

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04989

研究課題名(和文) 高安定レーザの作製による光ポンピング磁気センサの高性能化

研究課題名(英文) Advancement of an optical pumping magnetometer via development of a stable laser

研究代表者

高見澤 昭文 (Akifumi, Takamizawa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：50462833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：アライメントに鈍感なキャッツアイ配置を持つ波長894 nm(セシウムD1線)の外部共振器半導体レーザ(ECDL)を作製し、その周波数雑音を周波数1 Hzにおいて30 kHz/ Hzと評価した。この光源を用いて、セシウム原子を用いた光ポンピング磁気センサの実験系を構築し、1 Hzから500 Hzまでの周波数帯域において2 pT/ Hzの感度で磁場を測定した。また、この外部共振器半導体レーザを原子泉一次周波数標準器におけるマイクロ波共鳴による磁場測定に適用し、原子泉の不確かさ評価を完了させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

秒の単位を決める原子泉一次周波数標準器の不確かさ評価の完成に大きく寄与した。日常的によく用いられる単位の一次標準器に貢献したこと、および世界トップクラスの不確かさ $4.7 \times 10^{-16}$ の原子泉の評価に貢献したことは、社会的にも意義が深いと考える。

また、光ポンピング磁気センサとその感度評価の系を構築した。また、セシウムガスセルを温めるヒーターによる磁場ノイズを問題点として抽出した。こうした実験系の構築と課題抽出は、今後のさらなる感度向上に寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：An external-cavity diode laser (ECDL) with a wavelength of 894 nm (cesium D1 line) with a cat's eye configuration immune to the alignment was made. The frequency noise was evaluated to be 30 kHz/ Hz at 1 Hz. Using the ECDL, a system of an optical pumping magnetometer with cesium atoms was set up. The magnetometer's sensitivity was 2 pT/ Hz in the frequency range between 1 Hz and 500 Hz. Moreover, the ECDL was used for measurement of a magnetic field with microwave resonance in the atomic fountain primary frequency standard. The measurement contributed to the completion of the uncertainty evaluation.

研究分野：計量標準

キーワード：光ポンピング磁気センサ 外部共振器半導体レーザ 原子泉一次周波数標準器

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

物体内部に生じた磁化や電気信号などを外部から非侵襲に観測することが可能な高感度な磁気センサは、電気双極子能率 (EDM) の探索や岩石中に残る古代の地磁気の推定などの学術的な探求に加え、社会的ニーズの高い医療や社会インフラ診断などへ応用されることが期待されている。例えば医療応用については、疾患の発見やヒトの思考メカニズムの解明などのために脳からの磁場の観測が行われている [1]。

本研究開始当初から最も高感度な磁気センサは超伝導量子干渉素子 (SQUID) によるものであり、1 fT 程度の微弱磁場を測定できる。しかしながら、SQUID は希少かつ高価な液体ヘリウムを用いて極低温で動作させる必要があるため、コストやメンテナンスの煩雑さなどに難点がある。それに対し、アルカリ金属気体原子を用いた周波数計測に基づく光ポンピング磁気センサ [2] は、原理的には SQUID を超える検出感度を有するうえ、室温で動作するという大きな利点を持っている。したがって、光ポンピング磁気センサは究極の感度を追求するのみでなく、実用性という観点においても極めて有用である。

光ポンピング磁気センサ (一軸型) の実験配置を図 1(a) に示す。セシウムなどのアルカリ金属気体原子を封入したガスセルに、円偏光の共鳴レーザー (ポンピングレーザー) を照射する。原子は吸収-自然放出を繰り返してスピン偏極し、ポンピングレーザーを吸収しなくなる。しかし、図 1(b) に示すように、測定対象の磁場によって決まる磁気副準位の周波数シフトに同調する交流磁場を印可するとスピン偏極が解け、原子はポンピングレーザーを再び吸収する。従って、再吸収が起きるときの交流磁場の周波数から、磁場を測定することができる。

光ポンピング磁気センサを高感度化するためには、原子間および原子-セル壁面間の衝突によるスピン緩和、環境磁場ノイズ、レーザー光源の安定性など、様々なノイズ要因を除去する必要がある。レーザー光源に焦点を当てると、パワーの安定性は測定感度に直接的に影響する。また、アルカリ金属気体原子の共鳴線は数 MHz と非常に狭いため、原子によるレーザーの吸収量はレーザー周波数に極めて敏感である。加えて、レーザー周波数を原子の共鳴線にチューンしてロックする必要があるが、周波数が離散的に変化するモードホップという現象が起こるとロックが外れて磁気センサの動作が止まってしまうため、長時間にわたり周波数ロックを維持することも実用性を高めるうえにおいて重要である。

しかしながら、光ポンピング磁気センサの研究には基本的に市販のチタンサファイアレーザーや分布反射型半導体レーザーが用いられてきた。そのため、磁気センサに最適化されたレーザー光源の開発はほとんどなされていないのが実情である。今後は単純な高感度化だけでなく、磁場の空間分布を効率よく測定するために多数のセンサヘッドを並列に並べる多チャンネル化が重要になると考えられる。そのためには、1 本のレーザーをチャンネル数だけ分けて使用する必要があるため、低レーザーパワーで高い感度を得られるかが重要になり、レーザー光源の安定性への要請も厳しくなる。

## 2. 研究の目的

本研究では、レーザー光源の周波数やパワーの安定性が及ぼす光ポンピング磁気センサの感度等への影響を明らかにするとともに、最適化されたレーザー光源を作製することにより磁気センサの感度や実用性 (多チャンネル化など) を向上させることを目的とする。

我々は原子泉一次周波数標準器 [3] のために、セシウム原子の共鳴線に長期間連続的に周波数ロックが可能な外部共振器半導体レーザー (ECDL) を開発した [4]。従来の ECDL と異なり、通常アライメント調整や共振器長制御のために用いるピエゾ素子や微調ネジなどの位置微調器具をあえて使わないことで機械的な安定性を高めるとともに、大気圧変動の影響を抑制するために筐体で密閉した。この ECDL は制御をかけないフリーランの状態でも周波数が安定するという特徴をもつため、active な周波数ロックにも有利であるばかりでなく、制御によって生じる出力パワーの変動も抑制できるはずである。この ECDL をベースにして光ポンピング磁気センサの光源を開発し、最適化する。

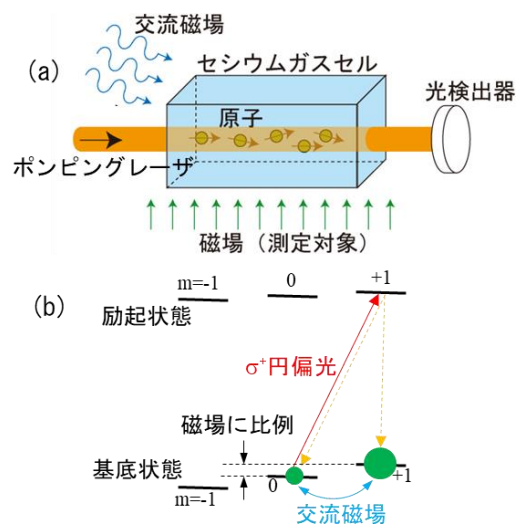


図1 光ポンピング磁気センサ  
(a)実験配置 (b)エネルギー遷移。

### 3. 研究の方法

本研究課題の申請時に予定していた研究方法を以下に示す。まず、セシウム D1 線に共鳴する波長 894 nm の ECDL を作製し、位相ノイズや強度の測定からパワースペクトル密度を導出して周波数やパワーの安定性を精密に評価する。その一方で、光ポンピング磁気センサの実験系を作製し、この ECDL を光源として適用する。既存の光源に比べて同じレーザーパワーでどの程度磁気センサの感度が上がるのかを実験的・理論的に調べる。具体的には、SQUID の検出感度であり脳磁観測に必要な感度でもある  $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  での 100 チャンネル同時観測を目指して ECDL を開発する。

実際には、光ポンピング磁気センサを作製したが、セシウムガスセルを温めるために用いたヒーターから生じる磁気ノイズが感度を悪化させた。ヒーターをオフにすれば、感度は  $2 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  に達したが、温度が下がるまでの数分間しか感度を持続できなかったため、さらなる高感度化が困難だった。ヒーターの代わりに温水を用いる方法を適用して光ポンピング磁気センサのノイズ除去に努めた一方で、原子泉一次周波数標準器 NMIJ-F2 における磁場の精密測定を行い、NMIJ-F2 の不確かさ評価の完成に寄与した[3]。

### 4. 研究成果

#### 4-1. 光ポンピング磁気センサの作製と感度の評価

光ポンピング磁気センサの実験系を作製し、磁場を測定した。光源として、バンドパスフィルタを用いて波長選択し、アライメントに鈍感なキャッツアイ配置を持つセシウム D1 線用の波長 894 nm の ECDL を作製した。ここで、レーザーのパッシブな周波数変動を抑制するために、位置微調器具を使わないことで機械的に安定させ、筐体で密閉して大気圧変動の影響を抑制した。なお、ECDL の周波数雑音は、位相計測アルゴリズムを FPGA に搭載したデジタル位相計[5]を用いて  $1 \text{ Hz}$  において  $30 \text{ kHz/Hz}^{1/2}$  と評価された。

図 2 に、磁気センサ部の写真を示す。光ファイバを通じてセシウム原子の D1 線に同調させたレーザーを導入し、10 torr の窒素をバッファガスとするセシウムガスセルに円偏光で照射した。十分なセシウム蒸気圧を得るために、ヒーターを用いてガスセルを約  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  まで温めた。そして、ガスセル透過後のレーザーを別の光ファイバを通じて磁気シールドから取り出し、フォトディテクタでパワーを測定した。環境磁場を遮蔽するための磁気シールドの中にこの磁気センサ部を入れ、ソレノイドコイルを用いて  $5 \text{ } \mu\text{T}$  程度の一様な静磁場（被測定磁場）をかけた。ここで、ヘルムホルツコイル（図 2 の rf コイル）を用いてガスセルに静磁場とは別の交流磁場を印加した。交流磁場の周波数が、被測定磁場に比例するセシウム原子のラーモア周波数に同調するとガスセルによるレーザー吸収量が最大となる。交流磁場には周波数変調をかけておき、ロックインアンプを用いてフォトディテクタの信号を復調することによりラーモア周波数  $f_L$  がわかり、それに比例する静磁場が  $B/nT = f_L/3.5$  により与えられた。

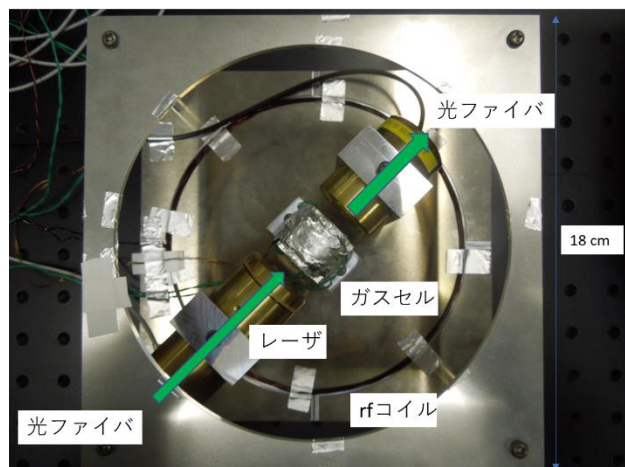


図 2 磁気センサ部

図 3 (a) に交流磁場の周波数に対する信号を示す。分散曲線が得られており、ゼロクロスする周波数がラーモア周波数である。ラーモア周波数において測定されるノイズと分散曲線の傾きから、磁場測定のノイズを導出した。図 3 (b) に、磁場測定のノイズのパワースペクトル密度を周波数の関数として示す。このパワースペクトル密度から、磁場測定の感度は  $1 \text{ Hz}$  から  $500 \text{ Hz}$  までの周波数帯域において  $2 \text{ pT/Hz}^{1/2}$  と見積もられた。

本研究により、光ポンピング磁気センサと感度評価系の構築を完了することができたので、今後の感度向上に貢献することになるだろう。

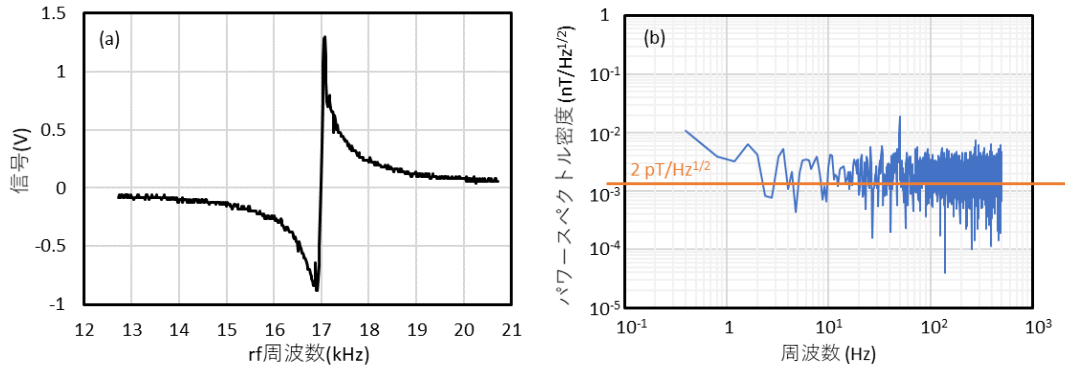


図3 光ポンピング磁気センサにおける (a) 交流磁場の周波数に対する信号、および (b) ノイズのパワースペクトル密度。

#### 4-2. NMIJ-F2 における磁場の精密測定

原子泉一次周波数標準器の通常の周波数測定においては、セシウム原子の基底状態の  $F = 3$ ,  $m_F = 0$  と  $F = 4$ ,  $m_F = 0$  の間の遷移周波数に共鳴するマイクロ波を照射し、ラムゼー共鳴信号を得て、中心のフリンジの最大値にマイクロ波の周波数をロックする。磁場測定においては、基底状態の  $F = 3$ ,  $m_F = +1$  と  $F = 4$ ,  $m_F = +1$  の間の遷移周波数を用い、同様にマイクロ波の周波数をロックする。磁気副準位  $m_F = +1$  には 1 次ゼーマン効果による周波数シフト  $\delta f_1$  が生じ、 $\delta f_1$  を係数  $7008.4 \text{ Hz}/\mu\text{T}$  で割ることにより磁場が与えられる。

ECDL を光源としたレーザを 6 方向から照射して光モラセスを生成し、上下方向のレーザの周波数を制御することにより、セシウム原子を上方に  $1.08 \text{ m}$  打ち上げる。2 つのマイクロ波共振器が光モラセスから  $0.59 \text{ m}$  上方 (状態選択共振器) および  $0.69 \text{ m}$  上方 (ラムゼー共振器) に設置されている。状態選択共振器におけるマイクロ波照射と上方からのレーザ照射によって  $F = 3$ ,  $m_F = +1$  の状態を選択する。そして、原子はラムゼー共振器においてマイクロ波照射を受けた後、重力によって速度を downward に変え、再びラムゼー共振器においてマイクロ波照射を受け、ラムゼー共鳴が得られる。 $F = 4$ ,  $m_F = +1$  への遷移確率は共鳴レーザの照射による蛍光観測により測定され、遷移確率が最大となるようにラムゼー共振器のマイクロ波周波数にフィードバックされる。水素メーザの周波数をリファレンスとして、マイクロ波周波数を 4 日間連続的に測定し、磁場の変化を観測した。

図 4 に、約  $200 \text{ nT}$  の磁場の変動分の時間変化を示す。磁場変動を  $1 \text{ pT}$  以下の精度で測定した。日周変動が観測されているが、 $40 \text{ pT}$  以下であることが確かめられた。この結果から、原子泉の主要な周波数シフト要因の一つである 2 次ゼーマン効果に関して、磁場の日周変動による周波数シフトが  $2 \times 10^{-17}$  以下であることが確かめられた。この結果は NMIJ-F2 の不確かさ評価の完成に大きく寄与した。

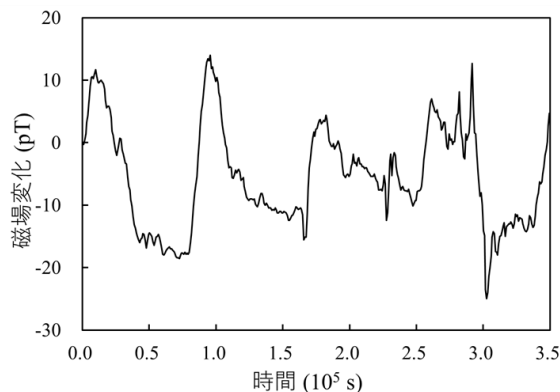


図4 NMIJ-F2 における磁場変動の時間変化[3]

- [1] E. Boto et al., *NeuroImage*, **149**, 404-414 (2017).
- [2] D. Budker and D. F. J. Kimball, *Optical Magnetometry*, Cambridge University Press, 2013.
- [3] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, and K. Hagimoto, *Metrologia*, **59**, 035004 (2022).
- [4] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, and T. Ikegami, *Applied Physics Express* **9**, 032704 (2016).
- [5] W. Kokuyama, H. Nozato, and T. R. Schibli, arXiv:2009.01137 (2020).

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Takamizawa Akifumi、Yanagimachi Shinya、Hagimoto Ken	4. 巻 59
2. 論文標題 First uncertainty evaluation of the cesium fountain primary frequency standard NMIJ-F2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 035004 ~ 035004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/ac5e7b	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高見澤昭文、柳町真也
2. 発表標題 小型原子時計のためのセシウムD1線の外部共振器半導体レーザの開発
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------