

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560378

研究課題名(和文)空間電荷分布測定標準化のための信号補正技術の開発

研究課題名(英文)Development of Signal Recovery Method in Space Charge Measurement

研究代表者

福岡 眞澄 (FUKUMA, Masumi)

松江工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：70228930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：パルス静電応力(PEA)法は、絶縁材料中の電荷分布を非破壊で測定する方法で、絶縁材料の開発や性能評価に広く利用されている。PEA法では試料にパルス電界を印加した時に内部に分布する電荷に働く静電気力により発生する音波を利用している。このため試料や電極の音響的特性が測定精度に影響する。本研究では、音響特性による誤差を補正する方法について調査を行った。その結果、PEA法による空間電荷分布測定装置に音響インピーダンス顕微鏡(AIM)の仕組みを組み込み、試料と電極の音響特性と空間電荷分布信号を同時に測定し、信号処理することでこれらの誤差を補正する方法を見出した。

研究成果の概要(英文)：Pulsed electro-acoustic (PEA) method is widely used for space charge distribution in insulating materials. The simultaneous measurements of space charge signal and acoustic properties signal within a sample in PEA system have been assembled by adding an Acoustic-impedance microscope (AIM). By using the experimentally assembled calibration system, a calibration method for the PEA method was used successfully to recover the acoustic signal in space charge measurement. The method uses the relationship between the PEA signal and the AIM signal. The calibration system can solve problems such as attenuation, acoustic impedance mismatching between upper electrode and sample. Both a semi-conductor and brass were used as the upper electrode and both materials gave the same results. The calibration method was therefore found to be an effective means of calibrating the measured PEA signal. Furthermore this calibration method doesn't have to use the semi-conductor.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子・電気材料工学

キーワード：空間電荷 高電圧 誘電体材料

1. 研究開始当初の背景

パルス静電応力 (PEA : Pulsed Electro-Acoustic) 法は、電極界面を含む誘電体の電荷分布 (電界, 電位) の時間的変化を非破壊で測定する手法である。この方法は 1985 年に元東京都市大学 (旧武蔵工業大学) の高田達雄教授と現在の情報通信研究機構 (旧通信総合研究所) の前野恭氏らによって発明された。この測定方法が発明されて、約 30 年が経過した。絶縁材料の分野では、世界中でこの測定方法が広く利用されている。現在、国際電気規格 (IEC: International Electrotechnical Commission) に空間電荷分布測定に関する規格制定の作業が進められている。しかしながら、この測定では試料にパルス電界を印加し、材料内部の電荷に働く静電気力により発生する音波を利用しているため、試料や電極の音響的特性が測定誤差を生じさせる問題があった。

2. 研究の目的

PEA 法は、電力用機器等の絶縁材料の性能評価に広く利用されている。PEA 法では課電電極 (上部電極) で発生する音波は接地電極 (下部電極) に達するまでに音波の減衰や分散の影響を受け、上部電極側の音波が下部電極近傍の音波に比べ減衰する。このため上部電極側の空間電荷密度は実際よりも小さく測定される。測定時には上部電極には試料と同じ音響特性をもつ導体 (半導電電極) を使用する必要もあった。最近、使用する半導電電極から試料中に電荷が高電界で注入され、試料中の空間電荷として検出されている可能性が指摘されている。そのため、半導電電極を用いず金属電極を用いての測定も求められている。

これまでの研究で、音響インピーダンス顕微鏡 (AIM : Acoustic Impedance Microscope) の技術と空間電荷分布測定技術を融合し、試料の音響特性と空間電荷分布を同時に測定し、信号処理時に上記に示した測定誤差を補正する方法について調査を行った。また、上部電極に半導電電極以外の金属電極を用いた場合の補正の方法についても調査した。

3. 研究の方法

(1) パルス静電応力法 図 1 に PEA 法の原理を示す。試料を電極で挟み、上部電極 (UE) に印加される電圧にパルス電圧を重畳する。このパルス電界により、電極試料界面及び試料内部に存在する電荷にはクーロン力が働き、圧力波 (音波) が試料内部に発生する。音波を下部電極 (LE) の背面に取り付けてある圧電素子で電気信号に変換し、アンプ (AMP) により増幅し、デジタルオシロスコープ (O.S) で記録する。以下、この信号を PEA 信号とする。PEA 信号をコンピュータ (PC) により信号処理することで空間電荷分布測定が可能である。PEA 信号の大きさは電荷量に比例し、極性は空間電荷の極性を示す。パル

ス電圧印加からの時間が試料内の電荷の位置を示す。PEA 法は圧電素子とアンプで構成される測定系が高電圧系と電気的に分離されているため、絶縁破壊が発生しても空間電荷分布を安全に測定できる利点がある。

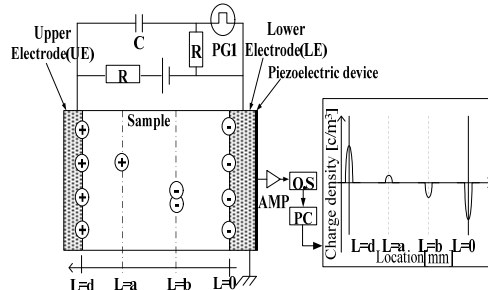


図 1 パルス静電応力 (PEA) 法

通常測定する絶縁材料は主に高分子であるため、試料と電極の音響的性質の違いや音波の減衰等により測定波形は少なからず影響を受ける。

このため上部電極には測定試料の音響特性に近い半導電電極を用いる必要もある。上部電極と試料に音響的性質の違いがあると上部電極と試料界面で発生する音波の大きさが変化する。また、半導電電極内に不純物があると、高電界印加時に試料に電荷が注入されてしまう可能性もある。試料と半導電電極の音響特性が同じであることが理想的であるが、実際の測定では異なる可能性もある。プリント基板等、実用状態では金属電極と組み合わせる材料もある。このような理由から、半導電電極を用いず、金属電極を上部電極とした測定も求められている。図 2 に音波の減衰、反射と透過を示す。また、それぞれの式を (1) ~ (3) 式に示す。

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x - j\beta} \quad (1)$$

$$t = \frac{P'}{P} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

$$r = \frac{P''}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

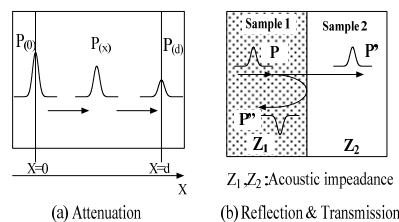


図 2 音波の伝搬と反射

ここで、 $P(x)$: x 点における音波、 α : 減衰係数、 β : 分散係数、 P : 入射波、 P' : 透過波、 P'' : 反射波、 t : 透過率、 r : 反射率、 Z_1 : 試料 1 の音響インピーダンス、 Z_2 : 試料 2 の音響インピーダンスである。音響インピーダンス (Z [kg/m²/s]) は、材料の音速 c [m/s] と密度 ρ [kg/m³] の積で表わされる物理量 ($Z = \rho c$) である。

(1) 式は音波の減衰を表す。音波は伝搬距離 x に対して指数的に減衰する。正確には減

衰が周波数に依存するため、減衰係数 α と分散係数 β は周波数の関数として扱わなければならない。ここでの分散は、音波の高い周波数成分は音波の減衰が大きく、低い周波数は減衰が小さいため、伝搬距離 x により音波波形が広がる現象を示す。(2),(3)式は、音波の透過と反射の式である。音響インピーダンスが異なる材料の境界面では音波の透過と反射の現象が起こり、材料の音響インピーダンスの違いによって音波の大きさが変化する。

(2)音響インピーダンス顕微鏡 図1の装置の圧電素子を含む回路に図3のようにダイオード回路と新たなパルス発生器を付加することで音響的性質(音響インピーダンス、減衰率、音速等)を測定することができる。この装置は試料の音響特性を測定する音響インピーダンス顕微鏡(AIM)の原理を利用したものである。AIMは超音波顕微鏡の一つであり、医療用(癌細胞の切除の確認)に開発応用されている。

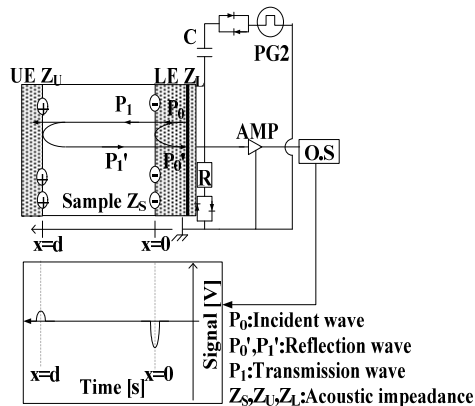


図3 音響インピーダンス顕微鏡(AIM)

AIM装置の動作は次の通りである。圧電素子にパルス発生装置(PG2)からパルス電圧を印加すると、圧電素子からパルス状の圧力波(音波)が発生する。発生した音波は、電極を伝搬し、試料と電極界面で反射する。反射した音波は、再び圧電素子に戻る。この時に、圧電素子から発生した電圧は、アンプ(AMP)を通して増幅される。この音波の反射する音波信号(以下AIM信号とする)から、試料の音響特性の測定が可能となる。以下に具体的な音響特性測定方法を示す。

圧電素子から発せられた音波(圧力)は試料-電極界面で反射と透過の影響を受ける。試料がない(空気)場合は、音響インピーダンスが、電極(AI)よりも極めて小さい($Z_{AI} \gg Z_{Air}$)ため、(3)式より $r \approx -1$ となり、パルス状音波の大きさ P_0 は、測定される P_1 の値に等しい。試料を電極においた場合には第1反射信号 P_1' と第2反射信号 P_2' の測定値を(2),(3)式より求めた(4)式に代入して下部電極側の試料の Z_S が測定できる。また、音波の減衰率は、音波の減衰が(1)式に従うとすれば、減衰係数 α [1/m] の大きさは概略(5)式

により求めることができる。式(5)の P_1'' は P_1' から P_1 の信号分を差し引いた差分信号である。

$$Z_S = \frac{(1 + \frac{P_1'}{P_1})}{(1 - \frac{P_1'}{P_1})} Z_{AI} \quad (4)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2d} \ln \frac{P_2'}{P_1(2 - \frac{P_1''}{P_1})(\frac{Z_{s2} - Z_{s1}}{Z_{s2} + Z_{s1}})} \quad (5)$$

(3)測定装置と測定例 上部電極を金属電極にした場合の補正方法を調査するために、PEA法とAIMを組み合わせた装置を作成した。作成した補正用の実験装置を図4に示す。パルス発生装置(PG1, PG2)を2台用いることでPEA法の回路と全く干渉することなく両測定は同時に行える。

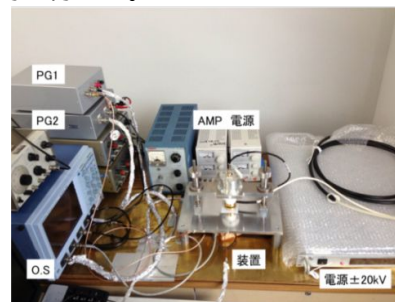


図4 PEAにAIMを組み込んだ実験装置

AIM信号を実際に測定すると、図5のような信号波形が得られる。パルスを印加した時点をと $t=0s$ とすると、試料と下部電極界面で反射された波形(第1波)がはじめに測定され、その後に試料と上部電極界面で反射した波形(第2波)が測定される。この信号は試料中での減衰および、電極と試料の境界での反射と透過により振幅が変化する。ここで、 t : 時間[s]である。

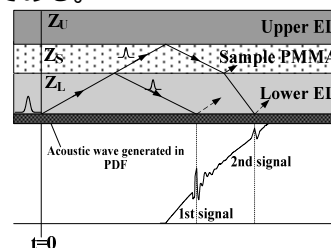


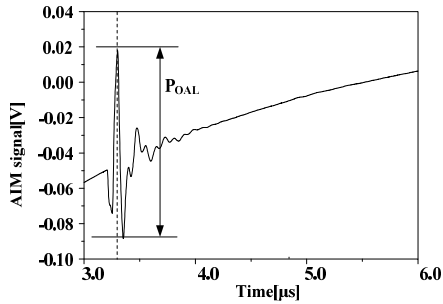
図5 AIM信号

次にAIM信号から試料及び上部電極の音響インピーダンス(Z_S, Z_U)の求め方について示す。図6にそのAIM信号波形の例を示す。はじめに試料を挟まない状態で第1波(S_{OAL})を測定する[図(a)]。この波形を基準とし、試料の上部電極が空気の状態[S_{OA} :図(b)]との差をとる[図(c)]。また、試料を電極で挟んだ状態の波形(S_{OU})を測定する(図では示していない)。音響インピーダンス(Z_U, Z_S)は、反射率と透過率の関係から、(6),(7)式の関係が得られる。ここで、 $P_{OAL}:S_{OAL}$ の第1波振幅、 $P_{OA}:S_{OA}$ の第1波振幅、 $P_{OA}':S_{OA}'$ の第2波振幅

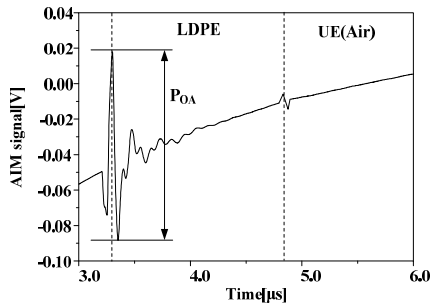
($S_{OA}-S_{OAL}$), P_{OU}' :第2波振幅($S_{OU}-S_{OAL}$), Z_{AL} :下部電極の音響インピーダンスである。(6), (7)式より, Z_{AL} にアルミの文献値 17.72×10^6 [kg/m²/s]を代入すると, Z_U と Z_S を測定できる。

$$\frac{P_{OA}}{P_{OAL}} = \frac{Z_{AL} - Z_S}{Z_{AL} + Z_S} \quad (6)$$

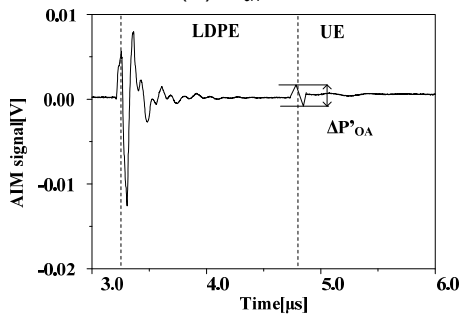
$$\frac{\Delta P'_{OU}}{\Delta P'_{OA}} = \frac{Z_S - Z_U}{Z_S + Z_U} \quad (7)$$



(a) S_{OAL} の波形



(b) S_{OA} の波形



(c) $S_{OA}-S_{OAL}$ 波形

図6 AIM信号の測定結果

$$P_U : \frac{\Delta P'_{OU}}{\Delta P'_{OA}} = \frac{2Z_S}{Z_S + Z_U} \cdot \frac{Z_S - Z_U}{Z_S + Z_U} \quad (8)$$

(6), (7)式より, PEA信号とAIM信号の上部電極波形から得られる音響特性には(8)式の関係があることがわかる。(8)式より, Z_S を定数とすると Z_U は変数となり, PEA信号とAIM信号の上部電極信号には直線関係があることがわかる。

(4) 補正方法 PEA信号とAIM信号の上部電極信号から補正を行う方法の手順を以下に示す。

上部電極が Semi-con の場合で AIM 測定を行った後, PEA 測定を行う。

上部電極が真鍮 (Brass) の場合で AIM 測定を行った後, PEA 測定を行う。

PEA 信号にデコンボリューション処理を行う。

PEA 信号の下部電極を 1 としたときの上部電極の比を求める。

で測定した結果から, 横軸に上部電極の AIM 信号, 縦軸に で求めた上部電極との比をプロットする。

でプロットした 2 点を直線で結ぶ。

から, AIM 信号が 0 の点と直線の交点を求める。

の値が で求めた点になるよう, 補正量を計算する。

求めた補正量を の上部電極信号に乗じる。

3.5 試料および測定結果 試料には, 一般の電気配線に用いられるポリ塩化ビニル [PVC, 厚さ 1.5(mm)] 及び, 低密度ポリエチレン [LDPE, 厚さ 1.5(mm)] を使用した。試料についての物性を表 1 に示す。上部電極には, 通常用いる半導電電極 (Semi-con), 導電性シリコンゴム (以下, シリコンゴム: Silicone rubber とする) と金属電極として真鍮 (Brass) を用いた。また, シリコンオイル (100cs) もしくはエタノールを音響整合剤 (マッチングオイル) として用いた。

表1 測定試料の物性

| 試料 | 塩化ビニル (PVC) | 低密度ポリエチレン (LDPE) |
|---|-------------|------------------|
| 厚さ d [mm] | 1.5 | 1.5 |
| ヤング率 E [10 ⁴ kg/cm ²] | 2.5~4.2 | 0.11~0.25 |
| 比誘電率 ϵ_r | 2.8 | 2.3 |
| 音速 c [m/s] | 2395 | 2080 |
| 密度 [kg/m ³] | 1350~1450 | 910~930 |
| 音響インピーダンス Z(=ρc) [10 ⁶ kg/m ² /s] | 3.23~3.47 | 1.89~1.93 |

PEA 信号と AIM 信号の測定結果の例を図 7 に示す。縦軸は, PEA 信号の下部電極を 1 としたときの上部電極の値である。横軸は, P_{OU}' の 0 からの振幅値である。図から AIM 信号は UE (Brass) が最も大きく, Semi-con が小さいことがわかる。UE が金属であることを考えると, 音響インピーダンスは Z_S と大きく異なるので, UE の AIM 信号は小さく測定されたと考えられる。AIM 信号の絶対値の大きさと PEA 信号との関係は, 測定値のばらつきはあるものの, 理論どおり直線関係となっていることを確認した。

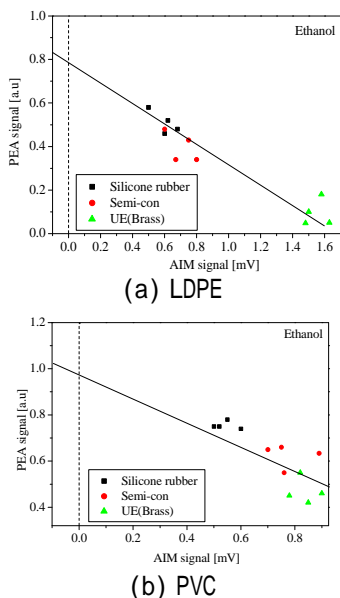


図7 PEA信号とAIM信号の関係(エタノール)

次に、前節で述べた手順にしたがって減衰係数と試料と電極の音響インピーダンスの不整合の測定を行った。測定には LDPE 試料を用い、電極には半導電シート(Semi-con)と金属電極として真鍮電極(Brass)を用いた場合の結果を図8に示す。手順 での Semi-con と UE(Brass)の値は、それぞれ 0.61 と 0.37 であった。手順 では(8)式の通り、直線の関係になることから2点を結ぶことができる。手順 の点は 0.66 であった。これより、Semi-con には 1.08 倍、UE(Brass)には 1.78 倍することで上部電極と試料の音響特性の不整合を補正できたことを示している。

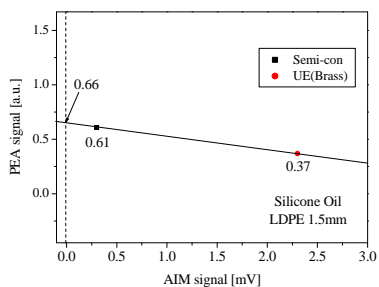


図8 AIM信号とPEA信号の関係(LDPE試料)

図9は、1.5mmのLDPE試料に電圧5kVを印加した場合の測定結果を上部電極と試料の音響特性の不整合の信号補正を実施した結果である(減衰補正を実施前)。測定では、上部電極に半導電電極を使用した場合[同図(a)]と真鍮電極を使用した場合[同図(b)]を示している。図中の実線波形が補正後の波形である。下部電極を1としたときの上部電極の比を考えた場合に、補正後はどちらも0.66となり(図8の結果と図9上部電極信号のピークが一致)、上部電極が金属であってもPEA信号の補正が可能であることを示している。この補

正を行うことで試料の減衰率を求めることができることを示している。

以上のことから、本研究で見出した方法により、試料中の音波の減衰と上部電極と試料の音響特性の不整合の補正が可能であることが明らかになった。

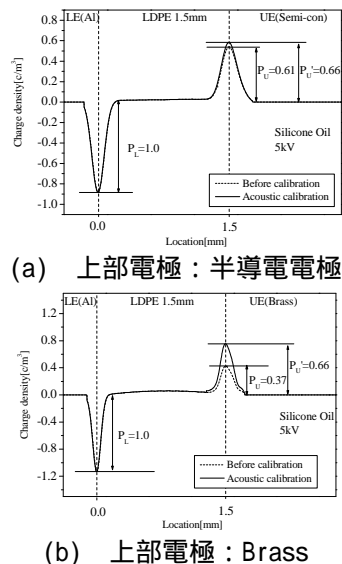


図9 上部電極が異なる場合の補正結果(音響特性の不整合の補正後、減衰補正前)

4. 研究成果

絶縁材料の性能評価に広く利用されているパルス静電応力(PEA)法では、以下の点が改善すべき点として考えられていた。

- (1) 試料中で音波が減衰するため上部電極界面の空間電荷密度が小さく評価される。
- (2) 上部電極には試料と同じ音響特性の材料の半導電電極を使用する必要があり、金属電極を用いた場合の補正方法がなかった。

(1)、(2)の対策として、本研究では、空間電荷分布と試料と電極の音響特性を同時に測定する装置を作成し、ポリ塩化ビニル(PVC)と低密度ポリエチレン(LDPE)について測定を行った。そして、空間電荷分布信号(PEA信号)と音響特性信号(AIM信号)の上部電極信号について直線の関係があることを理論と実験から明らかにし、この関係を利用して信号波形を補正する方法を見出した。本研究で見出した補正を行うことで、上部電極に金属電極を用いた場合でも補正が可能となった。以上の結果から、試料と音響特性の異なる上部電極を用いた測定が可能であると考えられる。測定に使用される音響整合剤(マッチングオイル)の影響についても本方法により調査を行った。マッチングオイルによって密着性が変化することから測定毎に補正処理が必要であることも新たにわかった。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計13件)
 福岡真澄, 富田大貴, 前野恭, "Space Charge Measurement for 27 mm Thick XLPE Sample in PEA Method", Proceeding of 2014

International Symposium on Electrical Insulation Materials, p.89-92, 主催：電気学会 (IEEJ), アメリカ電気学会 (IEEE), (2014.6.3), (新潟朱鷺メッセ)

福間眞澄, 富田大貴, 前野恭, "Space Charge Measurement for 27 mm Thick XLPE Sample in PEA Method", Proceeding of 2014 International Symposium on Electrical Insulation Materials, p.163, 主催：電気学会 (IEEJ), アメリカ電気学会 (IEEE), (2014.6.3), (新潟朱鷺メッセ) (装置のデモ)

福間眞澄「マグネシウム電極を用いた空間電荷分布測定」, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.35, (2014.3.18), (愛媛大学)

福間眞澄, 「金属電極を用いた空間電荷分布測定」電気学会 誘電・絶縁材料研究会, DEI-13 - 086, pp.43-48, (2013.12.11), (ルーテル市ヶ谷センター)

福間眞澄, 富田大貴, 「電力ケーブル用 XLPE の空間電荷分布測定」, 平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p.379, (2013.10.19), (岡山大学)

富田大貴, 福間眞澄, 前野恭, 「厚さ 27mm の XLPE の空間電荷分布測定」, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.19, (2013.3.20) (名古屋大学)

兒玉由佳里, 富田大貴, 福間眞澄, 「空間電荷分布測定における音波信号の補正」, 平成 25 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.17, (2013.3.20) (名古屋大学)

富田大貴, 福間眞澄, 「厚い試料の空間電荷分布測定装置の試作」, 平成 24 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p.129 (2012.10.20) (島根大学)

兒玉由佳理, 富田大貴, 福間眞澄, 「空間電荷分布測定における音波の減衰補正」, 平成 24 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p.128 (2012.10.20) (島根大学)

福間眞澄, 兒玉由佳里, 富田大貴, 「厚い絶縁材料の空間電荷分布測定装置の試作」, 第 43 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集, pp.205-208, (2012.9.10), (三島市民文化会館)

兒玉由佳里, 富田大貴, 福間眞澄, 「空間電荷分布測定における音波信号の減衰補正」, 第 43 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿集, pp.191-194(2012.9.10), (三島文化会館)

兒玉由佳理, 富田大貴, 福間眞澄, 布野竜二, 「空間電荷分布測定における音波信号の減衰補正」, 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.36, (2011.3.23) (広島工業大学)

富田大貴, 福間眞澄, 「線-平板電極系の空間電荷測定信号の補正」, 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, P37, (広島工業大学) (2011.3.23)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：音響インピーダンスを利用した空間電荷分布の校正法およびその校正法を用いた空間電荷分布測定装置

発明者：福間眞澄, 長尾雅行, 村上義信, 栗本宗明, 西森才真将

権利者：独立行政法人国立高等専門学校機構, 豊橋技術科学大学, 日東電工株式会社

種類：特許

番号：特願 2011 - 190867

出願年月日：平成 23 年 9 月 1 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福間 眞澄 (FUKUMA, Masumi)

松江工業高等専門学校・電気工学科・教授

研究者番号：70228930