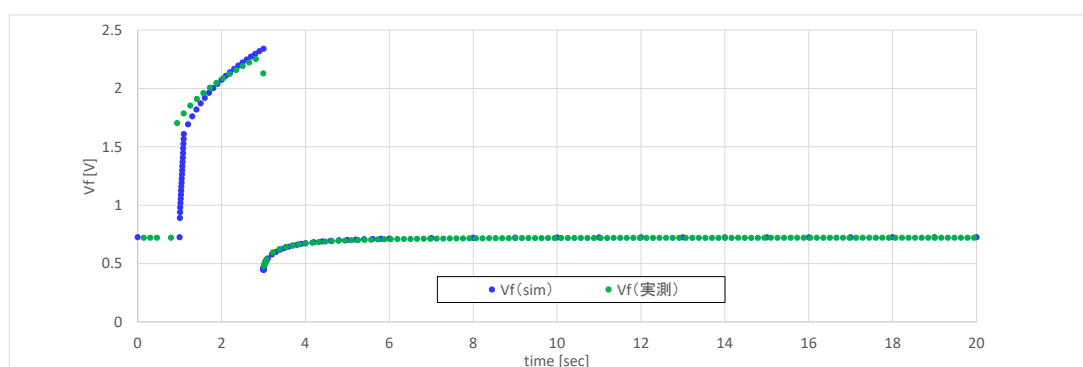


(a) 温度プロファイル



(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用し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、実際の計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