

電子線照射による電荷蓄積位置制御が部分放電開始電圧に及ぼす影響

相原 陸斗*, 近藤 一哉, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)
 小迫 雅裕, 匹田 政幸 (九州工業大学)
 伊藤 大貴, 中前 哲夫 (東芝産業機器システム株式会社)
 藤井 祐樹, 中村 勇介 (株式会社東芝)

Influence of Electron-Beam-Induced Charge Accumulation Depth on Partial Discharge Inception Voltage
 Rikuto Aihara*, Kazuya Kondo, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)
 Masahiro Kozako, Masayuki Hikita (Kyushu Institute of Technology)
 Daiki Ito, Tetsuo Nakazmae (Toshiba Industrial Products and Systems Corporation)
 Yuuki Fujii, Yusuke Nakamura (Toshiba Corporation)

1. はじめに

モールド変圧器を始めとする電力機器で発生する部分放電は、絶縁材料の劣化を促進し、最終的に絶縁破壊に至る可能性がある⁽¹⁾。著者らはこれまで、パルス静電応力(PEA)法を用いて、ボイドを模擬した空気/絶縁材料の二層構造における空間電荷分布と部分放電の同時測定手法を構築してきた。本稿では、電子線照射により試料内部の電荷蓄積位置を制御し、その位置が部分放電開始電圧 (PDIV)に及ぼす影響を実験的に検証した結果について述べる。

2. 測定条件

試料には厚さ 125 μm の PET を使い、試料上面と高電圧電極の間に 125 μm の空気ギャップを設けた。電荷蓄積位置を制御するため、20 keV および 36 keV の電子線 (電流密度 5 nA/cm^2) を照射し、照射面からそれぞれ約 5 μm および 15 μm の深さに電荷を蓄積させた。照射後、試料内電界が 0.25~3.0 kV/mm になるよう直流電圧を 0.25 kV/mm 刻みで印加し、空気ギャップ内の放電光を PMT で観測することで PDIV を判定した⁽²⁾。

3. 結果および考察

Fig.1 に電子線照射 PET の電圧印加時における空間電荷分布波形を、Fig.2 に PMT 出力と印加高電圧値を示す。Fig.1 より、印加電圧の増加に伴い、接地電極側の誘導電荷および照射面側の分極電荷と照射電子による負電荷量は、1.0 kV/mm および 1.5 kV/mm 印加時までは増加し、それ以降は減少に転じることが確認された。Fig.2 より、20 keV および 36 keV 照射試料では、1.08 kV および 0.81 kV 印加時(試料内電界でそれぞれ 2 kV/mm および 1.5kV/mm)に部分放電が発生していることがわかる。Fig.3 に、Fig.1 から算出した表面電位と PMT 出力から得た PDIV をまとめる。同図より、より深い位置(15 μm)の位置に電荷が蓄積した試料では表面電位が高くなり、その増加に伴い PDIV が低下することが明らかにになった。

4. まとめ

電子線照射により試料内の電荷蓄積位置を制御した試料を用い、PDIV の低下の要因を検証した。照射面からより深い位置に電荷を蓄積させた場合、表面電位が上昇し、その表面電位の上昇に伴って PDIV が低下することを確認した。今後は、さらに深い照射位置においても同様の傾向がえられるかを検証する。

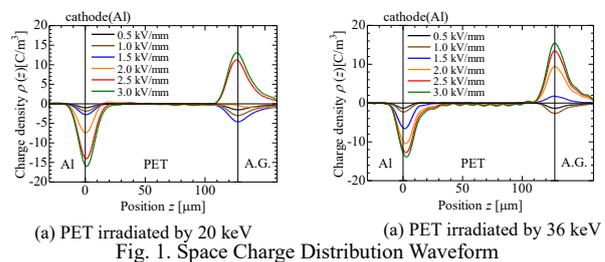


Fig. 1. Space Charge Distribution Waveform

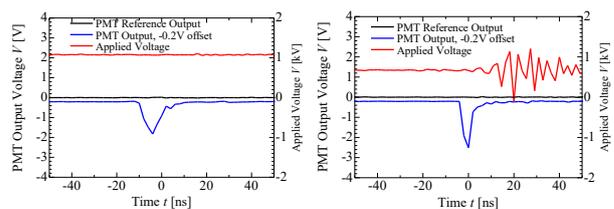


Fig. 2. PMT output and applied Voltage value

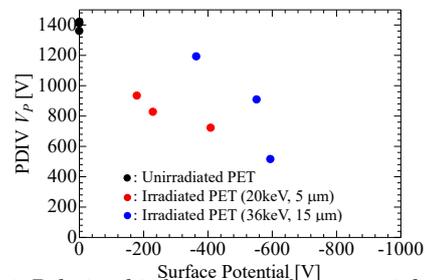


Fig. 3. Relationship between surface potential and PDIV

文献

- (1) N. Hayakawa et al., IEEE Trans. DEI, Vol. 15, No. 6, pp. 1701-1706, 2008
- (2) Kazuya Kondo et al., 2025 IEEE-CEIDP, pp. 797-800, doi: 10.1109/CEIDP61707.2025.11218334, 2025

部分放電曝露下における樹脂絶縁材料の浸食挙動の定量的解析

中村 陽央* 青木 裕介 (三重大学)

小迫 雅裕 匹田 政幸 (九州工業大学)

伊藤 大貴 中前 哲夫 前田 照彦 尾崎 多文 (東芝産業機器システム株式会社)

Quantitative Analysis of Erosion Behavior of Polymeric Insulating Materials under Partial Discharge Exposure

Yo Nakamura*, Yusuke Aoki, (Mie University)

Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, (Kyushu Institute of Technology)

Daiki Ito, Tetsuo Nakamae, Teruhiko Maeda, Tamon Ozaki, (Toshiba Industrial Products and Systems Co.)

1. まえがき

高電圧機器などの絶縁部に用いられる樹脂絶縁材料には高い信頼性が求められている。この樹脂絶縁材料の信頼性を下げる原因として、絶縁体中の異物やボイド、クラックなどによって生じる部分放電(PD)が挙げられ、PDによる劣化は材料によって異なることが知られている。本研究では各樹脂における浸食の進展過程および堆積物の存在が局所的なPD浸食挙動に及ぼす影響を調べることを目的として、ポリエチレンテレフタレート(PET)、ポリイミド(PI)、エポキシ樹脂(EP)を対象とし、PD曝露試験を行った。欠陥を模擬した球電極/樹脂/電極系を用い、PDにより生成された堆積物の除去前後における表面構造の観察により、堆積物の有無による浸食挙動の違いについて議論する。

2. 実験方法

本研究でPD曝露試験に用いたボイド欠陥模擬試料を図1に示す。PD条件は周波数を240Hz、印加時間を10~20時間とした。電極はエポキシ樹脂をモールドした直径5.6mmの銅球の球電極を厚さ0.15mmのガラスフィルムの上に設置した。その下に厚さ0.5mmの開放型ボイド、0.125mmの各種試料、平板電極(ITO)を図1のように設置し、球電極部分を高電圧側、ITO部分を接地に接続した。ボイドに注入された放電エネルギー E の総和は $V-Q$ リサージュ法を利用して算出し、各試料の堆積物除去前後の表面構造をレーザ

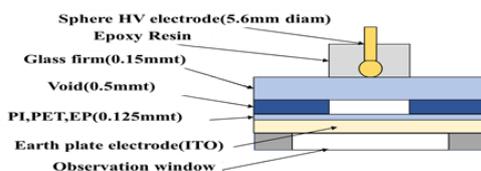


図1 電極系

Fig.1. Electrode system

顕微鏡により観察を行った。堆積物は各試料をエタノールに浸漬し、10分間の超音波洗浄により除去した。

3. 実験結果と考察

放電曝露後の各樹脂表面には、PD生成物による堆積とその周囲の浸食構造が共存していた。堆積物はFT-IR測定によれば、PDにより生成された分解・反応生成物と考えられる。堆積物が樹脂表面における浸食の進行に与える影響を評価するため、各試料に超音波洗浄を施し、堆積物を除去した後の樹脂表面構造を観察した。PIの結果を図2に示す。PIでは、超音波処理後、顕微鏡像で観察された元のPI表面よりも少し暗い色を呈していた亀裂状構造も消失し、表面は滑らかになっていた。さらに、堆積物が存在していた領域直下の樹脂表面は周囲の浸食部と比較して放電前の樹脂の表面の高さを維持していた。すなわち、堆積物が存在していた領域では、顕著な浸食構造は形成されていなかった。

このことより、堆積物の存在する部分ではPD浸食が抑制される一方、堆積物のない部分で浸食が進行することが示唆される。すなわち、堆積生成物の存在は局所的なPD浸食に対して保護的役割を果たしている可能性がある。

発表では、PI、PET、EPの3種類の樹脂について比較を行う。また、生成した堆積物と堆積物除去前後の試料表面のFT-IR測定を行った結果についても紹介する。

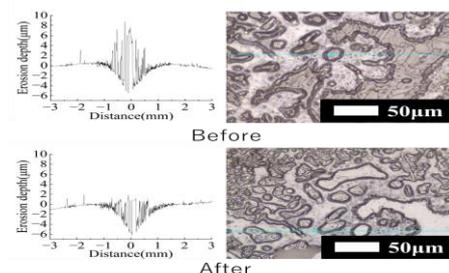


図2 PIの表面堆積物除去前後の表面形態変化

Fig.2. Surface morphological changes of PI before and after removal of surface deposits

発光輝度分布・放電エネルギーの同時測定に基づく劣化プロセスの推定

竹内 健*, 榊原 広太, 青木 裕介(三重大学), 小迫 雅裕, 匹田 政幸(九州工業大学),
伊藤 大貴, 中前 哲夫, 前田 照彦, 尾崎 多文(東芝産業機器システム)

Based on Simultaneous Measurement of Light Intensity Distribution and Discharge energy
Estimation of Partial Discharge Degradation process

ken Takeuchi, Kota Sakakibara, Yusuke Aoki (MieUniversity), Masahiro Kozako, Masayuki Hikita (Kyushu Institute of Technology)
Daiki Ito, Testuo Nakamae, Teruhiko Maeda, Tamon Ozaki (Toshiba Industrial Products and Systems Co.)

1. 研究背景・目的

欠陥(ボイド)の内部での部分放電(PD)によって発生する全ての放電エネルギーに対する浸食深さの関係からの寿命推定の試みが行われてきている⁽¹⁾。しかしながら、全放電エネルギーと浸食深さの間に一義的な対応関係が成立するわけではなく、実際に同一の模擬ボイド構造を用いた場合においても、放電活動や形成される浸食構造には試料毎に差異が認められた⁽²⁾。特に、長時間の課電中における放電強度の変動や断続的な放電の発生といった放電活動の時間的変動、ならびに放電の局所化といった空間的変動が劣化挙動に大きな影響を与えていることが示唆されている。

我々はこのような放電活動の変動を可視化・定量化する手段として、PDに伴う発光現象に着目した。発光輝度分布が局所的な放電エネルギー分布を反映するとの仮定のもと、発光画像からボイド内部の放電エネルギー分布の推定を行う。続いて、この推定分布と実際に観察された浸食構造の空間分布との対応関係を評価し、発光輝度分布に基づいて浸食構造を予測可能であることを明らかにする。

さらに、課電時間の経過に伴う発光強度の増減および発光強度分布変化を定量的に評価することで、課電中に進行する浸食構造の劣化過程の推定を試みた結果を紹介する。

2. 実験方法

本研究で用いた試料構造を図1に示す。本試料は厚さ0.5mmと0.125mmの2枚のPETシートの間にスペーサを設けて空間を形成し、さらにそのPETシートを電極で挟む構造になっている。上部電極は直径5.6mmの銅球でその周りはエポキシ樹脂でモールドしてある。ボイドを模擬した空間の寸法としては厚さ0.5mm、直径20mmである。スペーサに外側までつながるような切り込みを入れ、開放型ボイドを模擬した。開放型としたのはボイド内のガスの圧力や組成の変化を受けにくく、比較的安定な放電持続が期待できるためである。また、下部電極にはITO電極を用いることで、PDに伴う発光現象を観察可能とした。

ITO電極側から高速カメラ(株)ディテクト製, HAS-220)を用いて、発光現象を観察した。撮影条件は、フレームレート

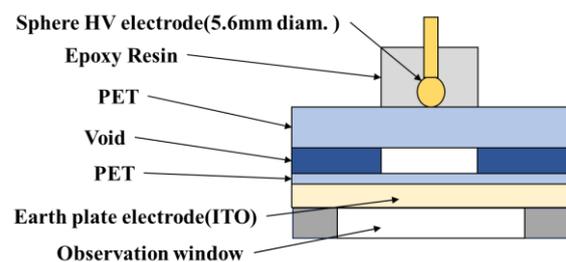


図1 模擬ボイド構造

Fig.1.Void simulation sample structure

50fps、シャッターを常時オープンとするバルブモードで撮影を行った。この撮影条件では、各フレームで記録される輝度値は、当該フレーム取得期間内に発生したPDに伴う発光の時間的積算値を表す目安となる。そのため、連続して取得した発光画像の輝度を時間的に積算することで、課電期間中に発生した発光量の累積値を評価することが可能となる。得られた発光画像について、 m 行 n 列の各画素における輝度値を積算し、積算発光強度 $I(m,n)$ 、観察領域内のすべての画素の積算発光強度の総和 $\sum_m \sum_n I(m,n)$ を算出した。

上部電極は電源に、下部電極と接地の間にコンデンサを接続した。試験電圧は放電開始電圧の2倍の電圧を印加し、部分放電曝露処理を行った。放電曝露時間は5~55時間とした。試料内部のボイド部分で発生した部分放電電流は試料の接地側に挿入したコンデンサにおける充放電として検出される。試料に印加される電圧およびコンデンサにかかる電圧を測定し、これらの電圧波形はデータロガー(NR-X100:キーエンス)を用いて、サンプリング周期 $50\mu\text{s}$ で取得した。取得した電圧データに基づき、 $V-Q$ リサージュ法を用いて1サイクル当たりの放電エネルギーを算出し、課電時間の全サイクルについて積算することで、PDによる放電エネルギー E_{total} を求めた。本研究では、発光強度の積算値がPDによる積算放電エネルギーを反映する指標であるとの前提に基づき解析を行った。ここで、定義する $E(m,n)$ は画素 (m,n) において実際に測定された放電エネルギーではなく、 E_{total} を発光強度分布に比例して空間的に配分することで得られた局所的な放電エネルギー指標である。すなわち各

画素に対応する $E(m,n)$ は、次式により定義される。

$$E(m,n) = E_{\text{total}} \times (I(m,n) / \sum_m \sum_n I(m,n)) \quad (1)$$

式(1)は、 E_{total} を発光強度分布に基づいて各画素へ比例配分することで、ポイド内部における放電エネルギーの相対的な空間分布を推定することを意味している。この前提のもと、一定時間内における積算発光強度の増分は、当該期間内に試料に注入された放電エネルギー量に対応し、その結果として生じる浸食構造の成長度合いを反映すると考えた。その仮定を実証するため、課電終了後に観察された浸食構造と $E(m,n)$ 分布の相関を調査した。浸食構造の評価は下部電極側の PET シートを対象として、レーザー顕微鏡(キーエンス, VK-X3000)を用いて測定した。

さらに、課電中における浸食構造成長の時間的推移を定量的に評価するため、課電時間全体を放電エネルギー $\Delta E=2.4\text{mJ}$ ごとに分割し、各区間における積算発光強度分布を個別に算出した。各区間の積算発光強度は、その区間中に進行した浸食構造成長の指標として用いた。

3. 実験結果

$V-Q$ リサージュ法により算出した課電期間全体の積算放電エネルギー E_{total} と、発光画像から得られた積算発光強度の総和 $\sum_m \sum_n I(m,n)$ の間には良好な比例関係が確認された。この結果は、本研究で用いた撮影条件および解析手法において、発光強度の積算値が PD によって消費された積算放電エネルギーを反映する指標として妥当であることを示している。

放電曝露時間が異なる複数の試料における、発光輝度分布や浸食量分布について検証した。各試料の発光輝度分布と浸食量の分布を比較したところ、両者の空間分布には明確な相関が認められた。すなわち、積算発光強度の高い領域において、より大きな浸食が形成される傾向が確認された。さらに、各試料の代表的な画素 (m, n) における $E(m, n)$ と浸食深さの関係を確認したところ、両者には比例関係があることが確認された。この結果は、局所的な放電エネルギーの大小が浸食量の違いとして反映されていることを示唆している。以上の結果から、発光輝度分布に基づいて定義した $E(m,n)$ を用いることで、浸食量分布を定量的に推定できる可能性が示唆された。

次に、課電時間の経過に伴う放電分布すなわち浸食量分布の変化を明らかにするため、放電曝露時間 24 時間の試料を対象として、課電初期から終了までにおける発光輝度分布の時間変化の解析例を示す。図 2 に放電エネルギー約 $\Delta E=2.4\text{mJ}$ ごとに 7 つの区間に分割して算出した発光強度積算値を示す。電極中心直下位置(グレー部分)では課電の進行に伴い発光強度が徐々に低下する傾向が認められた。一方、 $E=2.4\text{mJ}$, 4.8mJ 以降の段階では、局所的に発光強度が増大

する領域(図 2 オレンジ部分)が現れ、それらの領域は最終的に顕著な浸食が形成された位置(図 3 オレンジ部分)と対応していた。このことから、課電に伴い主たる放電活動が電極中心直下から周辺の局所領域へ移動する挙動が生じており、その結果として浸食構造も段階的に成長したと考えられる。

以上より、発光輝度分布の時間変化を追跡し、局所放電エネルギー指標 $E(m,n)$ の推移として評価することで、浸食構造の劣化過程を空間的・時間的に可視化し、定量的に評価できる可能性が示唆された。

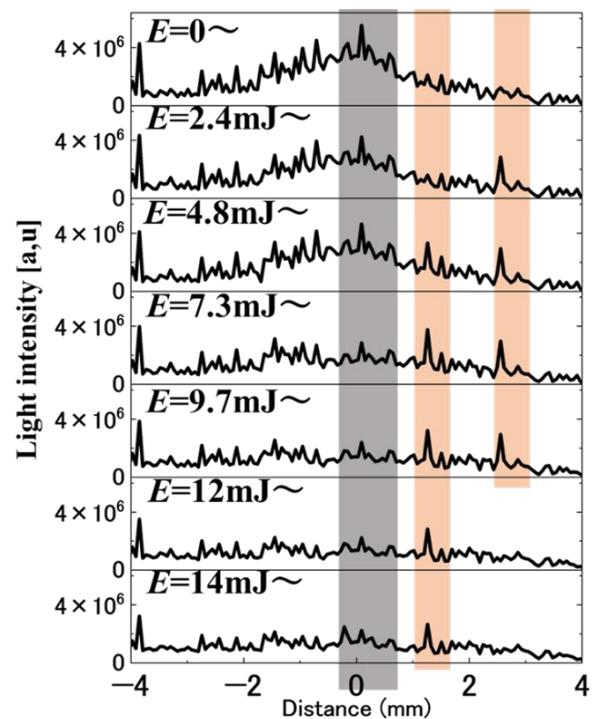


図 2 発光強度の時間変化

Fig.2. The change of light intensity

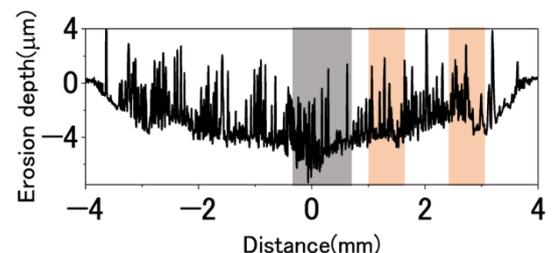


図 3 浸食構造

Fig.3. Erosion structure

文 献

- (1) Ken Takeuchi, et al, "Prediction of insulation life based on the relationship between discharge energy and erosion depth by void discharge", International Symposium on High Voltage Engineering 2025, PS2-21 (2025)
- (2) Yusuke Aoki, et al, "Effect of Changes in Partial Discharge Activity on Resin Erosion in Simulated Voids", 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, p.p.525-528, (2024)

相間絶縁紙の厚みが Volume-time 理論による PDIV 推定に与える影響の検討

長谷 宥里*, 梶山 飛翔, 匹田 政幸, 小迫 雅裕(九州工業大学)
原 侑吾, 今井 岳彦, 柳田 憲史(三菱重工業)

Investigation of the Influence of Inter-Phase insulation Paper Thickness on PDIV Estimation Based on Volume-Time Theory

Yuri Nagatani*, Towa Kajiyama, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu institute of technology)

Yugo Hara, Takehiko Iamai, Norihito Yanagita (Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.)

1. まえがき

インバータ駆動モータは幅広い分野で使用されている一方で、インバータサージによる絶縁劣化が懸念されている。筆者らは、これまで Volume-time 理論⁽¹⁾を用いて、平角巻線における湿度を考慮した部分放電開始電圧 (Partial Discharge Inception voltage: PDIV) の推定⁽²⁾や巻線間の相間絶縁紙が PDIV 推定に与える影響⁽³⁾について検討してきた。本報では、相間絶縁紙モデルの厚みが推定 PDIV に与える影響について検討した。

2. 実験および解析方法

<2・1>実験方法 実験サンプルには、2本の平角線を背合わせにしたアローペアに相間絶縁紙を挿入した相間絶縁紙モデルを用いた。図1に巻線モデルの断面図を示す。巻線被膜はポリアミドイミド(polyamide-imide: PAI)である。相間絶縁紙モデルの相間絶縁紙には、Nomex[®]410 (DuPont社製)を採用し、厚み $t=0.13, 0.18, 0.25$ mm の3種類を用意した。インパルス電圧の立ち上がり時間は $0.15 \mu\text{s}$ 、パルス幅は $400 \mu\text{s}$ とした。

<2・2>解析方法 Volume-time 理論とは、電界分布の空間的、時間的変化を考慮することで PD 発生確率を算出する理論である⁽¹⁾。また、陰極側に高電界がかかると誘電体表面から Fowler-Nordheim (F-N)理論に基づく電界電子放出が発生する。そのため、本解析モデルにおいては、空気中の負イオンからの電子脱離(V_w)、PAI 表面からの電子放出($S_{w,P}$)、Nomex[®]410 表面からの電子放出($S_{w,N}$)が主な電子発生源となり、初期電子発生確率(P)は式(1)のようになる。

$$P = 1 - \exp[-\int_t (V_w + S_{w,P} + S_{w,N})dt] \quad (1)$$

3. 結果および考察

図2に、PDIV の層間絶縁紙厚さ依存性の実験結果および推定値を示す。これより、PDIV の実験結果と推定値の良好な関係が確認された。本実験は湿度 25 %RH、温度 25 °C、大気圧下で行われたため、空気中の負イオンが初期電子発生源になった可能性は低く、誘電体表面からの電子放出が支配的である⁽²⁾。図3に、各相間絶縁紙の厚みにおける

Nomex[®]410 表面および PAI 被膜表面からの PD 発生確率の電圧依存性を示す。同図より、PAI 表面より Nomex[®]410 表面からの電子放出が支配的であることが確認された。さらに、 $t=0.13$ mm の場合、 $t=0.18, 0.25$ mm と比較して PD 発生確率が急激に上昇する。なお、Nomex[®]410 の比誘電率は厚み依存性を有しており、 $t=0.13$ mm における比誘電率は 2.4、 $t=0.18, 0.25$ mm における比誘電率は 2.7 とした⁽⁴⁾。そのため、 $t=0.13$ mm の場合は、絶縁層が薄くなったことによる高電界化に加え、比誘電率が低いことにより Nomex[®]410 に電界が付与されやすくなったことで電界放出がより顕著になったと考えられる。

今後は、周囲の温度変化による PDIV 推定の確立と絶縁材料の劣化時の PDIV 推定を検討する。

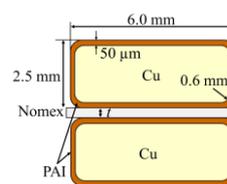


Fig.1. Cross-sectional view of the winding model

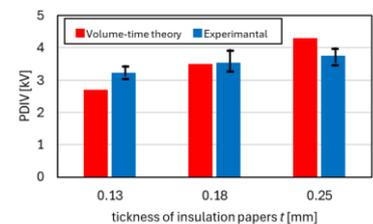


Fig.2. Thickness dependence of PDIV measured and estimated by Volume-time theory

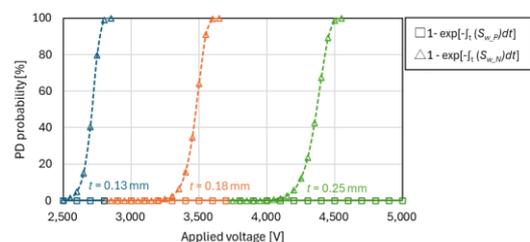


Fig.3. Voltage dependence of PD probability estimated by Volume-time theory

文 献

- (1) X. Xu, et. al, IEEE TDEI, Vol.3, No.6 pp.836-842 (1996)
- (2) 長谷宥里ら：誘電・絶縁材料研究会, pp.7-12 (2025)
- (3) 長谷宥里ら：第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, pp.192-194 (2025)
- (4) DuPontTM, Nomex technical data sheet
<https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/p>

ベーマイトナノコンポジット積層による ポリイミドフィルムのインパルス PDIV 向上の実験的検討

佐々木 晴成*, 長谷 宥里, 梶山 飛翔, 加藤 奏良, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)
坂東 誠二, 林坂 徳之 (住友精化株式会社)

Experimental Study on the Improvement of Impulse Partial Discharge Inception Voltage of Polyimide Film
by Boehmite Nanocomposite Lamination

Hareru Sasaki, Yuri Nagatani, Towa Kajiyama, Sora Kato, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako
(Kyushu Institute of Technology)

Seiji Bando, Noriyuki Hayasisaka (Sumitomo Seika Chemicals Co., Ltd.)

1. まえがき

筆者らはこれまで、ベーマイトアルミナナノコンポジットフィルムを用いたインバータ駆動モータの巻き線用絶縁皮膜において部分放電開始電圧 (partial discharge inception voltage : PDIV) の向上現象および絶縁破壊時間について検討してきた⁽¹⁾⁽²⁾。本稿では、ポリイミド (PI) にベーマイトアルミナ (AlOOH, boehmite alumina : BA) ナノフィラーを添加した PI 層と PI のニート層の 2 層構造からなるフィルムを用い、ナノコンポジット材料が及ぼすインパルス PDIV 特性への影響を調査した結果を報告する。

2. 実験方法

本報で評価した試料は、PI 層および 20 wt% の BA を添加した PI 層 (BA 層) からなる BA/PI フィルムである。フィルムは一边 25 mm 正方形に切り出し、BA 層側が棒電極側になるよう設置した。BA/PI フィルムは全体の厚みに対する BA 層の厚みが 4 % のフィルムおよび 28 % のフィルムを用いた (N=2)。使用した電極は、棒電極が直径 6 mm・端部曲率半径 0.5 mm の IEC(b)電極系である。

図 1 にインパルス PD 測定回路を示す。インパルス PD 測定では、正極・負極の繰り返しインパルス電圧 (昇圧速度 50 V/s、立ち上がり 100 ns、パルス幅 5 ns、極性反転 5 kHz) を放電発生まで印加した。同時に、検出コンデンサの電圧、自作のループセンサによる放電電磁波、PMT (photomultiplier tube) による発光量を測定した。各条件で 12 回分の PDIV を取得し、BA ナノフィラー添加による PDIV への影響を評価した。比較として、先行研究の PI のフィルムおよび BA のフィルムのデータを引用した。得られたデータはワイブル分布を用いて PDIV 値を評価した。

3. 結果および考察

測定結果は、ワイブルプロットにおける累積確率 63.2 % に対応する電圧を PDIV とし、各測定の PDIV を負極インパルス PDIV を基準とした比を表 1 に示す。BA 層が 4% の試料では正極インパルス PDIV が負極インパルス PDIV と比べ

て 7.86 % 高い値を示し、BA 層の厚みが 28% の試料では 13.4% 高い値を示した。これは、PD の起点となる電子放出確率が BA 層表面で低いことに起因し、BA 層が PDIV 向上に寄与していると考えられる。

この結果は、BA フィルムでの先行研究⁽¹⁾における、正極インパルス PDIV が負極インパルス PDIV より 12.5 % 高くなるという知見と類似しており、積層構造においても PDIV が

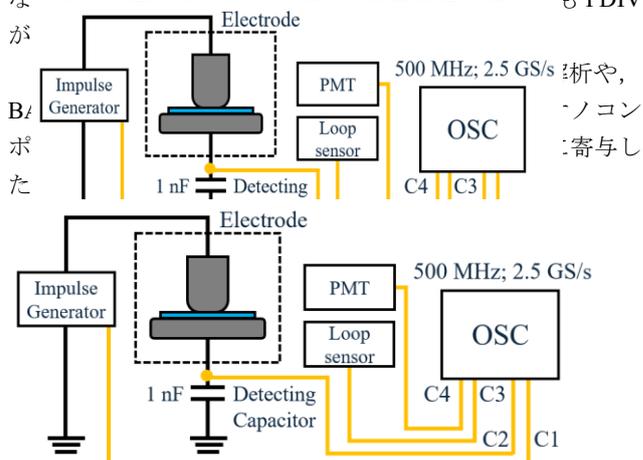


Fig1. Impulse PD measurement circuit

Table1. Relationship between Sample and Polarity ratio

Sample	Polarity ratio	
PI neat	1.03	
Single BA	1.14	
Double	4% BA	1.07
	28% BA	1.13

文 献

- (1) Abghi Ilman Arif et al, CMD2024, pp222-225,(2024)
(2) 竹之内, 他 : 電気学会論文誌 A, Vol.142, No.5, p.208-214 (2022)

小型ループセンサを用いたエポキシ樹脂モールド母線の部分放電位置推定と X 線 CT による検証

木本 涼太*, 豊田 志苑, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)
遠藤 秀樹, 三上 大輔, 高山 亨
(東京電力パワーグリッド株式会社)

PD Localization in Epoxy-Resin Molded Busbars using Small Loop Sensors and Verification by X-ray CT

Ryota Kimoto*, Shion Toyoda, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology)

Hideki Endou, Daisuke Mikami, Toru Takayama (TEPCO Power Grid, Incorporated)

1. まえがき

高度経済成長期に導入された電力設備の高経年化に伴い、樹脂モールド母線においても内部ボイドを起点とする部分放電 (PD) への対応が求められている。本研究では三相エポキシ樹脂モールド母線を対象に、小型ループセンサによる PD 位置推定と X 線 CT 観察結果との比較検証を行った。

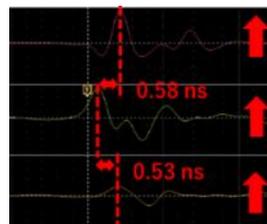
2. 実験方法

実験方法は前報⁽¹⁾と同様である。本研究では図 1 (a) の母線を試料とし、PD の発生する緑相および白相の対地間に交流高電圧を印加して PD 測定を行った。PD 検出には、同一仕様の小型ループセンサを 3 個用い、母線の側面に沿って長手方向に 10 cm 間隔で配置し、5 cm ずつスライドさせた。センサと母線表面の距離は 1 cm である。各センサは直径 10 mm のループをプリント基板上に形成し、SMA コネクタを介してアンプに接続した。PD 発生時に生じる高周波磁界成分を各センサで同時に検出し、増幅後の信号をオシロスコープで同時収録した。取得した信号から、センサ間の信号到達時間差および振幅差を用いて PD 発生位置の推定を行った。さらに、位置推定結果の妥当性を検証するため、X 線 CT による内部観察を併用した。

図 1(a) および (b) に、白相における PD 位置推定の様子および取得波形の一例を示す。図の青丸 3 か所



(a) Experimental setup



(b) Measured waveforms

Fig. 1. PD source localization

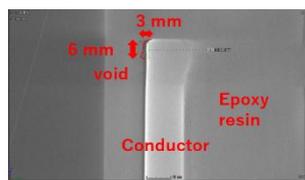


Fig. 2 X-ray image of epoxy-molded busbar

に設置した際、センサ 2 の位置で信号検出が最も早かったことから、試料長手方向に対してこの位置に PD 源があると考えられる。同様に、対向面や上下方向にセンサを配置して 3 次的に位置標定を行い、緑相についても同様に実施した。X 線観察結果例を図 2 に示す。位置推定の結果と、X 線観察による欠陥位置を図 3 に示す。図 3 の上面図に示すように、S2 の正面に

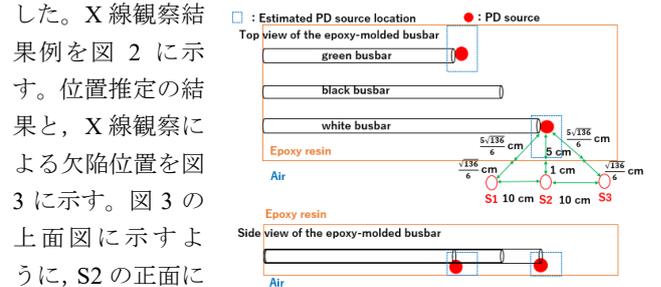


Fig. 3. Estimated PD source location and actual void location

PD 源があり、側面から見た高さも同じ高さである場合を考える。空気中の電磁波の速さ c は 3.0×10^8 m/s、樹脂中の電磁波の速さ C' は、エポキシ樹脂の誘電率を 4 とした場合、 $C' = c/\sqrt{\epsilon} = 1.5 \times 10^8$ m/s となる。したがって、PD 源から S2 に到達するまでの時間 t_{s2} は

$$t_{s2} = (5 \times 10^{-2})/C' + (1 \times 10^{-2})/c = 11/3 \times 10^{-10} \text{ s} \approx 0.367 \text{ ns}$$

同様に、PD 源から S1 もしくは S3 に到達するまでの時間 t_{s1} および t_{s3} は $t_{s1} = t_{s3} = (5\sqrt{136}/6 \times 10^{-2})/C' + (\sqrt{136}/6 \times 10^{-2})/c = 11\sqrt{136}/18 \times 10^{-10} \text{ s} = 0.713 \text{ ns}$ となる。

よって、S2 と S1 との到達時間差 Δt_{s21} および S2 と S3 の到達時間差 Δt_{s23} は、 $\Delta t_{s21} = \Delta t_{s23} = t_{s1} - t_{s2} = t_{s3} - t_{s2} = 0.713 - 0.367 = 0.346 \text{ ns}$ と計算される。これらの到達時間差の計算値が、実測値の 0.58 ns, 0.53 ns と異なる理由として、樹脂と空気の界面における電磁波の屈折および伝搬経路の変化が影響していると考えられる。今後、母線に対して長期課電を行い、絶縁破壊までの長期 PD 特性を取得することで、劣化・寿命推定に関する検討を進める予定である。

文献

(1) 宮川, 他: 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会, DEI-25-037, EPP-25-037, HV-25-037 (2025)

絶縁樹脂基板におけるボイド含有率と 部分放電特性の相関評価

坂本 アクバル大地*, 泊岩 龍斗, 末永 翔大, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)

Correlation Evaluation between Void Content and Partial Discharge Characteristics
in Insulating Resin Substrates

Akubarudaichi Sakamoto*, Ryuto Tomaiwa, Shota Suenaga, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako
(Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

パワーモジュール用絶縁基板におけるマイクロボイドと部分放電 (PD) 特性の短期・長期的絶縁破壊特性との関係は未解明である。この課題に対し、微小電極 (直径 2 mm) を 64 個形成し、各電極で PD 特性の評価および断面観察を行い、ボイド含有率が PD 特性に相関があることを示した⁽¹⁾。しかしながら、それらの定量的な評価はできていない。本報では、PD 特性とボイド形態との定量的評価を目的として、PD 電荷量および PD 発生頻度においてボイドとの関係性を示す。

2. 実験方法

使用した絶縁樹脂基板試料、PD 特性の測定方法、断面観察方法は前報⁽¹⁾と同一である。印加電圧は 3 kVrms (60 Hz) まで 15 秒で一定昇圧し、同様に一定降圧した。課電中に得られた 0.45 pC 以上の PD パルスを全て収録し、同測定を 3 回実施した。明確に異なる PD 特性を示した箇所を選定し、走査型電子顕微鏡 (SEM) で約 200 μm × 100 μm の領域を撮影した。画像全体を占めるボイドの総面積割合をボイド含有率として算出した。

単一ボイドモデルを適用し、ボイド含有率より PD 電荷量を推定し、実測値およびその他のパラメータとの比較を行った。

3. 結果および考察

図 1 に、試料 B1, D4 の印加電圧に対する PD 電荷量および PD 発生頻度のグラフを示す。

PD 発生頻度が、ボイド放電に起因するかを検討する。誘電体内部でのボイドで PD が発生すると仮定すると、比較的長時間の測定中に予期される平均発生頻度 N は次式(1)で示される⁽²⁾。

$$N \cong 2 \frac{V_a}{V_s} - 1 \quad (1)$$

ここで、 V_a と V_s はそれぞれ印加電圧と部分放電開始電圧である。この式より、 N と V_a の間には $2/V_s$ の傾きが生じるため、

印加電圧依存性があると読み取れる。図 1 に示したように、B1, D1 試料においても印加電圧依存性が確認された。しかし、 $2/V_s$ の傾きほど大きな傾きは得られなかった。これにより、今回の試料のボイドが非常に小さいものといえる。

次に、ボイド含有率と PD 電荷量の関係を考察する。試料サイズは 2000 μm × 150 μm で、各ボイドは面積 1 μm² の正方形で電極間に一つのボイドのみが存在する単一ボイドモデルと仮定する。以上の条件で分担電圧と見かけの PD 電荷量を計算することで、PD 電荷量とボイド数およびボイド含有率を推定できる。試料 B1 および D4 において計算を行ったものを図 2 に示す。ボイド含有率はボイド数を 2000 × 150 で割った値となる。以上より、PD 特性とボイド形態の定量的評価が可能であることが示唆された。

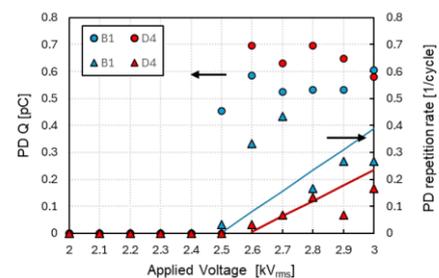


Fig.1. Voltage dependence of PD charge and PD repetition rate

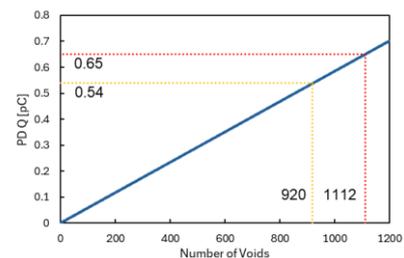


Fig.2. Relationship between PD charge magnitude and the number of voids

文献

(1)坂本 ら：令7，電気学会 A 大，3-P1-29

(2)大木 ら：誘電体現象論(改訂版)，電気学会，pp.304-308(2021)

放電遅れ時間測定に基づく絶縁フィルムからの電界電子放出の温度依存性に関する検討

酒森 貴史*, 宮路 仁崇, 大竹 泰智 (三菱電機),
梅本 貴弘, 佐藤 正寛, 熊田 亜紀子 (東京大学)

Temperature Dependence of Electron Emission from Insulating Films Based on Discharge Time Lag Measurement

Takashi Sakamori, Yoshitaka Miyaji, Yasutomo Otake (Mitsubishi Electric Corporation),

Takahiro Umemoto, Masahiro Sato, Akiko Kumada (The University of Tokyo)

1. はじめに

インバータ駆動モータでは、インバータサージにより巻線周辺で部分放電(PD)が発生すると、巻線皮膜が損傷し、絶縁破壊に至るおそれがある。これを防止するために、サージ電圧下での巻線周辺の PD 開始電圧(PDIV)推定の高精度化が必要である。先行研究では、PDIVはVolume-time理論により推定されてきた。しかし、主要な初期電子発生源である巻線皮膜からの電子放出のモデルに関しては、駆動状態における高温の影響が十分に考慮されていない。本報では放電遅れ時間⁽¹⁾の温度依存性を試験評価し、その結果から電子放出の温度依存性を検討した。

2. 統計時間遅れの測定方法

厚さ 50 μm のポリイミド(PI)またはポリテトラフルオロエチレン(PTFE)フィルムを挟んだ棒-平板電極系を用いた。平板電極に負インパルス電圧(IMP)を印加、棒電極を接地してPDを発生させた。電極系を電気炉で50~150 $^{\circ}\text{C}$ に加熱し、測定を行った(図1)。

PDIVをSchumannの条件式⁽²⁾により求め、その値に対する過電圧率を1.7~2.0とした。印加電圧がPDIVに到達した時刻から放電発生時刻までの時間を放電遅れ時間とし、取得データをラウエプロットで整理した。取得データのうち、平均値から標準偏差の範囲内にある値のみを用いて近似直線を求め、その傾きの逆数を統計時間遅れ t_s とした。

3. 結果

図2に得られたラウエプロットを示す。PIおよびPTFEともに、高温になるほど統計時間遅れが短くなった。また、フィルムからの電子発生が支配的であるため、気体からの電子発生を無視した上で、印加電圧波高値における単位時間当たりのフィルムからの電子放出数 S_w で統計時間遅れを整理した。 S_w はFowler-Nordheimの電子放出式(FN式)を用いて式(1)~(3)により算出した。ここで、 S_{cr} はSchumannの条件式を満たすフィルムの面積、 dn/dt は単位時間・面積当たりのフィルムからの電子放出確率、 A は定数、 β は電界増倍率、 E [kV/mm]は電界、 ϕ [eV]はイオン化エネルギーである。

$$S_w = \int_{S_{cr}} \left(\frac{dn}{dt} \right) dS \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = A \frac{(\beta E)^2}{\phi} \exp \left[-\frac{6.83 \times 10^3 \phi^{3/2} \theta}{\beta E} \right] \quad (2)$$

$$\theta = 0.956 - 1.06 (0.0379 \sqrt{\beta E} / \phi)^2 \quad (3)$$

t_s と S_w を50 $^{\circ}\text{C}$ の値で規格化した $S_w(T)/S_w(50^{\circ}\text{C})$ の関係を図3に示す。 S_w が大きくなると電子放出しやすくなり、 t_s は小さくなると予想される。しかし、図3に示す通り、150 $^{\circ}\text{C}$ ではそのような傾向は確認されなかった。この結果は、高温では電子放出が増加し、電子放出に温度依存性がある可能性を示唆している。

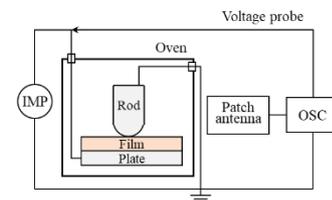


図1 電極系と測定系

Fig.1. Electrode configuration and measurement setup

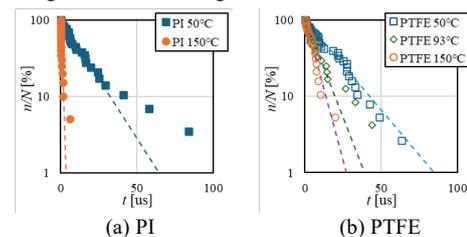


図2 ラウエプロットの温度依存性

Fig.2. Temperature dependence of the Laue plots

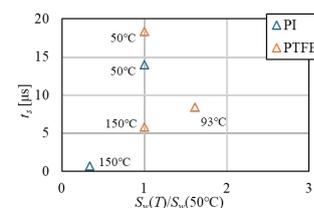


図3 統計時間遅れとフィルムからの電子放出数の関係
Fig.3. Relationship of t_s and $S_w(T)/S_w(50^{\circ}\text{C})$

文献

(1) T. Sakamori, et al: ISH 2025, PS1-6 (2025)

(2) 宅間董: 電学論, Vol.91, No.1, pp.148-156 (1971)

Time Evolution of Partial Discharge Luminescence Signals during Electrical Tree Degradation under AC-Pulse Superimposed Voltage Waveforms

Zhao Tang*, Takahiro Umemoto, Masahiro Sato, (The University of Tokyo)

Hirofuku Ishikawa, Yoshitaka Miyaji, (Mitsubishi Electric)

Shota Kodama, Tetsushi Okamoto, (TMEIC), Akiko Kumada, (The University of Tokyo)

1. Introduction

High-frequency inverter pulses impose complex insulation stress ⁽¹⁾. While we previously reported electrical treeing behaviors under superimposed waveforms ⁽²⁾, this study focuses on the detailed analysis of luminescence signals. By investigating the time evolution of these signals, we aim to clarify the influence of pulse polarity and magnitude on PD characteristics.

2. Experimental Setup

Fig. 1 shows the experimental setup for applying superimposed voltages and performing optical measurements. A needle-plane geometry (gap: 3 mm) embedded in epoxy was used. To decouple superposition effects from peak magnitude, four conditions were applied at an AC frequency of 50 Hz: (a) 18 kV AC; (b) 18 kV AC + 6 kV Pos. Pulse; (c) 18 kV AC + 6 kV Neg. Pulse; (d) 24 kV AC. PD activity was optically detected using a PMT.

3. Results and Discussion

<3 · 1> PD Repetition Rate (PD Count) Fig. 2 illustrates the PD count evolution. The 24 kV AC exhibited the highest activity (>10 counts/AC cycle), indicating peak magnitude serves as the dominant factor. However, the 18 kV + Neg. Pulse showed consistently higher recurrence rates (~5 counts/AC cycle) than the Positive Pulse case. This suggests negative pulses enhance discharge inception probability, attributable to enhanced electron injection from the cathode tip.

<3 · 2> Discharge Magnitude Analysis Pulse height analysis indicated that 24 kV AC generated the highest amplitude signals. Furthermore, the negative pulse condition exhibited higher mean amplitudes than the positive pulse case. This aligns with PD

count trends, implying that negative polarity intensifies discharge severity compared to positive polarity under identical peak stresses.

<3 · 3> Summary (1) Magnitude Dependence: Peak voltage magnitude primarily determines overall PD severity. (2) Polarity Effect: Under identical peaks, negative pulses result in higher PD repetition and amplitudes. This implies polarity-dependent injection mechanisms play a secondary but non-negligible role.

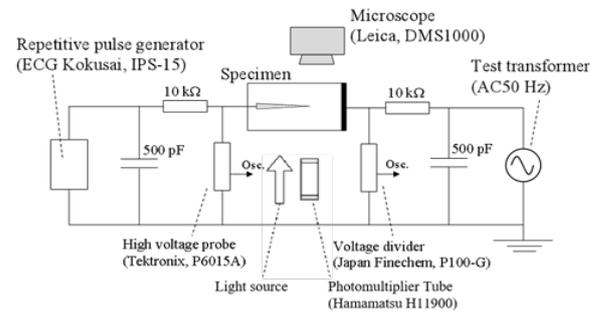


Fig.1. Schematic diagram of the experimental setup.

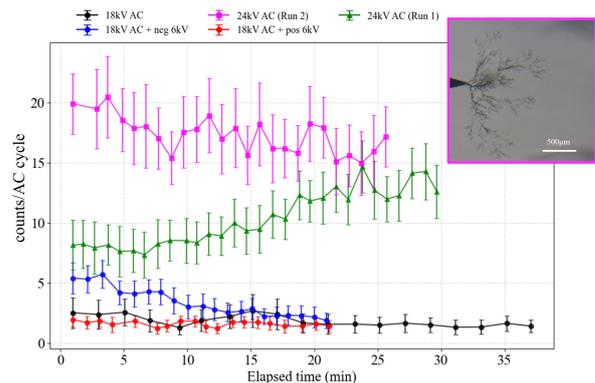


Fig.2. PD count per cycle evolution. Inset: Electrical tree morphology for 24kV AC (Run 2).

References

- (1) J. Jiang et al.: IEEE Trans. Power Electron., Vol.40, No.1, pp.2017-2027 (2025)
- (2) Z. Tang 他：電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-25-116 (2025)

インバータ駆動機器の絶縁状態監視に向けた機械学習による部分放電識別技術の開発

施 展*, 佐藤 正寛, 梅本 貴弘, 熊田 亜紀子 (東京大学)

Development of Partial Discharge Identification Technology using Machine Learning for Insulation Condition Monitoring of Inverter-fed Equipment

Zhan Shi*, Masahiro Sato, Takahiro Umemoto, Akiko Kumada (The University of Tokyo)

1. まえがき

近年、パワーエレクトロニクス技術の発展に伴い、様々な電気機器でインバータ駆動化が進められている。インバータ駆動機器では、高速スイッチングによるインバータサージに伴って部分放電 (PD) が発生する恐れがあり、絶縁劣化を加速させる要因となる⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、インバータ駆動環境下における絶縁診断技術の高度化を目指し、機械学習を用いた放電発生箇所の識別手法について検討を行った。本稿では、駆動電圧波形を模擬した PWM 電圧下での部分放電データを取得し、機械学習モデルによる放電モード識別の基礎検討を行った結果について報告する。

2. 実験概要

<2・1>実験構成 インバータ駆動機器の絶縁環境を模擬するため、部分放電試験を行った。供試体として、放電発生様相の異なる3種類のサンプル (Arrow pair, Twist pair, Needle-surface) を用意した。部分放電信号の検出には、高周波 CT を用いて接地電流を計測した。印加電圧波形には、インバータのスイッチング動作を模擬した 5 level の PWM 波形を用いた。基本周波数、キャリア周波数は各々 50 Hz, 25 kHz とした。

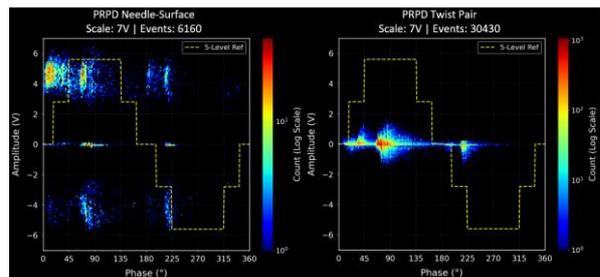
<2・2>データ収集と学習 各サンプルに対し、それぞれの部分放電開始電圧 (PDIV) の 1.2 倍の電圧を設定し、5 レベルの PWM 電圧を印加して発生した部分放電信号を計測した。計測データから特徴量を抽出し、教師データとして機械学習モデルに入力した。代表的な PRPD (Phase resolved PD) パターンを図 1 に示す。

3. 識別結果と考察

<3・1> 識別モデルと特徴量 部分放電パターンの識別には、機械学習アルゴリズムとして Random Forest を採用した。本手法は計算負荷が小さく、実行時のメモリ消費 (RAM) も極めて少ないため、将来的な演算リソースの限られた環境への実装に適している。

学習および識別には、部分放電波形データから取得した統計的特徴量を用いた。具体的には、「最大振幅」「平均振幅」「パルス数」「総エネルギー」「位相分布の散らばり」「正負半サイクルの非対称性」の 6 つとした。

<3・2>識別精度と評価 表 1 に、5 レベル PWM 波形が印



(a) Needle-surface sample (b) Twist pair sample

図 1 二つの異なる試料の PRPD (位相分解部分放電) パターン

Fig.1. PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) Pattern for Different Specimens.

表 1 分類レポート: さまざまな排出パターンのパフォーマンスメトリック。

Table 1: Classification Report: Performance metrics for different discharge patterns.

Class	Precision	Recall	F1-Score	Support
Needle	1.00	1.00	1.00	23
Arrowpair	0.97	1.00	0.98	31
Twist	1.00	0.97	0.99	35
Accuracy			0.99	89
Macro Avg	0.99	0.99	0.99	89
Weighted Avg	0.99	0.99	0.99	89

加したテストデータ (計 89 サンプル) を用いた評価結果を示す。検証の結果、電圧波形が混在する条件下においても Weighted Avg F1-Score は 0.99 に達した。これにより、放電発生源の構造をロバストに識別可能であることが確認された。

今後は、環境因子や絶縁媒体、放電源などの拡充を行い、より実用的な環境での検証を行う予定である。

文 献

- (1) Akihiko Iwata: "Verification of PD Suppression by Multi-Level Inverter for Electric Aircraft", 2025 IEEE/AIAA Transportation Electrification Conference and Electric Aircraft Technologies Symposium (ITEC+EATS), pp. 1-6 (2025)
- (2) 梅本貴弘・坪井雄一・田中雄一・佐藤正寛・熊田亜紀子: 「航空機用潤滑油を冷媒に用いる直接液冷モータの減圧環境における絶縁破壊・部分放電特性」, 電気学会 誘電・絶縁材料シンポジウム, No.O-7 (2025)

Investigation of Partial Discharge Phenomenon in Epoxy Resin without Insulation Paper

Swe Zin Linn Htet*, Nagata Souta*, May Thin Khaing*, Tatsuya Sakoda*,
Toru Takayama**, Daisuke Mikami**

*Electric Power Lab, University of Miyazaki

**TEPCO Power Grid, Incorporated

1. Introduction

There is a possibility that partial discharge (PD) in epoxy resin of cast resin transformers finally causes breakdown through formation of electrical treeing. While our previous studies focused on an epoxy electrode system with a void and insulation paper, cast resin transformers also contain resin-rich regions without insulation paper. No details about PD behavior in the regions, governed by intrinsic epoxy properties and internal defects, has been made yet. Therefore, this study focuses on PD characteristics in an epoxy electrode without insulation paper, which may be useful for improving PD diagnostic technique.

2. Experimental Procedure

Fig. 1 shows the outline of experimental setup. An epoxy electrode without insulation paper was energized by 25 kV with AC 60 Hz. Above the insulation paper, there was a void with a diameter of 1 mm. PD current was measured using a current transformer (CT) sensor clumped on a grounding wire. Additionally, two transient earth voltage (TEV) sensors were arranged on the inner and outer wall of the 11 mm thick acrylic vessel to evaluate location dependency of detected signals. Also, the number of PDs were monitored by the number of triggers in an oscilloscope.

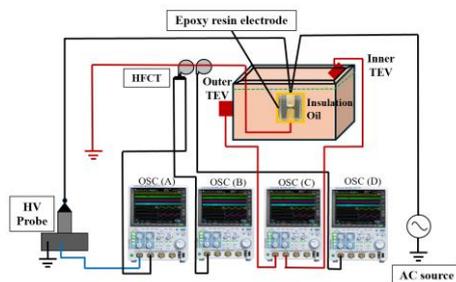
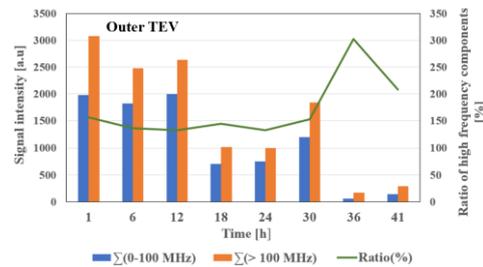


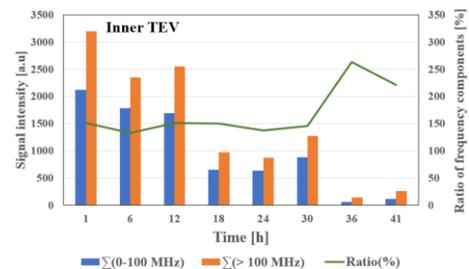
Fig. 1. PD experiment setup.

3. Experimental Results

PD magnitude was initially stable at approximately 250 pC, increased rapidly to about 2000 pC between 3 h and 10 h, and then gradually decreased after 11 h, with no electrical treeing or breakdown observed up to 41 h. By the way, an epoxy electrode with insulation paper exhibited higher PD magnitude (~1000pC),



(a) Outer TEV



(b) Inner TEV

Figs. 2. Temporal variation of high frequency components (more than 100 MHz) of signal waveforms detected by outer and inner TEV sensors.

electrical treeing at 46 h, and breakdown at 76.5 h. This increased PD activity is attributed to strong interfacial effects (epoxy-insulation paper), where permittivity mismatch.

Figs. 2 show the variation of the ratio of high-frequency PD components (>100 MHz) detected by the outer and inner TEV sensors. They are almost same. Because the vessel was made of acrylic, the propagation of electromagnetic waves doesn't differ in sensor positions. That is, in the case where there is no metal shielding layer between a PD source and a TEV sensor, there is no sensor position dependency in frequency components of detected signals by TEV sensors.

4. Conclusion

This study clarifies the fundamental PD behavior of epoxy insulation without insulation paper. The epoxy electrode without insulation paper exhibited lower PD magnitude than that with insulation paper, highlighting strong interfacial effects. Also, there was no sensor position dependency in frequency components of detected signals by TEV sensors.

ナノコンポジットエナメル皮膜材料の 耐部分放電特性と表面シリカ層形成の効果

池田 有志*, 大里 辰希 (兵庫県立大学), 山田 修平, 黒岩 和也 (日産化学),
菊池 祐介 (兵庫県立大学)

Partial Discharge Resistance of Nanocomposite Enamel Coating Materials and the Effect of Surface Silica Layer Formation
Yuji Ikeda*, Tatsuki Osato (University of Hyogo), Shuhei Yamada, Kazuya Kuroiwa (Nissan Chemical Corp.),
Yusuke Kikuchi (University of Hyogo)

1. はじめに

インバータ駆動モータコイルの絶縁設計は部分放電(PD)発生を許容しない Type-I 絶縁と所定の寿命特性を満足することで PD 発生を許容する Type-II 絶縁に大別される⁽¹⁾。Type-II 絶縁では、巻線に有機絶縁材料中にナノサイズの無機物粒子を充填したナノコンポジットエナメル電線を適用することで長寿命化を図ることが期待される。ナノコンポジットエナメル電線の長寿命化のメカニズムとして、PD 照射によりエナメル皮膜中の無機物粒子が表面に析出することで保護膜の役割を果たすことが挙げられている⁽²⁾。しかし、保護膜の形成過程や無機物粒子の種類・充填率が与える影響など未解明な点が多い。

我々はこれまでに平行平板電極間に発生した PD を有機絶縁フィルム試料に照射し、その損耗量を質量減少量から評価する実験を報告してきた⁽³⁾。本研究ではナノコンポジットエナメル皮膜を銅板に塗布した試料に対して PD を照射し、PD に対する損耗特性を調査している。本発表ではその初期結果について報告する。

2. 実験方法・結果

本実験では、銅板 (30 mm 角, 厚さ 0.5 mm) の上にポリイミドエナメル皮膜 (厚さ 30-35 μm) を塗布した試料を用いた。また、ナノコンポジットエナメル皮膜の場合、皮膜中にシリカが 20% 充填されている。放電電極として円柱状の上部電極と下部電極 (ステンレス製, 直径 30 mm) を対向させ、上部電極の下にガラス板 (50 mm 角, 厚さ 0.13 mm), 下部電極上にエナメル皮膜試料を設置した。また、ガラス板とエナメル皮膜試料の間にガラススペーサー (厚さ 0.13 mm) を設置することで空気ギャップを作り、PD を発生させた。また、この放電電極を恒温恒湿槽内に設置し、温度 25 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 50% とした。

PD 照射実験では放電電極間に周波数 7 kHz の交流電圧 (振幅 3 kV) を印加した。また、下部電極と接地間に直列にコンデンサを接続し、 $V-Q$ リサーチ法により放電電荷量と放電電力を算出した。PD 照射前後の試料の質量を電子天秤で測定し、エナメル皮膜の損耗量を測定した。さらに、段差計により損耗深さと表面形状を調査した。

図 1 に PD 照射時間 (t_d) に対するエナメル皮膜試料の質量減少量を示す。この結果から、ナノコンポジットエナメル皮膜の場合、損耗速度は汎用エナメル皮膜に比べて約 50 分の 1 に抑制されることが分かる。図 2 に PD 照射後の試料

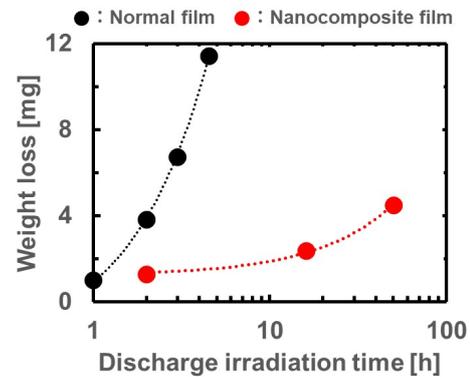


図 1 PD 照射時間に対する試料の質量減少量。
Fig. 1. Weight loss as a function of PD irradiation time.

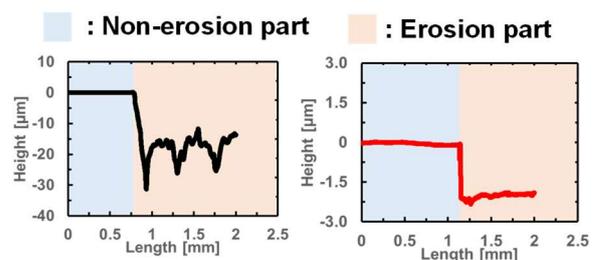


図 2 PD 照射後の試料表面形状 (左: 汎用試料 ($t_d = 4.5$ h), 右: ナノコンポジットエナメル皮膜試料 ($t_d = 120$ h))
Fig. 2. Surface morphology of the sample after PD irradiation (Left: Normal sample ($t_d = 4.5$ h), Right: Nanocomposite sample ($t_d = 120$ h)).

表面を段差計で測定した結果を示す。この結果から、汎用エナメル皮膜試料の表面は凹凸が大きく、局所的に損耗が進展していく。一方、ナノコンポジットエナメル皮膜の場合、表面にシリカ層が形成されており、比較的平坦な表面形状が現れていると考えられる。

3. まとめ

ナノコンポジットエナメル皮膜試料に PD 照射し、照射前後の質量減少量と表面形状変化から耐部分放電特性を評価した。講演ではエナメル皮膜表面状態と放電電力の変化の関係などについても発表する。

文 献

- (1) 適用拡大が進むインバータ駆動回転機の絶縁の現状, 電気学会技術報告 第 1533 号 (2022)
- (2) Y. Uozumi, et al., Proc. of CEIDP2007, pp. 228-231 (2007)
- (3) 菊池ほか, 令和 2 年電気学会 A 部門大会講演論文集, p. 37 (2020)

繰返しパルス電圧下におけるエナメル電線間の 部分放電モデリングの空間2次元化 (III)

中川 透吾*, 大里 辰希 (兵庫県立大学), 石川 裕卓, 宮路 仁崇,
大竹 泰智 (三菱電機 (株)), 菊池 祐介 (兵庫県立大学)

Spatial two-dimensional modeling of partial discharge between enameled wires under repetitive pulsed voltages (III)

Togo Nakagawa*, Tatsuki Osato (University of Hyogo), Hirofuku Ishikawa, Yoshitaka Miyajima,
Yasutomo Otake (Mitsubishi Electric Corp.), Yusuke Kikuchi (University of Hyogo)

1. はじめに

本研究グループでは、SiC インバータ駆動モータコイル絶縁に関する研究を行っており、実験結果⁽¹⁾の理解のためにエナメル電線間に生じる部分放電を誘電体バリア放電と捉え、流体モデルを用いた数値解析を行っている⁽²⁾。これまで、空間1次元モデルを空間2次元化し、計算を行った結果について報告した⁽³⁾。本講演では荷電粒子密度の2次元空間分布や帯電電荷密度分布等の詳細を報告する。

2. 数値解析方法・結果

数値解析では、図1に示す大気圧乾燥空気下にエナメル電線2本を平行に並べ接着する形で配置した2次元モデルを採用した。ここでエナメル皮膜に相当する誘電体層(厚さ38 μm , 比誘電率3.8)を電極上に配置し、ギャップ中のガスをドライエア (N_2 , O_2 混合気体, 293 K) とした。流体モデルの詳細は前報⁽³⁾を参照されたい。エナメル皮膜の2次電子放出係数 γ はパッシェンカーブを実測することで推定した値 (4.7×10^{-3})⁽⁴⁾ とした。

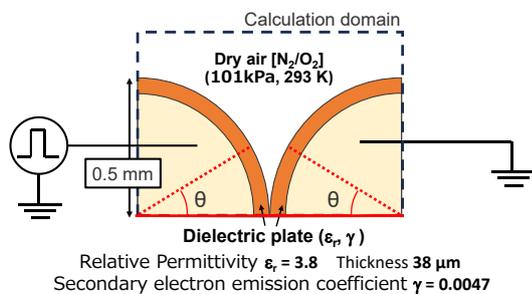


図1 数値解析モデル.

Fig. 1. Numerical analysis model.

図2にエナメル線間に印加した正極性パルス電圧波形(電圧: 1.3 kV, 立ち上がり時間: 52 ns, パルス幅: 500 ns) と放電電流波形を示す。ここで、放電電流は充電電流を除去したものである。図2より、放電電流は電圧立ち上がり時に加えて、電圧立ち下がり時に逆放電(放電電流の極性が負)が確認できる。図3に逆放電の放電電流を拡大した波形を示す。なお、計算では図1に示した電極系の奥行き方向の長さを10 mmと設定しており、ツイストペアの1ターン程度に対応する。

図4に逆放電が発生する直前の時刻(図3中の $t = t_1$) のエナメル皮膜表面の帯電電荷密度分布を示す。ここで、図4

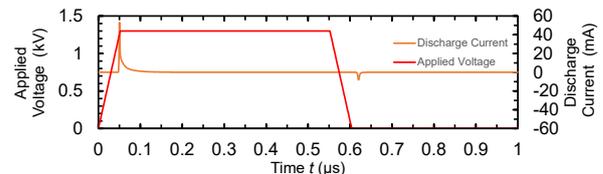


図2 印加電圧と放電電流波形.

Fig. 2. Waveforms of applied voltage and discharge current.

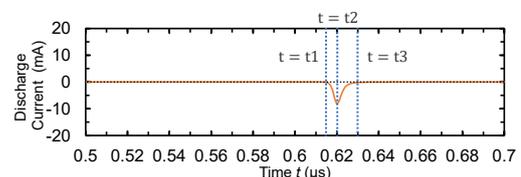


図3 逆放電時の放電電流波形.

Fig. 3. Waveform of reverse discharge current.

のグラフの横軸はエナメル皮膜表面に沿った方向 ($0 \leq \theta \leq 90 \text{ deg.}$) とした。 $t = t_1$ における帯電電荷は電圧立ち上がり時の放電によって生じた荷電粒子がエナメル皮膜に到達することで生じている。結果として、高電圧(陽極)電極側皮膜上に負の帯電電荷(最大密度点: $\theta = 13.3 \text{ deg.}$, $-523 \mu\text{C}/\text{m}^2$), 接地(陰極)電極側皮膜上に正の帯電電荷(最大密度点: $\theta = 12.8 \text{ deg.}$, $556 \mu\text{C}/\text{m}^2$)が分布している。この帯電電荷が形成する電界が外部から印加した電圧が形成する電界を打ち消すことにより、放電が停止している。なお、エナメル皮膜表面上の帯電電荷は逆極性の電荷を持った粒子が到達することで中和され減少する過程と、エナメル皮膜表面を拡散する過程が考えられる。本モデルでは前者を取り入れているが、後者は含まれていないことに注意されたい。

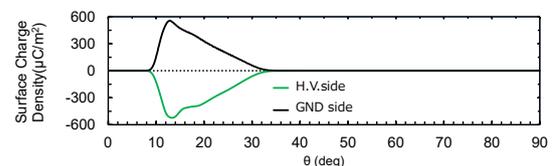


図4 エナメル皮膜表面上の帯電電荷密度分布 ($t = t_1$).

Fig. 4. Charge density profiles on enameled surfaces at $t = t_1$.

次に、逆放電による放電電流が最大となる時刻（図3中の $t = t_2$ ）のエナメル皮膜表面の帯電電荷密度分布を図5に示す。逆放電により生じた荷電粒子がエナメル皮膜表面に到達することで帯電電荷を中和するため、帯電電荷量が減少している。また、この時刻では接地側皮膜上に帯電している正の電荷密度が大きく減少しており、電子と正イオンの移動度の違いにより正の帯電電荷が速く中和されたと考えられる。

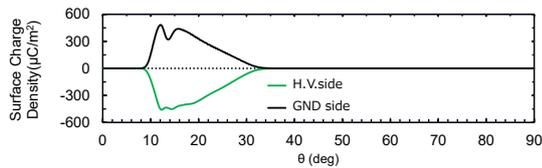


図5 エナメル皮膜表面上の帯電電荷密度分布 ($t = t_2$) .
Fig. 5. Charge density profiles on enameled surfaces at $t = t_2$.

最後に逆放電が消滅した後の時刻（図3中の $t = t_3$ ）のエナメル皮膜表面の帯電電荷密度分布を図6に示す。このように、帯電電荷密度は凹分布を有しており、空気ギャップに生じる電界は複雑な空間分布を有する。この帯電電荷密度分布は次のパルス電圧が印加されたときの放電に影響すると考えられ、本研究での2次元モデル化により明らかにすることが出来た。

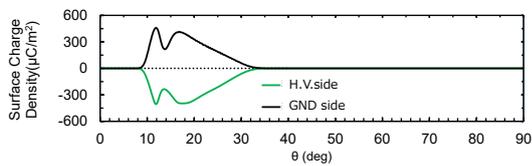


図6 エナメル皮膜表面上の帯電電荷密度分布 ($t = t_3$) .
Fig. 6. Charge density profiles on enameled surfaces at $t = t_3$.

3. まとめ

エナメル線間に発生する部分放電に対して空間2次元の誘電体バリア放電シミュレーションを適用した。放電によってエナメル皮膜上に発生する帯電電荷の密度分布の時間変化について明らかにした。今後は2発以上のパルス電圧を印加したときの放電発生と前の放電で生じたエナメル皮膜上の帯電電荷が与える影響について調査していく予定である。

文献

- (1) Y. Kikuchi, J. Matsusue, F. Yamada, T. Okuda and T. Nakamura, IEEE Access, Vol. 11, pp. 68826-68835 (2023).
- (2) 山田, 大里, 石川, 宮路, 大竹, 菊池, 令和7年電気学会全国大会, 2-002, p. 2 (2025).
- (3) 中川, 大里, 石川, 宮路, 大竹, 菊池, 令和8年誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧 合同研究会, DEI-26-005
- (4) Y. Miyaji, H. Ishikawa, Y. Otake, F. Yamada, Y. Kikuchi, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 32, No. 5 (2025) pp. 3117-3119.

直列コンデンサ法による高繰り返しナノ秒パルス電圧下の ツイストペアにおける部分放電開始電圧計測

石見 歩夢*, 大里 辰希 (兵庫県立大学), 石川 裕卓, 宮路 仁崇,
大竹 泰智 (三菱電機), 奥田 貴史, 中村 孝 (ネクスファイ・テクノロジー),
菊池 祐介 (兵庫県立大学)

Measurement of Partial Discharge Inception Voltage in a Twisted Pair Sample Under High-repetition Nanosecond Voltage Pulses
Using the Series Capacitor Method

Ayumu Iwami*, Tatsuki Osato (University of Hyogo), Hirofuku Ishikawa, Yoshitaka Miyaji,
Yasutomo Otake (Mitsubishi Electric Corp.), Takafumi Okuda, Takashi Nakamura (NexFi Technology Inc.),
Yusuke Kikuchi (University of Hyogo)

1. はじめに

SiC インバータの高 dv/dt 特性によりモータコイルへの繰り返しサージ電圧の上昇とコイル内部の電圧集中率の増大により、モータコイルにおける部分放電 (PD) の発生と早期絶縁劣化の危険性がある。我々は SiC-MOSFET インバータ電源をエナメル線ツイストペアにおける部分放電実験に適用し⁽¹⁾, 部分放電の湿度や気圧特性を調査してきた⁽²⁾⁽³⁾。一方、電気自動車の運転環境では高温下の特性評価も重要である⁽⁴⁾。しかし、従来の実験で PD 計測に用いてきた光電子増倍管 (PMT) を適用するには、PD 発光を透過する観測窓を有する高温槽など高価な設備が必要となる。そこで、本研究では直列コンデンサ法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて部分放電開始電圧 (PDIV) と繰り返しパルス電圧下の PDIV (RPDIV) を測定し、PMT と比較した結果を報告する。

2. 実験方法・結果

本実験で使用した SiC-MOSFET インバータ電源 (ネクスファイ・テクノロジー (株) 製) は単極性、両極性パルス電圧を出力可能であり、パルス電圧の立ち上がり時間は 18 ns (1000 V の時)、最高繰り返し周波数は 500 kpps である。本実験ではパルス幅を 500 ns、繰り返し周波数を 2 kpps とし、正・負を交互に両極性パルス電圧を 20 発印加した。直列コンデンサ法はツイストペア試料にコンデンサ C を直列接続し、その両端電圧から PD 電荷量を求める手法である。なお、 C の値 (490 pF) はツイストペアの静電容量に比べて十分大きな値を選んだ。また、本実験は実験室環境 (温度 24°C, 湿度 62%) で行った。PMT の感度波長は 300~900 nm のものを用いた。なお、印加電圧 (電源設定電圧) は 500 V から 1500 V まで 10 V ステップで昇圧し、全てのデータをオシロスコープで一括保存した。

図 1 に印加電圧に対する PD 電荷量 (20 発の平均値) とパルス電圧 20 発中の PD 発生確率を示す。ここで、コンデンサ両端電圧は充電電圧に PD 発生分が重畳された波形となる。また、1 つ前のパルス電圧にて生じた PD の電荷が残存しているため、毎回のパルス電圧にて生じた変化分を PD 電荷量とした。この結果から、PDIV は 1016 V, RPDIV は 1029 V と得られ、PMT の測定結果と良く一致し、PMT と同等の高感度で PD 計測が可能であることが分かった。

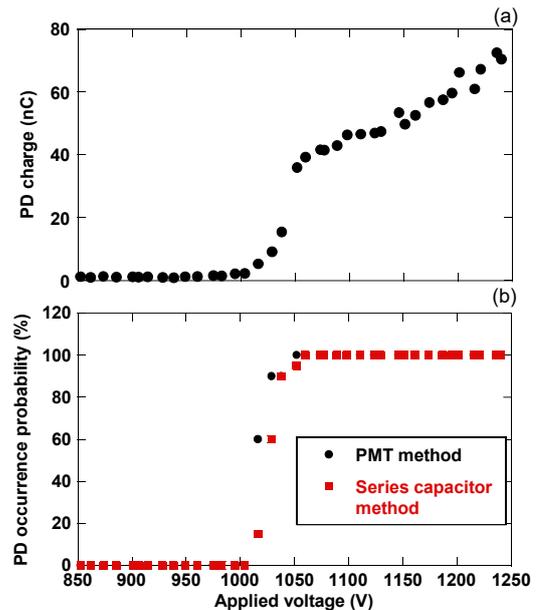


図 1 印加電圧に対する(a)PD 電荷量, (b)PD 発生確率。

Fig. 1. (a) PD charge and (b) PD occurrence probability as a function of the applied voltage.

3. まとめ

両極性繰り返しパルス電圧下のツイストペアにおける PDIV と RPDIV 測定に直列コンデンサ法を適用し、PMT の結果と良く一致することを示した。直列コンデンサ法はパルス電圧のどのタイミングで PD が発生したかの情報は得られないが、比較的簡便な方法にて SiC インバータの繰り返し高速パルス電圧下の PDIV, RPDIV を評価することが可能である。

文献

- (1) Y. Kikuchi, et al., IEEE Access, Vol. 11, pp. 68826-68835 (2023)
- (2) Y. Miyaji, Y. Otake, Y. Kikuchi, Proc. of CEIDP 2025, pp. 523-526 (2025)
- (3) A. Iwami, et al., Proc. of 24th ISH, PS4-31 (2025)
- (4) 石川ほか, 第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, pp. 37-42 (2025)
- (5) K. Kimura, S. Itaya, S. Ushirone, M. Hikita, W. Bito, Proc. of 7th ICPADM, pp. 1061-1064 (2003)
- (6) 久保ほか, 平成 30 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, p. 39 (2018)

複合環境因子下における耐サージ性エナメルツイストペアのインパルス PDIV および PD 電荷量特性

梶山 飛翔*, 長谷 宥里, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)

Impulse PDIV and PD Charge Characteristics of Surge-Resistant Enameled-Wire Twisted Pairs under Combined Environmental Factors
Towa Kajiyama *, Yuri Nagatani, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

カーボンニュートラル化に向け、航空・自動車分野では推進系の電動化が進められている^{(1),(5)}。電気絶縁に関しては、モータ巻線の絶縁信頼性を確保するためには気圧変化や、温度上昇、および湿度変化などの環境因子を考慮する必要がある。筆者らもこれまで、温度・湿度・気圧のうち単一の環境因子が部分放電 (partial discharge: PD) 特性に及ぼす影響をそれぞれ明らかにしてきた^{(2),(3),(4)}。一方で、これらの因子が同時に作用する場合の複合的影響については体系的な報告は少ない。

そこで本研究では、これまで報告例の少ない耐サージ性エナメル線を適用したモータ巻線模擬ツイストペア試料を用い、インパルス部分放電開始電圧(PD inception voltage: PDIV)およびPD電荷量の温度・湿度・気圧依存性を実験的に検討した。

2. 実験方法

図1に、PDIV測定実験系の概略図を示す。温度・湿度・気圧の実験環境の調整は、図1の右側に示す複数環境因子調整システムにて行った。PDはループセンサを用いて測定した。印加電圧には両極性インパルス電圧を用い、繰り返し周波数2.5kHz、立ち上がり時間100ns、パルス幅1 μ sとした。昇圧速度は50V/sとし、この条件で電圧を印加した。インパルスPD電荷量 Q は $Q=C_d \times \Delta V$ の式から計算した。PDIV測定の際には、試料に近い側のループセンサにトリガをかけ、閾値をノイズレベルの2倍に設定した。環境条件は温度(30 $^{\circ}$ C, 85 $^{\circ}$ C)、湿度(20%RH, 70%RH)、気圧(1atm, 0.2atm)とした。

3. 結果および考察

図2に、大気圧での温度30 $^{\circ}$ C、湿度20%RHを基本条件として規格化したインパルスPDIV比(R_{PDIV})およびPD電荷量比(R_Q)の気圧依存性を示す。各条件のPDIVとの比およびPD電荷量との比として整理した。その結果、基本条件に比べるといずれの条件においてもPDIVが低下する傾向を示した。一方、85 $^{\circ}$ C・70%RHの高温高湿度条件に限り、気圧低下に伴いPDIVが増加する挙動が確認された。この理由として、通常は気圧低下により、電子の平均自由行程が増加し、電子の衝突による電離が起りやすくなるためPDIVが低下すると考えられる。しかし、85 $^{\circ}$ C・70%RHの条件で

は、湿度低下による初期電子の発生源の減少が支配的となり、結果としてPDIVが増加したと推察される。また、PD電荷量については、どの条件においても気圧低下に伴い大幅な増加が認められた。これらの結果から、気圧低下時にはPDの放電形態が、パルス的で持続時間が短いストリーマ放電から、持続性が高くチャネル幅の広いグロー放電へ遷移している可能性が示唆される。

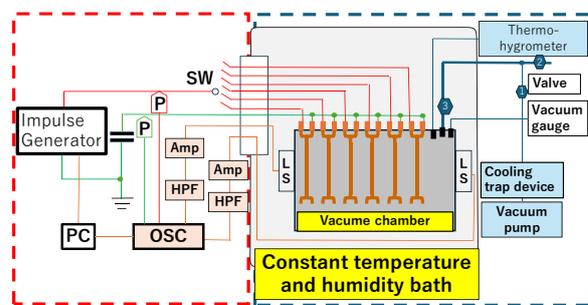


Fig.1. Schematic diagram of the PDIV measurement experimental system.

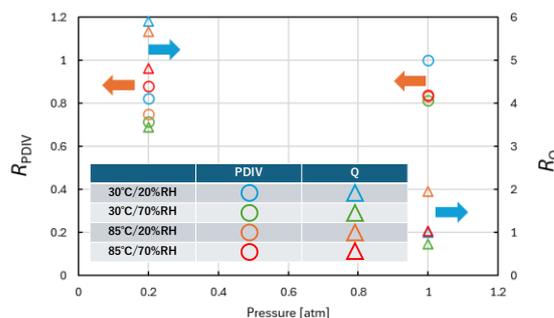


Fig.2. Pressure dependence of R_{PDIV} and relative variation of PD charge in surge-resistant enameled-wire twisted pairs

文献

- (1) 梅本, 他: 第55回電気電子絶縁材料システムシンポジウム GP(P)-3, pp.90-95 (2024)
- (2) 竹之内, 他: 令和2年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 3-P-B-5, p.249 (2020)
- (3) 西垣, 他: 第50回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, MVP1-6, pp.159-162 (2019)
- (4) 竹之内, 他: 令和3年電気学会全国大会, 2-009, p.9 (2021)
- (5) R. Farber, et al.: Journal of Physics D: Applied Physics, pp.1-16 (2024)

フッ素系液体封止 Si_3N_4 基板における 電極端部形状が部分放電開始電圧に及ぼす影響

泊岩 龍斗*, 金 ハナ, 末永 翔大, 坂本 アクバル大地,
匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)

Effect of Electrode Edge Geometry on Partial Discharge Inception Voltage of Fluorinated-Liquid-Encapsulated Si_3N_4 Substrates

Ryuto Tomaiwa, Hana Kim, Shota Suenaga, Akubarudaichi Sakamoto,
Masayuki Hikita, Kozako Masahiro (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

本研究では、パワーモジュールの封止材として液体絶縁材料の適用可能性を検討する。前報^(1,2)では、パワーモジュールの封止材として比誘電率が部分放電開始電圧 (PDIV) に与える影響を評価し、電界解析により PDIV を推定することで PDIV は局所的な最大電界のみでは決定されないことを示した。本報では、前報の PDIV 推定の妥当性を示すことを目的に、異なる電極エッジ構造を使用したフッ素系液体封止窒化ケイ素基板の PDIV 比較評価および電界解析による PDIV 推定を行った結果について報告する。

2. 実験方法

封止材として、3M 製 Fluorinert FC-3283(比誘電率 1.88)を用いた。絶縁基板には厚さ 0.320 mm、の窒化ケイ素(Si_3N_4)基板(比誘電率 8.3)を用いた。三重点における電極エッジ形状の異なる 2 種類の基板として、未加工基板(基板 1)および、片面に厚さ 0.30 mm、直径 20 mm の円形アルミ電極を有し、裏面に金スパッタを形成した基板(基板 2)を使用した。これらの基板を球対球電極系内に配置し、封止材により封止した。印加電圧は 60Hz の交流電圧を用い、500V_{rms}/s で昇圧し、各試料の PDIV を測定した(各試料につき 6 回、閾値 1pC、ワイブル分布に基づき、63.2%破壊確率に対応する電圧を代表値とした)。液体の絶縁破壊電界-ギャップ長特性は前報⁽¹⁾で作成した FC-3283 の実測から求めた経験式を用いた。当該式は、ギャップ長 0.03, 0.05, 0.10, 0.15 および 0.20mm とした条件下で測定した絶縁破壊電界(E)-ギャップ長(d)依存性から求めたものであり、次式で表される。

$$E = 21.1d^{0.417} \quad (1)$$

3. 結果および考察

PDIV 測定の結果、基板 1 は 8.9 kV_{rms}、基板 2 は 4.0 kV_{rms} となり、電極エッジ形状の違いが PDIV に大きく影響することが確認された。図 1(a)および(b)に、基板 1 および基板 2 に対する COMSOL 解析に基づく電界分布を示す。解析では、同一の電界強度を示す点を結んだ線分長を局所ギャップ長 d と定義した。図 2(a)および(b)は、基板 1 および基板

2 に対して、(1)式で表される絶縁破壊電界-ギャップ長特性 (E - d)特性曲線と、COMSOL 解析に基づく電界値をギャップ上の電界分布に重ねて示す。印加電圧を段階的に増加させた結果、解析電界が E - d 特性曲線と接する電圧を PDIV の推定値と定義した。その結果、基板 1 は 8.45kV_{rms} であり実測値と推定値は誤差約 5%であった。一方、基板 2 は 6.72kV_{rms} であり実測した PDIV との誤差が約 68%に達した。電極形状に起因する電界集中に伴う PDIV の低下傾向は確認されたが、推定精度は不十分であった。これは、解析で得られた E - d 特性が測定範囲外(約 0.003 mm)に位置したこと、および基板 2 は PD 発生面積が大きく、その結果、液中および存在するボイドが放電の起点となる可能性が相対的に高くなる。このため、ボイドに起因する PD が発生する確率が増加し、実測 PDIV が低下する要因となったと考えられる。

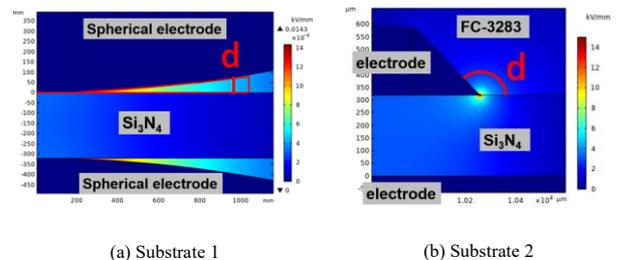


Fig. 1. Electric field distributions around the encapsulated Si_3N_4 substrates

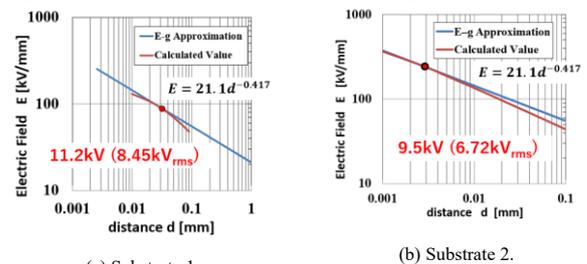


Fig. 2. Electric field-gap distance characteristics (E - d curve)

文献

(1) 泊岩 ら, 誘電・絶縁材料研究会, No. DEI-25-120, 2025

(2) R.Tomaiwa et al, 23rd IEEE ICDL_04_ID_1177 (2025)

ポリ塩化ビニルの帯電が ボイド中交部分放電開始電圧に与える影響

木村 凰二*, 長谷 宥里, 梶山 飛翔, 加藤 奏良, 佐々木 晴成,
匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)
三宅 弘晃, 田中 康寛 (東京都市大学)

Influence of Electrification in Polyvinyl Chloride on AC Partial Discharge Inception Voltage in Void

Oji Kimura*, Yuri Nagatani, Towa Kajiyama, Sora Kato, Hareru Sasaki,
Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology)
Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

1. まえがき

筆者らはこれまで、モールド変圧器やその絶縁紙におけるインパルス前課電が、その後の交流部分放電開始電圧(AC partial discharge inception voltage: AC-PDIV)に与える影響について検討してきた^(1,2)。インパルス印加直後のボイドに接する固体絶縁材料内の残留電荷は一時的に AC-PDIV を低下させるが、連続して交流 PD に曝されると残留電荷は除電され、AC-PDIV はインパルス印加前まで回復することを確認している^(1,2)。本報では、固体絶縁材料の永続的な帯電が AC-PDIV に与える影響について検討するために、帯電されているポリ塩化ビニル(polyvinyl chloride: PVC)フィルムを用いて PDIV 評価し、その帯電の影響を検討した結果を報告する。

2. 実験方法

試料系と実験系は前報⁽²⁾と同様である。図1に示すように、200 μm 厚の PVC フィルムに、直径 12 mm の円筒穴を有する 50 μm 厚のポリエチレンテレフタレート(polyethylene terephthalate: PET) フィルムを積層した試料を平行平板電極内に配置し、2層構造のボイド試料とした。本実験で使用した PVC フィルムは、片側の表面には負極性、さらにその内側に正極性の空間電荷が蓄積されており、その裏面は帯電していない。帯電している面 (top) をボイド側、帯電していない面 (bottom) をボイド側としたときの PDIV をそれぞれ測定し、空間電荷が PDIV に与える影響について検討した。PDIV 測定は、前報⁽²⁾と同様に 100 V/s (60 Hz) 一定で 1.2 kV_{rms} まで昇圧し、直ちに同速度で 0 V まで降圧させた。この一連の測定を top と bottom において 3 回ずつ連続で行った。試料数は 2 個である。

3. 結果および考察

図2に、PVC フィルムの top と bottom をそれぞれボイド側としたときの PDIV 測定結果を示す。同図より、bottom

時は、1,100 V_{rms} 程度の PDIV が正・負同程度の割合で発生した。一方で、top 時の 1 回目の PDIV は、800 V_{rms} 程度であり、bottom 時より 25% 程度低かった。また、測定回数に伴い PDIV は増加し、3 回目では bottom 時とほぼ同等になった。さらに、PDIV の極性はすべて正だった。これらの top と bottom の差は、PVC フィルムに蓄積している空間電荷の影響が考えられる。事前検討において、top 側の表面には正の空間電荷の蓄積が観測されている。この空間電荷とボイドにかかる外部電界が強調し合い、一時的な正極性における PDIV 低下が生じたと考えられる。

今後は、表面電位測定、並びに PD 特性と蓄積電荷の定量的な考察について詳細に検討する予定である。

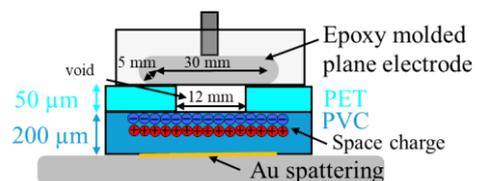


Fig.1. Configuration of void specimen using PVC film (top)

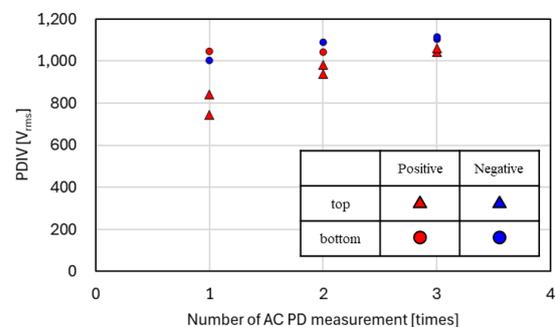


Fig.2. Results of PDIV measurement

文献

- (1) 丸山, 他: 電気学会論文誌 A, Vol.138, No.8, pp.422-427 (2018)
(2) 長谷, 他: 令和 6 年電気学会全国大会, 2-034 (2024)

界面を構成する絶縁体種が界面付近の電気トリー中の部分放電電荷量に及ぼす影響

服部 佑輝*, 村上 義信, 佐藤 孝政 (豊橋技術科学大学)

Partial Discharge Charge Amount in Electrical Tree near Interface
Influenced by Insulating Material Type Composing Interface

Yuki Hattori, Yoshinobu Murakami, Takamasa Sato (Toyohashi University of Technology)

1. まえがき

長期的な絶縁性能の低下要因の一つとして、電気トリーによる絶縁劣化が挙げられる⁽¹⁾。特に複合絶縁系においてはそれらの界面が電氣的弱点として作用⁽²⁾し、その界面に沿って電気トリーが発生・進展することが懸念されている。これらを背景に本研究では、2種類の絶縁体種から成る複合層試料を用いて界面付近のトリー中の部分放電(PD)特性を測定したので報告する。

2. 試料作製方法および実験方法

図1に試料形状を示す。先端曲率半径 $10\ \mu\text{m}$ の針電極を厚さ方向に半分に削った針(1/2針)電極と、厚さ $16\ \mu\text{m}$ のアルミ箔を約 $0.5\ \text{mm}$ の間隔でスライドガラス上(図1(a))またはポリイミド(PI)上(図1(b))に設置した後、電極間を未硬化の(EPCY221:HY2967=20:7)でモールドし、 $35\ ^\circ\text{C}$ で24時間硬化させた。電極系を $30\ ^\circ\text{C}$ のシリコンオイルに浸漬した後、1/2針電極に交流電圧(昇圧速度 $0.1\ \text{kV}_{\text{rms}}/\text{s}$, $60\ \text{Hz}$)を印加し、所定の長さになるまでトリーを進展させた。その後一旦電圧印加を休止した後、1/2針電極に一定交流電圧(昇圧速度 $0.1\ \text{kV}_{\text{rms}}/\text{s}$ で $5\ \text{kV}_{\text{rms}}$ まで昇圧, $60\ \text{Hz}$)を印加し、同調式PD測定器(CD-6)を用いてPD電荷量を20s間取得した。PD電荷量の検出閾値は $5\ \text{pC}$ とした。

3. 実験結果および考察

図2に典型的なPD測定前のトリーの様子を示す。最大トリー長は針先端を中心とする半円上における最大トリー進展長 L [mm]と定義した。図3に最大トリー進展長におけるPD電荷量を示す。同図中のプロットは最頻値、エラーバーは最小値および最大値を示す。界面の絶縁体種に関わらずPD電荷量の最頻値および最小値は最大トリー進展長に対してほとんど変化がなかった。トリー先端やトリーチャンネル内の一部で電荷量が小さいPDが多数生じたためと考えられる。一方、PI/EP複合試料のPD電荷量はGlass/EP複合試料のそれに比べ小さくなった。1/2針先端が接する絶縁体で比較した場合、PIの表面抵抗値 R_s は $10^{17}\ \Omega/\square$ ⁽³⁾であり、Glassのそれ $10^{14}\ \Omega/\square$ ⁽⁴⁾より高い。PI/EP複合試料においては、PIは R_s が高くトリー先端の電位が上がりにくいいため、

1/2針電極との電位差が小さくなる。その結果、トリー管内でのPDが発生しにくく、トリー分岐数が減少し、最大PD電荷量が減少したと考えられる。

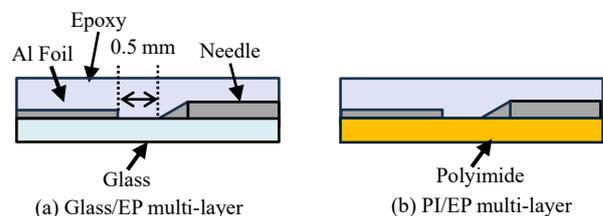
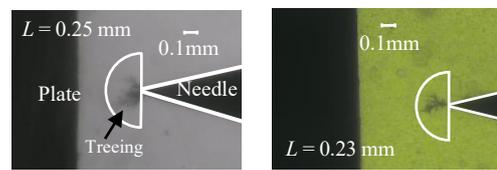


図1 電極形状

Fig.1. Electrode configuration



(a) Glass/EP multi-layer (b) PI/EP multi-layer

図2 トリーの光学顕微鏡像
Fig.2. Optical image of tree

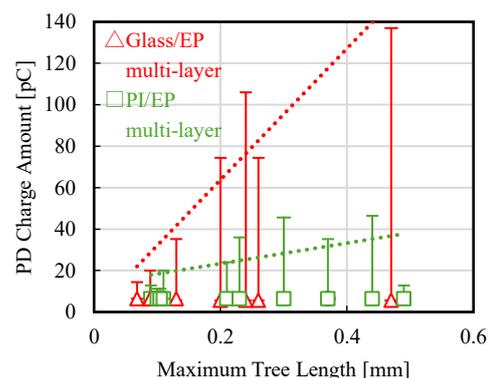


図3 PD電荷量の最大トリー進展長による変化

Fig.3. PD charge amount changed by maximum tree length

文献

- (1)横井・他：電気学会論文誌 A, 139(7), 337~338 (2019)
- (2)三川・他：電気学会論文誌 A, 40(2), 64~69 (2020)
- (3)前田：ポリイミド・芳香族系高分子 - 最近の進歩 2019, 5~12 (2019)
- (4)前中・他：New glass, 15(2), 56~62 (2000)

エポキシ/エポキシ複合界面付近における 電気トリー中の部分放電特性

谷畑 天斗*, 村上 義信, 佐藤 孝政, 川島 朋裕 (豊橋技術科学大学)
高月 大輝, 松山 幸太郎, 宮路 仁崇 (三菱電機株式会社)

Partial Discharge Characteristics in Tree Channel near Epoxy/Epoxy Multi-layer

Takato Tanihata, Yoshinobu Murakami, Takamasa Sato, Tomohiro Kawashima (Toyohashi University of Technology)

Daiki Takatsuki, Kotaro Matsuyama, Yoshitaka Miyaji (Mitsubishi Electric Corporation)

1. まえがき

長期的絶縁性能の低下の原因の1つに電気トリーによる絶縁劣化が挙げられる⁽¹⁾。電気トリーによる絶縁劣化には部分放電(PD)現象が関与している可能性⁽²⁾が高く、トリーイングにおけるPD現象を解明することは重要である。これらを背景に、界面付近に異なるトリー長を持つエポキシ(EP)/EP複合試料を用いて、一定電圧下におけるPD電荷量を測定したので報告する。

2. 試料作製方法および実験方法

図1に試料形状を示す。EP(CY221:HY2967=20:7で混合)で作製したEP角柱上に先端曲率半径10 μ mの針電極を厚さ方向に半分に削った針(1/2針)電極と厚さ16mmのアルミ箔を約0.5mm隔てて設置した。電極間を未硬化の同種のEPでモールドした後、EPを硬化(35 $^{\circ}$ C, 24h)させた。30 $^{\circ}$ Cにて1/2針電極に交流ランプ電圧(昇圧速度0.1kV_{rms}/s, 60Hz)を印加し、所定の長さになるまでトリーを進展させた。その後一旦電圧印加を休止した後、1/2針電極に交流電圧(昇圧速度0.1kV_{rms}/sで5kV_{rms}まで昇圧, 60Hz)を印加した。印加電圧波形をトリガとし、PD信号の時間変化を印加電圧が5kV_{rms}に達した後20s間測定した。PD発生の検出閾値は5pCとした。

3. 実験結果および考察

図2に典型的なPD測定前のトリーの様子を示す。最大トリー進展長 L [mm]は針先端を中心とする半円上における最大のトリーの長さとして定義した。図3にEP/EP複合試料における最大トリー長がPD電荷量に及ぼす影響をEP複合試料⁽²⁾のそれらとともに示す。同図中のプロットはPD電荷量の最頻値、エラーバーは最大または最小PD電荷量を示している。点線は最小二乗法によって求めた近似直線である。両試料においてPD電荷量の最頻値および最小値は最大トリー進展長に対してほとんど変化がなかった。一方、試料に関わらずPD電荷量の最大値は最大トリー進展長が長くなるほど大きくなる傾向を見せた。最大トリー進展長が長いほど針電極先端とトリー先端の電位差が大きくなり、また

は最大トリー進展長が長いほどトリー分岐数が増加し、同時にPDが発生した、もしくはその両方のためと考えられる。最大トリー長が短いEP/EP複合試料においては最大PD電荷量がEP単層試料のそれに比べ低下した。電氣的弱点となるEP/EP界面を容易に電荷が移動しやすく⁽³⁾、最大PD発生に必要な1/2針先端とトリー先端の電位差があまり大きくならなかったためと考えられる。

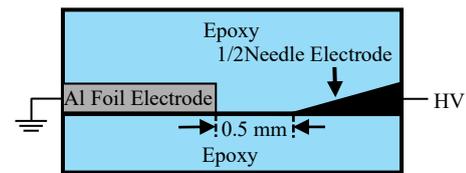
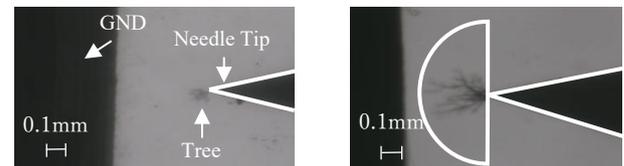


図1 電極形状

Fig.1. Electrode configuration



(a) $L = 0.102$ mm

(b) $L = 0.400$ mm

図2 トリーの光学顕微鏡像

Fig.2. Optical image of tree

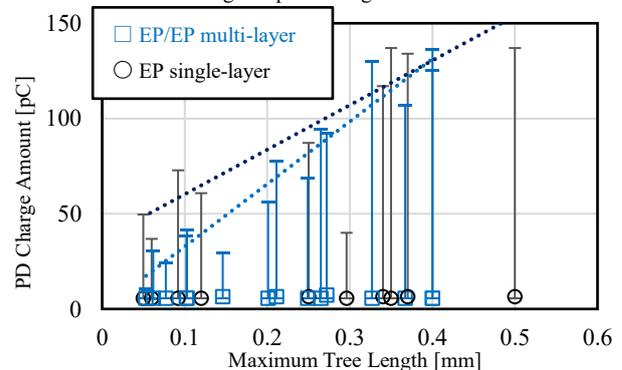


図3 各最大トリー長に対するPD電荷量

Fig.3. PD charge amount changed by maximum tree length

文献

- (1)坂本・他：電気学会論文誌A, 140(8)14~19 (2020)
- (2)服部・他：電気学会A部門大会, No.3-A-a2~4 (2025)
- (3) Emre Kantar, et al.:Proc. 24th Nordic Insul. Symp, 32~37 (2018)

Locating Dense Water Treeing Region in XLPE Cables

Kaung Htet Oo*, Atsushi Koreeda*, May Thin Khaing*, Tatsuya Sakoda*,
Kousei Tsuruta**, Tohru Takayama**, Daisuke Mikami**

*Electric Power Lab, University of Miyazaki

**TEPCO Power Grid, Incorporated

1. Introduction

Cross-linked polyethylene (XLPE) power cables are widely used in electric power systems. However, the XLPE cables gradually degrades under electrical and environmental stresses. One of the degradation phenomena is water-treeing.

To detect water-treeing degraded cables in a 22 kV XLPE cable system, we have proposed an inductive voltage/current pulse injection method combined with a conventional residual charge measurement.⁽¹⁾ A 1 MHz pulse was injected into the shielding layer of a 22 kV XLPE cable system using an injection (IJ) coil when AC voltage for obtaining residual charges accumulated in water-treeing regions is applied. Locating of a water treeing cable is achieved by using a reflection arrival time of the injected pulse.

In this study, we evaluated whether our technique can locate heavily degraded regions in a water-treeing cable or not.

2. Experimental Setup

Figure 1 shows an XLPE cable configuration which consists of a 40 m water-treeing cable (Blue), two 50 m water-treeing cable (Blue), a 10 m healthy cable (Black), and a Y-branch. CT_α is arranged adjacently to an IJ coil, and CT_β and CT_γ were arranged at grounded wires. Additionally, we made a highly concentrated water-treeing region in 50 m water-treeing cable, which is indicated by a solid circle in blue.

A 1 MHz pulse is obtained by a function generator and amplified by a high-speed bipolar amplifier. The amplified pulse is applied to the shielding layer through an IJ coil. Because impedance of a water-treeing degrade cable becomes small in comparison with a healthy cable, the injected pulse is reflected at

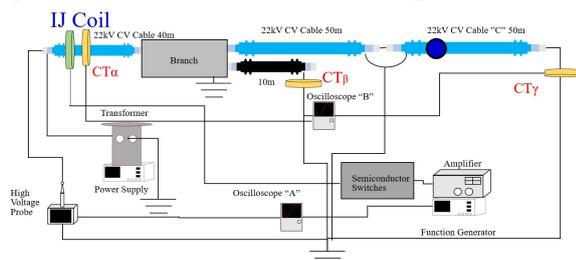


Fig. 1. Cable configurations including water-treeing degraded cables.

the boundary between cables. The 1 MHz current pulse is injected when AC voltage for discharging residual charges in water-treeing degraded cables is applied to XLPE cables. The reflected pulse waveform differs by the presence of residual charges. Additionally, the locating of the water-treeing degraded cable can be achieved based on a reflected wave reaching time.

3. Experimental Procedure

Experimental procedure is as follows:

Step 1: Reference measurement

AC 7.5 kV is applied to XLPE cables. When the voltage reaches 7.15 kV, a 1 MHz current pulse is injected to obtain “reference waveform”. The oscillation timing of the current pulse is shown in Fig. 2.

Step 2: DC application

DC 7.5 kV is applied to XLPE cables for 10 s to accumulate charges in water-treeing regions.

Step 3: Discharge excessive electric charges

XLPE cables are grounded for 10 s to discharge excessive electric charges caused by floating capacity.

Step 4: AC application & current pulse injection

AC 7.5 kV is applied. When the voltage reaches 7.15 kV, a 1 MHz pulse is injected to obtain “degraded waveform”.

Step 5: Obtaining “residual waveform”

“residual waveform” is decided by subtracting “reference waveform” from “degraded waveform”.

Step 6: Locating water-treeing cable

The water-tree section is performed by analyzing reflected wave reaching time.

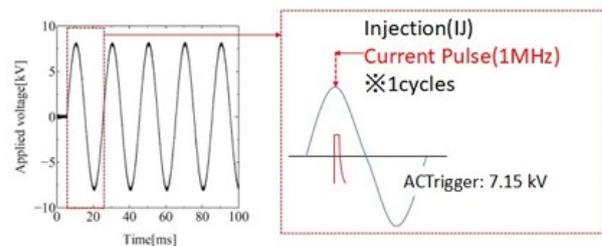


Fig. 2. Oscillation timing of the IJ pulse.

The above experimental procedures were repeated six times to obtain an average result.

4. Results and Discussions

Figure 3 shows “residual waveform” which is difference between “reference waveform” and “degraded waveform”. Also, it was confirmed that the propagation time of the current pulse traveling from a 40 m degraded cable to a 10 m healthy cable was approximately 350 ns which corresponds to propagation velocity of 1.4×10^8 m/s.

In Fig. 3, there is a signal peak at 0.31 μ s. Because the reflection wave from a boundary between a 40 m water-treeing degraded cable and a Y branch might arrive at 0.59 μ s, the signal peak could be due to a water-treeing region in a 40 m water-treeing degraded cable.

On the other hand, a reflection wave from the artificially fabricated water-treeing region should be seen at 1.55 μ s (108.51 m from a position of an IJ coil). However, a signal peak at around 1.55 μ s is not large. It is considered that the signal intensity is influenced by attenuation in the propagation process.

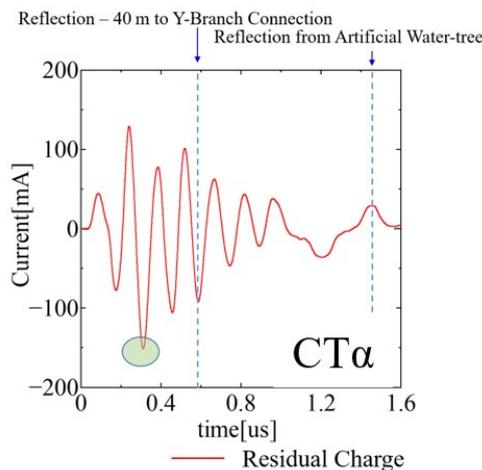


Fig. 3. Residual waveform reflecting water-treeing regions.

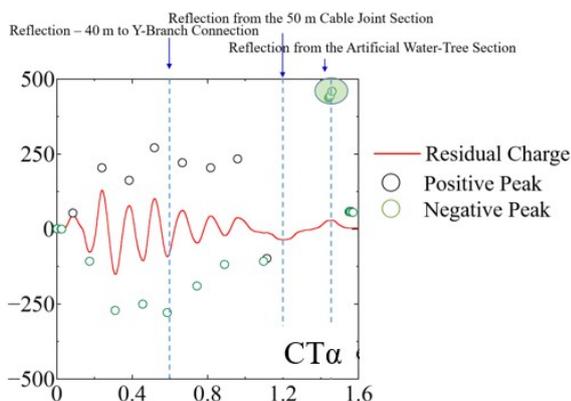


Fig. 4. Signal peak intensities calculated by using a damping coefficient.

Therefore, we estimated peak intensities in consideration of a damping coefficient which can be obtained by comparing signal intensities detected at different CT position. In Fig. 4, circles indicate signal intensities calibrated by the damping coefficient. A largest signal peak appears at 1.55 μ s, which may be due to a highly concentrated water-treeing region in 50 m water-treeing cable.

5. Conclusion

In a 22 kV XLPE cable configuration including water treeing degradation cables, we examined to locate water treeing degraded regions by combining the conventional residual charge method and the induced voltage/current pulse injection method. In particular, we examined whether our technique could locate an artificially degraded water treeing degraded region. As a result, we located the highly concentrated water-treeing region by considering the attenuation of the propagation waveform.

Now, we are performing locating water treeing cables in actual 22 kV distribution system.

References

- (1) May Thin Khaing, Nonoka Hirose, Takuma Miyake, Tatsuya Sakoda, Shigehiko Goto, Tomikazu Anjiki, Tomoki Chiba: "Evaluation of Degradation Degree on Silicone Rubber by Using Surface Discharge", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 998-1005 (2025)

分子シミュレーションを活用した 耐水トリリー性絶縁材料の開発

安田 陽平*, 鬼澤 雅紀, 山内 直哉 (株式会社ENEOS NUC)
菅崎 友士 (ENEOS HD株式会社)

Development of Water-Tree Retardant Insulation Materials Utilizing Molecular Simulation
Yohei YASUDA, Masaki ONIZAWA, Naoya YAMAUCHI (ENEOS NUC Co.), Yuji HAKOZAKI (ENEOS Holdings, Inc.)

1. はじめに

送電分野におけるカーボンニュートラルへの取り組みとして、報告者らはマテリアルリサイクル可能な架橋ポリエチレン(XLPE)の開発を進め、2種類の新規技術を報告した^[1]。また、直接的なリサイクル性改善だけでなく、再生可能エネルギーの導入推進に対する貢献として、直流 XLPE ケーブル用の絶縁材を既に製品化している。

一方、今後更なる需要拡大が見込まれる洋上風力発電において、耐水トリリー性架橋ポリエチレン(TR-XLPE)の適用が進んでいる。しかし、風車の大型化に伴うケーブル高電圧化に対して、従来 TR-XLPE から材料特性の向上が必要である。本研究では、分子シミュレーションを活用して新たな TR-XLPE 材を開発したので、その結果を報告する。

2. アプローチと開発品特性

<材料設計へのシミュレーションの活用>

XLPE への耐水トリリー性の付与技術としては、水と親和性の高い添加剤を配合し、絶縁体中の水分を均一に分散・固定化することで、水トリリーの発生や伸展を抑制できることがよく知られ、そのメカニズムも提案されている^[2]。

本研究ではシミュレーションを先行させ、効果的な添加剤特徴を解明することで、候補材料を選別して効率化しつつ、従来知見にとらわれない材料設計を目指した。

耐水トリリー性は添加剤の水トラップ性により発現するとみなし、添加剤と水分子との結合エネルギーを算出、その大小を比較した。結合エネルギーは汎用原子レベルシミュレータ MatlantisTM^[3]を使用し、添加剤と水とが結合する前後のエネルギー差から結合エネルギーを計算した。

<シミュレーション結果と材料特性>

約 1.4 万個の化合物に対して、水との結合エネルギーを算出した。水トラップ性能の構造的特徴を把握するため、水分子との相互作用(水素結合)が想定される最近接官能基で分類した結合エネルギーの分布を図 1 に示す。ここで、結合エネルギーの負値が大きいほど水トラップ性が高いことを意味する。図より、カルボキシル基やアミド基が高い水トラップ性能を示す。分布が広いヒドロキシ基等に注目し更に解析すると、最近接官能基の周辺構造も水トラップ

性に寄与することが示唆された。

シミュレーション結果を基に種々検討を重ね、表 1 に示す TR-XLPE 材を新たに開発できた。開発材は従来 TR-XLPE と同等の耐水トリリー性を有しながらも、通常 XLPE と同程度の電気特性を有しており、浸水環境下における高電圧ケーブル用絶縁材料としての利用が期待される。

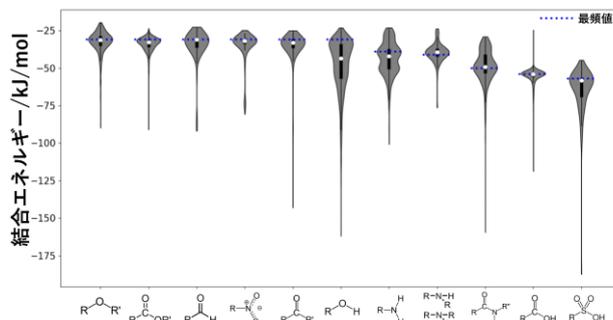


図 1 最近接官能基で分類した水との結合エネルギー分布
Figure 1. Distribution of Binding Energies with Water

表 1 開発材料の特性

Table 1. Characteristics of Developed TR-XLPE

項目	XLPE	従来 TR-XLPE	開発 TR-XLPE
架橋特性	Hot set 荷重時伸び <70% at 200°C		
機械特性	引張強度>25MPa、破断時伸び>500%		
最大水トリリー長	Ref.	Ref.比 30%	Ref.比 30%
誘電正接 at 90°C	0.02%	>0.2%	0.02%
DC 抵抗率 at 90°C	>10 ¹⁶ Ω cm	>10 ¹⁴ Ω cm	>10 ¹⁶ Ω cm

※参照規格：IEC 60840, ASTM 6097, JIS C 2138, JIS C 2139-3-1

3. まとめ

分子シミュレーションを活用した添加剤探索により、従来材と同等以上の特性を有する TR XLPE 材を開発できた。

文 献

- [1] a) 安田陽平・須賀健雄他, 令 6 電気学会全大, No.2-046. b) 安田陽平他, 令 7 電気学会全大, No.2-033.
[2] a) 福田輝夫, 電学論 A, 108, 5, 386-396 (1988). b) 植原弘明, 科学研究費助成事業 18K05244 (2021).
[3] Matlantis (<https://matlantis.com/>), software as a service style material discovery tool.

XLPE 試料を使用した 2 レベルインバータ波 印加時における水トリー進展特性

小林 悠希*, 植原 弘明, 岡本 達希 (関東学院大学)

Water Tree Propagation Characteristics Using XLPE Samples under Two-Level Inverter Wave Applications
Yuki Kobayashi, Hiroaki Uehara, Tatsuki Okamoto (Kanto Gakuin University)

1. まえがき

CV ケーブルにおいては、水と高電界の共存によって発生する水トリー劣化現象が依然として問題となっている⁽¹⁾。産業界では、インバータ駆動波形が多用されており、水トリー劣化を加速させる可能性がある⁽²⁾。本研究では、XLPE を使用し、等価 AC 周波数の 2 レベルインバータ波(以降、INV 波と略す)印加時における水トリー進展特性について検討したので、その結果を報告する。従来の加速劣化試験を実施しなかった理由としては、INV 波が多頻度パルス電圧によって等価 AC 周波数電圧を発生させるため、加速劣化させると実際の波形と大きく異なってくるためである⁽²⁾。

2. 試料および実験方法

<2・1>試料 厚さ 2 mm の XLPE シートを 5 cm 四方に切り取り、先端曲率半径 3 μm 、直径 1 mm のオグラ針を使用し、5 mm 角の範囲に 1 mm 間隔で深さ 0.5 mm の孔を開けて試料とした。このシートに直径 3 cm のアクリル製円筒容器をシリコングリースで接着する。接着した円筒容器内を 1 mol/L の塩化ナトリウム水溶液で満たし試料とした。
<2・2>実験方法 実験では、パルス電圧を 3 kV とし、等価 AC 周波数における INV 波(信号波 50 Hz)を 336 時間印加した。ここで、変調率は 95%である。ここで、水トリーの垂直方向への進展を伸び L (μm)とし、水平方向への進展を幅 W (μm)として定義する。それぞれ、75 個の試料の平均値として評価した。

3. 実験結果および考察

<3・1>水トリー形状 図 1 に、INV 波印加時における水トリー形状の例を示す。水トリー形状は、水電極先端付近で大きく分岐した手のひら状が多かった。また、水電極の側面方向にも進展していることがわかった。商用周波数印加時の水トリー形状は、マリモ状が多いため、INV 波印加時では大きく形状が異なることが確認できた。

<3・2>水トリー進展特性 図 2 に、INV 波印加時における水トリー進展特性の平均値を示す。水トリーの進展特性は、若干ではあるが L のほうが進展しやすいことがわかった。INV 波印加時においては、高調波を搬送波として使用するため、ひずみの影響が考えられる。また、高速高電圧

アンプのスルーレートの影響でひずみが大きくなっていることも考えられる。

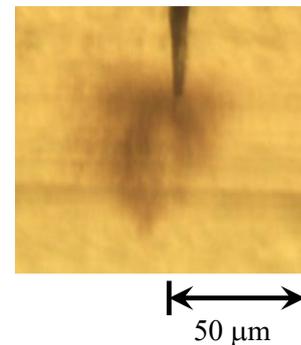


図 1 INV 波印加時における水トリー形状の例
Fig. 1. Example of water tree shapes two-level inverter wave applications

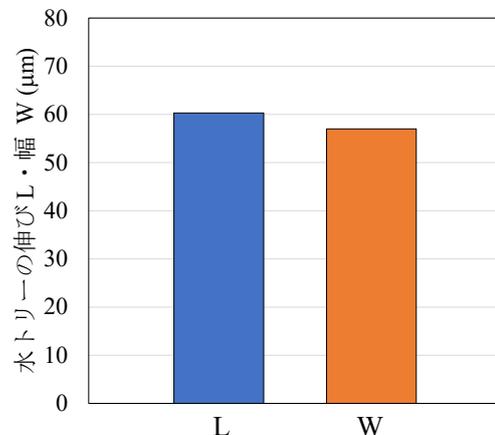


図 2 INV 波印加時における水トリー進展特性の平均値
Fig. 2. Average values of water tree propagation characteristics under two-level inverter wave applications

4. むすび

本研究では、XLPE 試料を使用し、等価 AC 周波数において INV 波印加時における水トリー進展特性を検討した。その結果、INV 波印加時には L のほうが W よりも比較的進展しやすいことがわかった。

文 献

(1)日高邦彦：高電圧工学 [第 2 版]，数理工学社 (2009)

(2)植原弘明他：電学論 A, Vol. 132, No. 4, pp. 325-332 (2012)

パルス計測における基線の確定法と空間電荷解析への応用

穂積 直裕 (穂積計測研究所/名古屋産業科学研究所)

Baseline Ensuring Algorithm for Pulse Measurement Applied to Space Charge Analysis

Naohiro Hozumi (Hozumi Measurement Lab. / Nagoya Industrial Science Research Institute)

1. まえがき

パルス静電応力法は、絶縁系内の電界にパルス電界を重畳させて音圧を発生させ、系外に伝搬する信号の時間変化を電荷密度の空間分布に変換する。電極から発生する音圧を衝撃応答とした参照した逆畳込処理が行われるが、標的波形と参照波形の基線(BaseLine)が正しくない場合には大きな計算誤差を生じる。この問題は、厚い試料で高感度の計測を行うときに顕著となる。基線の offset や傾き(tilt)は、スパイクノイズや計測系のゆらぎに起因すると考えられ、測定ごとに変化する成分を含むので、取得波形ごとの確定操作が必要となる。有限の時間窓による計測結果で波尾がゼロに収斂していない場合には、パルス波形の直流成分がゼロとなるように基線を補正する方法は却って誤差をもたらす。そこで、微分作用をもつ適当な関数(kernel)を畳込むことで基線をゼロとした信号に変換した後、逆畳込み操作によって目的信号を復元する手法を検討した。

2. 計算方法

簡単な例として、図1のように基線が傾きをもつ取得信号 $s_{aq}(t) = a_0 - a_1 t + s(t)$ を仮定する。ガウス関数 $g(t)$ を解析的に微分した $f(t) = dg(t)/dt$ (Gaussian mono-pulse) を畳込むと、

$$f(t) \otimes s_{aq}(t) = g(t) \otimes ds_{aq}(t)/dt \\ = g(t) \otimes a_1 + g(t) \otimes ds(t)/dt$$

最右辺第1項は定数であるから、目的信号を微分した関数にガウス関数を畳込んで offset を加えた結果が得られる。信号到来前の値から offset を推定して第1項がゼロとなるように補正すると、傾き成分は相殺される。衝撃応答を表す参照波形を用いた逆畳込を行うと、周波数補正された $s(t)$ が得られる。 $s_{aq}(t)$ の波尾がゼロに収斂していない場合には、数値 Laplace 逆畳込を行うことにより近似する⁽¹⁾。

3. 適用例

厚さ 11 mm のポリエチレン平板にアルミニウム電極を取付けたものを試料とした。直流バイアス -7.5 kV とパルス電圧 1 kV (幅約 400 ns) を印加し、パルス静電応力法による空間電荷測定を行った。20 秒ごとに 10 回連続して測定した信号に対し、空間電荷の影響がない参照信号を使用した逆畳込処理(normalize)を行った結果を図2(左)に示す。パルス応答到来前の信号から最小 2 乗法により offset を推定して基線を補正したもの(b)では、結果に大きなゆらぎが生じている。(d)は Gaussian monopulse の畳込みによる微分演算(c)を経たものであり、安定した結果が得られる。これよ

り求めた電荷と電界の分布を図2(右)に示す⁽²⁾。試料内部の様な帯電は、加工時に生じたものと考えられる。

4. まとめ

パルス静電応力法で測定される信号にガウス関数の微分波形を畳込む操作を経て基線を確定し、逆畳込処理を安定化できることを示した。

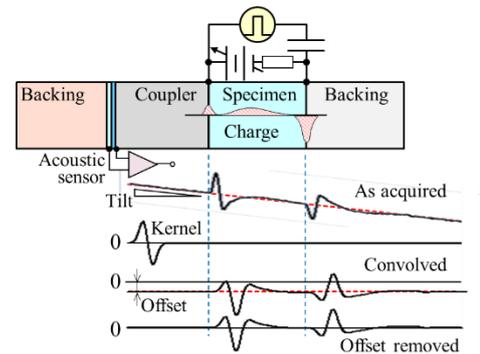


図1 基線確定の概要

Fig. 1. Baseline ensuring process.

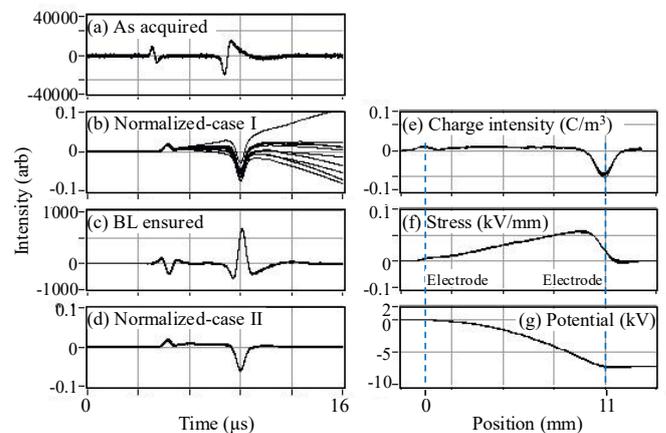


図2 基線確定と電荷・電界分布解析の結果

Fig. 2. Result of space charge analysis with ensured baseline.

文献

- (1) Y-G An, X. Li, T. Kawashima, Y. Murakami, Y. Tanaka, N. Hozumi: "Laplace Deconvolution for Improvement of Signal Processing in Space Charge Measurement Applied to Full-scale Cables", IEEE Transaction. on Dielectr. Electr. Ins., DOI:10.1109/TDEI.2025.3610493 (2025).
- (2) 李, 川島, 村上, 穂積: 「パルス静電応力法による空間電荷測定におけるノイズのゆらぎによる計算誤差の低減」, 電学論 A, Vol. 145, No. 4, pp. 92-98 (2025).

ガラスの空間電荷測定で見られる逆極性信号 に対する電極と試料界面の油膜の影響

寺本 有輝*, 弓達 新治, 尾崎 良太郎, 門脇 一則 (愛媛大学)

Influence of Oil at the Interface between Glass Specimen and Electrode on Polarity-Reversed Space Charge Signal
Yuki Teramoto, Shinji Yudate, Ryotaro Ozaki, Kazunori Kadowaki (Ehime University)

1. まえがき

ガラスやセラミックなどの無機材料内の空間電荷測定では特異な信号波形が観測されることが多い。一例として、一部のガラス試料(T-glass, C-glass)に直流電圧を印加した際に、印加電圧とは逆極性の信号波形が観測されることが挙げられる。この現象はガラス試料中に含まれる MgO, CaO の双極子モーメントが大きいために分極分子の電荷が外部印加電圧を受けて膨張/圧縮し、その動きが圧力波信号として検出されるため観測されると報告されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。今回我々は、MgO や CaO が含まれないとされる硼珪酸ガラス板でも逆極性信号が観測されるのかを確認するため、電界表示型 Stepped Electro-acoustic (SEA) 法を用いてカバーガラス内の電界分布を直接観察したところ、やはり通常とは逆向きの信号が得られた。本稿では、両面アルミニウム蒸着を施した試料および施していない試料を比較し、両者の違いから逆極性信号が現れる原因について考察する。

2. 実験方法

試料として両面アルミニウム蒸着が施されたカバーガラス (松浪硝子工業, 直径 22 mm, 厚さ 145 μm) と未蒸着のカバーガラスを用いた。直流電圧印加の際は、10 kV まで 2 分おきに 1 kV ずつ昇圧した。未蒸着試料における電極表面とガラス表面からの圧力波を分離検出することを目的として、試料と上下電極との間に、薄いシリコン油膜 (推定およそ 2 μm) を形成した。PEA 法よりも波形歪みの少ない SEA 法を用いて電界分布を直接観察した。測定方法の詳細は前報⁽⁴⁾と同一である。ただし本報では、出力信号の単位を電界や電荷の次元に変換せず、デコンボリューション処理後の波形を任意目盛上に表示した。

3. 実験結果

蒸着電極付き試料の電界に相当する信号を Fig.1(a)に、それを微分した電荷に相当する信号を Fig.1(b)に示す。さらに Fig.1(b)の波形に対してデコンボリューション処理を施した結果を Fig.2(b)に、それを積分した結果を Fig.2(a)に示す。また未蒸着試料における測定結果を Fig.3(a)に、それを微分した結果を Fig.3(b)に示す。Fig.3 の測定結果にはデコンボリューション処理は施していない。これは電極電荷と分極

電荷が混在している状態をインパルス波形とするとデコンボリューション処理の過程で分極電荷が消去されてしまうためである。

Fig.1, Fig.2 から蒸着電極付き試料において、先行研究と同様に印加した直流電圧と逆極性の信号波形が観測されることが確認された。これは、先行研究で示された結論を踏まえると、カバーガラスに正電圧を印加した際、「分極分子による膨張に起因する膨張波」が「電極電荷に起因する圧縮波」に比べて支配的であるために電極電荷が打ち消され、分極電荷のみが観測されることを示している。

一方で Fig.3 から、未蒸着の試料において、試料内部の分極電荷に加え陰極と陽極における電極電荷が確認された。

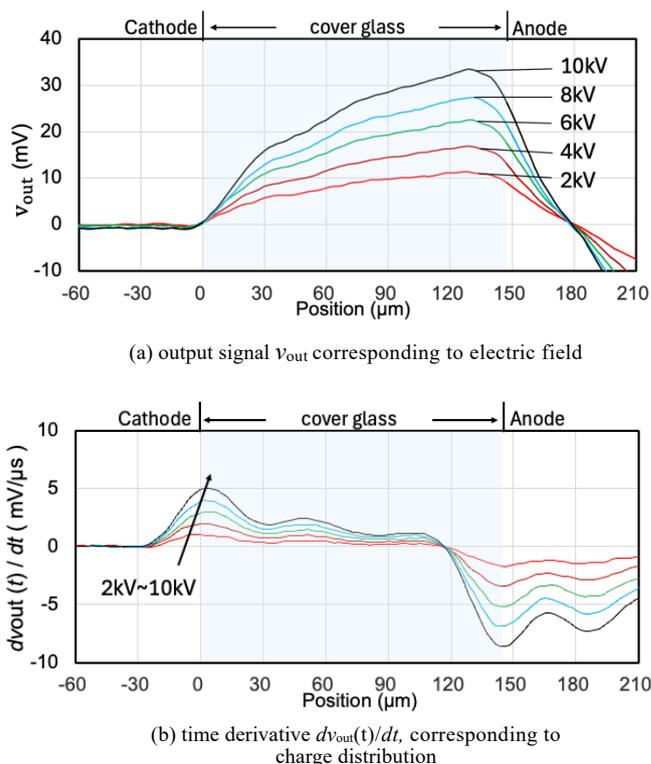


図1.電界表示型 SEA 法によるカバーガラスの測定結果 (両面アルミニウム蒸着試料・デコンボリューション未実施)
Fig.1 Waveforms of Aluminum deposited Cover Glass obtained by the Field Display-type SEA method (Without Deconvolution)

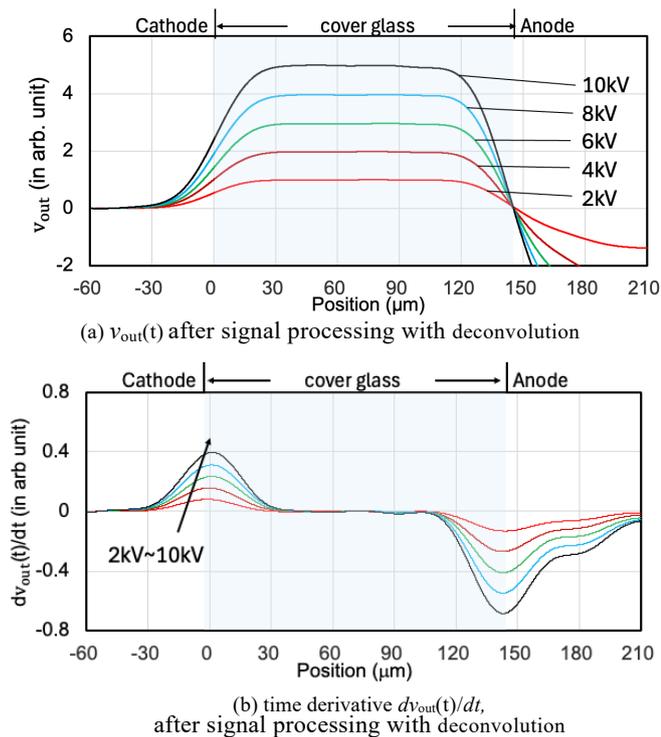


図2. 電界表示型 SEA 法によるカバーガラスの測定結果 (両面アルミニウム蒸着試料・デコンボリューション処理後)
Fig.2 Waveforms of Aluminum deposited Cover Glass obtained by the Field Display-type SEA method (After Deconvolution)

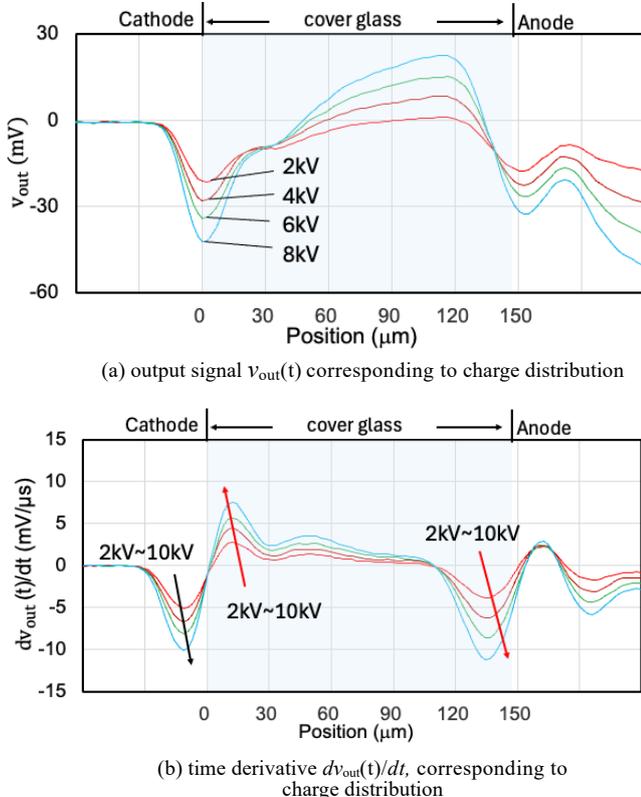


図3. 電界表示型 SEA 法によるカバーガラスの測定結果 (未蒸着試料・デコンボリューション未実施)
Fig.3 Waveforms of Non-deposited Cover Glass obtained by the Field Display-type SEA method (Without Deconvolution)

蒸着試料と未蒸着試料において観測結果に違いが生じる理由は、それぞれの試料において電極電荷が分布する位置が異なることに起因する。Fig.4(a)に示す通り蒸着試料では、電極電荷がアルミニウム蒸着面に分布するため、前述の理由により電極電荷に起因する信号は観測されない。一方で、未蒸着試料では Fig.4(b)のように電極電荷が上下電極に分布し、分極電荷からシリコン油膜を隔てて位置する。これにより「分極分子による膨張に起因する膨張波」と「電極電荷に起因する圧縮波」がそれぞれ検出でき、分極電荷と電極電荷を観測できる。つまり未蒸着試料は油膜の効果で「ガラスの膨張」の影響を受けにくいため電極電荷を観測できた。これに対し蒸着電極付き試料は、電極電荷からの圧力波が、ガラス試料の膨張に起因する圧力波に完全に打ち消されるため、電磁気学的に説明できないような結果になると思われる。

一方で、本実験で試料として用いたカバーガラスは硼珪酸ガラスであり、一般に CaO や MgO などの双極子モーメントの大きい成分を多く含まない。したがって、逆極性信号の検出には化学組成以外の要因が関与している可能性があり、慎重な検討が必要である。

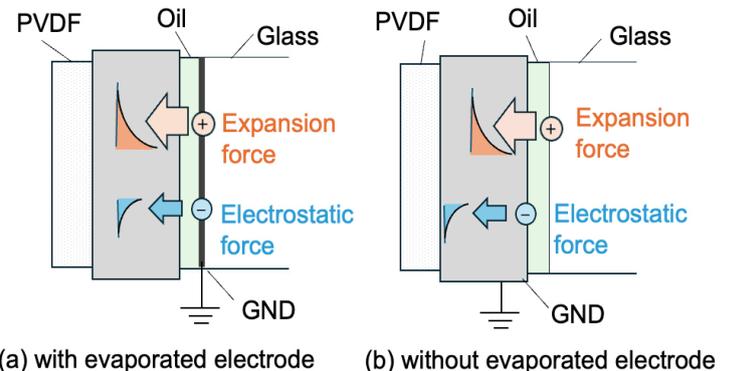


図4. 界面条件の違いによる測定結果の変化

Fig.4 Waveform Differences Due to Interface Conditions

文献

- (1) 高田達雄, 空間電荷蓄積:計測と解析, 丸善プラネット, P195, (2022)
- (2) 三宅弘晃, 伊藤祐樹, 田中康寛, 高田達雄, 花井正広: 電気学会論文誌 A, 123 巻 1 号, (2003)
- (3) 高田達雄, 田中康寛: 電気学会 誘電・絶縁材料研究会 DEI-18-98, (2018)
- (4) 門脇一則, 弓達新治, 尾崎良太郎, 福間真澄: 令和7年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 4-A-a1-1, (2025)

空間電荷と電流積分値から求めた電荷吸収率 による配電用 XLPE ケーブルの絶縁性評価

佐伯 祐輔, 弓達 新治, 尾崎 良太郎, 門脇 一則 (愛媛大学)

Evaluation of the Insulation Performance of XLPE Power Cables
Based on Charge Absorption Ratio Derived from Space Charge and Integrated Current
Yusuke Saiki, Shinji Yudate, Ryotaro Ozaki, Kazunori Kadowaki (Ehime University)

1. まえがき

電流積分法による各種絶縁体の評価は、印加電圧と試料の静電容量で決まる初期充電電荷量 Q_0 と、印加開始から t 秒後の電流積分値 $Q_{tot}(t)$ との電荷量比 $Q_{tot}(t)/Q_0$ でなされる。この評価方法は比較的簡便であるものの、電荷量比には伝導電荷 $Q_{cond}(t)$ や吸収電荷 $Q_{abs}(t)$ の情報が含まれていない。そこで、我々は $Q_{cond}(t)$ と $Q_{abs}(t)$ を分離し、そこから $\eta(t) = Q_{abs}(t)/\{Q_{tot}(t) - Q_0\}$ で表される電荷吸収率を新たに定義することで、劣化試料の伝導機構をより詳細に検討することが可能となると考えた。本論文では、不純物含浸により作成した模擬劣化ケーブルを試料として、電流積分値と空間電荷分布の同時測定により求めた $\eta(t)$ を用いた絶縁劣化性評価手法の有効性について報告する。

2. 実験方法

実験装置および実験方法は、前報と同じである⁽¹⁾。製造元が異なる2種類の6.6 kV用XLPEケーブルを未使用状態で入手し、これを実験に用いた。ひとつは乾式架橋、もうひとつは湿式架橋で製造された。前者では窒素雰囲気下で架橋が行われるため、不純物の混入が抑制される。一方、後者では高温高压の水蒸気を用いて架橋反応が進行することから、絶縁体内部に蒸気起因の微小空隙が形成されやすい。全試料について、まず新品状態における測定をした後、水没環境下においてケーブル外周から水トリーが進展する状況を模擬するため、市販のオリーブ油 (JOIL 味の素オリーブオイルエクストラバージン) を絶縁層外周から所定時間含浸させた後に再度測定した。オリーブ油の主成分であるオレイン酸分子は極性基を持つため、バルク内でホッピングサイトの役割を果たすと予想した。試料温度50℃一定のもと、内部導体に+20 kVの直流電圧を印加した。

3. 実験結果

乾式試料における+20 kV印加後30分時点の空間電荷分布を図1に示す。図中の(a)が未含浸、(b)が2時間含浸、(c)が4時間含浸である。SEA法を用いることにより、デコンボリューション処理を施さずとも、空間電荷プロファイルを測定結果から直感的に理解することが可能である⁽²⁾。グラ

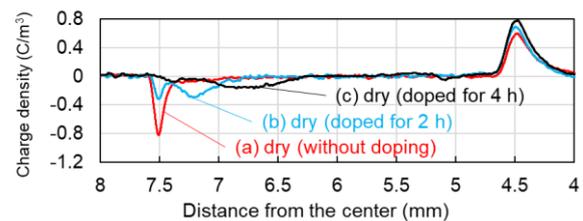


図1 乾式架橋型ケーブルのXLPE層における+20 kV直流印加後30分時点の空間電荷分布、(a)未含浸試料、(b)2時間含浸後 (c)4時間含浸後

Fig. 1. Space charge distributions in the XLPE layer of a dry-crosslinking cable at 30 min after DC voltage application of +20 kV, (a) without oleic acid doping, (b) after 2 h of doping, and (c) after 4 h of doping.

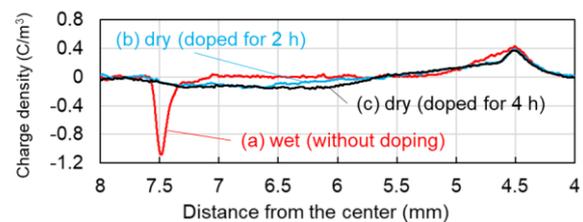


図2 湿式架橋型ケーブルのXLPE層における+20 kV直流印加後30分時点の空間電荷分布、(a)未含浸試料、(b)2時間含浸後 (c)4時間含浸後

Fig. 2. Space charge distributions in the XLPE layer of a wet-crosslinking cable at 30 min after the application of a DC voltage of +20 kV, (a) without oleic acid doping, (b) after 2 h of doping, and (c) after 4 h of doping.

フ横軸はケーブル中心軸からの距離であり、4.5 mmが内部導体表面で、7.5 mmが外部導体表面に位置する。図1において、(a)の未含浸の場合、バルク内に空間電荷の蓄積は確認されず、印加中の空間電荷分布に変化はなかった。一方、(b)の2時間含浸の場合、外部導体側から注入された負電荷が約7.0~7.4 mmの位置に蓄積し、ホモ空間電荷を形成していることがわかる。また、(c)の4時間含浸の場合、負電荷はより深く注入され、約6.5~7.0 mmの位置に蓄積していることが確認された。

湿式試料における+20 kV印加開始から30分後の空間電

荷分布を図2に示す。(a)の未含浸の場合、湿式架橋による絶縁体中の微小空隙の影響で未含浸であっても内部導体側から正電荷が注入され、内部導体近傍でホモ空間電荷として蓄積しているのがわかる。一方で(b)の2時間含浸の場合、外部導体側からの負電荷の注入量が大幅に増加し、約5.7 mmの位置を境目に左に負電荷、右に正電荷が蓄積しているのが分かる。(c)の4時間含浸の空間電荷分布は(b)と比較すると、約6.0~6.5 mmの位置における負電荷蓄積量がわずかに増加していることが確認された。

図1, 図2と同時に測定した電流積分値 $Q_{tot}(t) - Q_0$ を図3(a), (b)に示す。(a)が乾式試料, (b)が湿式試料である。乾式試料において、電圧印加開始から30分後の2時間含浸試料の $Q_{tot}(t) - Q_0$ の値は、未含浸試料のそれよりも約9倍、4時間含浸試料は約23倍大きいことがわかる。湿式試料においては、2時間含浸試料が約9倍、4時間含浸試料が約19倍大きいことがわかる。

空間電荷分布から求めた $Q_{abs}(t)$ の近似曲線と、電流積分値から求めた $Q_{tot}(t) - Q_0$ との比である電荷吸収率 $\eta(t)$ の時間変化を図4に示す。 $Q_{abs}(t)$ の算出方法は前報に詳しい⁽¹⁾。点線が乾式試料で、実線が湿式試料である。この図より、湿式試料において、未含浸の場合、電圧印加開始から約5分間は $\eta(t)$ が約90%以上であり、この間に流れた電流の大部分は吸収電流成分であることが示唆される。一方、含浸時間を延ばすと同時時間帯における $\eta(t)$ が大幅に小さくなっており、これは劣化による伝導電流成分の増加に起因するものである。乾式試料でも劣化進展に伴う $\eta(t)$ の推移は湿式試料と同様である。

ここで、電荷吸収率 $\eta(t)$ による電力ケーブルの劣化診断の可能性について考察する。仮に、未橋絡水トリーが多く存在する絶縁体に直流電圧を印加した場合、その箇所で電荷が捕捉され空間電荷として蓄積することで、 $Q_{abs}(t)$ はある程度大きくなるが、 $Q_{tot}(t) - Q_0$ は健全な絶縁体とさほど変わらないため、印加開始から約5分間において $\eta(t)$ は大きな値になると予想される。一方で、水トリーが進展して橋絡した絶縁体の場合、電極から注入された電荷は捕捉されることなくバルク内を移動するため $Q_{abs}(t)$ は小さくなり、伝導電流は大幅に増加するため、印加開始時点から $\eta(t)$ は小さな値になると予想される。このように直流電圧印加開始から約5分間における $\eta(t)$ の大小でケーブルの劣化度合いを評価できると考えている。

謝辞

ケーブル試料をご提供くださった東京電設サービス(株)の小山勇人様に感謝申し上げます。

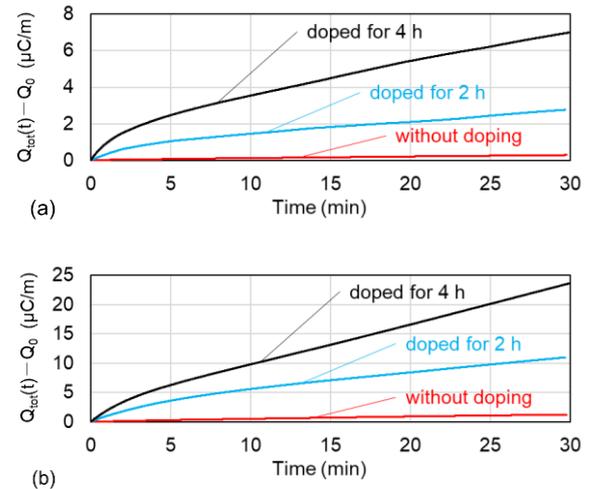


図3 $Q_{tot}(t) - Q_0$ と直流電圧印加時間との関係, (a)乾式試料, (b)湿式試料

Fig. 3. Relationships between $Q_{tot}(t) - Q_0$ and dc voltage application time for (a) dry cross-linking cable and for (b) wet cross-linking cable.

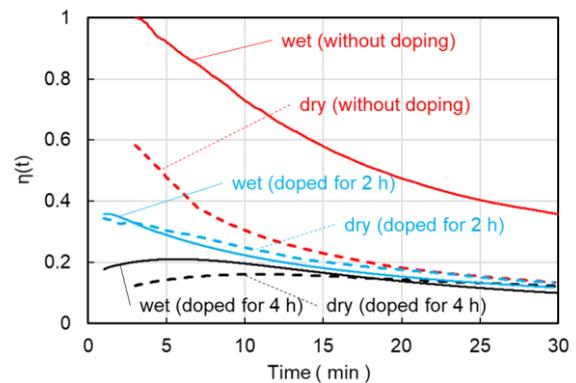


図4 $Q_{abs}(t)$ と電流積分値から算出された電荷吸収率 $\eta(t)$ の時間変化 (点線: 乾式, 実線: 湿式)

Fig. 4. Time evolution of $\eta(t) = Q_{abs}(t) / (Q_{tot}(t) - Q_0)$ for dry-crosslinking (dashed line) and wet-crosslinking (solid line) cables.

文献

(1) 門脇一則, 前畑真由, 弓達新治, 尾崎良太郎: 第55回電気電子絶縁材料システムシンポジウム論文集, Vol.97, No.7, pp.339-346, (2024)

(2) K. Kadowaki, M. Machata, T. Kaji, S. Ito, S. Yodate, and R. Ozaki: Proc. 2023 Int'l Symp. Elect. Insul. Mat'l (ISEIM), Vol. 1, C-4, pp. 53-56 (2023)

MgO ナノフィラー入り LDPE シートの電流と 空間電荷分布に対する厚さ依存性

干上 源太*, 弓達 新治, 尾崎 良太郎, 門脇 一則 (愛媛大学)

Thickness Dependence of Current and Space Charge Distribution in LDPE Sheets Including with MgO Nano-filler
Genta Hoshigami, Shinji Yudate, Ryotaro Ozaki, Kazunori Kadowaki (Ehime University)

1. まえがき

高分子材料に充填剤として酸化マグネシウム(MgO)ナノ粒子を添加することにより、直流高電圧印加時の空間電荷蓄積が抑制されることが報告されている。また、厚さの異なるフィルム試料において空間電荷分布を測定した結果、厚膜試料では空間電荷による局所電界増大に起因した絶縁破壊が発生する一方、薄膜試料では同等の電界条件下でも絶縁破壊が生じにくいことが報告されている⁽¹⁾。そこで本研究では、厚さ 50 μm および 150 μm の MgO ナノフィラー入り LDPE フィルム試料を対象とし、漏れ電流および空間電荷分布の測定結果から、ナノフィラーが伝導特性に及ぼす影響の厚さ依存性について検討する。

2. 実験方法

低密度ポリエチレン (LDPE) (住友化学工業 (株), スミカセン G201) に対し、重量比で 2 % の酸化マグネシウム (MgO) ナノフィラー(フルウチ化学株式会社 : Magnesium Oxide Nanoparticles, 平均粒径 15 nm)を二軸ミキシングロールで混練した後、厚さ 50 μm および 150 μm のシート状にプレス成型することにより実験試料を得た。なお、MgO ナノフィラーにはカップリング剤を用いた表面処理はしていない。厚さ 50 μm 試料の空間電荷分布測定には電界表示型 SEA 法⁽²⁾を用い、厚さ 150 μm 試料については従来の PEA 法を適用した。室温下にて、3 分間隔で印加電界を 0.1 MV/cm 刻みで階段状に昇圧する過程における電流と空間電荷分布を個別に計測した。上部電極には半導電電極を、下部電極にはアルミ蒸着電極を用いた。

3. 実験結果および考察

厚さ 150 μm および 50 μm 試料の電流測定結果を図 1 (a), (b)に示す。また、1.0 MV/cm のときの空間電荷分布測定の結果を図 2 (a), (b)に示す。図 1 (a)に示す 150 μm 試料において印加電界が 0.7 MV/cm までは、MgO を添加した試料の電流値が無添加試料よりも小さいことがわかる。しかし、0.8 MV/cm 以上では両者の電流値の大小関係が逆転した。図 1 (b)に示す 50 μm 試料では、無添加試料において 150 μm 試料と同様に、印加電界の上昇に伴って電流値が増加し、一定電界以上で電流値が飽和する現象が確認された。それ

に対し、MgO を添加した試料では、印加電界が 0.4 MV/cm を超えると電流値が急激に増加し、0.8 MV/cm 以上では測定限界を超えた。

図 2 (a)に示す 150 μm 試料の空間電荷分布より、MgO を添加することで空間電荷の蓄積量が減少していることがわかる。また、図 2 (b)に示す 50 μm 試料においても、試料厚さが薄くなった場合においても MgO 添加による蓄積電荷量の減少が確認された。MgO を添加した試料では、150 μm 試料では陰極付近で負電荷の蓄積がみられたのに対して、50 μm 試料では陰極付近で正電荷が蓄積した。また、電流値には顕著な差が生じた。このような電流特性の厚さ依存性は、試料が薄くなるほど、MgO ナノフィラーの凝集に起因する欠陥領域の影響が大きくなるためかもしれない。

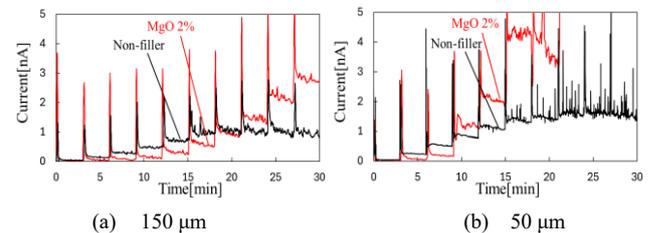


図 1. 階段状昇圧下での電流 : (a) 150 μm , (b) 50 μm

Fig. 1 Time evolution of external current under stepwise increasing voltage for (a) 150 μm and (b) 50 μm samples

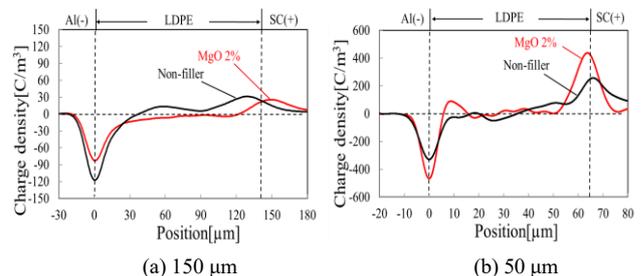


図 2 (a) 150 μm , (b) 50 μm の 1.0 MV/cm 時の空間電荷分布

Fig. 2. Space charge distributions at 1.0 MV/cm for (a) 150 μm and (b) 50 μm samples

文 献

- (1) K. Ota, M Kato, H Miyake, Y Tanaka: International Symposium on Electrical Insulating Materials (2017)
- (2) K Kadowaki, S Yudate, R Ozaki, and M Fukuma, IEEE Trans on DEI, Vol. 32, No. 5, pp. 3114-3116, July 2025.

パルス静電応力法による高温での空間電荷分布 測定における参照信号取得法の検討

高橋 邦宙*, 池田 安孝, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)

Study on Reference Signal Acquisition Methods for Space Charge Distribution Measurements at High Temperatures
Using the Pulsed Electroacoustic Method

Kunihiro Takahashi, Yasutaka Ikeda, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

1. はじめに

SiC等を用いたパワーモジュールは250°C程度の高温で動作可能だが、モジュールの基板や封止などで絶縁材料として使用されるエポキシ樹脂の耐熱性は200°C程度となっている。したがって高温で長時間耐えることができる新たな材料の開発が必要である。材料の絶縁性評価では、空間電荷分布の測定が不可欠だが、我々が開発してきた、高電圧印加可能なパルス静電応力 (PEA) 法による電荷分布測定装置の測定温度上限は150°Cであった。今回、装置を改良して上限を200°Cに改良したが、電荷分布算出には参照信号波形を正しく取得する必要があるため、その方法について報告する。

2. 200°Cにおける参照波形取得

<2.1>測定条件および実験条件 試料厚さ125 μmのポリミドフィルム (Kapton®) を用いて室温、150、175および200°Cで改良したPEA装置により参照波形取得を試みた。平均印加電界を10 kV/mmとし、パルス電圧を600 Vとした。パルス電圧印加には繰り返し周波数が1 kHzのパルス発生器を使用した。なおこの条件では2000回の加算平均で、適切に雑音が低減できていた。そこで、手法(i) 直流電圧を2 s間印加して、パルス電圧を継続して2000回印加する場合 (従来の方法)、手法(ii) 直流電圧を20回に分割 (1回100 ms) し、分割間に10 s一定の短絡時間を設けて印加する場合 (分割印加法)、手法(iii) 短絡時間を交互に含む25 Hzの双極性矩形波を印加し、電圧印加時の波形 (10 msでパルス電圧1回印加) から、それに続く短絡時の波形 (10 msでパルス1回印加) を差し引き、それを250波形加算平均する変形ロックイン法⁽¹⁾を用いた場合の3つの方法で波形を取得した。なお(iii)では、負電圧印加時は、短絡時の差分波形は上下反転して用いた計算した。

<2.2>実験結果および考察 図1~4にそれぞれ室温、150、175および200°Cで取得した参照波形を示す。図1および2によると、室温および150°Cでは若干波形の大きさに差があるものの、パルス電圧印加手法による差は、ほとんど見られなかった。一方、図3に示した175°Cでは、手法(i)で取得した波形では、試料中に負電荷の蓄積が観測され、高

電圧電極側 (陽極) に誘導された電荷量も増加していることがわかる。図4に示した200°Cでは、175°Cで電荷蓄積が見られなかった手法(ii)でも上述した手法(i)と同様の現象が見られるようになり、200°Cの手法(i)では下部電極側に急速な負電荷の蓄積が見られた。一方、変形ロックイン法を用いて取得した波形では200°Cでも、室温の結果と同じように電荷蓄積は見られなかった。

3. まとめ

変形ロックイン法で取得した参照信号波形は、175°C以上の他測定法で見られた急速な電荷蓄積による歪みが生じず、参照波形取得方法として有効である。しかし、ロックイン法で取得した波形は一括印加で取得した波形よりもノイズ成分が大きいことが課題である。そのため、波形の平均回数を増やす方法を研究中である。

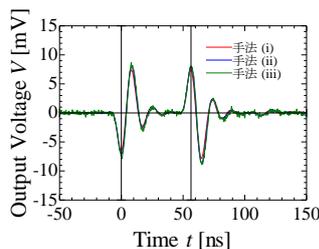


図1 室温での出力波形
Fig.1. Output waveform at room

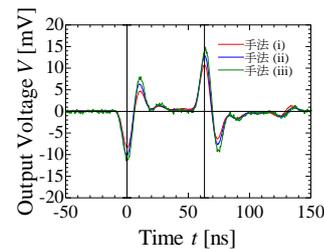


図2 150°Cでの出力波形
Fig.2. Output waveform at 150°C

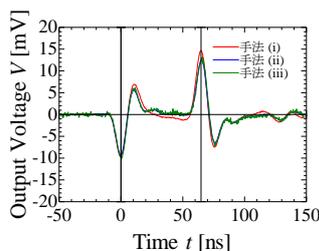


図3 175°Cでの出力波形
Fig.3. Output waveform at 175°C

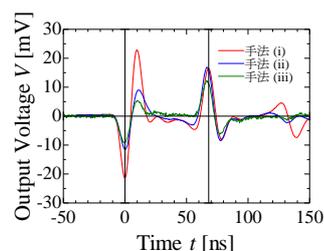


図4 200°Cでの出力波形
Fig.4. Output waveform at 200°C

文献

- (1) K.Sato, *et al.*, "Fair Signal Acquisition Method for Calibration of Space Charge Observation at High Temperature by PEA Method", 2023, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 1-4

エポキシ樹脂における矩形波電圧が 空間電荷蓄積に与える影響

峯岸 太一*, 榊原 慶大, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)

Effects of square voltage waveforms application on the space charge distribution in epoxy resin

Taichi Minegishi, Keita Sakakibara, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University),

1. まえがき

SiC パワーデバイスの普及に伴い、パワーモジュール用エポキシ絶縁材料の空間電荷挙動が、信頼性向上に向けて解明すべき重要な課題となっている。特に高速スイッチングに伴う矩形波電圧では、樹脂内に空間電荷が蓄積し、絶縁劣化を招く可能性がある。本研究では、基本的なエポキシ樹脂に矩形波電圧を高温環境下で印加し、それらが空間電荷蓄積に及ぼす影響を比較した。

2. 測定条件

測定試料は厚さ約 150 μm のアミン系硬化剤を用いたエポキシ樹脂(以下、EP-A)を用いた。測定温度は120及び150 $^{\circ}\text{C}$ とし、図1に示す様に最大50 kV/mmの単極性矩形波(以下、矩形波)電圧波形(50Hz, デューティ比 50%)を印加し、空間電荷蓄積を評価した。矩形波印加時の空間電荷分布は、Volt-on 時/off 時の波形を分けて加算平均処理をし、Volt-on 時の波形を連続的に評価した⁽¹⁾。

3. 測定結果と考察

<3-1 測定結果> 図2に120 $^{\circ}\text{C}$ および150 $^{\circ}\text{C}$ 環境下における矩形波印加時のEP-A内の空間電荷分布測定結果を示す。同図(a)より120 $^{\circ}\text{C}$ 環境下では、電圧印加直後から5分後まで明確な電荷蓄積は認められなかったが、印加10分以降に接地電極近傍で正極性ヘテロ電荷の蓄積が僅かに確認された。一方、同図(b)に示す150 $^{\circ}\text{C}$ 環境下では、印加5分後以降に接地電極近傍で正極性ヘテロ電荷の明確な蓄積が観察され、時間の経過とともに増加した。矩形波印加でも直流印加と同様に試料内にヘテロ電荷蓄積が生じることが明らかになった。

<3-2 正ヘテロ電荷蓄積原因> 測定温度と試料のガラス転移点 T_g が関係する。EP-A は T_g が 140 $^{\circ}\text{C}$ と比較的低く、未架橋分子が多く残存していると推定される。 T_g を超える高温条件では分子鎖のセグメント運動が活発化し、イオン性キャリアや不純物起源電荷が移動・滞留しやすくなる⁽²⁾。それらが起因して、正ヘテロ空間電荷の発生および蓄積サイトとして機能している可能性がある。

文献

- (1) K. Sakakibara et al., 2025 IEEE CEIDP, Manchester, UK, 2025, pp. 704-707, doi: 10.1109/CEIDP61707.2025.11218388.
- (2) N. Saito et al., 2021 IEEE CEIDP, Vancouver, Canada, 2021, pp. 458-461, doi: 10.1109/CEIDP50766.2021.9705317.

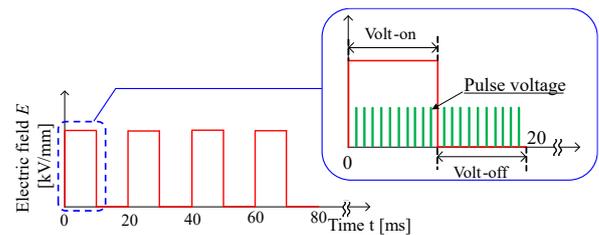
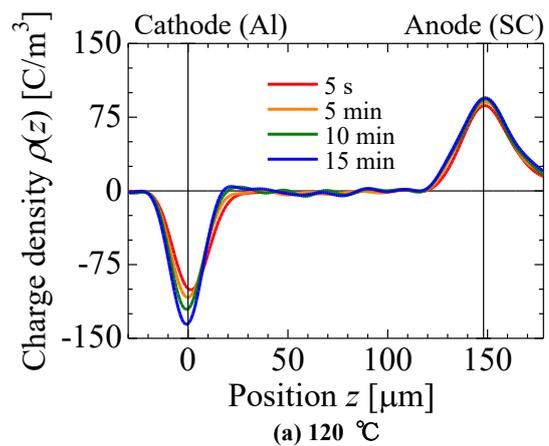
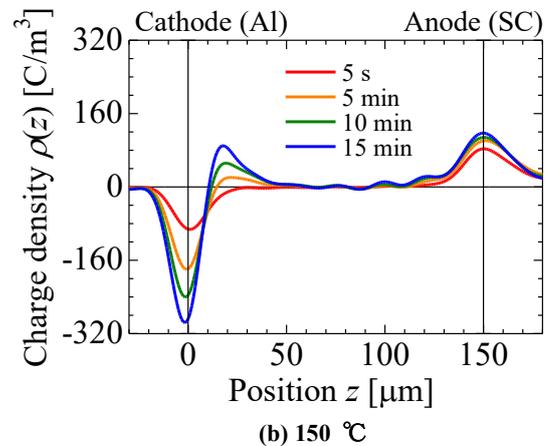


図1 電圧印加波形

Fig. 1. Applied electric field application waveform



(a) 120 $^{\circ}\text{C}$



(b) 150 $^{\circ}\text{C}$

図2 120, 150 $^{\circ}\text{C}$ における単極性矩形波印加時のEP-A内の空間電荷分布

Fig. 2. Space charge distribution in EP-A at 120 and 150 $^{\circ}\text{C}$ applying unipolar square voltage application

厚さ計を備えた PEA 装置によるゴム材料の 空間電荷分布測定

宮澤 勝*, 丸山 夏輝, 安 永國, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛(東京都市大学)

Space Charge Distribution Measurement in Rubber Materials Using a PEA System Equipped with a Thickness Gauge
Sho Miyazawa, Natsuki Maruyama, Yeongguk An, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

1. まえがき

ゴム系の絶縁材料に対してパルス静電応力 (PEA) 法⁽¹⁾を用いた空間電荷分布測定を行う際には、電極による締め付け圧が試料厚さを変化させる可能性がある。当研究グループにおける従来の測定では、測定前にダイヤルゲージを用いて試料厚さの測定を行い、印加電界に相当する電圧を決定するため、計測時の試料厚さの変動は実効的な平均印加電界の誤差を生じさせる。したがって、PEA 測定中における厚さを計測し、適切な直流電圧を印加し、得られた信号を正しく補正することが求められる。そこで本研究では、渦電流センサを用いて測定中に試料厚さを把握可能な空間電荷分布測定装置を新たに作製し、締め付け圧による厚さ変動を考慮した適切な電圧印加による電荷分布の測定を試み、従来の測定装置との比較を行った。

2. 実験および測定条件

新たに作製した PEA 装置は、Fig.1 に示すように、上部電極に渦電流センサ(KEYENCE,EX-110V)を設置することにより、試料厚さの計測が可能である。今回は、EPR (Ethylene propylene rubber) シートを試料とし、室温で測定を行った。平均印加電界は 10, 20, 30, 40, 50 kV/mm で印加時間は 20 min とし、各電圧印加後に 10 min の短絡時間を設けた。本論文では、測定前にダイヤルゲージを用いて測定した試料厚さから印加電圧を決定した従来の測定法と、開発した PEA 装置を用いた測定法で得られた結果を比較した。なお事前に改良装置を用いて様々な締め付けにより測定中の試料厚さを変えて得られた測定波形により音速を算出したところ、厚さが変化しても音速は変わらないことを確認した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2(a)に渦電流センサで計測した厚さを用いて測定した電荷分布、(b)に算出した電界分布を、また(c)に従来の手法で計測した電荷分布との比較、(d)に従来の手法で算出した電界分布との比較をそれぞれ示す。なお、(a)および(b)に示した測定中の試料厚さは 106 μm であり、(c)および(d)に示した試料の測定前の厚さは 120 μm 、測定中の厚さを音速を使って算出した結果は 84 μm であった。

Fig. 2(a)によると、電極誘導電荷は平均印加電界の増加に

ともない線形的に増加しており、(b)の電界分布もほぼ平均印加電界と一致した結果が得られている。ただし、ここには示していないが、従来法でも同様の結果が得られる。従来法では厚さを実際より厚く見積もったものの、その厚さを用いて校正する限り、見かけ上は正しく計測結果が示される。これに対して、(c)および(d)に示すように、実際の厚さを使って校正した場合、20 kV/mm の印加電界を想定した場合には実際の印加電界が 28 kV/mm となっていることがわかり、想定以上の電界が印加されたことになるため、正しい電荷分布を測定するためには、音速をもとに、試料厚さの変化を考慮した測定を行う必要があると言える。なお本研究は、一部 JSPS 科研費 JP24K07581 の助成を受けた。

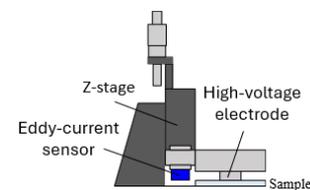


Fig. 1. Improved PEA measurement system

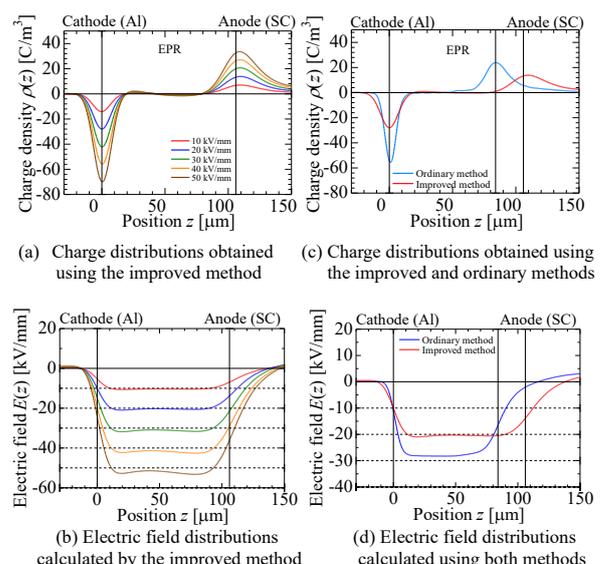


Fig. 2. Charge and electric field distributions

文献

(1) Y. Li, et al., IEEE Trans. DEI, 1, 188-195, 1994

作製条件の異なるポリイミドフィルムの 高温環境下における絶縁特性の評価

和田 衛*, 小林 淳平, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)
真辺 貴久, 佐藤 基岐, 鈴木 佳太 (NOK 株式会社), 林 優大 (メクテック株式会社)

Evaluation of Insulation Properties of Polyimide Films with Different Manufacturing Conditions under High-Temperature Conditions

Mamoru Wada, Junpei Kobayashi, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

Takahisa Manabe, Motoki Sato, Keita Suzuki (NOK CORPORATION), Yudai Hayashi (MEKTEC CORPORATION)

1. はじめに

ポリイミドは耐熱性、機械的強度、化学的安定性に優れた高分子材料の一種であり、フレキシブルプリント基板や半導体デバイスなどの絶縁層として広く実装されている。その量産工程においては、生産効率と材料特性の両立が重要な課題となり、特に焼成プロセスの条件設定は最終製品の絶縁信頼性を左右する重要な因子である。そこで本稿では焼成条件の異なる2種類の薄膜ポリイミド試料を作製し、パルス静電応力 (Pulsed Electroacoustic: PEA) 法⁽¹⁾および電流積分電荷法⁽²⁾ ($Q(t)$ 法) を用いて空間電荷蓄積および伝導電流特性の観点から絶縁性能の比較検討を行った。

2. 測定試料および実験方法

試料に焼成プロセスの異なる厚さ約 $30\ \mu\text{m}$ の薄膜 PI 試料 A, B を用いた。なおイミド化率を赤外吸収により調査した結果、試料 A は 72%、試料 B は 100%であった。測定温度を $80\ ^\circ\text{C}$ とし、電圧印加時間を 10 分、短絡時間を 5 分として、試料内平均電界が $20\ \text{kV/mm}$ から $100\ \text{kV/mm}$ となるように直流電圧を段階上昇させた。なお、間電荷分布測定時のパルス電圧は $100\ \text{V}$ 、アペレーシング回数は 2000 回、測定間隔は 5 秒とした。また $Q(t)$ 測定の測定間隔は 2 秒とした。

3. 実験結果および考察

図 1 に試料 A, B 内の空間電荷密度の経時変化を表すカラーチャートを示す。同図(a), (b)はそれぞれ試料 A および B の測定結果を表している。試料 A では低電界印加時より両電極近傍に微量の電荷蓄積が見られ、 $60\ \text{kV/mm}$ 印加時に絶縁破壊した。一方試料 B では、印加電界の増加に伴い両電極近傍に多量のホモ電荷の蓄積が見られ、特に高電界印加時において試料内部にまで電荷が注入されている様子が観測された。図 2 に試料 A, B の総電荷量比 $Q(600\ \text{s})/Q_0$ ⁽²⁾ を示す。総電荷量比は、試料内に流れる電流の積分量 $Q(t)$ うち、測定開始直後の測定値 Q_0 と各印加電界における最後の測定値 $Q(600\ \text{s})$ との比であり、これが 1 に近い場合は、優れた絶縁性を有していると評価される⁽²⁾。試料 A では印加電界が $20\ \text{kV/mm}$ の場合でも 1 から大きく外れる値となっており、

この試料では絶縁破壊は観測されなかったものの、高電界になるほど、流れる電流が非常に大きいことが確認された。一方試料 B では、印加電界に依らず 1.4 未満の値となっており、高電界印加時も高い絶縁性能を維持していた。これらの結果は、試料の化学組成の違いに起因していると考えられ、特に上述したイミド化率が大きな要因と考えられる。ただし、イミド化率が具体的に、どのように電気伝導に関与しているかについては、現状では不明であり、今後さらに調査を行う予定である。

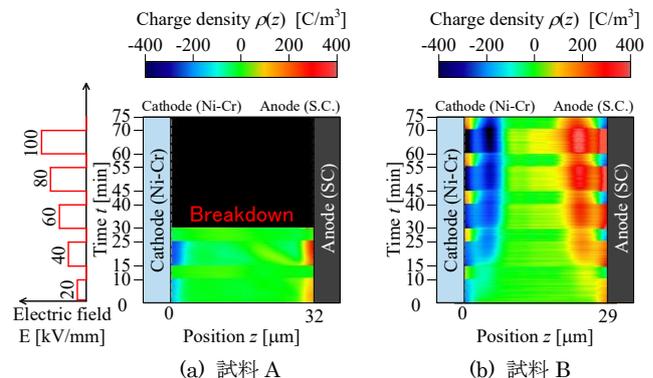


図 1 空間電荷分布の経時変化

Fig.1. Time dependence of the space charge distribution

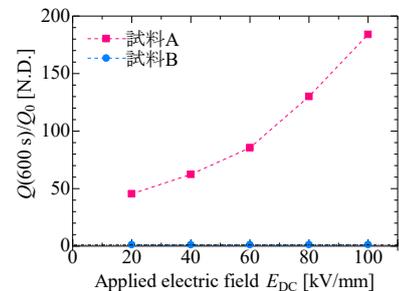


図 2 総電荷量比の電界依存性

Fig.2. Applied electric field dependence of charge amount ratio

文 献

(1) Y. Li, *et al.*, IEEE Trans. DEI, Vol. 1, No. 2, pp. 188-198, (1994).

(2) T. Takada, *et al.*, IEEE Trans. DEI, 24, 4, 2549-2558 (2017).

陽子線繰り返し照射による FEP 内の空間電荷蓄積特性

山崎 晴多*, 阿部 伎晃, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛, 羽倉 尚人 (東京都市大学)

Space charge accumulation in FEP irradiated by proton with repeated condition

Haruta Yamazaki, Wako Abe, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka, Naoto Hagura (Tokyo City University)

1. はじめに

近年、月・惑星探査計画が注目されており、宇宙機は地球磁気圏外という放射線がより厳しい環境にさらされる。月面環境では約 29.5 日の日照周期の為⁽¹⁾、太陽からの高エネルギー陽子は日照周期に応じて宇宙機に断続的かつ繰り返し照射される状況となる。このような環境下では放射線照射によって絶縁材料内部に形成された空間電荷が休止期間中に緩和・消失するのか、残存するのか絶縁信頼性設計上の重要課題となっている。本研究では、FEP(Fluorinated Ethylene Propylene)を対象に、休止状態を挟んだ陽子線の繰り返し照射を実施し空間電荷蓄積挙動の連続性および履歴効果を評価したので報告する。

2. 陽子線繰り返し照射による空間電荷蓄積特性

<2.1>測定条件および実験条件 試料には 127 μm のシェルダール社製 FEP を用いた。1.7MV ペレットロン・タンデム加速器を用い、加速エネルギーを 2 MeV とし、15 nA/cm² の電流密度にて陽子線を照射した⁽²⁾。尚、照射時間は 30 分とした。本測定では同一試料に 3 回の照射を実施し、各回の照射間に 3 時間の休止状態を設け、照射中の空間電荷分布測定を 5 秒間隔で行った。

<2.2>実験結果および考察 図 1 に空間電荷分布波形の結果を示す。同図中、陽子は紙面右側から照射し、黒縦破線は陽子線の計算飛程(46 μm)である⁽³⁾。同図(a)、(b)、(c)に 1 回目照射、2 回目照射、3 回目照射を示す。(a) 1 回目照射では、照射開始直後に計算飛程近傍で正電荷蓄積が生じ、時間とともに増加後、ピークに達して減少した。(b) 2 回目照射では、計算飛程近傍で生じた正電荷蓄積が時間とともに減少し、ピーク位置は陽子線通過領域へシフトした。(c) 3 回目照射では、計算飛程近傍から照射領域にかけて正電荷蓄積が観測され、ピーク位置は照射領域へシフトしつつ減少した。観測された正電荷蓄積は、照射回数を重ねるにつれて減少する傾向を示した。図 2 に電界分布波形を示す。同図(a)~(c)にそれぞれ 1~3 回目照射の結果を示す。同図より、照射回数を重ねるにつれて電界の大きさが低下し、最大電界位置が照射電極サイド(紙面右側)へと移動している事が分かる。これは、繰り返し照射に伴う空間電荷分布の変化が、内部電界形成に影響を及ぼしていることを示唆してい

る。図 3 に正電荷蓄積量の経時変化を示す。同図より、1 回目照射で蓄積量が増加し、3 時間休止後に開始した 2 回目照射開始時には、1 回目照射終了時よりも蓄積量が減少し、さらに 3 時間緩和後の 3 回目照射開始時には 2 回目照射終了時と同程度の蓄積量が観測された。以上より、本実験条件においては、休止期間中に空間電荷が完全に消失するのではなく、繰り返し照射に対して一定の連続性を有した蓄積挙動を示すことが確認された。

3. まとめ

15 nA/cm² の陽子線を 3 時間の休止状態を挟んで繰り返し照射した結果、照射回数を重ねても大きく変化せず、一定の連続性を示すことが分かった。

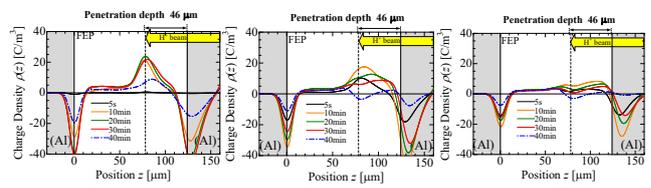


図 1 陽子線照射下における FEP の空間電荷分布波形

Fig. 1 Spatial charge distribution waveform of FEP under proton irradiation

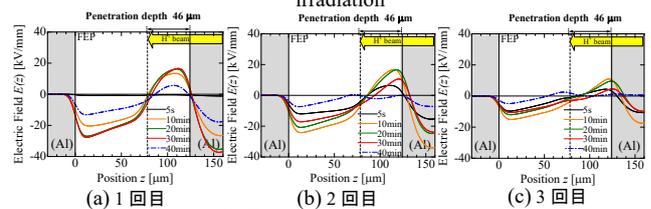


図 2 陽子線照射下における FEP の電界波形

Fig. 2 Electric field waveforms of FEP under proton irradiation

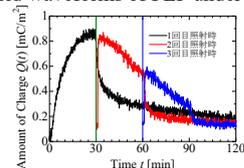


図 3 陽子線照射下における FEP の正電荷蓄積量の経時変化

Fig. 3 Changes over time in the positive charge accumulation of FEP under proton irradiation

文献

- (1) Heiken, G. H et al., LUNAR SOURCEBOOK-A user's guide to the moon, Cambridge University Press (1991)
- (2) 羽倉 他, J. At. Energy Soc. Jpn., Vol. 17, No. 3-4, pp. 111-117 (2018)
- (3) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The stopping and range of ions in solids", Pergamon Press, New York (1985)

シリコンゴムの伝導電荷

大木 義路* (早稲田大学), 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)

Conduction Carriers in Silicone Rubber

Yoshimichi Ohki* (Waseda University), Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

1. まえがき

我々は、『ケーブルなどの絶縁体に用いる高分子には、「極めて良好な絶縁体」と「普通に良好な絶縁体」の全く異なる2種類の高分子があり、それぞれが、全く別の電荷を有し、異なる絶縁挙動を示す。』と書いてきた⁽¹⁾。本稿では、「普通に良好な絶縁体」では、低電界印加時における主たる伝導電荷はイオンであるが、高電界印加時には電子性電荷が主体となることを、シリコンゴム(SiR)を例にとり、その空間電荷分布などから示していく。

2. 低電界印加時における電極分極

低圧ケーブルの絶縁に使われる厚さ1mmのSiRシートについて数Vの印加電圧で測定した複素誘電率(ϵ_r' , ϵ_r'')の周波数スペクトルを図1に示す。高温低周波で ϵ_r' が高くなる理由は、電極前面に電極と逆極性の電荷が蓄積される電極分極

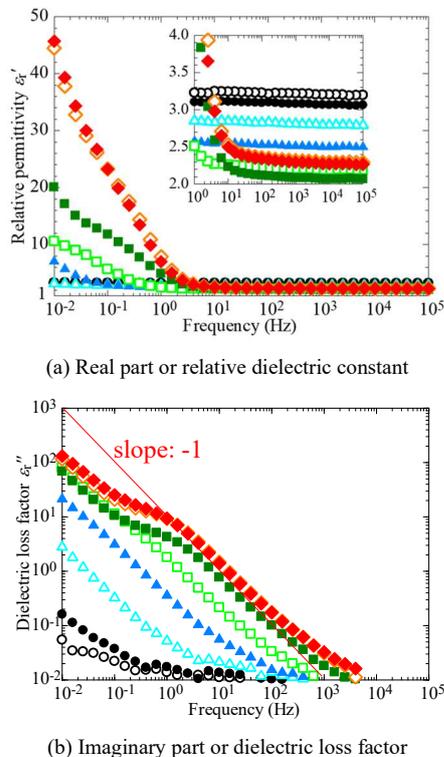


Fig. 1. Frequency spectra of complex permittivity measured in silicone rubber; (a) relative permittivity and (b) dielectric loss factor. Some data overlap. \circ : 25, \bullet : 50, \triangle : 100, \blacktriangle : 150, \square : 200, \blacksquare : 250, \diamond : 275, \blacklozenge : 300 °C; Red line: Inversely proportional to frequency.

である。試料中を移動してきたイオンが電極に直接入ることは無いので、電極前面にヘテロ空間電荷として堆積する。すると、電極には、電極と同極性の電荷が電源から供給されるので ϵ_r' が大きくなる。一方、 ϵ_r'' の増大は、無視しない量の電荷移動が原因であり、これによる誘電損率の増加分 $\Delta\epsilon_r''$ は印加電圧の周波数 f に反比例する。すなわち、図1の結果はSiRの主たる電荷がイオンであることを示している⁽¹⁾。

3. 高電界印加時の空間電荷分布

図2は厚さ約200 μm のSiRシートにおいて室温下で20または30kV/mmの直流電界印加時に観測された空間電荷分布である。両電極から試料内部へ電極と同極性のホモ電荷が注入され、時間経過にともない電荷は試料深部に到達している。特に陽極から注入される正電荷は負電荷に比べて注入量が多く、試料中央付近にまで到達している。さらに、試料が短絡されている30~35分および65~70分の結果は、両電極直近の試料内にホモ電荷が蓄積していることを示している。すなわち、図1と比べて約 10^4 倍の高電界印加時には注入された電子と正孔が主たる電荷となる事が明らかとなった。

なお、図1、図2は、それぞれ原子力規制庁原子力施設等防災対策等委託費に関わる高経年化技術評価高度化事業（平成30,31年度電気・計装設備用高分子材料の長期健全性評価研究）事業の中で取得された。

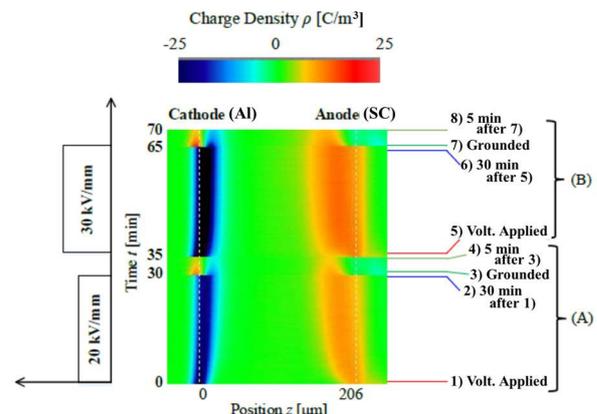


Fig. 2. Space charge distributions measured in silicone rubber at room temperature. Al: aluminum, SC: semiconductive layer.

文献

- (1) 大木義路, 平井直志 “高分子絶縁体には二種類ある(その2: 詳細版)”, 電気学会研究会 DEI-26-009, 2026年2月

異なる条件下で人工水トリーが形成された 配電用 XLPE ケーブルの空間電荷分布と電流積分値

曾根 智徳*, 弓達 新治, 尾崎 良太郎, 門脇 一則 (愛媛大学)

田澤 和俊 (矢崎エナジーシステム株式会社)

Space Charge Distribution and Integrated Current in XLPE Cables with Artificial Water Trees Formed under Different Conditions

Tomonori Sone, Shinji Yudate, Ryotaro Ozaki, Kazunori Kadowaki (Ehime University)

Kazutoshi Tazawa (Yazaki Energy Systems Corporation)

1. はじめに

水トリー劣化を受けた XLPE ケーブルでは、空間電荷および直流漏れ電流が劣化診断指標として有効であることが示されている⁽¹⁾。しかし、水トリー加速劣化条件の違いが、空間電荷分布および直流漏れ電流特性に及ぼす影響については、体系的な比較検討が十分になされていない。本研究では、異なる条件下で水トリー加速劣化を施した 6.6 kV 用 XLPE ケーブルを対象に、空間電荷分布および直流漏れ電流を測定し、劣化条件の違いによる電気特性の差異を比較検討する。

2. 実験方法

紙やすりによる絶縁層表面への一方向の目荒らし、もしくは、針による 1 cm 間隔での極細穿孔形成のいずれかで前処理された試料を、水道水もしくは硫酸ナトリウム水溶液 (0.5 mol/L) に浸漬した。この状態で、最大値 6.9 kV 周波数 2 kHz の交流電圧を 3 か月間印加した。2 種の前処理と 2 種の溶液からなる 4 通りの高周波加速劣化後、各試料に +20 kV の直流正電圧を 30 分間印加し、そのときの空間電荷分布および直流漏れ電流を測定した。測定装置は前報と同じである⁽²⁾。

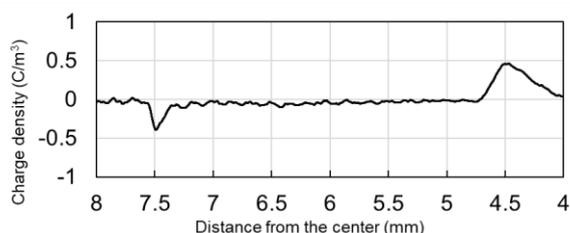
3. 実験結果

Na_2SO_4 浸漬のやすりがけ試料と、水道水浸漬の針刺し試料における電圧印加 30 分後の空間電荷分布を図 1(a)および図 1(b)に示す。横軸 7.5 mm の位置が外導表面である。図 1(a)におけるこの位置の電荷密度は、図 1(b)より半分以下であって、多くの正電荷が外導からバルク内に侵入していることがわかる。

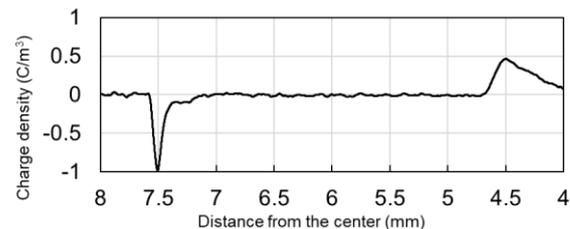
4 通りの加速劣化処理により得られた各試料の電流積分値 ($Q_{\text{tot}}(t) - Q_0$) の時間変化を図 2 に示す。水道水浸漬の針刺し試料における電圧印加 30 分後の電流積分値は他と比較して 2 倍程度大きいことがわかる。

空間電荷蓄積量が少ないにも関わらず、電流積分値が大きいという事実は、バルク内に電荷がトラップされることなく、流れやすい状態になっていることを意味する。これは、橋絡水トリーの形成によるものであると考える。水トリー

劣化の診断においては、空間電荷測定および漏れ電流測定の両方を併せて評価する必要がある。この考えの妥当性を確認するために、欠陥部の断面を観察する予定である。



(a) Sample treated with sandpaper and immersed in Na_2SO_4



(b) Sample treated with a needle and immersed in tap water

図 1: 電圧印加 30 分後の空間電荷

Fig. 1 Space charge distributions after 30 min of voltage application

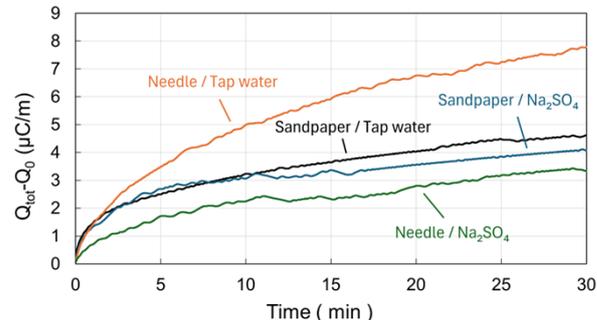


図 2: 各サンプルの電流積分値の時間変化

Fig. 2 Temporal change in the current integral for each sample

文 献

- (1) 穂積直裕, 内田克己, 村上義信, 長尾雅, G.Teyssedre, C. Laurent: 電気学会論文誌 A, Vol.128, No.2 (2008)
- (2) 門脇一則, 前畑真由, 弓達新治, 尾崎良太郎: 第 55 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム論文集, Vol.97, No.7, pp.339-346, (2024)

エポキシ樹脂を作製する材料の経年変化が電気的絶縁性に与える影響

原田 修輔*, 進藤 敦樹, 三宅 弘晃, 平井 直志, 田中 康寛 (東京都市大学)

The Effect of Aging Changes in Materials Used to Produce Epoxy Resin on Electrical Insulation Properties
Shusuke Harada, Atsuki Shindo, Hiroaki Miyake, Naoshi Hirai, Yasuhiro Tanaka, (Tokyo City University)

1. はじめに

半導体の高耐電圧化、高耐熱化が進んだことで、パワーデバイスのモジュールに用いられる基板や封止材も、これらに耐えられる絶縁体を開発する必要がある。セラミックはコストが高く加工しづらいため、それらを解決できるエポキシ樹脂 (EP) の高性能化が検討されている。しかし EP は経年とともに絶縁性が低下する。今回、製造年度の異なる主剤と硬化剤を用いて作製した EP の絶縁特性を比較し、何が絶縁性低下に寄与するのかを調査した。絶縁性の評価はパルス静電応力 (PEA) 法と電流積分電荷 ($Q(t)$) 法を用いた。

2. 測定方法

ビスフェノール A 型の主剤 (三菱ケミカル製 jER®828) と酸無水物硬化剤 (レゾナック製 HN-2200) で作製した厚さ約 125 μm のエポキシ樹脂試料 (EP) を試料として用いた。硬化促進剤には日清 EM 製 DMP-30 を使用した。主剤: 硬化剤: 促進剤の混合比は 100:80:1 とした。2018 年製 (o) と 2025 年製 (n) の硬化剤、2024 年製 (o) と 2025 年製 (n) の主剤を用い、主剤と硬化剤の組み合わせを変えて作製した EP の絶縁状態がどのように変化するかを調査した。試料の表記には、例えば主剤が o、硬化剤が n の場合は EP_{on} のように記した。なお主剤、硬化剤は室温で、デシケータ中で保管し、意図的な処理などは行っていない。これらの試料に対し測定温度を 100°C として PEA 法による空間電荷分布測定と $Q(t)$ 法による電流積分電荷量の時間変化を測定した。20 kV/mm に相当する直流電圧を 10 分間印加し、5 分間の短絡を行い、以降 20 kV/mm ずつ上昇させ、100 kV/mm まで同様のサイクルで測定を行った。 $Q(t)$ 測定における絶縁性能の評価では、電圧印加履歴を PEA 法と同様とし、印加 10 分後の積分電荷量 Q_{600} を初期電荷量 Q_0 で除した総電荷量比 (Q_{600}/Q_0)⁽¹⁾ を用いて行った。

3. 測定結果及び考察

Fig.1 に各試料の Q_{600}/Q_0 を示す。 Q_{600}/Q_0 は 1 に近いほど良好な絶縁材料であり、大きいほど絶縁性が低い⁽¹⁾が、EP_m では他の試料に対して Q_{600}/Q_0 が、全ての印加電界で小さく、絶縁性が高い。一方 EP_{oo} では、総電荷量比が極めて大きく、絶縁性が低いことがわかる。次に Fig.2 は短絡 5 秒後の空間

電荷分布であり、EP_{oo} においてヘテロ空間電荷が観測されたものの他の試料では内部にホモ電荷の蓄積が観測された。すなわち EP_{oo} では絶縁性が低下し、正のヘテロ電荷蓄積が蓄積することがわかる。古い材料では、酸化が生じていることが懸念され、それらを使った場合、材料の構造に酸化基が導入されること、もしくは重合されないモノマーが多数残留すると考えられ、それらが原因で注入されたキャリアが試料内部まで運ばれるため、絶縁性が低下し、ヘテロ電荷が蓄積することが予想される。

なお本研究は、一部 JSPS 科研費 JP24K07581 の助成を受けた。

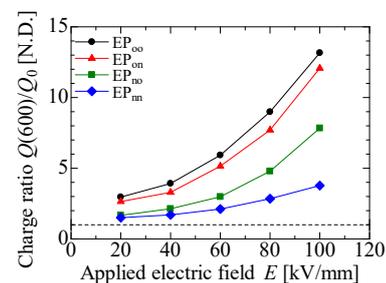


Fig. 1 Applied electric field dependence of the charge ratio Q_{600}/Q_0

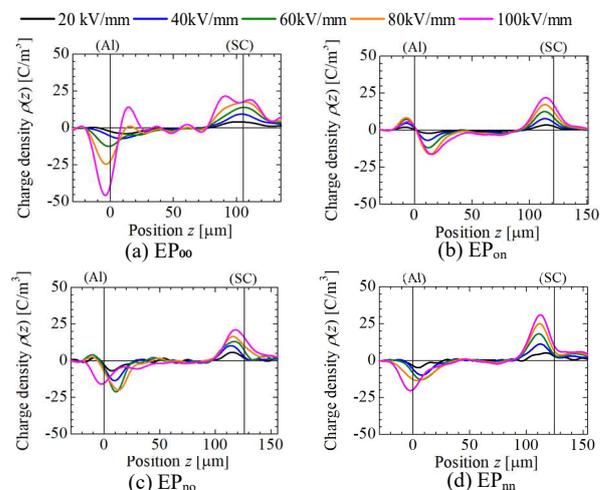


Fig. 2 Space charge distribution at 5 s after the circuit was shorted

文献

(1) T. Takada *et al.*; IEEE Trans. DEI, 24, 2549-2558, 2017

電荷分布・電流同時測定システムと 電流積分電荷法による測定結果の比較

大井 貴生*, 新荻 隼輔, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 平井 直志 (東京都市大学)

Comparison of Measurement Results Using a Simultaneous Charge Distribution and Current Measurement System and the Current-Integrated Charge Method

Takao Oi, Shunsuke Shinogi, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Naoshi Hirai (Tokyo City University)

1. はじめに

高電圧直流用絶縁材料評価のために筆者らが開発したPEA (パルス静電応力) 法による空間電荷分布と外部回路電流を同一試料で測定できる装置 (電荷分布・電流同時測定システム:以降同時測定システムと略記) は、絶縁破壊メカニズムの解明などに使われてきた⁽¹⁾。一方、電流積分電荷 ($Q(t)$) 法は簡便かつ低ノイズで絶縁性評価を行える手法として普及している⁽²⁾。ただし $Q(t)$ 法では、空間電荷の直接的な挙動把握は困難である。そこで本研究では、同時測定装置と $Q(t)$ 法により得られた測定結果を比較することで、両手法の相関性を調査し、 $Q(t)$ の測定結果により空間電荷蓄積評価が可能であるかについて考察した。

2. 材料、測定方法、比較における解析

厚さ約 140 μm の低密度ポリエチレンに、室温で直流電圧を印加し、同時測定装置および $Q(t)$ 測定装置を用いて、電流および電流積分電荷量 ($Q(t)$) の経時変化を観測した。いずれの測定でも、所定の電圧を 10 分間印加した後、短絡時間 5 分間の測定を行う。これを 1 サイクルとして、その後 10 kV/mm に相当する直流電圧を増加させて印加し、同様のサイクルを 10~60 kV/mm の平均印加電界の範囲で繰り返した。同時測定装置では、空間電荷分布の測定 (6 s) と電流密度値 $j(t)$ の測定 (4 s) を計 10 s で交互に繰り返す。この場合、各測定の 10 s における $j(t)$ 値をその期間の電流密度地として取り扱った。一方、今回の $Q(t)$ 法では $Q(t)$ のサンプリング間隔を 2 s としたが、 $Q(t)$ 測定値より電流密度値を算出する場合は、 $Q(t)$ 法で得られた時系列データから、同時測定システムの測定周期 10 s に同期するデータを抽出して傾きを求めることより電流値 $i_q(t)$ を算出し、さらにそれらを電極 (直径 10 mm) 面積で除した電流密度 $j_q(t)$ を算出した。一方、同時測定システムで得られた電流密度の値 $j(t)$ から $Q(t)$ に相当する量を算出する場合は、 $j(t)$ に 10 s を乗じた値を逐次加算した量を $Q_p(t)$ として求めた。

3. 測定結果及び考察

Fig.1 および 2 は、同時測定システムで観測された $j(t)$ と $Q(t)$ により求めた $j_q(t)$ の経時変化をそれぞれ示す。Fig. 1、2

から両手法ともに、印加電界の上昇にともない、定常状態の電流密度が段階的に増加している。しかし $j_q(t)$ では、特に低電界領域で瞬時充電電流が観測されておらず、また高電界領域においてスパイク状の変動が観測された。10 s ごとにデータを算出する場合、瞬時充電電流の変動が終了した後の値が記録されるため、その変化が観測されなかったと考えられ、また高電界下での $Q(t)$ 測定では、部分放電に関連する不連続の値が得られる場合があり、それによってスパイク状の変動が生じている可能性がある。Fig. 3 および 4 には、 $Q_p(t)$ と $Q_q(t)$ の経時変化をそれぞれ示す。いずれも印加電界の増加にともない観測される量が増加し、特に高電界下では、傾きの大きな変化が観測されているが、Fig. 3 に示された $Q_p(t)$ では、初期値 Q_0 の増加が明瞭ではないなどの問題点が見受けられる。今回の測定結果の比較から、両測定結果が完全には一致しないことが明らかになったが、測定法やデータ処理法を工夫することで改善は見込め、改善できれば、PEA 測定との関連性がさらに明確になると思われる。

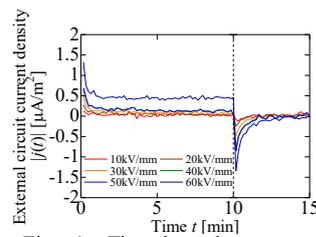


Fig. 1. Time-dependent current density $j(t)$ obtained using the PEA measurement system

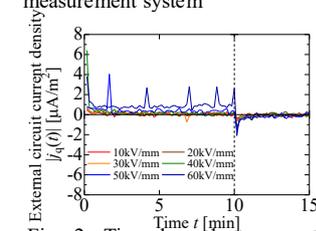


Fig. 2. Time-dependent current density $j_q(t)$ obtained using the $Q(t)$ measurement system

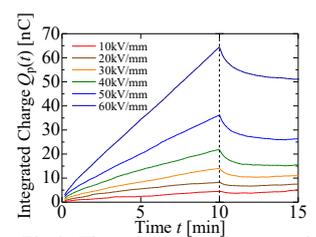


Fig. 3. Time-dependent integrated charge $Q_p(t)$ obtained using the PEA measurement system

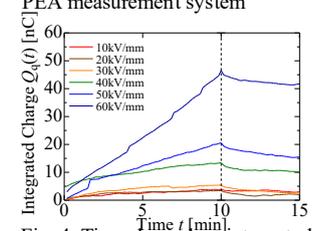


Fig. 4. Time-dependent integrated charge $Q_q(t)$ obtained using the $Q(t)$ measurement system

文献

(1) T Mori et al, IEEE, DOI: 10.1109/ISEIM.2011.6826346

(2) T Takada et al, IEEE., DOI: 10.1109/TDEI.2017.006355

針-平板電極系におけるガード電極と $Q(x,t)$ 波形

福岡 眞澄* (松江高専) 藤井 雅之 (大島商船高専) 関口 洋逸 (住友電工)

Guard Electrode and $Q(x,t)$ Waveform in Needle-Plate Electrode System

Fukuma, Masumi (NIT, Matsue College), Fujii, Masayuki (NIT, Ohshima College),

Sekiguchi, Yoitsu (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

1. はじめに

絶縁材料の電気伝導特性の測定に電流積分電荷法⁽¹⁾を利用した $Q(t)$ メータが利用されつつある。 $Q(t)$ メータでは電極形状にとらわれず、電流の時間変化を測定できるなどの利点がある。 $Q(t)$ の場所に対する変化 $[Q(x,t)]$ を測定することは、試料内の空間電荷挙動を調査するに有効と考え、1次元の $Q(t)$ メータ $[Q(x,t)$ メータ]を製作した⁽²⁾。本報告では、製作した $Q(x,t)$ メータを用いて針-平板電極系のガード電極の有無による $Q(x,t)$ 波形の違いを測定したので報告する。

2. 試料・実験方法

$Q(t)$ メータでは、測定試料に積分コンデンサ (C_{int}) (試料の静電容量の 1000 倍程度) を直列接続して、 C_{int} の両端の電圧値 $V_{int}(t)$ を測定することで、試料を流れる電流の測定時間 t までの積分値 $Q(t) [=C_{int}V_{int}(t)]$ を測定する。

図 1(a)と(b)は、製作した装置構成と測定試料(針-平板電極系)を示す。試料が同図に示すような針-平板電極の場合に、平板電極を x 方向に分割分離し、各電極に積分コンデンサ C_{int} を接続することで各測定電極の位置 x での $Q(t)[Q(x,t)]$ を測定できるようにした⁽³⁾。

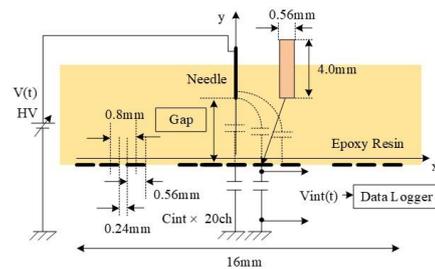
図 1(a)に示す測定試料の電極系は $16\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ の平板電極を x 方向に 20 分割し、1つの電極(測定電極)のサイズを 0.56 mm (x 方向:幅) $\times 4\text{ mm}$ (z 方向:奥行)とした。各電極の間隙は 0.24 mm とした。測定電極の x 方向のピッチは 0.8 mm とした。針電極には、図 1(b)に示される木綿針を使用した。分割された平板(測定電極)と針電極間は図 1(b)に示すようにエポキシ樹脂(主剤 CY221, 硬化剤 HY2967, 重量比 100:35)でモールドした。エポキシ樹脂の硬化は室温で数日かけて行った。ギャップ長は 2 mm とした。

ガード電極の測定結果への影響を調査するためにガード電極を設けた試料[図 2(a)]とガード電極を設けていない試料[図 2(b)]を用意した。

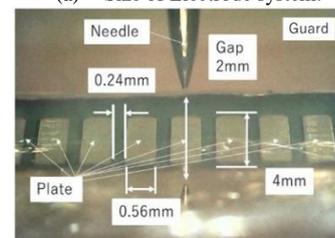
各測定電極には、静電容量 $0.01\mu\text{F}$ のフィルムコンデンサ (C_{int}) を接続した。 $V_{int}(t)$ の測定には、自作のインピーダンス変換器とデータロガー (GRAPHTEC 製, GL840) を利用した (サンプリング時間は 1 s に設定)。試料は定温乾燥機に入れ、温度 30°C で測定した。印加電圧は台形波 [図 3(a), 波高値 $V_m: 0.1\text{ kV}, 3\text{ kV}$, 周期 $T: 150\text{ s}$] を印加して測定を行った。

3. 結果および考察

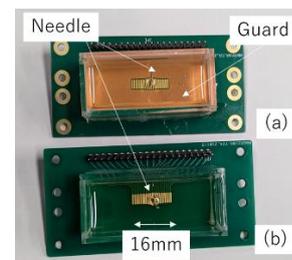
ガード電極を有する試料とガード電極が無い試料の測定結果を図 3 に示す。図中(a)~(d)の(*-1)と(*-2)はそれぞれガード電極がある場合とない場合を示している。 $V(t)$ には、周期 150 s の台形波電圧(波高値 V_m)を用いた。同図では、(a)に印加電圧 $V(t)$, (b)に、測定した $Q(x,t)$ の時間変化を 2次元表示 (2D) で示した。(c)は(b)の $Q(x,t)$ を時間 t で微分した電流分布 $dQ(x,t)/dt$ を (b)と同様に 2次元表示 (2D) で示した。図(d)は、針電極から最も離れた位置の測定電極 ($x=8\text{ mm}$) に流れる電流 $[dQ(8\text{ mm},t)/dt]$ と針電極直下 ($x=0\text{ mm}$) の電流 $[dQ(0\text{ mm},t)/dt]$ および電極直下の電極での $Q(0\text{ mm},t)$ などの時間変化を示している。



(a) Size of Electrode system.



(b) Photograph of electrode system
Fig.1. Electrode system in $Q(x,t)$ meter.



(a) With guard electrode (b) Without guard electrode
Fig.2 Photograph of sample (Top view).

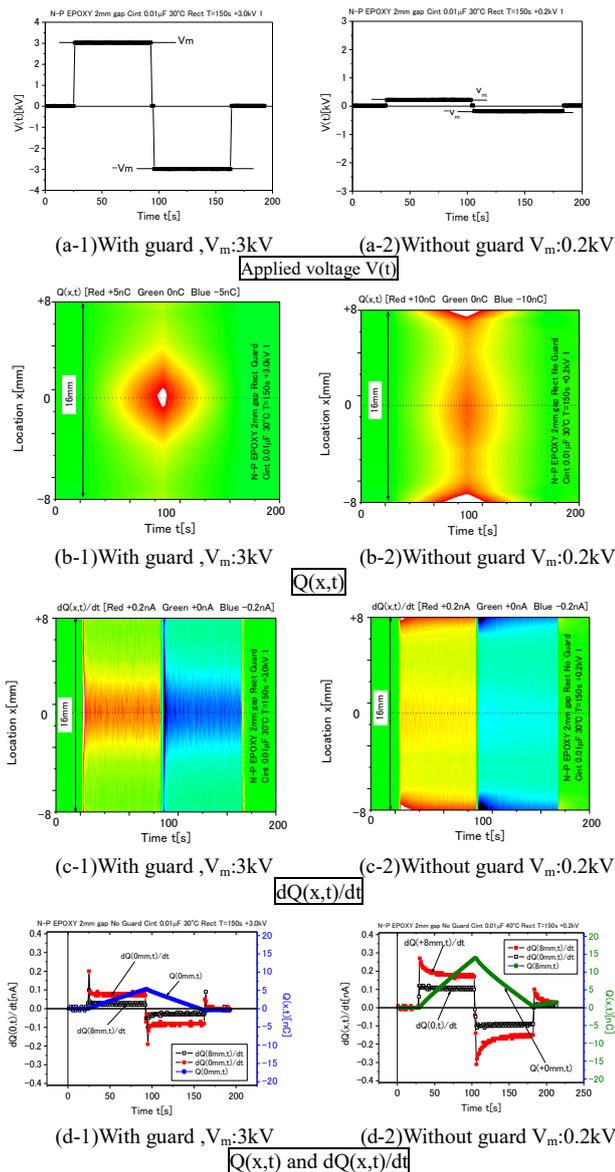


Fig.3 $Q(x,t)$ and $dQ(x,t)/dt$ when trapezoidal wave voltage applied to the needle-plate electrode system with Epoxy molding in 30°C, [(a): Applied voltage $V(t)$, (b): $Q(x,t)$ (2D), (c): $dQ(x,t)/dt$ (2D), (d) $dQ(8mm,t)/dt$, $dQ(0,t)/dt$, $Q(8mm,t)$, $Q(0mm,t)$, (*-1) :with guard electrode, (*-2): without guard electrode](Experimental results).

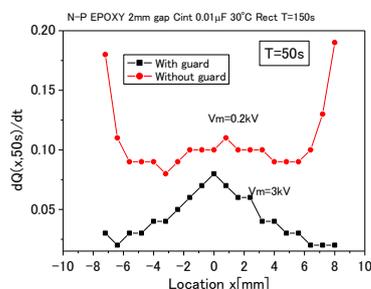


Fig.4 Presence of guard electrode and current distribution ($dQ(x,50s)/dt$) when trapezoidal wave voltage applied to the needle-plate electrode system with Epoxy molding in 30°C(Experimental results).

図 3(a-1)と(a-2)に示した印加電圧は、印加電圧の波高値 V_m がガード電極有の場合と無しの場合で、それぞれ 3kV と

0.2kV と大きく異なる。これは、測定を行った両試料の $Q(x,t)$ の最大値がほぼ同じになるように V_m を設定したためである。図 3(b-1)と(b-2)に示した $Q(x,t)$ は、ガード電極の有無により大きな違いが観測された。ガード電極がある場合には、 $Q(x,t)$ は針電極直下 ($x=0$ mm) で最大となる分布を示した。一方、ガード電極がない場合には、針電極直下で $Q(0,t)$ は、印加電圧の印加時間とともに増加するが、それよりも測定電極の両端の $Q(+8$ mm,t)と $Q(-8$ mm,t)で最大値を示した。

図 3(c-1)と(c-2)の電流分布 $dQ(x,t)/dt$ は、ガード電極がある場合には、針電極直下 ($x=0$ mm) で最大を示した。ガード電極がない場合には、測定範囲の両端 ($x=+8$ mm,-8 mm) で最大を示した。図 4 は、時間 t が 50s でのそれぞれ試料の電流分布 $dQ(x,t)/dt$ を示した。図 3(c)と図 4 から、ガード電極の有無は電流分布に大きく関係していることがわかる。また、図 3(d-1)と(d-2)より、電流分布が最大を示す位置での電流は印加電圧が急変する箇所(電圧印加直後、極性反転直後)に電流が急峻に変化する。これらの現象は以下のように考えることができる。ガード電極がある場合には、針-平板電極の電界分布から考えて、電界が最大となる針電極直下で電流分布が最大となる⁽³⁾。電圧印加直後と極性反転直後の急峻な電流の変化は、時間的に見て、エポキシ樹脂の分極による瞬時充電電流ではなく、電荷の移動による電流によるものとも考えられた。極性反転時には、電極から注入または抽出する電荷の極性が反転する(ヘテロ電荷効果)。これは極性反転後に針電極から注入された電荷が試料内に滞在すると、時間経過により後続の同極性の電荷注入を抑制するために電流が減少する(ホモ電荷効果)のではないかと考えられる。

ガード電極がない場合には、針電極と測定電極間の電気力線はガード電極が無いため測定電極に集中する。ガード電極がある場合と同様に針電極から注入された電荷が試料中に停滞すると、後続の注入電荷は、同極性の電荷が試料内に存在するためこれを避けるように針電極から離れた位置の測定電極に電気力線が集中して電流が流れ易くなると考えられる。

製作した $Q(x,t)$ メータを利用して、針平板電極系の電流分布を測定した。 $Q(x,t)$ を測定することで、試料中の空間電荷挙動についてある程度の考察が可能になったと考えられる。

文献

- (1) 高田達雄, 森琢磨, 岩田知之, 藤富寿之, 小野泰貴, 三宅弘晃, 田中康寛, 「電流積分電荷法による絶縁劣化診断法の提案」, 電気学会, 誘電絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会, DEI-16-058, EW-16-013, pp.1-8 (2016).
- (2) M. Fukuma, Y. Sekiguchi, Current Distribution Measurement under Non-uniform Electric Field by Current Integration Meter, International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM2017), DM-3,(2017).
- (3) 福岡眞澄, 藤井雅之, 関口洋逸, 「針-平板電極系に台形波電圧を印加した場合の $Q(x,t)$ 波形と電界分布」, 第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿, O-1, pp.74-79(2025).

電流積分電荷法を用いた 40kV/mm 以下における LDPE の電気伝導測定

衣斐彩乃, 杉本皓祐, 光本真一* (豊田高専),

藤井雅之 (大島商船高専), 福岡眞澄 (松江高専), 栗本宗明 (名古屋大学)

Electrical Conduction Measurement of LDPE applied below 40kV/mm by Current Integrated Charge Method

Ayano Ebi, Kosuke Sugimoto, Shinichi Mitsumoto*(National Institute of Technology(N.I.T.), Toyota College),

Masayuki Fujii (N.I.T., Oshima College), Masumi Fukuma (N.I.T., Matsue College), Muneaki Kurimoto (Nagoya University)

1. まえがき

電力ケーブルの電気絶縁材料としてポリエチレンが広く用いられている。低密度ポリエチレン (LDPE) の絶縁破壊の強さは高密度ポリエチレンより低いことが報告されているが、そのメカニズムの詳細には不明な点が多い。一方、直流高電界領域における電気伝導特性を評価する方法として、電流積分電荷法⁽¹⁾が近年注目されている。本稿では、電流積分電荷法を用いて 40kV/mm 以下における LDPE の電気伝導測定を評価したので報告する。

2. 試料および実験方法

試料は、0.921 g/cm³ の密度の LDPE を約 1.5mm 厚に成形したシートを使用した。この試料に対して電流積分計を用いて、所定の電圧を 3600 秒間印加し測定を行った。電圧は、印加電界が 20, 25, 30, 35 および 40 kV/mm となるように調整し、積分コンデンサは、1 μF の容量を用いた。測定温度は、27°C であった。

3. 実験結果および考察

図 1 に、LDPE の電荷-時間特性 $Q(t)$ の一例を示す。図 1 より、印加電界が一定の場合、電荷 Q の大きさは時間の経過とともに増加すること、また印加電界の増大に伴い Q の大きさが増加することが確認できる。さらに、 $Q(t)$ の傾きは時間とともに減少しており、電流が低下している。そこで、所定の時刻 x の前後 60 秒間の積分電荷量 $Q(x)$ および $Q(x+60)$ を用い、電流 $I_x = (Q_{(x+60)} - Q_{(x)}) / 60$ を算出した。その一例として、印加電界 20 kV/mm における電流 I_x の時間依存性を図 2 に示す。電流は時間の経過とともに減少しており、この傾向は 20~40 kV/mm のいずれの電界条件においても確認された。一方、絶縁部の抵抗値を厳密に特定するためには、さらに長時間の電界印加が必要である。しかしながら、LDPE に数十 kV/mm 程度の電界を印加した場合、電界の対数 $\log E$ に対する電流の対数 $\log I$ の傾きが約 2 となる SCLC (空間電荷制限電流) 機構を示すことが報告⁽²⁾されている。そこで本研究では $\log I$ - $\log E$ 特性を求め、その傾きの電界印加時間依存性を図 3 に示した。 $\log I$ - $\log E$ 特性の傾きは、電界印加時間ごとにわずかな変動は認められるものの、1.5 から 2.8 の範囲で分布しており、明確な時間依存性は確

認されなかった。以上より、本実験条件 (27°C、印加電界 20~40 kV/mm、密度 0.921 g/cm³ の LDPE) においても、SCLC 機構が支配的であることが確認された。数千秒程度の電界印加時間では電流は減少傾向を示しており、絶縁部の抵抗値を特定するためにはさらに長時間の電界印加が必要であるものの、SCLC 機構に基づく解析は十分に可能であることが示された。本研究の一部は日東学術振興財団の援助を受けて実施された。

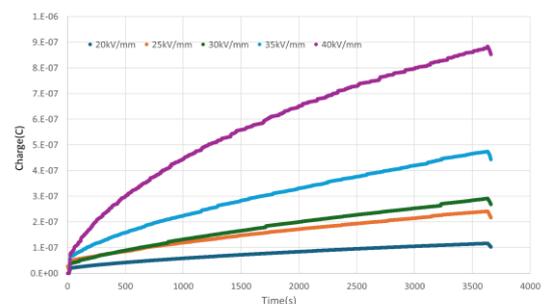


Fig.1. Typical charge time characteristics of LDPE

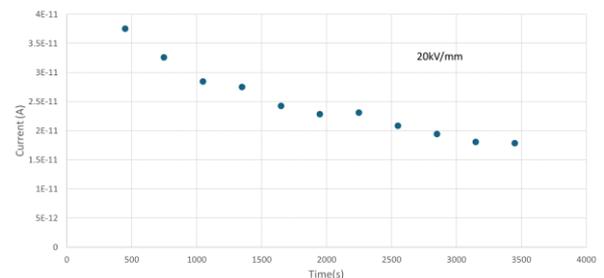


Figure2. Time dependence of current.

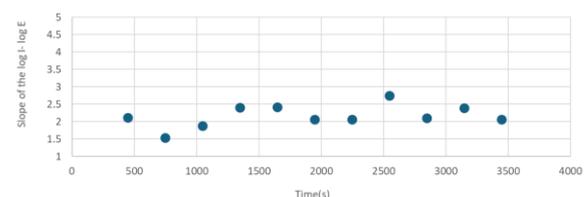


Fig.3. Slope of the $\log I$ - $\log E$ characteristics in LDPE ($\rho=0.921$ g/cm³)

文 献

- (1) 藤富等, 平成 27 年度電気学会全国大会, 2-57 p.69
- (2) 超智等, 電気学会論文誌 A, Vol.136, No11, pp.717-723

電流積分電荷法における高静電容量試料への 課電方法最適化の検討

小山 勇人* (東京電設サービス株式会社)

Study on Optimization of Voltage Application Method for High Capacitance Samples
Using Direct Current Integrated Charge Method
Hayato Koyama (Tokyo Densetsu Service Co., Ltd.)

1. はじめに

電気絶縁物の直流課電評価法として注目されている電流積分電荷法（以下、 $Q(t)$ 法）では、高圧ケーブル中の水トリ一劣化位置標定法などで実績がある⁽¹⁾。しかし装置構成上、高静電容量の試料に課電する際は、装置に内蔵されているコンデンサ容量を可変、ないしは増設しなくてはならず、長距離ケーブルなどの高静電容量試料の測定時に制約が生じていた。そこでコンデンサ容量を可変・増設することなく、課電プログラムの変更のみで高感度測定と試料評価ができる可能性を確認したため報告する。

2. 現行の電流積分電荷法の判定方法

<2・1> 測定装置 $Q(t)$ 法は、電圧印課時に試料に流れる電荷量を、装置内の蓄積コンデンサの両端電位差として記録する方法であり、任意の時間内での電荷挙動を区分できる。すなわち、測定終了時点 t_m の電荷量 $Q(t_m)$ は、初期の瞬時充電電荷量 $Q(0)$ を基準とし、次に試料内で蓄積・移動した吸収電荷量 $Q_{space}(t_m)$ と、最終的に試料に定常的に流れた伝導電荷量 $Q_{cond}(t_m)$ の3つの電荷量の和で記述される⁽²⁾。
<2・2> R_c を用いた基本的な判定方法 絶縁体試料の評価としては、瞬時充電電荷量 $Q(0)$ と、測定終了時点 t_m の電荷 $Q(t_m)$ の電荷量比である $R_c (Q(t_m)/Q(0))$ を用いれば、電荷が蓄積と移動する時間領域では“ $1 < R_c < 2$ ”であり、伝導電荷が支配的となる時間である緩和時間 τ と、測定時間 t_m が等しい場合 ($t_m = \tau$) には、 R_c が“2”となるとされる⁽²⁾。このため $Q(0)$ を記録することが測定上重要となる。

3. 高静電容量試料測定時の課題と解決法

<3・1> 高静電容量試料測定時の課題 現行の測定および評価においては、装置内の蓄積コンデンサに $Q(0)$ を蓄積する必要があり、かつ蓄積コンデンサ両端電圧が約3V未満で使用するという制約がある。ここで試料が長距離ケーブルのような高い静電容量を有していた場合、 $Q=CV$ より課電電圧に応じて $Q(0)$ が増加するため、都度、蓄積コンデンサを可変や増設しなくてはならず制約が生じていた。
<3・2> 解決法（課電プログラムの変更） $Q(t)$ 法は直流ステップ課電方法（電圧や時間）をプログラム上で任意に変更できる。このため蓄積コンデンサの課電プログラムを変更し、蓄積コンデンサが使用される容量の負担を減らす方法を提案する。

<3・3> 蓄積コンデンサの記録開始時間の目安 本来であれば $Q(0)$ を記録したいため、幾何容量の満充電時間の直前に記録を開始したい。このため文献値などで事前で得られる試料の静電容量 C と回路抵抗 R の積である時定数 $\tau=RC$ が目安となる。ここで τ は幾何容量 C の充電と瞬時に行われる分極（電子・原子分極が主体）がおおむね完了する時間とし、前述の τ とは区別する。実際の測定では、試料状態や課電回路中の保護抵抗、課電装置容量および内部抵抗で充電時間が決まることになる。

4. 課電プログラムの変更後の判定法

実際には、蓄積コンデンサの動作用リレーの動作時間があるため（最長2秒と見積もる）、記録開始時間は試料や回路による充電時間とのかねあいになる。このため瞬時充電電荷 $Q(0)$ が取得できるか否かで下記のように分けられる。
<4・1> $Q(0)$ が取得できる場合（充電途中での記録開始）
現行の $R_c (Q(t_m)/Q(0))$ で評価可能である。ただし充電途中からの記録開始となるため、蓄積コンデンサの容量負担も減少するが、 $Q(0)$ の計測値は本来値とは異なる。ここで $Q(0)$ の本来値を推定する方法として、異常が発生しないと推定される低電圧印課時、たとえば公称電圧 6.6kV で使用される高圧ケーブルでいえば 1kV 付近まで⁽¹⁾ においては現行プログラムで課電して、そのときの $Q(0)$ の計測値を最低2点以上取得する。つぎに $C=Q/V$ よりその2点以上の傾きから試料の静電容量 C を推定する。この C より $Q=CV$ の関係式を用いて、異常が発生しうる高電圧課電時での $Q(0)$ の本来値を推定する方法を提案する。

<4・2> $Q(0)$ が取得できない場合（満充電後の記録開始）
この場合は装置の蓄積コンデンサに $Q(0)$ が蓄積されず、満充電後のある時点での、本来値とは異なる $Q(0)'$ を基準電荷量として記録が開始される。以降は吸収電荷量 $Q_{space}(t_m)$ と、伝導電荷量 $Q_{cond}(t_m)$ のみが記録されていくことになるため、試料が良好な絶縁物の場合、蓄積コンデンサの容量負担は非常に少なくなる。評価においては通常であれば $R_c (Q(t_m)/Q(0))$ が算出できず評価不可である。しかし絶縁体に劣化があれば上記の、特に伝導電荷量 $Q_{cond}(t_m)$ が増えると考えられるため、同一課電条件下であれば R_c をもちいた試料同士の相対比較が可能である⁽³⁾。いっぽう電流値の推移を考えると、漏れ電流すなわち伝導電流が現れる時間は、新品高圧ケーブルの高電界印課時での実験では約5分後で

あり⁽⁴⁾、さらに貫通水トリーがある高圧ケーブルでは電流の単発的な上昇であるキック現象、ならびに指数関数的な電流急上昇は印課後2~3分程度で現れるとされている⁽⁵⁾。以上より蓄積コンデンサの動作用リレーの動作時間により、数秒間において電荷量を取得できなくとも（カットされても）、満充電数秒後のある時点での基準電荷量 $Q(0)'$ と、あらたに設定できる Rc' ($Q(t_m)/Q(0)'$) を用いて、同課電条件下の健全品ならびに複数試料との相対的な評価が可能と考えられる。また $Q(0)$ と $Q(0)'$ はリレー動作時間が短ければ近い値といえるため、前述の推定した $Q(0)$ も参考値となる可能性がある。各条件と $Q(0)$ との関係性を Fig.1 に示す。

<4・3> 水トリーがある絶縁体の水分量と $Q(0)$

$Q(0)$ の本来値を推定するにあたり、課題として水トリーがある絶縁体の水分量の変化によって、 $Q(0)$ が変化する依存性が存在する⁽⁶⁾。ただし過去知見によれば、水分量が多い場合でも、水トリー先端の全電荷量は直流印課電圧値との間にリニアな関係がみられた⁽⁷⁾、との記載がある。そこで仮に水分量が経時変化しても、その測定時点においては $Q(0)$ が各電圧と比例して上昇すると考えられるため、前述の推定法が適用できる可能性がある。また健全品を同条件下で課電して試料の $Q(0)$ と士を比較することも有用と考える。

<4・4> ΔQ の高感度取得 値の大きい瞬時充電電荷が省かれるため、その後の数桁小さくなる吸収電荷と伝導電荷の和である ΔQ を、現行の蓄積コンデンサの両端電圧の上限である 3V 内で最大限取得でき、高感度測定が可能となった。 $(\Delta Q/C = \Delta V < 3 \text{ C}$ は現行の蓄積コンデンサ容量)

5. 課電プログラムの実際と結果

$Q(t)$ 法の装置は Fig.2 に示すように、蓄積コンデンサと動作用リレーが並列となっている。そこで、①リレー閉状態で所定電圧を印課→②リレーを開く→③同時に記録を開始（このとき充電時間とリレーの動作時間のバランスで $Q(0)$ が取得できるか否かが決定）→④所定印課時間終了→⑤課電状態のままリレーを閉→⑥リレーを閉状態で 0V に降圧して接地となる。これによりリレー接点に負荷がかからず、かつ課電終了後に試料中の充電電荷が蓄積コンデンサへ逆流することも防止できる。なお、上記の測定や機器動作は高静電容量試料で確認済みである。

6. まとめ

電流積分電荷法 (Q_t 法) において、高静電容量試料の測定時にコンデンサ容量を可変・増設せずに、課電プログラムの変更のみで測定が可能であることを確認した。試料評価については $Q(0)$ が取得できない場合でも、課電した時点での電荷量 $Q(0)'$ を基準とした電荷量比 Rc' ($Q(t_m)/Q(0)'$) をもちいて相対評価ができる可能性を確認した。またあわせて ΔQ の高感度取得も可能となった。この手法は長距離ケーブルの複数相一括測定の簡素化に寄与できると考える。

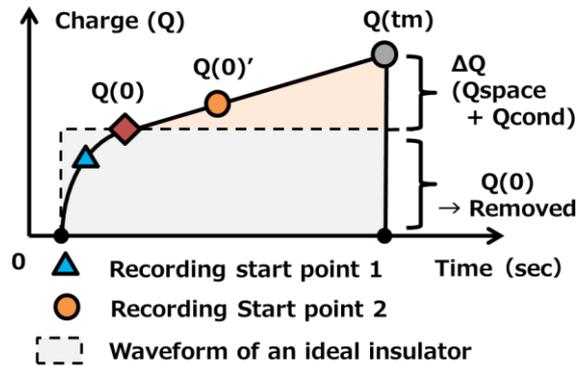


Fig.1 Schematic Diagram of the Charge Recording Start Time

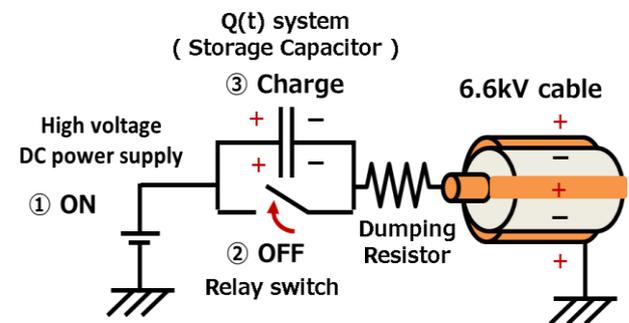


Fig.2 Schematic Diagram of Tests for $Q(t)$ Methods and Flow of Measurement.

・謝辞

本測定法の検討に際し、ご指導を頂いた東京都市大学名誉教授高田達雄先生、(株)エー・アンド・デイの長島徹朗氏、井上隆氏に心より感謝致します。

文 献

- (1) 小山 勇人・杉本 修・谷口 竜男・小沢 保夫：「電流積分電荷法による 6.6 kV CV ケーブル水トリー位置検出法の検討」, 令和 6 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.311 (2024)
- (2) 高田 達雄・岩田 晋弥・橘川 昂平・植原 弘明：「 $Q(t)$ 測定による XLPE での電荷蓄積の計測時間依存性の評価」, 電気学会研究会資料(誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会), (2021)
- (3) 小山 勇人・杉本 修：「電流積分電荷法による 6.6 kV CV ケーブル水トリー位置検出法の検討 (その 2)」, 令和 7 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.258 (2025)
- (4) 門脇 一則：「電流積分法と PEA 法の併用でわかること ～どこまでが吸収電流でどこからが伝導電流か～」, 第 56 回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム, No.SP-9 (2025)
- (5) 日本電線工業会：「高圧 CV ケーブルの保守・点検指針」, 技術資料, 技資第 116 号 D, 平成 24 年 2 月改正版
- (6) 足立 和久・李 英・荻島 みゆき・川井 二郎・海老沼 康光：「水トリー劣化した架橋ポリエチレンの空間電荷現象とその等価回路的検討」, 電気学会研究会資料(放電/誘電・絶縁材料合同研究会), (1997)
- (7) 李 英・川井 二郎・海老沼 康光・藤原 靖隆・相原 貢・大木 義路：「水トリー劣化した架橋ポリエチレンにおける空間電荷の挙動」, 電学論 A, Vol.116 No.9 pp.818-824 (1996)

電流積分法 (Q-t 法) による電気絶縁紙の 誘電・絶縁特性の評価

佐藤 学, 吉川 大 (ユカインダストリーズ株式会社)
松本 聡, 西川 宏之 (芝浦工業大学)

Evaluation of Dielectric and Insulation Properties of Insulating Paper by Q-t Method

Gaku Sato, Hajime Yoshikawa (YUKA INDUSTRIES)

Satoshi Matsumoto, Hiroyuki Nishikawa (Shibaura Institute of Technology)

1. はじめに

近年, 直流送電や直流機器の拡がりにより, 絶縁材料の直流電圧印加時の電気伝導, 空間電荷の現象理解の重要性が増している。また油入変圧器などの交流機器でも流動帯電現象といった電荷蓄積現象に起因する不具合事象等もあり, 設備保守の観点からも絶縁材料の誘電・絶縁特性の把握は重要である。

絶縁材料の誘電・絶縁特性の評価手法は, 様々な手法が提案・実用化されており, 評価しようとする特性に応じた測定手法が選択される。この内, 試料に直流電圧を印加した際に流れる電流成分を時間積分し, 電荷量として計測する電流積分法 (Q-t 法) は各種の電流成分を網羅的に捕捉でき, 材料の誘電・絶縁特性を俯瞰的に把握するのに有効とされ, 近年応用検討が進められている^{(1),(2)}。

油入変圧器に用いられる絶縁紙にはクラフト繊維からなる普通紙 (KP) と改質剤の添加により耐熱性を向上させた耐熱紙 (TUK) があり, JEC-2200-2014 の改訂以降, TUK が一般に使用されている。ただし, TUK の劣化に伴う誘電・絶縁特性の変化に関する報告は少ない。そこで本研究では, 絶縁紙の評価に Q-t 法を適用し, 絶縁紙の熱劣化に伴う誘電・絶縁特性の変化について検討した結果を報告する。

2. 実験

Q-t 法の測定回路の概略図を Fig.1 に示す。電極は主電極 ($\phi 25$ mm), リング電極 (内径 $\phi 38$ mm, 外径 $\phi 50$ mm), 対向電極 ($\phi 100$ mm) で構成した。測定試料は $t0.08$ mm \times D70 mm \times W70 mm の絶縁紙 (KP・TUK) を加速劣化 (KP: 140°C \cdot 2, 20 日, TUK: 170°C \cdot 2, 15 日) させたものを用いた。試料と電流積分計 (A&D 製 AD9832A) を接続した回路に直流電圧 (3 kV/mm) を印加し, 課電開始から短絡に至る全過程を測定した。なお本研究では非油浸状態・室温下で測定を行った。

3. 試験結果

熱劣化絶縁紙の測定結果を Fig.2 に示す。TUK, KP いずれも吸収電流が認められ, 電荷の蓄積が生じていた。また電荷量が試料により異なり, 未劣化品は TUK と KP で差が

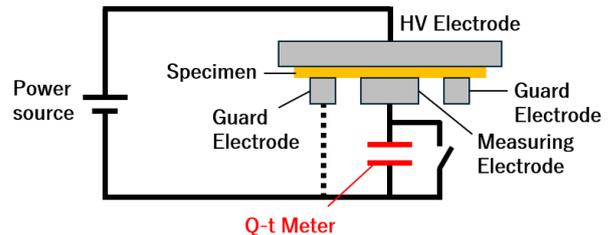
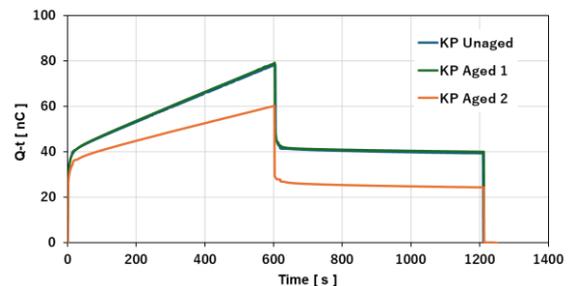
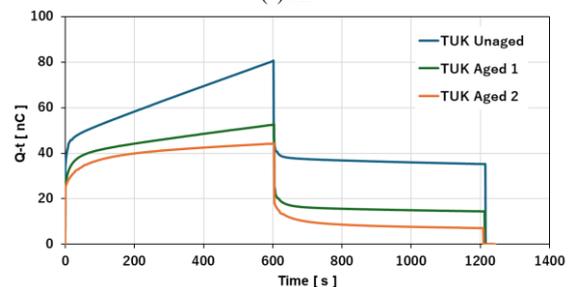


Fig.1 Diagram of measurement system



(a) KP



(b) TUK

Fig.2 Measurement results (at 20°C)

見られないが, TUK は劣化による電荷量の低下が顕著であった。引き続き検討を進め, 種々の条件 (印加電圧・温度・湿度・油浸など) における誘電・絶縁特性データを取得する予定である。

文献

- (1) 高田ほか「Q(t)法における電極電荷・蓄積電荷・漏れ電荷の区別」, 電気学会論文誌 A, Vol.141, No.4(2021)
- (2) 関口ほか, 「誘電・絶縁特性評価における電流積分法の役割と今後の展開」, 住友電工テクニカルレビュー, 第 205 号 (2024)

炭化水素系熱硬化性樹脂/配向 hBN コンポジット絶縁材料の作製

宮地 佑汰*, 佐藤 孝政, 村上 義信 (豊橋技術科学大学)

Fabrication of Hydrocarbon Thermosetting Resin/Oriented hBN Composite Materials
Yuta Miyachi, Takamasa Sato, Yoshinobu Murakami (Toyohashi University of Technology)

1. はじめに

車載用パワーモジュール等への適用を目指して、高放熱性と許容できる絶縁性を備えたコンポジット材料の開発が進められている⁽¹⁾。筆者らは、低誘電性・低吸湿性に優れる炭化水素系熱硬化樹脂⁽²⁾に着目し、ジシクロペンタジエン(DCP)/配向六方晶窒化ホウ素(hBN)コンポジット材料を静電吸着法を用いて作製できることなどを報告⁽³⁾した。本研究では、より低コストな製造法として静電吸着法を用いない配向付与プロセスにより DCP/配向 hBN コンポジット材料を作製したので報告する。

2. 試料および実験方法

図1に DCP/配向 hBN コンポジット材料の作製方法を示す。hBN (平均粒径 $d=45\ \mu\text{m}$, 平均厚さ $t=2.5\ \mu\text{m}$) と未硬化の DCP (主剤: 硬化剤=100:2.5 で混合) を混合 (未硬化 DCP:hBN=2.05:1) した。脱気処理 (室温, $6.7\times 10^{-1}\ \text{Pa}$, 5 min) 後, 混合液を治具に注型し, 遠心力 (3000 rpm, $1760\times g$, 5 min) および機械的圧力 (5 kPa) により未硬化 DCP 中の hBN を配向させた。その後, 直径 10 mm の超硬ダイスに hBN の鱗片面が厚さ方向と平行になるように, 混合物塊を挿入した後, ホットプレス (50 MPa, 35 °C, 35 min → 50 MPa, 175 °C, 10 min) し, 厚さ約 1.0 mm の DCP/配向 hBN 材料を作製した。アルキメデス法により試料中の hBN 含有率, 比熱容量は示差操作熱量計, 熱拡散率はフラッシュ法で測定し, 熱伝導率 (λ) を評価した。厚さを約 0.3 mm に研磨した試料を McKeown 型電極系に設置した後, 30 °C 下で上昇率 1 kV/s の直流ランプ電圧を印加し, 絶縁破壊電圧を測定した。絶縁破壊電圧を電極系作製後の試料厚さで除することで直流絶縁破壊の強さ (DC-Fb) を評価した。

3. 実験結果および考察

図2に DCP/配向 hBN コンポジット材料の熱伝導率および DC-Fb の hBN 含有率依存性を示す。同図に示したように熱伝導率は $37.6\sim 40.3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ のかなり高い値を示した。これは, 遠心力および機械的圧力により hBN の鱗片面が熱流方向と平行に配向し, 効率的な熱伝導ネットワークが構築されたためと推察される。また, DC-Fb は hBN の含有量に関わらず約 80 kV/mm を示した。DCP と hBN はいずれも比

誘電率差・導電率差が小さく, hBN 含有率に依存した界面電界の変動は生じにくいためと考えられる。本製法は静電吸着法を用いないため, 短時間かつ低コストで配向構造の形成が可能であり, 実用性の高い製造プロセスと考えられる。試料の一部をご提供いただきました RIMTEC 株式会社水島事業所の亀井氏並びに福本氏らに感謝いたします。なお, 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤 B(23K22740) の援助により行われた。

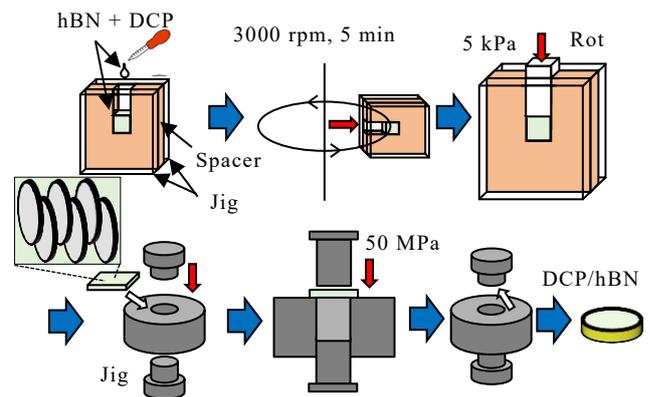


図1 DCP/配向 hBN コンポジット材料の作製方法
Fig.1. Fabrication method of DCP/oriented hBN composite materials

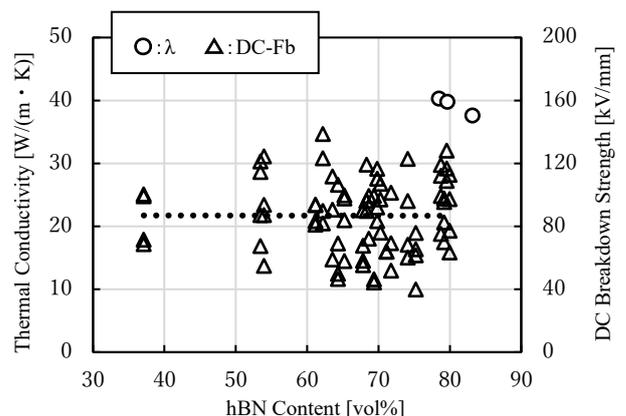


図2 DCP/配向 hBN コンポジット材料の λ と DC-Fb
Fig.2. λ and DC-Fb in DCP/oriented hBN composite materials

文 献

- (1)竹澤: 高熱伝導コンポジット材料, CMC 出版, 156~161 (2011)
- (2)吉田・他: 電気学会論文誌 A, 136(5), 324~329 (2016)
- (3)土田・他: 電気学会全国大会講演論文集, 2-037, 40 (2025)

電場配向したダイヤモンド/エポキシ複合材料 の熱伝導率評価

堀 凜惺*, 福田 千夏, 吉井 海成, 羅 皓澤, キム ハナ
匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)

Thermal Conductivity Evaluation of Electric Field-Oriented Diamond/Epoxy Composite Materials

Rinsei Hori*, Chinatsu Fukuda, Kaisei Yoshii, Hao-Tse Lo, Hana Kim

Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

近年、電力機器およびパワーエレクトロニクス機器の高出力化・高集積化に伴い、高熱伝導性を有する電気絶縁材料への要求はますます高まっている。筆者らはこれまで、高熱伝導性とフィラー低充填率化の両立を目的として、フィラー配向手法として電場印加を採用し、主としてアルミナ(Al_2O_3)フィラーを用いた高熱伝導化について検討を行ってきた^(1,2,3)。その際、アルミナフィラーとして球状、板状、多面体形状などを用い、これらを適切に組み合わせた配合設計の下で電場配向を行うことにより、鎖状構造の形成を介した高熱伝導化が可能であることを明らかにしている。しかしながら、現状ではフィラー充填率 35 vol%において、有効熱伝導率は約 1.8 W/m \cdot K に留まっている⁽³⁾。そこで本稿では、アルミナよりも高い熱伝導率を有するフィラーの一つであるダイヤモンドに着目し、その適用によるさらなる高熱伝導化の可能性について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

使用した樹脂系、試料作製手順および各種評価方法は、前報⁽³⁾と同様である。エポキシ樹脂の主剤にはビスフェノール A 型エポキシ樹脂 (DIC 製 EPICLON 850-S) を、硬化剤にはアミン系硬化剤 (DIC 製 ラッカマイド W-507) を用いた。フィラーには、トーメイダイヤ製ダイヤモンド砥粒 TMS325/400 を用い、樹脂中への添加率は 35 vol% 相当とした。主剤、硬化剤およびフィラーを自転公転式ミキサーにより十分に混合した後、専用金型に注型した。試料厚さを 1 mm とし、60 Hz において 1.5 kV_{rms}/mm の交流電界を印加した状態で、80 $^{\circ}$ C \cdot 30 分の一次硬化を行った。その後、課電を停止し、120 $^{\circ}$ C \cdot 3 時間の条件で二次硬化を施した。硬化後の樹脂中におけるフィラーの配向構造は、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。

試料の熱伝導率 λ は、熱拡散率 α 、比熱容量 C_p 、および密度 ρ の積 ($\lambda = \alpha C_p \rho$) により算出した。 α および C_p は、NETZSCH 製 LFA 467 Hyper Flash を用いてフラッシュ法により測定した。密度 ρ は水置換法により求めた。作製し

た各シート試料から 10 mm 角の試料を 3 個切り出し、それぞれの λ を評価した後、その平均値を代表値とした。

3. 結果および考察

各試料の熱伝導率の測定結果を Table 1 に示す。比較のため、前報⁽²⁾で示した球状アルミナフィラーを用いた結果も同表に併記した。その結果、ダイヤモンドフィラーを用いた場合は、球状アルミナフィラーの場合と比較して高い熱伝導率を示すとともに、電場配向による熱伝導率の向上割合も大きいことが分かる。この要因として、ダイヤモンドおよびアルミナの熱伝導率がそれぞれ約 1,500 W/m \cdot K および 30 W/m \cdot K と大きく異なることに加え、ダイヤモンドフィラーが不整形形状であるため、電場配向によってフィラー同士が点接触ではなく面接触に近い状態で連結し、界面熱抵抗が低減された可能性が考えられる。

以上の結果より、本稿では交流電場配向技術を適用することにより、ダイヤモンドフィラーを用いた低充填エポキシ複合材においても高熱伝導化が実現可能であることを実証した。今後は、フィラー粒径や形状の最適化、ならびに異種フィラーとの併用などを通じて、さらなる高熱伝導化および低フィラー充填率化を両立した複合機能材料の創製を目指す。

Table 1 Results of thermal conductivity measurement for each specimen.

Specimen	Diamond w/o field	Diamond with field	Alumina w/o field	Alumina with field
Filler content [Vol%]	37	36	35	35
Thermal conductivity [W/m \cdot K]	1.30	2.41	0.74	0.90
Improvement ratio	-	1.85	-	1.22

文 献

- (1) 岡崎祐太, 他, 第 41 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, No.C-1, pp.79-84 (2010)
- (2) 小迫雅裕, 他, 平成 23 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会, No.XVIII-3, p.397 (2011)
- (3) Lo Hao-tse, 他: 第 56 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, No.MVP-6, pp.161-163 (2025)

Hydrophobicity Reduction Behavior at a Fixed Point on Unused SiR before and after SD Treatment

May Oo Khin*, May Thin Khing*, Tatsuya Sakoda*
Yoshiki Nakayama**, Kota Niwa**

* Electric Power Lab, University of Miyazaki

** Kansai Transmission and Distribution, Inc.,

1. Introduction

Silicone rubber (SiR) for polymer insulators has high hydrophobicity; however, the surface gradually degrades due to UV ray and contaminants, reducing low molecular weight (LMW) and hydrophobic groups. The surface can be evaluated through the temporal behavior of a water droplet on the SiR surface. In our previous study, we measured droplet behavior at multiple positions on insulator sheds taking account of the surface roughness depending on positions.

In this study, the effect of surface discharge (SD) treatment is clarified by eliminating positional variation. The SD induces temporal decrease of hydrophobicity due to breaking Si-CH₃ group. By analyzing droplet behavior at the same position, we isolate the influence of SD on 1st hydrophobicity decrease, hydrophobic recovery tendency, and 2nd hydrophobicity decrease.

2. Experimental Procedure

SiR specimen with 50% alumina trihydrate (10 mm × 10 mm) was evaluated without surface cleaning to preserve its original condition. All measurements of contact angles were performed at the same position to eliminate positional variation. In this study, a single water droplet was placed on the SiR surface and kept for 10 min to observe its temporal shape change. This differs from our previous studies [1], where droplets were placed repeatedly every 5 or 10 min and the surface was wiped after each measurement. Each measurement in this study was repeated three times for both untreated and SD-treated conditions, with a one-hour interval between measurements to allow hydrophobicity recovery by LMW siloxane dispersion, ensuring independent surface conditions.

An SD electrode was designed using a 0.5 mm glass plate (75 × 25 mm), 0.1 mm aluminum (Al) tape, and a 150-mesh stainless-steel plate (80 × 20 mm, 0.1 mm hole size, 0.06 mm wire diameter). The glass plate was sandwiched between the Al tape and the mesh plate, forming a 20 × 30 mm SD area as shown in Fig.1. 8 kV with 10 kHz was applied to the mesh plate, and the treatment time was set at 10 s. Voltage and current were monitored using a high-voltage probe and a current transformer. Before and after SD treatment, a 7 μL water droplet was placed on the SiR surface, and the contact

angle was measured for 10 min.

Chemical changes were analyzed by ATR-FTIR, focusing on SiO₂, Si-O, Si-CH₃, C-H, and O-H peaks, and peak ratios relative to SiO₂ were compared. Surface morphology and elemental analysis were examined by SEM and EDS.

3. Experimental Results

3.1. Contact Angle Variation without SD Treatment

Figure 2(a) shows the variation of contact angle measured at the same position for an unused and untreated SiR specimen. All curves start with high initial angles of 100°–110°, indicating high hydrophobicity. Even without SD treatment, the unused SiR surface shows a rapid initial decrease of the contact angle within 1 min. It is thought that the hydrophilic siloxane covers the SiR surface by inverting the methyl group. After this stage, the contact angle decrease becomes slow because of LMW dispersion.

3.2. Contact Angle Variation with SD Treatment

Figure 2(b) shows the variation of contact angle measured at the same position for an unused SiR specimen after SD treatment. All curves start from lower initial angles of 95°–100°, which is clearly lower than that of the untreated SiR. A rapid early decrease is observed, followed by a gradual decline, indicating reduced hydrophobicity. Although the overall curve shapes are similar, slight differences appear in the timing, particularly at the secondary reduction initiation point, due to normal experimental factors such as droplet placement, local micro-texture, LMW siloxane redispersion, and environmental conditions.

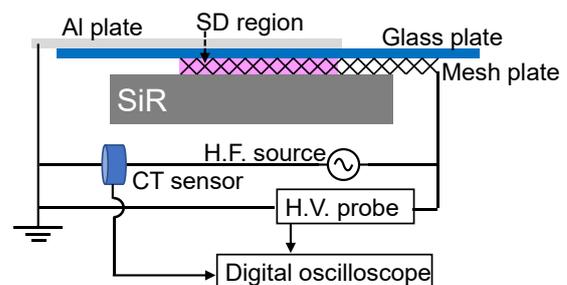


Fig. 1. Experimental setup for SD treatment.

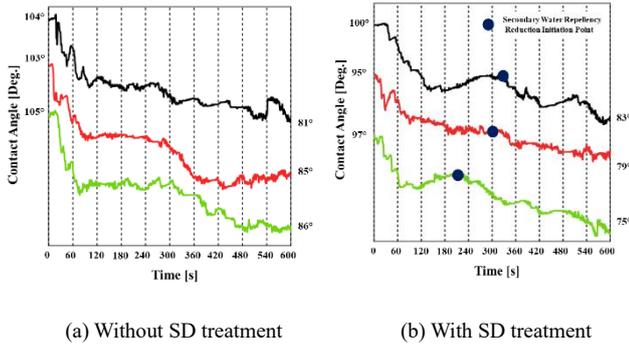


Fig. 2. Contact angle variation without SD treatment on an unused SiR.

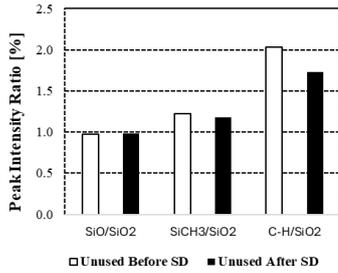


Fig. 3. Peak intensity ratios before and after SD treatment.

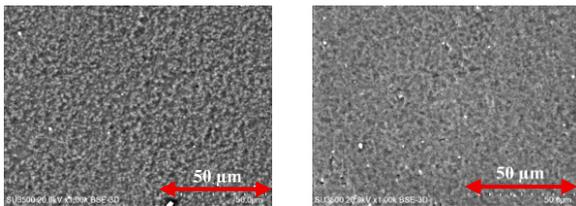
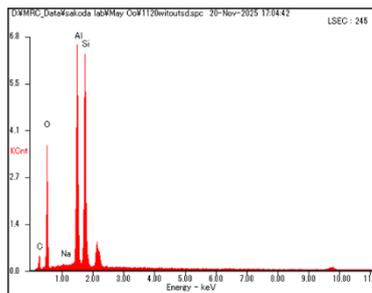
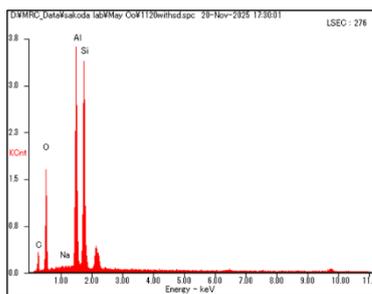


Fig. 4. SEM images of unused SiR without and with SD treatment.



(a) Without SD treatment



(b) With SD treatment

Fig. 5. EDS spectra of unused specimen without and with SD treatment.

3.3. FTIR, SEM and EDS Analyses Figure 3 shows peak - intensity ratios of SiO/SiO₂, Si-CH₃/SiO₂, and C-H/SiO₂ for an unused specimen before and after SD treatment. The SiO/SiO₂ ratio does not change. In contrast, Si-CH₃/SiO₂ and C-H/SiO₂ decrease after SD treatment. The reduction suggests that SD breaks Si-CH₃ groups, which is consistent with the contact angle measurements, where lower initial angles and weaker hydrophobic state were observed after SD. Thus, FTIR confirms that SD causes a clear loss of hydrophobic groups while SiO₂ structure remains unchanged.

SEM images are shown in Fig. 4. Even after SD treatment, the specimen surface is uniform with fine micro-texture. EDS spectra of an unused specimen are shown in Fig. 5. Al, Si, O, and C peaks can be seen before SD treatment. The intensive Al and Si peaks are due to ATH and the silicone matrix, while O comes from both Si-O backbone and ATH. The C peak reflects the silicone chains, and Na also appears. After SD treatment in Fig. 5(b), Al, Si, O, and C remain, showing that the silicone matrix and ATH are still intact. However, Al, Si, and C peaks become slightly lower, consistent with the removal of LMW siloxanes and methyl groups. This suggests that FTIR and contact angle findings that hydrophobic groups are decreased and hydrophobic recovery becomes slower. Thus, EDS confirms that SD modifies only the top surface layer without removing the underlying material.

4. Conclusion

This study confirms that a SD treatment can be used as a controlled method to simulate early-stage surface aging of SiR. By evaluating an unused specimen at a fixed surface position, the direct influence of SD was isolated without interference from positional non-uniformity. The observations indicate that SD mainly affects the outermost surface layer, reducing hydrophobic functional groups while leaving the bulk SiO₂/ATH structure unchanged.

These characteristics are consistent with the initial degradation processes, where chemical modification of the surface occurs before severe physical damage. This method is suitable for future comparative studies with naturally aged specimens and for improving diagnostic techniques related to hydrophobicity stability and surface condition evaluation.

5. References

[1] M. O. Khin et al., "Evaluation of degradation degree of 20-year-aged insulator by using surface discharge," in Proceedings of the 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), China, 2025.

シリコンゴム/配向六方晶窒化ホウ素 コンポジット絶縁材料の作製

佐藤 孝政, 宮地 佑汰, 村上 義信* (豊橋技術科学大学)

Fabrication of Silicone Rubber/Oriented hBN Composite Materials

Takamasa Sato, Yuta Miyachi, Yoshinobu Murakami (Toyohashi University of Technology)

1. はじめに

車載用パワーモジュール等への適用を目指して、高放熱性と許容できる絶縁性を備えたコンポジット材料の開発が進められている⁽¹⁾。筆者らは、低誘電性・低吸湿性に優れるジシクロペンタジエン(DCP)/配向六方晶窒化ホウ素(hBN)コンポジット材料を静電吸着法を用いて作製できることなどを報告⁽²⁾した。本研究では、より低コストな製造法として静電吸着法を用いない配向付与プロセスにより弾性が優れるシリコンゴム(SiR)/配向 hBN コンポジット材料を作製し、材料の熱伝導率を評価したので報告する。

2. 試料および実験方法

図1にSiR/配向 hBN コンポジット材料の作製方法を示す。hBN (平均粒径 45 μm , 平均厚さ 2.5 μm) 1g とイオン交換水 2-4g を混合した後、混合液を治具に注型し、遠心力 (3000 rpm, 1760 \times g, 5 min) および機械的圧力 (5 kPa) により hBN を配向させた。その後、直径 10 mm の超硬ダイスに hBN の鱗片面がプレス (厚さ) 方向と平行になるように、混合物塊を挿入した後、乾燥処理 (120 $^{\circ}\text{C}$, 30 min) を行った。ダイス中の hBN 塊に未硬化の SiR (KE-2061-60-A:KE-2061-60-B=1:1 で混合 (信越化学社製)) を滴下した後、ホットプレス (50 MPa, 120 $^{\circ}\text{C}$ -10 min \rightarrow 50 MPa, 150 $^{\circ}\text{C}$ -60 min) を行い、厚さ約 1.0 mm の SiR/配向 hBN 材料を作製した。アルキメデス法により試料中の hBN 含有率, 比熱容量および熱拡散率はフラッシュ法で測定し, 熱伝導率を評価した。

3. 実験結果および考察

図2にSiR/配向 hBN コンポジット材料の熱伝導率の hBN 含有率依存性を示す。同図に示したように hBN 含有量が 50 vol% 以上において熱伝導率は 10.9~25.3 W/(m \cdot K) の高い値を示した。これは、遠心力および機械的圧力により hBN の鱗片面が熱流方向と平行に配向し、厚さ (熱伝導率測定) 方向に対して効率的な熱伝導ネットワークが構築されたためと推察される。また、hBN 含有量の増加に伴って熱伝導率が上昇する傾向が見られた。hBN 含有量の増加に伴い、上記の熱伝導ネットワークが面方向に対して形成されやすくなったためと考えられる。本製法は静電吸着法を用いないため、短時間かつ低コストで配向構造の形成が可能であり、

実用性の高い製造プロセスと考えられる。なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤 B(23K22740)の援助により行われた。

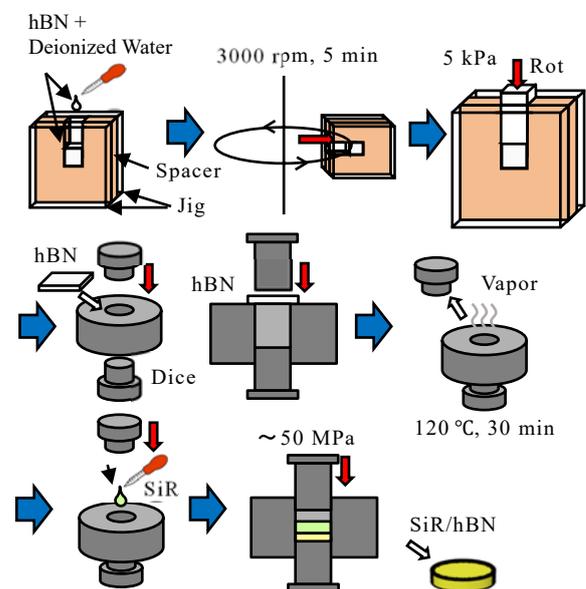


図1 SiR/配向 hBN コンポジット材料の作製方法
Fig.1. Fabrication method of SiR/Oriented hBN composite materials

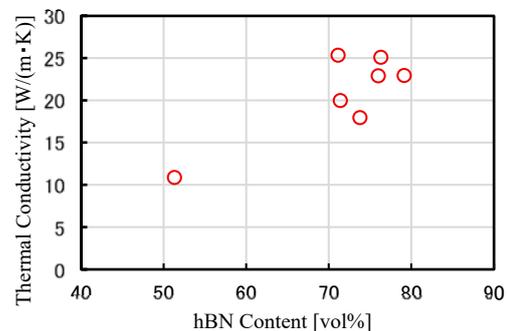


図2 SiR/配向 hBN コンポジット材料の hBN 含有率依存性
Fig.2. Thermal conductivity of SiR/oriented hBN composite materials influenced by hBN content

文献

- (1)竹澤: 高熱伝導コンポジット材料, CMC 出版, 156~161 (2011)
(2)土田・他: 電気学会全国大会講演論文集, 2-037, 40 (2025)

1000°C以上の高温で熱処理した BaTiO₃ 厚膜の 振動発電特性

川上 祥広* (公益財団法人電磁材料研究所)

Power generated energy by vibration using BaTiO₃ thick films annealed above 1000°C
Yoshihiro Kawakami (Research Institute for Electromagnetic Materials)

1. まえがき

振動発電技術は、電池フリーのリモコンスイッチとして実用化されスイッチを押す一回の動作で 170μJ のエネルギーが発電される仕様となっている⁽¹⁾。圧電方式の振動発電技術においても市販品において同等のエネルギーが発電される⁽²⁾。圧電方式でセラミックスを使用した場合、壊れやすいという課題があるが金属基板上に厚膜を形成し焼結させることで堅牢性を改善し同等の発電エネルギーが得られることが報告されている⁽³⁾。我々はエアロゾルデポジション (AD) 法で鉛フリー圧電材料である BaTiO₃ (BTO) 厚膜を耐熱性ステンレス基板上に形成し振動発電エネルギー向上に関する研究を行っている。その結果、1000°Cで熱処理した BTO 厚膜において市販品と同等の評価条件で 200μJ 以上の発電エネルギーが得られることを確認した⁽⁴⁾。本研究では、1000°C以上の高温で BTO 膜に熱処理を行うことで更なる特性向上が可能か実験を行った。

2. 実験方法

基板は振動発電用の市販品よりも小さい外形 25×10×0.1 mm の Fe-Cr-Al 系耐熱性ステンレスを用いて表面に Al₂O₃ 熱酸化被膜を形成し Pt/Ti 層を電極としてスパッタ法で形成し作製した。その基板上に AD 法で膜厚 20μm の BTO 厚膜を室温で両面に形成し大気中で 1000、1100、1200 °C の温度で熱処理を行った。膜表面上部電極として Au をスパッタ法で形成し BTO 膜の膜厚方向に 200V の電圧を印加して分極処理を行い特性評価用のサンプルを作製した。電気的特性として比誘電率と圧電定数 d_{33} の評価を行った。振動発電エネルギーはサンプルを梁長が 15 mm になるように片持ち梁状に固定し、自由端に 2 g の錘をつけて 3 mm 押し込んで弾くことにより励起される減衰振動により圧電効果で発電されるエネルギーの負荷抵抗依存性を評価し得られた最大エネルギーを発電エネルギーとした。

3. 実験結果と考察

BTO 膜の電気的特性を評価した結果を図 1 に示す。比誘電率は熱処理温度の上昇に伴い 3700 から 4100 まで増加し、圧電定数は約 40pC/N でほぼ同等の特性を示す傾向が確認された。発電エネルギーの評価結果を図 2 に示す。発電エ

ネルギーは 1000°Cで熱処理したサンプルが最も大きくなることが確認された。圧電効果による発電エネルギーは比誘電率に反比例することから、比誘電率の増加や熱処理による熱応力が発電エネルギーに影響していると考えられる。

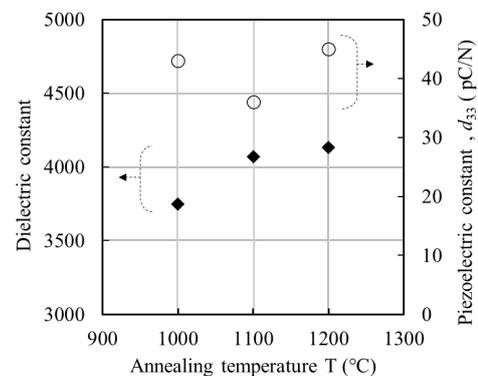


図1 BTO 膜の熱処理温度と電気的特性
Fig.1. Annealing temperature and electrical properties of BTO films

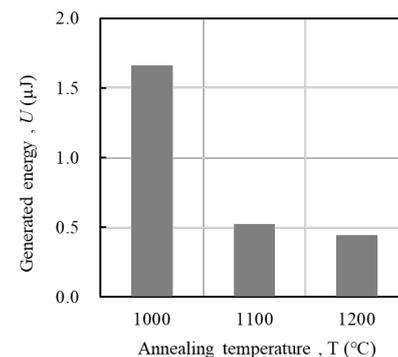


図2 BTO 膜の熱処理温度と発電エネルギー
Fig.2 Annealing temperature and generated energy of BTO films

文献

- (1) Kinetic Harvester, <https://www.enocean.com/en/product-category/> (2025)
- (2) 高効率振動発電素子, <http://www.thrive.co.jp/index.html>
- (3) A. Oishi, H. Okumura, H. Katsumura and H. Kagata, Journal of Physics: Conference Series 557 (2014) 012131
- (4) 川上祥広, 第41回センサシンポジウム, 26A3-PS-6 (2024).

多段型 EHD ポンプの新規試作とポンピング特性

久住 政喜*, 西川 精一 (かんでんエンジニアリング)
花岡 良一, 直江 伸至, 林 晋太郎 (金沢工業大学)

Novel Prototype of Multi-stage EHD Pump and Pumping Characteristics
Masaki Hisazumi, Seiichi Nishikawa (Kanden Engineering Corporation),
Ryoichi Hanaoka, Nobuyuki Naoe, Shintaro Hayashi (Kanazawa Institute of Technology)

1. まえがき

EHD ポンプは電気エネルギーを液体駆動に直接変換でき、非機械式であるので振動や騒音が無く、省エネルギー化が可能などの利点から、伝熱制御、液体輸送、圧力応用など、様々な産業用途に適用され得る。本報告では、高い圧力と流量を発現する多段型 EHD ポンプの特性を示し、考察する。

2. 試作 EHD ポンプと特性計測方法

図1に試作した多段型 EHD ポンプを示す。1対の SUS304 製電極が最大 24 対直列に接続され、6 対ごとに 4 段の蛇腹状配置した構造である。1 対の電極構造は、「6 個の垂直格子電極」と「角型環状板に内蔵された 3 個の円柱電極」が 2.5 mm 間隔で対抗し、液体通過面積の割合は 38.2% である。⁽¹⁾

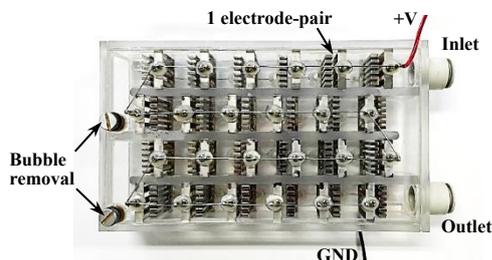


図1. 24 対 EHD ポンプの写真
Fig.1. Picture of 24 electrode-pairs EHD pump

EHD ポンピング特性は、EHD ポンプ、圧力変換器、超音波流量計およびバルブが内径 9 mm の透明チューブで一巡接続された液体循環系を用い、DC 電圧 V の印加により発生した圧力 P 、流量 Q および電流 I を計測して評価した。なお、 P 、 Q および I は、 V をステップ関数的に印加して約 15 秒後の値をプロットした。作動液体は、HFC43-10_{mcc} ($C_5H_2F_{10}$) であり、使用時の水分含有量は約 212 ppm であった。

3. EHD ポンピング特性と考察

<3・1> ポンピング特性

図2に V と P 、 Q および I の関係を示す。 V の増加と共に、 P は指数関数的に増加し、 Q はほぼ直線的に増加する。また、 I は sub-ohmic な関係を示す。この EHD ポンプは、最大電圧 $V_{max}=18$ kV で $P_{max}=47$ kPa、 $Q_{max}=5.5$ L/min を達成した。消費電力 W は $W_{max}=19.8$ W であった。図3に電極対数 N と P 、 Q および I の関係を示す。 N の増加と共に、 P と I

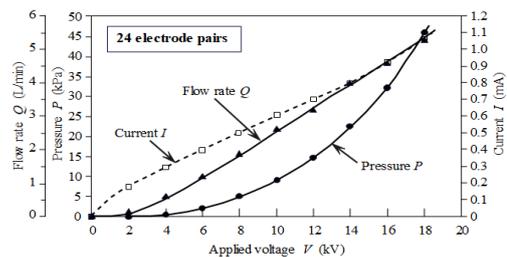


図2. V と P 、 Q および I の関係
Fig.2. Relationship between V and P , Q and I

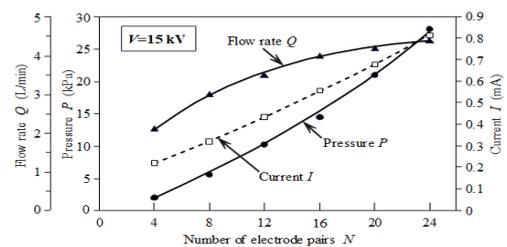


図3. N と P 、 Q および I の関係
Fig.3. Relationship between N and P , Q and I

はほぼ直線的に増加するが、 Q は飽和傾向となる。

<3・2> 考察

図3に関して、 N を直列に増加すると、各対の電極が独立に駆動力を供給し、電気力が累積されて P は比例的に増加する。また、 I も電極対数に比例して増加する。しかし、 P が増加しても Q はあまり増加しない。このことから、液体の移動はイオンに働くクーロン力が影響している可能性が示唆される。すなわち、 Q の決定はイオンの移動量と流路損失が主な律速要因となるため、 P が増加しても Q は比例的に増加せず飽和傾向を示すと思われる。

4. まとめ

試作 EHD ポンプの特性を計測し、これについて検討した。 V - P 特性は指数関数的および V - Q 特性は線形的な関係となる。また、 V 一定の下で電極対数 N を増加した場合、 P は線形的に増加するが、 Q は飽和傾向となる。これらの結果から、 Q はイオンに働くクーロン力に影響され、イオン移動量と流路損失の律速によって決定されることが示唆された。

文献

(1) S. Hayashi et.al.: ISH2025, PS3-6, ID: 67, pp.1-6 (2025)

糖水溶液におけるデバイ緩和モデルに基づく 緩和時間の糖濃度依存性

大友 響*, 渡部 裕太, 三浦 健司 (岩手大学大学院総合科学研究科)

Sugar Concentration Dependence of Relaxation Time Based on the Debye Relaxation Model in Aqueous Sugar Solutions
Hibiki Ootomo, Yuta Watabe, Kenji Miura (Graduate School of Arts and Sciences, Iwate University)

1. まえがき

スマート果樹栽培の実現には、果実のサイズや糖度などの生育状況の把握が重要である。本研究ではその基礎検討として、終端開放同軸プローブ法を用いてリングに含まれる4種の糖から調製した糖水溶液の複素比誘電率を異なる糖濃度で測定し、配向分極の電場からの遅れに起因するデバイ緩和関数を用いて緩和時間を求め、糖濃度が与える影響について検討した。

2. 実験方法

リングに含まれる4種の糖(フルクトース, ソルビトール, スクロース, グルコース)⁽¹⁾を用い、0~30 w/v%の糖濃度水溶液を作製した。糖水溶液の複素比誘電率は終端開放同軸プローブ法⁽²⁾を用いて測定された。標準媒体として蒸留水を用い、測定周波数は1~18 GHzとした。

液体の水はデバイ緩和モデルに従うことが知られており、低濃度の糖水溶液に対しても同様にデバイ緩和モデルが適用可能であるとする。以下のデバイ型緩和関数において、静的誘電率 ϵ_s 、高周波限界誘電率 ϵ_∞ 、緩和時間 τ (ps)をパラメータとして、複素比誘電率の周波数依存性の測定データにフィッティングさせて緩和時間を推定した。

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

3. 結果

図1に、フルクトース水溶液(10 w/v%)における誘電率実部の周波数依存性と、デバイ緩和モデルでフィッティングした結果を示す。破線で示した蒸留水($\epsilon_s: 78.3, \tau: 8.7$ ps)と比較して、 ϵ_s の低下と τ の増加が確認された。

フルクトース, グルコース, スクロースおよびソルビトールの糖濃度に対する緩和時間を図2に示す。緩和時間は糖濃度の増加に伴ってほぼ線形に単調増加した。これは水分子の配向運動が糖分子の存在により制限されるためと考えられる。それぞれの糖で緩和時間に差異が生じたのは、使用した糖の分子構造の違いが影響していると考えられる。本結果より、誘電特性に基づく糖濃度推定において、特定の周波数における誘電率絶対値を用いる推定手法に加えて、複

素誘電率の周波数特性から得られる緩和時間を用いた推定手法も有効であることが示唆された。

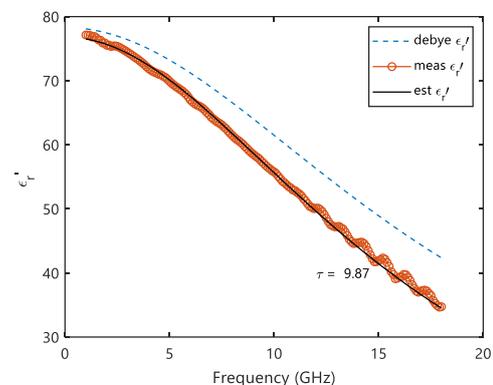


図1 フルクトース水溶液(10 w/v%)における誘電率実部の周波数依存性とデバイ緩和関数によるフィッティング結果

Fig.1. Frequency dependence of the real part of the dielectric constant in a fructose aqueous solution (10 w/v%) and fitting results using the Debye relaxation function

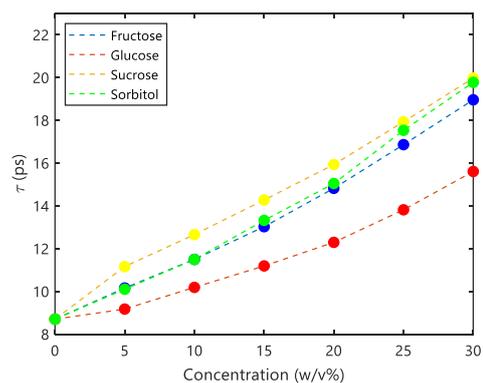


図2 フルクトース, グルコース, スクロースおよびソルビトールの糖濃度に対する緩和時間

Fig.2. Relaxation times for fructose, glucose, sucrose, and sorbitol as a function of sugar concentration

文献

- (1) 渡邊学, 小山田知広, 壽松木章, 村上政伸, 佐川了, 小森貞男, 荒川修, 園学研, 10 (4), pp. 565-571, 2011.
- (2) Y. Z. Wei, et al., Rev. Sci. Instrum., vol. 60, no. 9, pp. 3041-3046, 1989.

主鎖分子長の異なる PDMS 硬化体の 放電曝露による化学構造変化の FTIR 評価

山上 稔貴*, 青木 裕介 (三重大学)
菊田 晋介, 岡本 徹志 (株式会社 TMEIC)

FTIR Evaluation of Chemical Structural Changes in PDMS Cured Materials with Different Main-Chain Lengths under Electrical Discharge Exposure

Naruki Yamakami, Yusuke Aoki (Mie University), Shinsuke Kikuta, Tetsushi Okamoto (TMEIC)

1. はじめに

本研究では、放電環境下で使用されるポリジメチルシロキサン (PDMS) に着目し、主鎖分子長の違いに起因すると考えられる架橋構造の差異が放電耐性に及ぼす影響を検討する。架橋点間隔と放電劣化との関係は十分に明らかにされておらず、本研究では主鎖分子長の異なる 3 種類の変性 PDMS 硬化体を用い、放電曝露に伴う表面化学構造変化をフーリエ変換赤外分光法 (FTIR) により評価した。

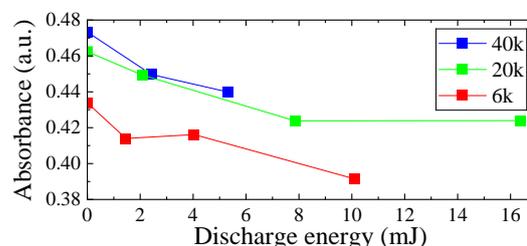
2. 試料及び試験方法

主鎖分子長が異なる 3 種類のエトキシ基末端の変性 PDMS を 250°C、2 時間の加熱処理を行うことで、厚さ約 150 μm の硬化体を作製した。試料は分子量に対応して 6k、20k、40k とした。放電曝露処理には、球状電極/ガラス板/空間/PDMS 膜/電極から構成させる積層型の電極構造⁽¹⁾を用い、周波数 240Hz、放電開始電圧の 2 倍に相当する一定の電圧を課電し、課電時間を変化させることで、異なる放電曝露条件の試料を作製した。放電エネルギーは $V \cdot Q$ リサージュ法により定量化し、FTIR 測定には、日本分光 (株) 製 FT/IR-4100 を用いた。

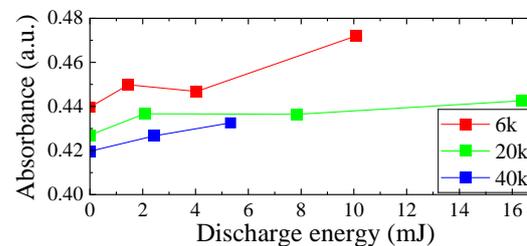
3. 試験結果

図 1 に 6k、20k、40k の各試料における FTIR スペクトルから得られた主要なピーク強度の放電エネルギー依存性を示す。図 1 (a) より、Si-CH₃ (1258cm⁻¹) 由来のピークはいずれの試料においても減少傾向を示し、側鎖メチル基の分解の進行が示唆された。一方、図 1 (b) に示す Si-O-Si (1078cm⁻¹) 由来のピークは増加傾向を示し、放電曝露による酸化架橋の進行が示唆された。これらの変化は、6k で特に顕著であった。図 1 (c) に示す Si-O-Si bending (687cm⁻¹) 由来のピークでは 40k ではわずかに減少したが、6k、20k ではほとんど変化が認められなかった。687cm⁻¹ ピークの減少理由として、酸化架橋あるいは主鎖の切断によるものと考えられるが、40k では図 1 (b) から示唆されたように酸化架橋が進行しておらず、主鎖 Si-O-Si 結合の部分的切断の発生が示唆される。以上より、20k では、放電曝露に対して化学的

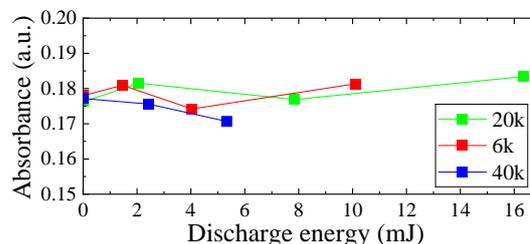
構造変化が最も小さく、本研究で用いた条件下において、放電に対して比較的安定な構造を有していると考えられる。



(a) Si-CH₃ (1258cm⁻¹)



(b) Si-O-Si (1078cm⁻¹)



(c) Si-O-Si bending (687cm⁻¹)

図 1: 主要な FTIR ピーク強度の放電エネルギー依存性
Fig.1. Changes in the discharge energy of major FTIR peaks

文 献

(1)山上・青木・菊田・岡本:「ポリジメチルシロキサン系複合材料の部分放電曝露時の化学構造変化」, 令和7年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 3-PI-33 (2025)

データ希薄条件における大規模化学言語モデルを用いたマススペクトル予測特性

武藤 聡希*, 熊田 亜紀子, 佐藤 正寛 (東京大学)

Prediction of Mass Spectra using Large Chemical Language Models and
Verification of Adaptability in Data-Scarce Domains
Satoki Muto, Akiko Kumada, Masahiro Sato (The University of Tokyo)

1 序論

質量分析において、PFAS等の環境汚染物質を含む未知化合物の同定技術が求められている。機械学習によるスペクトル予測は有力な手段だが、学習データの偏在により、既存手法ではデータ数が少ないフッ素化合物に対する予測精度が低いという課題がある[1]。先行研究[1]では学習データのダウンサンプリングが試みられたが、ECFP等の固定的な特徴量の表現力不足により、精度向上は困難であった。そこで本研究では、大規模データで学習された化学言語モデル(CLMs)を転移学習させる手法を提案する。豊富な化学的文脈を獲得したモデルを活用することで、データ希薄なフッ素化合物に対する予測精度の向上を試みる。

2 手法

2.1 データセットとモデル

学習および評価にはMoNAデータベースより抽出した低分子有機化合物のマススペクトルデータ(約9,600件)を用いた。提案手法では、化合物のSMILES表記を入力とし、大規模化学言語モデル(ChemBERTaおよびMolFormer)に対してLoRA(Low-Rank Adaptation)を適用し、スペクトル予測タスクへの適応(ファインチューニング)を行った。モデル入力には、CLMsから得られる分散表現に加え、従来の構造記述子(ECFPおよびRDKit 2D記述子)を結合した特徴量を用いた。これを多層パーセプトロン(MLP)に入力し、分子の大域的な文脈と局所構造の双方を考慮した予測を行う。

2.2 評価実験

モデル出力は m/z ごとの相対強度ベクトルとし、正解スペクトルとのコサイン類似度を損失関数として学習した。学習データに含まれる「フッ素含有分子」の数を意図的に制限した条件下で、従来手法(ECFP+MLPモデル)[2]との精度比較を行い、データ希薄領域における適応能力を評価した。

3 結果と考察

図1に、学習データ(7500分子)に含まれるフッ素含有分子の数と、テストデータ中のフッ素化合物に対する予測精度の関係を示す。

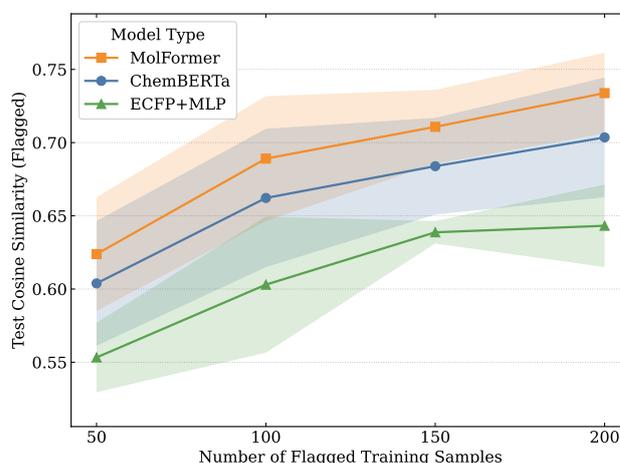


図1 学習データに含まれるフッ素化合物数と予測精度の関係

Fig 1. Relationship between the number of fluorinated compounds in the training data and prediction accuracy

提案手法は従来手法に比べて、フッ素データが少ない(100件程度)場合でも高い予測精度を維持した。これは、事前学習により獲得した基礎的な化学知識が、少数の学習データからの適応(Few-shot学習)を可能にしたことを示唆している。以上の結果より、提案手法はPFAS等のデータ収集が困難なタスクにおいて、少数のデータからドメイン適応が可能であるといえる。

参考文献

- [1] Ryohei Yamaguchi et al.: AGC Research Report 73 (2023)
- [2] Jennifer N. Wei et al.: ACS Cent. Sci., 5(4), 700-708 (2019)

模擬火山灰付着によるがいしの熱的耐性

満留 孝紀*, 栢 健一, 上窪 嵩人 (鹿児島工業高等専門学校)

Thermal resistance of insulators deposited to simulated volcanic ash

Koki Mitsudome, Kenichi Haji, Takato Kamikubo (N. I. T., Kagoshima College)

1. 序論

架空送電線では電気、機械性能を担うためにがいしがい用いられている。国内では絶縁部に、磁器製がいしが一般的に用いられているが、諸外国ではガラス製がいしが使用される場合もある。九州地方には有数の活火山が点在し、現在も噴火活動が継続している。そのため、がいしに火山灰が付着し、さらに湿潤が重畳した場合には、絶縁性能の低下や放電に伴う熱的特性への影響が懸念される。本研究では、模擬火山灰を用い、ガラス表面に付着させ、放電による表面温度変化及びガラス破損の有無を評価したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

桜島の成分比率⁽¹⁾を参考に模擬火山灰として、トノコ、カオリン、ベントナイトを質量比6:2.5:1.5で混合し、導電率0.01 mS/cmの蒸留水で懸濁液として使用した。絶縁材料として2種類の寸法のガラス板の幅26と52 mm(長さ26×厚さ1.3 mm)を使用した。電極にはアルミテープを用い先端角度60°とし(図2)、ガラス板上には、模擬火山灰0.05 gと蒸留水80 μLを混合した懸濁液を筆塗で塗布した。電極間距離は20 mm、電極と模擬火山灰との間隔は1 mm離れた。実験配置を図1に示す⁽²⁾。電圧比1:150のネオン変圧器を用い、放電が継続する条件の一次側80 Vで電極間電圧は12 kVとした。電圧印加サイクルは、10 s 課電 20 s 休止を1サイクルとし、最大30サイクルとした。連続、5サイクル×6、3サイクル×10の3条件で実験を行った。なお、5および3サイクルでは、10分間の休止時間を設けた。放電により水分が蒸発するため、電圧休止中の20 sの間に蒸留水20 μLを追加で滴下した。各条件について5回の試験を実施し、試料の幅とガラス板の破損程度の差異を調査した。

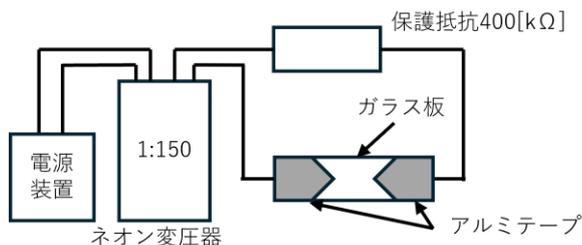


図1 実験配置

3. 結果と考察

表1に試験結果を示す。図2にガラスの縦寸法が26 mm、3サイクル×10の条件でガラスが破損したときの写真を示す。表1より30サイクル連続よりも3サイクル×10の方が破損しやすかった。これは、冷却期間を設けると、放電による加温と停止による冷却の繰り返しにより材料の熱的疲労が進行したこと、幅が小さい方が破損しやすく試料全体への熱分散が少なかったことが考えられる。観測結果によれば、放電時の一部表面温度は280℃以上、休止時には50℃以下であった。

表1 試験結果

幅, mm	試験条件と試験5回中の破壊個数		
	連続	5サイクル×6	3サイクル×10
26	破損せず	3 (11, 11, 16)	3 (4, 9, 13)
52	破損せず	破損せず	2 (7, 13)

注) () 内は、破損したときのサイクル数

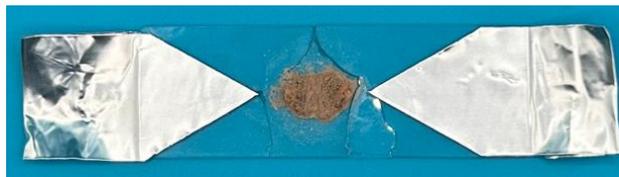


図2 破損条件(幅26 mm、電極間隔20 mm)

4. まとめ

本研究では絶縁材料としてガラス板を用いて評価を行った。今後、磁器、シリコーンゴム、RTV 塗布試料を含め、比較実験を行う予定である。

5. 謝辞

本実験は日本ガイシ(株) 殿から種々ご助言をいただき実施した。

文献

- (1) 松井智彰・七村玲奈: 鹿児島大学 地震火山地域防災センター 平成30年度報告書
- (2) 満留孝紀・栢健一・上窪嵩人: 2025年電気・情報関係学会九州支部連合大会, 電力機器の絶縁材料表面汚損時における電氣的特性評価に関する研究

耐トラッキング試験中の電流高調波解析による トラッキング現象検知の検討

浦山 則之^{1*}, 清水 博幸¹, 高松 晃大², 佐藤 友章², 水野 幸男³
(日本工業大学¹, 三井化学株式会社², 名古屋工業大学³)

Investigation of Tracking Phenomenon Detection Using Harmonic Analysis of Current During Tracking Resistance Tests
Noriyuki Urayama¹, Hiroyuki Shimizu¹, Kodai Takamatsu², Tomoaki Sato², Yukio Mizuno³
(Nippon Institute of Technology¹, Mitsui Chemicals Inc.², Nagoya Institute of Technology³)

1. まえがき

近年、有機絶縁材料の耐電圧性能の向上に伴い、電気自動車の駆動部などの高電圧部への適用が進んでいる。材料の電気劣化を評価する指標である耐トラッキング性能については、IEC 60112:2020・JIS C 2143:2021により「比較トラッキング指数(CTI)試験」が規格化されている⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、2025年にはUL 2597「表面トラッキング試験(STT)」が新たに規格化されるなど、高耐トラッキング材料を対象とした試験方法の高度化が進んでいる⁽³⁾。

本研究は、CTI試験などにおける材料劣化の早期検知技術の開発を目的に、試験時に取得した電流波形から高調波成分を抽出し、トラッキング破壊現象の兆候検出指標としての有用性を検討する。

2. 試験概要及び実験方法

<2・1>耐トラッキング試験の実施 本試験はIEC 60112に準じ、図1に示す回路を用いて行う。供試材料表面に0.1wt%の塩化アンモニウム水溶液を滴下して湿潤環境を与え、電極間に400~800V・50Hzの交流電圧を印加することで炭化導電路の形成・進展を再現し、その耐性を評価する。電解液は材料表面に30秒ごとに1滴ずつ滴下し、持続炎の発生、過電流継電器(遅延時間2秒)の作動、あるいは電解液の規定滴下数(50滴)への到達まで継続して行う⁽⁴⁾。

なお、使用電圧が規格上限である630Vを超えるため、電極間のアーク放電を防止する目的で、電極方向をIECで規定されている向きとはUL 2597を参考にして逆に設け、図2の向きとした⁽³⁾。供試材料については、三井化学株式会社より提供されたPA6T(ポリアミド6T)を使用する。

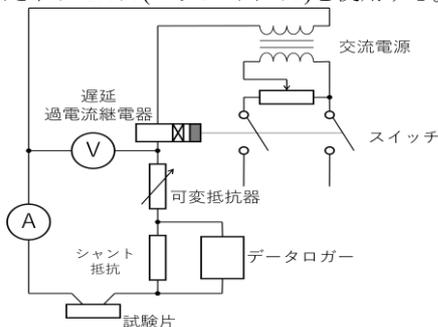


図1 耐トラッキング試験回路
Fig.1. Tracking durability test circuit

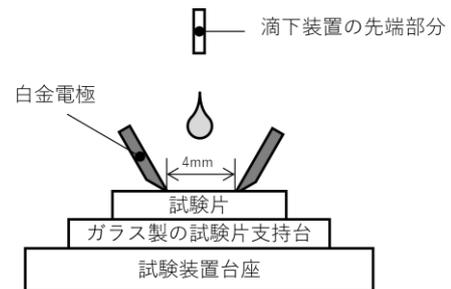


図2 電極および試験片の配置
Fig.2. Electrodes and test piece placement

<2・2>高調波抽出の方法 前項の試験中、データロガーを用いて電流波形を記録し、データをMATLABにより商用周波成分(50Hz)を弁別したうえで、短時間フーリエ変換(STFT)を用いて時間区間ごとの周波数スペクトルを出力し、高調波の動向を観察する⁽⁴⁾。

本研究では、トラッキング発生時と未発生時における偶数次高調波と奇数次高調波の動向を比較するため、パワースペクトル密度の高い第2次高調波・第3次高調波を抽出して、半波対称性の崩れに起因する偶数次高調波の挙動に着目して比較を行う。

3. 結果と検討

<3・1>試験結果 本研究では、試験電圧を400, 500, 630, 700, 725, 750, 800Vの各条件とし、各試料について3回ずつ耐トラッキング試験を実施した。なお、本研究では試行回数が限定的であるため、統計的有意差の検証ではなく、現象的傾向の把握を目的としている。

実験の結果、725V以下の条件ではトラッキングは発生せず、750Vでは3回中1回、800Vでは3回すべてでトラッキング破壊が発生した。

さらに、STFTにより得られた高調波成分のうち、第2次および第3次高調波に着目して分析を行った。その結果、トラッキング未発生時には両高調波成分とも時間的変動が小さく、安定した挙動を示した。一方、トラッキング発生時には、第2次高調波が大きく変動し、試験終盤に増大するなど、不安定な挙動を示す傾向が確認された。図3に750Vにおけるトラッキング発生時の第2・第3次高調波の時間変化を、図4にトラッキング未発生時の時間変化を示す。

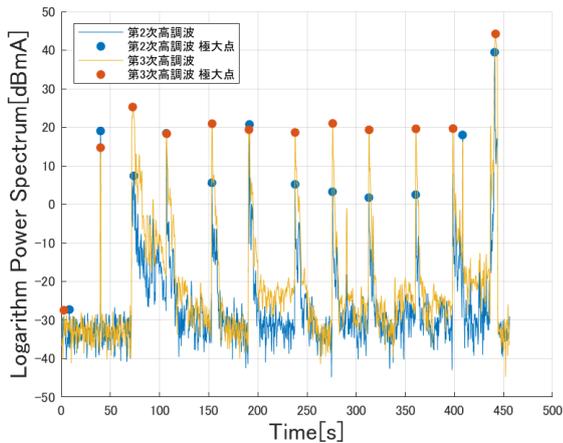


図3 トラッキング発生時(750V)の第2・3次高調波の傾向
Fig.3. Trends of the second and third harmonics when tracking occurs (750V)

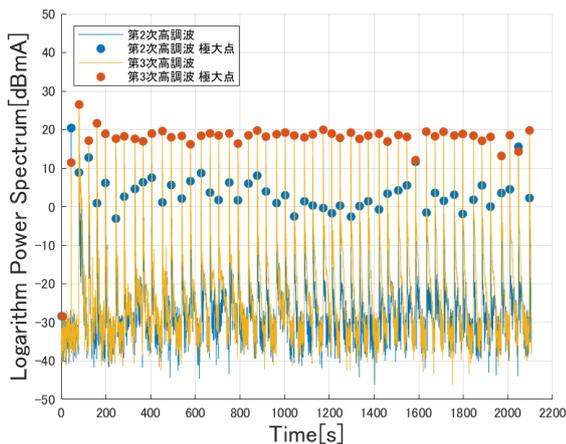


図4 トラッキング未発生時(750V)の第2・3次高調波の傾向
Fig.4. Trends of the second and third harmonics when tracking does not occurring (750V)

<3・2> 高調波変動の要因 高調波発生に関連する要因として、導電経路形成に起因する非線形性および半波対称性の崩れが挙げられる。

トラッキング発生時には、炭化導電路の形成や電解液の蒸発・濃縮、局部アーク放電の発生・消滅により、材料表面の電気インピーダンスが非線形かつ時間依存的に大きく変動する。これに伴い、電流の主な導通経路が炭化導電路側と電解液側の間で動的に切り替わり、電流の遮断と導通が繰り返される。その結果、電流波形にはクリッピングや急峻な立ち上がり、極性非対称といった波形ひずみが生じ、電流波形の非線形化が進行すると考えられる。

さらに、交流アーク放電においては、正半波が針状の波形を示すのに対し、負半波は比較的平滑なひずみ波形となることが知られている⁽⁵⁾。このように正負半波の波形が異なる

ことで半波対称性が崩れ、偶数次高調波が顕著に発生する。そのため、トラッキング発生時には、局部アーク放電に起因する半波対称性の乱れにより、偶数次高調波成分が増大すると考えられる。

一方、トラッキング未発生時には、炭化導電路の形成が進展せず、電流は主に電解液中を介して流れる。この場合、系の電氣的挙動は概ね線形抵抗的となるため、電流波形の非線形性および極性非対称性は小さく、偶数次・奇数次高調波成分の時間的変動も小さいまま安定して推移する。

以上の結果から、STFTにより高調波成分の時間変動を観測することで、トラッキング現象の発生有無や進展状態を判別できる可能性が示唆される。

4. 結論

STFTにより得られる高調波成分の時間変動は、材料表面に形成される導電経路の非線形性およびその時間的変動を反映した指標と解釈できる。この特徴量を用いることで、耐トラッキング試験中におけるトラッキング破壊の発生有無や進展状況を判別できる可能性が示された。

また、本研究で使用したデータロガーでは観測可能な周波数帯域が最大 1kHz に制限されていたため、高次高調波成分の挙動を十分に評価することができなかった。今後は、電流に重畳されるより高周波成分の観測を可能とする計器を用いて、トラッキング破壊の予測に適した周波数領域の選定について検討する予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、日本工業大学 清水研究室の嶋崎元哉氏ならびに大澤優人氏には、耐トラッキング試験や MATLAB 解析などにおいて多大な手助けを頂きました。深謝申し上げます。

文献

- (1) IEC 60112:2020 Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials
- (2) JIS C 2143:2021 固体材料の保証及び比較トラッキング指数の測定方法
- (3) UL 2597:2025 Surface Tracking Test (STT) Method
- (4) 田中・川村:「音声音響信号処理の基礎と実践 -フィルタ、ノイズ除去、音響エフェクトの原理-」, コロナ社(2021)
- (5) 天野・他:「電気工学ハンドブック[第2版]」, 電気学会(1989)

漏れ電流の解析による高耐熱ポリアミド PA6T のトラッキング挙動の評価

高松晃大¹、佐藤友章¹、浦山則之²、嶋崎元哉²、清水博幸²、水野幸男³

Evaluation of Tracking Phenomenon of Highly Heat-Resistance Polyamide 6T by Analysis of Leakage Current
Kodai Takamatsu¹, Tomoaki Sato¹, Noriyuki Urayama², Motoya Shimazaki², Hiroyuki Shimizu², Yukio Mizuno³
(Mitsui Chemicals, Inc.¹, Nippon Institute of Technology², Nagoya Institute of Technology³)

1. まえがき

電気自動車(EV)の急速充電や駆動出力向上のために、電源電圧の高電圧化が進められている。絶縁部材として用いられている高分子材料は、放電の影響により炭化が進行する。特に部品の小型化のために端子間距離を低減した場合、高分子材料表面に形成する炭化導電路が短絡するトラッキング破壊が発生する懸念がある。

図1で示した高耐熱ポリアミド PA6T は耐トラッキング性に優れていることが知られている。2025年に規定された UL2597 に準拠した試験では 600V を超える電圧においてもトラッキング破壊しないことを確認しており、端子間距離を削減した部品の小型化に貢献することが期待される。しかし部品の小型化に関する IEC 60664 では、絶縁を維持するための沿面距離の下限値が規定されている。絶縁材料の沿面距離を決定するための一要素として比較トラッキング指数(CTI)が用いられている。しかし CTI の最大値は 600V であるため、CTI>600V の樹脂材料においても、沿面距離は現行の規格値未満に設定できないことが課題となっている。

既存の沿面距離を削減可能と示すためには、削減した沿

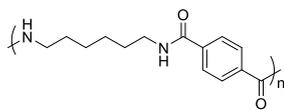


図1 PA6T の分子構造
Figure 1. Molecular structure of PA6T.

面距離において”トラッキング破壊に特徴的な挙動”が確認されないことを示すことが必要条件であると推定される。しかしながら”トラッキング破壊に特徴的な挙動”に関して解析した研究は非常に少ない。最近著者らは、PA6T がトラッキング破壊に至るまでに生じる特徴的な挙動に関しての解析を行っている²⁾。本研究ではトラッキング破壊に特徴的な挙動を、トラッキング試験中に試料表面に流れる漏れ電流の解析から検討し、沿面距離削減の指標に使用できないか検討することを目的とした。

2. 実験方法

PA6T とガラス繊維(GF)を二軸押出機 TEX30 にて熔融温度 340°C、吐出量 50 kg/h、回転数 400 rpm にて熔融混練してペレット化した。得られたペレットを 110°C、12 h 真空乾燥したのち、射出成形機(住友重機械工業製 SE75EV)により 60 mm×60 mm×3 mm 厚さの角板に成形した。成形条件はシリンダー温度 335°C、金型温度 160°C とし、結晶化が十分進行するように冷却時間を確保した。

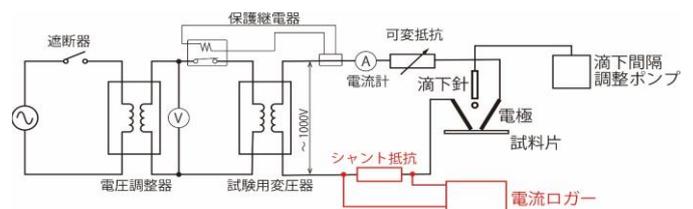


図2 CTI 測定装置の概要
Figure 2. Schematic image of apparatus for CTI measurement.

図2に自製のトラッキング測定装置の模式図を示す2枚の Pt 電極を設置し、基準条件として 4mm に設定した。さらに、沿面距離削減および拡張条件として 2mm、5mm の条件でも測定を行った。なお、本研究では電極間でのアーク放電が発生する可能性がある 600V 以上での検討も行うため、UL2597 を参考に電極のテーパ部分を外側に設置してアーク放電を抑制することを行った。所定の電圧を印加後、汚損液(0.1wt% 塩化アンモニウム水溶液)を 30 s ごとに 1 滴滴下した。電極から滴下した汚損液や樹脂に流れる電流(漏れ電流)を GRAPHTEC 製電流ロガー GL980 によって 10 μs の間隔でサンプリングした。なお、本研究では 20 滴以内に電極間に 0.5 A が 2 s 以上持続して流れた場合に、当該電圧でトラッキング破壊すると判定した。

3. 結果と考察

電極間距離を 5 mm または 2 mm に設定し、630V を印加して汚損液を 5 滴滴下した際に試料表面に流れた漏れ電流の波形を図3に示す。なお、電極間距離が 5 mm の条件では 50 滴滴下時においてもトラッキング破壊は発生せず、2 mm の条件では 8 滴目でトラッキング破壊が発生した。図

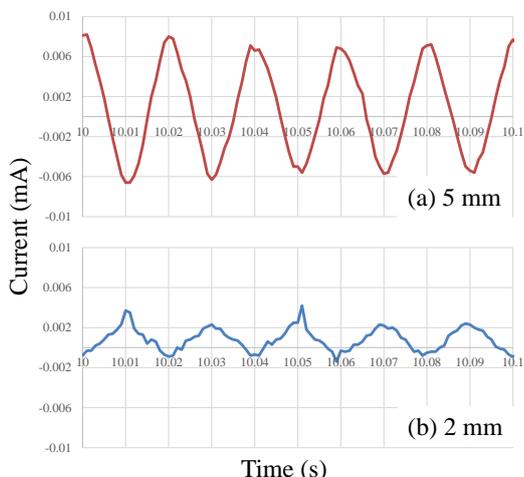


図3 PA6T-GFの電流挙動(a) 630 V 5mm, (b) 630V 2mm.

Figure 3. The time variation of current of PA6T-GF at (a) 630 V 5mm, (b) 630V 2mm.

3(a)の電極間 5mm の条件では、電源電圧と類似の正弦波の波形が得られた。これは電極間に残存する汚損液や試料表面に形成している炭化部分に電流が流れていることを示唆する。また、放電由来と考えられる微小なパルスが正弦波に重畳しているが、その電流値は電流振幅に比べて小さかった。そのため、放電の規模は非常に小さいことが推定される。一方、図 3(b)の電極間距離が 2mm の条件では、5mm の条件に比べて正弦波は不明瞭になり、電流が小さいものの多数のパルスが重畳していることが確認された。これは放電が連続的ではなく間欠的でパルス状に発生しているため、実効的な平均値が小さくなった可能性を示唆する。この結果から電極間距離が 2mm の条件では試料表面に電流が流れる際に放電が多数発生していることが示唆された。これらの結果から、漏れ電流に重畳する放電由来のパルスがトラッキング破壊の特徴量になると推定した。そこでフーリエ変換を行いパワースペクトルを得ることで、漏れ電流に重畳している放電由来の成分の定量評価を試みた。

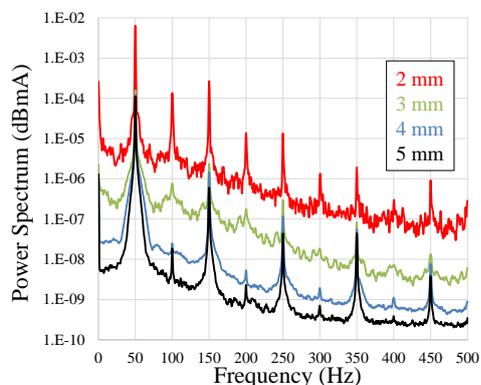


図4 各電極間距離のパワースペクトル

Figure 4. The power spectrum of various electrodes distance at 630V.

図4に各電極間距離における印加電圧630Vでの電流波形をフーリエ変換した際に得られたパワースペクトルを示す。各電極間距離ともに電源電圧の50Hzに比べて高い周波数成分が確認された。また、偶数次高調波成分(100Hz, 200Hz, 300Hz, …)は電極間距離が5mmおよび4mmでは 10^{-8} dBm/A程度と小さく不明瞭であったが、トラッキング破壊が発生する2mmではピークが明瞭となり 10^{-4} dBm/A程度と大きくなった。偶数次高調波成分の出現は、正弦波にパルス等が重畳して半波対称性が乱れた波形に由来すると推定され、図3(b)で示したような放電由来のパルスに起因すると考えられる。

ここで、各条件で得られたパワースペクトルの偶数次高調波成分は、印加電圧や電極間距離の違いにより電流振幅そのものが変化するため、絶対値での比較が困難である。そこで本研究では、各条件間で放電由来成分の相対的な増減を評価するために正規化を行った。具体的には、トラッキング破壊せず再現性の高い基準条件である印加電圧400V、電極間距離4mmにおける漏れ電流のパワースペクトルの50Hz成分を基準値とし、各条件で得られた偶数次高調波成分をこれで規格化した量をパワー比と定義した⁽²⁾。

$$\text{パワー比} = \frac{\text{各電極間距離} \cdot \text{周波数のパワースペクトル}}{400 \text{ V, } 4\text{mm} \text{ のパワースペクトルの } 50 \text{ Hz 成分}} \quad (1)$$

図5に各電極間距離におけるパワー比を示す。50 Hzではすべての電極間距離においてパワー比の増大は確認されなかった。この結果から、電源電圧と同周波数のパワースペクトルはトラッキング破壊有無にかかわらず類似の値をとることが示唆された。一方で100Hz、200Hzの偶数次高調波成分ではトラッキング破壊が発生した2mmにおいてパワー比が激増した。これらの結果から、電極間距離を削減した際のトラッキング破壊の有無を推定するために、パワー比の増加を指標とできる可能性が示唆された。

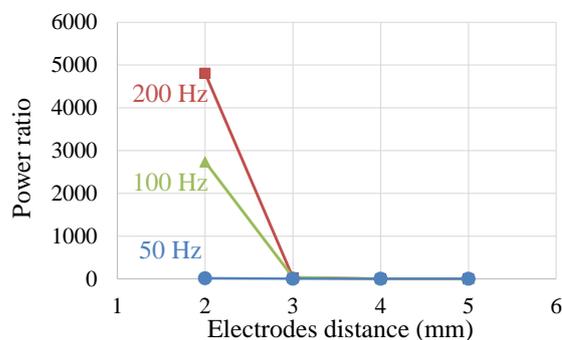


図5 各電極間距離のパワー比

Figure 5. The power ratio of various electrodes distance.

- (1) 林、水野、電気学会論文誌D, 142, 553-540 (2022)
- (2) 高松、佐藤、水野、清水、成形加工学会第36回年次大会, E-106 (2025)

シリカ充填脂環式エポキシ樹脂複合材料の交流絶縁破壊特性に及ぼす絶縁封止液体の影響

福田 千夏*, キム ハナ, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学),
上島 稔 (株式会社ダイセル)

Influence of Insulating Encapsulation Liquids on AC Dielectric Breakdown Characteristics of Silica filled Alicyclic Epoxy Resin Composites

Chinatsu Fukuda*, Hana Kim, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology),
Minoru Ueshima (Daicel Corporation)

1. まえがき

筆者らは、脂環式エポキシ樹脂のパワーモジュール封止材としての適用可能性を目指し、絶縁破壊特性および誘電特性を評価してきた^(1,2)。その結果、脂環式エポキシ樹脂は、その高いガラス転移温度の影響で、175°C付近の高温領域においても絶縁破壊強度が安定していることが明らかとなった。一方で、高温条件下の交流絶縁破壊試験では、試験に用いる絶縁油の物性が測定結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで本報では、シリカフィラー充填脂環式エポキシ樹脂複合材料の高温条件下における交流絶縁破壊試験に適した絶縁封止液体の選定を目的に、高耐熱タイプのシリコン油およびガルデン中での絶縁破壊特性を比較・評価した結果について報告する。

2. 実験方法

試料として、脂環式エポキシ樹脂ニート（以後、A0と称す）および同樹脂にシリカフィラーを30 vol%添加した複合材（AS30）を用意した。比較として、ビスフェノールA型エポキシ樹脂ニート（B0）を用意した。A0, AS30にはダイセル製セロキサイド2021P, B0には新日鐵化学製エポトートYD-128を使用した。各エポキシ主剤に対して、酸無水物硬化剤である新日本理化学製MH-700をエポキシ当量論的に混合して硬化物を作製した。シリカフィラーとして、平均粒径0.4 μmの真球状アモルファスシリカ（堺化学工業, Sciqas 0.4 μm ノンコート）を使用した。A0およびB0は、主剤と硬化剤を自転公転ミキサー（THINKY製, ARV-300）で混合後、予熱した金型に注型し、100°Cで2時間、続いて150°Cで2時間の条件で加熱硬化し、厚さ0.1mmのシート状試料を作製した。AS30では、硬化剤とフィラーとΦ2mmおよびΦ0.5mmのジルコニアビーズを配合して混合し、ジルコニアビーズをフィルタで分離した後に主剤を追加してさらに混合した。

絶縁破壊評価にはステンレス製の直径12.7 mmの球一平板電極系を使用した。30×30×0.1 mmの試料を電極間に挟み、ステンレス容器内にシリコン油（信越化学工業製, KF-968-100CS）またはガルデン（ソルベイススペシャルティポリマーズジャパン製, GALDEN® HT270）を満たして浸漬

した。測定は室温条件で行い、昇圧速度0.5 kV_{rms}/sの交流電圧（60 Hz）を印加し、試料が貫通破壊した電圧を記録した。各試料につき10点測定を行い、絶縁破壊強度は、絶縁破壊電圧を各試料の厚みで除して算出した。また、ワイブルプロットより累積破壊確率63.2%に相当する絶縁破壊強度値 η を求めた。

3. 結果および考察

表1に、カタログから抽出したガルデンとシリコン油の比誘電率と沸点を示す。併せて、同液体中での樹脂試料の絶縁破壊強度 η を示す。同一試料であっても、シリコン油中と比較してガルデン中では破壊電圧が低下する傾向が確認された。この要因の1つは、各絶縁液体固有の絶縁破壊強度の差異によると考えられる。また、絶縁油の比誘電率差に起因する電界分布の違いによることも考えられる。すなわち、比誘電率 ϵ_r が1.94と低いガルデン中では、 ϵ_r が2.7のシリコン油中に比較して、球電極と試料表面で形成される液体中の楔ギャップの局所電界がより増強され、その結果、低い絶縁破壊電圧になると解釈される。

封止液体の影響によって固体試料の見かけの絶縁破壊強度が低下することは、固体材料本来の特性評価を行う上で望ましくない。以上より、本研究条件下ではシリコン油の方が高温交流絶縁破壊試験における絶縁封止液体としてより適していると判断される。

Table 1. Relative permittivity and boiling point of each liquid sample, and the dielectric breakdown strength of solid samples

Sample	Relative Permittivity @AC60Hz	Boiling Point [°C]	Breakdown strength, η [kV/mm]		
			B0	A0	A30
Garden	1.94	270	83.5	86.2	83.4
Silicone oil	2.7	>250°C	140.4	105.3	96.1

文 献

- 篠崎圭祐, キムハナ, 匹田政幸, 小迫雅裕, 上島稔: 電気電子絶縁材料システムシンポジウム, No.MVP-11, pp.126-129, 2024
- 福田千夏, キムハナ, 匹田政幸, 小迫雅裕, 上島稔, : 令和7年電気学会基礎・材料・共通部門大会, No.3-P1-30,

各種フッ素系液体における絶縁破壊強度の 電極間距離依存性

清水 新大*, 末永 翔大, 泊岩 龍斗, 匹田 政幸, 小迫 雅裕 (九州工業大学)

Gap-Length Dependence of Breakdown Strength in Various Fluorinated Liquids

Arata Shimizu*, Shota Suenaga, Ryuto Tomaiwa, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology)

1. まえがき

次世代パワーモジュールの高圧化に伴い、封止材の絶縁信頼性確保が重要課題となっている。しかし、従来のシリコーンゲル等は放熱性や自己修復性に課題がある。そこで本研究では、高絶縁耐力・不燃性を有するフッ素系液体に着目し、新たな封止材としての適用可能性を検討した⁽¹⁾⁽²⁾。本論文では、4種類の試料について絶縁破壊強度の電極間距離依存性を評価した。

2. 実験方法

3M社製 Fluorinert FC-3283 (以下、F と称す)、ダイキン工業製 HFE-356mec (以下、M と称す)、ダイキン工業製 CELEFIN 1233Z (以下、C と称す) およびダイキン工業製 HFMOP (以下、H と称す) の4種類を評価した。なお、使用前には、相対湿度 (relative humidity : RH) および粒子含有率 (不純物濃度) が十分に低いことを確認した。

直径 12.5 mm の球-球電極を備えた容量 200 mL のオイルカップを用いた。電極間距離 d は厚みゲージを用いて、30, 50, 100, 150 および 200 μm に設定した。印加電圧 V_a は AC 100 V/s (電源周波数 60 Hz) の一定昇圧速度で、絶縁破壊が生じるまで連続的に電圧を印加した。絶縁破壊が生じた瞬時の電圧を BDV (breakdown voltage) と定義し、各測定後には、オイルカップ内を攪拌し、約 1 分間静置した。各電極間隙において BDV は 10 回ずつ測定した。得られた BDV はワイブル統計モデルに基づいて解析し、値のばらつきを示す形状パラメータ m と、累積絶縁破壊確率 63.2 % に対応する尺度パラメータ η [kV] を評価指標として採用した。

3. 結果および考察

表 1 および図 1 に、各液体試料における BDV のワイブルパラメータおよび絶縁破壊強度 E の電極間隙依存性をそれぞれ示す。なお、試料 C および H において d が 30 μm のとき、本実験系では BDV を正確に測定できなかった。

図 1 に示す $E-d$ 特性より、いずれの液体においても d の増加に伴い E は低下し、経験式 $E = Ad^n$ により近似できることが確認された。これは、 d の増大により有効体積が増加し、絶縁破壊の起点となる弱点が存在する確率が高まるためと考えられる。液体間で比較すると、F は全ての d にお

いて $E(\eta)$ が最も高く、ばらつきが大きい。一方、M, C, および H は、F に次ぎ絶縁性を示したが、 $E-d$ 曲線の傾きは緩やかであり、 d 依存性が比較的小さく、ばらつきが小さい。これらの差異は、液体の分子構造や密度、電子付着性、および不純物耐性などの物性に起因すると考えられ、今後、検討する予定である。以上より、フッ素系液体であっても、その種類によって絶縁設計上の適性が大きく異なることが明らかとなった。

4. まとめ

試料 F が最も高い絶縁破壊強度を示し、微小ギャップ領域において優れた絶縁特性を有することを明らかにした。一方で、液体の種類によって $E-d$ 特性やばらつきに顕著な差が存在することが確認された。今後は、各試料を適用したパワーモジュール内部を模擬した電界解析を行い、部分放電開始電圧 (PDIV) の推定を行う予定である。

Table 1. Weibull parameters for BDV in each sample

Gap [mm]	F		M		C		H	
	η	m	η	m	η	m	η	m
0.03	89.6	5.21	41.5	18.7	-	-	-	-
0.05	73.5	6.13	36.5	11.1	28.3	9.59	25.5	5.25
0.10	56.6	5.66	32.5	8.45	25.5	15.2	22.2	10.9
0.15	49.0	5.13	29.5	5.40	20.7	12.7	17.1	24.1
0.20	38.9	6.59	29.7	5.48	19.8	13.0	16.5	21.4

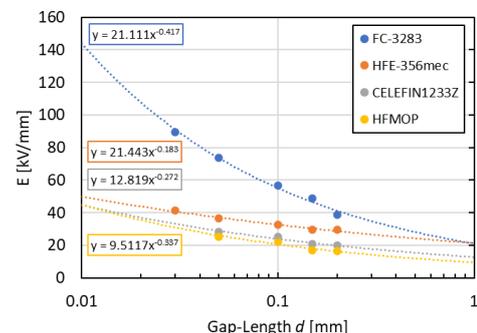


Fig. 1. Electrode-gap dependence of breakdown strength E ($E-d$ characteristics)

文 献

(1) 泊岩 ら, 令 7 電気学会全大, 312-A1, 講演番号 2-041

(2) 泊岩 ら, 誘電・絶縁材料研究会, No. DEI-25-120, 2025

廃食油の変圧器利用に関する基礎研究

中川 耕平*, 村上 祐一, 村本 裕二 (名城大学)
笠井 勇飛, 櫛木 一寿 (明電舎)

Fundamental Research on Use of Waste Cooking Oil in Transformers
Kohei Nakagawa, Yuichi Murakami, Yuji Muramoto (Meijo University)
Yuhi Kasai, Kazuhisa Kushiki (Meidensha Corporation)

1. まえがき

植物系電気絶縁油は、再生可能資源由来で生分解性が高く、環境負荷低減や脱炭素社会の実現に資する材料として注目されている。しかし、植物系電気絶縁油は従来広く使用されてきた鉱油と比較して販売価格が高く、その導入は十分に進んでいない。そこで本研究室では、食用廃油に着目し、安価かつ環境負荷の低い電気絶縁油の作製に関する研究に取り組んできた⁽¹⁾。本発表では、実際に社員食堂から回収した食用廃油を用いた変圧器への適用可能性について検討した結果を報告する。

2. 実験試料および実験方法

株式会社明電舎の社員食堂にて排出された食用廃油を実験試料として用いた。廃油試料に対しては、不純物を除去した後、真空加熱脱気処理を施し、各種特性の測定を行った。さらに、不純物除去および真空加熱脱気後の廃油試料に対して、エステル交換反応を実施することで、エステル廃油を作製した。このエステル廃油に対して、真空加熱脱気処理を行った後、特性の測定を実施した。それぞれの試料油の特性評価として、交流絶縁破壊電圧、粘度、密度および引火点の測定を行った。粘度は粘度計 (SEKONIC : VM-10A) を用いて測定し、密度は密度計 (京都電子工業 : DA-130N) を用いて測定した。また、引火点は引火点測定器 (アントンパール : CLA5) により測定した。さらに、測定した粘度を密度で除することにより動粘度を算出し、測定した交流絶縁破壊電圧を電極間距離 (0.25 mm) で除することにより交流絶縁破壊の強さを算出して評価した。

3. 実験結果および考察

表 1 に廃油およびエステル廃油の各種特性を示す。廃油については JIS C 2390-2:2019, エステル廃油については JIS C 2390-3:2019 の規格値とそれぞれ比較した。その結果、交流絶縁破壊の強さは、廃油およびエステル廃油のいずれにおいても JIS 規格値を満足した。また、動粘度についても、両試料ともに JIS 規格値を満足した。一方、引火点については、廃油は JIS 規格値を満足しなかったが、エステル廃油では JIS 規格値を満足した。廃油に対してエステル交換反応を施すことにより、動粘度および引火点は低下した。こ

れは、エステル交換反応により植物油の主成分であるトリグリセリドが低分子化したためであると考えられる。また、動粘度の低下により油中の流動性が向上し、電極間における局所的な熱の滞留や不純物の残留が抑制された結果、交流絶縁破壊の強さが向上したものと推察される。図 1 に廃油およびエステル廃油の外観を示す。廃油は暗褐色を呈していたのに対し、エステル交換反応後のエステル廃油は褐色を呈していた。

以上より、廃油に対してエステル交換反応を施すことにより、絶縁特性、動粘度および引火点において JIS 規格を満足する可能性が示された。現在、エステル廃油の長期劣化特性について測定を進めており、発表当日にはその結果についても報告する予定である。

表 1 廃油およびエステル廃油の各種特性

Table 1 Properties of waste oil and esterified waste oil

	waste oil	JIS 2390-2:2019	esterified waste oil	JIS 2390-3:2019
AC breakdown strength [kV/mm]	18.8	≥ 18	42.8	≥ 18
Kinematic viscosity [mm ² /s]	48.7	≤ 50	5.3	≤ 13
Flash point [°C]	296	≥ 300	196	≥ 150

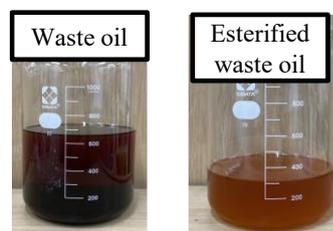


図 1 廃油およびエステル廃油の外観

Fig. 1 Photographs of waste oil and esterified waste oil.

文献

(1) Y. Murakami et al. : TEEE A, 18. 1569~1575 (2023)

セルロースナノファイバー (CNF) 成形板の 吸湿性が絶縁耐力に及ぼす影響

木村 啓韻*, 小島 寛樹, 早川 直樹 (名古屋大学),
古田 尚, 奥村 浩史 (利昌工業), 宮路 仁崇 (三菱電機),
岩永 拓実, 岡本 徹志 (TMEIC)

Effect of Hygroscopicity of Cellulose Nano-Fiber (CNF) Board on Breakdown Strength

Kein Kimura, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa (Nagoya University),

Nao Furuta, Hiroshi Okumura (RISHO KOGYO CO., LTD.), Yoshitaka Miyaji (Mitsubishi Electric Corporation),

Takumi Iwanaga, Tetsushi Okamoto (TMEIC Corporation)

1. まえがき

2050年カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが加速する中で、植物由来の低環境負荷材料の一種であるセルロースナノファイバー(CNF)が注目されている。筆者らはCNFのみから構成された成形板(CNF成形板)の回転機用絶縁材料への適用を目指している。先行研究において、CNF成形板のAC絶縁破壊電界(AC-BDE)において、相対湿度97%RHのBDEは11%RHの約1/10に低下することを明らかにした⁽¹⁾。本稿では、CNF成形板の吸湿性が絶縁耐力に及ぼす影響とその要因について検討した。

2. 実験方法

試料は50mm角、厚さ0.4mmのCNF成形板を用いた。課電試験前に飽和塩法⁽²⁾により吸湿させた試料を直径12.5mmの球-球電極間に挟み、DC正極性電圧を印加し、大気環境下で絶縁破壊電圧(BDV)を測定した。図1にCNF成形板の導電率 σ と比誘電率 ϵ_r の相対湿度依存性を示す。同図より各湿度における時定数($=\epsilon_0\epsilon_r/\sigma$)は8~300msであることから、直流場での課電試験として、昇圧速度を0.2kV/sとした。

3. 結果と考察

図2にAC-BDEおよびDC-BDEの相対湿度依存性を示す。同図より、相対湿度の増加とともに、AC-BDEもDC-BDEも同様に急激に低下していることがわかる。CNF成形板の絶縁耐力が高湿度領域において低下する要因として、電気的要因および熱的要因が考えられる。電気的要因の観点からは、CNF成形板の吸湿に伴う膨潤と比誘電率の上昇により、CNF成形板内部の空隙電界が7倍に上昇し得ることが示唆される⁽¹⁾が、図2のBDEの低下率(約1/10)の説明に十分とは言えない。一方、熱的要因においては、ジュール熱の観点からBDに至る発熱量 W とBDVと導電率 σ の間に式(1)の関係があると考えられる。

$$W = V_{BD}^2/R \propto \sigma V_{BD}^2 \rightarrow V_{BD} \propto 1/\sqrt{\sigma} \quad (1)$$

(V_{BD} : BDV, R : 体積抵抗)

図1において、11%RHから97%RHへの導電率の増加率の平

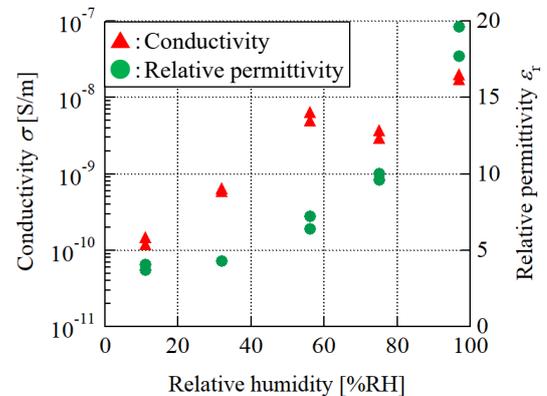


図1 CNF成形板の導電率と比誘電率の相対湿度依存性
Fig.1. Humidity dependence of conductivity and relative permittivity of CNF board

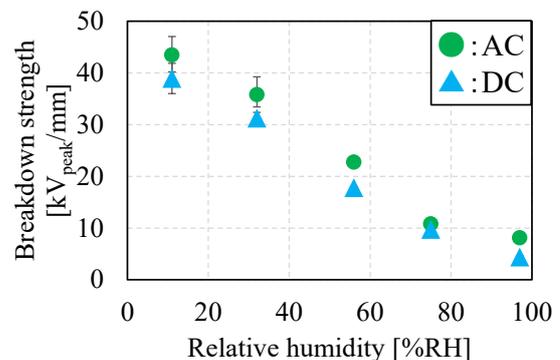


図2 CNF成形板のBDEの相対湿度依存性
Fig.2. Humidity dependence of BDE of CNF board

方根の逆数($1/\sqrt{140} \approx 1/12$)は、図2のAC-BDEの低下率とほぼ合致しており、またDC-BDEと同傾向を示すことは熱的要因の妥当性を意味している。以上より、高湿度領域においてCNF成形板の絶縁耐力が急激に低下する要因としては、熱的要因が支配的であると考えられる。

文献

- (1) K.Kimura et al.: ISH, A5-3, 2025.
(2) 日本産業規格: JIS C 2142: 2016.

絶縁油の導電率上昇を生じさせる熱劣化試験の検討

布施 則一*, 中村 信, 宮寄 悟 (電力中央研究所)

Study on Accelerated Ageing for Insulating Oils in Terms of Conductivity

N. Fuse, S. Nakamura and S. Miyazaki (Central Research Institute of Electric Power Industry)

1. まえがき

HVDC 送電システムの増強計画が進む一方で⁽¹⁾, CIGRE の調査では交直変換機用変圧器の二次側(直流側)巻線の絶縁不良事故が課題となっている⁽²⁾。直流電界下での電界分布は導電率に依存するため, 絶縁材料に任意の導電率変化を付与できる熱劣化試験手法が必要になる。

2. 実験条件

鉱油 (JIS C 2320 の 1 種 4 号), 約 1.4L を 140°C で 2 週間加熱した。後述するように, 窒素雰囲気下では, 実変圧器で生じる全酸価の上昇と, それに伴う導電率の上昇を再現できなかった。そこで, 文献⁽³⁾を参考に, 加熱中に酸化促進のため流量 1.5L/h の乾燥空気(水分含有量: 0.54ppm)を油中に通気または油表面に吹き付けた。劣化前後の鉱油に対し, CIGRE TB 646⁽⁴⁾に準拠し室温で導電率を測定した。また, 全酸価を水酸化カリウムによる滴定法で, 水分含有量をカール・フィッシャー滴定法で測定した。

3. 実験結果と考察

鉱油の加熱時に乾燥空気を吹き付けた場合の導電率, 水分量, および全酸価の変化を図 1 に示す。同図(a)に示すように, 導電率は加熱時間に伴って上昇した。ここで, 同図(b)によれば, 加速劣化後の鉱油における水分含有量は, 例えば劣化 2.9 日で 30ppm 弱と高い。そこで, この水分上昇が導電率に与える影響を除去するため, 真空乾燥処理により水分量を数 ppm に低下させ, その効果を同図に示した。その結果, 脱気処理後も導電率の増加傾向は維持されることが確認された。また, 煩雑さを避けるため図示しないが, 空気通気 (=バブリング) 条件では, 吹付け条件よりも導電率と酸価の上昇が大きく, スラッジも多く発生した。

図示しないが, 上記とは別に, 窒素密閉環境化で鉱油とプレスボードを同時に 50 日間熱劣化させた。その結果, プレスボードの平均重合度は 1160 から 243 に低下したにもかかわらず, 鉱油の導電率には有意な変化は認められなかった。このことから, 導電率上昇の支配要因は鉱油の酸化劣化であることが示唆された。

なお, 図 1 に関連して述べた水分上昇は, ガス中水分に由来すると考えている。実際, 2.9 日で使用されたガスに含

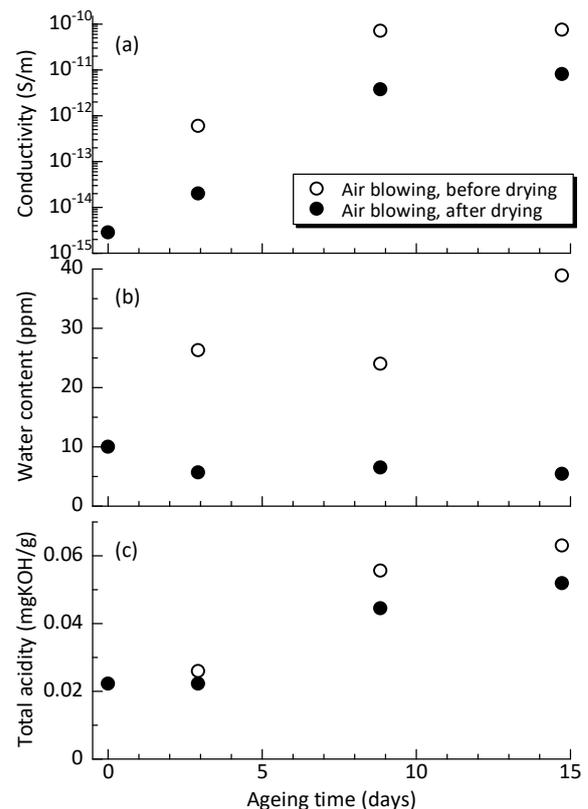


図 1 空気ガスを 140°C 環境下の鉱油に吹き付けて劣化させた結果。試料は全て室温で徐冷し, 室温条件にて物性評価を行った。白抜き: 劣化処理直後 (=脱気前), 塗りつぶし: 真空脱気処理後。

まれる水分全量から水分上昇を見積もると, 2.9 days×1.5L/h ×0.54ppm/1.4L=41ppm となり, 実験結果と概ね整合する。

文 献

- (1) 例えば, 「広域系統長期方針(広域連系システムのマスタープラン)」, 電力広域的運営推進機関, 2023, URL: https://www.occto.or.jp/assets/kouikikeitou/chokihoushin/files/chokihoushin_23_01_01.pdf, 2026 年 1 月 6 日閲覧
- (2) 例えば, *HVDC Transformer Failure Survey Results from 2013 to 2020*, CIGRE Tech. Brochure, No. 859, 2021.
- (3) 西川ほか, 「植物油系絶縁油の劣化と絶縁紙に及ぼす酸素の影響」, 第 32 回石油学会絶縁油分科会論文集, pp. 38-43, 2012.
- (4) *HVDC Transformer Insulation: Oil Conductivity*, CIGRE Tech. Brochure, No. 646, 2016.

球雷放電を用いた 樹脂材料の密着性向上メカニズムの検証

中島 和*, 早瀬 悠二, 高野 翔(富士電機)
及川 拓真, 稲田 優貴, 前山 光明(埼玉大学)

Investigation of the Mechanism for Improving Adhesion of Resin Materials Using Ball Lightning Discharge

Nagomi Nakajima, Yuji Hayase, Sho Takano (Fuji Electric Co., Ltd.)

Takuma Oikawa, Yuki Inada, Mitsuaki Maeyama (Saitama University)

1. 背景・目的

半導体デバイスの機械的保護や電氣的絶縁を目的とし、樹脂封止が用いられており、封止樹脂の熱変形に対する耐久性や、薄型化に向けた樹脂量削減が課題となっている。このため、封止信頼性向上を目的とした界面密着性を向上させる技術が求められている。^(1,2)

従来、化学処理や表面粗化、プラズマ処理が適用されてきた⁽²⁾。しかし、大気圧プラズマ処理(コロナ放電や誘電体バリア放電)には活性種密度が低い課題があった。

一方、球雷放電は、活性種(OHラジカル)が高密度で処理面積が広いという特長を有し⁽³⁾、高い官能基導入効果を期待できるため、本プラズマを用いた表面改質を試みた。本研究では、球雷放電を樹脂表面処理に適用し、密着力向上と表面のOH基の数の関連の検証を行った。

2. 実験方法および実験結果

球雷放電発生装置(図1)は、埼玉大学 前山・稲田研究室で報告されている構成を基にしている⁽³⁾。試料には、一般に絶縁物として利用されることの多い4種類の樹脂を用いた。また、処理前に溶剤洗浄を行った。

球雷放電は、中心電極負極性⁽³⁾、印加電圧3.8kV、パルス幅100msecで発生させ、試料表面に20回照射した。

表面処理後の密着性評価には、プリンシエア試験⁽¹⁾を用いた。試料表面にプリン状に封止樹脂を形成し、ロードセルにより垂直方向に荷重を加えた。破断時の最大荷重を底面の面積で除し、密着強度を算出した。さらに、処理試料に対しXPS(X-Ray Photoelectron Spectroscopy)を用いて試料表面のC-O結合の数を計測し、曝露処理前後のC-O結合変化量をOH基の増加量とみなした。これにより、OH基付与量を間接的に算出した。

3. 結果・考察

図2に球雷放電処理前後における各樹脂試料の密着強度を示す。エポキシ、ガラエポ、PPSでは、球雷放電処理により密着強度の向上が確認された一方、ベークライトでは

向上が見られなかった。

密着力向上の要因として、OH基の増加が寄与するかを確認したところ、樹脂種により相関があるものかないもの両方があり、3パターンに分けられることを確認した。

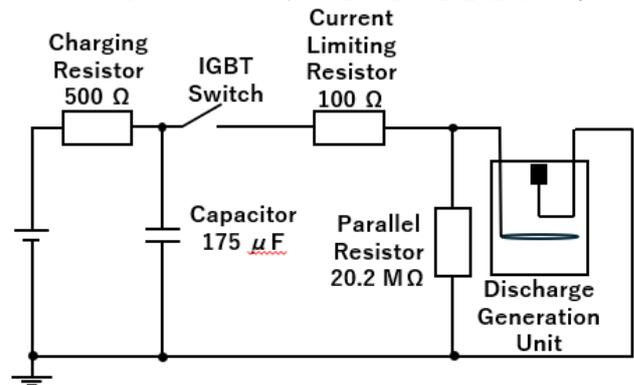


図1 実験系
Fig.1. Experimental system

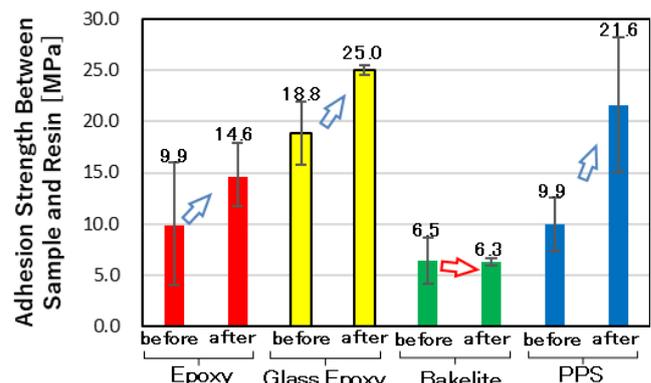


図2 試料-封止樹脂間の密着力
Fig.2. Adhesion Strength Between Sample and Resin

文献

- (1) 加藤凡典, 表面技術, 28~33(2021)
- (2) 中村友二, 応用物理, 376~384 (2013)
- (3) 及川拓真, EPP, 41~46 (2025)

配電用絶縁材料の絶縁破壊特性の比較

May Thin Khaing*, 田中 快斗, 迫田 達也 (宮崎大学)
濱田 滉太, 豎山智博(東芝)

Comparison of Dielectric Breakdown Properties of Dielectric Materials Used for Distribution Systems

May Thin Khaing, Tatsuya Sakoda (University of Miyazaki)

Kota Hamada, Chihiro Tateyama (TOSHIBA)

1. まえがき

昨今のカーボンニュートラル(CN)やサーキュラーエコノミー(CE)を目指す取り組みの中で、電気機器用の既存材料の使用が制約される可能性があり、今後は環境調和型の絶縁材料の適用が想定される。しかし、CNやCEに特化した絶縁材料の絶縁破壊強度や熱・機械的特性といった材料特性の評価はなされているが、汚損時の絶縁特性の劣化現象については十分に検証されていない。

本報告では、熱硬化性樹脂のガラスエポキシ、アルミナと、熱可塑性樹脂のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) とポリフェニレンサルファイド(PPS)の表面汚損時の絶縁破壊特性を比較した結果について述べる。

2. 実験方法

直径 80 mm、厚み 5 mm の材料(ガラスエポキシ、アルミナ、PTFE、PPS)を表面汚損させる前に、水滴接触角度を測定した。ここでは 7 μ L の水滴をマイクロシリンジで表面に滴下し、接触角度計(AUTO100, Simage)で測定した。なお、接触角度の測定は 3 回行い、平均値を求めた。

汚損物質として用いたとの粉の平均粒径は砂の 1/1000 程度である。ここでは 0.5 g のとの粉を 30 mL のイオン交換水に混ぜ、この懸濁液で材料を汚損させた。

Fig. 1 に汚損試料(ガラスエポキシ)の例と電極構成を示す。直径 50 mm の円柱電極を高電圧電極とし、汚損試料の中央部に配した。接地電極は内半径が 60 mm のリング状電極で、高電圧電極の外側に配した。そのため、5 mm の幅の試料汚損領域に高電界が印加される。Fig. 1 の電極を恒温槽内に配し、恒温槽内の温度を 30°C から 60°C まで 5°C 毎に相対湿度

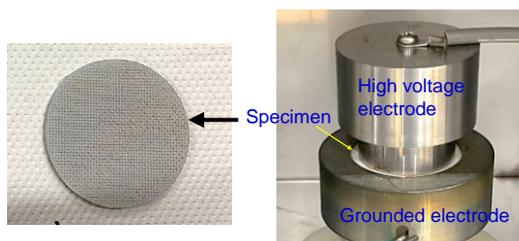


図 1 汚損試料の表面状態と電極構成

Fig. 1. A polluted specimen and an electrode configuration.

60%と 90%に調整(イオン交換水を加湿器で供給)して絶縁破壊電圧を計測した。昇圧速度は 0.5 kV/min とした。

3. 実験結果

<3・1>水滴接触角度と汚損 水滴接触角度は、アルミナ (28.7°)<PPS(88.28°)>≒ガラスエポキシ(90.7°)<PTFE (103.7°)の順であった。また、懸濁液を各試料の表面に滴下して各材料の汚損のしやすさを評価したところ、表面撥水性に依存して汚損領域の大小が決まること、試料の乾きやすさが各材料の表面撥水性に依存することが確認された。そのため、実環境で絶縁機器の表面が汚損される際は、水滴接触角度が小さい材料程、乾きやすく且つ汚損領域が大きくなると考えられる。

<3・2>絶縁破壊特性 Fig. 2 に絶縁破壊電圧の例として PPS とアルミナの結果を示す。PPS は絶対湿度が高くなると絶縁破壊電圧が低くなる傾向である。絶対湿度が高くなる程、試料表面の水分に加えて水を吸収したとの粉で表面は覆われる。この状態で表面に漏れ電流が流れて、局部的乾燥帯の形成を経てドライバンドアーク放電が発生していると考えられる。一方、アルミナの場合、表面はヒドロキシル基(-OH)が豊富で、水のような極性分子の吸着能力強い。そのため、PPS よりも湿潤した表面が形成されやすい。その一方で乾きやすい。本実験では、各温度で、相対湿度 90%の後に 60%で絶縁破壊電圧を測定している。60%時は、90%時に比べて表面の湿潤度が低くなり絶縁破壊電圧が高くなったと考えられる。以上のように、との粉汚損試料の湿度変化における絶縁破壊特性は、試料表面の撥水性に強く依存することが分かった。

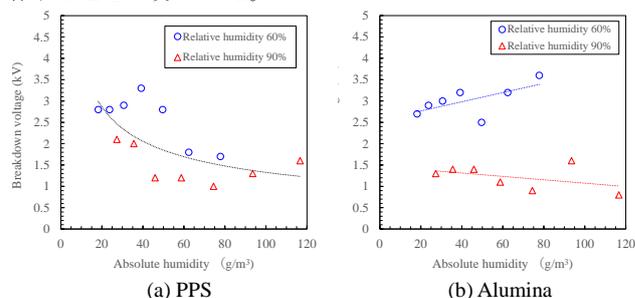


図 2 アルミナと PPS の汚損表面の絶縁破壊電圧

Fig. 2. Breakdown voltages on polluted surfaces of alumina and PPS.

ADMER[®]の添加が LDPE フィルムの 直流絶縁破壊特性に及ぼす影響

植木 海翔*, 村上 義信, 佐藤 孝政 (豊橋技術科学大学)
田中 雄基, 若井 愛莉, 栗原 海志瑠 (三井化学株式会社)

DC Breakdown Properties of LDPE Films Influenced by Addition of ADMERTM
Kaito Ueki, Yoshinobu Murakami, Takamasa Sato (Toyohashi University of Technology)
Yuki Tanaka, Airi Wakai, Michel Kurihara (Mitsui Chemicals, Inc.)

1. まえがき

低密度ポリエチレン(LDPE)は電力ケーブルなどの絶縁材料として広く利用されているが、直流高電界下では空間電荷の蓄積や電気伝導の増大が課題となっている⁽¹⁾。一方、無水マレイン酸(MAH)で変性したポリオレフィン⁽²⁾は、極性基が付与されることから、多層フィルムの接着層に広く用いられ、界面特性の改善に寄与している⁽²⁾。また、同時にこの極性基の付与は電荷移動の抑制や電界均一化を通じて絶縁特性の向上にも寄与することが期待できる。本研究では、LDPEにMAH変性ポリエチレン(PE)を添加した際の直流絶縁特性への影響を調査したので報告する。

2. 試料および実験方法

変性過程におけるMAHの未反応成分(残留酸)濃度が1 ppm未満のMAH変性PE(三井化学(株)製ADMER[®])を、LDPEに5wt%添加した厚さ0.1mmのフィルム(LDPE-MAHPE(1))を作製した。同様に、残留酸濃度が200 ppmのMAH変性PEを5wt%添加したフィルム(LDPE-MAHPE(2))も作製した。比較のため、LDPEフィルム(LDPE)も準備した。図1にMcKeown電極系⁽³⁾の概略図、図2に直流破壊試験で使用した回路図を示す。電極系を70°Cのシリコンオイルに浸漬した後、上昇率1 kV/sの正極性直流ランプ電圧を印加して絶縁破壊電圧(DC-V_b)を測定した。得られたDC-V_bを試料厚さで除し、直流絶縁破壊の強さ(DC-F_b)を評価した。

3. 実験結果および考察

図3にDC-F_bの評価結果を示す。黒塗りプロットは各試料のDC-F_b、白抜きプロットは試行回数10回の平均値、エラーバーはその標準偏差である。図3より、LDPE-MAHPE(1)およびLDPE-MAHPE(2)のDC-F_bは、LDPEと比較して高く、標準偏差も小さくなった。これは、MAH変性PEの極性基が電荷移動に対するトラップサイトとして作用したためと考えられる。Leeらは、PEをMAHで変性することにより空間電荷蓄積が抑制され、直流伝導電流が低下することを報告しており⁽⁴⁾、本研究の結果と整合する。また、MAH

変性PE添加によるDC-F_bの上昇効果は、ナノコンポジット絶縁材料で報告されている効果⁽⁵⁾と類似しており、MAH変性PEは直流用絶縁材料として有望であると考えられる。一方、LDPE-MAHPE(2)のDC-F_bは、LDPE-MAHPE(1)より低く、これは試料中の残留酸が電気伝導に寄与する可能性を示している。以上より、ADMER[®]のような残留酸濃度の低いMAH変性PEは、従来材料と比較して特に直流絶縁特性の向上に寄与することが期待される。

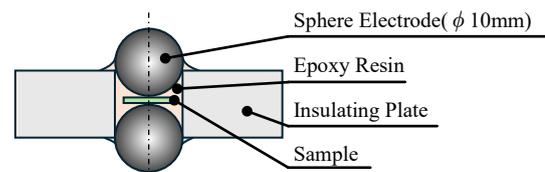


図1 McKeown型電極
Fig.1. McKeown type electrode

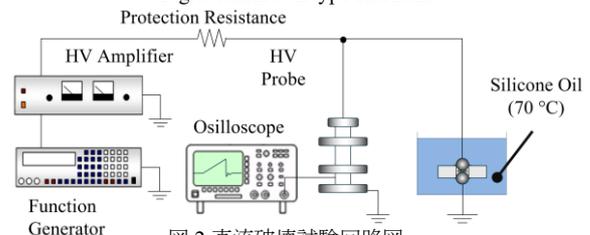


図2 直流破壊試験回路図
Fig.2. DC breakdown circuit

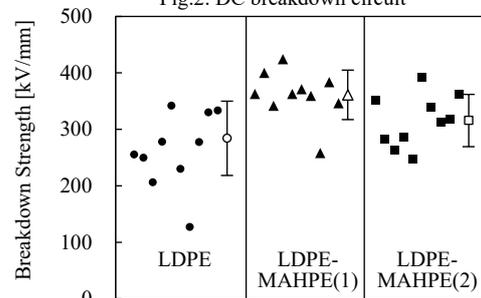


図3 直流絶縁破壊強度
Fig.3. DC breakdown strength
文献

- (1) 横山綾子: 電気学会論文誌 A, 117(7), 754-760 (1997)
- (2) 葛良忠彦: 成形加工, 17(2), 62-70 (2005)
- (3) J. J. McKeown: Proc. IEE, 12(4), 824~828 (1965)
- (3) Lee, S. H.: IEEE Trans. on DEI, 2(6), 1132-1139 (1995)
- (4) Murakami, Y., et al.: IEEE Trans. on DEI, 15(1), 33-39 (2008)

SiN膜がSiO₂/SiN複合層試料の 絶縁破壊特性に及ぼす影響

木村 剛留*, 村上 義信, 佐藤 孝政 (豊橋技術科学大学)

Breakdown Characteristics of SiO₂/SiN Multi-layers Sample Influenced by SiN Layer
Takeru Kimura, Yoshinobu Murakami, Takamasa Sato (Toyohashi University of Technology)

1. まえがき

デジタルアイソレータはフォトカプラと比較して小型、高速、低消費電力であることから、電気自動車や医療機器などへの応用が拡大している⁽¹⁾。絶縁材料としては主に酸化ケイ素(SiO₂)が用いられるが、機械的強度および防湿性に優れた窒化ケイ素(SiN)が併用される場合も多い⁽²⁾。そのため、SiO₂とSiNを組み合わせた絶縁膜の電気的特性を把握することが重要である。本研究では、SiO₂/SiN複合膜における直流絶縁破壊特性を把握するため、Si基板上に形成した単層および複合層絶縁膜試料を用いて絶縁破壊試験を実施したので報告する。

2. 実験方法および試料

図1に試料構造を示す。試料は厚さ775 μmのSi基板上に、(a) SiO₂を5.58 μm成膜した単層試料、(b) SiO₂を5.58 μmとSiNを1.20 μm順に形成した複合層試料である。試験には、これら試料をエポキシ樹脂でモールドしたMcKeown電極系⁽³⁾を用いた。

図2に直流絶縁破壊試験回路を示す。30℃にて上昇率50 V/sの正極性直流ランプ電圧を印加し、直流絶縁破壊電圧(DC-Vb)を測定した。DC-Vbを全絶縁膜厚で除し、直流絶縁破壊の強さ(DC-Fb)を評価した。印加電圧極性は、試料のSi基板側をGNDとする場合(GND:Si)と、絶縁膜側をGNDとする場合(GND:SiO₂またはGND:SiN)で設定した。

3. 実験結果および考察

図3にDC-Fbを示す。同図中のプロットは試行回数10~15回の平均値、エラーバーはその標準偏差を示している。単層試料のDC-Fb(GND:Si)はDC-Fb(GND:SiO₂)より若干低くなった。一方、複合層試料においてDC-Fb(GND:Si)はDC-Fb(GND:SiN)より低くなり、印加電圧極性により大きなDC-Fbの差が見られた。複合層試料ではSiO₂/SiN界面が存在し、GND:SiではSiN層が陽極側に位置する。SiNはホール電流が流れやすい特性を有する⁽⁴⁾ため、陽極側のSiO₂/SiN界面に正電荷が蓄積し、SiO₂/SiN界面の局所電界が増加した、またはその正電荷がSiO₂層にも注入され、SiO₂/Si界面の局所電界が増大した結果、DC-Fb(GND:Si)が大幅に低下したと考えられる。SiO₂層への正電荷の注入は単層試料のDC-Fb

(GND:Si)はDC-Fb(GND:SiO₂)より小さくなるという結果を支持しているものと思われる。

最後に、本研究の遂行にあたり、試料をご提供いただきましたローム株式会社 LSI 開発本部の和田氏ならびに長田氏らに感謝いたします。

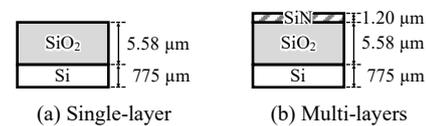


図1 試料形状

Fig.1. Sample configuration

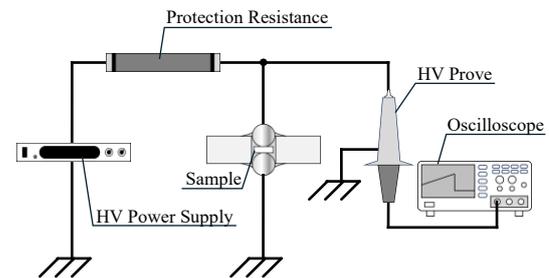


図2 直流絶縁破壊試験回路

Fig.2. Experimental setup for DC breakdown test

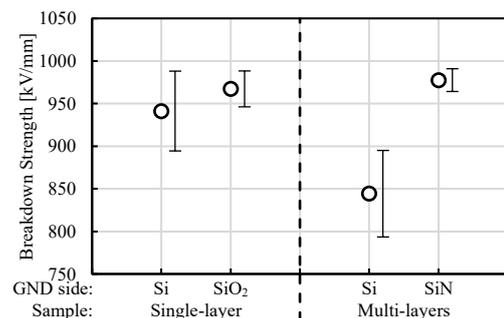


図3 SiN膜がSiO₂/SiN複合層試料の絶縁特性に及ぼす影響
Fig.3. Breakdown characteristics of SiO₂/SiN multi-layers sample influenced by SiN layer

文献

- (1) Isa Altoobaji, et al.: Electronics, 12(5), 1~15 (2023)
- (2) 藤田静雄・他: 応用物理, 54(12), 1250~1266 (1985)
- (3) J. J. McKeown: Proc. IEE, 12(4), 824~828 (1965)
- (4) 石谷明彦・他: 応用物理, 60(11), 1131~1135 (1991)

低汚損条件下における絶縁材料の撥水性と直流フラッシュオーバ電圧の関係

中村 勇介*, 豎山 智博 (東芝) 小嶋 修平 (TMEIC)

Relationship between Hydrophobicity of Insulating Materials and DC Flashover Voltage under Low Pollution Conditions

Yusuke Nakamura, Chihiro Tateyama (Toshiba Corporation), Shuhei Kojima (TMEIC Corporation)

1. まえがき

筆者らは、室内盤に設置される絶縁物の沿面絶縁特性を評価している⁽¹⁾。室内盤では、屋外機器ほど絶縁物が汚損されることはないが、等価塩分付着密度 (Equivalent Salt Deposit Density: ESDD) に換算して約 0.01 mg/cm^2 程度まで汚損され、さらに高湿度に晒される場合がある。このような、低汚損・高湿度条件下での絶縁データはほとんどない。

そこで本稿では、そのような低汚損・高湿度条件下における絶縁物のフラッシュオーバ電圧に対し、撥水性が与える影響を調査したので報告する。

2. 実験方法

図1に電極系を示す。絶縁物は円柱状 (厚さ 3 mm 、直径 62 mm) で、ガラエポ(GE)、PTFE(PF)、ガラポリ(GP)、片面にPTFEを貼付したガラエポ+PTFE(GE+PT)の4種類を使用した。まずは、絶縁物の上下にスプレーで汚損水を吹き付け、ESDDが 0.01 mg/cm^2 強となるよう塩水と粉末で汚損した。乾燥後、サンプル中央を直径 20 mm の電極で挟んだ。沿面距離は 45 mm である。その後、 $50^\circ\text{C} \cdot 95\% \text{RH}$ 下で直流電圧を印加した。電圧は 2.5 kV 刻みで昇圧し、各電圧を 1 分保持してフラッシュオーバ電圧を測定した。昇圧中にフラッシュオーバが発生した場合はその時点の電圧を採用し、 n 数は 3 とした。試験後、絶縁材料の接触角を測定した。

3. 実験結果

図2に各絶縁物のフラッシュオーバ電圧を示す。GEを絶縁物としたサンプルのフラッシュオーバ電圧は最も低く、平均値は 11.6 kV であった。PTを絶縁物としたサンプルの平均値は 30.0 kV である。また、GE+PTに着目すると、平均値は 27.9 kV で、PTのフラッシュオーバ電圧と近い値となった。図3に各絶縁物の接触角を示す。GEの接触角は平均 82.0° で親水性を示し、PTは平均 108° 、GPは平均 95.3° で疎水性を示した。

4. 考察

本試験下におけるフラッシュオーバはトラッキングが原因と考えられる。トラッキングによるフラッシュオーバは、

- ① 高湿度により塩分が潮解し、絶縁表面に導電性水膜が形成され漏れ電流が流れる
- ② 漏れ電流によるジュール熱で局所的に水が蒸発し乾燥部 (ドライバンド) が形成される

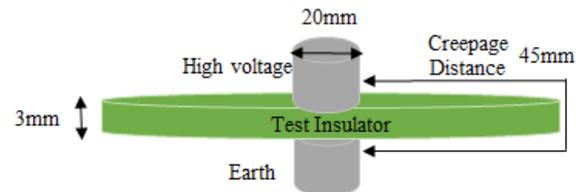


図1 電極系
Fig.1 Electrode System

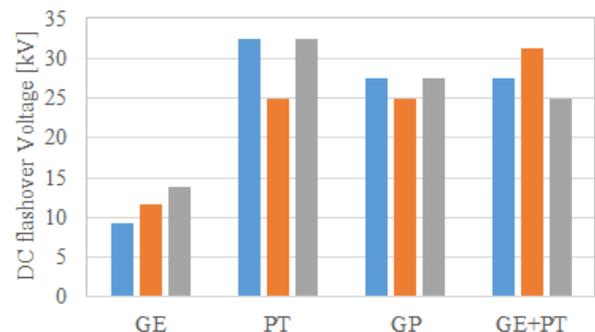


図2 各絶縁物の直流フラッシュオーバ電圧
Fig.2. DC flashover voltage of each insulating material

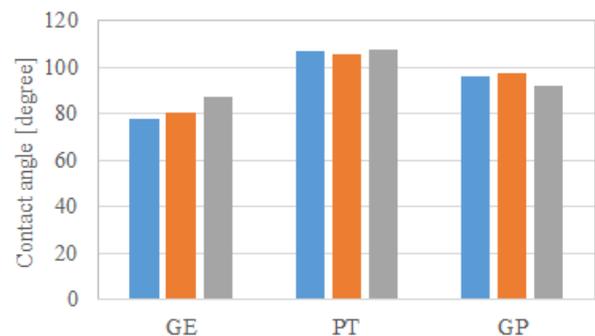


図3 各絶縁物の接触角
Fig.3. Contact angle of each insulating material

- ③ ドライバンド部でアークが発生する
- ④ アークにより表面が炭化し、導電性が増す
- ⑤ この現象が繰り返され、劣化が進行する
- ⑥ 導電性経路が形成され、上下電極間でフラッシュオーバというメカニズムで発生する。

このメカニズムを考慮すると、図2のフラッシュオーバ電圧の差は、絶縁材料の撥水性、すなわち接触角に起因すると考えられる。図4にGEおよびPTの接触角測定時の画像

をそれぞれ示す。GEは接触角が小さいため、水滴とGEの接触面積が大きい。一方、PTは接触角が大きいため、水滴とPTの接触面積は小さい。これらの絶縁物の高湿度下における表面の模式図を図5~7に示す。本電極系は裏と表があるが、模式図では直線の形状で記載している。図5はGEの模式図であるが、GEは水滴との接触面積が大きくなるため、メカニズム①で形成された水膜によって漏れ電流が流れる経路ができやすくなり、トラッキングが進展しやすくなる。一方、図6に示すPTでは水滴との接触面積が小さくなるため、漏れ電流が流れる経路ができづらく、トラッキングが進展しにくい。そのため、接触角が小さいGEのフラッシュオーバー電圧は低かったものと考えられる。

次に、GE+PTを検討する。図7の模式図を示すように、GE側には漏れ電流が流れる経路ができるが、PT側は経路ができないため、結果的に漏れ電流は流れづらくなる。そのため、フラッシュオーバー電圧が高くなったものと考えられる。つまり、低汚損・高湿度下の絶縁物のフラッシュオーバー電圧は接触角が大きく影響する。図8に絶縁物の接触角と直流フラッシュオーバー電圧の関係を示す。接触角が大きくなると、直流フラッシュオーバー電圧が高くなる。特に、接触角が90°以下の表面が親水性である絶縁物においては、大きくフラッシュオーバー電圧は低下する。一方、GE+PTのフラッシュオーバー電圧より、表面が親水性である絶縁物においても、漏れ電流が流れる経路を遮るように一部を疎水性にすると、フラッシュオーバー電圧を大きく向上させることが可能であることがわかった。

5. まとめ

本稿では低汚損・高湿度下のフラッシュオーバー電圧に対し、撥水性が与える影響を調査した。その結果、フラッシュオーバー電圧は接触角が大きくなるほど高くなること、表面が親水性の絶縁物では、漏れ電流が流れる経路を遮るように一部を疎水性にすると、フラッシュオーバー電圧を大きく向上させることが明らかとなった。

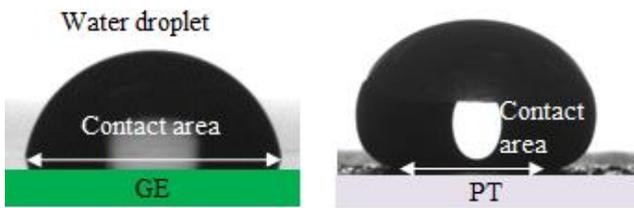


図4 接触角測定時の画像
Fig.4. Image during contact angle measurement

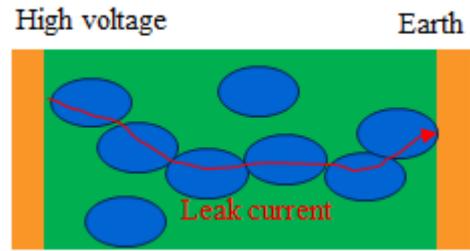


図5 高湿度下におけるGE表面の模式図
Fig.5. Schematic diagram of the GE surface under high humidity

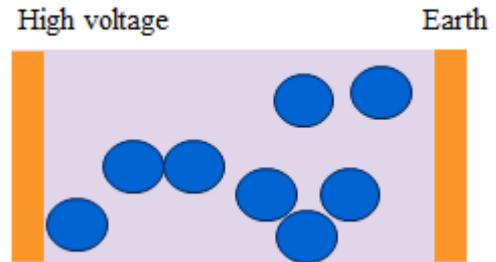


図6 高湿度下におけるPT表面の模式図
Fig.6. Schematic diagram of the PT surface under high humidity

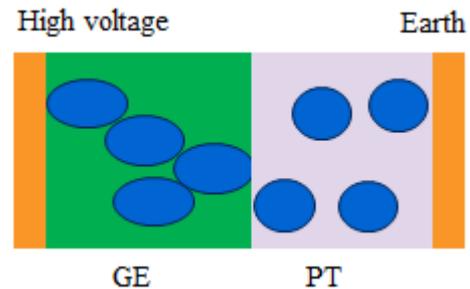


図7 高湿度下におけるGE+PT表面の模式図
Fig.7. Schematic diagram of the PT surface under high humidity

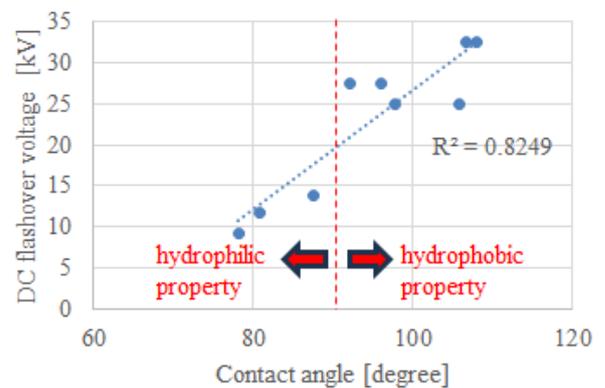


図8 低汚損下における接触角と直流フラッシュオーバー電圧の関係
Fig.8. Relationship between contact angle and DC flashover voltage under low contamination

文献

(1) 堅山他, 電気学会全国大会., 2-038 (2025)

フィラーコンポジット化したコイル絶縁材の電気特性

馬渕 貴裕* (三菱電機株式会社)

Characteristics of Filler-Composite Coil Insulation Materials
Takahiro Mabuchi (Mitsubishi Electric Corporation)

1. はじめに

近年、各種の高電圧回転機では小型化や高効率化に向けた開発が進められている。この実現には回転機のコイルに使用する絶縁材の特性向上が必須である。コイル絶縁材は、導体にマイカテープを巻き付けて樹脂を含浸、加熱硬化して形成するが、その特性向上の方策としてフィラーの添加が検討されている⁽¹⁾。特にナノフィラーは電気トリーの進展を抑制する効果を有し、これにより課電寿命が大幅に向上すると報告されている。今回、絶縁性を向上する新規なマイクロフィラーの探索としてガラスフィラーの添加効果について検討した。

2. 試料及び実験方法

ガラスクロスを貼り合わせたマイカ基材に、ガラスフィラー($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-B}_2\text{O}_3$, 平均粒径 $3\mu\text{m}$)とエポキシ樹脂を混ぜたトルエン溶液をスプレー塗布、乾燥することでガラスフィラー複合マイカテープを得た。これを長さ 300mm のアルミ角棒に巻き付けた後、エポキシ樹脂と酸無水物を混合した液状樹脂を減圧雰囲気中含浸し、加熱硬化して評価用のモデルコイルを作製した(図 1)。次にこのコイル中心部 50mm に銅テープを貼り付け、アルミ角棒と同部間に電圧を印加して、初期の絶縁破壊電圧及び一定電圧を印加して絶縁破壊に至る時間(課電寿命)について測定した。



図 1.樹脂を含浸したコイルモデル
Fig1.Resin impregnated Coil

上記と同様に、比較としてフィラーを含まない系(Ref1)、汎用の充填材であるシリカフィラー(SiO_2 , 平均粒径 $8\mu\text{m}$, Ref2)をマイカに塗布した系について併せて評価した。

3. 実験結果

図 2 に各種絶縁特性の評価結果を示す。いずれの試験においても絶縁破壊は、電極内で電界が集中しやすい角部で発生しており、絶縁破壊電圧はいずれも約 36kV と同等であった。一方、課電寿命はフィラーを含まない系(Ref 1)やシリカフィラーを充填した系(Ref 2)は $76\sim 145$ 時間であったのに対し、ガラスフィラーを充填した系では、 $192\sim 335$ 時間と向上した。上記の特性差異を検討するため、マイカを除いた樹脂とフィラーを混合した硬化物に電圧を一定時間印加した後、その断面を SEM 観察した結果、樹脂内の放電侵食部においてガラスフィラーはつながった状態であった(図 3)。これは放電エネルギーでフィラーが軟化し、隣接した粒子と融着したと見られ、無機的な壁を形成することで放電侵食を物理的に抑制したと推定される。

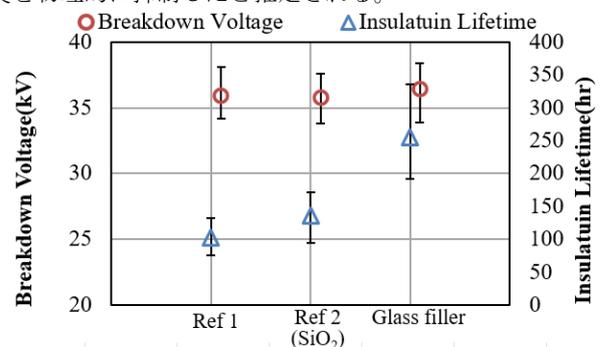


図 2.コイルの絶縁特性

Fig.2 Insulation Properties of Coil Model

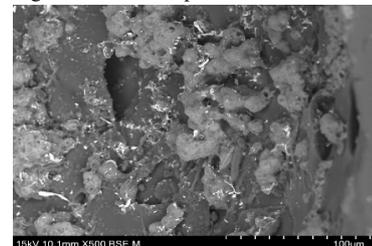


図 3.樹脂内のガラスフィラー
Fig.3 SEM Images of Glass Filler

文 献

(1) P. Gropper, T. Hildinger, F. Pohlmann and J. R. Weidner, "Nanotechnology in high voltage insulation systems for large electrical machinery –first results", CIGRE 2012, A1-103, 2012.

レジン含浸条件下における低抵抗コロナ防止テープ の寿命予測に関する検討

安田 拓実*, 馬淵 貴裕 (三菱電機株式会社), 岩永 拓実, 池田 竜志,
岡島 直輝, 菊田 晋介, 櫻井 孝幸, 岡本 徹志 (株式会社 TMEIC)

Study on Lifespan Prediction of Corona Armor Tape under Resin-Impregnated Conditions
Takumi Yasuda*, Takahiro Mabuchi (Mitsubishi Electric Corporation), Takumi Iwanaga, Ryuji Ikeda,
Naoki Okajima, Shinsuke Kikuta, Takayuki Sakurai, Tetsushi Okamoto (TMEIC Corporation)

1. はじめに

高電圧回転機では、鉄心と固定子コイルとの微小空間で発生する部分放電を抑制するため、主絶縁層の外層に低抵抗コロナ防止テープ（以下“低抵抗テープ”）を配置している。しかしながら、主絶縁層と低抵抗テープとの間の部分放電で発生するオゾンガス(O₃)による酸化劣化が報告されている⁽¹⁾。オゾン発生量と相関のある放電電力を指標として、化学反応速度論に基づくアレニウスプロットにより、低抵抗テープの劣化寿命を推定できることを実証した⁽²⁾。

本研究では、実機環境の模擬精度を向上させることを目的とし、レジン含浸条件下における低抵抗テープに対して本寿命予測技術の適用性を検証したので報告する。

2. 試料及び試験方法

図1に評価モデルの全体概略図を示す。部分放電による低抵抗テープの劣化現象を再現するために、主絶縁層と低抵抗テープとの間に空隙を設定した評価モデルとした。評価モデルには、実機環境を模擬することを目的とし、絶縁レジンを含浸し加熱硬化させた低抵抗テープを組み込み、恒温槽内に設置して高温雰囲気中で部分放電試験を実施した。V-Qリサーチ法により、空隙内部で発生する部分放電の放電電力を計測するとともに、放電に曝された低抵抗テープの表面抵抗値を経時的に測定した。表面抵抗値が判定基準に到達するまでの時間を劣化寿命と定義し、アレニウスプロットにより任意温度における劣化寿命を算出した。

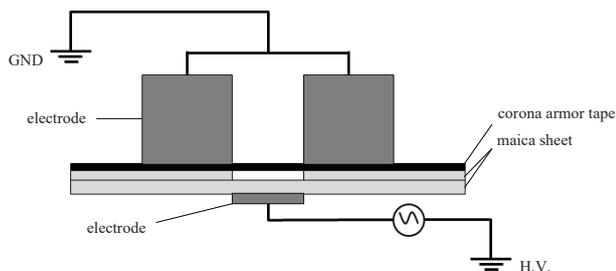


図1 部分放電を模擬した評価モデルの全体概略図
Fig.1. Schematic diagram of discharge model.

3. 結果

図2にレジン含浸条件下における低抵抗テープの劣化寿命に関するアレニウスプロットを示す。雰囲気温度が高くなるにつれて劣化寿命は短くなる傾向を示した。さらに、アレニウスプロットは良好な直線性を示したことから、アレニウス則が成立すると考えられる。したがって、レジン含浸条件下においても、直線近似式から活性化エネルギーおよび頻度因子を算出することが可能であり、任意温度における低抵抗テープの劣化寿命を予測できることを明らかにした。また、放電電力が高くなるにつれて劣化寿命は短くなり、劣化寿命と放電電力の間には明確な相関が見られた。

以上の結果から、レジン含浸条件下における低抵抗テープの劣化寿命は、アレニウスプロットにより予測できることを明らかにした。また、実機環境下における放電電力の概算値に基づいて予測した低抵抗テープの劣化寿命については、講演にて詳細を述べる。

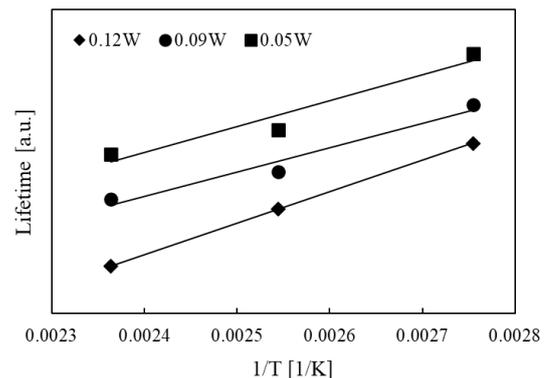


図2 レジン含浸低抵抗テープのアレニウスプロット
Fig.2. Arrhenius plot for resin-impregnated Corona Armor Tape.

文献

- (1)A Litinsky, G Schmidt, F Pohlmann, et.al. Electrical Insulation Conference, 356-359 (2017)
(2)T Yasuda, T Mabuchi, R Ikeda, et.al. International Conference on Dielectrics, 4C-12 (2024)

電動推進航空機用モータ絶縁における 流動潤滑油の絶縁破壊電圧の電界分布依存性

野口 真平*, 加藤 摩乙, 小島 寛樹(名古屋大学), 有賀 信雄,
卯辰 清志, 渡邊 瞬也 (シンフォニアテクノロジー), 早川 直樹 (名古屋大学)

Effect of Electric Field Distribution on Breakdown Characteristics of
Streaming Lubricating Oil for Electric Powered Aircraft Motors

Shimpei Noguchi, Mao Kato, Hiroki Kojima (Nagoya University), Nobuo Aruga,

Kiyoshi Utatsu, Shunya Watanabe (SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD.), Naoki Hayakawa (Nagoya University)

表1 供試電極系

Table 1. Electrode configurations

Electrode	Rod-plane	Parallel plane	Coaxial cylinder
Shape			
Gap length	1.0		2.0
Material	Stainless steel		
90%SOV	0.425 mm ³	359 mm ³	2.16 × 10 ⁵ mm ³
Electric field non-uniformity factor	1.97	1.02	1.00

1. まえがき

筆者らは、潤滑油絶縁を適用した電動推進航空機用モータの高出力密度化を目指している⁽¹⁾。潤滑油は巻線部の冷却のため、電界分布が異なる箇所を流動する。本稿では、最大電界の90%以上の高電界油体積(90%SOV)および電界分布の異なる電極系において、流動潤滑油の絶縁破壊電圧(BDV)を検討した。

2. 実験装置および実験方法

表1に供試電極系、図1に流動系の(a)構成および(b)外観を示す。各電極系を試験容器に設置して潤滑油を充填し、ポンプを動作させた状態(ポンプ流量0~38 L/min)で油温を23°Cに設定した。交流電圧(60 Hz)下のBDVを各流量で10~20回取得し、得られたBDVについてワイブル解析を行い、50%BDVを算出した。また、電圧印加前後にカールフイッシャー水分計を用いて油中水分量を測定した。

3. 実験結果および考察

図2に各電極系における潤滑油の50%BDVの流量依存性を示す。図中のエラーバーは標準偏差であり、各電極系における静止油(0 L/min)の50%BDVでそれぞれ規格化している。平行平板、同軸円筒電極のような平等電界下のBDVは流量の増加とともに静止油のBDVよりも上昇して最大値に達し、さらに流量を増加させると飽和する傾向を示した。絶縁油中では、不純物によるブリッジ形成が絶縁破壊の起点になりうるが、低流量領域(0~11.3 L/min)では油流によりブリッジ形成が抑制され、BDVが上昇した⁽²⁾と考えられる。また、同軸円筒電極は平行平板電極よりも90%SOVが大きく、油流による不純物除去効果よりも体積効果の影響が大きいため、同軸円筒電極のBDVの上昇率は平行平板電極に比べて低くなったと考えられる。一方、不平等電界下の棒-平板電極のBDVには流量依存性がみられなかった。棒-平板電極では負極性破壊が多かったことから、電子的破壊によってBDVの流量依存性がみられなかったと考えられる。以上のような流動潤滑油の絶縁破壊特性は、潤滑油絶縁を適用した電動推進航空機用モータの絶縁設計に有用である。

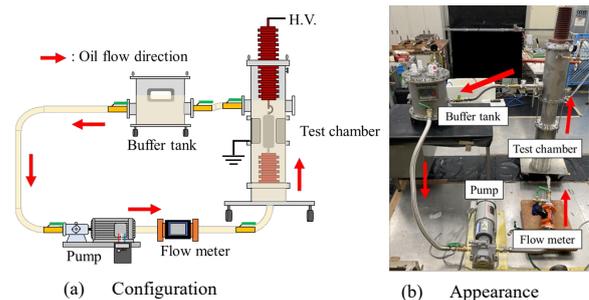


図1 流動系

Fig.1. Oil flow system

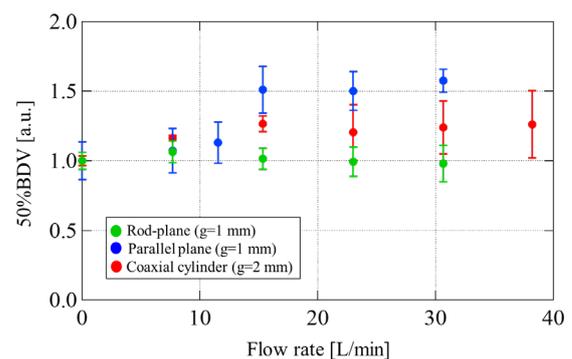


図2 各電極系における潤滑油の50%BDVの流量依存性
Fig.2. Flow rate dependence of 50%BDV of lubricating oil for different electrode configurations

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP21005)の結果得られたものである。

文 献

(1) N. Hayakawa et al.: ICDL, ID:1144 (2025)

(2) 池田他：電学論 B, Vol.99, No.10, pp.635-642(1979)

直流超電導限流器における液体窒素の動的絶縁破壊特性の圧力依存性

永縄 巧輔*, 武田 龍一, 小島 寛樹, 早川 直樹 (名古屋大学)

Pressure Dependence of Dynamic Breakdown Characteristics in Liquid Nitrogen
for DC Superconducting Fault Current Limiters

Kosuke Naganawa, Ryuichi Takeda, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa (Nagoya University)

1. まえがき

筆者らは、多端子直流送電システムへの導入を想定した直流超電導限流器(SFCL)について、限流動作時のジュール発熱に伴う液体窒素(LN₂)の動的絶縁破壊特性を検討している^(1,2)。本稿では、実器 SFCL を想定し、LN₂の動的絶縁破壊特性の圧力依存性を取得した。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験回路を示す。SFCL 限流動作時のジュール発熱を模擬したパンケーキコイルモデルを LN₂ ($T=77$ K, $P=0.10\sim 0.25$ MPa)に浸漬している。本モデルは高電圧電極に SUS テープ、接地電極にニクロムテープを使用し、ギャップ長を $g=2$ mm として各3ターンバイファイラ巻した。各テープの寸法は幅4 mm、厚さ0.3 mmである。高電圧電極に高電圧回路を、接地電極に通電回路を接続した。

まず、直流(正負極性)または交流(60 Hz)の高電圧を 1 kV_{rms}/s で昇圧印加し、LN₂の静的絶縁破壊電界(BDE_{static})を測定した。次に、高電圧電極に BDE_{static} 以下の印加電圧を維持した状態でニクロムテープに交流電流(60 Hz)を過渡的に 0.5~5 cycle 通電し、LN₂中に突発的に気泡を発生させ、動的絶縁破壊電界圧(BDE_{dynamic})を取得した。発熱は通電電流とニクロムテープ両端電圧との積をニクロムテープ表面積で除した値を熱流束 W 、その積算を熱量 J として評価した。図2に直流(正極性)高電圧印加時の(a)電圧、通電電流波形、(b)熱流束、熱量波形の一例を示す。

3. 実験結果および考察

図3(a)に直流(正負極性)および交流高電圧印加時、 $P=0.10$ MPa-absにおける BDE_{dynamic}の熱量依存性を示す。同図より、熱量の増加に伴い BDE_{dynamic}が BDE_{static}から著しく低下していることがわかる。また、交流と比較して、直流の方が BDE_{static}, BDE_{dynamic}ともに低いことから、直流システムに導入する SFCL は交流システムに導入する場合よりも厳しい絶縁設計を行う必要があることが示唆される。さらに、図3(b)に $J=0.75$ J/cm²における BDE_{dynamic}/BDE_{static}の LN₂圧力依存性を示す。同図より、LN₂圧力を上昇することで BDE_{dynamic}/BDE_{static}が1に漸近することがわかる。以上より、

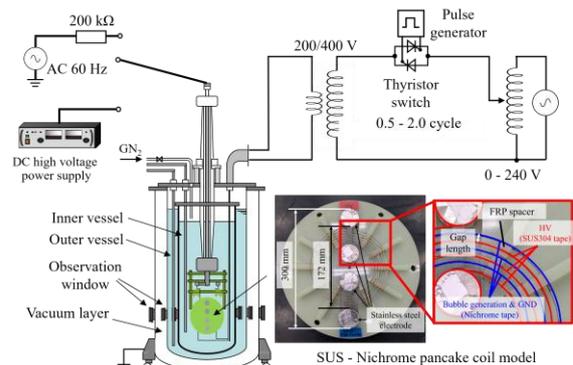


図1. 実験回路

Figure 1. Experimental circuit.

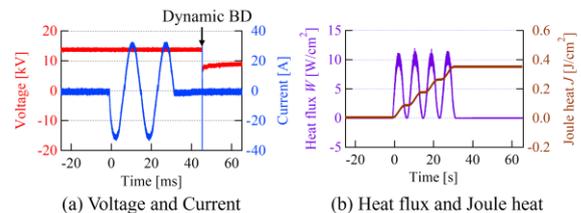


図2. 動的絶縁破壊試験の電圧、通電電流、発生熱流束、熱量波形
Figure 2. Waveforms of voltage, current, heat flux, and Joule heat at dynamic breakdown test.

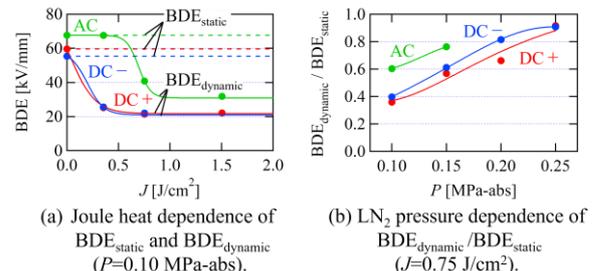


図3. LN₂の動的絶縁破壊特性

Figure 3. Dynamic breakdown characteristic in LN₂.

直流 SFCL においては、LN₂を加圧することにより動的絶縁破壊のリスクを低減でき、絶縁信頼性を向上できると考えられる。

文献

- (1) N. Hayakawa, et al.: IEEE Trans. DEL, Vol.29, No.1, pp.264-269, 2022
- (2)永縄 他: 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, B3-6, 2025

異なる生成時間と静置時間でファインバブルを付加した菜種油の密度と油温の関係

武内 亮太*, 荒岡 信隆, 高村 紀充 (福岡大学)
本間 大成, 宮寄 悟, 水谷 嘉伸 (電力中央研究所)

Relationship between Density and Oil Temperature of Rapeseed Oil
with Fine Bubble at Different Addition Time and Standing Time
Ryota Takeuchi, Nobutaka Araoka, Norimitsu Takamura (Fukuoka University)
Taisei Homma, Satoru Miyazaki, Yoshinobu Mizutani (CRIEPI)

1. まえがき

油入変圧器用の生分解性電気絶縁油のうち菜種油や大豆油等の天然エステルは、鉱油と比較すると密度や動粘度が高く、単純に鉱油を菜種油に置き換えた場合、冷却性能が劣るという問題がある。そのため著者らは菜種油の高性能化を目指して窒素ファインバブル（以下、窒素FBと記す）付加による影響を調査してきた⁽¹⁾。本稿では、窒素FBを付加した菜種油の密度と油温の関係について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

<2・1>試料作製 真空引きした容器内に未使用の菜種油（サンオーム ECO, かんでんエンジニアリング）を約840 mL 脱気注油した後、大気圧まで窒素ガス（純度 99.999%）を封入した。封入後に窒素FBを付加しない試料（生成時間0分間）は容器中で0, 30 または 60 分間静置した。一方、窒素FBを付加した試料は、自作のFB発生装置を用いて窒素FBを5分間～150分間生成した後に容器中で0, 30 または 60 分間静置した。試料数は各条件で6個ずつとした。
<2・2>密度と油温の測定方法 静置後の各試料を採取してポータブル密度比重計（DA-130N, 京都電子工業）で密度を測定した。また油温はポータブル密度比重計の表示部に示される温度を測定値として記録した。

3. 結果および考察

図1に密度の測定結果を示す。図中のプロットは平均値を、エラーバーは最大値と最小値を示している。なお、データの重なりを避けるため静置時間0分の結果を基準として30分と60分は横にずらして表示させている。図1より、生成時間の増加に伴って、密度が低下する傾向がみられた。また静置時間が短いほど、密度が低下した。本実験では、油温が生成時間の増加に伴って上昇した。油温上昇による密度への影響を評価するため、図2に密度と油温の関係を示す。点線はJIS K 2249-4 : 2011の石油製品の温度に対する密度換算および容量換算式の基本式⁽²⁾とカタログ値⁽³⁾

{0.92 g/cm³ (15°C)} から膨張係数 0.00068/°Cを求めて近似直線を引いたものである。実線は全測定結果のプロットの近似直線であり、傾き（膨張係数）は0.00080/°Cであった。点線と実線を比較すると測定結果の方が膨張係数は大きくなっている。この理由として、菜種油の換算式がないため石油製品の式を参照していることや、窒素FB付加による影響が考えられる。

なお、動粘度については、既報⁽¹⁾と同様にこれまでの実験条件では顕著な影響は見られなかった。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 22K14249 の助成を受けた。

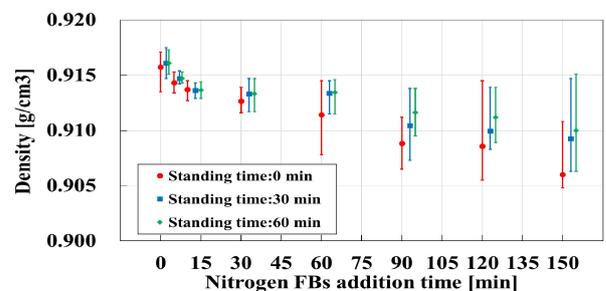


図1 密度の測定結果

Fig.1. Measurement results of density

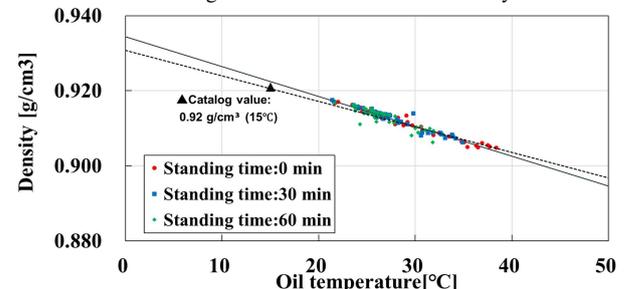


図2 密度と油温の関係

Fig.2. Relationship between density and oil temperature

文献

- (1) 荒岡ら, 令和7年電気学会全国大会, 2-043, p.47 (2025)
- (2) JIS K 2249-4 : 原油及び石油製品-密度の求め方 (2011)
- (3) https://www.kanden-eng.co.jp/special/so_eco/feature/

受配電機器絶縁物の診断作業簡易化に向けた 簡易イオン採取ツールの開発

藤原 宗一郎*, 本多 史弥, 杉谷 理紗, 三木 伸介(三菱電機(株))

Development of simple ion sampling tool for insulation diagnosis of power distribution equipment
Soichiro Fujihara, Fumiya Honda, Risa Sugitani, Shinsuke Miki (Mitsubishi Electric Corp.)

1. はじめに

当社では、受配電機器絶縁物に付着したイオンを採取し、MT法(マハラノビス・タグチ法)で解析することによる絶縁劣化診断サービスを提供している⁽¹⁾。従来のイオン採取法は、ピンセットを用いて、ろ紙を絶縁物表面に静置する煩雑な作業が必要であった。そのため、測定作業の簡易化が求められている。本報告では、測定作業をより簡便にすることを目的に開発した簡易イオン採取ツールについて述べる。

2. 実験

<2・1>簡易イオン採取ツールの仕様検討・試作

ピンセット作業不要かつ、様々な絶縁物形状からイオン採取可能とすべく、PET(ポリエチレンテレフタレート)を持ち手とし、先端に従来法と同じろ紙を貼り合わせた形状を考案し、図1に示す簡易イオン採取ツールを試作した。

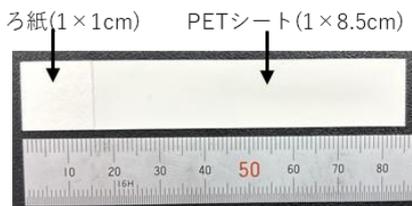


図1. 簡易イオン採取ツール
Fig1. Simple ion sampling tool.

<2・2>実験・評価方法

試作したツール自体からのイオン溶出有無を確認するため、ツール全体を純水に浸漬し、30分間の超音波洗浄処理後に得られた抽出液のイオン量をイオンクロマト分析(IC分析)により評価した。次に、ツールのイオン採取性能を明らかにすることを目的に、市場から回収した碍子やブッシング等の様々なサンプルに対し、ピンセットを用いた従来法と本ツールによるイオン採取を行い、両手法で採取したイオン量をIC分析により評価・比較した。

3. 結果と考察

<3・1>簡易イオン採取ツール自体のイオン量測定結果

図2に簡易イオン採取ツールからのイオン溶出量と、比較対象としてポリエステル絶縁物新品の表面付着イオン量の測定結果を示す。ツールからはNa⁺やSO₄²⁻が検出されたものの、新品絶縁物のイオン付着量より少ないことを確認

した。よって、ツール自体からの溶出イオン量は十分に少なく、診断結果に影響を及ぼすことはないと考えられる。

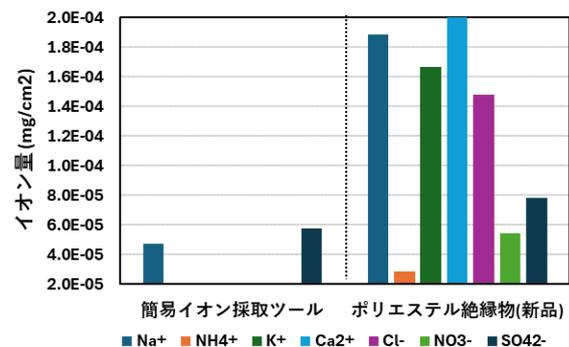


図2. 簡易イオン採取ツールからのイオン溶出量とポリエステル絶縁物新品の表面付着イオン量の比較
Fig2. Comparison of ion quantification from simple ion sampling tool and surface ion amounts on new polyester insulators.

次に、図3に従来法と本ツールによるイオン量測定結果の関係を示す。イオン種によらず高い相関(相関係数 0.96)が得られることを確認した。よって、図3の回帰式により、本ツールを用いた場合でも、従来法と同等の精度でイオン採取が可能と考えられる。今後は、本ツールのフィールド試験を進め、26年度より試運用を開始する予定である。

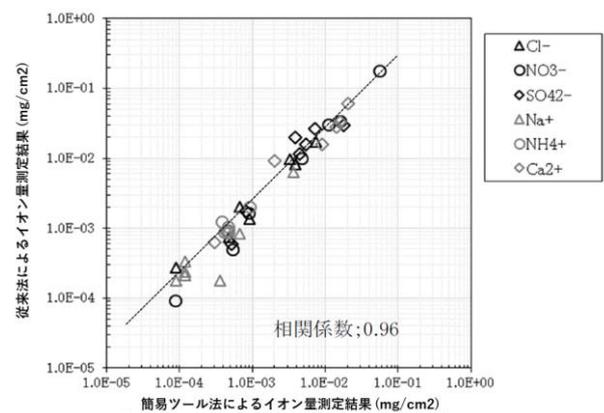


図3. 簡易イオン採取ツール法と従来法によるイオン量測定結果の関係
Fig3. Relationship between ion quantification results obtained by the simple ion sampling tool method and the conventional method.

文献

(1) 三木, 岡澤, 長谷川, 角田, 犬島: 「受配電設備絶縁物の余寿命診断技術」, 電学論 B 127 7 p.863 (2007)

Al-Mg 複水酸化物の電気伝導

市村 正也* (名古屋工業大学)

Possibility of Electrical Conduction of Al-Mg Double Hydroxide
Masaya Ichimura (Nagoya Institute of Technology)

1. まえがき

透明な導体及び半導体薄膜はディスプレイなどに不可欠である。これまで透明電子材料としては In_2O_3 , SnO_2 , ZnO などの酸化物が主として用いられてきた。一方、水酸化物の多くは絶縁体と認識されており、電子材料として応用されることはなかった。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$, AlOOH とも大きなバンドギャップを持つ透明な物質で、応用用途はこれまで化学分野に限られてきた。

本研究の目的は、水酸化物の透明電子材料としての利用である。これまで、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ に他の金属元素を混ぜ複水酸化物の薄膜を作製し、その電気伝導性を測定してきた。薄膜堆積には、簡便安価な手法であり、低温で製膜可能なドロップ蒸発法(Dorp Dry Deposition, DDD)を用いた[1]。その結果、母材の $\text{Mg}(\text{OH})_2$, AlOOH が $10^8 \sim 10^9 \Omega\text{cm}$ の抵抗率を持つのに対し、Al:Mg の組成比がおよそ 4:1 の Al-Mg 複水酸化物の抵抗率は $10^3 \sim 10^4 \Omega\text{cm}$ と数桁低いことが分かった[2]。そこで、Al-Mg 複水酸化物の電気伝導を理論的に検討するため、密度汎関数理論に基づく第一原理計算を行った。

2. 計算方法

第一原理計算はソフトウェア PHASE を用いた。擬ポテンシャルを用い、一般勾配近似(GGA)にて交換相関相互作用を計算した。実験で低い抵抗率が測定されたのは Al 組成の大きな試料であったため、Al の水酸化物の安定な構造である AlOOH (boehmite) を母体とした。その結晶構造を図 1(a) に示す。格子定数は $a=3.69$, $b=12.24$, $c=2.86 \text{ \AA}$ であり、破線で示す基本単位格子内には Al 原子 4 個、酸素原子 8 個、水素原子 4 個が含まれている。Al-Mg 複水酸化物を模擬するため、基本単位格子内で Al 一個を Mg 原子に置き換えた((3Al-1Mg)-OOH と記す)。エネルギーが最小となるよう構造緩和させたのち、電子の状態密度を求めた。

3. 結果と考察

構造緩和後の(3Al-1Mg)-OOH の結晶構造を図 1(b)に示す。原子価が小さいことを反映し、Mg への酸素の配位数が Al に比べて少なくなっている。図2に電子の状態密度を示す。電子に占有された状態の最上端をエネルギー軸の原点としている。価電子帯(エネルギーゼロ以下の状態)の最上部に空き準位があり、正孔が存在することを示している。つまり Mg が AlOOH に対しアクセプタとして働いている。したが

って、(3Al-1Mg)-OOH は p 型の伝導性を示すと考えられ、Al-Mg 複水酸化物は半導体・導体材料として利用できる可能性がある。

本研究は科研費 22K05268 の援助を受けた。

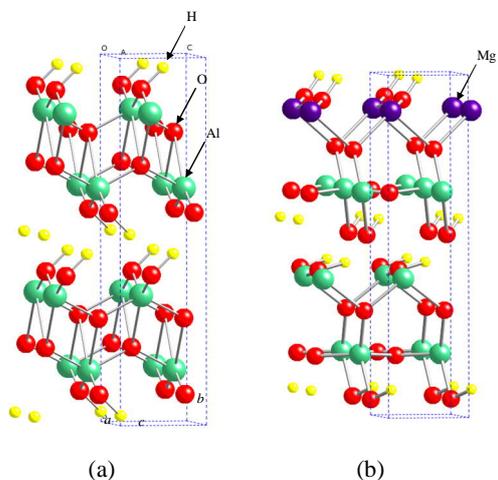


図 1(a)AlOOH の結晶構造。(b)構造緩和後の、(3Al-1Mg)-OOH の結晶構造
Fig.1. Crystal structure of (a)AlOOH, and (b) 3Al-1Mg-OOH after lattice relaxation.

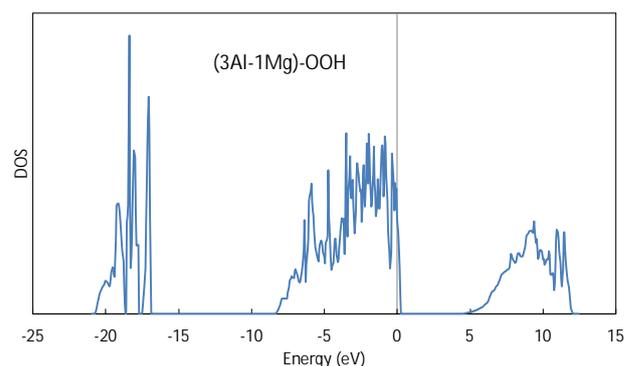


図 2 (3Al-1Mg)-OH の電子状態密度。横軸の原点は占有準位の最上端。
Fig.2. Density of states for (3Al-1Mg)-OH. The origin of the energy scale is the energy of the uppermost occupied state.

文 献

- (1) T. Li, M. Ichimura : Materials, 14, 724 (2021)
- (2) 市村・大倉：平 7 電気学会基礎・材料・共通部門大会, 3-A-a1-5

高配向性熱分解グラファイト基板上に おけるダイヤモンド結晶成長の面方位依存性

久保 歩夢*, 松谷 貴臣(近畿大学大学院),
俊成 修平(株式会社サーモグラフィティクス), 藤井 茉美 (立命館大学)

Orientation Dependence of Diamond Crystal Growth on Highly Oriented Pyrolytic Graphite Substrates

Ayumu Kubo, Takaomi Matsutani (Graduate School, Kindai University)

Shuhei Toshinari (Thermo Graphitics Co.,Ltd.) Mami N. Fujii (Ritsumeikan University)

1. 序論

AI・IoT・データセンターの普及に伴い電子デバイスの高性能化・高集積化が進み、発熱密度が増加している。このため、高放熱性ヒートシンク材料が不可欠であるが、AlやCuなど従来材料では次世代デバイスへの適用に限界がある。そこで本研究は、広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界強度、極めて高い熱伝導度を有するダイヤモンドに着目した。しかし、ダイヤモンド成膜では均一かつ全面的な被覆が困難である。本研究では、Z面およびXY面の高配向性熱分解グラファイト(HOPG)基板上でダイヤモンドのヘテロエピタキシャル成長を試み、面方位に依存した非結晶成長領域を解析することで、ダイヤモンド非結晶成長の要因と基板面方位との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 実験

本研究では、MP-CVDを用いて、Z面とXY面のHOPG基板上にダイヤモンドのヘテロエピタキシャル成長を試みた。成膜条件は、成膜時間15時間(5時間×3日)、温度を980°Cに固定し、原料ガス流量は、水素ガスの流量197.5 sccmとメタンガス2.5 sccmの条件と水素ガスの流量比199.0 sccmとメタンガス1.0 sccmの条件(以下省略し、メタンガスの流量比で表す)でZ面とXY面に成膜を行った。

成膜後、FE-SEMによる基板表面観察を行い、さらにレーザーラマン分光法を用いて成膜後の基板表面の非結晶成長箇所および成膜する前の無加工Z面とXY面基板のHOPG基板表面を測定し、分析を行った。

3. 結果及び考察

FE-SEMを用いて撮影した各成膜条件における基板表面像を比較した結果、非結晶成長箇所はZ面メタン1.0 sccm < Z面メタン2.5 sccm < XY面メタン1.0 sccm < XY面メタン2.5 sccmの順に減少することが分かった。

次に、レーザーラマン(ラマン分光法)によって得られた各試料のラマンスペクトルを図1に示す。

Z面・XY面両方で、1350 cm⁻¹および1580 cm⁻¹付近のラマンシフトに強度が大きい2つのラマンスペクトルが確認

できた。1350 cm⁻¹のラマンスペクトルは、欠陥に由来するDバンド(Dピーク)であり、1580 cm⁻¹付近のラマンスペクトルは、炭素系の物質に共通する六員環の面振動に由来するGバンド(Gピーク)であり、これらのピークはグラフェンの特徴的なピークである⁽¹⁾。DピークとGピークの強度比Rを次式で表すことができる⁽¹⁾。

$$R = \frac{\text{Dピーク強度}}{\text{Gピーク強度}} \quad (1)$$

DピークとGピークの強度比Rが小さいと、より規則的な構造・不純物の少なさを示し、強度比Rが大きいと、欠陥や不規則性の増加・不純物の多さを示す。強度比Rを導出し比較した結果、Z面においては成膜を行うと成膜する前の無加工基板より強度比が増幅し、XY面においては成膜を行うと成膜する前の無加工基板より強度比が減少する結果となった。

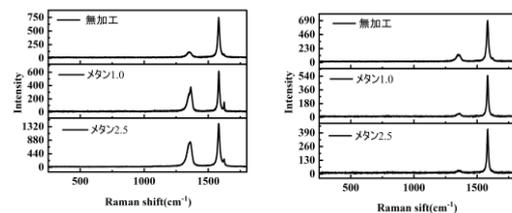


図1 非結晶成長箇所のラマンスペクトル
(左) Z面 (右) XY面
Fig.1. Raman spectra of non-crystalline
growth regions
(Left) Z-plane (Right) XY-plane

3. 結論

FE-SEMとレーザーラマンの分析により、Z面とXY面ではXY面の方が、非結晶成長箇所が少ない結果となった。得られたラマンスペクトルから考察を行った結果、非結晶成長箇所ができる原因としてHOPG基板の歪みが生じており、この歪みが結晶成長に大きな影響を与えているという結論に至った。

文献

(1)長田実, 垣花真人, TANSO 炭素, No228, 176~178, 2007

PLD 法によるニッケル酸化物 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 薄膜の作製と評価

田中 博美*、小谷 聡馬、石田 洗希、田上 大翔 (米子工業高等専門学校)

松本 凌 (物質・材料研究機構), 櫃田 英治、高野 義彦 (物質・材料研究機構、筑波大学)

Fabrication of $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ thin film using pulsed laser deposition

Hiromi Tanaka, Souma Kodani, Kouki Ishida, Hiroto Tanoue, (Yonago National College of Technology), Ryo Matsumoto (National Institute for Materials Science), Eiji Hitsuda and Yoshihiko Takano (National Institute for Materials Science, Tsukuba University)

1. 序論

近年、Ruddlesden-Popper 結晶相の 1 つである $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ において、高圧下で超伝導特性が観測された[1-2]。超伝導転移温度が約 30K と高く注目を集めている。一方で、外部印可フリーでの超伝導発現が期待されている $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 薄膜では、超伝導性が未だ観測されていない。そこで本研究ではパルスレーザー堆積 (PLD)法を用いてニッケル酸化物 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ をはじめとする $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ の薄膜作製を試みた。特に成膜時における条件を最適化し、結晶構造評価および電気抵抗の評価を行った。

2. 実験方法

PLD 法を用いて LAO 基板上に $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 薄膜を成膜した。ターゲットは La_2O_3 と NiO を $\text{La}:\text{Ni} = 4:3$ のモル比となるよう混合・焼結することで作製した。成膜条件は基板温度：690°C、酸素分圧：約 150mTorr とした。PLD 装置のパルスレーザーは周波数：10Hz、エネルギー：33mJ とした。さらに、成膜後の試料に対し、オゾン雰囲気下にて基板温度約 325°C で 1.5 時間のアニール処理を行った。作製した試料について、X 線回折 (XRD) 法による結晶構造の解析と、電気抵抗の評価を行った。

3. 結果と検討

図 1 に作製した薄膜試料の得られた薄膜の光学写真および XRD パターンを示す。光学写真から、黒色の薄膜が得られていることが分かる。バルク $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ の超伝導体の色が黒色であり、類似の構造が期待される。また、XRD パターンから基板由来のピークを除くと、 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ における (001) 面のピークが主相として得られた。また、他の RP 相 ($\text{La}_2\text{Ni}_1\text{O}_4$ や $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 等) に由来するピークは得られなかったことから、本手法により概ね単一層の $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 薄膜が作製できたと考えられる。さらに、高次の (0022) ピークが得られていることから薄膜全体にわたって高い c 軸配向性と結晶周期性を有していることが示唆される。オゾンアニール処理を行うことで薄膜の電気抵抗値は、処理前の 1.50[kΩ] から約

39%下がって、0.915[kΩ]に減少した。これは、オゾンによる酸素供給が適切になされ、薄膜内の酸素欠損が減少したためだと考えられる。今後は局所分析を用いた詳細な結晶構造解析を行う予定である。

4. まとめ

ニッケル酸化物 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ の薄膜形成を PLD 法により試みた。LAO 基板を用いて、基板温度：690°C、酸素分圧：約 150mTorr、パルス周波数：10Hz、レーザーエネルギー：33mJ の条件下で成膜を行った。その結果、ニッケル酸化物 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ を主相とする薄膜の作製に成功した。

また、オゾンアニール処理を行うことで薄膜の電気抵抗が、約 39%低減された。

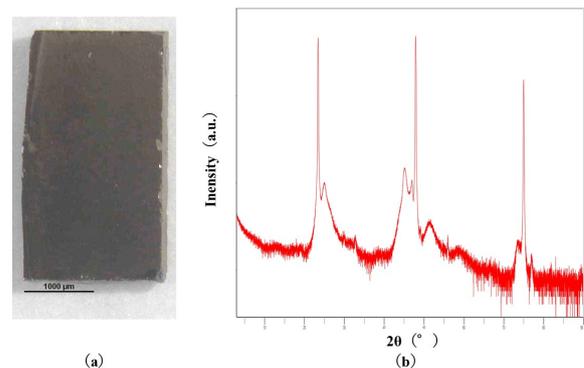


図 1 得られた薄膜の光学写真および XRD パターン
Fig.1 Optical Photograph and XRD pattern of obtained thin film.

文献

- [1] H.Sakakibara et al., Phys. Rev. B 109, 144511(2024)
- [2] Ko, E.K., Yu, Y., Liu, Y. et al. Nature 638, 935–940 (2025)

シリコン含有率の異なる アルミシリコン合金による多孔質シリコン負極の充放電特性

田上 凱*, 佐藤 慶介 (東京電機大学)

Charge-Discharge Characteristics of Porous Silicon Anodes Made from Al-Si Alloys with Different Si Content
Gai TAGAMI, Keisuke Sato (Tokyo Denki University)

1. 緒言

リチウムイオン電池 (LIB) は、スマートフォンや電気自動車をはじめとする幅広い製品に搭載されており、脱炭素社会の実現に不可欠な技術である。⁽¹⁾近年、LIB にはさらなる高エネルギー密度化と長寿命化の両立が強く求められており、この社会的需要に応えるため、新規電極材料の開発が盛んに進められている。現在、負極材料として広く用いられているのはグラファイトであるが、その理論容量には限界があり、将来的な高性能化に対して十分ではないとされる。そこで注目されているのが、グラファイトの約 10 倍の理論容量を有するシリコンである。⁽²⁾しかしながら、シリコンは充放電過程において約 300%もの体積変化を示し、それに伴う構造破壊によって電極の寿命が著しく低下するという課題を抱えている。この問題を解決するアプローチの一つとして、本研究では多孔質構造を有するシリコンの利用を行った。多孔質構造はスポンジ状の微細空隙を有し、体積変化による粒子への負荷を軽減することで構造破壊の抑制が期待できる。その作製手法として産業的に広く流通する安価な原料であるアルミシリコン合金 (Al-Si) を利用した。さらに、Al-Si 合金中の Si 含有率が与える影響を明らかにするため、Si 含有率が 15%(Al-15Si)、25%(Al-25Si)、50%(Al-50Si)の3種類の合金を用意した。

本稿では、Si 含有率の違いがサイクル特性、容量保持率に及ぼす影響について報告する。

2. 多孔質シリコン粒子の作製方法

実験手順を以下に示す。まず、脱イオン水 300 mL を入れたビーカーに Al-Si 合金粉末 10 g を加え、超音波洗浄機を用いて分散させた。ビーカーに攪拌子を入れ、ホットスターラー上で温度 30 °C、回転数 300 rpm に設定して攪拌を開始した。攪拌開始直後に 36 % HCl 溶液 30 mL を加えてエッチングを開始し、その後 30 分ごとに 15 mL ずつ追加し、合計で 120 mL を添加した。エッチングは開始から 5 時間まで継続した。反応停止のため、脱イオン水 300 mL を加えた後、生成物を吸引ろ過により回収した。ろ過の際にはエタノールを添加して迅速に溶液を通過させ、固体をフィルタ上に捕集した。回収した試料は、シャーレに移して 90 °C に加熱したホットスターラー上で乾燥させた。乾燥後に得られた固体を多孔質シリコン試料として回収した。

3. サイクル特性結果

得られた試料は、その後電池化することによって充放電試験を行った。その結果(Fig.1)、Si 含有率の違いによってサイクル特性に顕著な差が見られた。Al-25Si は初期から 50 サイクル程度まで比較的高い比容量を維持しており、初期サイクルにおける安定性に優れていることが確認された。一方で、50 サイクル以降では容量低下が顕著となり、長期サイクル安定性には課題が残る結果となった。

これに対し、Al-50Si は初期比容量こそ Al-25Si より低いものの、サイクルに伴う容量低下が緩やかであり、長期サイクルにおいて比較的安定した容量を示した。このことから、Si 含有率の増加により形成される多孔質 Si 骨格の連続性や構造的強度が向上し、充放電に伴う体積変化をより効果的に緩和できた可能性が示唆される。

一方、Al-15Si 由来試料および純 Si 試料では、サイクル初期において急激な容量低下が確認され、これは多孔質構造の不十分さや構造崩壊、ならびに電極内での導電経路の不安定化に起因すると考えられる。以上の結果より、Al-Si 合金中の Si 含有率は、多孔質 Si 電極の初期容量と長期サイクル安定性のトレードオフに大きく影響する重要な因子であり、特に Al-25Si および Al-50Si がそれぞれ異なるサイクル領域において優位性を示すことが明らかとなった。

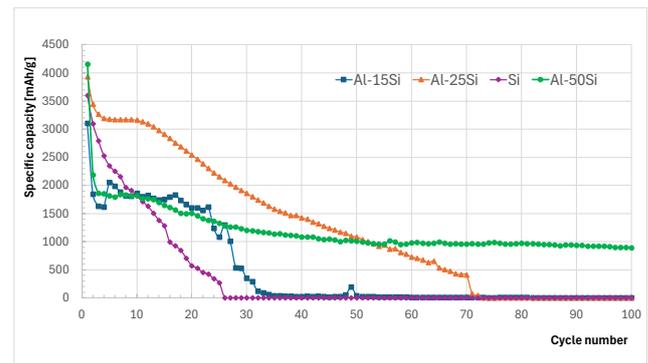


Fig1. Charge-Discharge Cycle Characteristic Evaluation

参考文献

- (1) J. -M. Tarascon, M. Armand, Nature 414, 359-367, (2001).
- (2) Uday Kasavajjula, Chunsheng Wang, A. John Appleby, Journal of Power Sources, Volume 163, Issue 2, 1003-1039, (2007).

Al/Ga置換ガーネット型酸化物の 混合固体電解質のリチウムイオン導電性

孫 瀚林*, 安部 勇輔, 熊谷 誠治 (秋田大学)

Lithium-ion conductivity of Al/Ga-substituted garnet-type oxide mixed solid electrolyte

Hanlin SUN, Yusuke ABE, Seiji KUMAGAI (Akita University)

1. 緒言

全固体リチウムイオン電池は発火することのない高い安全性を有する次世代蓄電池である。その固体電解質としてガーネット型酸化物 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO) が注目されているが、 $1100^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$ 程度の高温焼結を行う必要がある⁽¹⁾。これまで、LLZO 中の Zr サイトを Al または Ga で置換することで、その焼結特性の改善がなされた⁽²⁾。Ga 置換 LLZO は 1050°C での焼結でも高いリチウムイオン導電性が得られる。一方で、Al 置換 LLZO は、 1100°C 以上の高温で焼結することで、より高いリチウムイオン導電性が得られる。これらの材料を混合し、その混合比を見極めることで、LLZO の焼結反応の促進と高いリチウムイオン導電性の発現が期待できる。本研究では、Al/Ga 置換 LLZO の混合物を焼結し、そのリチウムイオン導電性を評価するとともに、低温にて液相状となる、あるいは焼結反応が進行する材料を添加し、その低温焼結特性およびリチウムイオン導電性を評価した。

2. 実験方法

$\text{Li}_{6.25}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Al}_{0.25}\text{O}_{12}$ (LLZA, 豊島製作所) と $\text{Li}_{6.25}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Ga}_{0.25}\text{O}_{12}$ (LLZG, 豊島製作所) に、エチルセルロースを 3% 溶解した無水エタノールを加えて混合した。LLZA と LLZG の混合比は 75:25, 50:50, 25:75 とした。調合粉は $\phi 10$ mm の内径を有する金型に充填し、ニュートンプレスおよび冷間等方圧プレスにより円柱状に成形した。この成形体をアルミナボード上に配置した後、母粉で覆い、管状炉にて 1150°C で 3 時間焼結した。その上昇レートは $5^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。 1150°C の焼結前に 750°C で 1 時間成形体を予熱した。焼結後の成形体は両面をエメリーペーパーで研磨し、マグネトロンスパッタにより Au 電極を形成した。その後、Ni タブ付きアルミラミネートフィルムに真空シールし、LCR メータ (IM3536, HIOKI) を用いて交流インピーダンス試験を行った。本測定は直流バイアス電圧 0 V, 交流電圧振幅 1 V, 周波数 8 M–10 Hz として行った。交流インピーダンス試験で得られたナイキストプロットに対して、電気的等価回路モデルを構築し、その粒界抵抗を評価した。次に、混合固体電解質の質量を 100 とし、それに対して 10 質量% の Li_3BO_3 (LBO, 豊島製作所) もしくは $\text{Li}_{5.875}\text{Y}_{0.875}\text{Zr}_{0.1}\text{Ce}_{0.025}\text{B}_3\text{O}_9$ (LYB, キヤノンオプトロン) を添加し、 950°C で焼結した成形体に対しても上記と同様の実験を行った。

3. 実験結果および考察

図 1 に異なる混合比で作製した LLZA/LLZG 混合固体電解質のナイキストプロットを示す。全ての試料において 2 つの半円弧が観測された。この 2 つの半円弧を含むナイキストプロットに対して電気的等価回路モデルを用いたフィッティングを行い、良好なフィッティング結果を得た。高周波側の半円弧が粒界抵抗 R_{gb} に相当する為、その R_{gb} を用いてそれぞれのリチウムイオン導電性を求めた。LLZA:LLZG

= 75:25 とした混合固体電解質 (LLZA75LLZG25) において 7.27×10^{-5} S/cm の高いリチウムイオン導電率が得られた。この高いリチウムイオン導電率が得られた LLZA75LLZG25 を基に、LBO または LYB を 10 質量% 添加して、低温域における焼結条件を探索した。LBO を 10 質量% 添加した LLZA75LLZG25 では、 950°C で 3 時間の焼結により、 3.63×10^{-5} S/cm のリチウムイオン導電率が示された一方で、LYB を 10 質量% 添加した LLZA75LLZG25 では、 950°C で 20 時間焼結すると 1.22×10^{-5} S/cm のリチウムイオン導電率が得られた。これは、LBO が 700°C 前後で融解して液相状に変化し、LLZG 粒子との粒界形成を促進させ、その後の 950°C 焼結でもその焼結反応が進行したと考えられる。LYB は 950°C の焼結により LLZO とともに焼結反応が進行し、その時間が長くなるほど良好な粒界が形成されたと思われる。

4. 結言

LLZA:LLZG = 75:25 とした混合固体電解質から最も高いリチウムイオン導電率が示された。LBO の添加では低温で短時間の焼結が可能であり、比較的高いリチウムイオン導電率が得られることを確認した。LYB の添加では焼結時間が長いほど、リチウムイオン伝導率の高い混合固体電解質を製造することができた。本研究では、これら低温域において焼結反応が進行する材料を添加することで、混合固体電解質のリチウムイオン伝導率を高めるための低温焼結条件を明らかにした。

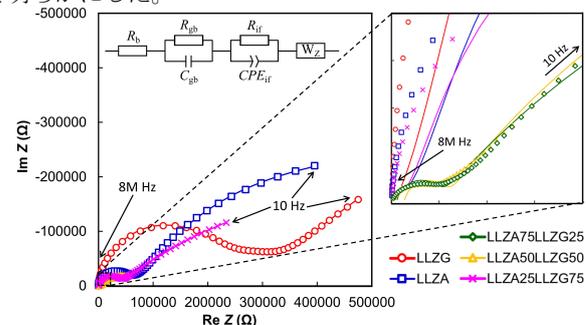


Fig. 1. Nyquist plot of the mixed solid electrolyte using LLZA and LLZG at different mass ratios

Table 1. Lithium-ion conductivity of the mixed solid electrolytes produced at different sintering temperatures and times

Sample	Sintering temperature ($^\circ\text{C}$) and time (h)	Lithium-ion conductivity (S/cm)
LLZA75LLZG25_LBO10	950°C 3 h	3.63×10^{-5}
	950°C 10 h	3.14×10^{-5}
	950°C 20 h	2.93×10^{-5}
LLZA75LLZG25_LYB10	950°C 3 h	3.67×10^{-6}
	950°C 10 h	5.89×10^{-6}
	950°C 20 h	1.22×10^{-5}
LLZA75LLZG25 (Reference)	1150°C 3 h	7.27×10^{-5}

文献

- (1) V. Thangadurai et al., *Chem. Soc. Rev.* 43 (2014) 4714–4727.
- (2) C. Chen et al., *ACS Appl. Energy Mater.*, 3(5) (2020) 4708–4719.

炭素材料の構造の違いが リチウムイオン電池の性能に与える影響

小川慶太^{1*}, 吉田伊吹², 竹島広恭³, 阿部正志², 井口弘文², 松尾啓三⁴, 田島大輔¹

(1.福岡工業大学, 2.Nash Energy Japan 合同会社, 3.株式会社 TSSP コーポレーション, 4.株式会社マツワ 3 企画)

The Effect of Structural Differences in Carbon Materials on Lithium-ion Battery Performance

Keita Ogawa, Ibuki Yoshida, Hiroyasu Takeshima, Masashi Abe, Hirohumi Iguchi, Keizou Matsuo, Daisuke Tashima

(1. Fukuoka Institute of Technology, 2. Nash Energy Japan GK, 3. TSSP Corporation CO.,Ltd., 4. Matsuwo 3 Planning Co., Ltd.)

1. まえがき

近年, リチウムイオン電池は, 高エネルギー密度・長寿命化を兼ね備えた蓄電デバイスとしてスマートフォン, 産業用機器など幅広い分野で利用が進んでいる⁽¹⁾. リチウムイオン電池性能を左右する主要な構成要素の 1 つである負極材では主に黒鉛が使われるが, 資源制約や環境負荷の観点から, より持続可能な炭素材料の開発が求められる⁽²⁾. そこで, 本研究では, 木材由来炭素の構造の違いと層間がリチウムイオン電池の負極としての容量特性に及ぼす影響を検討した.

2. 実験方法

本研究では, 原材料を熱処理で炭化が容易で収率が高いリグニン比較的多いとされている針葉樹の木材を使用することにした⁽³⁾. 材料準備として, 炭化・賦活実験は管状電気炉(アズワン株式会社, 型番 TMF-700N)により図 1 の手順で実験を行った. 炭化条件は, 木材を N₂ 雰囲気中で 600 °C まで上昇させ, 1 時間保持した. この時の昇温速度は 5 °C/min で実行した. 賦活は KOH(富士フィルム和光純薬株式会社製, 8 mol/L)水溶液を重量比 1 : 7 で混合し, 24 時間含浸させる. その後 Ni 容器(ニラコ製)に移し, N₂(福岡酸素製)雰囲気下, 昇温速度 5 °C/min, 900 °C で 1 時間保持をした. 得られた活性炭を中性に戻すために塩酸(富士フィルム和光純薬株式会社製, 0.5 mol/L)水溶液で洗浄を行い, 中性を確認後, 乾燥させ, 活性炭を得た.

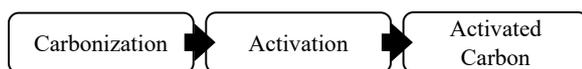


図 1 作製手順 (活性炭)
Fig.1. Create methods(Activated carbon).

木材由来炭素材料は, 図 2 の手順で作製した. 図 1 で作製した活性炭を超高温加熱炉(UTseries)Ar 雰囲気中で高温に上昇させ, 木材由来のハードカーボン(HC)を作製した.

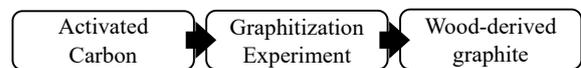


図 2 作製手順(木材由来の黒鉛)
Fig.2. Production Procedure (Wood derived graphite).

電極作成として比表面積と層間構造による充放電量の違いを見るために, 活性炭, 木材由来 HC, 一般的な電池用球状化天然黒鉛を用いてスラリーを作製し, リチウム-銅箔複合材上に塗工した. その後乾燥させ φ14 mm の円形に型抜きをし, グローブボックス内でコインセルを作成した. 充放電試験は, C レート 0.05 C(1 C : 1 時間で満充電できる電流値)で充電を行った.

3. 実験結果

比表面積分析の結果は BET 法によりマイクロ孔の比表面積が活性炭 $2.14 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{g}$, 木材由来 HC $8.00 \text{ m}^2/\text{g}$, 球状化天然黒鉛は測定不可となった. BJH 法によりイオンの拡散に有効といわれるメソ孔は活性炭 $272 \text{ m}^2/\text{g}$, 木材由来 HC $7.74 \text{ m}^2/\text{g}$, 天然黒鉛は測定不可となった⁽⁴⁾. 層間距離測定結果は XRD(SHIMADZU 製, XRD-7000)のピーク結果をもとに, 活性炭は測定不可, 木材由来 HC は 0.339 nm , 天然黒鉛は 0.338 nm , という結果が得られた. 充放電試験の結果を図 3, 4, 5 に示す. 活性炭は 1 サイクル目の充電容量が 923 mAh/g と高い結果となったがリチウムイオンの拡散が十分ではないため放電容量が 142 mAh/g に留まり, 初回効率が 15.4% と低かった. 一方, 木材由来 HC は 1 サイクル目の充電容量が 526 mAh/g と黒鉛より高い値を示したが, こちらも放電容量は 303 mAh/g と低く, 初回効率が 57.6% と同様に低い結果となった. 比較材料として用いて球状化天然黒鉛は, リチウムイオン電池の負極として安定した充放電曲線を描き, 372 mAh/g 付近の充放電容量となり効率が 93.1% と高くリチウムイオン電池の負極として優れた安定性を確認するこ

とができた。

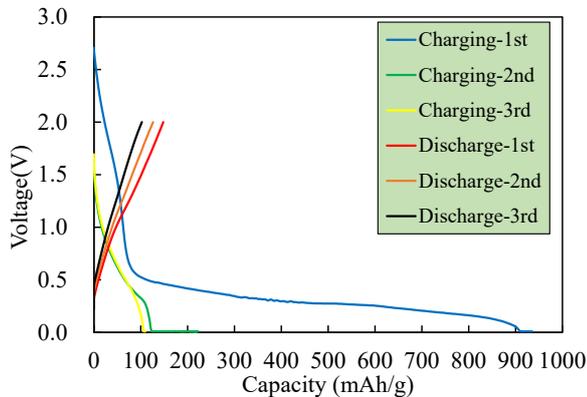


図3 充放電試験 (活性炭)
Fig.3. Charge and Discharge Test (Activated carbon).

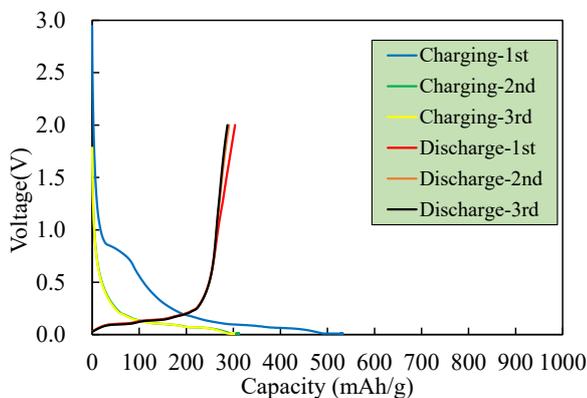


図4 充放電試験 (木材由来黒鉛)
Fig.4. Charge and Discharge Test (Wood derived graphite).

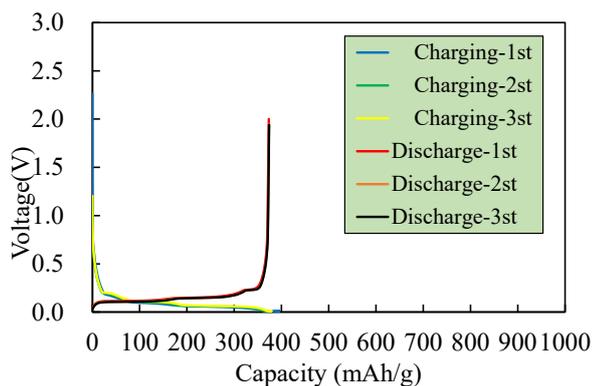


図5 充放電試験 (球状化天然黒鉛)
Fig.5. Charge and Discharge Test (Spherical Natural Graphite).

4. 考察

今回の充放電実験から比表面積が大きければ大きいほどリチウムイオンを大量に溜め込むことができ、層間が大きければリチウムイオンの拡散をスムーズにできることを確

認した。しかし、初回放電効率の結果から、活性炭やHCのように比表面積が高いと副反応によるLiイオンの消費が多く、SEI膜生成の不安定さや、活性炭奥にLiイオンが入り取り出すことができないためイオンの動きが不十分であったと考えられる⁽⁵⁾。

次に層間距離で比べてとき、木材由来HCは活性炭と比較して充電容量は小さいものの、黒鉛よりも層間が大きいためLiイオンの挿入が容易になり、容量が大きくなる傾向が見られた。初回放電効率は黒鉛と比較して低い値を示したが活性炭と比較すると改善が確認された。これは、木材の熱処理温度を高温にしたことにより黒鉛の層状構造に似た部分の発達と同時に、HC特有の乱層構造が残存したためと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、炭素材料の比表面積および層間距離の違いがリチウムイオン電池の性能がどう変化するか確認した。実験結果から比表面積が大きいほど充電容量なる一方で、副反応でLiイオンが消費され放電容量が小さくなる。層間が大きくなればリチウムを挿入、拡散が促進されるが、こちらも、副反応などの要因により黒鉛の理論容量付近でとどまるということが示された。今後は、コストの観点から木材を高温で処理する作製方法ではなく、低温熱処理で高容量の負極を作製することを目指す。

文献

- (1) 吉野彰, 「モバイル機器を支える電池-これからも世界を変えるリチウムイオン電池-」科学と教育, Vol. 66, No. 6, pp. 296-299, (2018)
- (2) P. Molaiyan, G. S. Dos Reis, D.Karuppiah, C. M. Subramaniyam, F. Garcis-Alvarado, U.Lassi, 「Recent Progress in Biomass-Derived Carbon Materials for Li-Ion and Na-Ion Batterise-A Review」, Batteries, Vol. 9, No. 2, 116 pp. 3-4, (2023)
- (3) 佐野寛, 本庄孝子, 「バイオマス半単価の原理と効用」高温学会誌, pp. 43-49, (2011)
- (4) 曾根田靖, 山口貴史, 井元清明, 児玉昌也, 森下隆広, 折笠広典, 「MgO 鑄型メソポーラス炭素のリチウムイオンキャパシタ特性」TANSO, pp. 57-59 (2013)
- (5) 櫻井庸司, 「リチウムイオン電池・全固体電池の材料技術-プロセス・評価技術まで-」, 科学情報出版株式会社, pp. 32-33(2021)

ナノグラニューラー薄膜のNTCサーミスタ特性評価

谷村 洋*, 岩佐 忠義 池田 賢司, 小林 伸聖 (電磁材料研究所)

Evaluation of NTC Thermistor Characteristics of Nanogranular Thin Films

H. Tanimura*, T. Iwasa, K. Ikeda, N. Kobayashi

(Research Institute for Electromagnetic Materials, DENJIKEN)

1. 背景

ナノグラニューラー材料 (Nanogranular Materials: NGM) は、絶縁体からなる母相 (マトリックス) 中に、ナノメートルサイズの金属粒子 (グラニューラー) が分散した構造を有する複合材料であり、磁性材料、高誘電材料等として優れた特性を示すことで知られている[1,2]. NGM の伝導特性に関して、金属の組成が多い場合には各グラニューラーが接触 (パーコレート) することで、金属的な電気伝導性を示す。一方で金属の組成が少ない領域では、各グラニューラーは互いに直接接触することなく孤立した状態にあるが、電子がグラニューラー間をトンネル効果によりホッピングすることで、電気伝導性が発現する。このように NGM の電気抵抗は、金属グラニューラー組成に強く依存し、絶縁体レベルから金属に近い低抵抗レベルまで、非常に広いオーダーにわたって制御可能である。また、トンネル伝導における電子のトンネル確率は試料温度にも依存し、一般的に材料の電気抵抗は試料温度の上昇とともに減少する傾向を示すが、その温度依存性が現れる温度領域は、マトリックスとして用いられる絶縁体材料の種類に強く依存することが知られている。絶縁体として酸化物を用いた NGM では、電気抵抗が顕著な温度依存性を示す温度領域は数十 K 程度の低温域に限られる場合が多く、室温付近では比較的緩やかな変化しか示さないことが一般的であった[3]. これに対し、我々は絶縁体にフッ化物を用いた NGM において、室温以上の温度領域において電気抵抗が大きく減少することを見出した。このような特性は、NGM を温度センサーや温度補償素子などに用いられるサーミスタ材料として応用できる可能性を示すものであり、実用的な観点からも重要である。本研究では、絶縁体マトリックスに BaF₂、金属グラニューラーに Co を用いた NGM を主な対象とし、Co の組成比を変化させた際に、電気抵抗の温度依存性がどのように変化するかを系統的に調査した。

2. 実験

NGM は、スパッタリングターゲットに BaF₂ および Co を用いたタンデム式スパッタリングによりガラス基板上に成膜した。この際、Co にかかる電力を調整することにより Co

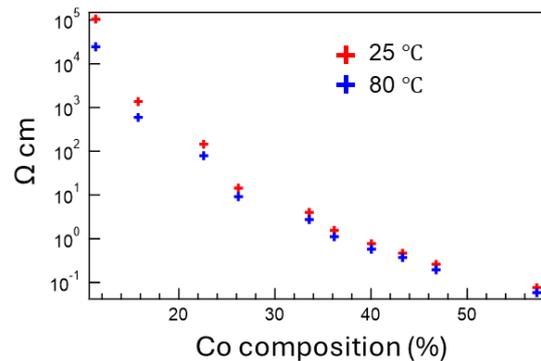


図1. 異なる Co 組成を有する試料の、室温と 80°C における電気抵抗率の変化。

組成の異なる試料を作成した。試料の結晶構造を XRD により測定し、電気抵抗は温度制御が可能なプローブステーションを用い、室温~80°Cの温度領域の電気抵抗を、大気条件下 4 端子法により決定した。

3. 結果と考察

図 1 に、室温および 80°C で測定した Co-BaF₂系 NGM の抵抗率の、Co 組成依存性を示す。Co の組成を変化させることにより、室温の電気抵抗を 6 桁程度の幅で制御可能であることがわかる。また、測定した温度領域において Co 組成の小さな系ほど大きな抵抗率の減少を示す。Co11%組成の試料においては、室温から 80°C までで 78%の抵抗減少率が観測された。これは現行の NTC サーミスタ材料である MnNiCoO₄ が示す 80%の抵抗減少率[4]に近く、NGM のサーミスタ材料としての有用性を示す結果であると言える。

講演では、NGM 試料の温度依存性をより詳細に示すとともに、他の金属・絶縁体を用いた系と比較し、NGM のサーミスタ特性について検討する。

文 献

- [1] N. Kobayashi, et al., Nat. Commun. 5, 4417 (2014)
- [2] Y. Cao, N. Kobayashi, et al. Acc. Mater. Res. 6, 979 (2025)
- [3] S. Mitani, et al., J. Magn. Magn. Mater. 165, 141 (1997)
- [4] K. Park, et al., J. Korean Phys. Soc., 49,585 (2006)

バイオマスプラスチックを使用した ノンハロゲン難燃ケーブルの開発および評価

加茂 司*, 山内 光典, 原 雄一 (矢崎エナジーシステム (株))

Development and evaluation of halogen-free, flame-retardant cables using bio-based plastics

Tsukasa Kamo*, Mitsunori Yamauchi, Yuichi Hara (Yazaki Energy System Corporation)

As part of its efforts to address climate change, in October 2021 the Government of Japan announced a medium-term target of reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 46% by fiscal year (FY) 2030 relative to FY2013 levels. It has also stated aims to reduce GHG emissions by 60% by FY2035 and by 73% by FY2040, relative to FY2013 levels. Among the strategies to curb GHG emissions, the utilization of biomass has attracted increasing attention. In this study, we developed EM 600V EEF/F, a halogen-free flame-retardant cable that employs bio-based plastics produced from plant-derived bioethanol as the feedstock, and conducted performance evaluations; herein, we report the results.

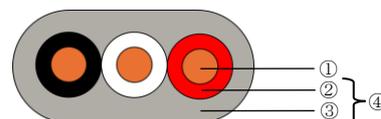
1. まえがき

日本政府は気候変動問題への取り組みとして 2021 年 10 月に温室効果ガスの排出削減目標を定め、中期目標として 2030 年度に 2013 年度から 46%削減することを目指す¹⁾。また、2035 年度、2040 年度において、温室効果ガスを 2013 年度からそれぞれ 60%、73%削減することを目指す²⁾。その中で温室効果ガスの排出を抑制していくための方策の一つとして、バイオマス（再生可能な、生物由来の有機性資源）の利用が注目されている³⁾。そこで、植物由来のバイオエタノールを原材料として製造されているバイオマスプラスチックを使用してノンハロゲン難燃ケーブルである EM 600V EEF/F を開発し、特性評価を行ったのでその結果を報告する。

2. 開発品

<2.1> 開発概要

本開発はノンハロゲン難燃ケーブルである EM 600V EEF/F の被覆材にバイオマスプラスチックを使用したケーブルである。従来のケーブルは一般的に石油を精製したナフサから製造されるプラスチックを使用しているが、本開発品は植物から得たバイオエタノールをエチレン化し、そのエチレンを重合したバイオマスプラスチックを被覆材に使用している。EM 600V EEF/F（以下 EM EEF）は図 1 に示すように軟銅導体（以下導体）、ポリエチレン絶縁体（以下絶縁体）、耐燃ポリエチレンシース（絶縁体保護層。以下シース）からなるケーブルである。被覆材は絶縁体とシースで構成されている。



- ①annealed copper conductor
- ②polyethylene insulation
- ③flame-retardant polyethylene sheath
- ④covering materials(insulation and sheath)

図 1. EM 600V EEF/F の構造

Fig.1 Structure of EM 600V EEF/F

本開発品は絶縁体にバイオマスポリエチレン、シースにバイオマスポリエチレンとバイオマス EVA（エチレン酢酸ビニル共重合体樹脂）を使用し、被覆材中にバイオマス材料を 25%以上含有しているケーブルである。

<2.2> 評価結果

表 1-1、1-2 に評価結果を示す。なお、導体直径 2.0mm、3 心の EM 600V EEF/F を試作して評価を行った。

表 1-1 評価結果

Table1-1 Result of test

項目 ⁴⁾	単位	規格値	開発品	従来品
水中耐電圧	-	2.5kV/1分	破壊なし	破壊なし
絶縁抵抗	MΩ・km	2,500≧	6,969	6,143
長期耐熱寿命 ^{5)※1}	℃	75≧	87	81
耐候性 ^{6)※2}	%	50≧	97.9	96.5

※1 40,000H 経過時点で伸び残率が 50%になる温度を推定

※2 3,000H 経過時点の伸び残率を測定。スガ試験機株式会社製サンシャインウェザーメーターを使用。

表 1-2 評価結果

Table1-2 Result of test

項目 ⁴⁾		単位	規格値	開発品	従来品	
引張	絶縁体	引張強さ	MPa	10≧	15.6	15.1
		伸び	%	350≧	531	521
	シース	引張強さ	MPa	10≧	13.2	12.3
		伸び	%	350≧	618	595
加熱後引張	絶縁体	引張強さ 残率	%	80≧	95.0	93.8
		伸び残率	%	65≧	99.6	95.1
	シース	引張強さ 残率	%	80≧	93.2	99.6
		伸び残率	%	65≧	96.0	102
加熱変形	絶縁体	%	10≦	0.7	0.7	
	シース	%	10≦	5.6	5.6	

表 1-1、1-2 に示す通り、バイオマスプラスチックを被覆材に使用した開発品と従来品と比較して同等の特性を有することを確認した。

<2.3> 二酸化炭素排出量削減効果

本開発品は被覆材中の石油由来プラスチックをバイオマスプラスチックに置き換えている。本開発では Braskem S.A. のバイオマスポリエチレンとバイオマス EVA を使用しており、Braskem S.A. が公表している植物栽培からバイオマスプラスチック製造までにおける二酸化炭素（以下 CO₂）排出量を石油由来のポリエチレンおよび EVA と比較した CO₂ 排出削減量はそれぞれ(1),(2)の通り⁷⁾。

バイオマスポリエチレン : 5.0 kg of CO₂e/kg・・・(1)

バイオマス EVA : 4.5 kg of CO₂e/kg・・・(2)

開発品はバイオマスプラスチックを 25%以上使用している。(1),(2)より従来品の被覆材と開発品の被覆材を比較した 1kg 当たりの CO₂ 削減量は(3)の通り。

被覆材 1kg 当たりの CO₂ 削減量（従来品比）

1.49 kg of CO₂e/kg of covering materials・・・(3)

被覆材にバイオマスプラスチックを使用することで従来品と比較して被覆材 1kg あたり 1.49 kg の CO₂ を削減できる。

3. まとめ

本開発では、気候変動問題への取り組みとして日本政府が掲げた温室効果ガス削減目標の発表を受けて、温室効果ガス排出抑制に効果があるバイオマスプラスチックを利用したノンハロゲン難燃ケーブルの開発および評価を実施した。バイオマスプラスチックを用いてノンハロゲン難燃ケーブルである EM 600V EEF/F の被覆材を開発し特性評価を行った結果、JIS C3605 で定められる特性について評価し、規格を満たすことを確認できた。今後はバイオマスプラスチックを利用したノンハロゲン難燃ケーブルの製品化に向

けて開発および評価を行っていく予定である。

文 献

- 1) 日本の NDC（温室効果ガスの排出量削減目標）,2021.10.22
- 2) 日本の NDC（温室効果ガスの排出量削減目標）,2025.2.18
- 3) 地球温暖化対策計画,2021.10.22
- 4) JIS C3605 600Vポリエチレンケーブル,2022
- 5) 電気用品安全法 通達 別表第十一「電気用品に使用される絶縁物の使用温度の上限値」,2013
- 6) JIS K7350-4 プラスチック実験室光源による暴露試験方法－第4部：オープンフレームカーボンアークランプ,2008
- 7) Braskem Releases Updated Life Cycle Assessment of Its greenT Bio-based Portfolio,2025.10.13

2層パッチ構造を用いた液晶装荷 ミリ波リフレクトアレー

森武 洋*, 井上 曜(防衛大学校)

Liquid Crystal Loaded Milliwave Reflectarray with Double Layer Patch
Hiroshi Moritake, Yo Inoue (National Defense Academy)

1. はじめに

100 GHz 以上のミリ波は次世代無線通信での実用化に向けて利用の期待が高まっている。電波の周波数が高くなると直進性が増すため、ビルの影などカバレッジホールへの対応も必要となる。一方、液晶は誘電率に大きな異方性を有し、電界に対して高い応答性を示すことから、高周波への応用が期待されている。しかし、高周波デバイスに液晶を応用する際、数 100 μm と非常に厚い液晶層が必要となるため、短い応答時間を実現するのは困難である。

そこで本研究では、2層パッチ構造を取り上げ、下部誘電体層を液晶とすることにより比較的薄い液晶層において大きな位相変化が実現できないかについて検討したので、その結果について報告する。

2. 結果及び検討

本研究では正方形パッチの単位セルを取り上げ、リフレクトアレーの基本特性について検討する。実際には、アンテナ分野では様々な形状の単位セルが報告されている。本研究で検討した単位セル構造の解析モデルを図 1 に示す。図 1(a)は従来の 1 層の正方形パッチセルの断面構造を表しており、図 1(b)は 2 層の正方形パッチセルの構造を示している。また図 1(c)はこれらのパッチセルの上面図である。誘電率が変化する層である液晶層の厚さは、液晶の応答時間を考慮して 50 μm とした。本研究では、電磁界シミュレーター (CST Studio Suite) を用いて解析を行った。

図 2(a)は 1 層パッチ構造について、パッチの 1 辺を 0.77 mm としたときの液晶分子が基板界面に対して 0 度から 90 度まで傾いた時の反射位相の周波数依存性を示している。この図から、分子が基板から起き上がるにつれて位相が変

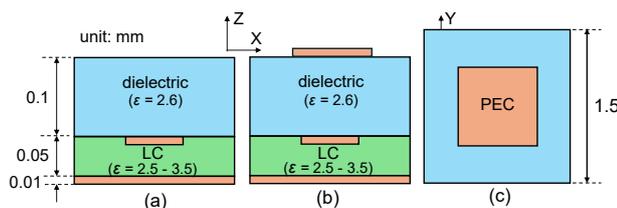


図 1 シミュレーションに用いたパッチアレーの単位セルの構造 ((a)1 層パッチセル、(b)2 層パッチセル、(c)パッチセルの上面図)

化する周波数が低周波側にシフトしていることがわかる。一方、2層パッチ構造の場合、位相が変化する周波数範囲が拡大していることがわかる。100 GHz 付近での液晶分子が基板界面に対して 0 度と 90 度における位相変化の最大値は 1 層パッチは 313 度、2 層パッチは 316 度であり、位相差の最大値はあまり変化が見られなかった。

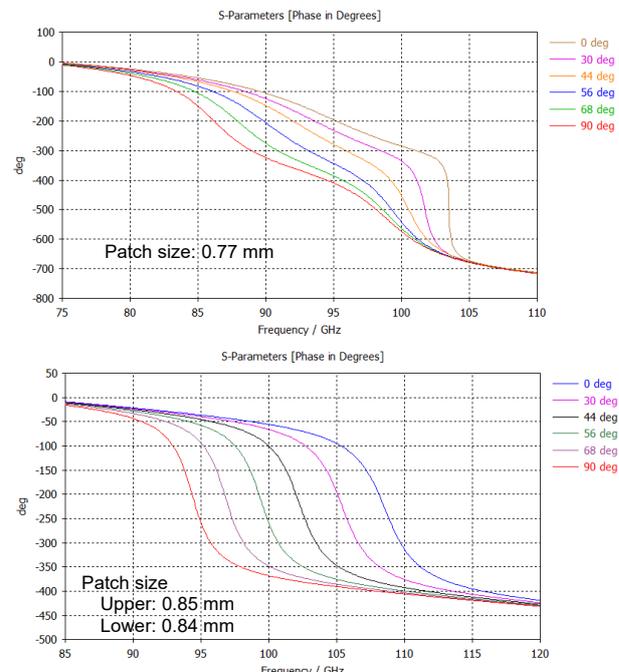


図 2 (a)1 層パッチセル及び(b)2 層パッチセルにおける反射位相の周波数依存性

3. まとめ

2 層パッチ構造の液晶装荷ミリ波リフレクトアレーを設計したところ最大位相変化量は 1 層パッチからほとんど増加がみられなかったが、位相変化する周波数帯域が広がることが確認できた。

文献

- (1) T. N. Lang, Y. Inoue, and H. Moritake: IEICE ComEX, **13**, 235~239 (2024)
- (2) 森武 洋・井上 曜: 令 7 電気学会全大, No.2-054 (2025)

乾燥 HPC 薄膜の湿度による液晶転移

寺西 加奈*, 宇戸 禎仁 (大阪工業大学)

Humidity-induced liquid crystalline transition of dried HPC thin film
Kana Teranishi, Sadahito Uto (Osaka Institute of Technology)

1. 実験目的

医薬品添加剤や食品添加物の結合剤として使用されているヒドロキシプロピルセルロース (Hydroxypropyl Cellulose : HPC) は、水との混合でコレステリック液晶相を発現し、らせん構造による選択反射特性を持つ。本研究では、HPC 水溶液をスライドガラスに滴下し乾燥させた薄膜と、気化した各溶媒との反応を観察した。固体の乾燥フィルムは、液晶薄膜よりも安定に長時間空气中に保つことができる。

2. 実験

本実験で使用した HPC は、Hydroxypropyl Cellulose、3~6 mPa·s (品番 H0473, 東京化成工業株式会社) である。

まず、粉末の HPC を純水に溶かして、HPC 濃度 32wt% の水溶液を作製し、混練時に発生した気泡を除去するため、室温で 24 時間放置した。この水溶液をスライドガラス上に滴下し、薄膜化した。この薄膜を 24 時間程度室温で放置して自然乾燥させた。

作製した乾燥 HPC 薄膜を水蒸気とエタノール蒸気をそれぞれ含む 2 種類の気体に曝露し、選択反射の出現を観察した。HPC 水溶液は、濃度 58wt%~66wt% になると液晶相が現れ、選択反射による呈色が観測される。

水蒸気の曝露実験では、図 1 に示すようにガラス容器の底一面に水を張り、容器内部の支持台の上に水がかからないように乾燥 HPC 薄膜を置いた。同様に、エタノール蒸気の実験では、ガラス容器に乾燥 HPC 薄膜を入れ、薄膜にかからないようにエタノールを滴下し気密にすることで、エタノール蒸気に曝露した。それぞれの薄膜について、室温で時間を追って観察した。

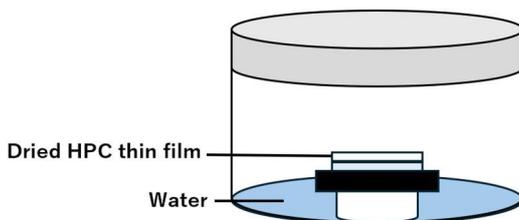


図 1 乾燥 HPC 薄膜の水蒸気による曝露実験

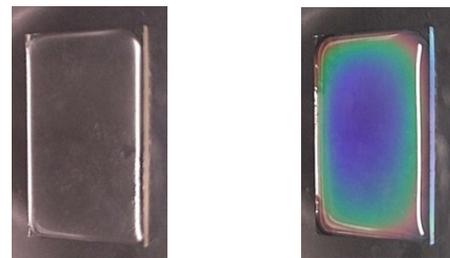
Fig.1 Exposure of dried HPC thin film to water vapor

3. 結果と考察

水蒸気と乾燥 HPC 薄膜の反応を観察したところ、図 2 に示すように、鮮やかな選択反射特性が観察された。この選択反射は実験開始から約 24 時間から観測され、約 4 日間選択反射光が確認された。これは乾燥して液晶相が失われた薄膜が水蒸気から水分を吸収することで液晶相を取り戻したことを意味している。時間経過によって、HPC 濃度 66wt% 付近で見られる紫色の選択反射光から 58wt% 付近で見られる赤色の選択反射光へシフトしていた。これは薄膜中の水分量の増加に伴い、薄膜の濃度が低下し、らせんピッチが変化したためだと考えられる。

エタノール蒸気の曝露実験では、約 4 時間後に水蒸気と同様に選択反射が観察され、液晶相を取り戻すことが分かった。これらのことから、乾燥 HPC 薄膜は水蒸気とエタノール蒸気に応答して液晶相へ転移することが明らかになった。HPC 液晶は粘性が高く、薄膜作製時に混入する気泡を取り除くことが困難なことから、均一な薄膜を作製することが難しい。しかし、今回使用した濃度 32wt% の水溶液は、液晶性を示す濃度に到達していないが粘性が低いため、均質な薄膜を容易に製作することができた。

今回の乾燥 HPC 薄膜の液晶転移を利用する方法は、新たな液晶の応用形態として興味深い。



(a) 乾燥 HPC 薄膜 (b) 液晶相を示す HPC 薄膜

(a) Air-dried HPC thin film

(b) HPC thin film in the liquid crystalline phase

図 2 水蒸気によって現れる選択反射

Fig.2 Appearance of selective reflection due to humidity

固相法で作製した BaTiO₃ への レーザーアニールによる影響

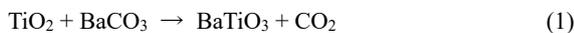
小川 耀司*, 松谷 貴臣, 津山 美穂 (近畿大学)

Effects of Laser Annealing on BaTiO₃ Prepared by the Solid-State Reaction Method

Yoji Ogawa, Takaomi Matsutani, Miho Tsuyama (Kindai University)

1. 序論

チタン酸バリウム(BaTiO₃)はペロブスカイト型結晶構造を有する強誘電体であり、優れた誘電率と圧電性を持つ。同じくペロブスカイト型結晶構造を有する強誘電体のチタン酸ジルコン酸鉛{Pb(Zr,Ti)O₃}と異なり有害物質の鉛を含まないため、環境面での利点がある。その特性から、積層セラミックコンデンサ、超音波振動子等の幅広い分野の電子機器に用いられており、我々の生活にとって欠かすことのできない材料である。BaTiO₃の代表的な合成法として、固相法がある。固相法とは、二種類以上の固体原材料粉末を混合し、高温焼成で反応を進行させて目的化合物を合成する方法である⁽¹⁾。BaTiO₃を作製する際の固相法の原材料には一般的に炭酸バリウム(BaCO₃)と酸化チタン(TiO₂)が用いられ、合成時の反応式は



となる。式(1)から BaCO₃を原材料として用いる場合、合成時に温室効果ガスの CO₂、条件によっては CO の発生が懸念される。このことから本研究では水酸化バリウム{Ba(OH)₂・8H₂O}と酸化チタン(TiO₂)を原材料とした。合成時の反応式は式(2)である。



固相法は比較的容易な合成法であるが、作製した BaTiO₃は低緻密な傾向が確認されている。本研究では、高輝度レーザーパルスを材料表面に照射し、表面改質を行うレーザーアニール法に着目し、固相法により作製した試料の緻密化による特性改善を目指した。

2. 実験方法

原材料となる Ba(OH)₂・8H₂O と TiO₂の粉末を電子天秤で mol 比を調整し、乳鉢にて 15 分間混合した。錠剤成型器に 80 kN を加えて、タブレット(φ 12 mm)に成型し、卓上マッフル炉を用いて 1150℃で仮焼した。仮焼した試料を粉末状になるまで粉碎し、再度タブレットに成型した後、1150℃で本焼を行った。本焼した試料に対し、大気中でレーザーアニール処理を施した。X線回折装置(XRD)を用いて得られた X線スペクトルから、結晶性を評価した。また、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて試料表面の微細構造を観察した。

3. 結果及び考察

図 1 は、(a)アニール未処理の BaTiO₃およびレーザー出力 3 GW/cm²、カバレッジ(重ね打ち率)(b)100%、(c)10000%でアニールした BaTiO₃の SEM 像である。図 2 は、各試料の XRD による X線回折スペクトルを示している。

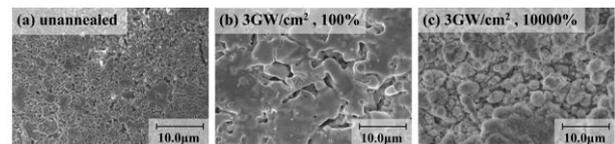


図 1 BaTiO₃の SEM 像: (a)未処理, (b)レーザー出力 3 GW/cm²・カバレッジ 100%でアニール, (c)レーザー出力 3 GW/cm²・カバレッジ 10000%でアニール
Fig.1. SEM micrographs of BaTiO₃: (a) unannealed; (b) laser-annealed at a power density of 3 GW/cm² with 100% coverage; (c) laser-annealed at 3 GW/cm² with 10000% coverage.

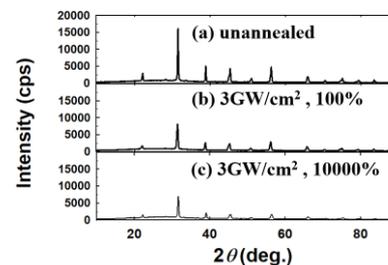


図 2 BaTiO₃の XRD 回折: (a)未処理, (b)レーザー出力 3 GW/cm²・カバレッジ 100%でアニール, (c)レーザー出力 3 GW/cm²・カバレッジ 10000%でアニール
Fig.2. XRD diffraction patterns of BaTiO₃: (a) unannealed; (b) laser-annealed at a power density of 3 GW/cm² with 100% coverage; (c) laser-annealed at 3 GW/cm² with 10000% coverage.

図 1 より、レーザー出力 3 GW/cm²、カバレッジ 100%、10000% でアニールを施すことで、BaTiO₃表面の緻密化が確認できる。また図 2 より、アニール後では回折強度は低下するものの結晶構造は維持されていることがわかる。

4. 結論

固相法で作製した BaTiO₃にレーザーアニール法を施すことで、結晶構造を崩さない表面の緻密化を可能とした。

文 献

(1)太田健一郎:無機工業化学, pp.125 (2002)

FEM-EK 法で使用する電極の電気化学特性比較と等価回路解析

後藤 満開, 相上 和哉, 小原 直子, カビール ムハムドゥル(秋田大学)
佐藤 友祐 (三和テッキ株式会社)

Comparison of Electrochemical Properties of Electrodes Used in FEM-EK Method and
Equivalent Circuit Analysis

Mankai Goto, Kazuya Aigami, Obara Naoko, Mahmudul Kabir (Akita University)
Yusuke Sato (Sanwa Tekki Corporation)

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災後、福島第一原子力発電所事故が発生した。この事故によって拡散されたセシウム(^{137}Cs)は土壌に吸着されやすく半減期が約30年と長いこと、長期間環境に悪影響を及ぼす恐れがある。居住地における汚染土壌は重機で掘削し除去されているが、問題点として山間部などに重機が入り込めないこと、掘削により生じた汚染土壌の仮置き場や処理場が必要になることが挙げられる。そこで汚染土壌浄化技術として、水平電極式動電(Flat Electrode Method Electro Kinetic; FEM-EK)法が考案された。この手法は、地中に陽極として小さな電極を埋め込み、地表にシート状の陰極を敷き、土壌に対して垂直方向に動電処理を行うことで汚染物質を地表付近に集め、土壌汚染の原因となっている金属を回収することを目的としている^[1]。そこで、この陰極の組成が電氣的にどのような役割を果たしているのか調べるため、陰極にセシウム吸着材として使用したゼオライトの質量比と、作製過程の一つであるプレス圧を変えた計20種類の陰極の電気化学特性を測定する。

2. 測定方法

インピーダンスアナライザ 6500B(桑木エレクトロニクス)を使用し、陰極のバルクにおける電気化学インピーダンスを測定する。周波数範囲が100 Hz~5 MHzであり、測定点数が100点である。バルクとは陰極を構成する素材を粒子として等価したものの総称である。また、測定した電気化学インピーダンスから、ゼオライト質量比の変化によって陰極の等価回路がどのように変化するかを考察する。

3. 測定結果・考察

測定したバルクの容量成分を表1に示す。表1よりすべてのゼオライト質量比において、プレス圧が上昇するにつれて容量成分が増加している。これはプレス圧が増加するにつれ陰極の厚さが減少していくからだと考えられる。また、すべてのゼオライト質量比において0 wt%から5 wt%にかけて容量成分が増加し、その後は減少している。ゼオライト質量比の違いによる容量成分の変化については等価回路を用いて考察する。例として、プレス圧10 MPa、ゼオラ

イト質量比0 wt%の電極の容量成分を C_b とすると表1より $C_b=37.5$ pFである。また、5 wt%の電極の容量成分は80.7 pFであるため、コンデンサの性質を踏まえると、0 wt%から5 wt%にかけて43.2 pFの容量成分が並列に接続されたと考えられる。この43.2 pFをゼオライト質量比5 wt%分の容量成分 C_{bz} とする。そして、ゼオライト質量比が5 wt%から10 wt%にかけて容量成分が減少しているということは C_{bz} 同士が直列に接続されていると考えられる。この様子を図1に示す。そして図1の回路における合成容量を求めたところ59.1 pFとなり、測定値である74.7 pFとの誤差率は20.9%となった。同様に20種類すべての電極において合成容量の誤差率を求めたところ平均9.36%となった。これより、誤差は多少あるが、ゼオライト質量比の増加に伴う等価回路の変化が判明したと考えられる。

表1 プレス圧が10 MPaのときのバルクの容量成分

質量比 [wt%]	圧力 [MPa]			
	10	20	30	40
0	37.5	59.4	61.1	81.3
5	80.7	89.6	95.0	112.7
10	74.7	76.0	90.9	95.3
15	60.9	70.3	84.9	105.3
20	52.3	59.9	71.8	86.1

※ 容量成分の単位はpFである。

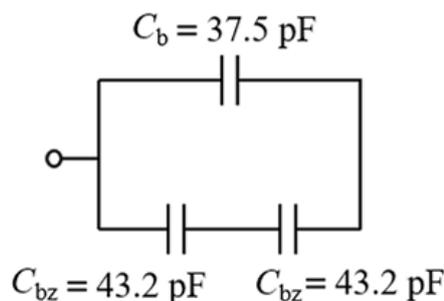


図1 10 MPa, 10 wt%における電極バルクの等価回路

(1)岸田拓也, カビール ムハムドゥル, 鈴木雅史, 中島春介:
“水平電極式動電法(FEM EK 法)を用いた汚染土壌の修復”,
静電気学会誌, 第41巻, 1号, pp.51-56 (2017)

TiO₂-PDMS 複合液滴発電素子の帯電特性評価

鈴木 悠大*, 山中 一翔, 青木 裕介 (三重大学)

Evaluation of Charging Characteristics of a Droplet-based Electricity Generator Using TiO₂-PDMS Composite
Yuta Suzuki, Kazuto Yamanaka, Yusuke Aoki (Mie University)

1. まえがき

液滴発電素子 (Droplet-based Electricity Generator : DEG) の発電性能向上を目的として, ポリジメチルシロキサン (PDMS) への酸化チタン (TiO₂) 粒子の複合化を検討してきた(1)。従来は, 負荷抵抗条件を変化させて取得した $I-V$ 特性から開放電圧や短絡電流を推定し, DEG の性能評価を行ってきた。また, これらの値と静電容量の推定に基づき, 帯電電荷量の評価も試みてきた。しかし, 静電容量の推定値は測定系の寄生成分の影響を受ける可能性があり, 実際の帯電電荷量の評価には不確かさが含まれる。本研究では, DEG を等価的に RC 回路として扱い, 液滴接触後の放電過程における出力電流を時間積分することで, 発電過程で移動した電荷量を直接評価した。本発表では, TiO₂との複合化が DEG の帯電特性および発電性能に及ぼす影響について報告する。

2. 実験方法

図1に DEG の構造と測定系を示す。DEG は基板上に形成した PDMS 系誘電膜と電極から構成される。試料には, エチルシリケート末端 PDMS を母材とし, TiO₂微粒子を体積分率 2.5 vol% および 5 vol% 添加した複合材料を用いた。TiO₂粒子を均一に分散した後, 熱硬化により複合体を作製した。比較のため, TiO₂を含まない PDMS 単体試料も同条件で作製した。約 60 μ L の液滴を高さ 6 cm から DEG に滴下し, 外部負荷抵抗を変化させながら出力電圧および電流を測定し, $I-V$ 特性を取得した。取得した $I-V$ 特性から, 液滴および素子を含む等価回路モデルに基づき液滴抵抗を推定した。DEG は等価的に抵抗成分と容量成分からなる RC 系として記述でき, 液滴接触後に蓄えられた電荷が放電

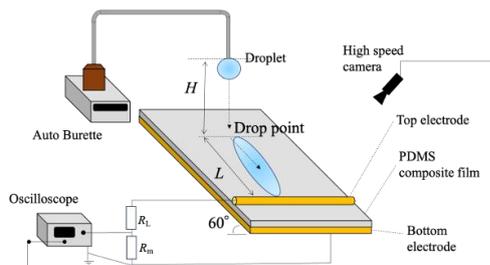


図1 DEG の構造と測定系
Fig. 1. DEG Structure and Measurement System

される。この放電過程における出力電流を時間積分することで, 発電過程で移動した電荷量を算出した。

3. 結果と考察

図2に, それぞれの DEG の出力電流の時間応答およびそこから積算して求めた電荷量を示す。2.5 vol% 複合体では, PDMS 単体に比べて最大電流および積算電荷量がわずかに増大した。一方, 5 vol% 複合体では, PDMS 単体に比べて最大電流および積算電荷量とともに約 2 倍に増大したことが確認された。この結果は, TiO₂添加量が十分に増加した場合に, DEG の帯電性能が向上することを示唆している。一方, $I-V$ 特性から推定される液滴抵抗は複合化によってほとんど変化しなかったことから, TiO₂との複合化は, 帯電電荷量の増加に寄与し, 結果として DEG の出力向上に有効であることが示唆される。

帯電電荷量を直接評価することで, 従来の $I-V$ 特性や開放電圧・短絡電流では把握できなかった DEG の性能向上を定量的に示すことが可能となった。また, 本手法は材料改良や構造最適化による性能向上を比較・評価するための有効な指標となり, DEG の設計・最適化において有用である。

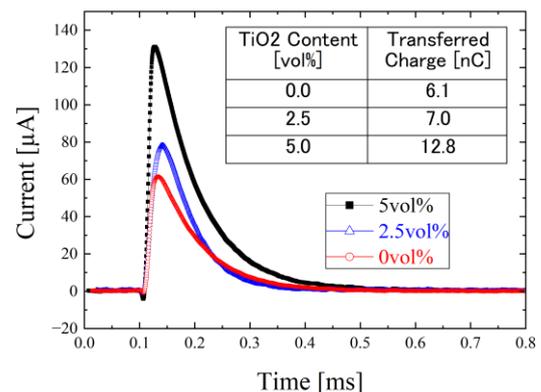


図2 DEG の出力電流時間応答と積算電荷量 (負荷抵抗: 500 k Ω)
Fig. 2. Time response of DEG output current and the corresponding accumulated charge (load resistance: 500 k Ω).

文献

(1)Y.Aoki, D. Tajima: Molecular Crystals and Liquid Crystals, 769, 1315-1332 (2025)

静電気圧力によるファインバブル発生機構の検討

花井 正広* (花井高電圧絶縁コンサルティング), 高村 紀充, 荒岡 信隆 (福岡大学)

Consideration of Fine Bubble Generation Mechanism by Electrostatic Pressure

Masahiro Hanai (Hanai High Voltage Insulating Consulting), Norimitsu Takamura, Nobutaka Araoka (Fukuoka University)

1. まえがき

直径 100 nm 付近のファインバブル (以降, FB と表記) において, ゼータ電位が -40 mV における気泡の表面が持つ電荷による反発作用が計算上表面張力よりも 1 桁以上小さいため, 安定化の原因は静電気ではないとして扱われてこなかった⁽¹⁾. 気泡の周囲にプラス電荷が存在すれば気泡表面で大きな電荷を持っていても外部から測定可能な電位は小さく, 気泡の電位に対して電荷が少なく見積もられていると考えられる。そこで, マイナス電荷が気泡の表面に留まり, その外側に密度が指数関数的に小さくなるプラス電荷が存在することで見かけの電荷は小さいが大きな電荷を持つ FB が存在できるかを計算により求めた。

2. 気泡に働く圧力の計算方法

気泡に働く圧力として, (1)式に示すように第1項は気泡の半径に対する表面張力, 第2項は大気圧, 第3項は静電気膨張圧力, 第4項は気泡の初期の半径 r_0 が安定した r_1 になった場合の内部の圧力で4つの項がある。

$$\frac{4T}{r} + p_0 - F_0 - p = 0 \quad \dots (1)$$

気泡の電荷として気泡表面上の半径 r_1 のところにマイナス電荷が留まりその外側にプラスの電荷が留まる Fig.1 のような電気層を考える。気泡表面のマイナス電荷は中心から r_1 の位置に集中して表面に沿って分布しているが, 気泡の周りに分布するプラス電荷は気泡の表面から ℓ の長さで電荷密度が半分になる (2)式に示すような指数関数的に減衰する分布をしていると仮定する。

$$q^+(r) = q^+ * \exp\left(-\frac{\ln 2 * (r - r_1)}{\ell}\right) \quad \dots (2)$$

ここで, r は気泡中心からの距離, $q^+(r)$ はプラス電荷の密度関数, q^+ はプラス電荷の合計, ℓ は半値長さ (プラス電荷が半分になる気泡表面からの距離) である。半値長さ ℓ として 2.0×10^{-10} m (0.2 nm) から 1.0×10^{-7} m (100 nm) までの 16 種の距離を用いた。

3. 計算結果

気泡の周囲電位が -30 mV, プラス電荷による圧縮圧力が無いと仮定したときの, 気泡ができた初期の半径 r_0 を 5.0×10^{-9} ~ 5.0×10^{-4} m とした場合において(1)式を満たす半径 r_1 との関係を示したのが Fig. 2 である。半値長さ ℓ が 1.4 nm

以下では同じ r_0 において 2 つの r_1 で安定した状態が存在する。1 つは気泡の持つ電荷が大きく, 気泡内部が真空となり r_1 が r_0 よりも大きな気泡となる状態である。もう 1 つは気泡の持つ電荷が小さく気泡内部気圧が大気圧よりも高くなり r_0 よりも小さな半径 r_1 の気泡となる状態である。

プラス電荷の存在を考えると計算上直径 60 nm から 200 μ m までの真空の FB ができることが明らかになった。

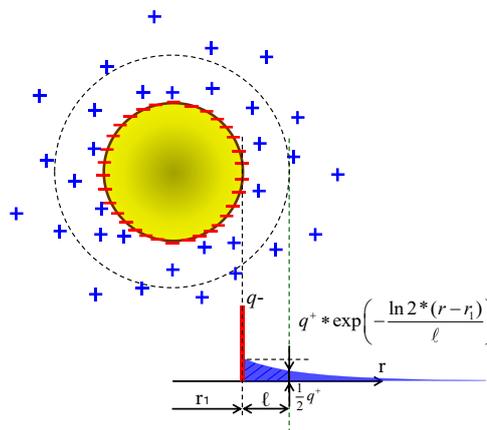


Fig.1 Charge distribution around a bubble

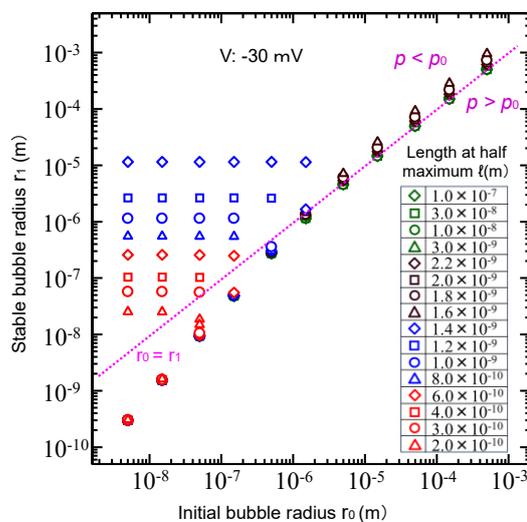


Fig.2 Relationship between initial bubble radius and stable bubble radius at potential -30 mV.

文 献

- (1) K. Yasui, T. Tuziuti and W. Kanematsu: "Mysteries of bulk nanobubbles (ultrafine bubbles); stability and radical formation", Ultrasonic Sonochemistry, Vol.48, pp.259-266 (2018)

シングルボードコンピュータを活用した 永久磁石磁化推定・可視化一体型システムの開発

木村 優介, 広瀬 友人, 吉本 拓輝, 岡本 吉史 (法政大学)

Development of Integrated System for Estimation and Visualization of Permanent Magnet Magnetization Distribution

Supported by Single-board Computer

Yusuke Kimura, Yuto Hirose, Hiroki Yoshimoto, and Yoshifumi Okamoto (Hosei University)

1. まえがき

近年, 脱炭素社会に向けて高効率な永久磁石 (PM) モータの需要が増加している. PM モータの性能は PM の着磁状態に依存するため, 事前に磁化分布を把握することが重要となる.

PM 磁化分布の推定手法として, PM 周囲の磁束密度から数値解析により内部の磁化を推定する方法^[1]があるが, 市販の測定器は磁気センサが1つのみで, 多点の計測には長時間を要する. また, 磁束密度と磁化はともに不可視の値であるため, 結果の確認には PC で専用ソフトによる可視化を行う必要があった.

そこで本稿では, 多数の磁気センサを搭載した回路基板を作成し, Raspberry Pi²⁾を Python の可視化ライブラリと連携することで PM 周囲の磁束密度の測定と多層パーセプトロン (MLP) による PM 内部磁化の推定, 可視化までをシングルボードコンピュータを介して短時間に行うシステムを開発したので詳細を報告する.

2. システム詳細

<2・1>システムの詳細 図1 (a) に測定器の詳細を, 図1 (b) に開発したシステムの全体図を示す. 測定器はホールセンサ (TMAG5273A2³⁾) を 2D アレイ状に装荷した回路基板 2 枚から成る. システム全体の流れとして, PM を挿入すると上下の基板で磁束密度が測定され, I²C 通信で Raspberry Pi へ送信される. Raspberry Pi では多層パーセプトロン (MLP) による PM 内部の磁化推定と VPython⁴⁾による可視化が瞬時に行われディスプレイで結果が確認できる.

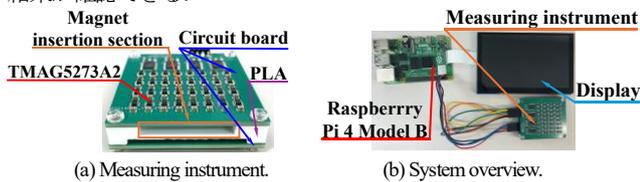


Fig. 1. System details.

<2・2>測定条件 推定対象の PM は, $+z$ 方向に平行着磁されたネオジウム磁石 (N42SH-R) で, 残留磁束密度は 1.27~1.30 T である. 測定点は磁石上下に 32 点ずつ, 計 64 点である. 測定点の間隔は x 方向に 5 mm, y 方向に 8 mm であり, 空気層は 3 mm であり各測定点にホールセンサを配置した.

<2・3>MLP による磁化推定 学習データは Biot-Savart 則を用いて生成する. MLP モデルの最適化は Optuna⁵⁾を用いて行った.

最適化を行ったモデルの詳細を表 1 に示す.

TABLE I HYPER PARAMETERS FOR MLP

Input	Hidden layer	Output	Epoch	Batch size	Optimization algorithm	Activation function	Initial learning rate
192	8	3	150	32	Adamax	GELU	0.0005

<2・3>VPython VPython⁴⁾は Python と 3D グラフィック用モジュールを統合したライブラリである. 教育用途向けに作られており 3D 可視化や動的な物理シミュレーションを容易に行うことができる.

3. 磁束密度測定結果・磁化推定結果

本章では, 提案システム (In-house) の妥当性を評価するために MTX-6R⁶⁾で磁束密度を測定し, SiGrad⁷⁾で磁化を推定し, MicroAVS⁷⁾で可視化を行った結果と比較を行った.

磁束密度測定結果を図 2 に, 磁化推定結果を図 3 に示す. 磁束密度の最大誤差は 8.36 mT で相対誤差 8.32% であり, 磁化強度の誤差は 1.00 mT で相対誤差は 0.08% であった. また測定から可視化に要した時間は In-house で 0.4 s, MTX-6R+SiGrad+MicroAVS で 266 s であり, 時間の大幅な短縮を実現できた.

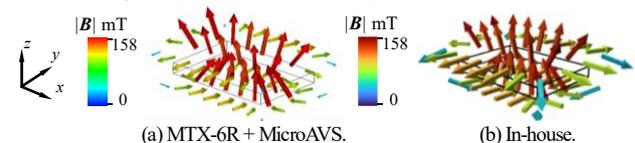


Fig. 2. Magnetic flux density measurement results.

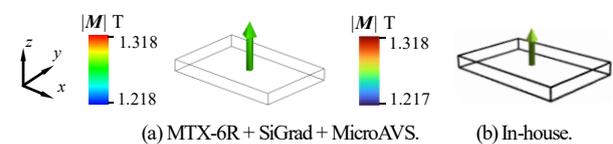


Fig. 3. Magnetization estimation results.

文献

- [1] N. Nakamura, et al, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 9-6000704, Sep. 2022
- [2] Raspberry Pi 4 Model B : <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-4-model-b/>
- [3] TEXAS INSTRUMENT : <https://www.ti.com/product/ja-jp/TMAG5273>
- [4] Scherer, D, Dubois, P, & Sherwood, B, 2000, "VPython: 3D interactive scientific graphics for students", *Computing in Science and Engineering*, 2(5), pp.82-88
- [5] T. Akiba, et al, "Optuna: a next-generation hyperparameter optimization framework," *Proceeding of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 2623-2631, 2019.
- [6] 株式会社アイエムエス : <https://ims-jp.com/mtxsp/product/>
- [7] サイバネットシステム株式会社 : <https://www.cybernet.co.jp/avs/products/microavs/>

軟磁性合金箔の飽和磁化精密測定法

田畑 智弘*, 浅利 裕介, 能島 雅史, 寺田 尚平 (株式会社 日立製作所)

Accurate Saturation Magnetization Measurement Method for Soft Magnetic Alloy Foils
Tomohiro Tabata, Yusuke Asari, Masafumi Nojima, Shohei Terada (Hitachi, Ltd.)

1. 緒言

モータの出力密度を高めるためには、鉄心として使用される軟磁性材料の飽和磁化 (σ_s) を向上させることが重要である。また、渦電流損失を低減するために薄板化が進められており、厚さ 100 μm 程度の鋼板がすでに製品化されている。したがって、薄いバルク箔材料に対して σ_s を正確に取得することが求められている。

振動試料型磁力計 (VSM) は σ_s の測定に広く用いられている。しかし、VSM による精密な評価は、試料形状、標準 Ni 試料との形状差などの要因に影響され、測定値の形状依存性は十分に解明されていない⁽¹⁻³⁾。我々は、縦 10mm 横 10mm 厚み 100 μm 近傍の微小試料において、100 μm スケールのわずかな寸法差でも Ni 試料との形状差が σ_s 計測値に大きな影響を及ぼすことを明らかにした⁽³⁾。

しかしながら、標準 Ni 試料と計測試料との形状差だけでなく測定装置毎の構成により σ_s 測定値が大きく変動するという未解明の課題があった。その背景にある測定装置毎に変化するセンサ-試料間距離が σ_s 測定値へ与える影響についてはいまだ明らかとなっていない。

そこで本研究では、振動試料型磁力計 (VSM) による Fe 系合金箔の飽和磁化測定精度向上を目的に、寸法誤差およびコイル配置の影響を系統的に解析した。

2. 実験方法

純鉄、Fe-5Co-2Cr-V、Fe-20Co の 3 種類の試料 (厚さ 0.1 mm) を用い、様々な寸法 (長さ・幅) の試料の飽和磁化を VSM で測定した。使用した VSM は図 2 に示す通りのソレノイド型およびポールギャップ型 VSM の 2 種類を使用し、コイル配置と振動方向の相対配置の違いが σ_s 測定値に与える影響を検討した。

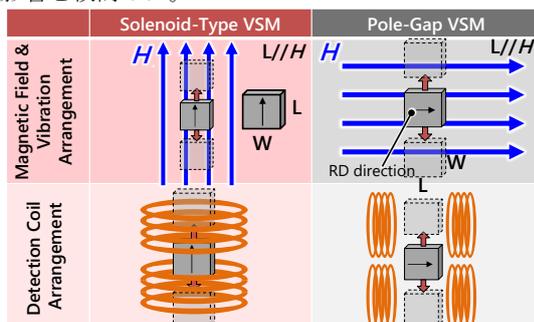


図1 飽和磁化測定時の配置
Fig.1. Instrument configuration for σ_s measurement

3. 結果

図 2 には各 VSM で計測した σ_s 計測値を試料のアスペクト比 (L/W) 毎にプロットした。図 2 から分かるように試料の長さ・幅の変化に対し、 σ_s は概ね線形に変動し、L/W と σ_s 計測値が相関することを確認した。また、ソレノイド型 VSM では σ_s が減少、ポールギャップ型 VSM では増加する傾向を確認し、コイル配置と振動方向により、寸法変化に対する傾向が逆転することが分かった。さらに、解析から Ni 標準試料との寸法差を基準に、ソレノイド型 VSM タイプに対応した補正式を構築することで、決定係数 0.99 で測定値を補正可能であることを明らかにした。また、図 2 の結果から VSM 装置毎に試料寸法による σ_s 計測値への影響が異なるため、飽和磁化の精密計測には各装置ごとに補正式が必要となることを明らかにした。

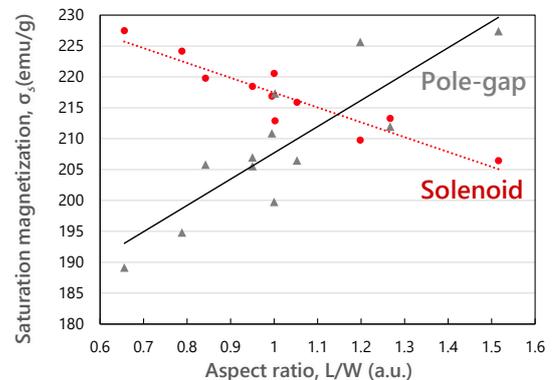


図2 試料寸法アスペクト比と σ_s 計測値の関係
Fig.2. Relationship between aspect ratio and σ_s .

4. 結言

本研究により、VSM 測定における試料寸法と装置構成が飽和磁化の評価結果に大きく影響することを明らかにした。精密測定には、装置ごとに寸法補正を適用することが不可欠と考えられる。

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のグリーンイノベーション基金事業/次世代モーター開発(JPNP21026)の結果得られたものである。

文献

- (1)J Lindemuth, J Krause, B Dodrill:IEEE Trans, Mag., 37. 4. 2752 (2001)
- (2)A Zieba, S Foner:Rev. Sci. Instrum., 53. 9. 1344 (1982)
- (3)T. Tabata *et al.*, MMM2025, DD-03 (2025).

積分器による無方向性電磁鋼板の直流偏磁下の交流 B-H ループ測定

谷延 泰地*, 小林 宏泰, 宮城 大輔 (千葉大学)

Measurement of AC Hysteresis Loops of Non-Oriented Electrical Steel Sheets under DC Magnetic Bias Using an Integrator

Taichi Taninobu, Hiroyasu Kobayashi, Daisuke Miyagi (Chiba University)

1. はじめに

SR モータ高効率化に向け、高周波かつ直流偏磁下の鉄損評価が求められる。正確な評価には直流成分の把握が必須だが、これには消磁状態からの連続的な磁束積分が必要である。先行研究⁽¹⁾ではアナログ積分器(Lake Shore 480)により無方向性電磁鋼板の直交偏磁下での準直流 B-H ループの測定システムを構築した。本研究ではこの測定システムをもとに、積分器を用いた直流偏磁下における 1kHz までの交流 B-H ループ測定システムを構築し、その有用性を検証した。

2. 測定方法

リング状無方向性電磁鋼板 35A210 (外径 120mm, 内径 100mm, 10 枚積層) に、磁束密度検出コイル (B コイル) と励磁コイルを巻いた二巻線コイル法で B-H ループを測定した。励磁コイルの巻き数を $N_1=144$ ターン, B コイルの巻き数を $N_2=25$ ターンとした。B の算出は積分器によるアナログ積分する手法 (積分器法) と, B コイル誘起電圧 v_B をデータロガーで記録し数値積分する手法 (数値積分法) を用い、両者を比較した。なお, 直流偏磁条件の比較にはループ直流成分 $B_{dc} = (B_{max} + B_{min})/2$ を用いた。

3. 結果および考察

無偏磁条件下の低周波域 (~10 Hz) において, 数値積分法では v_B の微小化に伴う S/N 比の低下により B-H ループにばらつきが生じた。その一例として, 1Hz で励磁した際の磁束密度の測定結果を図 1 に示す。これに対し積分器法ではドリフト補正により低周波にも関わらず磁束密度波形にはらつきは見られなかった。一方, 50Hz~1kHz 以上においては励磁開始時に生じる過渡応答も含めて両手法の磁束密度波形は良好に一致した。以上の結果から, アナログ積分器 (Lake Shore 480) を用いた積分器法は, 検討を行った 1kHz までの交流 B-H ループ測定に用いることができる。

直流偏磁条件下の磁気特性を正確に評価することはその損失推定法の確立において重要である。直流偏磁下での交流励磁の履歴などによる直流偏磁値の変化の有無も含めた測定を行うためには, 非常に低周波な磁束密度の変化から高周波の変化までを一貫して測定する必要がある。そこで, 初期磁化曲線(1Hz)から交流 B-H ループ(1kHz)の過程において磁束密度を連続的に変化させて測定法の検証を行った。積分器法は直流偏磁のための励磁から直流偏磁下の交流励磁時まで連続的に磁束密度の計測を行うことでループ

の絶対位置(直流成分)を直接測定できることが大きな利点である。一方, 数値積分法では, 低い周波数の磁束密度測定が出来ないため, 直流偏磁の値を直接的にはかることができない。図 2 に, 1kHz 時の積分器法と数値積分法による直流偏磁時の交流 B-H ループ部のみの比較を示す。図より非常に良く一致する結果が得られた。また, 交流 B-H ループ面積による積分器法の数値積分法に対する誤差は, 100Hz で 1.4%, 500Hz で -2.2%, 1kHz で 0.7% となり, 積分器法は, 直流偏磁下の交流 B-H ループの測定に有用である。

4. まとめ

積分器法は数値積分法では困難な直流偏磁過程を含む交流 B-H ループを連続的に測定できることから, 交流励磁による直流偏磁の変化も測定が可能であり, 直流偏磁下の交流 B-H ループ測定において有用であることを示した。

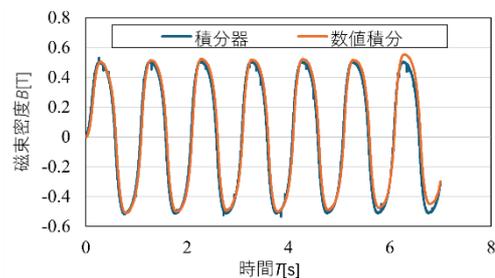


図 1 1Hz 時のメジャーループ測定における磁束密度測定結果比較

Fig. 1. Comparison of B measurements results in major loop at 1 Hz.

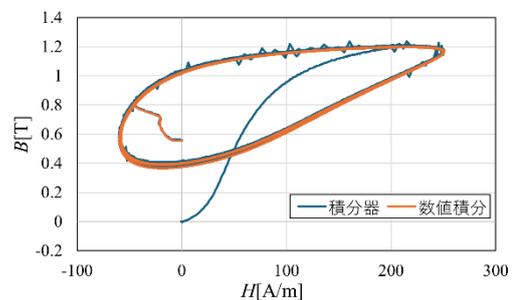


図 2 1kHz 時での直流偏磁下の交流 B-H ループ部の測定結果比較

Fig. 2. Comparison of AC B-H loops with DC magnetic bias at 1 kHz.

文献

- (1) 箕輪真弥 他:「プレイモデルによる無方向性電磁鋼板のマイナーループ推定精度に関する検討」, 電気学会研究会資料 SA23013/RM23013, pp. 63-66 (2023)

縦型複ヨーク単板磁気特性試験器を用いた磁歪測定法の開発

伊藤 真輝*, 藤原 耕二, 高橋 康人 (同志社大学)

Development of Vertical Double-yoke Single Sheet Tester for Magnetostriction Measurement

Masaki Ito*, Koji Fujiwara, and Yasuhito Takahashi (Doshisha University)

1. まえがき

変圧器が発する騒音の抑制は、静穏環境の実現には重要である。そこで、電気機器の鉄芯に用いられる磁性材料の磁歪を精度良く評価し、設計に活用できれば、騒音低減を図ることが可能である。電磁鋼板の磁歪測定には、当研究室がハブ機関になり、日本グループが提案した横型複ヨーク構造の単板磁気特性試験器 (HD-SST) が国際標準として採用された [1], [2]。本試験器は、磁歪測定には構造上優れている一方で、試験器の設置面積が大きくなるという課題がある。そこで本研究では、より省スペースで汎用性の高い縦型複ヨーク構造の試験器 (VD-SST) を用いて、磁気特性 (磁化特性, 鉄損特性) と磁歪を同時に高精度で測定可能なシステムを開発することを目的とする。本検討では、まず VD-SST を用いて磁歪測定を行うために必要な構造的要素の考案・検討を行った後、試作器を用いて測定精度を検討した。

2. 測定器の構成

図 1 に、設計した VD-SST を用いた磁歪測定器の外観を示す。図 2 は、 y 座標の負方向から見たときの断面図、図 3 は上側ヨークを除外して z 軸の正方向の $y > 0$ から見たときの鳥観図である。磁歪測定に VD-SST を用いる場合、HD-SST のように試料長手方向からレーザー光を入射させると、上側ヨークで遮られる。そこで、励磁巻線枠とヨークの間に設けた隙間からレーザー光を入射させ、ミラーを用いてレーザー光の経路を変更し、光学ターゲットまで到達させる構造を採用した。ミラーについては、当初は反射率の高い誘電体多層膜ミラーの使用を検討したが、測定波形に多くのノイズが観測されたため、低ノイズで安定した測定が可能であり、かつ比較的安価なアルミニウムコーティングが施されたミラーを採用した。検討したミラーは、2種類のみである。

さらに、従来の VD-SST のように試料上に上側ヨークを設置すると試料がヨークと接触し、磁歪による試料の自由な伸縮が阻害されてしまう。そのため、非磁性の z 軸ステージと高さ位置調整のための専用治具を用いて上側ヨーク全体を持ち上げ、試料と上側ヨーク磁極面の間にギャップを設けることで、試料にヨークの自重が掛からない構造とした。試料のクランプについては、上側ヨークの片側の磁極面と試料の間の 1 mm のギャップに、3D プリンタで作製した図 4 に示すような治具 (クランプピース) を挿入し、それを上側ヨークの自重を利用して押しえ付けることで試

料を固定した。クランプピースの形状は、ヨークが安定し、かつ磁歪が最も安定して測定できることが確認できた 1 本脚形状を採用した。

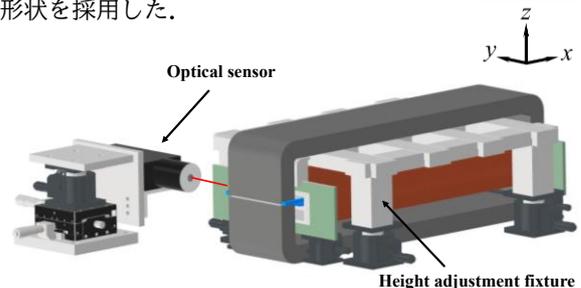


図 1 縦型複ヨーク SST を用いた磁歪測定器の全体の外観
Fig. 1. Schematic diagram of VD-SST for magnetostriction measurement.

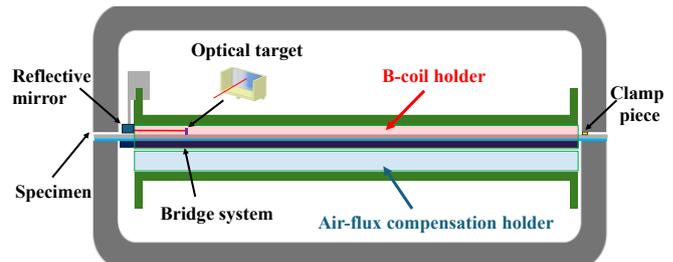


図 2 励磁巻線とヨーク
Fig. 2. Magnetizing winding and vertical double-yoke (VD).

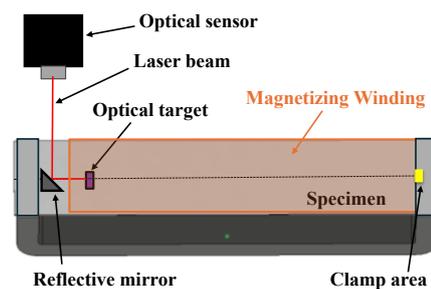


図 3 レーザ光と光路変更用ミラー
Fig. 3. Laser beam and optical-path changing mirror.



図 4 クランプピース (1 本脚)
Fig. 4. A single-leg clamp piece.

3. 測定精度の検証

試作した VD-SST を用いた磁歪測定器の測定精度を検証するため、方向性電磁鋼板 23P90 を用いて磁歪測定を行った。試料には伸縮が大きく、測定が比較的容易な圧延直角方向 (23P90_C), および伸縮が極めて小さく測定再現性の確保が難しい圧延方向 (23P90_L) の 2 種類を用いた。また、本検討では測定精度の指標とするため、既に国際規格化されている HD-SST を用いた測定システムで得られた結果と比較した。

まず、図 5 に示す両者の磁歪波形のバタフライープについて考察する。両者のループ形状の差異は小さく、試作した VD-SST は、ある程度の測定精度が確保できていることが確認できた。しかしながら、23P90_L の結果を詳細に観察すると、VD-SST で得られたバタフライープは左右非対称となる傾向が見受けられた。磁歪現象は、磁化の極性に依存せず、材料は同方向に変形するため、摩擦のような機械的な影響が存在したとしても、本来その波形に奇数次高調波成分は含まれない。しかしながら、今回測定された波形の周波数分析を行ったところ、励磁周波数である 50 Hz の成分が多く含まれていることが判明した。この要因については、現時点で考えられる可能性の 1 つとして、測定系内部に微小な直流成分が存在し、それが磁気吸引力を介して試料の面外振動に影響を与えていることが挙げられる。一般に、試料とヨーク間に働く磁気吸引力は磁束密度の 2 乗に比例すると考えられる。ここで、ヨークの残留磁気や電力増幅器などに起因する微小直流成分 ΔB が交流成分 $B_m \sin \omega t$ に重畳されていると仮定すると、磁気吸引力は $(B_m \sin \omega t + \Delta B)^2$ に比例することになる、この式を展開すると、 $(B_m \sin \omega t)^2$ の項に加えて、 $2\Delta B B_m \sin \omega t$ の項が現れる、前者は励磁周波数の 2 倍 (100 Hz) で変動する磁歪の成分であるが、後者は励磁周波数と同一の 50 Hz で変動する成分である、その結果、この 50 Hz の磁気吸引力の成分により磁束密度の正負に依存して面外振動の挙動が変化し、これがバタフライープの左右非対称性として観測されたと推測できる。特に、今回開発した VD-SST においては HD-SST と比較してヨークの寸法や上側ヨークとのギャップに自由度を持たせており、面外振動の影響を受けやすい構造的特徴があるため、この影響を抑制するように、ヨーク消磁および試料設置方法などを再検討し、対策を講じる必要がある。

次に、図 6 に示す VD-SST から得られた磁歪波形の Peak-to-Peak 値 (λ_{p-p}) と HD-SST から得られた結果との差分について検討する。(a) 図の 23P90_C においては、磁歪が大きい磁束密度領域では差分は 1 % 以下に収まり、良好な一致が確認できた。一方で、23P90_C の低磁束密度領域や (b) 図の磁歪が小さい 23P90_L においては、VD-SST と HD-SST との間の乖離が増大する傾向が見受けられた。この乖離については、両測定器間で磁気回路構成が根本的に異なるこ

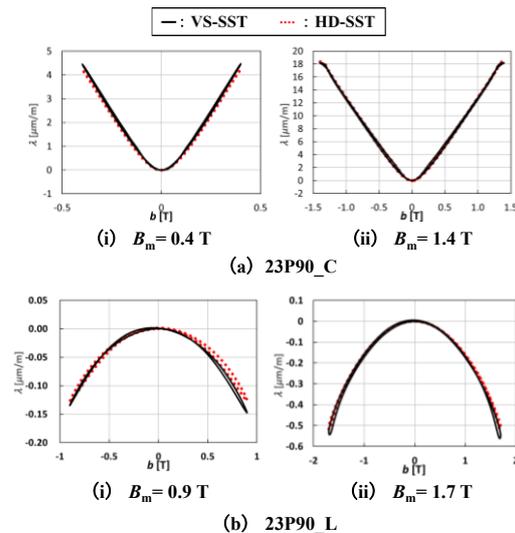


図 5 VD-SST と HD-SST によるバタフライープの比較
Fig. 5. Comparison of magnetostriction butterfly loops measured by VD-SST and HD-SST.

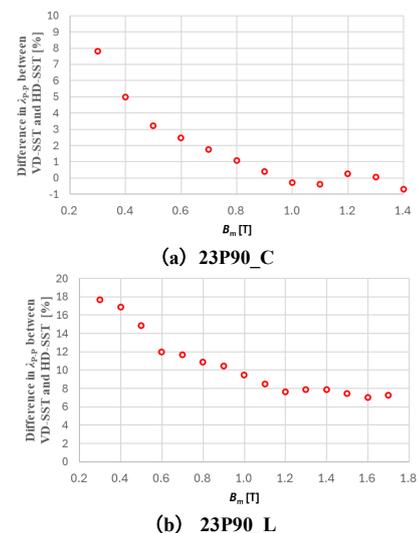


図 6 HD-SST に対する VD-SST の λ_{p-p} の差分
Fig. 6. Difference in λ_{p-p} between VD-SST and HD-SST.

と、および VD-SST の構造に起因する試料の面外振動の影響など、複数の要因が考えられる。しかしながら、現段階でこれらの要因がどの程度の割合で測定結果に影響を与えているかについて特定することは困難である。したがって、詳細な原因究明については、今後の検討課題とする。

文 献

- [1] S. Siebert, C. Kajiwarra, K. Fujiwara, and P. Klimczyk, "Establishment of the Standard Method of Magnetostriction Measurement of Grain-oriented Electrical Steel Strip and Sheet," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 565, Art. no. 170295 (2023).
- [2] IEC standards, "Magnetic Materials - Part 17: Methods of Measurement of the Magnetostriction Characteristics of Grain-oriented Electrical Steel Strip and Sheet by Means of a Single Sheet Tester and an Optical Sensor," IEC 60404-17 (2021).

磁性合金薄帯用磁気ひずみ測定法の開発

森 修*, 佐藤 茂行, 内海 良一, 遠藤 恭¹, (東栄, ¹東北大学)

Development of Measurement Technique for Magnetostriction of Magnetics Alloy Ribbons
Osamu Mori, Shigeyuki Sato, Ryoiti Utsumi, Yasushi Endo¹ (Toei Co.,Ltd, ¹Tohoku University)

1. はじめに

近年、パワーエレクトロニクス分野において、エネルギー損失の増大と磁気ひずみとの関連性が指摘されている。この関連性をより詳細に理解することは、デバイスのエネルギーの高効率化に直結し、産業応用の観点から重要である。しかしながら、従来の磁気ひずみ測定法¹⁾では、動作周波数範囲で磁気ひずみを直接測定することが困難であり、エネルギー損失との関連性を周波数軸で検討できなかった。この課題に対して、我々のグループでは、磁性合金薄帯に異なる応力を付与し、そのときのインダクタンスの外部磁界依存性(電磁気的変化)をコイルにより検出することによって薄帯の磁気ひずみを評価できる測定法を構築し、特定の周波数での磁性合金薄帯の磁気ひずみについて報告してきた²⁾。本報告では、磁性合金薄帯における磁気ひずみを、測定周波数を変化させて評価した結果について報告する。

2. 実験方法

図1は構築した磁気ひずみ測定法の概略図である。この本測定法では、まず細長い形状の磁性合金薄帯の中央部を検出コイル内部に挿入し、薄帯の両端を治具で固定した状態で電磁石のギャップ部に設置する。次に、固定した薄帯両端のうち一端にフォースゲージを取り付けて、薄帯の長手方向に一定の応力($\sigma_{//}$)を付与する。この状態で、薄帯幅方向に電磁石を用いて0-300 mTの直流磁界(H_{dc})を印加し、検出コイルのインダクタンスをLCRメータにより測定する。異なる $\sigma_{//i}$ に対して同じようにインダクタンス測定を行い、得られたインダクタンスの逆数($1/(L-L_0)$) (L : 検出コイルのインダクタンス、 L_0 : 空心コイルのインダクタンス)と H_{dc} との関係を、各 $\sigma_{//i}$ に対してまとめる。このとき、 $1/(L-L_0)$ 値を固定して、 H_{dc} の $\sigma_{//}$ による変化量($\Delta H_{dc} = H_{dc1} - H_{dc2}$)を導出し、 ΔH_{dc} と磁気ひずみ(λ_s)の関係式である $\Delta H_{dc} = 3\lambda_s(\sigma_{//1} - \sigma_{//2})/M$ (M : 薄帯の磁化)にあてはめて薄帯の λ_s を算出する。

今回 λ_s 評価に用いた試料はFe基アモルファス合金薄帯2605SA1(プロテリアル製)である。また、本測定法による測定条件としては、検出コイル(巻き数300)の印加電圧を0.1 V、測定平均回数を5回、測定周波数を0.5 kHz-1 MHzとした。

3. 実験結果

図2はFe基アモルファス合金薄帯における λ_s の測定周波数による変化である。 λ_s は測定周波数によらずほぼ一定となった。また、 λ_s 値は、いずれの測定周波数においてもおよそ28 ppmであり、公称値の27.0 ppmとほぼ同等の値が得られた。この結果は、本測定法において1 MHzまでの測定周波数範囲で合金薄帯の λ_s を正確に把握でき、従来の測定法とは異なる特長を有していることを表している。

当日は、この結果に加えて、Co基アモルファス合金薄帯における磁気ひずみの周波数特性や1 MHz以上の周波数範囲での合金薄帯における磁気ひずみの測定結果について報告する。

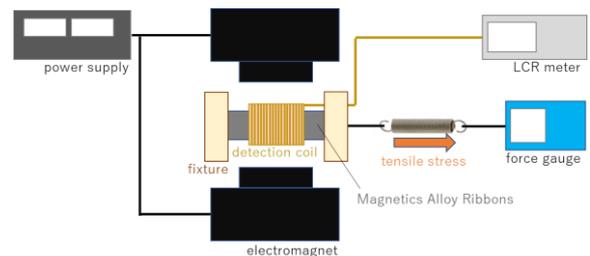


図1 磁性合金薄帯用磁気ひずみ測定法の概略図
Fig.1. Schematic diagram of measurement method for magnetostriction

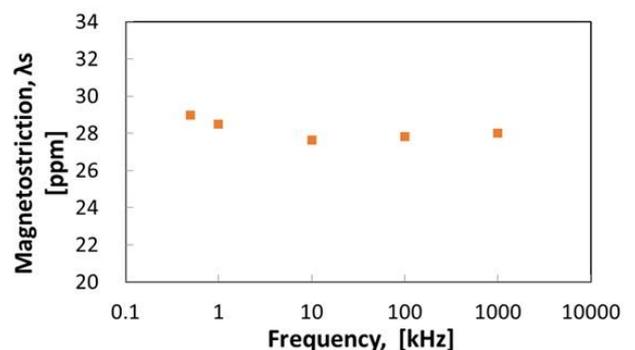


図2 Fe基アモルファス薄帯における磁気ひずみの周波数依存性
Fig.2. Frequency dependence of magnetostriction for Fe system amorphous alloys

文献

- 1) 荒井賢一, 津屋昇, 日本応用磁気学会誌 2, p.5 (1978).
- 2) 遠藤恭, 島田寛, 森修, 佐藤茂行, 内海良一, 第44回日本磁気学会学術講演概要, 14aD-5.

直流重畳三角波電流で励磁した 高周波向け磁性材料のインダクタンスの測定

牛場 日菜乃*, 南 政孝 (近畿大学)

Inductance Measurement of Magnetic Material for High Frequency Applications
under DC-biased Triangular Current Excitation

Hinano Ushiba*, Masataka Minami (Kindai University)

1. はじめに

パワーエレクトロニクス分野において、ワイドバンドギャップ半導体デバイスの実用化に伴い、スイッチング周波数の高周波化が進んでいる⁽¹⁾。これにより、磁性部品の特性の評価が重要だが、従来の評価方法は正弦波励磁が主であり、実使用条件下とは異なる⁽²⁾。

本稿では、実使用条件を想定し、高周波向け磁性材料に直流重畳三角波電流で励磁した際のスイッチング周波数に対するインダクタンスの変化を測定し、実使用条件下での傾向を評価する。

2. 対象のコア材と測定条件

コア材には、高周波数帯域の動作が可能で、電力変換回路の用途に適した磁性材料である 80 材のトロイダルコア (Fair-Rite 社, 5980001801) を採用する。巻き数は約 1A 程度で飽和するように 11 ターンとする。ここで、データシートに基づく設計値は約 $41 \mu\text{H}$ である。インダクタに重畳する平均直流電流は 0.2, 0.5, 0.7 A とし、オシロスコープの電流波形で飽和しない範囲を対象とする。

Fig. 1 に示す Buck Converter 回路を用いて、インダクタを直流重畳三角波電流で励磁する。入出力電圧 V_{in} , V_{out} はパワーメータ (日置電機株式会社, PW3337), インダクタ電流 i_L は電流プローブ (Tektronix, TCP312A) を用いて測定する。SW1 が ON 時のインダクタ電流 i_L を対象に、導出は割愛するが式 (1) を用いてインダクタンス L を算出する。

$$L = \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{out}}}{\Delta i_L} \Delta t \quad (1)$$

測定範囲はスイッチング周波数が 0.1 MHz~1.5 MHz として、デューティ比を 0.5 とする。

3. 測定結果

Fig. 2 にインダクタに重畳している平均直流電流ごとのスイッチング周波数に対するインダクタンスの変化を示す。3つの平均直流電流の条件下で、いずれも周波数が上昇するにつれてインダクタンスが低下する傾向が見られる。正弦波電流を印加した際は高周波になるにつれて、コアの透磁率が低下することが知られており、直流重畳時にも同様の傾向であることがわかる。また、低周波領域において、平均直流電流が 0.7 A の時に 0.5 A や 0.2 A の時と比較し

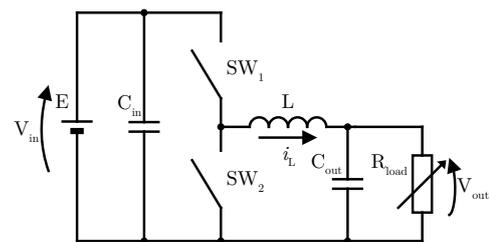


Fig. 1 Buck Converter Circuit

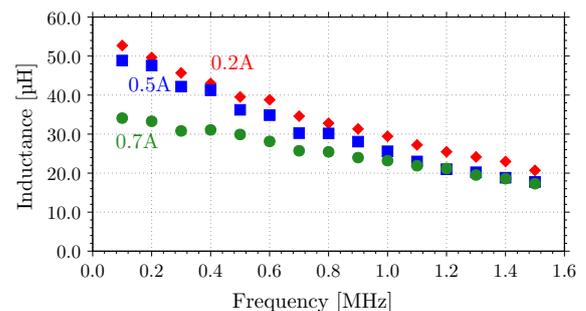


Fig. 2 Frequency Characteristics

てインダクタンスが低下している。80 材のデータシートより、平均直流電流が約 0.5 A 以上から透磁率が低下し始めることが示されており、本測定の結果に対応する。

4. おわりに

本報告では、実使用条件を想定して高周波向け磁性材料の 80 材に直流重畳三角波電流で励磁した際にも正弦波励磁と同様に、周波数が上昇するにつれてインダクタンスが低下する傾向が見られた。今後はパラメータを増やして、より詳細に測定するとともに、他の材料との比較を行なう予定である。

謝 辞

本研究の一部は公益財団法人 永守財団 研究助成 2025 助成 A の支援によりなされたものであり、ここに深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) Y. Zhong, et al., "A review on the GaN-on-Si power electronic devices," *Fundamental Research* 2.3, pp. 462-475 (2022).
- (2) H. Matsumori, et al., "Core loss calculation for power electronics converter excitation from a sinusoidal excited core loss data," *AIP Advances*, Vol.10, No.4 (2020).

高温超伝導コイルを用いた共振回路による 高感度磁界検出の検討

吉原 太陽*, 松尾 政晃, 佐々 滉太, 吉田 敬, 笹山 瑛由 (九州大学)

Highly Sensitive Magnetic Field Detection Using Resonant Circuit with High-Temperature Superconducting Coil
Taiyo Yoshihara, Masaaki Matsuo, Hiromasa Sasa, Takashi Yoshida, Teruyoshi Sasayama (Kyushu University)

1. はじめに

磁気粒子イメージング (MPI) は、がんの早期発見に向けた有望な技術として大きな注目を集めている⁽¹⁾。一方、MPIで用いる磁性ナノ粒子から発生する磁化信号は約 1 pT と極めて微弱であり、検出感度の向上が重要な課題である。銅線を用いた従来の検出コイルでは、線材の抵抗に起因する熱雑音が感度限界の要因となっていた。本稿では、高温超伝導 (HTS) コイルとコンデンサで構成する共振回路全体を冷却する方法⁽²⁾で高感度化を図り、共振周波数が変化した場合の感度の変化について検討した結果を報告する。

2. 方法

図1に検出コイルの概要図を示す。検出コイルの線材は、高温超伝導テープ線材 (SCS2050-AP-I) を使用した。コンデンサには U2J 特性を持つ積層セラミックチップコンデンサを使用し、液体窒素による浸漬冷却時に静電容量の合計が 1 μF または 10 μF となるようにして並列共振回路を構成した。また、回路抵抗を低減するため、検出コイルおよび共振コンデンサの配線にはすべて HTS 線材を使用した。なお、コンデンサが容易に変更できるように、HTS 線材同士の接続箇所において、半田接合の代わりに、HTS 線材の間にインジウム箔を挟み込んでボルト締めで接合する方法を用いた。

図2に提案法の検出感度性能を評価する計測システムを示す。ファンクションジェネレータを用いて励磁コイルに通電して 1 pT 程度の磁界を発生させた。その時に検出コイルに生じる電圧を計測して、 Q 値を算出した。

3. 結果

図3に Q 値の結果を示す。1 μF のコンデンサを接続した場合、共振周波数は約 3.9 kHz、 Q 値は常温状態 (300 K) において 7.7、低温状態 (77 K) において 1000 であった。また、10 μF のコンデンサを接続した場合、共振周波数は約 1.3 kHz、 Q 値は 300 K において 1.4、77 K において 1400 であった。提案手法により、各共振周波数において高い Q 値が得られ、計測感度の大幅な向上の可能性が示された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K21611 および (公財) 村田学術振興・教育財団の助成を受けたものである。

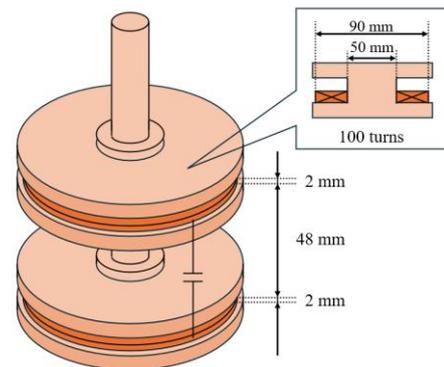


図1 検出コイルの概要図
Fig. 1. Schematic diagram of the detection coil

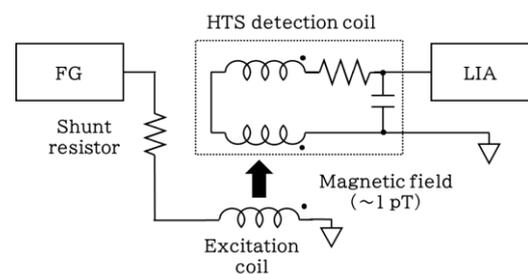


図2 計測システムの概要
Fig. 2. Overview of the measurement system

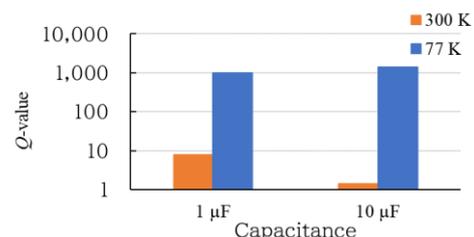


図3 検出コイルの Q 値
Fig. 3. Q -value of the detection coil

文献

- (1) B. Gleich, J. Weizenecker: Nature, 435. 1214-1217 (2005)
(2) 吉原太陽・松尾政晃・吉田敬・笹山瑛由: 2025年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 02-1P-09

有限要素法解析を用いたリンパ節に対する磁気ハイパーサーミアの治療効果検証

福岡勇大¹, 上島優也², 桑波田晃弘^{2,3}, 藪上信^{2,3}

(1東北大学工学部, 2東北大学大学院工学研究科, 3東北大学大学院医工学研究科)

Evaluation of the therapeutic efficacy of magnetic hyperthermia for lymph nodes using finite element method analysis

Yudai Fukuoka¹, Yuya Kamizima², Akihiro Kuwahata^{2,3}, Shin Yabukami^{2,3}

(1School of Engineering, Tohoku University, 2Graduate School of Engineering, Tohoku University, 3Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University)

1 はじめに

磁気温熱療法⁽¹⁾は、がん磁性ナノ粒子 (MNP: magnetic nanoparticles) を投与して、交流磁場を MNP に印加して加熱し、がんを死滅させる治療方法である。MNP を加熱しすぎると正常細胞に損傷を与え⁽²⁾、加熱が不十分な場合はがんへの治療効果が十分に得られない⁽³⁾。そのため、がんを死滅させ、正常細胞への損傷を最小限に抑えるために、加熱時の温度分布を予測する必要がある。そこで本研究では MNP の分布から温度分布をシミュレーションして治療効果の検証をした。

2 シミュレーション方法

有限要素法シミュレーション (COMSOL) を用いて磁場分布と加熱温度分布を評価した。Fig.1 はコイルとリンパ節の概形図である。生体組織は半径150 mmの半球としてモデル化した。リンパ節はその半球内部に長軸半径 $a = 5.0$ mm, 短軸半径 $b = c = 2.5$ mm をもつ回転楕円体としてモデル化した。MNP の分布は実際のリンパ節内の磁性ナノ粒子の分布⁽⁴⁾をモデル化するために外側の範囲に MNP を分布させた。コイルに $I_{max} \times \sin(2\pi f_0 t)$ の電流を流すことで磁性ナノ粒子に磁場を印加する。ここで I_{max} は 415 A, f_0 は 270 kHz である。磁性ナノ粒子の加熱は MNP に熱源の式 $p = \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}/dt$ を付与することで実際の加熱を模擬している。

3 シミュレーション結果

Fig.2 は磁場を印加してから 600 秒後のリンパ節内の温度分布である。Fig. 2(a)はリンパ節モデルの表面から 1mm の厚みに、Fig. 2(b)は 2mm の厚みに MNP を分布させた。MNP の密度はどちらも等しい。Figs. 2(a)(b)ではコイルからの距離が離れるほど、温度は低下した。しかし、Fig. 2(a)に比べて Fig. 2(b)の方が中心温度が高かった。Figs. 2(a)(b)コイルからの距離が同じでも生体組織の中で磁性ナノ粒子に近い外側の部分が内側より温度が高い傾向にあった。

4 結論

シミュレーション内で磁性ナノ粒子の分布したリンパ節

に交流磁場を印加し、温度分布を得た。加熱開始から終了までのリンパ節内の温度分布を使ってがんに対する治療効果を検証していく。

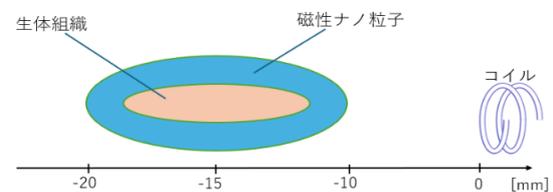


Fig. 1. Schematic diagram of the coil and lymph node in simulation.

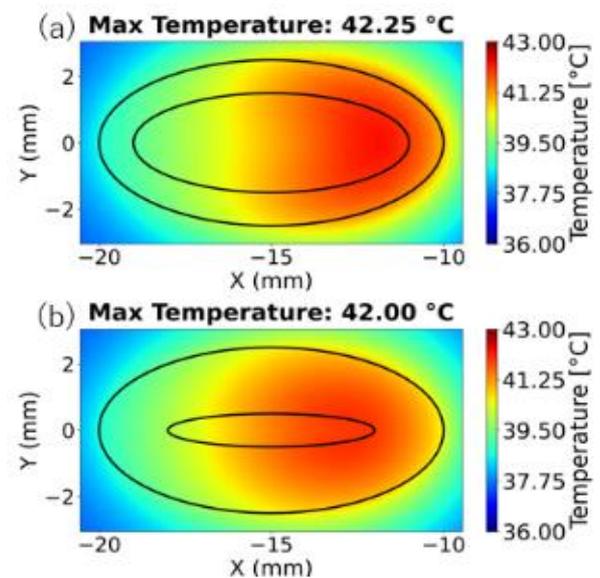


Fig. 2. Temperature distribution at 600 s (a)localized magnetic nanoparticles. (b) widely distributed magnetic nanoparticles.

文献

- (1) A. Rajan · N. K. Sahu : J. Controlled Release, 349 (2022).
- (2) G. C. van Rhoon ほか : European Radiology, 23 (2013).
- (3) X. Liu ほか : Theranostics, 10 (2020).
- (4) M. Ahmed ほか : Nanomedicine, 12 (2016).

磁性ナノ粒子を用いた高感度タンパク質センサ

北風 光稀^{1*}, 坂 天弥², 村山 徹², L. Tonthat^{1,3}, 桑波田 晃弘^{1,2,3}, 青木 英恵^{1,3}, 藪上 信^{1,2,3}, (¹東北大学工学部, ²東北大学大学院医工学研究科, ³東北大学大学院工学研究科)

High-sensitivity Protein Sensor Using Magnetic Nanoparticles

Mitsuki Kitakaze^{1*}, Amane Ban², Toru Murayama², L. TonThat³, Akihiro Kuwahata³, Hanae Aoki³, Shin Yabukami²

(¹Faculty of Engineering, Tohoku University, ²Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University,

³Graduate School of Engineering, Tohoku University)

1. はじめに

スイッチ磁界に対する磁性ナノ粒子とタンパク質の抗原抗体反応凝集体の磁気応答からサイトケラチンを検出した。

2. 計測方法

Fig.1 は本研究で使用した先行研究⁽¹⁾に基づく実験セットアップの構成の概略図を示したものである。このシステムは、磁気インピーダンスセンサ、永久磁石、スイッチングコイル、ローター、および試料固定具で構成される。タンパク質が抗体で表面修飾した磁性ナノ粒子との抗原抗体反応により磁性ナノ粒子間の結合を強め、磁界を印可した際の凝集を強めるため、スイッチ磁界に対する磁性ナノ粒子の応答性がタンパク質の濃度に対して敏感に変化する。これによりタンパク質を検出する。まず、NdFeB 磁石を用いて約 5 分間試料を磁化した。上記の磁化および凝集過程の後、ドライブコイルで磁化磁束密度 (H_{dc}) を 0 mT から 1.6 mT まで、上下方向に 0.06 mT 間隔で段階的に増加させた。各 H_{dc} は 30 秒間印加され、ナノ粒子の磁気モーメントは印加磁場の方向に揃うように凝集した。試料は磁気インピーダンスセンサの近くまでゆっくりと回転させ、センサは磁性ナノ粒子とタンパク質の凝集体からの漏れ磁界の磁気信号強度を検出した。

3. 計測結果

Fig.2 は磁性ナノ粒子の凝集体の顕微鏡写真と段階的に増加するスイッチ磁界に対する磁性ナノ粒子の凝集体からの磁気信号をタンパク質濃度ごとに示したものである。リンパ節転移のバイオマーカーであるサイトケラチンの精製タンパク質試料(ケラチン ヒト表皮由来)を、一次抗体(抗サイトケラチン AE1/AE3 抗体 (モノクローナルマウス IgG1))を介して、プロテイン G 被覆磁性ナノ粒子 (FG ビーズ、180 nmφ) に結合させた。磁性ナノ粒子と抗体はそれぞれ 2 μl/ml に PBS-T で調製し、等量混合した後、ロータリーミキサーで室温で 30 分間反応させ結合させた。これと濃度 0, 10 ng/ml, 1000 ng/ml に PBS-T でそれぞれ調整したサイトケラチンをロータリーミキサーで室温で 30 分間抗原抗体反応させた。Fig.2 に示すようにタンパク質の濃度が高くなるにつ

れて、磁性ナノ粒子の凝集体の中心の茶色がより濃くなった。これはタンパク質(サイトケラチン)濃度の増加に伴い磁性ナノ粒子間にタンパク質を介して架橋構造が形成⁽²⁾されて磁氣的結合が強まり、密に凝集したためであると考えられる。また、タンパク質の濃度が高くなるにつれて、スイッチ磁界に反応する磁気信号は強くなった。これはサイトケラチンが磁性ナノ粒子を凝集させるためであり、顕微鏡写真の結果とも一致した。

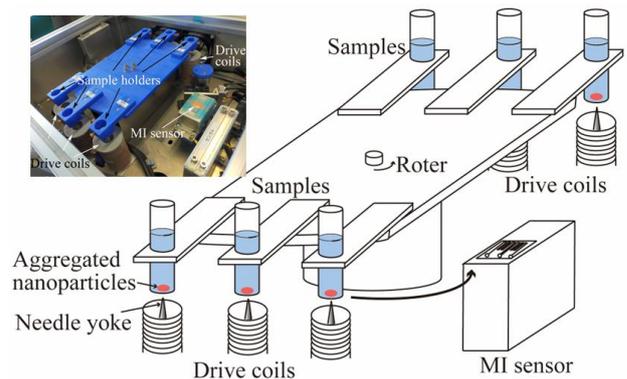


Fig.1 Schematic(bottom) and photo (top) of a laboratory-made system for detecting protein in a liquid phase using magnetic nanoparticles.

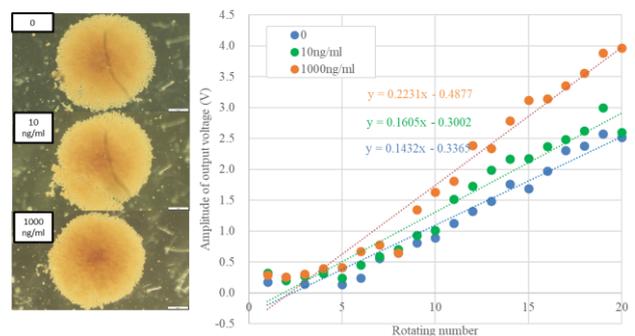


Fig.2 Magnetic response under increasing magnetic field (left) and optical micrographs of magnetic nanoparticle-cytokeratin aggregates (right) at different cytokeatin concentrations (0, 10, 1000 ng/ml)

文 献

- (1) S. Yabukami et al., AIP Advances, 14, 035102 (2024).
- (2) S. Yabukami et al., IEEE Trans. Magn., 61, 5100304 (2025).

レーザー局所加熱を施したスリットレス微細多極磁石の 磁化推定に関する検討

小林 主尚*, 岡本 吉史 (法政大学), 永井 慧大 (東京理科大学)

Study on Magnetization Estimation of Slitless Fine Multi-pole Magnets with Local Laser Heating
Kazuhisa Kobayashi, Yoshifumi Okamoto (Hosei University), and Keita Nagai (Tokyo University of Science)

1. まえがき

近年、アクチュエータやセンサなどの磁気 MEMS デバイスは、医療やロボティクス分野におけるシステムの小型化・高機能化において重要な役割を果たしている。これらのデバイス性能を最大化するには、微細かつ自由度の高い着磁パターンを有する永久磁石が不可欠である。従来のレーザー局所加熱は、熱干渉抑制にスリット加工を要するため、量産性や着磁形状の自由度が低い。これに対しスリットレス化は、任意の微細パターンを効率的に形成できるため、磁気 MEMS デバイスを用いた開発にとって重要である [1]。

本研究では、PM 表面を格子状に 12 分割した領域ごとに、レーザー走査速度を 90 mm/s から 200 mm/s まで段階的に変化させて着磁した薄型ネオジウム磁石を対象に、磁化推定手法 SiGrad [2] を用いて磁化分布を推定し、走査速度による着磁状態の違いを評価することを目的とする。

2. 推定手法

本研究では、最急降下法に基づく磁化推定手法 SiGrad [2] を用いた。また、磁界計測点 k における磁束密度の計測値 $B_0^{(k)}$ と、Biot-Savart 則 [3] による計算値 $B^{(k)}$ との二乗誤差を最小化するために、計測点の総数 N_m を用いて、目的関数を次式のように定義する。

$$\min. W = \sum_{k=1}^{N_m} (B^{(k)} - B_0^{(k)})^2 \quad (1)$$

3. 磁化推定モデル

推定対象であるスリットレス微細多極磁石の写真を図 1 (a) に示す。図 1 (b) に、永久磁石の磁極側に磁気シートを接触させたときに生じる着磁パターンを示す。磁極部分は深緑色で表され、全体の極数は 30 である。図 1 (c) にレーザー走査の領域区分を示す。レーザー走査速度は、領域 ① における 90 mm/s を始点とし、10 mm/s ずつ増加させ、領域 ⑫ において 200 mm/s となるようにした [1]。

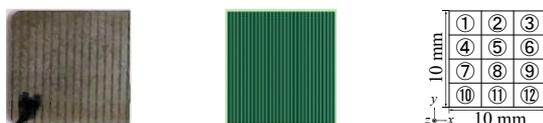


Fig. 1. Specifications of the thin permanent magnet.

対象とする永久磁石の寸法は 10 mm × 10 mm × 0.3 mm で、100 × 20 × 3 (=6,000 セル) に分割した。測定面は、±z 方向に磁石表面から 0.45 mm 離れた xy 平面上で実施し、x 方向 0.05 mm、y 方向 0.5 mm ピッチで配置した 201 × 21 × 2 (=8,842 点) の磁束密度データを用いた。なお、磁束密度測定には、アイエムエス社製の MTX-6R [4] を用い、計算には AMD Ryzen 7 9700X 8-Core 64.0 GB を搭載した PC を使用した。

4. 磁化推定結果

図 2 (a) に図 1 (c) の俯瞰図を示す。図 2 (b) に、MTX-6R で計測した測定磁束密度分布を示す。これより、30 極の着磁パターンに対応した縞状の磁束密度分布が確認できる。

図 3 (a) に、SiGrad から推定された磁化分布を示す。なお、初期磁化分布を全セルで一様に x 方向成分のみ 0.7 T と設定した。こちらの磁極の切り替わり数は 30 であり、図 1 (b) の着磁パターンと一致した。図 3 (b) に、推定された磁化分布から再構築した磁束密度分布を示す。これは図 2 の空間的な特徴が反映された分布となった。

SiGrad の反復回数は 4436 回、目的関数の初期値は 14.161 T² であり、収束値は 0.0139 T²、計算時間は約 10.8 時間であった。

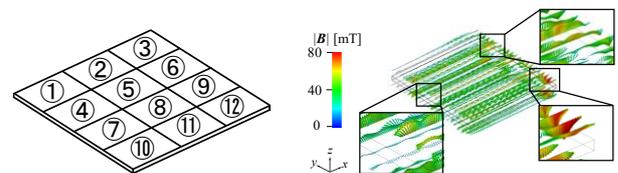


Fig. 2. 3D Area classification and Measurement flux density.

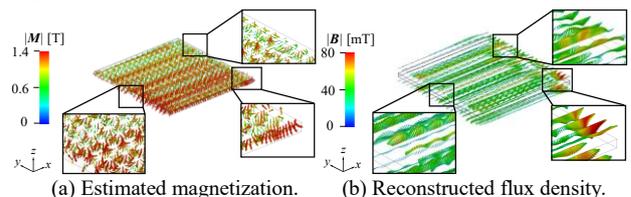


Fig. 3. Results of magnetization estimation.

文献

- [1] Keita Nagai, et al, *IEEE Access*. vol.11, pp.143446 - 143456, (2023).
[2] N. Nakamura, et al, *IEEE Trans. Magn.* vol.58, no.9-6000704, (2022).
[3] T. Onuki, et al., *IEEE Trans. Magn.* vol.31, no. 3, pp.1476-1479, (1995).
[4] MTX-6R : <https://ims-jp.com/mtxsp/product/>

光ファイバアレイを用いたダイヤモンド量子センサアレイの感度と空間分解能の評価

白石紘大¹, 井上昌成², 荒川佑奈¹, 桑波田晃弘^{2,3}, 藪上信^{2,3}

(¹東北大学工学部, ²東北大学大学院工学研究科, ³東北大学大学院医工学研究科)

Evaluation of the Sensitivity and Spatial Resolution of a Diamond Quantum Sensor Array Using a Fiber Array

Kota Shiraiishi¹, Masanari Inoue², Yuna Arakawa¹, Akihiro Kuwahata^{2,3}, Shin Yabukami^{2,3}

(¹School of Engineering, Tohoku University, ²Graduate School of Engineering, Tohoku University, ³Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University)

1. はじめに

ダイヤモンド NV(Nitrogen-Vacancy)センタは、磁力計として磁性ナノ粒子の検出など生体医療分野に応用されている。(1,2)本研究では、生体組織内の磁性ナノ粒子の分布を明らかにするため、光ファイバアレイを用いたダイヤモンド NV センタアレイを開発し、磁場感度と空間分解能を評価した。

2. 実験方法

ダイヤモンド NV センタを有するダイヤモンド基板(2 mm×2 mm×1 mm)に 25ch の光ファイバアレイを接着することで、NV センタからの情報を 25 分割する。励起光を照射する ch を選択することで、NV センタへの励起光の ch 数を制御できる。実験 1 はダイヤモンド基板上の中心の ch13 から励起光を 1 本入れ、残りの 24ch(ch1-12, 14-25)から赤色蛍光を集光した。実験 2 では、励起光を 2 本入れるために、ch7 と ch19 から励起光を入れて残りの 23ch を用いて集光した。また、4 つの NV 軸のエネルギー縮退を解くために、NV センタに予めバイアス直流磁場をかけた。空間分解能および磁気感度を評価するために、ヘルムホルツコイルを用いて、一様磁場を印加した場合と、アンチヘルムホルツコイルを用いて磁場勾配を印加した。また、フィッティング法(2)を用いて、実験 1、実験 2 の検出最小磁場を算出した。

3. 実験結果

Fig. 1 は、励起光 1 本(実験 1)の場合(a)と 2 本(実験 2)の場合(b)の赤色蛍光強度分布を示す。励起光を 2 本入れた場合、各 ch で 2~8 倍の赤色蛍光強度が得られた。Fig. 2 では励起光 1 本(実験 1)と 2 本(実験 2)の条件ごとの ch14 の ODMR(Optically-Detected-Magnetic-Resonance)スペクトルを示す。検出最小磁場は、励起光を 2 本入れることで各 ch で改善し、ch14 で約 6 倍程度改善した。

4. まとめ

励起光を入れる本数を増やすことで各 ch の平均蛍光強度の上昇と検出最小磁場の改善を実証した。今後はさらに励起光を入れる ch を増やすセットアップを作成し、空間分解

能の上昇やさらなる感度上昇に取り組む予定である。

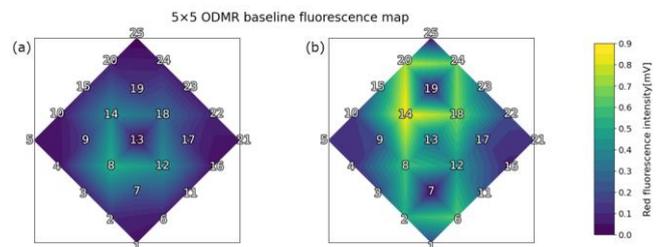


Fig.1 Color contour maps of red fluorescence from each channel of a diamond NV array under (a) single-beam and (b) dual-beam excitation.

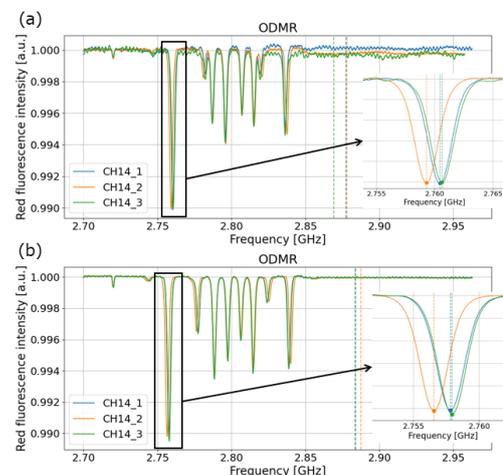


Fig.2 ODMR spectra under different conditions. CH14_1 corresponds to zero external magnetic field, CH14_2 to a uniform magnetic field, and CH14_3 to a magnetic field gradient: (a) single-beam excitation and (b) dual-beam excitation.

文献

- (1) Mayeul Chipaux et al., The European Physical Journal D 69, 166(2015)
- (2) Akihiro Kuwahata et al., Scientific Reports 10, 2483(2020)

VR を活用した磁界計算結果の リアルタイム可視化システムの開発

原田智来*, 岡本吉史 (法政大学)

Development of Real-Time Magnetic Field Visualization System Using VR
Tomoki Harada and Yoshifumi Okamoto (Hosei University)

1. まえがき

Virtual Reality (VR) 技術はエンターテインメントや教育訓練の分野で普及している。磁気工学分野への応用事例としても、静磁界分布の可視化^[1]や教育用途^[2]への適用については検討が進められている。しかしながら、実際の電磁機器設計への活用に関する報告事例は少なく、VR 応用の活路がある。

そこで本稿では、VR を活用した実用機器設計への起点として、VR 空間内に配置した有限長ソレノイドコイルによって生じる磁界分布を、リアルタイムで指定領域に表示できる可視化システムを開発した。本システムでは、Biot-Savart の法則に基づく厳密な物理演算により、コイル近傍の磁界の強さや向きをリアルタイムかつ定量的に可視化する。これにより、不可視である磁界分布の直感的な理解を促進でき、電磁機器設計への活用の足掛かりとなる。なお、将来的に本技術の特許化を検討しているため、一部の研究結果を割愛した。

2. 計算手法およびシステム環境

(2-1) 磁界計算法

VR 空間で作製したコイルによって生じる磁場は、Biot-Savart 則^[3]に基づく、以下 (1) 式を用いて計算を行う。

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{4\pi |\mathbf{r}|^3} \quad (1)$$

(1) 式において、 $d\mathbf{B}$ は微小磁束密度、 μ_0 は透磁率、 I は電流、 $d\mathbf{l}$ は微小線素ベクトル、 \mathbf{r} はコイル上の微小線素から観測点までの位置ベクトルを表す。磁界計算の精度を評価するため、有限長ソレノイドコイルの中心軸上における磁場の理論式^[3]を用いる。

(2-2) VR 環境の構築

本システムの構築にはゲームエンジン Unity^[4]を使用し、VR デバイスとして Meta Quest 2^[5]を用いた。また、本システムを動作させる計算機環境として、Intel Core i7-9700K プロセッサ (3.60 GHz)、AMD Radeon RX 550, 64 GB の RAM を搭載したデスクトップ PC を使用した。

3. 磁場ベクトル可視化システムの構築

本システムは、VR 空間内に配置された有限長ソレノイドコイルによって生じる磁界分布を、Biot-Savart の法則に基

づきリアルタイムで計算・可視化するものである。シミュレーション対象とする有限長ソレノイドの3次元モデルをVR空間内に配置し、設定した所定の領域内における各観測点に対して磁界の計算を行う。その結果は3次元矢印マーカールとして表示される。各マーカールは磁界の向きを示すとともに、その強度は不透明度と色調の変化により表現される。これにより、ユーザは空間的な磁界の広がりや強弱を直感的に把握可能である。図1に、配置した有限長ソレノイドコイルの端部周辺の磁界の可視化結果を示す。

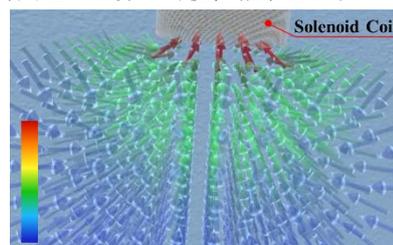


Fig. 1. Visualization examples on the proposed VR system.

4. システムの精度検証

本システムの磁界計算の妥当性を検証するため、10回巻きコイルの中心磁束密度のシミュレーション値と、円形コイルの重ね合わせに近似した理論計算値との比較を行った。比較結果を表1に示す。結果として、両者の相対誤差は1.04%であり、十分な精度を有していることが確認できた。

TABLE 1 VERIFICATION OF CALCULATION ACCURACY OF MAGNETIC FLUX DENSITY IN VR ENVIRONMENT

Theoretical Value [μT]	Simulation Values [μT]
124.9	123.6

文 献

- [1] B. Nuemberger et al., "Visualizing Spacecraft Magnetic Fields on the Web and in VR", *Proc. ACM Symp. on User Interface Software and Technology (UIST '23 Adjunct)*, pp. 1-3 San Francisco, USA, (2023-10)
- [2] S. Nakatani, T. Shimobaba, T. Ito, and A. Shiraki, "Development of Virtual-Reality-Based Electromagnetism-Teaching Materials Incorporating Gamification", *Proc. Int. Display Workshops (IDW)*, Vol. 30, pp. 1347-1350, (2023-12)
- [3] 小塚 洋司: 「電気磁気学—その物理像と詳論 (新装版)」, 森北出版 (2012-3)
- [4] Unity Technologies, "Unity," ver. 6000.0.47f1, 2025.
- [5] Meta Platforms, Inc., "Meta Quest 2", <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/> (2026-1-5)

平板を対象としたリモートフィールド 渦電流探傷法による孔状欠陥の検出

小林 徳康*, 高橋 栞太, 高草木 裕貴, 森 敦史, 山本 摂
(東芝エネルギーシステムズ株式会社)

Detection of Hole Like Defects by Remote Field Eddy Current Testing for Flat Plates
Noriyasu Kobayashi, Kanta Takahashi, Yuki Takakusagi, Atsushi Mori, Setsu Yamamoto
(Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)

1. はじめに

被検査体表面に開口を有する孔状欠陥に渦電流探傷法を適用すると、欠陥底部を流れる渦電流密度が開口部より指数関数的に低くなると共に、渦電流が欠陥の側面を流れ易いため、欠陥深さの評価が難しい。そこで、励磁コイルが発生する直接磁場により誘起された渦電流が二次的に発生し、欠陥底部まで浸透する間接磁場を利用し、原理的に高密度渦電流が存在しない領域での測定が可能であるリモートフィールド渦電流探傷法 (RFECT; Remote Field Eddy Current Testing) に着目した。一般的に、RFECT は管の検査に使用される⁽¹⁾が、平板の裏面欠陥検出への適用例⁽²⁾もある。今回、シミュレーション計算結果を基に試作した平板向け RFECT プローブを用い、孔状欠陥深さ評価の観点での検出性能を試験により確認した。

2. 磁束密度分布計算結果

励磁コイルを無欠陥の SUS316 製平板試験体上に設置し、周波数 10kHz で励磁した場合に試験体内部に発生する磁束密度分布の計算結果を図 1 に示す。同図では、間接磁場が試験体表面から深さ約 7mm で発生し、励磁コイルから約 50mm 離れた領域で試験体表面近傍に到達していることを確認できる。この領域に検出コイルを設置し、欠陥による間接磁場分布の変化に起因する検出コイル近傍の磁場分布変化を測定することで欠陥検出の可能性があると評価した。

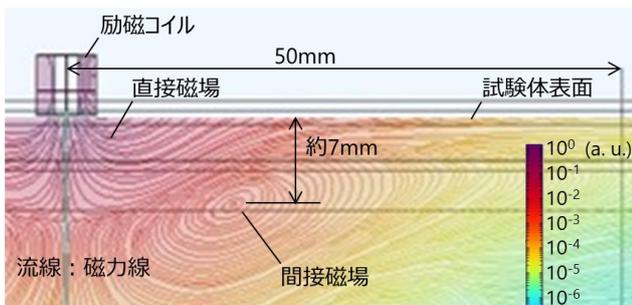


図 1 磁束密度分布計算結果

Fig.1. Calculated magnetic flux density distribution

3. 探傷試験方法及び結果

励磁・検出コイル間距離を 50mm とし、周波数 10, 25, 50kHz の条件で検出コイルが孔状欠陥 (直径 3mm で深さ 1, 2, 3, 4mm の平底穴) 近傍を通過するように走査して探傷試験を行った。深さ 1mm の平底穴による信号を基準とした平底穴深さと検出コイル出力電圧振幅との関係の試験結果を図 2 に示す。平底穴深さが深くなると検出コイル出力電圧振幅が単調に増加することから、平底穴深さを識別できることを確認した。また、表皮効果による磁場の浸透深さが深い低周波数条件ほど、平底穴深さの違いに対する検出コイル出力電圧振幅の差が大きくなり、高周波数条件より平底穴の深さを識別し易くなることを確認した。

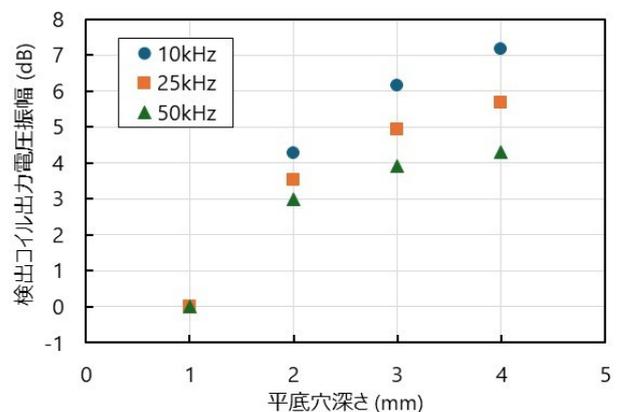


図 2 平底穴深さと検出コイル出力電圧振幅との関係の試験結果

Fig.2. Measured relationship between depths of flat bottom holes and amplitudes of detector coil output voltages

4. おわりに

平板向け RFECT にて、直径 3mm 孔状欠陥の深さ (1~4mm) を空間分解能 1mm で評価可能であることを確認した。

文 献

(1) T. R. Schmidt: Materials Evaluation, 42(2), 225-230 (1984)

(2) Y. S. Sun et al.: Materials Evaluation, 54(4), 510-512 (1996)

磁粉探傷試験における磁化方向に影響されないき裂形状の 定量的評価法の提案

福岡 克弘 (大阪産業大学)

Proposed Quantitative Evaluation Method for Crack Shape in Magnetic Particle Testing Independent of
Magnetization Direction

Katsuhiko Fukuoka (Osaka Sangyo University)

1. はじめに

磁粉探傷試験の探傷結果であるき裂へ付着した磁粉模様から、き裂形状を定量的評価することは不可能とされている。非破壊検査においては、検出されたき裂が破壊に与える影響の程度を判定するため、探傷結果に基づいてき裂形状を正確に定量的評価する技術の確立が、重要な課題の一つになっている。本研究では、き裂と磁化の方向の違いによるき裂への付着磁粉量を評価し、磁化の方向に影響されないき裂形状の推定評価手法の確立を目的とした。

2. 結果と考察

本研究では、図1のき裂に付着した磁粉の幅 W 、図2の付着磁粉の高さ H 、および図3の付着磁粉の幅と高さの割合 (アスペクト比) WH を探傷結果データベースとして、き裂形状を推定評価する。推定手順は、図1と図2よりき裂深さをそれぞれ推定し、それらの共通範囲を求める。この推定されたき裂深さと図3のアスペクト比 WH を用いてき裂幅を推定する。先行研究では、き裂と磁化の方向が直交する理想条件 (ここでは磁化方向 0° と呼ぶ) で探傷された磁粉幅と磁粉高さを用いて、同じ磁化方向 0° の探傷結果データベースからき裂形状を推定評価してきた⁽¹⁾。図1~3は、磁化方向 0° におけるき裂形状推定の一例である。ここで、実現場の探傷においてはき裂自体を目視確認することは通常できないため、探傷結果は磁化方向が 0° で得られたものとは限らない。そこで本研究では、異なる磁化方向の探傷結果データベース (磁粉幅、磁粉高さ、アスペクト比) を用いてき裂を推定し、定量的評価手法の一般化を検討した。推定対象き裂として、深さ: $70\mu\text{m}$ 、幅: $100\mu\text{m}$ のき裂を設定し、このき裂を磁化方向 5° で探傷すると、磁粉幅が $98.8\mu\text{m}$ 、磁粉高さが $10.8\mu\text{m}$ の探傷結果が得られた。これよりアスペクト比 WH は 9.15 と求められる。この探傷結果から、角度の異なる磁化方向の探傷結果データベースを用いてき裂形状の推定を行った結果を表1に示す。ここで、磁化方向 0° のデータベースを用いてき裂深さの推定を行った場合、磁粉幅のデータベースからは $74.5\mu\text{m}$ ~ $112.0\mu\text{m}$ 、磁粉高さのデータベースからは $53.3\mu\text{m}$ ~

$74.0\mu\text{m}$ のき裂深さと推定された。しかし、これらの推定結果の共通範囲は得られないため、推定エラーとなる。このことから、推定エラーとなるデータベースと推定結果が得られるデータベースの境界のデータベースが、正解データベースとなることが判る (ここでは磁化方向 5°)。この推定エラーを利用することで、実際に探傷された磁化方向の特定が可能であることが確認された。他の対象き裂および探傷磁化方向についても、同様の傾向が得られた。

本研究の一部は、科研費 (23K03874) の研究助成を受け実施したものである。

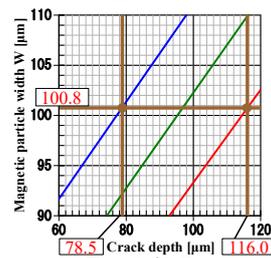


図1 磁粉幅
Fig.1. Particle width.

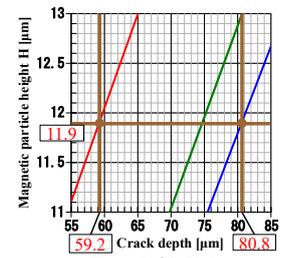


図2 磁粉高さ
Fig.2. Particle height.

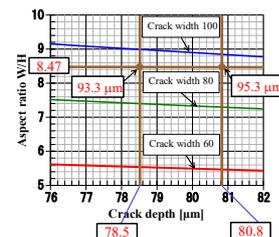


図3 アスペクト比
Fig.3. Aspect ratio.

表1 磁化方向 5° き裂形状の推定結果

Table 1. Estimation of crack dimensions from result at magnetization direction of 5°

Data Base ($^\circ$)	Estimation Crack Depth (μm)		Relative Error of Depth (%)		Estimation Crack Width (μm)		Relative Error of Width (%)	
	Error ~	Error	Error ~	Error	Error ~	Error	Error ~	Error
0	Error ~	Error	Error ~	Error	Error ~	Error	Error ~	Error
5	77.2 ~	75.4	10.2 ~	7.7	97.1 ~	98.3	1.7 ~	0.5
10	80.0 ~	83.1	14.2 ~	18.7	94.7 ~	96.8	4.1 ~	2.0
15	83.3 ~	89.8	19.0 ~	28.2	90.9 ~	94.7	7.9 ~	4.1
30	88.2 ~	120.0	26.0 ~	71.4	68.0 ~	81.2	31.1 ~	17.8
45	118.0 ~	146.3	68.5 ~	109.0	63.9 ~	70.9	35.3 ~	28.2

文献

(1) K.Fukuoka and S.Horiike, *Int. J. of Appl. Electromagn. Mech.*, Vol.52, No.3-4, pp.1545-1551 (2016-12)

磁気飽和を考慮したトロイダルコイルのインピーダンスを最大化する巻き数の推定手法

小西 弘宜* 高橋 慶多 (三菱電機株式会社)

Estimation Method for the Optimal Number of Turns to Maximize the Impedance
of a Toroidal Coil Considering Magnetic Saturation
Hironobu Konishi* Keita Takahashi (Mitsubishi Electric Corporation)

1. まえがき

電力変換器の小型化を目指す上で、ノイズフィルタ用コモンモードチョークコイル (CMC) の体積削減が課題となる。CMC の設計では、磁気飽和を考慮した場合、巻き数に比例して電流量が増加し、透磁率が低下することでインピーダンスが低下する。通常は磁気飽和が発生しないよう余裕を設けて巻き数を設計するが、小型化のためには、この余裕を最小限にすることで磁性体コアの体積を最小化する必要がある。

先行研究では、インダクタンスやインピーダンスの設計に向け、磁気飽和特性を考慮した解析モデルが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。本発表では CMC 用のナノクリスタルコアを対象に、同解析モデルを用いて磁気飽和特性を考慮し、CMC のインピーダンスを最大化する巻数を導出する手法を検討し、その妥当性を実測検証した結果を報告する。

2. 提案する巻き数の推定手法

ギャップのないトロイダルコイルのインダクタンス L [H] は、巻き数 N 、真空の透磁率 μ_0 [H/m]、磁性体の比透磁率 μ_r [a.u.]、実効断面積 S [m²]、実効磁路長 l [m] とすると次式で表される。

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r S}{l} \quad (1)$$

また、軟磁性体の透磁率の飽和挙動を数式的に考慮するために、次式に示す近似関数が提案されている⁽³⁾。

$$\mu_r = 1 + \frac{p}{1 + \left(\frac{H}{q}\right)^r} \quad (2)$$

ここで、変数 p , q , r はフィッティングパラメータ、 H は磁界強度[A/m]である。式(1)(2)から、 $dL/dN = 0$ より、インダクタンス L が極値となる巻き数 N_{opt} を導出する。

$$N_{opt} = \frac{Lq}{I} (X)^{\frac{1}{r}} \quad (3)$$

$$X = \frac{-(2+p - \frac{pr}{2}) - \sqrt{(2+p - \frac{pr}{2})^2 - 4(1+p)}}{2} \quad (4)$$

ここで、式(4)の導出では $r > 2$ の条件において2つの解が存在するが、インダクタンス L の巻き数に対する極値は、巻き数増加に伴う最大値を経た後に、飽和により透磁率が低下し下限値を取ると考えられる。そのため、本検討では最大値が得られる値が小さい解を採用した。

さらに、後述する試験結果より、インダクタンスが最大となる磁界強度の値が条件に寄らず一致する点より、透磁率と磁界強度に最適な動作点があるのではないかと考えた。式(3)(4)の導出過程から、インダクタンスが最大となる動作点の条件として次式が導出される。

$$\frac{d(\ln \mu_r)}{d(\ln H)} = -2 \quad (5)$$

3. 提案手法の検証

<3・1>提案式による巻き数の計算

本推定手法の妥当性を検証するため、市販のトロイダルコイルを対象に最適な巻き数を計算した。図1には式(2)のパラメータ導出に必要な直流重畳時の透磁率の計測系の概要を示す。コアの1次巻き線にはインピーダンス計測用のネットワークアナライザ (Agilent (現:Keysight) 社製, E5061B) が接続され、2次巻き線には直流重畳電流を印加するための直流電源 (KIKUSUI 社製, PAN16-10A) と直流電源のインピーダンス影響を抑制するための空芯リアクトル 1mH が直列接続される。直流重畳電流値はオシロスコープ (Tektronix 社製, MDO4104B-6)、電流プローブ (Tektronix 社製 TCP0030A) で計測した。

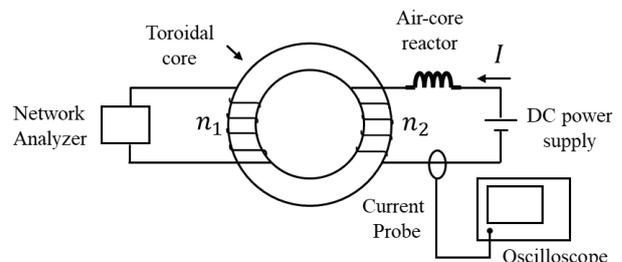


図1 透磁率磁界強度依存性の計測系

Fig.1. Measurement system for magnetic permeability dependence on magnetic field

本報告においてナノクリスタルコアは KEMET 社製の CMC (SCF39XV-420-2R4B004JH) を使用した。コアの寸法は、コアの樹脂ケースを含む実測値とカタログ値の差から、ケース厚みを 1mm と仮定して推定した。その結果、各寸法は高さ 18 mm, 内径 22 mm, 外形 41mm, 実効断面積は 120 mm², 実効磁路長は 97 mm と計算される。

1 次巻線の巻き数 n_1 , 2 次巻線の巻き数 n_2 を共に 1 巻とし、直流重畳電流を 4A まで 0.2A の間隔で変化させ、測定周波数 f を 100 kHz に設定しインピーダンス Z を測定した。周波数は低 Z 領域での測定精度悪化及び、空芯リアクトルの共振周波数 1MHz の影響を避けるよう決定した。

インピーダンス Z の計測結果から式 (6) より複素透磁率の実数部 μ' を、式 (7) より比透磁率 μ'_r を計算した。

$$\mu' = \frac{\text{Im}[Z]l}{2\pi f n_1^2 S} \quad (6)$$

$$\mu'_r = \frac{\mu'}{\mu_0} \quad (7)$$

また、磁界強度 H [A/m] は式 (8) で計算した。

$$H = \frac{n_2 I}{l} \quad (8)$$

図 2 には実測した比透磁率の磁界強度依存性を示す。式 (2) によるフィッティングは $H=0$ における比透磁率の実測値から求まる $p = 17762$ を初期条件として、 q および r に関して最小二乗法を用いた。

ただし、比透磁率の実測結果から式 (5) で算出されるインダクタンスが最大となる動作点は、 $H = 16 \sim 18$ [A/m] であることが推定されたため、上記動作点近傍での近似精度が向上するよう、近傍の 5 点のデータを用いてフィッティングを実施することで、 $q = 12.88$, $r = 3.16$ を決定した。

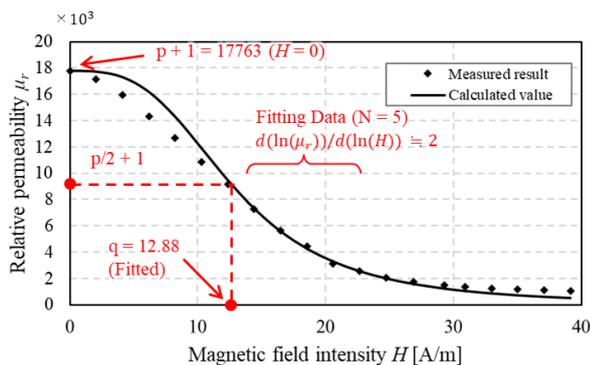


図2 比透磁率の磁界強度依存性

Fig.2. Dependence of relative permeability on magnetic field

表 1 には、式 (3) により得られた巻き数を掲載する。電流の増加に伴い、磁束密度が増加する為、 Z が最大となる巻き数が減少していることが分かる。式 (8) より磁界強度の平均値を計算すると、15.3 A/m となり、算出した最適動作点である 16 ~ 18 A/m と近い値であることを確認した。

表 1 各電流値における巻き数の推定値

Table 1. Estimated number of turns at each current value

電流 I [A]	巻き数 N_{opt}
0.2	7.4
0.4	3.7
0.6	2.5

<3・2> 実験による検証

図 3 には、巻き数とインピーダンスの関係を示した。図 1 に示す系において、1 次巻線の巻き数 n_1 , 及び直流重畳電流 I を変数として、 $n_1 I$ で計算される電流を 2 次巻線 ($n_2 = 1$) に印加した場合の 100 kHz におけるインピーダンスを計測した。なお、インピーダンスは最大値で規格化している。巻き数の推定値 N_{opt} とインピーダンスの最大値を比較すると、0.4 A, 0.6 A の条件では、予測値から 1 巻以内の精度で最大となる巻き数が推定できていることがわかる。 $N_{opt} = 7.4$ については、1.4 巻程度の差があるが、インピーダンス測定中の直流重畳電流の変動によるものが原因と考えている。以上より、提案手法の有効性を確認した。

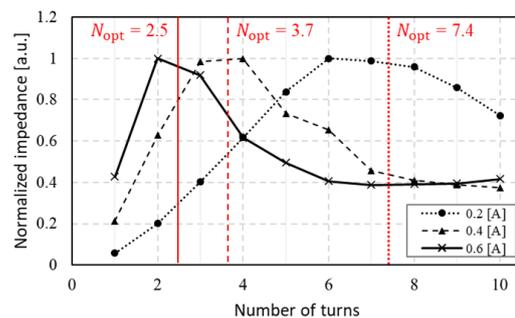


図3 最適な巻き数の実測値と推定値の比較

Fig.3. Comparison of measured and estimated values for the optimal number of turns

4. まとめと今後

本研究では、磁気飽和を考慮した場合におけるインピーダンスを最大化する巻き数を推定する手法を検討した。インダクタンスの理論式に先行研究で提示された透磁率の近似式を適用し、数式変形することで、巻き数を最大化するための数式を導出した。さらに、市販のナノクリスタルコアを対象に巻き数の推定を行い、実測した最大となる巻き数と比較することで、インピーダンスを最大化する巻き数を推定できることを確認した。

今後は本推定手法を活用した、磁性体コアの体積の最小化に向けた最適化手法を検討する予定である。

文献

- (1) Á. Ojeda-Rodríguez: EMC Europe., 1-6, (2023)
- (2) J. Allmeling: IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 1-6, (2012)
- (3) J. Imaoka: IEEE Transactions on Power Electronics., vol. 34, no. 9, 9033-9051, (2019)

半導体素子のターンオフ後に生じる導線内の電流の検討

宝本 学大*, 曾根原 誠, 梅堀 拓未 (信州大学)

Study on Current in Conductor Line after Semiconductor Device Turn-Off
Gakuto Takaramoto, Makoto Sonehara, Takumi Umebori (Shinshu University)

1. はじめに

多くの電源回路には、専らスイッチング電源が利用されている。スイッチング素子である半導体素子のターンオン/オフにより、負荷周辺の電流の流れ方などは広く知られており、配線・導線の寄生インダクタンスによるリンギングなどの影響などは深く議論・研究されている⁽¹⁾。

一方で、ターンオフ後の半導体素子周辺の導線における電流についてはあまり議論されていない。例えば、図1に降圧型DC-DCコンバータの典型的な回路を示すが、赤破線内の導線にも寄生インダクタンスがあるためトランジスタ(Tr)のターンオフ直後においてもターンオフ前の電流を流そうとする。既に筆者らは、Trのターンオフ直後に導線内に渦電流のように互い違いに流れる電流を実験的に明らかにしている⁽²⁾。

本稿では、スイッチング電源における半導体素子のターンオフ後を模擬した簡単な回路に対して、電磁解析ソフトウェアを用いて導線の断面形状と導線内に流れる電流を明らかにした。

2. スwitchング電源の模擬回路における電磁界解析

<2.1>解析条件 スwitchング電源などで半導体素子のターンオフ後の回路を検討するため、図2に示す電流源とスイッチ、導線で構成される等価回路モデルを用いた。図2の回路は電磁界解析ソフトウェア(JSOL; JMAG-Studio)を用いて解析した。本稿では、導線の断面形状を正方形(幅・高さ $w = h = 3$ [mm], 断面積 $A = 9$ [mm²]) および長方形(幅 $w = 9$ [mm], 高さ $h = 1$ [mm], 断面積 $A = 9$ [mm²])の2種類の解析結果について述べる。

電流 I は初め 9 A が流れていたものとし、 $t = 0$ [s] をターンオフの開始時とし、立下り時間は 10 ns に設定した。ターンオフしてから $5 \leq t \leq 45$ [μs] の範囲で 5 μs ごとに各導線内部の電流密度分布および各導線外部の磁界強度を解析した。

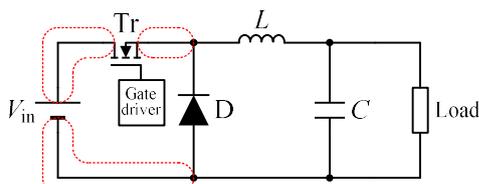


図1 典型的な降圧型DC-DCコンバータの回路図
Fig.1. Typical buck converter circuit diagram

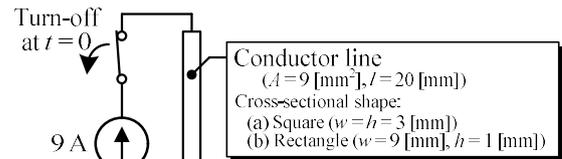


図2 解析で用いた半導体素子のターンオフ後を模擬した回路図
Fig.2. Equivalent circuit after semiconductor device turn-off used in electromagnetic field analysis

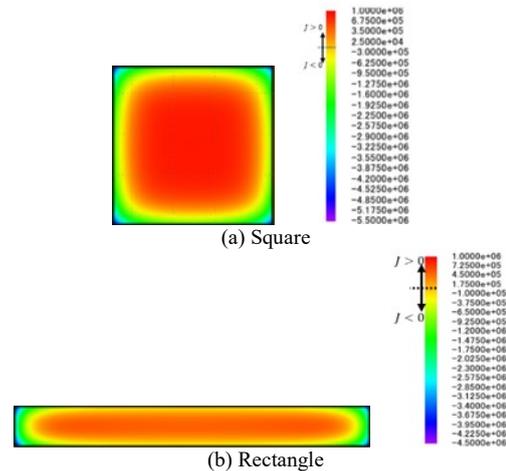


図3 $t = 5$ [μs]における各導線の電流密度分布の解析結果
Fig.3. Analysis results of current density J distribution for two types of conductor lines at $t = 5$ [μs]

<2.2>解析結果 図3に代表としてターンオフして 5 μs 経過した場合 ($t = 5$ [μs]) の各導線の電流密度分布の解析結果を示す。図3より、何れの導線も導線中央では紙面手前向きの電流 ($J > 0$)、導線端部では紙面奥向き ($J < 0$) の電流が流れ、導線内を互い違いに流れる電流が生じることが明らかになった。また、電流密度を積分するとゼロ、すなわち全電流としては 0 A である。発表当日は導線外側の磁界分布などについても述べる予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科学研究費助成事業(基盤B; 25K01240)の助成を受けたもので、ここに深謝する。

文献

- (1) 安東正登・和田圭二: 電気学会論文誌D, **137**, 2 168-174 (2017)
- (2) 平井大地・曾根原 誠・佐藤敏郎・須江 聡・宮本光教・久保利哉: R7 電気学会全国大会, 2-061 (2025)

EV オンボードチャージャー用 高効率リーケージトランスの基礎検討

飯田 健斗^{*1}, 上野 敦也^{2,3}, 曾根原 誠^{1,3} (¹信州大学, ²Epulse, ³eDEN)

Fundamental Study on High-Efficiency Leakage Transformer for EV Onboard Chargers

Kento Iida¹, Atsuya Ueno^{2,3}, Makoto Sonehara^{1,3} (¹Shinshu University, ²Epulse, ³eDEN)

1. はじめに

脱炭素化やカーボンニュートラルに向けた取り組みとして、モビリティの分野においては電気自動車 (EV) が国内外で急速に普及しつつある。また最近国内においては EV などの電動車を災害時の非常用電源として利用する V2L (Vehicle to Load) 技術が求められていて、2024 年 1 月の能登半島地震の被災地で活用された⁽¹⁾。V2L 技術などには絶縁型双方向コンバータなどで構成されるオンボードチャージャーが必要不可欠であり、その電力変換効率を高めることが急務になっている。また、EV に搭載されるため小型・軽量化にしなければならない。

既存のオンボードチャージャーにおける絶縁型双方向コンバータには、CLLC 共振型 DC-DC コンバータが広く採用されている⁽²⁾。CLLC 共振型 DC-DC コンバータの共振タンクでは、図 1 (a) に示すように結合係数の高いトランスと 2 つの共振インダクタを使用する構成が主流である。しかしながら、磁気部品を 3 点使用するため、コンバータの小型・軽量化の障壁となっており、電力変換効率の低下の要因にもなっている。

そこで筆者らは、トランスの漏れ磁束をあえて多くし、トランスと 2 つのインダクタを一体化した図 1 (b) に示すリーケージトランスを考案し、検討した。本発表では、自作したリーケージトランスと、既存の共振タンク用トランスおよびインダクタ (以降、共振タンク用磁気部品と呼称) をそれぞれコンバータに実装し、電力変換効率の実測値から比較した結果について述べる。

2. リーケージトランスについて

図 2 に作製したリーケージトランスの寸法を示す。鉄心には CIP コンポジット (Micrometals 製; T130-2) を用いたトロイダルコアを利用した。巻線には $\phi 0.55$ mm のエナメル線 (ダイドーハント製; 10155286) を用い、一次側は 29 turn, 二次側は 29 turn とした。既存の共振タンク用磁気部品に比べて、体積は約 59% 減少し、重量は約 62% 減少した。

3. CLLC 共振型 DC-DC コンバータの電力変換効率

図 3 に図 1 に基づく CLLC 共振型 DC-DC コンバータの電力変換効率の測定結果を示す。紙面の都合上、変換効率を測定した際の計測器類の詳細は割愛する。バッテリー放電方向において、入力電圧 V_i は 230~315 [V] の範囲とし、出

力電圧 V_o は 310 V とした。出力電力 P_o は 100~900 [W] の範囲でおおよそ 100 W 刻みになるように負荷を変化させた。また動作周波数 f_{sw} は、250 kHz, 300 kHz, 350 kHz, 400 kHz の 4 条件とした。

図 3 より、リーケージトランスを用いた CLLC 共振型 DC-DC コンバータの方が共振タンク用磁気部品を用いた同コンバータよりも電力変換効率が全ての条件で高くなることが明らかになった。これはリーケージトランスとして共振タンク用磁気部品を一体化したことによる半田実装の抵抗成分の低減や、低鉄損な CIP コンポジットコアによる鉄損の低減が主たる要因と考えられる。発表当日は、リーケージトランスの損失分離の結果についても述べる予定である。今後は、さらに電力変換効率が高くなるようにリーケージトランスの鉄心の材料や寸法、巻線の変更などを再検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科学研究費助成事業 (基盤 B; 25K01240) の助成を受けたもので、ここに深謝する。

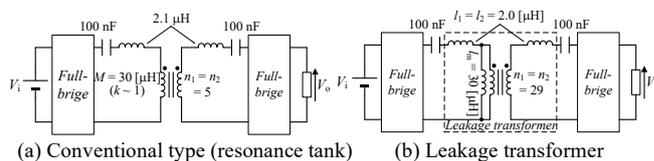


図 1 CLLC 共振型コンバータの回路図

Fig.1. Circuit diagrams of CLLC resonance converter

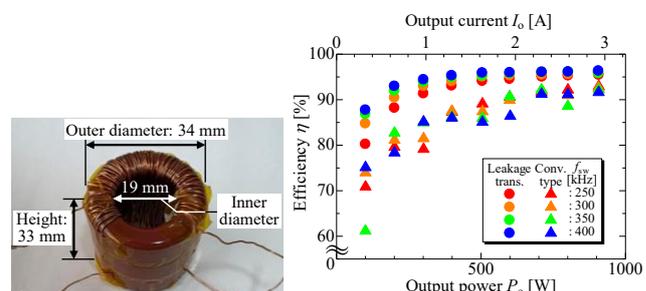


図 2 作製されたリーケージトランス

Fig.2. Fabricated leakage Transformer

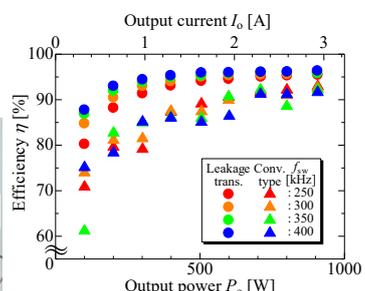


図 3 CLLC 共振型コンバータ電力変換効率の測定結果

Fig.3. Measurement results of power conversion efficiency in CLLC resonance converter

文献

- (1) 経済産業省 HP: https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/cev/cev-utilize.html (accessed 2025-12-26)
- (2) WolfSpeed HP: <https://www.wolf-speed.com/knowledge-center/article/designing-with-silicon-carbide-in-bidirectional-on-board-chargers/> (accessed 2025-12-26)

永電磁石のパルス駆動による吸着力の検討

菊池 良巳*, 中島 朱里, 脇若 弘之 (信州大学)

Investigation of adsorption force by pulse driving of permanent electromagnet
Yoshimi Kikuchi, Shuri Nakashima, Hiroyuki Wakiwaka (Shinshu University)

1. まえがき

本論文では、永電磁石 (EPM: Electro-Permanent Magnet) のスイッチングをパルス駆動により実施し、吸着力に及ぼす影響を電流波高値とパルス数について検討した。

吸着力は Maxwell 応力により $B^2S/(2\mu_0)$ として整理され、リフティング用途などに応用されている。NdFeB と AlNiCo の組合せにより、外部電力なしに吸着状態を保持し、電流パルスにより ON/OFF 動作を行う EPM が確立され、その設計原理と吸着力が検討された。EPM に関する研究課題として、高効率な磁気回路設計とトポロジ最適化が挙げられ、磁性材料、ギャップおよび磁力線の流路設計による特性改善が論じられている。しかし、パルス駆動時における電流波高値とパルス数が吸着力に及ぼす影響について、測定値と理論的考察を報告した例は少ない(1)(2)。本研究では、有限要素法と実測結果に基づき、AlNiCo の着磁条件の電流波高値とパルス数について検討した。

2. 構造と実験方法

図 1 に示すように、EPM の構造は 3 つの要素から構成される。①高保持力を有する NdFeB と低保持力の AlNiCo、②両磁石と鎖交するコイル、③磁路を構成する磁性材料である。ギャップは、磁路コア (SS400) と吸着コアとの間に 0.1mm を設けた。EPM の主要諸元を表 1 に示す。コイル電流は AlNiCo の保持力以上に相当する Max3.0A (124kA/m) まで印可し、通電時間はコイルの時定数を考慮して 40ms とした。

3. 結果と検討

<3・1>パルス電流による吸着力 初期に、ヒステリシス特性の負磁界側メジャーループに設定するため、パルス電流-2.16A(-89kA/m)を印可し、NdFeB と AlNiCo の磁化方向をお互いに逆向き設定した。次に、パルス電流を 0.22~2.16A を印可し、吸着力を測定した。その結果、保磁力が約 200kA/m に達した付近で AlNiCo の磁化方向が反転し、NdFeB と同方向となることを確認された。これに伴い、吸着力は急峻に増加し、飽和値になることが分かった。

<3・2>着磁回数による吸着力 図 2 に、パルス電流をパラメータとした着磁回数に対する吸着力特性を示す。着磁回数 N=4 以上で吸着力が飽和し、さらにパルス電流 1.48A 以上では吸着力がほぼ一定となることが分かった。

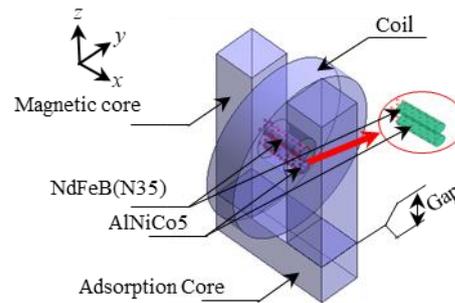


図 1 EPM の構造

Fig.1 Structure of electro-permanent magnet

表 1 EPM の諸元

Table 1 Specification of electro-permanent magnet

Core	Cross section	S	$10 \times 10\text{mm}^2$
	Adsorption core		$30 \times 10 \times 10\text{mm}^3$
Magnet	AlNiCo	$\Phi 3.5\text{mm} \times 10\text{mm}$	$B_r: 1.25\text{T}$
	NdFeB	$\Phi 3.5\text{mm} \times 10\text{mm}$	$B_r: 1.21\text{T}$
Coil	Wire	$\Phi 0.31\text{mm} \times 440\text{turn}$	$\sim 3.0\text{A}$
Gap	Teflon sheet	$T 0.1 \sim 1.0\text{mm}$	

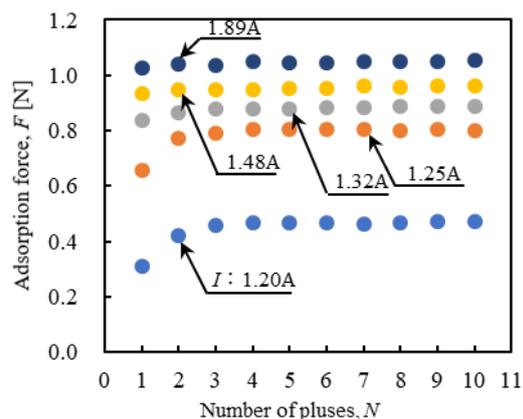


図 2 パルス着磁回数による吸着力

Figure 2. Adsorption force as number of pulse magnetization

文献

(1) F.Ochoa, T.J.Dodd, USES Conf. Proc., 02 (2015)

(2) 菊池：第 34 回 MAGDA カンファレンス, OS-8-4(2025)

Sm₂Fe₁₇N₃焼結磁石の焼結時特性低下要因の調査

西山篤秀*, 飯田悠太, 井上輝太(日本特殊陶業株), 大城亮介, 竹澤昌晃(九州工業大学),
 細川明秀, 平山悠介((国立)産業技術総合研究所)

Study on degradation factors of Sm₂Fe₁₇N₃ magnet properties in the sintering process

Atsuhide Nishiyama*, Yuta Iida, Teruta Inoue (Niterraco., Ltd.),

Ryosuke Oshiro, Masaaki Takezawa (Kyushu Institute of Technology), Akihide Hosokawa, Yusuke Hirayama (AIST)

1. 緒言

Sm₂Fe₁₇N₃は高い飽和磁化および異方性磁場を有し、耐熱性に優れるため永久磁石材料として高いポテンシャルを有しているとされる一方で、緻密な焼結体を得る際に粉末時の保磁力を低下させてしまうことが課題とされている。Sodaらは粉末作製から焼結までの一連のプロセスを低酸素雰囲気化することによって、焼結時に保磁力が激減する現象を大幅に抑制できることを報告しているが(1)、完全に抑止した例は未だ報告されていない。酸化以外では一般的に保磁力低下の原因として、結晶粒径の粗大化や粒界および粒内の不純物・欠損の存在、添加元素の影響などが知られているが(2)、低酸素雰囲気中で焼結されたSm₂Fe₁₇N₃の低下原因は明らかになっていない。Kerr効果顕微鏡を用いた磁化反転挙動観察を実施した結果、着磁後の残留磁化状態から多磁区化を起こす結晶粒が確認され(図1)、これを解消することがSm₂Fe₁₇N₃焼結磁石の保磁力向上につながると考えた。そこで今回、この観測結果に対して様々な組織観察手法を組み合わせて、保磁力低下を引き起こす要因を調査したので、これを報告する。

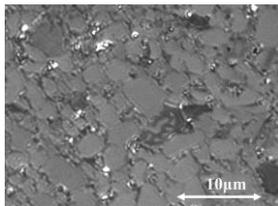


図1 Sm₂Fe₁₇N₃磁区観察結果
 Fig.1. Magnetic domain observation of Sm₂Fe₁₇N₃

2. 実験方法

グローブボックス中で粉砕しSm₂Fe₁₇N₃微粉末を超音波ホモジナイザーにて分散させることによって原料粉末を得る。この粉末を非磁性超硬ダイス中に充填し、2Tの外部磁場中で加圧することによって成形体を作り、これを真空雰囲気下で任意の圧力温度条件のもと通電加圧焼結を行うことで焼結体とした。この一連の工程は大気を遮断した低酸素雰囲気中で実施されている。得られた焼結体に対しては、磁気特性をPPMS-VSMによって、磁区観察をKerr効果顕微鏡によって、組織観察をFE-SEM, EBSD, EPMAによって評価を行った。

3. 結果

<3・1>結晶粒径の影響

Kerr効果顕微鏡にて粗大粒子の磁化反転が速いことが確認された。SEM観察の結果から、粉碎時に粗大粒が残っていたことが確認された。一方で、焼結時に結晶粒の粗大化は起きていない。

<3・2>粒界の不純物

SEM-EDXやEPMAの結果から、粒界三重点や二粒子界面にFeやSmの異相が存在することが確認された。それらと同一視野の磁化反転挙動をKerr効果顕微鏡で観察すると、それらの周囲の磁化反転挙動が他の組織と比較して特異的な挙動を示すことはなかった。

<3・3>粒内の歪の影響

EBSDの結果から、粒子の結晶性による優劣を判断した。それらと同一視野の磁化反転挙動をKerr効果顕微鏡で観察すると、それらの周囲の磁化反転挙動が他の組織と比較して特異的な挙動を示すことはなかった。

<3・4>粒内の偏析の影響

SEM-EDXやEPMAの結果から、一部のSm-Fe-N結晶粒の中にFeやSmの濃度の高い偏析が存在することが確認された(図2)。それらと同一視野の磁化反転挙動をKerr効果顕微鏡で観察すると、磁化反転挙動が速く着磁後の残留磁化状態で多磁区化を起こしており、粒内偏析による保磁力への強い影響があることが確認された。当日の発表ではこれらの詳細なデータについて報告する。

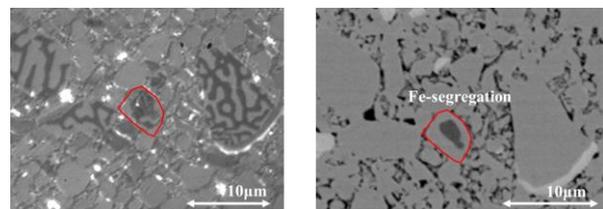


図2 偏析を持つSm-Fe-N観察結果(左:Kerr顕微鏡, 右:SEM)
 Fig.2. Observation of Sm-Fe-N with segregation
 (L:Kerr-Microscope, R:SEM)

文献

(1) R. Soda, et al., AIP Advances, 6, 115108 (2016).

(2) 佐川真人, 永久磁石—材料科学と応用—(2007).

低酸素雰囲気で作製した $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 系 焼結磁石の磁区観察

大城 亮介*, 竹澤 昌晃 (九州工業大学), 西山 篤秀, 飯田 悠太, 井上 輝太 (日本特殊陶業株), 細川明秀, 平山悠介 ((国立)産業技術総合研究所)

Magnetic domain observation of $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ -based sintered magnets fabricated in a low-oxygen atmosphere

Ryosuke Oshiro, Masaaki Takezawa (Kyushu Institute of Technology),

Atsuhide Nishiyama, Yuta Iida, Teruta Inoue (NiterraCo., Ltd.), Akihide Hosokawa, Yusuke Hirayama (AIST)

1. はじめに

$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 系焼結磁石は, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系焼結磁石を代替する高性能磁石材料として, さらなる残留磁束密度と保磁力の向上が望まれている^{(1),(2)}. そこで本研究では, $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 系焼結磁石において, 結晶粒界に偏析した Fe が周辺の結晶粒の磁気特性に与える影響を明らかにするために, 偏析した Fe の周辺で減磁過程における磁区構造変化を調べ, その影響について考察した.

2. 実験方法

観察した試料の特性を Table.1 に示す. 試料表面を鏡面研磨した後, 磁気 Kerr 効果顕微鏡を用いて試料表面の複数視野を観察した. 交流消磁した試料の消磁状態から磁区観察を始め, その後+50 kOe のパルス着磁をした後, -1 kOe の減磁界を印加した後の残留磁化状態の磁区像を取得した. さらに減磁界を-7kOe まで 1kOe ずつ増加させ, 最後に-50 kOe のパルス磁界を印加して, 磁区構造の変化を観察した. 磁石試料の ab 面では縦 Kerr 効果で面内磁化成分を, c 面では極 Kerr 効果で磁化の極成分を観察した.

3. 実験結果と考察

Fig.1 は, ab 面において結晶粒界に偏析した Fe を含む視野と含まない視野, Fig.2 は c 面で Fe 偏析を含む視野と含まない視野を磁区観察した結果である. 青で塗りつぶした箇所が粒界に偏析した Fe であり, その他の色で塗りつぶした箇所は各減磁界強度で磁区構造変化 (減磁) が確認された結晶粒である. Fig.1 より, Fe 偏析のある視野とない視野で, 減磁の起きた結晶粒の割合に差異があったものの, 各結晶粒での減磁に要する減磁界強度の分布には, Fe 偏析による大きな影響は見られなかった. すなわち, 粒界での Fe 偏析が周囲の結晶粒の保磁力を低下させる影響は限定的であると考えられる. また, 減磁の起きる結晶粒の割合の差異についても, 観察視野によるばらつきを考慮すると, Fe 偏析による影響があったとは断定できない. Fig.2 に示す c 面の観察においても, Fe 偏析のある視野とない視野で, 減磁過程における磁区構造変化に明確な差異は観察されなかった.

以上の結果より, 結晶粒界に偏析した Fe は周囲の結晶粒

表 1 観察試料の特性
Table 1. Characteristics of Observation Samples.

Sample	Powder particle size (μm)	H_{cj} (kOe)	B_s (kG)	B_r (kG)	Observation plane
A	3.22	5.31	12.57	10.96	ab-plane
B	3.22	5.23	12.72	11.04	c-plane

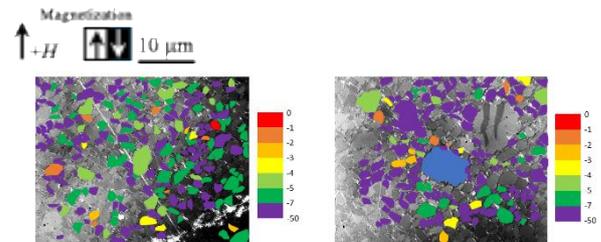


図 1 ab 面の磁区観察結果
Fig.1. Magnetic domain observation results on the ab-plane.

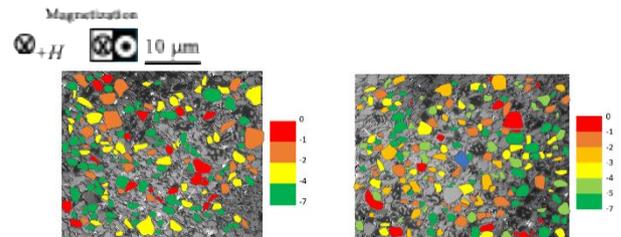


図 2 c 面の磁区観察結果
Fig.2. Magnetic domain observation results on the c-plane.

の減磁挙動に大きな影響は与えていないと考えられる.

4. まとめ

$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 系焼結磁石において, 粒界での Fe 偏析は周囲の結晶粒の保磁力に大きな影響を与えていないことが分かった. 今後は, 低い減磁界強度で減磁が起きている結晶粒の保磁力低下の原因を解明していくことが期待される.

文献

- (1) 高木健太, 電気学会論文誌 A 基礎材料共通部門誌, 145, 188-193 (2025).
- (2) Y. Hirayama, Z. Liu, W. Yamaguchi, K. Takagi, and K. Ozaki, IEEE Trans. Magn., 59, 1-4 (2023).

Nd-Fe-B 系焼結磁石における減磁界中での 加熱による磁区構造の変化

弘中 陽大*, 森本 佑治, 竹澤 昌晃 (九州工業大学)
松本 紀久 (三菱電機)

Changes in the Magnetic Domain Structure of Nd-Fe-B Sintered Magnets Due to Heating in a Demagnetizing Field

Yota Hironaka*, Yuji Morimoto, Masaaki Takezawa (Kyushu Institute of Technology)

Norihisa Matsumoto (Mitsubishi Electric Corporation)

1. はじめに

電気自動車やハイブリッド自動車の普及に伴い、駆動モータ用の永久磁石にはさらなる性能向上が求められている。モータ内部の磁石材料に加わる熱や圧縮応力による不可逆減磁を抑制するための指針を導出するため、これまでに著者らは、熱と応力の複合負荷による Nd-Fe-B 系焼結磁石の磁区構造変化を調べてきたが⁽¹⁾、モータ運転時に作用する減磁界については十分に考慮されていなかった。本研究では、磁石試料に減磁界を印加した状態で加熱や応力付与を行うことで実使用条件を再現した際の磁区構造変化を観察して、その要因を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

観察試料には、約 1.4 T の残留磁束密度と約 1 MA/m の保磁力を有する Nd-Fe-B 系焼結磁石を用いた。磁気 Kerr 効果顕微鏡を用いて、減磁界を印加しない状態と印加した状態での熱減磁による磁区構造変化を観察した。

熱減磁は、試料を 48~50 °C に加熱することで行った。着磁方向とは逆向きの -2.7 kOe の減磁界の有無による磁区構造の変化を比較した。観察は図 1 に示す手順で実施し、同一視野 (8 視野) を対象として評価した。

3. 実験結果と考察

8 視野で約 800 個の結晶粒の磁区構造を観察した。図 2 に、減磁界の無い場合とある場合で、着磁後、加熱中、および室温に戻した際の磁区観察の結果を示す。この結晶粒では、着磁後でも多磁区構造であり、減磁界の無い場合では変化しなかった結晶粒が、減磁界のある場合ではその減磁方向の磁化成分を有する黒色の磁区面積の増加が観察された。また、減磁界の有無によって磁区構造の変化に違いが観察された。このことは、減磁界が磁区構造の変化に影響を及ぼしていることを示唆している。

4. まとめ

Nd-Fe-B 系焼結磁石において、減磁界の有無によって磁区構造変化が異なる結晶粒が観察された。今後、応力印加による磁区構造変化も観察する予定である。

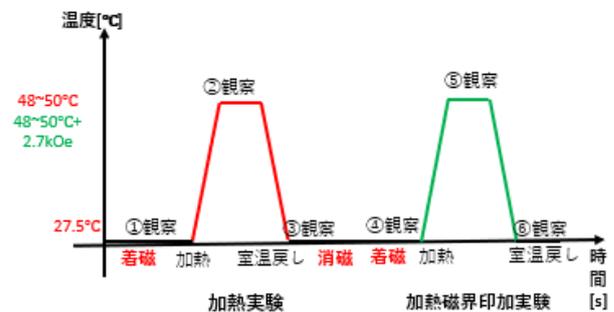


図 1 加熱実験の観察手順

Fig.1. Observation Procedure for Heating Experiment

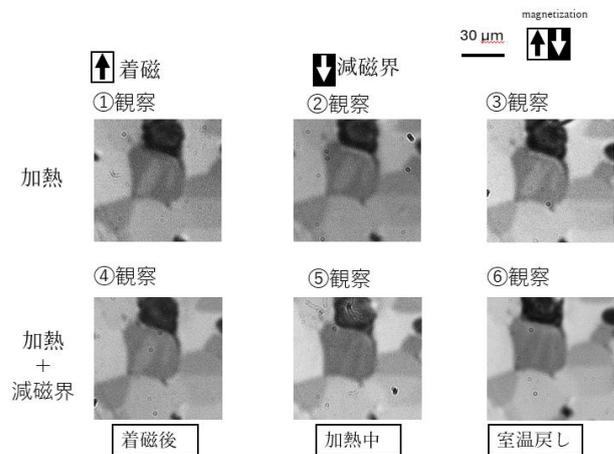


図 2 着磁後、加熱中、室温戻しの際の磁区像

Fig.2. Magnetic domain images after magnetization, during heating, and

return to room temperature

文 献

- (1) 竹澤昌晃・田村紘大・森本祐治・松本紀久：電気学会マグネティックス研究会，MAG-22-080 (2022)

La, Sm 添加 Nd-Fe-B 系焼結磁石への粒界拡散

平川 暁大*¹, 山下 昂洋¹, 柳井 武志¹, 岩崎 亮人², 中野 正基¹
(長崎大学¹, 三菱電機²)

Grain boundary diffusion of Nd-Fe-B sintered magnets with La and Sm additives
Akihiro Hirakawa, Akihiro Yamashita, Takeshi Yanai, Akito Iwasaki and Masaki Nakano
(Nagasaki University, Mitsubishi Electric Corporation)

1. はじめに

現状、永久磁石モータとして広く使われている Nd-Fe-B 系磁石は、産業用（車載用など）、医療用など様々な分野で使用されているが、キュリー温度が一般的に約 310 °C と低く、100 °C 以上の高温下では保磁力の急激な減少が生じる。そこで、xEV 等での 150~200 °C の高温下で使用する際には、Tb(テルビウム)等の重希土類元素を粒界拡散し、室温での Nd-Fe-B 系磁石の保磁力を向上させ、高温下での使用を実現している。しかし、重希土類元素は、(1)埋蔵量が少なく高価格、(2)特定地域に埋蔵されているため、供給リスクを抱える等の懸念があり、その使用量を減らす取り組みがなされてきた。その中で、岩崎らは、Nd-Fe-B 系焼結磁石に対し La(ランタン)および Sm(サマリウム)を微量添加することで、①保磁力の温度係数の向上や②La, Sm が結晶粒界に偏析することを報告している^[1]。

本稿では、Tb 等の重希土類元素の粒界拡散における La・Sm 添加のシナジー効果を検討したので報告する。

2. 実験方法

粒界拡散を施す試料として、厚さ 1 mm の焼結磁石：サンプル① (La・Sm 添加量：多) とサンプル② (La・Sm 添加量：少) を準備した。各々のサンプル表面に、PLD(Pulsed Laser Deposition)法を用いて、Tb-Cu 膜を成膜後、温度：800 °C で熱処理を施した。磁気特性は VSM で測定し、結晶構造は X 線回折で観察した。

3. 実験結果及び考察

図 1 は、サンプル①および②における粒界拡散における累積熱処理時間と保磁力の関係を示して

いる。本結果から、重希土類を多量に含まない Tb-Cu 系添加合金においても、La および Sm の微量添加によるシナジー効果の可能性が示唆される。具体的には、累積熱処理時間が 2 時間以上になった際、La, Sm の添加量が多いサンプル①の保磁力が、サンプル②の保磁力よりも大きくなる。この原因として、La および Sm の添加量が多いサンプル①において、結晶粒界や三重点を中心に La・Sm が偏析し、それに伴って Tb などの重希土類元素が粒界層へ効率的に拡散・配置された可能性を示唆している。

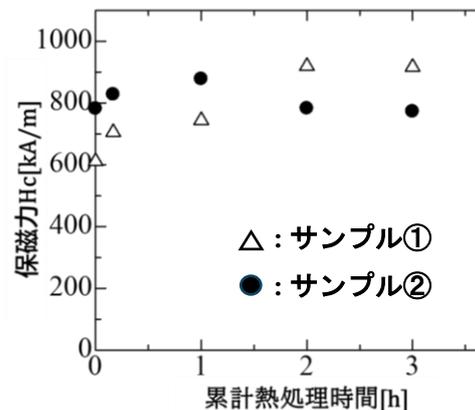


図 1 異なる La, Sm 含有量のサンプルにおける Tb-Cu 粒界拡散の保磁力に及ぼす影響
Fig.1. Effect of Tb-Cu grain boundary diffusion on the coercivity of samples with different La and Sm contents.

参考文献

[1] 岩崎亮人, 中野善和, 中村泰貴：令和 3 年電気学会全国大会講演概要集, No.2-84(2021).

磁性コアの鉄損に対する荷重影響の実験的検証

中山 諒人*, 大元 靖理, 重松 浩一, 今岡 淳, 山本 真義 (名古屋大学),
古井 崇介 (ニデックモビリティ株式会社)

Experimental Analysis of the Influence of Mechanical Stress on Core Loss in Magnetic Cores
Ryoto Nakayama, Yasumichi Omoto, Koichi Shigematsu, Jun Imaoka, Masayoshi Yamamoto (Nagoya University),
Shusuke Furui (NIDEC MOBILITY CORPORATION)

1. はじめに

近年、地球温暖化対策の一環として注目されるハイブリッド電気自動車(HEV)は電気自動車(BEV)と異なりエンジンを有し、車載補機用 DC-DC コンバータはエンジン近傍に配置される場合が多い。そのため、エンジン動作時に発生する振動が DC-DC コンバータに伝達され、DC-DC コンバータの内部部品、特にトランスなどの磁性コアに振動が加わる。したがって、エンジン振動によるコアの破損を防止することは、DC-DC コンバータの信頼性確保の観点から、重要な課題である。

この振動対策の一例として、実際の製品では図1のように押さえばねを用いて磁性コアを固定する構造が採用されている。

しかし、押さえばねでコアに荷重を印加すると、DC-DC コンバータの変換効率が低下する場合がある。文献(1)では、応力下にある電磁鋼板では鉄損が増加することが一般に知られていることから、押さえばねによってコアに加わる荷重が鉄損に影響を及ぼした結果、変換効率の低下を招いている可能性がある(1)。

また、車載補機用 DC-DC コンバータは、エアコンやカーナビ、カーオーディオなど多様な負荷に接続される。これらの負荷は最大出力で常時動作するわけではないため、DC-DC コンバータは軽負荷状態での運転時間が長い。磁性コアの損失(銅損・鉄損)は DC-DC コンバータの総損失の一部を占めるが、軽負荷時には巻線に流れる電流が小さいため銅損は減少し、相対的に鉄損の影響が支配的になる。よって



図1 押さえばねの実装例

Fig.1. Implementation Example of a Retaining Spring

鉄損の特性を理解することは、実運転条件下での効率改善や信頼性向上に資する重要な課題である。

そこで本研究では、フェライトコアに荷重を印加した場合の鉄損変化に着目し、コア単体を対象とした押さえばねによる荷重印加実験を通じて、鉄損に与える影響を実験的に明らかにする。

2. 実験環境

本研究では、EI形状のフェライトコア(DMR96A)を用いて検証を行った。コアの主な材料特性を表1に示す。

荷重印加の位置・量および測定の実験性を確保するため、本研究では専用治具を用いた。図2に治具の部品を、図3に治具組立後の外観を示す。

測定への磁気的影響を避けるため、治具を構成するBASEはA5052製(アルミニウムとマグネシウムの合金)、SHIMはC2801P/C2680P製(銅と亜鉛の合金)、SPRING_PLATEはSUS301-CSP-3製(オーステナイト系ステンレス)でいずれも非磁性体で作製した。これにより、測定結果はコア自身の磁気特性変化のみを反映するようにした。

鉄損の測定にはBHアナライザ(岩崎通信機株式会社製SY-8219)を用いた。その主な設定値を表2に示す。実効磁路長および実効断面積は、使用したEIコアの形状寸法に基づいて算出した。

鉄損測定は室温環境下で実施した。全測定を同一環境下で行っているため、荷重条件間の温度変動の影響は小さいと考えられる。

表1 コアの材料特性

Table 1. Core material properties

Characteristics	Values	Conditions	
Initial Permeability	3300±25%	f=10 kHz	25°C
Saturation Magnetic Flux Density	540 mT	B<0.25 mT	
Residual Magnetic Flux Density	55 mT	1194 A/m	25°C
Coercive Force	10 A/m	50 Hz	

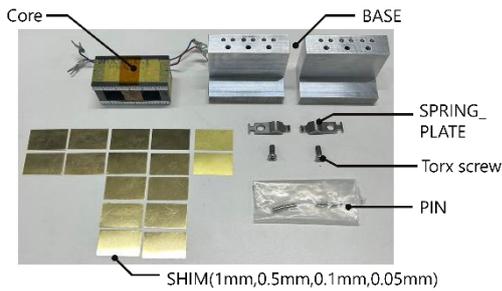


図2 治具一覧
Fig. 2. Fixture Parts

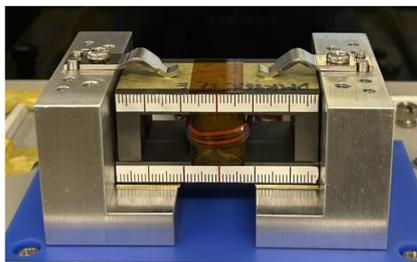


図3 組み立て後の治具外観
Fig. 3. Assembled Fixture Appearance

表2 BHアナライザの主な設定値
Table 2. Main Settings of BH Analyzer

Items	Values
Effective Magnetic Path Length	83.80 mm
Effective Cross-Sectional Area	361.60 mm ²
Primary Winding	2 turns
Secondary Winding	2 turns
Phase angle (Current-Voltage Phase Lag)	80.0 degree
Maximum Magnetic Flux Density	60-170 mT
Measurement Frequency	90.0 kHz

コアに印加する荷重は、コアと BASE の間に挿入する SHIM の厚さを変更することで調整した。また、締結条件のばらつきを抑えるため、トルクスネジの締結トルクは 1.0 N・m で統一した。

本研究では、0-245 N の範囲で 12 段階の荷重条件を設定し、各条件に対して鉄損測定を行った。

3. 実験結果

各荷重条件の実測値は最大磁束密度 B_m が BH アナライザの制約で設定値から若干ばらつくため、荷重と鉄損の関係を直接比較することは困難である。

そこで最大磁束密度の条件を統一したうえで比較・分析を行うため、得られた実測値に対してスタインメッツ方程式を用いたフィッティングを実施した。スタインメッツ方

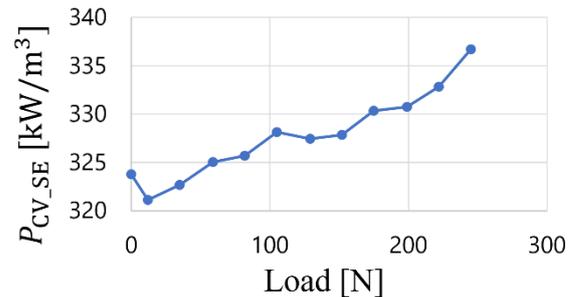


図4 $B_m=200$ mT における荷重と鉄損の関係
Fig. 4. Relationship between Load and Iron Loss at 200mT

程式は、磁性材料の鉄損評価に広く用いられており、式(1)で表される⁽²⁾。

$$P_{CV} = k \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \quad (1)$$

ここで、 P_{CV} は鉄損、 f は測定周波数、 B_m は最大磁束密度、 k 、 α 、 β はスタインメッツパラメータである。

フィッティングによって得られたスタインメッツパラメータを用い、各最大磁束密度における鉄損 P_{CV_SE} を推定した。図4に、最大磁束密度 200 mT の場合の荷重と鉄損の関係を示す。図4より、印加する荷重の増加に伴い、スタインメッツ方程式を用いて推定した鉄損 P_{CV_SE} が増加する傾向が確認された。

この鉄損増加の要因として、荷重の印加によりコア内部に機械的歪みが生じ、磁区構造の変化や磁壁移動の障害が引き起こされることで、ヒステリシス損または渦電流損が増加した可能性が考えられる。

一方で、0 N から 12 N にかけて鉄損が一時的に低下する現象が観測された。この要因として、コア加工時に生じる表面の微小な凹凸による隙間が初期荷重の印加によって圧縮され、実効的なエアギャップが減少したと考えられる。これにより磁路の連続性が向上し、鉄損が一時的に減少したと推測される。

4. 結論

フェライトコアに機械的応力を印加した場合の鉄損変化を実験的に評価した。結果として、印加する荷重の増加に伴い鉄損が増加することを確認した。

今後は低応力域で鉄損が低減する要因を明らかにする予定である。

文 献

- (1) 谷 良浩, 大穀 晃裕, 中野 正嗣, 有田 秀哲, 山口 信一, 都出 結花利, “応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性”, 日本磁気学会誌, Vol.30, No.2, pp.196-200, 2006.
- (2) Kalina Detka and Krzysztof Górecki, “Modelling the power losses in the ferromagnetic materials”, Materials Science-Poland, Vol.35(2), pp.398-404, 2017.

プラズマ回転電極法で作製された鉄粉からなる 圧粉磁心の試作と磁気特性の評価

児玉雄大*, 吉田栄吉, 阿加賽見, 室賀翔, 岡本聡, 遠藤恭 (東北大学)

Magnetic Properties of Dust Cores Made from Iron Powder Fabricated by Plasma Rotating Electrode Process
Yudai Kodama, Shigeyoshi Yoshida, Saijian Ajia, Sho Muroga, Satoshi Okamoto, and Yasushi Endo (Tohoku University)

1. 背景

樹脂と混練した鉄粉でからなる圧粉磁心は、等方的な絶縁性、高い形状自由性、高周波数帯で低損失などの特長を有するため、モータリアクトルの磁心材料として注目されている。圧粉磁心は、粉末間に存在する絶縁層によって渦電流が抑制されるものの、充填率の低下により飽和磁束密度と透磁率が減少するといった課題がある。これらの課題を解決するために圧粉磁心における充填密度の向上が求められている。そのため、我々のグループでは、圧粉磁心の新たな原料粉として粒子内部のガス欠陥が少ないことが報告されているプラズマ回転電極(PREP)法⁽¹⁾で作製された粉末に着目した。本研究では、PREP鉄粉とアトマイズ鉄粉を用いて圧粉磁心を作製し、それらの磁気特性について比較した。

2. 磁心の作製法

電解精錬を行った鉄を原料とした PREP 鉄粉(A) (D_{50} : 50.2 μm)と電解精錬を行っていない鉄を原料とした PREP 鉄粉(B) (D_{50} : 68.4 μm)の2種類を圧粉磁心の原料粉として使用した。また、PREP鉄粉の比較対象としてガスアトマイズ法で作製された鉄粉(D_{50} : 39.4 μm)と水アトマイズ法で作製された DenjiroTM (平均粒径 : 85.2 μm)⁽²⁾を使用した。

圧粉磁心(外径 13 mm, 内径 8 mm, 高さ 4-5 mm)の作製法については、他の文献⁽³⁾に詳細を述べているので、ここでは省略する。

粉末および作製した磁心の構造と磁気特性は、SEM, VSM, インピーダンスアナライザを用いて評価した。

3. 結果および考察

図1に PREP 鉄粉(A)とガスアトマイズ鉄粉の SEM 像を示す。PREP 鉄粉(A)はアトマイズ鉄粉と比較して、円形度が高く、表面が滑らかであることが確認できる。また、PREP 鉄粉(A)には、サテライト粉末が存在しなかった。

表1に作製した圧粉磁心の密度と飽和磁束密度、透磁率を示す。PREP鉄粉からなる磁心では、他の粉末からなる磁心と比べて密度が高くなり、飽和磁束密度および透磁率についても高くなった。これは、PREP鉄粉が他の粉末と比較してガス欠陥が少ないのに加えて円形度が高いため、流動性が高くなったことが影響したと考えられる。以上より

PREP 粉を圧粉磁心の原料として使用することで、飽和磁束密度および透磁率の向上が可能であることが明らかとなった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、PREP 鉄粉を提供いただいた東北大学未来科学技術共同研究センター(NICHe)千葉明彦教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト JPMXP1122715503 の支援のもと行われました。また、科研費 JP25K17634 および東北大学国際集積エレクトロニクス開発センター(CIES)、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター(CSIS)の支援のもと行われました。

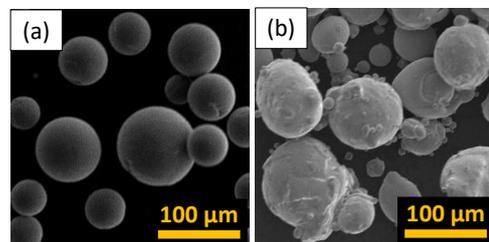


図1 圧粉磁心に使用した鉄粉の SEM 像

(a) PREP 鉄粉(A), (b) ガスアトマイズ鉄粉

Fig. 1. SEM image of the iron powders used in the dust cores.

(a) PREP powder(A), (b) gas-atomized iron powder

表1 異なる鉄粉で構成された磁心の構造と磁気特性
Table 1. Structure and magnetic properties of the dust cores with different iron powders.

Sample	Density [g/cm ³]	Saturation magnetic flux density [T]	Permeability ($f=10$ kHz)
PREP (A)	7.33	2.03	87
PREP (B)	7.17	1.97	77
Atomize	7.25	1.97	78
Denjiro TM	7.10	1.94	70

文献

- (1)G. Chen etc al., Powder Technology, 62, 703~710 (2018)
(2)JFE Steel Technical Report, 31, 81~84 (2024)
(3)Y. Kodama etc al., IEEE Transactions on Magnetics, 61, 2000905 (2025)

Fe-Ga-Al 膜における磁気特性の Al 組成依存性

百田 郁矢*, 阿加 賽見, 室賀 翔, 宮崎 孝道, 遠藤 恭 (東北大学)

Dependence of Magnetic Properties on the Al Content for Fe-Ga-Al Films

Fumiya Momota, Saijian Ajia, Sho Muroga, Takamichi Miyazaki, Yasushi Endo (Tohoku University)

1. まえがき

Fe-Ga 多結晶膜は、高い飽和磁歪および優れた機械特性を有していることから、薄膜アクチュエータやセンサへの応用が期待されている。その一方で、高周波磁気特性の基本特性の 1 つであるダンピング定数が高く⁽¹⁾、高周波磁気デバイスに応用するためにはその特性改善が必須である。

我々のグループでは、これまでに侵入型の B や C を添加した Fe-Ga 多結晶膜の磁気特性を検討し、軟磁気特性および高周波磁気特性を改善できることを報告した^{(2), (3)}。その一方で、置換型の La や Y を添加した膜では、磁気特性の改善があまり見られなかった^{(4), (5)}。本研究では、Fe-Ga 多結晶膜の磁気特性を改善可能な置換型元素の探索のため、新たに Al を選択し、Al 組成の異なる Fe-Ga-Al 膜における構造と磁気特性を検討した結果について議論する。

2. 実験方法

50 nm 厚の $(\text{Fe}_{0.72}\text{Ga}_{0.28})_{100-x}\text{Al}_x$ (Fe-Ga-Al)膜は、高真空 DC マグネトロンスパッタ装置を用いてガラス基板上に作製した。Fe-Ga-Al 膜の Al 組成 (x) は、0 – 7.9 at.%である。なお、酸化防止のため、Fe-Ga-Al 膜の表面に 10 nm 厚の Si 層を製膜した。

Fe-Ga-Al 膜の構造・組成に関しては、XRD, EDX を用いて評価した。また、それらの磁気特性に関しては、VSM, 光てこ法による超高感度薄膜磁歪測定装置およびブロードバンド強磁性共鳴(B-FMR)測定法を用いて評価した。

3. 結果

図 1 に、50 nm 厚の Fe-Ga-Al 膜における飽和磁歪 (λ_s) および有効ダンピング定数 (α_{eff}) の Al 組成依存性を示す。 λ_s に関しては (図 1(a)), Al 添加することによっておよそ 58 ppm から 80 ppm 程度まで増加し、 $x = 3.0 - 6.7$ at.%までほぼ一定となった。この λ_s の増加は、結晶構造の変化によるものと考えられる。また、 $x = 6.7$ at.%以上では、 λ_s は 60 ppm に減少し、Fe-Ga 多結晶膜の場合とほぼ同じ程度となった。この λ_s の Al 添加に対する減少は、先行研究⁽⁶⁾とは異なる結果となった。

また、図 1(b)に示すように、 α_{eff} は Al 添加量の増加にともない減少し、 $x = 7.9$ at.%で最小値 0.014 となった。この原

因は、Al 添加により軟磁気特性が変化したことによるものと考えられる。この結果は、Al 添加によって Fe-Ga 多結晶膜の高周波磁気特性が改善されることを示唆している。

以上の結果は、Al が Fe-Ga 多結晶膜における高い飽和磁歪をもちつつ高周波磁気特性の改善が可能な添加元素の有力な候補の 1 つであることを表している。

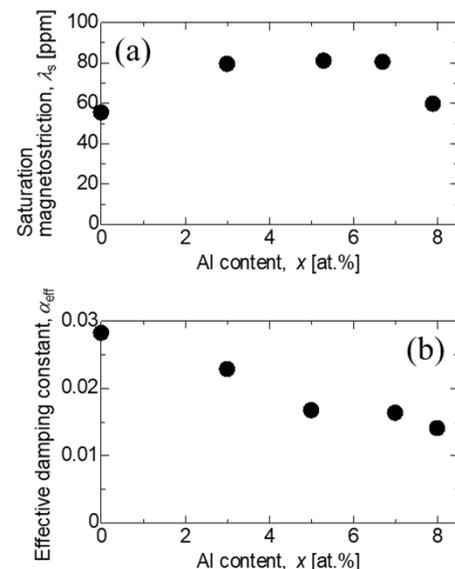


図 1 50 nm 厚の $(\text{Fe}_{0.72}\text{Ga}_{0.28})_{100-x}\text{Al}_x$ 膜における (a) 飽和磁歪 (λ_s) および (b) 有効ダンピング定数 (α_{eff}) の Al 組成依存性
Fig. 1. Dependence of (a) saturation magnetostriction (λ_s) and (b) effective damping constant (α_{eff}) on the Al content (x) for 50-nm-thick $(\text{Fe}_{0.72}\text{Ga}_{0.28})_{100-x}\text{Al}_x$ films

謝辞

本研究の一部は、東北大学 CSIS, 東北大学 CSRN, 東北大学 CIES および ASRC の支援のもと行われた。

文献

- (1) Daniel B. Gopman et al., *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 11, 6101304 (2017)
- (2) Y. Endo et al., *The papers of Tech. Meeting "Magnetics", IEEJ, MAG20111* (2020)
- (3) S. Muramatsu et al., *AIP Advances*, **11**, 025114 (2021)
- (4) R. Nishina et al., *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **8** (2024)
- (5) S. Ajia et al., *AIP Advances*, **15**, 3, 035116 (2025)
- (6) Jason R. Hatrick-Simpers et al., *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 102507 (2008)

カルーセルスパッタで成膜したフッ化物系 ナノグラニューラー高周波磁性膜の高温熱処理挙動

直江 正幸*, 佐藤 光晴, 鈴木 一行 (電磁材料研究所), 宗像 誠 (崇城大学)
高村 陽太, 中川 茂樹 (東京科学大学), 小林 伸聖 (電磁材料研究所)

Annealing Behavior of Nanogranular High-frequency Films with Fluoride Matrix deposited by Carousel Sputtering
Masayuki Naoe, Mitsuharu Sato, Kazuyuki Suzuki (DENJIKEN), Makoto Munakata (Sojo University),
Yota Takamura, Shigeki Nakagawa (Science Tokyo), Nobukiyo Kobayashi (DENJIKEN)

1. まえがき

フッ化物は固体の中で最もワイドバンドギャップな材料群であるため、磁性金属ナノ粒子が分散するナノグラニューラー膜のマトリックスに用いると、比抵抗の高い金属磁性膜が得られ⁽¹⁾、強磁性の本膜には強い一軸異方性も付与できるため⁽²⁾、磁化困難軸から周波数限界の高い高周波磁気特性を引き出すことができる。他方、本膜が熱履歴を経ると、内部応力緩和等による磁気特性向上が期待できるが、その一方で比抵抗が低下するトレードオフを呈する⁽³⁾。フッ化物の低い焼結温度や、フッ素の高い電気陰性度(腐食性)に起因していると考えられるが、従来の成膜法からカルーセルスパッタ法⁽⁴⁾に変更すると磁性金属とフッ化物との相分離性が向上し、比抵抗低下が抑制されることを明らかにした⁽⁵⁾。

本研究では、カルーセルスパッタによりフッ化物の多い膜組成で高比抵抗な強磁性ナノグラニューラー膜を成膜し、これらにはんだリフローを想定した 260°C の熱処理を施した。その結果、熱処理後も高い比抵抗を保つことを確認すると共に、想定以上の高い透磁率が得られたので報告する。

2. 実験方法

<2.1>成膜 カルーセルスパッタ装置でガラス基板を公転させ、Co₃₅Fe₆₅合金ターゲットとCaF₂セラミックターゲットに通過させる二元同時スパッタ(タンデム法)により、面内一軸異方性のCo₃₅Fe₆₅-CaF₂ナノグラニューラー膜を成膜した。Ar成膜ガス圧を1.1 Paとして、10 nmのCaF₂下地層を形成した後、CoFeターゲットへの投入電力を固定してCaF₂ターゲットの電力を変化させることでナノグラニューラー膜組成を調整し、成膜時間調整で膜厚を約500 nmとした。
<2.2>熱処理 40 kA/mの直流磁界を磁化容易軸に印加した真空熱処理(1 h 保持)、および鉛フリーはんだのリフロープロファイル(IPC/JEDEC J-STD-020)を模擬した大気圧窒素中での高温短時間熱処理(RTA: ランプ加熱, 無磁界, 10 sec 保持)を、いずれも到達温度を260°Cとして試料に施した。
<2.3>評価 試料を、比抵抗(直流四探針法)、組成(WDS)、静磁化特性(VSM)、高周波複素透磁率(短絡マイクロストリップライン法)、およびX線回折($\theta/2\theta$ 法, Cu K α)で評価した。

3. 実験結果

図1は、磁界中真空熱処理を経た試料の高周波複素透磁率スペクトルである。凡例に成膜状態(As-depo.)から真空熱処理後(After ANN)への比抵抗変化も併記した。CaF₂が60 at. %付近では、260°C・1 h 保持の真空熱処理を経ても比抵抗が1000 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以上を保ち、CoFeプアであるにもかかわらず低周波での μ' が100を超え、かつ共鳴周波数が1 GHz以上であることが判った。As-depo.からAfter ANNで比抵抗が2~4桁低下したが、これらを更にRTAした後の低下は皆無であった。なお、高周波複素透磁率にはRTAにより絶対値および共鳴周波数の低下が見られたが、僅かであった。

謝辞 本研究は、JST A-STEP 産学協同 JPMJTR22R9, および JSPS 科研費 JP25K01274, JP24H00388 の助成を受けた。

文 献

- (1) Naoe et al.: J. Magn. Magn. Mater., 391, 213-222 (2015).
- (2) Naoe et al.: IEEE Magn. Lett., 5, #3700404 (2014).
- (3) 直江 他: 電気学会研究会資料, MAG-24-083 (2024).
- (4) 今泉 他: 電学論 A, 131, 499-504 (2011).
- (5) 直江 他: 電気学会研究会試料, MAG-25-154 (2025).

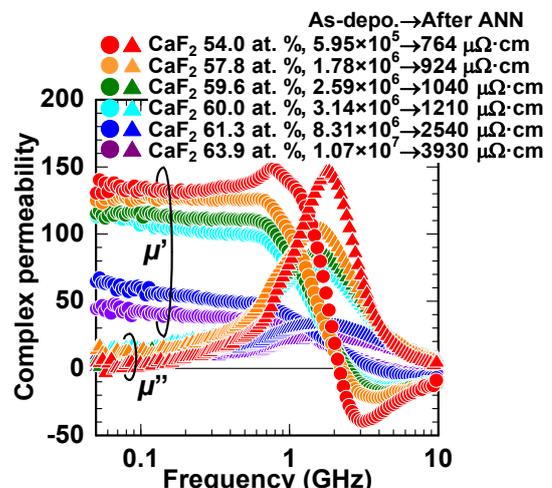


図1 磁界中真空熱処理を経たCo₃₅Fe₆₅-CaF₂膜の高周波複素透磁率スペクトル(磁化困難軸)
Fig. 1. Complex permeability spectra of Co₃₅Fe₆₅-CaF₂ films annealed in vacuum under magnetic field (magnetic hard axis).

アモルファス Fe-B 鎖状微粒子における 構造および磁気特性

西井 丈流*, 若林 和志, 宮崎 孝道, 阿加 賽見, 室賀 翔, 遠藤 恭 (東北大学)

Structure and Magnetic Properties of Amorphous Fe-B Particle Chains

Takeru Nishii, Kazushi Wakabayashi, Takamichi Miyazaki, Saijian Ajia, Sho Muroga, Yasushi Endo (Tohoku University)

1. はじめに

近年, 5G の普及にともない情報通信機器の高周波化がより一層加速し, 電磁干渉 (Electromagnetic Interference: EMI) 問題が顕在化している. この問題を解決する方法の1つとして従来から利用される磁気損失型ノイズ抑制シート (Noise suppression sheet: NSS) では, 更なる広帯域・高周波化が必要不可欠となっている. これらの要求を満足するためには, NSS に用いられている軟磁性微粒子の微細化や形状の鎖状化が鍵をにぎっている.

我々のグループは, これまでに磁界中水溶液還元反応法によりサブミクロンサイズのアモルファス Fe-B 微粒子の鎖状化を試みて, その固有透磁率が球状微粒子に比べて高くなることを報告した⁽¹⁾. その一方で, 鎖状微粒子の形成数や長さの制御までには至っておらず, 鎖状微粒子の特性を十分には活かしきれていなかった.

本研究では, より均一な Fe-B 鎖状微粒子を合成するために合成法の改善を試み, 試作しにおける構造と磁気特性を検討した.

2. 実験方法

Fe-B 鎖状微粒子の合成法は以下の通りである. Fe 系反応浴の上下に永久磁石を設置し, 磁石の隙間から B 系還元剤液を一定速度で滴下することによって Fe-B 鎖状微粒子を合成した. なお, 磁界印加時間を $t = 0 - 60 \text{ min}$ とした.

合成した Fe-B 鎖状微粒子の形状は SEM を, また, その磁気特性は VSM および短絡型 MSL と VNA を組み合わせた複素透磁率測定法⁽²⁾を用いて評価した. なお, 磁気特性評価には, 合成した微粒子を樹脂中に分散させ, 外部磁界を印加することで微粒子長軸方向に配向処理したコンポジットを用いた.

3. 結果および考察

図 1 に磁界印加時間 $t = 20 \text{ min}$ で合成した Fe-B 鎖状微粒子の SEM 像を示す. 微粒子形状はサブミクロンサイズの球状微粒子が数~数十個程度連結した状態であり, その長さもある程度そろっていた. また, 球状微粒子の単体の混在も少なかった. このことは, 均一な Fe-B 鎖状微粒子の合成に成功したことを表している.

図 2 は Fe-B 鎖状微粒子 ($t = 20 \text{ min}$) コンポジット材にお

ける複素透磁率の周波数特性である. 実部 μ' , 虚部 μ'' とともに鎖状微粒子の配向方向に依存し, いずれの値も長軸方向がより高くなった. これは主に一軸磁気異方性によるものと考えられる. また, 長軸方向の虚部 μ'' では 1 - 4 GHz において FMR に由来するブロードなピークが観測された.

当日は, これらの結果に加えて, 熱処理の影響についても議論する.

謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP24KJ0415, JP24K21602, 東北大学 CSIS および CIES の支援のもとで行われた.

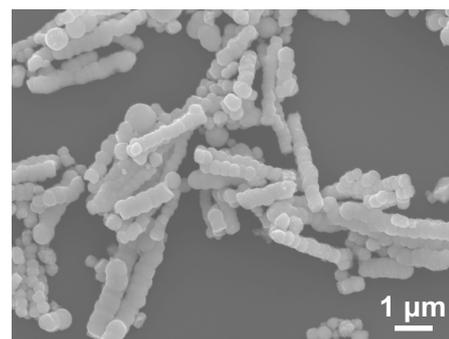


図 1 合成した Fe-B 鎖状微粒子の SEM 像

Fig. 1. SEM image of synthesized Fe-B particle chains.

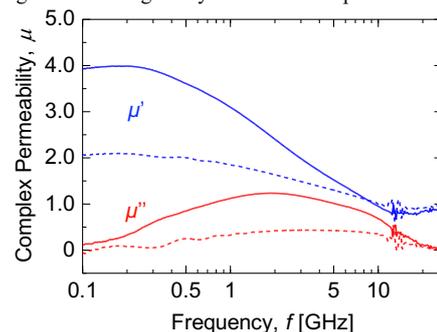


図 2 Fe-B 鎖状微粒子コンポジット材における複素透磁率の周波数依存性. 実線が鎖状微粒子の長軸方向, 破線が短軸方向に測定した結果である.

Fig. 2. Complex permeability spectra of Fe-B particle chains composite. Solid and dashed line represent longitudinal and transverse directions of particle chain, respectively.

文献

- (1) Y. Endo, *J. Soc. Mater. Jpn.*, **72**, 198-200 (2013).
 (2) S. Takeda et al., *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 227-231 (2015).

サブミクロン Fe-Co-B 微粒子における 磁気特性の合成時の $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比による影響

佐藤 魁翼*, 阿加 賽見, 宮崎 孝道, 室賀 翔, 遠藤 恭 (東北大学)

Influence of $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ Ratios During Synthesis on Magnetic Properties of Submicron Fe-Co-B Particles
Kaifu Sato, Saijian Ajia, Takamichi Miyazaki, Sho Muroga, Yasushi Endo (Tohoku University)

はじめに

パワーエレクトロニクス分野において、変圧器やインダクタといった受動素子のさらなる小型化・高周波化のためには高飽和磁束密度（高飽和磁化）かつ低損失な軟磁性材料の開発が必要不可欠である。その候補材料の一つとして、高飽和磁化を有しつつも渦電流損失の増大を GHz 帯まで抑制することが可能なサブミクロン径の Fe 系軟磁性アモルファス微粒子が挙げられる¹⁾。なかでも、Fe-Co 合金アモルファス材料の場合、Fe:Co の比率によって飽和磁化を制御できる可能性がある²⁾。したがって、本研究では、合成条件における $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比の異なるサブミクロン径のアモルファス Fe-Co-B 微粒子を合成し、それらの構造および磁気特性について検討した。

実験方法

Fe-Co-B 微粒子の合成には水溶液還元反応法を用いた。反応溶液には Fe^{2+} と Co^{2+} を含む溶液を、還元溶液には NaBH_4 溶液を用いた。このとき、Fe/Co 組成比を制御するために、反応溶液中の Fe^{2+} と Co^{2+} の濃度比を $\text{Fe}^{2+}:\text{Co}^{2+} = 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10$ と変化させた (Sample A - Sample E)。

合成した微粒子の構造解析・組成分析には XRD, SEM, ICP を、また磁気特性評価には VSM および短絡型 MSL と VNA を組み合わせた複素透磁率測定装置を用いた³⁾。

結果および考察

表 1 に合成した Fe-Co-B 微粒子の組成を示す。 $\text{Fe}^{2+}:\text{Co}^{2+}$ と Fe:Co の比率を比較すると、合成条件に対して析出物の Fe 含有率が低くなり Co 含有率が高くなった。これは、Fe に比べて Co の電極電位が低く還元されやすいことに起因している。また、 $\text{Fe}^{2+}:\text{Co}^{2+}$ と Fe:Co:B の比率を比較すると、合成条件における Fe^{2+} の比率の増加にともない、析出物における B の含有率が増加した。

図 1 に合成した Fe-Co-B 微粒子における飽和磁化 σ_s の合成時の $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比依存性を示す。 σ_s は合成時の Fe^{2+} の比率の増加にともない増加し、 Fe^{2+} の比率が 0.8 を越えると減少した。 σ_s 値については Sample D のとき 141.6 emu/g と最大で、Sample E のとき 131.7 emu/g と最小となった。とりわけ、 σ_s が最小となったのは、Sample E において B の含有率の増加が支配的になったためであると考えられる。

以上の結果は、微粒子合成時の $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比を変えることで、Fe-Co-B 微粒子における飽和磁化を Fe の含有率によって制御できることを示している。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術事業 JPJ009777 およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト JPMXP1122715503 のもとで行われました。また、本研究は JSPS 科研費 JP24KJ0415, JP24K21602, 東北大学 CIES および東北大学 CSIS の支援のもとで行われました。

表 1 合成時の $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比が異なる Fe-Co-B 微粒子の組成
Table 1. Composition of Fe-Co-B particles synthesized with different $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ ratios

Sample	Solution	ICP	ICP
	$\text{Fe}^{2+}:\text{Co}^{2+}$ (at.%)	Fe:Co (at.%)	Fe:Co:B (at.%)
A	50.0:50.0	45.6:54.4	37.3:43.3:19.4
B	60.0:40.0	55.9:44.1	46.6:33.3:20.1
C	70.0:30.0	63.0:37.0	51.4:26.0:22.6
D	80.0:20.0	73.9:26.1	55.2:18.9:25.9
E	90.0:10.0	85.1:14.9	56.7:10.2:33.0

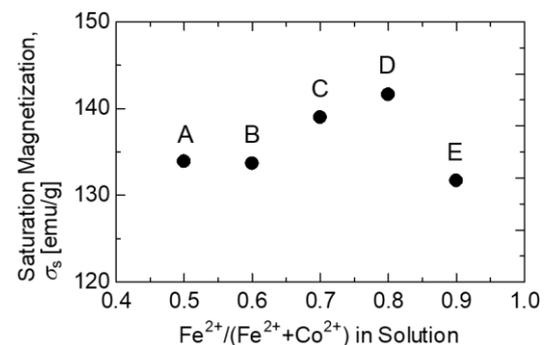


図 1 合成時の $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ 比が異なる Fe-Co-B 微粒子の飽和磁化
Fig.1. Saturation magnetization of Fe-Co-B particles synthesized with different $\text{Fe}^{2+}/\text{Co}^{2+}$ ratios

文献

- (1) Y. Shimada et al.: J. Magn. Soc. Jpn., 33, 95~99 (2009)
- (2) P. H. Dederichs et al.: J. Magn. Magn. Mater., 100, 241~260 (1991)
- (3) S. Takeda and M. Naoe: J. Magn. Magn. Mater., 449, 530~537 (2018)

ナノ結晶磁性材への Cr 添加による 結晶子サイズ分布の改善効果

神山 望^{*1}, 松岡 孝¹, 尾藤 輝夫²(日本ケミコン株式会社¹, 秋田県立大学²)

Effect of Cr addition on crystallite size distribution in Nanocrystal materials

Nozomu Kamiyama¹, Takashi Matsuoka¹, Teruo Bitoh²(Nippon Chemi-Con Corp.¹, Akita Prefect. Univ.²)

1. 緒言

高効率が求められる電力変換器には、高飽和磁束密度で鉄損の低い Fe-Ni 系ダストチョークコイル(ハイフラックス)が用いられるが、粉末を成形しているため透磁率が高くできない。近年、高 Fe 濃度のナノ結晶磁性材が注目されている。アモルファス母相中に数十 nm の結晶相が分散し、交換相互作用により実効的な磁気異方性が低減するため低鉄損が実現される。主成分は安価な Fe で、液体急冷法による大量製造が可能のため、比較的成本を抑制できる。だが、高 Fe 濃度では結晶化が急速に進行し結晶子が肥大化する。結果、実効的な磁気異方性が十分に低減せず軟磁気特性が劣化し、高周波鉄損も増加する。高 Fe 濃度のナノ結晶材の結晶成長の制御を目的に、結晶相に固溶する可能性のある Cr を添加し、その効果について検討した。

2. 実験方法

$Fe_{85-x}Cr_xB_9Nb_5Cu_1$ ($x=0\sim 4$) の組成で原料を秤量し、Ar 雰囲気中で溶解して母合金を作製した後、液体急冷法により幅 5mm・板厚 10~11 μ m および幅 10mm・板厚 13~14 μ m のアモルファス合金箔を得た。これらを用いて、コア A (外径 13×内径 12×高さ 5mm、約 0.50g) とコア B (外径 20×内径 12×高さ 10mm、約 10.0g) のトロイダルコアを作製し、窒素雰囲気中で昇温速度 40.2°C/min で 650°C まで加熱し、結晶化させた。比透磁率はインピーダンスアナライザ、直流磁化特性は直流 BH アナライザで評価し、結晶化温度は DTA、結晶子のサイズ分布は XRD で測定した。さらに、コア B はアクリル樹脂で含浸硬化後、ギャップチョーク加工を施し、鉄損を交流 BH アナライザで評価した。

3. 結果

図 1 にコア A の評価結果を示す。結晶子サイズ分布のピーク径の 2 倍以上の結晶子の割合(粗

大結晶子割合)を求めたところ、Cr=0%では 76.7%であったが、Cr 添加により減少し、Cr=4%で 24.6%となり、結晶子サイズ分布の均質化が確認された。また、保磁力は Cr=0%で 222A/m から Cr=4%で 11.2A/m まで低下し、結晶化温度は 397°C から 455°C へ上昇した。これらの結果から、結晶化温度の上昇によって結晶成長が抑制され、交換相互作用の効果が向上したことで保磁力が低下したと考えられる。Cr=3%のコア A とコア B を比較したところ、コア B では内周部の結晶子サイズが最大で 160nm 以上まで肥大化し、保磁力が 21.5A/m とコア A の 14.5A/m よりも高い値を示した。これは巻回積層厚の増加による発熱量の増加と放熱性の低下が原因と推定される。また、コア B の鉄損は樹脂接着前 47mW/cc から接着後 207mW/cc、ギャップ加工後 251mW/cc へと樹脂接着後に大幅に増加し、磁歪の影響が大きいことが示唆された。

以上より、Cr 添加は結晶成長の均質化に有効であるものの、製品化には結晶化時の発熱低減や磁歪対策などの課題解決が必要である。

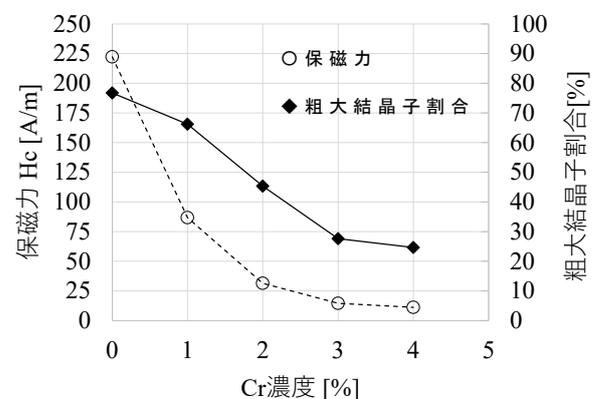


図 1. Cr 濃度と保磁力および粗大結晶子割合との関係

Figure 1. Relationship between Cr concentration, coercivity, and the proportion of coarse crystallites

ナノ結晶磁性箔を使ったギャップチョーク の低損失化

松岡 孝*, 神山 望 (日本ケミコン株式会社)

Low-Loss Enhancement in Gapped Choke Cores Using Nano-crystalline Magnetic Foil

Takashi Matsuoka*, Nozomu Kamiyama, (Nippon Chemi-con Corporation)

1. まえがき

電力変換器の小形化を目的とした変換周波数の高周波化を目指す動きが活発になっている。しかしながら、これらの回路に供される磁気デバイスの内部損失がネックとなり実現を阻んでいる^{(1)~(2)}。アモルファス金属を熱処理で結晶化して微細な結晶組織とすることで、軟磁気特性を大幅に改善したナノ結晶磁性材が実用化されるようになった⁽³⁾。主に高い透磁率を利用してノイズ抑制コイルに応用されている。鉄損が小さい特長があるが、飽和磁束密度が小さいため昇降圧用や出力平滑用チョークに使われるのは稀である。また、Fe濃度を高めて飽和磁束密度を高くする試みも多くなされているが、結晶化時の発熱で温度制御しにくいことや磁歪による特性低下のため試作検討の域を出ていない⁽⁴⁾。

早期の社会実装を考慮して、箔積層後に熱処理が可能で、既に量産されているナノ結晶磁性箔(表1)を選定した。No.1~4はファインメット類似組成。No.5~7はFe濃度を上げて飽和磁束密度が高い。これらについてギャップ付コアを試作しその特性を調べたので報告する。

表1 鉄系ナノ結晶材料

Table.1 Nanocrystalline magnetic materials

サンプル No.	箔厚 #1 [μm]	飽和磁束密度 [T] #2	磁歪 #2 [ppm]	メーカー	箔幅 [mm]	コアサイズ[mm]	
						外径	内径
1	9.7	1.2	≈0	A社	10	28	18
2	12.2	1.2	≈0	B社	10	28	18
3	12.6	1.2	≈0	C社	15	28	18
4	12.7	1.25	≈0	D社	15	28	18
5	13.6	1.4	<2	D社	15	28	18
6	16.4	1.4	<2	D社	15	28	18
7	18.2	1.5	10	D社	10	28	18

#1:重量から算出した平均箔厚 材料密度7.2[g/cm³]

#2:メーカー公表値

表2 測定器

Table.2 Measuring instrument

鉄損	岩崎通信機	B-HアナライザSY-8218
直流磁化	電子磁気工業	BHアナライザBH-1000
周波数特性	KEYSIGHT	インピーダンスアナライザE4990A
電流重畳特性	NF回路設計ブロック	LCRメーター-ZM2376&直流電流バイアスユニット

2. 実験方法

ギャップ付チョークコアの製造工程を図1に示す。磁路のギャップは、積層した磁性箔を接着した後、機械的に切断して設けている。切断後にコア形状を維持するため、予め磁性箔を樹脂で接着する必要があるが、その接着剤の収縮応力により磁気特性が影響を受け、鉄損の増加や電流重畳特性の低下が生じる⁽⁵⁾。樹脂の収縮応力を緩和するためセラミック粉フィラーを分散した接着樹脂について効果を調べた。コアの占積率が低下しないよう巻回積層後に樹脂含浸する方式を取った。樹脂は低粘度の1液性アクリル系接着樹脂(マツモトファインケミカル V101)を使用した。試作条件は図1内に記載した。

測定は、コアに均等に1次2次それぞれ0.5mmφ銅線で15または20ターソ巻いて、表2の測定器を使用した。

3. 結果と考察

<3・1>フィラーの効果 図2に接着樹脂に分散したフィラー体積比率と鉄損の関係を示す。サブミクロン径のゼオライトやセラフィットでは、分散量の増加と共に鉄損が低減しているが、粒径の大きいシリカではほとんど効果が認められない。

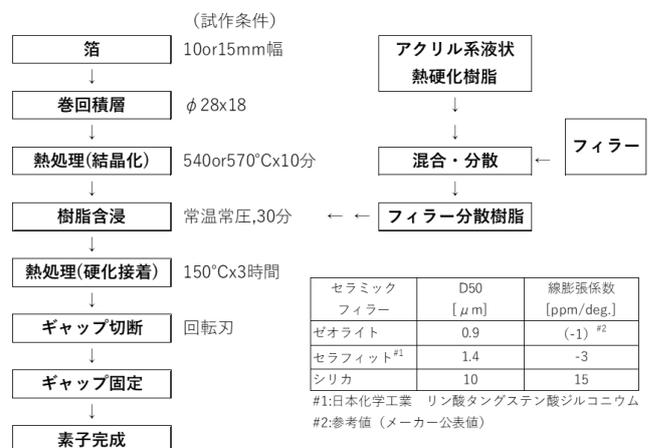


図1 ギャップ付チョークコアの製造工程

Fig.1 Manufacturing process for gapped choke cores

図3は、正磁歪を持つナノ結晶材料の樹脂にゼオライトを分散した場合の分散体積比率と磁化曲線の変化を示す。熱処理後に比べて樹脂接着すると樹脂からの応力で磁化曲線は等方的な異方性が付与され残留磁束密度は低下する。フィラーを分散させた場合、フィラー体積比率が上昇するに従い、残留磁束密度並びに最大磁束密度が向上することが確認され、応力緩和の効果と推察される。フィラー効果は鉄損低減だけでなく、電流重畳特性の改善にも効果がある。

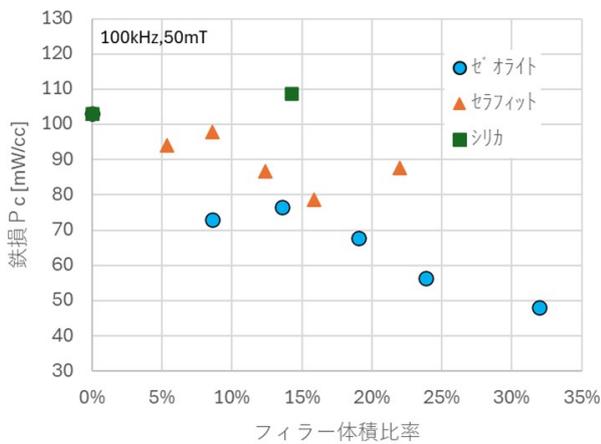


図2 フィラー濃度と鉄損の関係

Fig.2 Relationship between filler concentration and core loss

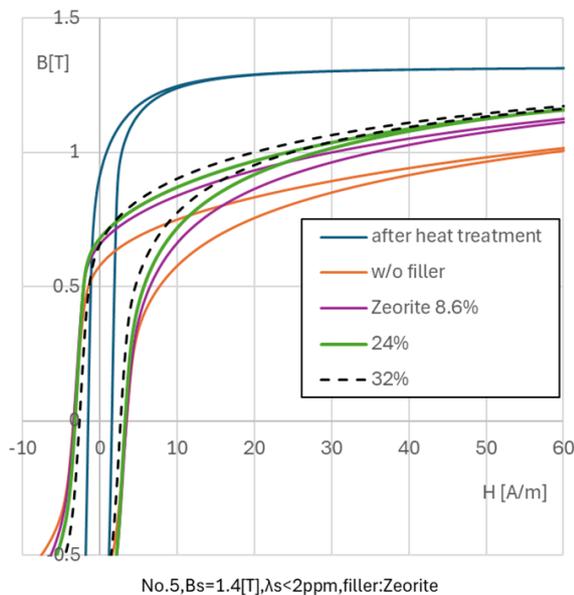


図3 正磁歪のあるナノ結晶材料の直流磁化曲線

Fig.3 DC magnetization characteristics of positive-magnetostrictive nanocrystalline materials

<3・2>箔厚と鉄損 図4は、ギャップ加工後の鉄損と磁性箔厚の関係を示す。フィラーを入れない樹脂のみで接着した場合(グラフ青色)、磁歪がほぼゼロのグループと正磁歪を持つグループで、それぞれ別の箔厚 d^2 に比例する線上に分布している。一方、フィラー入り樹脂で接着した場合は、正磁歪を持つグループの鉄損が低減し、ゼロ磁歪のグループと同じ線上に分布することがわかる。

樹脂接着を伴う応用では、飽和磁束密度を高めた材料は正磁歪を有するため鉄損が増大し、ナノ結晶材の特長である低鉄損が失われるため活用されることが無かった。正磁歪が大きい場合は難しいものの、数 ppm 程度以下であればフィラー等で接着樹脂の応力を緩和することで、同じ箔厚のゼロ磁歪ナノ結晶材に相当する鉄損に低減する可能性が見いだされた。これら材料を薄箔化しフィラー入り接着樹脂を利用すれば、フェライトに近い鉄損と鉄系アモルファス相当の重畳特性が両立する可能性がある。

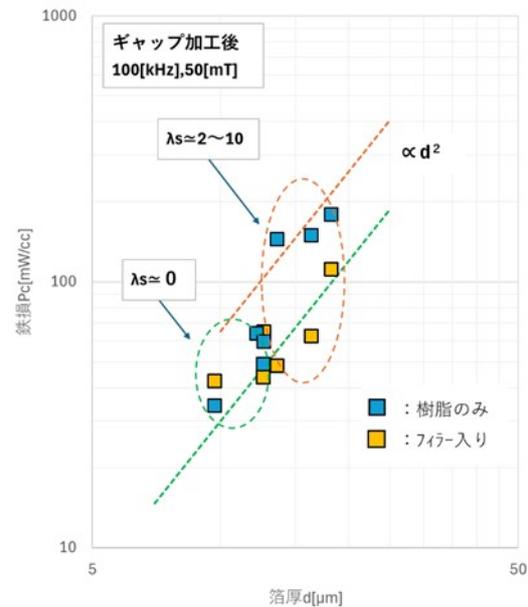


図4 鉄損と箔厚の関係

Fig.4 Relationship between core loss and foil thickness

文 献

- (1) Keisuke Fujisaki, "Bottleneck Technology Inhibiting Realization of Power Electronics Society", Magnetics Jpn., Vol.17, No.3(2022)
- (2) Masayuki Naoe, "Magnetic Materials for High-Frequency Applications", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol.144 No.6, pp186-193(2024)
- (3) Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi, J. Appl. Phys.64, 6040 (1988).
- (4) Motoki Ohta, までりあ Materia Japan, 第62巻第9号, pp578-581(2023)
- (5) Ijlal Hasif, Munekatsu Shimada, Takeshi Kubota "Compression Dependence of Magnetization Curves on Iron-Based Soft Magnetic Materials", J. Japan Inst. Met. Mater. Vol.83, No 1(2019), pp.1-8

Lasso 回帰を用いた軟磁性薄帯の鉄損モデル化

松本 駿佑*, 室賀 翔, 高須 匠, 阿加 賽見, 遠藤 恭(東北大学)

Core Loss Modeling Based on Lasso Regression for Soft Magnetic Thin Ribbons

Shunsuke Matsumoto, Sho Muroga, Takumi Takasu, Saijian Ajia, Yasushi Endo (Tohoku University)

1. はじめに

現在, モビリティの電動化や AI サーバの増加等による電力需要の高まりにより, パワーエレクトロニクスデバイスの小型化, 高効率化が求められている. 特に, 磁気素子はデバイス内での損失, 体積割合が高く, 高飽和磁束密度かつ低損失な軟磁性材料が要求されている. 軟磁性材料における磁気特性の向上には, 材料組成や製造プロセスの最適化が重要である. そのため, 多数のパラメータを同時に検討できる機械学習が注目されている. 我々のグループでは, 圧粉磁心の最適設計に向けて, 機械学習モデルの一種である Lasso 回帰を用いて鉄損の推定を行った⁽¹⁾. その結果, 鉄損に影響を与えるプロセス条件を抽出できることを示した. しかしながら, この推定手法を材料設計指針の明確化に展開するためには, 推定精度と説明可能性の改善が重要である.

本研究では, 鉄損をヒステリシス損失, 古典渦電流損失および過剰損失に分離し, 各損失を Lasso 回帰によって推定することでプロセス条件が各損失に与える影響について明確化する.

2. 解析方法

評価試料には, Si の含有率および熱処理温度が異なる 15 種類の Fe-Si 薄帯(厚さ 10 μm)を用いた. 試料の鉄損 P_{cv}/f を B - H アナライザによって測定し, Bertotti の式⁽²⁾を用いて, P_{cv}/f をヒステリシス損失 P_h/f , 古典渦電流損失 P_{cl}/f , 過剰損失 P_{exc}/f に分離した.

一方で, P_{cv}/f を B - H アナライザの測定条件(振幅 B_m , 周波数 f)および薄帯の試作条件(Si の含有率 C_r , 熱処理温度 T_a)から推定するサロゲートモデルを構築した(Model 1 および Model 2). Model 1 については, P_h/f , P_{cl}/f , P_{exc}/f ごとに推定し, その和を求めることで P_{cv}/f を算出した. Model 2 については, P_{cv}/f を損失分離せずに推定した. 各モデルの学習において, 任意の 1 種類の試料をテストデータとし, 残りのデータを学習用データに用いた.

3. 結果および考察

P_{cv}/f の周波数特性について, 実測値(テストデータ)と推定値を比較して図 1 に示す. P_{cv}/f の実測値は, 10 kHz 以下において周波数に依存せずおおよそ一定であり, 10 kHz 以上では周波数とともに増加した. また, Model 1 の推定値は, 実測値における周波数特性の傾向とよく一致した. これは,

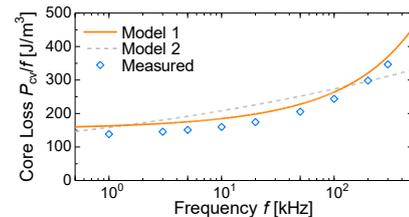
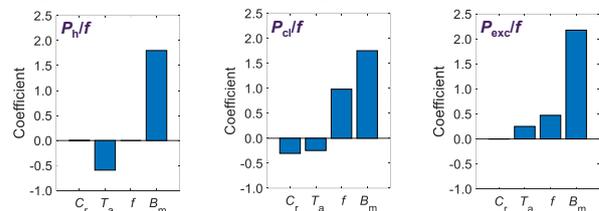


図 1 鉄損の周波数特性における実測値と推定値の比較
Fig.1. Measured and estimated frequency characteristic of core loss



(a)ヒステリシス損失 (b)古典渦電流損失 (c)過剰損失

図 2 Model 1 における予測関数の指数

Fig.2. Coefficient of prediction formula for Model 1

Model 1 において P_{cv}/f を周波数依存性の異なる 3 種類の損失の和で推定したためであると考えられる. 一方, Model 2 は単項式であり, 実測値の周波数特性を表現できていない.

Model 1 における予測関数の指数を損失の種類ごとに図 2 に示す. 各損失の予測関数 P/f は

$$P/f = (KC_r^a T_a^b) f^\alpha B_m^\beta \quad (1)$$

の形で表される. 式(1)の右辺における各パラメータの指数が正であれば, 損失の増加, 一方で指数が負であれば, 損失の低減に寄与する. このことから, 予測関数の指数によって各損失と試作条件の関係を定量化できることが示された.

以上の結果は, 物理モデルに基づいた鉄損の分離が Lasso 回帰モデルの推定精度および説明可能性の改善に有効であることを表している.

謝辞

本研究の一部は, 文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト JPMXP1122715503 のもとで行われた. また, 東北大学 CIES および東北大学 CSIS の支援のもとで行われた.

文献

(1)S. Matsumoto et al., Digests of 49th MSJ, 17aPS-12,148 (2025)

(2)G. Bertotti, IEEE Trans. Magn., 24. 621~630 (1988)