

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870428

研究課題名(和文) 高分解能磁気イメージング法の開発と界面科学への応用

研究課題名(英文) Development of high-resolution magnetic field imaging system and application to interface science

研究代表者

木村 建次郎(Kimura, Kenjiro)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10437246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、測定面から離れた領域の電流分布を高分解能で可視化可能なサブサーフェス磁気イメージングシステムの試験装置を開発した。本装置のハードウェアは、磁気センサとしてトンネル磁気抵抗効果素子、ナノスケールの位置決め精度を有するセンサ走査機構を備える。また、磁気センサの最小寸法で決まる空間分解能を実現する積分幾何学的電磁場再構成理論に基づく映像化ソフトウェアにより、測定データから高分解能画像が1秒以内で生成される。この試験装置を、金属接合界面、LEDチップ、蓄電池等に適用し、電流密度分布を映像化することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a high-resolution subsurface magnetic field imaging system capable of visualizing electric current distribution in a distance from the measurement area. This system equips a tunneling magnetoresistance device as a magnetic field sensor and a scanning device with nanometer-scale precision. Additionally, This system have a imaging software based on integral geometry electromagnetic field reconstruction theory capable of achieving a spatial resolution equal to minimum size of a magnetic field sensor for a higher-spatial resolution image. We have succeeded in imaging electric current distributions at metal-metal junction interface, LED chips, rechargeable batteries and so on using this system.

研究分野：計測

キーワード：計測 物理化学 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

磁気イメージングは、ナノテクノロジーから、医療分野まで、様々な応用分野を持つ。その中でも特に、固体磁気センサを用いた顕微鏡装置は、半導体微細加工技術の進展と共に、その空間分解能の向上が著しい。すなわち、このタイプの磁気イメージング法の空間分解能の向上には、微細な固体磁気センサを作製することが重要となる。例えば、走査型磁気力顕微鏡(Magnetic Force Microscopy : MFM)では、シリコン製の探針に、強磁性体材料を被覆し、磁化することにより磁場を磁気力として測定するが、空間分解能の向上のためには、探針先端をより鋭利にし、強磁性体材料をより薄く被覆させることが重要となる。このMFMは、空間分解能は高く、数nmに達するが、探針に加わる静電気力やVan der Waals力との区別が難しく、定量的な磁場の測定は難しい。定量的な、磁場分布が測定可能な磁気イメージング法として、走査型磁気抵抗効果顕微鏡(Magneto-Resistance Microscopy: MRM)と、走査型超伝導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device: SQUID)顕微鏡(SSM)がある。MRMは、磁気抵抗効果素子を2次元走査することによって、磁場分布を取得する。SSMは、ピックアップコイルとSQUID素子で構成された磁気センサを2次元走査することによって、磁場分布を測定することができる。MRM、SSM共に、空間分解能はセンサの磁気感受部のサイズに制限され、典型的にはMRMは数ミクロン、SSMは数十ミクロンである。磁気センサの微細化に伴い、空間分解能は向上するが、信号強度は逆に低下し、微弱な磁場の変化を捉えるのが困難となる。信号処理回路に送られる信号強度が、センサの磁気感受部の体積に比例するからである。即ち、磁場感度の観点からは、磁気感受部の体積は大きい方が望ましく、空間分解能の観点からは、

磁気センサの磁気感受部の体積は小さくあるべきである。本研究では、高い磁場感度と空間分解能を両立する画像再構成を備えた磁気イメージング法を開発し、様々な電子デバイスに適用することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、磁気センサのサイズ以下の空間分解能を達成することが可能な積分幾何学的再構成理論と"物質内部の磁場分布を断層的に映像化する"電磁場再構成の理論"[木村 建次郎ら, エレクトロニクス実装技術 28, 16 (2012).]と組み合わせ、"積分幾何学的電磁場再構成"理論を備えた磁気イメージングシステムを開発し、測定面から離れた領域の電流密度分布を薄膜磁気センサの膜厚に相当する空間分解能 10 nm 以下で映像化することを目的とする。有限センササイズ効果を解消し、高分解能化を実現する積分幾何学的再構成理論では、磁気センサの磁気感受部にて積算された磁場に由来する信号から、各座標の本来の磁場を逆解析することによって算出する。それと同時に、マクスウェル方程式を解くことによって、物質内部の3次元磁場分布を再構成することができる。

3. 研究の方法

有限サイズの磁気センサを、測定対象上にて2次元走査し、2次元データマトリックスを取得する。このデータマトリックスに画像再構成処理を加えることにより、有限のセンササイズよりも微細な構造の映像化が可能になる。その際、同時にマクスウェルの方程式を解くことにより、物質内部の磁気発生源近傍の、磁場分布の映像化も同時に可能となる。この手法を装置化し、電池や半導体デバイス内部の物質界面での電荷移動の分析に応用することにより、デバイスの界面電荷伝導機構の理解に向けた基礎データを獲得することができるようになる。

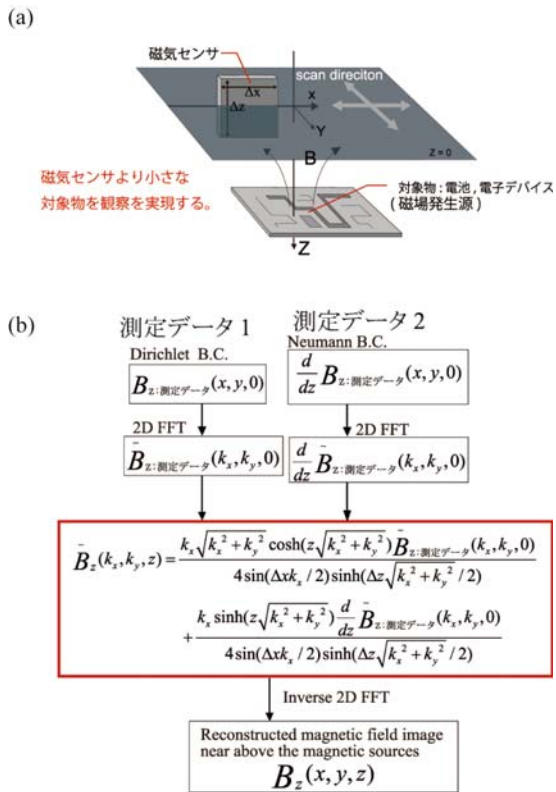


図1: 積分幾何学的再構成理論の概要. (a) 再構成の目的, (b) 計算処理プロセス.

平成 25 年度は、図 1 に示した"積分幾何学的再構成理論"のソフトウェア開発を行った。本理論では、試料上方にて、磁気センサを 2 次元走査し、2 次元磁場分布データマトリックス(測定データ 1)を最初に取得する。次に、磁気センサと試料との距離を変え、再び、磁気センサを 2 次元走査し、2 次元磁場分布データマトリックスを取得する。この 2 つの 2 次元磁場分布データマトリックスから、図 1 に記した静磁場の基礎方程式の Dirichlet 境界条件(測定データ 1), Neumann 境界条件 (測定データ 2)を作製し、測定データ 1, 2 を図 1 の赤枠の式に代入することにより、真の 3 次元磁場分布が得られる。図 1 の式は、センサの幅(図 1 の $\Delta x, \Delta z$)にて積分された空間分解能悪化の効果を解消する項が分母に含まれ、磁気センサが無限小であった場合の真の 3 次元磁場分布が得られることを意味している[木村 建次郎, 特願: 2011-104143, PCT/JP2012/002951, 分布解析装置]。薄膜磁気センサの膜厚は実際には有限のため、空間分

解能は、膜厚 1 nm から 10 nm に定まる。平成 25 年度前半は、ソフト開発に加え、上記理論を用いた磁気イメージングシミュレーションを実施し、装置開発に不可欠となる、再構成に最適なデータ取得時間やデータ取得ピクセル数等、測定条件を抽出した。

平成 25 年度前半のシミュレーション結果をもとにハードウェアの開発を開始した。ハードウェアの開発では、高精度圧電スキャナーを粗動ステージ上に配置し、センサに対して試料が任意の方向に走査可能となる構成にする。装置開発終了段階にて、10 nm 以下の空間分解能を達成可能な装置仕様とする。

平成 26 年度後半は、様々な物質界面の電荷移動の解析に応用する。半導体デバイス内部接合界、電池の電極/電解液界面等である。これらの界面分析に本手法を応用することで、電子デバイスの動作メカニズムが明らかとなる

4. 研究成果

本研究では、測定面から離れた領域の電流分布を高分解能で可視化可能なサブサーフェス磁気イメージングシステムの試験装置を開発した。開発した装置を図 2 に示す。本装置は、最大 30mm × 30mm の領域における磁場分布画像を測定可能で、位置決め精度は 1nm 以下である。図 2 に開発した制御ソフトウェアを示す。ステッピングモータによるセンチスケールの測定により、電子部品全体に流れる電流密度の大まかな分布を把握し、注目すべき部分をピエゾステージによりナノスケールの電流密度分布を得る。配線構造と電流密度分布画像の位置合わせには、磁気センサプローブに巻いたコイルにより測定対象に交流磁場を印加し、金属配線に誘起された渦電流により発生した磁場を磁気センサを用いて検出することにより、金属部分の映像化を行う。これにより、X 線による電子部品内部の配線を映像化することなく、電流分

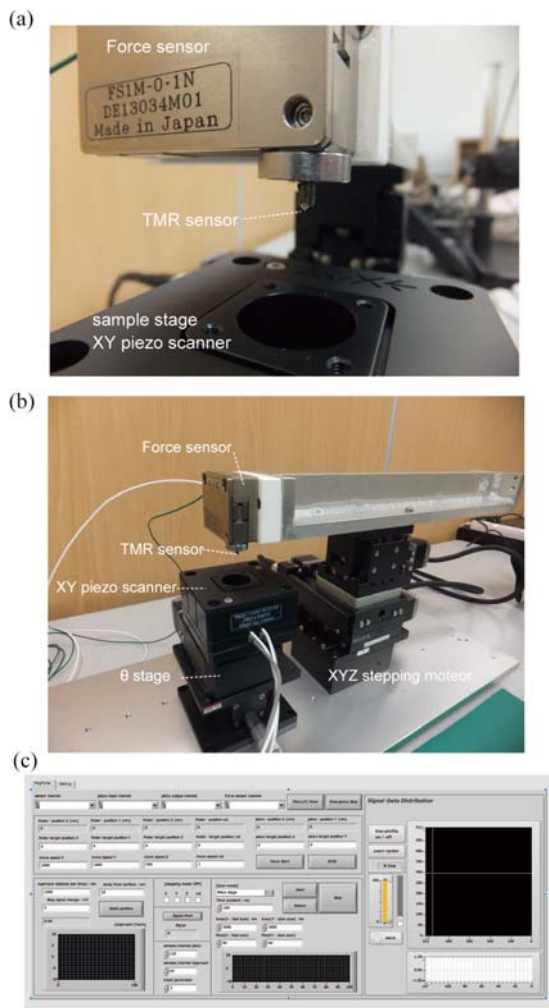


図2: 磁気イメージングシステムのハードウェア。(a) 磁気センサ(TMR)および試料台., (b) XYZ θ 駆動システム. ナノスケールの位置決めは試料台下のピエゾステージにて行う., (c) 開発した制御ソフトウェア.

布と測定対象内の導電率分布を映像化することが可能となる。

図3に開発した積分幾何学的再構成ソフトウェアの GUI 画面および再構成デモデータを示す。図3(c)は、代表寸法 $600\text{ nm} \times 1600\text{ nm}$ 、最小寸法の 20 nm の薄膜磁気センサで取得したデータを数値計算によって得たものである。 20 nm は、薄膜磁気センサの膜厚に相当する。これら一連のデータを用いて再構成した結果を図3(c)右下に示す。磁気発生源が明瞭に映像化されていることが分かる。

この映像化システムを本研究では、青色LEDチップ内配線、金属接合界面、蓄電池等に適用した。図4に青色LEDチップの適用した結果を示す。デバイスに電流を印加した

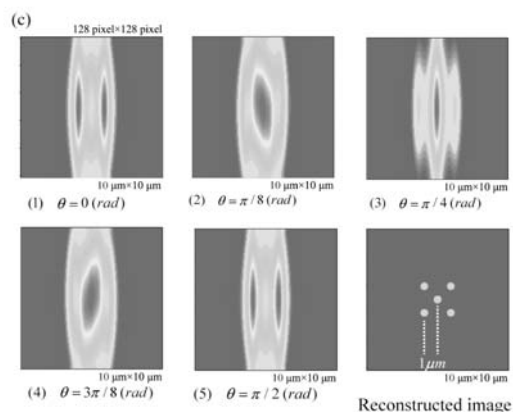
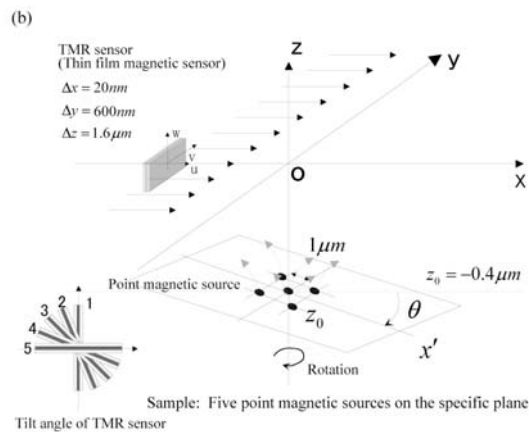
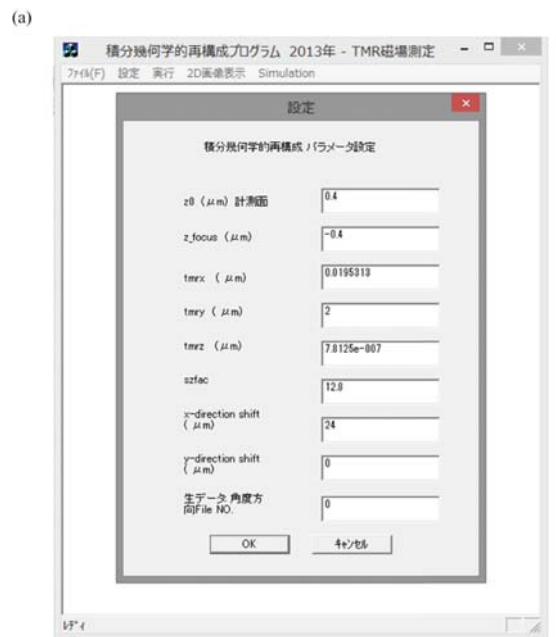


図3: 積分幾何学における計算手法を用いて静磁場の基礎方程式を解き、薄膜磁気センサの最小寸法、すなわちナノスケールの膜厚で決まる空間分解能を計算機実験により実現した結果 (a) 開発したソフトウェアの GUI., (b) 薄膜磁気センサが5つの磁気発生源が配置された平面上空を回転しながら2次元走査される様子. (c) Fig. 6(a)左下に示すセンサの試料表面に対する角度毎の測定データとそれらを用いて再構成した右下の高分解能画像.

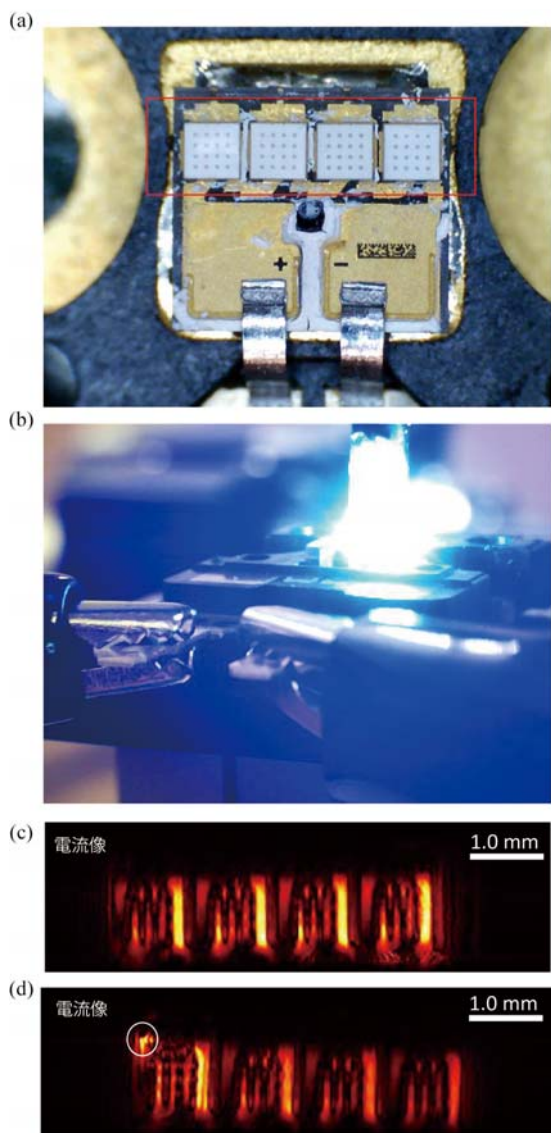


図 4: 車載ヘッドランプ用青色 LED モジュールにおけるチップ内電流異常の検出., (a) 測定した青色 LED チップ., 測定領域は赤枠., (b) 測定中の写真.電流を印加し、発光させた状態にて磁気センサにてチップ内電流を測定する., (c) 正常品のチップ内電流分布画像., (d) 異常品のチップ内電流画像. 白丸枠内に異常な電流集中が見られる。

状態にて、磁気センサをチップ上部にて 2 次元走査し、チップ内電流画像を再構成する。図 4 に正常な青色 LED チップとリーク電流の大きい故障した青色 LED を測定した結果を示す。故障した青色 LED チップの一部に大きな電流集中が見られることが分かる。

以上、本報告書では、開発した磁気イメージングシステムの試験機の概要および青色 LED チップに適用した結果を紹介した。蓄電池応用に関しては、現在、東芝等様々なメーカーと共同研究を進め、その有用性が確認

されている。蓄電池応用に関する、一連の成果は、2014 年度 3 月電気化学会講演会にて発表した。今後、装置メーカーと共同で、本システムの実用化を進め、早期に半導体メーカー、蓄電池メーカー等多くの企業、大学の実用化研究、基礎研究にて活用されるように、普及活動を進める計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① 木村 建次郎、野本 和誠、小畑 恵子、鈴木 智子、美馬 勇輝、大藪範昭、稲男健、木村憲明 “物質界面の構造を映像化するサブサーフェスイメージング法の開発 -”第 44 回国際電子回路産業展アカデミックプラザ ,AP-17(2014). (アカデミックプラザ賞)

② 木村建次郎、美馬勇輝、大藪範昭、稲男健、木村憲明

“高感度磁気抵抗効果素子による磁場の計測と電磁場再構成法を用いた高分解能コンクリート内部鉄筋検査技術に関する研究”, 非破壊検査 Vol.62 (2013) No.10 Oct.527-528. (Invited)

[学会発表] (計 11 件)

① 木村建次郎, “Nondestructive electric current density imaging inside rechargeable battery cell“ 17th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy, 2014 年 8 月 4 日-8 日、千葉県つくば国際会議場 (依頼講演) .

② 木村建次郎, “物質界面の構造を映像化するサブサーフェスイメージング法の開発” JPCA-show 2014 (第 44 回国際電子回路産業展), 2014 年 6 月 4 日-6 日、東京ビッグサイト(アカデミックプラザ賞).

[図書] (計 1 件)

木村建次郎, 美馬勇輝, 木村憲明, 弓井孝佳, 森康成, 星島一輝, 中田成幸, 土井恭二, "非破壊モニタリングのための 3 次元データ解析技術および装置技術", 巨大構造物ヘルスマニタリング, NTS (2015).

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称: 電池検査装置および電池検査方法
発明者: 木村建次郎, 美馬勇輝
権利者: 神戸大学
種類: 特願

番号：2014-049798
出願年月日：平成 26 年 3 月 13 日
国内外の別：国内

名称：導電率分布導出方法および導電率分布導出装置

発明者：木村建次郎, 木村憲明
権利者：神戸大学, 木村憲明
種類：特願
番号：2014-049513
出願年月日：平成 26 年 3 月 12 日
国内外の別：国内

○取得状況（計 4 件）

名称：ポテンシャル取得装置、磁場顕微鏡、検査装置およびポテンシャル取得方法

発明者：木村建次郎
権利者：神戸大学
種類：登録
番号：5713246
出願年月日：H23.3.1
取得年月日：H27.3.20
国内外の別：国内

名称：ポテンシャル取得装置、磁場顕微鏡、検査装置およびポテンシャル取得方法

発明者：木村建次郎
権利者：神戸大学
種類：登録
番号：10-1346523
出願年月日：H23.3.1
取得年月日：H25.12.23
国内外の別：韓国

名称：磁場分布取得装置

発明者：木村建次郎
権利者：神戸大学
種類：登録
番号：5626678
出願年月日：H22.11.24
取得年月日：H26.10.10
国内外の別：国内

名称：分布解析装置

発明者：木村建次郎
権利者：神戸大学
種類：登録
番号：I 463161
出願年月日：H24.5.3
取得年月日：H26.12.1
国内外の別：台湾

〔その他〕

○受賞
平成 26 年 2 月 25 日
“高分解能サブサーフェスイメージング法の開発”
第一回 中辻賞

平成 26 年 6 月 4 日
“物質界面の構造を映像化するサブサーフェスイメージング法の開発”
2014 JPCA アカデミックプラザ賞

○メディア発表
2014 年 4 月 22 日 日刊工業
“高分解能で非破壊検査画像”
当研究室から技術移転がなされた Integral Geometry Instruments 社が紹介されました。
http://j-net21.smrj.go.jp/watch/news_tyus/entry/20140424-02.html
(技術移転関連)

2014 年 4 月 29 日 日刊工業 一面
“3次元検査ソフトウェアシステム開発”
当研究室から技術移転がなされた Integral Geometry Instruments 社が紹介されました。
<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0920140429aav.html>
(技術移転関連)

○展示会出展
FC EXPO 水素・燃料電池研究発表大会～FC アカデミックフォーラム～
2013 年 2 月 27 日-3 月 1 日、東京ビッグサイト

JPCA JAPAN
2013 年 6 月 5 日-6 月 7 日、東京ビッグサイト

JASIS 2013
2013 年 9 月 4 日～9 月 6 日、幕張メッセ国際展示場

CEATEC JAPAN 2013 リサーチパーク
2013 年 10 月 3 日～10 月 4 日、幕張メッセ国際展示場

非破壊評価総合展
2013 年 10 月 30 日～11 月 1 日、東京ビッグサイト

JASIS 2014
2014 年 9 月 3 日～5 日、千葉県幕張メッセ国際展示場

センサ-EXPO JAPAN2014
(セイコーNPC ブースにて共同研究紹介)

CEATEC japan 2014
2014 年 10 月 7 日～11 日、千葉県幕張メッセ国際展示場

6. 研究組織
(1)研究代表者
木村 建次郎 (KIMURA, Kenjiro)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：10437246