

# 帯電現象と材料表面

村田 雄司\*

\*東京理科大学 理工学部 (〒378-8510 千葉県野田市山崎 2641 番)

## Electrostatic Phenomena and Material Surface

Yuji MURATA\*

\*Faculty of Science and Engineering, Tokyo University of Science (2641, Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510)

**Key Words** : Electrostatic Phenomena, Contact Charging, Frictional Charging, Plasma Treatment

### 1. 序

「静電気」……というだけでも知っている言葉、しかしこの言葉の内容を深く知っている人は意外に少ない。静電気現象は、実は大気汚染の防止や車の塗装、コピーやプリンタなどの原理として大活躍しているし、また半導体製品や液晶パネルなどの製品品質を左右する深刻な生産障害の原因になっていることも、関係者以外には案外知られていない。静電気は、物体のサイズが小さくなるとその影響度が大きくなり、微細な粒子、特にナノスケールの粒子では特に大きな効果を持つようになる。これは、「表面積/質量」の比が大きくなるため、ナノテクノロジーの進化は静電気への考慮無しでは語れなくなるであろう。

静電気は一般に材料表面に発生する。材料が体積的に静電気を持つこともあるが、多くの場合、静電気は表面現象である。そこでここでは、静電気と材料表面と題して、静電気発生現象およびその機構、表面の性質を変えることによる静電気発生特性の変化、また静電気の障害を無くすための表面処理などについて概要を述べさせていただく。

### 2. 静電気発生の原因と特性

#### 2.1 静電気現象の概要

静電気とは、通常の電気とは違って流れない電気を言う。普通の物体は正負の電気をほぼ等量持っていて電気的には中性になっているが、静電気を帯びた物体は正負のどちらかの電気が過剰になっており、しかもこの状態が長く保たれている。電気という言葉はさまざまな事象の総称であって、「物体が持つ電気」というような表現をする場合には「電荷」という言葉を使う。

電流を流さない物体、すなわち絶縁体は他の物体とちょっと接触しただけですぐ過剰の電荷を持つ。一方の物体表面から接触中に正極性あるいは負極性の電荷が相手表面に移動してしまうからである。

絶縁体は天然には宝石類がその代表で、あと硫黄や雲母など比較的種類が限られる。しかし、人工のものでは高分子材料(合成有機高分子材料、通称プラスチックと言われている

材料)が代表で、身の回りに山ほどある。この材料はそのほとんどが極めて高度な絶縁性を持っているため、表面に発生した電荷はなかなか移動せず、長い間静電気を持った状態を維持する性質を持つ。

金属のような導体は、電荷を与えてもすぐ逃げてしまっ、静電気でも帯電するようにはならないと思われている。しかし、金属でも周囲から何らかの方法で電氣的に絶縁されていると電荷の逃げ場が無くなるから、静電気を持つ状態になる。ちょうど導体が電荷を溜める容器になっていると思えば良い。容器の中では電荷は自由に動き回れるが、容器が絶縁されているとそこから出ることができない。たとえば、金属の固まりが絶縁体の上に置かれていたり、あるいは金属粉が空気中に舞っている状態などがこれにあたる。

雷は、導体と言え水の水の粒子(水滴)や水の粒が集まって、雲として空中に浮かんでいる状態での帯電による現象である。人間は電気が流れるから導体の一種と言っても良い。したがって、人間が地面に素足で立っていると全く静電気を持たない。しかし工場やオフィスなどで、プラスチックタイルなど絶縁性の床の上にいると、歩行や着衣の着脱など色々な原因で静電気を持つ。人体の帯電現象は半導体素子の破壊や可燃性雰囲気での爆発事故など、静電気障害を起こす原因の一つになっている。冬の乾燥期で車を降りるときなどに経験する「パチッ」と言ういやな放電は、ほとんどの場合、自分の体が帯電しているために起こる。

物体が静電気を帯びた状態としては、正極性あるいは負極性の単一極性に帯電する「単極性帯電現象」と、正負両極性の電荷が1つの物体内部で分かれた「双極性帯電現象」が存在する。絶縁体を電界中に置いたときに分極状態になるが、この現象は静電気の帯電とは言わない。これは電界を取り去るとただちに元に戻ってしまう。双極性帯電状態は外部電界に関係無しに正負の帯電状態がセットになって存在し続ける。単一極性帯電でも正負入り交じって存在することが多いが、どちらかの極性の電荷がずっと多い。双極性帯電では正負の電荷の絶対値がほぼ等しい。エアフィルタや音響素子として利用されているエレクトレットは双極性帯電体で、薄いフィルムや細い繊維の形で製品化されている。

2. 2 接触摩擦帯電の特性<sup>1)</sup>

2つの異なった物体が互いに接近し接触すると、一方は正極性に、他方は負極性に帯電し、表面が分離されると静電気として認識される。この現象、すなわち接触帯電現象は接触する表面間で電荷が移動することにより起こるが、電荷の移動は導体であっても絶縁体であっても、ともかく異なった物質同士であれば起こる。そのため、電荷が逃げないようにすれば、どんな材料でも異なった材料同士を接触させると帯電する。

接触時の電荷の移動は極めて短時間に起こると考えられ、接触時間を増しても帯電量はほとんど変わらないことが多い。実験的には接触時間に対して帯電量が増加する傾向を示す場合もあるが、これは接触面が接触中に變形し、接触面積が接触時間とともに増加するためであると考えられる。

接触帯電では、材料表面の凹凸のため、本当に接触している部分の面積(接触時に電荷が移動できるような表面間隔になっている部分の面積-接触帯電の有効接触面積)は見かけの接触面積に比べて驚くほど小さいのが普通である。そのため、単に固体同士を軽く接触させただけでは、発生する電荷はやっと測定できる程度に少ないのが普通である。特別に鏡面仕上げをした面同士の接触や、プラスチックを金型に流し込んで成型する場合、あるいは接触する一方の材料がゴムのように柔らかい物質である場合などでは、接触が全面に渡って密になるため、接触後に分離した表面の電荷密度は極めて高くなる。そのためほとんどの場合、分離するときに気中放電が発生し、あとで帯電面に粉を散布して見ると、放電が走った後の特有な電荷模様が見られる(図1)。

接触によって発生する電荷の量は接触面を擦りあわせると多くの場合は格段に増加する。この帯電様式を摩擦帯電という。摩擦を繰り返すと帯電量は次第に増加し、やがて飽和する傾向を示す。この現象についても幾つかの機構が関係しているが、最も大きな影響を持つものは、有効接触面積の増大である。

摩擦によって接触している表面の變形が起こらないとする



図1 他の物体に密着したあと分離した高分子材料表面の電荷分布状態  
分離時に静電気放電が起こると正負の極性の入り混じった分布になる。分離後に帯電面に電子写真トナーを散布して得られた画像である。

と、摩擦を繰り返すたびに毎回同じ程度の面積  $S_0$  が擦りあわされることになるであろうが、その時に擦り合わされた面積の内ある割合で、その前の擦りあわせまでに少なくとも1度は擦られた面積  $S$  が存在する。この割合、すなわち  $S/S_0$  は摩擦回数が増加するにしたがって増加し、多数回の摩擦後には  $S=S_0$  になる。要するにすべての摩擦可能な面が1度は摩擦されてしまうことになり、この状態で電荷の増加はほとんど起こらなくなる。これは、接触面での電荷の発生が瞬時に起こるためで、同じ部分の接触では、1回目の接触で移動すべき電荷はほとんどすべて移動してしまい、2回目以降の接触では新たな電荷移動はもはやほとんど起こらない。

摩擦帯電は摩擦中の発熱や摩擦される材料表面の破壊など、接触帯電に比べてより複雑な現象である。さらに帯電現象によって、摩擦中に表面間でマイクロプラズマが観測されており<sup>2)</sup>、このプラズマによる表面の変化などを考え合わせると、摩擦帯電はさらに複雑な効果を持つ現象であることになる。

3. 接触帯電の機構

3. 1 ベーシックモデル

表面間の単なる接触でなぜ静電気が発生するかと言う問題は、単純なようで中々複雑である。この過程は接触と分離の2つに分けて考えられる。まず2物体の表面が互いに接近しやがて接触する過程を見てみよう(図2)。材料として金属を考えると極めてわかりやすい。

図3に示すように、2つの金属が接触すると、お互いの仕事関数  $W_1$ ,  $W_2$  の差に基づいて電子が接触界面を移動する。このことはほとんど瞬時に起こり、フェルミレベルが一致して電子の移動は終わる。その結果、仕事関数の小さい金属は電子を失って正極性に、反対に仕事関数の大きい金属は電子をもらって負極性に帯電し、接触し合う金属の間に電位差

$$|(W_1 - W_2)/e| \dots\dots\dots(1)$$

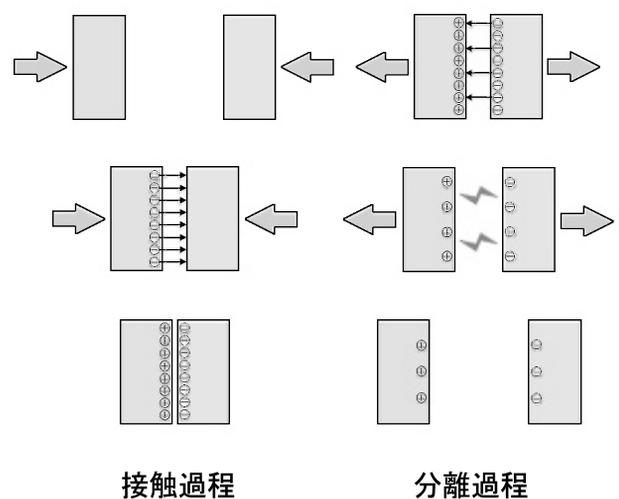


図2 接触分離による帯電  
左側の接触過程で表面間の電荷の移動が終わる。右側の分離過程初期には電荷の一部が戻り、さらに分離が進むと気中放電(静電気放電)が発生し多くの電荷が失われる。この過程が終了して現実の帯電電荷となるが、それでも電荷量が多いと完全に分離したあとでも静電気放電が起こる。

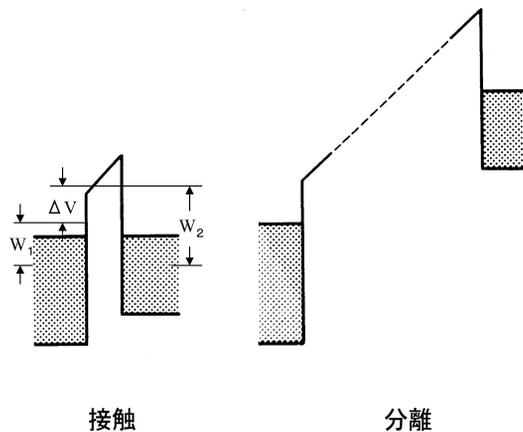


図3 金属の接触図

仕事関数の異なる金属が接触すると、仕事関数の小さい金属から大きい金属に向けて電子が移動し、前者は正極性に、後者は負極性に帯電する。分離すると両者の電位差が表面間隔に比例して増す。その結果図2に示す静電気放電が発生する。

ができる。 $W$ の単位はeV、 $e$ は電子電荷( $1.601 \times 10^{-19} \text{C}$ )である。電子の移動はトンネル効果によるもので、この効果が起こるためには表面がかなり接近している必要があり、その間隔は最大でもnmの程度であるとされている。

次に表面が分離する過程を考える。単純には授受された電子分だけそれぞれの表面が帯電すると考えられるが、この電子のかなりの部分が分離過程終了までに失われてしまう。まず、分離初期でトンネル効果が有効である間は、接触している2金属の表面間電位差を一定( $|W_1 - W_2|/e$  [V])に保つように電子が戻り出す。表面間隔が大きくなってトンネル効果が有効でなくなると、次は大気中であれば気中放電が起こる。ギャップが小さいときの気中放電の特性は、パッシェンの法則<sup>3)</sup>として知られている。

パッシェンの法則では、2つの電極の間隔と気圧の積 $d \times p$ を横軸にとり、縦軸に放電が起こる最低の電圧(電極間に加える電圧) $V_{\min}$ をとると、その関係は下に凸の極小値を持つカーブになる。極小値は、1気圧の大気中であれば、大体 $d = 5 \mu\text{m}$ で $V_{\min} = 350 \text{V}$ の程度である。この時の表面電荷密度 $\sigma_s$ を計算すると、

$$\sigma_s = C \times V_{\min} = \epsilon_0 / d \times V_{\min} = 6.2 \times 10^{-4} \text{C/m}^2 \dots \dots \dots (2)$$

の程度となる。ここに $C$ は接触する金属表面間の静電容量、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率( $= 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )で、単位面積当たりの値である。接触時の電子移動によって形成される帯電電荷密度はこれより大きい値であると考えられるが、その電荷の多くの部分は表面間隔が数 $\mu\text{m}$ の程度になる時に気中放電によって失われてしまう。

この電荷は、さらに帯電した面が全く周囲から独立する状態になると、もっと減少することになる。金属体表面に $\sigma_s$  [ $\text{C/m}^2$ ]の電荷があると、その表面電界強度 $E$ は、

$$E = \sigma_s / \epsilon_0 \dots \dots \dots (3)$$

となる。1気圧での放電限界は $E_{\min} \cong 3 \times 10^6 \text{V/m}$ であるから、

$$\sigma_s = E_{\min} \times \epsilon_0 = 2.7 \times 10^{-5} \text{C/m}^2 \dots \dots \dots (4)$$

となって、ギャップが小さい時に比べて電荷密度はさらに1桁減少する。これが実際に我々が得る静電気の状態である。絶縁体では電荷密度 $\sigma_s$ の帯電表面の電界は $\sigma_s / 2\epsilon_0$ であるから、絶縁体表面に保持され得る最大電荷密度は(4)式の値の2倍になる。

### 3.2 絶縁体の帯電

現実の接触帯電は金属同士で起こることもあるが、絶縁体が帯電するケースが多い。絶縁体は電子構造が明確でないものが多く、したがって接触帯電の機構もまたはっきりしていない部分が存在する。絶縁体として最も多く使われている高分子材料では、分子構造に基づく電子構造と、分子の配列による各種構造があって複雑である。高分子材料が金属と接触して帯電する場合、接触する金属の仕事関数値と帯電量の相関関係が実験的に求められており、構造の複雑性はともかく、電子構造が帯電特性を決める基本的要因であることが示唆された。この結果は、材料表面の電子状態を調べる手法の一つである光電子放出の測定によって裏付けられている<sup>4,5)</sup>。

高分子材料では、接触時に電子を相手側に与えるドナー状態と、相手から移動してくる電子を受け入れるアクセプター状態の構造によってその材料の帯電特性が決まると考えられる。このような機構の提案は大分前に出されている<sup>6)</sup>が、問題はドナーとアクセプターがどのような成因によってできているかということになる。高分子材料の帯電特性は、その化学構造によるところが大きく、ドナーやアクセプターの性質が化学構造によって決まると考えられる。昔からある帯電列は、材料の化学構造の帯電傾向を示すものと考えられ、多くの研究がある<sup>7)</sup>。

しかしこの他に、不純物、および前述した分子配列による影響も大きい。図4は種々のポリエチレンの帯電特性を示すものである<sup>8)</sup>。ポリエチレンは化学構造が最も単純な高分子材料で、分子の枝分かれ(分岐)の程度によって密度の異なるものができ、高密度から低密度まで各種の製品が存在する。密度の異なるポリエチレンの光電子放出測定によって等価の仕事関数(光電子放出の閾値エネルギー)を求めると、図に示すように、密度が大きくなるにしたがってその値は小さくなる。この結果は、金属に対する負帯電傾向が密度の増加にもなると弱まってくることを期待させるものである。

これに対して実際の接触帯電の実験では逆に、等価の仕事関数が小さくなると(密度が大きくなると)負帯電傾向が強まる結果が得られている。一方、ポリエチレン表面をエネルギーの小さい電子線で帯電させ、表面のアクセプターになる電子トラップを電子で埋めた状態を作り出し、その後で光電子放射の測定を行うと、密度の高いものは光電子放出数が極めて多くなり、電子トラップ密度が高いことを示すことがわかった。この結果は、電子トラップ密度が高いポリエチレンは低いものに比べてアクセプター密度が高いため、負帯電傾向が強いことを示すものである。この場合では、分子の配列がアクセプターの状態を作っていることになる。

高分子材料の接触・摩擦帯電現象はすべて上に説明したドナーとアクセプター状態の電子の授受によるものとは言えない。空気中の水分の存在が帯電特性に大きく影響することはしばしば言われており、水分があるとイオン性の電荷発生が

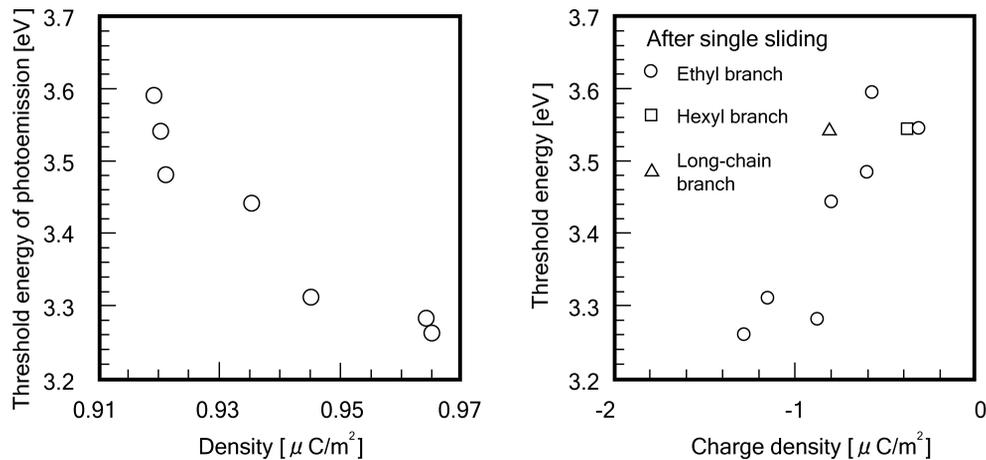


図4 ポリエチレンの密度と帯電特性

左はポリエチレンの密度と光電子放出の閾値との関係、右は閾値と接触帯電で発生する電荷密度を示す。ポリエチレンの密度が違っていると閾値が違いますが、閾値は電子で満たされた状態の上限で等価の仕事関数であるから、この値が小さいものは正極性に帯電する傾向があるはずである。しかし、右の図から、逆の関係が見られる。これは、分岐の構造によって電子を捕らえる状態(電子トラップ)の密度が変わるためである。

起こるといふ実験結果もある<sup>9)</sup>。

#### 4. 物質表面と静電気

##### 4.1 表面の性質と帯電特性

接触・摩擦による電荷の発生は表面現象であるから、物質表面の性質がそのまま静電気の発生に影響を持つ。そのため、材料の表面を改質してしまえば、帯電の特性が大きく変化することになる。単分子膜であるLB膜を固体表面に形成し、帯電特性を調べた例があり、LB膜の材料によって異なる帯電特性が得られている<sup>10)</sup>。

絶縁体表面の最大電荷密度  $5.4 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$  は、だいたい一辺  $500 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA}$  は  $10^{-10} \text{ m}$ ) の四角の中に1つの電子の過不足(正極性帯電の場合は電子が不足、負極性の場合は1つ余計にある)に相当する。この面積の表面には、原子が数万から数十万個はあるから、最大に帯電している状態でもこれだけの表面原子の内のわずか1つの原子が電子の過不足を生じている状態である。前述したように、接触時に移動する電荷の量はもっと多いと思われるが、それにしてもすべての表面原子が電子の過不足を生じるようなことは起こり得ない。このように極めてわずかの原子が電子を放出するか、あるいは電子を受け入れている状態が、現実に帯電している状態と言うことになる(原子ではなく分子、あるいは前述のように、原子・分子の配列構造が電子を受け入れる場合もある。後者は構造的な電子トラップである)。そうすると、材料表面に特異な性質を持った原子がごく僅かに混入していれば、その材料の帯電特性を大きく変えることができる可能性があることになる。

このような原理で、不純物混入やコーティングなどによって材料表面の組成を僅かに変化させると帯電特性を大きく変えることができる。

電子写真に使用されているトナーは  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  程度のサイズの高分子粉体であるが、通常の高分子粉体と比べて非常に帯電しやすい状態になっている。これは帯電制御剤という特異な特性を持った微粒子を混入している結果である。混入さ

れた制御剤はその一部がトナー表面に顔を出して高分子の帯電特性を必要な特性に変化させている。

帯電特性は、分析装置にかからないような微量な表面組成の変化によって大きく変わる傾向がある。それほど静電気の特性は敏感なもので、この特性変化を材料表面の状態変化の指標にしようとする提案もある。

##### 4.2 プラズマ処理による帯電特性の変化

プラズマ処理は、材料のバルクの性質を変えずに表面の性質を変える一つの代表的方法であり、接着性や印刷適正を向上させるために古くから用いられている。表面現象である静電気の特性は、当然プラズマ処理によって変わるはずである。事実、高分子材料をアルゴン、窒素、酸素などのプラズマで処理すると、接触・摩擦帯電特性が劇的に変化する。

図5<sup>11)</sup>はポリエチレンのフィルムをアルゴンプラズマに晒したあと、その表面にステンレスビーズを滑落させ、接触・摩擦によって帯電させた結果を示す。ポリエチレンの接触摩擦帯電量は、プラズマに晒す時間が長くなると驚くほど多くなり、やがて飽和に至る。飽和帯電量はプラズマに晒す前の状態での接触摩擦帯電量に比べて200倍以上になっている。

処理後の表面は、水の接触角が変化し、親水性になっており、接触摩擦帯電量は接触角にほぼ依存して変化している。ESCAの分析の結果によれば、処理後の表面はO/Cの比率が大きくなり、酸素化合物が生成していることがわかる。アルゴンガスプラズマでこのようなことが起こるのは、ガスの置換時に混入するガス中の残留酸素とポリエチレン表面の吸着水の分解によって発生した酸素によるものと考えられる。窒素ガスプラズマでは、大気と窒素との置換を行う際の到達真空度を高めると、残留酸素が減少し、ポリエチレン表面に導入される酸素原子が減り、逆に窒素原子が増えて、接触摩擦帯電で正極性に帯電するようになる。

このようにプラズマ処理を行うと、高分子材料の場合にはその帯電特性を自由に変えることができる。さらにこの方法を用いれば、際立って帯電しやすい材料を作り出すことがで

きるため、帯電現象を利用する静電気の応用面でその効果が発揮されることが期待される。ただし、プラズマ処理には1つの大きな問題点がある。それは、プラズマに暴露されて変化した表面の特性が、処理後の時間経過にもなると次第に元の特性に戻ってゆくことである。このため、処理によって変化した帯電特性は、数ヶ月経つと発生電荷量で1/2程度に減少してしまう。この経時変化の原因の一つは高分子の分子運動であると考えられている。高分子材料は表面の分子が内部の分子と入れ替わるような運動を常にしており、プラズマで処理され組成が変化した表面分子が時間経過とともに内部に入り込み、処理されていない内部の分子が表面に顔を出す。その結果、表面の特性が順次元の特性に戻って行くというのである。

そこで、分子運動を高め表面に近い内部の分子まで処理を進めてしまう目的で、処理する時の試料表面温度を上昇させ処理を行ったところ、経時変化をある程度防止できることがわかった。現時点では、処理後2ヶ月程度は特性の変化が見られない状態を作り出すことができる<sup>12)</sup>。

#### 4.3 表面粗さと帯電特性

接触帯電では、荷電粒子が移動できるような極めて接近した部分でのみ電荷が発生する。材料の表面に凹凸があると、電荷が移動できるような有効接触面積が減少し、その結果発生電荷量は一般に減少する。

図6<sup>13)</sup>は、表面粗さを変化させたポリプロピレンフィルムと水銀との接触帯電の結果である。試料表面をさまざまな粒度の砥粒の紙やすりで研磨し、表面粗さの異なる試料を製作した。その結果として、砥粒の粗さが増すと電荷発生量が減少して行く。図では、試料の中央から左側だけを研磨した試料について、研磨していない右側も含めて水銀が接触した後の電荷分布を測定した結果を示してある。砥粒が粗いと研磨面の帯電は非研磨面に比べてずっと少ない結果になっている。

流動性のある水銀との接触では一般に摩擦に匹敵するか、

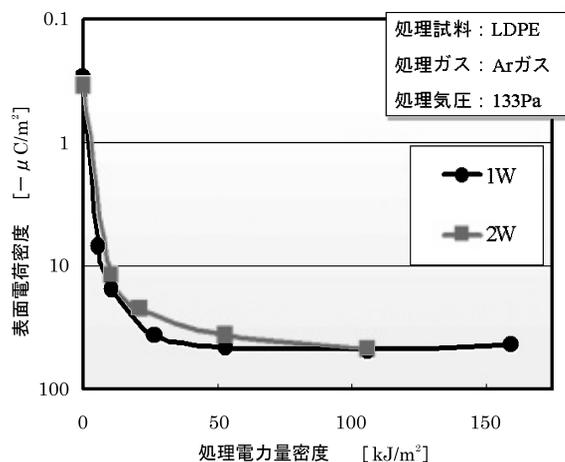


図5 低密度ポリエチレンをアルゴンガスプラズマで処理し、その表面にステンレスビーズを滑落させ、接触摩擦帯電を起こしたときの特性  
処理電力量密度が高くなると、電荷密度は200倍以上に増加する。

あるいはそれ以上の電荷が発生する。これは水銀が接触相手表面の凹凸と良く馴染み、有効接触面積が見かけの面積に近い状態になるからである。そのため、水銀と試料表面が分離する際には静電気放電が発生したり、水銀粒が帯電した試料表面に付着してしまうようなことが起こる。このような水銀も接触相手表面の凹凸の状態によってはその細部までは入り込めず、有効接触面積が凹凸の状態によって変化する。

また、図7<sup>14)</sup>に示すデータは、高分子材料の表面を研磨やエッチングによって処理し、表面荒さを変化させ、固体金属を接触させて発生電荷量を測定した結果である。この場合は、凹凸の変化によって電荷発生量が変化するだけでなく、その極性まで変わることがわかる。これは、凹凸を付ける際の表面の加工によって、表面の電子トラップの状態が変化するためだとされている。

### 5. 表面処理と帯電防止

静電気が発生は、これを利用する技術では必要なことであるが、その反面、静電気による生産障害の発生を考えると歓迎できない現象である。後者としては、静電気を発生しにくくすることと、発生する静電気を素早く漏洩させることが重要になる。

静電気を漏洩させるためには、材料表面の電気伝導度を増加させることが必要である。そのためには、種々の表面処理法が用いられる。

帯電防止剤は<sup>15)</sup>、古くから広く使用されている。帯電防止

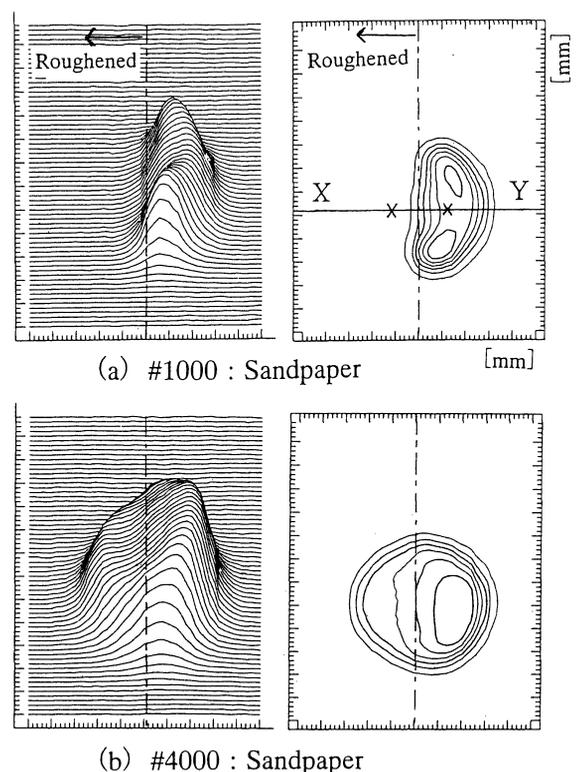


図6 表面粗さと帯電特性  
ポリプロピレンフィルムの左半面を紙やすりで研磨し、研磨していない右半面も一緒に水銀と接触させ、そのあとで表面の電荷分布を測定した結果を示してある。荒い紙やすりの場合(上図)では左側の帯電が少なくなっている。

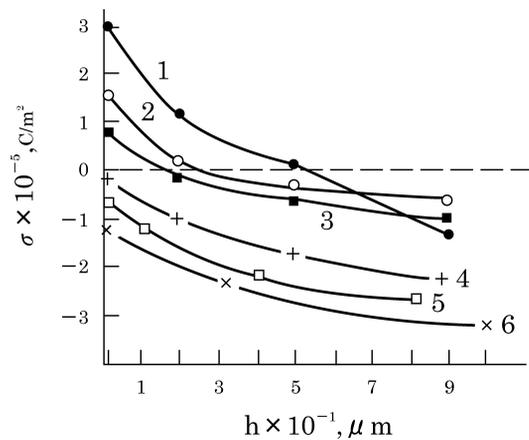


図7 表面粗さの異なるガラスと種々の試料との摩擦帯電  
ガラスの表面をエッチングや研磨で荒らした。図の番号1～4は順にコットン、アルミニウム、シルク、ナイロンとガラスを摩擦した結果、5および6はポリエチレンとテフロンの場合で、フィルターペーパーと摩擦している。発生電荷量は電荷密度  $\sigma$  で、表面粗さは height parameter  $h$  で表している。表面が粗くなると、発生電荷が減少し、負極性になってゆく。これは、試料表面を荒くする際に、表面の構造が破壊されて電子のアクセプターとなる欠陥が増えた結果であるとしている。

剤の多くは界面活性剤で、これを材料表面に塗布したり、薄めて吹き付けたり、あるいは材料内部に混入して表面にブリードアウトさせたりすると、大気中の水分を吸着して表面の電気伝導性が向上する。静電気を漏洩させるためには導体のような伝導性は必要なく、表面比抵抗で言うて大体  $10^{-8}\Omega$  の程度にすればほとんどの場合、十分である。

真空蒸着などによって表面に金属薄膜を形成する方法<sup>16)</sup>は、ほぼ完全な帯電防止法として用いられる。片面蒸着の場合には非蒸着面は帯電するが、この面を金属に密着しておけば静電気障害を起こすことは防げる。またフィルムが薄い場合、非蒸着面の表面電位は極めて低くなるから、ほこりの付着や静電気放電は起こりにくくなる。

前項4.3で触れた表面粗さと電荷発生量の関係は、帯電防止にも利用されている。高分子材料でモールドされている半導体素子の表面を非光沢な梨地にすると、製造プロセスで発生する素子の帯電がかなり緩和される。フィルムの製造工程でも、フィルムを搬送するローラの表面にこのような加工を施せば、フィルムの帯電を減らすことができる。

## 6. 終わりに

静電気の多くは表面現象であって、表面の性質に極めて敏感である。そのため、うまい表面処理法が見つければ、さまざまな材料の静電气的特性を好みのものに変化させることが可能となろう。コストも含めて考えて、このような技術が広まれば、静電気の利用にも、また静電気障害の防止にも大変な利益をもたらすことになる。現時点ではさまざまな物質の材料やさまざまな形態の材料に汎用性のある方法は開発されていないが、技術の高度化にともなってその必要性が増し、近い将来にはこのようなことが達成される可能性もある。

過去には、静電気の技術は電子写真技術の出現と半導体工業の進歩によって大きく発展した。前者は帯電機構の理解や帯電特性制御に関する技術についてであり、後者は静電気障害対策技術に関する進歩であった。これからはナノテクノロジーの進歩が一つの牽引役になるかも知れない。

(2005-7-8 受理)

## 文 献

- 1) 村田雄司；表面・高分子と静電気（共立出版，1988）
- 2) 中山景次；トライボロジスト，49，23（2004）
- 3) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編，放電ハンドブック，p. 43（オーム社，1999）
- 4) Y. Murata, T. Hodoshima and S. Kittaka；*Jpn. J. Appl. Phys.*, 18, 2215（1979）
- 5) Y. Murata and I. Hiyoshi；*Jpn. J. Appl. Phys.*, 36, 5329（1997）
- 6) T. J. Fabish and C. B. Duke；*J. Appl. Phys.*, 48, 4256（1977）
- 7) A. F. Diaz and R. M. Felix-Navarro；*J. Electrostat.*, 62, 277（2004）
- 8) Y. Murata and I. Hiyoshi；*J. Electrostat.*, 46, 143（1999）
- 9) E. Nemeth, V. Albrecht, G. Schubert and F. Simon；*J. Electrostat.*, 58, 3（2003）
- 10) K. Ohara, I. Nakamura and M. Kinoshita；*J. Electrostat.*, 51, 351（2001）
- 11) 矢野浩輝，崔 暢洛，村田雄司；静電気学会講演論文集'02，p. 51（静電気学会，2002）
- 12) 脇田敬輔，鈴木啓裕，菊池 正，村田雄司；静電気学会講演論文集'03，p. 87（静電気学会，2003）
- 13) 堀 靖郎，齊藤勝男；静電気学会誌，24，42（2000）
- 14) T. N. Vladykina, B. V. Deryagin and Yu. P. Toporov；*Phys. Chem. Mech. Surfaces*, 3, 2817（1985）
- 15) 後藤伸也，細川泰徳；帯電防止材料の応用と評価，p. 9（シーエムシー出版，2003）
- 16) 篠原敏郎；帯電防止材料の応用と評価，p. 48（シーエムシー出版，2003）