



解説

静電気の可視化技術 —表面電位分布測定—

Visualization of Static Electricity Measurement of Surface Potential Distribution

菊 永和也

KIKUNAGA Kazuya

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター

(原稿受付：2021年10月1日)

静電気は製造現場で生産障害や製品破壊など多種多様の問題を引き起こす原因となっている。有効な静電気対策のためには静電気を定量的に評価する測定技術が必要不可欠であり、これまでに様々な静電気測定技術が開発されてきた。それぞれの静電気測定技術は使用方法や特徴が異なり、環境や状況に合わせて適切な測定法を選択をする必要がある。著者は、従来とは異なる静電気計測システムとして、非接触および非破壊的、視覚的かつ定量的に可視化できる静電気スキャナを開発した。本稿では、既存の静電気計測技術と、著者が開発した静電気スキャナの概要・測定例および応用例について述べる。

Keywords:

charge, static electricity, surface potential, visualization, measurement

1. はじめに

静電気というと静電気放電をイメージするが、狭義としては空間のあらゆる場所において電荷の移動がないような電気、広義としては電荷の空間的な移動がわずかであって、それによる磁界の効果が電界の効果に比べて無視できるような電気、とされている[1]。材質が異なる二つの中性的（非帯電）な物体を接触させると、その界面においてエネルギー準位を平衡にするために電荷移動が起こり、その電荷移動によって材料の極性に偏りができ、帯電（接触帯電：図1）が起こる[2]。さらに接触している二つの材料を引き剥がすと、両者間の距離が近いときは非常に高電界となるため静電気放電が発生し、空気中で電離などによって正イオンまたは負イオンが多量に生成される。そして局所的に接触帯電と逆極性の電荷が付着する。これは剥離帯電と呼ばれており、特にフィルムなどでよく起こる現象である。また摩擦では表面の凹凸が擦り合わされるとともに表面物質の破壊や温度上昇なども加わり界面付近でマイクロプラズマが発生するなど複雑な現象が誘起されることも報告されている[3]。つまり中性（非帯電）の異種材料が接触・剥離・摩擦するだけで静電気が発生する。そのため加

工、成形、実装、搬送といった多数の製造プロセスを実施する装置が存在し、ゴム、金属、樹脂、セラミック等が存在する製造現場では、静電気は容易に発生する。静電気力（引力・反発作用）は原材料および半製品・製品などのコンタミネーション、プラスチックフィルムによる梱包不能、原材料・製品などの自動搬送不能および自動計量不能、画像・印刷不良の原因に、静電気放電はIC、LSIなどの電子素子およびそれらが実装されている電子システムの静電気破壊、誤作動などの障害、さらには爆発や火災などの災害の原因になる[4-7]。さらにこのような静電気問題は広範囲な分野で問題となっており、表1に示すように帯電物や障害も様々である。静電気対策としてコロナ放電

表1 様々な静電気障害。

分野	帯電物	障害の例
半導体・液晶	パッケージ	パッケージ・内部回路の破壊、特性劣化、歩留り低下
	ガラスパネル・装置類	トランジスタの破壊、製造中のガラスの破壊
電機・電子	絶縁材料・作業員	部品組立時の異物付着、基板検査時の静電気破壊
	パッケージ	基板搬送時の静電気放電・静電気吸着
金属	導体材料・装置	銅薄巻取り不良・切断時の切り粉付着
化学	繊維	原糸のより合わせ不良、糸のからみ・切断
	フィルム	ホコリの吸着、ローラーへの巻きつき、放電
食品・薬品	絶縁材料・装置	ギャップ搬送時の詰まり、シール包装時の噛み込み
	作業員	容器内の異物付着
樹脂・フィルム	装置・絶縁材料	整形成型残りによる異物付着、パーツフィードの詰まり
	フィルム	ロールとロールでの巻き取り不良
紙・繊維	紙・装置	印刷機の詰まり、裁断工程での切り粉付着
輸送	導体材料・作業員	バンパー塗装不良、電子基盤の静電気破壊
	パッケージ	出荷前検査時の静電気放電・静電気吸着

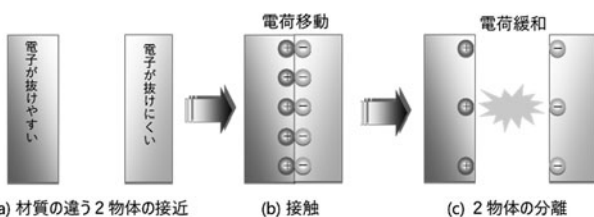


図1 異種材料の接触帯電モデル。

式、自己放電式、放射線式、紫外線式、軟X線式など様々な徐電器（イオナイザ）が用いられている。中でもコロナ放電を用いたイオナイザは操作性・持続性・設置性が良く、高い除電能力を持つことから製造現場ではよく用いられている。コロナ放電式イオナイザは金属針に高電圧を印加することで空気中にイオンを発生させる。金属針のように細く尖った先端では電荷同士の反発力が小さくなるため電荷が密集しやすく電荷がたくさん集まる。そうすると針先端の電位勾配（電界）が強くなり、やがて空気の電離エネルギーを超えるとコロナ放電が起こる。このコロナ放電と空気中の気体が反応することで正または負のイオンが生成される。正イオンは負帯電の場所に引き付けられ、負イオンは正帯電の場所に引き付けられるため、帯電が選択的に除電される。しかしどのくらいの時間で除電が行われ、どの程度の効果があるのかを調べるには静電気を定量化することが必須であり、静電気測定と除電はセットで考える必要がある。帯電量が小さいときは、製造プロセスに及ぼす影響は少ないが、帯電量が大きくなると静電気力による力学的作用も大きくなるためプロセス異常を起こし始める。そのため「静電気の定量化」はプロセス異常を引き起こす前に検知するための手段でもあり、静電気測定方法の選択は極めて重要である。

2. 様々な静電気測定技術

静電気測定としては電荷量、電位、電界を対象とした測定技術がある。研究用途で用いられる方法を含めると多数存在するが、ここでは現場で用いられる代表的な測定・分析として(1)ファラデーケージ、(2)クーロンメーター（電流積分法）、(3)カラートナーを用いた方法[8]、(4)表面電位計[9-14]、(5)静電気力顕微鏡[15]について紹介する。

2.1 ファラデーケージ

ファラデーケージは図2に示すように外側が接地された二重円筒導体容器を用いて、容器内に投入された帯電体の総電荷量を外部のキャパシタに静電誘導し、そこからの電位差を測定することで電荷量を計算する測定器である。ここでは容器とアースとの両者間に生じる静電容量 C [F] と電位計で測定される電圧 V [V] から、測定対象物の電荷量 Q [C] は次式で表される。

$$Q = CV \tag{1}$$

ファラデーケージでは容器に対象物を入れなければ測定できないため、ピンセット等でつかむ行為が必要になるが、その行為によっては対象物の帯電が変化するため注意が必

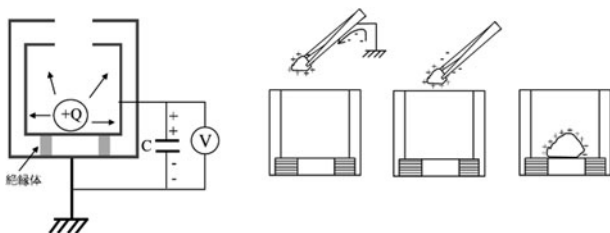


図2 ファラデーケージの概要。

要である。また粉体などにおいては対象物を直接触れることなく測定するために吸引式のファラデーケージなどもある。

2.2 クーロンメーター

クーロンメーターは図3に示すように溜まっている電荷を所定のコンデンサに電流として流し込み、その電流を積分して帯電電荷量を測定する測定器である。ここでは測定対象物から流れた電流を I [A]、時間を t [s] として測定対象物の電荷量 Q [C] は次式で表される。

$$Q = \int I dt \tag{2}$$

クーロンメーターは帯電している電気を電流として測定するため、元の帯電状態は壊され二度と測定できない破壊検査と位置付けられる。

2.3 カラートナーによる可視化方法

カラートナーを用いた方法は、赤や青などの色を帯電箇所につけることで帯電分布を可視化する方法である。カラートナーはメーカーによって異なるがそれぞれのトナーの色によって帯電量や電氣的極性が異なる。ここでは電氣的極性が異なる青トナーと赤トナーを帯電したポリイミドフィルムに散布したときの例を図4に示す。トナーによって放電形状に色付けされていることがわかる。このようにトナーの帯電極性（正または負）を利用して対象物にトナーを散布することで帯電している箇所を直感的に認識することができる。一方で、この方法は対象物にトナーを接触させる必要があることから破壊検査であり、また帯電の電氣的極性のみしかわからず定量的な評価はできない。

2.4 表面電位計

表面電位計は図5に示すように静電誘導を利用したチョッパー型、また静電容量を利用した振動電極型がある。静電誘導を用いた原理は、帯電体に導体を接近させると静電誘導が起きる現象を利用する。電界 E [V/m] の中に導体が置かれると誘電率を ϵ [F/m] としたとき、その表面

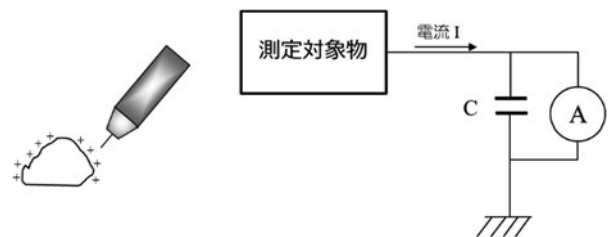


図3 クーロンメーターの概要。

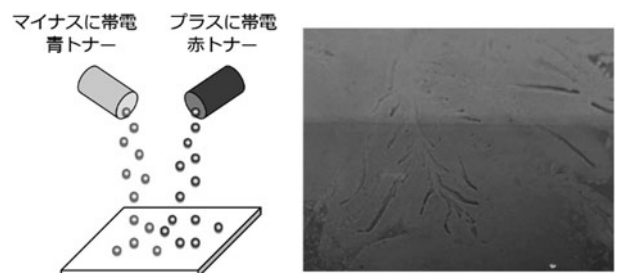


図4 カラートナーを用いたポリイミドフィルムの帯電の可視化。

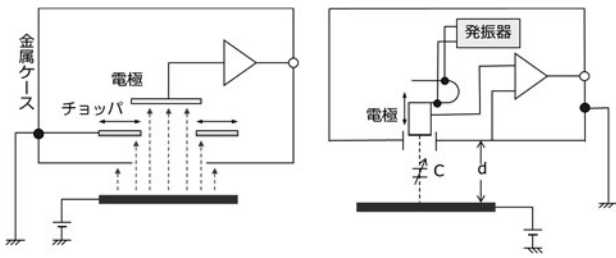


図5 表面電位計の概要。(a)静電誘導によるチョッパー型、(b)静電容量による振動容量型。

には電荷密度 σ [C/m²]が誘導され、次式が成り立つ。

$$\sigma = \epsilon E \tag{3}$$

これによって帯電体から生じる電界に応じて導体の片側に電荷が誘導され、導体に電位差が生じる。この導体の電位を測定することによって、帯電体からの電界を知ることができる。表面電位計では安定的にこの静電誘導の電位を測定するために、電界を検出する電極の前面をチョッピングして交流電圧を誘起させることで、非接触かつ高精度な測定を行っている。この帯電体から生じる電界は距離に応じて変化するため、あらかじめ距離と出力信号の校正を行うことで対象物の帯電を表面電位として測定することができる。

静電容量を利用した原理は、検出電極と測定面との間に生じる静電容量を利用する。検出電極と測定面とが互いに向き合って設置した状況において電気回路を考えると、電極と測定面との間に静電容量 C [F]が定義できる。このとき電荷は測定面の表面に存在するものとする。検出部を振動させると空間的変位が発生し、検出部の電極に交流変調信号が誘起される。このとき検出部の電極に対向する対象物の電荷量 Q [C]は次式で表される。

$$Q = \frac{\Delta V \epsilon S}{d \pm a} \tag{4}$$

ここで ΔV [V]はセンサによって検出された最大電位と最小電位の電位差、 ϵ [F/m]はセンサと対象物との誘電率、 S [m²]はセンサの面積、 d [m]はセンサと対象物との距離、 a [m]はセンサの振幅である。誘電率、センサの面積、距離、振幅が一定の場合、電荷量 Q はセンサで検出される電位差 ΔV に比例する。これを校正することで対象物の帯電を表面電位として測定することができる。これらの表面電位計は非破壊で定量的かつ容易に対象物の表面電位を測定できるが、測定状況によって距離依存性、測定面積依存

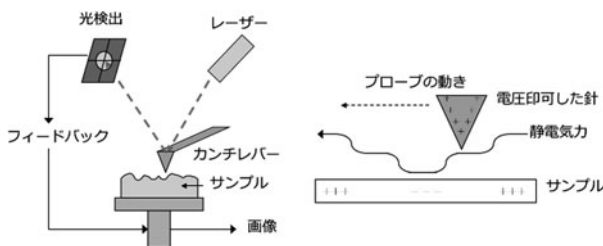


図6 静電気力顕微鏡の概要。

性、測定環境依存性があるため、使用方法には注意が必要である。

2.5 静電気力顕微鏡

静電気力顕微鏡は、先端を尖らせた探針を用いて物質の表面をなぞるように動かして表面状態を観察する走査型プローブ顕微鏡の一種である。その原理はまずサンプル表面の形状を測定し、次にその形状と同じ軌跡を辿りつつプローブに電圧を印加して針先端の静電気力の影響を測定することができる。これにより帯電などの電荷を二次元分布として可視化することが可能である[15]。静電気力顕微鏡は非接触で定量的かつ空間分解能が数 μm と非常に高いが、測定面積が微小 ($\sim 1 \text{ mm}^2$)、かつ分布を測定するためのマッピング時間に時間を要する。そのためマクロ領域における測定は難しく、微細な対象物の評価・分析として用いられている。

3. 静電気スキャナと応用

絶縁体に帯電した電荷はその表面抵抗の高さから拡散することなく同じ場所に保持される。そのため絶縁体の表面には同一面内に正または負の電気的極性および異なる電荷量の帯電が混在することになる。そのため一点のみ測定するだけでは静電気がどれくらいなのか、除電したときにどれくらい効果があるかを判断するには不十分である。静電気を二次元的・定量的・短時間で可視化することができれば、効率的かつ有効な対策を行うことができる。そこで非破壊かつ定量的に静電気分布を可視化できるシステムを開発した。

3.1 装置構成

静電容量を用いた測定原理は非接触かつ高精度で安定的に表面電位を測定できる。しかしそのセンサ内には検出電極、発振器、プリアンプを内蔵した構造が一般的でありセンサの小型化が困難であるため、センサをアレイ化しても空間分解能を狭くすることが難しいという課題があった(図7)。そこで検出部の電極、振動機構、信号処理機能をそれぞれ分解し、表面電位を測定するための振動型アレイセンサを一体化した構造によって、2次元分布を短時間で測定するシステム構成を考案した。このシステムはライン型アレイセンサ、振動発生器、各センサの信号を同時に処

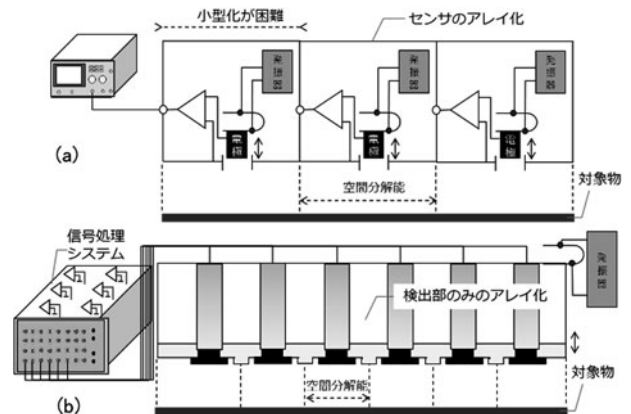


図7 従来センサの空間分解能の問題と解決。(a)従来センサ、(b)考案したシステム。

理するシステム、走査機構システムから構成されており、プリンタのコピー機のような使用方法であることから静電気スキャナと名付けた(図8)。ライン型アレイセンサは30個の検出部(平板電極、サイズ:0.7 mm×0.7 mm)が一列に並び、各電極間の相互干渉を防ぐために電極間にシールド配線が配置した構造となっている。アレイセンサは振動発生器に接続され、特定の振動数(50 Hz~1 kHz)・振幅(0.1~1 mm)で振動させることができる。アレイセンサの配線はそれぞれ信号処理システムに接続しており、各センサで検出した信号を同時に測定することができる。対象物はセンサと並行に向き合うように距離500 μm離して配置し、アレイセンサを一軸方向に走査させることで表面電位分布を短時間で測定することができる。

3.2 仕様

静電気スキャナは、アレイセンサを走査しながら各センサで測定した表面電位と空間座標から対象物の表面電位分布を空間分解能1 mmの画像として描画することができる。使用 방법은測定対象物を装置にセットし、アレイセンサでサンプル表面を非接触スキャンすることで表面電位分布の情報を読み取り画像で視覚化する。静電気スキャナの各センサは表面電位で校正しており表2に示すような性能となっている。静電気スキャナは様々な材料の静電気や関連する現象を定量化・可視化でき、表面電位の経時変化を観測することで静電気以外の情報を得ることができる。ここからは静電気スキャナを用いた様々な可視化の例を紹介する。

3.3 ガラスと塩化ビニルとの接触帯電

ガラスと塩化ビニルを接触させたときに発生する帯電を可視化した例を紹介する[18]。図9(a)は塩化ビニルを「AIST」の文字に沿って接触させた後のガラスの表面電位分布を測定した結果(測定面積60 mm×30 mm)を示している。測定結果から接触させた位置が正に帯電していることが分かる。これはガラスと塩化ビニルを接触させたときにそれぞれが正と負の電荷を有する帯電列によって説明す

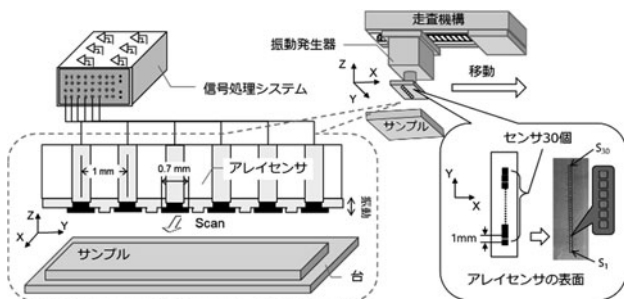


図8 静電気スキャナの概要。

表2 静電気スキャナの仕様と特徴。

測定面積	~10,000 mm ²
空間分解能	1 mm
分布測定時間	0.1 s/mm
表面電位の測定範囲	10 V~1.5 kV
表面電位の測定精度	10%

ることができる。次に、帯電させたガラスをイオナイザによるイオン風に曝露した後、再度、静電気スキャナで測定した結果を図9(b)に示す。図9(b)は除電前と比べると帯電させた「AIST」文字が消え、帯電電荷が取り除かれたことを示している。このように静電気スキャナを用いれば接触によって発生した帯電の位置と量、また除電効果について簡単に評価することができる[16, 17]。

3.4 静電気とホコリ

静電気問題の一つであるホコリとの関係を調査した例を紹介する[18]。アクリル上に塩化ビニルを「×」の文字に沿って接触させた後、アクリルの表面電位分布を測定した結果を図10(a)に示す。接触した場所では帯電が生成されていることがわかる。次に、繊維由来のホコリをアクリルに付け、エアダスターを用いてホコリを吹き飛ばした。この時、図10(b)に示すように、ホコリは帯電した領域に付着したままであった。さらにホコリが付着したままのアクリルにイオナイザを用いて除電を行ったが、このホコリを除去することはできなかった。これは粉塵が帯電した場所に付着しやすく、その後に取り除きが困難であることを示している。逆にいうと現場等での静電を適切に測定・除去することは粉塵の付着を防ぐことにつながると言える。

3.5 低温プラズマ照射による帯電の形成

低温プラズマは創傷上の殺菌や止血、がん細胞の選択的殺傷などの生体医療への応用が期待されており、プラズマにおける荷電粒子のふるまいを理解することは重要である。ここではポリイミドフィルムに低温プラズマを照射したときに形成される帯電について紹介する[19]。接地した金属板の上にポリイミドフィルム(厚さ:70 μm)を張り付け、主に止血を目的として開発されたプラズマ源[20](Heガス流量:2.0 l/min, 印加電圧:約7 kVpp, 電圧周波

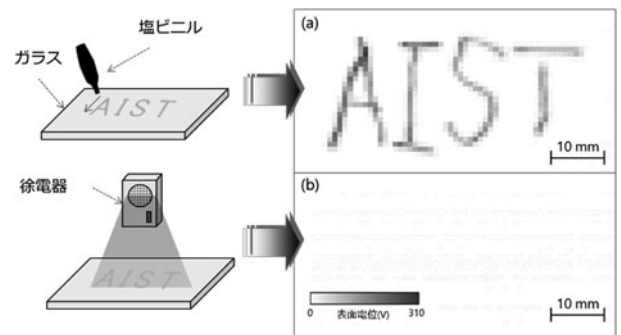


図9 (a)塩化ビニルで接触帯電させたときのガラスの表面電位分布、(b)除電後に測定した表面電位分布。

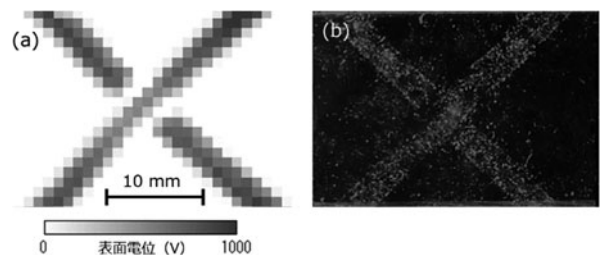


図10 (a)塩化ビニルで接触帯電させたときのアクリルの表面電位分布、(b)埃を付着させたときの写真。

数：約 62 kHz，投入電力：約 1.4 W）を用いてプラズマフレアを 3 秒間照射したとき，ポリイミドフィルムの表面電位分布を測定した結果を図11に示す．プラズマ照射点を中心として，ドーナツ状の形状の帯電が形成されており，その表面電位は -20 V から 110 V までの範囲で分布している．また中心から半径 5 mm 程度の範囲で弱く負に帯電（～-20 V）した領域が存在し，その外側に強く正に帯電（～100 V）した領域が存在している．さらにプラズマ照射点からの距離が増加するにつれて表面電位は徐々に減少している．このような帯電の形状や表面電位の大きさは大気圧プラズマの照射条件によっても異なるが，ガス流によって形成されたと考えられる．プラズマ照射による表面の電荷は反応種の生成と輸送に影響を与える可能性があるため，プラズマ中の荷電粒子の振る舞いや反応を評価する上で重要な情報をもたらす，現象の解明に寄与することを期待する．

3.6 薄膜中の欠陥検知

これまでは表面に溜まった電荷（帯電）をターゲットとした静電気可視化例について紹介した．ここでは積極的に帯電させることで材料内部の特性を評価する方法について紹介する．サンプルとして，ポリカーボネートの上にカーボンフィラーを添加したプラスチック樹脂（厚さ：4 μm）を塗布し，体積抵抗が下がらなかったものを用いた．コロナ放電を照射することでサンプルを正に帯電させ，帯電直後（0 分後）と 6 分後の表面電位を測定した結果を図12に示す．帯電直後において表面電位が高い（帯電している）領域と低い（帯電していない）領域（C），6 分

後に表面電位が低くなった領域（C'）が観測された．コロナ放電を照射したとき絶縁体であれば帯電しつづけ，導体であれば電気を流しやすいため帯電がすぐ緩和する．このことから表面電位が低い領域（C）はカーボンフィラーが凝集しており，表面電位が高い領域はカーボンフィラーがないことを示している．また表面電位が徐々に低くなる領域（C'）はカーボンフィラーがある程度分散していると考えられる．このように帯電と表面電位分布の経時変化を用いることで材料内部の電気的特性を評価し，膜中の欠陥を検出することができる．その他にも自動車分野において次世代材料として実用化が進められている複合材料の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）において，材料内部における導電性の評価も可能であることがわかっている[21]．このように本手法では材料内部に局在する導電率の異なる位置をイメージングすることが可能であり，複雑な構造の材料評価において有効な手段になる．

4. 静電気可視化技術の課題と展望

本稿では，静電気を測定する従来の方法と，著者が開発した静電気スキャナの概要およびその応用例について紹介した．静電気スキャナはライン型配列30個のセンサを用いて，対象物の表面電位分布を非接触型・非破壊で計測するシステムである．静電気スキャナは，面積：～10,000 mm²，空間分解能：1 mm，時間：0.1 s/mm，電位範囲：10 V～1.5 kV，精度：10%で表面電位を測定する性能を有する．これによってこれまで直感的に捉えることができなかった静電気を定量的に評価することが可能となった．その一方で，静電気可視化技術としては広い面積をカバーしつつ更に細かい電荷を観測したいという要望がある．そこで今後は静電気スキャナを用いた「高空間分解能化」に取り組んでいきたいと考えている．その方法として検出プローブの特性とシミュレーションを組み合わせることで分解能を高められる[22, 23]．このように静電気スキャナの表面電位分布とシミュレーションを駆使することで，さらに高い空間分解能への展開が期待できる．

一般的に電荷は直接測定が難しく目に見えないことからそれらを起因とする現象を理解するにはあらゆる測定技術を駆使する必要がある．そのような場合は静電気測定技術をうまく活用し，電荷が関係する間接的な影響などを数値化・定量化することで，様々な現象への理解に貢献できれば幸いである．

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費（基盤 C）JP25420427，JST A-STEP（トライアウト）JPMJTM20H4 の助成を受けたものです．最後に，本解説執筆の機会を与えていただいた産総研 電子光基礎技術研究部門 清水鉄司 主任研究員に感謝いたします．

参考文献

[1] 静電気学会編 新版静電気ハンドブック（オーム社，2006）p.1.

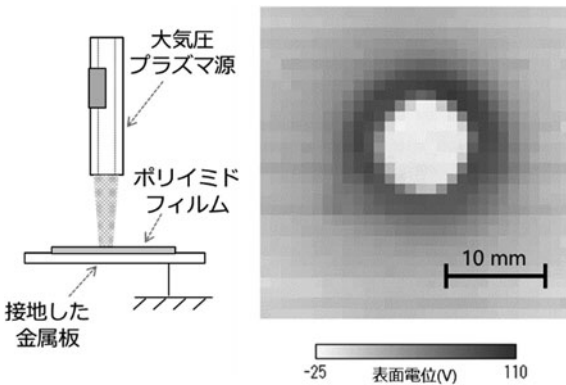


図11 大気圧プラズマの照射により形成された帯電状態．

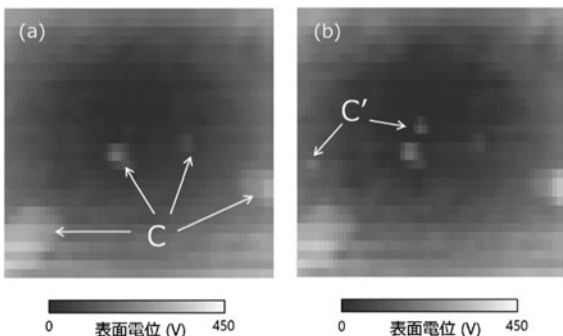


図12 コロナ放電を照射した後のカーボンフィラー入りプラスチック樹脂の表面電位分布 (a) 0 分後，(b) 6 分後．

- [2] 村田雄司：表面技術 **56**, 436 (2005).
 [3] 中山景次：真空 **49**, 618 (2006).
 [4] L. Lachman and S-L. Lin, J. Pharm. Sci. **57**, 504 (1968).
 [5] P. Cartwright *et al.*, IEEE Trans. Ind. Appl. IA-21, 541 (1985).
 [6] M. Glor, *Electrostatic Hazards in Powder Handling* (Research Studies Press Ltd. Taunton, England, 1988).
 [7] D.M. Harland and R.D. Lorenz, *SPACE SYSTEMS FAILURES* (Plaxis Publishing Ltd, 2005).
 [8] 尾前 宏：鹿児島県工業技術センター研究報告 **20**, 57 (2006).
 [9] P.E. Secker, J. Electrostat. **1**, 27 (1975).
 [10] E. Eisenmenger and M. Haardt, Solid State Commun. **41**, 917 (1982).
 [11] S.B. Lang, D.K. and Das-Gupta, J. Appl. Phys. **59**, 2151 (1986).
 [12] R.A. Anderson and S.R. Kurtz, J. Appl. Phys. **56**, 2856 (1984).
 [13] T. Maeno *et al.*, IEEE Trans. Electr. Insul. **23**, 433 (1988).
 [14] A. Sowinski *et al.*, J. Electrostat. **67**, 568 (2009).
 [15] 佐藤大知 他：Imaging Conference JAPAN (2014) p.255.
 [16] 菊永和也：コンバーテック **45**, 59 (2017).
 [17] 菊永和也 他：静電気学会講演論文集：静電気学会全国大会, 12pA-1 (2017).
 [18] K. Kikunaga, Sensors **21**, 4397 (2021).
 [19] T. Shimizu *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 090906 (2019).
 [20] 榊田 創 他：プラズマ照射処理装置, 特許第6074792号 (2014).
 [21] K. Kikunaga and N. Terasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 04FC 02 (2018).
 [22] A. Fatihou *et al.*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **23**, 2377 (2016).
 [23] M. Neaogoe *et al.*, J. Electrostat. **90**, 123 (2017).



きくなが かずや
菊 永和也

産業技術総合研究所 センシングシステム
 研究センター センサー情報実装研究チ
 ム 主任研究員, 博士 (工学). これまでに
 高温超伝導薄膜材料, フォトニクスデバイ
 ス, センサ・計測技術などの研究活動を行ってきた. 現在は
 電荷やエレクトレットを対象としたセンサ・システム・応用
 に関する研究開発に従事.