

原子磁力計による高感度金属検出機の開発

Development of high-sensitive metal detector using atomic magnetometer

○高橋俊也*, 正路裕也*, Saenyot Khanuengchat*, 大坊真洋*

○Shunya Takahashi*, Yuya Shoji*, Saenyot Khanuengchat*, Masahiro Daibo*

* 岩手大学大学院

*Iwate University Graduate School

キーワード： 光ポンピング原子磁力計 (Optical pumping atomic magnetometer),
非破壊検査 (Non-destructive testing), 金属検出機 (Metal detector)

連絡先： 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工 大坊研究室
大坊真洋, Tel.: 019-621-6983, Email: daibo@iwate-u.ac.jp

1 はじめに

近年、電子部品の製造過程や食品の製造過程において金属粒子の異物混入が問題となっている。例として、我々の生活に欠かせない電子部品であるリチウムイオン電池への金属粒子混入が挙げられる。リチウムイオン電池はスマートフォンやノートパソコンをはじめ、電気自動車、家庭用太陽光発電電力を自家消費するための小型蓄電池としても採用が増えている。しかしながら、普及が進む中においても、未だリチウムイオン電池の信頼性には不安を抱えている。その一因として挙げられているのは金属粒子の混入であり、それを核にして金属イオンから析出し、より大きな金属粒となり、やがて異常発熱や発火を引き起こすことが問題となっている¹⁾。

異物混入は、電子部品の製造過程だけではなく、食品産業においても大きな問題となっている。食品原料の輸入時点で異物が付着している場合や、機械の経年劣化による部品の一部が欠けて混入することがある。異物混入は企業の大きなイメージダウンに繋がりがかねないため、X線異物検出機や磁気センサを搭載した金属検出機を用いて製造過程における金属粒子の異物混入の発見に力を入れている。しかしながら、X線異物検出機は、X線を使用し食品を透視することで金属以外にもガラスや樹脂などの異物を発見することが可能であるものの高価かつ大型である。このような背景に

より、金属粒子の異物検出に価格が安く比較的小型な磁気センサを搭載した金属検出機の重要性がさらに高まっている²⁾。

粒子径の小さな金属粒子から発生する磁場は、磁性体もしくは渦電流であっても、いずれも非常に微弱であり、これらの異物を発見するためには高感度の磁気センサが求められる。微弱な磁場検出には、SQUID(Superconducting QUantum Interference Device) 磁力計が筆頭であったが、超伝導効果を用いるため冷却に大量の液体ヘリウムを必要とし、ランニングコストが高く小型化にも向いていない。そこで我々は、SQUID 磁力計に代わる高感度磁気センサとして、光ポンピング原子磁力計を金属検出機に応用した。光ポンピング原子磁力計は円偏光ビームによるアルカリ金属原子のスピンの偏極を利用した高感度磁気センサであり、SQUID 磁力計の報告されている最高感度を理論上上回ると報告されている³⁾。また光ポンピング原子磁力計は、アルカリ金属を封入したガラスセルを100度～200度程度に暖めれば動作可能なため、ランニングコストを抑えることができるといったメリットがある。この特徴から産業や科学研究のみならず医療分野などの様々な分野での応用が期待されている。本研究では光ポンピング原子磁力計の高感度を活かし、数百 μm から数 mm の金属試料検出のための高感度金属検出機を開発することを目的とする。

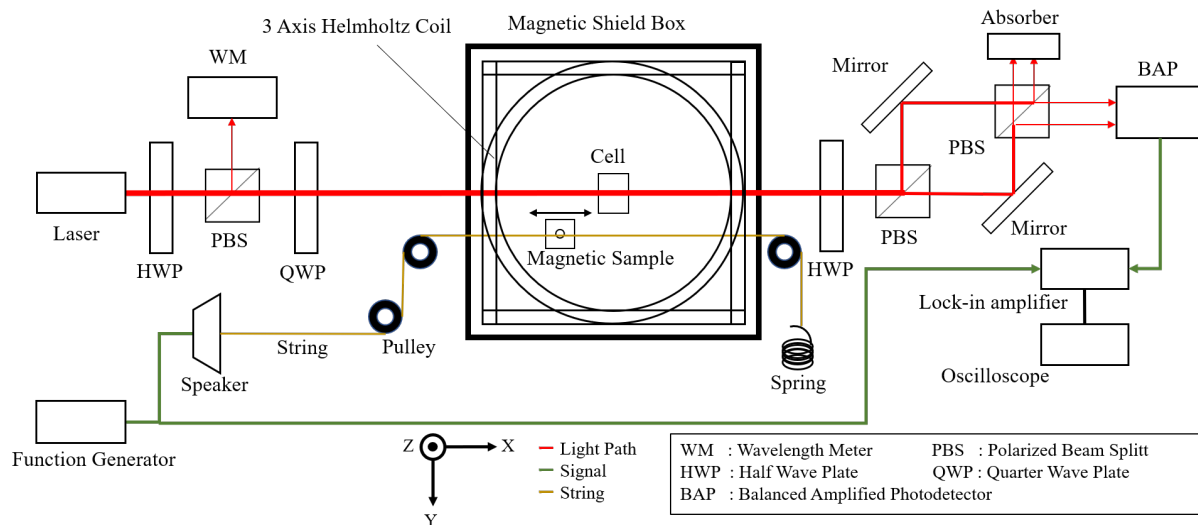


Fig. 1 Block diagram of small magnetic sample detection system.

2 実験装置

Fig. 1 に光ポンピング原子磁力計による金属試料検出システムのブロック図を示す. このシステムは, 高感度に磁気信号を検出する光ポンピング原子磁力計と, 金属試料を振動させる加振部の 2 つに分けられる. 光ポンピング原子磁力計のガラスセルの付近で金属試料を振動させ, 同期検波することにより, 雑音に埋もれた金属試料が発生する微弱な繰り返し磁気信号 (交流) の検出が可能となる.

2.1 光ポンピング原子磁力計

我々の光ポンピング原子磁力計は, Rb, He, N₂ を封入したガラスセル, 半導体レーザー, 加熱レーザーシステム, レーザの偏光度を測定するシステムにより構成されている. 磁気シールドボックス内部にある 3 軸ヘルムホルツコイルの中心にアルカリ金属などを封入したガラスセルを SiC プレート上に固定しアラミド繊維の紐で吊るす. SiC プレートを加熱用レーザーを使って加熱し, ガラスセルの表面温度を非接触計測して, PID 制御により設定温度に維持する. 加熱によりガラスセル内の Rb 原子を高密度の蒸気にした状態で磁気シールドボックス内部の 3 軸ヘルムホルツコイルを使い二次高調波成分を用いたゼロ磁場校正方法によって測定する空間の磁場を絶対ゼロ磁場に校正した⁴⁾. 次に, 楕円偏光のレーザー光をガラスセルに入射させた. 楕円偏光の円偏光成分は, 光ポンピングとして機能し, 直線偏光成分は, 磁場を計測するプローブ光として機能する⁵⁾. なお, 一つのビームでポンピングとプロービングを実現するために, 波長はルビジウムの D₂ 線よりも, わずかにディチューニングした. ヘルムホルツ

イルで交流磁場を印加するとアルカリ金属原子にトルクが生じ, 原子のスピンの傾く. それに伴い, プローブ光の旋光が生じる. これを PBS で p 偏光と s 偏光に分ける. それらの差動信号をフォトダイオードにより光から電流に変換し, 増幅し電圧として出力している. 結果として交流磁場の情報を得ることができる^{6, 7, 8)}.

2.2 加振部

光ポンピング原子磁力計の磁場検出部分であるガラスセル付近で金属試料を振動させ雑音に埋もれた微弱な繰り返し磁気信号 (交流) を検出するには, 光ポンピング原子磁力計を高感度な動作点に設定する必要がある. まず, 磁気シールドボックス内部を 3 軸ヘルムホルツコイルを用いて適切な直流磁場を印加し, ゼロ磁場環境にする. 金属試料を振動させるためにモーターや加振器などの磁場を発生するものを磁気シールドボックス内部に置くと磁気シールドボックス内部のゼロ磁場環境を保つことができない. そこで加振部であるスピーカーは磁気シールドボックスの外部に置き, スピーカーに接続した紐を磁気シールドボックス内部に通し, 端部を磁気シールドボックス外部にあるバネに接続することにより金属試料を振動させる.

光ポンピング原子磁力計で計測される磁気信号は, 距離の増加に伴い急激に減衰するため, 高い S/N 比で計測するには, 光ポンピング原子磁力計のガラスセルに可能な限り近い距離で金属試料を振動させる必要がある. また, 金属試料を交換する度に, 位置が変わらないよう取り付け必要がある. 常に同じ位置や高さに金属試料を取り付けるために 3D プリンタを用いて

ABS樹脂製のケースを作製した。Fig. 2に金属試料を固定するためのケースの写真を示す。まず②のケースとアラミド繊維の紐を接着剤で固定する。次に、①のケースに金属試料を挿入し、ケース内で金属試料が動かないよう固定をする。この2つのケースを絶縁テープで重ねることで金属試料を交換しても常に同じ位置に設置できるようにした。Fig. 3にガラスセルと金属試料の位置の図を示す。

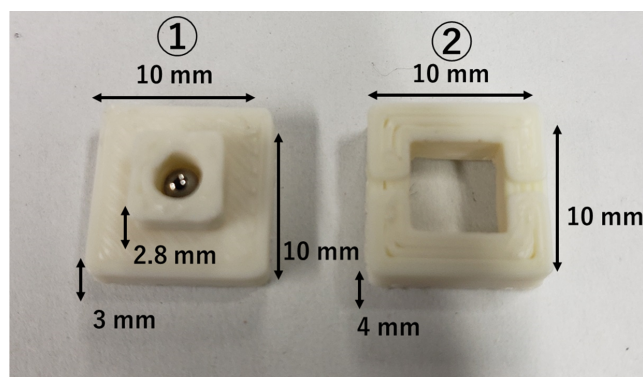


Fig. 2 Case made by a 3D printer.

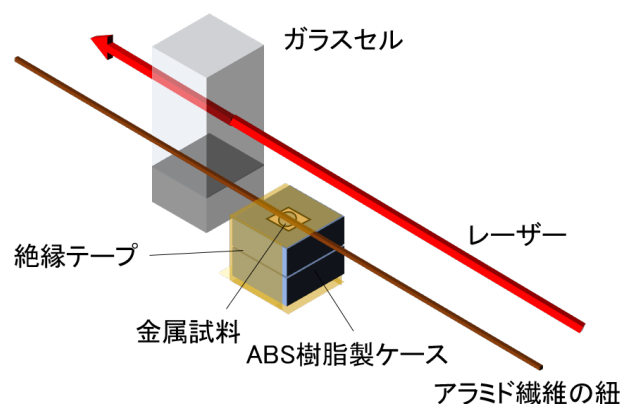


Fig. 3 Illustration of the position of the glass cell and small magnetic sample.

3 実験方法

光ポンピング原子磁力計で測定可能な金属試料の最小径を調べるために、鉄球 (SUJ2) とステンレス球 (SUS304) の直径を変え、それぞれの試料が発生する磁場の計測を行った。まず、光ポンピング原子磁力計のセル温度、レーザー波長、光パワーを調整し、磁気シールドボックス内部を3軸ヘルムホルツコイルによって

ゼロ磁場環境にした。次に、システム全体のノイズを調べるために金属試料を挿入していない各直径ごとのケースを4 mmの振幅で光ポンピング原子磁力計のガラスセルから7 mm~11 mmの距離で振動させた。その時のノイズレベルの振幅と位相をロックインアンプで同期検波して計測した。最後に、金属試料を挿入したケースを、ノイズを調べたときと同様にガラスセルから7 mm~11 mmの距離で振動させた。金属試料が発生する磁気信号の振幅と位相をロックインアンプで同期検波して計測した。実験条件の各パラメータの値の詳細をTable1に示す。

Table 1 Configuration parameters of the optical pumping atomic magnetometer and vibration system.

各パラメータ	値
セル温度	211 度
レーザー波長	780.003 nm
光パワー	2.38 mW
金属試料の振動振幅	4 mm
金属試料の振動周波数	9 Hz
ガラスセル壁からの距離	7 mm~11 mm
使用する金属試料 (ネオジム磁石で着磁)	$\phi 0.3 \sim \phi 1.5$ (SUJ2), $\phi 0.5 \sim \phi 1.5$ (SUS304)

4 実験結果

Fig. 4に鉄球とステンレス球のそれぞれの直径を変えたときの実験結果を示す。縦軸は信号 [dB]、横軸は直径 [mm](対数目盛)を表す。グラフの赤線は鉄球の実験結果を、青線はステンレス球の実験結果を示す。黒色の破線は金属試料を挿入していないケースのみを振動させたときのノイズである。緑色の破線は、光ポンピング原子磁力計本来のノイズを表す。実験結果より直径 0.5 mm 以上の鉄球、および直径 0.6 mm 以上のステンレス球の信号が検出できた。直径 0.4 mm 以下の鉄球、および直径 0.5 mm のステンレス球の信号は、本システムのノイズ付近であった。直径 1 mm 以上の鉄球の信号が変化していないのは、鉄球が発生する磁場が強すぎて光ポンピング原子磁力計が飽和しているためだと考える。また光ポンピング原子磁力計本来の

ノイズが-107 [dB] に対し、-84.5 [dB] までノイズが上昇している。得られた実験結果と光ポンピング原子磁力計本来のノイズから概算すると、測定可能な鉄球の最小径は直径約 200 μm となる。

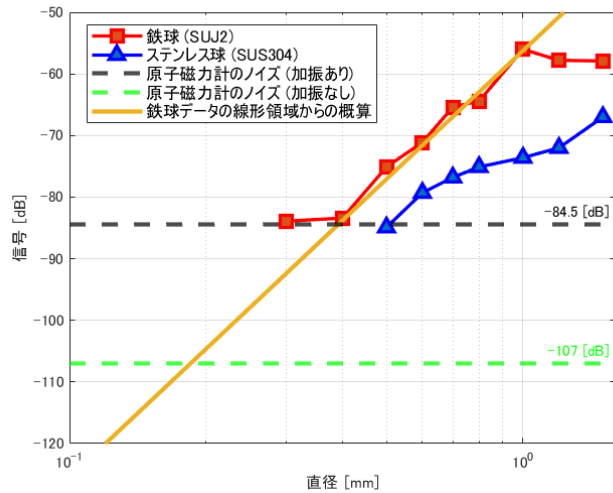


Fig. 4 The relationship between the sample diameter and the signal.

5 結論

光ポンピング原子磁力計を用いることにより、直径 0.5 mm の鉄球および直径 0.6 mm のステンレス球の磁気信号を検出することができた。この検出感度は、測定条件や使用環境によるが、市販の高感度金属検出機の感度と比較して同等の感度であった。原子磁力計の感度が高いのにも関わらず、従来の金属検出機と同等の感度になった理由は、同期検波のための振動が光学系に伝達して発生してしまう機械的ノイズと磁気シールドボックスが揺れることで生じる磁気ノイズが混入し、ノイズが 22.5 [dB] ほど上昇しているためだと考える。試料由来の磁気信号以外の環境ノイズを低減し、原子磁力計本来のノイズでシステムを動作させると直径約 200 μm の鉄球が発生する磁場を測定することができる。この感度は、従来の金属検出機よりも高感度である。したがって、光学系や磁気シールドボックスを振動させてしまう機構を改善をする必要がある。

参考文献

- 1) 神山 敦: リチウムイオン電池の信頼性と安全性について, REAJ 誌, 40-4 (2018)
- 2) 金井 貴志: 異物検出機の原理と適切な運用方法, アンリツテクニカル, 89, 44/52, (2014)
- 3) I. K. Komiunis, T. W. Kornack, J. C. Allred and M. V. Romalis: A subfemtotesla multi-channel atomic magnetometer, Nature, DOI: 10.1038/nature01484, 422, 596/599 (2003)
- 4) K. Saenyot, Y. Shoji, S. Takahashi and M. Daibo: Zero Magnetic Field Calibration for Single-Beam Atomic Magnetometers Using Second Harmonics, IEEE Magnetics Letters, 10, DOI:10.1109/LMAG.2019.2944804 (2019)
- 5) M. Daibo et al: Atomic Magnetometer Pumped by Elliptically Polarized Single Laser Beam and Miniaturization by using the Microelectromechanical System, BIT' s 3rd Annual World Congress of Smart Materials, 133, Proc. AVANI Riverside Bangkok Hotel, Bangkok, Thailand (2017)
- 6) M. Daibo: Ultrahigh sensitivity magnetic field measurement by optically pumped atomic magnetometer, The 1st Joint International Symposium of Iwate University (IU) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMILT), Iwate University, Morioka, Japan (2017)
- 7) K. Otowa, M. Daibo: An atomic magnetometer realized by in situ decomposing rubidium azide using a femtosecond laser in a cell fabricated by MEMS technology, The 1st Joint International Symposium of Iwate University (IU) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMILT), Iwate University, Morioka, (2017)
- 8) Y. Shoji, S. Khanuengchat, S. Takahashi and M. Daibo: DC-Bias-Magnetic-Field Dependence of Step Response in an Elliptically Polarized Single-Beam Atomic Magnetometer, 2020 8th International Electrical Engineering Congress, Chiang Mai, Thailand (2020)