

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K20907

研究課題名(和文)原子磁力計に基づく新しい脳磁計測

研究課題名(英文)Magnetoencephalography based on the atomic magnetometers

研究代表者

井上 壮志(Inoue, Takeshi)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：80637009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：脳機能を非侵襲的に計測できる脳磁計の磁力計として現在用いられているSQUIDより安価な原子磁力計を用いることを目標に研究を行った。実際に原子磁力計を構築して、レーザー光パワーや変調周波数幅などの動作条件の最適化を行うことで、10 pT/Hzオーダーの磁場感度を実現した。また実際に微弱な磁場を印加して、100 pTオーダーの磁場変動の測定に成功した。本研究により、原子磁力計を用いた脳磁計測に向けた基礎を築くことができた。

研究成果の概要(英文)：The atomic magnetometer was developed toward magnetoencephalography (MEG). The operation cost of the atomic magnetometer is lower than the SQUID which is used as the magnetometer for the MEG. The operation conditions of the atomic magnetometer, such as the laser light power and the width of the frequency modulation of the laser light, were optimized. The field sensitivity on the order of 10 pT/Hz was achieved. We measured the please magnetic field whose magnitude was about 300 pT and confirmed the magnetometer operation. In this study, we laid the groundwork of the atomic magnetometer toward the magnetoencephalography.

研究分野：原子核物理学

キーワード：原子磁力計 生体磁気計測

### 1. 研究開始当初の背景

脳の高次機能の解明は科学の進展に寄与し、認知症や統合失調症、てんかんなどの疾患の診断及び治療をはじめとする医療にとっても大きな意義がある。脳機能の調査において重要となるのが測定方法の非侵襲性であり、そのような測定法の1つに脳磁計がある。脳磁計は大脳皮質のニューロンから発生する微弱な磁場を計測し、脳の活動を調べる測定方法である。脳磁計は、その時間的、空間的な分解能の高さから、脳の機能を非侵襲的に調べる手法の中で非常に重要な役割を果たしている。脳磁計で測定される磁場は、大脳皮質の活動に伴って発生するものであり、その大きさは100 fT オーダー以下と0.1 mT オーダーの地磁気と比較して何桁も小さい。この極微な磁場が、脳内のどの部分から発生したかを探ることにより、脳の活動プロセスを推定する有力な手掛かりが得られる。

このような極微な磁場を検出するために現在の脳磁計では、磁力計に超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いている。SQUID は1 fT/Hz オーダーの磁場感度を持つ磁力計であるが、超伝導状態を利用した計測機構であるため、液体ヘリウムによる冷却システムを必要とし、システムの運転・維持に多大なコストを要する。そのため、脳磁計の全国的な普及は進んでいない。

### 2. 研究の目的

脳磁計の磁力計として、SQUID より安価・容易に動作可能で、SQUID と同等の磁場感度を持つ常磁性原子ルビジウム (Rb) と光の相互作用 (非線形磁気光学回転・NMOR 効果) に基づく原子磁力計の開発を行う。特に、原子磁力計の感度に依存する動作パラメータの確認、及び最適化を行う。

### 3. 研究の方法

Rb 原子の共鳴周波数に合った直線偏光を Rb 原子集団に入射すると起点状態の Rb 原子のスピンの整列状態が生成される。直線偏光の入射軸に静磁場が印可されている場合、このスピン整列状態は印可磁場の周りをスピン歳差運動する。連続光を入射することで、スピン整列状態はスピン歳差周波数とスピン緩和割合で決まる、ある角度だけ直線偏光の偏光面から傾き、それを保つこととなる。この傾いたスピン整列状態と再び、入射直線偏光が相互作用することで、直線偏光の偏光面も傾く。この偏光面の傾き具合は、印可磁場の大きさに対して分散型の応答を示すので、偏光面の傾きを測定することで、磁場の大きさをモニターできる。磁場感度は、測定されたスペクトルの線幅

と偏光面の回転角度の決定精度に依存する。そこで、実際の実験においては、偏光面の回転角度を感度良く検出するために、周波数変調光とロックインアンプを用いた位相敏感検波法を採用する。そして、磁場感度の入射光パワー依存性と変調周波数幅依存性を調べて、脳磁計のため磁力計としての性能を調査する。

### 4. 研究成果

図1に示す原子磁力計を構築した。Rb 原子はガラスセルに入射され、環境磁場の影響を抑制するために磁気シールド内に設置した。磁気シールド内部には、残留磁場を打ち消すための3軸コイルを設置した。直線偏光は分布帰還型 (DFB) レーザーから供給された。そして、磁力計としての性能を最適化するために、NMOR 信号のレーザー光強度依存性とレーザー光周波数変調幅依存性を調べた。図2に典型的な NMOR 信号を示す。

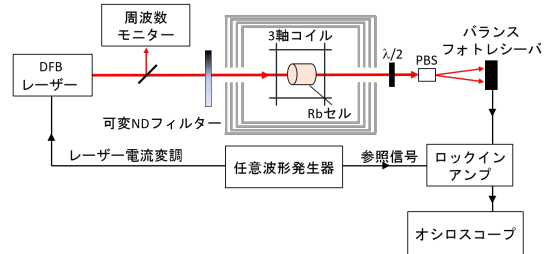


図1. 原子磁力計の実験セットアップ。

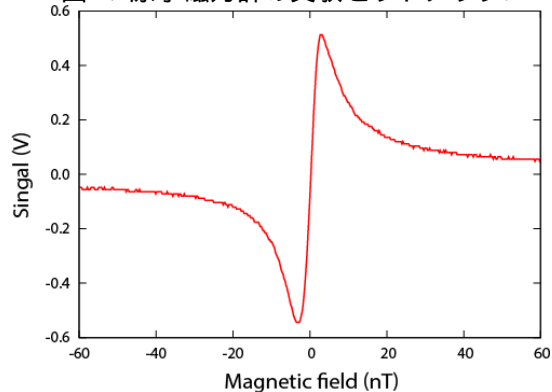


図2. NMOR 信号の一例。

レーザー光パワー依存性はレーザー光のサイズは直径 2 mm に固定して、全パワーを図1に示す Rb ガラスセルの前方に設置した可変 ND フィルターの透過率を変化させて測定した。レーザー光周波数変調幅依存性を調べる際には、レーザー光周波数の上限値を  $^{85}\text{Rb}$  原子の D1 線の  $F = 3$  のクロスオーバー遷移に固定して、下限値を変化させて測定した。

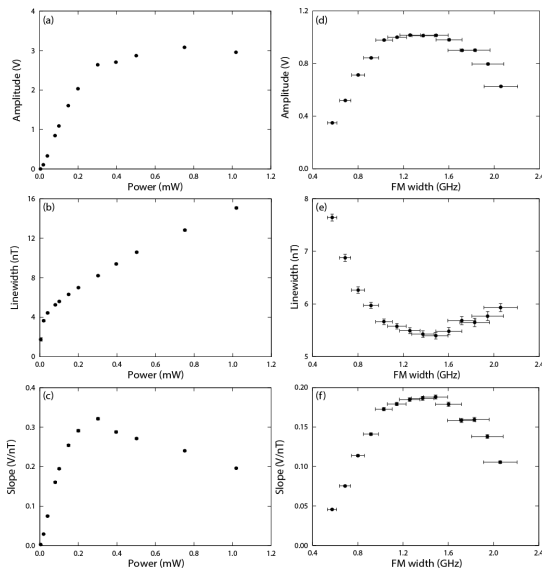


図 3. レーザー光パワーに対する NMOR 信号の (a) 振幅, (b) 線幅, (c) 傾きの依存性, 及び, レーザー光周波数変調幅に対する NMOR 信号の (d) 振幅, (e) 線幅, (f) 傾きの依存性.

レーザー光パワーに対する NMOR 信号の振幅, 線幅及び傾きの依存性を, それぞれ図 3 (a), (b), (c) に示す. これらの結果から, 現状のセットアップでは, 図 3 (c) に示す通り, NMOR 信号の傾きは 300  $\mu$ W で最大となった. また, レーザー光周波数変調幅に対する NMOR 信号の振幅, 線幅及び傾きの依存性を, それぞれ図 3 (d), (e), (f) に示す. これらの結果から, 室温の条件では, 図 5 (f) に示す通り 1.3 GHz が最適な周波数変調幅となった.

磁場感度を求めるために, NMOR 信号のパワースペクトル密度 (PSD) を測定した. PSD のレーザー光強度依存性を調べた結果, レーザー光パワーを 2 倍にすると, PSD も 2 倍となった. 一方, NMOR 信号の傾きは, 図 3 (c) から 50  $\mu$ W と 100  $\mu$ W のときの比は約 2.6 であるのに対して, 100  $\mu$ W と 200  $\mu$ W のときの比は約 1.5 にとどまった. 以上の結果より, 原子磁力計として最も磁場感度が高くなる測定条件は, レーザー光パワー 100  $\mu$ W, 周波数変調幅 1.3 GHz であることが判明した.

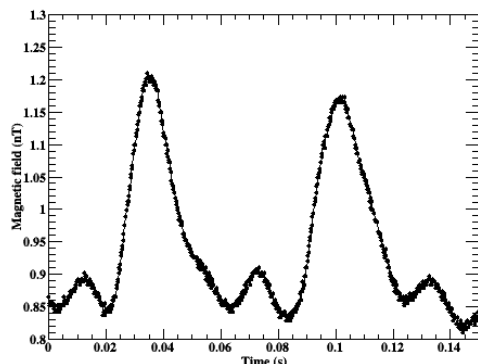


図 4. 矩形波磁場測定結果.

この条件における現状の磁場感度は, 10 Hz で, およそ 16 pT/Hz<sup>1/2</sup> であった. また最適条件下で, 振幅 300 pT, 周波数 15 Hz, デューティ比 20 % の矩形波磁場を印加して, 光学磁力計の応答をみた (図 4). このように, 100 pT オーダーの磁場に対して実際に原子磁力計が応答していることを実験的に確かめられた.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- (1) T. Inoue, U. Dammalapatit, K. Harada, M. Itoh, S. Ito, H. Kawamura, K. Sakamoto, K. Tanaka, A. Uchiyama, R. Yoshioka, T. Aoki, K. Asahi, A. Yoshimi, and Y. Sakemi, "Highly sensitive magnetometer for the fundamental physics and the medical science", 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), 2017 年 1 月 9 日-10 日, 京都, 京都大学桂キャンパス.
- (2) T. Inoue, K. Harada, M. Itoh, S. Ito, H. Kawamura, K. Sakamoto, K. Tanaka, A. Uchiyama, R. Yoshioka, T. Aoki, K. Asahi, U. Dammalapati, A. Hatakeyama, T. Sato, A. Yoshimi and Y. Sakemi, "EDM search experiment with laser cooled Fr atoms", RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms, 2017 年 7 月 4 日-5 日, 大阪, 大阪大学 RCNP.
- (3) T. Inoue, K. Harada, M. Itoh, S. Ito, H. Kawamura, K. Tanaka, A. Uchiyama, R. Yoshioka, T. Aoki, K. Asahi, A. Yoshimi and Y. Sakemi, "Magnetometry toward the fundamental physics and the medical science", 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA), 2018 年 1 月 8 日-9 日, 名古屋, 名古屋大学.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

井上 壮志 (INOUE, Takeshi)  
東北大学・学際科学フロンティア研究所・  
助教  
研究者番号：80637009

##### (2) 研究分担者

該当なし

##### (3) 連携研究者

該当なし

##### (4) 研究協力者

該当なし