

集束超音波と誘起電界を用いた 非近接型静電気計測技術の開発

菊永 和也^{*,1}, 星 貴之^{**}, 山下 博史^{*}, 江頭 正浩^{*}, 野中 一洋^{*}

(2013年9月9日受付; 2013年12月30日受理)

Development of Non-adjacent Measurement of Static Electricity by Focused Ultrasound Wave and Induced Electric Field

Kazuya KIKUNAGA^{*,1}, Takayuki HOSHI^{**}, Hiroshi YAMASHITA^{*},
Masahiro EGASHIRA^{*} and Kazuhiro NONAKA^{*}

(Received September 9, 2013 ; Accepted December 30, 2013)

A novel method is proposed for non-adjacent measurement of static electricity on a surface by a focused ultrasound wave to excite movement of the sample surface. The focused ultrasound waves are generated by controlling individually the phase of 285 airborne ultrasound transducers, these results demonstrated that local excitation could be measured. An electric field is induced by exciting a charged object. The frequency of the induced electric field is the same one of the charge oscillation. The electric field intensity and phase are related to the surface potential and electrical polarity of the object, respectively. We have clarified that it can be measured the electric field from a distance of 80 mm for the charged object by a monopole antenna and a Lock-in-amplifier. This method has the capability of detecting the surface potential at a longer distance than that for a surface potential sensor.

1. はじめに

近年、製造業の生産現場では生産効率を高めるために製造のオートマ化が進んでいる。そのため、生産現場では半製品が高絶縁材料と接触や剥離を繰り返し、その静電気発生率が高くなっている。自動化された製造工程における静電気障害は、帯電物が多数存在することから原因箇所特定が困難であること、再現性が低く原因追究に多大な時間を要することから極めて深刻な問題である。特に、デバイスの低電圧駆動化が進んでいるエレクトロニクス産業では、静電気問題が深刻化している¹⁾。そのため、静電気問題への対策は急激に増え、静電気関連製品市場が2015年までに80億米ドルを上回ることが報告されている²⁾。

生産現場において様々な場所の静電気をモニタリングすることは極めて困難である。それは生産性を低下させないような環境や状況に対応する静電気計測器が少ないことが原因の一つとして挙げられる。近々に予想される電子デバイスの小型化や静電放電耐性の低下、製造装置の複雑化に対応するため、空間制約の多い生産現場で簡易に静電気計測が可能な技術の開発が各方面から切望されている。これまで静電気計測として、静電界や静電容量をターゲットとして様々なタイプの表面電位センサが開発されてきた³⁻¹¹⁾。しかし、これらはセンサから対象までの距離に測定領域が依存すること、近傍のアースの影響を受けやすいことなどからセンサを遠ざけると静電気を検出できない場合があるなどのデメリットがある。これらの理由から、静電気の場所を正確に測定するために、一般的な表面電位センサは対象物に近接させる必要があった¹²⁾。しかしながら、生産現場では製品や装置などが常に動いており、静電気力によって製品が予期せぬ動きをしたり、ゴミが付着する原因になったりすることから、センサを近接させることは好ましくない。そのため、生産現場では、近接させずに静電気を計る技術が求められている。

我々は上記を満たすことを目的として、帯電した対象物に静電気の状態を変化させないような刺激を加え、それによって変化した信号を捉えることで静電気を計る技術の開発に取り組んできた。そこでは、対象物に加える刺激とし

キーワード：静電気計測, 集束超音波, 低周波電界, 振動, 非近接

* 産業技術総合研究所生産計測技術研究センター
(〒841-0052 佐賀県鳥栖市宿町 807-1)

Measurement Solution Research Center, National Institute
of Advanced Industrial Science and Technology, 807-1,
Shuku-machi, Tosu, Saga 841-0052, Japan

** 名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター
(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

Center for Fostering Young & Innovative Researchers,
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku,
Nagoya, Aichi 466-8555, Japan

¹ k-kikunaga@aist.go.jp

て音波を用い、対象物を物理的に振動させることで電荷振動を起し、電界を誘起・計測することで、静電気の定量的評価が可能であること¹³⁾、集束音波によるパルスの励振技術を用いることで、センサを固定したままで静電気分布の計測ができる可能性があることを明らかにしてきた¹⁴⁾。この励振によって発生する電界の大きさは、対象物が物理的に振動する振幅に比例する。そのため、検出可能なレベルの電界を発生させるためには、対象物の物理的な振幅を大きくすることが必須であり、数 kHz 以下の音波励振ならびに電界検出を行う必要がある。このような低周波の電界(準静電界)は、距離が離れるにつれて大きく減衰するため、これまで電界センサを近接させる必要があった。そこで、本研究では、フェーズドアレイ法を用いた集束超音波による低周波励振法の確立と、モノポールアンテナとロックインアンプを用いた低周波電界検出の高感度化を試みた。これにより、センサを対象物に近接させることなく、局所的に静電気を計測する技術の開発を行った。

2. 原理

2.1 電荷振動による電界誘起

図1に静電気計測のための電荷振動による電界誘起の概念図を示す。電界誘起の概念として、正(または負)の電荷が帯電している測定対象物を物理的に振動させた場合を考える。そうすると対象物とともに静電荷も空間的に振動する。時間的に電荷の空間位置が変動するため、その周囲に電界が誘起されるというものである。この電荷振動によって誘起される電界として、双極子放射の理論を適応する。

電荷 q [C] を持つ荷電粒子が運動するときを作る電界 E [V/m] は、図2のように極座標をとり、荷電粒子の運動方向を z 方向とすると、発生する電界は下記のように表される¹⁵⁾。

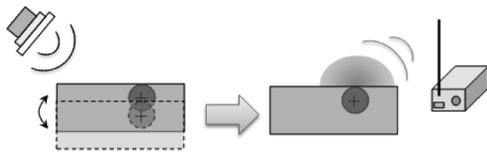


図1 帯電電荷の振動に伴う電界誘起の概念
Fig. 1 A concept of inducing electric field with charge oscillation for measuring static electricity.

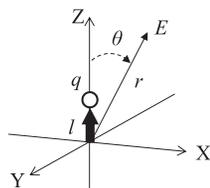


図2 極座標の設定
Fig. 2 Coordinate settings.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r + \left\{ \begin{array}{l} \frac{ql}{2\pi\epsilon_0 r^3} (1 + jkr) \cos\theta \mathbf{e}_r + \\ \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} (1 + jkr + (jkr)^2) \sin\theta \mathbf{e}_\theta \end{array} \right\} e^{-jkr} \quad (1)$$

ここで ϵ_0 [F/m] は真空の誘電率、 l [m] は荷電粒子の変位、 r [m] は荷電粒子から観測点までの距離、 k [m^{-1}] は波数 ($k = 2\pi f/c_0$)、 f [Hz] は荷電粒子の振動数、 c_0 [m/s] は真空中の光速、 j は虚数、 θ [rad] は z 軸からの傾き、 \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_θ はそれぞれ r 方向、 θ 方向の単位ベクトルである。ここで、右辺第一項は静電界である。本研究では電荷を振動させて静電気を計測する目的であるため、静電界に由来する項は除外して考える。その他の e^{jkr} にかかる項は、時間変動する電界である。ここで、すべての解を同時に求めようとすると複雑になるため、簡単にするために、周波数を 1 kHz 以下、観測距離を 1 波長 (300 km) 以下とすると、発生する電界(準静電界)の支配的な項は以下のように表される。

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{r^3} (2 \cos\theta \mathbf{e}_r + \sin\theta \mathbf{e}_\theta) e^{-jkr} \quad (2)$$

この電界を計測することにより、電荷を求めることができる。本研究では、パラメータの系統的な評価を行うために、静電気の対象として電荷量に比例する表面電位を用いて実験を行った。

2.2 フェーズドアレイを用いた集束超音波

本手法を用いた静電気計測のためには、空気中において非近接で、対象物を局所的に励振する必要がある。そこで、本研究では、物体が超音波の進行を遮るときに、超音波の進行方向において、物体表面に応力が発生する非線形音響学的な現象^{16,17)}、すなわち音響放射圧を利用する。超音波の平面波が垂直に入射するとき、物体表面に生じる音響放射圧 P [Pa] は次式で表される^{18,19)}。

$$P = \alpha \frac{I}{c} = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (3)$$

ここで I [W/m^2] は音響インテンシティ、 c [m/s] は音速、 p [Pa] は超音波の音圧(実効値)、 ρ [kg/m^3] は媒質の密度である。 α は物体表面の反射特性に依存する係数で、特に全反射のとき $\alpha = 2$ となる。この音響放射圧 P [Pa] に面積 S [m^2] を乗算することで、その場に発生する力 F [N] となる。しかしながら、単独の超音波振動子が生じる音響放射圧は微弱であり、対象物を振動させるためには高い音圧を発生させる必要がある。そこで本研究では、数十 mN 程度の発生力を得るため、285 個の超音波振動子を用いた。

超音波は各振動子の位相を適切に制御することによっ

て、空中に単一の焦点を結ぶことができる。また、この方法は位相を操作することで焦点の位置を変えることもできるため、離れた場所から空間中の任意の位置に力を発生させることができる。図3に示すように、矩形の振動子アレイを用いて、焦点距離を R [m]、正方形アレイの一辺の長さを D [m] としたとき、焦点径の幅 w [m] は次式で与えられる¹⁹⁾。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (4)$$

ここで λ [m] は超音波の波長である。(4)式から、アレイサイズと空間解像度がトレードオフの関係にあることが分かる。周波数 40 kHz の超音波を用いた場合の波長は $\lambda = 8.5$ mm である。これより、 $D = 17$ cm、 $R = 17$ cm のとき、集束径 $w = 17$ mm と算出される。本研究では、局所的な励振のために音波を集束させること、励振において対象物が振動する振幅を大きくすることから、DC -1 kHz で変調した超音波 (40kHz) を用いた。

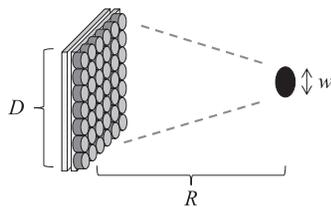


図3 超音波の集束径に関するパラメータ
Fig. 3 An image of relationship between a device size, focal length and a diameter of focal point.

3. 実験方法

集束超音波の評価に関する実験システムと電界の評価に関する実験システムを図4, 5に示す。本研究では、文献20において製作した小型超音波デバイスを使用した。アレイのサイズは $D = 17$ cm であり、その矩形領域内に 285 個 (17×17 個) の超音波振動子が配列され、焦点における発生力の最大値は 16 mN である。このデバイスでは 40 kHz の超音波を ON/OFF することで DC -1 kHz で変調することができる。そのため、超音波としての本質が損なわれず、集束度を保ったまま、低周波で励振することができる。

まず、この集束超音波の特性を評価するために、スピーカーに $\Phi 10$ mm の穴を開けた板を組み合わせて、超音波デバイスに向かい合うように 17 cm 離して設置した (図4(a))。このスピーカーを X ステージによって横方向に動かすことで集束超音波の集束度を評価した。また、物体表面に集束超音波を照射することによる励振を評価するために、超音波デバイスを対象物と向かい合うよう (z 軸方向) に距離 17 cm のところに設置した (図4(b))。

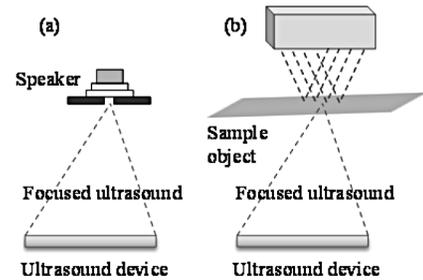


図4 (a) 集束超音波の特性を評価するシステム、(b) 集束超音波を用いた励振を評価するシステム
Fig. 4 Experimental setup for (a) characterizing a focused ultrasound wave and (b) evaluating an excitation by it.

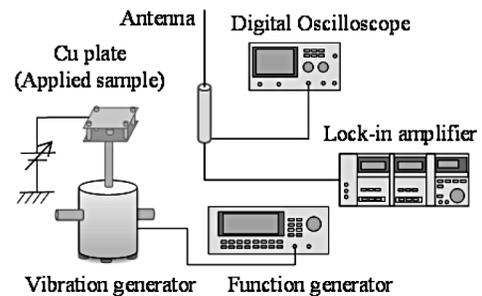


図5 電圧印加サンプルの振動によって誘起された電界の評価システム
Fig. 5 Experimental setup for evaluating an electric field induced by vibration of applied sample.

ここでは、対象物として塩化ビニルシート (厚さ 10 μ m、サイズ 25 cm \times 25 cm) を用い、変調周波数 100 Hz の集束超音波を照射した。そのときの超音波焦点の周辺における変位分布を、ラインレーザー変位計 (LJ-G200, キーエンス社製) を用いて、超音波が照射された直後から 60 m 秒まで 20 m 秒間隔で測定した。

次に、帯電体を振動させることで誘起される電界の評価を行った (図5)。その検証として、静電気の帯電電位、電氣的極性、振幅と振動数を制御する必要がある。そこで、定量的な電界を誘起させる手段として、小型振動発生器 (512-A, エミック社製) とサンプルへの直流電圧印加を用いた。振動部とサンプルを固定する絶縁性の支持台は 200 mm のステンレス棒で直結し、10 Hz - 1 kHz の正弦波で振動させ、振動部の振幅は 250 μ m に設定した。静電気を制御するためのサンプルとして金属平板 (銅板、厚さ 0.3 mm、10 mm \times 10 mm) を用いて、それに 0 - 500 V の直流電圧を印加した。電界を検出するために、無指向性で長さ 0 - 20 cm のモノポールアンテナとデジタルオシロスコープまたは、ロックインアンプを使用した。アンテナは対象物と垂直方向 (z 軸方向) にして、側面に配置し、サンプルを中心として距離 2 - 80 mm の範囲でシグナルを測定した。ロックインアンプのリファレンスには振動発生器に入力しているファンクションジェネレータの同期信号を用

いた。通常、電界強度は、アンテナ利得、ケーブル損失やアンテナ出力電力などによって求めることができるが、ここでは、単純に電界強度とアンテナ出力電圧が比例関係であることを用いて、その関係性について議論を行った。

最後に、図4(b)の集束超音波を用いた励振システムと図5の電界評価システムを用いて、コロナ放電によって表面電位を100 Vに帯電させたポリイミドフィルム(10 mm×10 mm)を対象として、中心振幅250 μm 、100 Hzで励振させ、電界を測定することで、非近接での静電気の評価を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 集束超音波の検証

集束超音波の検証として、まず、音圧の空間分布の評価を行った。図4(a)で示したように、超音波デバイスによって発生させた集束超音波の空間分布を測定した結果を図6(a)に示す。これより、直径が約 $w = 20$ mmの集束した音圧が得られることが分かった。(4)式による焦点径 $w = 17$ mmより少し広いが、ほぼ理論通りの結果が得られた。

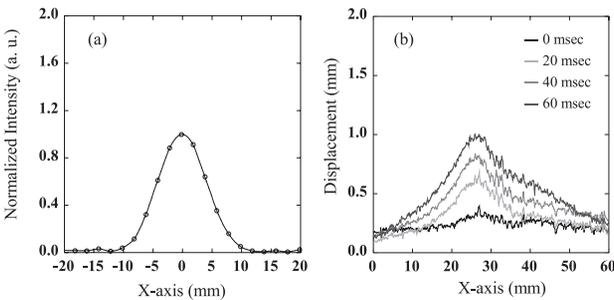


図6 (a)集束超音波による音圧の空間分布と(b)集束超音波によって変位した塩化ビニルシートの変位分布
Fig. 6 (a) Spatial distribution of measured radiation pressure, (b) displacement distributions of vinyl chloride sheet along straight line through ultrasound focus.

4.2 集束超音波を用いた非近接での局所的励振

次に、対象物に局所的な振動を印加するために、物体表面に集束超音波を照射して局所の変位を測定する実験を行った(図4(b))。図6(b)は超音波焦点の中心付近に沿った塩化ビニルシートの変位の一次元分布を、超音波が照射された直後から60 msまで20 ms間隔で測定した結果を示している。超音波照射から時間が経過するとともに局所的な振幅が得られているのが分かる。これは、集束超音波の力によって、塩化ビニルシートの一部が押されている過程を示している。超音波焦点の中心部にて変位は最大で約1 mmで、半値全幅FWHM = 25 mm程度である。集束径より広い範囲ではあるが、これは対象物のヤング率に関係して広くなると考えられる。これよ

り、本研究では、集束超音波を用いて、近接させずに局所的な励振が可能であることを明らかにした。

4.3 電荷振動により誘起される電界

図7は図5の実験システムを用いて、サンプルを100 Hzで振動させたときに、長さ10 cmのモノポールアンテナを距離5 cmに設置したときにオシロスコープで測定したシグナルをFFT変換することで得られた電界の周波数依存性を示している。図7(a)(b)は、それぞれサンプルを接地した状態と100 V電圧を印加したときの結果である。図7(a)のように、帯電がない状態における100 Hzの小さなシグナルは振動発生器のノイズに相当する。一方、図7(b)のように、電圧印加したサンプルでは100 Hzにおいて電界の増加が観測された。また、帯電したポリイミドフィルムを対象として、150 Hzと1 kHzの音波で励振を行った場合では、それぞれの周波数の電界が観測された¹³⁾。これらの結果は電荷の空間的振動によって、その振動数と同じ周波数の電界が誘起されたことを示している。このことから、励振する振動特性によって誘起する電界の周波数を制御することができ、様々な環境に合わせて周波数を選択することが可能である。また、このサンプルの振動数を高くすると、電界は小さくなり、2 kHz以上で観測されなくなった。これは、サンプルが物理的に振動する振幅が小さくなるためであり、効率的に電界を誘起するには振幅が大きくなる低周波の振動を用いることが有効である。

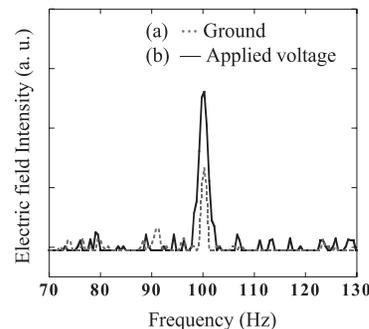


図7 電圧印加の有無における電界の周波数依存性
Fig. 7 Frequency dependence of electric field intensity for (a) grounded and (b) applied samples.

4.4 電界誘起を用いた静電気の評価

上述した方法を用いて静電気を計測するために、誘起された電界を測定することで静電気の情報を得る必要がある。そのためには、静電ポテンシャルと誘起された電界特性の関係を明らかにする必要がある。図5の実験システムを用いて、サンプルを100 Hzで振動させ、サンプルの印加電圧を0–200 Vで変化させたときに、モノポールアンテナとオシロスコープで測定したシグナルを

FFT 変換し、100 Hz の電界強度を計測した。図 8(a) は正負の電圧をサンプルに印加したときの電界強度と印加電圧の絶対値の関係を示している。ここで、この電界強度は、図 7 に示すようにアンテナによって測定されたシグナルとノイズの差としている。図 8(a) より、電界強度は 0–200 V で正の印加電圧と、また、-200–0 V で負の印加電圧と直線比例していた。これは誘起された電界がサンプルの静電気の大きさに比例していることを示している。それ故、その電界強度を測定することによって表面電位を推測することができ、我々のシステムは 10 V 以上の表面電位の大きさを推定することができた。

しかしながら、この電界強度は正負の電気的極性の情報は含まれていない。そこで電気的極性に関連するパラメータを明らかにするために、正と負の電圧印加したサンプルにおける電界の位相を調べた。図 8(b) に電界の位相と正負の印加電圧の絶対値の関係を示す。この位相はファンクションジェネレーターのリファレンス信号と測定された電界信号を比較することによって計算した。正と負に電圧印加されたサンプルの電界の位相はそれぞれ約 -13 度と 167 度だった。このように印加電圧と電界位相の関係は、その位相が電荷極性によって変化していることを示している。それは電荷の空間的振動に関係しており、電荷振動が仮想的な交流電流のように考えることができる。仮想的な電流の方向は正電荷振動(正位相)の方向と一致するが、負電荷振動(負位相)の方向とは逆になる。そのため、サンプルの帯電極性に依存した位相を持った電界が誘起される。この相対位相はリファレンス信号で同期振動したサンプルと測定するアンテナまでの距離によって変化する。この結果は電界の位相を測定することによって電荷の極性を判別することができることを示している。

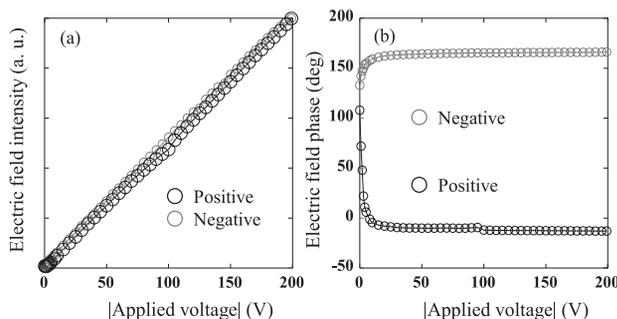


図 8 正負の電圧をサンプルに印加したときの (a) 印加電圧と電界強度、(b) 印加電圧と位相の関係

Fig. 8 (a) Relationship between absolute value of applied voltage and normalized electric field (EF) intensity, and (b) relationship between absolute value of applied voltage and electric field phase for negatively and positively applied samples.

これらの関係性は、帯電したポリイミドフィルムを対象として、音波による励振を用いたときと同様の結果が得られている¹³⁾。このことから、対象物を励振する際に、音波を用いるか、直接的に振動させるかというのは、本質的に変わらず、励振によって誘起される電界を用いることでその対象物の静電気を計測することができる。

4.5 ロックイン方式を用いた低周波電界計測

本手法ではある程度の物理的な振幅を必要とするため、現実的に 1 kHz 以下の低周波の振動数を用いることになる。そのため誘起される低周波の電界を高効率で測定することがこの静電気計測技術の鍵となる。通常、低周波のアンテナを高効率で測定するためには、その波長と同程度の長さのアンテナを用いればよいが、1 kHz 以下の電界の波長は 300 km 以上になるため、それは実用的ではない。本手法では、電荷振動によって誘起される電界の周波数は対象物の振動特性によって制御することができる。そのため、対象物の振動数と同じ周波数の電界信号のみ積算することによって、余計なノイズが除去され小さなレベルの電界も検出することができる。そこで低周波の電界を測定する手段として、同軸ケーブルの中心線をむき出しにしたモノポール構造のアンテナを用いて、これをロックインアンプに接続し、非近接で電界の計測が可能か実験を行った(図 5)。そのとき、サンプル(電圧印加プレート)は 100 V の直流電圧を印加し、振幅 250 μm 、振動数 100 Hz に設定した。図 9 にアンテナ長 0–15 cm における電界強度の距離依存性を示す。ここではサンプルの振動方向と垂直(X 軸)方向にアンテナを移動させ、サンプルを中心として距離 2–80 mm で測定した。図 9 より、測定距離が遠くなるにつれて電界強度が減衰しており、アンテナ長が長い方が遠方まで電界を検出できているのがわかる。ここで規格化された電界強度 10^{-2} は検出感度限界である。アンテナ長が

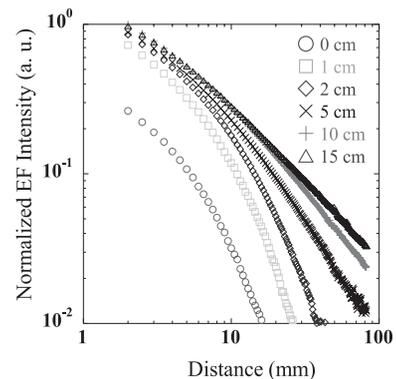


図 9 モノポールアンテナ長 0–15 cm で測定された電界強度の距離依存性

Fig. 9 Distance dependence of electric field (EF) intensity for antenna length 0-15 cm.

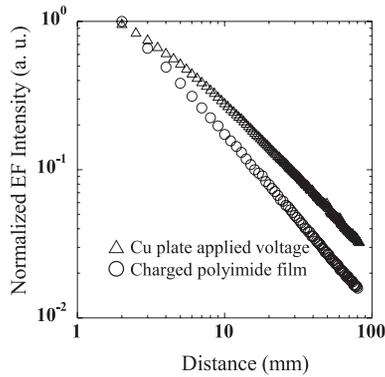


図10 集束超音波によって励振されたポリイミドフィルムを用いてモノポールアンテナで測定された電界強度の距離依存性

Fig. 10 Distance dependence of electric field (EF) intensity measured by monopole antenna using polyimide film excited by focused ultrasound.

10 cm と 15 cm においては、測定距離 80 mm でも電界が計測できており、10 cm 以上でも計測可能だと思われる。さらに長いアンテナを用いることで低周波電界検出を高効率化することができ、より離れていても静電気の計測が可能になると思われる。

4.6 非近接における静電気計測

図4(b)の集束超音波を用いた励振システムによって100 Vに帯電させたポリイミドフィルムを励振させ、図5の電界評価システム(15 cmのモノポールアンテナとロックインアンプ)を用いて、電界強度の距離依存性を測定した結果を図10に示す。また、この比較のために、電圧印加プレートを対象物とした図9のモノポールアンテナ長15 cmで測定した電界強度の結果も図10に示す。それらの電界強度に違いがみられたものの、電圧印加プレートを用いて誘起した電界と同様の傾向の結果が得られた。ここで電界強度が異なったのは、ポリイミドサンプルでは、集束超音波を用いて振動させることで二次元的に振幅にムラができたこと、コロナ放電による帯電にムラがあること、また電圧印加プレートでは、振動部とサンプルを固定する絶縁性の支持台があったことで電界の空間的干渉を受けたことなどが考えられる。しかしながら、これらの結果から、振動させる対象物が異なっても電界を計測することで、表面電位を推測することができることを実証した。ただ、この静電気計測に関するサンプル-アンテナ間の結合係数は、対象物の振幅、測定距離、アンテナの長さなどで決まっている¹³⁾。そのため、この計測装置は、標準サンプルとして、直流電圧を印加した電極と制御可能な振動発生装置を用いて、校正を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、電荷振動による電界誘起を基盤として、フェーズドアレイを用いて発生させた集束超音波と、ロックインアンプ方式の低周波電界計測を用いることで、非近接で静電気を計測する技術を開発した。集束超音波は、対象物から10 cm以上離れた距離において、集束径20 mm程度で、対象物を局所的に励振可能である。また、低周波電界用の計測として、長さ10 cm以上のモノポールアンテナとロックインアンプを用いることで、対象物からの距離80 mm以上でも測定が可能であることが明らかになった。これより、本研究で開発した静電気計測技術は、対象物にセンサを近接させることなく、かつ測定面積を変化させずに静電気を測定することが可能である。また、本稿では静電気の評価対象として表面電位を扱ったが、今後は電荷量で評価していく予定である。

6. 謝辞

本研究は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)先導的産業技術創出事業(11B09009d)の支援を受けて行ったものである。

参考文献

- White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements. Industry Council on ESD Target Levels, p.77 (2010)
- P. Markowitz: ESD Products and Materials: Markets and Opportunities, p.5, Nano Markets, Virginia USA (2010)
- P. E. Secker: The design of simple instruments for measurement of charge on insulating surfaces. *J. Electrostat.*, **1** (1975) 27
- E. Eisenmenger and M. Haardt: Observation of charge compensated polarization zones in polyvinylidene fluoride (PVDF) films by piezoelectric acoustic step-wave response. *Solid State Commun.*, **41** (1982) 917
- R. E. Vosteen: International Conference on Charged Particles - Management of Electrostatic Hazards and Problems, p. 1, Oyez (1982)
- R. A. Anderson and S. R. Kurtz: Direct observation of field - injected space charge in a metal - insulator - metal structure. *J. Appl. Phys.*, **56** (1984) 2856
- 松井満: 微小面積表面電位計. 静電気学会誌, **10** (1986) 217
- 山田博章, 小林徹也: 振動型表面電位センサ. 静電気学会誌, **10** (1986) 213
- D. M. Taylor, P. E. Secker: Industrial electrostatics:

- Fundamentals and measurements. Research Studies Press, John Wiley 1994.
- 10) A. Sowinski, F. Salama, and P. Mehrani: New Technique for Electrostatic Charge Measurement in Gas-Solid Fluidized Beds. *J. Electrostat.*, **67** (2009) 568
 - 11) K. Sasagawa and M. Tsuchiya: Real-time monitoring system of RF near-field distribution images on the basis of 64-channel parallel electro-optic data acquisition. *IEICE Electron. Exp.*, **2** (2005) 600
 - 12) T. Takuma, M. Yashima, and T. Kawamoto: Principle of surface charge measurement for thick insulating specimens. *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, **5** (1998) 497
 - 13) K. Kikunaga, H. Yamashita, Y. Fujii and K. Nonaka: Measurement Technology of Surface Potential Using Acoustic Wave and Electric Field. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52** (2013) 05DB16-1
 - 14) K. Kikunaga, T. Hoshi, H. Yamashita, Y. Fujii and K. Nonaka: Measuring Technique for Static Electricity Using Focused Sound. *J. Electrostat.*, **71** (2012) 554
 - 15) 例えば, 後藤尚久, 新井宏之: 電波工学. 昭晃堂 (1992) 51
 - 16) J. Awatani: Studies on Acoustic Radiation Pressure. I. (General Considerations). *J. Acoust. Soc. Am.*, **27** (1955) 278
 - 17) T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka: Theory of Rayleigh and Langevin Radiation Pressures. *Acoust. Sci. Technol.*, **21** (2000) 145
 - 18) B. T. Chu and R. E. Apfel: Acoustic radiation pressure produced by a beam of sound. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72** (1982) 1673
 - 19) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, **3** (2010) 155
 - 20) 星貴之: 空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, p. 1A1-A03 日本機械学会 (2012)