

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：84415

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700797

研究課題名(和文) 歩行に伴う人体帯電の予測を目的とした接触帯電特性を測定するシステムの開発

研究課題名(英文) Development of the system to measure the contact electrification properties for prediction about electrification of human body generated by walking

研究代表者

平井 学 (HIRAI, Manabu)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40530077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：接触と分離のみで発生する微少な電荷量を測定するための実験系を構築するため、真空吸着法の確立と高感度のファラデーケージの開発を行った。絶縁体同士で摩擦を極力抑制して接触させたところ接触帯電量は当初の予測よりも少なく測定感度以下という結果があった。従来、物と物とを接触させるだけで帯電するという説明が主流であったが、今回得られた成果ではその説明は必ずしも正しいとは言えない可能性を含んでいる。また、接触による電荷移動の駆動力を検討するため接触電位差測定装置を作製し、自動測定用のプログラムを開発した。

研究成果の概要(英文)：To build the experimental system to measure the amount of small electric charge which occurs with only contact and separation, a vacuum adsorption method and a sensitive Faraday cage have been developed. When triboelectrification between insulators was controlled as small as possible, the amount of contact electrification was less than the forecasting value, and several data could be smaller than this measurement sensitivity. It was considered that electric charge could transfer just by touching a thing to the other one in contact electrification, but this research shows that there is a possibility that the hypothesis is not correct in the insulators. To consider the driving force of electric charge movement by contact, a contact potential difference measuring apparatus has been made and a program for its automatic measurement has been developed.

研究分野：総合領域

キーワード：静電気 接触帯電 絶縁体 人体帯電

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 社会的背景

歩行によって人体が帯電し、電位が上昇することはよく知られている。人体の帯電は、それにより静電気放電 (ESD: Electrostatic Discharge) が発生し、ガソリンスタンドでは火災の、電子機器では誤動作や故障の原因となる。また、ESD 電撃ショックによる二次災害 (驚いて物を落とす、足を滑らすなど) も報告されている。このように人体の帯電の影響は広範囲に及ぶ。

### (2) 学術的背景

そもそもなぜ歩行によって人体は帯電するのか。この主な原因は、衣類と人体、衣類同士の摩擦ではなく、履物の底面と床面との間で発生する電荷であることが実験的に確かめられており、これまでに人体が帯電する過程を等価回路で説明しようという試みが行われてきた。しかし、因果律が破綻していたり、モデルが限定的であったり、ある特異な実験結果を説明するために考案したものであるにもかかわらず、正常な部分と特異な部分の言及すらできていない状況であった。さらに、いずれの試みも「上げた足の履物の底面に電荷がある」という仮定の根拠が十分に述べられていない。

このように、歩行によって生じる人体帯電現象のメカニズムは未だに十分に解明されていないのが現状である。

研究代表者は、これまでの研究から履物と床材の組み合わせや温湿度によって歩行時の人体電位が異なること、人体電位の大小関係を履物ごとに並び変えると、ほとんどの場合床材の順序が一致することに気づいた。これは、履物の底材と床材の組み合わせが人体電位に大きな影響を及ぼすことを示唆するものであり、履物の底材に使われる高分子材料の表面の電子状態と床材の表面の電子状態が重要な役割を演じている証拠とも考えられる。一般にこれらは高抵抗材料であるが、その表面の電子状態の研究が帯電機構の解明のために必要である。

しかし、表面の電子状態の理論的背景も現在のところないに等しいため、実験的な手段にたよってその実体を解明する必要がある。表面の電子状態に関する研究には光電子放出現象などを利用する測定法と接触電位差法が用いられるが、歩行時の人体電位との関係を明らかにするためには、履物と床材の間で移動する電荷量を実験的に求める必要がある。

静電気は接触と分離だけでも発生し、摩擦は接触の総面積を増やし、帯電量を増大させるものであるという説がある。電荷量測定には一般的にファラデーケージ法が用いられるが、既製品は試料を摩擦帯電させた後で測定する仕様・設計であるため、試料の帯電量が多くなり、ファラデーケージに投入するときに絶縁性のつまみ道具との間で発生する

帯電は無視できた。しかし、接触と分離のみで発生する微少な電荷量を測定するためには、同じ仕様・設計のファラデーケージでは精度も感度も不十分であった。

## 2. 研究の目的

接触と分離のみで発生する微少な電荷量を測定するための実験系を構築するため、真空吸着法の確立と高感度のファラデーケージの研究開発を進める。

また、接触による電荷移動の駆動力について検討するため接触電位差を測定する装置を作製する。

## 3. 研究の方法

### (1) 接触帯電量の測定

#### 真空吸着法の検討

試料同士の接触・分離方法として、真空吸着法の適用を検討する。試料同士を接触させるときに使用する絶縁性のつまみ道具等との間で発生する帯電を、除電器を用いて除去できるようにし、帯電しているか否かを、電界センサーを用いて判断する。

#### ファラデーケージの測定感度向上

当初、測定に必要な感度が不明であったため、既存のファラデーケージ (最小目盛 5500pC) で試験的に実験を行ったところ、最小目盛以下の目分量で読み取るような指示値であった。そのため、少なくとも 10 倍以上の感度向上を目指す。本研究では、ファラデーケージの形状変更による感度向上を目指す。

#### 接触帯電量の測定

真空吸着法とファラデーケージを組み合わせることにより、物質同士の接触のみで移動する電荷量が測定可能な実験系を構築し、プラスチック等の加工が比較的容易な絶縁材料の評価を行う。

なお、静電気測定は温湿度の影響が強いため、温湿度を制御した環境で測定を行う。

### (2) 接触電位差測定装置の製作

本研究で取り扱う試料は基本的に絶縁体であり、1 回あたりの測定時間が長くなるため、自動測定が不可欠である。そのため、本研究では、接触電位差測定装置の制御プログラムを開発する。製作にあたっては、絶縁性粉体の接触電位差測定用に開発された増田らの装置を参考にする。

## 4. 研究成果

### (1) 接触帯電量の測定

#### 真空吸着法

本研究で開発した真空吸着法は、大気圧と真空圧の圧力差を利用して、帯電量を測定したい物体に対して重力に逆らう方向の力を発生させて 2 物体を接触させるものであり、これによって、2 物体の接触面以外を満遍な

く除電することが可能となった。この有効性について紹介する。

実験室の温湿度を一定(20℃、20%RH)にして絶縁体試料を24時間以上調整した後、試料表面を電界センサーで観察すると、ところどころ電界が検知される。これは電界センサーで観察する前までに試料表面が摩擦等を受けることによって帯電し、それを観察していると解釈できる。その表面に対して除電器を用いて除電を行うと、保有している電界センサーでは電界が検知できないレベルまで除電することが可能である。そこで、接触させる絶縁体試料表面をそれぞれ入念に除電してから絶縁性のつまみ道具、素手等のいくつかの手段を使って試料を保持・接触させるのだが、今度は保持具等が分離した表面で弱い電界が検知されてしまう。すなわち、ファラデーケージ法によってこのまま電荷量を測定する場合、試料同士の接触帯電の他に保持具等との間の接触帯電が加算され、その比率もわからないため、結局、正味の帯電量がわからなくなってしまう。しかし、図1に示した手法を用いると、手も触れずに2物体の接触面以外を、電界が検知できないレベルまで満遍なく除電することができるようになった。(図1中S1とS2がここで言う2物体)そして、真空圧側を大気圧に戻すことで試料の一方(S2)を重力によって落下させ、ファラデーケージの内筒の中に直接入れることができるようになった。

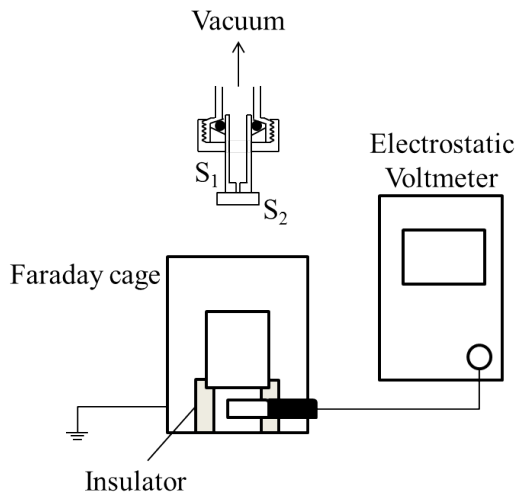


図1 真空吸着法を用いた電荷量測定の概念図

#### 作製したファラデーケージの概要

真空吸着法を利用した試料の接触方法と電荷量測定を両立させるため、図2に示すような上部を開いた二重のコップ形のファラデーケージを、アルミ合金を加工して作製した。ファラデーケージの外筒と内筒の間は、ポリ塩化ビニルを用いて絶縁した。また、外筒は接地し、内筒の電位を測定するため、振動容量型の電界プローブを、ファラデーケ

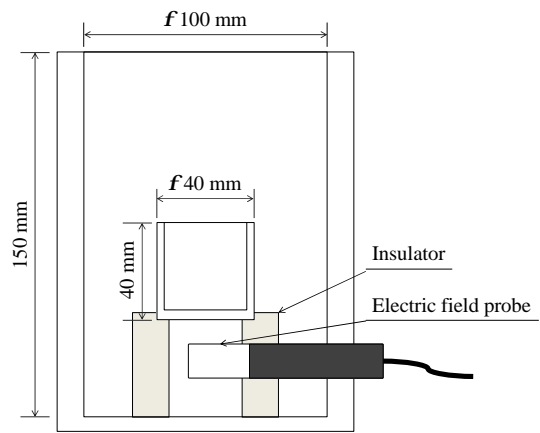


図2 作製したファラデーケージの概要

ジの外筒と絶縁材に穴を開けて挿入した。このファラデーケージの静電容量は10.7[pF]であった。

#### 電界プローブの校正

作製したファラデーケージの外筒と内筒の間に直流電源を用いて電位差  $V_A$  を与え、ファラデーケージに挿入した電界プローブと接続している計器(電位計)の指示値  $V_R$  との関係性を求めた。その結果、 $V_R = 1.20 V_A$  の関係が得られた(図3)。ここで述べた静電容量とこの関係式より、ファラデーケージの内筒に投入された物体の電荷量  $Q$  [pC] は、 $Q = 10.7 \times V_R / 1.20$  により求められる。なお、 $V_R$  の最小目盛が20[V]であるので、電荷量の最小目盛は178[pC]であり、既存のファラデーケージと比べて感度が約30倍向上できた。

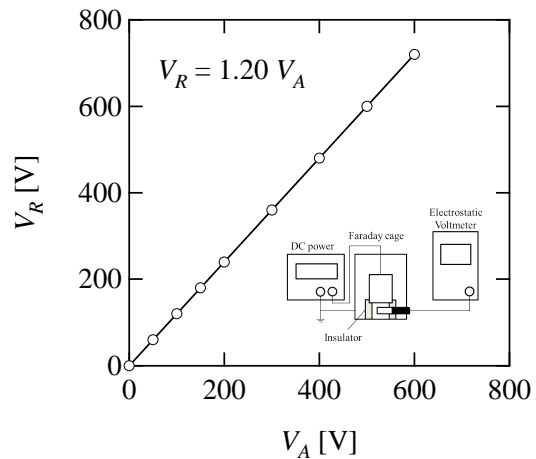


図3 ファラデーケージの外筒と内筒の間の印加電圧  $V_A$  と電界プローブと接続している計器の指示値  $V_R$  の関係

#### 接触帯電量の測定

上記 から 作製した実験装置を用いて、S1をポリ塩化ビニル(PVC)とし、S2をポリオキシメチレン(POM)、アクリル樹脂(PMMA)、ナイロン6(N6)、ABS樹脂(ABS)

の4種類として接触帯電量を測定した結果、0から714[pC]までの値が得られた。しかし、そのうち84%が最小目盛以下であり、次の2つ目の目盛までに全結果の96%が入った。個々に見ていくと、POMとPMMAは0から339[pC]、N6は36から714[pC]、ABSは18から179[pC]となっており、N6が若干大きな値を示しているものの、どの試料でも非常にバラツキが大きいことがわかる。また、帯電が確認できない結果が含まれていることもわかった。これは、従来、物と物とを接触させるだけで帯電するという説明が主流であったが、本研究で得られた結果では、その説明は必ずしも正しいとは言えない可能性を含んでいることを意味する。このようなバラツキやゼロ電荷の原因は明確ではないが、接触させるときに測定者が検知できないレベルで摩擦が生じているためか、接触面積が接触させるときに変わっているためではないかと考えられる。

本実験においてS1とS2のみかけの接触面積はおよそ341[mm<sup>2</sup>]であるが、この面積と空気中の絶縁限界から接触帯電量を予測すると9.2[nC]となり、測定結果と比べると数桁大きい。一方、圧縮強さから予測される接触面積の下限値は0.4[mm<sup>2</sup>]程度となる。同様にこの面積と空気中の絶縁限界から接触帯電量を予測するとおよそ11[pC]という値が得られる。しかし、この値は最小目盛以下を目分量で10分の1まで読みとった場合よりも少ない電荷量である。したがって、上述のゼロ電荷についても感度が不十分で実験的な追究が必要である。また、近年、電荷緩和説、すなわち、接触・分離後、パッシェンの法則によって放電が発生するため、電荷量は予測よりも少ない状態で観測されるという説が議論されているが、その説について言及するためにも、さらに測定感度を向上させる必要があることがわかった。

## (2) 接触電位差測定装置

粉体の接触電位差測定装置として、増田らによって開発された接触電位差測定装置は、ほぼそのまま粉体以外にも適用可能である。彼らの装置では温湿度制御機能も搭載されていたが、所属機関では温湿度制御できる実験室を利用できるため、装置の仕様を簡素化した。図4、図5、図6にそれぞれ作製した

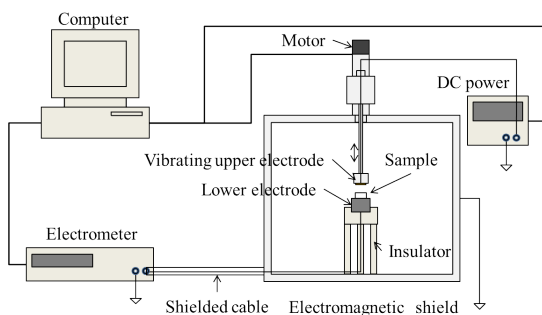


図4 接触電位差測定装置の概要



図5 接触電位差測定装置の自動測定用パラメータ設定ダイアログボックス

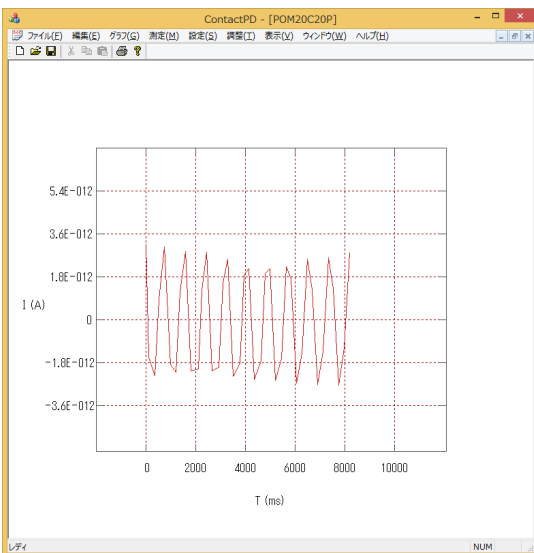


図6 測定画面の例: 上部電極に電圧を印加して振動させたときにエレクトロメータで読み取られた電流値の時間依存性

装置構成の概要、および自動測定用のパラメータ設定画面、測定画面の例を示す。この制御プログラムの開発により、図6に示すような電流波形の測定を、印加電圧を複数回かえて、なおかつ、ある一定時間を空けて繰り返し同じ測定が自動的にできるようにした。

なお、本研究期間中において測定数が十分に確保できなかったため、今後、継続して本装置で測定を行う予定である。

## <引用文献>

増田弘昭、板倉隆行、後藤邦彰、高橋 徹、手嶋 孝、種々の粉体における接触電位差の測定と評価、粉体工学会誌、30 巻、1993、854-859

T. Matsuyama and H. Yamamoto, Charge-relaxation process dominates contact charging of a particle in atmospheric condition: II. The general model, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.30, 1997, 2170-2175

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

平井 学、木村裕和、絶縁体同士の接触帯電量の測定、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

平井 学、木村裕和、絶縁体同士の接触帯電量の計測(第 2 報)、2015 年度(第 16 回)静電気学会春期講演会、2015 年 3 月 5 日、東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

平井 学、木村裕和、歩行帯電シミュレーションの現状、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 8 日、中部大学春日井キャンパス(愛知県・春日井市)

HIRAI Manabu、Contact Electrification between the Insulators when Friction was Lessened as Much as Possible at Their Contact and Separation、The 9th International Symposium on Non/Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy、2014 年 6 月 16 日、大連(中国)

平井 学、人体と静電気に関する考察、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 28 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

平井 学、絶縁体同士の接触帯電量の計測、2014 年度(第 15 回)静電気学会春期講演会、2014 年 3 月 5 日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都・目黒区)

平井 学、接触帯電特性測定装置の開発、地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所地方独立行政法人大阪市立工業研究所第 2 回合同研究発表会、2013 年 2 月 5 日、大阪府立産業技術総合研究所(大阪府・和泉市)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

平井 学 (HIRAI, Manabu)

地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：4 0 5 3 0 0 7 7