

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 19 日現在

機関番号：32690

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560283

研究課題名（和文） 接触分離過程における表面間電位差変化の直接測定

研究課題名（英文） Direct measurement of surface potential difference in a separation process after contact

研究代表者 松山 達 (MATSUYAMA TATSUSHI)

創価大学・工学部・教授

研究者番号：40247284

研究成果の概要（和文）：プラスチックフィルムと金属板を接触させ、これを分離・再接近させる際の、表面間電位差変化を直接計測する手法を開発した。接触時に発生する静電気（電荷）により、分離時には表面間電位差は増加するが、ある点で急峻な電位減少が発生することを実証した。即ちこれは、接触帯電量が、電荷移動メカニズムではなく、分離時に発生する放電に伴う電荷緩和メカニズムによって、その残留電荷として決定することを実証したものである。

研究成果の概要（英文）：A novel method was developed to measure the potential difference between a polymer film and metal plate in a separation and re-approach process after contact. The surface potential difference due to the charge generated by the contact increases in the separation process: it was demonstrated that a sudden decrease of the potential takes place at a point in the process. This a direct experimental proof of the fact that the amount of contact charge is determined as residual charge after a charge relaxation process due to gas discharge, not by charge transfer mechanism at the contact.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：静電気，摩擦帯電，ESD 障害，放電

## 1. 研究開始当初の背景

絶縁性材料の接触に伴って発生する静電気（帯電）は、いわゆる静電気障害・ESD 障害の原因であり、この現象の基礎的理解はプロセス障害を防止する立場から重要である。一方、粉体粒子の静電気現象を積極的に応用する立場からも、例えばコピー機における、トナー粒子の帯電設計の現場等において、粒子帯電機構の解明が極めて強く求められ

て来た。しかしながら、絶縁体と金属との接触の系に限ってみても、そもそも「電荷キャリアは電子かイオンか」といった非常に基本的な疑問からして、この問題についての長い学説史の中で未だに明らかな結論が得られていないのが現状である。ところで、接触帯電（摩擦帯電）は(1)2物体の接触に伴う界面での電荷移動から、(2)接触面の分離による電荷固定に至るプロセスによって発生する。但

し、この接触面の分離過程で表面間電位差が十分大きくなる場合には(3)表面間で気中放電が発生する可能性が考えられ、これにより電荷緩和が生ずるとすると、分離後に観測される(つまり実際の)帯電電荷量は、この緩和後の残留電荷であることになる。

報告者はこれまで長く、高分子性粒子が金属壁と接触・衝突する際に発生する静電気の量を実測する実験的研究と、この帯電機構を議論する理論的研究を展開して来た。これら一連の研究の成果として、通常の空气中で発生する粒子の衝突・接触帯電では、必ず上記(3)のプロセスが生じて、粒子帯電量はこの電荷緩和メカニズムによって決定されるとする理論を提案するに至った。しかしながら、これまでこの現象に対する直接実証実験は得られていなかった。

図1に「放電緩和モデル」の概念図を示す。(1)金属壁に接触した絶縁性表面は電荷を受け取り、(2)引き続いて接触面が分離される。(3)接触時に得た電荷に対応する表面電位差曲線は、やがて放電限界に到達し、(4)放電による電荷緩和が起こる。(5)「残留電荷による表面電位曲線」が放電限界曲線を下回る点で、放電緩和が終了し、この時点での残留電荷が、「発生電荷」として観測される。但しここで、電荷緩和による電位差の減少がどのような「経路」に従うのかは全く解っていない。放電限界曲線としては良く知られたPaschenの法則が(絶縁体表面からの放電発生においても)援用可能と仮定すると、この放電限界曲線の極小条件は、常圧常温の空気に対して、表面間ギャップ7  $\mu\text{m}$ 、放電開始電圧330 V程度である。

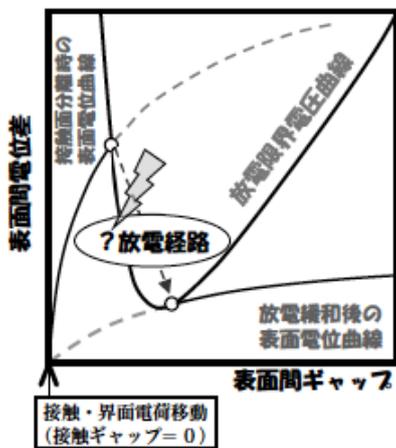


図1. 放電緩和概念図

従って、何らかの方法で、

(1) 接触ギャップを1  $\mu\text{m}$ 以下の精度で制御・計測しつつ、0~数十 $\mu\text{m}$ の範囲で変化させる。

(2) このときの表面間電位差の変化を、0~1 kV程度のレンジで計測する。

ことが実現できれば、「放電緩和の有無」の直接的証拠を提示し、更に、この放電経路についての詳細な情報を得ることができることになる。

## 2. 研究の目的

以上により、本研究は、超高入力インピーダンス・接触型表面電位計とピエゾドライブを用いて、全く新しく提案する実験系を構築することにより、この「接触面分離時の表面間電位差の変化」を計測し、電荷緩和の直接的証拠を示すことを目的とする。これは、上記のように接触帯電量を決定するのが電荷の「移動メカニズムなのか緩和メカニズムなのか」という2つの主要な対立する基礎理論についての、本研究分野で長らく続いて来た議論に終止符を打つ「学説選択(決定)実験」であるという点で、極めて重要である。

## 3. 研究の方法

図2に実験装置の概念図を示す。 $\Phi$  10 mmの円筒形ステンレスの片側断面にテフロンをコーティングした材料をサンプルとした。このサンプルヘッドの後ろから超高入力インピーダンス接触型表面電位計(トレック社製: Mode1820)を用いて、金属円筒部の電位を計測する。テフロンコーティング面を、鏡面仕上げしたステンレス板に接触させる。金属板はピエゾ駆動するステージに固定され、このステージの裏側から高精度静電変位センサを用いて変位を計測する。実験は接触状態から開始して、接触面を100  $\mu\text{m}$ 程度まで分離した後に再接近・再接触させるまでを1組として行った。

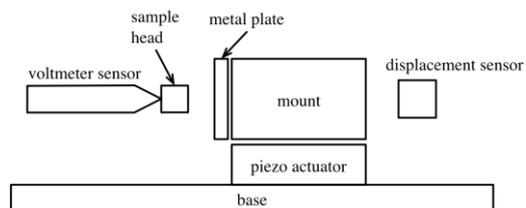


図2. 実験装置概念図

本測定系の等価回路を図3に示した。テフロン表面と金属板の間の電位差を $V_g$ とし、この空気ギャップの静電容量を $C_g$ 、テフロンフィルム(とサンプルヘッドの間の)の静電容量を $C_f$ とするが、実際にはサンプルヘッド側面に浮遊容量 $C_s$ が存在する。測定されるのはサンプルヘッドの電位 $V_m$ である。 $V_m$ とギャップ電位差 $V_g$ の間には、

$$V_g = kV_m, \quad k = 1 + C_s/C_f \quad (1)$$

の関係がある。後に述べる、今回の実験範囲では、直接測定値である  $V_m$  と、ギャップ電位差  $V_g$  の係数は  $k=1.05$  程度であり、当面、この誤差は大きくないものとして、 $V_m$  の値を用いて以下、評価するものとした。

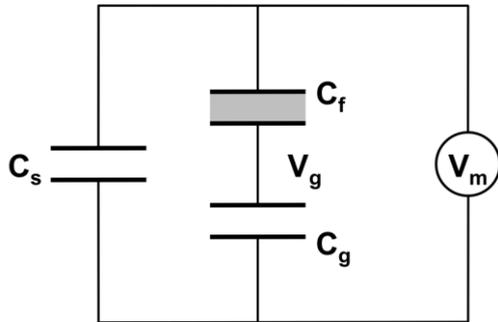


図3. 実験系等価回路図

#### 4. 研究成果

図4に、電荷固定条件下での電位曲線を示す。分離・再接近時の電位曲線が完全に一致し、電荷固定条件を満たしていることが解る。また、これにより、今回用いた表面電位計のドリフトが実験範囲では全くないことが確認できた。尚、電位曲線がこのギャップ範囲で直線にならないのは等価回路に於ける浮遊容量  $C_s$  の存在に依る。

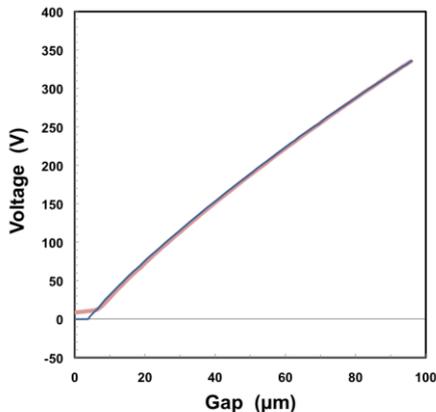


図4. 電荷固定条件下での電位差変化

ここで、 $C_s$  を定数と仮定した理論電位曲線を図4のデータにフィッティングした結果を図5に示す。理論曲線とデータ的一致は非常に良いので、ここでの仮定が成立していることが確認された。また、このフィッティングを用いて分離距離の零点バイアスを補正した。

実験方法の項でも述べたように、このフィッティングの結果から、式(1)の  $k$  の値は  $1.05$  程度と見積もられ、計測しているヘッド電位とギャップ電位はほぼ等しいことが解った。

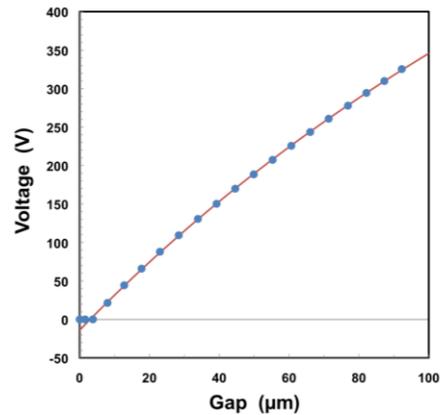


図5. 電荷固定条件下での理論フィッティング

図6～8に、放電緩和が観測された例を示す。分離時の電位立ち上がりの途中で、図6では1回、図7では2度の急峻な電位減少が認められ、放電緩和に依って電荷が部分的に緩和したことが解る。加えて、この緩和は全電荷が失われる完全緩和ではなく、一定量の電荷が緩和する部分緩和であったことが解る。また、最終的に残留した電荷に依る電位変化は、絶対値の変化はあるが、その残留電荷量に対応した、電荷固定条件に対応する電位変化に対応する形状をなし、ギャップ変化に伴う静電容量変化に対応した電位変化が健全に計測されていることが解る。また特に、分離終了から再接近に至る過程では分離部分と再接近の電位曲線は完全に一致しており、この点でも、この区間では電荷固定条件が成立していること、また、本計測の健全性が確認できる。従って以上により、接触面分離時に面間放電に依る部分的な電荷緩和が生じることが直接的に実証された。

一方、図8では、図6、7と異なっている種の「過剰緩和」が観察され、残留電荷量が他の結果に比べて小さくなっている。この観測結果は、電荷緩和後の最終残留量がどのように定まるのかを議論する際に、重要になるものと考えられる。

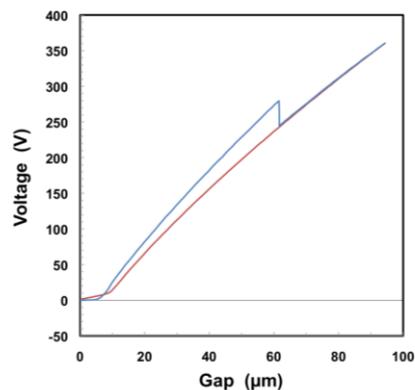


図5. 電荷緩和による電位変化

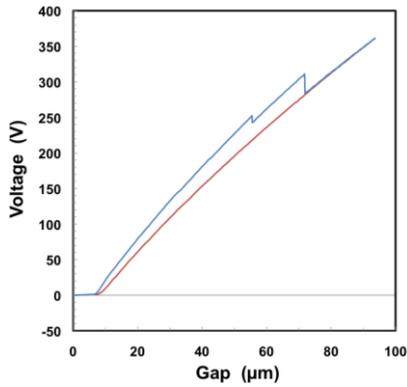


図 6. 2回の電荷緩和が生じた例

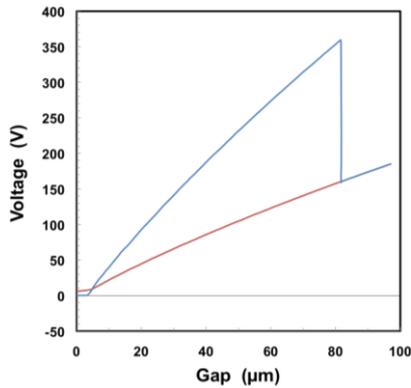


図 7. 過剰緩和の例

最後にいくつかの実験ランから得られた、これらの放電開始点と放電終了点を纏めた結果を図 8 に示した。個別実験ランではランダムに放電が生じているように見えたが、これらのデータを纏めると、一定の放電開始曲線が存在することが解る。但し、この放電開始曲線は、本系では放電開始曲線は一般的に空気放電限界を与えるものとして広く採用されているパッシェンカーブと比較して、随分下（低電位）の方に存在した。

本研究の範囲では、1種類のプラスチック材料を用いた実験までしか実現できなかったが、このようにして得られる、放電開始条件に材料依存性があることを示すことができたなら、材料ごとの静電気帯電特性を示す全く新しいパラメータが提案されることになり、この分野に於いて極めて重要な意味を持つ。

また、図 8 から解るように、ギャップの比較的小さい領域で発生した緩和については、放電終了点が放電開始点の「ほぼ直下」であったのに対して、ギャップの大きい領域ではある種の「過剰緩和」が観測され、放電終了点は、放電開始点よりもかなり下方に位置している。放電緩和による残留電荷として静電気帯電量が決定するとする帯電量決定モデルでは、当然のことながら、放電開始条件よ

りも、放電停止条件が、その最終的な帯電量を決定する点において重要である。従って、この過剰緩和メカニズムを含めた、放電終了点決定メカニズムに関する研究の展開が、今後重要になることが示された。

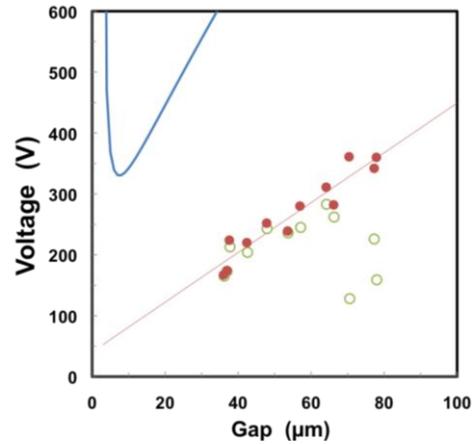


図 8. 放電開始・終了点

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

① Tatsushi Matsuyama, "Impact Charging of Single Particles", The 2013 Annual Meeting of the Electrostatics Society of America (招待講演), 2013 年 6 月 12 日, Cocoa Beach, FL, USA

② 松山達, 山本秀幸, 井田旬一, 山本英夫, 「接触帯電に於ける電荷緩和について」粉体工学学会 2013 年度春期研究発表会, 2013 年 5 月 22 日, 東京

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者:

松山 達

創価大学・工学部・教授

研究者番号: 40247284

(2) 研究分担者

なし