

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	SiC-MOSFET インバータを用いた高周波誘導加熱方式小金属検出法 (Small-Foreign-Metal Particles Detection Based on High-Frequency Induction Heating Using an SiC-MOSFET Inverter)
氏名(Name)	司城 卓也

液晶ディスプレイ、二次電池およびソーラーパネルなどの普及により、エレクトロニクスやエネルギー分野でプラスチックフィルムに機能性を持たせた高機能フィルムの需要が拡大している。しかしながら、リチウムイオン電池の発熱・発火事故に代表されるように、高機能フィルムに混入した小金属が問題となっている。これは、主に高機能フィルム製造工程において生産ラインに使用されているステンレス (SUS304) 歯車の摩耗等により小金属として飛散し混入するものと考えられ、高機能フィルムの品質保証において小金属検出技術の開発が急務となっている。混入した小金属を検出するための検査法として、Charge Coupled Device (CCD) カメラを用いた画像処理や、X線などを応用した検出技術が実用化されている。しかしながら、これらの検出技術ではフィルムサイズ、フィルムに混入した異物の材質ならびに搬送速度等による影響から直径 0.1 mm以下の小金属の検出が困難になるとされており、より高分解能な小金属検出技術が求められている。本学位論文では、高周波誘導加熱方式小金属検出法を提案し、その有効性を明らかにしている。

第1章では、本学位論文の研究背景について述べている。まず、小金属混入によるリチウムイオン電池の発火事故例を示し、小金属検出技術の必要性を示している。さらに、これまで実用化されている小金属検出法の特徴および課題について述べている。第2章では、関連する国内外の小金属検出法に関する研究開発動向を示し、実用化に向けた課題を明らかにしている。一方、本学位論文の先行研究で提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出法について述べている。この高周波誘導加熱方式小金属検出装置は、高周波インバータ、誘導加熱コイルおよびサーモグラフィックカメラで構成されている。高周波インバータにより発生した高周波交番磁界を用いて高機能フィルム上の小金属を誘導加熱によって加熱し、サーモグラフィックカメラを用いて小金属を検出する。本格的な実用化に際し克服すべき課題を明らかにし、本学位論文の研究目的を明らかにしている。

第3章では、初めに、小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数と磁束密度の関係について実験的に検討し、高周波インバータのスイッチング周波数は400 kHzが適切であることを明らかにしている。400 kHz 駆動SiC-MOSFET 高周波インバータを試作し、小金属を加熱してサーモグラフィックカメラで観測可能なことを実験により明らかにしている。このとき、SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を測定し損失分析を行い、SiC-MOSFET 高周波インバータの全損失のなかで SiC-MOSFET の導通損失が支配的であることを明らかにしている。このことから、導通損失を低減するため2並列接続SiC-MOSFET 高周波インバータを試作し動作特性を評価している。SiC-MOSFETを2並列接続することにより、導通損失を49.4%低減し、SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を94.9%から96.8%に改善可能であることを明らかにしている。

高機能フィルムの製造ラインを考慮した場合には、高機能フィルムに対して広範囲に高周波交番磁界を印加できる誘導加熱コイルの形状および配置を検討する必要がある。そこで第4章では、フリンジ

ング磁束を利用した誘導加熱コイルの新しいコア形状を提案し、その有効性を明らかにしている。提案したE型コアを用いた誘導加熱コイルについて、磁界解析ソフトウェアJSOL JMAGを用いてコアギャップ付近のフリンジング磁束密度が小金属を加熱するために必要な値となっていることを確認している。さらに、実験装置を構築し実験により提案したE型コアを用いた誘導加熱コイルの有効性を確認している。実験結果から、高機能フィルム上に混入した直径 0.3 mm の小金属球が最大で5.2℃の温度上昇が実現できることをサーモグラフィックカメラによって確認している。

第5章では、第4章で提案したE型コアを用いた誘導加熱コイルと比較してコアの鉄損を低減可能なEI型コアを用いた誘導加熱コイルを提案している。誘導加熱コイルに用いているE型コア内の鉄損によりE型コア内の温度が上昇する。このとき、コア内部と表面との過大な温度差が生じる。これが原因で、コア割れが発生し小金属検出装置の連続安定動作が困難となる問題点があった。本章で提案したコア形状では、E型コアとI型コアのギャップ長を可変とすることが可能であり、E型コア内の鉄損を低減しながらギャップ内に発生する磁束密度を増加させることが可能な点に特長がある。磁界解析ソフトウェアJSOL JMAGを用いて、本章で提案したEI型コアが第4章のコア形状および同一実験条件に対してコア内の鉄損を71.8%低減できることを明らかにしている。さらに、実験装置を構成し、実験により有効性を確認している。実験結果から、高機能フィルム上に混入した直径 0.3 mm の小金属では最大で6℃の温度上昇を実現できることをサーモグラフィックカメラによって確認している。また、E型およびI型コアのコアギャップ距離を5 mmから4 mmにすることによって直径 0.15 mm の小金属については最大で3℃の温度上昇をサーモグラフィックカメラで確認した。これらの実験結果から、EI型コアを用いた誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置は高機能フィルムの製造ラインに適用可能であり、従来の小金属検出法と比較し実用性が高いことを確認している。

第6章では、本学位論文の結論と今後の検討課題を述べている。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	司城 卓也
審 査 委 員	主 査：田中 俊彦
	副 査：久保 洋
	副 査：若佐 裕治
	副 査：堀田 昌志
	副 査：山田 洋明
	副 査：藤田 英明
論 文 題 目	SiC-MOSFET インバータを用いた高周波誘導加熱方式小金属検出法 Small-Foreign-Metal Particles Detection Based on High-Frequency Induction Heating Using an SiC-MOSFET Inverter
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>液晶ディスプレイ、二次電池およびソーラーパネルなどの普及により、エレクトロニクスやエネルギー分野でプラスチックフィルムに機能性を持たせた高機能フィルムの需要が拡大している。しかしながら、リチウムイオン電池の発熱・発火事故に代表されるように、高機能フィルムに混入した小金属が問題となっている。高機能フィルムの品質保証において小金属検出技術の開発が急務となっており、本学位論文では、高周波誘導加熱方式小金属検出法を提案し、その有効性を明らかにしている。</p> <p>第 1 章では、本学位論文の研究背景について述べている。まず、小金属混入によるリチウムイオン電池の発火事故例を示し、小金属検出技術の必要性を示している。さらに、これまで実用化されている小金属検出法の特徴および課題について述べている。第 2 章では、関連する国内外の小金属検出法に関する研究開発動向を示し、実用化に向けた課題を明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、初めに、小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数と磁束密度の関係について実験的に検討し、高周波インバータのスイッチング周波数は 400 kHz が適切であることを明らかにしている。400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作し、サーモグラフィックカメラで加熱された小金属を観測可能なことを実験により明らかにしている。このとき、SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を測定し損失分析を行っている。損失分析結果から SiC-MOSFET の導通損失が支配的であり、導通損失低減を目的とした 2 並列接続 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して動作特性を評価している。実験結果から、導通損失を 49.4%低減し SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を 94.9%から 96.8%に改善できることを明らかにしている。</p> <p>第 4 章では、広範囲に高周波交番磁界を印加できるフリッジング磁束を利用した誘導加熱コイル</p>	

の新しいコア形状を提案し、その有効性を明らかにしている。提案した E 型コアを用いた誘導加熱コイルについて、磁界解析ソフトウェア JSOL JMAG を用いてコアギャップ付近のフリンジング磁束密度が小金属を加熱するために必要な値となっていることを確認している。さらに、実験装置を構築し実験により提案した E 型コアを用いた誘導加熱コイルの有効性を確認している。実験結果から、高機能フィルム上に混入した直径 0.3 mm の小金属球が最大で 5.2 °C の温度上昇が実現できることをサーモグラフィックカメラによって確認している。

第 4 章で提案した E 型コアを用いた誘導加熱コイルでは、E 型コア内の鉄損により E 型コア内の温度が上昇する。このとき、コア内部と表面との過大な温度差が原因で、コア割れが発生し小金属検出装置の連続動作が困難となる問題があった。そこで、第 5 章では E 型コアと I 型コアを用いた E 型コア内の鉄損を大幅に低減できる誘導加熱コイルを提案し、その有効性を明らかにしている。磁界解析ソフトウェア JSOL JMAG を用いて、本章で提案した EI 型コアが第 4 章のコア形状および同一実験条件に対してコア内の鉄損を 71.8 % 低減できることを明らかにしている。さらに、実験装置を構築し、実験により有効性を確認している。実験結果から、高機能フィルム上に混入した直径 0.3 mm の小金属において最大で 6 °C の温度上昇を実現できることをサーモグラフィックカメラによって確認している。また、E 型および I 型コアのコアギャップ長を 5 mm から 4 mm にすることによって直径 0.15 mm の小金属についても最大で 3 °C の温度上昇が達成できることをサーモグラフィックカメラで確認した。これらの実験結果から、EI 型コアを用いた誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置は高機能フィルムの製造ラインに適用可能であり、従来の小金属検出法と比較して実用性が高いことを確認している。

第 6 章では、本学位論文の結論と今後の検討課題を述べている。

【本審査および公聴会における主な質問内容】

本審査および公聴会においては、①小金属の加熱理論式に円柱モデルを用いているが実際の小金属形状と比較した場合の円柱モデルの妥当性について、②最終目標となる小金属の大きさについて、③加熱コイルのコアを EI 型とすることで鉄損を大幅に低減できた理由について、などの質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士（工学）の学位論文に十分値するものと判断した。論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格と判定した。

【関連論文の発表状況】

学術論文（査読付き）は 1 編、IEEE 主催ならびに共催の年次会議および国際会議論文（査読付き）は 4 編であり、主な関連論文は以下のとおりである。

- [1] T. Shijo, S. Kurachi, Y. Uchino, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka, "New Induction Heating Coils with Reduced Iron-Loss in the Cores for Small-Foreign-Metal Particle Detector Using an SiC-MOSFETs High-Frequency Inverter," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 8, No. 5, pp. 803-812, September 2019.
- [2] T. Shijo, S. Kurachi, Y. Uchino, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka, "High-Frequency Induction Heating for Small-Foreign-Metal Particles Using 400 kHz SiC-MOSFETs Inverter," Conf. Rec. of the IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE), 2017, pp. 5133-5138.