



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

(Degree)

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)

氏名：鈴木 章吾 NO.1

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

サブサーフェスイメージング¹⁾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)²⁾ 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氣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

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1cm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 mA_{pp}の電流を印加し、キャンセルコイルには200 Hz、200 mA_{pp}の逆位相の電流を印加し測定を行った。図2(a)

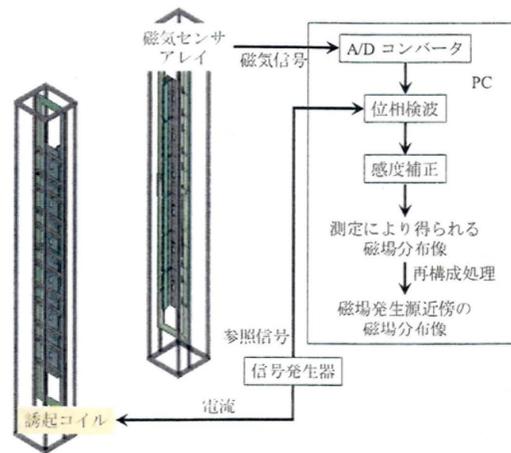


図1：MIセンサモジュール透磁率イメージングシステムの構造。

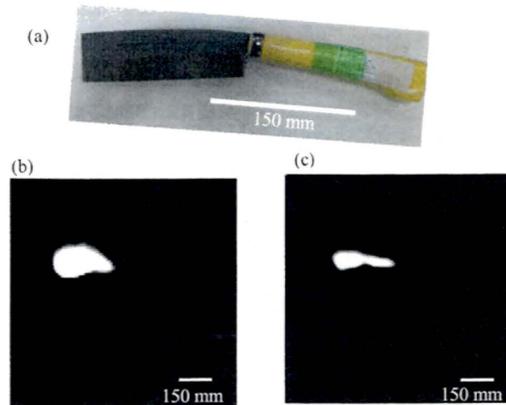


図2：(a) 刃物の光学写真、(b) 測定により得られる磁場分布像、(c) 再構成処理後の磁場分布像。

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。xy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xy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。荷電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 μmであり、絶縁体の厚みは62 μmである。平均導電率は $30.7 \times 10^6 \text{ Sm}^{-1}$ 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0 Ω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 $z=2.04 \sim 2.28 \text{ mm}$ 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1 A_{pp}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(xy平面)を示す。また、図4(d)に図4(c)の $z=2.28 \text{ mm}$ 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 $z=2.28 \text{ mm}$ の断層画像にて短絡点が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幅幅を考える。図4(d)における半幅幅は1.48 mmとなる。また、短絡を作製した $z=2.28 \text{ mm}$ 付近のピーク以外の $z=0.25$

氏名：鈴木 章吾 NO.4

mm や $z = 4.50$ mm のピークは測定した周波数の高周波領域の欠如が原因であると考えられる。

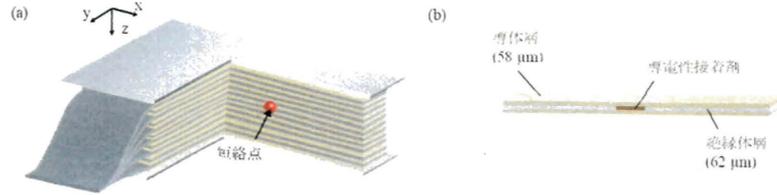


図3：(a) 30層周期的層状荷電粒子デバイス模擬試料の構造、(b) 荷電粒子デバイス内の短絡の作製方法。

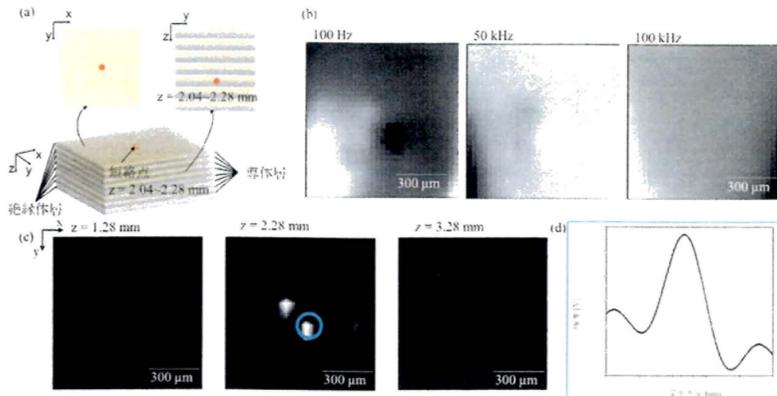


図4：(a) 18-19層目に短絡が存在する30層周期的層状荷電粒子デバイス模擬試料の構造、(b) 計測により得られる磁場の周波数依存複素データ、(c) 準定常磁場の逆解析理論を適用して得られた3次元磁場分布の断層画像(xy平面)、(d) 短絡点の磁場の深さ依存性。

【参考文献】

- 1) B.Saleh: *Introduction to Subsurface Imaging* (Cambridge University Press, 2011).
- 2) A.M.Cormack: Nobel Lecture. (1979)551.
- 3) L.Gan, S.H.Chung, K.H.Aschenbach, M.Dreyer and R.D.Gomez: *IEEE Transactions on Magnetics*. 36 [5](2000)3047.
- 4) 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.

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		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	木村 建次郎
	副査	教授	林 昌彦
	副査	准教授	笠原 俊二
	副査		
			印

要旨

本論文は、物体の内部構造を3次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—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—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蔽されるが、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られる。

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。