



# 高分解能サブサーフェス磁気イメージングシステム に関する研究

美馬, 勇輝

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2017-03-25

(Date of Publication)

2019-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6852号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006852>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏名 美馬 勇輝

専攻 化学

論文題目 高分解能サブサーフェス磁気イメージングシステムに関する研究

指導教員 木村 建次郎

本論文は、高感度磁場計測を基にした、物体内部の磁気発生源の構造を非破壊で可視化するサブサーフェス磁気イメージングシステムを開発し、電子デバイスや蓄電池の電流経路を可視化した結果を纏めたものである。

トンネル磁気抵抗効果を用いた磁気センサの著しい高感度化により、磁気発生源から離れた領域における微弱磁場の計測が可能となったことで、サブサーフェスイメージングとしての新しい可能性が拓けた。本論文では、静磁場の基礎方程式の逆解析理論に基づき、物体外部で得られた磁場の空間分布から、物体内部の磁気発生源の構造を精密に可視化する方法論、実験技術の開発に取り組み、さまざまな荷電粒子デバイスに適用可能な、高分解能サブサーフェス磁気イメージングシステムを完成させ、電子デバイス、蓄電値の電流経路の非破壊可視化に成功した結果を示している。

第1章では、サブサーフェスイメージングとしての磁気イメージングの有用性について議論し、静磁場の基礎方程式の順方向問題の解と“従来の逆方向問題の解析法”を明示しながら、従来の磁場イメージングの課題と本研究における構想について記述している。

第2章では、本研究で開発したサブサーフェス磁気イメージングにおける再構成理論について示しており、冒頭では基軸となる自由空間における静磁場の逆解析理論について示している。自由空間における静磁場の空間的な拡がりに関して、物体内部の磁場の空間分布と、物体外部の磁場の空間分布の関係について示し、実際の計測において問題となる背景磁場の影響と、低減方法について議論している。第二に、上記の議論を基に、本技術の重要な応用の一つである蓄電池内部の電流密度分布可視化の問題に関して、磁場から電流に変換する解析的な再構成理論を示している。第三に、実際の計測では、有限のサイズを有する磁気センサを用いるため、計測によって得られた磁場の空間分布、すなわち“みかけの磁場の空間分布”は、“真の磁場の空間分布”とは異なったものとなるが、“みかけの磁場の空間分布”から“真の磁場の空間分布”を再構成する理論、積分幾何学的再構成理論に関して、高分解能化の効果を議論している。本章で記述した一連の理論に基づく、計算アルゴリズム、可視化ソフトウェアを開発し、第3章にて記述するサブサーフェス磁気イメージングシステムに搭載され、第4章にて示す実験結果が得られる。

第3章では、本研究にて開発したサブサーフェス磁気イメージングのハードウェアおよびソフトウェアについてその詳細を記述している。ハードウェアでは、全8軸独立制御の駆動部、XYZ ステッピングモータ、XYZ ピエゾステージ、傾斜補正用の $\theta_x$ ,  $\theta_y$  ゴニオステージ、磁気センサ部に対する接触を検知する力検出機構を備えたシステムについて、その詳細を示している。さらに、二次元磁場分布を取得するための測定方法や測定面と測定対象表面の角度を規定するための傾斜補正方法などの動作機構について説明している。また、高感度磁気センサの原理やその性能、対象との距離に依存する電流強度の検出能について

美馬勇輝 NO.2

議論している。最後に、前章に述べる再構成理論に基づいた計算処理を行う過程で生じるギブス振動に対して、窓関数やミラーリング処理等の軽減方法とその軽減方法について記述している。

第4章では、サブサーフェス磁気イメージングシステムにて得られた一連の結果について記述している。背景磁場の影響を考慮していない先行研究における再構成理論では可視化し得ない、磁気発生源の空間分布を、本研究にて開発したシステムでは可視化に成功した結果を示している。さらに、より複雑な電流密度分布を有する現実的な荷電粒子デバイスにて、実験を行った結果について示している。さらに、本技術の重要な応用の一つである実際のリチウムイオン蓄電池内部において、その特性劣化の原因となる、電流密度分布の空間的不均一箇所を可視化することに成功した結果について示している。さらに、前述のパッシブ方式のサブサーフェス磁気イメージングシステムに対して、物体に磁場を加えその応答を計測する アクティブ方式のサブサーフェス磁気イメージングと、パッシブ方式のサブサーフェス磁気イメージングを併用することにより、電流密度分布と、導電率分布を同時に可視化した結果について示している。章末には、積分幾何学的再構成理論を用いた磁気発生源の可視化において、高分解能化を達成した結果を示している。

第5章では、本論文を総括するとともに、次世代のサブサーフェスイメージングシステムとしての本研究の磁気イメージングに関する今後の可能性について述べる。

氏名	美馬 勇輝		
論文題目	高分解能サブサーフェス磁気イメージングシステムに関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	木村 建次郎
	副査	教授	内野 隆司
	副査	教授	和田 昭英
	副査	教授	佐藤 宣夫
要 旨			
<p>本論文は、物質内部の電流密度分布を非破壊で映像化するサブサーフェス磁気イメージングシステムを開発し、リチウムイオン蓄電池や半導体デバイスなど荷電粒子デバイス内部の磁場分布や電流密度分布の解析に適用した一連の成果をまとめたものである。本研究により得られた研究成果は、(1)画像再構成のための計算アルゴリズムの開発、(2)計測装置の開発、(3)実デバイスへの応用、に分類され以下の通りである。</p> <p>(1) 本研究にて開発したサブサーフェス磁気イメージングシステムにおける画像再構成プロセスの基礎となる静磁場の基礎方程式の逆解析に関して、実際の計測において問題となる計測対象の磁気発生源以外の、浮遊磁場の影響を考慮した、画像再構成計算アルゴリズムを開発し、信頼性の高い磁気発生源の映像化を実現した。さらに、蓄電池等、薄膜-平行金属平板構造体内の電流を磁気発生源として、構造体外部に生じる磁場の空間分布の計測データから、蓄電池内の2次元電流密度分布を解析的に導く理論に基づく、計算アルゴリズムを開発し、実デバイスに適用可能とした。加えて、実際の計測では、有限のサイズを持つ磁場の検出器の代表寸法で空間分解能が決定するが、本研究では、X線コンピュータトモグラフィの画像再構成理論であるラドン変換と関係する、積分幾何学的な計算方法を用いて、静磁場の基礎方程式を逆解析する計算アルゴリズムを開発し、検出器の代表寸法を遥かに越える最小寸法での空間分解能が達成可能であることを計算機シミュレーションにより示した。</p> <p>(2) 本研究におけるサブサーフェス磁気イメージングシステムでは、計測面から離れた物体内部の磁場分布、電流密度分布を、計測データを基に画像再構成するが、画像再構成により高い空間分解能を達成するためには、計測面における微弱な磁場を精密に計測することが不可欠である。これを実現するために、ピコテスラスケールの検出感度を持つ磁気検出器、ナノメートルスケール以下の位置決め精度を持つ磁気検出器の2次元走査機構、検出器のダイナミックレンジをフルスケールで使用する信号増幅・調整回路を作製し、上記画像再構成プロセスの入力値となる磁場の空間分布を精密に取得する計測システムを開発している。磁気計測においては、室温にて高感度磁気計測が可能なトンネル磁気抵抗効果素子を用いており、測定対象物の深度に応じて、磁気検出面積の異なる、最適な素子を選定している。磁気検出器の走査機構に関しては、走査時の振動を抑制した中心対称性の高いキャタピラ型形状で粗動用XYZステッピングモータステージ、位置決め精度nmスケールの微動用XYZピエゾステージ、磁気センサ検出方向回転のためのθステッピングモータステージ、接触検知用の静電容量型力検出機構、資料側に傾斜補正用のゴニオステッピングモータステージを配置し、磁気検出器の精密な位置決めを実現している。</p> <p>(3) 上記のサブサーフェス磁気イメージングシステムを用いて、様々な荷電粒子デバイス内の電流密度分布の映像化を達成している。光学的な非破壊画像計測法を適用できない、非磁性体金属に覆われたデバイス内部の電流密度分布の映像化が、実用上、注目すべき点である。特に、リチウムイオン蓄電池では、電極反応や拡散抵抗に由来する局所導電率分布に由来する、蓄電池外部の磁場を精密に計測し、</p>			

氏名	美馬 勇輝
<p>そのデータを基に、蓄電池内の電流密度分布を逆解析し、リチウムイオン蓄電池内部の局所導電率異常箇所、すなわち動作不良の原因となる箇所を、逆問題の解法に基づき非破壊映像化したのは世界的にも前例がない。これに加えて、準定常的な電磁場を用いて、物質の導電率分布を映像化する技術開発、磁気検出器の代表寸法を越える空間分解能を実現する画像再構成理論の原理実証に成功した例は、特筆すべきである。</p> <p>以上、本研究は、静的な磁場の逆解析に基づくサブサーフェス磁気イメージングについて、その画像再構成計算および装置技術を研究したものであり、物質内部の電流密度分布を得る方法論について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の美馬勇輝は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。</p>	