

PDF issue: 2025-07-02

アクティブ方式磁気イメージングに関する研究

鈴木, 章吾

<mark>(Degree)</mark> 博士(理学)

(Date of Degree) 2021-09-25

(Date of Publication) 2022-09-01

(Resource Type) doctoral thesis

(Report Number) 甲第8134号

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008134

※ 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 鈴木 章吾

専 攻 化学

論文題目(外国語の場合は、その和訳を併記すること。) アクティブ方式磁気イメージングに関する研究

指導教員 木村 建次郎

氏名: 鈴木 章吾 NO.1

サブサーフェスイメージング¹¹とは、物質内部の測定対象物を可視化する手法である。サ ブサーフェスイメージングは計測方式により、パッシブ方式とアクティブ方式に大別され る。パッシブ方式は、測定対象物自身が発する場や波、粒子を計測する方式であり、アク ティブ方式は、測定対象物に送信機から場や波、粒子を与え、その応答を受信器により計 測する方式である。アクティブ方式は送信機と受信機で構成されることから多次元空間の データが取得可能であり、情報量の点でパッシブ方式と比較して有利である。アクティブ 方式により物体の内部構造を可視化する手法としては、得られた情報をもとに逆解析解を 用いた再構成処理を行う CT (Computerized Tomography)²¹ がよく知られている。

パッシブ方式磁気イメージングシステムには心磁計のような生体磁気計測や磁性探針と 試料磁界との磁気的作用によるカンチレバー振動の位相変化により磁気力勾配の分布を測 定する磁気力顕微鏡^{3) 4)}が知られている。アクティブ方式磁気イメージングシステムとして は荷電粒子デバイスの電流密度分布可視化や渦電流探傷計^{5) 6)}がよく知られた技術である。 しかし、このような磁気イメージングの問題点として、マクスウェル方程式からもわかる ように自発磁化を持つ磁性体や電流のような磁気発生源が存在する場合に磁場は空間的に 広がるため、構造的な情報の取得が難しいことや CT のように 3 次元的な内部情報の映像化 が不可能であることがあげられる。

そこで本研究では、マクスウェル方程式において磁場の時間変動が無視できる場合と磁 場の時間変動を考慮した場合における磁場の逆解析理論の開発を行い、その再構成理論を 用いたアクティブ方式磁気イメージングシステムの開発を行うことにより構造的な情報の 取得や3次元的な内部情報の映像化が可能なシステムの開発を行った。マクスウェル方程 式において磁場の時間変動が無視できる場合においては、磁場はラプラス方程式を満たす。 このラプラス方程式の解析解を用いた再構成理論(静磁場の逆解析理論)を搭載した透磁 率イメージングシステムの原理検証を行う。透磁率イメージングシステムでは送信機とし てコイルにより静的な、または低周波の磁場を与え、その応答を磁気センサにより計測し、 得られる磁場のデータを境界条件として用いた逆解析理論により、磁気発生源近傍の磁場 分布を映像化し、強磁性体の測定対象物の構造を映像化することを目的とする。一方、マ クスウェル方程式において磁場の時間変動を考慮する場合においては、磁場は拡散方程式 を満たす。再構成理論モデルとして周期的多層構造モデルを考える。モデル内の磁場の拡 散方程式を導出し、その拡散方程式を解くことで、物体内部の3次元的な磁場分布の映像 化を行うことを目的とする。この拡散方程式の解析解を用いた再構成理論(準定常磁場の逆 解析理論)を搭載したパルス-サブサーフェス磁気イメージングシステムでは、送信機とし てパルス電流を測定対象物に印加し、その応答を磁気センサにより計測し、得られる磁場 の周波数依存複素データを境界条件として用いた画像再構成により、蓄電池、コンデンサ 等層状構造を有する荷電粒子デバイス内部の3次元的な磁場分布の映像化可能な計測シス テムの開発を行い、実際の不良荷電粒子デバイスにおける各層毎の磁場分布の断層映像化

氏名:鈴木 章吾 NO.2

を行う。

図1のような24 チャンネルマルチ MI センサ基板を4 個使用し1 次元に1 cm ピッチに96 チャンネル並べた MI センサモジュールと誘起コイルが対になった透磁率イメージングシス テムの開発を行った。図1のように誘起コイルと磁気センサが対になった構造となる。透磁 率イメージングシステムは MI センサモジュール、誘起コイル、制御 PC、AD コンバータ、 信号発生器で構成されている。制御 PC により測定装置の動作部分を制御しており、誘起コ

イルに信号発生器により交流 電流を流し、そこから発生す る磁場を磁気センサにより計 測し、その信号を AD コンバ ータにより AD 変換後制御 PC に取り込む。その後誘起コイ ルに印加する電流に同期した 参照信号を用いて位相検波し、 磁気センサにより得られた交 流信号の振幅の大きさを得ら れる磁気信号としている。誘 起コイルから z 方向に均一な 交番磁場を与え、その磁場を 磁気センサにより検出する。 また、のように磁気センサ側 にも小型コイルを取り付け、 対の外部コイルの磁場を打ち 消すような構造となっている。 誘起コイルと磁気センサの間 に高透磁率の試料が存在する 場合、そこで磁場が変化し、 その変化を検出することで透 磁率分布に相当する磁場分布 の映像化が可能となる。誘起 コイルには 200 Hz、600 mAp-p の電流を印加し、キャンセル コイルには 200 Hz、200 mApp の逆位相の電流を印加し測定 を行った。図2(a)

構造.



図1: MI センサモジュール透磁率イメージングシステムの



図2:(a) 刃物の光学写真,(b) 測定により得られる磁場分 布像,(c) 再構成処理後の磁場分布像. 氏名: 鈴木 章吾 NO.3

に測定対象物の刃物の光学写真を示す。測定面と測定対象物間の距離は 10 cm で測定を行っ た。図 2 (b) に測定により得られた磁場分布を示す。この磁場分布像に再構成理論を適用し た結果を図 2 (c) に示す。再構成条件として測定面から 10 cm 離れた位置の磁場分布を再構 成している。この結果から、再構成処理を行うことにより刃物の形状に特徴的な磁場分布 が映像化されていることが示された。

次に周期的層状荷電粒子デバイス内部の再構成理論の境界条件となる荷電粒子デバイス 表面における磁場の周波数依存複素データを高速に測定する測定手法の開発を行った。"周 波数領域で特定の周波数帯"を抽出し逆フーリエ変換することで構築した時間領域におけ るパルス状電流"を荷電粒子デバイスに印加し、そこから漏洩する磁場を磁気センサにより 測定する。磁気センサの信号はAD変換後汎用計算機へ信号が取り込まれる。このとき、パ ルス電流の同期信号により信号の取り込むタイミングを制御している。xv のステッピング モーターを制御 PC で制御し磁気センサを xv 平面で走査することにより、走査エリアの磁 場分布が得られる。この測定により、時間領域の磁場分布が得られる。そのデータをフー リエ変換することにより磁場の周波数依存複素データを得ることができる。荷雷粒子デバ イスとして図3(a)のような導体(銅箔)と絶縁体が交互に周期的に30層積層された周期的 層状荷電粒子デバイス模擬試料を作製した。図3(b)に示すように導体の厚みは58 um であ り、絶縁体の厚みは 62 µm である。平均導電率は 30.7×10⁶ Sm⁻¹ である。短絡は絶縁体層に 欠損を作製し、絶縁体層欠損箇所に導電性接着剤を用いて導体層同士を接着させることに より作製した。短絡抵抗はおおよそ0Ωとなる。30層周期的層状荷電粒子デバイス模擬試 料の磁場周波数複素データを測定し、準定常磁場の逆解析理論を適用し3次元磁場分布の 断層画像の映像化を行った。まず、図4(a) に示すように 18-19 層目に短絡を作製した。短 絡は荷電粒子デバイス表面から = 2.04~2.28 mm に存在する。30 層周期的層状荷電粒子デ バイス模擬試料には1Amの印加した。測定周波数は0.1~100 kHzの範囲で100 Hz 間隔で測 定した。測定範囲は 90 mm × 90 mm、画素数は 16 pixel × 16 pixel、積算時間は 2 s/point、磁 気センサの検出成分はz方向、使用した磁気センサは MI センサである。図4(b) に計測に より得られる磁場周波数複素データのうち 100 Hz、50 kHz、100 kHz を示す。この図から印 加電流の周波数が大きくなるほど短絡由来の磁場が減衰していることが分かる。図4(c) に 図4(b)の計測結果から準定常磁場の逆解析理論を適用し得られた3次元磁場分布の断層画 像 (xv 平面) を示す。また、図4(d) に図4(c) のz=2.28 mm の断層画像の青丸で示した箇 所の磁場の深さ依存性を示す。この結果から、短絡点が存在する箇所に磁場強度のピーク が見られており、準定常磁場の逆解析理論を用いた 3 次元磁場分布の映像化が可能である ことが示された。図4(c)のz=2.28 mmの断層画像にて短絡点が2か所観測されているよう に見られるのは 5 mm×5 mm で作製した短絡点のうち観測されている 2 か所の接触抵抗が 小さいことが考えられる。深さ方向の分解能の評価として半値幅を考える。図4(d) におけ る半値幅は 1.48 mm となる。また、短絡を作製した z=2.28 mm 付近のピーク以外の z=0.25

(別紙1)

論文審査の結果の要旨

氏名	鈴木 章吾					
論文 題目	アクティブ方式磁気イメージングに関する研究					
審查委員	区分	職名		氏	名	
	主査	教授	木村 建次郎			
	副查	教授	林昌彦			- 11-
	副查	准教授	笠原 俊二			100
	副査					
	副查				·····	印
	<u>. </u>		要旨			

本論文は、物体の内部構造を3次元的に可視化することを目的として、準定常磁場、静磁 場を用いたアクティブ方式磁気イメージング法一磁場を加えることによる物体からの磁気応 答を用いた物体の可視化方法一において、新しい逆問題の解析方法を提案し、計算アルゴリ ズム開発、機器開発、基礎実験を行った、一連の成果を纏めたものである。

蓄電池における局所的な内部導電率異常の問題に着目し、蓄電池は通常、高導電率の正極、 低導電率の電解液、高導電率の負極の3層を積層状に貼り合わせた構造をセルとし、このセ ルを多重に重ね合わせた積層構造を有する。本研究では、この周期的に導電率が変化する蓄 電池に、時間変動のある電流を加えた際に蓄電池内に発生する磁場に関して、周期性を組み 込み、拡散型の磁場のマクロ化方程式を導出し、これを基にした時間逆行の方程式を逆問題 解析の基礎方程式として解析的に解き、導電率異常箇所近傍の磁場分布を可視化する方法を 提案した。蓄電池に関する磁場の逆問題を解き、可視化する方法では、多層構造を有する蓄 電池内の各セルにおいて、正極から負極への時間変動のある電流が存在した場合に発生する 周辺磁界の変化により、周辺セルにおいて誘導磁場が発生、すなわち蓄電池外への漏洩が遮 蔵されるが、その"遮蔽厚み"が時間変動の振動数に依存することを物理学的根拠としてい る。例えば蓄電池深部で発生した時間変動磁場に関しては、遮蔽効果により低い振動数のみ が蓄電池外に漏洩し、蓄電池表面にて発生した時間変動磁場に関しては、低い振動数に加え、 高い振動数の磁場の双方が蓄電池外に漏洩する。本研究では、上記理論を基にした計算ソフ トウェア、計測機器、様々な振動数の電流を加え、蓄電池外に漏洩した微弱な磁場、具体的 にはナノテスラからピコテスラスケールの磁場を検出する計測機器を自ら製作し、実際の蓄 電池に適用し、理論の実証、手法の有効性を示している。

さらに、本論文では空間内の透磁率分布を可視化するための方法について示されている。 透磁率分布を可視化する研究の意義として、幹となる可視化原理として逆問題の解析解を前 提としつつ、半導体素子製造や蓄電池製造で問題となる磁性金属微粒子の混入や、鉄筋コン クリート建造物内における鉄筋腐食等の社会問題を取り上げている。ナノテスラスケール以 下の微弱な磁場計測では、我々が生活する空間のあらゆる箇所から環境磁気ノイズが混入す ることが重要な問題となる。本論文では、環境磁気ノイズの中で、磁性材料から発生する磁 場を高感度に検出し、逆問題を解析的に解き、可視化する方法と機器開発の内容が示されて おり、基礎研究、応用研究の双方において重要な成果であると考える。

以上、本研究は、準定常磁場を用いた物体内部の構造を可視化する方法論を研究したもので あり、本論文は、逆問題解析、これに基づいた機器開発、実証結果について重要な知見を纏 めたものであると判断する。よって、学位申請者の鈴木章吾は、博士(理学)の学位を得る資 格があると認める。





図3:(a)30層周期的層状荷電粒子デバイス模擬試料の構造,(b)荷電粒子デバイス内の短絡の作製方法.



図4:(a) 18-19 層目に短絡が存在する 30 層周期的層状荷電粒子デバイス模擬試料の構造。 (b) 計測により得られる磁場の周波数依存複素データ、(c) 準定常磁場の逆解析理論を適用 して得られた 3 次元磁場分布の断層画像 (xy 平面)、(d) 短絡点の磁場の深さ依存性。 [参考文献]

- 1) B.Saleh: Introduction to Subsurface Imaging (Cambridge University Press, 2011).
- 2) A.M.Cormack: Nobel Lecture. (1979)551.
- L.Gan, S.H.Chung, K.H.Aschenbach, M.Dreyer and R.D.Gomez: IEEE Transactions on Magnetics. 36 [5](2000)3047.
- T.Yamaoka, H.Tsujikawa, S.Hasumura, K.Andou, M.Shigen, A.Ito and H.Kawamura: Microscopy Today. 22 [6](2014)12.
- 5) V. Gerginov, F.C.S. da Silva and D. Howe: Rev Sci Instrum. 88 [12](2017)125005.
- 6) C. Deans, L. Marmugi and F. Renzoni: Rev Sci Instrum. 89 [8](2018)083111.