

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04089

研究課題名(和文) 光ポンピングスピン偏極原子のベクトルポテンシャル変調

研究課題名(英文) Vector potential modulation of optical-pumped spin-polarized atoms

研究代表者

大坊 真洋 (DAIBO, MASAHIRO)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：20344616

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)：二重入れ子巻線構造のベクトルポテンシャルコイルを原子磁力計に組み込み、ベクトルポテンシャルを印加したときの信号の変化を調べ、ベクトルポテンシャル計測器の実現を目指した。我々は、均一なベクトルポテンシャルと磁場の両方を発生できるヘルムホルツ型のコイルを、数値シミュレーションによって設計した。磁場およびベクトルポテンシャルを原子磁力計に印加した時の周波数特性を比較したところ、磁場応答が周波数の増加とともに減少するのに対し、ベクトルポテンシャル応答はその逆であった。原子磁力計によって、交流のベクトルポテンシャルを磁場と区別して計測できることを初めて実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベクトルポテンシャルは、その存在が理論的にも実験的にも認識されているにもかかわらず、それを直接測定するセンサーはなかった。我々は、ベクトルポテンシャルを発生するコイルと、スピン偏極した原子を制御する両方の技術を組み合わせることによって、新しいセンサーの実現を目指した。今回、磁場とは全く異なる応答を測定できたので、センサーを実現するために必要な基盤技術を見出したといえるだろう。この技術は、新しい医療機器などへの応用が可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：Here is the translation:

We aimed to realize a vector potential measuring device by incorporating a vector potential coil with a double-nested winding structure into an atomic magnetometer. Initially, we designed a Helmholtz-type coil capable of generating both a uniform vector potential and a magnetic field through numerical simulations. By comparing the AC frequency characteristics when either a magnetic field or a vector potential was applied to the atomic magnetometer, we found that the magnetic field response decreased with increasing frequency, whereas the vector potential response exhibited the opposite behavior, showing completely different frequency responses. From this, we demonstrated for the first time that an atomic magnetometer can measure AC vector potential distinctively from the magnetic field.

研究分野：計測

キーワード：ベクトルポテンシャル 光ポンピング 原子磁力計 ベクトルポテンシャルコイル

1. 研究開始当初の背景

ベクトルポテンシャルは、電場や磁場の元となる量である。一般的になじみのある磁界は、ベクトルポテンシャルが空間的に回転すると発生する。もう一つの物理量である電界は、ベクトルポテンシャルが時間的に変化した時、その時間変化に比例して発生する。

さて、ベクトルポテンシャルは、マクスウェルの論文ではもともと導入されていたが、後にヘルツやヘビサイドによって基本式から削除された経緯がある。ベクトルポテンシャルは、計算上の利便性のためのものであり、物理的な実体は無いと考えられていた時代もあった。その後、アハラノフとボームにより、ベクトルポテンシャルは電子の波動関数の位相を変化させることが理論的に予測された。これは後にアハラノフ・ボーム効果と呼ばれる。その後、日立製作所の外村博士らは、マイスナー効果で完全磁気遮蔽された磁束リングの内外を通る電子線の干渉(位相シフト)を電子線ホログラフィーにより観測し、ベクトルポテンシャルが物理的に意味のある量であることが実証された。

ベクトルポテンシャルは、アハラノフ・ボーム効果のように、量子力学的な領域でなければ観測にかかることがないわけではなく、マクロ領域でも有効である。しかし、ベクトルポテンシャルを積極的に使った機器は見当たらない。我々は磁気とベクトルポテンシャルに関する考察から、二重に入れ子になった複雑なコイル(図1)を発想した。それは細長く柔軟性のあるソレノイドコイルを円筒にさらに巻きつけて構成される。 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{J}$ の逆構造とも解釈できる。十分に長いソレノイドコイルの外部には事実上磁場は無いので、円筒の内側の空間は無磁場である。実際には全体を円筒にねじりながら巻きつけたグローバル構造があるため、そのままでは磁場が発生する。そこで、細長いソレノイドコイルの中心にも導線を設け、それに逆方向に戻り電流を流すことにより、磁場をキャンセルしている。試作したコイルの円筒の中心軸に沿って二次導体を配置すると、その場所に磁場が無いにもかかわらず、誘導電圧が観察された。我々が当初感激したことは、ベクトルポテンシャルコイルと二次導体の間に超伝導シールドや強磁性体シールドがあっても、減衰することなく結合することであった。一次コイルと二次コイルの途中にある媒体によらず、ベクトルポテンシャルが時間変化すれば電場が形成されるのである。

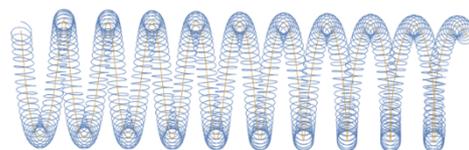


図1 ベクトルポテンシャルコイル

さて、磁場中でのスピン偏極原子の振る舞いはよく調べられているが、一方ベクトルポテンシャル中でスピン偏極原子がどのように振る舞うかについては報告例がない。そこで、これまで我々が行ってきた、導線を使った実験のように金属中の熱平衡状態の自由電子を使って電氣的に調べるのではなく、光ポンピングによりスピン偏極させた中性原子を使い、ベクトルポテンシャルを印加したときに、透過光の偏光がどのように変化するかを光学的に調べる。

2. 研究の目的

スピン偏極した原子にベクトルポテンシャルを印加した時に、偏光状態がどのように変化するかを調べる。特に、ベクトルポテンシャルと磁場の違いを比較する。最終的には、ベクトルポテンシャルを計測できる装置の基盤技術を開発することが目的である。

3. 研究の方法

(1) ベクトルポテンシャルコイル

我々はこれまでにベクトルポテンシャルを発生する特殊なコイルを開発してきた。通常、コイルに電流を流すと磁場が発生するが、開発したコイルは磁場を発生せずにベクトルポテンシャルだけを発生することができる。均一な場を形成するには、球形のコイルが理想的であるが、レーザーのアクセス、赤外線温度計測などの開口部が必要となることから、ヘルムホルツ構成のベクトルポテンシャルコイルを新たに作成した。

ベクトルポテンシャルコイルは、コイルをさらにコイル状に巻いた構造であるため、巻線長が長くなる。そのため、巻線抵抗に電流が流れることによる抵抗電圧降下が発生しやすい。この電圧降下は、電位勾配を誘発するとともに、周囲の誘電率により静電結合する。この電位勾配は、電界と等価であり、ベクトルポテンシャルの時間変化が発生する電界と重ね合わされ疑似信号となる可能性がある。スカラー電位による電位勾配は、ファラデーケージにより静電シールドできるので、我々はベクトルポテンシャルコイルを銅フィルムで覆い、計測系のグランドに接地してこの影響を排除した。なお、銅フィルム中に巡回電流が流れると、トランスのようになり一次電流を阻害するので、銅フィルムの端部にスリットを設け、巡回電流が流れないようにした。

(2) 光ポンピング差動型原子磁力計

光ポンピング原子磁力計は、通常はポンピングとプローブ用に、直交する2方向からのレー

ザーが必要である。我々は一方向からのレーザー照射で微弱磁場を検出できる原子磁力計を開発してきた。またベクトルポテンシャルの計測には、磁場が無いことを証明することが重要である。我々は二次高調波を観察することにより、絶対ゼロ磁場を確認する方法も開発している。原子磁力計に、前述のベクトルポテンシャルコイルを組み合わせると、磁場の無い絶対ゼロ磁場環境を確認しながら、ベクトルポテンシャルの影響を調べることが可能になる。原子磁力計の基本構成を図2に示す。

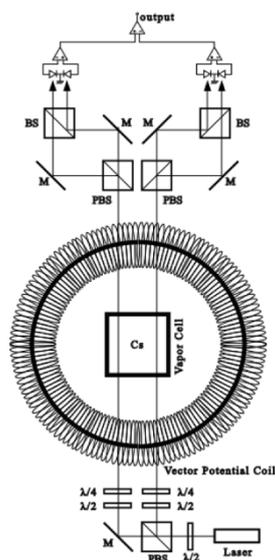


図2 差動型原子磁力計

(3) 超伝導コイルと超伝導シールド

ニオブチタン超伝導コイルを鉛管により超伝導シールドして、ファラデーの電磁誘導とベクトルポテンシャルによる結合を区別する実験を行う。ファラデーの電磁誘導では、ループの内外を区別する必要がある。一方、ベクトルポテンシャルの場合は、電流と導線の内積で説明され、1回巻きに満たないコイルであっても誘導電圧の発生が可能である。漏洩磁場の影響がないように、超伝導シールドした状態での一次側のベクトルポテンシャルコイルと二次側導線の電磁結合を調べた。

4. 研究成果

(1) ベクトルポテンシャルコイル

複雑な電流経路からベクトルポテンシャルを計算するシミュレーションコードを開発し、ベクトルポテンシャルの分布を決定する設計手法を実現した。また、エナメル被覆の導線を芯線に密に巻いた巻線（長いソレノイドコイル）を、コイルメーカーと共同開発し、ヘルムホルツ型のベクトルポテンシャルコイルを実際に作成、評価した。このコイルは、均一なベクトルポテンシャルを発生させることもできる他、結線を切り替えることにより均一な磁場を発生させることもできる。さらに極性を入れ替えることによりアンチヘルムホルツコイル構成として、傾斜ベクトルポテンシャル、傾斜磁場も生成することができる。不要な電位勾配については、ファラデーケージにより除去できる。

(2) 光ポンピング差動型原子磁力計

均一性や傾斜を評価するために、差動計測が可能なマルチチャンネル化が必要である。そこで、4チャンネル分割のフォトダイオードアレイをP偏光とS偏光で2系統用意して、合計8チャンネル、差動で4チャンネルの原子磁力計を作成した。我々の原子磁力計は楕円偏光でポンピングとプロービングの両方を兼ねて、1つのビームで動作を可能にしている。

ベクトルポテンシャルと磁場のそれぞれについて、周波数応答を測定したところ、ベクトルポテンシャルは周波数に比例して信号が増大し、磁場の場合は減少するという全く異なる応答が観測された。図3にベクトルポテンシャルによる信号を磁場による信号で除算した周波数応答特性をしめす。原子磁力計は、これまで磁場を計測するものであったが、ベクトルポテンシャルからも影響を受けることが明らかとなった。原子磁力計をベクトルポテンシャルで変調制御することも可能である。

(3) 超伝導コイルと超伝導シールド

超伝導の細長いソレノイドコイルを半円状にカーブさせて、さらにその両端部を折り返すように半円状にカーブさせた二重半円の一次コイルを作成した。その一次コイルの周囲には鉛の円管による超伝導シールドも設置して、磁場が外側に漏れないような構造にした。

二次コイルは一次コイルの半円の中心付近を通るように設置した。二次コイルも超伝導シールドしている。重要なのは二次コイルの内側には磁束が存在しない構造としてしていることである。

この状態で一次コイルと二次コイルの信号結合を調べた結果、周波数に比例した有限の結合が観察された。すなわち、超伝導シールドがあっても、コイルの内側に磁束がなくても、結合が起きることである。この結合はベクトルポテンシャルによるものと考えられる。

以上のように、ベクトルポテンシャルの発生から検出まで、超伝導やスピン偏極原子を用いて、実験を行った。ベクトルポテンシャルによりスピン偏極した原子に影響を及ぼすことがわかった。また、内側に磁場が無い状態で、しかも超伝導シールドを一次コイル、二次

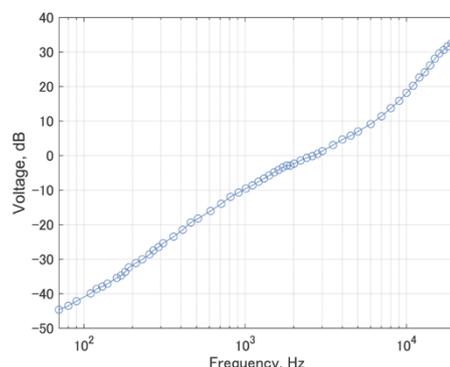


図3 ベクトルポテンシャルによる信号を磁場による信号で除算した周波数応答特性

コイルの両方に施しても、ベクトルポテンシャルによる結合があることが分かった。これらの結果は、ベクトルポテンシャルの印加や、時間変化するベクトルポテンシャルの検出が可能になったことを意味する。ここで開発された技術や知見は、今後、非破壊検査装置や、医療機器などへ応用されることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shoji, Y. and Daibo, M.	4. 巻 13
2. 論文標題 Differential behavior of magnetic field and magnetic vector potential in an optically pumped Rb atomic magnetometer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0130481	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Daibo Masahiro	4. 巻 33
2. 論文標題 Vector Potential Coupling From Outside the Loop Through the Superconducting Shield	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3258371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masahiro Daibo
2. 発表標題 Vector potential coupling from outside the loop through the superconducting shield
3. 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Shoji, K. Chida, T. Terato and M. Daibo
2. 発表標題 Atomic Magnetometer Modulated by Magnetic Vector Potential
3. 学会等名 8th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances (SEIA ' 2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 旭飛、大坊 真洋
2. 発表標題 ベクトルポテンシャルコイルによるループ外からの電磁誘導
3. 学会等名 2021年（令和3年）応用物理学会東北支部 第76回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千田航汰，大坊真洋
2. 発表標題 マルチチャンネル型シングルビーム光ポンピング磁力計を用いた磁気勾配計測の検討
3. 学会等名 2022年応用物理学会東北支部第77回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺戸貴俊，大坊真洋
2. 発表標題 差動型原子磁力計を用いた磁気傾斜計の開発
3. 学会等名 2023年応用物理学会東北支部第78回学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takatoshi Terato, Masahiro Daibo
2. 発表標題 Development of an Elliptically Polarized Single-Beam Optically Pumped Atomic Magneto-Gradiometer
3. 学会等名 19th SIAM Physics Congress (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ベクトルポテンシャル発生装置、ベクトルポテンシャルコイル配置方法、ベクトルポテンシャルトランス、および非接触給電システム	発明者 大坊真洋、他6名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-100853	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------