

論 文

絶縁物とガラスの接触帶電特性

北林宏佳^{*1}, 藤井治久^{**}

(2003年4月4日受付; 2003年7月10日受理)

Charging Characteristics between Insulators and Glass

Hiroyoshi KITABAYASHI^{*1} and Haruhisa FUJII^{**}

(Received April 4, 2003; Accepted July 10, 2003)

It is necessary to understand mechanism of contact charging between insulators. However the electrification phenomena of the insulator surface are not well known yet. We measured the charging potential of glass which was separated from insulating plate, by using electrostatic voltmeter. From the experiment, we obtained the following results. The contact electrification potential of the glass was dependent on the material of insulating plate. The charge quantity on the glass depended on the number of contact with the insulating plate. Furthermore, this phenomenon was not related to the relative dielectric constant and ionization potential of insulating materials, but the apparent work function.

1. はじめに

絶縁物と絶縁物間の接触帶電機構についての報告は少ない。その報告の一つとして、G.S.P. Castle は固体帶電理論を適用した表面状態モデルについて解説し、絶縁物間の帶電現象測定の難しさについて説明するとともに、メカニズム解明のためにはミクロな測定手段が必要であることを提案している¹⁾。また、高分子の接触帶電現象では静電気発生の要因についての検討が行われている²⁻¹⁸⁾が、高分子の種類により、仕事関数が関与している場合³⁻⁵⁾と比誘電率が関与している場合（ケーンの法則）が報告されている¹⁶⁻¹⁸⁾。

筆者らはこれまで、金属と絶縁物であるガラスの接触剝離による帶電現象に注目し、新たに開発した接触帶電評価装置を用いて、金属の表面形状または材質を変化させた場合と、金属とガラスとの接触時間を変化させた場合のガラス上の電位を表面電位計にて測定した。その結果、金属材料の違いによりガラスの接触帶電電位が異なることから、

金属とガラスの仕事関数差がガラスの帶電に関与し、その際のキャリアは電子であることを報告した¹⁹⁾。

しかし、絶縁物材料とガラスの接触剝離による帶電現象については明らかにされていない。ガラスは高抵抗材料であり、絶縁性にも優れた材料があるので、電気機器に使用される。しかし、製造工程中で静電気による帶電、放電が発生し、電気機器の絶縁破壊による不具合が生じる可能性がある²⁰⁻²¹⁾。

そこで本論文ではこのような絶縁物と絶縁物間の接触帶電現象に及ぼす支配的要因を明確にすること目的に、各種絶縁物材料と絶縁物であるガラスとの接触剝離帶電特性を測定した。

2. 実験方法

2.1 ガラスの表面電位測定方法

表面電位の測定はクリーンルーム内に設置したこれまでの報告と同じ接触帶電評価装置にて行った¹⁹⁾。ガラスの帶電特性測定の場合の装置の概略図を図1に示す。塩ビ製の箱中の雰囲気は窒素ガスにより、温度は23°C、湿度は50% R.H. に保たれている。ガラスの表面電位を3本の非接触表面電位計プローブで測定した。表面電位計はMonroe社製(MODEL 174)でプローブ1017Sである。まず、ステージから13 mm のステンレス(SUS)ピン上(4カ所)にガラスを置き、SUSピンを下げる。ガラスをステージと一定時間、ステージ下面の空圧駆動真空装置で真空吸着させた後、剝離し、13 mm ギャップのSUSピン上で、接触していないガラス表面側から電位測定を行った。この接触、剝離

キーワード：静電気、帶電特性、接触電位差、絶縁物

* 三菱電機株式会社先端技術総合研究所 (661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1)

Mitsubishi Electric Corp., Advanced Technology R&D Center, 1-1 Tsukaguchi-Honmachi 8-chome, Amagasaki 661-8661, Japan

** 奈良工業高等専門学校電気工学科 (639-1080 大和郡山市矢田町 22)

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering, 22 Yata, Yamatokoriyama 639-1080, Japan

¹ Kitabayashi.Hiroyoshi@wrc.melco.co.jp

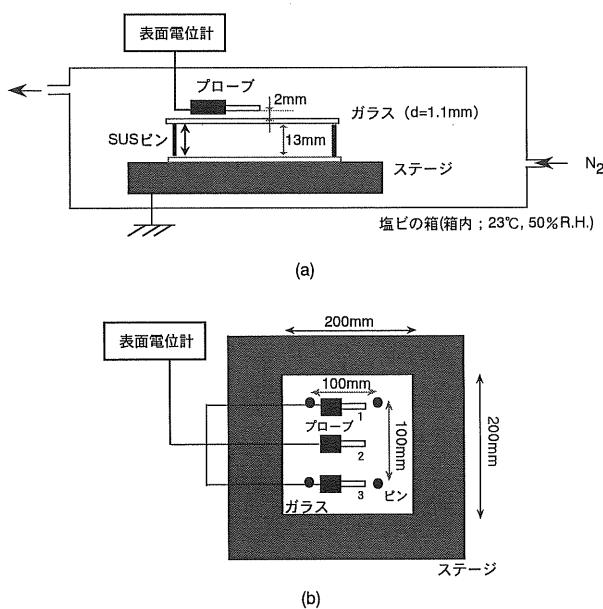


図 1 接触帶電評価装置の概略図

(a) 断面図, (b) 平面図

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus for contact electrification.
(a) Cross section, (b) Front view.

の動作を連続的に繰り返した（繰り返し接触帶電）。接触吸着時間は 1, 5, 10, 20, 100 秒と変えた。その際の剥離状態でのガラスの保持時間は接触吸着時間に関わらず、10 秒間一定とした。

測定は同一条件において 2 回行い、3 本のプローブ（図 1 (b) のプローブ番号 1, 2, 3）によって、合計 6 ポイント測定した。なお、表面電位測定時のプローブとガラス表面の距離は 2 mm である。

また、帶電測定にあたっては、絶縁ステージでの帶電が計測値に影響することが考えられるが、次の 2.2 節に述べるように絶縁物ステージの絶縁物厚が極めて薄いため、その影響は無視できる。

2.2 ガラスとステージ材について

ステージは $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 、厚さ 8 mm の Al 材を上仕上げ（平均粗さ $0.13 \mu\text{m}$ ）に加工したもの用いた。そのステージ表面に Cr を 400 \AA 蒸着した後、各々の材質を $2,000 \text{ \AA}$ 蒸着した。材質は Al_2O_3 , MgO , SiC , SiNx , SiO_2 の絶縁物、Al, Ni, Au の金属である。ステージの表面粗さは（株）東京精密の超小型表面粗さ測定機（Handy surf E-30A）を用いて計測した。表面電位プローブの下部に面した位置で表面粗さを計測し、その平均を各々のステージの粗さとした。平均粗さ (R_a) と最大粗さ (R_{\max}) 値を表 1 に示す。表面材の違いによる粗さのばらつきは小さい。

ガラスには無アルカリガラス（比誘電率：6.5、表面平均粗さ： $0.01 \mu\text{m}$ 以下）を $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 、厚さ 1.1 mm に加工したもの用いた。購入したガラスを真空中で 100°C で

表 1 各々のステージの表面粗さ
Table 1 Surface roughness of each stage.

ステージ 表面材質	平均粗さ R_a (μm)	最大粗さ R_{\max} (μm)
Al_2O_3	0.30	3.3
MgO	0.42	5.7
SiC	0.39	4.9
SiNx	0.31	4.5
SiO_2	0.45	6.1
Al	0.43	6.9
Ni	0.51	5.3
Au	0.38	4.6

1 時間加熱した後、湿度 30% R.H. のデシケーターに入れて保管した。実験直前に、ガラスの両面をイオン送風器で除電し、表面電位計で $\pm 5 \text{ V}$ 以下になったものを帶電測定用ガラスとした。また、一度測定に使用したガラスは次の測定には使用していない。

2.3 ステージ表面材料の仕事関数測定方法

金属ステージに用いた金属（Al, Ni, Au）の仕事関数測定は、理研計器（株）の光電子放出測定装置（AC-1）を用いて求めた。

絶縁物の見かけ上の仕事関数測定は、次のようにして行った。試料はステージ表面材に用いた絶縁物を $2,000 \text{ \AA}$ ずつガラスに蒸着したものを用いた。各々の絶縁物蒸着ガラスと金属ステージ（Al, Ni, Au）間で繰り返し接触させ、絶縁物の表面電位（1 回当たりの接触吸着時間を 10 秒とし、10 回繰り返した後の値）を測定した。各々の絶縁物において、絶縁物蒸着ガラスの面内 3 カ所（プローブ番号 1, 2, 3）について、絶縁物蒸着ガラス 4 枚で行った合計 12 ポイントとその平均値をプロットし、金属ステージの仕事関数と接触帶電電位の直線関係を導き、接触帶電電位が 0 V になる仕事関数を絶縁物の見かけ上の仕事関数とした。

3 実験結果

3.1 繰り返し接触帶電測定

図 2 (a) はステージ表面に Al_2O_3 を用いた場合、図 2 (b) は MgO を用いた場合のガラスの繰り返し接触帶電特性である。

Al_2O_3 と MgO ともに接触時間に関わらず、すべて負極性の電位である。どちらもトータルの接触時間が長くなれば電位は高くなるが、同じ累積接触時間でも 1 回当たりの接触吸着時間が短い方が高くなる。これらのことから繰り返し接触帶電では、電位の増加は接触回数に大きく依存することがわかる。

3.2 ガラスの接触帶電に及ぼすステージ材の影響

各々の絶縁物ステージとガラスの 1 回当たりの接触吸着

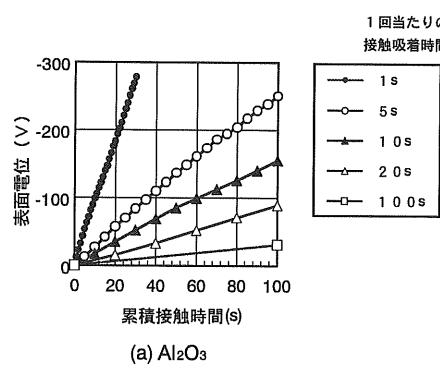
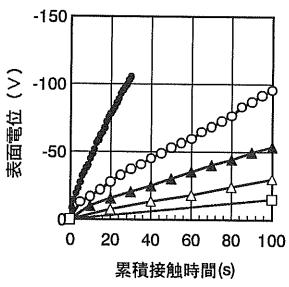
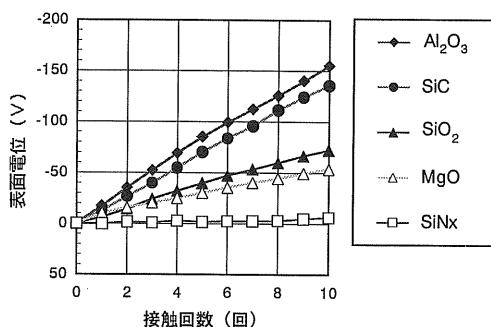
(a) Al_2O_3 (b) MgO

図 2 絶縁物ステージでの接触時間とガラス電位との関係

Fig. 2 Surface potential of glass substrate vs the contact time on insulating plates.

(a) Al_2O_3 , (b) MgO .図 3 各種ステージ材との接触によるガラスの電位
Fig. 3 Relationship between surface potential of glass and the number of contact for tested stage materials.

時間を 10 秒とし、10 回繰り返した場合のガラス電位（6 ポイントの平均値）を図 3 に示す。

このグラフより、ステージ材料の違いによって、電位の大きさが大きく異なることがわかる。電位はすべて負極性であり、順序は $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiC} > \text{SiO}_2 > \text{MgO} > \text{SiNx}$ である。この傾向は 1 回当たりの接触吸着時間を変えた場合においても同様である。

さらに、図 3 に示したような接触吸着時間 10 秒で 10 回繰り返した後のガラス表面電位の測定結果（各 6 ポイント）を用い、ステージに接触していないガラス面側の電荷を 0 として、計算から求めた接触面側の表面電荷量の値を

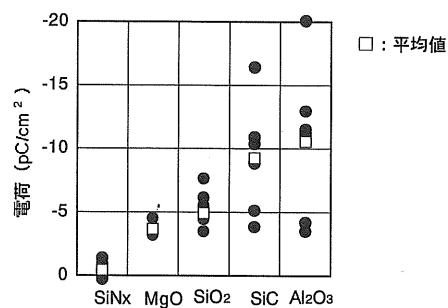


図 4 ステージ材と表面電荷量との関係

Fig. 4 Surface charge quantity as a parameter of stage materials.

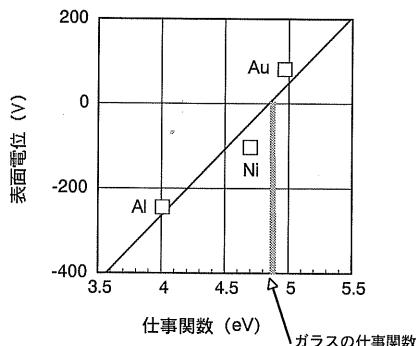
図 5 金属ステージ材の仕事関数と接触電位との関係
Fig. 5 Relationship between surface potentials and the work functions of several metals.

図 4 に示す。平均値で比較すると、電荷量の大きさの順序は繰り返し接触帯電と同じ傾向を示す。グラフには全ての測定点をプロットした。各材質でガラスの表面電位にはばらつきが見られる。これは測定装置（図 1）におけるガラス基板上の測定箇所の差により生じているためである。ガラス面中央部（図 1 (b) のポイント 2）で電位が高く、外側（ポイント 1, 3）で電位が低い傾向にあり、ステージ下部からの真空引きによる吸着の違いが電位分布に影響していると考えられる。材料を変更してもこの傾向は同じであるため、各材料において同じ箇所（6 ポイント）を測定した平均値を材料の特性とする。

3.3 絶縁物の見かけ上の仕事関数値

ガラスの仕事関数値は前回の報告¹⁹⁾で述べたように、既知である金属ステージ（Al, Ni, Au）の仕事関数と、そのステージとガラスとの接触電位の直線関係から等価的に求めた。その結果を図 5 に示す。図 5 よりガラス電位が 0 V である仕事関数値をガラス基板の見かけ上の仕事関数とし、その値は約 4.9 eV であった。

ステージに用いた絶縁物蒸着ガラスの接触帯電電位と金属ステージの仕事関数との関係は比例関係にあり、これらの結果よりステージに用いた絶縁物と金属との接触帯電では、電子が主なキャリアになっていると考えられる。これ

はガラスと金属との接触帶電の場合と同様の結果であり、各々の特性の0 Vの値から各々の絶縁物の見かけ上の仕事関数を求めた。その一例として Al_2O_3 と MgO の結果を図6に示す。各々の絶縁物の仕事関数は、 Al_2O_3 : 4.1 eV, MgO : 4.3 eV, SiC : 4.2 eV, SiNx : 4.7 eV, SiO_2 : 4.4 eVであった。

4. 考 察

筆者らは金属とガラスとの接触帶電メカニズムにおいて、ガラスと金属間の仕事関数差がガラス帶電に関与しており、ガラス帶電のキャリアは電子であることを報告した¹⁹⁾。一方、高分子の帶電においては高分子の仕事関数や比誘電率が関与するとの報告がなされているが²⁻¹⁸⁾、絶縁物とガラスの接触帶電ではどのパラメータが関与するか明確になっていない。そこで、我々は絶縁物のイオン化ポテンシャル、見かけ上の仕事関数と比誘電率の各パラメータと、今回のガラスの接触帶電電位との関係から、絶縁物とガラスの接触帶電現象の支配的要因を検討した。

4.1 イオン化ポテンシャルの影響

理研計器(株)製の光電子放出測定装置(AC-1)にてこれら絶縁物のイオン化ポテンシャルを測定した。測定用試料は、Al基板上にCrを400 Å蒸着し、その上に各々のステージ材料に用いた絶縁物を2,000 Å蒸着したもの用いた。イオン化ポテンシャルは Al_2O_3 : 5.30 eV, MgO : 5.20 eV, SiC : 4.86 eV, SiNx : 4.76 eV, SiO_2 : 5.40 eVであった。

これらイオン化ポテンシャルとガラスの接触帶電電位(1回当たりの接触吸着時間を10秒とし、10回繰り返した後の値)との関係を図7に示す。イオン化ポテンシャルとガラスの電位に相関は見られず、イオン化ポテンシャルはガラスの帶電を決定する要因ではないことがわかった。

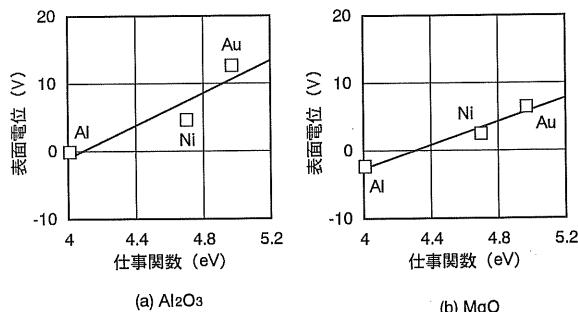


図6 金属ステージと絶縁物ステージ材を接触したときの絶縁物蒸着ガラスの帶電特性

Fig. 6 Contact electrification potentials of insulating materials with metals with well-known work function values.
(a) Al_2O_3 , (b) MgO .

4.2 見かけ上の仕事関数の影響

上記のように絶縁物のイオン化ポテンシャルは、ガラスの帶電特性に関与しなかった。次にステージに用いた絶縁物の見かけ上の仕事関数値とガラスの接触帶電電位(1回当たりの接触吸着時間を10秒とし、10回繰り返した後の値)との関係を図8に示す。図内にはガラスの仕事関数値(4.9 eV)も示した。この図からガラスの仕事関数に近い絶縁物、つまり、ガラスとの仕事関数差が小さい絶縁物ほど、ガラスの接触帶電電位は低く、逆にガラスとの仕事関数差が大きい絶縁物ほど電位が高くなることがわかる。従って絶縁物材料においてもガラスとの接触帶電における主なキャリアは電子であると予想される。

4.3 比誘電率の影響

比誘電率測定用試料は、Si基板上に下部電極としてCrを400 Å蒸着し、その上に各々のステージ材料に用いた絶縁物を2,000 Å蒸着し、上部電極として直径4 mm、厚さ1,000 ÅのAlを蒸着したものを用いた。測定装置はYHP社製の4061A計測システムを用いた。測定周波数は10 kHzで各々の材質の比誘電率を求めた。各々の絶縁物に対

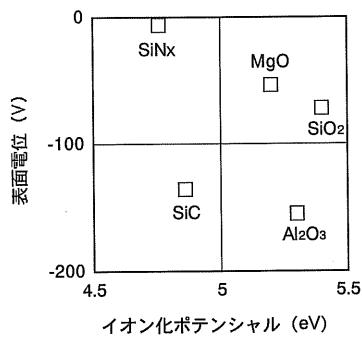


図7 絶縁物ステージのイオン化ポテンシャルとガラス電位との関係

Fig. 7 Relationship between surface potential and the ionization potential for tested insulating materials. し5個の電極で測定し、平均をその試料の比誘電率とし

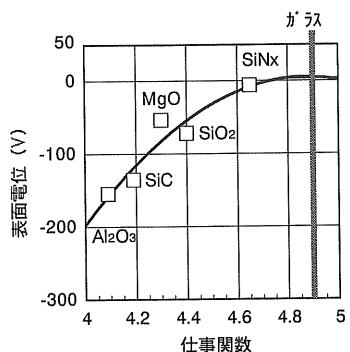


図8 絶縁物ステージの仕事関数とガラス電位との関係

Fig. 8 Relationship between surface potential of glass substrates and apparent work function of several insulating plates.

た。これらの結果から求めた比誘電率は Al_2O_3 : 9.48, MgO : 7.87, SiC : 9.06, SiNx : 6.06, SiO_2 : 4.08 であった。

絶縁物の比誘電率値とガラスの接触帯電電位 (1回当たりの接触吸着時間を10秒とし、10回繰り返した後の値)との関係を図9に示す。ガラスの比誘電率は6.5である。高分子の接触帯電に見られる比誘電率の大きい材質が正極性に帶電し、小さい材料が負極性に帶電するというケーンの法則^[16-18]は、ガラスの接触帯電において当てはまらない。

4.4 ガラスの接触帯電に及ぼすステージ材の影響

4.4.1 接触時間の比較

金属と絶縁物ステージでのガラスの接触帯電におけるキャリア移動時間の違いについて、金属の例としてAlを、また、絶縁物の例として Al_2O_3 を検討する。図10にそれぞれの接触回数と1回当たりの接触吸着時間を変化させたときの帶電電位の関係を示す。

金属(Al)の場合は1回当たりの接触時間が5秒以上で接触回数と表面電位との関係は同じになるが、接触時間が

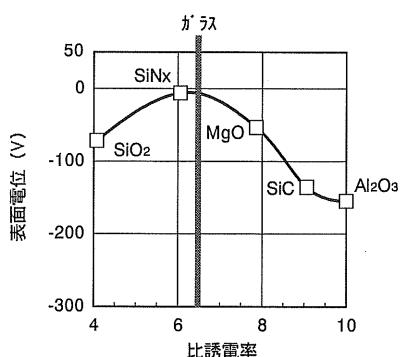


図9 絶縁物ステージの比誘電率とガラス電位との関係
Fig. 9 Relationship between surface potential of glass substrates and the relative dielectric constant of several insulating plates.

1秒では接触回数に対する表面電位の増加率が5秒以上よりもかなり小さい。一方、絶縁物(Al_2O_3)の場合は1回当たりの接触時間が5秒以上で接触回数と表面電位との増加率は同じであるが、接触時間が1秒では表面電位の増加率が5秒以上と比較して、金属の場合の増加率ほど大きな違いは見られない。この傾向は他の金属や絶縁物においても同様である。表1に示した材料の表面粗さには、大きな違いが見られないため、キャリア移動が接触時間により、金属と絶縁物で異なると推測される。

4.4.2 仕事関数の比較

金属ステージと絶縁物ステージをガラスと接触する時間を変えた場合の各種仕事関数と表面電位の比較を図11に示す。

金属ステージとの接触で求めたガラスの仕事関数は4.8から4.9 eV内にあることがわかり、接触時間の違いでガラスの仕事関数値に大きな違いはない。また、ガラスの仕事関数に近いステージ材料ほど、ガラスの表面電位は低い。しかし、金属ステージと絶縁物ステージの同じ仕事関数値におけるガラスの表面電位を比較した場合に、接触時間が5秒以上で、金属ステージの方が絶縁物ステージよりも電位が高い。この理由は接触帯電に関与するステージ材中の電子密度の違いによると考えられる。つまり、ガラスよりも仕事関数の小さな金属ステージとガラスとの接触においては、金属の仕事関数値からガラスの見かけ上の仕事関数値の差のみ、電子の流入が生じるが、金属側から電子が放出されるので、電子密度が高い領域から電子が移動すると予想される。一方、絶縁物ステージとガラスとの接触においては、絶縁物の見かけ上の仕事関数値からガラスの見かけ上の仕事関数値の差のみ、電子が流入する。そのときに接触帯電に寄与する電子は絶縁物ステージから放出されるので、絶縁物の表面準位にトラップされた少量の電子

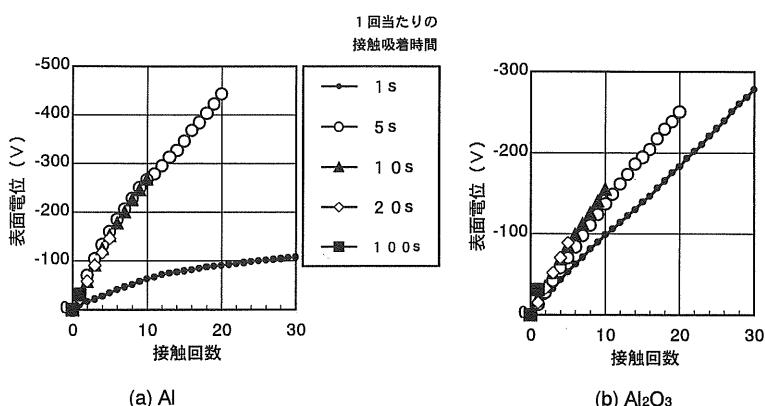


図10 金属と絶縁物ステージにおけるガラスとの接触回数と電位との関係
Fig. 10 Surface potential of glass substrate vs the contact number on metal and insulating plates.
(a) Al, (b) Al_2O_3 .

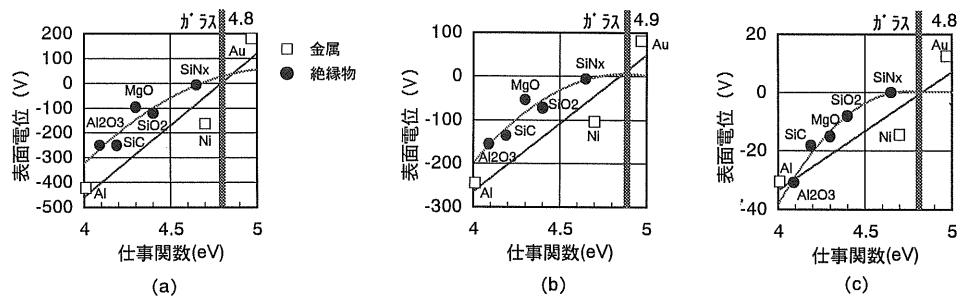


図 11 金属と絶縁物ステージとガラスとの接触時間の違いにおけるガラス電位と仕事関数との関係
(a) 5秒×20回, (b) 10秒×10回, (c) 10秒×1回。

Fig. 11 Surface potential and work function of glass substrate vs the contact time on metal and insulating plates.
(a) 5 s × 20 times, (b) 10 s × 10 times, (c) 100 s × 1 times.

が寄与している可能性が考えられる。

5. まとめ

各種絶縁物ステージと絶縁物であるガラスとを接触させた場合のガラスの帯電電位を測定した結果、以下のことわかった。

(1) 絶縁物ステージにおいて、ガラスの繰り返し接触帶電では、ガラス電位の増加は接触回数に大きな影響を受ける。

(2) 金属ステージと絶縁物ステージとのガラスの1回当たりの接触時間により、帶電電位の増加傾向が異なることがわかった。金属ステージでは1回当たりの接触時間が5秒以上では接触回数に対する表面電位の増加率はほぼ一定であるが、絶縁物ステージの場合は1回当たりの接触時間が1秒以上で、表面電位の増加率はほぼ等しい。

(3) 金属ステージと絶縁物ステージの同じ仕事関数値でガラスの表面電位を比較すると、ガラスの電位の絶対値は金属ステージの方が高い。ただし、接触時間が5秒以上の場合である。

(4) ステージ材が絶縁物の場合においても、金属ステージと同様にガラス帶電には主として電子が寄与する。

参考文献

- 1) G.S.P. Castle : J. Electrostat., **40 & 41** (1997) 13
- 2) D.K. Davies : Br. J. Appl. Phys., **D2** (1969) 1533
- 3) R.G.C. Arridge : Br. J. Appl. Phys., **18** (1967) 1311
- 4) R.G. Cunningham and H.P. Hood : J. Colloid Interface Sci., **32** (1970) 373
- 5) 葛西昭成 : 静電気学会誌, **1** (1977) 46
- 6) Y. Murata : Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1
- 7) 日吉 功, 村田雄司 : 静電気学会誌, **21** (1997) 28
- 8) T. Mizutani, Y. Takai, T. Osawa and M. Ieda : J. Phys. D., **9** (1976) 2253
- 9) T.J. Fabish and C.B. Duke : J. Appl. Phys., **48** (1977) 4256
- 10) C.B. Duke and T.J. Fabish : J. Appl. Phys., **49** (1978) 315
- 11) C.B. Duke : J. Vac. Sci. Technol., **A3** (1985) 732
- 12) 柳田和彦 : 表面科学, **15** (1994) 560
- 13) 村田雄司 : 表面・薄膜分子設計シリーズ 5 「表面・高分子と静電気」, p. 27, 共立出版 (1988)
- 14) 村田雄司 : 固体物理, **27** (1992) 501
- 15) H. Graf von Harrach and B.N. Chapman : Vacuum, **22** (1972) 535
- 16) M. Sclarke, 富士ゼロックス(株)総合研究所 訳 : 「ゼログラフィーの原理と最適化」, p. 53, コロナ社 (1987)
- 17) A. Coehn : Ann. Phys., **43** (1914) 1048
- 18) A. Coehn : Wied. Ann., **64** (1898) 21
- 19) 北林宏佳, 藤井治久, 大石貴之 : 静電気学会誌, **22** (1998) 253
- 20) H. Kitabayashi, H. Fujii and T. Ooishi : J. Electrostat., **40 & 41** (1997) 103
- 21) H. Kitabayashi, H. Fujii and T. Ooishi : Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) 2964