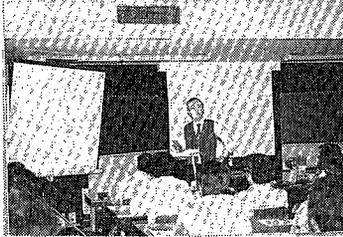


粉体の静電気現象とその応用

Electrified Phenomena of Powder and Their Applications



講師 東京大学生産技術研究所
助教授
山本 英夫
Dr. Hideo Yamamoto
Associate professor,
Institute of industrial science,
The university of Tokyo



抄録：(化)技術部 製品開発課
沢田 雅光
Masamitsu Sawada

In the field of powder handling, electrostatic gives not only negative phenomena as dust explosions or impediments in product, and but also positive phenomena as applications for action controls and measurements of powder properties. Electrostatic has many kinds of forces affect to powder, and can be used effectively. Therefore we have to make efforts in its effective applications.

In this lecture, the introduction to electrostatic of powder is shown, and then the electrostatic formation of ceramic membrane which we have developed is referred as an example of applications.

まえがき

空気の乾燥した冬場によく静電気を体験する。ドアのノブに触れた際、手にパチッと衝撃を感じたりするのもその一例である。それは、人間の体をコンデンサーの静電容量で考えると、100 pF~200 pF あり、さらに、200 pF 程度の衣服を着ており、多くの静電気を蓄えていることになるからである。

このような静電気は、特に粉体を扱う工業界において無視できないものであるが、学問的にはまだ不明な点も多い。しかし、高度な粉体技術を確立していくためには、それを解明し、有効に利用することを考えていかなければならない。そこで私の研究室において研究している粉体と静電気との係りについて、静電気の基礎的な事項と、研究成果である静電気の応用例の一部を含めて述べることにする。

1. 粉体分野での静電気現象

粒子は粒子同士、あるいは粒子と粉体機器との衝突、接触により荷電し、帯電粒子となる。粒子が負に帯電すれば装置は正に帯電するといった具合であり、この結果、種々のトラブルを起こしたり、逆に有効的に利用されたりする。

トラブルの例としては、ボールミル内壁への粒子の付着、ふるいの目詰り、ダクト内への粉塵付着による閉塞、あるいは装置内部への粉塵付着というような生産性障害や、放電による粉塵爆発や可燃物への引火、あるいは感電といった災害、および放電に伴う電磁波の発生に起因する制御機器の誤動作などが挙げられる。

一方、積極的に利用されている例としては、古くから行われている電気集塵、静電塗装、コピーやインクジェットを使った静電印刷、粒子を無接触でハンドリングするための電界カーテン、静電分離・分級、数ミクロン径の粒子表面上への微粒子コーティングなどの粒子運動制御があげ

られる。また、電荷粒子の移動に伴う電界、電圧の変化を利用したエアロゾル計測、粒子選別、粉体流検知、粉体流量計測などの粉体の計測にも有効に利用されている。

静電気現象には、クーロン力という力学現象と、絶縁強度以上の電位に達した時に起こる放電現象があるが、このような現象が静電気によるトラブルや、利用される部分に大きく関与していることはいうまでもない。

2. 静電気とは

静電気に対するものとして動電気があり、この両者を対比して説明する。動電気は常に電子が供給され、移動し、負荷となって消滅するのに対し、静電気は、外的作用がない限りほとんど動かない。動電気の場合、例えば100 Wの電球に100 Vの電圧を印加すると、オームの法則により、1 Aの電流が発生するが、この1 Aとは、毎秒1 C(クーロン)の電荷が流れる場合と定義されている。動電気における1 Cの電荷は、わずか100 Wの電球1個点灯させる程度の小さいものであるが、同じ1 Cであっても静電気においては、非常に大きい力となる。いま同じ極に帯電した2個の小さい物体が、それぞれ $q_1(C)$ と $q_2(C)$ の電荷をもち、 $r(m)$ 離れていると、その反発力(クーロン力 $F(N)$)は、クーロンの法則から次式で与えられる。

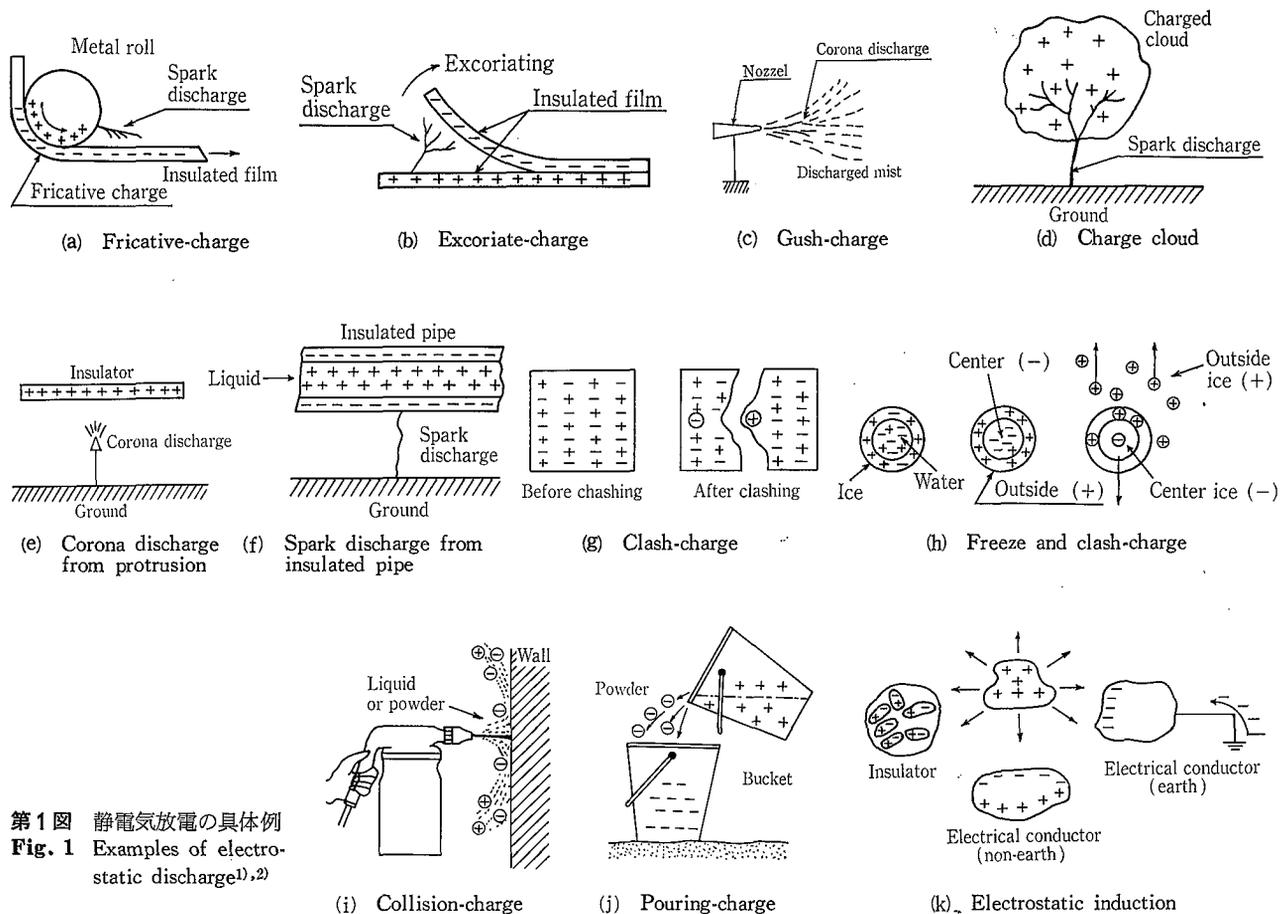
$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \pi \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}$$

ここに、

ϵ_s = 媒質の比誘電率、

ϵ_0 = 真空の誘電率(pF/m)

q_1, q_2 はいずれも1 Cで、1 m離れた空気中にあると仮定すると、2個の物体間に働く反発力は実に約100万トンにも達する。静電気は、この非常に大きい力が、力学的作用や放電となって生産性障害を起こしたり、逆に有効利用されているものである。



第1図 静電気放電の具体例
Fig. 1 Examples of electrostatic discharge^{1),2)}

電子1個の電荷は $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ であり、逆に1Cというのは約 10^{19} 個の電荷を意味する。非常に多くの電荷が生じることにより、そこに電界が形成され電位が発生する。この電位はクーロン力を電荷で除して求められ、やはり大きい値になる。放電は、このような大きい電位によって絶縁層が破壊され起こるもので、冬期、衣服などの摩擦が原因で放電する時で、人体に200~300V、大きいところでは、700Vもの電位が発生していると報告されている。

3. 帯電・放電の種類

このような静電気が帯電する方法に、いくつかの種類がある。例を示しながら次に述べる。

1) 摩擦帯電 (第1図(a))

最も一般的な帯電で、衣服と人体の摩擦による帯電もこれに属する。図示した例は、金属ロールに接触、摩擦し、帯電した絶縁性フィルムが、ロールから離れる時に火花放電するというものである。

2) 剥離帯電 (第1図(b))

付着した2枚のフィルムを剥がす時、必ず一方が正で他方が負に帯電する。この動作を続けると、フィルムに静電気が蓄積されやがて放電する。これを剥離帯電という。

3) 噴出帯電 (第1図(c))

ノズルから液体あるいは粉体を噴出させた時、一般にノズル部が負で、噴出された物体が正に帯電する。噴出された物体はミストとなり、電荷が集まり帯電ミストとなってノズル部に放電する。この時の放電はコロナ放電であることが多い。

4) 帯電雲 (第1図(d))

雷で代表されるもので、水滴あるいは粉体が接地体から離れ、上昇して行った時に、上部で正の帯電雲を形成し、電位が増すと接地体に対して放電するものである。

5) 突起物との間に起こるコロナ放電 (第1図(e))

正に帯電した物体に突起物のある接地体が近づくと、突起物先端に電荷が集中し、そこにコロナ放電が発生する。

6) 絶縁パイプからの火花放電

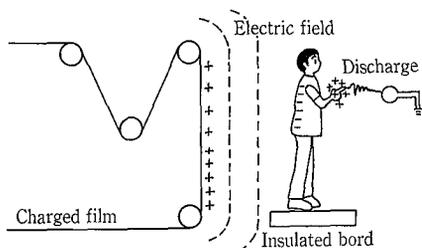
この現象は化学プロセスでよく経験されたものであるが、絶縁されたパイプ内面を液体が高速で流れると、パイプに電荷が蓄積され、接地体との間で放電を起こす。

7) 破碎帯電 (第1図(g))

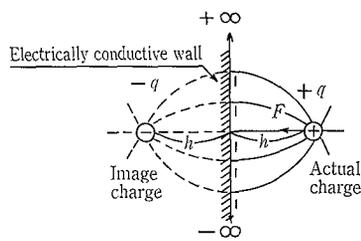
固体を粉碎し粉体を得る過程で経験する静電気である。破碎前は電的に中性の固体であっても、複雑な形への形状変化によって、負の電荷の多い側と正の電荷の多い側に分離する。その時、それぞれの電荷に帯電する。

8) 凍結・破壊による帯電 (第1図(h))

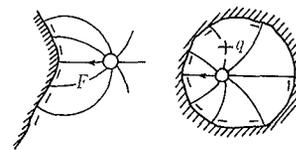
雷雲のできる原因といわれている現象である。寒冷前線の接近により、水滴を含んだ暖かい空気は上昇し、気圧の低い上空で断熱膨張を起こす。その結果、上昇していた小さい水滴が大きく成長し、やがてその表面に氷をつくる。この時、一時的に外部が氷、内部が水といった2層構造を成し、 OH^- より拡散しやすい H^+ の影響で氷が正、水が負の電気二重層を形成する。そしてそのまま更に上昇して内部まで氷に変わると、内部の体積膨張によってこの氷塊は碎かれ、碎かれた正に帯電した小さい氷塊は、正に帯電して



第2図 人体の静電誘導
Fig. 2 Electrostatic induction of human body



(a) Flat electric conductor
第3図 影像力
Fig. 3 Image force³⁾



(b) Curved electric conductor

大きい氷塊より上層部に正の帯電雲をつくる。

9) 液体・粉体が衝突したときの帯電 (第1図(i))

噴出帯電については前述したが、ノズルから噴出された液体あるいは粉体が、高速で壁などに衝突した時に帯電する。例えば、大きいサイロ中へトウモロコシの粒をコンベアで落とし込んだ時、粒同士の衝突、粒と壁面の摩擦、粒自体の破壊、破壊した小さい粒の浮遊による帯電雲などにより、高電位に成長し放電粉塵爆発に至るケースが報告されている。

10) 粉体などを移し換えるときの帯電 (第1図(j))

これは、接触、摩擦、あるいは剥離帯電に関係していると考えられるが、例えばポリバケツ中の粉体を他の容器に移す時、ポリバケツに正、粉体に負の電荷が帯電する。

11) 静電誘導帯電 (第1図(k))

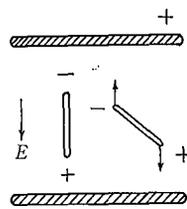
上記以外に物質が直接接触しなくても帯電するケースがある。それが静電誘導帯電である。図に示すように、絶縁体、導体に係わらず、その近傍に帯電した物体が接近すると、その周囲に電界が形成され帯電体と逆の極性の電荷が分極によって帯電体側に集まる。そのまま帯電体を除けば集まった電荷は、またもとにもどる。ところが、導体で接地されているものに帯電体を近づけたままで接地を切り離すと、その導体内に帯電体と逆の電荷のみが残る、帯電体を除いても帯電した状態になってしまう。箔検電器はこの現象を理解するのに最適な道具である。

この誘導帯電は、無意識のうちに帯電してしまうので、非常に厄介なものである。例えば第2図に示すように、帯電したフィルムの近くに絶縁された人間が立っていると、人間のフィルム側の部分にフィルムと逆の電荷が集まり、その反対側にフィルムと同じ電荷が集まる。そして、その部分が接地された物に近づけば放電を起こし、制御機器などの故障、誤動作を引き起こす。

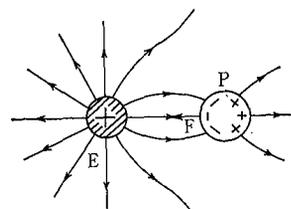
また人間がカーペットの上を歩行する時にも誘導帯電が起こる。カーペットが正に帯電していれば、誘導帯電により靴底に負の電荷が集まる。そうすれば更に誘導帯電によって靴下が正に帯電する。そして靴下の反対側の体上部に負の電荷が集まる。

4. 粒子に働く静電力の種類

いたるところに色々な形で発生する静電気を、粉体工業で有機的に応用するためには、粉体粒子に及ぼす静電力を理解しておかなければならない。電荷をもった2個の粒子間に電界が形成され、クーロン力という非常に大きい力が



第4図 配向力³⁾
Fig. 4 Orientation force



第5図 グレーディエント力³⁾
Fig. 5 Gradient force

働くということは前述したとおりである。

1) 影像力

一般にクーロン力と呼ばれる静電力は、必ずしも電荷をもった2個の粒子間に働くものだけではない。粒子1個でも自分でつくる電界により力を受けることがある。それが影像力と呼ばれる。第3図(a)で示されるように+qの電荷をもった1個の粒子が、接地された平面の導体壁からhの距離にあるとすると、この粒子は壁に引き寄せられる。電荷qから発せられた電気力線が壁面に終端するが、壁面では電位ゼロの等電面であろうとするため、壁面の裏hの等距離に真電荷+qと同じ大きさで異符号の影像電荷-qが存在するように、クーロン力Fが働く。ボールミル内壁への粒子の付着による効率低下は、この影像力により説明される。

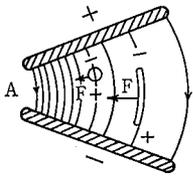
この力は、曲面の導体壁に対しても発生する。その状態を第3図(b)に示す。

2) 配向力

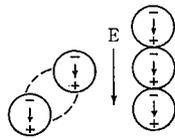
粒子が電荷をもっていなくても、正と負の電極によって電界が形成されているところに存在する粒子は、クーロン力を受ける。これを配向力という。第4図に示すように、電極間に細長い粒子があると分極により、粒子の両端に反対の電荷が集まる。そしてこれをそれぞれの電極が引張るため、すべての粒子が電界の方向に配列する。この力は利用価値が高く、例えばセラミックスに靱性をもたすため、ウィスカーを複合させる場合があるが、このウィスカーを静電力により配向させた状態で複合し、靱性を向上させた例が報告されている。

3) グレーディエント力

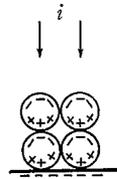
グレーディエント力を模式的に第5図に示す。正の電荷を持った物体Eによって形成された電界中に、ある大きさの電気的中性の粒子Pがあると、PのE側に負、反対側に



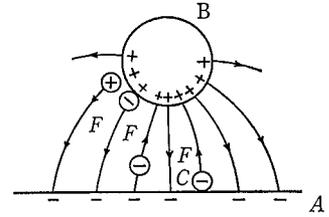
第6図
配向力とグレイディエント力³⁾
Fig. 6
Orientation force and gradient force



第7図
じゅず玉形成力³⁾
Fig. 7
Pearl-chain forming force



第8図
ジョンセンサーベック力³⁾
Fig. 8
Johnson-Rahbeck's force



第9図
静電誘導帯電によるクーロン力³⁾
Fig. 9
Coulomb's force by electrostatic-induction charge

Eが分極する。Eからの距離は負の部分の方が、正の部分より近く電界が大きいので、PはEに引きつけられる。この力をグレイディエント力という。

1) 配向力とグレイディエント力が共存する場合

第6図は、配向力とグレイディエント力の両方が働く場を示す。2個の電極を平行に配した時、その間の電界密度は通常均一であるが、図のように斜めに並べると、電極間距離の小さいところが電界は強く、大きいところが弱い。従って、このような電極間に帯電していない粒子があれば、グレイディエント力により電界の強いAの側に引き寄せられ、かつ細長い粒子であれば配向力によって縦に並ぶ。この原理を応用して、細胞の合成がなされている。

2) じゅず玉形成力 (第7図)

電界中に電荷を帯びていない粒子が複数あると、それぞれの粒子が分極し、その結果粒子の正と負が引合い、じゅず玉を形成する。粒子が誘電体であれば分極電荷の引力で、じゅず玉状態を保つ。

3) ジョンセンサーベック力 (第8図)

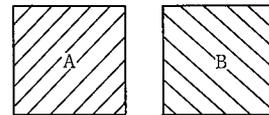
電極上に積層されている粒子層に電流を通すと、粒子自体は分極するが、粒子間および粒子と電極の間の空間はコンデンサーになり、電流を通し続ければその分電荷が蓄積されていく。そして粒子同士、粒子と電極の接点の正負が食まり、強固な積層状態が形成される。これをジョンセンサーベック力という。

7) 静電誘導帯電によるクーロン力 (第9図)

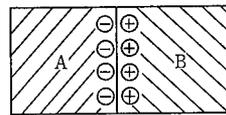
平板状の電極Aと球状の電極Bが離れておかれており、それぞれを負と正にチャージしておく。その状態で平板上に金属粒子Cを置くと、静電誘導によりやがて粒子も負に帯電し、粒子の重量よりクーロン力が上回り、平板から離れ正の球に引き上げられる。しばらくすると、粒子は逆に負の成分が減少し、引力が優勢になって平板上にもどる。このように粒子は電極間を行ったり来たりする。この原理を利用して、粒子の大きさを測定することができる。

5. 帯電のメカニズム

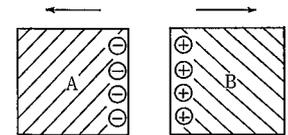
最も一般的な接触、摩擦による帯電の機構について第10図で説明する。いま電気的に中性の2個の物体があり、それが何らかの作用で接触したとすると、その接触面で電荷の移動が起こり、必ず片方が正で片方が負の電気二重層を形成する。そして外力によって、この2個の物体を分離すると、離れる過程でいくらか電荷の漏洩、緩和が起こるが、最終的には完全な中性にもどらず、それぞれの電荷が残って帯電が観測されることになる。



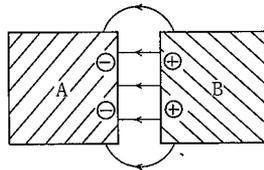
(a) Both are neutral



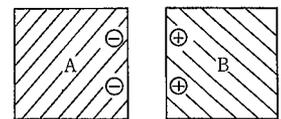
(b) Charge transfer



(c) Charge separation



(d) Charge relaxation



(e) Observation of charge

第10図 固体の接触帯電過程

Fig. 10 Process of contact electrification of solid

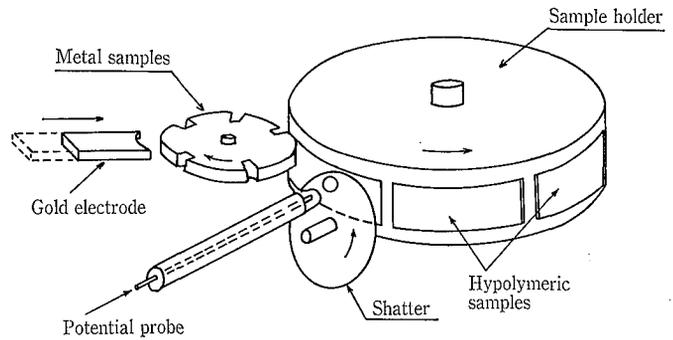
2個の物体が異なる材質であれば、両者の電子構造も異なり、電子のもつエネルギー量に差がある。このエネルギー量をフェルミ準位という。いわゆる化学ポテンシャルである。2種の物体の界面では、同じ化学ポテンシャルになるようとするため、化学ポテンシャルの高い方から低い方へ電子が移動する。電子が出た側が正、入った側が負になる。このようにして電気二重層が形成される。

化学ポテンシャルの高低については、現段階では電子の移動量が測定できないので、多数の物質を多数の組合わせて接触させ、いずれが正か負かを調べ、第1表のような帯電列を作成している。表中上部の物質ほど化学ポテンシャルが高く正に、下部の物質ほど化学ポテンシャルが低く負に帯電し易いということが理解される。例えば、ポリアミド66 (ナイロン66) とポリテトラフルオロエチレン (PTFE) を接触させると、ナイロン66が正、PTFEが負に帯電する。またポリスチレンとポリエチレンの場合は前者が正、後者が負になる。

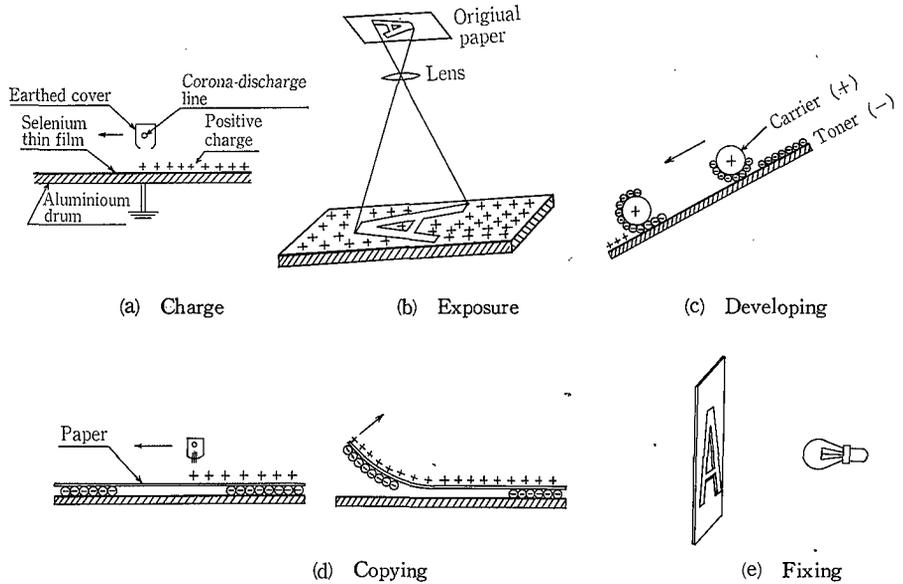
高分子材料の帯電の難易を定量的に把握する試みもある。帯電の難易は電子の移動の難易であり、仕事関数と呼ばれる。高分子材料の仕事関数を求めるのに、化学ポテンシャルが明らかになっている金属を利用した方法として、第11図に示す装置が考えられている。金属として、クロ

(Positive end)
Silicon elastomer with silica filter
Borosilicate glass, fire-polished
Window glass
Aniline-formol resin (Acid catalysed)
Polyformaldehyde
Polymethylmethacrylate
Ethylcellulose
Polyamide 11 (Nylon 11)
Polyamide 66 (Nylon 66)
Ock salt
Melamine formol
Wool
Silica
Silk
Poly-ethylene glycol succinate
Cellulose acetate
Poly-ethylene glycol adipate
Polydiallyl phthalate
Cellulose (Regenerated) sponge
Cotton
Polyurethane elastomer
Styrene acrylonitrile copolymer
Polystyrene
Polyisobutylene
Polyurethane flexible sponge
Borosilicate glass, ground surface
Polyethylene glycol terephthalate
Polyvinyl butyral
Formo-phenolique, hardened
Epoxy resin
Polychlorobutadiene
Butadiene acrylonitrile copolymer
Natural rubber
Polyacrylonitrile
Sulphur
Polyethylene
Polydiphenyl propane carbonate
Chlorinated polyether
Polyvinylchloride with 25 % D. O. P.
Polyvinylchloride without plasticizer
Polytridurochloroethylene
Polytetrafluoroethylene (PTFE)
(Negative end)

第 1 表
帯電列⁴⁾
Table 1
The triboelectric series



第 11 図 接触帯電測定装置の一例⁵⁾
Fig. 11 An example of measuring equipment of contact charge



第 12 図 電子コピーの原理図 (ゼロックス方式)²⁾
Fig. 12 The principle of electronic copy (by XEROX)

ム、ニッケル、鉄、コバルトなどを貼り付けた回転体に金の電極を接触させて、その間の電位差を測定すると、それぞれの金属の仕事関数が知られる。それぞれの金属を、更に右側の回転体に貼り付けた高分子試料に接触させ、電位プローブで高分子試料にチャージされた電荷を測定する。測定された電荷がゼロになる時の金属の仕事関数が、その高分子の仕事関数になる。このようにして数値化された仕事関数で配列したものは、第 1 表の帯電列と良く一致し、粉体材料の評価にも適用できる方法と考えている。

6. 緩和のメカニズム

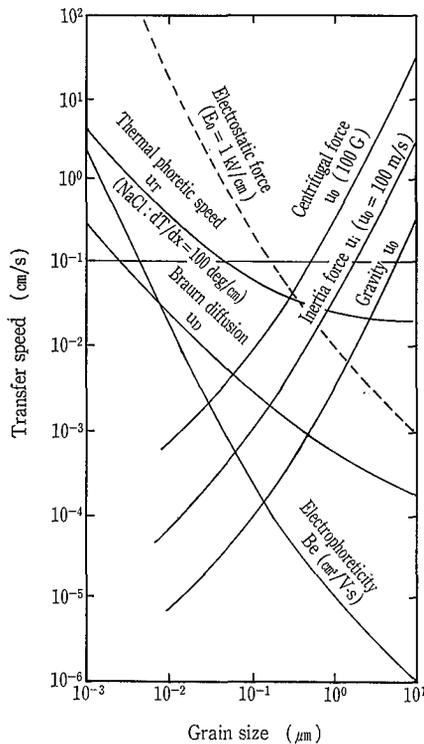
普通、金属はあまり帯電しない。これは電気二重層が形成されても分離の段階で、高分子などのような絶縁体に比べ、電荷の緩和が非常に速いことによる。接触によって界面に集まった電荷が、導体内ではその移動速度が速いので、分離の過程で中和しようとして、逆の電極側に流れてしまう。結果的に観測される電荷量が減少し、帯電が認められないということになる。絶縁体の場合は、抵抗が大きく電荷の移動が極めて遅いので、分離の際に多くの電荷がとり残され帯電が認められる。冬場に多く静電気を体験するのは、空気中の湿分が少なく電荷が移動し難いためであ

る。逆に湿度の多い夏季は絶縁体であっても、物体の表面に導体である水分が膜を作り、電荷の緩和が速く帯電し難いので、静電気を体験することが少ない。このことを利用して、静電気による生産性障害の防止を図ることがある。粉碎に際し、粉碎助剤として若干の水分を添加して粉碎効率を向上させるなどである。

7. 静電気の応用例

静電気を害としてのみとらえるのではなく、有効に利用することを考えていかなければならない。現在非常にうまく利用したものに電子コピーがあるが、そのゼロックス方式について第 12 図で説明する。

これはトナーと呼ばれる帯電を制御し易い粉体の利用技術である。(a)で示すように、アルミニウムの基板から成るドラムの表面にコーティングされたセレン薄膜に、正の高電圧を加えたコロナ放電により正の電荷を与える。これに(b)のようにレンズを通し、例えば A という光を照射すると、光の当たった部分は電荷が逃げる。次にフェライトのような数十ミクロンの正にチャージした粒子表面に、トナーを付着させて基板上にまぶす。負にチャージしたトナーは、正の電荷を帯びた部分に付着する。A の部分には付か

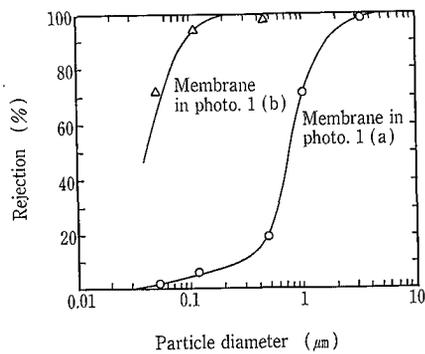


第13図 粒子に働く力
Fig. 13 Various forces serving a grain

ない(c)。この上に紙を載せ、再度正の放電線を照射すると、紙が正に帯電し、そのまま紙を引き上げると、トナーが今度は紙に付着してくる(d)。それを熱で定着することによりコピーが完成するわけである(e)。

特に粉体工業において静電気を利用する必然性は、第13図に示すところにある。すなわち、粒子に働く力として静電気力の他に、遠心力、重力、ブラウン拡散などがあるが、1ミクロン以下の粒子径になると、その粒子の移動速度は静電気力が最も大きくなるからである。

われわれの研究室ではこの力を利用して、セラミックスの膜を作成することに成功した。この膜の作成法を静電成膜(Electrostatic formation of ceramic membrane)と呼んでいる⁶⁾。熱CVDにより窒化珪素、アルミナ、チタニアなどいずれかのセラミックスの超微粒子を調整し、それを支持体表面にじゅうず玉形成力により沈着させ、約1200°Cで焼結させると、微粒子同士が三次元のネットワーク構造を作り、厚さ約20μmの微細孔を有したセラミックスの膜が得られる。この静電成膜法により作成した膜のSEM写真を写真1に示す。(a)は熱CVDの反応ガスである四塩化珪素濃度が1.4%の条件で生成した粒子を用いて成膜した。(b)はそれが0.2%の場合である。この写真に示した2種類の膜の分画性能を、各種粒径の単分散ポリスチレンラテックス(粒子濃度：重量で100ppm以下)を用いて測定



第14図 セラミック膜の分画性能⁶⁾
Fig. 14 Rejection of the ceramic membrane

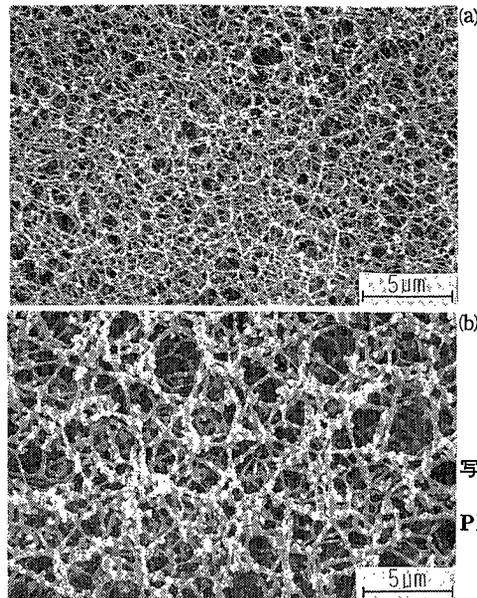


写真1 セラミック膜表面のSEM写真⁶⁾
Photo.1 SEM photographs of ceramic membranes surface

したので、その結果を第14図に示す。分画性能は膜の細孔径分布に対応するものであり、SEM写真で観察される細孔径分布の様子と比較的良く一致している。どちらの膜の分画性能も、かなりシャープであり、特に図中(b)の膜の50%分画性能は0.04μm程度と予測され、限外透過膜(UF)として十分実用に適するものと期待している。

むすび

これらは、粉体への静電気の数少ない応用例であるが、粉体に対する静電気力というのは非常に役立つものと考えており、今後粉体製造プロセス中の生産性障害の克服も含め、学問的アプローチにより積極的に利用されることが望まれる。

〔参考文献〕

- 1) 田嶋：OHM '77/4 39
- 2) 増田：“最近の静電気工学” 高圧ガス保安協会発行(1975) 6, 28
- 3) 静電気ハンドブック、静電気学会編、オーム社(1981) 253, 254, 259
- 4) J. Herniker: Nature, 196(1962)474
- 5) D. K. Davies: Br. J. Appl. Phys. 2(1969)1533
- 6) 山本、野村、増田：粉体工学会誌、Vol. 26 No. 3(1989)169