

氏名（本籍）	角 真輝（神奈川県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 268 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 17 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	マイクロ・マクロなサブサーフェス磁気イメージングの電力変換回路及び素子への適用
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤 宣夫 (副査) 教授 新井 浩志 教授 秋田 剛 教授 関 弘和 教授 菅 洋志 非常勤教員 山本 秀和

学位論文の要旨

マイクロ・マクロなサブサーフェス磁気イメージングの電力変換回路及び素子への適用

科学技術の進歩により、電子機器は日常生活に不可欠となり、その高機能化が進んでいる。これらの機器の主要な機能は内部の電子回路で、その故障や劣化は機器の機能に直接影響を与える。特に電子回路の中でも電力変換機能を有し、多くの回路の電源用途に用いられるパワーエレクトロニクスとして取り扱われる電源回路では、その回路機能損失が多くの回路機能の損失に波及する。また、回路内部での故障は視認が難しく、高集積化する回路基板上での故障箇所特定や劣化評価は困難である。そのため、部品の劣化予測、劣化監視システム、回路の耐故障設計に関する研究が進められている。しかし、これらの研究では、その対象が特定の素子に限定されており、回路全体の劣化に備えることは不完全である。そこで現在、非破壊の電子回路評価手法として静磁場の再構成理論を用いたサブサーフェス磁気イメージングが注目されている。本手法は現在までに、プリント基板、リチウムイオン電池、インダクタ、太陽電池等の評価への適用事例が報告されている。

そこで、本研究では、サブサーフェス磁気イメージングを用いて、パワーエレクトロニクス製品の一種である絶縁型直流電圧変換回路(DC-DC コンバータ)を測定対象とした電流起因磁場の測定、そこから電流経路画像を算出することを目的とした。

まず、マクロなサブサーフェス磁気イメージングは、磁気センサが二次元走査することで走査

面での磁場分布を測定する。この測定系での検出感度は磁気センサに依存するため、より微小な劣化測定を行うためには、高感度な磁気センサを用いる必要がある。そこで、本研究では常温で高感度な磁気センサとして評される MI(Magneto Impedance)センサを用いた。他方、磁気センサの高感度化を実現するにあたって、その応答周波数帯域が狭帯域化する。MIセンサではその上限が 1 kHz@-3 dB とされている。しかし、測定対象とする DC-DC コンバータを含めて、スイッチング電源の内部を通電する電流は多くの場合、1 kHz を超える。つまり、磁気センサの応答周波数範囲を超えてしまうため測定が困難である。

以上に対し、本研究ではダウンコンバージョン法を提案し、適用した。ダウンコンバージョン法では、DC-DC コンバータの入力電源に交流電圧を重畳することで、交流電圧の周波数とスイッチング周波数の差周波成分の磁場を意図的に発生させる。この差周波を磁気センサの応答周波数帯域に内包させるように入力電源に重畳する交流電圧の周波数を決定することで、磁気センサの応答周波数を超えるスイッチング周波数の DC-DC コンバータ内部の電流起因磁場及び電流経路分布を測定した。しかし、入力電源に交流電圧を重畳する回路機能を新たに具備する必要があるため、設計や素子点数の観点から、実用できてない。

そこで、本研究ではパルス幅変調方式(PWM: Pulse width modulation)のサブサーフェス磁気イメージングを提案した。この手法では、DC-DC コンバータのスイッチング素子のデューティ比を変調することで、DC-DC コンバータ内部に磁気センサの応答周波数帯域内の周波数成分の電流を通電させる。この電流起因の磁場を磁気センサで測定することで電流起因磁場と電流経路分布を測定可能であることを示した。本手法は先のダウンコンバージョン法のように、回路構成を変化させる必要がなく、回路に求められる変更点はスイッチング制御を変更することのみである。また、PWM 制御は DC-DC コンバータなどの回路において出力電圧制御に用いられる一般的な手法である点も、ダウンコンバージョン法より有用度が高い点である。これらの結果から、マイクロなサブサーフェス磁気イメージングによって、回路内部の電流経路を測定可能なことが示され、故障や劣化に伴った電流経路の変化をとらえることで、回路全体の評価可能であることが示された一方で、積層セラミックコンデンサの測定から、内部の劣化原因の解明には空間分解能の観点から困難であると考えられ、より空間分解能が高いマイクロな測定系の必要性を示した。

マイクロなサブサーフェス磁気イメージングとして、近年磁性体の磁区観測等で用いられる交番磁気力顕微鏡(A-MFM: Alternating magnetic force microscope)を利用した。パワーデバイスや積層セラミックコンデンサ内部の測定を前提に、幅 5 μm の電流細線に直流電流を通電し、AFM/KFM/A-MFM を複合化した測定装置で計測した。測定結果から、A-MFM を用いて直中電流起因の静磁場の観測が可能であることが示された。また、ビオ・サバルの法則を利用した数値計算結果との比較から、探針先端の実効的な空間分解能の低下についても考察した。

本論文では、絶縁型 DC-DC コンバータを測定対象とした新たな手法によるサブサーフェス磁気イメージングや A-MFM を利用したサブサーフェス磁気イメージングによって電流経路の測定が可能であることを示した。パワーエレクトロニクスでは、絶縁型 DC-DC コンバータの他にも多くの回路手法が存在するため、今後はそれらの回路に対して PWM 法が有用であるか考察する必要がある。

る。また、A-MFM を用いた手法では、検出感度に関して考察する必要がある。これは、パワーデバイス測定対象とする場合、その動作領域における測定領域内を通電する電流が、デバイス全体を通電する電流より小さくなるためである。これらの課題を解消できた場合、マクロからマイクロまでパワーエレクトロニクスの電流経路測定を用いた評価が可能になると考える。

審査結果の要旨

この博士学位論文の第1章では、電子機器内部の電子回路機能の故障や劣化が機器の性能に影響を与えることを指摘した上で、電力変換機能を持つパワーエレクトロニクス製品の回路機能損失は、他の回路機能にも影響を及ぼす課題をまずは述べている。具体的な回路機能の損失を引き起こす要因の1つは、構成素子の不良やはんだ付けの劣化による開放故障と短絡故障である。これらの故障は、構成素子内部で発生するか微小であるため、視認が困難であり、高集積化する回路基板上での故障箇所特定や劣化評価は難しい。しかし、回路機能の重要度は高く、信頼性評価技術はシステム全体の信頼性を向上させるために極めて重要である。そのため、劣化予測、劣化監視システム、耐故障設計に関する研究が進められているが、特定の素子に限定されているという欠点がある。本研究では、マクロ領域のサブサーフェス磁気イメージング手法による電力変換回路評価及びその構成素子の解析手法の実現を目的としている。具体的には、高周波動作する電力変換回路に周波数変調を用いることで、応答周波数上限が1kHzの磁気センサを用いて測定し、電流経路を可視化する。また、マイクロ領域のサーフェス磁気イメージング手法として、交番磁気力顕微鏡法による電流近傍磁場の測定を目的とすることを述べている。

第2章では、高感度磁気センサの原理とその応用について述べられている。特に、磁気インピーダンス (MI: Magneto-Impedance) 効果を用いた MI センサに焦点を当て、電流経路可視化装置の原理、静磁場の再構成理論、電流経路算出方法が解説されている。これらの技術は、電子回路の故障箇所特定や劣化評価に有効であり、非破壊検査における新たな可能性を示している。また、センサの感度と周波数応答の関係にも触れ、高周波動作する電力変換回路の評価に適用可能であることが示されている。

第3章では、積層セラミックコンデンサの電流経路画像と試料外観の比較、正常時と故障時の電流経路画像の分析を通じて、故障箇所の特定や劣化評価が可能であることを示している。実験構成、測定条件、結果、考察の項目に分けて、測定対象の積層セラミックコンデンサについて詳細に説明し、故障時の電流経路の変化を捉えることで、コンデンサの劣化や故障を評価する手法を提案している。本章のまとめでは、提案手法の有効性について述べられており、サブサーフェス磁気イメージング技術が電子部品の故障診断に貢献する可能性が高いことが示されている。

第4章では、絶縁型 DC-DC コンバータの動作原理とダウンコンバート法の基本原理について解説されている。絶縁型 DC-DC コンバータは、直流入力電圧を任意の直流電圧に変換可能

な装置であり、電気自動車や通信、医療機器など多岐にわたる用途で利用されている。ダウンコンバート法は、高周波動作する電力変換回路の電流起因磁場分布を測定する手法で、応答周波数上限が 1kHz の磁気センサを用いて 1MHz で動作する DC-DC コンバータの電流経路を可視化する。本章では、この測定法の適用例として、絶縁型 DC-DC コンバータ内部でのダウンコンバート法の原理と測定対象、実験構成、測定条件、測定結果が詳述されている。

第 5 章では、パルス幅変調方式を用いた絶縁型 DC-DC コンバータの測定について述べられている。この方式の原理は、直流入力電圧を任意の直流電圧に変換することが可能であり、電力変換回路の主要部品である。測定条件、測定装置、測定方法について詳細が説明され、測定回路が構築されている。結果として、電流経路の画像化に成功し、コンバータの動作状態を評価することができる。本章のまとめでは、パルス幅変調方式を用いた測定が、電力変換回路及びその構成素子の解析に有効であることが示されている。

第 6 章では、走査型プローブ顕微鏡の原理と応用について解説されている。原子間力顕微鏡の原理、光てこ法、カンチレバーの共振特性、探針-試料間に作用する力、測定モードなどが詳述されており、ケルビンプローブ力顕微鏡や交番磁気力顕微鏡の原理にも言及されている。これらの顕微鏡は、電気、磁気、弾性、ジュール熱などの物理量を計測可能であり、半導体デバイスや回路基板等の評価に有用である。特に、交番磁気力顕微鏡は、静磁場が任意の周波数を有した磁気力として検波可能であり、セカンドスキャンが不要となる利点があることを言及している。

第 7 章では、電子部品やデバイスの動作領域内の特性評価において、静磁場の測定が重要であることを示した上で、直流電流細線の磁場測定に焦点を当てている。磁場勾配分布の捉え方を解説し、交番磁気力顕微鏡の原理に基づく測定手法が提案され、将来的なパワー半導体デバイス内の測定を想定した研究であることを示した上で、測定対象としてシリコン基板上の微細電流路を採用した理由、実験構成、測定条件、測定結果が詳述され、測定結果からは磁場勾配分布の特徴が明らかにされている。考察では、測定結果の意義と限界が議論され、磁場測定による評価手法の有効性が強調されている。

第 8 章では、サブサーフェス磁気イメージング技術の研究成果を総括している。当該技術は、電力変換回路やその構成素子の非破壊評価に有効であり、特に高周波動作する電力変換回路の電流起因磁場分布を可視化することに成功していることを述べている。また、マイクロ領域でのサーフェス磁気イメージング手法として、交番磁気力顕微鏡法による微細電流路の磁場測定が可能であることを示している。これらの技術は、電子部品の故障解析や劣化評価において、従来の手法では困難であった詳細な情報を提供することができ、電子回路の信頼性向上に寄与すると結論している。