

論 文

圧縮された2枚のプラスチックシートの空気中 およびシリコン油中での分離による帯電

白井正治*

(1982年5月24日受理)

Electric Charges Produced by Separation of Two Compressed Plastic Sheets in Air or Silicone Oil

M. SHIRAI*

(Received May 24, 1982)

The mechanism of the electrification produced by separation of two compressed plastic sheets was investigated experimentally. When two compressed plastic sheets were separated in air or silicone oil, electric charge produced on each sheet was measured by an electrometer and the charge distribution was observed by use of a dust figure. The charges produced on two sheets separated in air were smaller than those produced by the separation in silicone oil. Ununiform charge distributions were produced on the surfaces of the two sheets separated in air. When a plastic sheet was compressed to a photographic film in air and they were separated in air or silicone oil, a discharge pattern was observed on the only film which was developed after the separation in air. However, the discharge did not occur at the separation in silicone oil. The charges produced on the two sheets separated in air were discharged and reduced at the separation and the ununiform charge distributions were produced on the surfaces of the two sheets.

1. 序

絶縁物と絶縁物の接触による帯電に関して、Roseらは誘電体の球を誘電体や金属の円板に25 kgの圧力で押しつけて分離し、円板に生ずる電荷量を測定したり¹⁾。また、DaviesやDukeらは絶縁物と金属の接触帯電の実験結果から絶縁物と絶縁物の接触帯電の機構について推論している^{2),3)}。著者はこの帯電を応用して、表面に凹文字などの紋様のある紙をプラスチックシート面に圧縮し、電荷図形を用いて紙面の紋様をシート面に転写・検出する実験を行ない報告したり⁴⁾。

プラスチックシートなどを空気中で圧縮・分離する場合、それによって生ずる帯電は放電により減少することが考えられる。本研究では、空気中で圧縮・分離された2枚のプラスチックシートの帯電状態を調べるために異種、または同種のプラスチックシートを空気中で圧縮し

た後、空気中とシリコン油中で分離し、それぞれの分離において2枚のシートに生ずる電荷量を測定して比較するとともに、シート面に生ずる電荷分布を Pb_3O_4 と硫黄の混合粉末による電荷図形⁵⁾を用いて調べた。そして空気中での圧縮・分離によりプラスチックシート面に生じた電荷が放電することを確かめるために、プラスチックシートを写真フィルムの感光面に圧縮・分離し、写真フィルムの感光とプラスチックシート面に得られる電荷図形を調べた。その結果、空気中で圧縮・分離されたプラスチックシート面に生ずる電荷は、分離の際の放電により失われ、シート面に不均一な電荷分布が生ずることがわかったので以下に報告する。

2. 実験方法

図1(a)に2枚のプラスチックシートの圧縮方法を示す。試料には、塩化ビニール(硬質)、ポリエステル(飽和)、およびポリカーボネートの3種の鏡面にロールされたシートを用いた。これらのシートはこれまでの静帯電の実験によく用いられており、本実験の機械的圧縮にも耐えられる。シートの厚さは0.1 mm、形は30 mm×40 mmの長方形の一端に5 mm×4 mmの把持部分をも

* 日本大学生産工学部電気工学科 (275 習志野市泉町 1-2-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nihon University, 2-1, Izumi-cho 1-chome, Narashino, 275 Japan

つ形とした。実験に先立ち、各シートの残留電荷はそれらをアルコール等の有機溶媒により洗浄した後、約70°Cの温水中に浸し、空気中で乾燥させることにより除去された。電荷が除去されたことは電位計と電荷図形によって確認した。

2枚のプラスチックシートA, Bは上下に重ね合わせおのおの背面を厚さ40μmのアルミ箔C, Dで覆った後、直径30mm、厚さ10mmの2枚のステンレス円板E, Fの平滑な面の間に挟み、プレスの頭部Iと台座Jの間で圧縮した。各シートの背面をアルミ箔で覆うのは圧縮後のシートとステンレス板との分離を容易にするためである。なお、2枚のシートが均一に圧縮されるように上下のステンレス板とプレスの頭部や台座の間に、厚さ0.5mmの塩化ビニール板G, Hを置いた。

圧縮後、アルミ箔で背面を覆われた2枚のシートをプラスチック製の絶縁把手で分離しないように取り出して図1(b)のファラデーケージ(自作)Fに入れ、振動容量型電位計(TR-8401)Eにより全体の電荷量がゼロであることを確認した後、各シートの把持部分を2本の絶縁把手で把持して、空気中または100cStのシリコン油中で上下にほぼ一様な速さで分離した。分離時間は約3.5秒である。なお、シートを絶縁把手で把持する際、把持部分に帯電を生じないように、シートの把持部分とプラスチック製の絶縁把手の先端をアルミ箔で覆った。

分離されたシートSに生じた電荷量は図1(b)の測定装置で測定した。ファラデーケージの静電容量を C_F 、コンデンサ C_0 の容量を C 、電位計の入力端子間の容量を C_E とし、電位計の指示値を V とすると、シートの電荷量 Q は $Q=(C_F+C+C_E) \cdot V$ として求まる。図1(b)の装置では $C_F+C+C_E=9,800$ pFである。

分離されたプラスチックシート面の電荷分布は Pb_3O_4 と硫黄の300 mesh以下の混合粉末を散布して得られる電荷図形⁵⁾により調べた。混合粉末中の Pb_3O_4 粉末は硫黄粉末との摩擦によって正に、硫黄粉末は負に帯電しているの、シート面の負に帯電した部分には Pb_3O_4 粉末が、正に帯電した部分には硫黄粉末が付着してシ-

ト面に電荷図形が得られる。この電荷図形からシート面の電荷分布を知ることができる。

分離されたプラスチックシート面に生ずる電荷の放電を確認するために、シートを写真フィルムの感光面に重ね遮光性の紙袋に入れて圧縮した後、これらを暗室内の空気中またはシリコン油中で分離し、フィルムに生ずる感光像とシート面に得られる電荷図形を調べた。なお実験は温度25°C、相対湿度約70%の室内で行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮の圧力と電荷量

分離されたシートに生ずる電荷量は圧縮の圧力により異なる。図2は塩化ビニールとポリエステルシートを空気中で種々の圧力で圧縮して分離した際に各シートに生じた電荷量を測定した結果である。2枚のシートに生ずる電荷量は圧力が400 kg/cm²くらいまでは圧力とともに増加するが、400 kg/cm²を超えると電荷量の増加は鈍くなり、1,000 kg/cm²以上ではほぼ一定になる。この傾向は他のプラスチックシートの組合せでも同様に見られた。1,800 kg/cm²前後の圧力による圧縮ではシートに生ずる電荷量への影響がほぼ一定の状態ではシートを密着することができる。したがって、以下の実験では、圧縮はすべて1,800 kg/cm²の圧力で約20秒間行なうことにした。

3.2 空気中で圧縮・分離された2枚のプラスチックシートに生ずる電荷

3種のプラスチックシートをそれぞれ材質の異なるシートや材質の同じシートと組み合わせて、これらを空気中で圧縮・分離し、各シートに生じた電荷量を測定した。実験は各組合せについて、試料をかえて10回行ない、各シートに生じた電荷量の平均値と動揺の程度(平均値に対する標準偏差の割合)を求めた。

(1) 異種のプラスチックシートに生ずる電荷

表1に2枚の異種のプラスチックシートについて得られた結果を示す。塩化ビニールシートとポリエステルシートを圧縮・分離した場合、塩化ビニールシートは負に、ポリエステルシートは正に帯電する。また、ポリエステルシートとポリカーボネートシートの場合には、ポリエステルシートの帯電は塩化ビニールシートとの組合せの場合と逆に負に帯電し、ポリカーボネートシートは正に帯電する。ポリカーボネートシートと塩化ビニールシートの場合には、ポリカーボネートシートは正に、塩化ビニールシートは負に帯電した。いずれの場合にも、分離された2枚のシートに生ずる電荷は互いに逆極性でほぼ等量となった。これは2枚のシート間に電荷の移動が生じたことを示している。各シートの帯電の極性や電

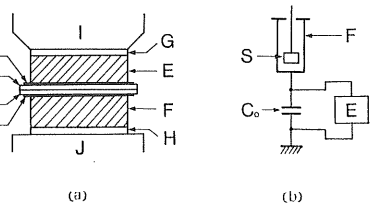


図1 実験装置略図(a)および電荷測定装置(b)
Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement (a), and apparatus (b) for measuring the charge of a plastic sheet.

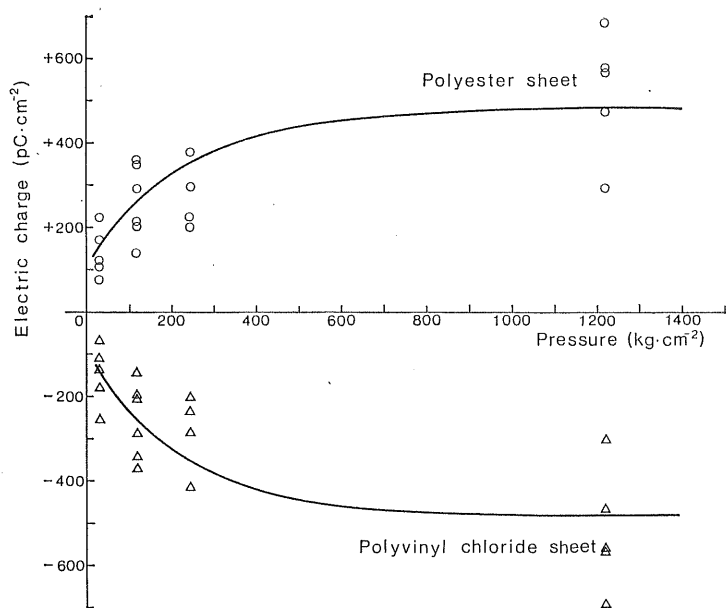


図2 種々の圧力で圧縮された塩化ビニールシートとポリエステルシートに生ずる電荷

Fig. 2 Charges produced by separation of a polyvinyl chloride sheet and a polyester sheet which were compressed with various pressure.

表1 圧縮された異種のプラスチックシートの空気中での分離により生ずる電荷

Table 1 Charges produced by separation of two different compressed plastic sheets in air.

Polyvinyl chloride sheet backed with Al-foil	-480 pC/cm ²
Polyester sheet backed with Al-foil	+480 pC/cm ²
Polyester sheet backed with Al-foil	-370 pC/cm ²
Polycarbonate sheet backed with Al-foil	+390 pC/cm ²
Polycarbonate sheet backed with Al-foil	+310 pC/cm ²
Polyvinyl chloride sheet backed with Al-foil	-330 pC/cm ²

荷量が組み合わされるシートにより異なるのは、シート間を移動する電荷量が2枚のシートの材質によって決まるからであろう。3種のシートの帯電の極性関係はこれまでに発表された帯電列^{6,7)}とほぼ一致する。なお、3種の組合せの各シートに生ずる電荷量には大きな動揺が見られた。平均値に対する標準偏差の割合は、いずれも55~60%となった。この動揺は2枚のシートの圧着状態や分離の際に生ずる放電などに起因していると思われる。なお、実験の前後における各シートの厚みをマイクロメータで測定した結果、厚みの変化は見られなかった。

(2) 同種のプラスチックシートに生ずる電荷

3種のプラスチックシートそれぞれについて同じ材質

の2枚のシートを組み合わせて空気中で圧縮・分離し、各シートに生ずる電荷量を測定した結果を表2に示す。どのシートの組合せについても分離された2枚のシートには、互いに逆極性でほぼ等量の電荷が生じた。各シートに生ずる電荷量は2枚の異種のシートの圧縮・分離の場合より小さい。また、各シートに生ずる電荷量の動揺の程度は、3種のシートとも平均値の40~50%となった。

同種のシートの帯電は、各シートの表面の状態や圧着された2枚のシート面の分離などに起因するものと思われる。これに関連して、白雲母板を2枚の薄板に剝離し、各薄板に生ずる電荷を測定した結果、2枚の薄板には200~300 pC/cm²の正・負ほぼ等量の電荷が生じた。

表 2 圧縮された同種のプラスチックシートの空気中での分離により生ずる電荷
Table 2 Charges produced by separation of two same compressed plastic sheets in air.

Plastic sheets	Charges of one sheet (pC/cm ²)	Charges of other sheet (pC/cm ²)
Polyvinyl chloride sheets backed with Al-foil	+360	-380
Polyester sheets backed with Al-foil	+260	-280
Polycarbonate sheets backed with Al-foil	+310	-300

表 3 圧縮された異種のプラスチックシートのシリコン油中での分離により生ずる電荷
Table 3 Charges produced by separation of two different compressed plastic sheets in silicone oil.

Polyvinyl chloride sheet backed with Al-foil	-2,070 pC/cm ²
Polyester sheet backed with Al-foil	+1,830 pC/cm ²
Polyester sheet backed with Al-foil	-1,950 pC/cm ²
Polycarbonate sheet backed with Al-foil	+2,090 pC/cm ²
Polycarbonate sheet backed with Al-foil	+2,370 pC/cm ²
Polyvinyl chloride sheet backed with Al-foil	-2,090 pC/cm ²

3.3 シリコン油中で分離された2枚のプラスチックシートに生ずる電荷

空気中で圧縮・分離された2枚のプラスチックシートに生ずる電荷は分離の際に放電の影響を受けているものと思われる。そこで、空気中で圧縮された2枚の異種、または同種のプラスチックシートをシリコン油中で分離して各シートに生ずる電荷量を測定し、空気中で分離した場合と比較した。シリコン油中で分離する場合、各シートの電荷の放電は生じにくい。

(1) 異種のプラスチックシートの場合

塩化ビニールシートとポリエステルシート、ポリエステルシートとポリカーボネートシート、およびポリカーボネートシートと塩化ビニールシートの3種の組合せを空気中で圧縮した後、シリコン油中で分離し、各シートに生じた電荷を測定した。表3は各組合せの分離された2枚のシートに生じた電荷量の平均値を示す。表に示すように、分離された各組合せの2枚のシートには空気中での分離の場合と同様に、互いに逆極性でほぼ等量の電荷が生ずる。各シートの帯電極性は空気中での分離の場合と変わらない。しかし、電荷量は空気中での分離の場合と比べて、塩化ビニールシートとポリエステルシートの組合せで約4倍、ポリエステルシートとポリカーボネートシートの組合せで約5倍、ポリカーボネートシートと塩化ビニールシートの組合せで約7倍となった。また各

シートに生ずる電荷量の平均値に対する標準偏差の割合は、各組合せとも空気中での分離の場合より小さく、20~30%となった。シートに生ずる電荷量が空気中での分離に比べて大きく、その動揺が小さくなるのは、各シートに生ずる電荷の放電がシリコン油により妨げられるからであると思われる。シリコン油は常温常圧の空気の不純物破壊強度 3kV/mm の10倍以上の強度をもつ。シリコン油中で分離されたシートの電荷量の測定値のなかには、空気中で分離する場合の最大値と考えられる 2,700 pC/cm² を越えるものも見られた。

なお、シリコン油に試料のプラスチックシートとアルミ箔を浸して、それらに生ずる電荷量を測定した結果、各シートには 0~50 pC/cm² の負の電荷が、アルミ箔には 0~20 pC/cm² の正の電荷が測定された。このことは試料がシリコン油に浸されることによる影響がわずかであったことを示している。

(2) 同種のプラスチックシートの場合

塩化ビニール、ポリエステルおよびポリカーボネートのおおの2枚のシートを空気中で圧縮した後、シリコン油中で分離し、各シートに生じた電荷量を測定した。表4に各シート面に生じた電荷量の平均値を示す。空気中の分離の場合と同様に2枚のシートに生ずる電荷量は正・負ほぼ等量であるが、その量は空気中での分離の場合より大きく塩化ビニールシートとポリエステルシート

表4 圧縮された同種のプラスチックシートのシリコン油中での分離により生ずる電荷
Table 4 Charges produced by separation of two same compressed plastic sheets in silicone oil.

Plastic sheets	Charges of one sheet (pC/cm ²)	Charges of other sheet (pC/cm ²)
Polyvinyl chloride sheets backed with Al-foil	+1,610	-1,470
Polyester sheets backed with Al-foil	+820	-740
Polycarbonate sheets backed with Al-foil	+420	-420

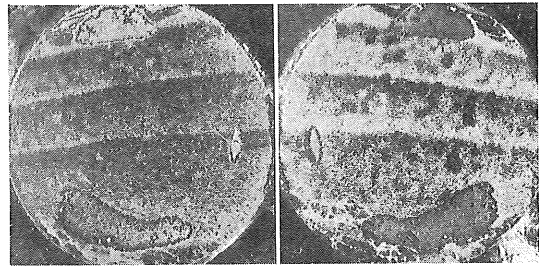
で3~5倍, ポリカーボネートシートで1~2倍となった。また, 各シートに生ずる電荷量の動揺の程度は, いずれも空気中の分離の場合より小さく, 各平均値の25~30%になった。電荷量の増加と動揺の減少はシート面に生じた電荷の放電がシリコン油により妨げられることに起因すると思われる。なお, 白雲母板をシリコン油中で剥離した結果, 空気中での剥離の約4倍の800~1,200 pC/cm²の電荷が測定された。

3.4 電荷図形によるシート面の電荷分布の観察

空気中で圧縮・分離された2枚のプラスチックシート面の電荷分布をPb₃O₄と硫黄の混合粉末による電荷図形により調べた。

図3は空気中で圧縮・分離された塩化ビニールシートとポリカーボネートシートの各分離面に得られた電荷図形である。(a)は塩化ビニールシート面に得られたもので, 円形に圧縮された部分に灰色に見えるPb₃O₄粉末が広く付着しているのが見られる。横線状のむらが生じている。また, 圧縮部分の上部と下部および右端の部分に白く見える斑紋状の硫黄粉末の付着が生じているのが見られる。この電荷図形から, 分離された塩化ビニールシート面に負の帯電部分のほかに, 正に帯電した部分が生じていることがわかる。シート面は全体として負に帯電している。(b)は(a)の塩化ビニールシートから分離されたポリカーボネートシート面に得られた電荷図形である。圧縮されたシート面に硫黄粉末の付着した部分やPb₃O₄粉末の付着した斑紋が生じているのが見られる。(b)で硫黄粉末が付着している部分は(a)のPb₃O₄粉末の付着部分と対応している。また, (b)のPb₃O₄粉末の付着した斑紋は(a)の硫黄粉末の斑紋と対応している。このことはポリカーボネートシート面の帯電極性が塩化ビニールシート面の帯電極性と逆になっていることを示している。(b)の電荷図形から, ポリカーボネートシート面の帯電は一樣ではなく, 全体として正になっていることがわかる。

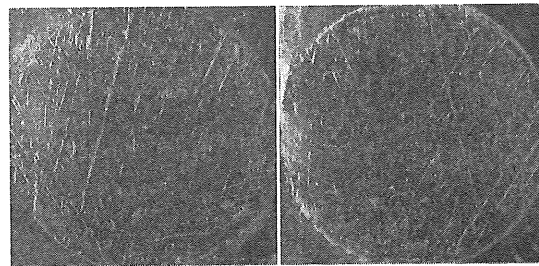
(a), (b)両電荷図形に現われた横線状の粉末の付着むらは, 両シートの分離速度のむらによって生じたものであ



(a) Polyvinyl chloride sheet (b) Polycarbonate sheet

図3 空気中で分離された塩化ビニールシートとポリカーボネートシートに得られた電荷図形

Fig. 3 Dust figures obtained on the polyvinyl chloride sheet and polycarbonate sheet which were separated in air.



(a) Polyvinyl chloride sheet (b) Other polyvinyl chloride sheet

図4 空気中で分離された2枚の塩化ビニールシートに得られた電荷図形

Fig. 4 Dust figures obtained on the two polyvinyl chloride sheets which were separated in air.

ると思われる。また, 部分的に極性が逆の, 粉末が斑紋状に付いている部分は接触面の状態の差異や両シート面に生じた電荷の放電に起因するものと思われる。

図4は, 2枚の塩化ビニールシートを空気中で圧縮・分離した場合に各シート面に得られたものである。図3の電荷図形と比べて, 粉末の付着量は少ない。(a)では圧縮された部分にPb₃O₄粉末の付着が見られる。そのなかに線状の硫黄粉末の付着が生じている。(b)は(a)の塩化

ビニールシート面から分離されたもう一方の塩化ビニールシート面に得られたもので、圧縮された部分に硫黄粉末の付着が見られる。そのなかに、線状の Pb_3O_4 粉末の付着が生じているのが見られる。これらの電荷図形から、2枚の塩化ビニールシートの一方は全体として負に、他方は全体として正に帯電していることがわかる。各シート面には全体の帯電と逆極性の帯電部分が生じているが、このような不均一な電荷分布は2枚のシートの接触面の状態や、各シート面に生じた電荷の放電に起因するものと思われる。

3.5 圧縮されたプラスチックシートと写真フィルムの分離の際に生ずる放電

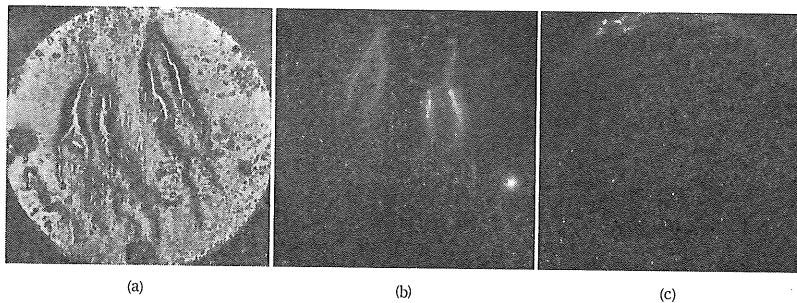
空気中での圧縮・分離によりプラスチックシート面に生ずる電荷の放電を確かめるために、プラスチックシートを写真フィルムの感光面に重ねて圧縮した後、これらを空気中とシリコン油中で分離して、写真フィルムに生ずる感光像とシート面に得られる電荷図形を調べた。

図5はポリカーボネートシートを写真フィルムの感光面に圧縮して分離した場合の結果である。写真フィルムには ASA-100 の Fuji-Neopan SS シートフィルムを使用し、これを ASA-600 に増感して現像した。

実験に先立ち、2枚の写真フィルムを感光面を合わせて空気中で圧縮・分離し、それらに生ずる帯電と感光を調べた。両フィルムには $0\sim 60\text{pC/cm}^2$ の正負の電荷が生ずるが、感光はほとんど生じないことを確認した。写真フィルムの感光面にポリカーボネートシートを重ねて空気中で圧縮・分離した結果、ポリカーボネートシートは負に、写真フィルムは正に帯電した。両者に生ずる電荷量は約 430pC/cm^2 でほぼ等しくなった。図5(a)は空気中で写真フィルムから分離されたポリカーボネートシート面に得られた電荷図形である。圧縮された部分に

多くの Pb_3O_4 粉末が付着している。そのなかに硫黄粉末が樹枝状に付着している部分が現われている。この硫黄粉末の樹枝状部分の周囲には粉末の付かない部分が生じているのが見られる。この電荷図形から、全体の帯電が負であるポリカーボネートシート面に、樹枝状の正に帯電した部分や、帯電していない部分が生じていることがわかる。図5(b)は(a)のポリカーボネートシートから分離された写真フィルムの感光像を印画紙に焼き付けたものである。圧縮された部分に弱い感光が生じている。そのなかに、やや散漫な樹枝状の強い感光が生じているのが見られる。この樹枝状の感光は図5(a)の電荷図形に現われた樹枝状部分とほぼ重なる。この感光はポリカーボネートシートと写真フィルムを分離した際に、両者に生じた電荷が放電したことを示している。図5(a)の電荷図形に生じた粉末の付かない樹枝状部分は、放電により電荷が中和された部分であり、その中央に生じた樹枝状の硫黄粉末の付着は放電による二次的な帯電によるものと考えられる。また、図5(b)の写真フィルムに見られる弱い感光部分はフィルム面に生じた電荷の微弱な放電によるものと思われる。ポリカーボネートシートと写真フィルムをシリコン油中で分離した場合、両者に生ずる電荷量は約 $900\sim 1,000\text{pC/cm}^2$ と大きくなるが、分離された写真フィルムには図5(c)に示すように、感光はほとんど生じない。これは両者に生じた電荷の放電がシリコン油によって妨げられるためである。

以上の結果から、ポリカーボネートシートと写真フィルムを空気中で圧縮・分離する場合には、両者に生ずる電荷は分離の際の放電により失われ、ポリカーボネートシート面に不均一な電荷分布が生ずることがわかる。



(a) A dust figure on a polycarbonate sheet separated from a photographic film in air, (b) A discharge pattern caused on the photographic film separated from a polycarbonate sheet of (a), (c) A pattern caused on a photographic film separated from a polycarbonate sheet in silicone oil.

図5 写真フィルムとポリカーボネートシートの分離により生ずる放電図形
Fig. 5 Discharge patterns caused by separation of a photographic film and a polycarbonate sheet.

4. 結 論

本研究で得られた以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 空気中で圧縮・分離された2枚の異種のプラスチックシートには互いに極性が逆でほぼ等量の電荷が生じた。各シートの帯電極性は組み合わせられる2枚のシートの材質によって決まる。本実験では、(-)塩化ビニール、ポリエステル、ポリカーボネート(+)の帯電列が得られた。

(2) 同種のプラスチックシートの圧縮・分離、および雲母板の剝離の場合にも、正・負ほぼ等量の電荷が生じた。

(3) 空気中で圧縮された2枚のプラスチックシートをシリコン油中で分離した場合、各シートに生ずる電荷量は空気中で分離した場合に比べて大きくなり、その動揺は逆に小さくなった。帯電列は空気中と同様になった。

(4) 空気中で圧縮・分離された2枚のプラスチックシート面の電荷分布を Pb_3O_4 と硫黄の混合粉末による電荷図形により調べた結果、各シート面には不均一な帯電部分が生じていることがわかった。

(5) 写真フィルムの感光面にポリカーボネートシートを重ねて圧縮し、これらを空気中で分離した結果、分離の際に両者に生ずる電荷の放電がフィルムに感光した。シート面にはフィルムに生じた感光に対応する不均一な

電荷図形が得られた。分離をシリコン油中で行なった場合、写真フィルムはほとんど感光しなかった。

以上のことから、2枚のプラスチックシートを空気中で圧縮・分離する場合、両シートに生ずる電荷は分離の際の放電により失われ、各シート面に不均一な電荷分布が生ずることがわかる。空気中で圧縮された2枚のプラスチックシートをシリコン油中で分離する場合には放電は生じにくいので、各シートに空気中の分離の場合よりも大きな帯電が生ずると考えられる。

終りに本研究に際し、終始ご指導とご鞭撻を賜った東北大学名誉教授林威先生に心から感謝申し上げます。また、実験の便宜を図ってくださった本学の斉藤勝己教授に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) G.S. Rose and S.G. Ward: Br. J. Appl. Phys., 8 (1957) 121
- 2) D.K. Davies: Adv. Stat. Electrification, 1 (1970) 10
- 3) C.B. Duke and T.J. Fablich: J. Appl. Phys., 49 (1978) 315
- 4) 白井正治: 静電気学会誌, 6 (1982) 255
- 5) Y. Toriyama: *Dust Figure of Surface Discharge and Its Application*, Chap. 1-2, Kinokuniya, Tokyo (1961)
- 6) 竹中治夫, 上野 弥: Plast. Age, 10, 6 (1964) 53
- 7) 土田英俊, 篠原 功: 高分子, 16, 179 (1967) 347