

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	大阪大学 大学院工学研究科
職位または役職	助教
氏名	福永 崇平

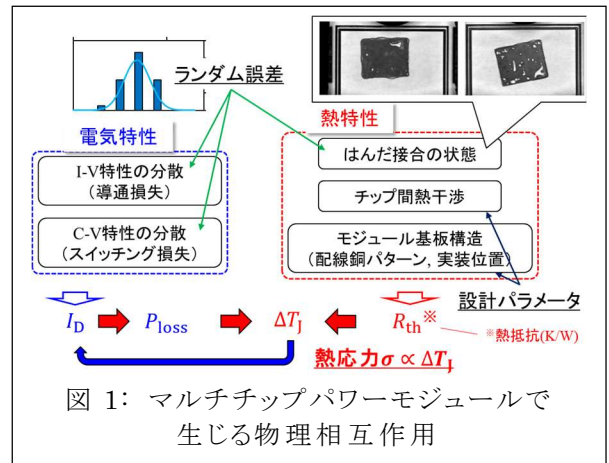
1. 研究題目

機電一体型モータに適用する SiC パワーモジュールの高信頼構造設計技術の開発

2. 研究目的

モータを駆動するインバータをはじめとした電力変換回路の小型高効率化が求められている。近年注目が集まる炭化ケイ素 (SiC) パワーデバイスの特長を活かして、機電一体型モータと呼ばれる、高温となるモータの近傍にインバータを配置することによる電動駆動システムの小型高性能化が検討されている。しかし高温環境下における長期間信頼動作を保証するためには、パワーデバイスだけでなく、これを複数搭載したパワーモジュールの配線構造設計や実装材料の高耐熱化が必要になる。特に SiC パワーモジュールは Si パワーモジュールと比べ、比較的小さいチップを多数実装するマルチチップ構造が検討されている。マルチチップモジュールでは、発熱するチップ間の熱干渉によるジャンクション温度の上昇が問題になる。また実装するパワーデバイスのオン抵抗やゲートしきい値電圧などの電気的特性の違いが引き起こす電流アンバランスによって発熱分布が偏ると、熱応力が集中し、信頼性を著しく低下させる。

本研究では、高温環境下で長期信頼性を担保するためのマルチチップ SiC パワーモジュールの構造設計法を開発する。このために、図 1 に示す物理相互作用を考慮した設計アプローチが必要になる。本助成においては図 1 の熱特性およびその評価のうち、①モジュール基板構造によって変化するチップ間熱干渉が、見かけの熱抵抗増加に与える影響の定量化、および②マルチチップモジュールの熱抵抗 R_{th} の評価で課題となる、ジャンクション温度 T_j の推定手法の誤差評価について検討を行った。



3. 研究内容及び成果

○モジュール基板構造が放熱性能に与える影響の定量的評価

図 2 は各パワーデバイスにそれぞれ独立した電流経路を持たせ、パワーデバイスのベアダイを等間隔距離で複数実装可能な回路パターン・基板構造を持つモジュール基板サンプルである。この基板について、配線パターンは同一パターンのまま、表 1 に示す構造パラメータを適用した複数種類の基板を用いてモジュールサンプルを実装し、チップ間距離が熱干渉に与える影響を実験的に評価した。ベアダイとして SiC ショットキーバリアダイオード (SBD) を用いて、中央ともう 1 つの合計 2 つのチップのうち、一方を発熱した場合の熱抵抗、および同時発熱時の熱抵抗をそれぞれ評価し、熱干渉の影響を定量化した。

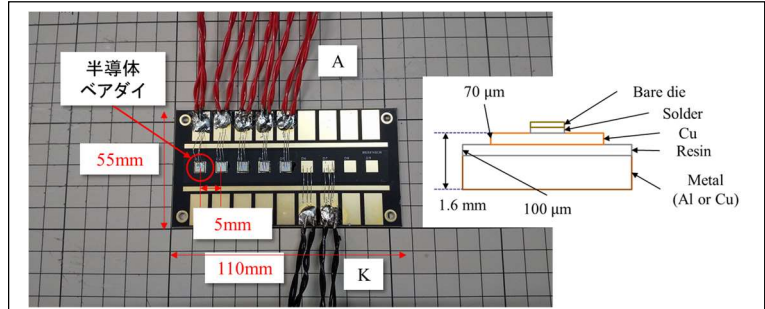


図 2: 作製した評価サンプル (SiC-SBD を 5 つ実装)

表 1: 構造パラメータ

サンプル	パターン銅厚	絶縁層熱伝導率 W/(m・K)	放熱基板
A	4oz	3.0	Al
B	4oz	3.0	Cu
C	2oz	2.0	Cu

図 3 は各サンプル基板について、チップ間距離と熱干渉を考慮した見かけの熱抵抗の関係である。熱抵抗の評価には過渡熱抵抗測定器 Simcenter T3STER を用い、ジャンクション-ケース間熱抵抗 $R_{\theta(j-c)}$ を同定した。実験結果からモジュール基板構造に依らず、チップ間距離が短くなるほど熱干渉の影響を含めた見かけの熱抵抗が大きくなることを明らかにした。また放熱基板に熱伝導率が高い銅を用いると、アルミを用いる場合と比べて横方向の熱伝導が大きくなるため、熱干渉による見かけの熱抵抗が大きくなることを定量的に明らかにした。しかしながら、横方向の伝熱は放熱面積の拡大につながるため、全熱抵抗としては銅の方が小さくなる。また裏面金属材料よりも表面のパターン厚みや絶縁層の熱伝導率が放熱性能の向上に大きく寄与することを明らかにした。

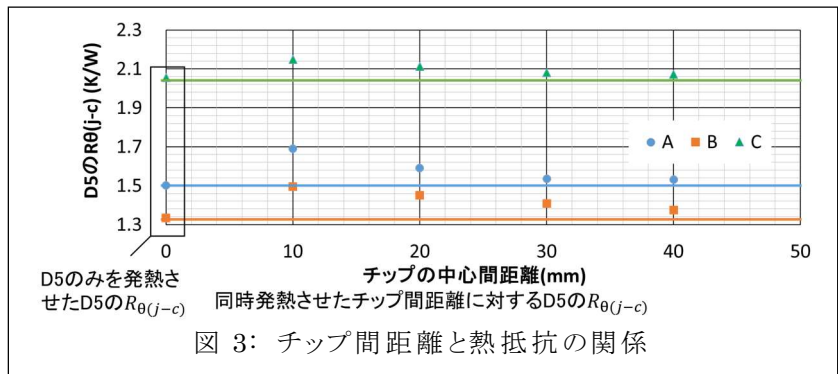


図 3: チップ間距離と熱抵抗の関係

○温度係数を用いたジャンクション温度推定に与える誤差評価

パワーモジュールの熱設計評価では、実装するパワーデバイスの I-V 特性の温度依存性を用いて推定した T_j の時間応答を用いる。しかし複数パワーデバイスが並列接続されたマルチチップパワーモジュールでは、I-V 特性の温度依存性によって自己発熱用の大電流および温度推定に用いる微小電流がそれぞれ分担され、 T_j 推定の誤差要因となる。そこで図 4 に示す試験系を構築し、 $N=2$ または 3 個のディスクリート SiC-SBD を並列接続し、各デバイスを異なる温度のヒートシンクに固定した。熱平衡状態において、温度係数を用いて推定した T_j と、熱電対を用いて測定した各パワーデバイスの温度の差を評価した。

表 2 は型番が同じ 3 つのパワーデバイスを並列接続した場合の、各 SBD の温度とその平均値 $T_{j,ave}$ 、および温度係数を用いて推定したジャンクション温度 $T_{j,TSEP}$ である。表より、温度係数を用いて推定されるジャンクション温度が、各パワーデバイスの平均値にお

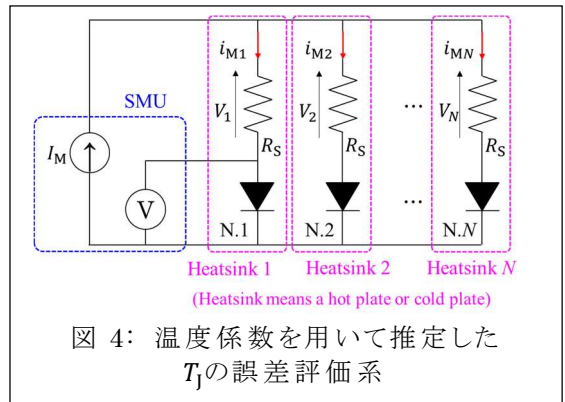


図 4: 温度係数を用いて推定した T_j の誤差評価系

およそ一致する。すなわち並列接続したパワーデバイスの熱設計において、最大ジャンクション温度を推定できず、誤差が生じることを明らかにした。そこで各 SBD に流れる T_J 推定用の微小定電流の分担をそれぞれ測定し、各 SBD の I-V 特性を模擬するデバイスモデルを用いることで、各 SBD の T_J を推定できることを明らかにした。

Case	表 2: 各 SBD 温度と推定温度				
	Set temperature			$T_{J,ave}$ [°C]	$T_{J,TSEP}$ [°C]
	N.1 [°C]	N.2 [°C]	N.3 [°C]		
1	26.7	26.7	26.5	26.63	26.29
2	26.9	26.9	30.8	28.20	27.72
3	26.9	26.9	41.9	31.90	32.44
4	26.9	26.9	51.4	35.07	37.77
5	31.3	26.9	26.9	28.37	28.09
6	51.3	26.9	26.9	35.03	38.81

4. 今後の研究の見通し

これまでの研究成果から、マルチチップパワーモジュールに用いるモジュール基板の構造パラメータが放熱性能に与える影響を過渡熱抵抗により定量的に明らかにした。この結果を数値モデルに適用し、有限要素法に基づくシミュレーションを援用した非線形計画法に基づく構造最適化を行う。最大ジャンクション温度およびモジュール内部の温度勾配により生じる熱応力を目的関数とし、これらを最小化する構造パラメータを算出し、実装したモジュールを評価する。

またパワーデバイスの電気的特性のばらつきおよびモジュール内部温度勾配が与える発熱分担は、数値モデルを用いた信頼性設計の誤差要因になるため、予め評価する必要がある。実装するパワーデバイスの電気的特性およびその温度依存性を、半導体カーブトレーサを用いてモデル化する。発熱分担をモデルから算出し、その妥当性を実験により検証する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

(1) 査読付き国際会議における発表:

- S. Fukunaga, and T. Funaki: “Development of high-speed current switch box for transient thermal characterization of SiC power modules,” 13th International Conference on Integrated Power Electronics Systems 2024 (CIPS 2024), Poster Sessions, Düsseldorf, Germany, March 12-14, 2024. (Poster)
- S. Fukunaga, and T. Funaki: “Analysis of errors in junction temperature estimated by temperature-sensitive electrical parameter for parallel-connected power devices,” 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2024), PS-04-18, Hyogo, Japan, Sep. 1-4, 2024. (Poster)

(2) 国内学会等における発表:

- 福永 崇平, 舟木 剛: 「パワーデバイスの温度係数を利用したマルチチップモジュールのジャンクション温度推定誤差に関する一検討」, 電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-23-054/SPC-23-237, 九州大学 西新プラザ 大会議室 AB, 2023 年 10 月 26 日 -27 日.
- 福永 崇平, 舟木 剛: 「ベイズ情報量規準に基づくパワーモジュールの熱応答モデル化に関する一検討」, 電気学会 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-24-064/PSE-24-076/SPC-24-118, 福江文化会館, 2024 年 3 月 7 日 -8 日.
- 大賀 悠功, 福永 崇平, 舟木 剛: 「金属放熱基板を用いた SiC パワーモジュールの過渡熱抵抗の実験的評価」, 電気学会 産業応用部門大会, 1-16, 水戸市民会館, 2024 年 8 月 28 日 -30 日.
- 福永 崇平, 舟木 剛: 「パワーデバイスの温度係数を利用したマルチチップパワーモジュールの過渡熱回路モデル誤差に関する一検討」, 電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-24-045/SPC-24-183, 日立シビックセンター, 2024 年 11 月 14 日 -15 日.
- 大賀 悠功, 福永 崇平, 舟木 剛: 「マルチチップパワーモジュール内部の熱干渉がジャンクション温度に与える影響に関する一検討」, 電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-24-046/SPC-24-184, 日立シビックセンター, 2024 年 11 月 14 日 -15 日.