

氏名	しょうじ ゆうや 正路 裕也
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第11号
学位授与年月日	令和5年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科システム創成工学専攻
学位論文 題目	光ポンピング原子磁力計を用いたベクトルポテンシャルの計測に関する研究
学位審査委員	主査 准教授 大坊 真洋 副査 教授 長田 洋 副査 教授 小林 宏一郎

論文内容の要旨

20世紀の初頭、電磁気学においてベクトルポテンシャルのその物理的な意味に対する解釈が Aharonov と Bohm の提唱から見直され始めた。それ以前の電磁気学において、ベクトルポテンシャルとは単なる数学的なツールであった。その後、外村氏による電子線干渉と Meissner 効果を用いた Aharonov-Bohm 効果の実証により確かなものとなった。これに加え、Maxwell-Lodge 効果というものも知られている。この効果はソレノイドコイルの外部において、磁場が存在しないにもかかわらず起電力が発生する現象である。この効果は、古典的な Aharonov-Bohm 効果の類似物と考えられている。確かにベクトルポテンシャルは一つの物理量として認知されてきたが、これの実用レベルにある計測機器はいまだに開発されていない。そこで本論文では、ベクトルポテンシャルの計測手法の検討を主な目的とする。

一般的に、Aharonov-Bohm 効果の観測には電子線干渉、Maxwell-Lodge 効果の計測には閉ループを用いた電圧計測が用いられる。前者は大型で高価な装置が必要であるというデメリットがある。後者は、有限長のソレノイドコイルの両端から漏れ出る磁束と計測で用いる閉ループが鎖交してしまい Faraday の誘導則に従った起電力が発生するため、ベクトルポテンシャルが誘起する起電力と区別がつかなくなるというデメリットがある。そこで、我々はスピン偏極された電子に着目し、これに対するベクトルポテンシャルの相互作用が起こるかを検討した。電子をスピン偏極させるために我々はアルカリ金属に対する光ポンピング法を利用した。これにより、ベクトルポテンシャルの相互作用の観測のみならず、磁場の計測も可能となる。この光ポンピング法を利用した磁場計測の装置は光ポンピング原子磁力計と呼ばれる。一般的にベクトルポテンシャルの計測上、磁場の存在は大きな問

題となる。しかしながら、この副次的な機能により、ゼロ磁場校正や、ベクトルポテンシャルによる応答と磁気による応答の比較が可能となる。この計測は光学計測の一種であるため、前述の閉ループによる問題を避けることができる。また本研究においては、一様なベクトルポテンシャルを発生させる装置が重要となってくる。既に一様なベクトルポテンシャルの発生方法として球形のベクトルポテンシャルコイルが開発されているが、光ポンピング法には適さない形状であった。そこで私はヘルムホルツコイルと同様の形状のベクトルポテンシャルコイルを、設計・製作した。また、数値計算によるシミュレーションも行った。装置の設計に併せて、それに必要な計測用の回路もシミュレーションし、設計・製作した。なおベクトルポテンシャルコイルとは磁場を発生させることなくベクトルポテンシャルのみを発生させることのできるコイルである。

以上を踏まえ、本論文では序論や装置、原理の説明に続き、原子磁力計の基本特性、ヘルムホルツコイル型ベクトルポテンシャルの数値解析、ベクトルポテンシャル印加時の応答について述べている。

一様な磁束密度を生成するコイルとしてはヘルムホルツコイルが知られている。我々はこれに着目した。ヘルムホルツコイルとは磁束を発生させる円形コイル一对を適切な距離に配置した際に、その中心付近に均一な磁束密度を生成するコイルである。すなわち、ベクトルポテンシャルを発生させる円型ベクトルポテンシャルコイルをヘルムホルツコイルと同様の幾何学的条件下で配置すると、その中心付近に均一なベクトルポテンシャルコイルが発生することが予測される。我々はヘルムホルツコイルの数値解析を行い、実際にヘルムホルツコイル型のベクトルポテンシャルコイルを作製した。数値解析の結果から、ベクトルポテンシャルが均一に発生することがわかった。また、中心付近においては磁場も打ち消されるであろうことが示された。このコイルは中心付近に十分な間隔があるため原子磁力計に適応することができた。

上記のベクトルポテンシャルコイルをスピン偏極したアルカリ金属に印加した際の応答波形と磁場を印加した際の応答波形を計測した。この際、磁場や電場の影響が小さくなるように原子磁力計を用いた磁場校正やファラデーケージの設置をした。計測結果として、システムのカットオフ周波数以下のレンジにおいては、磁場の振幅対周波数特性は一定若しくは若干の減少であったのに対しベクトルポテンシャルの振幅対周波数特性は増加した。これはスカラーポテンシャルの勾配による電界ではなく、ベクトルポテンシャルの時間微分による電界が影響を及ぼしたことを強く支持している。本研究によって、少なくともベクトルポテンシャルコイルで発生した磁場とは異なる信号が原子磁力計で計測できることがわかった。

論文審査結果の要旨

本論文は、ベクトルポテンシャルを光学的に計測する方法および装置に関するものである。論文は、7章から構成されており、主にベクトルポテンシャルを検出するための光ポンピング原子磁力計と、均一なベクトルポテンシャルを発生するためのヘルムホルツ型ベクトルポテンシャルコイルに関して論じられている。

第1章は序論であり、背景、先行研究の状況、目的が示されている。

第2章は理論であり、原子核と電子の相互作用、光ポンピング法、ベクトルポテンシャルについて論じている。

第3章はシングルビーム原子磁力計について説明している。レーザー光学系、動作点設定のための3軸ヘルムホルツ磁気コイル、磁気シールド、無誘導レーザー加熱、4チャンネル差動型受光回路について、原理、作製、装置評価を行っている。特に上下左右のベクトルポテンシャルや磁場の影響を評価できるように4チャンネルの差動型受光回路を設計し、専用基板を作製し実装したことは評価できる。

第4章は、原子磁力計の各種パラメータの最適化について述べられている。波長依存性、楕円偏光の円偏光成分と直線偏光成分の割合、折返しによる二次高調波の評価、ルビジウムガスセル温度、周波数応答特性、非線形性、ダイナミックレンジを詳細に調べて、高感度で動作できる最適な範囲を同定している。

第5章はベクトルポテンシャルコイルの数値計算および作製について述べられている。磁場とベクトルポテンシャルの両方の空間分布、均一性、磁気勾配について、簡易的な解析解と数値計算を比較しながら、実験装置の性能を予測している。電位勾配によるスカラーポテンシャルの影響を最少化するためのファラデーケージも組み入れている。二重入れ子のコイルの巻き方を、巻き方向が逆の微小ソレノイドコイルを用いて対称性を高め、寄生スカラーポテンシャルの影響が最少になるコイルを作製している。磁場とベクトルポテンシャルの計測が同時にできるように、ベクトルポテンシャルコイルを構成する微小ソレノイドコイルのコア線を磁気コイルとして使用する巧妙な構造となっている。

第6章は、ベクトルポテンシャルの計測について述べられている。まず、シングルビーム光ポンピング原子磁力計に交流磁場を印加し、その二次高調波が最大になるように動作点を定めて、絶対ゼロ磁場環境を実現した。その状態で磁場信号とベクトルポテンシャルの信号を入力した時の違いを比較した。磁場信号を印加した場合は周波数とともに減少する応答が観測されたのに対して、交流ベクトルポテンシャルを印加した場合は、周波数とともに増大する反対の応答が観測された。この結果は、光ポンピング原子磁力計によりベクトルポテンシャルを計測できることを示唆しており、ベクトルポテンシャルを利用した新たな計測方法や機器につながる成果である。

第7章は結論である。磁力計のための受光回路の作製、ベクトルポテンシャルコイルの数値計算による定量的評価、ベクトルポテンシャルの計測の3つを成果とし

ている。

古典的電磁気学では、ベクトルポテンシャルの時間微分が電場、回転が磁場として与えられる。電場も磁場もベクトルポテンシャルで与えることができるので、より根源的な物理量である。磁場がない空間であってもコイルに電圧が発生する現象は Maxwell-Lodge 効果として知られている。Maxwell-Lodge 効果の量子力学版としては Aharonov-Bohm 効果があり、これは磁場がない空間であってもベクトルポテンシャルの存在によって電子波の位相がシフトする現象である。Maxwell-Lodge 効果の観測は、二次コイル側のリード線を含む電気回路のループの影響を排除するのが困難であること、Aharonov-Bohm 効果はコヒーレンス長の短い電子波の干渉による観測や超伝導シールドが必要となることから、ベクトルポテンシャルを比較的簡便に計測する方法がなかった。

そこで、申請者は光ポンピング原子磁力計でベクトルポテンシャルを光学的に計測することを試みた。論文の結果は、光ポンピング原子磁力計によりベクトルポテンシャルを計測できることを示唆しており、ベクトルポテンシャルを利用した新たな計測方法や機器につながる成果である。

以上により、この論文はベクトルポテンシャルの計測方法について、理論的、実験的に詳細に研究しており、特に原子磁力計でベクトルポテンシャルを計測した事例は過去に例がなく新規性があり、レーザー技術、電子回路技術、電磁気学、数値シミュレーションなどの高度な技術を用いており、この斬新な研究は計測分野の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

Differential behavior of magnetic field and magnetic vector potential in an optically pumped Rb atomic magnetometer, Yuya Shoji, Masahiro Daibo, *AIP Advances*, 13, 025127, 06 February 2023, <https://doi.org/10.1063/5.0130481>.