

# オープン CAE を用いた電気-熱連成解析による パワー半導体の温度シミュレーション

八坂 慎一（電子技術部電子デバイスグループ）

## 1. はじめに

パワー半導体を実装したパワーモジュールの信頼性を考えるとき、有限要素法（FEM）などを用いた数値解析により動作時の様々なストレスを検証することが一般的に行われている。パワー半導体の実装分野でコンピュータ支援エンジニアリング（CAE）を用いて電気の解析を行う場合、半導体のチップ部分の電気特性を再現するために一次もしくは二次の温度特性を持った抵抗率を設定することが多いが（文献1など）、このような単純な抵抗体のモデルでは熱過渡解析で行うような半導体の温度特性を利用したジャンクション温度の計測を、シミュレーションで正確に再現することができない。

オープン CAE はオープンソース CAE ともいい、ソースコードを公開し自由な利用や頒布を促進することを目的とした CAE 用ソフトウェアのことである。ソースコードが公開されているためソースコードのレベルで計算過程や計算結果を検証できること、プログラムの改変も可能であることから解析の自由度が高いこと、低コストで導入できること、などのメリットがある。一方、ソースコードの解析・改変にはプログラミングの知識を必要とすること、商用ソフトウェアと比較するとサポートが弱いこと、オープンソースソフトウェア独特のライセンス条項があり、無条件に利用できるわけではないこと、などのデメリットもある。実装分野では計算結果に対する信頼性を要求される場面が多く、オープン CAE の利用が他の分野より低いのが現状である。

パワーサイクル試験は主にパワー半導体を対象としてデバイスに断続的な通電を繰り返し、半導体のチップに周期的な発熱と冷却を引き起こすことによってデバイスや実装構造の信頼性を確認する試験方法である。半導体のチップ温度つまりデバイスのジャンクション温度が何℃まで上昇したか、あるいは何℃まで冷却されたか、を計測することが重要であるが、パワーサイクル試験時に計測しているジャンクション温度が妥当な値であるかどうかについては CAE を利用したシミュレーションの結果を活用することが有効である。

以前の報告では、SiC ショットキーバリアダイオードを銀ナノ粒子接合材料で銅板に接合したサンプルを用いて、パワーサイクル試験による接合材料の耐久性の評価を行った結果について示した（文献2）。パワーサイクル試験などの評価結果の妥当性を検証するためには、試験中のサンプル内の温度分布や接合材料の応力・ひずみなど

の変化を詳細に分析する必要があるが、これらの物理量を直接計測することは困難であるためシミュレーションによる解析が必須となる。また、パワーサイクル試験では接合材料のダメージ評価において熱過渡解析による構造関数を指標とすることもあるため、シミュレーションを行う場合は熱過渡解析も考慮した電気-熱連成解析を行う必要がある。この部分については過去に、抵抗体の導電率に温度と電流密度の関数を設定したダイオードのモデルを提案し、回路シミュレータを用いた電気-熱連成解析に適用可能であることを示した（文献3）。さらにこのモデルの考え方を三次元に展開して、オープン CAE を用いた電気-熱連成解析によって熱過渡解析のシミュレーションを行い実測値とシミュレーションの結果が一致することを報告した（文献4）。これらの結果から、提案したモデルはパワーデバイスの電気-熱連成解析による熱抵抗測定結果の解析に有効であると判断できるので、次にパワーサイクル試験への適用が考えられる。本研究ではパワーサイクル試験におけるデバイスの温度変化についてオープン CAE によるシミュレーションを行い、実測値との比較を行ったのでその結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 シミュレーションモデル

本研究で用いたモデルは文献4と同様に炭化ケイ素（SiC）のショットキーバリアダイオード（SiCSBD Wolfspeed 社 CPW5-1200-Z50B）を使用し、半導体の電気特性として、導電率に温度と電流密度の関数を組み込んだモデルとした。この SiCSBD の断面模式図を図1に示す。最上部がアルミニウムの電極となり、その下にジャンクション部、ドリフト層、SiC ウェハの順になっている。ジャンクション部については本来ショットキー接合部であり、厚さを持たない構造であるが、ジュール熱を発生させるため体積要素とする必要があり、1 μmの厚さを持つ構造とした。表1にモデルの各構造に設定する物性値を示す。ジャンクションの導電率  $\sigma_1$  は素子の温度特性に相当するため、次式のように設定する。

$$\sigma_1(j_z, T_1) = \frac{j_z \cdot d_1}{V_0 + V_a \times (T_1 - 273.15)} \quad \dots (1)$$

ここで、 $j_z$  は電流密度の厚さ方向（Z軸方向）の成分でダイオードの順方向を正としている。 $T_1$  はジャンクションの各要素の温度[K]、 $d_1$  はジャンクションの厚さ（1 μ

m) である。V<sub>0</sub> と V<sub>a</sub> はデバイスの温度特性に相当する。このように導電率を設定することによって、ジャンクションを流れる電流によらずジャンクションの両側に温度 T<sub>1</sub> に応じた電位差が発生する。

次に、ドリフト層の導電率 σ<sub>2</sub> はダイオードの直列抵抗成分に相当するため、次式のように設定する。

$$\sigma_2(T_2) = \frac{d_2}{S_2 \cdot R_s \cdot \{1 + trs1 \cdot (T_2 - T_0) + trs2 \cdot (T_2 - T_0)^2\}} \dots (2)$$

ここで、T<sub>2</sub> はドリフト層の各要素の温度 [K]、d<sub>2</sub> はドリフト層の厚さ (10 μm)、S<sub>2</sub> はドリフト層の面積 (4.9 mm×4.9 mm=24.01 mm<sup>2</sup>) である。R<sub>s</sub>、trs1、trs2、T<sub>0</sub> は直列抵抗成分の SPICE パラメータに相当する。R<sub>s</sub>、trs1、trs2 の値については、通電時のシミュレーションを行って加熱電流に対する温度安定後の順方向電圧 (V<sub>D</sub>) の値が実測値と合うように設定した。本研究で使用した各パラメータの値を表 2 に示す。

電気-熱連成解析を行うソフトウェアはオープンソース CAE ソフトウェアである Elmer (文献 5) を用いた。Elmer はフィンランドの国営企業 (CSC - IT Center for Science Ltd.) で開発されたソフトウェアであり、幅広い物理モデルに対応していること、それらの物理モデルを連成させた連成解析の機能が充実している、といった特徴がある。本研究で提案するデバイスモデルでは抵抗体の導電率に電流密度の関数を設定しているが、Elmer の電流解析のソルバーでは電流密度の値を使用して導電率を計算することを想定していないため、ソースコードを変更して目的の計算が可能となるようコンパイルを行ったソルバーを使用している。

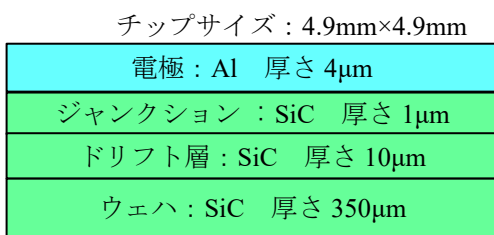


図 1 SiCSBD の断面模式図

表 1 SiCSBD の物性値

構造	熱伝導率 [W/m·K]	比熱 [J/kg·K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	導電率 [S/m]
電極(Al)	238	900	2700	3.4×10 <sup>7</sup>
Junction	380	714	3200	(1) 式
Drift	380	714	3200	(2) 式
Wafer	380	714	3200	5.0×10 <sup>3</sup>

表 2 各パラメータの設定値

パラメータ	設定値
V <sub>0</sub> [V]	0.830409174
V <sub>a</sub> [V/K]	-1.690565×10 <sup>-3</sup>
R <sub>s</sub> [Ω]	0.0065397
trs1 [K <sup>-1</sup> ]	7.68283×10 <sup>-3</sup>
trs2 [K <sup>-2</sup> ]	5.79167×10 <sup>-5</sup>
T <sub>0</sub> [K]	273.15

表 3 実装材料の物性値

構造	熱伝導率 [W/m·K]	比熱 [J/kg·K]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	導電率 [S/m]
ゲルシート	6.5	1550	980	1.0×10 <sup>-9</sup>
基板 85Mo-15Cu	108	280	10010	1.89×10 <sup>7</sup>
Ag sinter	70	350	10500	4.3×10 <sup>7</sup>
リボン Al	238	900	2700	3.4×10 <sup>7</sup>
端子 Cu	400	380	8930	4.0×10 <sup>7</sup>

## 2.2 シミュレーションと実際の比較

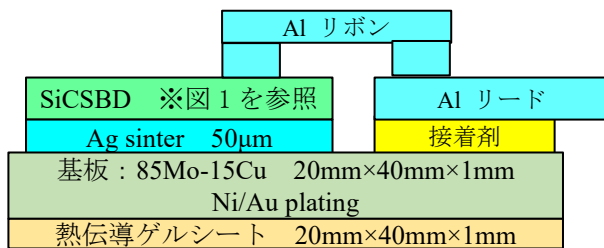
提案するデバイスモデルの妥当性を検証するため、SiCSBD を実装したサンプルを作製し熱過渡解析を行った実測値とシミュレーションの結果から算出した構造関数について比較を行った。試作したサンプルの構造と写真は図 2 のとおりであるが、文献 4 と異なりアルミニウムリボンを用いたワイヤーボンディングを行っている。サンプルの冷却は熱伝導ゲルシートを介してサンプルを水冷ヒートシンクに取り付け、水温 25℃ の冷却水を流して冷却を行った。熱過渡解析の測定条件は、加熱時間 100 秒・冷却時間 100 秒、加熱電流を 25A とした。冷却時には電流を 0 とするのではなく 20 mA の電流を流し、この電流に対する V<sub>f</sub> の値を計測してジャンクション温度に換算した。この冷却時の温度プロファイルから JEDEC (JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION) の規格に準拠した方法 (文献 6) で構造関数を算出した。

FEM による電気-熱連成解析については物性値として表 1 と表 3 の値を用い、電気的境界条件として図 2 (c) のリードの端部 (アノード) に電流を設定し、カソードに 0 V の電位を設定した。温度境界条件としては、電流の流れる構造部にジュール熱による発熱を熱源として設定し、アノード面、カソード面には熱伝達率 3000 W/(m<sup>2</sup>·K)、熱伝導ゲルシートの下面には熱伝達率 4000 W/(m<sup>2</sup>·

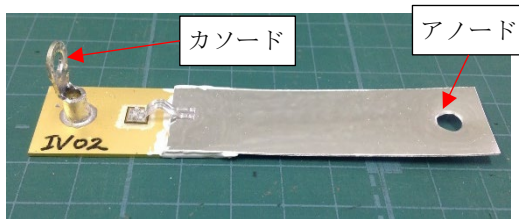
K), 参照温度 298.15 K (25°C) の冷却面を設定した. 熱過渡解析のシミュレーションでは, 実測と同様に加熱電流を 25A として設定し, 加熱時間 100 秒・冷却時間 100 秒とし, 冷却時には電流を 0 とするのではなく 20 mA に設定して, 冷却時のアノード面の電位の平均値を取得した. なお, 得られた温度プロファイルはデータの数が多い構造関数を算出するためには十分ではないため, 補間あるいは外挿を行って構造関数算出用のデータとした.

次に, パワーサイクル試験の試験条件については, ON/OFF 時間を 2sec/18sec とし加熱電流をジャンクション温度の最大値 ( $T_{jmax}$ ) が 175°C, 200°C, あるいは 225°C となるように制御しながら試験を行った. サンプルの冷却は, 熱抵抗測定と同様に熱伝導ゲルシートを介してサンプルを水冷ヒートシンクに取り付け, 文献 2 のパワーサイクル試験の冷却条件とあわせて水温 65°C の冷却水を流して冷却しながら測定を行った. 試験開始後 100 サイクルまで計測を行い 100 サイクル時の電圧プロファイルをシミュレーションとの比較に用いた.

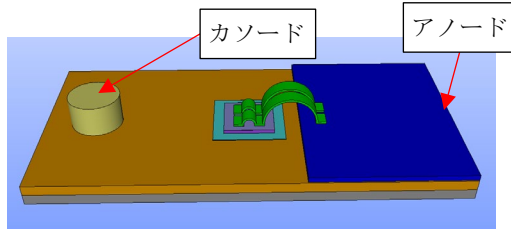
パワーサイクル試験のシミュレーションについては熱過渡解析で使用したモデルをそのまま使用し, 境界条件については熱抵抗測定のシミュレーションと同様に, アノードに電流値を設定しカソードに 0V の電位を設定した. 加熱電流値については  $T_{jmax}$  が 175°C, 200°C,



(a) 断面模式図



(b) サンプル写真



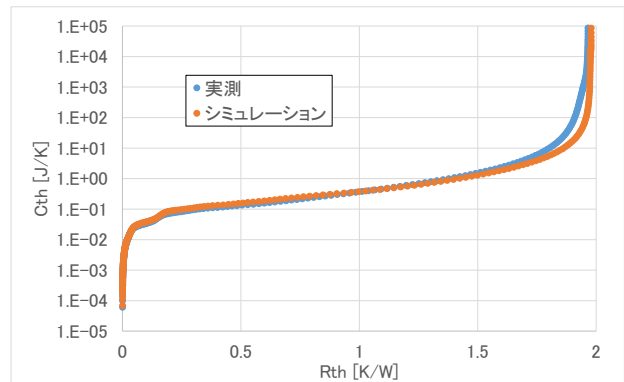
(c) 解析用 3D モデル

図 2 試作サンプルと解析モデル

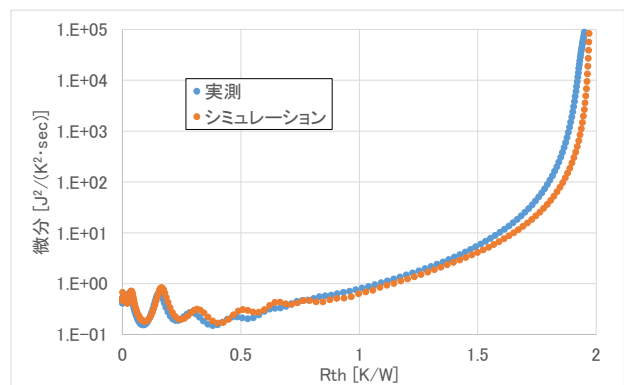
225°C の 3 条件となるように表 4 の値に決めてシミュレーションを行った. この解析モデルでは試作サンプルによる実測と異なり水冷ヒートシンクや冷却水の循環系などは考慮しておらず, 熱伝導ゲルシートの下面に熱伝達率を設定している. そのため温度安定に要する時間が短く 3 サイクルのシミュレーションを行ったところでほとんど温度安定に達していた. そこで解析時には, 3 サイクルのシミュレーションを行い, 3 サイクル目の電圧プロファイルと温度プロファイルを実測との比較に用いた.

### 3. 実験結果

図 3 に試作サンプルで計測した熱過渡解析による構造関数と, シミュレーションの結果から算出した構造関数の比較を示す. (a) は通常の構造関数を, (b) は微分構造関数を示している. 全般的には, 実測とシミュレーションで通常の構造関数も微分構造関数も一致しているといえる. グラフの右側, つまりデバイスから遠い領域では若干のずれが見られるが, これはシミュレーションでサンプル裏面に熱伝達率を設定しそこから先の水冷ヒートシンクや冷却水およびチラーなどの構造を省略しているのに対して, 実測では水冷ヒートシンクや冷却水およびチラーなどが存在するためその影響が測定結果に表れていると考えられる.

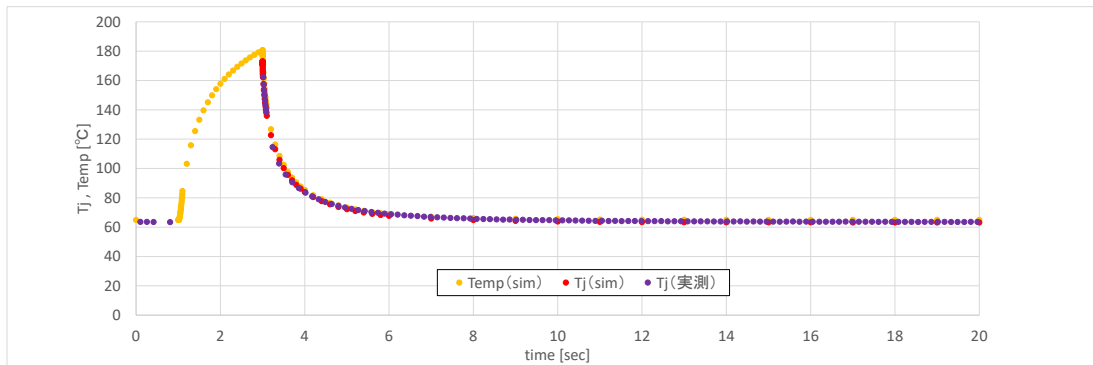


(a) 構造関数

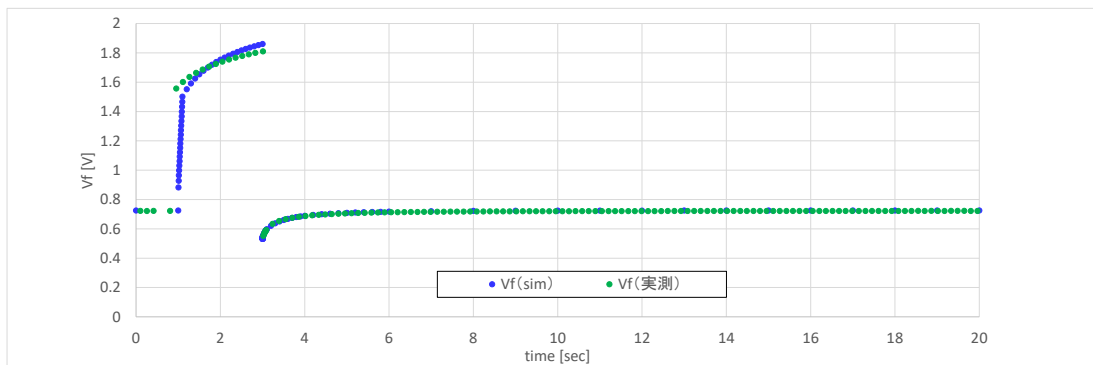


(b) 微分構造関数

図 3 試作サンプルによる実測とシミュレーションによる構造関数の比較

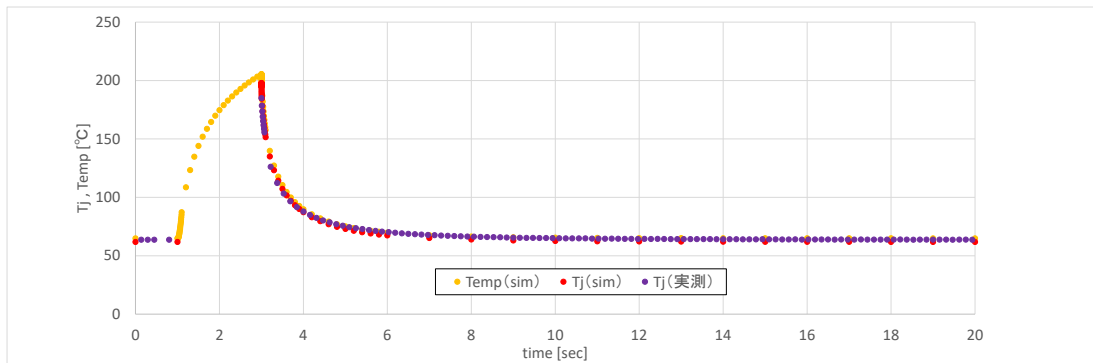


(a) 温度プロファイル

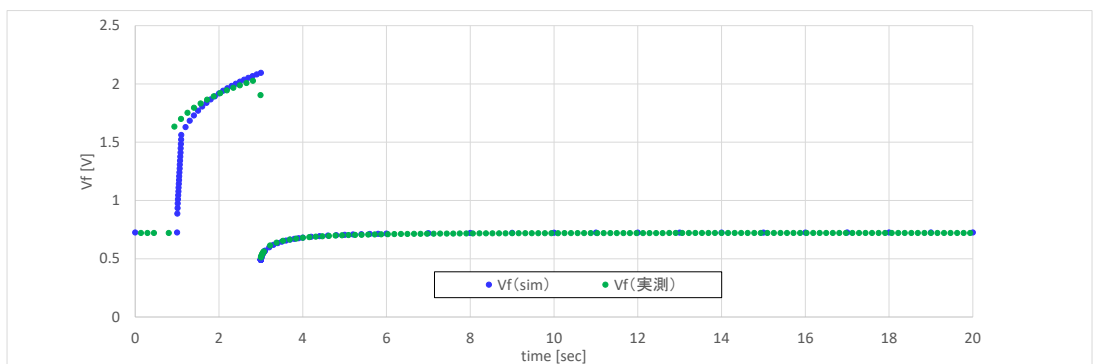


(b) 電圧プロファイル

図4 パワーサイクル試験時の温度プロファイルと電圧プロファイルの比較 (Tjmax 175°C)

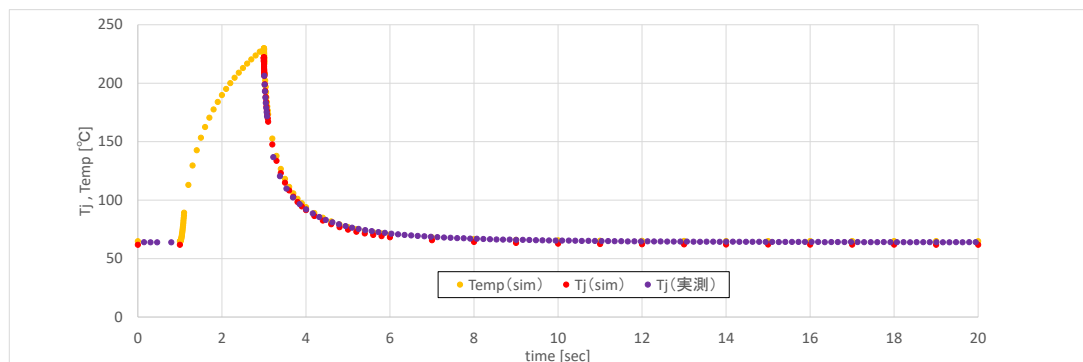


(a) 温度プロファイル

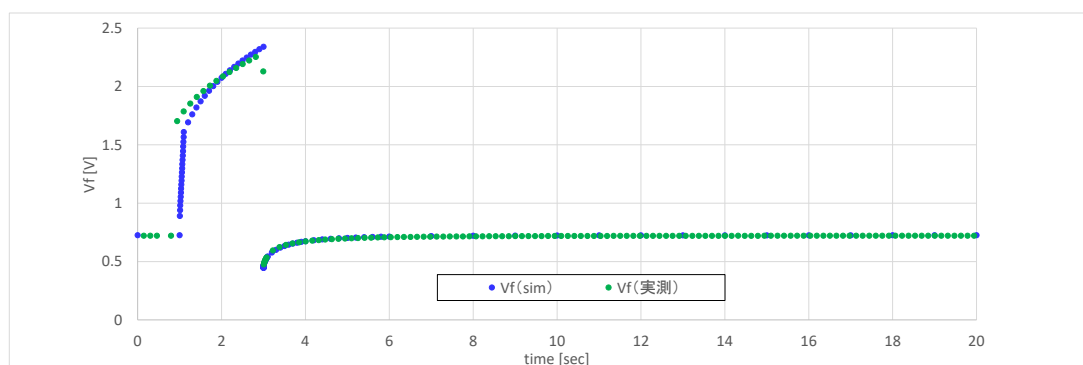


(b) 電圧プロファイル

図5 パワーサイクル試験時の温度プロファイルと電圧プロファイルの比較 (Tjmax 200°C)



(a) 温度プロファイル



(b) 電圧プロファイル

図6 パワーサイクル試験時の温度プロファイルと電圧プロファイルの比較 (Tjmax 225°C)

次に、図4～図6にTjmaxが175°C、200°C、225°Cの3条件を目標としたパワーサイクル試験時の温度プロファイルと電圧プロファイルの比較を示す。図中の温度プロファイルについて、Temp(sim)と表記しているデータはシミュレーションによるデバイスの最高温度を、Tj(sim)についてはシミュレーションによる冷却時の電圧プロファイルからデバイスの温度特性を利用して計算したジャンクション温度を、Tj(実測)については実測した冷却時の電圧プロファイルからデバイスの温度特性を利用して計算したジャンクション温度を示している。3条件ともにデバイスの温度特性を利用して計算したジャンクション温度については実測とシミュレーションによる結果はよく一致しているが、Temp(sim)つまり温度解析の結果から算出したデバイスの最高温度とは一致していない。これはデバイスの温度特性とVfの計測値から計算したTjmaxは、デバイス全体の電氣的に平均化された温度に相当するので、必ずしもデバイスの最高温度とは一致しないことを示している。また、加熱時の電圧プロファイルは一致しておらず加熱電圧についてはシミュレーションでは十分には再現できていない。加熱時の電圧プロファイルを見ると、どの加熱条件においても実測でのVfの立ち上がりはシミュレーションの結果と比較して緩やかになっている。加熱時の電流はほぼ一定値で制御されていると考えてよいので加熱時の電圧はデバイスの温度によって

変化していると推測できる。したがって、加熱時における電圧の実測値とシミュレーションの差は、シミュレーションによるデバイスの温度変化が実際の計測と比較して立ち上がりが速くなっているか、シミュレーションで使ったデバイスの温度特性が実際のもものと異なっている可能性が考えられる。しかしながら、実際の実測では加熱時のジャンクション温度は計測できないため、現状ではこの加熱時の温度変化の差については確認できていない。表2のデバイスの温度特性は実測によるI-V特性の温度変化に基づいているが、この測定はサンプルを恒温槽の中に入れてサンプル全体を一定温度に制御した状態で電気特性を測定している。一方、パワーサイクル試験においては、温度はチップとその周囲において上昇しているためサンプルには温度があまり上昇していない部分が存在する。例えば図2のアルミリードや基板についてはパワーサイクル試験時には温度があまり上昇していないと考えられる。デバイスの温度特性を計測している際にはこのアルミリードや基板についても周囲と同様に加熱されているため、今回のモデルのようにアルミニウムや85Mo-15Cuの抵抗率の温度変化を考慮していないと温度特性にずれが発生する可能性がある。次に、表4に冷却時のVfの計測値から推測した実測のTjmax、シミュレーションによる冷却時のVfの計算値から推測したシミュレーションによるTjmax、シミュレーションの温度解析の結果によるチップの最高温度を示す。Tjmaxについて

てはシミュレーションによる結果と実測値の差は1°C以内であるが、シミュレーションによるチップの最高温度は7°C以上高い値を示している。この結果は冷却時の温度プロファイルから計算した  $T_{jmax}$  はデバイス全体の温度分布を考慮した電気特性に基づく  $V_f$  の値から算出されているため、チップの平均的な温度を示しており、チップの局所的な最高温度とは異なっていると解釈することができる。実測ではチップの温度分布は計測できていないがこれらの結果から実際にチップの温度分布を計測すると  $T_{jmax}$  よりも高くなっている部分が存在する可能性がある。

これらの温度差については、実装材料の耐久性に影響する可能性があるため、パワーモジュールの信頼性を考える上で考慮しておく必要があると思われる。今後はこの温度差や電圧プロファイルの差の原因を調査し、シミュレーションによる解析結果が正しいのか、他の実装材料の温度依存性など別の要因をシミュレーションに反映させる必要があるのか、などを確認する必要がある。

#### 4. まとめと今後の展開

抵抗体に電流密度と温度の関数を組み込んだ導電率を設定することにより、半導体の温度特性を簡易的に再現する FEM モデルを用いて、オープン CAE による電気-熱連成解析を行う手法について検討を行った。SiCSBD を実装した試作サンプルについて、熱過渡解析の実測とシミュレーションによる解析結果との比較を行ったところ、シミュレーションと実測で構造関数が一致し、提案するモデルの妥当性が確認できた。

このモデルを使用してパワーサイクル試験の試験条件にしたがったシミュレーションを行い実測による測定結果と比較を行った。冷却時の温度プロファイルや電圧プロファイルについては、シミュレーションと実測はよく一致したが、加熱時のデバイスの最高温度と冷却時の温度プロファイルから算出したジャンクション温度には差があり、また加熱時の電圧プロファイルについては実測の値はシミュレーションの結果と比較して緩やかになっていることが分かった。

今後は加熱時の電圧プロファイルの差の原因を確認するために、アルミニウムや銅および 85Mo-15Cu などの材料についても抵抗率の温度依存性を考慮したモデルによって解析を行い、その結果に基づいて解析モデルの見直しを行う予定である。

表 4 実測とシミュレーションの比較

試験条件 (目標温度)	175°C	200°C	225°C
実測の加熱電流 [A]	34.7	37.9	40.1
シミュレーションの設定 電流 [A]	34.49722	37.53265	39.84700
実測の $T_{jmax}$ [°C]	174.3	199.9	224.5
シミュレーションによる $T_{jmax}$ [°C]	175.0	200.0	225.0
シミュレーションによる チップの最高温度 [°C]	182.1	207.3	232.3

#### 【参考文献】

1. 森田滉隆, 干強: ” 電気-熱-構造連成解析を用いた車載用パワーモジュールの評価方法の確立”, 第二十四回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (2014), 2C4-3.
2. 八坂慎一, 田口勇, 篠原俊朗: ” 高温パワーサイクル試験による銀ナノ粒子接合材料の信頼性評価”, 第33回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 (2019), 12B1-02.
3. 八坂慎一, 篠原俊朗: ” 回路シミュレータ (LTspice) による電気-熱連成解析用デバイスモデルの検証”, 第34回エレクトロニクス実装学会春季講演大会 (2020), 4D2-01.
4. 八坂慎一, 篠原俊朗: ” オープン CAE によるパワー半導体の電気-熱連成解析と熱過渡解析への応用”, 第30回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (2020), 1A1-1.
5. <https://www.csc.fi/web/elmer> (参照日: 2023/7/14)
6. JEDEC Standard JESD51-14: ” *Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of Thermal Resistance Junction-to-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path*”, November 2010