

リチウムイオン電池の発火原因となる極微小金属粒を 高感度で検出する装置の開発

Development of Metallic Micro-contaminant Detection System for Lithium Ion Battery

2171902



研究代表者
(成金受領者)
共同研究者

豊橋技術科学大学
ニッカ電測株式会社

教授 田中三郎
研究員 大谷剛義

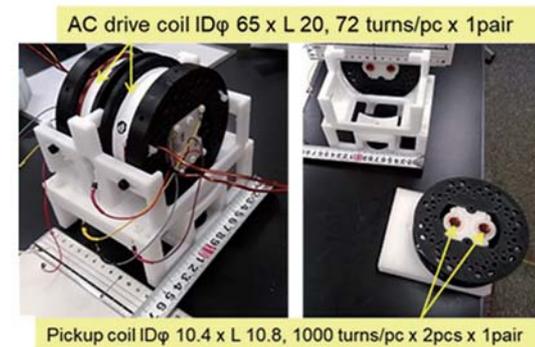
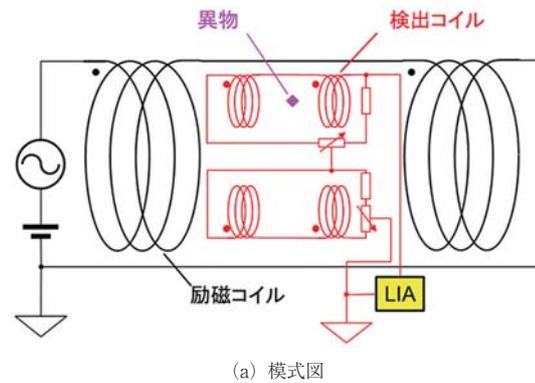
[研究の目的]

近年、リチウムイオン電池など高性能2次電池におけるマイクロオーダーの極微小金属異物の混入が原因で火災となる事故が発生し、安全を脅かしている。これを検出する技術が存在せず、世界中で求められている。本研究はこれまで不可能であった電池用セパレータ（絶縁材）内の金属異物を高精度で検出できる技術を確立し、人間と機械の調和を促進し、高性能検査装置を創成することを目的とした。

[研究の内容, 成果]

1. 検証機の試作・検討

微小な金属異物の磁化応答と渦電流応答を識別するため、検出コイルの出力をロックインアンプ（LIA）で読み取ることができる実験系を構築した。また、励磁磁界の影響とノイズを低減ねらい、差動型検出コイルとした。図1に実験系の模式図および外観写真を示す。検証機では和動型検出コイルを2対作製し、1対の励磁コイルのギャップ間にコイル中心軸に対称となるように各和動検出コイルを配置。各和動コイルは、励磁コイル軸に直交するギャップ中心面に対し対称となるように配置された。実験系で使用される各コイルは、式(1)に示すとおり、



(b) 外観写真
図1 コア無し検証機

強い励磁磁界にするため巻き数を多くするほど、また、励磁コイルの断面積 S_m を広くするほど、コイルのインダクタンス L とキャパシタンス C （主に線間容量）が増大する。長岡係数を K とし、励磁コイルの長さを l_m とすると、励磁コイルのインダクタンス L_m を一般式（ソレノイドコイル）で示すと、

$$L_m = \frac{K_m \mu_0 \mu_s}{l_m} S_m N_m^2 \quad (1)$$

と表すことが出来る。実際には、長岡係数を用いた一般式で近似しないため、Lyleの近似式 [T. R. Lyle: Phi. Trans. 213A (1914) 421] を用いて計算した。

2. 異物サンプルの応答確認

異物サンプルとして、一般的なサーチコイル式金属検出器の標準試験片である鋼球 $\phi 2.5$ mm と SUS304 球 $\phi 2.5$ mm, アルミニウム球 $\phi 3.0$ mm, 日本検査機器工業会の X 線検査機用標準試験片の SUS304 ワイヤ $\phi 0.2$ mm x L5 mm を測定した。本研究では、磁性・非磁性金属を検出することが目的であるため、SUS304 ワイヤ $\phi 0.2$ mm x L5 mm を測定したときの差動検出コイルの出力波形を図 2 に示す。測定条件は、 $H_{dc} = 0$ mT/ μ_0 , $H_{ac} = 8.768$ mT_{rms}/ m_0 @ 1009 Hz (2.07 A_{rms}), コイルギャップ 7.3 mm とし、長さ方向と検出コイルの中心軸方向を合わせて測定した。図に示した時間波形から、SUS304 ワイヤ $\phi 0.2$ mm x L5 mm の信号変化は、シャント抵抗出力 (磁界: 桃色) 位相から $4/\pi$ 程度進んだ位置にピークがみられる。この結果から、磁化応答と渦電流応答が共に発生しているがわかる。磁界波形が正弦波に近い波形であるのに対し、異物有の波形 (赤線) は尖形になっていることから、異物の磁化応答がヒステリシスを持つことがわかる。

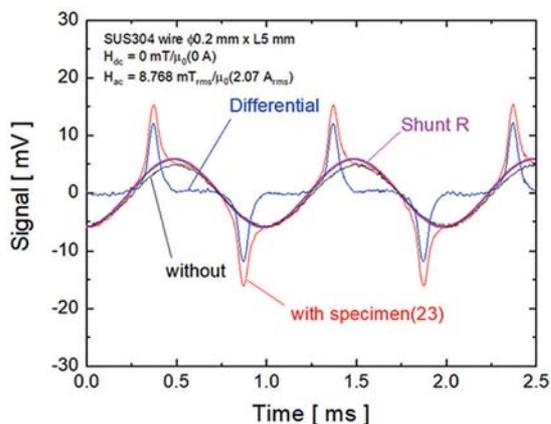


図 2 異物信号

3. コア付き検証機

3.1 設計・作製

励磁コイルにコアを用いることでコイル内部の磁束密度を高めることができ、同じ電流を流せば磁束密度を高めることができる。また、検出コイルも同様に、コアを用いることでコイルの内部磁束が高まり、磁束の変化量が増し、検出コイルの誘導起電力が増加する。そこでカットコア材の選定にあたり、高い絶縁性特性 Ni-Zn フェライトと PC パーマロイ丸棒・アモルファス箔積層から、コア内の渦電流の発生が比較的少なく、形状寸法がマッチし入手可能な日本カットコアトランス(株)製 アモルファス箔 (日立金属(株)のファインメット FT-3M) 積層カットコア SC-8 を採用することとした。基本模式図を、図 3 に示す。作製にあたり、金属異物検査装置では、近傍で金属部材が使用されていると、漏洩磁界によりノイズとなる恐れがある。そこで、HIPS (耐衝撃性ポリスチレン) を採用し 3D プリンタ (Zortrax M200) で主要部材を印刷した。また、強い励磁磁場とするために、コア間に強い吸着力が生じる。そのため、固定用には、強い締結力で締め付けることができ、高せん断性を持つ RENEY (ポリアミド樹脂系) などの高強度樹脂ネジを用いた。

3.2 磁性金属の検出

コア付き検証機においても、空芯同様に磁性金属異物の体積に比例する信号強度が得られるかどうかを検証した。測定結果を図 4 に示す。

コアギャップは 6.0 mm とした。図に示すよ

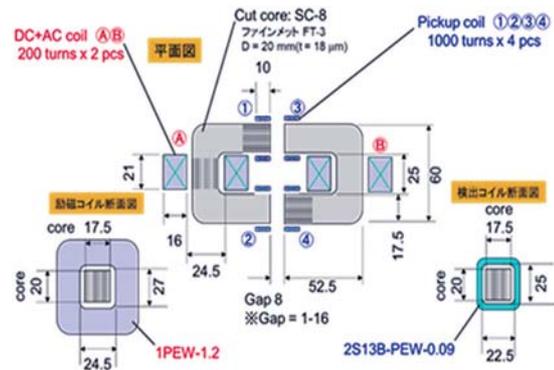


図 3 コア付き検証機検出部模式図

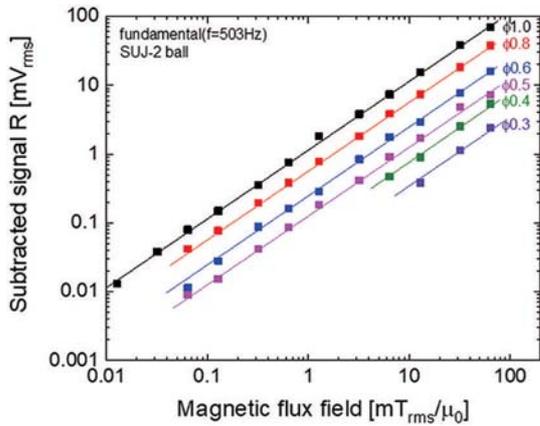


図4 サイズ別交流磁場強度依存性

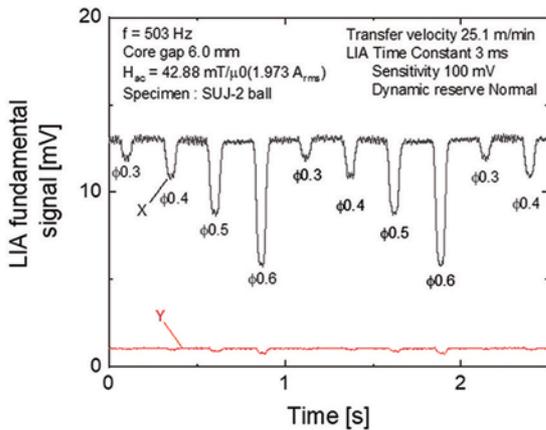


図5 出力の時間波形

うに、鋼球の信号強度は体積に比例した応答を確認できた。図5は検出信号をロックインしたロックインアンプ (LIA) 出力の時間波形を示しており、ここではφ0.3 mm までしか測定していないが、コアギャップ (隙間) を 2.0 mm 程度にすることで、計算上信号は現状の 27 倍になることから、φ100 mm も検出できることがわかる。

3.3 非磁性金属の検出

非磁性金属の応答は、透磁率が低く、ヒステリシスを持たないため、渦電流による応答が支配的になる。本装置では非磁性金属も検出できることが大きな特徴であり、非磁性金属として、AL と Cu を評価試料とした。評価結果を図6に示す。球状の非磁性金属では渦電流による起電力の式に従い、信号強度は半径の5乗に比例し、時間波形から銅粒φ0.85 mm を検出するこ

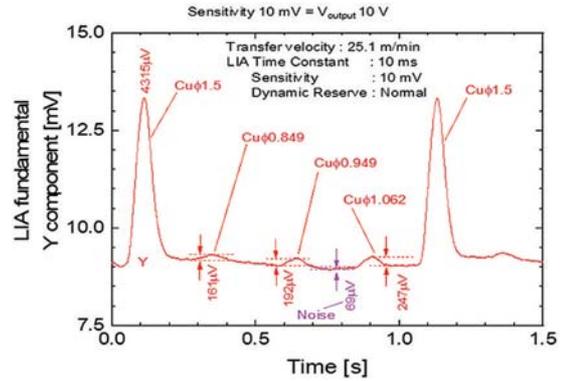


図6 LIA 出力の時間波形

とができていることがわかる。

4. プロトタイプを試作

幅 60 mm の被検査物に対応可能がプロトタイプを試作した。図7に3D設計図を示す。作製したプロトタイプの写真を、図8に示す。

評価条件は、移動速度 25.6 m/min、時定数: 10 ms、Sensitivity: 5 mV、Dynamic Reserve: Normal で、鋼球φ0.5, 0.4, 0.3 mm と日本検査機器工業会の SUS304 ワイヤ φ0.2 mm x L5 mm、同アルミニウム円板 (t=0.3 mm)φ4, 3, 2 mm の測定を行った。ロックインアンプ出力波形を、図9に示す。図に示す通り、磁性金属の鋼球φ0.3 mm でも十分な磁化応答 (X) による信号変化が捉えられている。非磁性金属のアルミニウム小円板φ2 mm x t0.3 mm (φ1.2 mm 球相当) についても、渦電流応答 (Y) が捉えられていることがわかる。

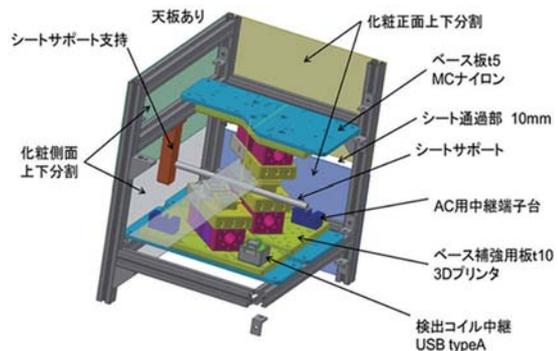
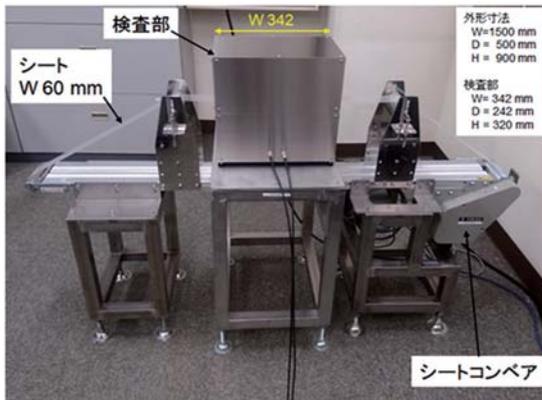


図7 プロトタイプの3D設計図

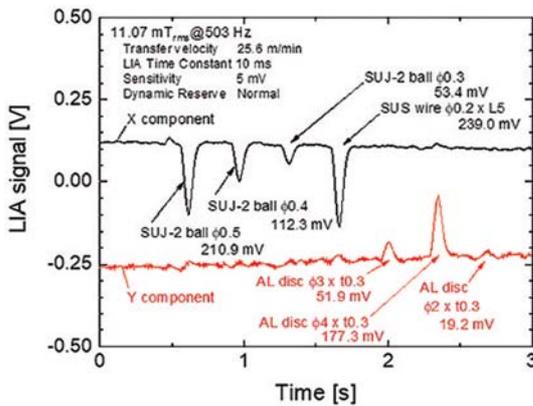


(a) 内部構造の写真



(b) 全体外観写真

図8 プロトタイプ装置



黒線：X (cos 成分), 赤線：Y (sin 成分)

図9 ロックインアンプ出力波形

5. まとめ

磁化応答・渦電流応答は原理式に従い、球体サンプルでの磁化応答は体積に比例し、渦電流応答は円板で半径の4乗、球状で半径の5乗に比例することを確認することができた。パーマロイカットコアを用いて、コイルインダクタン

スを増大させることで、直径 100 ミクロンの磁性金属を検出できることを示した。また、一般に難しいとされる非磁性金属を同一の装置で Cuφ0.8 mm を検出することができた。また、AL 小円板については、φ2 mm x t0.3 mm (φ1.2 mm 球相当) を検出することができた。

[今後の研究の方向, 課題]

今回、100 μm の検出が限界となったが、更なる高周波化と発熱を抑える方法を検討することで、1桁小さいものが検出できると予想される。

[成果の発表, 論文等]

- [1] S. Tanaka, T. Matsuo, K. Kobayashi, M. Kabasawa, T. Ohtani and S. Ariyoshi, "Measurement of Magnetic Nanoparticles by Small HTS SQUID Array", IEEE Trans. Appl. Supercond., 2792405_1-6 (2018).
- [2] Saburo Tanaka, Takeyoshi Ohtani, and M. Kikuchi, "Metallic fine contaminant detection Technique using harmonic responses", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 459 (2018) 171-175.
- [3] K. Kobayashi, Y. Sanada, S. Ariyoshi and S. Tanaka, "2D-MPI System using HTS-SQUID", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 871 (2017) 012077_1-6.
- [4] K. Demachi, S. Kawagoe, S. Ariyoshi and S. Tanaka, "Ultra-Low Field SQUID-NMR using LN2 Cooled Cu Polarizing Field coil", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 871 (2017) 012076_1-7.
- [5] S. Tanaka, Y. Narita, T. Ohtani, S. Ariyoshi and S. Suzuki, "Development of Metallic Contaminant Detection System using rf High-Tc SQUID with Cu Pickup Coil", IEEE Trans. Appl. Supercond., 27, 1600304 (2017).
- [6] Saburo Tanaka, Toshifumi Suzuki, Kazuya Kobayashi, Shu-Hsien Liao, Heng-Er Horng and Hong-Chang Yang, "Analysis of Magnetic Nanoparticles using Second Harmonic Responses", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 440 (2017) 189-191.