

2023 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	パワー半導体デバイスにおける最大定格値の最適化
キーワード	①パワーエレクトロニクス、②パワー半導体デバイス、③信頼性工学

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏 名	ハヤシ シンイチロウ 林 真一郎
配付時の所属先・職位等 (令和5年4月1日現在)	千葉工業大学 工学部 電気電子工学科 助教
現在の所属先・職位等	同上
プロフィール	2016年3月首都大学東京大学院博士前期課程修了。同年4月三菱電機株式会社入社。在職中は、伊丹製作所パワエレシステム設計電源課に所属し、鉄道車両用補助電源装置の設計・開発に従事。2019年4月東京都立大学大学院電子情報システム工学域博士後期課程に進学。2022年3月博士(工学)取得。同年4月より現職に至る。パワーエレクトロニクス、特にパワー半導体デバイスの信頼性に関する研究に従事。

1. 研究の概要

電力を効率よく利用するためには、パワーエレクトロニクス技術が必要不可欠である。パワーエレクトロニクス技術とは、パワー半導体デバイスを用いて電力の形態を効率的に変換することができる技術である。そのため、省エネルギー化のキー技術として、家電からxEV、鉄道車両、工場に至るまで様々なアプリケーションの電源装置に使用されている(図1)。さらに、研究開発レベルでは、航空機やロケット発射装置の電動化にも応用されている。

こうした背景から、パワーエレクトロニクス技術を使用した電気機器(以下、パワエレ機器)には、幅広い期待寿命と性能が要求されつつある。そこで、本研究では要求される期待寿命と性能に合わせたパワエレ機器設計手法の確立を目指している。本助成の研究期間においては、特にパワー半導体デバイスの定格電圧値の最適化を目標に研究を実施した。

研究の結果より、パワー半導体デバイスの寿命と性能が定格電圧値の設定に依存することが明らかとなった。また、パワー半導体デバイスの寿命と性能はトレードオフの関係にあることから、最適値の設計ができる可能性を示すことができた。



図1. パワーエレクトロニクス技術の応用例

2. 研究の動機、目的

日本政府は「2050 年カーボンニュートラル」を達成するために、グリーン成長戦略を示している。そのひとつとして「製造・サービス・輸送・インフラなど、すべての分野でデジタル化・電化の推進」が掲げられており、電力を効率よく使用可能なパワーエレ機器の導入拡大が図られている。これまで主にパワーエレ機器が用いられてきた産業分野や鉄道分野においては、機器の期待寿命が長く、20 年程度となることもある。

特に、パワーエレ機器を構成する主要部品であるパワー半導体デバイスは、メーカーにおいて種々の長期信頼性試験が実施されている。こうした長期信頼性試験の結果から、パワー半導体デバイスの最大定格値は決定される。パワー半導体デバイスを動作させる際のゲート電圧も最大定格値が定められている。ゲート電圧は、高く設定するほど電力変換損失が低減する（性能が向上する）ことが知られているが、長期的な信頼性を担保するため最大定格電圧を定めることで性能を制限している。

一方、今後パワーエレ機器が様々な分野に導入されることで、要求される期待寿命と性能への柔軟な対応が必要となる。図 2 は、各アプリケーションにおいて要求される期待寿命と性能の概要を示している。鉄道車両では、約 20 年の期待寿命が要求される一方で、比較的高い性能は求められていない。しかし、電動化ロケットでは、発射に必要な数分間という寿命で非常に高い性能が要求される。要求される寿命と性能が多様化する中で、従来通り 20 年以上の寿命を有するよう最大定格電圧を定めては、過剰品質になり兼ねない。



図 2. 各アプリケーションにおいて要求される期待寿命と性能の概要図

こうした背景から、パワー半導体デバイスの期待寿命に応じて性能を可能な限り引き出す技術が不可欠である。そこで、本研究の目的は、要求される期待寿命と性能を踏まえたパワー半導体デバイスの最大定格設定手法を確立することである。そのために、アプリケーションに応じた長期信頼性試験手法を提案することで、パワー半導体デバイスの寿命を正確に評価できることを目指す。

3. 研究の結果

本助成の研究期間における主な成果は、

- (1) パワー半導体デバイスの寿命評価試験環境の構築
- (2) 動的寿命評価試験回路の開発

の 2 点である。以下にそれぞれの成果の詳細を報告する。

(1) パワー半導体デバイスの寿命評価試験環境の構築

一般的に、パワー半導体デバイスの寿命を評価するためには、加速劣化試験が用いられる。加速劣化試験とは、電圧や温度などパワー半導体の寿命にとってストレス（加速因子）となる値を高く設定することで寿命を加速させ、得られた結果から通常使用条件における寿命を推定する試験である。本研究を遂行するためにも、パワー半導体デバイスの加速劣化試験を実施する環境の構築が必要となる。

図 3 は、本研究室に構築したパワー半導体デバイスの寿命評価試験環境を示している。パワー半導体デバイスの寿命を加速させるために、ホットプレートによる試験温度設定を可能とした。また、様々な条件のゲート電圧に対応した寿命を評価できるよう、試験電圧は直流（ ± 100 V）および矩形波交流（ ± 50 V、 ~ 300 kHz）に対応できる仕様とした。さらに、試験中に予期せぬ事態が発生した場合を考慮して、遠隔からの監視及び試験の緊急停止ができる仕様とした。このように安全性にも配慮をすることで、大学の研究室という制限された環境においてもパワー半導体デバイスの寿命評価試験の実施が可能となった。



図 3. パワー半導体デバイスの寿命評価試験環境

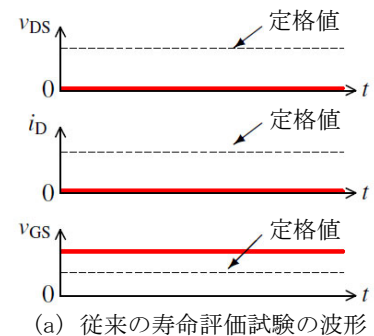
(2) 動的寿命評価試験回路の開発

図 4(a) は、パワー半導体デバイスにおける従来の寿命評価試験の試験波形を示している。従来は、試験電圧として直流電圧を用いる静的な寿命評価が行われている。一方、図 4(b) は、パワー半導体デバイスにおけるパワエレ機器内での動作波形を示している。パワー半導体デバイスの実動作波形は矩形波であり動的な条件である。そこで、パワー半導体デバイスの寿命評価試験において矩形波を用いる「動的寿命評価試験」を実施することで、より正確な寿命の評価試験を実施した。

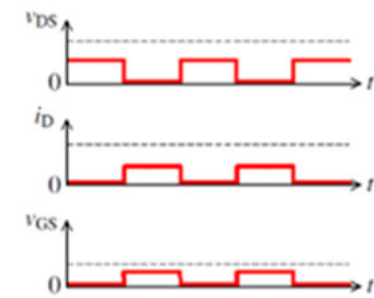
図 5 は、動的寿命評価試験を実施するために開発した試験回路を示している。試験回路は、矩形波交流（ ± 50 V、 ~ 300 kHz）が出力可能である。また、複数のサンプルを同時に試験できる仕様とした。

以上の成果を活用して、パワー半導体デバイスのより正確な寿命評価に向けて、継続的に試験を実施中である。なお、現在までに従来の寿命評価方法と提案する寿命評価方法における差異が明らかとなっている。また、本助成による研究成果以外の成果とも併せて考察することで、パワー半導体デバイスの寿命と性能がゲート電圧に依存することを実験的に明らかにした。さらに、パワー半導体デバイスの寿命と性能はトレードオフの関係にあることから、最適値の設計ができる可能性を示すことができた。

詳細な研究成果は、今後学会発表を通して広く社会に還元していく予定である。



(a) 従来の寿命評価試験の波形



(b) 実動作時の波形

図 4. パワー半導体デバイスの寿命評価試験と実動作波形の差異（概念図）



図 5. 開発した試験回路

4. 研究者としてのこれからの展望

私は、「5 ゲン主義」を大切にする研究者を目指している。5 ゲン主義は、現場・現物・現実・原理・原則に基づいて問題を解決するという考え方である。学術研究においては原理・原則が重要であるが、モノづくりを通して社会に貢献できる研究成果を得るためには、現場・現物・現実に基づくことも重要となる。製造現場を持たない大学にとって、5 ゲン主義に基づく研究をするためには、産学連携を一層強化していく必要があると考えている。企業・大学の双方に利益のある産学連携が確立されるよう、その活動をけん引していきたい。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

この度は、皆さまからいただきましたご支援の御陰様により、本研究の基盤となる環境の構築および開発ができました事到大変感謝いたします。

今後も御陰様の気持ちを忘れることなく、日々の研究に精進するとともに、その成果を広く社会に還元できるよう努めてまいります。