

論 文

帯電したプラスチックシートからの
静電気放電の等価エネルギー藤岡 清悟*, 藤井 陽三*, 中塚 木代春*
澤 栗 安美*, 増田 閃一**

(1978年12月27日受理)

Equivalent Energy of Discharges from Electrically
Charged Plastic SheetsS. FUJIOKA,* Y. FUJII,* K. NAKATSUKA,*
Y. SAWAGURI* and S. MASUDA**

(Received December 27, 1978)

The ignition energy of acetone-air mixtures was measured in relation to the concentration of acetone vapour. It has the minimum value when the concentration of acetone in air is 5.8%, and the value is 0.63 mJ. The value increases very quickly with decreasing concentration of acetone and is 1.4 J at 3.3% concentration. The equivalent electrical energy of discharges appeared between plastic sheets contacted with a grounded back conductor and grounded spherical electrodes was measured. When a polyester sheet with 0.1 mm thickness was charged to 510 nC/cm², a discharge having equivalent energy of 1.4 J appeared between the sheet and a spherical electrode of 20 mm diameter, and the discharge could ignite an acetone vapour of 3.3% in air. But leaner mixtures of 2.6-3.2% could not be ignited even by discharges from the sheet charged to 860 nC/cm². To produce discharges having a some equivalent energy, a higher charge density was required with thinner sheets and/or larger spherical electrodes.

1. はじめに

前報¹⁾で述べたように、染料製造工程で生じた小爆発事故の原因究明を目的として、プラスチックシートからの静電気放電の着火力について実験を行なった。爆発した物質はアセトン-空気混合気以外にはないと考えられるのであるが、そのアセトン濃度は実測によると0.3~3.3%と希薄であり、通常の条件下で発生しうる静電気放電ではとうてい着火不可能であると思われた。しかしながら前報¹⁾の実験によって、接地した密着背後導体(以下、背後導体と記す)を有する薄い絶縁物シートにはきわめて多量の電荷が帯電して、これが放電するときわめて着火力が強い沿面放電を伴った火花放電が生ずることが明らかとなり、これは Heiderberg²⁾ によっても確

認されている。

本報では、着火性の強い沿面放電の等価エネルギーを求めるために、

- (1) アセトン-空気混合気の各濃度における最小着火エネルギー測定
- (2) 背後導体を持つプラスチックシートからの放電による種々の濃度のアセトン-空気混合気への着火実験

を行なった。その結果、上記の放電の等価エネルギーが明らかとなるとともに、条件さえ整えば3.3%のアセトン-空気混合気に着火しうるほど強力な静電気放電が生ずることを再確認することができたので報告する。

2. 実験方法ならびに実験結果

2.1 実験装置

前報¹⁾に示したのと同じ装置を用いてプラスチックシートを帯電させ、この電荷の放電によるアセトン-空気混合気の着火性を調べた。全実験を通じて次の条件を固定した。

- (1) 試料プラスチックシートに背後導体を設置した(背後導体非密着の場合にはアセトンと空気の混合

* 住友化学工業株式会社大阪製造所研究部 (554 大阪市此花区春日出中 3-1-98)

Research Department, Osaka Works, Sumitomo Chemical Co., Ltd., 3-1-98, Kasugade-naka, Konohana-ku, Osaka 554, Japan

** 東京大学工学部電気工学科 (113東京都文京区本郷 7-3-1) Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

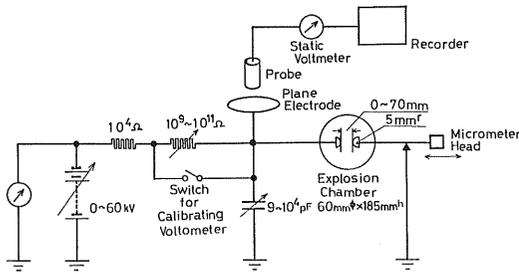


図1 最小着火エネルギー測定装置の模式図
Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for determining minimum ignition energy.

割合が化学量論比の混合気でも着火しなかった。

- (2) 試料シートとして電荷の減衰が遅い厚さ 0.1 mm および 2.0 mm のポリエステルシートを用いた。
- (3) 試料シートには電圧印加法により負電荷を帯電させた(正の場合よりも着火性の強い放電を生ずる²⁾)。

次にアセトン-空気混合気各濃度における最小着火エネルギーを測定するために図1の装置を製作使用した。爆発容器は直径 60 mm, 高さ 185 mm の SUS 製で、容器内に設置した直径 10 mm の一対の球電極間に容量性火花放電を発生させ、アセトン-空気混合気の着火性を調べた。放電のエネルギーは放電回路の静電容量 C と火花放電開始電圧 V_s とを測定して $CV_s^2/2$ として求めた。ただし、放電開始電圧は、放電電極に直結した電位測定用平板電極の電圧を記録計付きの校正した静電電位計で連続記録して求めた。

放電回路のインダクタンスと抵抗は可能なかぎり小さくして損失を最小にしたが、火花放電の持続時間はとくに制御しなかった。

2.2 アセトン-空気混合気各濃度における最小着火エネルギーの測定

直径 10 mm の一対の半球電極間に生ずる容量性火花放電を着火源として、種々の濃度のアセトン-空気混合気

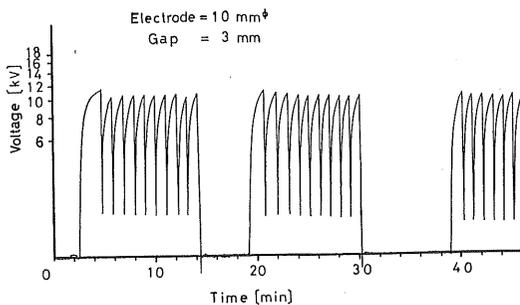


図2 放電回路の充放電の様子
Fig. 2 Aspect of charging and discharging in discharge circuit.

の最小着火エネルギーを測定した。放電回路の充放電の様子を図2に示す。

図で直流高圧電源のスイッチを入れると回路が充電されて放電電極の電圧が徐々に上昇し、放電電圧に達すると火花放電を生じ電圧が急激に降下する。このあと再び回路が充電されて次の放電を生ずる。図の各ピークの電圧が放電電圧であり、この値は実験条件を一定に保つても 10~20% の幅で変動した。電極付近に適量のイオンを発生させて放電電圧を安定化する方法³⁾があるが、本実験ではこのような特別な処理をしなかったので放電電圧が変動したものと考えられる。また図2では、放電時に放電電極の電圧が 0V まで降下していないが、これは記録計の応答が遅いため、オシロスコープにより放電時に電圧が 0V まで降下することを確認した。そこでコンデンサに蓄積された全エネルギーが放電時に放出されるものとして放電エネルギーを $CV_s^2/2$ から算出しても良いことが確かめられた。

火花放電による着火エネルギーを測定するとき、電極間距離を短くすると消炎距離に近づき大きな着火エネルギーを要するといわれている⁴⁾。図3に 4.4% のアセトン-空気混合気最小着火エネルギーと電極間隔との関係を測定した結果を示す。図より電極間隔が 3.0 mm よりも小さくなると最小着火エネルギーが急激に大きくなることが知られる。したがって以下の実験では電極間隔を 3.0 mm 以上とした。

アセトン-空気混合気種々の濃度における最小着火

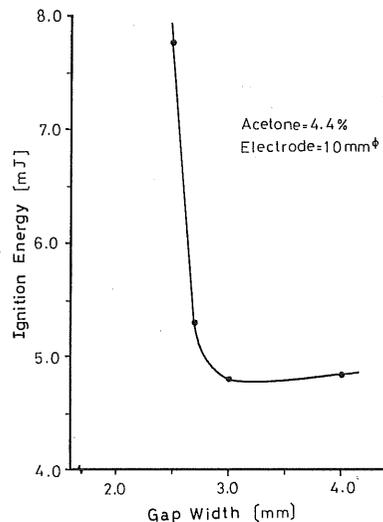


図3 最小着火エネルギーと電極間隔との関係 (アセトン 4.4%, 電極径 10 mm)
Fig. 3 Relationship between minimum ignition energy and electrode distance (Acetone conc. 4.4%, electrode radius 10 mm).

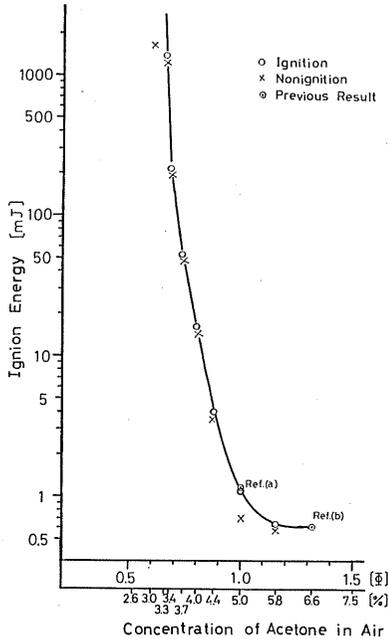


図4 種々のアセトン濃度における最小着火エネルギー
Fig. 4 Effect of acetone concentration on minimum ignition energy.

Ref. (a) J. B. Fenn: Ind. Eng. Chem., 43 (1951), 2865.
(b) N. Gibson and T. C. Lloyd: Br. J. Appl. Phys., 16 (1965), 1619.

エネルギーを測定した結果は図4に示す。図よりアセトン濃度が5.8%のとき最小着火エネルギーはもっとも低くなり、0.63 mJをとるが、濃度の減少とともに急激に上昇し、3.3%の場合には1.4 Jときわめて大きな値となることが明らかとなった。なお本装置では発生しうる火花放電の最大エネルギーが1.7 Jであるため、3.2%以下爆発下限界の2.6%までの希薄なアセトン-空気混合気の着火エネルギーは測定できなかった。

2.3 プラスチックシートの電荷密度およびその減衰

背後導体を持つ厚さ2.0 mmのポリエステルシートに、印加電圧15 kVで帯電させた場合の表面電荷密度分布を直径2 mmのプロブで測定した。この結果を図5に示す。表面電荷密度の変動幅は10%以内であり帯電の一様性は良好であった。ただしプロブの形状から、非常に微細な電荷密度分布の変動は検出できていない。

次に背後導体への印加電圧とポリエステルシートの表面電荷密度との関係を図6に示す。厚さ2.0 mmのポリエステルシートの場合、実験条件の範囲内では82 nC/cm²まで帯電できた。厚さ0.1 mmのポリエステルシートには最高860 nC/cm²まで帯電したが、表面電荷密度が800~860 nC/cm²になるとシートが絶縁破壊して

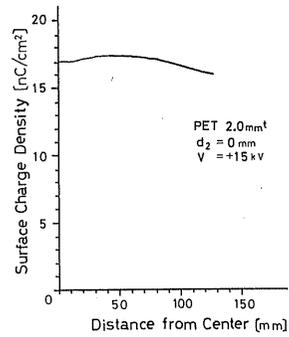


図5 ポリエステルシート上の表面電荷密度分布曲線
Fig. 5 Distribution curve of surface charge density on polyester sheet.

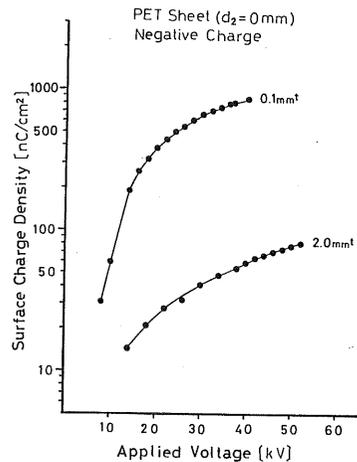


図6 接地背後導体を密着したポリエステルシート上の表面電荷密度
Fig. 6 Surface charge density on polyester sheets with earthed back electrode.

ピンホールを生じた。

図7および図8に厚さ0.1 mmおよび2.0 mmの帯電したポリエステルシートの電荷減衰曲線をそれぞれ示す。いずれも緩やかな減衰を示し、とくに厚さ2.0 mmのシートの場合には、帯電後20分間では電荷の減衰が認められなかった。また厚み0.1 mmおよび2.0 mmのシートはともに相対湿度RH=23~50%の範囲内で電荷の減衰速度の変化がほとんど認められなかった。これに対して厚さ0.08 mmのポリエチレンシートの場合は、図9に示すように電荷の減衰がきわめて速く、相対湿度が増加すると減衰は著しく速くなり初期電荷密度が大きいほど相対湿度の影響が大きかった。印加電圧30 kV以上で荷電するとシートが絶縁破壊したので、図9に見られるように約600 nC/cm²が背後導体付き、厚さ0.08 mmのポリエチレンシートに得られる最高の電荷密度

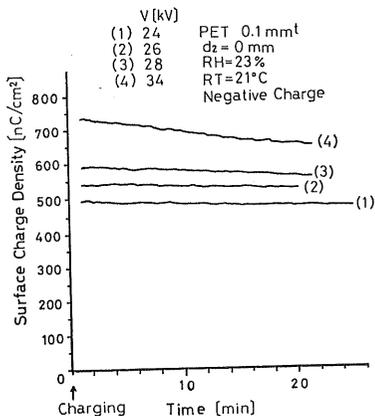


図 7 接地背後導体を有するポリエステルシート ($t=0.1$ mm) 上の電荷の減衰曲線
 Fig. 7 Decay curves of electrostatic charge on polyester sheet ($t=0.1$ mm) contacted with earthed back electrode.

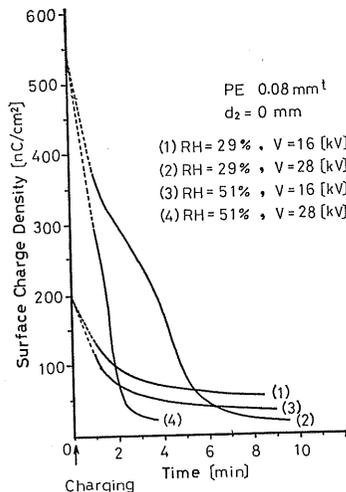


図 9 接地背後導体を有するポリエチレンシート ($t=0.08$ mm) 上の電荷の減衰曲線
 Fig. 9 Decay curves of electrostatic charge on polyethylene sheet ($t=0.08$ mm) contacted with earthed back electrode.

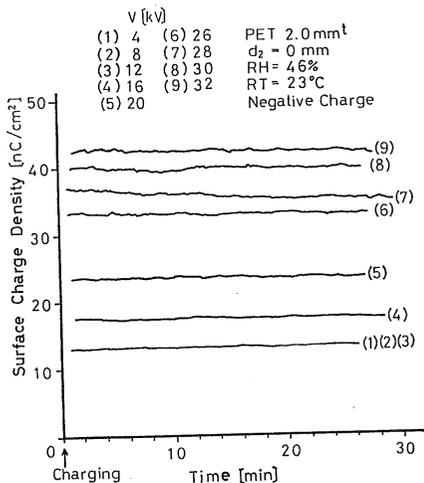


図 8 接地背後導体を有するポリエステルシート ($t=2.0$ mm) 上の電荷の減衰曲線
 Fig. 8 Decay curves of electrostatic charge on polyester sheet ($t=2.0$ mm) contacted with earthed back electrode.

と考えられる。

以上の結果より、背後導体のある厚さ 0.1 mm のポリエステルシートは、周囲の湿度とはほとんど無関係に容易に 800 nC/cm^2 程度のきわめて高い電荷密度にまで帯電しうるが、ポリエチレンシートの場合は湿度が十分低く、しかも電荷分離が急激に生ずるような激しい摩擦が行なわれるときのみ 600 nC/cm^2 の電荷密度に達しうるものと推察される。したがって背後導体付きのポリエステルシートの帯電とその放電とを調べることによって、

最も帯電しやすい状態にあるポリエチレンシートの帯電と放電に関する知見を得ることができるものと考えられる。

2.4 プラスチックシートからの放電時の移動電荷量

試料ポリエステルシートに対向する球電極を $4 \mu\text{F}$ と $5 \text{ k}\Omega$ ($\tau=20 \text{ ms}$) の時定数回路路由で接地して、放電で移動する電荷量の測定を可能にした。実験では厚さ 0.1 mm のポリエステルシートの場合、球電極の直径を 5~60 mm の範囲で変化させても移動する電荷量に差は認められなかった。一方、厚さ 2.0 mm のポリエステルシートでは、直径 20 mm と 60 mm の球電極とのあいだに放電時の移動電荷量の差はないが、直径 5 mm の球電極を使うときわめて微弱なコロナ放電しか生ぜず放電で移動する電荷量はわずかであった。

しかし厚さ 0.1 mm のポリエステルシートでは表面電荷密度が約 300 nC/cm^2 以上で、厚さ 2.0 mm のシートでは約 50 nC/cm^2 以上のときに沿面放電を伴う火花放電が生じ、この限界付近の表面電荷密度では、電荷密度がわずかに変化しても沿面放電を生じたり生じなかったりし、それに伴って放電で移動する電荷量は図 10 に示すように大幅に変動した。

次にポリエステルシート上の表面電荷密度と放電を生ずる球電極距離との関係を図 11 に示す。球電極の直径 (5, 20, 60 mm) に関係なくシートの厚さと電荷密度によって放電を生ずる距離が決まり、厚さ 0.1 mm のシートでは 0.5~10 mm、厚さ 2.0 mm のシートでは 1.5~

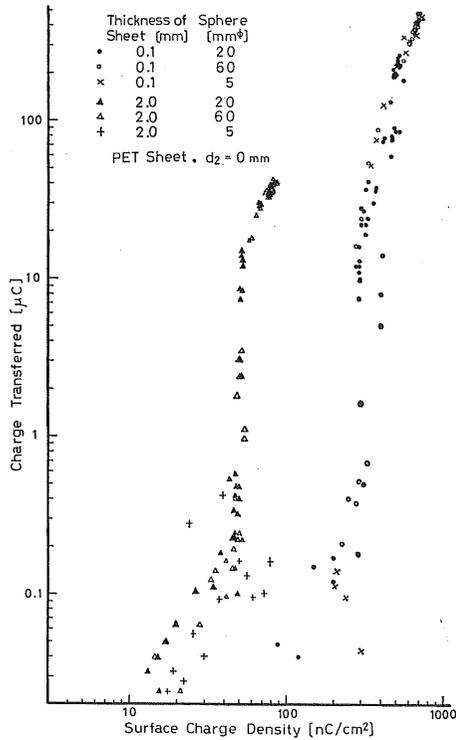


図 10 ポリエステルシート上の表面電荷密度と放電で移動した電荷量との関係

Fig. 10 Relationship between charge transferred in discharge vs. surface charge density on polyester sheets.

30 mm の範囲にある。ただし厚さ 2.0 mm のシートの場合、直径 5 mm の球電極を使うと直径 20 mm および 60 mm の球電極を使ったときよりも大きな距離で放電を生じた。

2.5 プラスチックシートからの放電の等価エネルギー

厚さ 0.1 mm および 2.0 mm の帯電したポリエステルシートと直径 5 mm, 20 mm および 60 mm の球電極とのあいだに生ずる放電の等価エネルギーを求めるため、濃度 3.3~5.1% までのアセトン-空気混合気を使って着火実験を行なった。ある一定濃度のアセトン-空気混合気に対して同一表面電荷密度で 6 回放電を行なって 1 回も着火しなかったときに、この濃度の混合気はこの電荷密度のシートからの放電では着火しないものと判断した。

図 12 にポリエステルシートの表面電荷密度と放電の等価エネルギーとの関係を測定した結果を示す。図から知られるように同一の等価エネルギーを持った放電を発生させるには、ポリエステルシートが薄いほど、また球電極の直径が大きいほど高い表面電荷密度が必要であった。ただし厚さ 2.0 mm のポリエステルシートと直径 5 mm

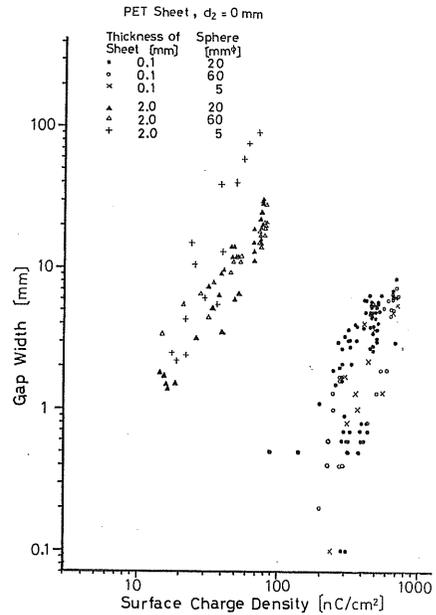


図 11 ポリエステルシート上の表面電荷密度と放電を生ずる電極間隔との関係

Fig. 11 Relationship between surface charge density polyester sheets vs. electrode distance.

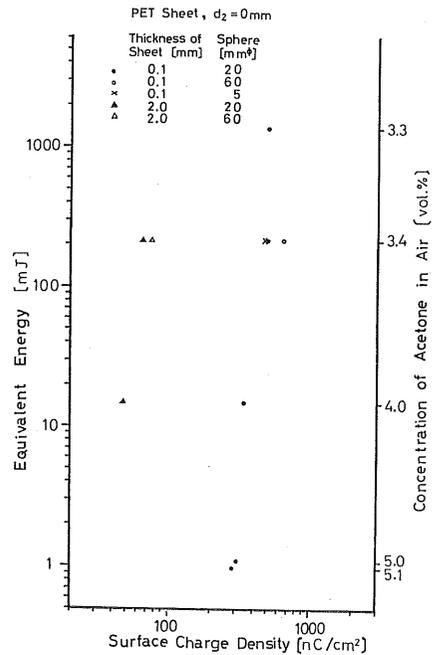


図 12 ポリエステルシート上の表面電荷密度と放電の等価エネルギーとの関係

Fig. 12 Relationship between surface charge density on polyester sheets vs. equivalent energy of discharge.

の球電極との組合せでは微弱な放電しか生ぜず、濃度 3.4% の混合気 (最小着火エネルギー 220 mJ) には着火しえなかった。

厚さ 0.1 mm のポリエステルシートが 510 nC/cm^2 に帯電したとき、直径 20 mm の球電極とのあいだに 3.3% のアセトン-空気混合気にちょうど着火しうる放電を生じたので、この放電の等価エネルギーが 1.4 J であることがわかった。また 670 nC/cm^2 に帯電したときには、直径 20 mm の球電極とのあいだに生じた放電によって 3.2% の混合気が着火した (3.2% の混合気の最小着火エネルギーは図 4 より約 5 J 程度と推定される)。しかしシートが絶縁破壊するため、3.1% の混合気に着火可能な放電を生じしうるほどにはシートに荷電できなかつた。厚さ 2.0 mm のポリエステルシートの場合、最高 82 nC/cm^2 の表面電荷密度で等価エネルギーが 220 mJ 以上の放電を生じ、3.4% の混合気に着火しえたが、本実験装置で得られる最高電荷密度が厚さ 2.0 mm のシートの場合 82 nC/cm^2 であるため、3.3% のものには着火しえなかった。

3. 結 論

濃度 3.3~5.8% までの範囲のアセトン-空気混合気の最小着火エネルギーを、容量性火花放電を着火源として測定した。この結果濃度が 5.8% のときには 0.63 mJ と小さな値であるが、3.3% の希薄な混合気の場合には 1.4 J ときわめて大きな着火エネルギーを要することが明らかとなった。

次に厚さ 0.1 mm および 2.0 mm のポリエステルシートに背後導体を密着させて負電荷を荷電したところ、厚さ 0.1 mm のシートの場合、シートが絶縁破壊することなく帯電しうる最高の電荷密度は 860 nC/cm^2 であることが明らかになった。厚さ 2.0 mm のシートの場合には装置の性能上最高 82 nC/cm^2 までしか帯電しえなかつた。またポリエステルシート上の電荷の減衰は、シートの厚みおよび周囲の湿度にはほとんど無関係に緩やかであり、速いものでも 20 分間に 20% 程度であった。

これに対して厚さ 0.08 mm のポリエチレンシートの場合、絶縁破壊を生じない最高の電荷密度は約 600 nC/cm^2 であり、その電荷の減衰はきわめて速く、荷電終了から 2~6 分後には 90% 程度の電荷が漏洩し、また減衰速度は周囲の湿度が増加すると著しく増大することが知られた。したがって背後導体付きの厚さ 0.1 mm のポリエステルシートは、周囲の湿度とはほとんど無関係に 800 nC/cm^2 程度のきわめて高い電荷密度に帯電しうるが、0.08 mm のポリエチレンシートの場合には湿度が十分低く、しかも電荷分離が急激に生ずるような激しい

摩擦が行なわれるときのみ 600 nC/cm^2 の電荷密度に達しうるものと考えられる。

さらに背後導体を持って帯電した厚さ 0.1 mm および 2.0 mm のポリエステルシートと直径 5 mm, 20 mm および 60 mm の接地球電極とのあいだに生ずる放電の等価エネルギーを、濃度 3.3~5.1% までの範囲にあるアセトン-空気混合気のなかで測定した。この結果、同一の等価エネルギーの放電を生ずるのに、シートが薄いほど、また球電極径が大きいほど高い電荷密度が必要であることが明らかとなった。ただし直径 5 mm の球電極と厚さ 2.0 mm のシートの組合せでは、5.1% の混合気にも着火しえない微弱なコロナ放電しか生じなかつた。直径 20 mm の球電極と 510 nC/cm^2 に帯電した厚さ 0.1 mm のシートとのあいだには、1.4 J の等価エネルギーを持った放電が生じ、3.3% のアセトン-空気混合気が着火し、 670 nC/cm^2 に帯電したシートとのあいだに生じた放電では 3.2% の混合気が着火した。しかしシートを 860 nC/cm^2 に帯電させても 2.6~3.1% の希薄な混合気に着火しうる放電は生じなかつた。

ここで上記の結果も加えて、本研究の発端となった事故時の爆発原因を考察すると、背後導体があるポリエチレンシートはこれがないものより 10~100 倍の電荷密度に帯電し、このシートからは強力な放電が発生する。しかしながら、前報¹⁾に記述したような事故時の条件、すなわち反応容器内のアセトン-空気混合気の最高濃度は 3.3% であるとか、長年にわたる製造経験において放電現象がまったく認められなかつたこと等から判断すると、事故時の条件下では着火する可能性がまったくないことを本実験が実証している。

ただ非常に起こりにくいケースではあろうが、たとえ

- (1) 反応容器上部のアセトン-空気混合気が 3.3% で、しかもポリエチレンシートが 600 nC/cm^2 まで帯電しえた場合、
- (2) きわめて部分的にアセトン-空気混合気が何らかの理由で 3.3% 以上になり、かつ 300 nC/cm^2 以上の帯電が得られた場合、

には着火爆発の生じうることも、この実験は明らかにしている。したがって事故はこのような条件が現実起こったとしか考えざるをえないと結論される。

最後に、本研究の発表を許可された住友化学工業(株)取締役大阪製造所長中塚時雄氏に、また最小着火エネルギー測定装置の設計に協力をいただいた労働省産業安全研究所田島泰幸氏、当社大阪製造所田川聞悟氏に衷心より感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 藤岡清悟, 藤井陽三, 中塚木代春, 澤栗安美, 増田閃一: 静電気学会誌, 2, 1 (1978), 52.
- 2) E. Heiderberg: *Proceeding of the 1st International Conference on Static Electricity*, p.351, May (1970).
- 3) I.G. Haig and A.W. Bright: *3rd International Congress on Static Electricity*, p.139, April (1977).
- 4) H.F. Calcote, C.A. Gregory, Jr., C.M. Barnett and R.B. Gilmer: *Ind. Eng. Chem.*, 44, 11(1952), 2656.