

論 文

非イオン系界面活性剤で処理した不織布の 新しい除電機能

村田 雄司*, 土井 正人**, 原田 英樹**

(1997年7月3日受理)

Charge-Eliminating Characteristics of Non-Woven Fabric Treated with Nonionic Surface Active Agent

Yuji MURATA,* Masato DOI** and Hideki HARADA**

(Received July 3, 1997)

The characteristic of newly developed Non-Woven Fabric with Charge Eliminating Function (NFCEF) was investigated. NFCEF is made of polypropylene single fiber of 20 μm diameter and treated with a nonionic surface active agent. When a charged substance is wrapped up in this fabric, the electrostatic charge on the surface of the substance is believed to be eliminated. Our experiment showed that electrostatic charge generated on the surface of a polymer was eliminated when the charged surface was brought close to the surface of NFCEF with a small air gap. It was also observed that, when NFCEF was in the electrostatic field, considerable electric current was emitted from the surface of NFCEF to the air. The current increases with increase of the field intensity and relative humidity of the experimental atmosphere. The current emission from NFCEF surface is considered to be due to weak discharge on the surface or direct charge emission from the surface.

1. 序

他の物体との接触や摩擦によって絶縁体表面に発生した静電気は、普通すこぶる安定であって、放置しておいてもなかなか自然には減衰しない。また、帯電部分が他の物体と接触しても、この電荷は容易なことでは移動しない。例えば帯電した絶縁体表面に接地した導体板を密着させても、その電荷量はほとんど変化しないことが知られている(静電気放電が起これば、話は別である)。このため、帯電体の電荷の除去には特別な方法を用いなければならない。現在おもに用いられている方法は、除電剤を使用し表面の電気伝導性を高めて電荷漏洩を促進する方法と、放電により発生するイオンによって中和する方法である。

このたび、帯電体を包んでいるとその電荷が比較的早い速度で減衰するという、新しいタイプの除電材料(出光石

キーワード: 除電、不織布、除電材料、電荷放出、表面抵抗

* 東京理科大学理工学部電気工学科 (278 野田市山崎 2641)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science & Technology, Science University of Tokyo, Yamazaki 2641, Noda, Chiba 278, Japan

** 出光石油化学株式会社 (108 東京都港区芝 5-6-1)
Idemitsu Petrochemical Co. Ltd., 5-6-1, Shiba, Minato-ku, Tokyo 108, Japan

油化学製、除電性不織布、NFCEF、Non-Woven Fabric with Charge Eliminating Function と称することにする)が作られた。これは少なくとも見かけ上、従来の除電に対する感覚をえるものであって、その除電のメカニズムは興味ある研究対象である。しかし静電気の測定には、データのばらつきだけでなく、測定法によっては意外な落とし穴があり、現象の確認は慎重を要する。

本研究は、除電性不織布について、実験面からその特異な除電機能の存在を確認するために行った。除電性不織布で帶電体を包むことによって帶電体が除電されるとすれば、本除電性不織布表面と帶電体表面との間で、両表面間のギャップを通して電荷が移動し、帶電体表面電荷を中和するメカニズムが考えられる。もちろん接触部分での電荷移動も考えられるが、前述のように帶電体表面が仮に導体に接触しても電荷移動がほとんど起こらないのであるから、この場合の電荷移動は空間を通して起こっているものと思われる。そこで、除電性不織布の表面に帶電体を接近させたときの、帶電体表面の電荷量の変化を観察するとともに、本除電性不織布表面が電界下に置かれたとき、その表面から空気ギャップを通して電流が流れるか否かを確認することを目的に実験を行った。

2. 試 料

測定に用いた除電性不織布は、厚さ 0.39 mm、纖維の太さ 20 μm 、1 m^2 当りの重量 50 g のポリプロピレン製で、見かけ体積に対するポリプロピレン部分の実体積の比率は約 14.2%である。除電性不織布はこの不織布を非イオン系界面活性剤で処理したものである。実験には、比較試料として界面活性剤処理をしないもの（ブランク試料）も使用した。

3. 実験装置および方法

3.1 除電機能の確認

摩擦帶電させたテフロン板表面に除電性不織布を接近させ、電荷量の変化を調べる実験を行った。概要は以下の通りである（図1）。

直径 80 mm の円板状に切り出した除電性不織布を直径 100 mm の接地した真鍮製円板表面に密着するように置き、その上方から摩擦帶電させた直径 30 mm のテフロン板を、お互いの面が平行で両表面の間隔が $d = 5 \text{ mm}$ になるように接近させ、10 秒間その状態を保ったのち遠ざける。この操作の前後で、テフロン板の電荷量に変化が起るか否かを測定した。テフロン板はテフロン製棒の先端に固定してある。電荷量の測定には、ファラデーケージを使用し、

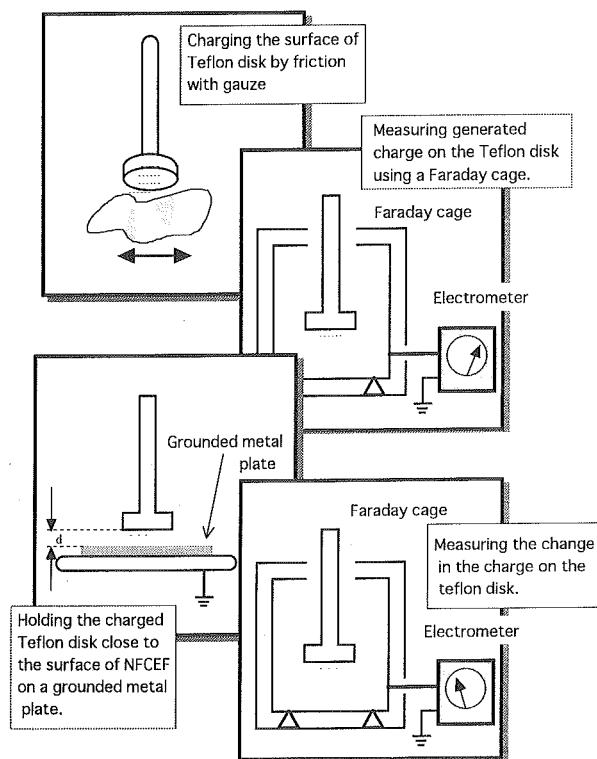


図 1 除電性不織布の除電機能を調べる実験方法

Fig. 1 Experimental procedure for investigating the charge eliminating characteristics of Non-Woven Fabric with Charge Eliminating Function (NFCEF).

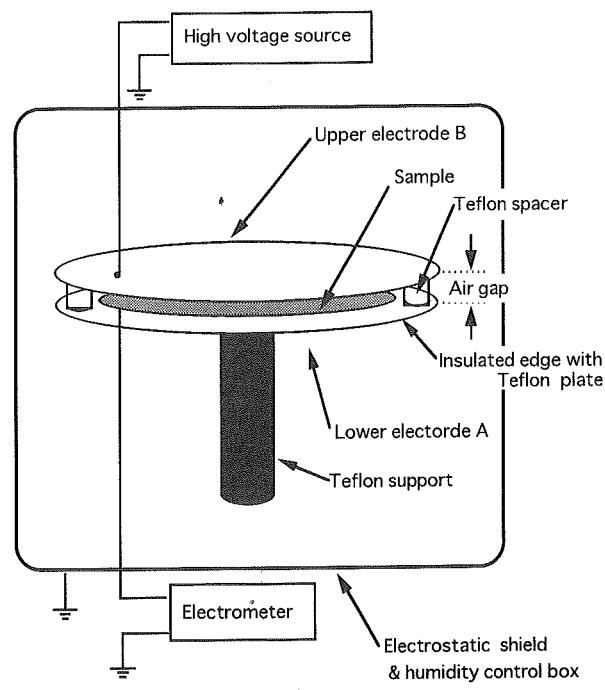


図 2 除電性不織布の表面から空気ギャップを通して
流れる漏洩電流の測定系

Fig. 2 System for measuring leak current from NFCEF surface through an air gap.

試料の帶電部分の面積で帶電量を除して電荷密度に換算した。

3.2 空気ギャップを通して流れる電流

除電性不織布が、帶電体に接触せずにその電荷を除去することができるとすれば、帶電体の電荷は帶電体が作り出す電界のもとに、帶電面と不織布の間の空気ギャップを通して漏洩するはずである。そこで図2に示す装置を製作し、この現象を確かめた。

除電性不織布を直径 160 mm の円板状に切り出し、直径 200 mm の金属（真鍮）製円板電極 A（下面電極）上にその中心を合わせて密着させて置く。A はテフロン柱によって水平に支えられている。A の上方に、A と平行でこれとは一定のギャップをおいて、同じ直径の金属円板電極 B（上面電極）がある。A, B のギャップは直径 10 mm のテフロン製スペーサ（支柱-丸棒）を円盤の周辺部に 3 個置くことによって維持されている。A をエレクトロメータの入力端子に接続し、B に直流高電圧電源の出力端子を接続する。金属円板 A, B の円周端部 10 mm は絶縁体で覆い、円板周辺部から放電が起こることを防いでいる。

装置全体は、静電シールド容器内に収め、同時に湿度制御もしている。測定時の気温は 24 ± 1°C、湿度は相対湿度約 40~90% の範囲で任意に設定した。

実験を開始するときは、高圧電源の電圧コントロールツ

まみをゆっくり回して電圧を徐々に上昇させ、あらかじめ定めた電圧に達したときに、両電極間に流れる電流をエレクトロメータを用いて測定した。

3.3 導電性の測定

試料を金属電極で挟み、電圧を印加して抵抗測定を行った。この測定には市販の抵抗測定箱（アドバンテスト製TR-42）を使用した。電極は直径50 mmの円板、ガード電極は内径70 mm、外径80 mmである。

4. 実験結果

4.1 除電機能

帯電体表面に除電性不織布を接近させたときの除電結果

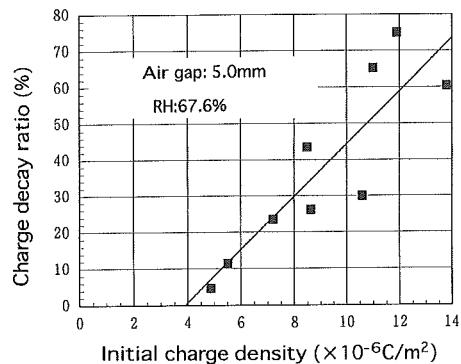


図 3 除電性不織布の除電機能
初期電荷密度と表面電荷の減衰率

Fig. 3 Charge eliminating characteristic of NFCEF.
Charge decay ratio vs. initial charge density.

を図3に示す。接近後の帶電体表面の電荷密度が接近前に比べて大きく減少していることがわかる。図の縦軸に示した減衰割合 R (%) は以下のように定義した。

$$R = (\sigma_i - \sigma_e) / \sigma_i \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここに σ_i は初期の電荷密度、 σ_e は除電された後の電荷密度で、帶電体を除電性不織布表面に接近させ、10 s その状態を保ったあとの帶電体の電荷密度である。

この図に示すデータから、除電性不織布には帶電体を接近させるだけで確かにその表面の電荷を減衰させる能力があることが確認できた。その能力は、ほぼ初期電荷密度に直線的に依存する。また除電能力は、帶電体の電荷密度が $4 \times 10^{-6} \text{ C}/\text{m}^2$ 以下ではほとんど認められない。しかし電荷密度が大きくなり、 $10^{-5} \text{ C}/\text{m}^2$ の程度になると 70~80% もの電荷を除去するようになる。ただしこの値は、帶電体表面の電界に依存すると考えられるから、帶電体の厚みや裏面を接地してあるか否かによって大きく変化するものと思われる。

比較のために、除電性不織布の代わりにブランク試料を用いた場合は、同じ実験で全く帶電体表面電荷の減衰を認めることはできなかった。

4.2 除電性不織布表面からの電流測定

図2に示す円板状電極A、Bの間隔を10 mmに設定し、電極Bに0~±7 kVまでの電圧を加えたところ、電極A上に密着させて置いた除電性不織布表面と電極Bとの間の空気ギャップを通して流れる電流を認めることができた。電

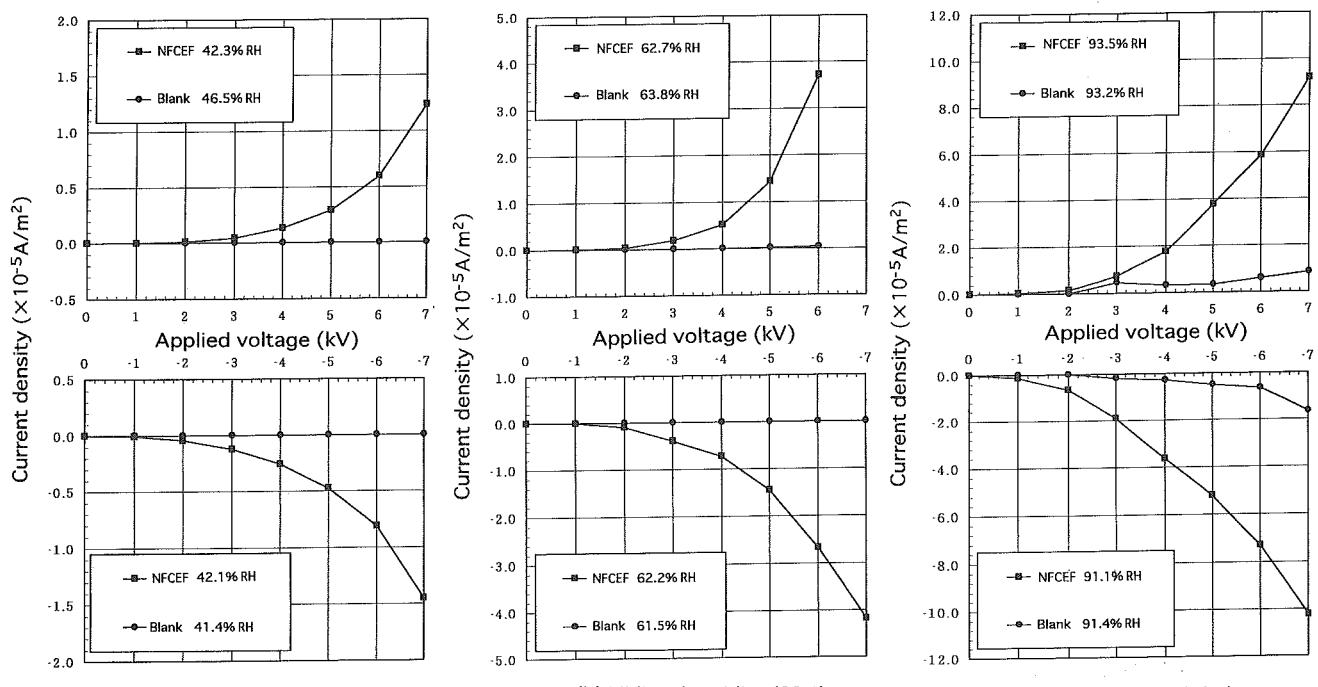


図 4 除電性不織布から空気ギャップを通して流れる電流

Fig. 4 The current from NFCEF surface through an air gap.

流は、印加電圧に対して2次関数的に増加するが、湿度に大きく影響を受け、湿度が高いほど多くなった。測定は湿度領域を40%台、60%台、90%台の三つに分けて行った。結果を図4に示す。

低湿度領域である40~47%RH近傍では、7kV印加時に除電性不織布の単位表面積(1m²)当たり10⁻⁵A台の電流が観測された(図4(a))。印加電圧の極性の効果はほとんど見られない。プランク試料の場合は、この電流の測定レンジでは電流はほぼ0である。

相対湿度60%近くの中湿度域では、-7kV印加時で低湿度の場合に比べて3倍程度の電流が流れている(図4(b))。低湿度領域と同様、印加電圧の極性効果はほとんど認められない。この湿度域でも、プランク試料の場合の電流はほとんど認められない。

相対湿度91~93%の高湿度領域では、7kV印加時に単位面積当たり最大10⁻⁴Aの程度の電流が測定できた。この湿度領域でも、印加電圧の正負の極性に対して電流密度の絶対値はあまり変化しなかった。プランク試料についても、この高湿度領域では、明らかに電流を認めることができた。その値は除電性不織布に比べて大略1桁低いものである。

電極A上に試料を置かない状態での電流は、高湿度・高

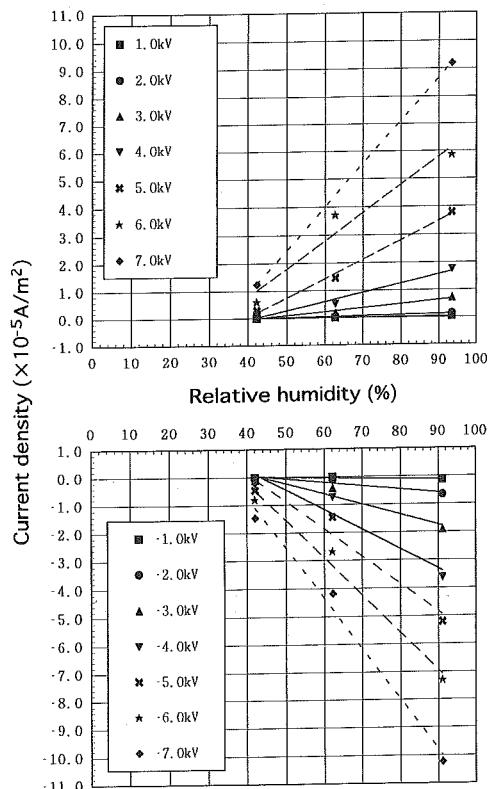


図5 除電性不織布から空気ギャップを通して流れる電流の湿度依存性

Fig. 5 Dependence of the current from NFCEF surface through an air gap on relative humidity.

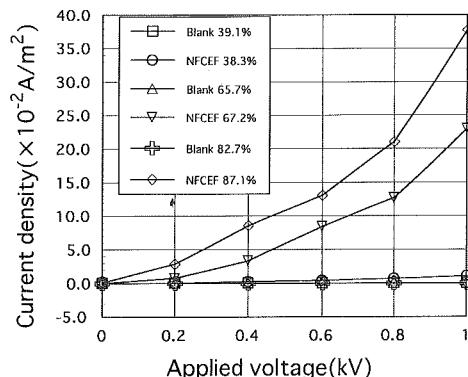


図6 除電性不織布を直接通して流れる電流
結果は電流密度で表している

Fig. 6 The current flew through NFCEF.
The result is shown in current density.

電圧印加の場合でも試料を置いた場合の電流に比べ少なくとも3桁以上は小さく、試料を置いた場合の電流に対して無視できる値であった。

図5に湿度変化に対する電流の変化の状態をまとめて示す。測定点が少ないため明確なことはいえないが、電流値は湿度の変化にほぼ比例する特性を示し、相対湿度約40%から90%までの変化に対して約1桁上昇することがわかった。

4.3 試料を直接流れる電流

図6に試料を直接通して流れる電流の測定結果を示す。相対湿度の上昇に伴って電流は増加し、最大1kVまでの印加電圧で、この測定の最大相対湿度である87.1%のとき、単位面積当たり10⁻²A台の電流が流れることがわかった。これは界面活性剤で処理した試料としてはかなり大きな電流密度であると思われる。この値は、4.2で示した空間を流れる電流に対して約3桁大きい。

5. 考 察

除電性不織布による除電現象が4.1に示した実験結果により確認できた。すなわち、除電性不織布は、帯電体表面に接近するだけで、接触することなくしてその電荷を除去することができる能力を有する。この除電現象は、4.2に述べた実験結果により、帯電体表面と除電性不織布表面との間の空気ギャップを通して電流が流れるために起こると考えて良いであろう。このギャップを通して流れる電流は、ギャップの電界と相対湿度に依存する。

空気ギャップを通して電流が流れる現象としては、まず気中放電現象が考えられる。除電性不織布は、直径20μmのポリプロピレン繊維できており、高湿度では界面活性剤が水分を吸着して電気伝導性が高くなっているため、特に繊維先端部など電界が集中する部分では弱い放電が起こることも考えられる。一般にコロナ放電では、電流が印加

電圧のほぼ2乗に比例することが知られている。図4でギャップ間を流れる電流が印加電圧に対して2次関数に近い形になっていることは、コロナ放電の発生を示唆するといえるかもしれない。

一方高湿度下では、放電開始電界強度よりかなり低い電界で物体表面から大気中への電荷放出現象が確認されている^{1,2)}。この現象は、広い意味での放電前駆現象といえるであろうが、帯電体の電荷を減衰させる一つの原因であることがわかっている¹⁾。この現象の確認実験は帯電体の材料としては金属を用いて行われ、放出電流はこの実験結果より小さい。しかし、除電性不織布は纖維で作られているため、表面での電界は全体が平面である場合より局所的には強くなる場合もあり得て、電流が大きい理由は説明できる可能性がある。

除電性不織布を電極で挟んで測定した電流は、除電処理したフィルムの抵抗測定などで得られる電流と比べると意外に大きい印象を受ける。この原因の少なくとも一つは、不織布の構造に由来するものと考えられる。面積1m²、厚さ0.39mmの不織布に含まれる纖維は、その実体積の比率(14.2%)と纖維の直径から計算すると長さ約1.76×10⁵mとなり、その表面積は11.08m²である。この薄い不織布にこれだけの面積の表面が含まれていることから、フィルムやシートの場合と比較すると、はるかに電気抵抗が小さくなることはうなずける。

物体の表面抵抗は次式で表される。

$$R_s = \rho_s d / l \quad (2)$$

ここに、 d は電流の流れる方向の長さ、 l は幅、 ρ_s は表面抵抗率である。不織布を電極で挟んだ場合、仮に電極の間隔に等しい長さを持つ多数の纖維が、電極に垂直になって電極間を橋渡していると仮定すると、電極間の抵抗値 R の計算では、電極間隔が上式の d で、 l は不織布の纖維の円周に纖維の本数を掛けた値になる。したがって、

$$R = \rho_s d / (2\pi r N) \quad (3)$$

ただし、 r は纖維の半径、 N は纖維の本数である。不織布の単位面積当たりでは、 $d = 0.39 \times 10^{-3}$ m、 $r = 1 \times 10^{-5}$ m、 $N = 1.76 \times 10^5 / 0.39 \times 10^{-3} = 4.52 \times 10^8$ 本/m²として計算すると、 $R = \rho_s \times 1.37 \times 10^{-8} \Omega$ となり、数値として表面抵抗率 ρ_s の約8桁も小さな値になる。

現実には纖維の並び方はランダムであるからこの値とはだいぶ異なるが、本研究に用いた界面活性剤処理の不織布の電気伝導は、見かけは体積伝導であるが、実は不織布の纖維の表面を伝わる表面伝導であって、見かけの容積に対して含まれる表面積が大きいため固形材料よりも抵抗値が小さくなり、本測定結果のように電圧印加時の電流が意外に大きくなることが説明できると考えられる。

表1 本実験に用いた非イオン系界面活性剤で処理したポリプロピレンフィルムの表面抵抗率

Table 1 Specific surface resistivity of polypropylene film treated with nonionic surface active agent used in the present experiment.

Relative humidity (%)	Specific surface resistivity (Ω)
50	5.01×10^9
70	1.95×10^9
90	3.59×10^8

表1に、本実験の不織布の処理に使用した非イオン系界面活性剤をポリプロピレンフィルムに塗布した場合の、表面抵抗率と相対湿度との関係を示す。湿度上昇とともに表面抵抗率の値は減少しているが、その値は相対湿度50%から90%の範囲で $10^9 \Omega$ から $10^8 \Omega$ の程度である。この値は通常の除電剤の特性の範囲内であって、このことから本実験で使用した非イオン系界面活性剤が、特別に低抵抗の処理ができる特性を持っているわけではないことが理解できる。

不織布の除電機能を確認した3.1の実験で、除電機能が認められた電荷密度 σ (約 4×10^{-6} C/m²)での絶縁体表面の電界強度 E は、 $E = \sigma / 2\epsilon_0 = 2.26 \times 10^5$ V/mである。

不織布内の充填率が14.2%であるから、不織布のポリプロピレン部分を片側の面に集めてしまうと考えると、その部分の厚さは $d' = 0.39 \times 10^{-3} \times 14.2 / 100 = 0.055 \times 10^{-3}$ mになる。そこで3.2の実験で、間隔10mmの電極間に不織布が入っている場合、 $d_1 = (10 - 0.055) \times 10^{-3}$ の空間の電界を E_1 、ポリプロピレン部分(厚さ $d_2 = d'$)の電界を E_2 とすると、

$$E_1 d_1 + E_2 d_2 = V \quad (4)$$

ここで V は電極間の印加電圧である。ポリプロピレンの比誘電率を $\epsilon_s (= 2.2)$ とすると $E_2 = E_1 / \epsilon_s$ であり、また E_1 として前述の帯電絶縁体表面の電界強度である 2.26×10^5 V/mを仮定すると、 V は2.25kVになる。これは図4で電流が立ち上がりを見せる印加電圧に大略等しい。

この計算には、ポリプロピレンが纖維であることを入れていない。纖維先端部では電界強度が高くなることが考えられるが、ポリプロピレンの比誘電率が低いため、このような考慮を入れずに概略の試算をした。

現状では、そのメカニズムに結論を出すことはできないが、本除電性不織布が帯電体を包むことによって除電できるという新しい除電機能を持っていることが判明した。もちろん除電性不織布が帯電体を包んでいる際には、両者の表面には常に一定のギャップが維持されているわけではなく、当然接触している部分が存在する。本実験ではこの接触部分で電荷を除去する現象が起こっているかどうかにつ

いての実験は行っていない。しかし、除電性不織布は纖維でできているため、その表面が帶電体である固体の表面と接触していても、接触していない纖維部分が存在する。その部分の纖維については、本実験で確認した現象が起こるはずであり、結果として見かけ上接觸していても除電機能が維持できるものと考えられる。

6. 結論

非イオン系界面活性剤で処理した除電性不織布は、帶電体を包んでおくだけで除電作用を示す。この原因は、帶電荷が作り出す電界下で除電性不織布表面と帶電体表面と

の間に、空気ギャップを挟んで電流が流れるためであることがわかった。このギャップを挟んで電流が流れる機構については現在は結論を出すことはできないが、弱い放電によるものか、あるいは表面からの直接の電荷放出によるものと考えられる。

参考文献

- 1) Y. Tada and Y. Murata : Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 1926
- 2) 御所康七：電学誌, **94A** (1974) 38