

博士論文

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

2019年9月

司城 卓也

山口大学 大学院創成科学研究科
システム・デザイン工学系専攻

目次

第1章	序論	1
1.1	高機能フィルムの市場と技術動向	2
1.2	高機能フィルムの小金属混入が疑われる事故例	4
1.3	従来の小金属検出技術	6
1.4	本研究の目的	11
1.5	本研究の概要	11
第2章	小金属検出技術の研究開発動向ならびにワイドバンドギャップパワーデバイスの技術動向	15
2.1	小金属検出装置の研究開発動向	15
2.2	高周波誘導加熱方式小金属検出技術	17
2.3	誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向	19
2.4	ソフトスイッチング技術	24
2.5	Si系パワーデバイスならびにワイドバンドギャップパワーデバイスの技術動向	26
2.5.1	Si, SiC, GaNパワーデバイスの技術動向	26
2.5.2	SiC-SBD	28
2.5.3	SiC-MOSFET	31
2.6	本章のまとめ	34
第3章	SiC-MOSFET高周波インバータを用いた小金属の高周波誘導加熱法	35
3.1	小金属の加熱理論	35
3.2	小金属加熱を実現する周波数と磁束密度の決定	41
3.3	SiC-MOSFETを用いた高周波インバータのギャップ内小金属加熱	48
3.4	SiC-MOSFET高周波インバータの損失低減	54
3.5	本章のまとめ	60
第4章	フリンジング磁束を用いた誘導加熱方式小金属検出法	63
4.1	フリンジング磁束を用いた小金属検出法	63
4.2	シミュレーション結果	70
4.3	実験結果	72
4.4	本章のまとめ	89
第5章	コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイル	91
5.1	コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルの構成	91
5.2	シミュレーション結果	95
5.3	実験結果	101
5.4	本章のまとめ	114

第 6 章 結論	117
参考文献	121
発表論文	127
謝辞	129

目次

1.1	高機能フィルムの分野別世界市場	3
1.2	分野別年平均成長率(2015~2020年)	3
1.3	リチウムイオン電池の内部構造	5
1.4	年度別リチウムイオン電池の発火事故件数	6
1.5	CCDカメラを用いた小金属検出法	7
1.6	電磁誘導方式小金属検出法	8
1.7	X線を用いた小金属検出法	8
1.8	近赤外カメラを用いた小金属検出法	9
2.1	SQUID磁気センサを用いた小金属検出法	16
2.2	誘導加熱方式小金属検出装置のイメージ図	18
2.3	インバータの回路方式	20
2.4	サイリスタインバータの回路構成	21
2.5	IGBTインバータの回路構成	21
2.6	MOSFETインバータの回路構成	22
2.7	直列共振型フルブリッジインバータの等価回路	22
2.8	スイッチングモード遷移図	23
2.9	ハードスイッチング	24
2.10	ソフトスイッチング	25
2.11	Si, SiC, GaNの物性値のレーダーチャート	26
2.12	Si-MOSFETとSiC-MOSFETの構造図	27
2.13	Si, SiC, GaNパワーデバイスの応用分野	28
2.14	n型SBDの構造	29
2.15	オーミック接触の電圧-電流特性	29
2.16	金属とn型半導体のエネルギーバンド図	30
2.17	金属とn型半導体のエネルギーバンド図	30
2.18	SBDとpn接合ダイオードの電圧-電流特性	31
2.19	プレーナーゲート構造のとn型MOSFETの断面構造図	32
2.20	プレーナーゲート構造のとn型MOSFETのオン抵抗の各成分	32
2.21	トレンチゲート構造のとn型MOSFET	33
3.1	導体球モデルの小金属における熱収支	36
3.2	球座標系	36
3.3	円柱モデルの小金属における熱収支	37
3.4	高機能フィルム上の円環	38
3.5	高機能フィルム上の温度分布	40
3.6	磁束密度と周波数および球状被加熱物体(SUS304)の直径の関係	42

3.7	先に提案されてる誘導加熱方式小金属検出装置の構成図	43
3.8	各種コア材における比透磁率の周波数依存性	44
3.9	誘導加熱コイルのコア寸法	45
3.10	誘導加熱コイルの実機写真	45
3.11	金属球の温度誘導上昇と周波数の関係	46
3.12	カメラ分解能と熱拡散の関係	47
3.13	実験回路構成図	49
3.14	試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータ	50
3.15	ゲートドライブ回路構成図	51
3.16	SiC-MOSFET 高周波インバータの各部動作波形	52
3.17	小金属加熱結果	53
3.18	誘導加熱コイル周辺の磁界解析結果	55
3.19	パワーデバイスのスイッチング図	57
3.20	電力変換効率測定回路	58
3.21	SiC-MOSFET 単相インバータの損失分析結果	59
3.22	SiC-MOSFET の 2 並列素子化に関する図	59
3.23	SiC-MOSFET2 並列接続フルブリッジインバータの回路図	60
3.24	SiC-MOSFET 2 並列接続インバータの損失分析結果	60
4.1	検出手法イメージ	64
4.2	ギャップ付近の磁束の流れ	64
4.3	E 型コアの寸法	65
4.4	E 型誘導加熱コイルの連結イメージ	66
4.5	E 型コアの磁路長および断面積	67
4.6	E 型コアの等価磁気回路	68
4.7	フリンジング磁束を利用した誘導加熱方式小金属検出装置の構成図	69
4.8	3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた誘導加熱方式小金属検出装置の構成図	69
4.9	E 型誘導加熱コイルの連結時の解析モデル	71
4.10	磁束密度分布解析箇所	71
4.11	コアギャップ周辺の磁束密度分布	72
4.12	解析ライン I におけるフリンジング磁束の磁束密度分布	73
4.13	解析ライン II におけるフリンジング磁束の磁束密度分布	73
4.14	3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の磁束密度シミュレーション結果	74
4.15	E 型コア	75
4.16	3 連結 E 型誘導加熱コイルの構成	76
4.17	実験回路構成図	77
4.18	導通試験結果	78
4.19	フロリナートを用いた冷却の様子	79
4.20	測定点 (全てコア先端から高さ 3 mm)	79
4.21	磁束密度分布の比較	80
4.22	誘導加熱実験時の小金属とサーモグラフィックカメラの位置関係	82
4.23	フィルム上の小金属	83
4.24	直径 0.3 mm 小金属の誘導加熱実験結果	83
4.25	直径 0.15 mm 小金属の誘導加熱実験結果	84

4.26	磁束密度分布測定箇所	85
4.27	フリッジ磁束の磁束密度分布	86
4.28	3 連結 E 型誘導加熱コイルにおける鉄損分布解析結果	87
4.29	フィルム上の小金属	88
4.30	直径 0.7 mm 小金属の誘導加熱実験結果	88
4.31	520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした E 型誘導加熱コイルの連結イメージ	89
5.1	EI 型コアの寸法	92
5.2	EI 型誘導加熱コイルの連結イメージ図	92
5.3	EI 型コアの磁路長および断面積	93
5.4	EI 型コアの等価磁気回路	94
5.5	コアギャップ距離と磁束密度の関係	95
5.6	コア内鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置の構成図	96
5.7	3 連結 EI 型誘導加熱コイルの連結時の磁束密度解析結果	97
5.8	コアギャップ内の磁束密度分布	98
5.9	E 型誘導加熱コイルおよび EI 型誘導加熱コイルのコア内の鉄損密度分布シミュレーション結果	99
5.10	ヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果	100
5.11	飽和状態におけるヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果	101
5.12	コアギャップ 4 mm における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの連結時の磁束密度解析結果	102
5.13	3 連結 E 型誘導加熱コイルの構成	104
5.14	実験回路構成図	104
5.15	導通試験結果	105
5.16	磁束密度分布測定結果	105
5.17	小金属検出装置プロトタイプモデルイメージ図	106
5.18	作製したフィルム搬送装置	107
5.19	フィルム搬送装置のモータとコントローラー	107
5.20	フロリナート用水槽	108
5.21	選定した冷却用チラー	108
5.22	チラー内部構造	109
5.23	流量調節用ボールバルブ	110
5.24	高機能フィルム搬送機を適用した小金属検出装置の外観図	111
5.25	高機能フィルム搬送機における小金属の位置関係	112
5.26	直径 0.3 mm 小金属球の誘導加熱実験結果	112
5.27	直径 0.15 mm 小金属球の誘導加熱実験結果	114
5.28	520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした EI 型誘導加熱コイルの連結イメージ	115

表目次

1.1	各分野の応用製品群	4
1.2	従来の小金属検出技術の特長と比較	10
2.1	従来の検出法および SQUID 磁気センサを用いた小金属検出の特長と比較	17
2.2	各回路方式の特徴	20
2.3	誘導加熱用高周波インバータの容量および用途による分類	21
2.4	Si, SiC, GaN の物性値	26
2.5	Si-MOSFET と SiC-MOSFET の性能	34
3.1	計算条件	42
3.2	実験時の周波数と磁束密度	46
3.3	鎖交磁束密度計算結果 (直径 0.3 mm の小金属球)	48
3.4	SiC-MOSFET (C2M0400120D) の電気的特性	48
3.5	実験回路定数	50
3.6	各周波数範囲における磁束密度の基本制限 ⁽⁶⁴⁾	54
4.1	E 型コアのコア材の物性値	66
4.2	コア材の物性値比較	75
4.3	実験回路定数	77
4.4	フロリナートの物性値	78
4.5	鎖交磁束密度計算結果 (直径 0.15 mm の小金属球)	81
4.6	各測定点の室温からの温度上昇 ΔT °C	85
5.1	E 型誘導加熱コイルおよび EI 型誘導加熱コイルのコア内の鉄損比較	96
5.2	実験回路定数	104
5.3	冷却用チラーの仕様	109

第1章 序論

高分子化学の著しい発展に伴い、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用途は広範囲に及んでいる。中でも液晶ディスプレイや二次電池、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の需要が飛躍的に拡大している⁽¹⁾。一方で、リチウムイオン電池の発熱・発火事故をはじめとするフィルムに混入した導電性異物による品質低下が問題となっている⁽²⁻⁶⁾。この導電性異物は主に高機能フィルム製造機器の破損や摩耗によって混入した鉄やステンレスなどの小金属と推測され、高機能フィルムの高品質化において小金属検出技術の開発が必要不可欠となっている。

上述した小金属混入の対策として、高機能フィルムの製造・加工工程で小金属の有無を検査する小金属検出技術がある。高機能フィルムの検査には、磁気や CCD (Charge Coupled Device) カメラおよび近赤外カメラによる画像処理、X線などを応用した検出技術が実用化されている⁽⁷⁻¹¹⁾。しかしながら、これらの検出技術ではフィルムサイズや材質、搬送速度等による影響から直径 0.1 mm 以下の小金属から検出が困難になるとされており、より高感度な小金属検出技術が求められている。上述の通り、混入する小金属が主に鉄や非磁性のステンレスであることに着目し、文献(12)では高周波誘導加熱 (IH: Induction Heating) による小金属検出法が提案されている。高周波誘導加熱による小金属検出装置は高周波電源と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る。高周波電源から高周波電流を誘導加熱コイルに流して高周波交番磁界を発生させ、フィルム上の小金属を高周波誘導加熱によって加熱することで、その温度変化を利用して検出を行う。加熱された小金属の熱は小金属を中心に周囲のフィルムに広がる。このとき、サーモグラフィックカメラによりフィルムを観測することによって、小金属が実寸よりも拡大されるため検出が容易となる。したがって、従来の小金属検出技術以上に高感度な検出が可能になると考えられる。しかしながら、文献(12)で提案する小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では高機能フィルムの製造ラインに適用困難である。

本論文では、高周波誘導加熱による小金属検出装置の実用化を目的として、広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案する。また、小金属を誘導加熱するために最適な周波数で駆動可能であり、数百ミリメートル幅のフィルムに対して広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルが要求する大電力出力可能な SiC-MOSFET 高周波インバータを使用し、高機能フィルムの製造工程の小金属検出装置に適用可能である

ことを示す。提案した高機能フィルムの製造工程において広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた小金属検出装置を試作し、小金属加熱実験により実用性を確認する。本章では、高機能フィルムの市場と技術動向について説明する。次に、リチウムイオン電池の発熱・発火事故を例に高機能フィルムの小金属混入による事故例を示す。最後に本論文の研究目的と概要について述べる。

1.1 高機能フィルムの市場と技術動向

高機能フィルムとは、ベース材となるプラスチックフィルムにコーティングや蒸着等の表面処理やラミネート等の二次加工を施したもの、またはベースフィルム原料自体の高機能化を図ったものをいい、エレクトロニクス、自動車、エネルギー、包装、メディカルなど非常に広範な分野で応用されている^①。図 1.1 に、高機能フィルムの分野別世界市場を示す。高機能フィルムは、海外および国内ともに緩やかな拡大傾向にある。特に FPD (Flat Panel Display) 分野における高機能フィルムの市場規模は大きく、日系メーカーが得意とする領域である。また、近年はスマートフォンおよびタブレットなどタッチパネル関連分野が高い成長率を示している。エレクトロニクス分野は、新興国などでの需要は旺盛であり、今後も市場の拡大が予想される。一方、国内市場はアベノミクスによる経済成長が期待され、2020 年の東京五輪開催決定など、内需拡大の機運の高まりと相まって、建材・インフラ関連やライフサイエンス関連でのフィルムの需要拡大も予測される。図 1.2 に、高機能フィルムの分野別年平均成長率を示す。高機能フィルムにおける成長分野として、エネルギー分野、自動車分野およびバリアフィルム分野が挙げられる。太陽電池およびリチウムイオン電池の市場拡大、中国を中心とした新興国での需要拡大、車載電装化や HV および EV の普及などの影響が多く市場に波及し、成長要因となっている。また、ウェアラブル機器市場の立ち上がりや IoT 活用の拡大も市場の成長に寄与している。一方、ディスプレイ分野および半導体・実装分野は製品単価の下落などにより成熟分野となっている。

高機能フィルムの主な応用製品を表 1.1 に示す^①。FPD 関連では、ディスプレイのバックライトに使用される高価格な LED (Light Emitting Diode) の個数を減らしコストダウンするための輝度向上フィルム、また、タブレット PC (Personal Computer) やスマートフォンなどで知られるタッチパネル用の透明導電性フィルム、光学用透明粘着シートなどで応用されている。半導体・実装関連では、半導体素子製造の材料であるウエハの保護に使用されるグラインドテープやダイシングテープ、また、絶縁テープとしても活躍している。エネルギー関連では、太陽電池パネルを保護するバックシート、携帯電話やパソコンのバッテリーとして広く普及しているリチウムイオン電池の正・負極を分離するセパレータ素材などに用いられている。その他、建材・インフラ分野では建築物の老朽化による漏水を防ぐ防水シートや震災による瓦礫や低汚染物質の仮置き場に使用される遮水シート、ライフサイエンス分野では

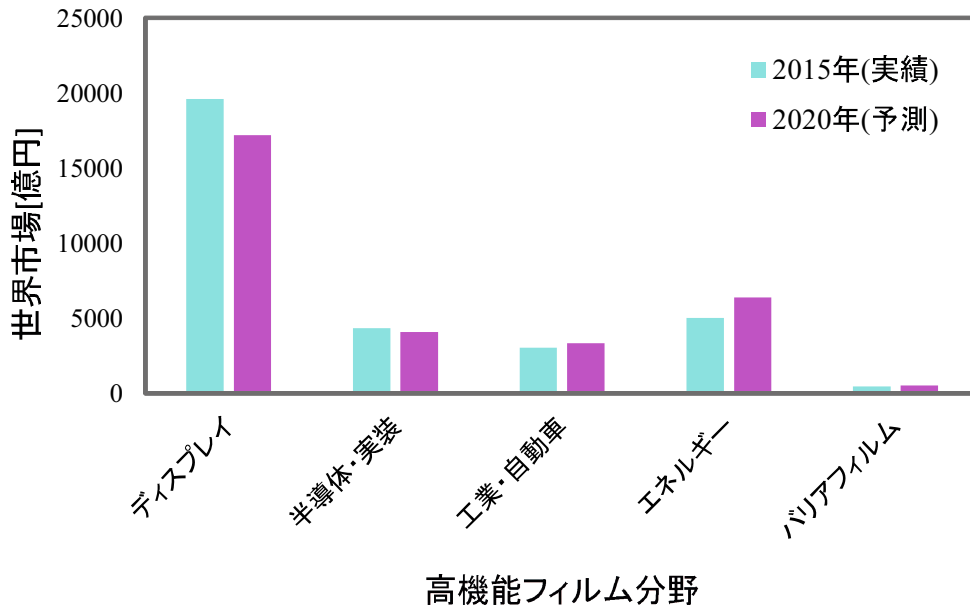


図 1.1 高機能フィルムの分野別世界市場

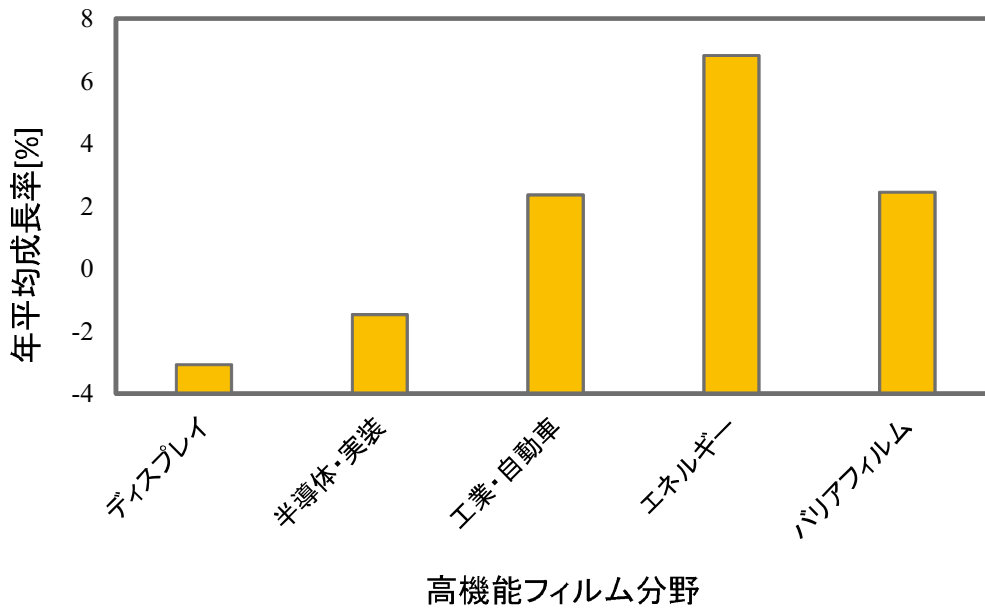


図 1.2 分野別年平均成長率 (2015~2020 年)

医療向けのフィルムで使用される通気性フィルムなどがあり、今後も様々な応用分野で市場拡大が予想される⁽¹⁾。

表 1.1 各分野の応用製品群

分野	応用製品群
ディスプレイ	偏光板, 偏光板保護フィルム, 位相差フィルム, 表面処理フィルム, モスアイフィルム, 輝度向上フィルム, 拡散シート, 反射フィルム, 透明電導性フィルム, ハードコートフィルム, プラスチックフィルム基板, 光学用透明粘着シート (OCA), プロテクトフィルム, FPD用離型フィルム, OLED用位相差フィルム
半導体・実装	バックグラインドテープ, ダイシングテープ, ダイボンドフィルム, 高耐熱接着フィルム, ドライフィルムレジスト, 層間絶縁フィルム (アクティブ基板用), カバーレイフィルム, FPC用離型フィルム
工業・自動車	加飾フィルム, 転写フィルム, 自己修復フィルム, モーター用絶縁フィルム, 産業用絶縁フィルム, 自動車用ウィンドウフィルム, CFRP用離型フィルム, フィルムコンデンサー用フィルム, MLCC用離フィルム
エネルギー	太陽電池用封止フィルム, 太陽電池用バックシート, リチウムイオン電池用セパレータ, リチウムイオン電池用ラミネートフィルム, 圧電フィルム
バリアフィルム	透明蒸着フィルム, ONY系共押出フィルム, EVOH系共押出OPPフィルム, PVAコートOPPフィルム, ハイブリッドバリアフィルム, ナノコンポジットコートフィルム
建材・インフラ	透湿防水シート, 防湿気密フィルム, 建築用ウィンドフィルム, 遮音シート, 化粧シート, 真空断熱材用フィルム, 光触媒フィルム, 防水シート, 遮水シート, コンクリート補強用シート
ライフサイエンス	テープ材用隔離フィルム, 癒着防止フィルム, イージーピールフィルム, 方向性フィルム, 通気性フィルム, 生分解性マルチフィルム

1.2 高機能フィルムの小金属混入が疑われる事故例

近年、高機能フィルムがエレクトロニクス製品へ広く応用されているが、フィルムの製造工程で混入する小金属による品質低下が問題となっている。小金属の多くは、フィルム製造機器の破損や摩耗によって混入した数mmから数十 μm の鉄やステンレスなどの金属片であり、こうした小金属はフィルムの電気的性質に悪影響を与えるため、エレクトロニクス製品の機能性や安全性の低下に繋がる。例として、パソコンや携帯電話などの電子機器から航空機や衛星まであらゆるバッテリーとして活用されているリチウムイオン電池の発熱・発火事故が挙げられる⁽²⁻⁵⁾。図 1.3 に、リチウムイオン電池の構造を示す。リチウムイオン電池と

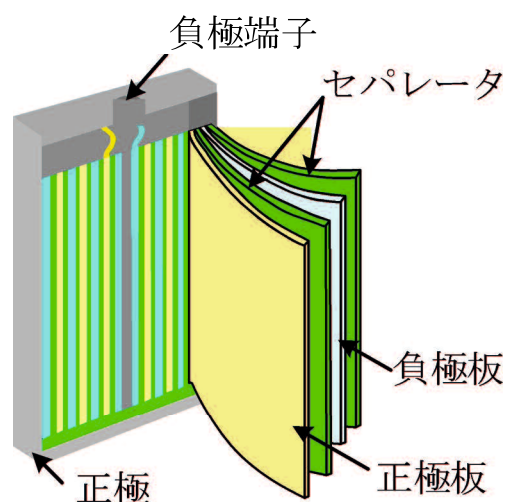


図 1.3 リチウムイオン電池の内部構造

は、一般的にコバルト酸リチウムの正極板、黒鉛の負極板、リチウム塩を溶解させた有機溶媒の電解液および正極板と負極板を分離するセパレータから構成される⁽¹³⁾。また、リチウムイオン電池は従来の電池よりも高容量かつ軽量という特徴があり、小型軽量化、高性能化が進むパソコンや携帯電話などの電子機器に搭載されている。他の二次電池に比べエネルギー密度が高く、可燃性の有機溶媒を使用するため事故を起こす確率が高い。その主な原因が電極材やセパレータ素材として使用されている高機能フィルムに混入した小金属による内部短絡である。2006年に発生したデル社製ノートパソコンに搭載されたソニー社製リチウムイオン電池の発火事故もセパレータに混入した小金属が原因とされており、ソニーは全世界におよぶ大規模なりチウムイオン電池の回収・交換を実施した。また、2016年に東芝社製ノートパソコンに搭載されているパナソニック社製のリチウムイオン電池の不具合による発火事故に至る可能性があることを発表した⁽¹⁴⁾。このリチウムイオン電池の発火事故に至る可能性の要因としてバッテリー内に異物が混入したことによるものと特定されている⁽²⁻⁵⁾。これらの文献の製品事故情報によると、2013年度から2017年度の5年間に582件のバッテリーの発火事故が報告されている。図 1.4 に年度別リチウムイオン電池の発火事故件数を示す⁽⁴⁻⁶⁾。図 1.4 より、2013年度から2017年度の5年間に発生した582件のリチウムイオン電池の発火事故うち402件(69%)が火災の被害に及んでいる。また、リチウムイオン電池の発火事故の原因は、製品の不具合によるものが368件(71%)と最も多く、主な原因は高機能フィルムの製造工程において小金属が混入したことによるものである。この製品の不具合による368件の発火事故のうち、209件(36%)はリコール対象製品であり製品の交換や回収が必要であった。また、2013年度から2017年度にかけてリチウムイオン電池の発熱・発火事故は増加傾向にあり、2016年度から毎年100件以上を超えている。これらより、高機能フィルムの市場拡大に伴い、今後もリチウムイオン電池の発熱・発火事故の増加が予想される。

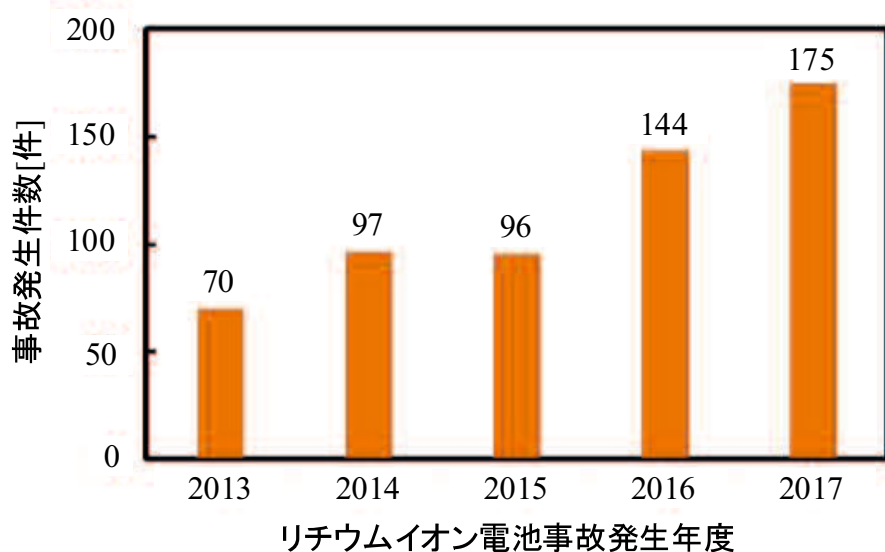


図 1.4 年度別リチウムイオン電池の発火事故件数

1.3 従来の小金属検出技術

小金属混入の対策として、高機能フィルムの製造・加工工程で小金属の有無を検査する小金属検出技術がある。高機能フィルムの検査用として実用化されているものでは、磁気、CCD カメラおよび近赤外カメラによる画像処理、X 線などを応用した検出技術がある⁽⁷⁻¹¹⁾。図 1.5 に CCD カメラを用いた画像処理による小金属検出法を示す⁽⁷⁾。CCD カメラの画像処理による小金属検出技術は、フィルム状の色や凹凸などの特徴を計測し、画像解析することで小金属検出を行う。小金属の材質は問わないが、光沢のあるフィルムやフィルム素材と同色の小金属の検出には不向きである。しかし、高速走行するフィルムにおいても高い感度で直径 0.1 mm 以下の検出作業が可能であるため、最も主流な検出技術である⁽⁷⁾。しかしながら、CCD カメラを用いた画像処理による小金属検出法は前述した発熱・発火事故の要因となる鉄やステンレスなどの金属片だけでなく、石、ガラス、硬い樹脂片などあらゆる材質を検出してしまふ。また、混入金属が搬送される高機能フィルムの裏面に付着している場合は、検出不可能といった課題がある。CCD カメラを用いた画像処理による小金属検出法の特徴を以下にまとめる。

- 石、ガラス、硬い樹脂片などあらゆる材質を検出するため、金属のみの検出は不可能
- 直径 0.1 mm 以下の異物を検出可能
- 高機能フィルム搬送時において適用可能
- 画像処理を行っているため、高機能フィルム裏面に付着した異物は検出不可能

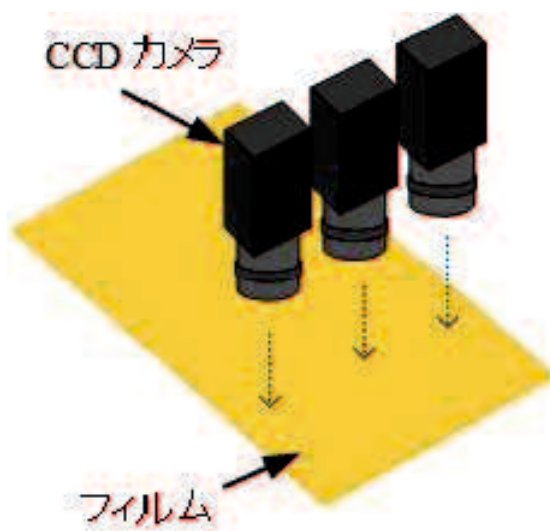


図 1.5 CCD カメラを用いた小金属検出法

図 1.6 に電磁誘導方式小金属検出法を示す⁽⁹⁾。電磁誘導方式を用いた小金属検出技術は、小金属が発するわずかな磁界を磁気センサーで検知し、小金属を検出する。そのため、直径 0.1 mm 以下の金属は検出不可能となる。また、磁気は物体の磁性に依存するため、磁性金属の検出は得意であるが、非金属に加え非磁性金属の検出はできない。前述したように、高機能フィルムの製造工程によって混入する金属片は鉄やステンレスであるため、非磁性金属であるステンレスの検出には不向きである。しかし、高速走行するフィルムにおいても高感度での検出が可能である⁽⁹⁾。本検出法は、小金属が発するわずかな磁界を磁気センサーで検知するため高機能フィルムの裏面に付着した小金属は検出可能となる。電磁誘導方式を用いた小金属検出法の特徴を以下にまとめる。

- 磁性金属の検出は得意であるが、非金属は検出不可能
- 直径 0.1 mm 以下の異物を検出不可能
- 高機能フィルム搬送時において適用可能
- 高機能フィルム裏面に付着した異物も検出可能

図 1.7 に X 線を用いた小金属検出法を示す⁽¹⁰⁾。X 線小金属検出技術は、X 線を細いビーム状にしてフィルムに照射し、その透過量から混入異物を検出する。また、図 1.7 に示す X 線を用いた小金属検出法では、CCD カメラによる画像処理と同様に発熱・発火事故の要因となる鉄やステンレスなどの金属片以外に石、ガラス、硬い樹脂片などあらゆる材質を直径

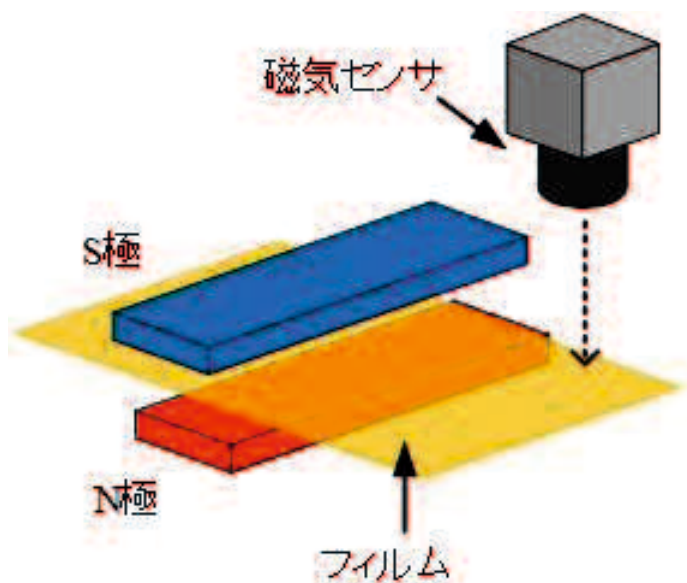


図 1.6 電磁誘導方式小金属検出法

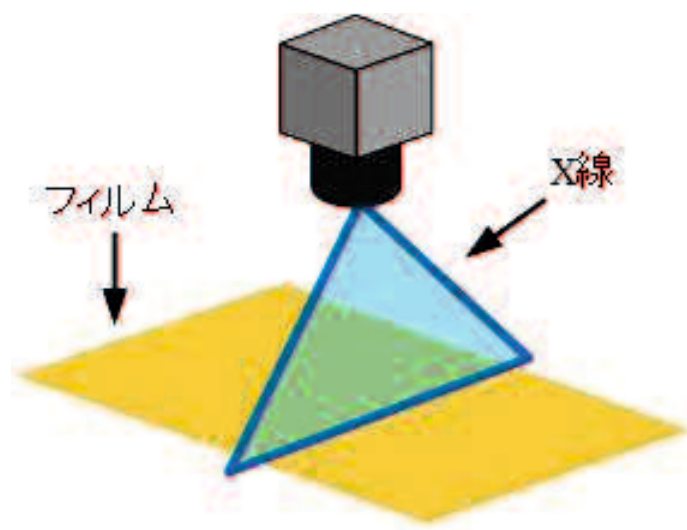


図 1.7 X線を用いた小金属検出法

0.1 mm 以下の異物を高感度で検出することができる。しかし、高速走行するフィルムでは検出感度が低下するため、インラインでは用いられていない⁽¹⁰⁾。X線を用いた小金属検出法の特徴を以下にまとめる。

- 照射した X 線の透過量から異物を検出するため、金属のみの検出は不可能

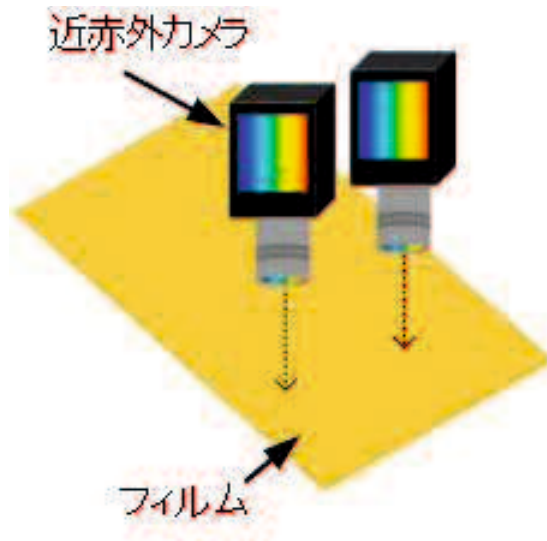


図 1.8 近赤外カメラを用いた小金属検出法

- 直径 0.1 mm 以下の異物を検出可能
- 高機能フィルム搬送時において適用不可能
- 高機能フィルム裏面に付着した異物も検出可能

図 1.8 に近赤外カメラを用いた小金属検出法を示す⁽¹¹⁾。近赤外カメラを用いた小金属検出法は、赤外光と可視光を高機能フィルムに照射する。高機能フィルム上に混入した異物の赤外光と可視光の反射率によって判別する。小金属の反射特性を利用するため、直径 0.1 mm 以下の金属および非金属の検出が可能となる。文献(11)では、近赤外カメラによる小金属検出装置として多波長検査技術を利用した高機能フィルム検査システムを提案している。しかしながら、混入金属が搬送される高機能フィルムの裏面に付着している場合は、検出不可能といった課題がある。文献(11)では、近赤外カメラによる小金属検出装置の一種である多波長検査技術を利用した高機能フィルム検査システムを提案している。近赤外カメラを用いた小金属検出法の特徴を以下にまとめる。

- 反射特性を利用するため金属のみの検出が可能
- 直径 0.1 mm 以下の異物を検出可能
- 高機能フィルム搬送時において適用可能
- 高機能フィルム裏面に付着した異物は検出不可能

表 1.2 従来の小金属検出技術の特長と比較

検出方法	CCD カメラ	電磁誘導方式	X 線	近赤外カメラ
金属のみを検出	—	△ (磁性体のみ)	—	○
0.1 mm 以下の異物検出	○	—	○	○
フィルム搬送時に適用	○	○	—	○
フィルム裏面の異物検出	—	○	○	—

表 1.2 に、従来の小金属検出技術の主な特徴と比較を示す。一般的に小金属検出装置に使われる CCD カメラ、電磁誘導方式、X 線、近赤外カメラでは小金属検出装置で高機能フィルムの製造工程において適用困難であることが確認できる。さらに近年、電気自動車やスマートフォンなどの普及により二次電池の高出力化・大容量化・軽量化に伴い、セパレータに用いられる高機能フィルムの薄型化が進み、より高感度かつ有効的な小金属検出技術が求められている。そこで、混入する小金属が主に鉄や非磁性のステンレスであることに着目し、文献 (12) では高周波誘導加熱による小金属検出法が提案されている。高周波誘導加熱による小金属検出装置は高周波電源と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る。高周波誘導加熱とは、金属に交番磁界を鎖交させ、その際に発生する誘導起電力によって導体に渦電流を流し、この渦電流と金属の固有抵抗によるジュール熱損失により金属を加熱する方式をいう⁽¹⁵⁾。一般的に、金属に鎖交させる交番磁界の周波数が 1 kHz 未満では低周波誘導加熱、それ以上では高周波誘導加熱という⁽¹⁶⁾。提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出法では、高機能フィルムに混入した小金属に高周波交番磁界を鎖交させることで誘導加熱し、その温度変化をサーモグラフィックカメラなどの温度測定器を使い検知することにより小金属を検出する。この検出法の特徴は、検出に熱を利用することである。小金属を加熱することにより、小金属のみの温度変化だけでなく熱伝導により小金属周囲のフィルムも加熱される。その時、サーモグラフィックカメラ上では小金属が実寸より拡大されるため高い検出感度が期待できる。高周波誘導加熱は金属の物性によって発熱特性が変わる場合があるが、原理上ステンレスや鉄などの磁性金属だけでなく、アルミや銅などの非磁性金属の加熱も可能である⁽¹⁶⁾。そのため、従来の小金属検出技術に代わる新たな技術として期待できる。しかしながら、文献 (12) で先に提案されている小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では高機能フィルムの製造ラインに適用困難である。そこで本論文では、高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用化を目的として、広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案する。また、小金属を誘導加熱するために最適な周波数で駆動可能であり、数百ミリメートル幅のフィルムに対して広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルが要求する大電力出力可能な SiC-MOSFET 高周波インバータを使用し、高機能フィルムの製造工程の小金属検出装置に適用可能であることを示す。SiC-MOSFET は、スイッチングデバイスとして広く用いられている Si パワーデバイス

と比較して、高周波駆動かつ大電力出力可能という特長を有しており、提案する小金属検出装置における高周波電源に適用可能である⁽¹⁷⁾。そこで、提案した高機能フィルムの製造工程において広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた小金属検出装置を試作し、小金属加熱実験により実用性を確認する。

1.4 本研究の目的

前節で述べた研究背景より、従来の小金属検出技術に代わる新たな技術として期待できる高周波誘導加熱方式小金属検出装置が提案されている⁽¹²⁾。文献(12)で提案されている高周波誘導加熱を用いた小金属検出装置は高周波電源と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る。高周波電源から高周波電流を誘導加熱コイルに流して高周波交番磁界を発生させ、フィルム上の小金属を高周波誘導加熱によって加熱することで、その温度変化を利用して検出を行う。加熱された小金属の熱は小金属を中心に周囲のフィルムに広がる。このとき、サーモグラフィックカメラによりフィルムを観測することによって、小金属が実寸よりも拡大されるため検出が容易となる。しかしながら、文献(12)で提案する小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では高機能フィルムの製造ラインに適用困難である。そこで本論文では、小金属検出装置における誘導加熱コイルのコア形状が実用的ではないことから広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状を提案し、より実用的な小金属検出装置について論じる。以下に本論文の目的を要約する。

- 小金属を誘導加熱するために最適な周波数で駆動可能であり、数百ミリメートル幅のフィルムに対して広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルが要求する大電力出力可能な SiC-MOSFET を小金属検出用の高周波電源に適用可能であることを示す。
- 広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状を提案し、磁界解析ソフトおよび小金属加熱実験から有効性を確認する。
- 小金属検出装置における誘導加熱コイルの鉄損を低減に着目し、広範囲に誘導加熱領域かつ誘導加熱コイルの鉄損を低減可能な誘導加熱コイルのコア形状を提案し、磁界解析ソフトおよび小金属加熱実験から有効性を確認する。

1.5 本研究の概要

本論文は6章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究背景として高機能フィルムの市場動向および高機能フィルムの小金属混入によるリチウムイオン電池の発熱・発火事故例について示し、従来の小金属検出法の特徴

および課題について説明し小金属検出法の必要性を述べる。さらに、本研究の本論文の概要について説明する。

第2章では、国内外において関連する小金属検出法の研究開発動向を示し本研究の位置づけを明らかにする。まず、前述した従来の小金属検出法および国内外における小金属検出法について詳細に説明する。さらに、他の文献で提案されている小金属検出装置の実用性における問題点を明らかにする。次に、混入する小金属が主に鉄や非磁性のステンレスであることに着目し、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出法の有効性を明らかにする。先に提案されている高周波誘導加熱を用いた小金属検出装置は高周波電源と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る。高周波電源から高周波電流を誘導加熱コイルに流して高周波交番磁界を発生させ、高機能フィルム上の小金属を高周波誘導加熱によって加熱することで、その温度変化を利用して検出を行う。また、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用化に向けた課題を述べている。実用化に向けた課題として、製造ラインを流れる数百ミリメートル幅の高機能フィルムに対して一様な高周波交番磁界を印加可能な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。また、その誘導加熱コイルが要求する高周波の大電力を出力可能な高周波電源も要求される。よって、この検出装置の実用化に向けて誘導加熱コイルのコア形状と高周波電源の両面での実用化が求められている。次に、ワイドバンドギャップパワーデバイスとして普及している SiC パワーデバイスならびに GaN パワーデバイスの特長や現在の技術動向についても説明する。そこで、ワイドバンドギャップパワーデバイスである SiC-MOSFET を誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源に使用することにより、前述した高周波電源の実用化を実現可能であることを説明する。

第3章では、小金属の高周波誘導加熱を実現する周波数と磁束密度の関係について実験結果により検討し、直径 0.1 mm 級の小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数条件を明らかにしている。そこで、直径 0.1 mm 級の小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数を 400 kHz に決定し、2章で説明した高周波駆動かつ大電力出力可能な SiC-MOSFET を用いた高周波インバータを試作する。試作した 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを小金属検出装置に適用し、先に提案されている誘導加熱コイルを用いて小金属加熱実験を行う。誘導加熱実験から 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用性を確認する。さらに、400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率および損失分析を行う。SiC-MOSFET 高周波インバータにおける全損失のうち導通損失が支配的であることに着目し、SiC-MOSFET を並列接続することによって、導通損失低減効果およびさらなる電力変換効率向上を確認する。

第4章では、先に提案されている小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では高機能フィルムの製造工程に適用困難であることから、広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導

加熱コイルのコア形状および配置を提案する。磁界解析ソフトを用いて提案した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状の有効性を確認する。また、提案した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して小金属検出装置を構築する。試作した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて小金属加熱実験を行い、提案する高周波誘導加熱方式小金属検出装置が高機能フィルムの製造工程に適用可能であることを明らかにする。

第 5 章では、第 4 章で提案した誘導加熱コイルにおいて鉄損の低減に着目し、広範囲に誘導加熱領域を拡大可能かつ誘導加熱コイルにおけるコアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案する。また、磁界解析ソフトを用いて広範囲に誘導加熱領域を拡大可能かつ誘導加熱コイルの鉄損を低減可能な誘導加熱コイルの有効性を明らかにする。提案した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して小金属検出装置を構築する。試作した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能かつ誘導加熱コイルの鉄損を低減可能な誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて小金属加熱実験を行い、提案する高周波誘導加熱方式小金属検出装置が高機能フィルムの製造工程に適用可能であり、より実用的な小金属検出装置であることを明らかにする。

第 6 章は、本研究で得られた研究成果および今後の研究課題を述べている。

第2章 小金属検出技術の研究開発動向ならびにワイドバンドギャップパワーデバイスの技術動向

本章では、研究背景で述べたリチウムイオン電池の発熱・発火事故をはじめとする高機能フィルムに混入した小金属を検出する装置が必要不可欠であることから、他の小金属検出装置の研究開発動向について説明する。まず、前述した従来の小金属検出法および国内外における小金属検出法について詳細に説明する。さらに、他の文献で提案されている小金属検出装置の実用性における問題点を明らかにする。次に、混入する小金属が主に鉄や非磁性のステンレスであることに着目し、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出法の有効性を明らかにする。また、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用化に向けた課題および誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向を述べている。誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向から、高周波誘導加熱方式小金属検出装置用の高周波電源の回路方式および使用する半導体デバイスを決定する。次に、ワイドバンドギャップパワーデバイスとして普及している SiC パワーデバイスならびに GaN パワーデバイスの特長や現在の技術動向についても説明する。そこで、ワイドバンドギャップパワーデバイスである SiC-MOSFET を誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源に使用することにより、誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源の実用化を実現可能であることを説明する。

2.1 小金属検出装置の研究開発動向

本章では、国内外において関連する小金属検出法の研究開発動向を示し本研究の位置づけを明らかにする。小金属の混入は高機能フィルムだけでなく、食品の製造ラインにおいても起こりうる。食品の製造ラインでは、食品製造機器はステンレスを中心とした金属が多用されている⁽¹⁸⁾。ステンレスはネジの脱落やパーツの破損など、機器のメンテナンスや管理不足により混入が発生しやすい。高機能フィルムや食品に混入する小金属の検出に超電導量子干渉素子 (Superconducting quantum interference device: SQUID) を用いた検出法が提案されている⁽¹⁹⁻²⁸⁾。SQUID はジョセフソン接合を含む環状超電導体に基づく、極めて弱い磁界の検出に用いられる検出感度の高い磁気センサの 1 種である。地磁気の 1 億～10 億分の 1 程度の極めて小さな磁束密度を計測可能である。環状超電導に極めて弱い磁界を印加することで

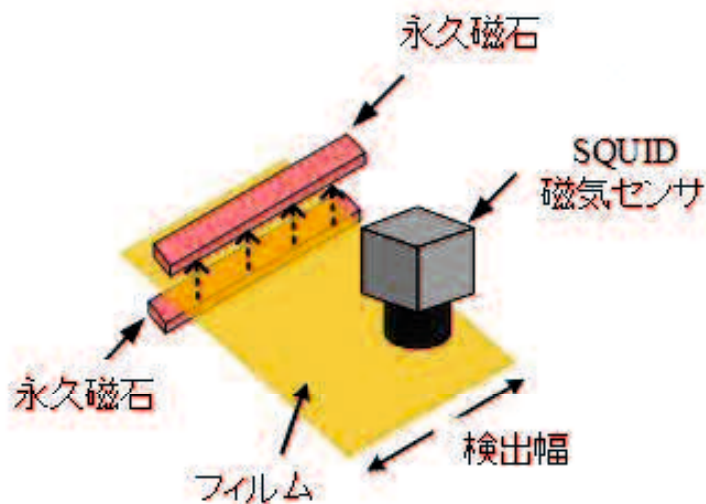


図 2.1 SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法

環状超伝導体に印加する磁界を電圧に変換可能である。これらの特長から、SQUID 磁気センサを用いた検出装置では従来のセンサでは計測不可能であった医療応用、地球物理応用、材料評価応用等の幅広い分野での応用が期待されている。図 2.1 に、SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法を示す⁽¹⁹⁻²⁸⁾。文献(19)では、SQUID 磁気センサを用いた小金属検出装置を提案し、高機能フィルムに混入した直径 0.1 mm 以下の鉄球を検出した。また、文献(20)および(21)では、直径 0.3 mm のステンレス球を検出している。しかしながら、これらの文献において SQUID 磁気センサを用いた小金属検出装置は実用的ではない。その理由として、SQUID の検出幅が狭く実際に製造される数百ミリメートルの幅を有する高機能フィルムにおいて適用不可能であるからである。また、文献(27)および(28)において、SQUID の小金属検出領域を拡大するために、複数のチャンネルを使用した SQUID が提案されている。例えば、8 チャンネル SQUID 磁気センサを用いた小金属検出装置が提案されているが複数のチャンネルを使用した場合においても小金属の検出領域は 70 mm である。よって、SQUID 磁気センサにおいて複数のチャンネルを使用した場合においても実用的な高機能フィルムの製造ラインには適用するのは困難であるといえる。さらに、提案されている SQUID を用いた検出法の実用化における課題として挙げられるのが、液体窒素を用いて -196° の超電導状態を維持するための冷却装置である⁽¹⁹⁻²⁸⁾で。SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法の特徴を以下にまとめる。

- 極めて弱い磁界を検出するため金属のみの検出が可能
- 直径 0.1 mm 以下の金属異物を検出不可能

表 2.1 従来の検出法および SQUID 磁気センサを用いた小金属検出の特長と比較

検出方法	CCD カメラ	電磁誘導方式	X 線	近赤外カメラ	SQUID
金属のみを検出	—	△ (磁性体のみ)	—	○	○
0.1 mm 以下の異物検出	○	—	○	○	○
フィルム搬送時に適用	○	○	—	○	—
フィルム裏面の異物検出	—	○	○	—	○

- 環状超伝導体大きさに依存するため、数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムの製造工程に適用困難
- 高機能フィルム裏面に付着した異物も検出可能
- 液体窒素を用いて超電導状態を維持するための冷却装置が必要

また、文献(11)では、多波長検査技術を利用した高機能フィルム検査システムを提案している。これは、従来の近赤外カメラを用いた小金属検出法と同様の原理である。文献(11)によると誘導加熱コイルを用いた検出方式においては、ステンレスなどの非磁性金属の検出は困難であると主張している。表 2.1 に、従来の小金属検出法および SQUID を用いた小金属検出法の特徴と比較を示す。表 2.1 の比較より、従来の小金属検出法および SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法はリチウムイオン電池の発熱・発火事故の要因となる金属、直径 0.1 mm 以下の小金属の検出、高機能フィルム搬送時における適用、高機能フィルムの裏面に付着した小金属の検出の 4 つの課題点を満足していないことが確認できる。これらの小金属検出法に関連する研究によると、実際の高機能フィルムの製造ラインに適用可能な実用的な小金属検出装置は提案されていない。

そこで文献(12)では、前述した検出法の課題点を解決可能な高周波誘導加熱方式小金属検出法を提案されている。また、誘導加熱方式小金属検出法を用いて直径 0.1 mm 級の非磁性金属であるステンレスを検出可能であることを明らかにしている。

2.2 高周波誘導加熱方式小金属検出技術

従来の小金属検出法および SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法の実用化における課題を解決可能な小金属検出技術として高周波誘導加熱を用いた小金属検出技術が提案されている⁽¹²⁾。高周波誘導加熱とは、金属に交番磁界を鎖交させ、その際に発生する誘導起電力によって導体に渦電流を流し、この渦電流と金属の固有抵抗によるジュール熱損失により金属を加熱する方式をいう⁽¹⁶⁾。文献(12)の小金属検出装置は、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る。提案されている小金属検出法では、

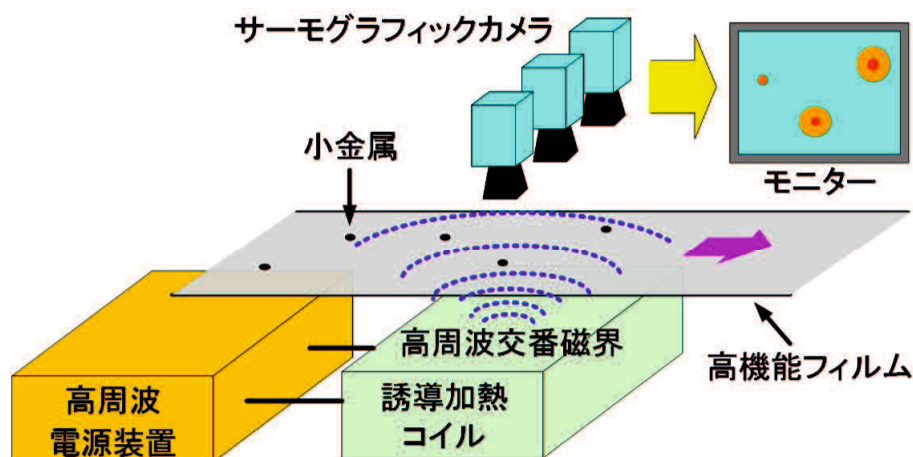


図 2.2 誘導加熱方式小金属検出装置のイメージ図

高機能フィルムに混入した小金属に高周波交番磁界を鎖交させることで誘導加熱し、その温度変化をサーモグラフィックカメラなどの温度測定器を使い検知することにより小金属を検出する。この検出法の特徴は、検出に熱を利用することである。小金属を加熱することにより、小金属のみの温度変化だけでなく熱伝導により小金属周囲のフィルムも加熱される。その時、サーモグラフィックカメラ上では小金属が実寸より拡大されるため高い検出感度が期待できる。また、文献(12)で提案されている誘導加熱方式小金属検出法を用いて非磁性金属であるステンレスを検出可能であることを明らかにしている。高周波誘導加熱は金属の物性によって発熱特性が変わる場合があるが、原理上ステンレスや鉄などの磁性金属だけでなく、アルミや銅などの非磁性金属の加熱も可能である⁽¹⁶⁾。そのため、従来の小金属検出技術に代わる新たな技術として期待できる。図 2.2 に高機能フィルムの製造工程に適用した場合の高周波誘導加熱方式小金属検出装置の構成図を示す。製造ラインを流れる高機能フィルムに誘導加熱コイルから高周波交番磁界を発生させる。フィルム上では小金属が誘導加熱により発熱し、高機能フィルムへの熱伝導により実寸より拡大された小金属をサーモグラフィックカメラによって検出することができる。一方で、この検出装置の実用化を想定した場合、いくつかの課題も存在する。まず、製造ラインを流れる数メートル幅のフィルムに対して一様な高周波交番磁界を印加可能な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。また、その誘導加熱コイルが要求する高周波の大電力を出力可能な高効率な高周波電源も要求される。よって、この検出装置の実用化に向けて誘導加熱コイルと高周波電源の両面での最適化が求められている。

2.3 誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向

本節では、誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向について説明する⁽²⁹⁻³⁶⁾。また、誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向から本論文で提案する小金属検出装置における高周波インバータの回路トポロジーおよび高周波インバータに使用する半導体デバイスを決定する。一般的に、金属に鎖交させる交番磁界の周波数が 1 kHz 未満では低周波誘導加熱、それ以上では高周波誘導加熱という⁽¹⁶⁾。低周波誘導加熱は被加熱物体の表面ではなく均一な加熱が可能といった特長があるが、被加熱物体に与える加熱エネルギーが小さいことが欠点に挙げられる。一方、高周波誘導加熱は被加熱物体に与える加熱エネルギーが大きく、被加熱物体の表面加熱が可能となる。しかし、インバータや共振回路が必要となり高価となるのが欠点である。高機能フィルム上に混入した直径 0.1 mm 級の小金属の誘導加熱を目的としているため、加熱エネルギーが大きい高周波誘導加熱を使用する。高周波インバータを用いた誘導加熱では、主に誘導融着や誘導溶解といった産業用途に使用される⁽²⁹⁾。また、高周波インバータは負荷の用途により様々な回路トポロジーがあり、大きく一石型、ハーフブリッジ型、フルブリッジ型に分けられる。基本的にインバータ出力端の力率を改善するために共振用のインダクタやキャパシタが接続される。このため、ターンオン、ターンオフのどちらか一方は電流共振によるゼロ電圧ゼロ電流スイッチング (ZV&ZCS : Zero Voltage Zero Current Switching) 動作が得られやすい。これらの回路構成を図 2.3 に示す。一石型インバータの特徴は、構造が単純で安価であるが出力電力が 3 kW 程度と小さい。ハーフブリッジ型インバータの特徴は、一石型インバータと比較すると構造は複雑となるが、5~10 kW と中容量の加熱に適している。フルブリッジ型インバータの特徴は、構造は複雑になるが 15 kW 以上の大容量の誘導加熱が可能となる。また、高周波インバータの定格出力電力は入力電圧、負荷抵抗値が同一であるとき、フルブリッジを 100 % とすると一石型で 50~60 % 程度となり、ハーフブリッジ型で 60 % となる⁽³⁰⁾。したがって、要求される出力電力の大きさ、使用する半導体デバイスの定格などに応じて回路構成を決定する必要がある。これらの回路構成図の特徴を表 2.2 にそれぞれ示す。表 2.2 より、各回路方式の特徴として、1 石型インバータは構成がシンプルであり、スイッチ素子の責務が大きい。ハーフブリッジインバータは中性点維持が必要となる。フルブリッジインバータは必ず 2 つのスイッチを導通し、電力制御範囲が広い。これらの特徴より、フルブリッジインバータは表 2.2 の回路方式の中で出力電力が最も高いことが分かる。そのため、小金属検出装置用の高周波インバータには直列共振型フルブリッジ方式を採用する。また文献 (31) では、フルブリッジ方式を採用した誘導加熱用高周波インバータについて詳細に説明されており、誘導加熱用高周波インバータの各種容量および用途に応じた回路構成および使用する半導体デバイスを説明している。表 2.3 に誘導加熱用高周波インバータの容量および用途による分類を示す⁽³¹⁾。図 2.4 に文献 (31) で提案されるサイリスタインバータの回路構成図を示す。表 2.3 および図 2.4 に示すサイリスタイ

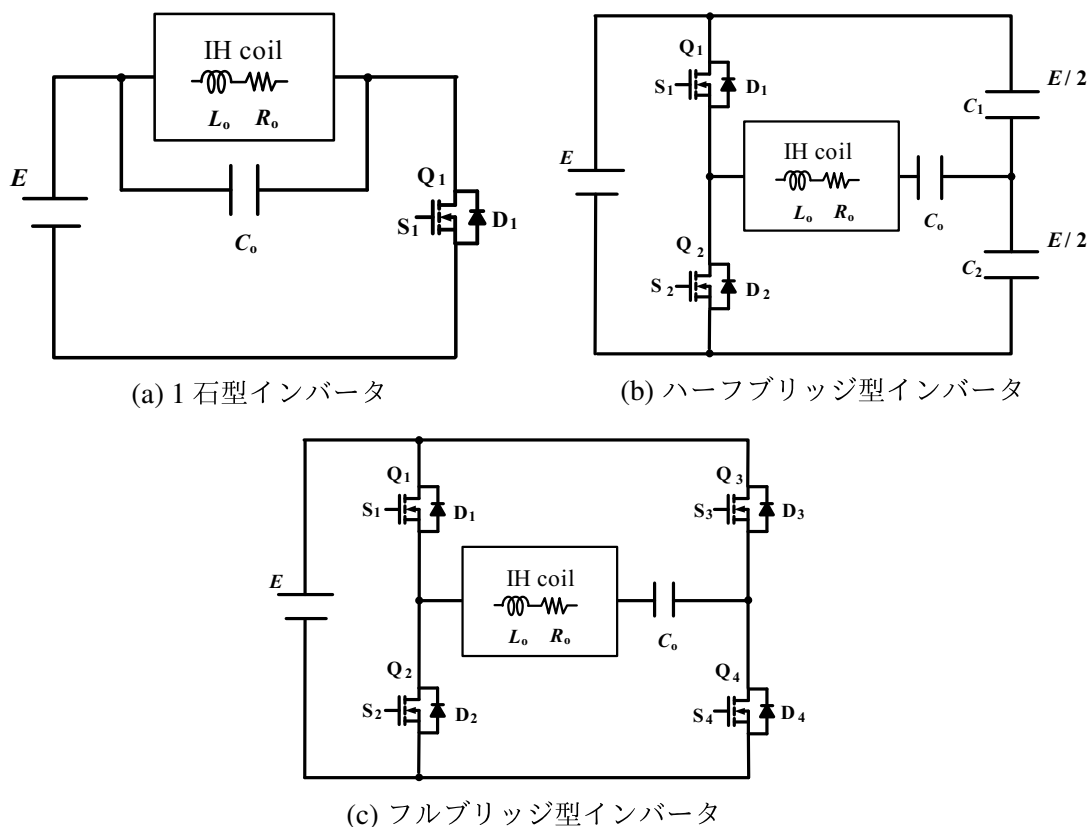


図 2.3 インバータの回路方式

表 2.2 各回路方式の特徴

	1石型	ハーフブリッジ	フルブリッジ
スイッチ素子数	1	2	4
出力可能電圧	$-x$ or E	$E/2$ or 0 or $-E/2$	E or $-E$
出力電圧 %	50~60	60	100
適用容量 kW	~3	5~10	15~

ンバータは工業用の誘導加熱インバータとして最も大容量となり、電流形インバータの方式を採用している。駆動周波数は0.2~10 kHz、出力容量は最大で12 MWである。サイリスタインバータには、高耐圧・大電流のサイリスタを直並列接続にすることによって大電力出力が可能となる。また、図 2.4 において R_o および L_o は誘導加熱コイルの等価直列抵抗値およびインダクタンスを示しており、 C_o は並列共振用のキャパシタを示している。次に、文献 (31) に提案される汎用インバータについて説明する。汎用インバータの半導体デバイスは IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用しており、駆動周波数は20~50 kHz、出力容量は2.5~20 kW と業務用厨房機器を中心としたインバータである。図 2.5 に文献 (31) で

表 2.3 誘導加熱用高周波インバータの容量および用途による分類

分類	サイリスタインバータ	IGBT インバータ	MOSFET インバータ
デバイス	サイリスタ	IGBT	MOSFET
方式	電流形	電圧形	電圧形
周波数 kHz	0.2~10	20~50	20~500
出力容量 kW	~12000	2~20	~1000
用途	工業用	厨房用, 工業用	工業用

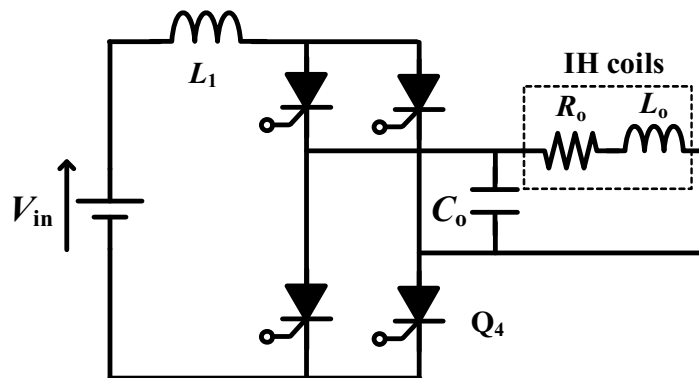


図 2.4 サイリスタインバータの回路構成

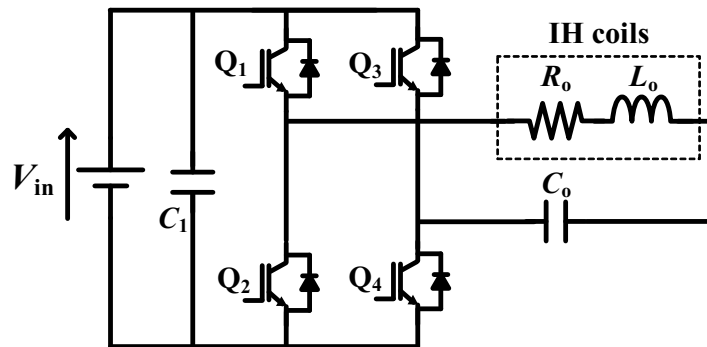


図 2.5 IGBT インバータの回路構成

提案される IGBT インバータの回路構成を示す。図 2.5 の R_0 および L_0 は誘導加熱コイルの等価直列抵抗値およびインダクタンス、 C_0 は直列共振用のキャパシタを示している。この IGBT インバータは容量によって用途が異なる。2.5~5 kW では、主に電磁調理機器として業務用厨房機器に使用されており、7~15 kW では、主に食品用工業機械やプラスチック成形などの産業分野に使用されている。20 kW 出力 IGBT インバータは、工業用熱融解装置や業務用熱処理への適用が可能となる。次に、文献 (31) で提案されている MOSFET インバータについて説明する。図 2.6 に文献 (31) で提案されている MOSFET インバータの回路構成を示す。図 2.6 の R_0 および L_0 は誘導加熱コイルの等価直列抵抗値およびインダクタンス、 C_0 は直列共振用のキャパシタを示している。また、図 2.6 の MOSFET インバータは 100~

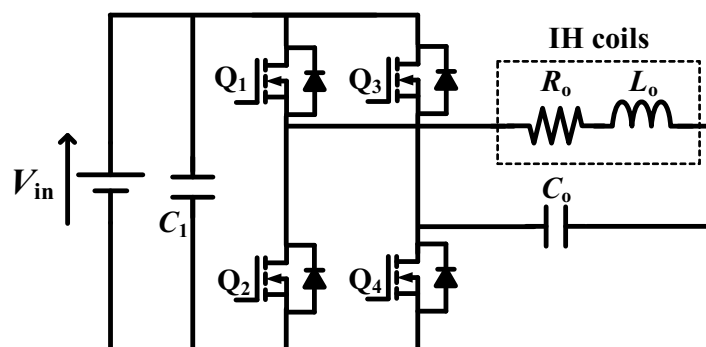


図 2.6 MOSFET インバータの回路構成

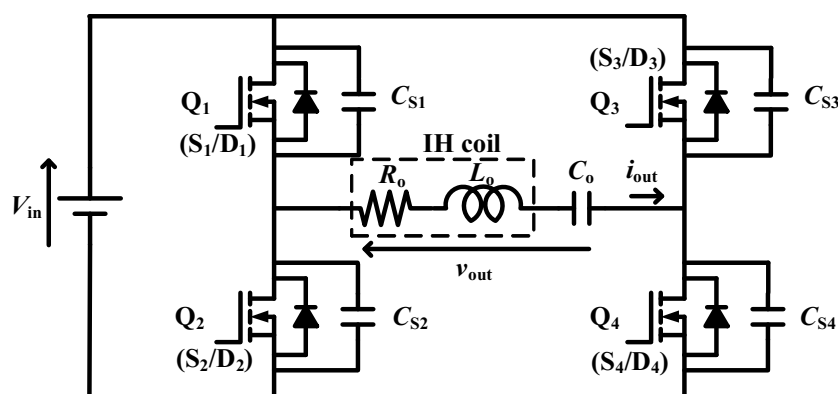


図 2.7 直列共振型フルブリッジインバータの等価回路

500 kHz の周波数で駆動が可能となる。また、図 2.5 の回路構成では電力変換効率が 75 % であったのに対し、図 2.6 の MOSFET インバータの電力変換効率は 96 % (定格時) まで向上することが報告されている。しかしながら、この MOSFET インバータは、1 ユニットで 75 ~ 100 kW 出力可能な MOSFET インバータを使用して、複数のユニットを並列接続することで 1 MW 級の大電力出力が可能となっている。表 2.3 に示す誘導加熱用高周波インバータの容量および用途による分類から、高周波駆動可能な小金属検出装置用インバータの半導体デバイスに MOSFET を使用する。

図 2.7 に、直列共振型フルブリッジインバータの等価回路構成図を示す。誘導加熱用途での使用を想定しているため、フルブリッジインバータに接続する負荷は誘導加熱コイルの等価直列抵抗 R_0 とインダクタンス L_0 、共振用キャパシタ C_0 からなる直列共振負荷とする。図 2.7 の C_{S1} - C_{S4} は SiC-MOSFET の出力容量である。図 2.8 に、スイッチングモード遷移図を示す。フルブリッジインバータ回路には対称性があるので、本節では図 2.8 に示すようにスイッチ S_1 , S_4 が導通している状態 (Mode I) から、スイッチ S_2 , S_3 が導通している状態 (Mode IV) への転流動作について検討する。SiC-MOSFET の出力容量は数 100 pF と微小であるため、これを無視して考えると、スイッチング動作は Mode I \rightarrow Mode III \rightarrow Mode IV の

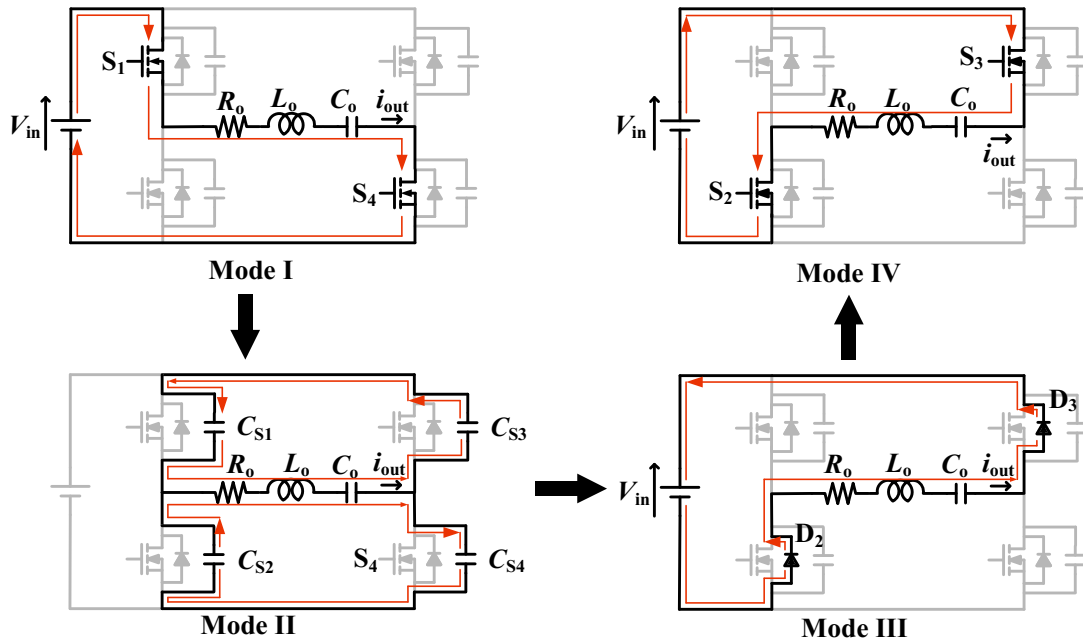


図 2.8 スイッチングモード遷移図

順に行われる。まず、Mode I の状態でスイッチ S_1 、 S_4 をターンオフする。RLC 直列共振負荷には出力電流 i_{out} が連続で流れるので、Mode III のように還流ダイオード D_2 、 D_3 が導通する。Mode III の期間にスイッチ S_2 、 S_3 にゲート信号を与えておけば、出力電流 i_{out} の極性反転後にスイッチ S_2 、 S_3 がターンオンする。この時、スイッチ S_2 、 S_3 は ZV&ZCS ターンオンとなるので、還流ダイオードのリカバリ電流を生じることがなく、サージ電圧やスパイク電流が発生しない。しかし、Mode I の状態で出力電流 i_{out} の極性が反転すると、 i_{out} は還流ダイオード D_1 、 D_4 を流れる。この時、 S_1 、 S_4 をターンオフし、 S_2 、 S_3 をターンオンすると S_2 、 S_3 には還流ダイオード D_1 、 D_4 のリカバリ電流が流れる。したがって、還流ダイオードのリカバリ電流の発生を避けるためには、出力電流 i_{out} の極性反転前にスイッチ S_1 、 S_4 をターンオフしなければならない。つまり、インバータ出力電圧に比べて出力電流が遅れた遅れ力率で動作する必要がある⁽³²⁾。通常の遅れ力率動作ではスイッチのターンオン時はソフトスイッチングとなるが、ターンオフ時はハードスイッチングとなるのでスイッチング損失やサージ電圧が発生しやすい⁽³³⁾。

次に、誘導加熱用高周波インバータに関連する研究を説明する⁽³⁴⁻³⁶⁾。文献(34)では 1 kW 出力、450 kHz 駆動の誘導加熱装置用直列共振回路方式インバータを提案しており、MOSFET を高周波インバータに使用することによって 450 kHz の駆動周波数においても安定動作を確認している。また、誘導加熱装置の電力変換効率は 76 % と報告されている。文献(35)では、複数の誘導加熱コイルとインバータから構成される誘導加熱装置を提案しており、40 kHz 駆

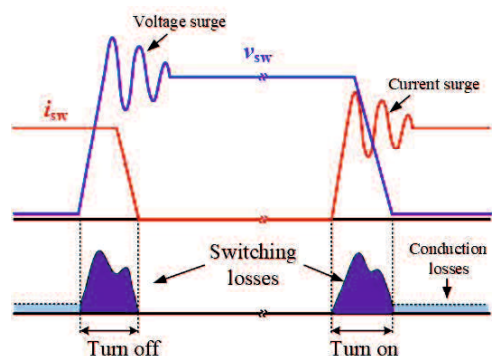


図 2.9 ハードスイッチング

動 150 kW 出力の半導体ウエハ用熱処理装置に適用している。高周波誘導加熱の特長である急速加熱を実現している。文献 (35) では、ゾーンコントロール誘導加熱を提案しており被加熱物体に複数の加熱コイルに複数のインバータを取り付けることですべてのコイル電流を同一周波数かつ同一位相に制御可能である。文献 (36) では、1.5~3.0 kW 出力、20 kHz 駆動のインバータを用いて小型小金属検出装置を構築し、被加熱物体を広範囲かつ 200 ° 以上の温度領域を得られる誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案している。実験結果から提案した誘導加熱コイルを用いることで、加熱領域内に自由度の高い誘導加熱コイルの配置を実現している。これらの誘導加熱用高周波インバータにおいて被加熱物体に有効的な周波数を決定する必要がある。しかしながら、文献 (36) における誘導加熱用高周波インバータの半導体デバイスとして広く利用されている Si パワーデバイスは長い年月を重ね発展してきたが、近年材料物性に起因する理論的性能限界に近づいており今後の飛躍的性能向上は困難な状況にある。そこで注目されているのが、SiC や GaN (Gallium Nitride) といったワイドバンドギャップパワーデバイスである。

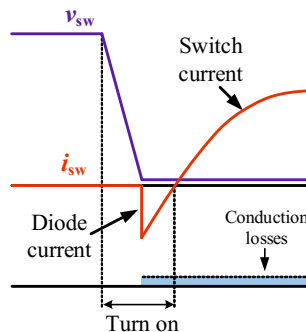
2.4 ソフトスイッチング技術

電力変換回路の高性能化・小型軽量化・応答性の向上などを行うためにスイッチング周波数の高周波化が必要になる。しかしながら、図 2.9 に示すハードスイッチングと呼ばれるスイッチングではスイッチのターンオン(ターンオフ)で電圧、電流の重なりが生じ、これがスイッチング損失となる。MOSFET のターンオン(ターンオフ)時間は通常、数十 ns~数百 ns で 1 回あたりのスイッチング損失は極めて小さいものに思えるが、これがオンオフのスイッチング毎に発生するので、スイッチング周波数が高くなるときわめて大きな問題となる。そのため、電力変換回路の高周波化に伴いスイッチング損失の低減が解決しなければならない大きな課題となってきている。そこで、ハードスイッチングによるスイッチング損失を低減させる方法の一つにソフトスイッチング技術がある。ソフトスイッチングとは、LC



(a) ZVS (ゼロ電圧スイッチング)

(b) ZVC (ゼロ電流スイッチング)



(a) ZV&ZCS (ゼロ電圧電流スイッチング)

図 2.10 ソフトスイッチング

共振回路の利用により、パワー半導体デバイスをゼロ電圧条件またはゼロ電流条件下でスイッチングし、電圧または電流をゼロからゆっくり増加させ、スイッチング損失を大幅に低減可能なスイッチング方式である。図 2.10 にソフトスイッチングの電圧および電流波形を示す。図 2.10(a) のようにスイッチングすればパワー半導体デバイスの電圧がほとんどゼロの間に電流がゼロから立ち上がって、パワー半導体デバイスのスイッチング損失を極めて小さくできる。このように電圧がほとんどゼロの間にスイッチングすることはゼロ電圧スイッチング (ZVS : Zero Voltage Switching) と言われている。ZVS はスイッチに並列にロスレススナバキャパシタを接続することで設計でき、スイッチにかかる電圧は緩やかな傾きをもって増加する。一方、図 2.10(b) のように電流がほとんどゼロの間に電圧をゼロまで移行する、つまりスイッチをオンするというスイッチングをゼロ電流スイッチング (ZCS : Zero Current Switching) という。ZCS は、スイッチに直列にロスレススナバインダクタを入れることで設計でき、スイッチを流れる電流は緩やかな傾きをもって増加する。また、図 2.10(c) に示すように電圧に対し電流が遅れとなるような誘導性負荷の場合、レグのハイサイド (ローサイド) がターンオフした際に、電流はローサイド (ハイサイド) 側のダイオードへ転流する。このダイオードへの転流動作時にターンオンすることで、スイッチ電流がゼロかつ電圧がゼロ

表 2.4 Si, SiC, GaN の物性値

Properties	Si	4H-SiC	GaN
Energy gap: E_G [eV]	1.12	3.26	3.5
Breakdown electric field: E_B [MV/cm]	0.3	3	3
Electron mobility: μ_n [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	1400	900	1250
Saturation drift velocity: v_S [1×10^7 cm/s]	1	2.7	2.7
Thermal conductivity: [$\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$]	1.5	4.9	1.3

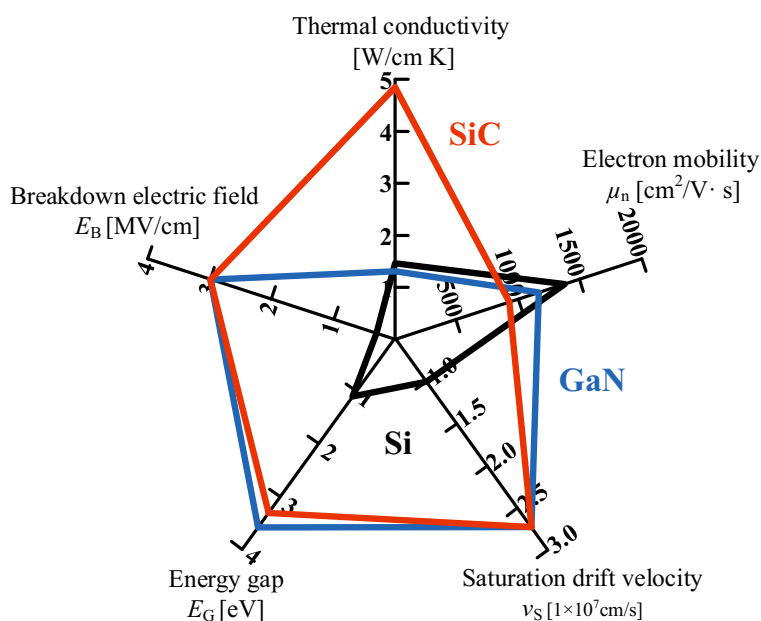


図 2.11 Si, SiC, GaN の物性値のレーダーチャート

の間にスイッチングすることができる。これをゼロ電圧ゼロ電流スイッチングと言う。これらの方法を用いることで、スイッチング損失を大幅に低減可能である。また、電源から発生するノイズを著しく低減することが可能である。

2.5 Si系パワーデバイスならびにワイドバンドギャップパワーデバイスの技術動向

2.5.1 Si, SiC, GaN パワーデバイスの技術動向

現在、電力変換回路のスイッチング素子として広く利用されている Si パワーデバイスは長い年月を重ね発展してきたが、近年材料物性に起因する理論的性能限界に近づいており今後の飛躍的性能向上は困難な状況にある。そこで注目されているのが、SiC や GaN (Gallium Nitride) といったワイドバンドギャップパワーデバイスである。表 2.4 に、Si, SiC (4H 構造), GaN の物性値をそれぞれ示す⁽³⁷⁾。また、図 2.11 に表 2.4 の物性値のレーダーチャートを示

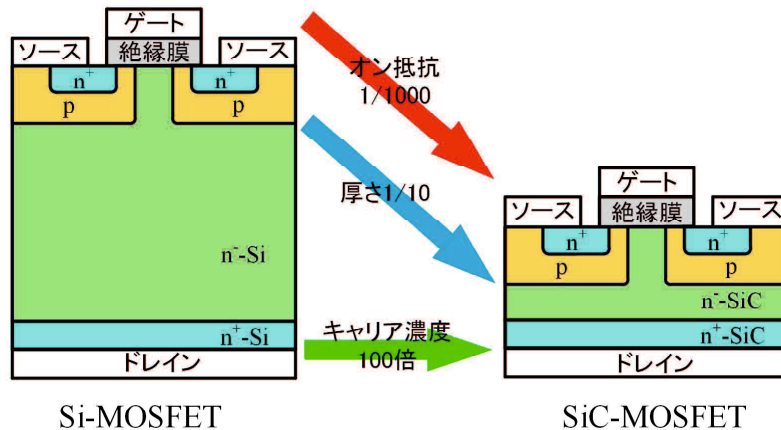


図 2.12 Si-MOSFET と SiC-MOSFET の構造図

す。表 2.4 と図 2.11 に示すように、SiC や GaN は現在パワーデバイス材料として主流の Si に比べて優れた物性値を有している。注目すべき物性値は、絶縁破壊電界と飽和ドリフト速度、そして熱伝導率である。図 2.12 に、例として Si-MOSFET と SiC-MOSFET の構造図を示す。SiC と GaN の絶縁破壊電界は、Si に比べると 1 桁も大きい。したがって、同耐圧であれば SiC や GaN を使ったパワーデバイスの厚さは Si を使ったデバイスに比べて約 1/10 で済むことになる。デバイスの厚さが薄くなれば、デバイス内部で電流が通る経路（ドリフト層）が短くなる。このため、オン抵抗を約 1/10 に低減できる。さらに、SiC と GaN は Si に比べて、キャリアとなる不純物の濃度を高められるため、オン抵抗を下げられるという特徴もある。不純物濃度は、絶縁破壊電界の 2 乗に比例して高めることができるので、絶縁破壊電界が約 10 倍の SiC や GaN では、不純物濃度を 100 倍に高められる。その結果、キャリアの数が 100 倍になり、オン抵抗は約 1/100 に低減できる。絶縁破壊電界によるオン抵抗の低減と不純物濃度によるオン抵抗の低減は、かけ算で効く。このため、SiC や GaN は理論的には Si に比べてオン抵抗を 1/1000 に低減することが可能であり、定常損失の大幅な削減が期待できる。次に、注目すべき物性値は飽和ドリフト速度である。電界が電子や正孔に印加されると、その電界の方向に合わせてそれぞれ逆方向に引きずられる。電子や正孔といったキャリアが全体として単位時間に移動する距離をドリフト速度という。ドリフト速度は電界に比例し、電界が非常に強くなると、キャリアのドリフト速度は飽和してしまう。その時のドリフト速度を飽和ドリフト速度という。表 2.4 より、Si と比べて SiC と GaN の方が 2~3 倍高い値を示している。飽和ドリフト速度が高ければ、スイッチング周波数を高めることができる。スイッチング周波数向上の効果はインダクタやコンデンサの小型化という形で現れる。そのため、電力変換回路を小型化することができる。最後に、注目すべき物性値として熱伝導率がある。熱伝導率を Si と比較すると、SiC は約 3 倍、GaN は約 1.5 倍高い。熱伝導率が高ければ、デバイス内で発生した熱を外部に放射しやすくなり、高温での動作が可能

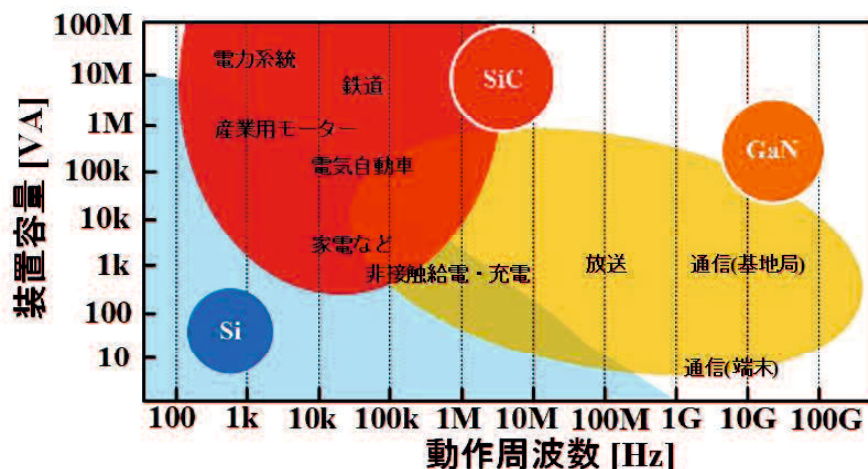


図 2.13 Si, SiC, GaN パワーデバイスの応用分野

となる。したがって、ヒートシンクなどの冷却部品を小型化することができる⁽¹³⁾。ただし、これらの特長は材料の持つ能力を最大限に引き出すことができた場合の数値であり、実現されているわけではない。現在試作されているワイドバンドギャップパワーデバイスには、Si パワーデバイスに比べて課題が山積みである。しかしながら Si パワーデバイスの性能は Si の性能限界に近い状態まで向上しているため、更なる高性能デバイスの実現の可能性を秘めているこれらの材料に大きな期待がかけられている⁽³⁸⁾。図 2.13 に、SiC と GaN が現時点でターゲットとしている分野を示す⁽³⁹⁾。パワーデバイスとしての実用化に最も近いワイドバンドギャップパワーデバイスは SiC である。図 2.13 に示すように SiC パワーデバイスは、主流の Si パワーデバイスをさらに大容量化・高速化する分野で検討されている。最初に市場投入された SiC パワーデバイスはショットキーバリアダイオード SBD (Schottky Barrier Diode) である⁽⁴⁰⁻⁴³⁾。続いて、パワー MOSFET の市場投入も始まっている。これらはともにユニポーラデバイスである。SiC を用いたバイポーラデバイスが実現するとさらなる大容量化が可能である。もう一つの実用化に近いワイドバンドギャップパワーデバイスである GaN パワーデバイスは高周波特性が要求される携帯電話の基地局など、SiC よりも動作周波数が高い分野での応用が検討されている^(38,39)。次に、SiC を用いたパワーデバイスとして製品化が開始されている SiC-SBD と SiC-MOSFET について、SBD と MOSFET の原理を説明し、SiC を用いた場合の長所を述べる。

2.5.2 SiC-SBD

ダイオードは、一方向の電流にのみ導通し他方向の電流を遮断する整流機能を持つデバイスである。ダイオードには、バイポーラデバイスとして動作する pn 接合ダイオードとユニポーラデバイスとして動作する SBD が存在する。ユニポーラデバイスはバイポーラデバイ

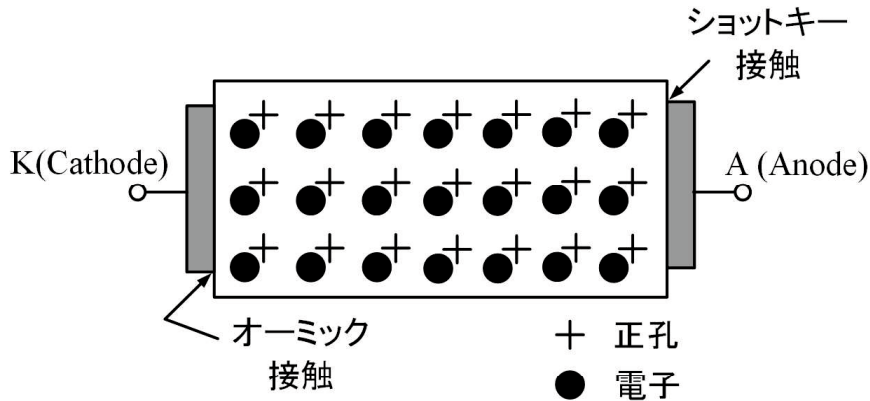


図 2.14 n 型 SBD の構造

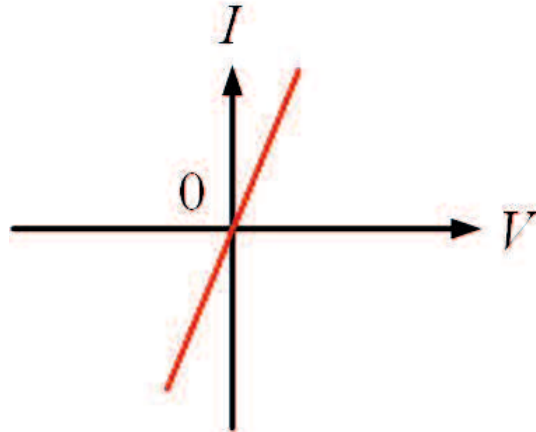


図 2.15 オーミック接触の電圧-電流特性

スのような少数キャリアが存在せず多数キャリアと呼ばれる荷電粒子が電流の媒体となる。図 2.14 に、ユニポーラデバイスとして動作する n 型 SBD の構造を示す。n 型の場合は電子を多数キャリア、正孔を少数キャリアと呼ぶ。金属と半導体を接触させた場合、両方の仕事関数の大小により整流特性を示したり、オーミック特性を示したりする。オーミック接触とは、半導体と金属との間に電氣的な障壁が存在せず、半導体の抵抗に比べて十分に無視できる程の小さな接触抵抗である状態を言う。図 2.15 に、オーミック接触の場合の電圧-電流特性を示す。図 2.15 より電圧-電流特性は正方向および負方向に対して直線的かつ原点に対して対照的な特性を示し、これをオーミック特性と呼ぶ。

次に整流特性を示す場合について説明する。図 2.16 に、金属の仕事関数 ϕ_m が n 型半導体の仕事関数 ϕ_s より大きい場合の金属と n 型半導体のエネルギーバンド図を示す。ここで、仕事関数とはフェルミ準位 (半導体中で電子の存在確率が 1/2 になる時のエネルギー準位) から真空準位 (自由空間) までのエネルギーである。図 2.16(a) に示すように半導体のフェルミ準位は金属のフェルミ準位より $\phi_m - \phi_s$ だけ上にある。このような状態の金属と半導体を接触

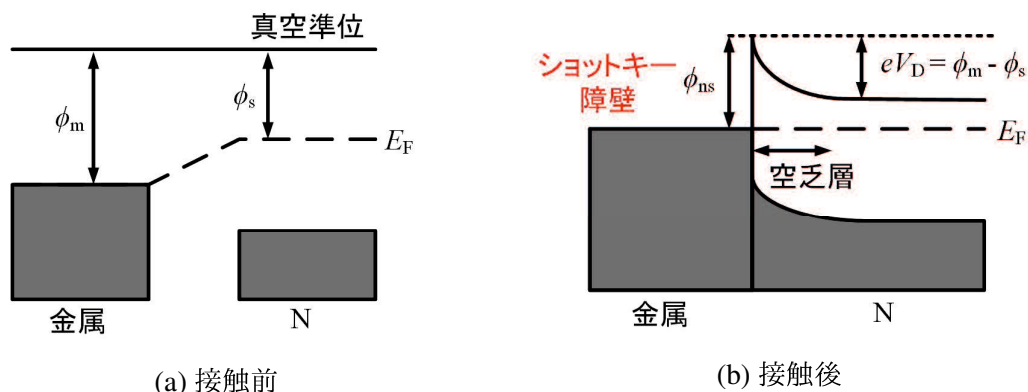


図 2.16 金属と n 型半導体のエネルギーバンド図

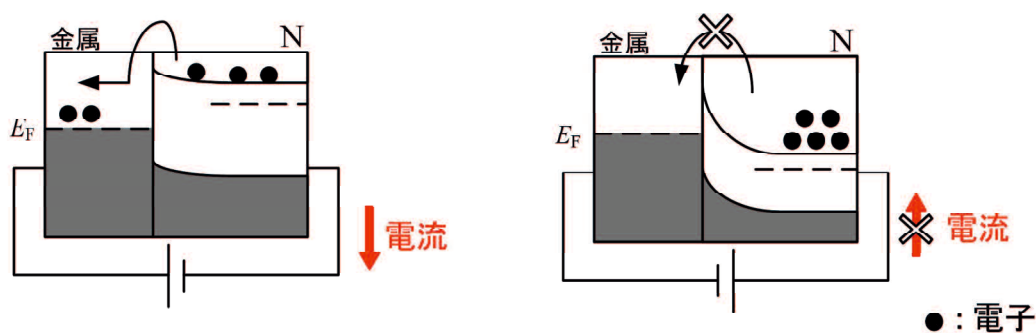


図 2.17 金属と n 型半導体のエネルギーバンド図

させると、半導体の伝導帯中の電子の一部は、金属中に流れ込み、金属は余剰な負電荷を、半導体は正電荷を得て図 2.16(b) に示すように、金属と半導体のフェルミ準位の高さは同じになる。この時、接触界面の半導体側には空乏層が形成される。この接触をショットキー接触と呼び、図 2.16 に示す ϕ_{ns} をショットキー障壁、 V_D を拡散電位と呼ぶ。図 2.17 に、金属-n 型半導体ショットキー接触の電圧印加時のエネルギーバンド図を示す。図 2.17(a) に示すように、順バイアス印加時では、半導体側の障壁の高さ eV_D は減少するため半導体から金属側へ電子が容易に拡散する。したがって、金属側から半導体へと電流が流れる。また、図 2.17(b) に示すように逆バイアス印加時には、半導体側の障壁の高さ eV_D が大きくなるため、電子は移動せず電流は流れない。以上の動作を行うことから、ショットキー接触では pn 接合の場合と同様に整流特性が発生する。

したがって、ショットキー接触を持つダイオードをショットキーバリアダイオード SBD と呼ぶ。図 2.18 に、SBD と pn 接合ダイオードの電圧-電流特性を示す。図 2.18 より、一般的に pn 接合ダイオードの順方向降下電圧が 0.7 V であるのに対し、SBD の順方向降下電圧は 0.3~0.5 V と低いことが分かる。これは、動作上、金属側から少数キャリアの注入がなく、

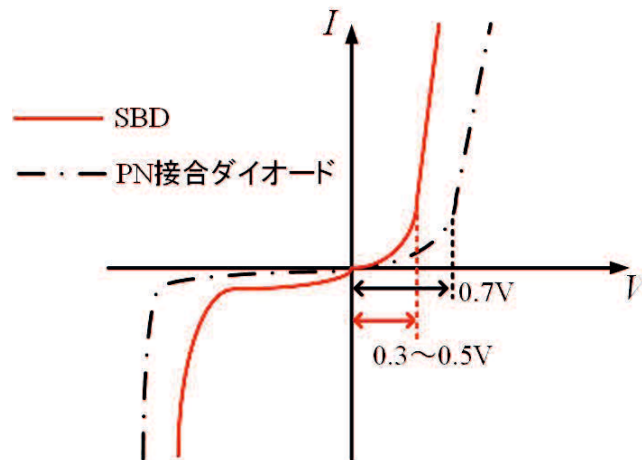


図 2.18 SBD と pn 接合ダイオードの電圧-電流特性

少数キャリアの蓄積効果が起こらないからである。よって、SBD は高速で動作させることができ、逆回復電流はほとんど発生しない。Si を基材とした SBD の欠点としては逆方向耐圧が低いため、耐圧 100 V 程度までの低耐圧デバイスにしか用いられない。しかし、SiC を用いると 600~1200 V 以上の高耐圧 SBD を実現可能となり、Si を基材とした SBD の欠点を改善することができる⁽⁴⁰⁻⁴³⁾。

2.5.3 SiC-MOSFET

MOSFET とは、金属酸化物半導体電界効果トランジスタのことであり、電力変換回路に応用されているパワー MOSFET は MOSFET を大電力用途に発展させたデバイスである。ここでは、現在パワー MOSFET として広く使用されている n 型 MOSFET を取り上げ、プレーナゲート構造とトレンチゲート構造について説明する。図 2.19 に、プレーナゲート構造の n 型 MOSFET のオン状態およびオフ状態の断面構造をそれぞれ示す。図 2.19(a) に示すように MOSFET のゲート電極に順バイアス電圧が印加されると、ゲート電極に対面した p 層領域内の電子が引き寄せられ n 型のチャンネルが形成される。チャンネルとは電流経路のことであり、このチャンネルによりドレイン・ソース間が導通し、電気伝導が可能となる。この時、ドレイン電極に順バイアス電圧を印加すると、ソース電極下の n+ 層領域からチャンネル領域を通過してドレイン電極下の n 層領域に電子が移動する。これが n 型 MOSFET のオン状態である。次にオフ状態にするためには、図 2.19(b) に示すようにゲート電極に印加されている順バイアス電圧を取り除かなければならない。順バイアス電圧が取り除かれると、電流経路であったチャンネル内のキャリアは移動し消滅する。ドレイン電極下の n- 層領域とソース電極下の n+ 領域の間に空乏層が形成されて、オフ状態となる。また、MOSFET はオン電圧が抵抗特性 (オン抵抗) を持っている。オン抵抗は、MOSFET の電極、それぞれの層、層と層の間

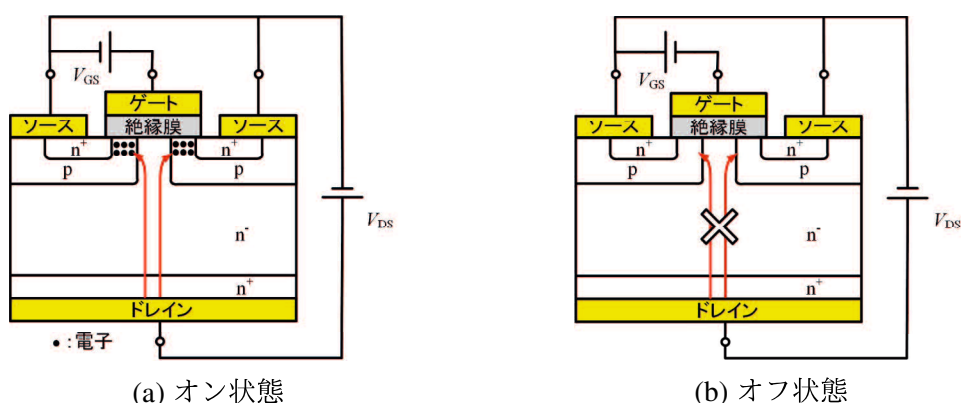


図 2.19 プレーナゲート構造のと n 型 MOSFET の断面構造図

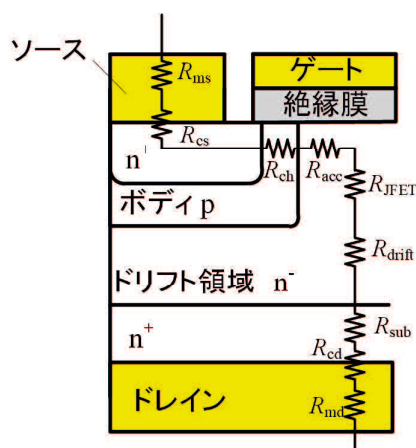


図 2.20 プレーナゲート構造のと n 型 MOSFET のオン抵抗の各成分

に存在する。図 2.20 に、プレーナゲート構造の n 型 MOSFET のオン抵抗の各成分を示す。MOSFET のオン抵抗の各抵抗成分の総和は、

$$R_{\text{on}} = R_{\text{ms}} + R_{\text{cs}} + R_{\text{ch}} + R_{\text{acc}} + R_{\text{JFET}} + R_{\text{drift}} + R_{\text{sub}} + R_{\text{cd}} + R_{\text{md}} \quad (2.1)$$

となる。ここで、 R_{ms} はソース電極の抵抗、 R_{cs} はソースコンタクト抵抗、 R_{ch} はチャネル抵抗、 R_{acc} は蓄積層の抵抗、 R_{JFET} は図 2.20 においてソースをソース、両端にある p 層のボディ領域をゲート、n-層のドリフト領域と n+をドレインとする JFET の抵抗、 R_{drift} はエピタキシャル層の抵抗、 R_{sub} は基板抵抗、 R_{cd} はドレインコンタクト抵抗、 R_{md} はドレイン電極の抵抗と表すことができる。次に、プレーナゲート構造の MOSFET より更なる低オン抵抗化を実現するための技術であるトレンチゲート構造の MOSFET について説明する。図 2.21 にトレンチゲート構造における n 型 MOSFET の断面図とオン抵抗の各成分を示す。トレンチゲート構造は、基板に対して垂直にトレンチ溝を掘り、その障壁に MOSFET のゲートを

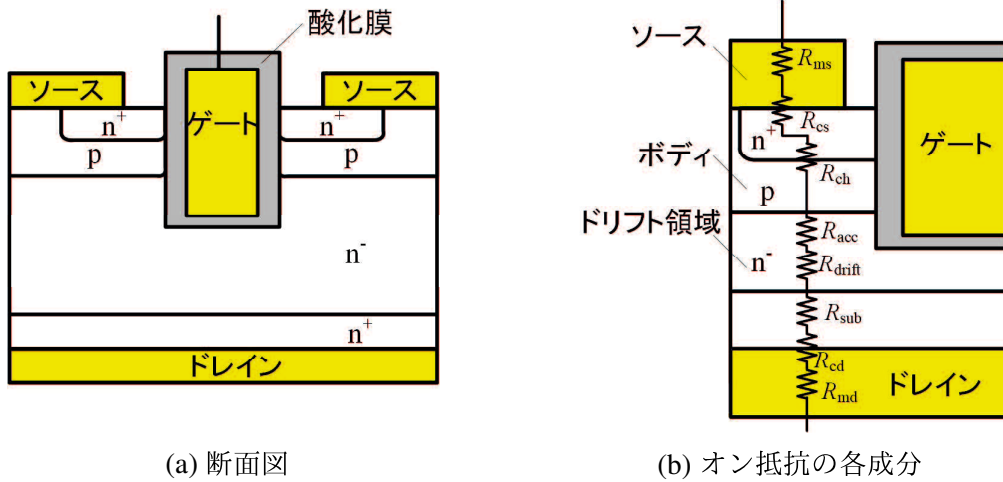


図 2.21 トレンチゲート構造のと n 型 MOSFET

形成した構造のことである。トレンチゲート構造では、図 2.21(b) に示すように、図 2.20 におけるソースをソース、両端にある p 層のボディ領域をゲート、n-層のドリフト領域と n+をドレインとする JFET の抵抗成分 R_{JFET} が存在しない。したがって、トレンチゲート構造の MOSFET のオン抵抗は

$$R_{on} = R_{ms} + R_{cs} + R_{ch} + R_{acc} + R_{drift} + R_{sub} + R_{cd} + R_{md} \quad (2.2)$$

で表される。(2.2) 式より R_{JFET} が無い分、低オン抵抗化が可能となる。さらに、 R_{JFET} が存在しないため、MOSFET の微細化・高密度化が可能であるためプレーナゲート構造の MOSFET と比べて更なる低オン抵抗化が実現できる^(44,45)。また、パワー MOSFET はユニポーラデバイスであり、SBD と同様で少数キャリアの蓄積効果がないため、スイッチング速度が速いのが特徴である。さらに、電圧駆動型であるため MOSFET 駆動時に発生する電力損失が小さいという特徴もある。その一方でキャリアの蓄積がないため、高耐圧化するためにドリフト層の厚さを厚くしていくと、オン抵抗が増加するという問題がある。そのため、Si を基材とするパワー MOSFET は主に 600 V 以下の素子耐圧で、高周波領域の用途に应用が限られる⁽¹³⁾。そこで SiC を用いてパワー MOSFET を製造すると、図 2.12 に示すように Si よりもドリフト層の抵抗が低いため、高耐圧かつ低オン抵抗の両立が可能となる。また、市販が開始された時の SiC-MOSFET はプレーナゲート構造であったが、更なる低オン抵抗化を実現するためにトレンチゲート構造を採用した SiC-MOSFET も製品化され始めている。表 2.5 に、同定格の Si-MOSFET と SiC-MOSFET の電気的特性を示す⁽⁴⁶⁻⁵⁰⁾。表 2.5 より、600 V 以上の高耐圧領域において SiC-MOSFET の方がオン抵抗が小さく、ジャンクション温度が高いことが確認できる。したがって、SiC-MOSFET を用いることで高周波かつ大電力容量の高

表 2.5 Si-MOSFET と SiC-MOSFET の性能

基材	メーカー	型番	ドレイン-ソース 間電圧 V_{DSS} [V]	ドレイン 電流 I_D [A]	オン抵抗 $R_{DS(on)}$ [m Ω]	ジャンクシ ョン温度 T_j [°C]
Si	IXYS	IXFQ28N60P3	600	28	260	150
		IXFK20N120	1200	20	750	150
SiC	ROHM	SCT2120AF	650	29	120	175
		SCT2160KE	1200	22	160	175
	CREE	C2M0160120D	1200	19	160	150

効率な電力変換回路が実現可能となるため、次世代パワーデバイスとして注目されている。

2.6 本章のまとめ

本章では、研究背景で述べたリチウムイオン電池の発熱・発火事故をはじめとする高機能フィルムに混入した小金属を検出する装置が必要不可欠であることから従来の小金属検出法として使用されている小金属検出法および国内外における研究開発動向として SQUID 磁気センサを用いた小金属検出法について説明し、実際の高機能フィルムの製造工程に適用するための要求を比較し、これらの検出法より有効的である誘導加熱方式小金属検出法を述べた。また、誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向を述べている。誘導加熱用電力変換回路の研究開発動向から、高周波誘導加熱方式小金属検出装置用の高周波電源の回路方式および使用する半導体デバイスを決定し、ワイドバンドギャップパワーデバイスとして普及している SiC-MOSFET を誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源に使用することにより、誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源の実用化を実現可能であることを説明した。ここで本論文では、これらの要求を実現可能な高周波駆動かつ大電力出力可能な電力変換回路を実現するために SiC-MOSFET を小金属検出装置における高周波インバータに使用する。また、後述する小金属加熱実験結果より SiC-MOSFET を用いた高周波駆動かつ大電力出力可能な高周波インバータおよび数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムに対して広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルの有効性を明らかにする。

第3章 SiC-MOSFET高周波インバータを用いた小金属の高周波誘導加熱法

本章では、高機能フィルム中に混入した小金属の高周波誘導加熱を実現する周波数と磁束密度の関係を実験結果により検討し、小金属の誘導加熱を実現する周波数および磁束密度を決定する。また、周波数と磁束密度の関係から小金属加熱用の高周波インバータの駆動周波数を 400 kHz に決定した。次に 400 kHz SiC-MOSFET 高周波インバータを試作し、その動作検証および小金属加熱実験を行う。小金属加熱実験結果から試作した 400 kHz SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた誘導加熱方式小金属検出装置の有効性を確認する。次に、誘導加熱方式小金属検出法の高周波電源に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率向上の検討を行った。SiC-MOSFET 高周波インバータが発生する全損失において導通損失が約 80 % を占めていることに着目して、SiC-MOSFET 2 並列接続インバータを試作し、電力変換効率測定および損失分析を行った。電力変換効率測定および損失分析結果から、提案する小金属検出装置に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータの SiC-MOSFET を 2 並列接続することにより、SiC-MOSFET の導通損失の低減および電力変換効率向上を確認した。

3.1 小金属の加熱理論

小金属の熱収支を検討するにあたり、図 3.1 に示すような高機能フィルム上に置かれた球状の金属に一樣な磁束が鎖交している場合を考える。このとき、小金属には磁束の鎖交により電磁誘導の法則に従い渦電流が流れ、ジュール熱 P [W] が発生する。このジュール熱は小金属の温度上昇に寄与する熱 $P_{m,h}$ [W] だけでなく、金属表面から空気中への放熱 $P_{m,r}$ [W]、小金属周囲の高機能フィルムの温度上昇による熱 $P_{f,h}$ [W]、高機能フィルムから空気中への放熱 $P_{f,r}$ [W] にも寄与すると予想される。ただし、放射伝熱はほぼ無いものとする。ここで、小金属のジュール熱 P [W] が高機能フィルムおよび空気中に伝搬するため

$$P = P_{m,h} + P_{f,r} + P_{m,r} + P_{f,h}. \quad (3.1)$$

が成り立つ。ここで、導体球に磁束密度 B [T] を鎖交することによって発生するジュール熱 P [W] を求める。図 3.2 のように z 軸方向に一樣に磁束が鎖交している半径 a [m] の金属球の

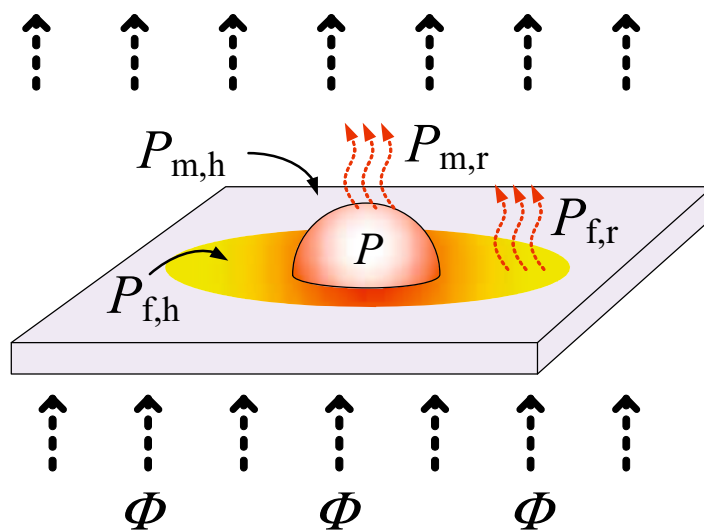


図 3.1 導体球モデルの小金属における熱収支

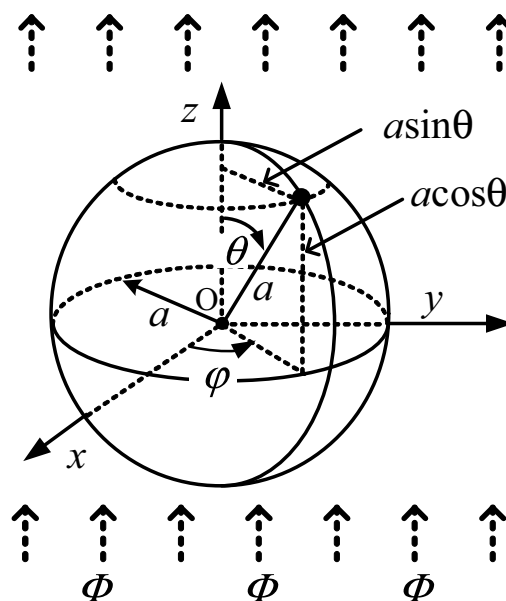


図 3.2 球座標系

場合，小金属に発生するジュール熱を求める。ジュール熱 P [W] は球のベッセル関数 $J_n(x)$ を用いると

$$P = \frac{36\pi B^2 a (a/\delta)^2}{\sigma \cdot |(\mu + 2\mu_0)J_0(\frac{1+j}{\delta}a) + (\mu - \mu_0)J_2(\frac{1+j}{\delta}a)|^2} \cdot \text{Im} \left[J_2(\frac{1+j}{\delta}a)J_0(\frac{1-j}{\delta}a) \right]. \quad (3.2)$$

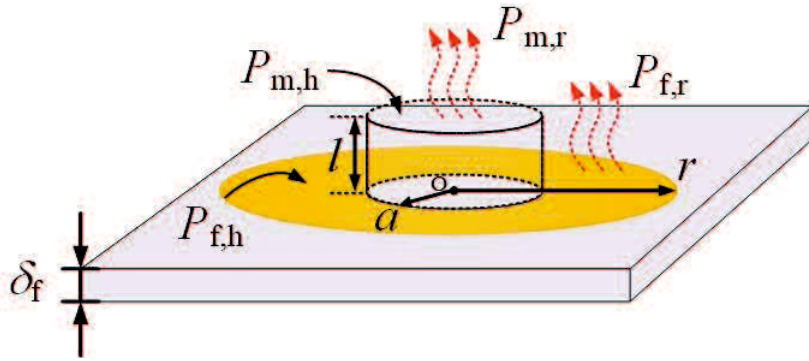


図 3.3 円柱モデルの小金属における熱収支

と求められる⁽⁵¹⁾。(3.2)式において、 a [m] は金属球の半径、 δ [m] は表皮深さ、 σ [S/m] は金属球の導電率、 μ [H/m] は金属球の透磁率、 μ_0 [H/m] は真空の透磁率を示す。次に、(3.1)式の各熱量 $P_{m,h}$ [W]、 $P_{m,r}$ [W]、 $P_{f,h}$ [W]、 $P_{f,r}$ [W] を理論的に求める。ただし、ジュール熱 P [W] は導体球モデルによって理論式を求めたが空気の流れ方に依存する熱伝達率を厳密に決定することは困難である。そこで、円柱の小金属モデルにおいて温度上昇および放熱の熱量を決定する。円柱モデルは球モデルよりも体積が大きいため、加熱に大きな熱量が必要となる。したがって、円柱モデルの小金属を加熱できれば球モデルの小金属も加熱可能であるため、各熱量 $P_{m,h}$ [W]、 $P_{m,r}$ [W]、 $P_{f,h}$ [W]、 $P_{f,r}$ [W] は円柱モデルにより算出する。図 3.3 に円柱モデルの小金属における熱収支を示す。高機能フィルム上に置かれた円柱状の金属に一樣な磁束が鎖交している場合を考える。このとき、導体球モデルの小金属と同様に磁束の鎖交により発生するジュール熱 P [W] が発生する。このジュール熱は小金属の温度上昇に寄与する熱 $P_{m,h}$ [W] だけでなく、金属表面から空気中への放熱 $P_{m,r}$ [W]、小金属周囲のフィルムの温度上昇による熱 $P_{f,h}$ [W]、高機能フィルムから空気中への放熱 $P_{f,r}$ [W] にも寄与すると予想される。ただし、放射伝熱はほぼ無いものとする。ここで、図 3.3 の δ_f [m] は高機能フィルムの厚さを示す。 $P_{m,r}$ [W] について熱源金属を半径 a [m]、長さ l [m] の円柱として、表面積を S [m²]、温度は一樣で周囲空気との温度差を ΔT [°C] とすると

$$\begin{aligned} P_{m,r} &= hS\Delta T = h(2\pi a^2 + 2\pi al)\Delta T \\ &= 2\pi ha(a + l)\Delta T. \end{aligned} \quad (3.3)$$

が成り立つ。ここで、注意すべきは温度差 ΔT [°C] が熱源と周囲空気との温度差を示している点である。まず、図 3.3 において高機能フィルム上に円柱状熱源を置いた場合の温度分布を求めると、フィルムと周囲空気との温度差 $\theta(r)$ は定常状態では

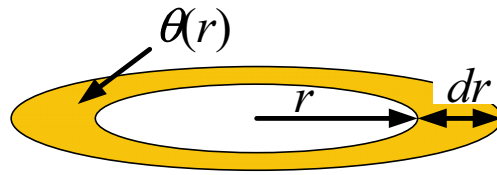


図 3.4 高機能フィルム上の円環

$$\theta(r) = C_1 I_0(\eta_f r) + C_2 K_0(\eta_f r). \quad (3.4)$$

で表される。ただし、 C_1 [°C]、 C_2 [°C] は境界条件で決まる定数、 I_0 は 0 次の第 1 種変形ベッセル関数、 K_0 は 0 次の第 2 種変形ベッセル関数、 η_f [1/m] は温度分布の広がりにくさを表す定数である。検出の条件として持っているのは、 ΔT_S [°C] 以上の昇温された領域を半径 r_S [m] 以上作り、それを検出するということである。また、 $r=a$ ではフィルムの厚み方向に温度ムラが発生するという現実的な側面もあり、 $\theta(a)=\Delta T$ と定めることが難しい。したがって、 $\theta(r_S)=\Delta T_S$ と境界条件を定めたほうが、現実的である(熱源から十分離れるとフィルムの厚み方向の温度ムラは小さくなる)。(3.4) 式において、 $C_1=0$ ($\theta(\infty)\neq\pm\infty$) として、 $\theta(r_S)=\Delta T_S$ とすると

$$\theta(r_S) = C_2 K_0(\eta_f r_S) = \Delta T_S. \quad (3.5)$$

が成り立つ。また、(3.5) 式より $C_2=\Delta T/\{K_0(\eta_f a)\}$ でもあるため

$$\Delta T = \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)} \Delta T_S. \quad (3.6)$$

となり、これを (3.3) 式に代入すると

$$P_{m,r} = 2\pi h a (a + l) \Delta T_S \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)}. \quad (3.7)$$

が得られる。

次に、高機能フィルムから空気中への放熱 $P_{f,r}$ [W] について考える。図 3.4 に高機能フィルムから空気中への放熱による高機能フィルム上の円環を示す。図 3.4 のように半径 r [m]、微小厚み dr の高機能フィルムの円環を考えると、面積は

$$\pi(r + dr)^2 - \pi r^2 = 2\pi r dr + \pi dr^2 \approx 2\pi r dr. \quad (3.8)$$

で与えられる。(3.8)式において、 h [W/(m²·K)] は高機能フィルムから空気への熱伝達率(フィルムの表/裏の熱伝達率を考慮)とすると、この面からの空気への熱伝達は $h \cdot 2\pi r dr \cdot \theta(r)$ であるからフィルム全体からの放熱は、

$$\begin{aligned} P_{f,r} &= \int_a^\infty 2\pi h \Delta T \frac{r K_0(\eta_f r)}{r K_0(\eta_f a)} dr = \frac{2\pi h \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \left[-\frac{r K_1(\eta_f r)}{\eta_f} \right]_{r=a}^{r=\infty} \\ &= \frac{2\pi h \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \frac{a K_1(\eta_f a)}{\eta_f} = \frac{2\pi h a \Delta T}{\eta_f} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f a)}. \quad (\because K_1(\infty) = 0) \end{aligned} \quad (3.9)$$

が成り立つ。ここで、(3.9)式において $a < r < \infty$ で積分してあるので ΔT_s [°C] 以上の昇温された領域半径 r_s [m] まで積分すると、

$$\begin{aligned} P_{f,r} &= \int_a^{r_s} 2\pi h \Delta T \frac{r K_0(\eta_f r)}{K_0(\eta_f a)} dr = \frac{2\pi h \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \left[-\frac{r K_1(\eta_f r)}{\eta_f} \right]_{r=a}^{r=r_s} \\ &= \frac{2\pi h \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \frac{a K_1(\eta_f a) - r_s K_1(\eta_f r_s)}{\eta_f} = \frac{2\pi h \Delta T}{\eta_f} \frac{a K_1(\eta_f a) - r_s K_1(\eta_f r_s)}{K_0(\eta_f a)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

が得られる。(3.10)式に(3.6)式を代入すると

$$P_{f,r} = \frac{2\pi h \Delta T_s}{\eta_f} \frac{a K_1(\eta_f a) - r_s K_1(\eta_f r_s)}{K_0(\eta_f r_s)} \quad (3.11)$$

が得られる。

次に、小金属の温度上昇に寄与する熱 $P_{m,h}$ [W] について考える。そこで、 Δt [sec] 間に熱源金属が ΔT [°C] 昇温し、高機能フィルムが各点において $\theta(r)$ [°C] 昇温するために必要なエネルギーを考慮する。 $P_{m,r}$ [W] は、 Δt [sec] 間に熱源温度を ΔT [°C] を昇温させるために必要な発熱とする。熱源金属の半径 a [m]、長さ l [m] の円柱と仮定しているので

$$\begin{aligned} P_{m,h} \Delta t &= \rho_m C_m \pi a^2 l \Delta T. \\ P_{m,h} &= \rho_m C_m \pi a^2 l \frac{\Delta T}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.12)$$

が成り立つ。ここで、熱源金属の密度を ρ_m [kg/m³]、比熱を C_m [J/(kg·°C)] とする。(3.12)式に(3.6)式を代入すると

$$P_{m,h} = \rho_m C_m \pi a^2 l \frac{\Delta T}{\Delta t} \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_s)} \quad (3.13)$$

を得る。

次に、小金属周囲の高機能フィルムの温度上昇による熱 $P_{f,h}$ [W] を考える。図 3.4 の高機能フィルム上の円環を $\theta(r)$ [°C] 昇温させるための必要なエネルギーを $a < r < \infty$ で積分することで求めることが可能であるため、

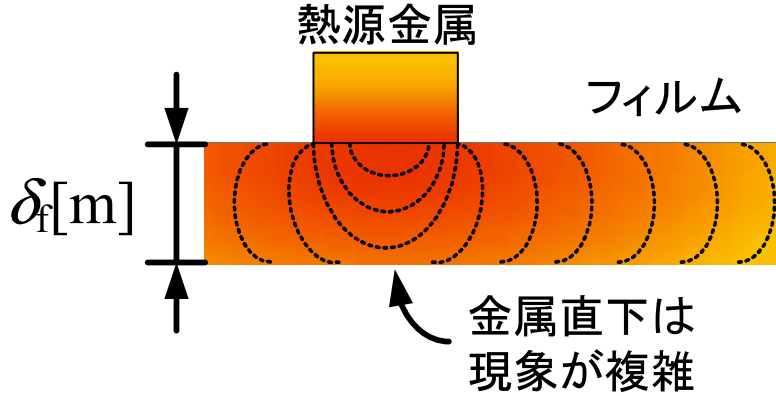


図 3.5 高機能フィルム上の温度分布

$$\begin{aligned}
 P_{f,h}\Delta t &= \int_a^\infty \rho_f C_f \cdot 2\pi r \delta_f dr \cdot \theta(r) = \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \int_a^\infty r K_0(\eta_f r) dr \\
 &= \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f \Delta T}{K_0(\eta_f a)} \left[-\frac{r K_1(\eta_f r)}{\eta_f} \right]_a^\infty \\
 &= \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f \Delta T}{\eta_f} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f a)} \quad (\because K_1(\infty) = 0) \\
 P_{f,h} &= \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f}{\eta_f} \frac{\Delta T}{\Delta t} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f a)} \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

が得られる。ここで、 δ_f [m] は高機能フィルムの厚さを示す。しかしながら、(3.14) 式は $r \leq a$ となる領域におけるフィルムの昇温を考慮していない。図 3.5 に示すように、 $r \leq a$ では厚み方向の温度ムラが発生したり、熱源の漏れ方によってフィルムの体積が変わるなど複雑である。安全に見積もるためには、半径 a [m]、長さ δ_f [m] の円柱状フィルムが ΔT [°C] だけ昇温する項を (3.14) 式に加えればよいため、

$$P_{f,h} = \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f}{\eta_f} \frac{\Delta T}{\Delta t} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f a)} + \pi\rho_f C_f a^2 \delta_f \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.15)$$

が得られる。(3.15) 式に (3.6) 式を代入すると

$$P_{f,h} = \frac{2\pi\rho_f C_f \delta_f}{\eta_f} \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \frac{a K_1(\eta_f a) - r_s K_1(\eta_f r_s)}{K_0(\eta_f r_s)} + \pi\rho_f C_f a^2 \delta_f \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_s)} \quad (3.16)$$

を得る。よって、小金属の温度上昇に寄与する熱 $P_{m,h}$ [W]、金属表面から空気中への放熱 $P_{m,r}$ [W]、小金属周囲の高機能フィルムの温度上昇による熱 $P_{f,h}$ [W]、高機能フィルムから空気中への放熱 $P_{f,r}$ [W] を以下にまとめる。

$$P_{m,r} = 2\pi ha(a+l)\Delta T_S \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)}. \quad (3.17)$$

$$P_{f,r} = \frac{2\pi ha\Delta T_S}{\eta_f} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f a)}. \quad (3.18)$$

$$P_{m,h} = \rho_m C_m \pi a^2 l \frac{\Delta T}{\Delta t} \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)}. \quad (3.19)$$

$$P_{f,h} = \frac{2\pi a \rho_f C_f \delta_f}{\eta_f} \frac{\Delta T_S}{\Delta t} \frac{K_1(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)} + \pi \rho_f C_f a^2 \delta_f \frac{\Delta T_S}{\Delta t} \frac{K_0(\eta_f a)}{K_0(\eta_f r_S)}. \quad (3.20)$$

(3.17)~(3.20) 式を (3.2) 式に代入すると、小金属の誘導加熱に必要な磁束密度は

$$P = \frac{36\pi B^2 a (a/\delta)^2}{\sigma \cdot |(\mu + 2\mu_0)J_0(\frac{1+j}{\delta}a) + (\mu - \mu_0)J_2(\frac{1+j}{\delta}a)|^2} \cdot \text{Im} \left[J_2(\frac{1+j}{\delta}a)J_0(\frac{1-j}{\delta}a) \right].$$

$$= P_{m,r} + P_{f,r} + P_{m,h} + P_{f,h}$$

$$B = \sqrt{(P_{m,r} + P_{f,r} + P_{m,h} + P_{f,h}) \frac{\sigma \mu^2 |(\mu + 2\mu_0)J_0(\frac{1+j}{\delta}a) + (\mu - \mu_0)J_2(\frac{1+j}{\delta}a)|^2}{36\pi a(a/\delta)^2 \text{Im} \left[J_2(\frac{1+j}{\delta}a)j_0(\frac{1+j}{\delta}a) \right]}} \quad (3.21)$$

となる。(3.21) 式を用いて必要な磁束密度を計算することが可能となる。

3.2 小金属加熱を実現する周波数と磁束密度の決定

製造ラインに搬送される高機能フィルムに混入した小金属を誘導加熱して検出するには、小金属検出装置の設置場所と誘導加熱された小金属を観測するサーモグラフィックカメラの最小空間分解能の関係から小金属を5秒以内に5°C以上に加熱する必要がある。そこで、前節の理論式よりこの加熱条件を満たす場合に要求される磁束密度と周波数の関係を求める。小金属の加熱条件を満たす場合に要求される交番磁界の周波数と磁束密度を実験により検討する。ここで、高機能フィルムに混入する金属としては、鉄やステンレスを想定している。両者を誘導加熱する場合、透磁率や抵抗値の低いステンレスの方が加熱が困難なためステンレスの金属球を対象に誘導加熱に必要な磁束密度を求める。ここでは、ステンレスとしてSUS304を対象とする。また、プラスチック製のフィルムはポリイミドフィルムとし、図3.1のようにSUS304製ステンレス球がフィルム上に乗った状態を仮定する。計算における条件を表3.1にまとめる。直径が50 μm, 100 μm, 500 μmのSUS304製ステンレス球を5秒間に5°C上昇させるために必要な交番磁界の周波数と磁束密度の関係を図3.6に示す。図3.6より、特性がある周波数を境に変化している。これは磁界の周波数により表皮効果という現象が現れて、金属球に発生するジュール熱の特性が変化するためである。この特性の変化は金属球の半径を a [m] 表皮深さを δ [m] とすると、 $a/\delta=1.59$ を境に現れる。また、図3.6より例えば100 μm級のSUS304製ステンレス球では100 kHzで約10 T, 1 MHzで約1 T, 10 MHzで約100 mTと、高周波なほど磁束密度を下げて加熱できることが確認できる。交番磁界の

表 3.1 計算条件

SUS304			ポリイミドフィルム		
比熱	C_m	590 J/(kg·K)	厚み	δ_f	50 μm
密度	ρ_m	7930 kg/m ³	熱伝達率	k_f	0.29 W/(m ² ·K)
比透磁率	μ_r	1.02	比熱	C_f	1130 J/(kg·K)
導電率	σ	1.39×10 ⁶ S/m	密度	ρ_f	1470 kg/m ³
抵抗率	ρ	7.2×10 ⁷ $\Omega \cdot \text{m}$	加熱条件		
空気			拡大領域	r	1 mm
真空の透磁率	μ_0	4 π × 10 ⁻⁷ H/m	目標温度	ΔT_S	5 °C
熱伝達率	h	1 W/(m ² ·K)			

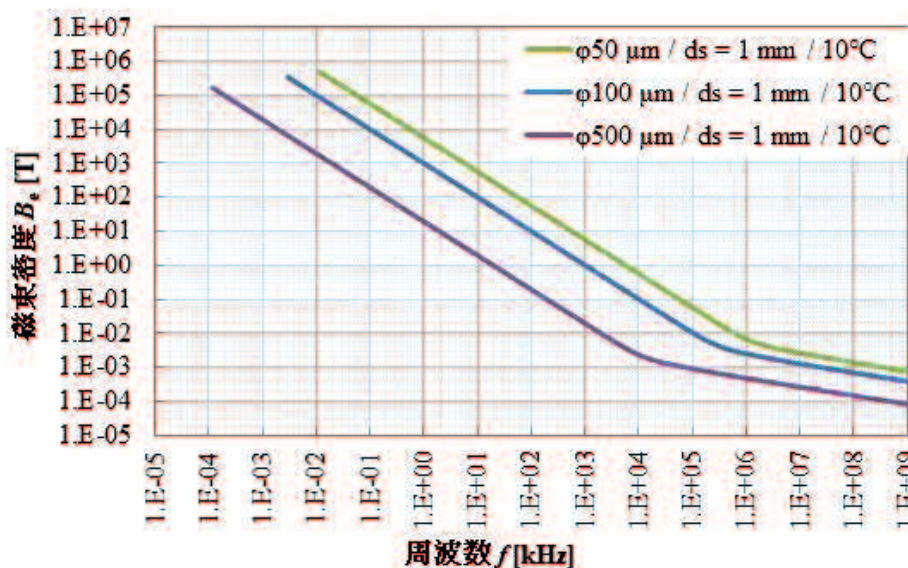


図 3.6 磁束密度と周波数および球状被加熱物体 (SUS304) の直径の関係

周波数は磁界を発生させる誘導加熱コイルに流れる電流の周波数，すなわち，誘導加熱装置の高周波インバータの周波数によって決まる。誘導加熱装置の電源には SiC-MOSFET インバータを用いる。SiC-MOSFET インバータの駆動周波数は数 MHz ほどが限界であるため，交番磁界の周波数は 100 kHz~1 MHz 程度が妥当と考えられる。

次に，本研究で用いる交番磁界の周波数について検討する。図 3.7 に高周波誘導加熱を用いた小金属検出法として先に提案されている小金属検出装置の構成図を示す⁽¹²⁾。小金属検出装置は高周波インバータ，誘導加熱コイル，サーモグラフィックカメラにより構成される。高周波インバータより生成した高周波電流を誘導加熱コイルに印加して高周波交番磁界を発生させ，誘導加熱コイルのギャップ間に固定した小金属を誘導加熱する。誘導加熱された小金属の発熱状態はサーモグラフィックカメラを用いて確認する。文献(12)において小金属の誘導加熱に適した周波数が実験的に検討されている。図 3.7 の小金属検出装置における

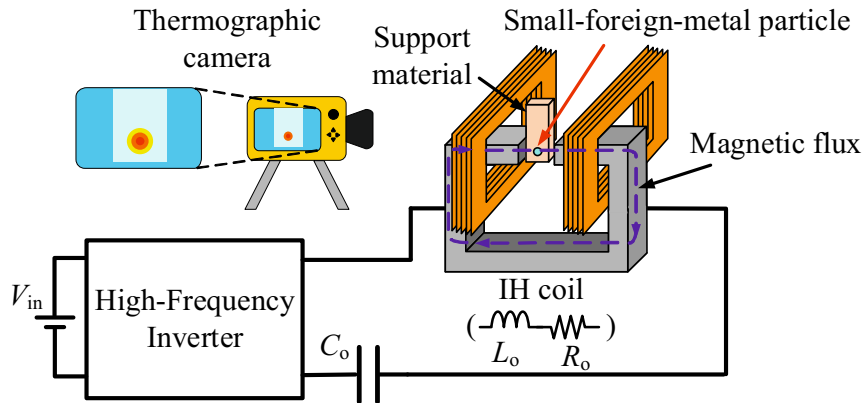


図 3.7 先に提案されてる誘導加熱方式小金属検出装置の構成図

実験条件は以下のとおりである。

- 小金属（球体）
 - 直径：1 mm, 0.7 mm, 0.5 mm, 0.3 mm
 - 材質：SUS304
- 誘導加熱コイル
 - ギャップ内磁束密度：5.03～74 mT
 - コイル電流：4.04～30.7 Arms
- サーモグラフィックカメラ：InfReC R300SR(日本アビオニクス)
- 誘導加熱時間：5 秒間

また、誘導加熱コイルのコア材にはフェライトコアを採用している。図 3.8 に各種コア材の比透磁率の周波数特性を示す。図 3.8 に示すように 100 kHz 以上の高周波に対応したコア材はフェライトやダストコアに限られる⁽⁵²⁾。特にフェライトコアはダストコアに比べ、透磁率が高く、コア内の磁束密度を得やすい。フェライトコアには Ni 系と Mn 系が存在するが、Mn 系は Ni 系に比べ抵抗率が低いため MHz 以上の領域では渦電流損が激しく不向きである⁽⁵³⁾。しかし、透磁率や飽和磁束密度に優れているため、100 kHz～1 MHz 以下の領域で使用する本実験では Mn 系フェライトコアを用いる。そこで、図 3.7 の装置では TDK 社製 Mn 系フェライトコア PC40 を使用している。図 3.9 および図 3.10 に誘導加熱コイルのコア寸法および実機写真を示す。巻き線はギャップ付近に 5 巻きずつ計 10 巻きしている。また、誘導加熱時の磁界による近接効果や誘導加熱によって巻き線が非常に発熱するため、巻き線は極力断面積を広げるために平角銅線を使用している。図 3.8 で示したように交番磁界を高周

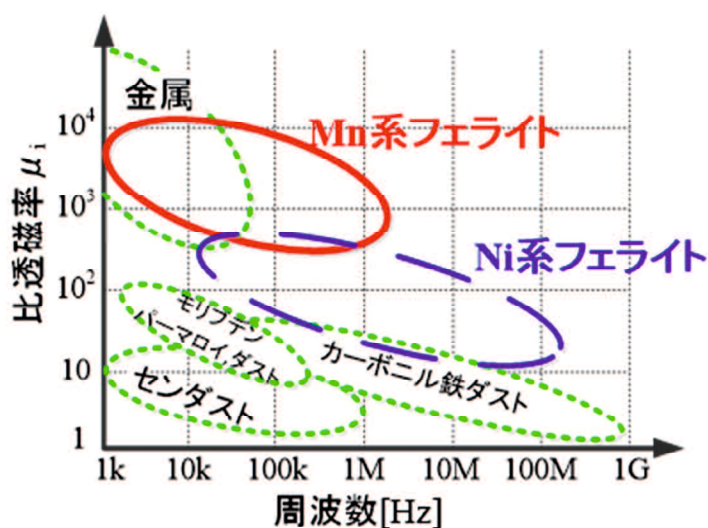


図 3.8 各種コア材における比透磁率の周波数依存性

比透磁率を低下させることによって金属球の加熱効率は向上する。しかし、一般的に周波数が高いほど取り扱いが困難となり、特に MHz 付近は高周波インバータに用いる SiC-MOSFET の駆動周波数の限界でもあるため、周波数の最適化が必要である。そこで、文献 (54) および (55) において小金属の誘導加熱に適した周波数が実験的に検討されている。実験概要および実験結果を下記に示す。小金属に発生するジュール熱 P には小金属内を鎖交する交番磁界の周波数 f と磁束密度 B の間には

$$P \propto (B \cdot f)^2 \quad (3.22)$$

の関係がある。ジュール熱が (3.22) 式に従うと仮定し、 $B \cdot f$ を一定のまま周波数 f を 200～1500 kHz まで変化させ、直径 1 mm, 0.7 mm, 0.5 mm, 0.3 mm のステンレス球 (SUS304) を対象に 5 秒間の誘導加熱実験を行う。 $B \cdot f$ を一定に保つため、磁束密度と比例関係にある電流を周波数ごとに調整して $B \cdot f$ 一定となるようにしている。表 3.2 に周波数を 200～1500 kHz まで変化させた際の加熱条件を示す。 $B \cdot f$ は 388 kHz を基準としており、ほぼ全ての周波数において一定である。図 3.11 に各周波数における小金属の上昇温度と周波数の関係を示す。図 3.11 から、直径 0.7 mm 以上では一定の場合、上昇温度はほぼ一定であることがわかる。しかしながら、直径 0.5 mm 以下では周波数を下げ、磁束密度を増やすほど上昇温度が高くなっている。この理由については理論的には説明できていないが、直径 0.5 mm 以下の小金属においては周波数が低く、磁束密度が高いほど飛躍的に上昇温度が高くなっている。ゆえに、実験結果から本研究で提案する小金属検出装置に使用する高周波インバータの駆動周波数は 400～500 kHz 程度が妥当であると考えられる。ここで、日本においては

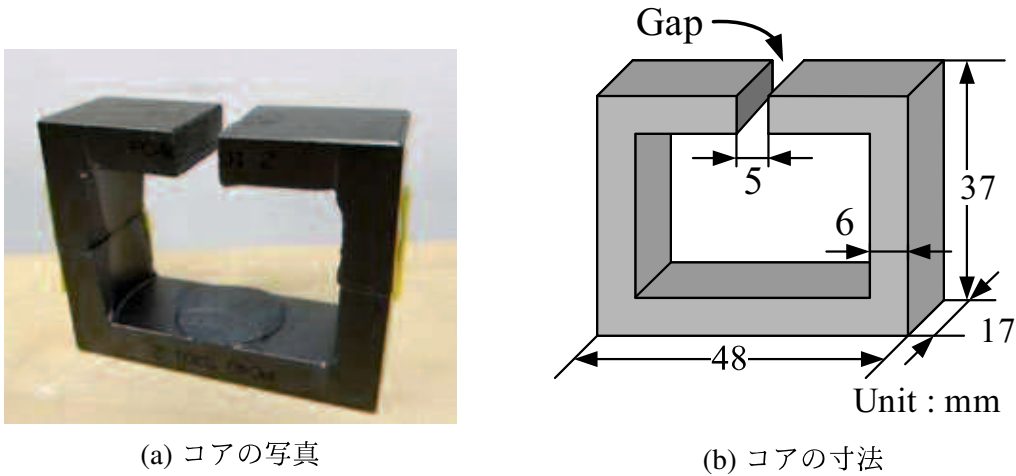


図 3.9 誘導加熱コイルのコア寸法



図 3.10 誘導加熱コイルの実機写真

AM (Amplitude Modulation) 帯ラジオに 526.5~1606.5 kHz の周波数が使用されており，誘導加熱周波数を 500 kHz 程度に設定した場合には電波法による高周波設備への規制が厳しくなる⁽⁵⁶⁾。これらの実験結果および文献 (56) における高周波設備の規制より，本研究で使用する高周波インバータの駆動周波数を 400 kHz に決定した。

次に，小金属に鎖交する必要な磁束密度について検討する。(3,21) 式の磁束密度に関して小金属の伝熱による拡大範囲とサーモグラフィックカメラの分解能の関係から求めるとする。まず，サーモグラフィックカメラの視野範囲から最小空間分解能を求める。本論文では，詳しくは 4 章および 5 章で後述するが A4 サイズ横幅 (210 mm) フィルムでの小金属検出を行う小金属検出プロトタイプモデルを作製することを想定している。プロトタイプモデルでは，製品化した際のコスト面を考えサーモグラフィックカメラ一台で小金属を検出すること

表 3.2 実験時の周波数と磁束密度

周波数 kHz	電流 Arms	磁束密度 mT	$B \cdot f$
1510	4.04	5.03	0.47
1380	4.29	7.94	0.67
1290	4.66	10.25	0.81
1210	5.01	12.16	0.90
1120	5.46	13.45	0.92
1008	5.97	16.34	1.01
896	6.74	18.02	0.99
791	7.57	20.41	0.99
711	8.41	24.51	1.07
588	10.3	31.00	1.12
493	12.2	32.75	0.99
388	15.0	42.03	1.00
301	20.0	43.61	0.80
193	30.7	73.97	0.88

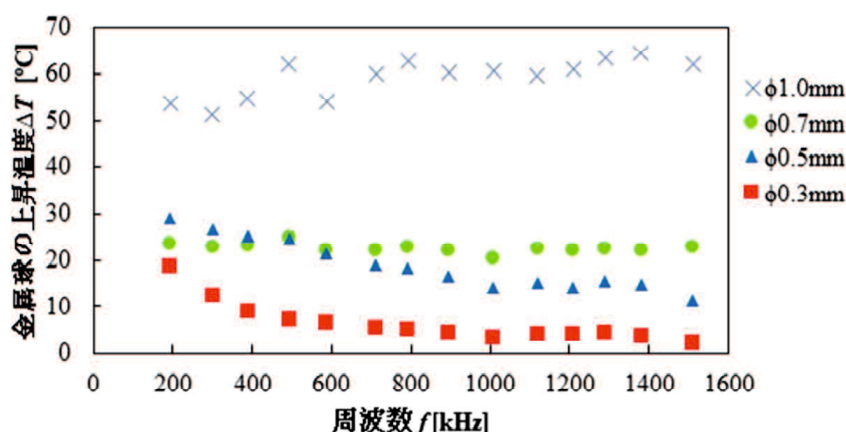


図 3.11 金属球の温度誘導上昇と周波数の関係

を検討している。搬送されているフィルムから垂直上向きに 70 cm 離れた場合、高機能フィルム全体をカメラでとらえることができる。現在販売されているサーモグラフィックカメラにおいて、医療現場用または研究開発用で使用されているものに関して画素数は 640×480 の 30 万画素のカメラが高画素のモデルとなっている⁽⁵⁷⁾。この 30 万画素のサーモグラフィックカメラを使用すると想定し、高機能フィルム-カメラ間の距離、視野角度および画素数から空間分解能は 1 ピクセル 0.425 mm となる。

次に、求めた空間分解能サイズと伝熱による拡大範囲から検出磁束密度を求める。図 3.12 に、カメラを 70 cm 離れた時の加熱前後の小金属とサーモグラフィックカメラの解像度の

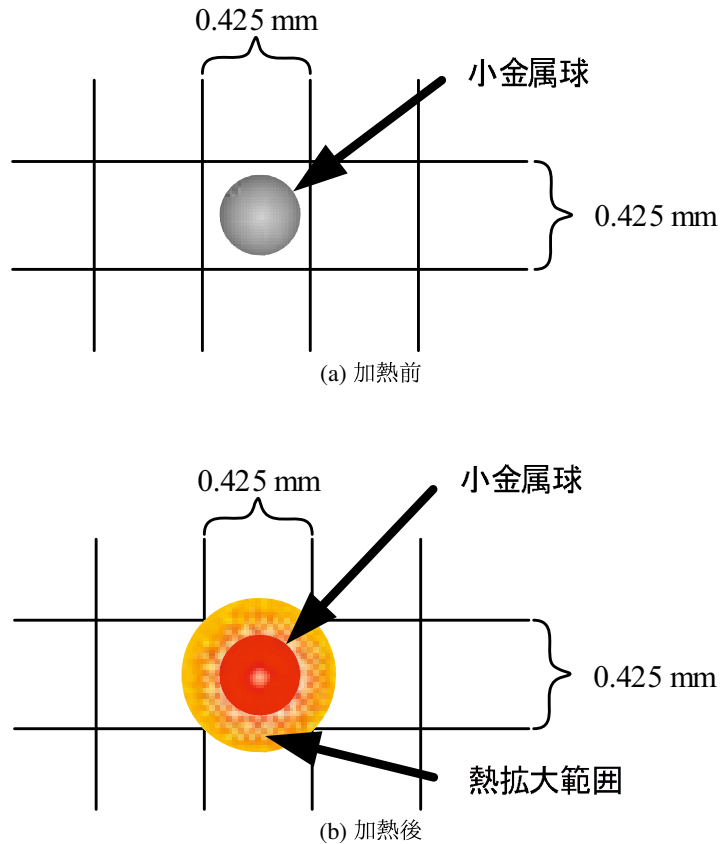


図 3.12 カメラ分解能と熱拡散の関係

関係を示す。また、このときの小金属の大きさはサーモグラフィックカメラの1ピクセル0.425 mm以下となる直径0.3 mmの小金属球を想定する。図3.12(a)に示すように小金属が最小ピクセルの真ん中にある場合を想定し、図3.12(b)のように1ピクセル分小金属と伝熱によるフ高機能フィルムの温度上昇部分が拡大したとする。このときの小金属、フィルムの放熱および発熱に関わる値を(3.17), (3.18), (3.19)および(3.20)式から求める。計算に使用するSUS304, 高機能フィルムおよび空気の物性値は表3.1の値を使用した。また、加熱条件として加熱時間 Δt [s]は5秒, 拡大領域半径 r_s [mm]は図3.12(b)から

$$r_s = \frac{0.425 \times \sqrt{2}}{2} = 0.3 \text{ mm}$$

を使用した。

表3.3に、目標温度上昇 ΔT_s [°C]を2°Cから5°Cまで0.5°C刻みで変化させた際の(3.17), (3.18), (3.19), (3.20)式の和 P [W], 温度上昇に必要な鎖交磁束密度を示す。表3.3から材質SUS304の直径0.3 mm小金属球を5秒間で5°C温度上昇させ検出するためには31.6 mTの磁束密度が必要であることが確認できる。詳しくは4章および5章で後述するが、高機能フィルム上に付着した小金属を検出する場合30 mT程度の磁束密度が必要であるといえる。

表 3.3 鎖交磁束密度計算結果 (直径 0.3 mm の小金属球)

温度上昇 [°C]	必要発熱量 P [W]	鎖交磁束密度 [mT]
5	7.11×10^{-5}	31.6
4.5	6.40×10^{-5}	29.9
4	5.69×10^{-5}	28.2
3.5	4.98×10^{-5}	26.4
3	4.27×10^{-5}	24.5
2.5	3.56×10^{-5}	22.3
2	2.84×10^{-5}	19.9

表 3.4 SiC-MOSFET (C2M0400120D) の電気的特性

Item	Symbol	Value
Drain-Source voltage	V_{DS}	1200 V
Continuous drain current	I_D	$T_C=25\text{ °C}$ 60 A
		$T_C=100\text{ °C}$ 40 A
Gate-Source voltage	V_{GS}	+20 V
		-5 V
Static drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$T_j=25\text{ °C}$ 40 mΩ
		$T_j=150\text{ °C}$ 52 mΩ
Power dissipation ($T_j=125\text{ °C}$)	P_D	330 W
Junction temperature	T_j	150 °C
Input capacitance	C_{iss}	1893 pF
Output capacitance	C_{oss}	150 pF
Reverse transfer capacitance	C_{rss}	10 pF
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	15 ns
Rise time	t_r	52 ns
Turn-off delay time	$T_{d(off)}$	26 ns
Fall time	t_f	34 ns

3.3 SiC-MOSFET を用いた高周波インバータのギャップ内小金属加熱

図 3.10 における誘導加熱コイルを用いてギャップ内における小金属加熱実験を行う。また、前述したように図 3.10 における小金属検出装置の高周波電源に 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いる。小金属検出装置は SiC-MOSFET 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により構成される。高周波インバータより生成した高周波電流を誘導加熱コイルに流して高周波交番磁界を発生させ、誘導加熱コイルのギャップ間に固定した小金属を誘導加熱する。誘導加熱された小金属の発熱状態はサーモグラフィックカメラを用いて確認する。誘導加熱方式小金属検出法では搬送されるフィルム幅に様に磁界を発生させるために誘導加熱コイルを複数接続する必要がある。そのため、SiC-MOSFET 高周波インバータには大電力出力が要求される。そこで、使用する SiC-MOSFET の定格仕様

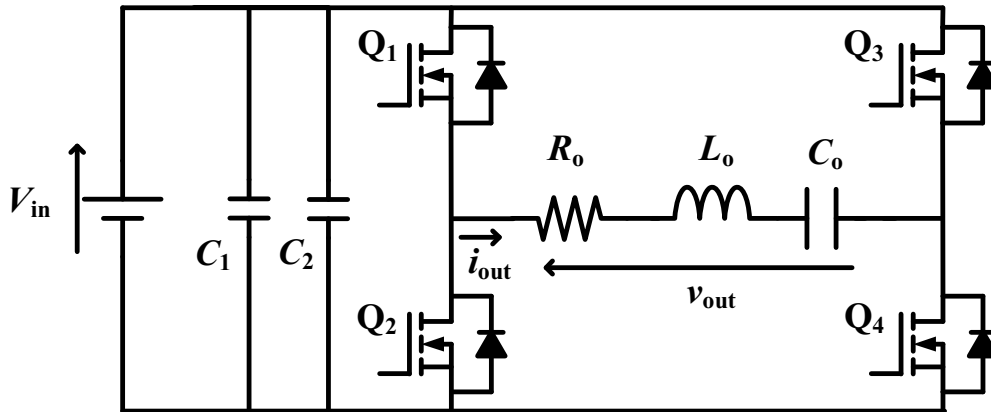


図 3.13 実験回路構成図

目標値は本研究室で所有している中で最大出力の直流電源装置の定格を考慮して決定した。設定した仕様目標値より、実験で使用する SiC-MOSFET には Cree 社製の「C2M0040120D」を選定した。表 3.4 に、「C2M0040120D」の電気的特性を示す⁽⁵⁸⁾。「C2M0040120D」は現在市販されている同定格の SiC-MOSFET の中でも優れた低オン抵抗特性とスイッチング特性を有している。また、表 3.4 のオン抵抗 $R_{DS(on)}$ に着目するとジャンクション温度 T_j が 125°C においても値がほとんど変化していない。一方、同定格の Si-MOSFET の場合は同条件でオン抵抗値が約 2 倍となる⁽⁵⁹⁾。このことから SiC-MOSFET の高温動作が可能という特長が確認できる。図 3.13 に、フルブリッジインバータの実験回路構成を示す。本節では試作したフルブリッジインバータを用いて小金属加熱実験を行う。負荷には図 3.10 に示す誘導加熱コイルおよび共振用キャパシタからなる RLC 直列共振負荷を接続する。また、表 3.5 に回路定数を示す。次に、試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータ回路について説明する。スイッチング周波数 400 kHz での安定動作を実現するために配線構造やゲートドライブ回路構成を考慮して回路を試作した。図 3.14 に、試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータ回路を示す。主回路基板とゲートドライブ回路基板は別基板としており、ピンで接続できるようにしている。また、SiC-MOSFET の放熱器としてヒートシンクを使用し、自然空冷とした。図 3.15 にゲートドライブ回路の構成図をそれぞれ示す。試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータ回路の特長を以下に示す。

- サージ電圧の原因となる寄生インダクタンス成分を低減するために主回路基板は両面銅箔基板を用いて電流経路の対称性を考慮したラミネートバスバー構造としている。また、主回路基板から DC キャパシタまでの DC バスラインについては 2 枚の銅板の間に絶縁シートを挟んだラミネートバスバー構造としている^(60,61)。

- フルブリッジインバータにおいてはスイッチングの度に図 3.13 の $C_2 \rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2$, $C_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4$ のループ内の寄生インダクタンス成分と寄生容量成分が共振してサージ電圧の

表 3.5 実験回路定数

Item	Symbol	Value
Input voltage	V_{in}	70 Vdc
Output current	I_{out}	30 Arms
Switching frequency	f_{sw}	400 kHz
DC capacitor	C_1	5600 μ F
Bypass capacitor	C_2	2.24 μ F
Equivalent resistance of load	R_o	1.65 Ω
Inductance of load	L_o	9.37 μ H
Capacitance of load	C_o	16.3 nF

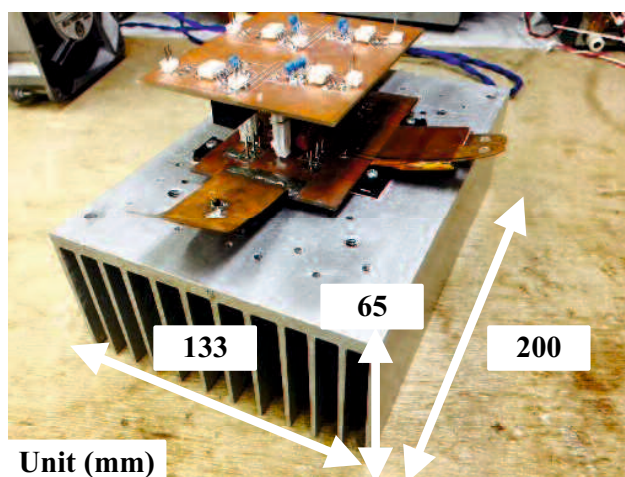


図 3.14 試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータ

原因となる電流が流れる。そのため、バイパスコンデンサ C_2 に周波数特性が良く寄生インダクタンス成分が少ない MLCC (Multi-Layer Ceramic Capacitor) を複数個並列して配置してサージ電圧を低減している⁽⁶²⁾。

● 回路の配線構造を改良することで寄生インダクタンス成分の低減は可能となるが、ゼロにすることはできないので、サージ電圧は発生する。その際に MOSFET の入力容量 C_{iss} に高周波電流が流れ込んで誤点弧が発生し、インバータの上下アームの短絡が発生することがある。特に、SiC-MOSFET はゲート閾値電圧 $v_{GS(th)}$ が低いために誤点弧が発生しやすく、対策が必要となる⁽⁶³⁾。そこで、マイナスバイアスが可能なゲートドライブ回路を構築した。マイナスバイアスすることでゲート電圧にノイズが重畳してもゲート閾値電圧を超えないようにすることができる。GS (Gate Source) 間には、使用した SiC-MOSFET の推奨電圧値である ON 時に 20 V、OFF 時に -5 V が印加されるようにした。ゲートドライブ回路の構成図は図 3.15 のとおりである。ゲートドライブ回路にはゲート駆動用静電カプラ FOD3184(FAIR

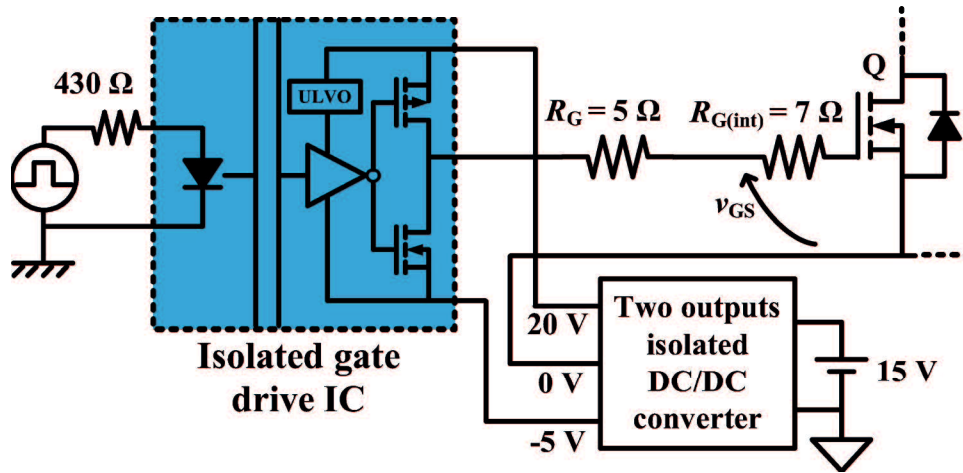


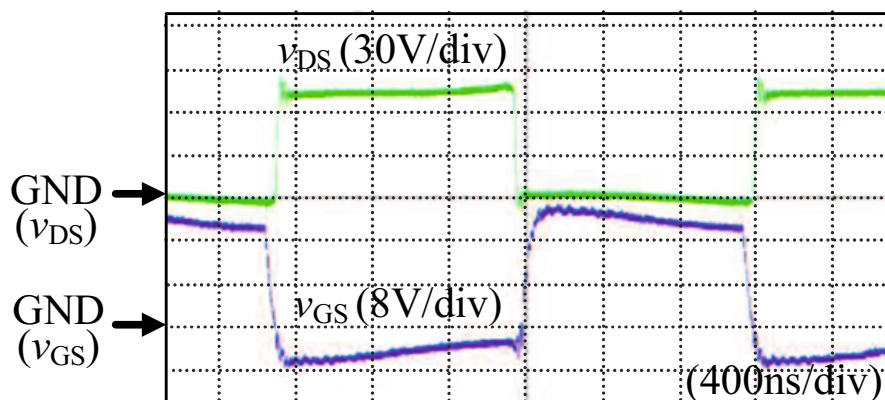
図 3.15 ゲートドライブ回路構成図

CHILD 社) と 2 出力絶縁型 DCDC コンバータ MGJ2D152005SC (Murata Electronics 社) を用いている。ゲート駆動用静電カプラ内での電圧降下により GS 間には ON 時に 20 V, OFF 時に -5 V が印加される。試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータの動作を確認するために Tektronix 社のオシロスコープ DPO5204B を用いて各部動作波形を測定した。出力電圧 v_{out} は高圧差動プローブ P5200A (Tektronix 社) を用いて測定し、スイッチ Q_4 の電圧は受動プローブ TPP1000 (Tektronix 社), 出力電流 i_{out} は電流プローブ TCP0150 (Tektronix 社) を用いて測定した。図 3.16 に試作した SiC-MOSFET 高周波インバータの各部動作波形を示す。図 3.16(a) は SiC-MOSFET 高周波インバータにおけるスイッチ Q_4 のゲートソース間電圧およびドレインソース間電圧を示す。図 3.16(b) は SiC-MOSFET 高周波インバータにおける出力電流および出力電圧を示す。図 3.16 に示すようにサージ電圧が発生している期間でゲート閾値電圧 $v_{GS(th)}$ は超えておらず、誤点弧は発生していない。この結果から試作した SiC-MOSFET フルブリッジインバータはサージ電圧が高い場合でも安定動作が可能であり、上述の実装技術とゲートドライブ回路の有効性を確認できた。

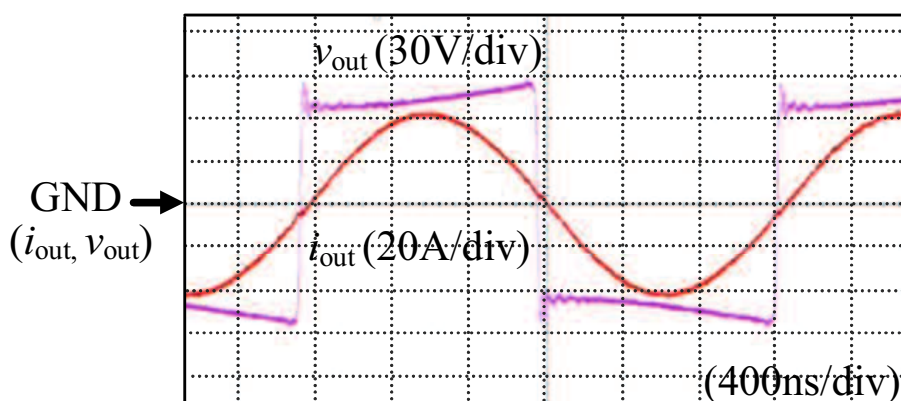
次に、試作した SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた小金属加熱実験を行った。前述したように実験条件および対象金属は以下の通りである。

- 小金属 (球) …… 直径: 0.7 mm, 0.5 mm, 0.3 mm, 材質: SUS304
- 誘導加熱コイル …… ギャップ磁束密度: 80 mT 程度 (コイル電流 30 Arms 時)
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 400 kHz
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- 誘導加熱時間 …… 5 秒間

図 3.17 にコアギャップ内加熱における小金属加熱結果を示す。図 3.17(a) にコアギャップ内に設置した小金属の写真を示す。図 3.17(b) に直径 0.15 mm の小金属加熱結果を示す。図 3.17(c)



(a) スイッチ Q_4 のゲートソース間電圧およびドレインソース間電圧波形

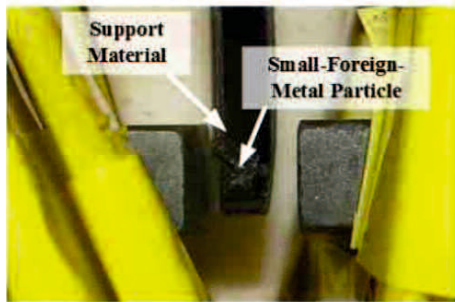


(b) SiC-MOSFET 高周波インバータの出力電圧および出力電流波形

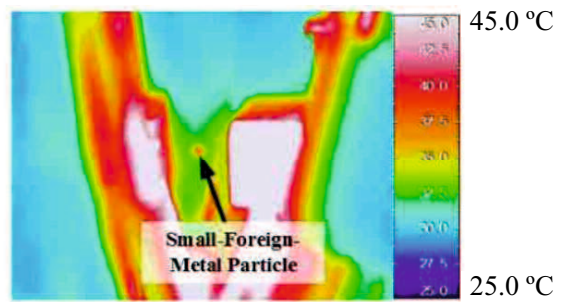
図 3.16 SiC-MOSFET 高周波インバータの各部動作波形

に直径 0.3 mm の小金属加熱結果を示す。図 3.17(d) に直径 0.5 mm の小金属加熱結果を示す。図 3.17(e) に直径 0.7 mm の小金属加熱結果を示す。これらの実験結果から、400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた小金属検出装置において、サーモグラフィックカメラによって容易に小金属が検出可能であることを明らかにした。図 3.17 の実験結果による各小金属の温度上昇結果を述べる。直径 0.15 mm の小金属の温度上昇は 12.2 °C、直径 0.3 mm の小金属の温度上昇は 29.0 °C、直径 0.5 mm の小金属の温度上昇は 32.7 °C、直径 0.7 mm の小金属の温度上昇は 42.6 °C となった。よって、提案する 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた誘導加熱方式小金属検出法の有効性を確認した。

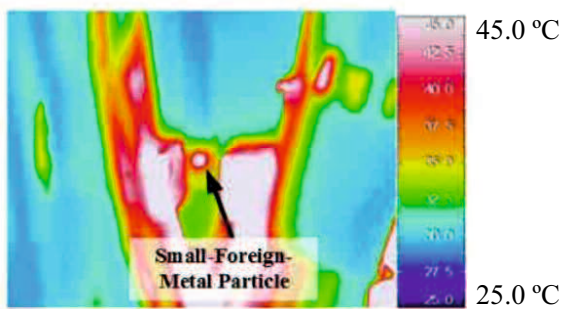
次に、誘導加熱方式小金属検出装置における高周波磁束密度によって作業者の人体への影響が懸念されるため国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP: International Commission on Non-ionizing Radiation Protection) によって提案される非電離放射線へのばく露の防護に対す



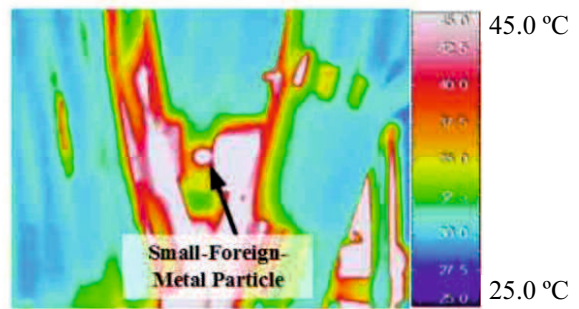
(a) コアギャップ内に設置した小金属の写真



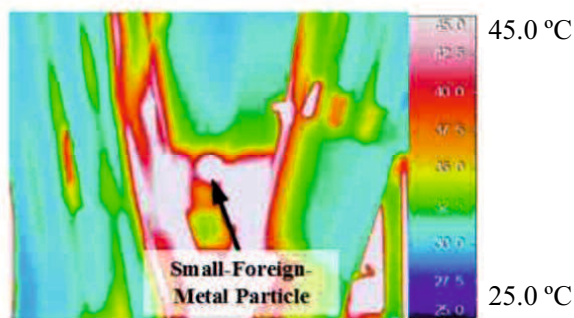
(b) 直径 0.15 mm の小金属加熱結果



(a) 直径 0.3 mm の小金属加熱結果



(b) 直径 0.5 mm の小金属加熱結果



(b) 直径 0.7 mm の小金属加熱結果

図 3.17 小金属加熱結果

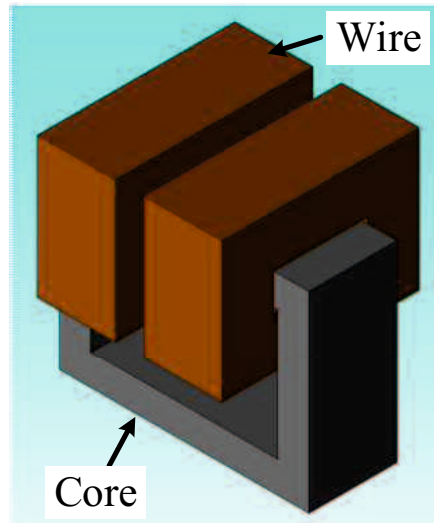
表 3.6 各周波数範囲における磁束密度の基本制限⁽⁶⁴⁾

周波数範囲 f	磁束密度 B [T]
1 Hz～8 Hz	$(4 \times 10^{-2})/f^2$
8 Hz～25 Hz	$(5 \times 10^{-3})/f$
25 Hz～50 Hz	2×10^{-4}
50 Hz～400 Hz	2×10^{-4}
400 Hz～3 kHz	$(8 \times 10^{-2})/f$
3 kHz～10 MHz	2.7×10^{-5}

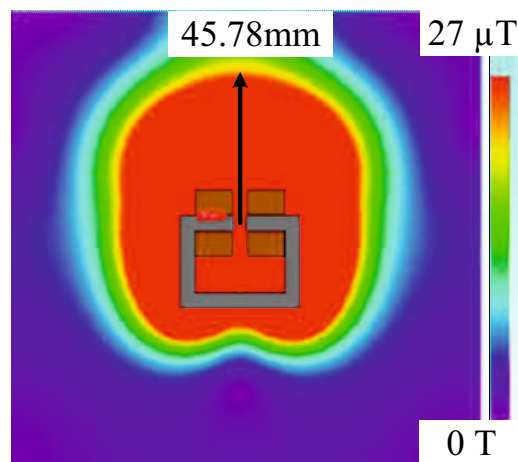
るガイドラインについて検討する。ICNIRPのガイドラインによると、磁界が発生している環境でのばく露は作業者の健康被害におよぶ可能性があることから1 Hzの低周波から10 MHzまでの高周波領域において人体にばく露する磁界が制限されている⁽⁶⁴⁾。表 3.6 に文献 (64) のガイドラインにおける磁束密度の制限値を示す。表 3.6 より、400 kHzの周波数に対しては27 μ T以上の磁束密度が発生している環境下における作業は制限されている。ここで、図 3.10 に示す誘導加熱コイルにおいてICNIRPのガイドラインを満足することを確認する。図 3.18 に磁界解析ソフトウェア JMAG(JSOL 社製)を用いた誘導加熱コイル周辺の磁界解析結果を示す。図 3.18(a) は誘導加熱コイルのモデルを示す。図 3.18(b) は誘導加熱コイルの周辺における磁界解析結果を示す。図 3.18(b) の磁界解析結果より、図 3.10 の誘導加熱コイルのコアギャップ周辺においてコアギャップから45.78 mm以上の距離を確保する必要がある。小金属検出装置の誘導加熱コイルを高機能フィルムの製造工程に適用した場合、製造工程における高機能フィルムは数百ミリメートルの幅を有するため45.78 mm以上の距離の確保が保証される。よって、高周波誘導加熱方式小金属検出装置はICNIRPのガイドラインを満足することが確認できる。

3.4 SiC-MOSFET 高周波インバータの損失低減

次に、SiC-MOSFETの並列接続による電力変換効率改善効果について検討した。小金属検出装置におけるSiC-MOSFET高周波インバータを損失分析し、全損失の中で導通損失が支配的であることを確認した。導通損失を低減するために効果的な方法として並列接続したSiC-MOSFET高周波インバータを試作し、導通損失低減効果を確認した。まず、パワーエレクトロニクス製品に用いられる電力変換回路におけるパワーデバイスから発生する損失を検討する。図 3.19 にパワーデバイスを用いたスイッチング回路とその動作波形を示す。電力変換回路において、パワーデバイスの低損失化が求められている。パワーデバイスはスイッチング機能と整流機能を有しており、駆動回路によってオンオフを制御する。図 3.19(a) に実際のパワーデバイスのスイッチング回路を示す。スイッチング動作する際に遷移時間を要し、オフ期間の時には漏れ電流が流れ、オン期間の時はオン電圧を生じる。オンからオフに切り



(a) 磁界解析モデル



(b) 磁界解析結果

図 3.18 誘導加熱コイル周辺の磁界解析結果

替わる際はターンオフ損失，オフからオンに切り替わる際はターンオン損失というスイッチング損失が発生する。オン期間中にはオン電圧とパワーデバイスに流れる電流 i_d によって，導通損失が生じる。オフ期間中は，漏れ電流とパワーデバイスに印加される電圧 v_{DS} によってオフ損失が生じる。したがって，低損失化するために以下に示す項目が求められる。

- 低スイッチング損失能力 (低ターンオン損失および低ターンオフ損失)
- 低導通損失能力
- 良好な電流遮断能力 (低オフ損失)

• 低損失駆動能力

現状のパワーデバイス、低導通損失、低損失駆動、低スイッチング損失の3つが特に重要視されている。さらに、容量が大きい電力変換器に対しては低スイッチング損失と低導通損失が求められる。

本節では、試作した誘導加熱用 SiC-MOSFET フルブリッジインバータの損失を測定および計算し電力変換効率の測定、損失分析を行う。効率測定にはマルチパワーメーター (YOKOGAWA WT3000) を使用し、効率測定を行い、電力変換効率を算出する。実験に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータにおける SiC-MOSFET の並列接続では、前述の誘導加熱実験に使用した Cree 社製の SiC-MOSFET 「C2M0040120D」を選定した。また、SiC-MOSFET 高周波インバータの出力においても誘導加熱用のコイルを使用する。ここで、高周波インバータの電力変換効率 η は、入力電力を P_{in} 、出力電圧を P_{out} とすると

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3.23)$$

で表すことができる。(3.23) 式の結果より、試作した回路の電力変換効率向上の検討を行うため、試作したフルブリッジインバータから発生しうる損失分析を行う。ここでは、損失の大半を占めることが考えられるスイッチング素子 $Q_1 \sim Q_4$ の導通損失、スイッチング損失、環流ダイオード損失について検討する。コンデンサや配線で発生する損失はその他の損失としている。各スイッチの損失を下の (3.24)、(3.25)、(3.26) 式をもとに計算した。

・導通損失

スイッチに電流が流れる時間を $t_1 \sim t_2$ 、出力電流実効値を I_{out} としオン抵抗を R_{DS} とすると導通損失 P_{on} は

$$P_{on} = \frac{1}{T_{SW}} \int_{t_1}^{t_2} R_{DS} I_{out}^2 dt \quad (3.24)$$

で表される。

・スイッチング損失

フルブリッジインバータには誘導加熱コイルおよび直列共振用キャパシタから構成される RLC 直列負荷を用いて遅れ位相で動作しているので、ターンオフ損失のみを考慮すればよい。スイッチング周期を T_{SW} 、ターンオフ時間を t_{off} 、スイッチの電圧を V_Q 、スイッチに流れる電流を I_Q とし、スイッチング損失を P_{SW} とすると

$$P_{SW} = \frac{1}{T_{SW}} \int_{t_1}^{t_0+T_{SW}} V_Q I_Q dt \quad (3.25)$$

で表される。

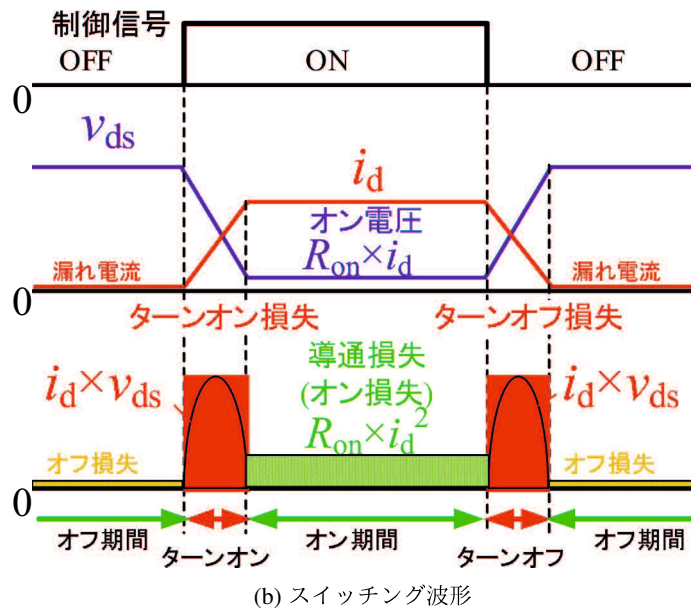
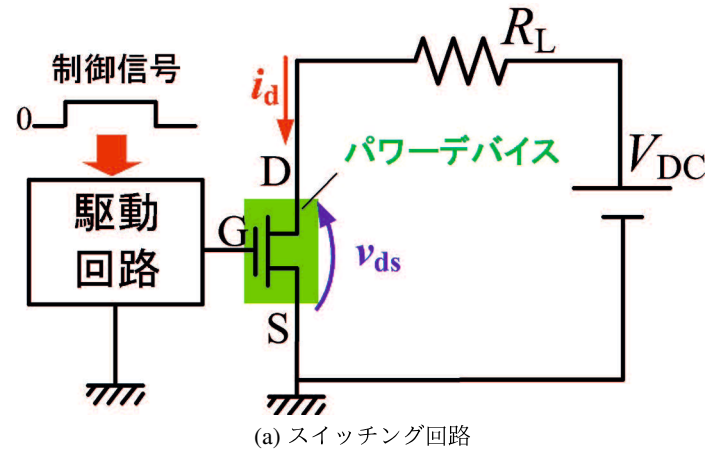


図 3.19 パワーデバイスのスイッチング図

・環流ダイオード損失

環流ダイオードに導通する時間を t_D とし、順方向降下電圧を V_D 、環流ダイオードに流れる電流を i_D とすると、環流ダイオードの定常損失 P_D は

$$P_D = \frac{1}{T_{SW}} \int_{t_0}^{t_0+t_D} V_D i_D dt \quad (3.26)$$

で表される。

図 3.20 にマルチパワーメーター (YOKOGAWA WT3000) を使用した SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を測定する際の回路構成を示す。図 3.20 において、 V_1 と A_1 を用いて入力電力 P_{in} を測定し、 V_2 と A_2 を用いて出力電力 P_{out} を測定している。図 3.21 にマルチパワーメーター (YOKOGAWA WT3000) を用いた SiC-MOSFET フルブリッジインバータの損失分析の結果を示す。また、図 3.21 に示す SiC-MOSFET フルブリッジインバータを

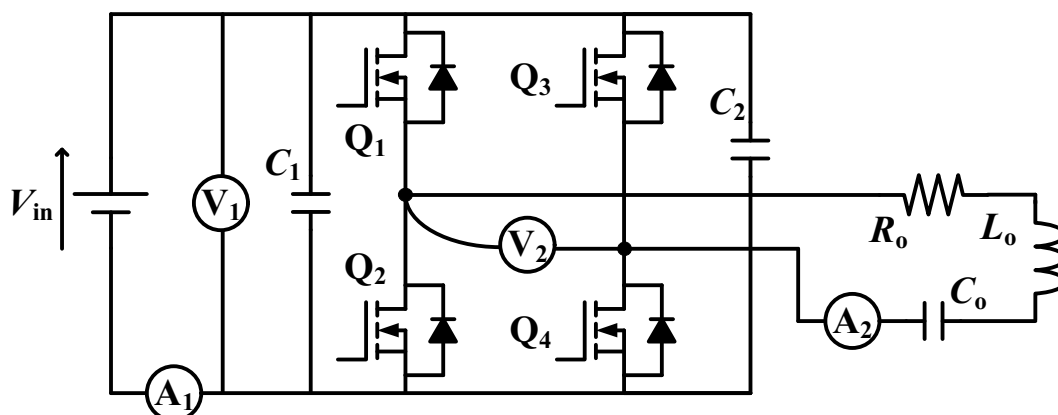


図 3.20 電力変換効率測定回路

SiC-MOSFET 単相インバータと呼ぶ。図 3.21 に示すように、SiC-MOSFET 単相インバータでの電力変換効率は 94.9 %，全損失は 110.0 W であり，そのうち導通損失が 96.4 W，ターンオフ損失は 3.9 W，ダイオード損失は 3.2 W となった。バイパスコンデンサの等価直列抵抗などによるその他の損失は 8.6 W となった。損失分析結果より，試作した SiC-MOSFET 単相インバータにおいて，導通損失が全損失の約 87.6 % を示していることが明らかになった。そこで，導通損失を低減する方法として SiC-MOSFET の 2 並列接続である。また，SiC-MOSFET の 2 並列接続したフルブリッジインバータを SiC-MOSFET 2 並列接続インバータと呼ぶ。試作した SiC-MOSFET 2 並列接続インバータにおいて SiC-MOSFET 単相インバータと同様に，電力変換効率の測定および損失分析を行い，導通損失低減効果を確認する。図 3.22 に SiC-MOSFET を 2 並列接続した場合と，SiC-MOSFET 単相での比較の図を示す。図 3.22 より，2 並列接続した場合は各スイッチ（ Q_1 と Q_2 ）に流れる電流が半分になることが確認できる。ここで，図 3.22(b) において，スイッチの導通損失を計算する。SiC-MOSFET のオン抵抗を R_{DS} ，スイッチング時間を T_{SW} ，出力電流実効値を I_{out} として t_1 から t_2 までの区間での定常損失を $P_{on(2)}$ とすると，

$$P_{on(2)} = \frac{2}{T_{SW}} \int_{t_1}^{t_2} R_{DS} \left(\frac{I_Q}{2} \right)^2 dt \quad (3.27)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{T_{SW}} \int_{t_1}^{t_2} R_{DS} I_Q^2 dt \quad (3.28)$$

が成り立つ。

(3.28) 式より，(3.24) 式と比較すると導通損失が半分に低減可能であることが確認できる。本節では，SiC-MOSFET 2 並列接続インバータを試作し，試作した 2 つの SiC-MOSFET インバータの電力変換効率の測定，損失分析を行い導通損失が低減されていることを明らかにする。図 3.23 に SiC-MOSFET 2 並列接続インバータの回路図を示す。なお，SiC-MOSFET 単相インバータとの効率を比較するため，使用する SiC-MOSFET および回路定数は同じ条件で実験を行った。図 3.23 の回路において，(3.23) 式を用いて SiC-MOSFET 2 並列接続インバー

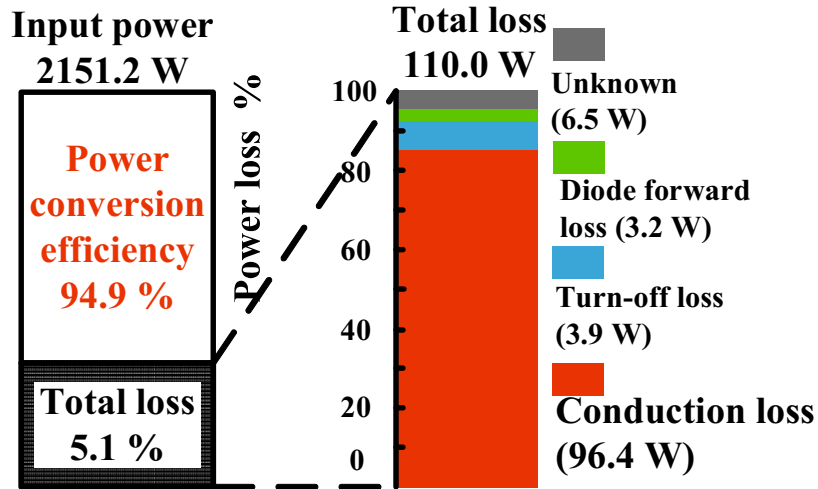


図 3.21 SiC-MOSFET 単相インバータの損失分析結果

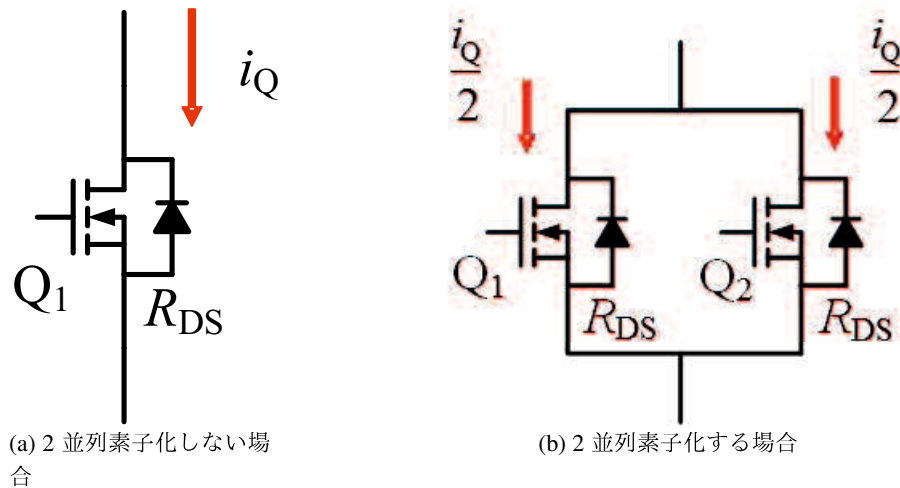


図 3.22 SiC-MOSFET の 2 並列素子化に関する図

タの電力変換効率を測定した。測定方法は、マルチパワーメーター (YOKOGAWA WT3000) を用いて電力変換効率の測定を行い、電力変換効率および損失を算出する。図 3.24 に SiC-MOSFET 2 並列接続インバータの損失分析結果を示す。図 3.24 より、SiC-MOSFET 2 並列接続インバータの電力変換効率は 96.8 % となった。全損失は 70.2 W であり、そのうち導通損失が 48.8 W、ターンオフ損失が 10.4 W、ダイオード損失が 2.4 W、バイパスコンデンサの等価直列抵抗などによるその他の損失は 8.6 W となった。これらの結果より、図 3.21 と図 3.24 を比較すると SiC-MOSFET 2 並列接続インバータにより、SiC-MOSFET の導通損失は 96.4 W から 48.8 W と 49.4 % の低減効果を確認した。(3.28) 式と (3.24) 式によって、導通損失を 50 % 低減することを示しているが導通損失が 50 % まで低減していない要因としては、各 SiC-MOSFET に均等に電流が流れていないことが推測される。2 並列接続された各 SiC-MOSFET の寄生インダクタンスのばらつきによって電流アンバランスが生じ、導通損

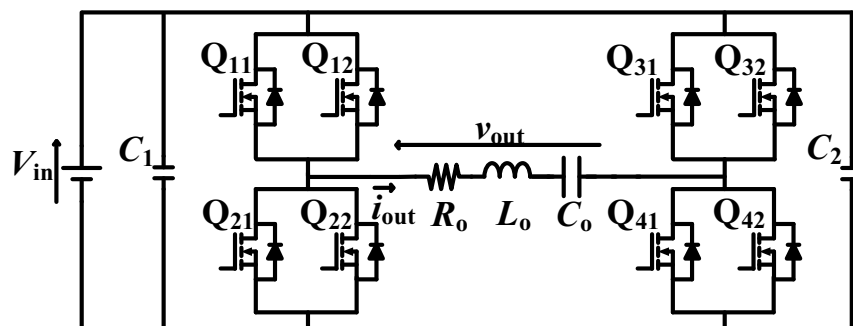


図 3.23 SiC-MOSFET2 並列接続フルブリッジインバータの回路図

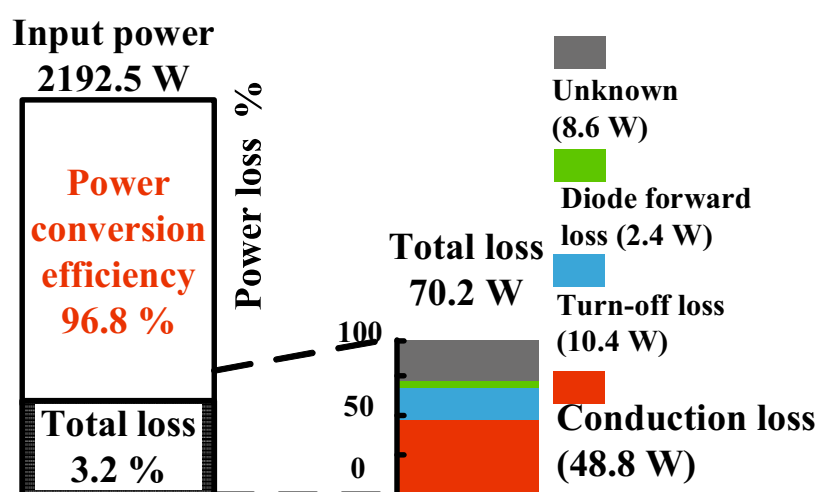


図 3.24 SiC-MOSFET 2 並列接続インバータの損失分析結果

失が 50 % 低減していない要因となる。これらの電力変換効率および損失分析結果より、提案する小金属検出装置に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータの SiC-MOSFET を 2 並列接続することにより、SiC-MOSFET の導通損失を 49.4 % 低減することを確認した。その結果 SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を 94.9 % から 96.8 % に向上することを確認した。

3.5 本章のまとめ

本章では、高機能フィルム中に混入した小金属の高周波誘導加熱を実現する周波数と磁束密度の関係について理論と実験結果により検討し、小金属の誘導加熱を実現する周波数条件を明らかにした。また、SiC-MOSFET を用いて駆動周波数 400 kHz 駆動の高周波インバータを試作し、その動作検証および小金属加熱実験を行った。その結果から試作した 400 kHz SiC-MOSFET 高周波インバータが誘導加熱方式小金属検出法の高周波電源に適用可能であることを示した。次に、誘導加熱方式小金属検出法の高周波電源に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率向上の検討を行った。SiC-MOSFET 高周波インバータが発生

する全損失において導通損失が約 80 %を占めていることに着目して、SiC-MOSFET 2 並列接続インバータを試作し、電力変換効率測定および損失分析を行った。電力変換効率測定および損失分析結果から、提案する小金属検出装置に使用する SiC-MOSFET 高周波インバータの SiC-MOSFET を 2 並列接続することにより、SiC-MOSFET の導通損失を 49.4 %低減することを確認した。その結果 SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率を 94.9 %から 96.8 %に向上することを確認した。

第4章 フリンジング磁束を用いた誘導加熱方式小金属検出法

第3章では、先に提案されている小金属検出装置の誘導加熱コイルを用いて誘導加熱コイルのコアギャップ内での小金属加熱を行った。しかしながら、先に提案されている小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では、高機能フィルムの製造工程に適用するのは困難である。本章では、高機能フィルムの製造工程に適用するための誘導加熱コイルのコア形状に着目し、フリンジング磁束を用いた広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案する。磁界解析ソフトを用いて提案した誘導加熱コイルのコア形状の有効性を確認する。また、提案した誘導加熱コイルおよび400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して小金属検出装置を構築する。試作した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルおよび400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて小金属加熱実験を行い、提案する高周波誘導加熱方式小金属検出装置が高機能フィルムの製造工程に適用可能であることを明らかにする。

4.1 フリンジング磁束を用いた小金属検出法

第3章で示した誘導加熱コイルと高周波インバータで構築した小金属検出装置により、小金属をフェライトコアのギャップ間で加熱可能であることが文献(54)および(55)で報告されている。しかし、検出装置として実用化を考えた場合、狭いギャップ内で広い面積のフィルム全域にわたる検出法は現実的でない。そこで、フリンジング磁束を利用した誘導加熱方式小金属検出法を提案する^(65,66)。提案する検出手法を図4.1に示す。図4.1(a)は、先に提案されている検出法^(54,55)を使いギャップ内に高機能フィルムを搬送し、誘導加熱により混入した小金属を検出する手法である。図4.1(b)は、ギャップ外にフィルムを流しギャップからはみ出した磁束であるフリンジング磁束により混入した小金属を誘導加熱する手法である。図4.1(a)では、高機能フィルムをギャップに通す必要があり、実際の数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムの製造工程に適用した場合に、数百ミリメートル幅のコアギャップを有する誘導加熱コイルが必要であり実現不可能といえる。図4.1(b)では、フィルムをコア上に配置するだけであり、サーモグラフィックカメラによる検出も容易となる。ゆえに、検出作業が容易になることが予想できる。ここで、提案手法の課題として磁束密度の低下が挙げられる。図4.2のようにギャップ付近の磁束の振る舞いを考えた場合、発生させた磁束の大

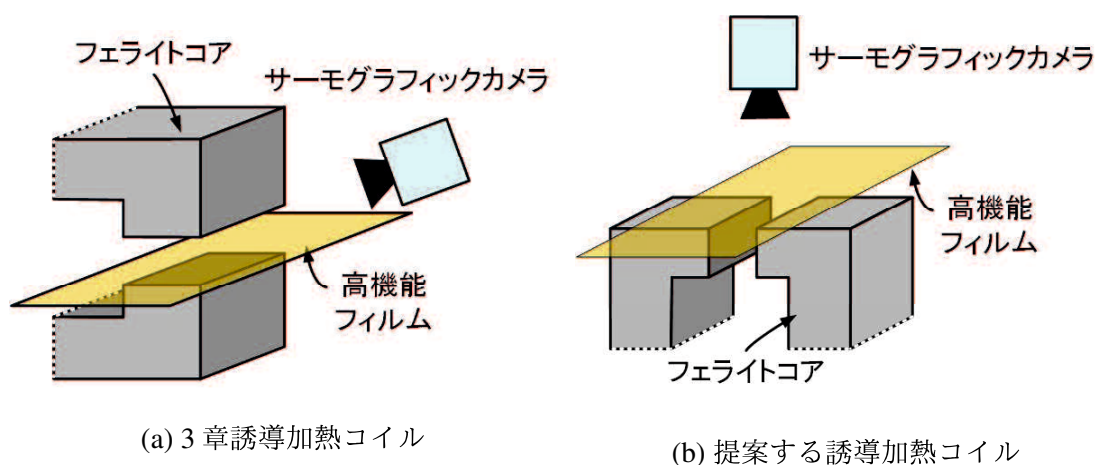


図 4.1 検出手法イメージ

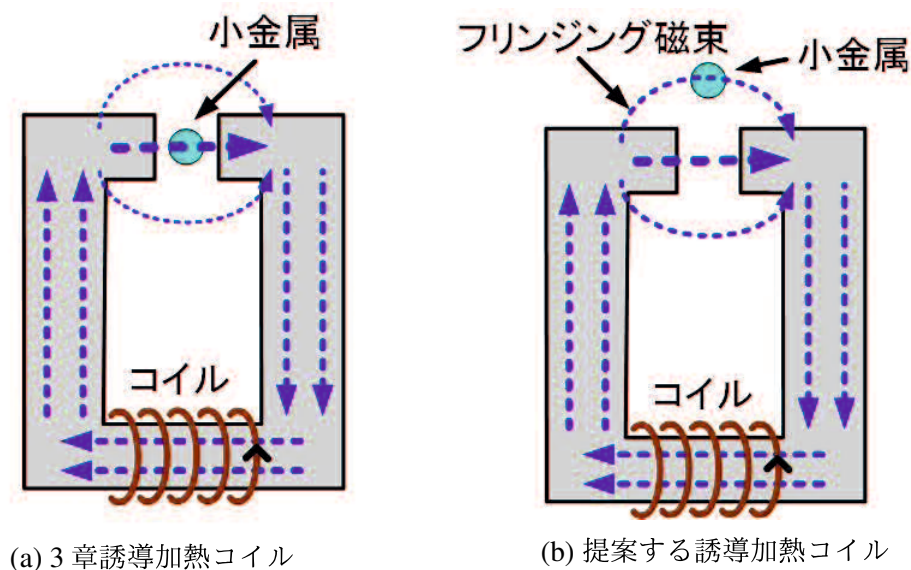


図 4.2 ギャップ付近の磁束の流れ

部分はギャップ内を鎖交する。一方で、ギャップから漏れる磁束はごく一部にすぎない。よって、磁束密度が著しく低下し、検出に十分なフリンジング磁束が出力されない可能性がある。しかし、文献(67)においてコアギャップ外でのフリンジング磁束の分布が調査されており、図4.2(a)のコア端においても金属球を加熱可能であることが確認されている。したがって、フリンジング磁束は比較的広範囲に分布しており、提案手法により混入した小金属の検出が可能であるといえる。そこで、提案手法に適した新構造の誘導加熱コイルを提案する。

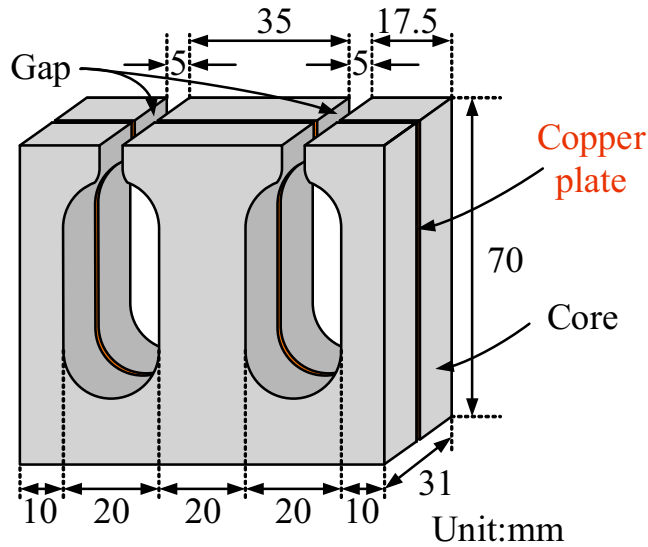


図 4.3 E 型コアの寸法

図 4.3 に、新構造誘導加熱コイルに用いるコアの寸法を示す。提案する新構造誘導加熱コイルのコア形状は先端の広がった E 型であり、コイルを各コア脚に巻くことで誘導加熱コイルとなる。図 4.4 に、実用時の新構造誘導加熱コイルのイメージを示す。先端を広げることによって、図 4.4 のようにコアを並べた際に隣り合うコアの間にフリンジング磁束を発生させることが可能となる。ゆえに、数メートル幅のフィルムを扱う場合においても、同誘導加熱コイルを複数個連結することにより広範囲にフリンジング磁束を分布させることが可能となる。この際、高機能フィルムと誘導加熱コイルの接触を防止するため高機能フィルムは誘導加熱コアの上空 3~5 mm を搬送されるとする。また、提案する E 型誘導加熱コイルはコア中央部に銅板を挟み込んでいる点にも特長がある。コア材として用いるフェライトは熱伝導率 λ が低いため、コア内部の温度差が発生しやすく、熱破壊に至ることがある。ここで、以下に示す熱応力の関係式⁽⁶⁸⁾を用いて、コアの熱破壊が発生する可能性がある温度差 ΔT は

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E \cdot \alpha} \quad (4.1)$$

で求められる。(4.1) 式の変数はそれぞれ、 ΔT [°C]: コアの温度差、 σ [N/m²]: 熱応力、 E [N/m²]: ヤング率、 α [1/K]: 線膨張率を示している。表 4.1 に、E 型コアのコア材の物性値を示す。表 4.1 の値を (4.1) 式に代入すると、

$$\Delta T = 20 - 28 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

となり、コア内の温度差が 30 °C 程度でコアの熱破壊が発生する可能性があることが分かる。よって、熱破壊を防ぐためにはコア内の温度差を抑える、すなわち均熱化を図る必要が

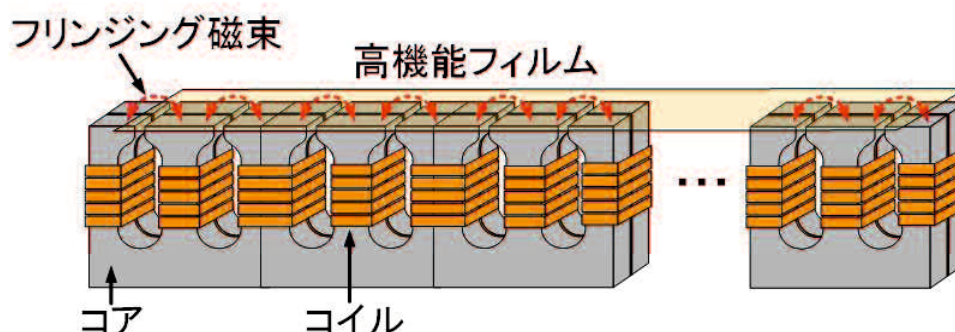


図 4.4 E 型誘導加熱コイルの連結イメージ

表 4.1 E 型コアのコア材の物性値

Item	Symbol	Value
Thermal conductivity	λ	5.0 W/(m·K)
Young's modulus	E	$0.14 \sim 0.20 \times 10^{12}$ N/m ²
Linear expansion coefficient	α	$12.0 \sim 12.5 \times 10^{-6}$ 1/K
Tensile strength	σ	$20.0 \sim 50.0 \times 10^6$ N/m ²

ある。そのため、提案する E 型誘導加熱コイルでは、コアギャップ部分の磁束密度へ影響が表れないように厚さ 1 mm の銅板をコアによって挟み込むことで均熱化を図る。また、E 型誘導加熱コイルのコアギャップは図 4.3 に示すように 5 mm とした。一般的にコアギャップが狭いほどギャップ上の磁束密度、すなわちフリンジング磁束の磁束密度は高くなる。そのため、コアギャップは 1 mm 程度が適していると考えられる。しかし、実際に E 型のコアを製作する上である程度のコアギャップ幅が必要であるため、E 型誘導加熱コイルのコアギャップは 5 mm とした。

次に、図 4.3 に提案する E 型コア形状のコアギャップ中に発生する磁束密度の理論式を等価磁気回路により求める。図 4.5 に E 型コア形状の等価磁気回路に使用する磁束の磁路と断面積を示したものを示す。また、図 4.6 に、E 型コア形状の等価磁気回路を示す。等価磁気回路に使用した変数は以下に示すものとする。

- R_g : ギャップ部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- R_1 : E 型コア底辺部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- R_2 : E 型コア脚部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- l_g : ギャップの距離 [m]

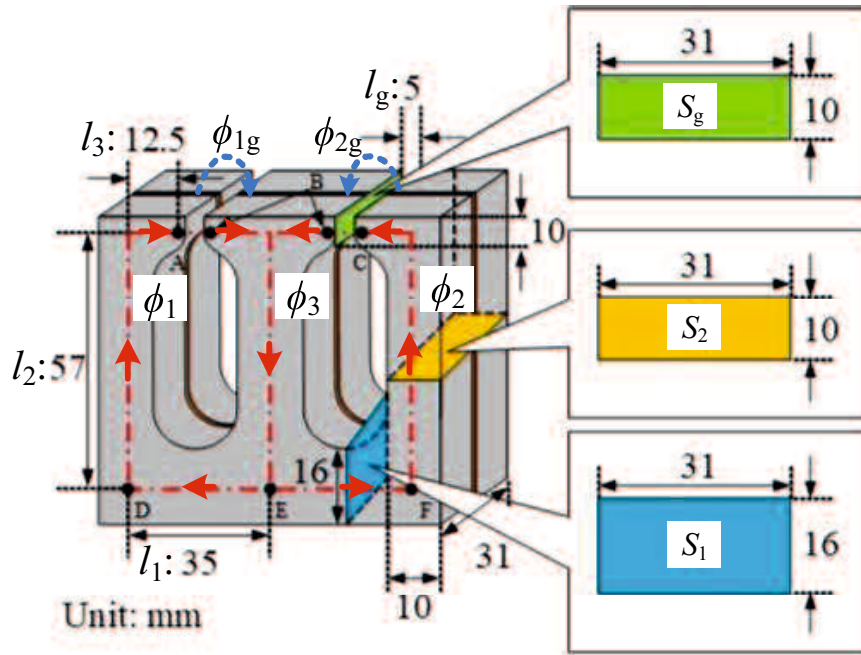


図 4.5 E型コアの磁路長および断面積

- l_1 : E型コア底辺部分の磁路長 [m]
- l_2 : E型コア脚部分の磁路長 [m]
- S_g : ギャップの部分の断面積 [m^2]
- S_1 : E型コア底辺部分の断面積 [m^2]
- S_2 : E型コア脚部分の断面積 [m^2]
- N : 銅線コイルの巻き数 [回]
- I : 銅線コイルに流れる電流の実効値 [Arms]
- ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : 各コア, ギャップ中を通る磁束 [Wb]

等価磁気回路における各磁気抵抗は,

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S_g} \quad (4.3)$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_s \mu_0 S_1} \quad (4.4)$$

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_s \mu_0 S_2} \quad (4.5)$$

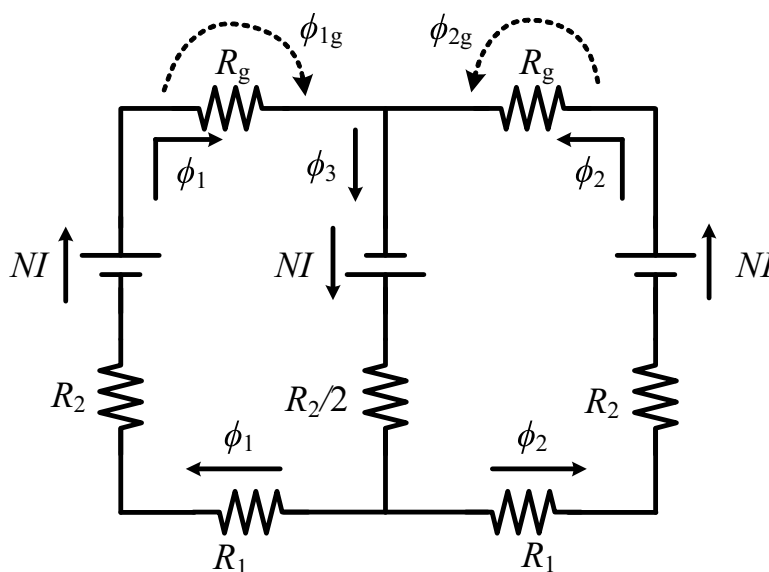


図 4.6 E 型コアの等価磁気回路

で表される。ただし，(4.3)～(4.5) 式中の μ_0 は真空の透磁率， μ_s は使用するコアの比透磁率とする。等価磁気回路においてキルヒホッフ第 1 法則より

$$\phi_3 = \phi_1 + \phi_2 \quad (4.6)$$

また，等価磁気回路の対称性より

$$\phi_1 = \phi_2 = \frac{\phi_3}{2} \quad (4.7)$$

が成り立つ。等価磁気回路においてキルヒホッフ第 2 法則より回路方程式をたてると

$$2NI = (R_g + R_1 + R_2)\phi_1 + \frac{R_2}{2}\phi_3 \quad (4.8)$$

$$2NI = (R_g + R_1 + R_2)\phi_2 + \frac{R_2}{2}\phi_3 \quad (4.9)$$

となる。ここで， $N=5$ 回， $I=10$ Arms， $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m， $\mu_s=2400$ とすると，ギャップ内の磁束密度は $B=25.0$ mT となる。しかしながら，本章で提案する誘導加熱コイルはコア上空 3～5 mm のフリンジング磁束を用いることを想定しており，等価磁気回路からフリンジング磁束を計算することは困難である。そこで，電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) を用いてコア上空のフリンジング磁束を求める。ここで，図 4.7 に提案する誘導加熱方式小金属検出装置の構成を示す。検出装置は，400 kHz SiC-MOSFET 高周波インバータと 3 連結 E 型誘導加熱コイル，共振用キャパシタ，サーモグラフィックカメラで構成される。誘導加熱コイルのコアを並べた際に隣り合うコアの間にフリンジング磁束を発生させることが可能となる。ゆえに，数メートル幅のフィルムを扱う場合においても，同誘導加熱コイルを複数個連結

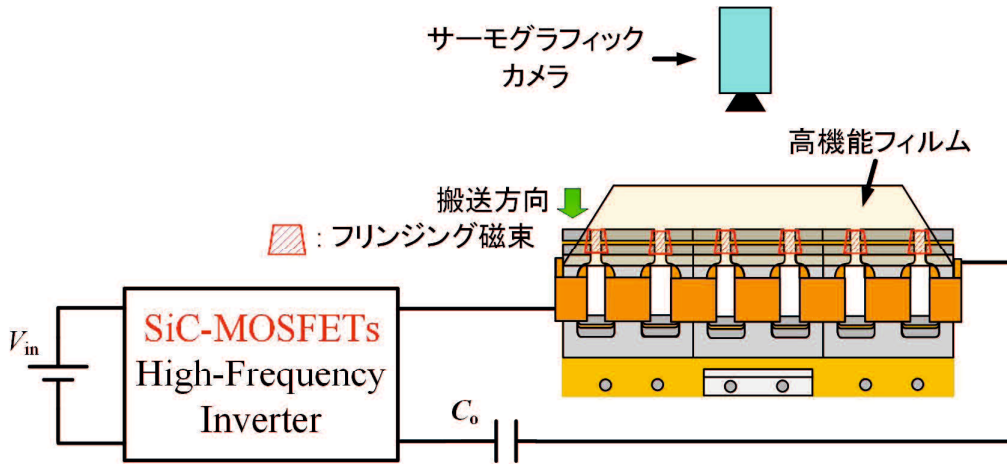


図 4.7 フリンジング磁束を利用した誘導加熱方式小金属検出装置の構成図

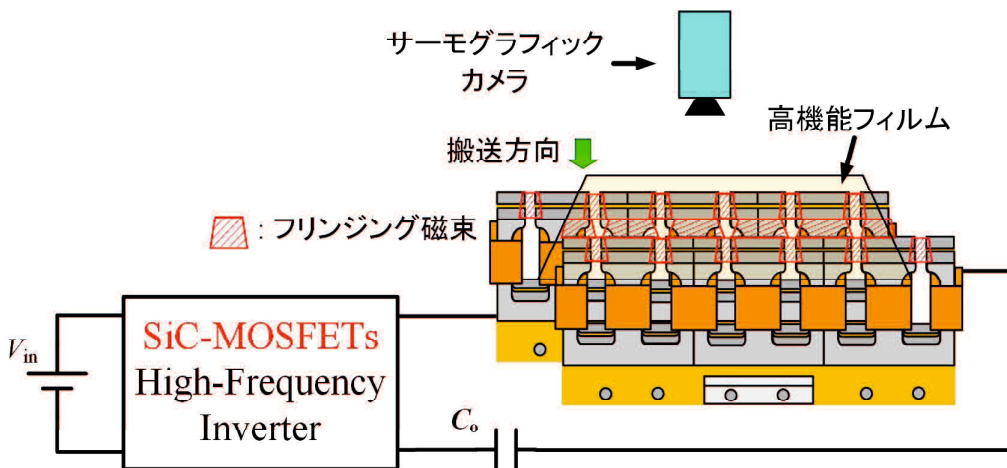


図 4.8 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた誘導加熱方式小金属検出装置の構成図

することにより広範囲にフリンジング磁束を分布させることが可能となる。しかしながら、図 4.7 に示す誘導加熱コイル配置では、小金属を検出可能なのはフリンジング磁束が発生する箇所だけであるため、搬送される高機能フィルムのすべての面積に磁界を印加可能な誘導加熱コイルの配置を検討する。図 4.8 に 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の小金属検出装置の構成図を示す。本小金属検出装置において、前述した 3 連結 E 型誘導加熱コイルを千鳥配置している。千鳥配置した誘導加熱コイル間のギャップは 8 mm とする。図 4.8 に示すように 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合誘導加熱コイルにおける加熱領域を拡大することが可能になる。

4.2 シミュレーション結果

本章で提案する誘導加熱コイルはコア上空3~5 mmのフリンジング磁束を用いることを想定しており、前述したように等価磁気回路からフリンジング磁束を計算することは困難である。そこで、電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) を用いてコア上空のフリンジング磁束を求める。E型誘導加熱コイルの上空3~5 mm地点におけるフリンジング磁束密度分布と強度を調べるために、電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) version 16.0 による磁場解析を行った。図4.9に、E型誘導加熱コイル連結時の解析モデルを示す。また、解析における条件は以下の通りである。

- E型誘導加熱コイル …… コイル巻き数: 35回(各コア脚あたり5回), 電流実効値: 10 Arms
- コイル電流周波数 …… 400 kHz
- コア材 …… PC40

シミュレーション時間を短縮するため、コイルは簡易的に表現している。コア材はPC40の物性データを使用している。解析は図4.10に示すコア中心 $x=0$ (解析ラインI), コア端となる $x=15.5$ (解析ラインII)において $0 < y < 240$ の領域を走査し、磁束密度分布を求めた。ラインI, IIは $z=3, 5$ mmの2条件でそれぞれ解析した。解析結果を図4.11, 図4.12および図4.13にそれぞれ示す。ここで、図4.11のコア上側のブロックは空気層を表している。このように解析したい部分(この場合はコアギャップ周辺の磁束密度の振る舞いを調べたいので、コアギャップ周辺の空気層)のメッシュ(要素の集まり)を細かく設定することで解析の精度を高めている。解析結果から、解析ラインIの $z=3, 5$ mmでは、それぞれの場合でギャップ上の磁束密度は同じ値となっており、 $z=3$ mmの場合の方が3 mT程高い値を示している。コア端にあたる解析ラインIIにおいても、コア中心に比べて値は小さくなるが同様の分布を示している。一方、各コア脚の中央部においては磁束密度が小さくなっている。このことは、図4.13の磁束密度分布からも確認できる。一般的に磁束密度はコイル電流に比例するので、コイル電流を調整することでより強力な磁束密度を発生させることもでき、金属球の誘導加熱も可能であると考えられる。よって、提案するフリンジング磁束を利用した誘導加熱方式小金属検出法は有用性があると考えられる。また、図4.11の磁束密度分布解析結果より、E型コア上空3 mm地点において10 mTの磁束密度が発生していることが確認できる。磁束密度はコイル電流に比例することから、コイル電流30 Arms時において30 mTの磁束密度が発生する。ここで、3章の表3.3では直径0.3 mmの小金属を加熱するためには30 mT程度必要であることを示しており、磁界解析結果から直径0.3 mmの小金属加熱に有効であることが確認できる。前述したように、図4.7に示す誘導加熱コイル配置では、小金属を検出可能なのはフリンジング磁束が発生する箇所だけである。つまり、搬送される高機能フィルムのすべての面積に磁界を印加することは不可能であり、搬送される高機能フィルムのすべての面積に磁界を印加可能な誘導加熱コイルの配置を検討する必要がある。

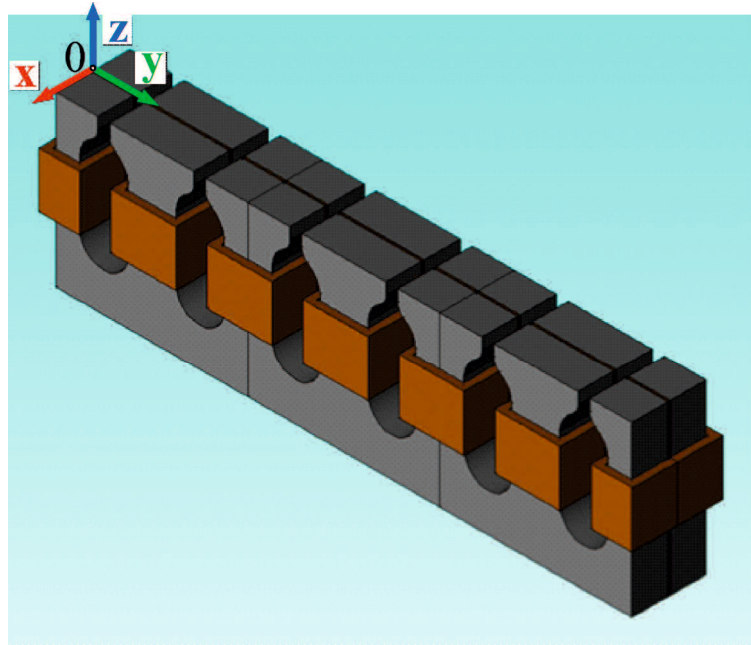


図 4.9 E 型誘導加熱コイルの連結時の解析モデル

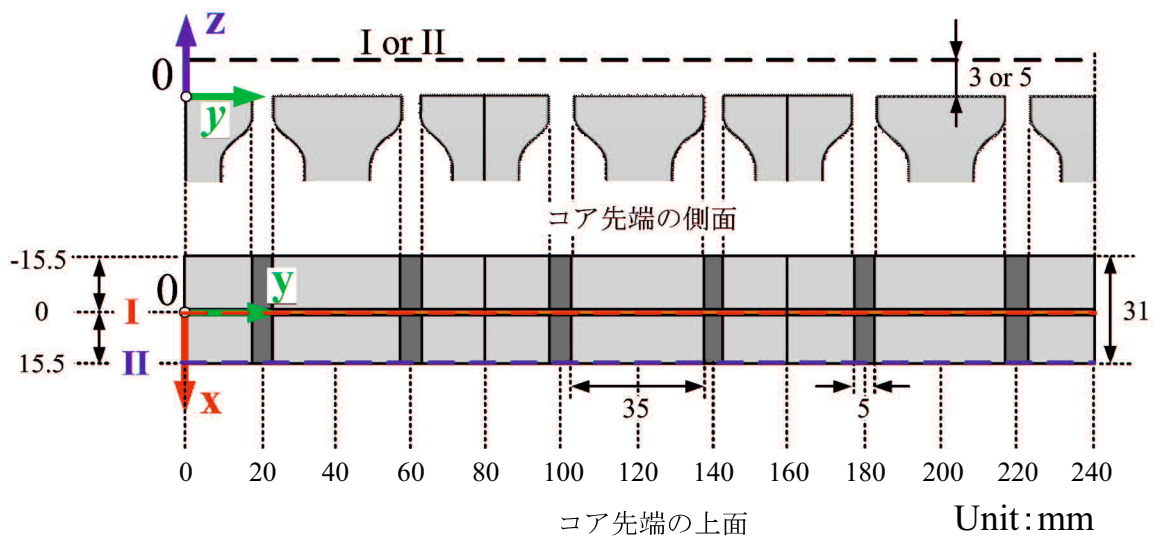


図 4.10 磁束密度分布解析箇所

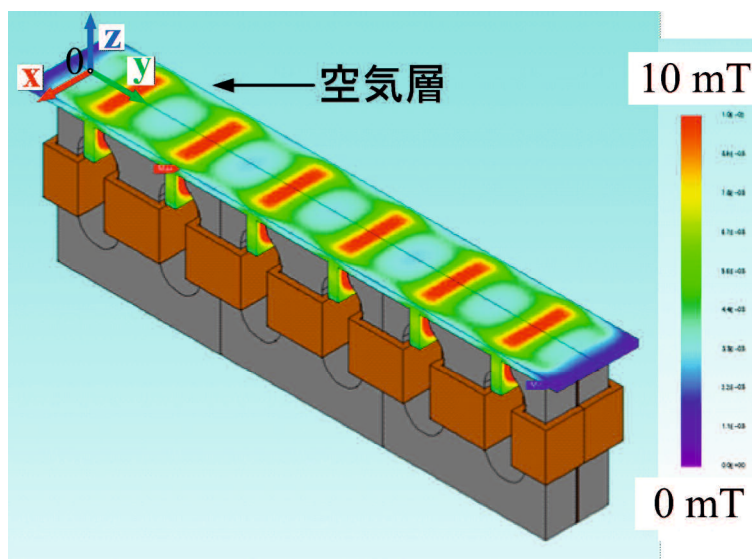


図 4.11 コアギャップ周辺の磁束密度分布

次に、3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の小金属検出装置を検討する。図 4.8 の 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の小金属検出装置において、電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) version 16.0 による磁場解析を行う。図 4.14 に 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の磁束密度シミュレーション結果を示す。先ほどと同様に、電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) version 16.0 を用いて磁場解析を行った。図 4.14 に示すように、3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いることで、2 列に千鳥配置した 3 連結 E 型誘導加熱コイル間においても磁束密度が発生していることが確認できる。

4.3 実験結果

図 4.7 の小金属検出装置を用いて小金属加熱実験を行う。製作した単体の E 型コアを図 4.15 に、3 連結した E 型誘導加熱コイルを図 4.16 に示す。E 型コアのコア材料には FDK 社製の Mn 系フェライトコア 7H10 を用いており、PC40 に比べて高周波におけるコア損失が低いことが特徴である。各コアの主な物性を表 4.2 にまとめる⁽⁶⁹⁾。また、図 4.16(a) に示すように均熱用銅板を固定できるように台座も作製した。台座の材料には非磁性金属の SUS304 を使用し、台座自体が誘導加熱されないようにしている。コイルの材料としてはリッツ線 (撚り本数:1800 本, 素線径 0.05 mm) を使用し、図 4.16(b) に示すように直接コアに接触しないよう厚さ 0.5 mm, 耐圧 15 kV/mm のガラスエポキシ板を用いたボビンを装着している。さらに、リッツ線自体にも耐圧 56.6 kV の自己融着性のシリコンゴムテープ (日東電工社) を巻き、絶縁耐力を強化している。以上のようにして作製した 3 連結 E 型誘導加熱コイルと第 3 章で作製した 400 kHz SiC-MOSFET フルブリッジインバータを接続し、均熱用銅板の効果

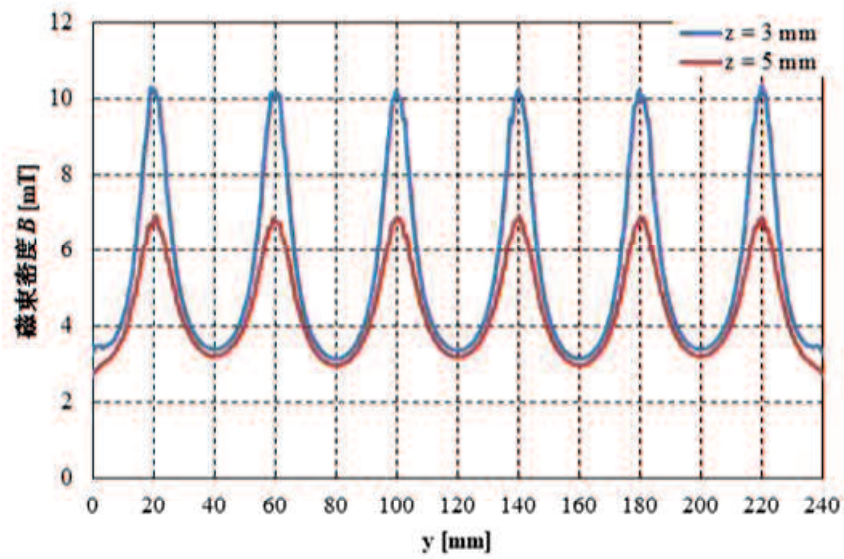


図 4.12 解析ライン I におけるフリッジング磁束の磁束密度分布

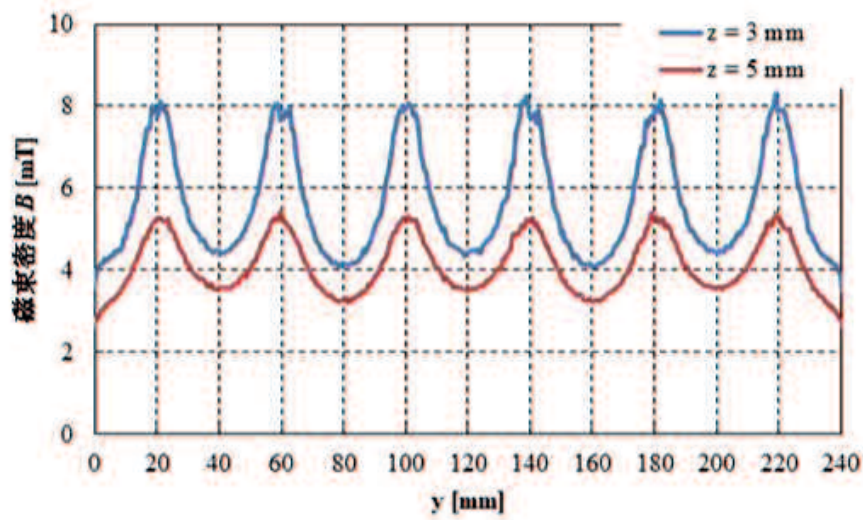
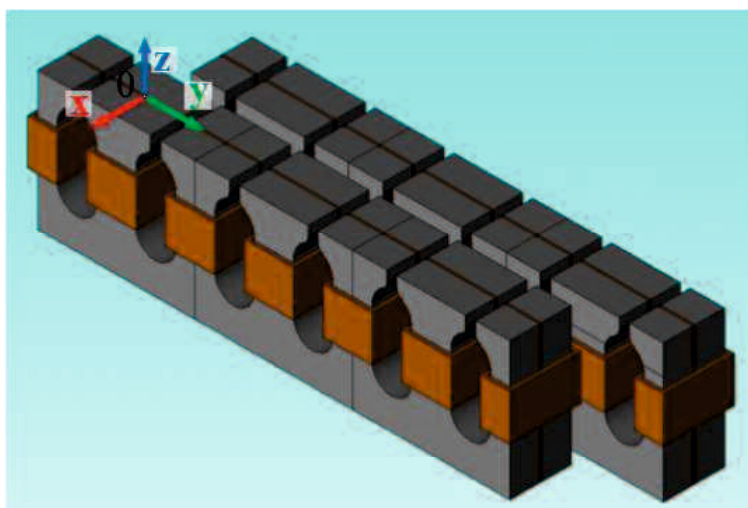
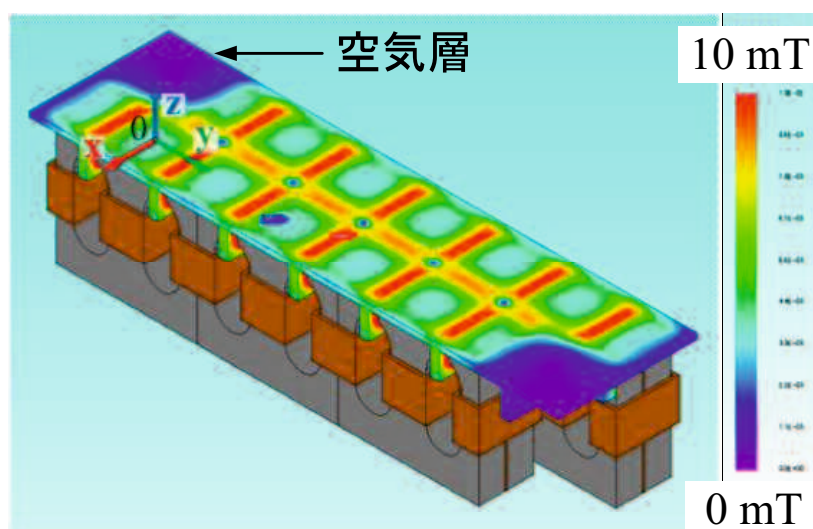


図 4.13 解析ライン II におけるフリッジング磁束の磁束密度分布



(a) 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の解析モデル



(b) シミュレーション結果

図 4.14 3 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いた場合の磁束密度シミュレーション結果



図 4.15 E 型コア

表 4.2 コア材の物性値比較

	記号	単位	条件	PC40	7H10
交流初透磁率	μ_{iac}		0.1 MHz	2300	1600
飽和磁束密度	B_S	mT	100 °C	530	490
コア損失	P_{CV}	kW/m ³	100 °C	220	95

を確認するために通電試験を行った。図 5.14 に実験回路の構成図を、表 4.3 に回路定数をそれぞれ示す。通電試験では 10 Arms の電流を 3 連結誘導加熱コイルに流し、コアの温度分布をサーモグラフィックカメラで観測する。通電試験の条件は以下の通りである。

- 出力電流周波数 …… 375 kHz
- 出力電流実効値 …… 10 Arms
- 導通時間 …… 3 分間
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- コアの冷却 …… 無風状態

図 4.18 に、通電開始から 3 分後のサーモグラフィ画像を示す。図 4.18 より、コア上下間およびコア下部の左右間の温度差は 30 °C 以下であり、銅板を挟み込んだことの有効性を確認できた。しかし、コアの冷却等を行っていないなかったため、コア温度は飽和せずに上昇傾向にあった。ここで、フェライトの磁性が無くなるキュリー温度は 200 °C 程度である。小金属を誘導加熱するためにコイル電流を 10 Arms 以上にした場合には鉄損が増加してコアの温度上昇が激しくなり、キュリー温度に達する可能性も考えられる。そのため、コアの冷却法を検討する必要がある。そこで、フッ素系不活性液体のフロリナートを用いてコアを冷却



(a) 均熱用銅板および台座



(b) ガラスエポキシ板を用いたボビン



(c) 3 連結 E 型誘導加熱コイル

図 4.16 3 連結 E 型誘導加熱コイルの構成

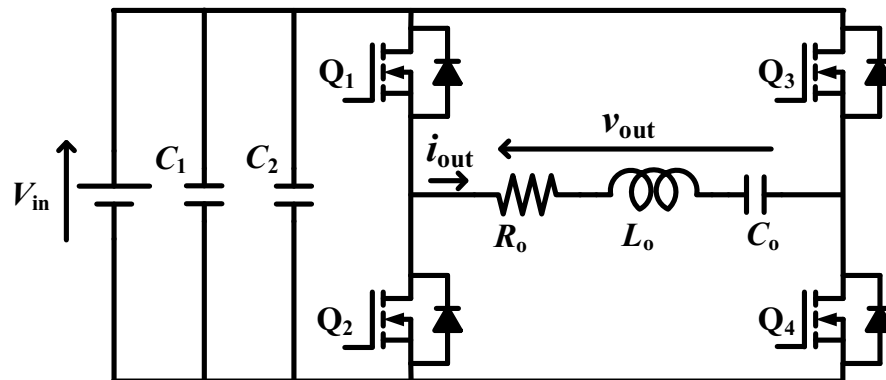


図 4.17 実験回路構成図

表 4.3 実験回路定数

Item	Symbol	Value
Switching frequency	f_{sw}	375 kHz
DC capacitor	C_1	5600 μ F
Bypass capacitor	C_2	10.9 μ F
Equivalent resistance of IH coils	R_o	5.0 Ω
Inductance of IH coils	L_o	150.5 μ H
Capacitance of IH coils	C_o	2.37 nF

する。フロリナートは強制送風に比べて 5 倍の熱伝達能力を持つなどの優れた熱特性、さらに電気絶縁性および安全性を併せ持つ液体であり、電子機器の絶縁冷却にも使用されている。フロリナートには幾つか種類があるが、実験にはフロリナート FC-3283 (3M 社) を使用する。フロリナート FC-3283 の物性値を表 4.4 に示す⁽⁷⁰⁾。表 4.4 の値をもとに図 4.19 に示すような冷却システムを作製した。フロリナートの沸点を考慮して、実験はフロリナートの温度が 100 °C に達したら中断するという条件でシステムを作製した。まず、フロリナートと誘導加熱コイルを入れる容器には耐熱 120 °C 程度で耐薬品性に優れるポリプロピレン容器を採用した。また、攪拌機 TYPE HEIDON 600G (新東科学社) を用いてフロリナートを循環させることで冷却効率を向上させた。使用した攪拌機の攪拌翼直径は 80 mm であり、フロリナートがよく循環されるように水面に対して攪拌機を斜めに挿入している。さらに、実験中はアラーム機能付きの接触温度計でフロリナートの温度を常時観測できるようにした。試作した誘導加熱方式小金属検出装置を使い、3 連結 E 型誘導加熱コイルのフリンジング磁束の磁束密度分布を測定した。図 4.20 に示すコア先端から高さ 3 mm の測定点 A₁-M₁ および A₂-M₂ の磁束密度をサーチコイルにより測定した。先のシミュレーション結果と比較するため、実験条件は以下の通りである。

- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 10 Arms

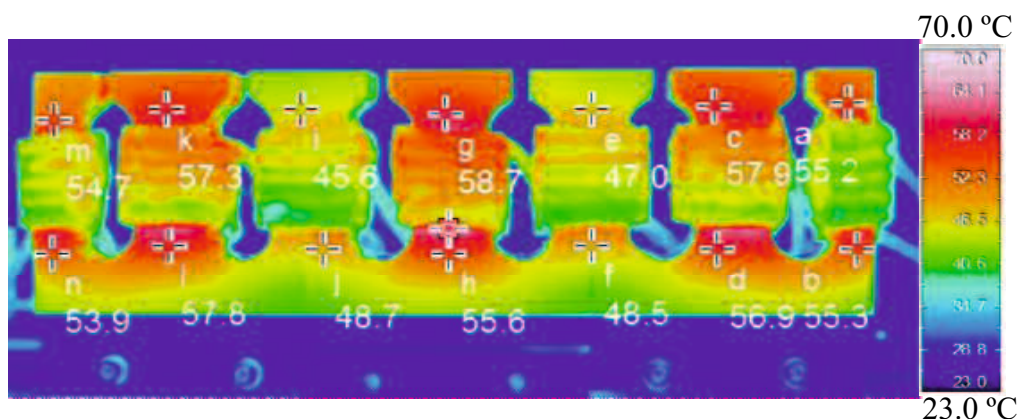


図 4.18 導通試験結果

表 4.4 フロリナートの物性値

特性	物性値
沸点	128
比熱	1050
熱伝導度	0.067
絶縁耐力	43
引火点	なし
オゾン層破壊係数	0

● 高周波インバータ 駆動周波数: 375 kHz

図 4.21 に、測定結果を示す。シミュレーション結果と実験結果は同様の傾向を示しており、整合性を確認できる。シミュレーション結果を基準とした場合の両者の誤差は、最大で A₁ 点の-55.3%である。しかし、全測定点の平均誤差は 16.5%であり、シミュレーション結果と実験結果は一定の精度で一致している。したがって、シミュレーション通り、誘導加熱コイルを連結することによって高周波交番磁界の照射領域を広範囲に拡大できることが確認できる。また、小金属を載せた高機能フィルムをコア先端から高さ 3 mm の位置に設置し、誘導加熱実験を行った。対象金属球のサイズは直径 0.3 mm と市販で入手可能で最小な直径 0.15 mm とする。ここで、3 章で説明したように表 3.3 から直径 0.3 mm の小金属加熱には 30 mT 程度の磁束密度が必要であることを示した。次に、直径 0.15 mm の小金属球の加熱に必要な磁束密度を (3.17), (3.18), (3.19), (3.20) 式を用いて計算する。表 4.5 に、目標温度上昇 ΔT_s [°C] を 2 °C から 5 °C まで 0.5 °C 刻みで変化させた際の (3.17), (3.18), (3.19), (3.20) 式の和 P [W], 温度上昇に必要な鎖交磁束密度を示す。表 4.5 から材質 SUS304 の直径 0.15 mm 小金属球を 5 秒間で 5 °C 温度上昇させ検出するためには 49 mT 程度の磁束密度が必要であることが確認できる。提案した E 型誘導加熱コイルでは、コイル電流 30 Arms 時において

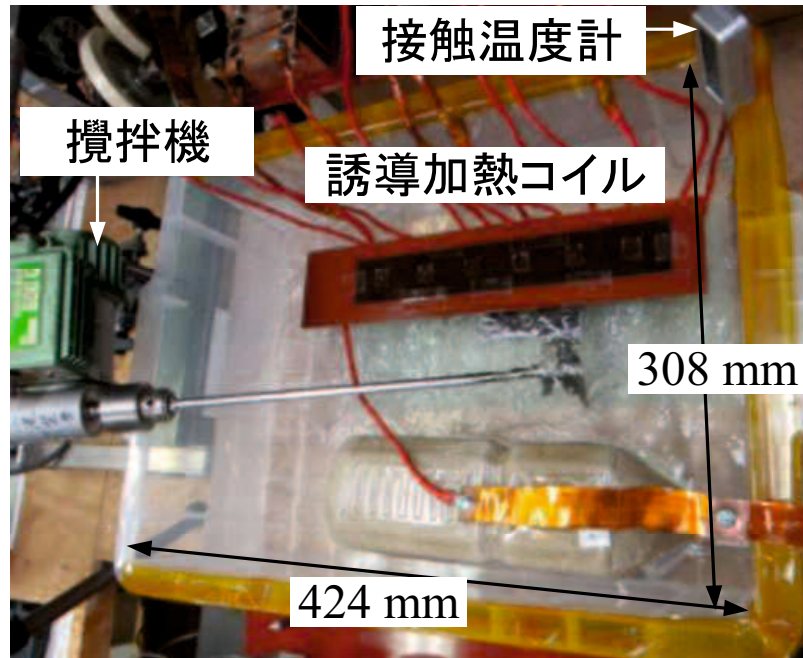


図 4.19 フロリナートを用いた冷却の様子

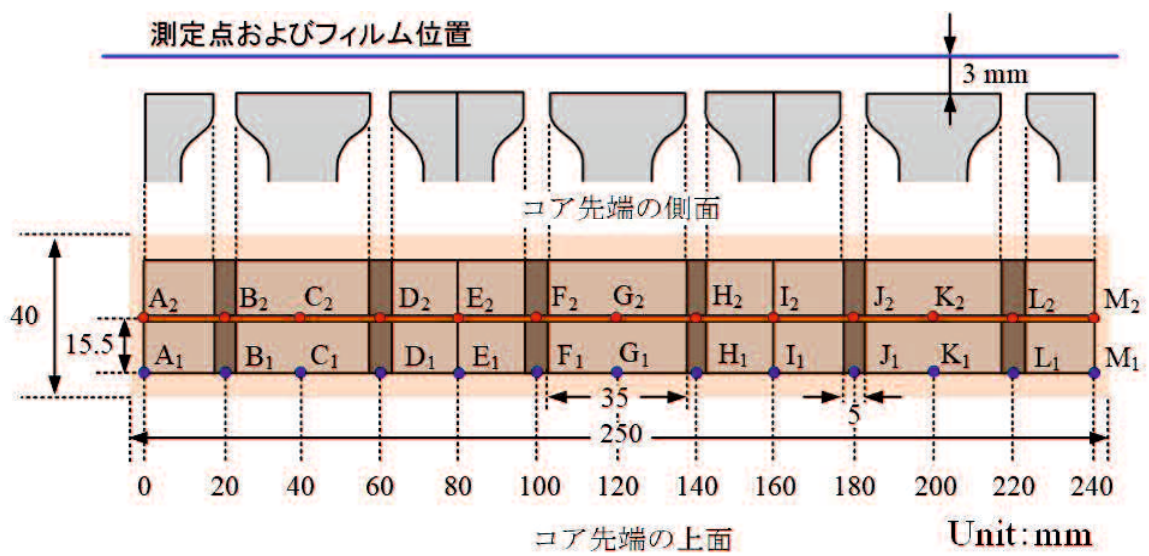
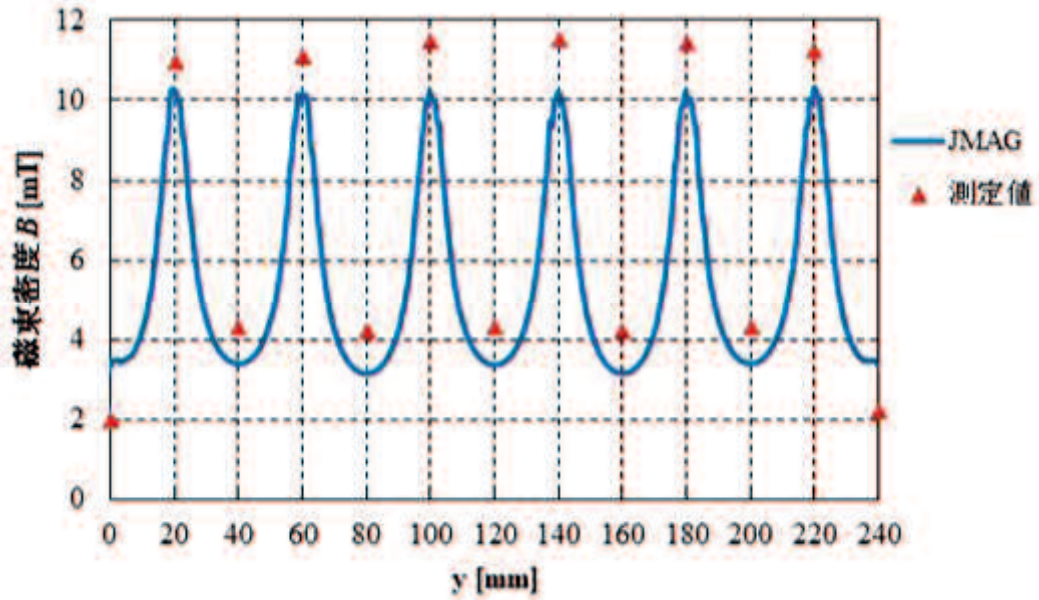
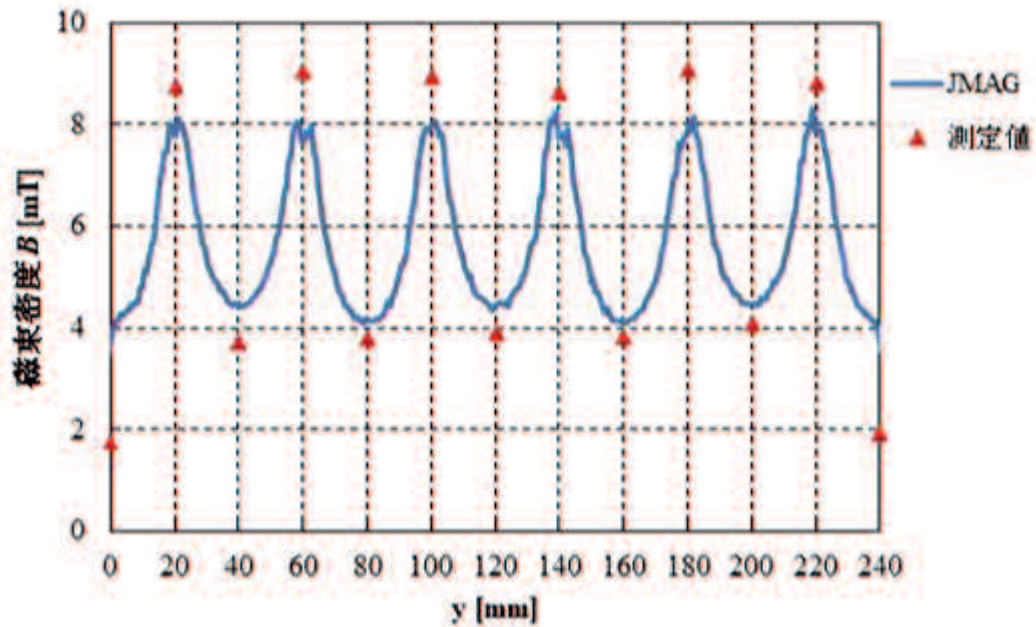


図 4.20 測定点 (全てコア先端から高さ 3 mm)



(a) 測定点 A₂-M₂



(b) 測定点 A₁-M₁

図 4.21 磁束密度分布の比較

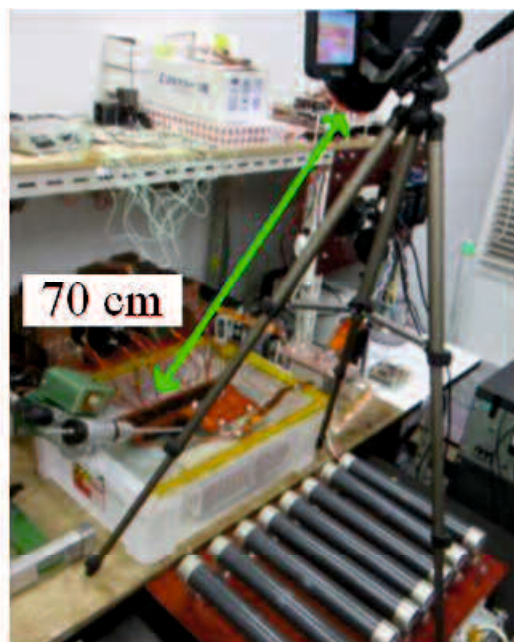
表 4.5 鎖交磁束密度計算結果 (直径 0.15 mm の小金属球)

温度上昇 [°C]	必要発熱量 P [W]	鎖交磁束密度 [mT]
5	2.17×10^{-5}	49.3
4.5	1.95×10^{-5}	46.8
4	1.74×10^{-5}	44.2
3.5	1.52×10^{-5}	41.3
3	1.30×10^{-5}	38.2
2.5	1.09×10^{-5}	35.0
2	8.68×10^{-6}	31.2

も直径 0.15 mm の小金属を検出することは困難であるため、直径 0.15 mm の小金属加熱は近接拡大レンズを使用して実験を行う。また、近接拡大レンズを使用した小金属加熱実験は金属とサーモグラフィックカメラの距離を 5.6 cm に設定した。これらをふまえ実験条件は以下に示す。

- 小金属 (球体) …… 直径: 0.3 mm, 0.15 mm, 材質: SUS304
- 高機能フィルム …… ポリイミドフィルム
- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 30 Arms
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 375 kHz
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- 加熱時間 …… 5 秒
- 小金属とサーモグラフィックカメラの距離 …… 小金属: 直径 0.3 mm, 距離: 70 cm, 小金属: 直径 0.15 mm, 距離: 5.6 cm

図 4.22 に、誘導加熱実験時の小金属とサーモグラフィックカメラとの位置関係を示す。直径 0.3 mm 小金属の場合は、図 4.22(a) に示すように小金属とサーモグラフィックカメラの距離を設置した小金属を全て同時に観測できる 70 cm とした。しかし、直径 0.15 mm 小金属の場合は同条件では直径 0.3 mm 小金属よりも発熱が小さく、小金属を検出できない恐れがある。そこで、図 4.22(b) に示すように直径 0.15 mm 小金属の場合は端子台を設けて小金属とサーモグラフィックカメラの距離を 5.6 cm とし、近接拡大レンズ IRL-CO72U (日本アビオニクス社) を使用して実験を行った。各小金属はセロハンテープでフィルムに貼り付けている。フィルムはコア上面に厚さ 3 mm のベイク板を乗せ、その上にフィルムを置くことでコア先端から高さ 3 mm の位置に固定している。フィルム上における小金属の位置はフリンジング磁束の磁束密度が高い $B_2, D_2, F_2, H_2, J_2, L_2$ の 6 点である。実際のフィルム画像を図 4.23 に示す。また、直径 0.15 mm の小金属を誘導加熱するために SiC-MOSFET フルブリッジインバータの出力電流、すなわち誘導加熱コイルに流れる電流を実験室の直流電源の最大出力である 30 Arms に設定した。磁束密度と電流は比例関係にあるため、図 4.21 の結果より、小金属を設置した点に鎖交するフリンジング磁束の磁束密度は約 30 mT となる。 図 4.24 お



(a) 直径 0.3 mm



(b) 直径 0.15 mm

図 4.22 誘導加熱実験時の小金属とサーモグラフィックカメラの位置関係



図 4.23 フィルム上の小金属

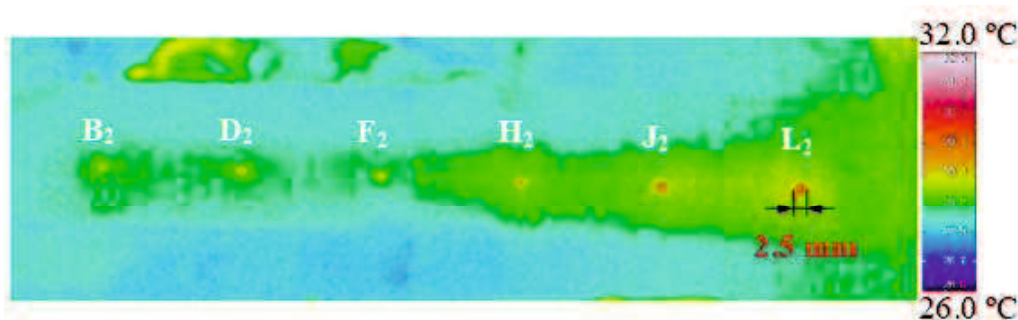


図 4.24 直径 0.3 mm 小金属の誘導加熱実験結果

よび図 4.25 に、直径 0.3 mm と直径 0.15 mm の小金属を誘導加熱した際のサーモグラフィ画像をそれぞれ示す。また、表 4.6 に 5 秒間における各小金属の上昇温度を示す。図 4.24 および図 4.25 からコアギャップ上に設置した全小金属が発熱しサーモグラフィックカメラ上でその位置を確認することが出来る。特に発熱が激しい箇所は直径 0.3 mm の小金属の場合は L_2 点で直径 2.5 mm に拡大、直径 0.15 mm の小金属の場合は D_2 点で直径 0.36 mm に拡大されている。面積比では、直径 0.3 mm の小金属の場合は 69.4 倍、直径 0.15 mm の小金属の場合は 5.76 倍にそれぞれ拡大されている。ここで、表 4.6 の上昇温度が直径 0.15 mm 小金属の方が高いのは、サーモグラフィックカメラとの距離が近いためである。また、図 4.24 においてフィルム右中央付近に温度上昇が見られるが、これはサーモグラフィックカメラなどに周囲の熱が反射してノイズとして映ったものである。実用時は、本実験に使用したフィルム以上のサイズを想定している。しかし、以上の結果から E 型誘導加熱コイルの数を増やすことで容易に検出領域を広げることが可能であり、フリッジング磁束を利用した検出法は新たな小金属検出技術として期待できる。しかしながら、図 4.7 に示す誘導加熱コイル配置では、小金属を検出可能なのはフリッジング磁束が発生する箇所だけである。つまり、搬送される高機能フィルムのすべての面積に磁界を印加することは不可能であり、搬送される高機能フィルムのすべての面積に磁界を印加可能な誘導加熱コイルの配置を検討する必要がある。

図 4.27 に、磁束密度測定結果を示す。上記の磁束密度測定条件において、千鳥配置した

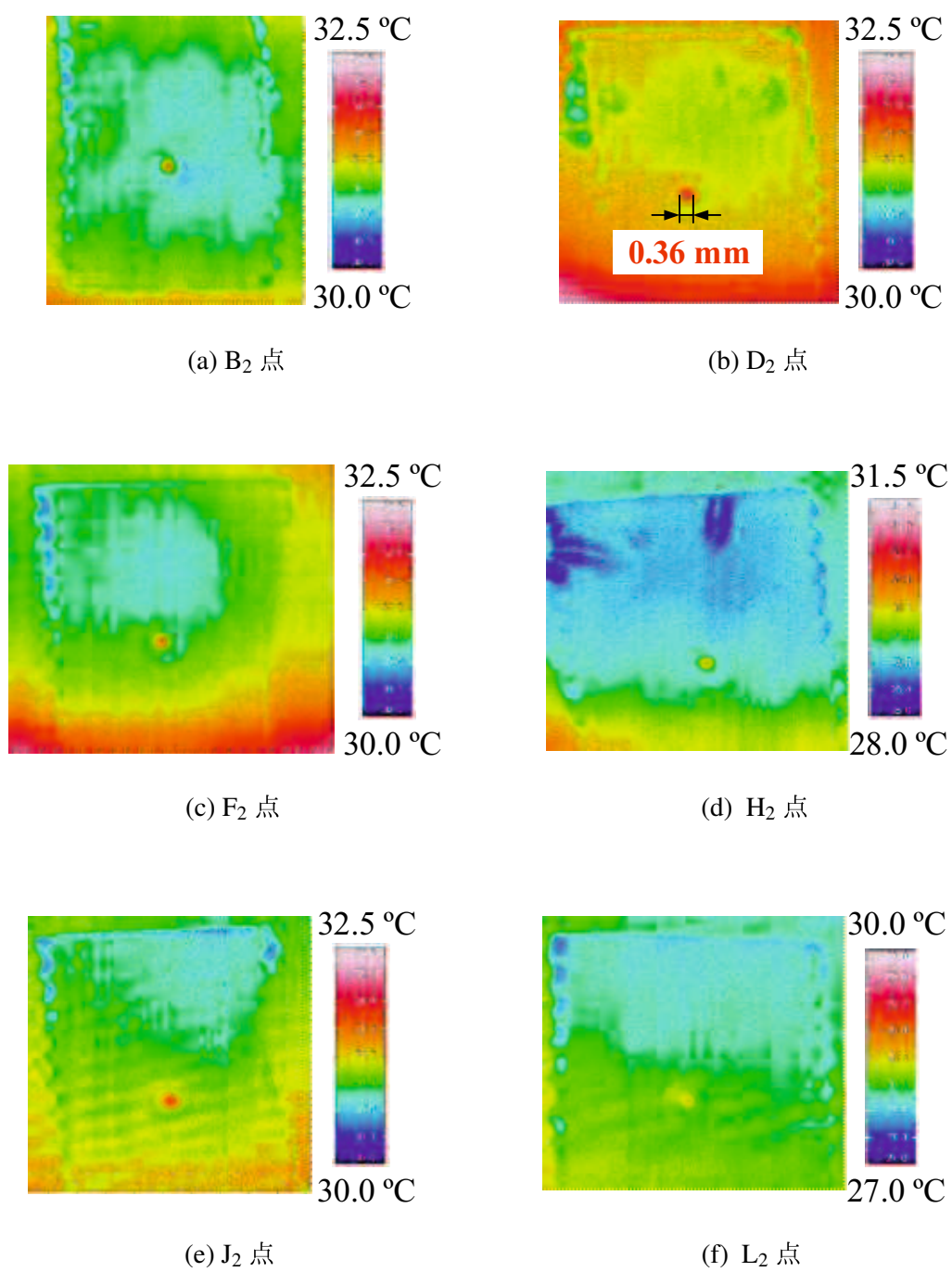


図 4.25 直径 0.15 mm 小金属の誘導加熱実験結果

表 4.6 各測定点の室温からの温度上昇 ΔT °C

金属球の直径	B ₂	D ₂	F ₂	H ₂	J ₂	L ₂
0.3 mm	1.9	2.8	2.4	2.0	3.8	5.2
0.15 mm	3.2	7.3	4.8	6.1	6.7	6.3

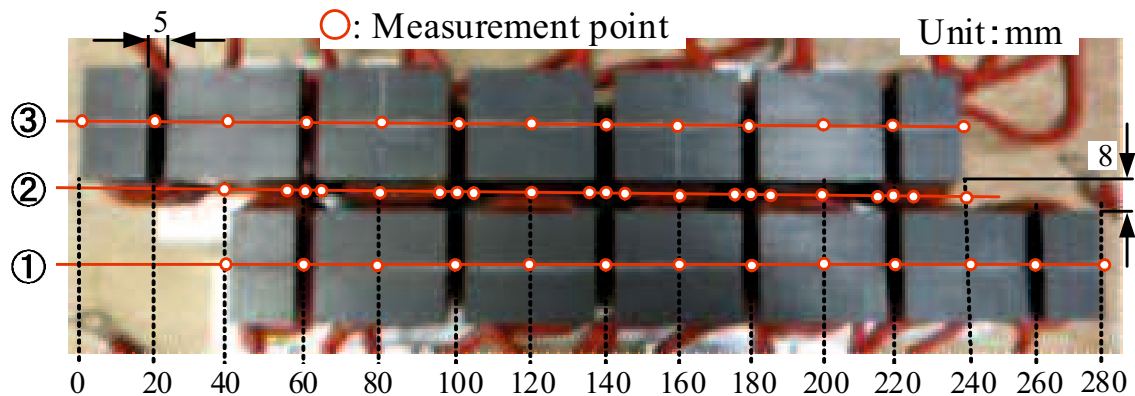


図 4.26 磁束密度分布測定箇所

2列誘導加熱コイル間での磁束密度は8 mT程度発生しており加熱領域を拡大可能であることが確認できる。シミュレーション結果と実験結果は同様の傾向を示しており、磁束密度のシミュレーション結果とサーチコイルを用いた磁束密度測定結果では、最大誤差が14%となり整合性を確認できる。したがって、シミュレーション通り、誘導加熱コイルを連結することによって高周波交番磁界の照射領域を広範囲に拡大できることが確認できる。図4.8の3連結E型誘導加熱コイルを2列用いた場合の小金属検出装置の構成図において、小金属検出実験を行った。しかしながら、提案するE字型誘導加熱コイルの鉄損の影響により出力電流を30 Armsまで出力することが不可能である。なぜなら、E字型誘導加熱コイルの鉄損によってコア割れが生じてしまう。図4.28に提案する3連結E型誘導加熱コイルにおける鉄損分布解析結果を示す。磁束密度分布解析結果と同様に、電磁界解析ソフトJMAG(JSOL社) version 16.0を用いて鉄損分布解析を行った。図4.28に示すように、3連結E型誘導加熱コイルの鉄損は4088 Wとなった。図4.8の3連結E型誘導加熱コイルを2列用いた場合、誘導加熱コイルの鉄損は8176 Wである。誘導加熱コイルのコア割れの可能性があるため、本実験の条件として出力電流を15 Armsとした。対象金属は直径0.7 mmとした。図4.29にフィルム上に設置した小金属を示す。図4.29の赤い点の位置に直径0.7 mmの小金属を設置している。また、本実験における条件を以下にまとめる。

- 小金属(球体)… 直径: 0.7 mm, 材質: SUS304
- フィルム … ポリイミドフィルム

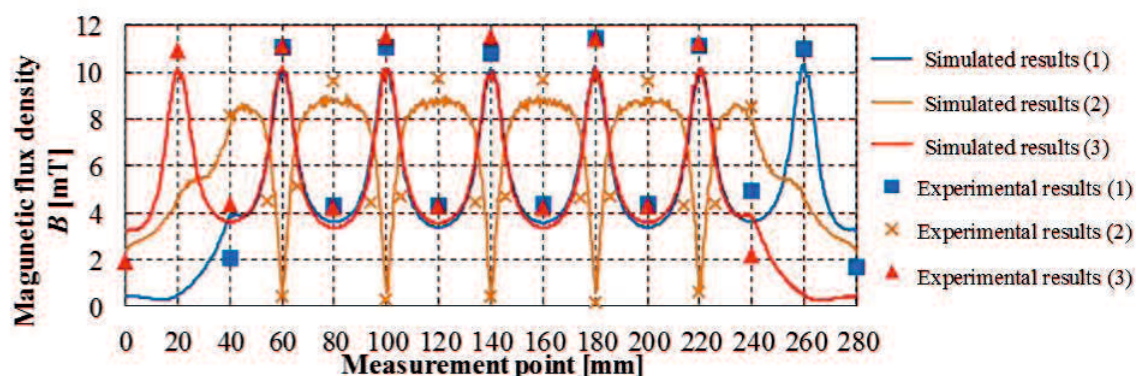
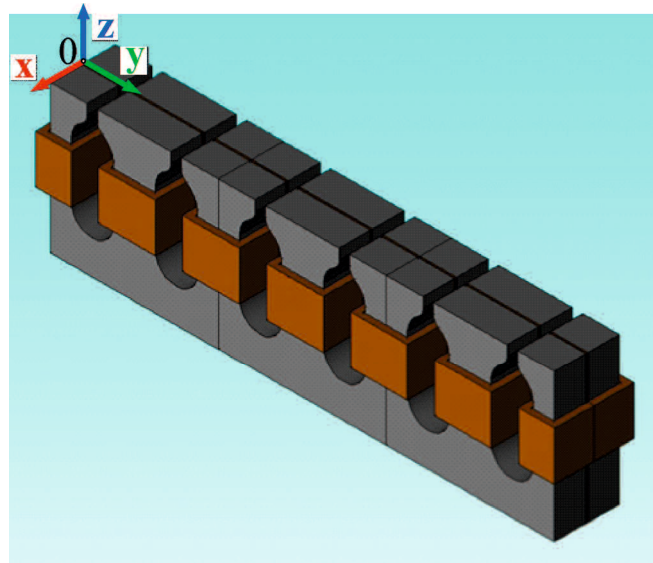


図 4.27 フリンジング磁束の磁束密度分布

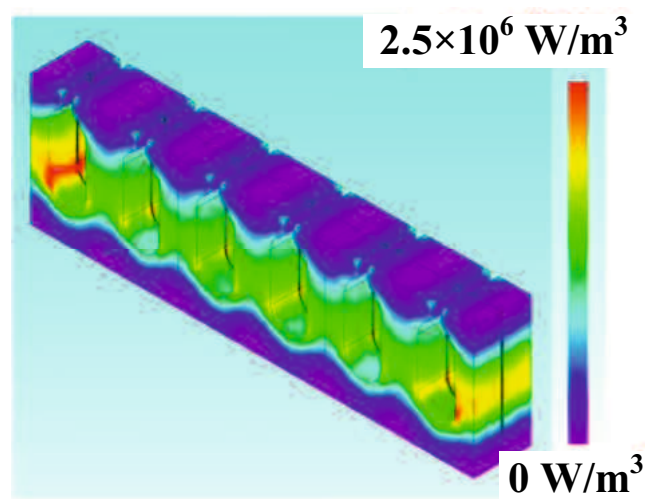
- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 15 Arms
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 375 kHz
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- 加熱時間 …… 5 秒
- 小金属とサーモグラフィックカメラの距離 …… 小金属: 直径 0.3 mm, 距離: 70 cm

図 4.30 にサーモグラフィックカメラを用いて検出した直径 0.7 mm の小金属の誘導加熱結果を示す。図 4.30 の誘導加熱実験結果より、直径 0.7 mm の小金属の温度上昇は 2.0~3.5 °C となった。

ここで、3 章で述べたように小金属検出装置における高周波インバータの半導体デバイスに 1200 V 定格の SiC-MOSFET が必要不可欠な理由を説明する。本研究では、実験室における直流電源の定格を考慮し、A4 用紙サイズ幅の高機能フィルムを対象とした小金属検出実験を行った。しかしながら、実際の高機能フィルムは 520 mm 幅と想定されている。図 4.31 に 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした誘導加熱コイルの連結イメージ図および等価回路を示す。図 4.31(a) は 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした誘導加熱コイルの連結イメージ図を示す。図 4.31(b) は 520 mm 幅の高機能フィルムにおける等価回路を示す。図 4.31(a) において、520 mm 幅の高機能フィルムにおいて小金属検出を行う場合、7 連結 E 型誘導加熱コイルを 2 列用いることになる。図 4.31(b) において $R_{11} \sim R_{115}$ および $L_{11} \sim L_{115}$ は 1 列目の 7 連結 E 型誘導加熱コイルにおける各巻き線の等価直列抵抗およびインダクタンスを示す。 $R_{21} \sim R_{215}$ および $L_{21} \sim L_{215}$ は 2 列目の 7 連結 E 型誘導加熱コイルにおける各巻き線の等価直列抵抗およびインダクタンスを示す。そのため、図 4.31(b) の等価回路のように 520 mm 幅の高機能フィルムにおいて小金属検出を行う場合、合計 30 巻き線必要となる。表 4.3 にしめす回路定数より、3 連結 E 型誘導加熱コイルの等価直列抵抗値は 5.0 Ω より、1 巻き線の等価直列抵抗は 0.71 Ω となる。7 連結 E 型



(a) FEM モデル



(b) 鉄損分布解析結果

図 4.28 3 連結 E 型誘導加熱コイルにおける鉄損分布解析結果

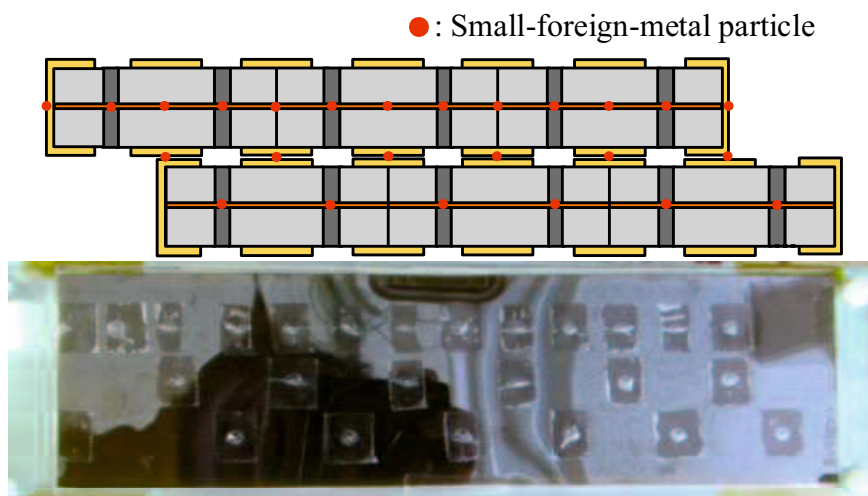


図 4.29 フィルム上の小金属

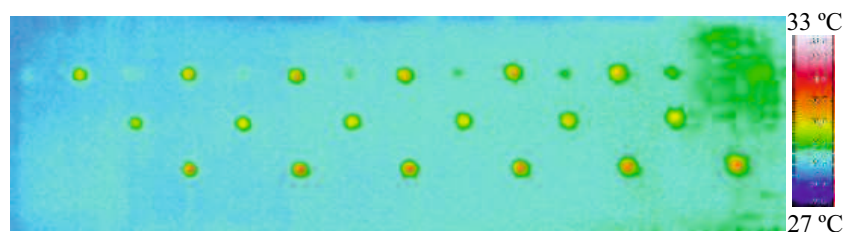
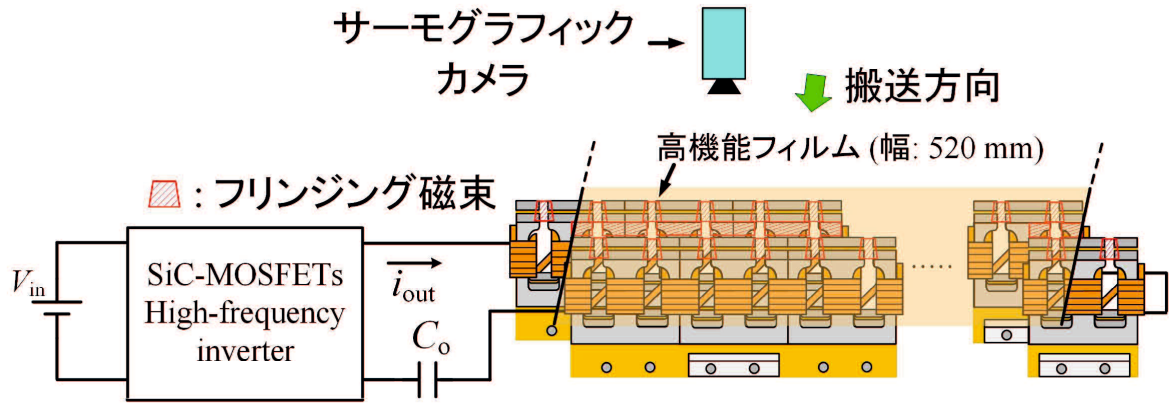


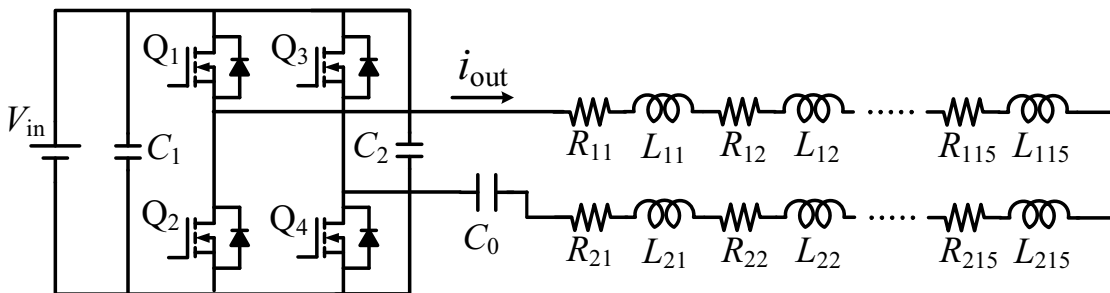
図 4.30 直径 0.7 mm 小金属の誘導加熱実験結果

誘導加熱コイルを2列用いると等価直列抵抗値は 21.3Ω となる。出力電流実効値を 30 Arms とした場合、SiC-MOSFET のドレイン・ソース間に印加される電圧は 903 V となる。これらの計算結果より、半導体デバイスは定格の約 60~70 % の環境下で使用されることが望ましいため、1700 V 定格の SiC-MOSFET が必要不可欠であるといえる。

以上をまとめると数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムに磁界を印加可能な誘導加熱コイルのコア形状を提案し、小金属加熱実験から有効性を確認した。しかしながら、2列の誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置では誘導加熱コイルの鉄損による影響から出力電流を 30 Arms まで出力することが不可能である。また、誘導加熱コイルの鉄損は 8176 W であり、誘導加熱コイルのコア割れの可能性があるため 0.7 mm 以下の小金属の検出は不可能であった。



(a) 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした E 型誘導加熱コイルの連結イメージ



(b) 520 mm 幅の高機能フィルムにおける E 型誘導加熱コイルの等価回路

図 4.31 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした E 型誘導加熱コイルの連結イメージ

4.4 本章のまとめ

本章では、フリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルを提案しその有効性を確認した。第 3 章で求めた高周波インバータの周波数条件において試作した高効率かつ安定動作が可能な SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて誘導加熱方式小金属検出法における高周波電源に適用した。また、フリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルを提案し磁界解析ソフトを用いて広範囲に小金属加熱が可能であることを確認した。さらに、誘導加熱方式小金属検出実験を行った。実験結果から、高機能フィルム上に混入した小金属を誘導加熱コイルの上空 70 cm に設置したサーモグラフィックカメラによって直径 0.3 mm の小金属を検出可能であることを明らかにした。また、直径 0.3 mm の小金属の温度上昇は、最大で 5.2 °C であった。次に、提案した誘導加熱コイルを用いて直径 0.15 mm の小金属加熱実験を行った。しかしながら、直径 0.15 mm 小金属の場合は同条件では直径 0.3 mm 小金属よりも発熱が小さく、小金属を

検出できない恐れがあるため、直径 0.15 mm 小金属の場合は端子台を設けて小金属とサーモグラフィックカメラの距離を 5.6 cm とし、近接拡大レンズを使用して実験を行った。直径 0.15 mm の小金属の温度上昇は、最大で 6.3 °C であった。次に、試作した 3 連結 E 型誘導加熱コイルを千鳥配置することで千鳥配置した誘導加熱コイル間においても磁束密度が発生し、広範囲に小金属加熱が可能であることを確認した。千鳥配置した 3 連結 E 型誘導加熱コイルを用いて同様に誘導加熱実験を行った。直径 0.7 mm の小金属の温度上昇は、最大で 3.5 °C であった。しかしながら、誘導加熱コアの鉄損によって、高い磁束密度が発生することが困難である。この問題を解決するために、誘導加熱コアにおける鉄損を低減することが必要となる。

第5章 コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイル

第4章でフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルを提案し、SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた小金属検出装置を構築した。また、提案する誘導加熱コイルを用いて誘導加熱実験を行った。フリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルを提案し磁界解析ソフトを用いて広範囲に小金属加熱が可能であることを確認した。実験結果から、高機能フィルム上に混入した小金属をサーモグラフィックカメラによって直径0.3 mm および直径0.15 mm の小金属を検出可能であることを明らかにした。また、直径0.3 mm の小金属の温度上昇は、最大で5.2 °Cであった。次に、試作した3連結E型誘導加熱コイルを千鳥配置することで千鳥配置した誘導加熱コイル間においても磁束密度が発生し、広範囲に小金属加熱が可能であることを確認した。千鳥配置した3連結E型誘導加熱コイルを用いて同様に誘導加熱実験を行った。直径0.7 mm の小金属の温度上昇は、最大で3.5 °Cであった。しかしながら、誘導加熱コアの鉄損によって、高い磁束密度が発生することが困難である。この問題を解決するために、誘導加熱コアにおける鉄損を低減することが必要となる。本章では、これらの問題を解決するために誘導加熱コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルのコア形状を提案する。提案した鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置を構築し、直径0.3 mm および直径0.15 mm の小金属球における誘導加熱実験を行う。小金属誘導加熱実験結果から提案する誘導加熱コイルの有効性を確認する⁽⁷¹⁾。

5.1 コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルの構成

図5.1にコアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルのコアの形状および寸法を示す。図5.1に提案する誘導加熱コアは、E字型コア、I字型コアおよび銅板から構成される。図5.2に提案するEI型誘導加熱コイルの連結イメージ図を示す。E字型誘導加熱コアとI字型誘導加熱コア間に発生する磁束を利用してE字型誘導加熱コアとI字型誘導加熱コアのギャップを通過するフィルムに混入する小金属を加熱する。図5.2のようにコアを並べた際の連結された誘導加熱コイルにおいて加熱領域を拡大することが可能である。ゆえに、数メートル幅のフィルムを扱う場合においても、同誘導加熱コイルを複数個連結することにより広範囲にでの加熱が可能となる。次に、図5.1に提案するE型コアおよびI型コア形状のコアギャップ中に発生する磁束密度の理論式を等価磁気回路により求める。図5.3にEI型コア形状の

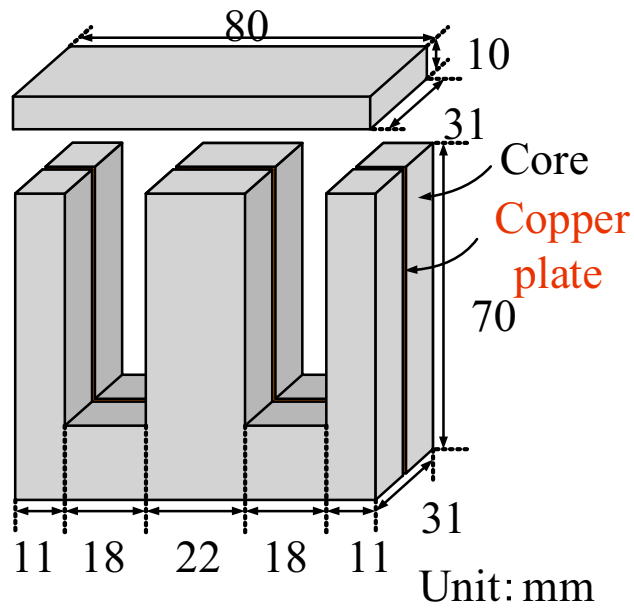


図 5.1 EI 型コアの寸法

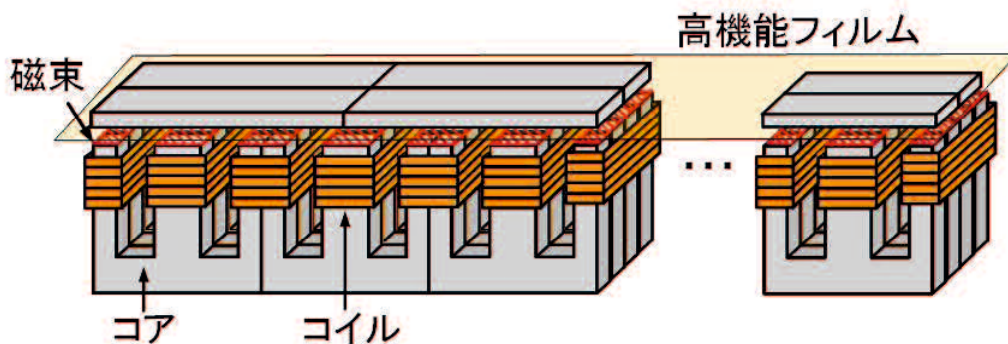


図 5.2 EI 型誘導加熱コイルの連結イメージ図

等価磁気回路に使用する磁束の磁路と断面積を示したものを示す。また、図 5.4 に、EI 型コア形状の等価磁気回路を示す。等価磁気回路に使用した変数は以下に示すものとする。

- R_g : ギャップ部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- R_1 : E 型コア底辺部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- R_2 : E 型コア脚部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- R_3 : I 型コア部分の磁気抵抗 [A/Wb]
- l_g : ギャップの距離 [m]

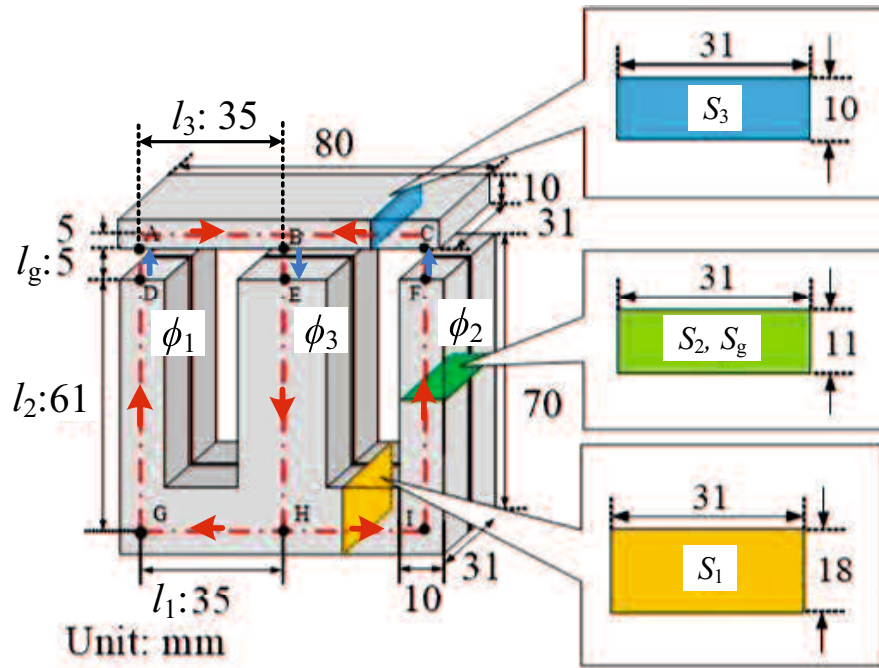


図 5.3 EI 型コアの磁路長および断面積

- l_1 : E 型コア底辺部分の磁路長 [m]
- l_2 : E 型コア脚部分の磁路長 [m]
- l_3 : I 型コア部分の磁路長 [m]
- S_g : ギャップの部分の断面積 [m^2]
- S_1 : E 型コア底辺部分の断面積 [m^2]
- S_2 : E 型コア脚部分の断面積 [m^2]
- S_3 : I 型コア部分の断面積 [m^2]
- N : 銅線コイルの巻き数 [回]
- I : 銅線コイルに流れる電流の実効値 [Arms]
- ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : 各コア, ギャップ中を通る磁束 [Wb]

等価磁気回路における各磁気抵抗は,

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S_2} \quad (5.1)$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_s \mu_0 S_1} \quad (5.2)$$

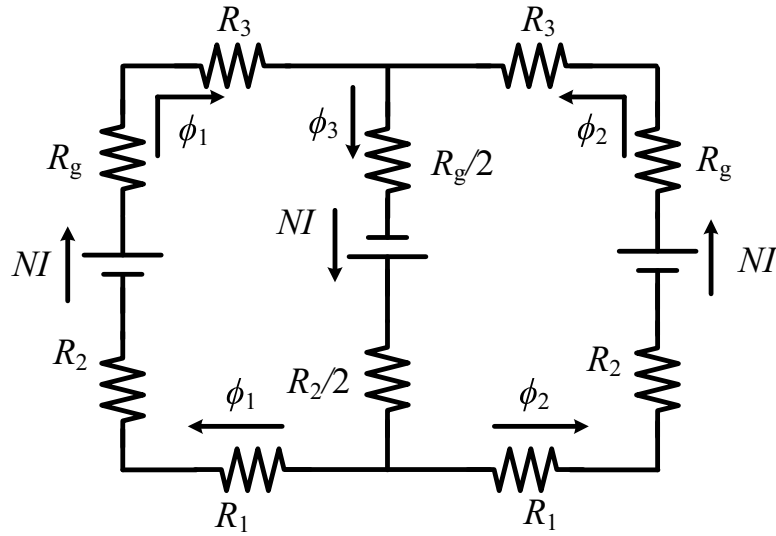


図 5.4 EI 型コアの等価磁気回路

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_s \mu_0 S_2} \quad (5.3)$$

$$R_3 = \frac{l_3}{\mu_s \mu_0 S_3} \quad (5.4)$$

で表される。ただし、(5.1)~(5.4) 式中の μ_0 は真空の透磁率、 μ_s は使用するコアの比透磁率とする。等価磁気回路においてキルヒホッフ第1法則より

$$\phi_3 = \phi_1 + \phi_2 \quad (5.5)$$

また、等価磁気回路の対称性より

$$\phi_1 = \phi_2 = \frac{\phi_3}{2} \quad (5.6)$$

が成り立つ。等価磁気回路においてキルヒホッフ第2法則より回路方程式をたてると

$$2NI = (R_g + R_1 + R_2 + R_3)\phi_1 + \left(\frac{R_2}{2} + \frac{R_g}{2}\right)\phi_3 \quad (5.7)$$

$$2NI = (R_g + R_1 + R_2 + R_3)\phi_2 + \left(\frac{R_2}{2} + \frac{R_g}{2}\right)\phi_3 \quad (5.8)$$

となる。ここで、 $N=5$ 回、 $I=30$ Arms、 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m、 $\mu_s=2400$ とする。そこで、EI 型誘導加熱コイルにおける磁束密度は、E 字型誘導加熱コアと I 字型誘導加熱コアのギャップ内における磁束密度はギャップの距離 l_g によって決まる。図 5.5 にコアギャップの距離とギャップ内の磁束密度の関係図を示す。図 5.5 より、コアギャップ内の磁束密度はコアギャップの距離の 2 乗に反比例することが確認できる。また、コアギャップ距離が 5 mm のときコアギャップ中の磁束密度は 37.2 mT であることが確認できる。コアギャップ距離が 4 mm のときコア

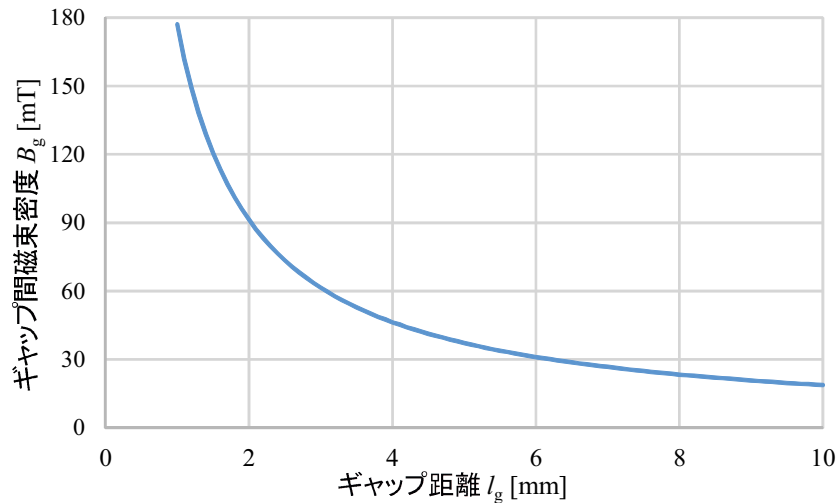


図 5.5 コアギャップ距離と磁束密度の関係

ギャップ中の磁束密度は 46.5 mT であることが確認できる。ここで、誘導加熱コイルと高性能フィルムの接触を防ぐため、コアの上空 3 mm 地点で高性能フィルムを搬送することに決定している。第 3 章および第 4 章では、直径 0.3 mm の小金属を 5 °C の温度上昇で検出するためには 31.6 mT の磁束密度を鎖交させる必要があり、直径 0.15 mm の小金属を 5 °C の温度上昇で検出するためには 49.3 mT の磁束密度を鎖交させる必要があるため、本章で提案する EI 型誘導加熱コイルにおいて直径 0.3 mm の小金属加熱実験では E 型コアおよび I 型コアとのコアギャップ距離は 5 mm、直径 0.15 mm の小金属加熱実験では E 型コアおよび I 型コアとのコアギャップ距離は 4 mm に決定した。図 5.6 に 3 連結 EI 型誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置の構成図を示す。図 5.6 に 3 連結 EI 型誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置において等価磁気回路から算出した磁束密度を電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) を用いてコア上空の磁束密度を求める。

5.2 シミュレーション結果

次に、図 5.6 の 3 連結 EI 型誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置の E 型コアおよび I 型コアのコアギャップ内において、E 型コア上空 3 mm 地点における磁束密度分布と強度を調べるために、電磁界解析ソフト JMAG (JSOL 社) version 16.0 による磁場解析を行った。また、解析における条件は以下の通りである。

- E 型誘導加熱コイル …… コイル巻き数: 35 回 (各コア脚あたり 5 回), 電流実効値: 10 Arms
- コイル電流周波数 …… 400 kHz
- コア材 …… PC40

図 5.7 に、3 連結 EI 型誘導加熱コイルの連結時の磁束密度解析結果を示す。図 5.7(a) に 3

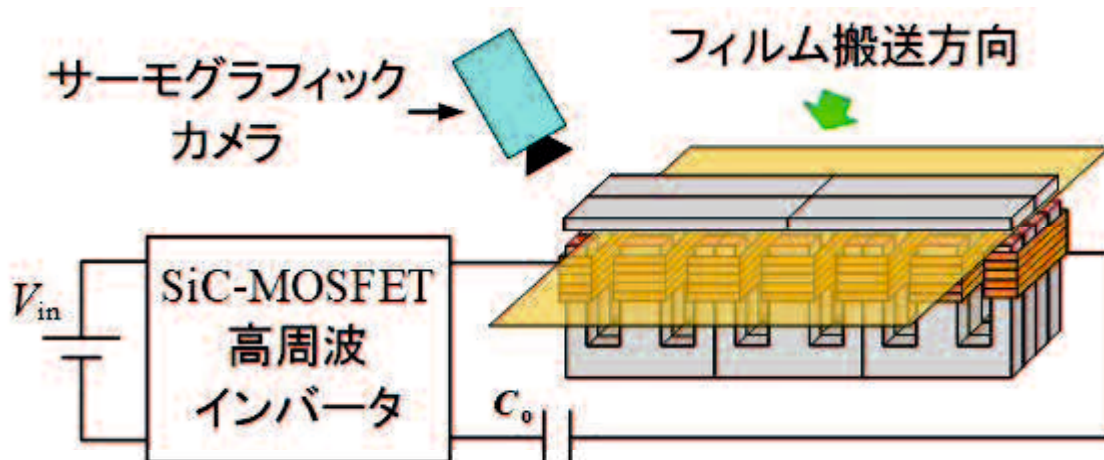


図 5.6 コア内鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルを用いた小金属検出装置の構成図

表 5.1 E 型誘導加熱コイルおよび EI 型誘導加熱コイルのコア内の鉄損比較

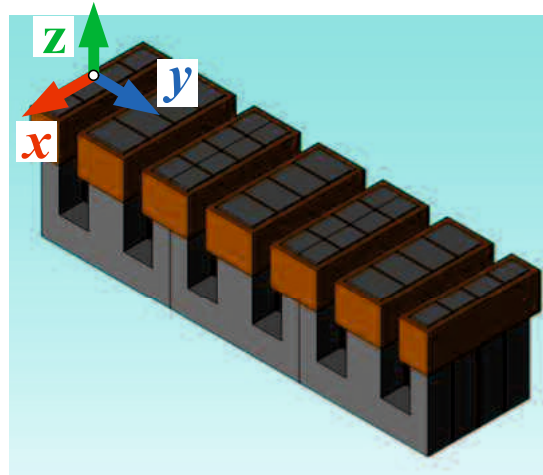
	E 字型誘導加熱コイル	EI 型誘導加熱コイル
鉄損 W	4088	1153
ジュール損 W	2686	702
ヒステリシス W	1402	451

連結 EI 型誘導加熱コイルの解析モデルを示す。図 5.7(b) に 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの磁束密度分布解析箇所を示す。図 5.7(c) に 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの磁束密度解析結果を示す。図 5.8 に磁束密度分布解析結果を示す。図 5.8 より、コアギャップ内において 12 mT の磁束密度が発生していることを確認した。よって、第 4 章で提案するフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルと比較して磁束密度 20 % 増加することが確認できる。

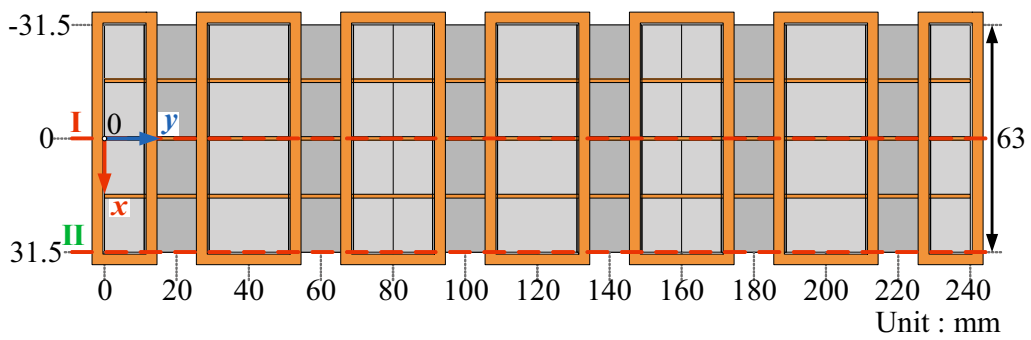
次に、第 4 章で提案したフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルと本章で提案する EI 型誘導加熱コイルのコアの鉄損を比較した。ここで、解析における条件は以下の通りである。

- E 型誘導加熱コイル …… コイル巻き数: 35 回 (各コア脚あたり 5 回), 電流実効値: 30 Arms
- コイル電流周波数 …… 400 kHz
- コア材 …… PC40

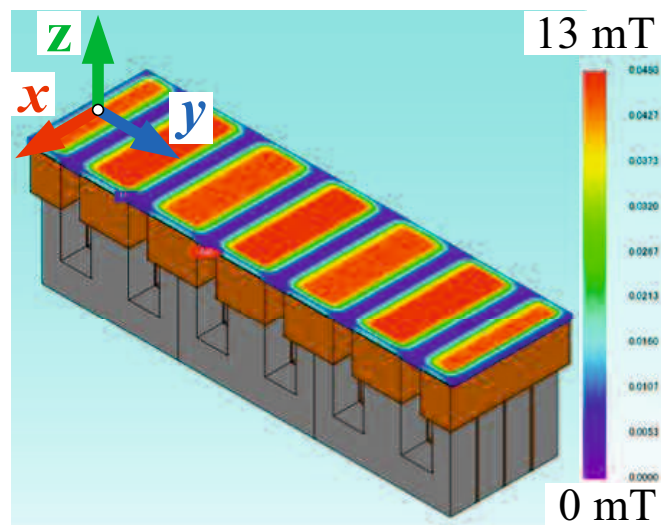
図 5.9 にフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルおよび EI 型誘導加熱コイルのコア内の鉄損密度分布シミュレーション結果を示す。図 5.9 において本章で提案する EI 型誘導加熱コイルの鉄損が著しく低減していることが明らかである。表 5.1 にフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルおよび EI 型誘導加熱コイルのコア内の鉄損比較を示す。第 4 章で提案したフリンジング磁束を用いた誘導加熱コイルにおいて、コアの鉄損は 4088 W であった。そ



(a) 解析モデル



(a) 磁束密度分布解析箇所



(c) 磁界解析結果

図 5.7 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの連結時の磁束密度解析結果

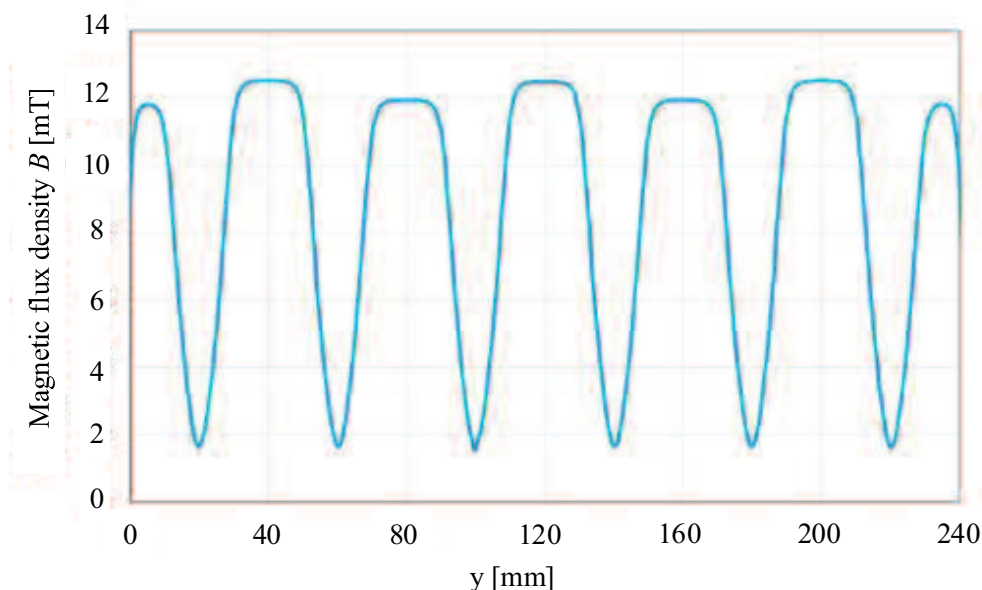
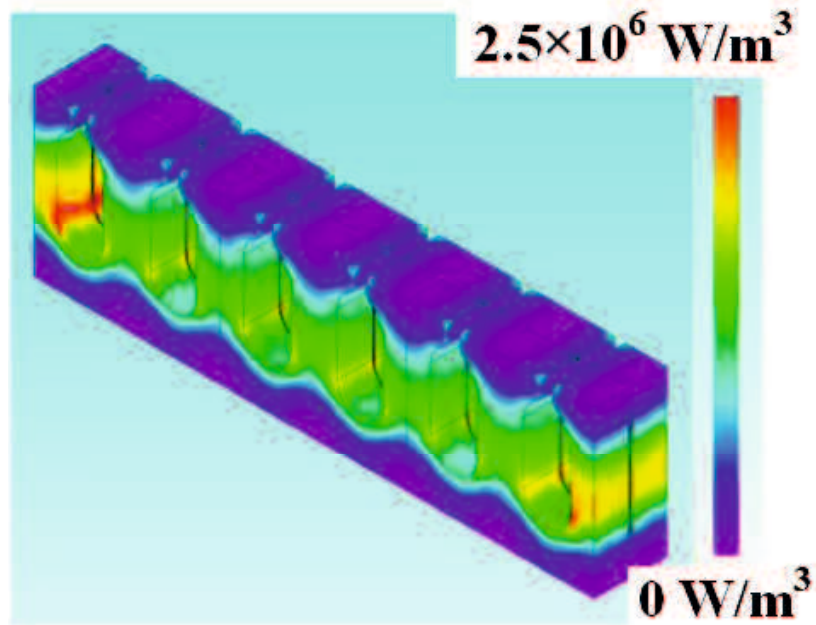


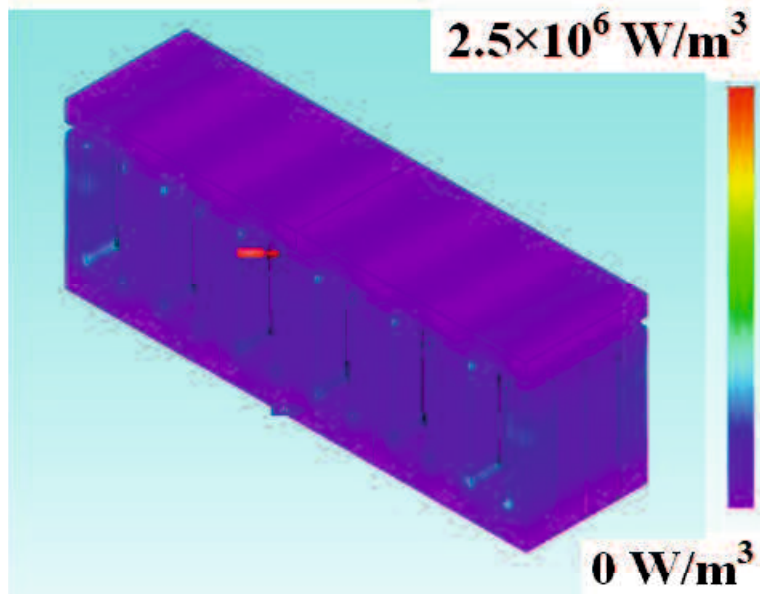
図 5.8 コアギャップ内の磁束密度分布

の中で、ジュール損は 2686 W、ヒステリシス損は 1402 W となった。一方、本章で提案する EI 型誘導加熱コイルにおいて、コアの鉄損は 1153 W であった。その中で、ジュール損は 702 W、ヒステリシス損は 451 W となった。これらの結果より、EI 型誘導加熱コイルを用いることによって、コアの鉄損を 71.8 % 低減可能であることが確認できる。鉄損を低減することによって、誘導加熱コイルにおけるコア割れを防止することが可能となり、より実用的な小金属検出装置を実現することが可能となる。

次に、提案する EI 型誘導加熱コイルにおける冷却問題について説明する。第 3 章と同様に E 型コアはフッ素系不活性液体のフロリナートを用いて冷却する。しかしながら、搬送される高機能フィルムよりも上部に I 型コアがあるため I 型コアの冷却にフロリナートを使用することは困難である。そこで、I 型コアの冷却にはヒートシンクを用いて自然空冷を行う。I 型コアはヒートシンクを用いた自然空冷で冷却可能であるかを電磁界ソフトウェア JMAG を用いて確認する。ここで、I 型コアに付加するヒートシンクの体積はサーモグラフィックカメラを用いた小金属の観測の妨げにならない程度の体積に設定している。図 5.10 にヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果を示す。図 5.10(a) に I 型コアにヒートシンクを付加した解析モデルを示す。図 5.10(b) に熱解析結果を示す。図 5.10(b) より、I 型コアおよびヒートシンクは駆動から 30 分以内に飽和状態になっていることが確認できる。また、図 5.11 に飽和状態におけるヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果を示す。図 5.11 の熱解析結果より、I 型コアおよび I 型コアに付加したヒートシンクの温度は 30 °C であり I 型コアの冷却はヒートシンクを用いた自然空冷で実現可能であることを確認した。

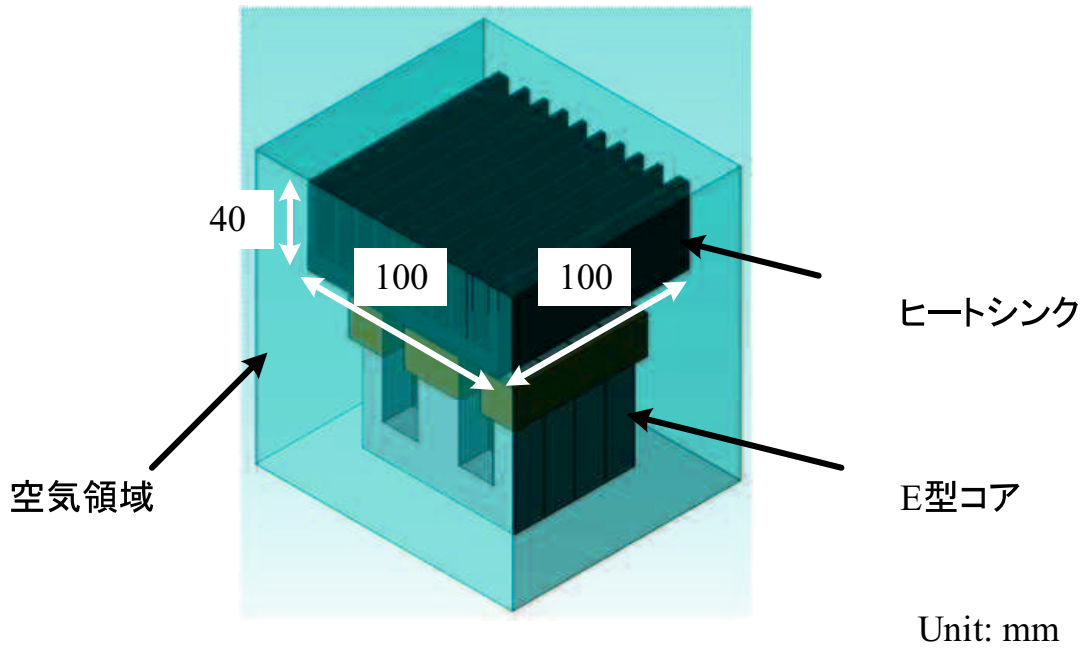


(a) E型誘導加熱コイルにおけるコア内の鉄損密度分布シミュレーション結果

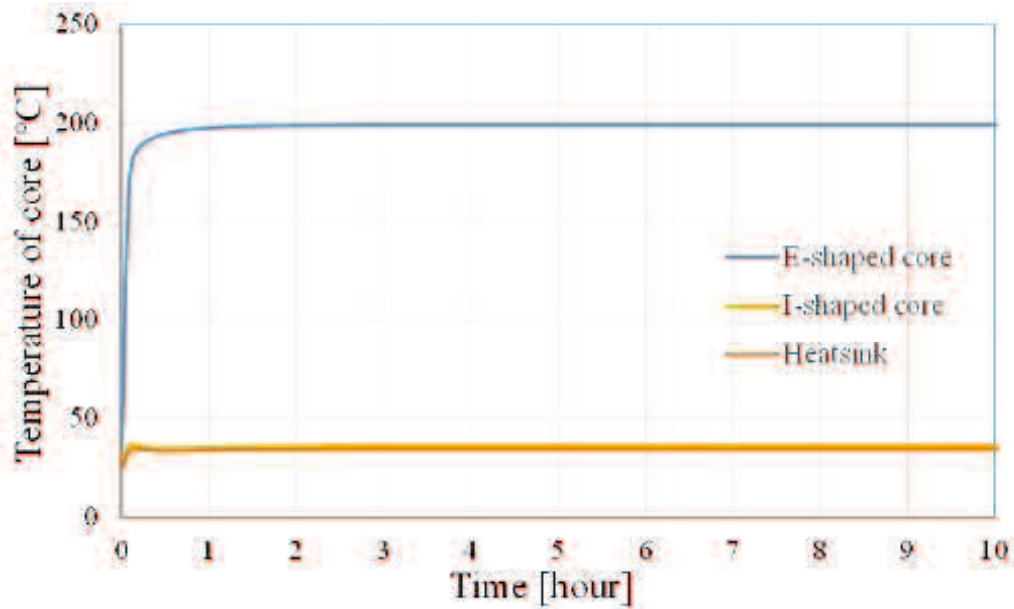


(b) EI型誘導加熱コイルにおけるコア内の鉄損密度分布シミュレーション結果

図 5.9 E型誘導加熱コイルおよびEI型誘導加熱コイルのコア内の鉄損密度分布シミュレーション結果



(a) I型コアにヒートシンクを付加した解析モデル



(b) 熱解析結果

図 5.10 ヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果

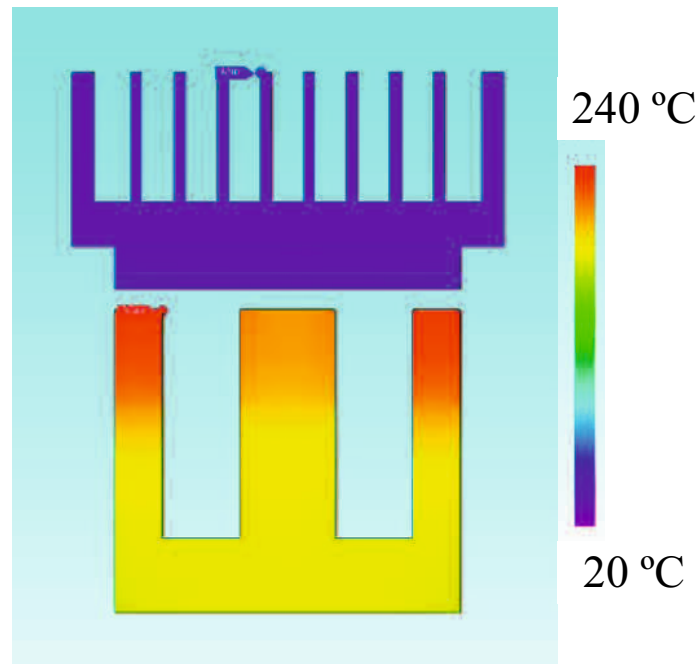
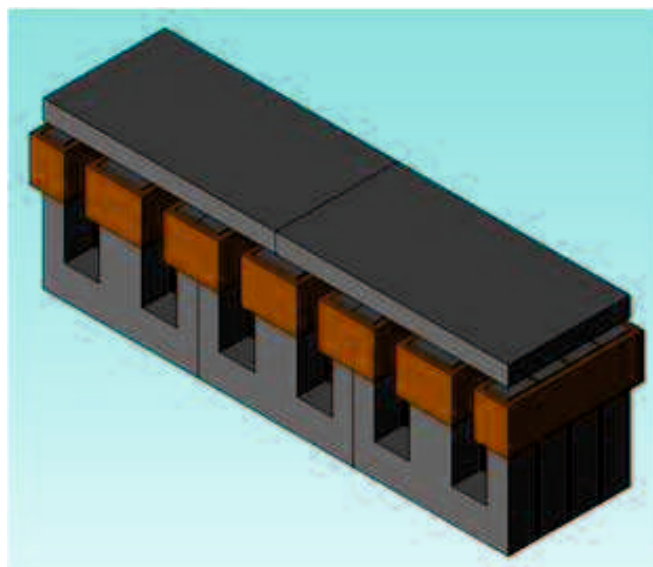


図 5.11 飽和状態におけるヒートシンクを付加した I 型コアの熱解析結果

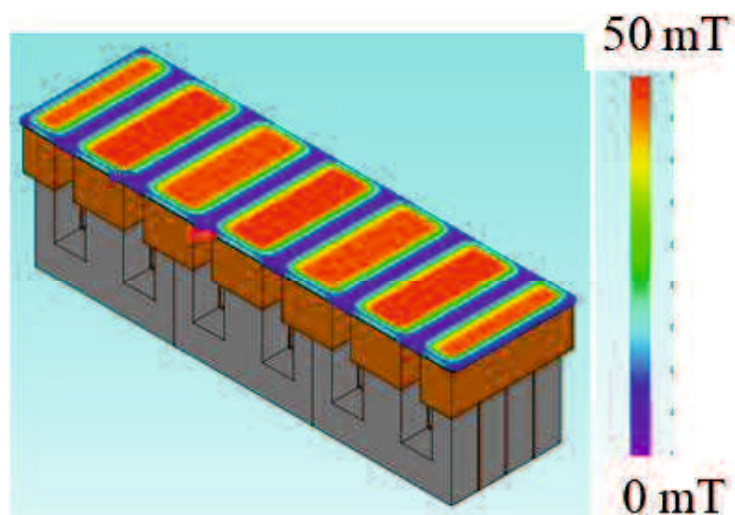
次に、直径 0.15 mm の小金属を検出するために E 型コアと I がたコアのコアギャップ距離を 4 mm に変更した場合における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの磁束密度解析結果を示す。図 5.12(a) にコアギャップ距離を 4 mm に変更した場合における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの解析モデルを示す。図 5.12(b) に図 5.12(a) の磁束密度分布解析結果を示す。図 5.12(b) より、コアギャップ内において約 48 mT の磁束密度が発生していることを確認した。よって、コアギャップ距離を 4 mm に変更することによってコアギャップ距離を 5 mm における誘導加熱コイルと比較して磁束密度 33 % 増加することが確認でき直径 0.15 mm の小金属の検出が期待できる。

5.3 実験結果

図 5.6 の小金属検出装置を用いて小金属加熱実験を行う。図 5.13 に、試作した 3 連結した EI 型誘導加熱コイルの写真を示す。第 4 章と同様に、EI 型コアのコア材料には FDK 社製の Mn 系フェライトコア 7H10 を用いる。また、図 5.13 に示すように均熱用銅板を固定できるように台座も作製した。台座の材料には非磁性金属の SUS304 を使用し、台座自体が誘導加熱されないようにしている。コイルの材料としてはリッツ線 (撚り本数:1800 本, 素線径 0.05 mm) を使用し、図 5.13 に示すように直接コアに接触しないよう厚さ 0.5 mm, 耐圧 15 kV/mm のガラスエポキシ板を用いたボビンを装着している。さらに、リッツ線自体にも耐圧 56.6 kV の自己融着性のシリコンゴムテープ (日東電工社) を巻き、絶縁耐力を強化して



(a) 解析モデル



(b) 磁界解析結果

図 5.12 コアギャップ 4 mm における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの連結時の磁束密度解析結果

いる。

試作した3連結E型誘導加熱コイルと第3章で作製した400 kHz SiC-MOSFET フルブリッジインバータを接続し、均熱用銅板の効果を確認するために通電試験を行った。図 5.14 に実験回路の構成図を、表 5.2 に回路定数をそれぞれ示す。通電試験では 10 Arms の電流を3連結誘導加熱コイルに流し、コアの温度分布をサーモグラフィックカメラで観測する。通電試験の条件は以下の通りである。

- 出力電流周波数 …… 375 kHz
- 出力電流実効値 …… 10 Arms
- 導通時間 …… 3 分間
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- コアの冷却 …… 無風状態

図 5.15 に、通電開始から3分後のサーモグラフィ画像を示す。図 5.15 より、コア上下間およびコア下部の左右間の温度差は 30 °C 以下であり、銅板を挟み込んだことの有効性を確認できた。第4章で提案したE型誘導加熱コイルの導通試験結果と比較して、誘導加熱コアの温度上昇を著しく低減していることが確認できる。しかし、コイル電流 30 Arms 時にはコアの冷却能力を上昇するために、第4章でも使用したフッ素系不活性液体のフロリナートを用いてコアを冷却する。フロリナートは強制送風に比べて5倍の熱伝達能力を持つなどの優れた熱特性、さらに電気絶縁性および安全性を併せ持つ液体であり、電子機器の絶縁冷却にも使用されている。フロリナートには幾つか種類があるが、実験にはフロリナート FC-3283 (3M 社) を使用する。図 5.15 の導通試験結果より、コアの鉄損を低減可能な新しい誘導加熱コイルのコア形状の有効性を確認した。

試作した3連結EI型誘導加熱コイルのコアギャップ内の磁束密度分布をサーチコイルにより測定した。先の磁界解析結果と比較するため、実験条件は以下の通りである。

- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 10 Arms
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 400 kHz

図 5.16 に、磁束密度分布測定結果を示す。磁束密度分布解析結果と実験結果は同様の傾向を示しており、整合性を確認できる。磁束密度分布解析結果を基準とした場合におけるコアギャップ内における磁束密度の誤差は 15 % であり、磁束密度分布解析結果と実験結果は一定の精度で一致している。したがって、磁束密度分布解析通り、EI 型誘導加熱コイルを用いてコアギャップ内の磁束密度を用いて小金属検出に有効的であることが確認できる。

次に、EI 型誘導加熱コイルを用いた小金属検出実験を行う。本章では、誘導加熱実験の際に誘導加熱コイルの冷却システムおよび高機能フィルム搬送機を構築している。第3章の冷却システムでは耐熱性および耐薬品性に優れるポリプロピレン容器を採用し、攪拌機を用いてフッ素系不活性液体のフロリナートを循環させ誘導加熱コイルの冷却を行っている。フ



図 5.13 3 連結 E 型誘導加熱コイルの構成

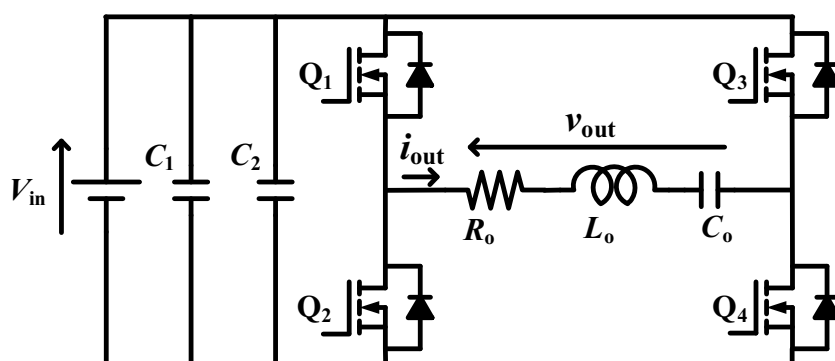


図 5.14 実験回路構成図

表 5.2 実験回路定数

Item	Symbol	Value
Switching frequency	f_{sw}	400 kHz
DC capacitor	C_1	5600 μ F
Bypass capacitor	C_2	2.2 μ F
Equivalent resistance of load	R_o	2.2 Ω
Inductance of load	L_o	139.4 μ H
Capacitance of load	C_o	1.2 nF

ロリナートは強制空冷に比べて 5 倍の熱伝達能力を持つなど優れた熱特性，さらに電気絶縁性および安全性を併せ持つ液体であり，電子機器の絶縁冷却にも使用されている。しかし，第 4 章の冷却システムではフロリナート自体の冷却を行っていない。そのため，長時間運転する検出装置では誘導加熱コイルが常に発熱するため誘導加熱コイル冷却のためフロリナー

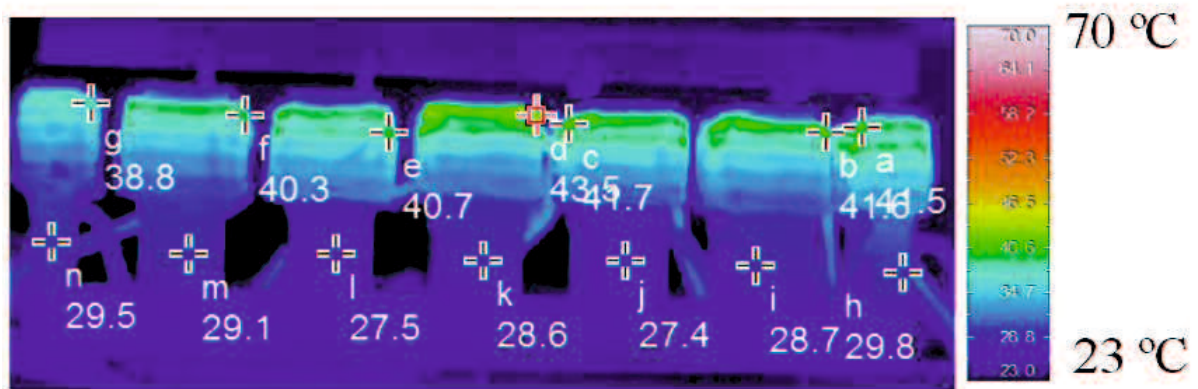


図 5.15 導通試験結果

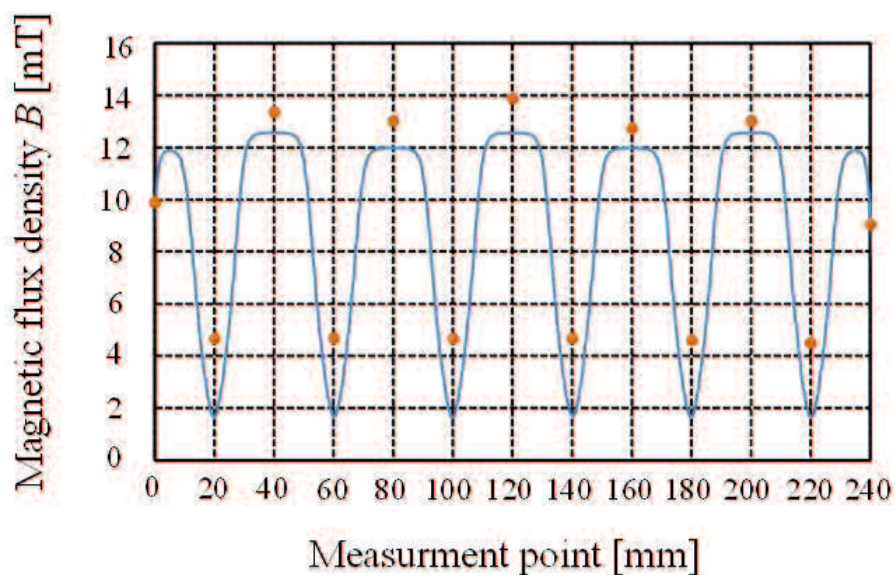


図 5.16 磁束密度分布測定結果

トの冷却も同時に行い、常に冷却されたフロリナートで誘導加熱コイルを冷却する必要がある。実際の検出装置はインラインに用いられ、長時間運転が求められるため以下の事項を考慮し誘導加熱実験を行わなければならない。

- 移動しているフィルムに対し誘導加熱を行い加熱実験を実施
- 装置の長時間運転を想定し、冷却したフロリナートを循環させコアが割れないように誘導加熱コイルを均等に冷却

以上より、本研究では A4 サイズ幅のフィルムの検出を行う誘導加熱方式小金属検出装置の

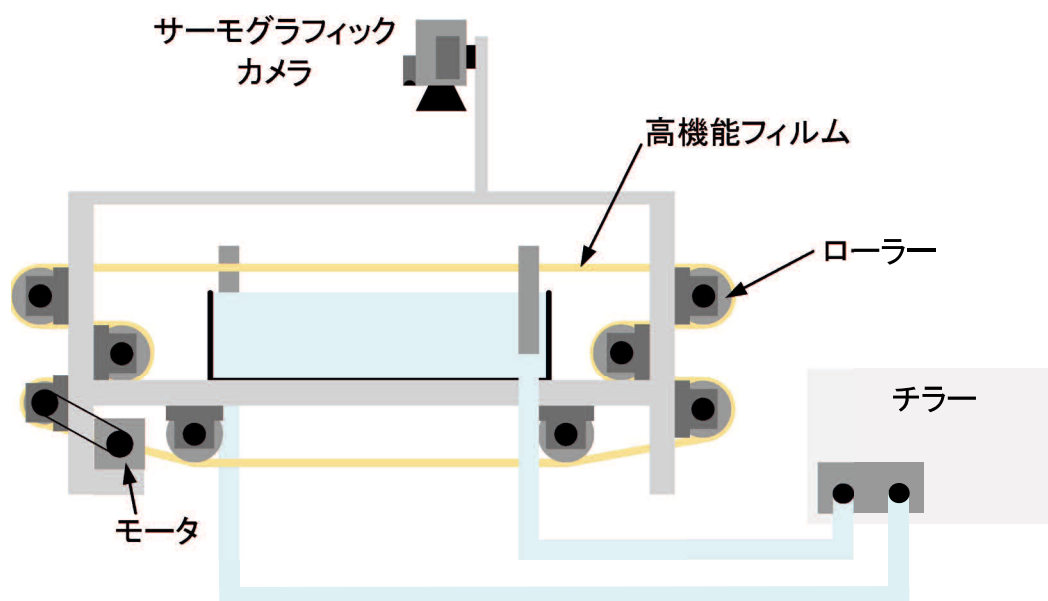


図 5.17 小金属検出装置プロトタイプモデルイメージ図

プロトタイプモデルを作製した。図 5.17 に、小金属検出装置プロトタイプモデルのイメージ図を示す。小金属検出装置は主にフィルムの搬送を模擬したフィルム搬送装置、冷却フロリナート用の水槽およびフロリナートを冷却・循環させるためのチラーで構築される。フィルム搬送装置はアルミフレームおよびローラーで構成し、モーターを使用することで一定の速度でフィルムが搬送可能となるように構成されている。また、ローラーの位置は搬送するフィルムができる限りたるむことがないように配置している。実際に作製したフィルム搬送装置を図 5.18 に示す。ローラーを回すためのモーターは、図 5.19 に示すオリエンタルモータ社製の AC サーボモータ US2-425JA-30-2 を使用している。モーターの回転速度はコントローラーで変更することができ、フィルムの搬送速度を調整することが可能である。フロリナート用の水槽は、A4 フィルム幅に対応した誘導加熱コイルを収容可能な大きさとしている。図 5.20 に、作製した水槽を示す。作製した水槽はアクリル板を使用している。また、フロリナートがあふれ出ても大丈夫なように二重構造としており、内側の水槽にフロリナートを充填せる。このとき、水槽の高さはフロリナートの液面が誘導加熱コイルの先端表面に一致するようにしている。また、内側の水槽内にはフロリナートの流量が可能な限り均一になるように穴の開いた仕切り板を設けている。

フロリナート冷却用のチラーは、誘導加熱コイルの発熱量に対して十分な冷却能力を持つオリオン機械社製の RCC1500B1 を選定した。オリオン社製の RCC1500B1 を図 5.21 に、チラーの仕様を表 5.3 に示す。選定したチラーはチラー内の冷媒をファンで冷却するファン空冷方式である。図 5.22 に、チラーの内部構造のイメージ図を示す。チラー内部は冷媒がコンプレッサーにより循環されており、冷却用の液体を冷媒で冷却する構成となっている。ま

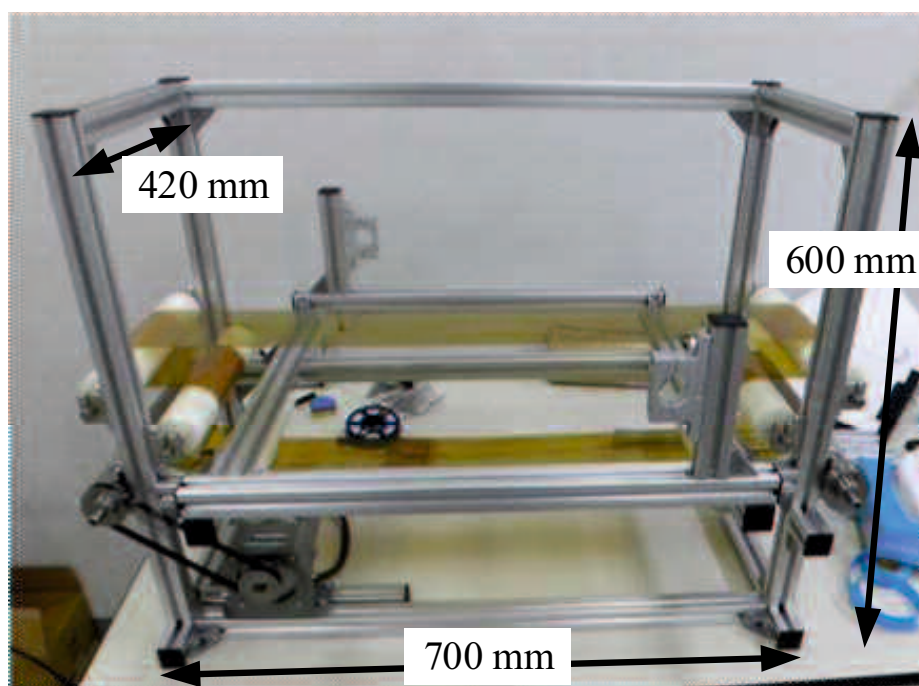
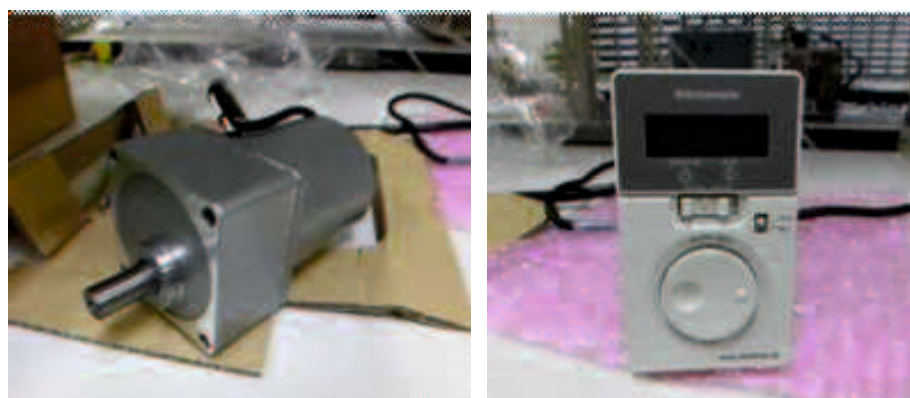


図 5.18 作製したフィルム搬送装置



(a) モーター

(b) コントローラー

図 5.19 フィルム搬送装置のモーターとコントローラー

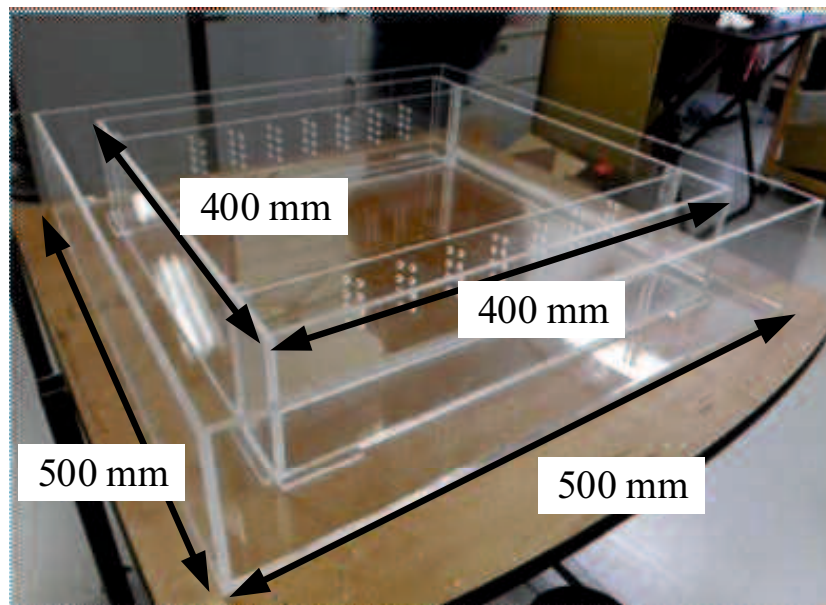


図 5.20 フロリナート用水槽



図 5.21 選定した冷却用チラー

表 5.3 冷却用チラーの仕様

冷却性能	4.65 kW
使用液温度範囲	15～40 °C
液温制御精度	設定温度 ±0.5 °C
使用循環量範囲	20～80 L/min
冷媒	R-410A
適用クーラントタンク容量目安	250～700 L
電源	三相 200±10% (50/60 Hz)

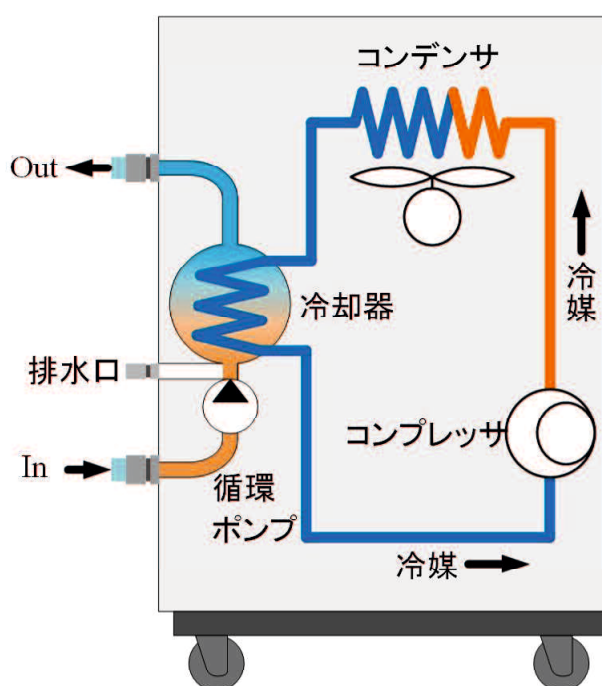


図 5.22 チラー内部構造

た、チラーの流出速度は一定であり、所望の流出速度に変更することができない。そこで、図 5.23 に示すようにボールバルブを使用し、水槽用に流量を調整することが可能な構成とした。また、サーモグラフィックカメラは第 3 章と同様に 70 cm のカメラ距離で A4 サイズ幅 (210 mm) を確認することが可能であるため、サーモグラフィックカメラは 1 台使用し、搬送するフィルムから 70 cm 離れた所に設置している。

試作した冷却装置および高機能フィルム搬送機を有する誘導加熱方式小金属検出装置を使い、直径 0.3 mm 小金属の誘導加熱実験を行った。主な実験条件は以下の通りである。また、小金属を載せた高機能フィルムをコア先端から高さ 3 mm の位置に設置し、誘導加熱実験を行った。主な実験条件は以下の通りである。

- 小金属 (球体) …… 直径: 0.3 mm, 材質: SUS304
- フィルム …… ポリイミドフィルム

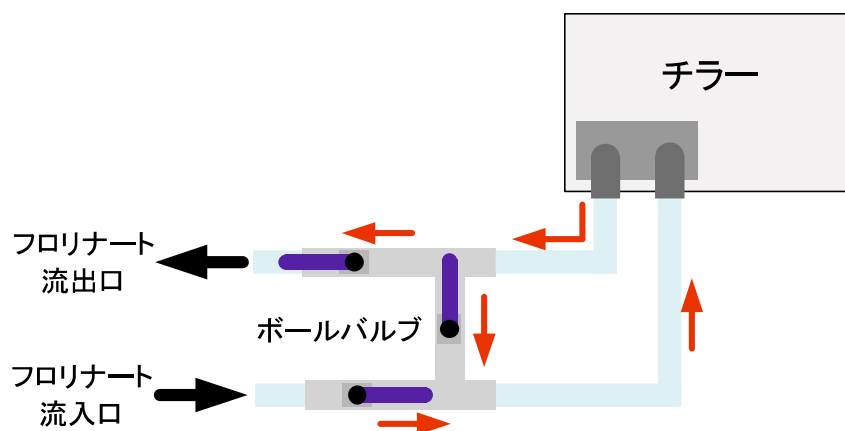
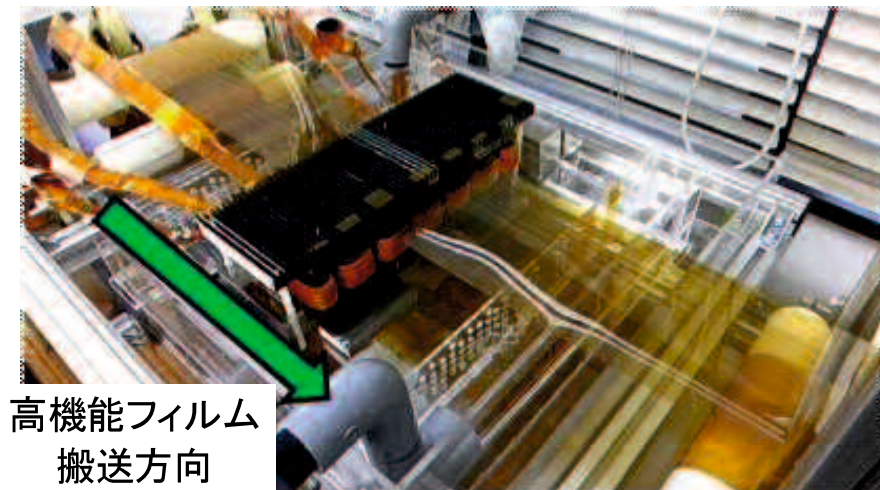


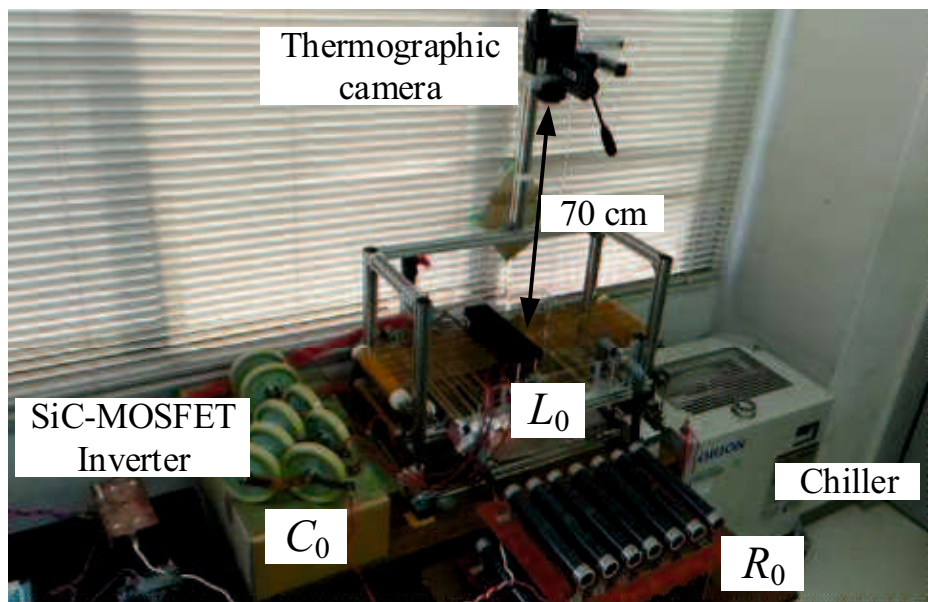
図 5.23 流量調節用ボールバルブ

- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 30 Arms
- コアギャップ距離 …… 5 mm
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 400 kHz
- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- 加熱時間 …… 5 秒
- 小金属とサーモグラフィックカメラの距離 …… 距離: 70 cm

本実験では、E字型誘導加熱コイルとI字型誘導加熱コイルのコアギャップに高機能フィルムを搬送させる。実際の小金属検出装置を模擬するために高機能フィルム搬送機を試作した。図 5.24 に高機能フィルム搬送機を適用した場合の小金属検出装置を示す。高機能フィルムが誘導加熱コイルのコアギャップを通過し、コアギャップ通過直後において誘導加熱された小金属の温度上昇をサーモグラフィックカメラによって検出する。図 5.24 に高機能フィルム搬送機を適用した場合における小金属検出装置の外観図を示す。第4章と同様に、各小金属はセロハンテープで高機能フィルムに貼り付けている。また、直径 0.3 mm の小金属を誘導加熱するために SiC-MOSFET フルブリッジインバータの出力電流、すなわち誘導加熱コイルに流れる電流を実験室の直流電源の最大出力である 30 Arms に設定した。磁束密度と電流は比例関係にあるため、図 5.7 の結果より、小金属を設置した点に鎖交する磁束密度は約 36 mT となる。図 5.25 に、誘導加熱実験時の小金属とサーモグラフィックカメラとの位置関係を示す。対象の小金属の場合は、図 5.25 に示すように小金属とサーモグラフィックカメラの距離を設置した小金属を全て同時に観測できる 70 cm とした。図 5.26 に、直径 0.3 mm の小金属を誘導加熱した際のサーモグラフィ画像をそれぞれ示す。図 5.26 の実験結果より、図 5.25 におけるコアギャップ内を通過した全小金属が発熱しサーモグラフィックカメラ上でその位置を確認することが出来る。また、実験結果よりサーモグラフィックカメラで検出した直径 0.3 mm の小金属の温度上昇 ΔT は最大で 6.6 °C であった。



(a) 高機能フィルム搬送機の実機写真



(b) 高機能フィルム搬送機を適用した小金属検出装置の外観図

図 5.24 高機能フィルム搬送機を適用した小金属検出装置の外観図

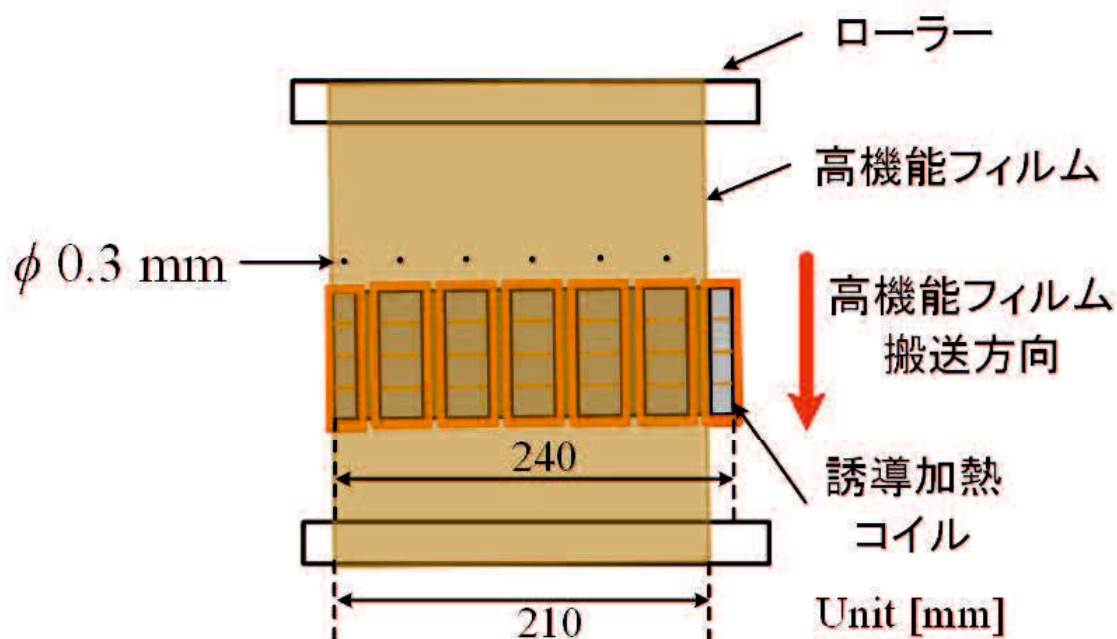


図 5.25 高機能フィルム搬送機における小金属の位置関係

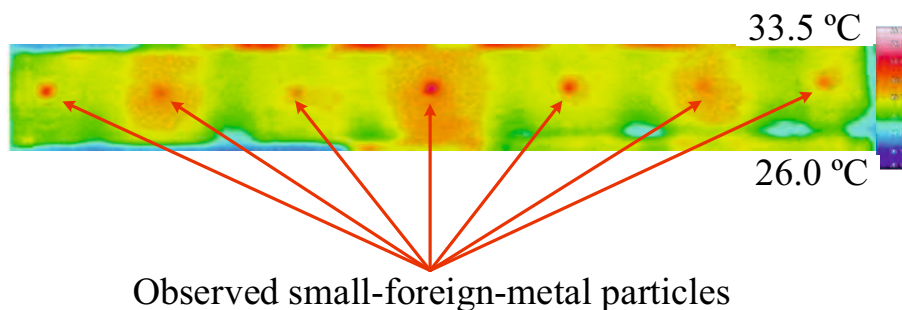


図 5.26 直径 0.3 mm 小金属球の誘導加熱実験結果

次に、試作した冷却装置および高機能フィルム搬送機を有する誘導加熱方式小金属検出装置を使い、直径 0.15 mm 小金属の誘導加熱実験を行った。直径 0.15 mm の小金属を検出するために必要な磁束密度は 45~50 mT であるため、より高い磁束密度を得るためにコアギャップを 5 mm から 4 mm に変更した。主な実験条件は以下の通りである。

- 小金属 (球体) …… 直径: 0.3 mm, 材質: SUS304
- フィルム …… ポリイミドフィルム
- 誘導加熱コイル …… 電流実効値: 30 Arms
- コアギャップ距離 …… 4 mm
- 高周波インバータ …… 駆動周波数: 400 kHz

- サーモグラフィックカメラ …… InfReC R300SR (日本アビオニクス社)
- 加熱時間 …… 5 秒
- 小金属とサーモグラフィックカメラの距離 …… 距離: 70 cm

図 5.12 にコアギャップ距離を 4 mm に変更した場合における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの磁束密度解析結果を示す。図 5.12(a) にコアギャップ距離を 4 mm に変更した場合における 3 連結 EI 型誘導加熱コイルの解析モデルを示す。図 5.12(b) に図 5.12(a) の磁束密度分布解析結果を示す。図 5.12(b) より、コアギャップ内において約 48 mT の磁束密度が発生していることを確認した。よって、コアギャップ距離を 4 mm に変更することによってコアギャップ距離を 5 mm における誘導加熱コイルと比較して磁束密度 33 % 増加することが確認でき直径 0.15 mm の小金属の検出が期待できる。本実験では、試作した高機能フィルム搬送機を用いて E 字型誘導加熱コイルと I 字型誘導加熱コイルのコアギャップに高機能フィルムを搬送させる。高機能フィルムが誘導加熱コイルのコアギャップを通過し、コアギャップ通過直後において誘導加熱された小金属の温度上昇をサーモグラフィックカメラによって検出する。第 4 章と同様に、各小金属はセロハンテープで高機能フィルムに貼り付けている。また、直径 0.15 mm の小金属を誘導加熱するために SiC-MOSFET フルブリッジインバータの出力電流、すなわち誘導加熱コイルに流れる電流を実験室の直流電源の最大出力である 30 Arms に設定した。磁束密度と電流は比例関係にあるため、図 5.12 の結果より、小金属を設置した点に鎖交する磁束密度は約 48 mT となる。図 5.27 に、直径 0.15 mm の小金属を誘導加熱した際のサーモグラフィ画像をそれぞれ示す。図 5.27 の実験結果より、コアギャップ内を通過した全小金属が発熱しサーモグラフィックカメラ上でその位置を確認することが出来る。また、実験結果よりサーモグラフィックカメラで検出した直径 0.15 mm の小金属の温度上昇 ΔT は 2~3 °C であった。

ここで、第 4 章と同様に小金属検出装置における高周波インバータの半導体デバイスに SiC-MOSFET が必要不可欠な理由を説明する。本研究では、実験室における直流電源の定格を考慮し、A4 用紙サイズ幅の高機能フィルムを対象とした小金属検出実験を行った。しかしながら、実際の高機能フィルムは 520 mm 幅と想定されている。図 5.28 に 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした誘導加熱コイルの連結イメージ図および等価回路を示す。図 5.28(a) は 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした誘導加熱コイルの連結イメージ図を示す。図 5.28(b) は 520 mm 幅の高機能フィルムにおける等価回路を示す。図 5.28(a) において、520 mm 幅の高機能フィルムにおいて小金属検出を行う場合、7 連結 EI 型誘導加熱コイルを 2 列用いることになる。図 5.28(b) において $R_{11} \sim R_{115}$ および $L_{11} \sim L_{115}$ は 1 列目の 7 連結 EI 型誘導加熱コイルにおける各巻き線の等価直列抵抗およびインダクタンスを示す。 $R_{21} \sim R_{215}$ および $L_{21} \sim L_{215}$ は 2 列目の 7 連結 EI 型誘導加熱コイルにおける各巻き線の等価直列抵抗およびインダクタンスを示す。そのため、

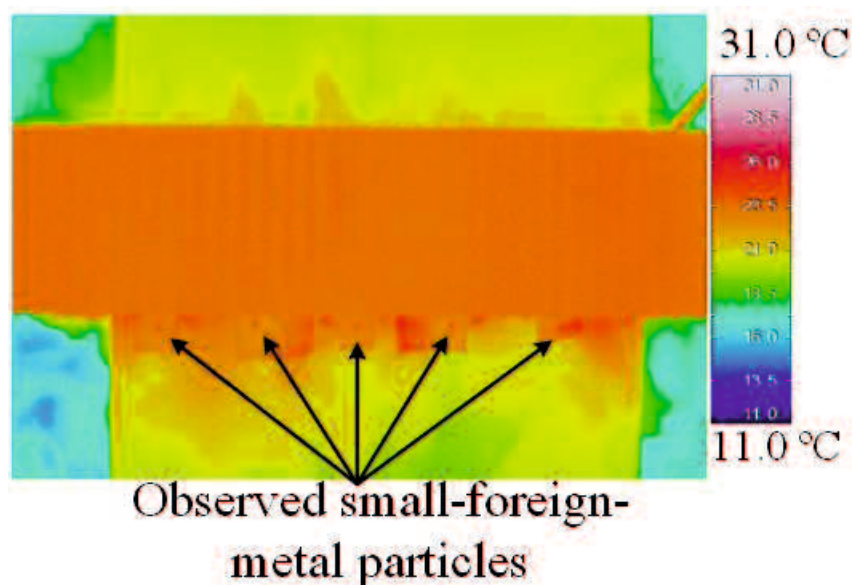


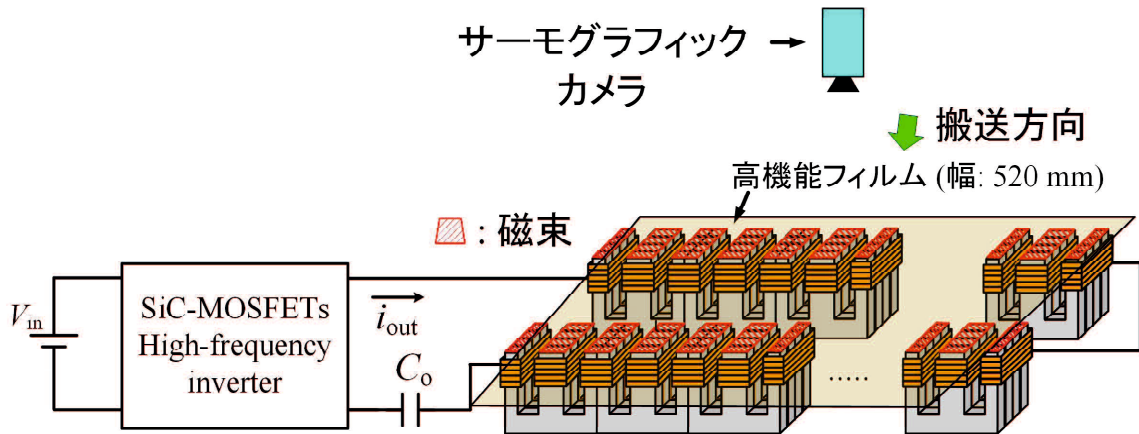
図 5.27 直径 0.15 mm 小金属球の誘導加熱実験結果

図 5.28(b) の等価回路のように 520 mm 幅の高機能フィルムにおいて小金属検出を行う場合、合計 30 巻き線必要となる。表 5.2 にしめす回路定数より、3 連結 EI 型誘導加熱コイルをの等価直列抵抗値は 2.2Ω より、1 巻き線の等価直列抵抗は 0.32Ω となる。7 連結 EI 型誘導加熱コイルを 2 列用いると等価直列抵抗値は 9.6Ω となる。出力電流実効値を 30 Arms とした場合、SiC-MOSFET のドレイン・ソース間に印加される電圧は 407 V となる。さらに、より高い磁束密度を得る場合コアギャップの距離を小さくする必要があるため誘導加熱コイルの鉄損は上昇する。それにより、各巻き線の等価直列抵抗も増加するためドレイン・ソース間に印加される電圧も上昇する。これらより、SiC-MOSFET が必要不可欠であるといえる。

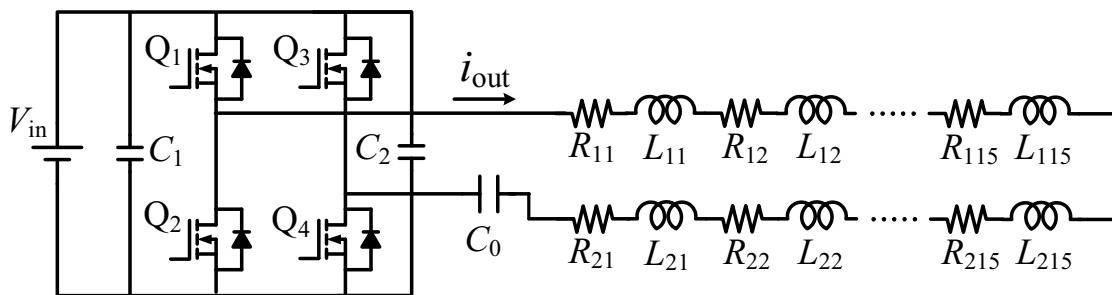
以上をまとめると数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムに磁界を印加可能かつコアの鉄損を低減可能な EI 型誘導加熱コイルのコア形状を提案し、EI 型誘導加熱コイルを用いることでコアの鉄損を 71.8 % 低減可能であることを確認した。また、小金属加熱実験から直径 0.3 mm の小金属の温度上昇は最大で $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ で検出し、有効性を確認した。また、EI 型誘導加熱コイルのコアギャップ距離を 4 mm に変更することで直径 0.15 mm の小金属の温度上昇を $2\sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ で検出可能であることを確認した。

5.4 本章のまとめ

本章では、第 4 章で課題となったフリンジング磁束を用いた E 型誘導加熱コイルの鉄損によるコア割れの問題点から誘導加熱コイルにおけるコアの鉄損を低減可能な EI 型誘導加熱コイルのコア形状を提案した数百ミリメートル幅を有する高機能フィルムに磁界を印加可



(a) 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした EI 型誘導加熱コイルの連結イメージ



(b) 520 mm 幅の高機能フィルムにおける EI 型誘導加熱コイルの等価回路

図 5.28 520 mm 幅の高機能フィルムにおける小金属検出を対象とした EI 型誘導加熱コイルの連結イメージ

能かつコアの鉄損を低減可能な EI 型誘導加熱コイルのコア形状を用いて、第 4 章で提案した E 型誘導加熱コイルと比較してコアの鉄損を 71.8 % 低減可能であることを確認し、磁界解析ソフトを用いて広範囲に小金属加熱が可能であることを確認した。小金属加熱実験から直径 0.3 mm の小金属の温度上昇は最大で 6.6 °C で検出し、有効性を確認した。また、EI 型誘導加熱コイルのコアギャップ距離を 4 mm に変更することで直径 0.15 mm の小金属の温度上昇を 2~3 °C で検出可能であることを確認した。以上より、EI 型誘導加熱コイルを用いることで、より実用的な小金属検出装置を実現可能であることを確認した。

第6章 結論

本論文は、SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた誘導加熱方式小金属検出装置を提案し、その有効性を明らかにした。

第1章では、研究背景として高機能フィルムの市場動向および高機能フィルムの小金属混入よりリチウムイオン電池の発熱・発火事故例について示し、従来の小金属検出法の特徴および課題について説明し小金属検出法の必要性を述べた。

第2章では、国内外において関連する小金属検出法の研究開発動向を示し本研究の位置づけを明らかにした。まず、前述した従来の小金属検出法および国内外における小金属検出法について詳細に説明し、さらに、他の文献で提案されている小金属検出装置の実用性における問題点を明らかにした。次に、混入する小金属が主に鉄や非磁性のステンレスであることに着目し、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出法の有効性を明らかにした。先に提案されている高周波誘導加熱を用いた小金属検出装置は高周波電源と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、高周波電源から高周波電流を誘導加熱コイルに流して高周波交番磁界を発生させ、高機能フィルム上の小金属を高周波誘導加熱によって加熱することで、その温度変化を利用して検出を行う。また、先に提案されている高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用化に向けた課題を述べた。実用化に向けた課題として、製造ラインを流れる数百ミリメートル幅の高機能フィルムに対して高周波交番磁界を広範囲に印加可能な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ことを示した。また、その誘導加熱コイルが要求する高周波の大電力を出力可能な高周波電源も要求される。よって、この検出装置の実用化に向けて誘導加熱コイルのコア形状と高周波電源の両面での実用化が求められている。そこで、ワイドバンドギャップパワーデバイスとして普及している SiC パワーデバイスならびに GaN パワーデバイスの特長や現在の技術動向についても説明し、ワイドバンドギャップパワーデバイスである高周波駆動かつ大電力出力可能な SiC-MOSFET を誘導加熱方式小金属検出装置における高周波電源に使用することにより、前述した高周波電源の実用化を実現可能であることを説明した。

第3章では、小金属の高周波誘導加熱を実現する周波数と磁束密度の関係について実験結果により検討し、直径 0.1 mm 級の小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数条件を明らかにした。そこで、直径 0.1 mm 級の小金属の高周波誘導加熱を実現する最適な周波数を 400 kHz に決定し、2章で説明した高周波駆動かつ大電力出力可能な SiC-MOSFET を

用いた高周波インバータを試作した。試作した 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを小金属検出装置に適用し、先に提案されている誘導加熱コイルを用いて小金属加熱実験を行った。誘導加熱実験から 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波誘導加熱方式小金属検出装置の実用性を確認した。さらに、400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータの電力変換効率および損失分析を行う。SiC-MOSFET 高周波インバータにおける全損失のうち導通損失が支配的であることに着目し、SiC-MOSFET を並列接続することによって、導通損失低減効果および電力変換効率向上を確認した。

第4章では、先に提案されている小金属検出装置の誘導加熱コイルのコア形状では高機能フィルムの製造工程に適用困難であることから、フリンジング磁束を利用して広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な E 型誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案した。磁界解析ソフトを用いて提案した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な誘導加熱コイルのコア形状の有効性を確認する。また、提案した広範囲に誘導加熱領域を拡大可能な E 型誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して小金属検出装置を構築した。試作した E 型誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて小金属加熱実験を行い、提案する高周波誘導加熱方式小金属検出装置が高機能フィルムの製造工程に適用可能であることを明らかにした。

第5章では、第4章で提案した E 型誘導加熱コイルにおいて鉄損による影響から高い磁束密度を得ることが困難であるという問題点から、誘導加熱コイルにおけるコアの鉄損低減に着目し、広範囲に誘導加熱領域を拡大可能かつコアの鉄損を低減可能な EI 型誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案した。また、磁界解析ソフトを用いて広範囲に誘導加熱領域を拡大可能かつコアの鉄損を低減可能な EI 型誘導加熱コイルの有効性を明らかにした。提案した EI 型誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを試作して小金属検出装置を構築した。次に、実際の高機能フィルムの製造工程を模擬するために誘導加熱コイルの冷却装置および高機能フィルム搬送機を試作した。試作した EI 型誘導加熱コイルおよび 400 kHz 駆動 SiC-MOSFET 高周波インバータを用いて小金属加熱実験を行い、提案する高周波誘導加熱方式小金属検出装置が高機能フィルムの製造工程に適用可能であり、より実用的な小金属検出装置であることを明らかにした。

以上より、本論文では SiC-MOSFET 高周波インバータを用いた誘導加熱方式小金属検出装置を提案し、その有効性を明らかにした。そこで、実用的な誘導加熱コイルのコア形状および配置を提案し、実際の高機能フィルムの製造工程に適用可能であると結論づけられる。

最後に、本研究の今後の研究課題を以下に挙げる。

- EI 型誘導加熱コイルの E 型および I 型コアのギャップを再検討し、搬送される高機能フィルム上に付着した直径 0.15 mm の小金属検出を実現可能な磁束密度の検討
- EI 型誘導加熱コイルを 2 列用いた小金属検出装置を構築し、搬送される高機能フィル

ム上に付着した直径 0.15 mm の小金属の検出

- さらなる実用化を目的として EI 型誘導加熱コイルを 2 列用いた小金属検出装置の長時間運転

参考文献

- (1) 富士キメラ総研：「2015年版 機能性高分子フィルム市場 市場動向」，
<http://www.enplanet.com/ja/Market/Data/y141.html>.
- (2) 消費経済審議会製品安全部会：「リチウム蓄電池に係る事故と対応状況について」，
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70618d04j.pdf>.
- (3) NTT ファシリティーズ総研：「小形リチウムイオン電池の最新安全性試験技術と安全性試験サイトの構築」，
<http://www.ntt-fsoken.co.jp/research/pdf/2009/arak.pdf>.
- (4) 独立行政法人製品評価技術基盤機構：「増加するリチウムイオンバッテリー搭載製品事故」，
<http://www.nite.go.jp/date/000087872.pdf>.
- (5) 独立行政法人製品評価技術基盤機構：「5年で2倍以上に！リチウムイオンバッテリー搭載製品の事故」，
<http://www.nite.go.jp/date/000096603.pdf>.
- (6) 独立行政法人製品評価技術基盤機構：「電気用品の製品事故について(リチウムイオンバッテリーの最近の事故例)」，
<http://www.chugoku.meti.go.jp/latestnews/pdf/shoukei/1711282.pdf>.
- (7) タカノ株式会社：「無地フィルム外観検査装置 (CCD)」，
<http://www.takano-kensa.com/html/film/01/ccd.html>.
- (8) アドバンスフードテック株式会社：「金属検出フィルムメタルディテクター」，
<http://www.aftweb.co.jp/film.html>.
- (9) 株式会社システムスクエア：「異物検査機ってなに？」，
<http://www.system-square.co.jp/contents/examination.html>.
- (10) 株式会社日立ハイテクサイエンス：「X線異物解析装置 EA8000」，
<http://www.hitachi-hightech.com/hhs/products/ana/xrf/wdxrf/sp/ea8000/product>.
- (11) オムロン株式会社：「マルチウェーブセンシング」，
<http://www.fa.omron.co.jp/product/special/web-inspection-system/multi-wave-sensing/index.html>.
- (12) 山本直樹，平木英治，田中俊彦，山田幸治，長尾達也，三宅泰弘：「微小金属の高周波誘導加熱手法の検討」，平成25年電気学会全国大会，no. 4, pp. 159160, (2013)
- (13) 三洋電機株式会社：「Lithium ion 技術資料」，
<http://www.orient-technology.com/Sanyo/technote/lion/J.pdf>
- (14) 東芝株式会社：「東芝製ノートパソコンに搭載のバッテリーパック交換について」，
http://www.toshiba.co.jp/about/press/2016_01pr_j2801.htm

- (15) 高橋勘次郎, 深町成一, 渡辺哲哉, 久保田喜郎共著:「高周波の基礎と応用」, 東京電機大学出版局, (1990)
- (16) アイメックス株式会社:「高周波加熱とは」, <http://www.i-mecs.com/technology/>
- (17) 山下勝己:「NE ハンドブックシリーズ パワー半導体」, 日経 BP 社, (2012)
- (18) イカリ消毒株式会社:「食品製造現場における金属異物混入防止の考え方と進め方」, <http://www.ikari.co.jp/topics/professional9.html>
- (19) 河野丈治:「SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)」, エネルギア総合研究所, no. 29, p. 18
- (20) T. Nagaishi, F. Kamitani, H. Ohta, K. Kuwa, H. Fujita, and S. Tanaka, “First practical high Tc SQUID system for the detection of magnetic contaminants in commercial products,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, issue. 2, pp. 800-803, (2005)
- (21) S. Tanaka, T. Ohtani, Y. Narita, Y. Hatsukabe, and S. Suzuki, “Development of metallic contamination detection system using RF high-Tc SQUIDs for food inspection,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, issue. 3, (2014)
- (22) T. Ohtani, Y. Narita, S. Tanaka, S. Ariyoshi, and S. Suzuki, “Development of three channel SQUIDs contaminant detector for food inspection,” *Proc. INTERNAG*, p. 1 (2015)
- (23) S. Tanaka, T. Akai, Y. Kitamura, Y. Hatsukabe, T. Ohtani, and S. Suzuki, “Two-Channel HTS SQUID gradiometer system for detection of metallic contaminants in lithium ion battery,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, issue. 3, pp. 424-427 (2011)
- (24) M. Takemoto, T. Akai, Y. Kitamura, Y. Hatsukabe, and S. Tanaka, “HTS Rf-SQUID microscope for metallic contaminant detection,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, issue. 3, pp. 432-435 (2011)
- (25) K. R. Blay, F. Weiss, D. A. Clark, G. J. J. B. de Groot, M. Bick, and D. Sen, “Signal processing techniques for improved performance of a SQUID-based metal-detector,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, issue. 3, pp. 812-815 (2009)
- (26) H. J. Krause, G. I. Panaitov, N. Wolters, D. Lomparski, W. Zander, Y. Zhang, E. Oberdoerffer, D. Wollersheim, and W. Wilke, “Detection of magnetic contaminations in industrial products using HTS SQUIDs,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, issue. 2, pp. 729-732 (2005)
- (27) M. Bick, P. Sullivan, D. L. Tilbrook, J. Du, B. Thorn, R. Binks, C. Sharman, K. E. Leslie, A. Hinsch, K. Macrae, and C. P. Foley, “A SQUID-based metal detector: comparison to coil and X-ray system,” *Supercond. Sci. Technology*, vol. 12, pp. 346-351 (2005)
- (28) S. Tanaka, Y. Kitamura, Y. Uchida, Y. Hatsukabe, T. Ohtani, and S. Suzuki, “Development of metallic contaminant detection system using eight-channel high-Tc SQUIDs,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, (2013)
- (29) 新型ソフトスイッチング電力変換回路と応用機器技術調査専門委員会:「新型ソフトスイッチング電力変換回路と応用機器の技術動向」, 電気学会技術報告, 第 1072 号
- (30) S. Llorente, F. monterde, J. M. Burdio, and J. Acero, “A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers,” *Proc. of 17th Annual IEEE APEC 2002*, vol. 2, pp. 1168-1174, (2002)

- (31) 富士電機株式会社：「誘導加熱特集」，富士時報，vol. 71, no. 5, pp. 4-5, (1998)
- (32) 藤田英明，赤木泰文：「低温プラズマ発生装置用 2 MHz, 2 kW 電圧形インバータ -三次共振回路を用いたスイッチングの高速化-」，電気学会論文誌 D 分冊，vol. 117, no. 10, pp. 1262-1268, (1997)
- (33) 仁田旦三，中岡睦雄：「パワーエレクトロニクス」，オーム社，(2005)
- (34) 赤木泰文，上面哲官：「パワー MOSFET を用いた電圧形インバータ・直列共振回路方式の 1 kW 450 kHz 誘導加熱装置」，電気学会論文誌 D 分冊，vol. 110, no. 11, pp. 1177-1183, (1990)
- (35) 藤田英明，尾崎一博，内田直喜：「半導体高速処理用ゾーンコントロール誘導加熱装置」，電気学会論文誌 D 分冊，vol. 128, no. 3, pp. 296-302, (2008)
- (36) 宮村大毅，羽根吉寿正，富田英雄，高橋信雄：「鉄板の均一加熱を目的とする小型誘導加熱装置」，平成 26 年電気学会産業応用部門大会，1-69, (2014)
- (37) Rohm 株式会社：「SiC パワーデバイス・モジュールアプリケーションノート」，(2014)
- (38) 山本秀和：「ワイドギャップ半導体パワーデバイス」，コロナ社，(2015)
- (39) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「focus NEDO No.48」，(2013)
- (40) 山本秀和：「パワーデバイス」，コロナ社，(2012)
- (41) 由宇義珍：「はじめてのパワーデバイス」，工業調査会，(2006)
- (42) 渡辺明禎：「トランジスタ回路の実用設計」，日経 BP 社，(2012)
- (43) 釜我昌武，成慶，大橋弘通：「変換器高周波化のための Si-IGBT と SiC-SBD の検討」，電気学会論文誌 D 分冊，vol. 128, no. 5, pp. 569-576, (2008)
- (44) Gourab Majumdar，井上薫，大村一郎，木本恒暢，四戸孝，常信和清，田上知紀，田中慎一，津田邦男，服部亮，牧本俊樹，松永高治，松本聡：「パワーデバイス」，丸善株式会社，(2011)
- (45) 特許庁：「パワー半導体デバイス」，特許出願技術動向調査報告書，(2014)
- (46) IXYS 株式会社：「IXFQ28N60P3, IXFX20N120 Datasheet」，(2012)
- (47) IXYS 株式会社：「IXFK20N120, IXFX20N120 Datasheet」，(2013)
- (48) Rohm 株式会社：「SCT2120AF Datasheet」，(2014)
- (49) Rohm 株式会社：「SCT2160KE Datasheet」，(2013)
- (50) CREE 株式会社：「C2M0160120D Datasheet」，(2014)

- (51) C.P. bidinosti, E.M. chapple, M.E. hayden, “The Sphere in a Uniform RF Field-Revisited,” Department of Physics, Simon Fraser University, Burnaby, B.C., V5A 1S6 Canada, pp. 191-202, (2007)
- (52) 山村 英穂：「トロイダル・コア活用百科」， CQ 出版， (1997)
- (53) TDK 株式会社： 「ノイズ対策用フェライトの基礎」 ，
<http://product.tdk.com/ja/products/emc/guidebook/jemc/basic/06.pdf>.
- (54) S. Kurachi, N. Yamamoto, E. Hiraki, T. Tanaka, H. Yamada, Y. Yamada, T. Nagao, Y. Miyake and Y. Noda, “High-frequency Induction Heating for Tiny Foreign Metals,” *Proc. IEEE ICPE 2015-ECCE-Asia*, pp. 2203-2208, July (2015)
- (55) T. Shijo, S. Kurachi, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka “A 400 kHz SiC-MOSFETs high-frequency inverter for small-foreign-metal particle detection,” *Proc. IEEE SPEC*, S27-423, Dec. (2016)
- (56) 総務省： 「電波利用ホームページ 高周波利用設備の概要」 ，
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/highfre/index.htm>.
- (57) 日本アビオニクス株式会社： 「赤外線サーモグラフィ」 ，
<http://www.avio.co.jp/productd/infrared/>
- (58) Cree 株式会社：「C2M0040120D Datasheet」 ， (2015)
- (59) Infineon 株式会社：「CoolMOS C7 IPW60R040C7 Datasheet」 ， (2015)
- (60) 有賀善之介, 和田圭二：「ラミネートブスバー近傍における電磁誘導ノイズの解析」， 電気学会論文誌 D 分冊， vol. 132, no. 2, pp. 288-294, (2012)
- (61) 滝沢聡毅, ジニーオルゲス：「パワーエレクトロニクス主回路構造の解析技術」， 富士時報， vol. 77, no. 2, pp. 162-165, (2004)
- (62) 小松宏禎, 野口季彦：「高周波 EMI ノイズを低減する超高速スイッチング素子駆動回路の開発」， 電気学会半導体電力変換研究会資料， SPC-07-18, (2007)
- (63) 西垣彰紘, 梅上大勝, 三島大地, 服部文哉, 山本真義：「半導体デバイスの誤点弧メカニズムに関する検討」， 電気学会論文誌 C 分冊， vol. 135, no. 7, pp. 769-775, (2015)
- (64) ICNIRP Guidelines：「For limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields」， health and physics， vol. 99, no. 6, (2010)
- (65) T. Shijo, S. Kurachi, Y. Uchino, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka, “High-frequency induction heating for small-foreign-metal particles using SiC-MOSFETs inverter,” *Proc. IEEE IFECC 2017-ECCE-Asia*, O15, 1532, (2017)
- (66) T. Shijo, S. Kurachi, Y. Uchino, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka, “High-frequency induction heating for small-foreign-metal particle detection using 400 kHz SiC-MOSFETs inverter,” *Proc. IEEE ECCE 2017*, pp. 5133-5138, (2017)
- (67) 山本直樹, 平木英治, 田中俊彦, 山田幸治, 長尾達也, 三宅泰弘, 野田勇二郎：「プラスチック中における微小金属の高周波誘導加熱手法」， 平成 25 年電気学会産業応用部門大会， Y-52, (2013)

- (68) 中沢一, 長屋二郎, 加藤博:「材料力学」, 産業図書, (2003)
- (69) TDK 株式会社: 「Mn-Zn 系フェライト 材質特性」, <http://product.tdk.com/ja/catalog/datasheets/ferrite/mn-zn/material/characteristics/ja.pdf>
- (70) 3M 株式会社: 「3M フロリナート フッ素系不活性液体」, <http://www.mmm.co.jp/emsd/fluorine/products/fluorinert.html>
- (71) T. Shijo, Y. Uchino, Y. Noda, H. Yamada, and T. Tanaka, “Iron loss reduction in the cores of induction heating coils for small-foreign-metal particle detector with a 400 kHz SiC-MOSFETs high-frequency inverter,” *Proc. IEEE IPEC-Niigata 2018-ECCE-Asia*, pp. 324-328, (2018)

発表論文

学術論文

- (1) Takuya Shijo, Yuki Uchino, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko 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

国際会議

- (1) Takuya Shijo, Shinya Kurachi, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko Tanaka “A 400 kHz SiC-MOSFETs high-frequency inverter for small-foreign-metal particle detection,” *Proc. IEEE SPEC*, S27-423, Dec. (2016)
- (2) Takuya Shijo, Shinya Kurachi, Yuki Uchino, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko Tanaka, “High-frequency induction heating for small-foreign-metal particles using SiC-MOSFETs inverter,” *Proc. IEEE IFEEC 2017-ECCE-Asia*, O15, 1532, (2017)
- (3) Takuya Shijo, Shinya Kurachi, Yuki Uchino, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko Tanaka, “High-frequency induction heating for small-foreign-metal particle detection using 400 kHz SiC-MOSFETs inverter,” *Proc. IEEE ECCE 2017*, pp. 5133-5138, (2017)
- (4) Takuya Shijo, Yuki Uchino, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko Tanaka, “Iron loss reduction in the cores of induction heating coils for small-foreign-metal particle detector with a 400 kHz SiC-MOSFETs high-frequency inverter,” *Proc. IEEE IPEC-Niigata 2018-ECCE-Asia*, pp. 324-328, (2018)
- (5) Takuya Shijo, Yuki Uchino, Yujiro Noda, Hiroaki Yamada, and Toshihiko Tanaka, “New IH coils for small-foreign-metal particle detection using 400 kHz SiC-MOSFETs inverter,” *Proc. IEEE ECCE 2018*, pp. 3602-3607, (2018)

口頭発表

- (1) 司城卓也, 倉地真也, 吉竹拓也, 山田洋明, 田中俊彦:「400 kHz SiC-MOSFET インバータを用いた小金属検出法」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 1-78, pp. 267-278 (2016)

謝辞

パワーエレクトロニクス研究室配属以来、全過程を通して適切なお指摘ならびに多くのご助言を頂きました山口大学 大学院創成科学研究科システム・デザイン工学系専攻 田中俊彦教授に心から感謝の意を表すとともに厚く御礼を申し上げます。田中俊彦教授には、毎朝のミーティングにより自身の研究だけでなく様々な知識をつける機会を提供していただき自身の成長に大きく繋げることができ、心から感謝の意を表すとともに厚く御礼を申し上げます。さらに、田中俊彦教授には土日や祝日でも論文投稿や学会発表の際に論文や学会発表資料を添削して頂きました。

パワーエレクトロニクス研究室配属以来、本研究を遂行するにあたり適切なお指摘ならびに多くのご助言を頂きました山口大学 大学院創成科学研究科システム・デザイン工学系専攻 山田洋明准教授に心から感謝の意を表すとともに厚く御礼を申し上げます。山田洋明准教授は本パワーエレクトロニクス研究室の卒業生でもあることから、研究面だけでなく私生活においても数多くの有益なお意見ならびにご助言を頂きました。

本学位論文をまとめるにあたり、ご多忙中にも関わらず数多くのお意見ならびにご指摘を頂きました本学位論文審査員の山口大学 大学院創成科学研究科 久保洋教授、若佐裕治教授、堀田昌志准教授に厚く御礼を申し上げます。さらに、外部審査員として本学位論文を審査していただきました東京工業大学 工学院 電気電子系 藤田英明教授に心から御礼を申し上げます。

毎月の定例ミーティングの際、適切な御指導ならびに御指導を頂きました宇部工業高等専門学校 岡本昌幸教授に心から感謝の意を感謝の意を表すとともに厚く御礼申しあげます。

ご多忙中にも関わらず博士学位論文公聴会にご出席して頂いた東京工業大学 赤木泰文特任教授に心から感謝の意を表すとともに厚く御礼を申し上げます。赤木泰文特任教授には国際会議でお会いした際に数多くのお意見ならびにご指摘を頂き、自身を成長することができました。さらに、本学位論文を完成するにあたり博士学位論文公聴会にて有益なお意見を頂きました。

研究の進め方だけでなく、社会人および技術者としての心構えについてもご教示頂いた博士後期課程の野田勇二郎氏(現、宇部興産株式会社)に心から感謝いたします。本研究の実験装置の作製にあたり、多くのご助言を頂いたことで円滑に研究を進めることができました。

山口大学との包括的連携協力協定のもと、企業の視点から数多くのご助言ならびにご指

導して頂きました宇部興産株式会社 古屋敷啓一郎氏，藤井昌浩氏，山田幸治氏，三宅泰弘氏，真田広朗氏，藤山義祥氏に深く御礼申し上げます。約4年間の毎月の進捗報告会議での議論はとても大きな経験となり，電気電子の分野にとどまらず伝熱学および赤外線工学の分野についても様々なことを知ることができました。

研究活動だけでなく，学会に参加する時など様々な面で適切に優しくご指摘ならびにご助言を頂きました池田風花氏（現，宇部工業高等専門学校助教）に厚く御礼を申し上げます。

山口大学工学部から大学院創成科学研究科博士後期課程まで，研究面だけでなく私生活においても数多くの有益なご意見ならびにご助言を頂きました倉地真也氏（現，三菱電機株式会社），吉竹拓也氏（現，株式会社きんでん）ならびに柴田翔氏（現，株式会社明電舎）に厚く御礼を申し上げます。

博士後期課程と一緒に進学し，研究のみならず様々な面で一緒に苦楽をともにした常盤歩夢氏ならびに西川慧氏に厚く御礼申しあげます。また，日々切磋琢磨しながら研究室生活を共に過ごした同期である，谷本琢真氏，成定佑樹氏，半田湧一氏，堀昂平氏ならびに三谷彰氏に厚く御礼申しあげます。

最後に，長年に渡り著者の学生生活にご理解とご協力を頂き，著者が博士後期課程への進学を決意した際にも多大な応援ならびにご支援をして頂き，最後まで暖かく見守ってくださった父 健治，母 智子，兄 宏太郎ならびに親族一同に心より感謝いたします。また，これまで著者をご支援いただいた全ての方に深く感謝いたします。