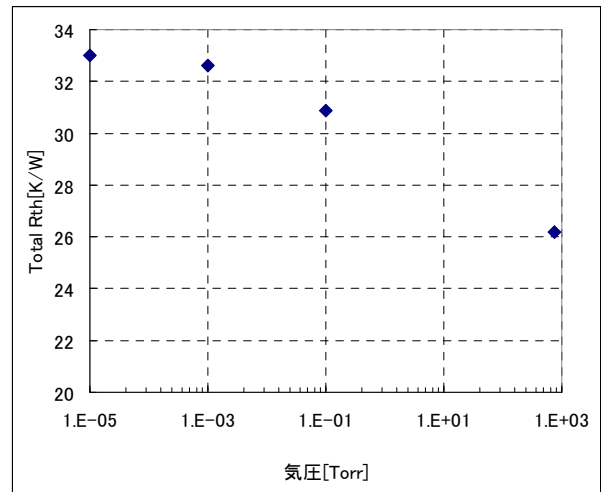


図11 気圧に対する熱抵抗の変化

常圧に対し、減圧することで総熱抵抗の増加が確認される。またその傾向は、おおよそ  $10^{-3}$  [Torr]~ $10^{-5}$  [Torr] 近辺で飽和傾向を示している。常圧での総熱抵抗値 (26.19[K/W]) に対して、熱抵抗変化がおおよそ飽和していると思われる  $10^{-5}$  [Torr] (32.99[K/W]) では、約 26% 程度 (6.80[K/W]) の増加率となる。この総熱抵抗の増加を引き起こしている主な領域は構造関数の最右端であることから、サンプルの最外端における熱抵抗の増加、即ちヒートシンクから周囲環境に至る箇所の熱抵抗に相当する。サンプル周辺の熱伝達物質である大気が希薄になる (減圧される) に従い、ヒートシンクから周囲環境への熱伝達が制限され熱抵抗が増加するという、想定された結果を数値的に得ることができた。

二点目は、構造関数の 3~17[K/W] 近辺での熱容量変化がみてとれる点である (図8下 拡大図)。17[K/W] 以降の Rth-Cth 傾

向はほとんど変化せず、該領域での熱容量のみ減圧により低下が見られる。この領域の変化要因を切り分け評価するために、評価素子であるトランジスタとヒートシンク間に熱抵抗の高い絶縁性シートを挿入し、同様な構造関数の取得を行った。取得した構造関数（上）と微分化（下）グラフを重ねて図12に示す。

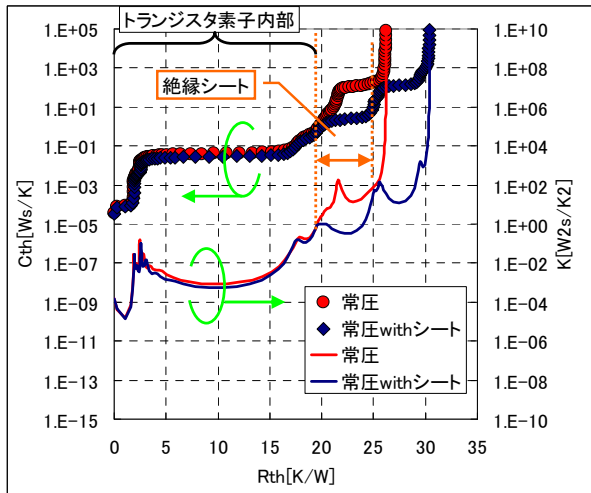


図12 構造関数（切り分け実験）

図12から、挿入した絶縁シートは  $R_{th} \approx 20 \sim 25 [K/W]$  の領域に存在している（矢印の範囲内）ことが確認される。このことから図9下図で熱容量変動の見られる箇所はトランジスタ素子内部の比較的外端部に存在し、熱抵抗が大きく且つ熱容量が小さい箇所であると言える（トランジスタ素子内部の概略図を、図13に示す）。

これらのことから、該領域はトランジスタ素子外周のモールド樹脂領域と推定される。ただし、モールド樹脂自体の熱容量が気圧により増減することは考えられない。減圧条件下では大気対流による放熱が発生しないため、モールド樹脂表面からの放熱は微小な輻射成分を除いて発生し得ない。そのため、常圧の大気中では対流によりモールド樹脂から放熱されていた熱のほとんどは、ヒートシンクへと伝達されることになる。熱の流れがほとんどヒートシンク方向となり、トランジスタ表面側のモールド樹脂部分への熱流入が減ること

でモールド樹脂部分の熱容量へ寄与する率が見かけ上減少し、結果として構造関数に熱容量の減少として現れたものと示唆される。

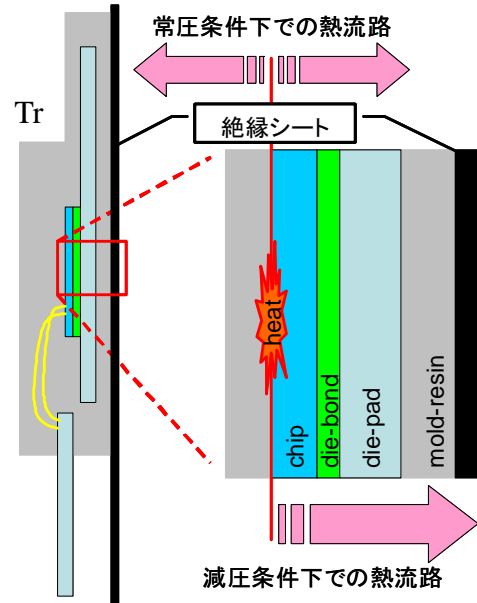


図13 トランジスタ素子内部概略図

続いて接合温度の上昇と気圧の関係を、図14に示す。常圧での温度 ( $56.59 [^{\circ}C]$ ) に対し、 $10^{-5} [Torr]$  条件下では放熱に介在する大気の影響がほとんど無いため、接合温度が  $69.96 [^{\circ}C]$  となり、 $13.37 [^{\circ}C]$  (約24%) の上昇が見られた。

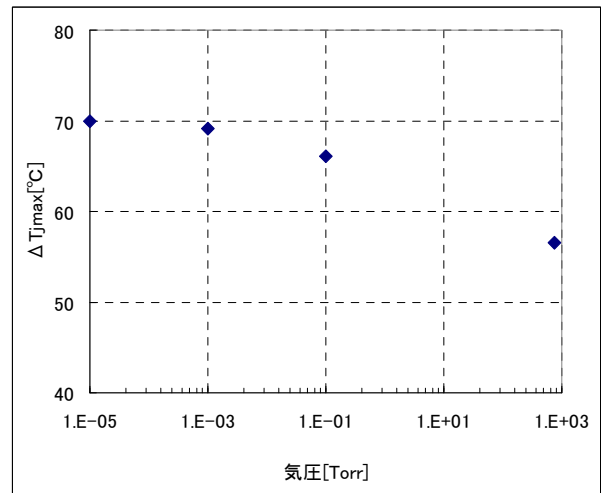


図14 気圧に対する  $\Delta T_{jmax}$  の変化

通常、デバイスの熱抵抗（カタログ値）は大気中での値でありパッケージ表面部からの熱放出を含む値となる。まれな例と

なるが宇宙用途を考えた場合、ヒートシンク面からの放熱が主体となりパッケージ表面部からの熱放出が期待できなくなるため、想定外のデバイス接合温度上昇に注意が必要となる。また、熱設計に対してもより多くのマージンを確保する等の対策も必要になる。

表2に、減圧条件下での熱過渡特性解析で得られた結果をまとめて示す。

表2 減圧評価データ

	常圧	1E-1 Torr	1E-3 Torr	1E-5 Torr
Total Rth [K/W]	26.19	30.86	32.61	32.99
$\Delta T_{jmax}$ [°C]	56.59	66.14	69.15	69.96

減圧により大気への熱放出成分を分離評価可能であることから、熱シミュレーションを行う際に必要な温度パラメータの中でも、従来は評価が困難であった様々な項目取得が可能である。例えば BGA パッケージの半導体素子の詳細な熱特性についても取得が可能となる。BGA パッケージの半導体素子では、表面側にヒートシンクを接続していない場合は、その放熱成分の多くがパッケージ裏面（ボール）側へ伝達するが、従来はこれらの熱抵抗（ $\theta_{jb}$ ）を分離取得することが困難であった（熱電対を使用する方法では BGA 面への熱電対配置が困難であり、また熱過渡特性解析では同時に表面での放熱が起きるため裏面側のみの熱抵抗成分の分離が困難）。これに対して、通常の基板に実装された BGA 素子を減圧条件下で熱過渡特性解析することで、基板方向以外（パッケージ上面及び側面）の放熱を遮断することが可能なため、容易に  $\theta_{jb}$  の取得が精度良く行える。

その他にも現在、様々な応用評価を検討しており、今後も、継続して検討・実験を行う予定である。

#### 4. まとめ

熱過渡特性解析法を用いた評価結果を示し、従来の熱電対と PN 接合部の温度パラメータを使用する方法では得られない構造関数のメリットならびにその構造関数から得られる情報について述べた。熱過渡特性解析で得られた構造関数は例えば半導体素子のパッケージ製品から、LED 電球等に示されるモジュール形態まで、熱経路の各要素について熱抵抗と熱容量の傾向からその構成要素を分離可能である。これらの特長を活かし、各種半導体素子開発や実装部材の開発、あるいは部材選定等、幅広く応用が可能な装置であることを示した。

また、今回は熱過渡特性解析を用いてパワー MOSFET を減圧条件下で評価し、大気が熱抵抗に与える影響を定量的に分離可能であることを確認できた。この方法を応用することにより、従来困難であった特殊パッケージの詳細な熱抵抗測定熱が可能となる。また、熱シミュレーションを実施する際に必要となる各種パラメータをより正確に分離・評価することも可能と考えられる。

また、ここで述べた以外にも熱過渡特性解析を多くのデバイスに応用可能で、今後も新たな試みを試行し、各種評価手法の立案・開発を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 国峰 尚樹：『エレクトロニクスのための熱設計完全入門』、日刊工業新聞社
- [2] Oliver Steffens et al. : 『Thermal Transient Characterization Methodology for Single-Chip and Stacked Structures』、21st IEEE SEMI-THERM Symposium