

令和元年6月20日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04372

研究課題名(和文)ベクトルポテンシャルトモグラフィーの開発

研究課題名(英文)Development of Vector Potential Tomography

研究代表者

大坊 真洋(DAIBO, Masahiro)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：20344616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、電磁気学の根本物理量であるベクトルポテンシャルに着目して、物体内部のインピーダンス分布を計測する新しいアプローチに取り組んだ。理論および数値シミュレーションにより球型のベクトルポテンシャルコイルが均一なベクトルポテンシャルを発生することを示し、実際に製作して実証した。また、ベクトルポテンシャルの時間微分と、導体経路との内積の線積分に等しい第一の電圧の他に、線積分経路中の抵抗値に比例した第二の電圧成分も発生した。電磁シールドの効果は、第一の電圧には無く、第二の電圧にはあった。これらを使い分けることによって、新たな計測方法が実現できるだろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学が適用されるミクロな世界では、電磁現象は電界や磁界ではなく、ベクトルポテンシャルで表現されている。しかしながら、マクロな世界では、電界や磁界で考えることがほとんどであり、ベクトルポテンシャルを発生させることを目的としたコイルはこれまで無く、その応用機器やアプリケーションは存在しなかった。ベクトルポテンシャルを実用化するための第一歩となる球型の特殊コイルを実現した。また、電流(ベクトルポテンシャル)の時間変化から電界を発生し、それを対象物に作用させて、その相互作用から対象物の電気的情報収集する新しい方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：We focused on the vector potential, which is the basic physical quantity of electromagnetism, and worked on a new approach to measure the impedance distribution inside the object. We show that spherical vector potential coil generates uniform vector potential by theory and numerical simulation. Furthermore, we actually built a coil and measurement system. In addition, a first voltage component equal to the line integral of the inner product of the time derivative of the vector potential and the conductor path, a second voltage component proportional to the resistance along the line integration path were also observed. The electromagnetic shield was ineffective for the first voltage and effective for the second voltage. By using these properly, a new measurement method will be realized.

研究分野：電子計測、磁気計測、磁気センサー、非破壊検査

キーワード：ベクトルポテンシャル コイル 非破壊検査 電界発生

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

量子力学が適用されるミクロスコピックな領域では、ベクトルポテンシャルで電磁気現象が表現されている。電界はベクトルポテンシャルの時間微分であり、磁界はベクトルポテンシャルの回転の空間微分として表される。すなわち電界や磁界は根源的な物理量とはいえ、むしろベクトルポテンシャルの方が電磁現象の元となる物理量であり、これを使えば統合的に表現できるので都合がよい。しかし、マクロスコピックな領域では、歴史的な経緯から電界と磁界が使われており、ベクトルポテンシャルを起点として電磁デバイスを再考察することは、ほとんど試みられていないように見受けられる。実際に我々が測定できる物理量は電圧や電流であることから、ベクトルポテンシャルまで遡る必用性の有無が議論になるだろう。

そこで、我々は電場でも磁場でもなく、ベクトルポテンシャルのみを発生させる特殊なコイルを開発して、ベクトルポテンシャルの理解と応用を試みてきた。このコイルを使った基礎的な研究として、電磁シールドを一次コイルと二次コイルの間に挿入したベクトルポテンシャルトランスの実験を行った。その実験結果は、一次コイルと二次コイルの間の結合に、シールドは影響を与えないという驚く結果であった。この効果をさらに確かにするために、シールドに超伝導体を使った実験も行ったが、結果は同様に結合に影響を与えなかった。シールドがあるのだから、電界も磁界も通らないはずなのに、一次コイルと二次コイルが電氣的に結合した。この結果を、ベクトルポテンシャルをベースに考えると、ベクトルポテンシャルは、電磁シールドを透過するという解釈ができることになり、この特性を利用した機器や応用を考えるのはとても有意義であると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ベクトルポテンシャルを基本原理とした、電磁デバイスの開発と、その応用を探ることである。信頼性の高いベクトルポテンシャルの実験をするために、空間的にベクトルポテンシャルの強度のばらつきが少ないコイルの構造を考察する。そして、実際にベクトルポテンシャルコイルを作製し、そのコイルで生成した均一なベクトルポテンシャルの中で様々な対象物を挿入して誘導される電圧を計測する。これにより、物体内部の電氣的な情報を計測する手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 球コイルの数値シミュレーション

クーロンゲージを仮定した理論式に基づいて、数値シミュレーションにより、電流を球型ベクトルポテンシャルコイルに流した時の球内ベクトルポテンシャルの分布を求める。これにより、球型ベクトルポテンシャルコイルの基本設計を行う。

#### (2) 球型ベクトルポテンシャルコイルの作成

比較的大空間に均一なベクトルポテンシャル場を発生するために、直径 500 mm 程度の球型ベクトルポテンシャルコイルを作製する。

#### (3) 巻線ジグの作成

柔軟で座屈しやすいリッツ線を使用して、細長いソレノイドコイルを作製するための条件を探るため、撚り線を試作する巻線ジグを作製する。

#### (4) リッツ線化

巻線ジグにより適切な製作パラメータを得て、高周波対応したリッツ線による細長いソレノイドコイルを作製する。この細長いソレノイドコイルが、球型ベクトルポテンシャルコイルの素線となる。

#### (5) 多電極機構

対象物体に回転対象で多数の電極を設け、任意の角度で回転することができる多電極機構を作製する。

#### (6) 非接触計測

交流ベクトルポテンシャル場中に対象物を挿入し、その近傍にセンサーとして抵抗を配置する。抵抗両端に現れた電圧により、対象物の誘電率や位置を検出する。

### 4. 研究成果

#### (1) 球コイルの数値シミュレーション

ベクトルポテンシャルコイルの基本構造は、柔軟で細長いソレノイドコイルを円筒に巻き付けた二重入れ子のコイルである。ベクトルポテンシャルにはゲージの選び方の自由度があるが、信号周波数が低周波 (< 100 kHz) であることから、クーロンゲージを採用した。この場合、 $\text{div } A = 0$  となり発散がゼロであるので、磁束と同様にベクトルポテンシャルは空間で連続に接続される。そのため、円筒のベクトルポテンシャルコイルでは、コイルの中心部に対して出入口付近では弱くなってしまふ。

そこで、均一なベクトルポテンシャルを生成するために、球形のベクトルポテンシャルコイルを考案した。図 1 に球形ベクトルポテンシャルコイルの構造を示す。球の中心軸を等間隔にサンプリングして、等間隔に複数のトロイダルコイルを球の中心軸に直交するように配置した。トロイダルコイルの大半径は、球の表面にトロイダルコイルが密着するように配置した。

各層のトロイダルコイルは電氣的に直列に接続されていることを想定し、同一電流が流れると

設定した。個々のトロイダルコイルを構成している巻線は、捻れながらトロイダルに巻線されており、実際に作製できる構造に近いモデルである。

Mathlab でプログラミングして数値シミュレーションした結果を図 2 に示す。球内の全域において、均一で軸に平行なベクトルポテンシャルが発生していることがわかる。一方、球の外側では反対向き。

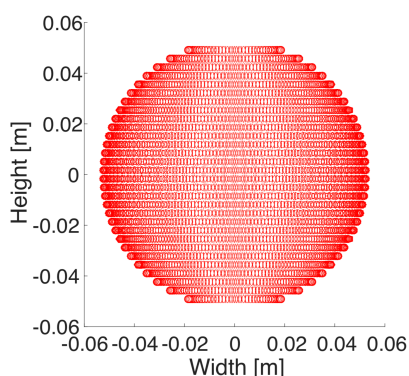


図 1 球型ベクトルポテンシャルコイルの構造

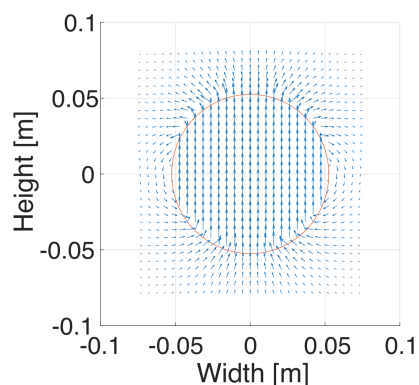


図 2 ベクトルポテンシャルの空間分布

### (2) 球型ベクトルポテンシャルコイルの作成

数値シミュレーションにより、均一な空間分布のベクトルポテンシャルが得られることが確認できたので、球型ベクトルポテンシャルコイルを作成した。コイルの線長が長くなるため、細長いソレノイドコイルは電線が 6 本並列となった 6 条巻の電線を使用した。中心にも導体が配置されており、6 条巻の電線とは反対方向に戻り電流が流れるようにした。これにより、磁場の発生は無くなり、不要なベクトルポテンシャルの成分も相殺される。作製した球型ベクトルポテンシャルコイルの外観を図 3 に示す。球の直径は 500 mm である。



図 3 球コイルの外観

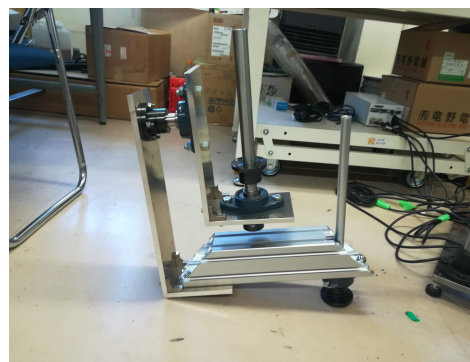


図 4 巻線ジグの写真

### (3) 巻線ジグの作製

高周波化のためにリッツ線による細長いソレノイドコイルの作成を行った。リッツ線は多数の細線が束になっており、その束がバラバラにならないように糸でゆるく縛られている。リッツ線自体も撚り線となっており、細長いソレノイドコイルを作るために戻り線に巻きつけると、撚りが戻って均一に戻り線に巻きつけることができない。従来、単線で細長いソレノイドコイルを作製する場合は、一回公転する毎に、一回自転しており、捻れが蓄積する構造であったが、単線の場合には素材自体が回転対象で均一なため、座屈などは生じなかった。リッツ線では対称性が完全でないため、歪が蓄積して周期的に折れ曲がりが発生する問題があった。そこで、公転と自転を独立に巻くことができるように、3 軸の回転自由度を持つ巻線ジグを作製した。作製したジグの写真を図 3 に示す。これにより、細長いソレノイドコイルの作製条件がわかったが、手動巻であるので実験に必用な十分な長さ (200 m 程度) の製造までは困難であった。

### (4) リッツ線

共同研究企業によりリッツ線の6条巻のコイルが作製された。中心の戻り線は単線である。この細長いソレノイドを2個の直径600 mmのアルミニウム半球に巻きつけて、球型ベクトルポテンシャルコイルを作製した。

#### (5) 多電極機構

半導体ウェハー用のコンタクトプローブ（直径0.34 mm）を240本円周上に配置（1.5° 間隔）した多点プローブを作製した（図5）。平面試料に対して、プローブ全体を上下させて試料の入れ替えと接触／断絶を可能にした。また、球内の中心平面に試料が配置できるように高さ調整機能も設けた。また、プローブと試料全体を球の中心面内で回転させる機構も設けた。これらの機構により、平面試料に任意の角度でベクトルポテンシャルを印加し、プローブの両端の電位計測ができるシステムを構築した（図6）。

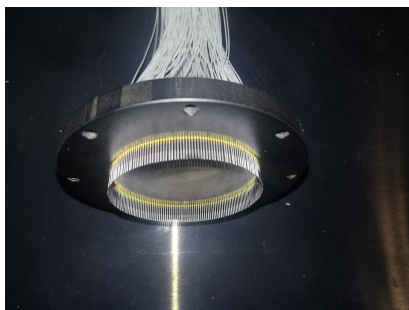


図5 多点プローブ（240本）



図6 多電極機構（3軸自由度）

#### (6) 非接触計測

前述のとおり球型のベクトルポテンシャルコイルでは、空間的に均一なベクトルポテンシャルの生成が可能である。しかし、ベクトルポテンシャルそのものを検出できるセンサーは今の所存在しないので、ベクトルポテンシャルを発生するための電流を交流として、交流のベクトルポテンシャルの時間微分に比例した電界を発生させる。球型ベクトルポテンシャルコイルの中に、電線を貫通させてその両端の電圧を測定すると、電界（即ちベクトルポテンシャルの時間微分）と球コイルの直径の積と等しい電圧が観測される。この電圧は、ファラデーの電磁誘導で得られる計測ループの中を貫通する磁束の総量の時間微分とも一致する。無限に長いソレノイドコイルの外側には磁束は存在せず、今回の実験でもソレノイドコイルは十分に長く、密に巻かれており、球型ベクトルポテンシャルコイルの内部には磁束は事実上無い。

観測に使用している電線をループにしないで、球型ベクトルポテンシャルコイル内で折り返して、球型ベクトルポテンシャルコイルの同一側から電線の接続を取り出すと、電圧はゼロになる。それは、ベクトルポテンシャルと電線経路の内積の線積分が電圧にあるから、往復でキャンセルされてゼロになる。これをファラデーの電磁誘導で考えると、観測ループ内に磁束を含まないので、観測結果はゼロという説明になる。

しかし、球型ベクトルポテンシャルコイル内の電線の途中で100 k $\Omega$ 程度の比較的大きな抵抗値の抵抗を挿入すると、この電圧に加えて追加の電圧が現れる。この電圧は抵抗値に比例すると共に、周波数にも比例する。この電圧は、観測ループの中に磁束が無いにもかかわらず発生する。抵抗値が数M $\Omega$ 程度になると、開放電圧を測定している差動アンプの入力インピーダンスと同等程度になるので、テブナンの等価回路の出力インピーダンスが大きくなるので、出力電圧が低下し始める。ベクトルポテンシャルコイルに交流電流を流すと、電界が発生し、それが抵抗と結合することは確かである。

一連のシステムを使用した成果として、誘電体の非接触検出の事例を示す。前述の抵抗値の大きな抵抗の近傍に空気と異なる誘電率の物体を配置すると、今度は抵抗に誘導される電圧が対象物に応じて変化する。この電圧の大きさや位相を測定することにより、対象物の誘電率や位置検出が可能になる。この検出方法は、対象物とセンサー（抵抗）がある空間全体を包含するコイルによって信号を得る方法であり、センサーとして単なる抵抗が使えることがユニークといえる。

図7に実験装置の概念図を示す。左右対象に高抵抗を配置して、開放電圧を差動で検出している。電圧はロックインアンプで同期検波して測定した。対象物は、それぞれ蒸留水、アルコール、食用油をマイクロチューブに封入したものである。マイクロチューブは非対称な形状をしているため、同じ分量を封入した2つのマイクロチューブを左右対称になるように一体化したものをサンプルとした（図8）。

図9に抵抗の位置を固定して、対象物を移動した時の差動電圧の変化を示す。食用油、アルコール、蒸留水の順に信号が大きくなっており、誘電率の大きな順に対応している。抵抗の近傍で

信号が極大となっており、抵抗をセンサーとして位置の検出も可能であることがわかる。

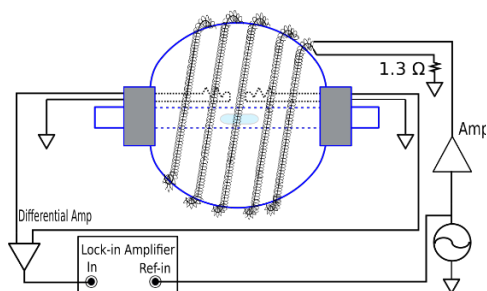


図7 誘電体の検出装置のブロック図

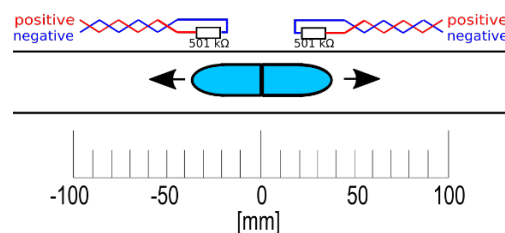


図8 サンプルと抵抗の差動配置

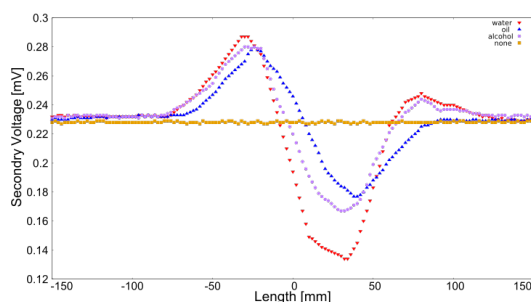


図9 サンプルを移動させた時の出力電圧の変化

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

1. 大崎 凌汰、大坊 真洋: 交流ベクトルポテンシャル場中での電気抵抗による誘電体検出、電気学会計測研究会予稿集、査読無, IM-19-020, 2019
2. Masahiro Daibo: Toroidal vector-potential transformer, Proceedings of the 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST), 査読有, Sydney, doi: 10.1109/ICSensT.2017.8304422, pp. 1-4, 2017

〔学会発表〕(計7件)

1. 大崎 凌汰、大坊 真洋: 交流ベクトルポテンシャル場中での電気抵抗による誘電体検出、電気学会計測研究会、IM-19-020、東京都千代田区神田新保町3丁目高橋ビル、2019.3.15
2. Masahiro Daibo, Rogowski Coil with Superconducting Shield Inserted between Primary Coil and Secondary Coil, 3LPo2C-10 [L31], 2018 Applied Superconductivity Conference, Washington State Convention Center, 2018.10.31
3. 小野純暉, 大坊真洋: 時間変化するベクトルポテンシャルで誘導する二次電圧, 平成30年東北地区若手研究者発表会, 121, 東北学院大学, 2018.2.24
4. 高橋 信貴, 大坊真洋、ベクトルポテンシャルによる水中電界発生、平成30年度電気関係学会東北支部連合大会、2H12、岩手大学、2018.9.7
5. 天間 亮, 大坊 真洋: 均一なベクトルポテンシャルを発生する二重入れ子コイルの形状, 第44回(2018年春季)応用物理学会講演会, 18p-F202-6, 早稲田大学, 2018.3.18
6. 大坊真洋: 交流ベクトルポテンシャル発生装置による新規計測システム, 科学技術新興機構 製造技術・計測 新技術説明会, JST 東京本部, 2018.3.13
7. 鳥島淳生, 大坊真洋: トロイダル型ベクトルポテンシャルトランス, 平成29年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」, YS29-3-2-1, 東北学院大学, 2017.3.4

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：ベクトルポテンシャル検出装置、交流磁場検出装置、ベクトルポテンシャル計測装置、及び、トモグラフィ装置

発明者：大坊真洋、大島修三

権利者：岩手大学

種類：特許

番号：特願 2017-071640

出願年：2017年

国内外の別：国内

○取得状況（計2件）

名称：Vector potential generation device, vector potential transformer, shield permeation device, non-contact space electric field generation device, null circuit, and structure for vector potential generation device

発明者：Masahiro Daibo, Shuzo Oshima

権利者：Sumida Power Technology

種類：Patent

番号：US2016/0300652 A1

取得年：2018

国内外の別：国外

名称：ベクトルポテンシャル発生装置、ベクトルポテンシャルトランス、シールド透過装置、非接触空間電界発生装置、ヌル回路、およびベクトルポテンシャル発生装置用の構造体

発明者：大坊真洋、大島修三

権利者：岩手大学、スミダパワーテクノロジー

種類：特許

番号：特許第 6205572 号

取得年：2017年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。