

静電気による障害および災害について

大阪府立工業奨励館* 村 崎 憲 雄

1. はじめに

古くから潜在的な興味を持たれた静電気に関する障害についての関心が多くの産業において高まってきた。高分子材料の飛躍的な発展と加工機械の高速化が主たる原因であり、合成繊維などでは静電気除去を考慮しなければ満足な製品を得られない程に厄介な問題である。しかしながら除去対策として利用できる絶対的な手段が与えられていないので、当面した障害について適当とおもわれる対策をその都度構っているといつても過言ではない。帯電に關係する試料には摩擦する側と摩擦される側の二つが必要なこと、試料の表面の状況が相当強い作用を帯電量に及ぼすこと、温度と湿度によつて帯電量が悪化すること、試料の履歴が關係してくることなどが現象の解明を困難にする原因で場合によつては極性が反転することもある。障害防止についての一端に關係している私共は以上のようなことについて意見を求められることがあり、たまたま編集委員から表題について御依頼を受けたものの、記録として残るだけに大変なことを引うけてしまつたと少なからず後悔している次第である。

静電気の利用法としての各種の装置については既に御承知のことと思しますので、この紙面で御紹介することは障害についてはどのような対策がおこなわれているかということに加えて私なりの臆測を述べさせて戴きます。

2. 静電気による障害と災害

2-1 災害と障害の種類

帯電した物体に生じる静電引力または反撥力が製品の品質低下や作業能率の低下をきたす場合を静電気障害、帯電量が大きくなって生じた放電が火災または爆発の原因となる場合を災害と區別する人もあるが一般には災障害と呼んで明確に區別していない。

高分子材料を扱う工場や液体を多量に送流させている工場ではそれらが相当高い電位に帯電しているにもかかわらず一般には事故が発生していない。たまたま何らかの事情で事故が生じた場合に静電気が事故の原因であると推測されても発生状況を再現することが難しい。そのためよほど大きい事故でない限り災害の灾情はあきら

かにされていない場合が多い。また、静帯電による爆発過程が明らかになつたとしても、防止対策としていかなる手段が適当であるかを決定することは容易なことではない。そのため爆発に関しては不測の事故としておきらめられていたが最近では防止策として有効な方法が紹介されている。労働省安全研究所が発生状況についてアンケートを用いて調査したものを第1表に示す。このような

第1表 (a) 過去における静電気障害災害の発生状況

区分	の災 区 別 害	爆 引 火 火 災	電 撃	生 産 障 害	火 放 電 の 発 生	計
アンケートによる		73	72	40	—	185
事例による		55	44	20	3	122

(b) 静電気の発生工程

区分	工程 別	送流工程				噴出工程				液体 の 過 渡	固体 の ふる い	粉 砕 ・ 練 ・ 攪 拌	そ の 他
		気 体 の 送 流	液 体 の 送 流	粉 体 の 送 流	小 計	気 体 の 噴 出	液 体 の 噴 出	粉 体 の 噴 出	小 計				
アンケートによる		21	64	46	131	26	22	16	64	26	42	71	91
事例による		4	15	10	29	12	2	2	16	0	6	15	56

障害と災害について業種別に列記すると次のようである。

繊維工業 糸または布が機械にまきつくので作業を停止するか又は速度を低下させるという障害、吸引力と反撥力によつて糸または布にむらを生ずるという障害、糸切れその他の不良品を生じる原因、作業者への電撃等が主たるもので帯電量との關係を第2表に示す。

化学工業 可燃性液体の送流工程、粉末の攪拌または粒度の分別工程等に生じる静電気による放電が、周囲状況によつて火災または爆発の原因となる場合が多い。扱う材料に対する最小着火エネルギーを与える帯電量は、いづれの工場においてもみうけられる。最小着火エネルギーで着火するような雰囲気が発生する湿度が大切であること

* 大阪市西区江之子島上之町

第2表 繊維工場における障害と帯電量の関係

工程	障害の種類	帯電量	仕掛品
カード	ウェブの垂れ初め	3.5kV	スフ
	繊維の付着	4~6kV	
	紡出不能	6kV以上	
練じょう機	まきつき	$10 \times 10^{-12} \text{c/cm}$ 以上	スフ
製紡機	毛羽立ち, まきつき	10~50V	アセテート
	作業不能	50V以上	
幹出し機	電撃	10~20kV以上	
乾燥機			
杼布機			
生地検査機	電撃	50kV以上	
サンフォライズ機	電撃	25kV以上	
		折たたみ不良	

が第3表からわかる。

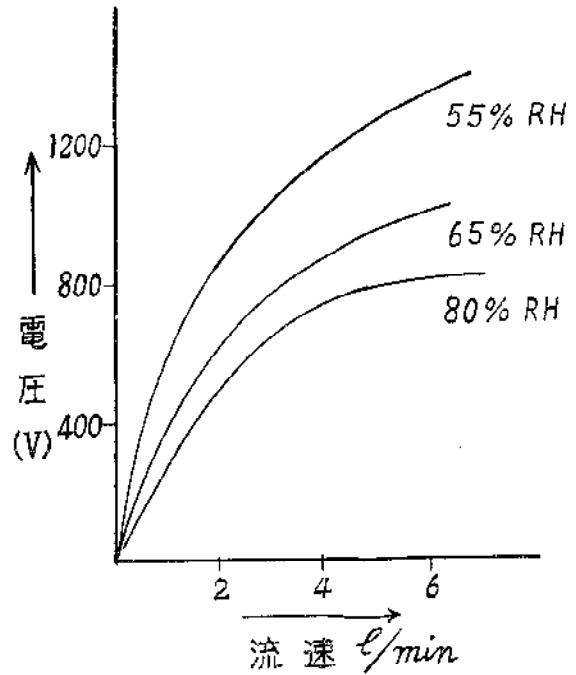
高分子工業 現在使用されている高分子材料は殆んどが良好な絶縁物であるので、放電を発生しない工程は少ない。この種の産業は製品に要求する性能と形状が種々にわかれているので障害の種数と程度も複雑である。製品化されてからの障害発生も他の業種にくらべて多いので永久帯電防止ということが望まれている。主たるものを第4表に示す。

第3表 製造工程にみられる最大帯電量

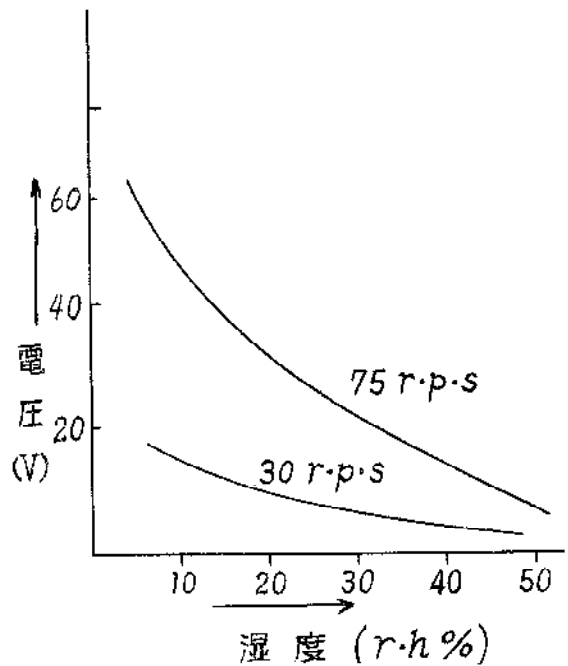
発生工程	最大帯電量	電 (V) 正
小麦粉タンク	$1.6 \times 10^{-5} \text{c/kg}$	8200
アスピリン精製	$3.4 \times 10^{-5} \text{c/kg}$	500以上
石けん工場乾燥塔	$9 \times 10^{-8} \text{c/kg}$	200以上
TNT 火薬混和	$3 \times 10^{-7} \text{c/kg}$	40以上

第4表 高分子材料の加工工程に生じる障害

品 種	障 害	発生電圧
絶縁用クロス, テープ等	電撃, 着火および塵埃付着	40000以上
	電撃, リヒテンバルグ像の発生	20000以上
成形品	塵埃付着, 電撃	3000以上
機械加工	塵埃付着による表面の損傷	200以上



第1図 帯電量と湿度の関係



第2図 伝導性ゴムローラの帯電

2-2 一般的な防止対策

効果が比較的顕著で実際に使用されている防止手段は電荷を速やかに逃がすかまたは電荷の発生量を抑制するという考え方にたったものである。

(1) 温湿度の調整

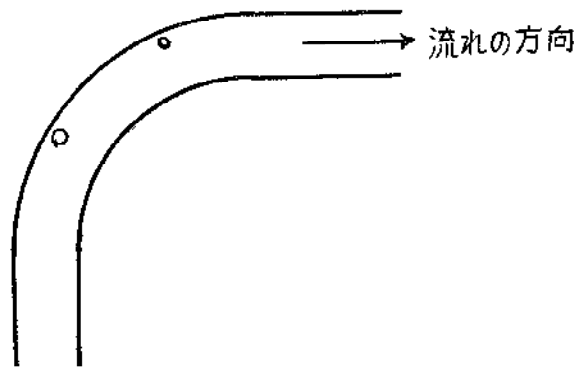
第1図は四塩化炭素を真鍮金網を通して落下させるときの帯電量と湿度との関係である。第2図は繊維用のゴムローラの帯電量と湿度との関係である。各図からわかるように湿度の上昇は帯電防止に有効で経済的にも有利であるがあまり高い湿度にすると作業者の健康、機器の

発錆，製品の品質等に悪影響をおよぼす．そのため工程によつて上昇限度が決まる．多くの場合に有効であるがこれのみで完全に防止できると限らない．

(2) 機器の接地と接地導体

機器が絶縁されていると蓄積された電荷の電位上昇のために火花放電を生じる場合がある．この場合，帯電体が比較的大きいので危険が伴うので，工場ではすべての機器を接地しなければならない．過去に生じた機器による電撃の多くは接地不良に原因するもので，特にダクトボンド，バルブ等から電撃をうけた報告が多い．

接地金属とは帯電体の近傍に接地された金属導体を配置し，帯電体の電位を降下させることを主たる目的とするものである．金属導体の替りに導電性塗料や除電針布等が使用される場合もある．



第3図 パイプ破壊箇所。印

塩化ビニルパイプに液体を送流すると静電気がパイプに発生することは自明のことである．液体の質によつては第3図の箇所が絶縁破壊する程に帯電するので可燃性液体や大量の輸送管として一般には合成樹脂製のパイプを使用することが避けられている．この場合でも接地導体を使用することによつて絶縁破壊を生じる程の高電位を低下させることが可能であり，既に一部の工場で実用化されてから1年を経過している．その他カーペットの帯電による電撃防止や塵埃の付着防止にも応用されている．簡単な方法であるが対象によつては相当効果を發揮する．

(3) 異種の電荷を発生させる材質または同種の材質を機器の部品として使用する方法

Cohenの法則として知られている帯電についての経験則を利用する方法である．使用上若干の経験的な判断を要求されることもある．第5表は帯電列で測定者によつて若干の相違がある．相違点が天然産のものに集中している点に興味がある．機器を構成する部品の材質を選ぶ場合，仕掛品の材質に対し部品の材質が帯電列において上位と下位を占めるものを適当な割合に用い，仕掛品に生じる電荷が全体として少くなることを目的とする．織

第5表 帯電序列

(+)	(a)	(-)	(b)	(+)	(c)
—ガラス	—ガラス	—ガラス	—ガラス	—羊毛	
—頭髮	—毛髮	—毛髮	—毛髮	—ナイロン	
—ナイロン	—ナイロン	—ナイロン	—ナイロン	—ビスコース	
—羊毛	—羊毛	—ナイロン —ポリマ	—ナイロン —ポリマ	—木綿	
—レーヨン	—洋毛	—洋毛	—洋毛	—絹	
—絹	—絹	—絹	—絹	—鉄	
—ビニロン —人絹	—ビスコース	—ビスコース	—ビスコース	—ゴム	
—綿	—木綿	—木綿	—木綿	—ルーサイト	
—アセテート	—紙	—紙	—紙	—ポリビニル —アルコール	
—オーロン —綿混	—ラミ	—ラミ	—ラミ	—デクロン	
—紙	—鉄	—鉄	—鉄	—オーロン	
—ゴム	—ゴム	—ゴム	—ゴム	—塩化ビニル	
—テリレン (ニ菱)	—アセテート	—アセテート	—アセテート	—ダイネル	
—ビニロン	—オーロン	—オーロン	—オーロン	—ヴェロン	
—サラ	—キラン	—キラン	—キラン	—ポリエチレン	
—ダクロン	—ポリエチレン	—ポリエチレン	—ポリエチレン	—テフロン	
—テリレン (ICI)	(-)	(-)	(-)	(-)	
—カーベイト					
—ポリエチレン					
—カネカロン					
—セルロイド					
—セロファン					
—テピロン					
—テフロン					
(-)					

a, b, c. は測定者，日時，場所が異なる．

織工業では折たたみ部分に同種の布をまきつけたものが多い．決定的な効果を期待できないが簡単に施行できるので比較的好く利用されている方法である．防止方法としての特許請求も他の方法にくらべ圧倒的に多い．

(4) 帯電防止油剤

静電気防止の理想としては，製造工程では勿論使用者にわたつてからでも静電気を生じないことである．現在では防止油剤の使用がもつとも理想に近い手段であるが幾つかの欠点もある．

油剤は合成樹脂に練込まれて使用されるものと合成繊維の表面に塗布して使用されるものがある．練込用はいかなる形状のものにでも使用できることと効果が相当期間有効で摩擦や切断によつても効果が減少しない．し

かし相当多量に練込まなければ効果がうすいので幾分か樹脂の性能を劣化させるという短所がある。塗布用の油剤は表面を薄く覆うことによつて効果を發揮するので、使用量はすくなくとも良いが摩擦や水洗によつて効力を失う。また空中に放置された場合の自然変質も大きいという欠点がある。

理想的な油剤とは(1)経時変化を生じない(2)使用条件に制約なく使用できる(3)少量で効力を發揮する(4)製品、機器、加工工程のいずれにも悪影響を及ぼさない、という性質をもつた油剤である。現在市販されている油剤は(4)の特性において特に欠ける所が大きい。石油その他の有機溶剤に使用できるもの、火薬、中間物等爆發性粉体に使用できるもの、チョコレート、小麦粉等の食糧品に使用できるもの等が要求されているが今のところ市販されていない。現在市販されている油剤の一部を第6表に示す。いずれも界面活性剤であり、硬質ポリ塩化ビニル、ポリスチロール、ポリプロピレン、ポリエチレン等との相溶性が悪い。

第6表 帯電防止油剤の使用量と塩化ビニル樹脂の帯電量

油剤含有量	電気抵抗 Ω	帯電圧 V
0	5.1×10^{11}	-3900
0.2	4.0×10^{10}	-1500
0.4	9.0×10^9	-150
0.6	3.2×10^9	0
0.8	2.4×10^8	0
1	2.0×10^8	0

樹脂または繊維の材質を改変して静電気を生じないようにする試みもあるが工業化に成功していない。たとえばメタンまたはエタン誘導体を0.1~0.5%モノマー中に添加し、重合時にフリーラジカルを形成させるというような方法である。フィルムの場合には表面を化学処理することによつて本体の性質を害ことなく半永久的に帯電防止することに成功したと U.C.Cが報じている。

(5) 除電装置

帯電体の近くに放電々極をおき、10~30kVの電圧を与えるとコロナ放電が生じる。生じたイオンのうちで、帯電体と異符号のイオンは帯電体に吸引され、異極性のものは反撥されるので帯電体の電荷は中和消滅することになる。この種の装置は殆んど工場で使用されているが可燃物が存在する個所では使用に注意を要する。装置の絶縁不良によつて溶剤に着火したという報告がしばしばおこなわれているので、装置による着火の状態をしらべた結果を第7, 8, 9表に示す。装置の特性はメーカーによつて相当相違する。放電々流、使用電圧、爆鳴気に

第7表 放電々極の絶縁抵抗と静電容量

品名別	絶縁抵抗 Ω	静電容量
1	4.2×10^{11}	15
2	2.6×10^{10}	15
3	4.9×10^{10}	13
4	2.0×10^{13} 以上	15
5	2.0×10^{13} 以上	15

第8表 二次側無負荷電圧および放電々流

品名別	二次側電圧 kV	放電々流 μA
1	5.2	42
2	6.9	70
3	6.9	25
4	9	16
5	8.8	50

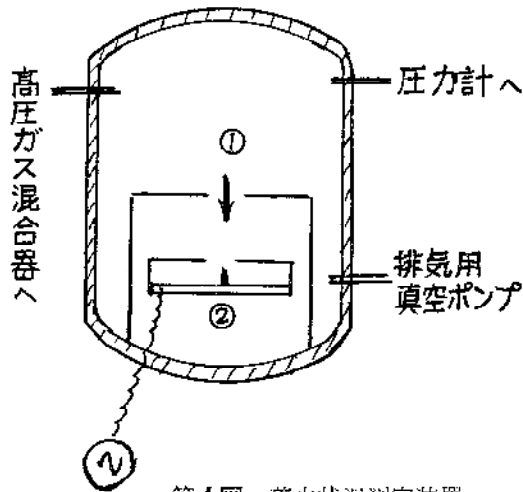
第9表 着火状況

(気体、水素30%, 酸素70%)

品名別	電極位置	着火迄に要したスイッチ投入数
1	22m.m	100回で着火せず
	19m.m	41回で着火
	16m.m	8回で着火
	10m.m	2回で着火
2	21m.m	100回迄着火せず
	20m.m	84回で着火
	19m.m	9回で着火
	10m.m	2回で着火
3	5m.m	100回まで着火せず
	4m.m	"
	3m.m	"
	2m.m	2回で着火
4	3m.m	100回まで着火せず
	2m.m	"
	1m.m	"
5	6m.m	100回迄着火せず
	5m.m	3回で着火
	4m.m	1回で着火

に対する着火能力等更に検討すべき点が多いが、一応現在市販されている装置を用いても安全な場合があることだけは了解できる。第4図は上記の特性を調査するために使用した実験装置である。

その他各種のものがあるが、代表的なものは放射線源の電離作用、帯電が外部電圧によつて変化する性質等を利用したものである。特種の工程に利用されているが放



第4図 着火状況測定装置

電々極程には広くきわまつていない。

3. 帯電の本質と現象

種々の研究方法を用いて静電荷の発生機構が研究されてきたが、明快にすべての帯電を説明しうるまでには至っていない。帯電によつてできる静電場、帯電体相互の反撥力または吸引力等静電気についての基礎的な事項は18世紀に既に解析されている。しかしながら、ヴァンデグラフ起電機やウイムスハースト起電機が良好に起電するための条件や、集塵機その他の静電気を利用した装置の詳しい動作状態は充分知られていないといえる。これらの装置に発生する諸現象は静電感應や逆2乗法則だけで説明できる程には簡単なものではないらしい。静電気についての研究がどのような状態におかれているか憶測を交えて以下に紹介する。

3-1 電荷の発生機構

(1) 発生についての諸説

帯電を生じるものは良好な絶縁物であり、摩擦またはこれに類する動作がおこなわれる必要があるということとは自明のことである。第10表は今までに発表された電荷発生に関する諸説をあつめたものであるが、電荷担体としてイオンと電子の両方が考えられている。また接触している対面間に正負からなる電気二重層が生じるということはすべてに共通した考え方である。二重層として分離する電荷がどこからやってくるかという点についてイオン説と電子説では相違するが、いずれも実験による確証がとばしい。

電子説では絶縁物中に含まれる不純物によるエネルギー準位が仮想される。多くの試料を帯電させたときに生じる帯電序列が若干の相違があつてもほぼ一致するように不純物が都合よく混入してくれると常に期待できないという点に弱点があるが、金属と絶縁物との帯電に関しては相当複雑な現象でも説明することができる。不純物のエネルギー準位を測定する方法がみつければ、この説はさ

らに多くの現象をも解明できるだろうといわれている。イオン説の場合には、材料の表面に付着しているイオンと表面との付着力の差によつて説明されているが、この場合にも電子説と同様種々の弱点を有している。

(2) 発生条件

(1)に関係するすべての要素が吟味されなければならないが、その中でも経験的に重要なものは試料の状況、温湿度、摩擦のしかた、分離のしかたおよび雰囲気であるとされている。帯電測定に際してこれらがどのように扱われているか以下に略記する。

(試料の状況) 伝導度、誘電率、圧電係数と表面の汚れおよび成分については必ず記録されなければならない。ほとんどの試料の表面は酸化膜か吸着層が存在するので、何らかの方法でそれらの状態を推察しておくことと実験結果の判定に役立つ。また、実験に先だつて試料表面の電荷を除去しておかなければならない。一般にはコロナ放電、放射線、アルコールの炎等に試料を曝し電荷を除去する。この場合本当に電荷が除去される場合と正負の電荷が混合しみかけ上消滅したように見える場合の二通りがある。いずれの傾向が強いかを判断して実験結果を検討しなければならない。

誘電率、伝導度、圧電係数は帯電量と無関係に一応それ自身を一つの対象として測定できるので比較的資料も多く、得られた数値も信頼性が高い。水蒸気の吸着による表面の伝導度は相当詳しく研究されており、帯電防止用の油剤、コーティング、湿度の調整等はこの現象の利用である。帯電量と伝導率とは電荷の消失速度によつて関係づけられる。 α を定数、 σ を伝導率、 ϵ を誘電率、初期電荷量を Q としたとき t 秒後の電荷は一般に $Qe^{-\alpha\sigma/\epsilon t}$ としてあらわされている帯電体をコンデンサとみなした等価回路としての考察であつて、この式の中には荷電粒子の移動速度は含まれていない。

荷電粒子が如何なる速度で拡散するかということと伝導率とを関係づける方が帯電には必要とおもわれる。

(雰囲気) 空中で帯電をおこなわすときには水蒸気的作用が強い。第1図、第2図および試料の項からも帯電量が湿度の影響を受け易いことはよくわかる。試料の材質によつては湿度の高い場合と低い場合で帯電極性が反転することもあるので注意が必要である。不純なガス成分が存在するような雰囲気では更に複雑な状況をとる場合もあることを知つておく必要はある。温度が上昇すると一般には吸着量が減少する。帯電量は温度の上昇にもなつて減少するので、吸着量と帯電量との関係を詳しく調査することも興味のあることである。

(接触、摩擦、分離の仕方)

接触面が離れるときには二重層の電荷の距離も大きくなるので二面間の電位差が上昇する。このとき、一部の

電荷は伝導と放電によつて逆流することが考えられ、一般に分離速度が帯電量に関係するとされている。分離速度を変えて帯電量の変化する状況を実験することは難しい問題で、普通観察される程度の帯電現象では分離速度と帯電量とは直接関係がないようにおもわれる場合が多い。

接触、摩擦等の現象を微細に調査すること自身が一つの研究目的として相当複雑な点が多い。界面に生じた境界層がどのように帯電に作用しているかという点になると全くわからないといつてもよい状態で、摩擦と接触との関係について現在では「摩擦は接触面積の増加と接触面の温度上昇をきたす」というように説明されている。

圧力が増加すると吸着層は破壊され、材質の表面が乾燥摩擦されるというように力学上考えられている。力学的に破壊された吸着層が電気的にどのように動作するかということは興味のあることであるが難しい問題である。

その他帯電に関係する因子としては試料の温度差、試料の一方が金属であれば接地されているか否かということ、試料中に導体が内蔵されているか否かということ、外部電場の有無等がある。

関係する要素をできるだけ簡単化し、仮定を説明しているといつても過言ではない程説明しきれない問題が発生するので、静電気を利用するためにも基礎的な研究が望まれている。

3-2 電場および測定器

静電気学の基礎的事項としては19世紀に発見された帯電感応と逆2乗法則である。しかしながら、電荷が絶縁物に付着する状態、正負電荷の混合状態等を測定または推察するためには以上の知識はさほど役立たない。

帯電体は一様な電荷密度であると仮定して処理する場合と他の現象と併せて推察した結果から電荷の分布状態をモデル化して考察することが多い。たとえば、紙を積重ねる場合には電荷の作用のため美しく整頓できないにもかかわらず、一度積重ねてしまったものは一枚ずつ取出すことが困難であるという現象が印刷工場で見られる。最初は反発力として作用し、後では吸引力として作用するということから紙の表裏で極性が異なるという判

断が下されている。

帯電量の測定も実際には難しい場合が多い。現在では、帯電体の電位または電荷密度を測定するかわりに、帯電体近傍におかれた電位傾度が測定されている。電位傾度は測定器の形状、おかれた位置、帯電体の形状と電荷の分布状態等に関係するので静電気測定と呼ぶには程遠い。しかしながら電位計にかわる適当な方法が与えられていないので止むを得ず使用されている。使用上注意すべき点は、(1)電位計によつて帯電体の電力線ができるだけ乱されないこと(2)おのおのの電位計の指示特性主として入力端子に入る電力線の状況をしることである。

4. むすび

静電気障害について若干の事項をのべた。多くの工程を円滑に処理する上に欠くことのできない技術でありながら得られる成果はあまりはなやかでない。関心はあつてもとりあげられる機会のない障害による日々の損失は相当大きいものとおもわれる。資源の節約に直接関係すること故今後の発展が望まれる。本文によつて静電気に関心を有していただくことができれば幸いと思ひ現状の紹介に終つたことをお詫び申しあげる。

第10表 電荷の発生機構についての諸説

荷電粒子 条件	電 子	イ オ ン
	接 触	エネルギー単位の差①
接 触		表面に生じるイオン濃度の差③
接 触		誘電率の差④
	トラッピングレベルの分布のしかたの差⑤	
摩擦、加熱	温 度 差⑥	温 度 差⑦
摩擦、加熱		圧電、焦電効果⑧
摩擦、加熱		摩擦粉の移動⑨