

## 論 文

# ポリプロピレンと水銀との 接触帶電に及ぼす表面粗さの影響

堀 靖郎\*, 1, 斎藤 勝男\*

(1999年7月19日受付, 1999年12月2日受理)

Effect of the Surface Roughness  
on Contact Charging of Polypropylene with Mercury

Yasuro HORI\*, 1 and Katuo SAITO\*

(Received July 19, 1999; Accepted December 2, 1999)

The effect of the surface roughness on the contact charging of polypropylene with mercury has been studied by measuring the two-dimensional surface charge distribution. For each sample film, one half of its area was made rough by sandpaper, and the other half was left untreated. These two portions were charged by contacting them simultaneously with mercury, and the two-dimensional surface charge distribution was measured over the entire sample. Our observations show that the behavior of the contact charging clearly depends on physical roughness. The charge density on rough surface was lower than that on smooth surface. Moreover, when the surface was made exceedingly rough, no contact charging occurred.

## 1. はじめに

高分子表面への静電気の帶電現象及びその静電気の減衰に関して、多くの研究があるにもかかわらず、定量的には未だ殆どなにも解明されていないようと思われる。この大きな原因には、実験の定量的な再現性のなさにあるのは自明であると思われる。

例えば、同一の金属と同一の高分子の接触帶電を測定しても、帶電量が1回1回大きく違うことはよく経験することである。悪いことにこの違いの原因は解明されておらず、定量的に同じ測定値をいつも出すことは殆ど不可能なことである。Lowell and Akandeは、実験の定量的再現性の無さを逆手にとり、帶電量データのばらつき度合いこそが、表面の性質を反映しているとまで主張して

いる<sup>1)</sup>。

もし、ある表面状態の違いが帶電現象に与える影響が小さければ、その関係を定量的に調べることは困難であるばかりでなく、表面状態の違いの影響が有るか無いかさえ結論づけることは殆ど不可能であろう。しかし、もし同一表面上に、違う表面状態を作り出し、その2領域を同時に帶電させ、2次元分布測定によりその両方の帶電状態を同時に観測することができれば、表面状態と帶電現象の関係を明らかにできそうである。この考えに基づいて、我々は2次元帶電分布測定装置を作製し<sup>2, 3)</sup>、ポリプロピレンと水銀の接触帶電に及ぼす表面粗さの影響を調べた。予備的な結果は、既に学会発表した<sup>4)</sup>。

高分子と金属との接触帶電の実験で、固体金属を用いると、見かけの接触面積と真の接触面積が一致しないことは良く知られている<sup>5)</sup>。一方金属として液体である水銀を用いると、表面があまり粗くなければ、真の接触面積と見かけの接触面積が一致し、繰り返し帶電によっても帶電量が増加しないことが報告されている<sup>6)</sup>。

水銀を用いる場合でも、表面が非常に粗くなると高分子と水銀が完全に接触しているとは言えなくなるであろう。故に接触帶電実験で、用いる高分子試料の表面の粗さの程度によって実験値がばらつくのは当然である。こ

**キーワード**：高分子表面、接触帶電、表面粗さ、  
帶電の2次元分布、ポリプロピレン

\*名古屋工業大学電気情報工学科 (466-8555 名古屋市  
昭和区御器所町)

Department of Electrical and Computer Engineering,  
Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa,  
Nagoya 466-8555, Japan

<sup>1)</sup> hori@elcom.nitech.ac.jp

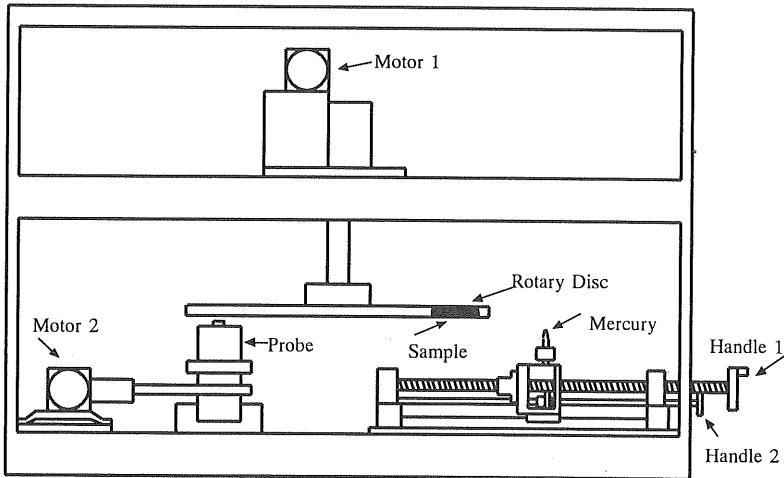


図1 回転円盤型2次元帶電分布測定装置の側面図

Fig.1 Schematic illustration of an apparatus of measuring the two-dimensional distribution of surface charges.

のように、水銀と高分子との接触面積の関係は未だ明らかにされているとは言えない。我々は高分子表面にヤスリによって凹凸を付けた場合に、表面の凹凸度合いが水銀との接触帶電に与える影響を調べた。

実験に際しては同一試料の半分の領域をマスキングし未処理部とし、残り半分をヤスリ処理して処理部とした。両者の領域を同時に帶電し、全領域を2次元帶電分布測定した。この方法により、全体の帶電は僅かな実験条件の違いにより1回1回ばらつくにも関わらず、処理領域と未処理領域の差は他の実験条件に左右されずにはっきりと観測できた。水銀接触後の帶電測定には、すでに報告した回転円盤型2次元帶電分布測定装置を用いた<sup>2)</sup>。

## 2. 実験

### 2.1 2次元帶電分布測定装置

図1に本実験で用いた自作の回転円盤型2次元帶電分布装置<sup>2)</sup>の概念図を示す。以下簡単に装置と実験手順について説明する。装置全体は0.6 m (W) × 0.5 m (D) × 0.5 m (H)の箱に入っており、箱の中は湿度調整が出来るようにしてある。測定温度は室温を調節すること一定に保っている。

高分子試料(3 cm × 3 cm)は回転円盤の下面に取り付けられている。箱の外からハンドル1を用いて水銀を所定の位置に持っていく、ハンドル2で水銀を上下させ接触帶電を行う。同時に、1 nFのコンデンサでアースに接続した水銀の電位を測定することにより、水銀の電荷量(=高分子上の電荷の総量)を測定している。

高分子表面の静電荷測定は、回転円盤の下にあるプローブにより、誘導起電力を測定することにより行う。2

次元測定のため、回転1周の測定で、円弧状の1次元帶電分布の測定を行い、プローブを左右に動かし繰り返し測定することにより扇形の帶電分布測定を行う。この扇形の分布を内挿法により、直交座標系の格子点上の電荷量に変換し、2次元帶電分布を表現している。

尚、接触帶電時の水銀の上下移動は手動で行っている。その他の水銀の帶電量の測定・円盤の回転・プローブの移動・誘導起電力の測定・記録は、オンラインにつないだパソコンで行っている。

### 2.2 凹凸を付けたポリプロピレンフィルム試料

本研究で用いた試料フィルムは、粒状のポリプロピレン(三菱油化製ノーブレン MA4)を真空ホットプレス法により作製した。フィルム厚は約0.6 mmであった。

このフィルムを3 cm × 3 cmに切り、測定試料とした。この測定試料の表面の半分をマスキングし未処理部とし、残りの半分をヤスリ処理した。ヤスリ処理の方法は、紙ヤスリまたはフィルムヤスリ(3M社製)を用いて、手で軽く2分間摩擦した。同一試料に処理領域と未処理領域を設けることでその差が明確に測定されることを期待している。ヤスリは、500番～10000番までを用い、全部で9種類の試料を用意した。詳しくは、500番(研磨剤の粒度=3.4 μm相当、紙)、1000番(1.5 μm相当、紙、フィルム)、2000番(0.9 μm相当、紙)、3000番(0.5 μm相当、紙)、4000番(0.3 μm相当、紙、フィルム)、8000番(0.1 μm相当、フィルム)、10000番(0.05 μm相当、フィルム)の9種類のヤスリを用いて表面処理をした。

上記ポリプロピレンフィルムへの直接ヤスリ掛けでは、

ヤスリ掛けによる酸素等との化学反応の影響も考えられる。そこで比較のために、テンプレートを用いて凹凸を付けた試料も準備した。フィルム作製の真空ホットプレスの時に、ポリプロピレンの上下をアルミフィルムで挟むが、このアルミフィルムにヤスリ掛けをして凹凸を付け、テンプレートとした。用いたヤスリは、1000番と8000番の2種類である。

各試料の凹凸の程度を、触針式粗さ計（TALYSURF 10 RANK TAYLOR HOBSON）で測定した。

### 2.3 帯電分布の測定

表面の半分に凹凸を付けたポリプロピレンフィルム試料を、処理部と未処理部の境界線を中心として直径5mmの水銀により接触帯電させた。処理部・未処理部の帯電領域（各々半径2.5mmの半円状）を2次元分布測定により同時観察した。用いた試料は、直接ヤスリ掛け試料9種類とテンプレートにより凹凸を付けた2種類の試料である。実験は温度20°C、湿度40%の条件下行った。

実際の測定では、最初に試料の残留電荷を取り除くためにアセトンを含ませたガーゼで軽く試料を拭い、2次元測定で電荷が残っていないことを確認した。その後15分間静置し乾燥させた。そして、水銀との接触帯電を行い、2次元表面電荷分布測定を行った。

又、繰り返し帯電実験も行った。上記の接触帯電・2次元測定の後、同じ所を前の帯電電荷を残したまま、もう一度接触帯電・2次元測定を繰り返す方法である。この繰り返しは10回目まで行った。1000番と4000番の紙ヤスリで直接ヤスリ掛けをした、2種類の試料についてこの繰り返し帯電実験を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 ポリプロピレン表面の凹凸の程度

各試料の触針式粗さ計による測定結果を図2に示す。図2で左側が処理部、右側が未処理部である。500番では3~4μm、1000番では1~2μmの深さの凹凸が処理部に有るのがはっきりと分かる。2000番（9μm相当）では、凹凸が確認できなかった。これは粗さ計の探針直径が5μmで、分解能を越えているためだと思われる。これ以上細かいヤスリで処理した試料でも同様に、触針式粗さ計では凹凸が確認できなかった。

2000番以降の粗さの程度はルーベ（10×）で観察した。500番のヤスリで処理したポリプロピレン試料の粗い凹凸から、4000番の細かい凹凸まで、処理部の凹凸は定性的にヤスリの研磨剤粒度の順に小さくなっていた。又、8000番と10000番の試料では、

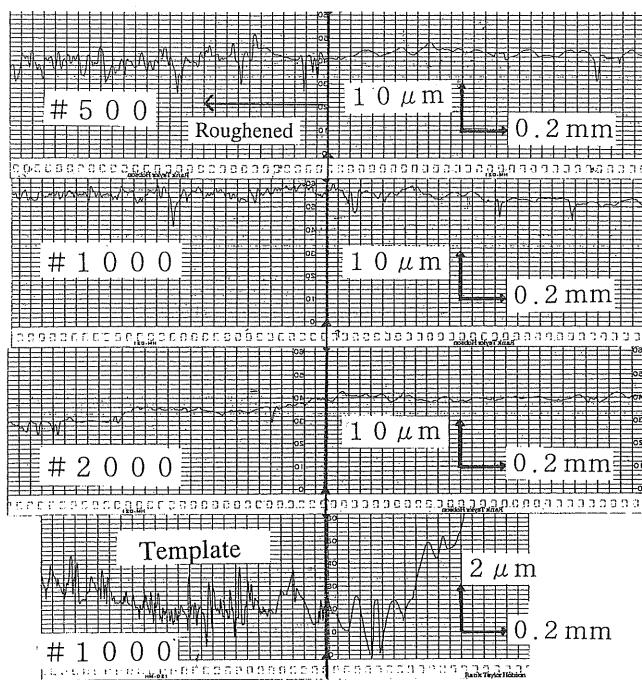


図2 ポリプロピレンフィルム表面の粗さ

Fig.2 Surface roughness of the polypropylene film.

凹凸が小さすぎて観察出来ず、2つの処理の違いの確認はできなかった。

テンプレート（1000番）を用いて作製したポリプロピレンフィルムの凹凸は、図2の1番下（注意：この図だけ縦軸感度5倍である。又、右の方で大きく上に行っているのは試料の滑らかなうねりであり凹凸ではない）に示すように、深さ1~2μmの凹凸がある。テンプレートを用いて作製した試料の凹凸は、直接ヤスリ処理した試料の粗さと同程度であることを示している。

図2でも見ることが出来るように、各試料とも未処理部と処理部分にわたって、所々ではっきりとした凹凸（深さ5μm程度）が観測された。これはヤスリ処理によってではなく、フィルム作成時にできた凹凸である。この凹凸の接触帯電への影響についても後に言及する。

### 3.2 表面粗さと帯電分布

ポリプロピレンフィルム表面の凹凸の違いによる、水銀との接触帯電後の2次元帯電分布の測定結果の代表例を図3に示す。試料表面の帯電は全て負（マイナス）電荷であった。図3の左列は帯電分布の3次元表現（マイナス電荷密度を上方にとっている）、右側は等高線図である。図3の各図中の一点鎖線より左半分がヤスリ処理した部分で、右半分は未処理部分である。

図3(a)に見るように、1000番で処理した部分は、全くと言ってよいほど帯電していないことが分かる。図

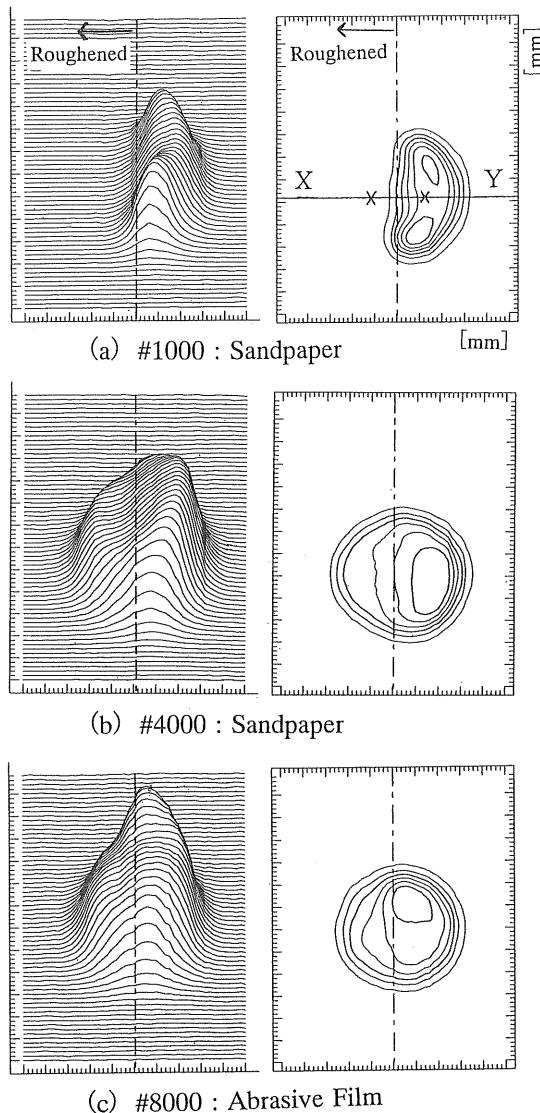


図3 水銀接触後の帶電分布の表面粗さ依存性

Fig.3 Roughness dependency of the surface charges.

The minimum scale in the figure is 0.2mm.

3 (b) の 4 0 0 0 番で処理した部分の帶電密度は未処理部分の帶電密度の約 50 %, (c) の 8 0 0 0 番では処理部の帶電密度は未処理部の約 70 % であった。

この図 3 (b) (c) に見るように、処理した部分が未処理部より帶電量が少ない、それもごく僅かに少ないとが確定できるのは、本研究で採用している処理部・未処理部を同時に帶電し、2次元観測で同時に観察できたからである。もし試料全体を処理し、処理部だけを観測する従来の方法を採用していたなら、50 % の帶電であっても、1回1回の実験値のばらつきの中に隠れてしまい、処理の効果で帶電量が減少したとは確定できないであろう。我々は本研究の同時観察により、ルーペで観察出来なかつた程の僅かな凹凸の 8 0 0 0 番ヤスリでの処理部でも、未処理部より帶電が少ないことを確定できた。つ

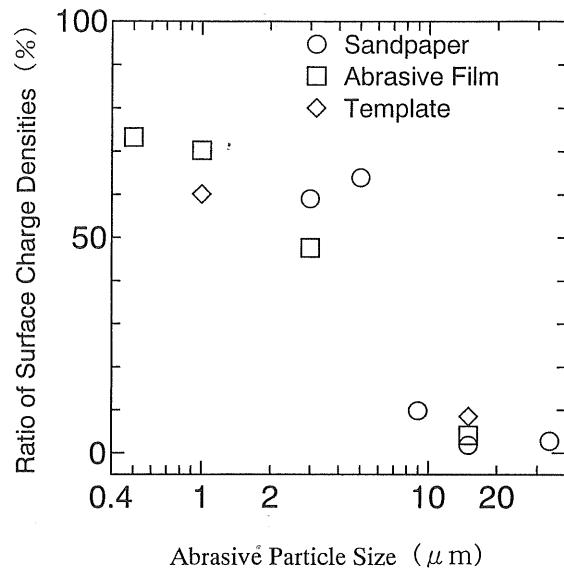


図4 帯電密度比の研磨剤粒度依存性

Fig.4 Change of the charge density ratio with the surface roughness represented by the abrasive particle size.

まり、何度も同じように帯電・2次元観測をしても、いつも図 3 (c) に見るように未処理部より処理部の方が帶電が少ないとが確認出来た。

表面粗さに対する帶電密度の依存性、表面処理の方法に対する帶電密度の違いを簡便に比較するために、「帶電密度比」を定義する。帶電密度比 = (処理部の帶電密度) / (未処理部の帶電密度)。ここでは、各々の帶電密度として、表面電荷の中心付近の直線上の処理・未処理境界線から 1.2 mm 位置 (処理部・未処理部の半円形の帶電領域の中心。例: 図 3 (a) 右図の直線 XY 上の x 印の 2 点) の電荷密度を代表として採用した。

図 4 にこの帶電密度比を、表面処理をしたヤスリの粒度の関数としてプロットした。この図は、水銀による接觸帶電が表面粗さに大きく依存していることをよく示している。2 0 0 0 番以下 (研磨剤粒度 9  $\mu\text{m}$  以上) の粗さのヤスリで処理をしたポリプロピレン表面には、殆ど帶電しないことが解る。それ以上細かいヤスリ処理では、帶電密度は表面の滑らかさの度合いに応じて増えていくよう見える。

しかし、3 0 0 0 番ヤスリ (5  $\mu\text{m}$ ) で処理した試料の帶電量は 4 0 0 0 番よりも多く、1 0 0 0 0 番ヤスリ (0.5  $\mu\text{m}$ ) の結果は帶電量が少なすぎるよう見える。3 0 0 0 番ヤスリの結果は、ヤスリ処理による定量的な凹凸の付け方の困難さを示している。この試料では 4 0 0 0 番ヤスリ処理よりも大きな凹凸がついてしまったのであろう。一方 1 0 0 0 0 番ヤスリの結果は、3 次元表現

で見たときには境界線での帶電密度の違いがはっきりせず、処理効果があるのかないのかは確定出来ない程であるが、帶電密度比は73%と小さく出てしまった。帶電密度比法の限界なのであろう。

尚、同じ研磨剤粒度の時の凹凸の付け方の違いによる帶電密度の大きさの違いは、実験誤差内であると言える。つまり、ヤスリの違い（紙ヤスリ、フィルムヤスリ）や、直接ヤスリ掛けとテンプレートを使った凹凸の作製法の違いによる帶電密度の依存性は観測されていない。結論として、水銀による接触帶電の帶電密度は表面粗さに大きく依存していることが、確定した。

### 3.3 繰り返し接触帶電

表面の半分を4000番（紙ヤスリ）で処理を施したポリプロピレン試料への水銀による繰り返し接触帶電の実験結果を図5に示す。尚、ポリプロピレンフィルムの表面に帶電した電荷は、長時間にわたり殆ど減衰しないことが分かっている。

未処理の部分は最初の帶電から10回目までの帶電まで、帶電は殆ど一定である。これは最初の接触帶電から水銀と高分子が完全に接触し、いつも真の接触面積が同じであることを示している。このことは又、未処理部でも前にも言及したように凹凸が存在するが、この凹凸は大きな影響を及ぼさないことを示している。

それに反して、ヤスリ処理をした部分では、1回目から順に帶電量が増え、繰り返し帶電の回数が増えるにつれて帶電量が飽和値に近づいている。これは凹凸のある面では、金属に液体である水銀を使おうとも、接触面積及び接触面がその時そので違っていることを示している。勿論新たに接触した面の分だけ帶電量が増えていくのである。

1000番ヤスリで処理をした試料での同じ実験では、処理部分では10回の接触後も全く帶電しなかった。

### 4. 結論

同一ポリプロピレン試料に、ヤスリ処理等で凹凸を付けて表面を粗くした処理部分と未処理部分を設け、水銀で同時に接触帶電し、2次元分布測定することにより処理部・未処理部の差、処理効果を明瞭に観測できた。粗い表面は滑らかな面よりも、接触帶電量が少ない。これは高分子と水銀との接触面積の違いによるものである。

しかし、1000番等の粗いヤスリで処理した部分は帶電による電荷が全く観測されなかった。この時の真の接触面積がゼロであるとは思われず、他の原因も存在すると思われる。

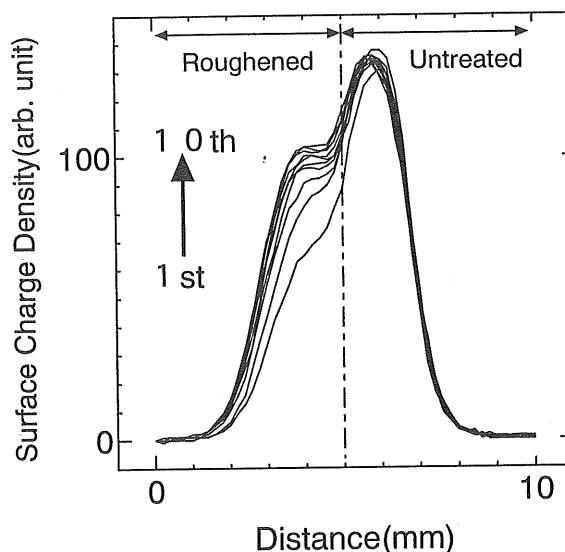


図5 繰り返し接触帶電時の1次元帶電分布の変化

Fig.5 Center-line profiles of charge distribution on PP surface after series of contact charging by mercury.

### 5. おわりに

現在、より定量的な粗さの表面の実験をすべく、定量的に凹凸を付けたテンプレートを作製し、本研究と同様の実験を計画している。

又、表面処理部と未処理部を同一表面に設けて、2次元表面電荷分布測定するのが処理効果を測定するのに有効と証明されたので、他の表面改質法で処理し、接触帶電への影響・表面電荷減衰の違い等を調べる予定である。

試料の表面粗さ測定にご協力いただいた本学機械工学科の馬淵英二氏、加藤千代一氏に深く感謝いたします。本研究は一部文部省科学研究費の援助を受けました。

### 参考文献

- 1) J. Lowell and A. R. Akande : J. Phys. D: Appl. Phys., **21** (1988) 125
- 2) 堀 靖郎：静電気学会講演論文集 '95, p.95, 静電気学会(1995)
- 3) 堀 靖郎, 地家秀晃, 彦坂修一, 岩井 良 : 静電気学会講演論文集 '96, p.245, 静電気学会(1996)
- 4) 斎藤勝男, 堀 靖郎 : 静電気学会講演論文集 '97, p.75, 静電気学会(1997)
- 5) 村田雄司 : 表面・高分子と静電気, p.53, 共立出版(1988)
- 6) K. P. Homewood, J. Lowell and R. M. Riley : J. Phys. E: Sci. Instrum., **18** (1985) 846