

カリウム原子光ポンピング磁力計の作成と磁気感度評価

Construction and Evaluation of Magnetic Field Sensitivity for Optical Pumped Potassium Atom Magnetometer

○梅川英之, 柳村提亮, 大坊真洋

○Hideyuki Umekawa, Daisuke Yanagimura, Masahiro Daibo

岩手大学工学部

Faculty of Engineering, Iwate University

キーワード： 磁気計測 (magnetic measurement), 光ポンピング (optical pumping), カリウム (potassium)
歳差運動 (precession), 電子スピン (electron spin)

連絡先： 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部電気電子工学科大坊研究室
大坊真洋, Tel: (019)621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

微小磁場の計測技術は産業や医療, 科学研究など幅広い分野で応用されている重要な技術である. 現在実用化されている中で最も高感度な磁力計は SQUID 磁力計であり, 我々が知る限りでは, 超伝導コイルと結合された状態において $0.08 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の磁気感度が報告されている¹⁾. この磁気感度は既存の磁気計測技術の中でも突出しており, 従来の微小磁気計測においては他の選択肢が存在しなかった.

しかし, SQUID を最も高い感度で動作させるには高価な液体ヘリウムを利用して極低温に冷却する必要があるため, 動作維持に高いコストがかかる. また, SQUID は静電気に弱く, 非常に壊れやすいため取り扱いが難しいという問題点もある.

そこで我々は SQUID 磁力計に代わる可能性を持つ高感度磁力計として, カリウム原子を利用した光ポンピング磁力計について研究を行っている.

光ポンピング磁力計は M. V. Romalis らの研究グループにより, 準静的な磁場 (10-150Hz) に対して $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下²⁾, RF 磁場 (99kHz) に対して $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の磁気感度の実現が報告されている高感度磁力計であり³⁾, 理論的には $0.01 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の磁気感度が実現可能であるとされている.

本研究においては, 実際にカリウム光ポンピング原子磁力計を作成し, その動作確認ならびに磁気感度向上のための基礎データの測定を行った. また, 測定したデータに基いた条件下において, 5 kHz の交流磁場に対してサブピコテスラの磁気感度を実現したので, 以下にその概要を報告する.

2. 光ポンピング原子磁力計の原理

光ポンピング原子磁力計は K, He, N₂ を封入したガラスセル, ポンプレーザー, プローブレーザー, プローブレーザーの偏光度を測定するシステムにより構成されている. 図 1 に実際の構成図を示す.

ガラスセルはベークライトにより作成した断熱容器内部で 200 °C 程度に熱する。磁気シールド内のコイルにより静磁場が発生すると、K 原子中の電子の磁気モーメントは静磁場の向きを軸として歳差運動を始める。1/4 波長板によって直線偏光から円偏光へ変換し、波長を吸収波長に一致させたポンプビームを静磁場と平行な y 軸方向からセルへ入射し、電子を選択的に励起することにより電子スピンの向きを揃える(光ポンピング)⁴⁾。さらに、x 軸方向より直線偏光のプロブビームを入射し、セルを透過したプロブビームは 1/2 波長板を利用する事により、偏光ビームスプリッターで分離される s 偏光成分と p 偏光成分が等しい光強度となるように調節する。

この状態で、静磁場と垂直な z 軸方向から信号用コイルを用いて交流磁場を印加すると、電子は磁気モーメントの横スピン成分を持つ。この横スピン成分との相互作用により、直線偏光のプロブビームの偏光状態が変化する。これにより偏光ビームスプリッターで分離される s 偏光成分と p 偏光成分の光強度に差が生じ、その差分を増幅した信号が差動増幅器より出力される事となり、結果として印加された交流磁場の情報を知ることが可能となる。

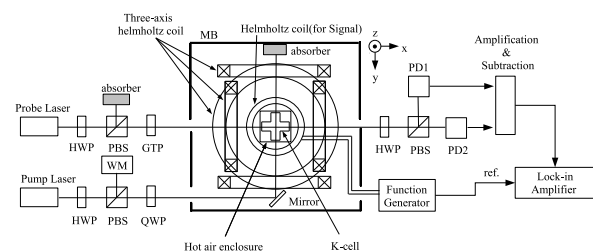


図 1 光ポンピング原子磁力計の構成図

3. 周波数スペクトルの観測

作成した磁力計の動作を確認するために、信号用磁場を印加せず、y 軸方向へ印加する静磁場強度を様々な値に変化させながら、スペクトルアナライザを用いて観測した周波数スペクトルを図 2 に示す。なお、 B_y は y 軸方向に印加されている静磁場強度であり、 $B_y=0$ [T] は地磁気を打ち消した状態を表している。

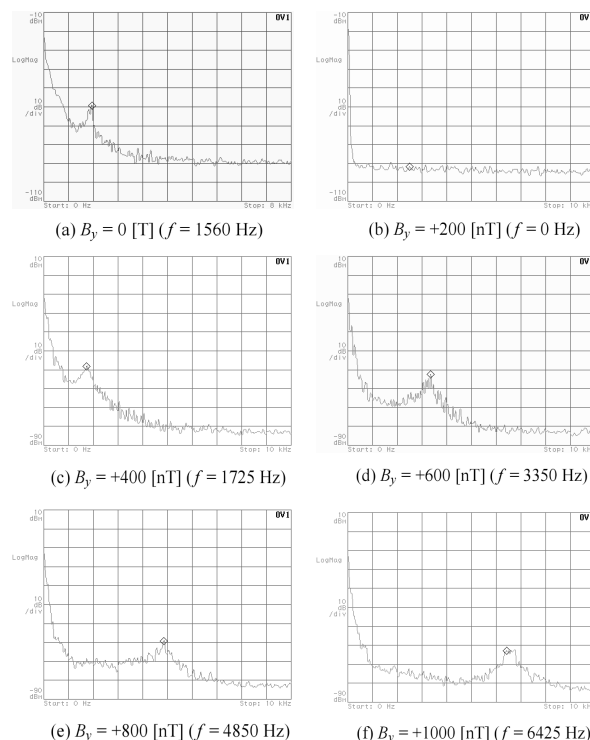


図 2 周波数スペクトルの変化

図 2 (b)~(f) の周波数スペクトルを比較すると、印加する静磁場強度が大きくなるに従い、スペクトルのピークが高周波側へシフトしている事が分かる。

また、 $B_y = -200$ nT を印加している図 2(a) と $B_y = +200$ nT を印加している図 2(c) においては、スペクトルのピークがほぼ等しい周波数に存在しているため、周波数は静磁場の向きによらず、静磁場強度だけに依存していると考えられる。これらの特性は電子の歳差運動周波数 f を導く式 (1) を満足させる³⁾。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{g_s \mu_B}{2\pi\hbar(2I+1)} B \quad (1)$$

ここで、 g_s は電子の g 因子、 μ_B はボーア磁子、 I は原子の核スピン量子数、 B は印加する静磁場強度を表している。

図 2 より得られた実測値と式 (1) より計算した理論値の比較を図 3 に示す。この結果より、図 2 における静磁場強度と周波数の間には比例関係が成り立っている事が分かり、スペクトルのピークのシフトは歳差運動周波数に依存していると考えられる。

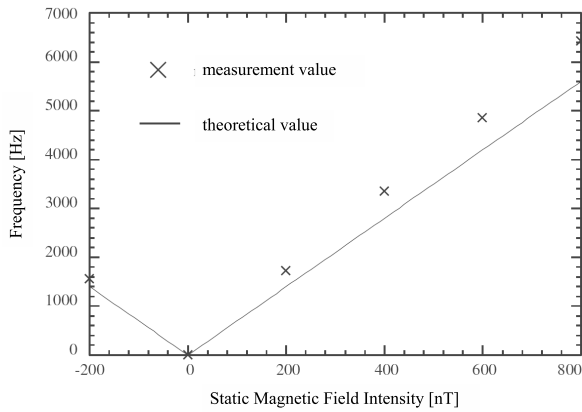


図3 印加静磁場 B_y と周波数の関係

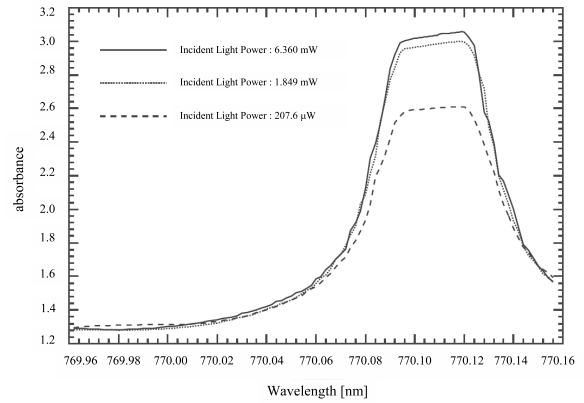


図4 カリウムセルの吸収スペクトル

4. 基礎データの測定

4.1 吸収スペクトルの測定

我々の光ポンピング原子磁力計においては、 K 原子を D_1 共鳴線を利用して励起するために 770.1 nm 付近の波長のレーザー光が必要である⁵⁾。そこで、 K 原子を効率的に励起するための最適波長を調べるために吸収スペクトルを測定した。

吸収スペクトルの横軸はビーム波長、縦軸は吸光度 A に対応しており、吸光度 A は

$$A = \log_{10}(I_0/I) \quad (2)$$

で定義される。ここで、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度を表している。

図4は入射光強度を変えて測定した吸収スペクトルを表しており、この測定においては直線偏光のレーザー光を利用した。図4より、入射光強度が大きいほど吸収波長付近における吸収が大きいことが分かり、これはビーム強度が大きいほど電子を励起する効率が良い事を表していると考えられる。

また測定結果より、吸光度が最大となるレーザー波長は、入射光強度に関わらずおよそ 770.119 nm である事が分かった。従って、我々の作成したガラスセルにおいて、 K 原子の D_1 共鳴線を利用して効率的に励起を行うために最適なレーザー波長は 770.119 nm であると考えられる。

4.2 ポンプビーム強度と磁場感度

ポンプビーム強度は、ポンプビームによって励起する事ができる電子数に関わる重要なパラメータである。図5にポンプビーム強度とロックインアンプにより検知された信号の関係を示す。この図から、ビーム強度が 10 mW 以下の場合には信号の値が不安定であり、特に 2 mW 以下では信号がほとんど検出できていない事が分かる。これは、特定のポンプ強度以下においては電子のスピンの十分に偏極されないため、磁力計として動作しない事を示している。

また、この図よりポンプビーム強度が大きくなるに従い、測定値の変動が小さくなり、得られる出力電圧も大きくなっている事がわかる。このことから、ポンプビームの出力を増大する事による磁気感度の向上が期待できる。

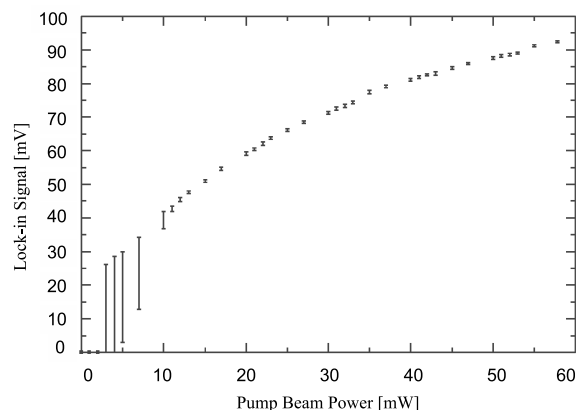


図5 ポンプビーム強度とロックインアンプ信号

4.3 各種パラメータの変化と磁気感度

磁気感度に影響すると考えられる他のパラメータを変動させた場合のロックインアンプ出力電圧の変化を測定した。それぞれのパラメータについて、本実験構成において最大の出力電圧を得られた値を表 1 に示す。ポンプビーム強度やプローブビーム強度に関しては、それぞれのレーザーで実現できる最大強度において出力電圧が最大となった。ポンプビーム波長は D_1 共鳴線における吸収波長を一致させた場合に出力電圧が最大となり、一方、プローブビーム波長は可能な限り吸収波長からデチューニングした場合に最大の出力電圧を得られた。また、セルを暖める熱風の温度は、我々の用いているヒーターで実現可能な最大温度である $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の場合に出力電圧が最大となった。なお、ビーム強度やプローブ波長のデチューニング、熱風温度に関しては最適とは言えず、適正值にする事でより感度が向上すると考えられる。

表 1 最大出力電圧を得る条件

測定パラメータ	
ポンプビーム波長	770.119nm
ポンプビーム強度	73.1mW
プローブビーム波長	770.161nm
プローブビーム強度	9.0mW
熱風温度	220 $^{\circ}\text{C}$

5. 磁気感度限界の測定

表 1 に示された条件下において、 5 kHz の微小な交流磁場を印加した場合に得られたロックインアンプの出力電圧を図 6 に示す。この図より、印加磁場強度とロックインアンプ信号の間で、少なくとも 10^{-7} ~ 10^{-12} T の 5 桁にわたり線形性が保たれている事が分かり、 10^{-12} T (1 pT) 以下においても、雑音の影響は存在するが、線形性が表れている事を見て取れる。この結果より、我々の作成した磁力計がサブピコテスラの磁気感度を有している事が実証された。

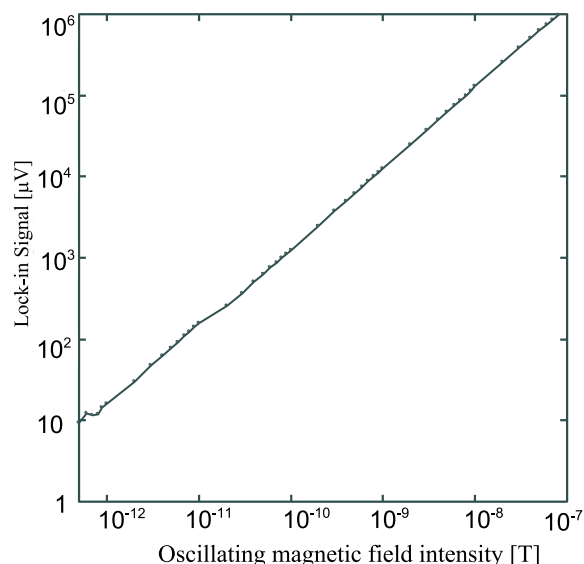


図 6 磁気感度限界の測定

6. まとめ

カリウム光ポンピング原子磁力計を製作し、その動作確認を行った。また、磁力計の感度を向上させるため各種パラメータの磁気感度への影響を調べ、 5 kHz の交流磁場に対してサブピコテスラの磁気感度を得た。

今後はガラスセルに封入する K , He , N_2 の最適な圧力の決定やバイアス磁場による磁場環境の最適化、雑音対策を施す事により、磁気感度の向上を目指す。また、更なる応用として、磁場分布を画像化する研究へと発展させる予定である。

参考文献

- 1) H. C. Seton, J. M. S. Huchison, and D. M. Bussell : IEEE Trans. Appl. Supercond.7-3213,1/12(1997)
- 2) I.K.Kominis, T.W.Kornack, M.V.Romalis: Nature, 422-10, 1/4 (2003)
- 3) I.M.Savukov, S.J.Seltzer, M.V.Romalis : Phys. Rev. Lett. 95-063004, 1/4 (2005)
- 4) 平野 功: 原子・光・磁気の解析—その成り立ちと発展の軌跡—, 技報堂出版, 87/94 (2004)
- 5) Thomas Whitmore Kornack : A Test of CPT and Lorentz Symmetry. Using a K-3He Co-magnetometer, 21/23 (2005)