

等価の仕事関数に基づく電子機器搬送工程の 帯電抑制技術

北 林 宏 佳^{*1}, 武 藤 浩 隆^{*}

(2006 年 9 月 15 日受付 ; 2007 年 1 月 20 日受理)

Technology of Charging Control in Conveyance Manufacturing Process of Electronic Machinery on the Basis of the Effective Work Function

Hiro Yoshi KITABAYASHI,^{*1} and Hiro taka MUTO,^{*}

(Received September 15, 2006 ; Accepted January 20, 2007)

Recently in manufacturing process of electronic machinery, the contact electrification of machinery is probable to cause the ESD to the semiconductor devices in the electronic machinery. In particular, this phenomenon can be confirmed in the conveyance process of machinery manufacturing. Therefore it is necessary to provide the countermeasures to the contact electrification. The electrification suppression method based on the effective work function was proposed in order to solve the problem of the contact electrification. According to this method, the electrification is suppressed by applying materials with similar work function to the contact and separation area in the conveyance process of electronic machinery.

1. 電子機器組立工程での静電気発生と課題

最近の様々な電子機器には高集積化した半導体デバイスが搭載されており, これらの半導体デバイスは高機能化・高微細化される傾向にある. 半導体デバイスは高集積化されるほど静電気放電に対する耐性は低下する^{1,2)}. 一方, 電子機器中の基幹部材は絶縁性の高い高抵抗材料が多用されているため, 組立中に発生した電荷は緩和しづらく, 接触分離を繰り返すことにより蓄積され続け電位が上昇する. これらの絶縁部材に帯電した電荷が, 電子機器の端子や配線を介して半導体素子内部に放電することにより, 電子機器が不良となる可能性がある. 近年の製造工程では自動化装置の導入が進み, 組立てられる電子機器表面と製造・搬送装置の表面が接触する工程が多く, 接触分離帯電による静電気放電が発生し易い状況にある.

静電気を抑制する対策は, ①除電装置 (イオナイザ等) の設置による発生電荷の中和, ②電荷の緩和を促進する低抵抗材料の適用, ③電荷発生自体の抑制の 3 種類が上げられる. これらの対策を製造工程へ適用するときそれぞれ問題が発生する. 第一の除電装置の設置は, イオナイザからイオン風を照射することで帯電物を中和させる方法である. しかし, イオナイザの設置箇所が適切でない場合, 製品に対して逆に電荷を注入し, 静電気破壊を生じさせる可能性がある. 第二の対策は, 母材である有機絶縁材料にカーボンブラックや金属粉を混入することで導電性を付与するのが一般的であるが, 長期間の使用により, 混入した材料が浸出し, 工場内の環境や製品の汚染に繋がる可能性がある. 第三の対策は, 帯電の発生そのものを抑制するという本質的な手法である. 本論文で述べる等価の仕事関数に基づく帯電抑制はこの対策に含まれる.

キーワード: 接触分離帯電, 仕事関数, 帯電抑制, 静電気放電, 除電

^{*} 三菱電機 (株) 先端技術総合研究所

(661-8661 兵庫県 尼崎市塚口本町 8-1-1)

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

¹ Kitabayashi.Hiroyoshi@dx.MitsubishiElectric.co.jp

2. 等価の仕事関数を用いた帯電抑制手法

静電気帯電を減らす最良の方法は, 接触分離が避けられない部分に, 帯電電荷が発生しないような材料を使用することである. 二つの異なる材料が接触した場合, 必ずその表面に電荷が発生する³⁾. いくつかの典型的な絶縁材料については

古くから帯電列として知られている。帯電列上、接近した位置にある材料の組み合わせでは帯電を抑制できると報告されている⁴⁾。しかし、材料の帯電特性は母材そのものの特性に加え、添加物の含有量やその表面状態で大きく異なる。また、帯電列上の序列は相対的なものにすぎず、定量的な帯電量を推定することはできない。

接触分離帯電の原因は異なる材料間の電子の移動であり、材料の仕事関数とその電子の移動量、すなわち帯電電荷量を規定する^{5,7)}。仕事関数の差が大きい材料間の接触分離帯電では、発生電荷量が多く、差が小さい材料間では発生電荷量が少ないことが明らかにされている^{8,9)}。このように、これまでの研究では帯電メカニズム解明の物性値として仕事関数が使われてきたが、実工程において仕事関数を静電気抑制に適用した例は見られない。本論文では電気・電子機器の搬送工程において、機器そのものの材料とそれに接触する工程内機器部材の仕事関数を定量的な指標として採用し、仕事関数差の小さい材料を選定することにより、静電気帯電を発生させないという帯電抑制手法について報告する。

具体的な事例として、電子機器搬送工程の中で一般的であり、搬送装置と電子機器との接触分離が避けられない図1に示した以下の二つを検討した。

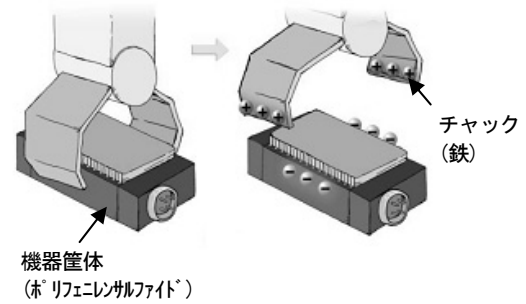
①自動搬送ロボットのアーム先端に設置されたチャック部で機器を掴み、別の場所へ移動させた後、機器がチャック部から分離したときに発生する機器筐体とチャック部表面の接触分離帯電。

②機器を搬送箱に積載して、ローラコンベアで搬送するときに発生する搬送箱とローラ表面との接触分離帯電。

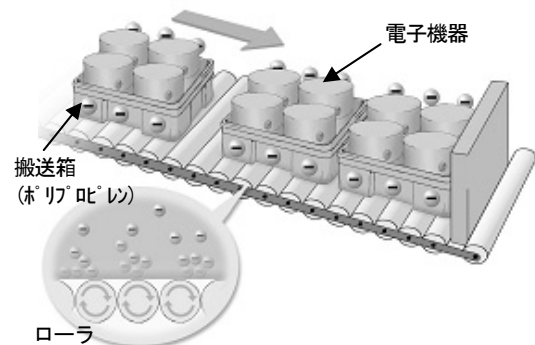
3. 絶縁物の等価の仕事関数の測定

金属材料の仕事関数は紫外線照射により金属中から放出される電子のエネルギー特性から得る光電子法により正確に測定できる。本報告においても金属の仕事関数は市販されている理研計器社製の光電子放出測定装置（AC-1）を用いて光電子放出法で測定した。

一方、絶縁物の場合、帯電による影響などで光電子法による正確な仕事関数の測定は困難である。そこで、既知の仕事関数を有する各金属を、絶縁物に接触分離したときの絶縁物上の帯電電位を測定し、その仕事関数依存性から、等価的な値として求めた¹⁰⁾。金属と絶縁材料との帯電特性は仕事関数差に依存するという前提に立ち、帯電量がゼロとなる仕事関数をその材料の等価の仕事関数とする。等価の仕事関数を接触帯電特性から測定するための金属としてアルミニウム（Al）、ニッケル（Ni）、金（Au）を選定した。Alを基材と



① 機器筐体とチャック部表面の接触分離帯電



② 搬送箱とローラ表面間の接触分離帯電

図1 搬送工程での接触分離帯電

Fig.1 Contact electrification on conveyance manufacturing.

① Package on machinery and surface on chucks.

② Conveyance box and surface on rollers.

してその表面を鏡面仕上げとし、Al, Ni, Au を各々2000 Åずつ蒸着した。これら蒸着した各金属表面の光電子放出法で測定した仕事関数は、それぞれ Al : 4.19eV, Ni : 4.68eV, Au : 4.90eV である。これら金属については酸化の可能性が考えられるが、導通の確認から絶縁物への変化は少なく、この状態で測定した仕事関数値を実用上、各金属の仕事関数値とする。

被測定用の絶縁物試料は、100x100x2mm の大きさに加工した板状試料を用いる。吸湿によるデータのばらつきを抑制するために、測定前には、真空オーブンをを用いて0.1atmの真空中、100℃で2時間、熱処理する。その後、湿度30%に制御されたデシケータに入れて保管する。実験直前に試料をデシケータから取り出し、その両面をイオン送風器で除電した後、帯電特性を測定する。測定はクラス1000のクリーンルーム（温度：23℃、湿度：50%）内で行った。表面電位の測定は次のようにする。Al, Ni, Au を表面に蒸着した帯電用金属を120gの一定重量で、試料に10秒間接触させた。その後、分離し10秒間離した状態を維持する。この操作を10回繰り返した後の試料の表面電位を測定した。表面電位は非接触表面電位計（Monroe Electronics 社製 MODEL279）に接続された

3本のプローブ (1034E) を用いて測定した。1つの材料に対し、試料を2枚準備、各試料に対して上記測定を2回実施した。従って、4回の測定データが得られ、その平均値を採用した。

図2はポリフェニレンサルファイド (PPS)、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE) の等価の仕事関数の測定例である。横軸は絶縁物と接触させた金属の仕事関数を縦軸は絶縁物の表面電位を示す。仕事関数と表面電位は比例関係にあり、本絶縁物の接触分離帯電では電子が主なキャリアであることが予想できる。従って、各直線の電位がゼロとなる横軸との切片の値を等価の仕事関数とする^{9,10}。それぞれの材料の等価の仕事関数は5.1eV, 5.4eVと評価できる。

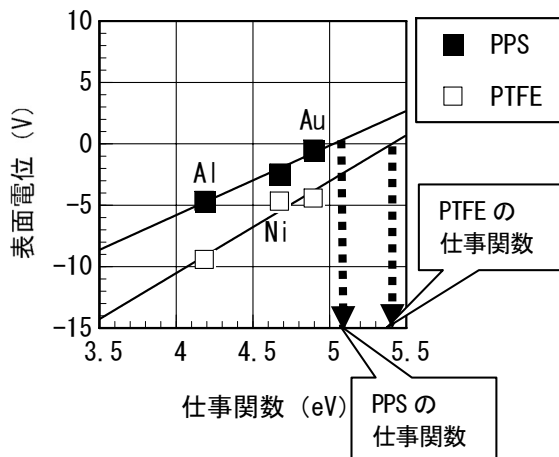


図2 PPS と PTFE の等価の仕事関数の測定

Fig.2 Measurement of effective work function on PPS and PTFE.

4. チャックと機器筐体の接触分離帯電

4.1 帯電抑制チャック材料の検討

自動搬送ロボットで電子機器を搬送するときに、ロボットのアーム先端に設置されたチャック部で機器を掴み、別の場所へ移動させた後、機器がチャック部から分離したときに機器筐体とチャック表面間に静電気が発生する。帯電が問題となった機器の筐体は約 $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ の体積抵抗値であるポリフェニレンサルファイド (PPS) が使用されている。抵抗が高いため接触帯電により発生した電荷は緩和しづらく、接触分離を繰り返している間に、電荷が蓄積し高電位になる。この筐体中には半導体デバイスが搭載されているので、静電気放電が発生した場合にデバイス破壊の原因となる可能性がある。

静電気を抑制する手法として、チャックで機器筐体を掴んで分離しても、筐体が帯電しないチャック材料の選定を検討した。

4.2 機器筐体材料と帯電抑制候補材料の

等価の仕事関数

図1に示した機器筐体は絶縁材料の PPS であり、現状のチャック材料は鉄 (Fe) である。機器筐体の帯電を抑制できるチャック材料の候補として金属と有機高分子材料を検討した。金属材料の候補としてアルミニウム (Al)、金 (Au)、白金 (Pt)、3 種類のステンレス (SUS304, SUS316, SUS440) を選定した。高分子材料の候補として、絶縁性ポリエチレン (PE)、導電性ポリエチレン (PE)、ポリフェニレンサルファイド (PPS: チャック加工用で機器筐体の PPS とは組成が異なる)、および、現状の鉄製チャックに市販のポリイミド溶液を塗布したポリイミド (PI) コートを選定した。

前節の方法で測定したこれらの候補材料の等価の仕事関数値を表1に示した。機器筐体材料である PPS の仕事関数が 5.1eV であるのに対して、現状のチャック材料である鉄の仕

表1 チャック候補と機器筐体材料の仕事関数

Table 1 Work function of materials on chucks and package on machinery.

材 料	仕事関数(eV)
Al	4.2
Au	4.8
Pt	4.9
SUS304	4.7
SUS316	4.8
SUS440	4.7
絶縁性 PE	5.1
導電性 PE	5.0
PPS (チャック加工用)	5.2
PI コート	5.1
現状チャック材料 (Fe)	4.5
機器筐体材料 (PPS)	5.1

事関数は 4.5eV であり、その差が 0.6eV あることから、これらの材料による帯電は大きいと推定される。表1から、等価の仕事関数が機器筐体材料である PPS の仕事関数に近い値を持つ絶縁性 PE と PI コートが最も帯電を抑制できる材料と推定できる。

4.3 チャック候補材料の帯電特性

等価の仕事関数を測定した表1の各材料をチャックの形状に加工し、搬送動作を実施したときの帯電電位を測定した。機器筐体を測定前にイオナイザにより除電した後、アース板上に固定した状態で、3つのチャックが筐体の3箇所を 0.1MPa の一定圧力で、接触と分離の操作を10回繰り返した。その後、チャックと機器筐体は3箇所接触するためその表面電位を表面電位計で測定する。測定に用いた試験サンプル

数は3個で、1つの機器筐体に対し3箇所を接触部位があるので、合計9点の平均を各チャック材料の測定値とした。

図3はチャック候補材料と機器筐体との接触分離による電位を示す。機器筐体に使用されているPPSの仕事関数は5.1eVであり、図中に縦線で示した。図3より機器筐体の表面電位は、チャック候補材料の仕事関数に対して比例関係にあり、チャック材料と筐体材料の接触分離帯電では、電子が主たるキャリアになっていると予想できる。筐体材料(PPS)より小さい仕事関数の材料(Fe, SUSなど)では、筐体側は負極性に帯電し、筐体より大きな仕事関数の材料(PPS)では、筐体側は正極性に帯電する。筐体とチャック材料間の仕事関数差が大きいほど、筐体の帯電量が大きくなる。この図から帯電抑制効果が高い材料は、表1の仕事関数から予測されたように、絶縁性PEとPIコートであり、現状のチャック材料であるFeと比較すると帯電電位が改善できることがわかる。

4.4 実工程での適用性の確認

帯電抑制チャック材料には、筐体PPS材料の等価の仕事関数に等しい材料であるポリイミド(PI)を使用すれば、帯電が抑制できることがわかった。そこで、実際の製造工程で帯電抑制チャックの適用性を確認した。

現在の鉄(Fe)チャック表面にPIコートしたチャックを製作し、通常の製造工程のチャックに適用した。筐体の接触分離帯電電位の結果を図4に示す。現状のチャック材料(Fe)による筐体の表面電位は約-1600Vであった。一方、帯電抑制チャック(PIコート)による筐体の平均電位は約-30Vであり、約1/50以下に筐体の帯電を抑制できることがわかった。

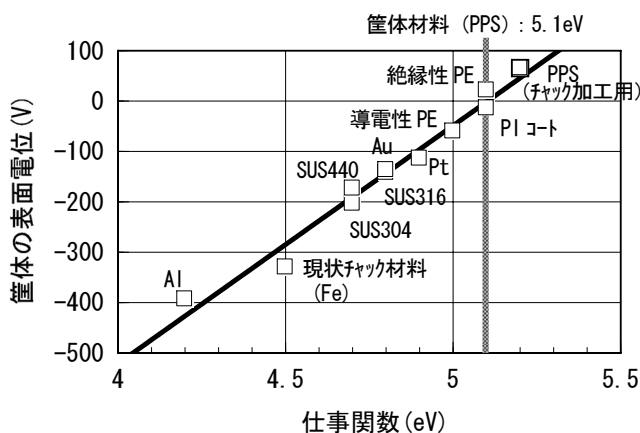


図3 チャック候補材料の仕事関数と機器筐体の表面電位との関係
Fig.3 Relationship between work function of materials on chucks and surface potential of package.

5. コンベアローラと搬送箱の接触分離帯電

5.1 帯電抑制ローラ材料の検討

電子機器を別工程へ移動するとき搬送箱に機器を積載し、ローラコンベア上を箱が自動搬送される場合がある。搬送箱に絶縁材料を適用したときに搬送箱の底面とローラ間で接触分離帯電が生じ、静電誘導により搬送箱中の機器も帯電する。この状態で機器の端子が放電したときには、搭載されている半導体デバイスの破壊に繋がる可能性がある。

搬送箱の底面に発生した静電気を除去する手法として、設置の簡便さやコスト面から、ローラとローラの間の隙間に箱の底面に接触するように除電ブラシを設置することを試みた。しかし、ブラシのみの設置では、ブラシ繊維へのゴミ付着や、ブラシの変形により、短期間で除電効果が悪化することが明らかとなった。その結果、頻繁にブラシを交換する必要がある、ライン管理者の負担が大きくなる。管理者の負担を軽減させるためには、さらにメンテナンス間隔の長い、恒久的な帯電抑制対策を実施することが必要である。

そこで、ローラコンベアにおいて搬送箱が搬送されるときに、搬送箱とローラが接触分離を繰り返しても、搬送箱が帯電しない材料を等価仕事関数に基づき選定し、ローラ表面に巻き付けることで帯電の抑制を検討した。

5.2 搬送箱と帯電抑制候補ローラ材料の

等価の仕事関数値

現状のローラは鉄を主成分とする鋼管である。搬送箱は体積抵抗率が約 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ の絶縁材であり、主成分がポリプロピレン(PP)で、着色剤としての添加剤を含む。ローラ表面に巻くフィルムの候補材料として、市販フィルムの中から絶縁性ポリエチレン(PE)、導電性ポリエチレン(導電性PE)、ポリエステル(PET)、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)、ナイロン(Nylon)を選択した。

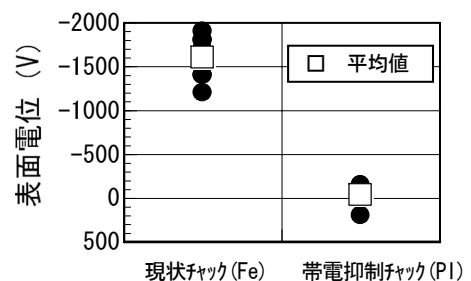


図4 現状と帯電抑制チャックによる実工程での表面電位の比較
Fig.4 Comparison of surface potential at having used existing and charging control chuck in manufacturing process.

これら材料の仕事関数を表2に示す。表2から搬送箱材料 (PP) の仕事関数は 4.9eV であるのに対して、現状のローラの仕事関数は 4.2eV であり、その差が 0.7eV と接触帯電が大きいと推定できる。また、表2から搬送箱との帯電がもっとも抑制できる材料は、等価の仕事関数が等しい導電性 PE であることも推定できる。

5.3 ローラ候補材料の帯電特性

搬送箱の接触分離帯電評価は、工程中に使用されている搬送箱 (寸法: $560 \times 360 \times 200\text{mm}$) を使用し、通常の電気機器の搬送方法と同様に、1個当たりの重量が 4kg の電気機器を搬送箱中に4個入れ、自動搬送のローラコンベア上を搬送させる。搬送後、電気機器を箱から取り出して、空箱をアース板上に設置した 30mm 厚の4個のテフロンスペーサー上に置き、搬送箱底面の4箇所の表面電位を非接触表面電位計 (シムコジャパン社製 FMX-002) を用いて測定した。表2で示した各候補材料をローラに巻いて、そのローラ上を搬送させたときの搬送箱の表面電位を測定した。各候補材料の測定に搬送箱を2個用い、1つの箱で4箇所の面内測定から、合計8点の平均を各ローラ材料による搬送箱の帯電電位測定値とした。

図5はローラに巻いた各種材料の仕事関数とそれらの材料を巻いたローラで発生した搬送箱の接触分離帯電電位を示す。搬送箱材料 (PP) の仕事関数は 4.9eV であり図中に縦線で示した。表2の仕事関数値から推定されたとおり、搬送箱の仕事関数と同じ仕事関数をもつ導電性 PE を巻いたローラでは、表面電位は小さい。また、搬送箱の仕事関数より小さい仕事関数の材料 (PET, Nylon) を巻いたローラでは、搬送箱側は負極性に帯電し、搬送箱の仕事関数より大きな仕事関数の材料 (PE, PTFE) を巻いたローラでは、搬送箱は正極性に帯電している。搬送箱とローラ材料間の仕事関数差が大きいほど、搬送箱の帯電量が大きくなることがわかる。ただし、各種ローラ材料の仕事関数と搬送箱の表面電位は、直線上にプロットされず、比例関係を示していない。特に搬送箱の仕事関数よりもローラ材料の仕事関数が小さい範囲では、約 4eV から 4.9eV までの傾きは小さいが、約 4eV より小さいナイロンが存在する領域で傾きが大きくなり、負極性側へ電位が急激に増加する。

この理由は二つ考えられる。一つ目は接触分離帯電に関与する搬送箱、あるいはローラ材料の接触帯電に影響を及ぼす電子の状態密度の違いによると考えられる。固体高分子の帯電現象を説明するために、Duke らはあるエネルギーの深さを中心にガウス分布する、高分子固有の電子状態が存在するとした帯電モデルを提案している^{11,12)}。このモデルでは高分子表面は電子で満たされ、分子量の分布や分子配列のランダム

表2 ローラ候補と搬送箱材料の仕事関数
Table 2 Work function of materials on rollers and conveyance box.

材 料	仕事関数 (eV)
絶縁性 PE	5.1
導電性 PE	4.9
PET	4.4
PTFE	5.4
Nylon	3.7
現状ローラ材料 (Fe)	4.2
搬送箱材料 (PP)	4.9

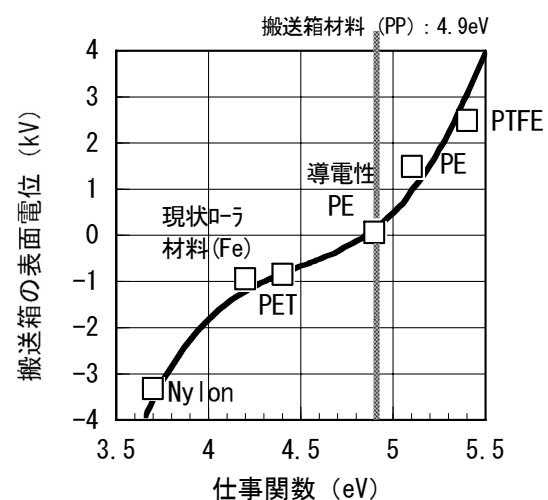


図5 ローラ候補材料の仕事関数と搬送箱の表面電位との関係

Fig.5 Relationship between work function of material on rollers and surface potential of conveyance box.

さの影響を受けて、接触する相手物体に電子を供給できる状態 (ドナー) と、相手物体から電子を受け取ることができる状態 (アクセプター) が存在すると考えている。接触した相手物体の仕事関数との差により、電子が移動するが、これらの高分子材料の電子状態密度は、各々の高分子により異なり、ドナー領域とアクセプター領域の電子の移動数が異なると述べている。従って、図5に示した曲線の傾きは搬送箱とローラに巻いた各材料間のドナー領域とアクセプター領域の電子の分布に依存している可能性が推測される。このモデルを確認するためには、これら材料の電子状態を確認する必要がある。

二つ目はローラ材料と搬送箱の真の接触面積である。ローラ材料の中で Nylon は繊維状のシートであり、他のローラ材料に使用したフィルム生地ではないので、表面形状が異なる。従って、搬送箱との接触面積がフィルム材料よりも大きな

り発生電荷量が増加し、電位が負極性側へ増加した可能性も考えられる。実工程で真の接触面積の測定は難しいので定量的な考察はできない。しかし、ローラ材料との接触により搬送箱の表面電位の極性が材料により異なることは、本測定で明らかであり、これは接触面積に関らず、仕事関数の違いが関与している。

5.4 実工程での適用性の確認

搬送工程において、コンベアローラに帯電抑制材料（導電性 PE）を巻いたローラと、現在、使用している鋼管ローラで搬送後、搬送箱を 5 個積み重ねた状態での最上段の搬送箱の表面電位を測定した。また、鋼管ローラ上を搬送させるときに、ローラ間に除電ブラシを設置し、除電ブラシと帯電抑制材料（導電性 PE）を巻いたローラを併用した場合の結果を図 6 に示す。対策していない鋼管ローラのみ電位は約 -19kV であるが、除電ブラシの設置では -0.5kV、さらに除電ブラシに加え帯電抑制材料のローラ設置では -0.1kV まで抑制することができた。

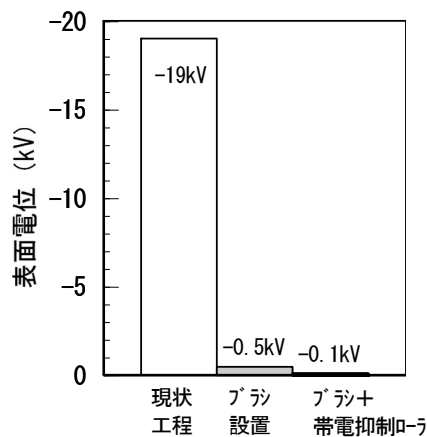


図 6 現状ローラとブラシに加えて帯電抑制ローラを使用したときの実工程での表面電位の比較

Fig.6 Comparison of surface potential at having used existing roller, brush and charging control roller in addition to brush in manufacturing process.

6. まとめ

電子機器搬送工程での静電気帯電の問題を解決する方法として、等価の仕事関数に基づく帯電抑制技術を提案した。本手法は製造工程において接触分離する部分に、仕事関数が近い材料を使用することで帯電を抑制する。自動搬送ロボットアーム先端に設置されたチャック部で、機器を掴み移動させた後、機器がチャック部から分離されたときに発生する機器筐体の接触分離帯電、機器を搬送箱に積載して、ローラコンベアで自動搬送するときに発生する搬送箱とローラ表面間の接触分離帯電のそれぞれについて、等価の仕事関数に基づき材料を選定、適用することで大幅に帯電電位を抑制することを示した。本論文に記載した搬送工程では、帯電電位を抑制する主要因は接触する材料間の仕事関数であった。しかし、適用材料の電気抵抗率等の物性値が製造工程で影響する可能性も考えられ、これらの相関については今後の課題である。

さらに電気・電子機器は、高機能化・高微細化され、静電気放電による不良が発生しやすい状況が続くと推測できる。電荷を中和するイオナイザの設置や導電性材料の適用は今後も必要である。一方、電荷の発生そのものを抑制するという本質的な対策が、今後、ますます重要になると考えられる。本論文で述べた等価の仕事関数に基づく電子機器搬送工程での帯電抑制手法は、その有効な手段となる。

参考文献

- 1) L.B. Levit and J. Menear: Solid State Technol, **41** (1998) 85
- 2) 丸治彦, 杉本泰彦, 五月女清孝, 市川和男: 静電気学会誌, **26** (2002) 11
- 3) 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.16, 共立出版(1988)
- 4) 静電気学会: 新版 静電気ハンドブック, p.1026, オーム社 (1998)
- 5) R.G.C. Arridge: Brit. J. Appl. Phys., **18** (1967) 1311
- 6) Y.Murata: Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1
- 7) 北林宏佳, 藤井治久, 大石貴之: 静電気学会誌, **22** (1998) 253
- 8) H. Graf von Harrach and B.N. Chapman: Vacuum, **22** (1972) 535
- 9) D.K. Davies: Brit. J. Appl. Phys., **D2** (1969) 1533
- 10) 北林宏佳, 藤井治久: 静電気学会誌, **27** (2003) 240
- 11) T.J. Fabish and C.B. Duke: J. Appl. Phys., **48**, 1 (1977) 4256
- 12) C.B. Duke and T.J. Fabish: J. Appl. Phys., **49**, 1 (1978) 315