

### 粉体の化学(10)粉体の摩擦帯電現象 空気中 と飽和蒸気圧中における測定について

KAWAKITA, Kimio / Okada, Kazuhisa / 岡田, 一久 / 川北,  
公夫

---

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部  
研究集報

(巻 / Volume)

5

(開始ページ / Start Page)

10

(終了ページ / End Page)

22

(発行年 / Year)

1968-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004255>

## 粉 体 の 化 学

## 第 10 報 粉体の摩擦帯電現象

(空気中と飽和蒸気圧中における測定について)

教授 川 北 公 夫 (基礎学科)

岡 田 一 久 (電気工学科)

## Chemistry of Powders

## [X] Electrification Phenomenon of Powders by Friction

(Measurement in the Atmosphere of  
Air and Saturated Vapour)Kimio Kawakita, *Professor*Kazuhisa Okada, *Postgraduate*

## Abstract

The each amount of charge and its polarity on powder particles caused by friction between powder particles and the various materials of chute net which have the different work-functions — silver, copper and stainless steel — were observed under the condition of about 65 per cent R.H. and besides of saturated vapour by using the method of alternating current as shown in Fig. 1 and Photo. 1. As to the measuring above property, four kinds of powder, polyvinyl chloride, mica, potato-starch and lactose were used.

Under about 65 per cent R.H. and using the silver net both polyvinyl chloride and mica produce negatively charged particles of 60 to 80 per cent as shown in Figs. 10~11, while both potato-starch and lactose hold the same per cent in negatively and positively charged particles and produce the reversal of the polarity which changes negative from positive in the boundary of range 50 or 60 microns in diameter as shown in Figs. 12~13. In general, the rate of positively and negatively charged particles depends on the size of particle. And the amount of charge on powder particle of less than about 70 microns in diameter increases with the surface area of the powder as shown in Figs. 2~5. For larger than about 70 microns, it is in proportion to the volume. But the charged amount of powder larger than about 100 microns in diameter tends to neutral.

In the condition of saturated vapour and using the silver net the amount of charge which is proportional to the volume of particle disappears especially in mica and lactose as shown in Figs. 6~9.

In the case of the copper, the stainless steel net and about 65 per cent R.H., as the special experiment, the distribution of charge on particles of polyvinyl chlo-

ride and potato-starch was observed to have not a great difference comparing with the case of about 65 per cent R.H. and using the silver net.

Consequently, it may be considered that an important factor of the electrification of powder by friction is largely dependent on the experimental circumstances, such as the moisture and not so much influenced by the difference of work-function of the chute net.

## 1. 緒 言

粉体の帯電に伴う障害には炭じん爆発, 粉体の空気輸送における輸送能力の低減, あるいは粉体製造における粉砕工程で粒子の凝集または飛散などがある。また, この障害に反して有意義な利用面もあり, 静電塗装, じんあいの電気集じん, 静電複写などがある。

粉体粒子の帯電は粒子の流動中, 正電荷粒子数および負電荷粒子数はほぼ同一数と言われ, その原因追求について Haper<sup>1)</sup>, 橋高<sup>2)</sup>, Szagnok<sup>3)</sup> らの研究がある。

橋高らはすでに仕事関数など明らかにされている Ge, Si, と種々の金属との接触帯電の実験を電子説の立場から説明した。それによると, 酸化や吸着の影響を含めて帯電量と接触電位差は一応比例増加すると報告している<sup>1)2)</sup>。

また Szagnok<sup>3)</sup> は Kunkel・Hansen の方法, すなわち垂直な極板間を落下する粒子を外部から光りを当てて粒子の軌跡を求め, 粒子の帯電量を測定する方法により, NaCl, KCl 粉体に X線,  $\beta$  線を照射をおこなった試料につき研究し, 照射前後では, 照射前の NaCl, KCl 粉体は対称分布を示していたものが, 照射後では, NaCl はプラス側にずれ, また KCl はマイナス側にずれ, 単位表面積当たりのプラス電荷が増加すると報告している。

一方, Brasefield<sup>4)</sup> は Ni の傾斜板上に異なった酸素含有量をもつカーボンブラックを滑らせたときの帯電量は酸素含有量の増大とともに減少し, その極性はプラスよりマイナスに逆転することを見いだした。このことからカーボンブラックの電子親和性は酸素の含有量とともに増加すると報告している。

種谷は粉体食品の中の小麦粉と二, 三のミルク粉を用いて摩擦帯電現象を報告している。その報告の中で, 帯電量の増加は粉体のある粒径を境にして, 表面積に比例し, 極性の逆転は直径  $60\mu$  程度で起ると報告している<sup>5)</sup>。

著者は粉体がホッパーに取りつけられた仕事関数の異なる銀網, 銅網, ステンレス網面との摩擦帯電現象について, 空気中におけるときと, 飽和蒸気圧中におけるときに分けて研究した。

粉体試料は塩化ビニール, マイカ, パレイショデンプン, 乳糖の4種類である。

## 2. 実 験 装 置

粉体の帯電量の測定にはいろいろな方法がある。たとえば, 粉体が容器にたい積したような場

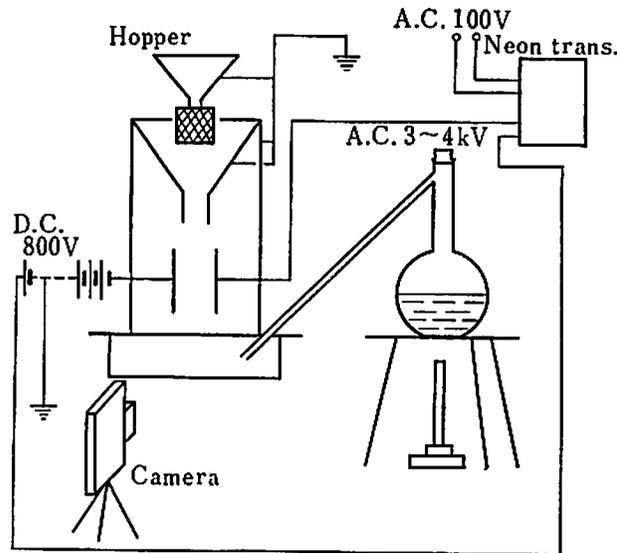


Fig. 1 Schematic diagram of the measuring apparatus

合には、振動容量型電位差計が用いられるが、粉体個々の粒径に対する帯電量を求めるには交流電圧法が用いられる。すなわち (Fig. 1) 直径 10 cm, 高さ 50 cm, のメタアクリル樹脂の観測筒中に 2 枚の平行極板 (2×13 cm) を間隔 1.1 cm でセットし、プロジェクター 2 台 (500 W, 100 W) を観測筒後方 45 度から照射し、乱反射をさけるために筒内に黒紙をはり、極板内に集光させる。観測筒内部の雰囲気と飽和蒸気圧中に分けて測定する。飽和蒸気圧中はフラスコで湯を沸かし観測筒に入れる。平行極板にネオン・トランスで昇圧された交流電圧 3~4 kV を与え、ホッパーから落下してくる多くの電荷を持った粒子がその極板間に入ると正弦波を画きながら落下する。また同時に、その粒子の極性を知るために乾電池による直流 800 V (90 V×9) を重畳させる。

その振幅、波長をカメラ (絞り 8, シャッタースピード 1/15) で撮影する。

電荷を持った粒子は直流重畳のために、それぞれの極板に引きつけられ、それに付着するもの、はね返されてまた反対の極板に向うものがあるため、撮影に際しては極板の上方をとらなければならない。

振幅から帯電量、波長から粒径を計算する。すなわち、帯電量は次式で解析される。

$$e = 2\pi^2 m A f^2 \frac{300d}{\sqrt{2}V} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{g}{2\pi\lambda f^2}\right)^2}$$

ここで

$e$ : 電気量 (e.s.u.)

$A$ : 振幅 (cm)

$m$ : 粒子の質量 (g)

$f$ : 周波数 (50 c/s)

$\lambda$ : 波長 (cm)

$V$ : 極板間の実効電圧 (V)

$g$ : 重力加速度 (cm/sec<sup>2</sup>) を示す。

粒径の半径は Stokes' law によって求められる。

$$v = \frac{2}{9} r^2 \frac{(\sigma - \rho)}{\mu_v} \cdot g, \quad v = f\lambda$$

ここで

$v$ : 落下速度 (cm/sec)

$r$ : 粒子半径 (cm)

$\sigma$ : 粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho$ : 空気の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\mu_v$ : 空気の鉛直方向の粘性係数 (g/cm·sec)

である。なお、この Stokes' law への適用は Reynolds number  $R = \rho v r / \mu_v < 0.5$  を満足し、また Stokes の沈降速度から粒径を求められるのは数十ミクロンであるので、結合によって、大きくなった直径 100 ミクロン以上では直接粒子の軌跡から求めなければならない。

また、帯電量  $e$  の計算で  $\sqrt{1 + (g/2\pi\lambda f^2)^2}$  の頃は 1.01 程度なので省略した。

帯電量  $e/m$  の測定範囲は極板間隔と写真の引伸率から 38~4500 である。

### 3. 試料の調整

実験に用いた粉体、塩化ビニール (岩井化学薬品)、マイカ (平和化学産業)、バレイショ、デンブ (司生堂製薬)、乳糖 (司生堂製薬) をシャーレに入れ、真空ポンプで 12 時間、50~70°C で乾燥した後、デンケターに入れて保存する。なお、その時にアース棒を用いて除電をおこない、また用器から用器へ移すときにはアース棒を用いる。

### 4. 結果及び考察

測定結果は Table 1~3 に示す。Table 1~2 はそれぞれ空气中 (相対湿度 65%)、飽和蒸気圧中における銀網を用いた測定結果である。グラム当たりの平均帯電量は正領域、負領域のそれぞれの平均を求め、その和を計算する。空气中 (Table 1) では測定粒子数 500~900 個で、塩化ビニール、マイカではマイナス粒子が 60~80% を占め、バレイショ、乳糖では正、負が半々である。一方飽和蒸気圧中 (Table 2) での測定粒子数は 100~400 個であった。この表をまとめると次のようになる。

(1) 平均帯電量は空气中、飽和蒸気圧中それぞれ  $(-7.85 \sim 5.32) \times 10^{-5}$  e.s.u.,  $(-1.09 \sim 1.17) \times 10^{-5}$  e.s.u. である。

(2) 表面積当たりの平均帯電量は空气中、飽和蒸気圧中それぞれ、 $(-0.404 \sim 0.305)$  e.s.u./

Table 1 Amount of charge on various kinds of powder in atmosphere (Silver net)

Sample	Polarity	Number of porticles	Mean charge of particle (e.s.u.)	Mean charge of particle (e.s.u./cm <sup>2</sup> )	Mean charge of particle (e.s.u./g)	Mean diameter ( $\mu$ )
Polyvinyl chloride	+	52	2.05	0.156	0.978	59.0
	-	686	1.93	0.158		
	neutral	141	$\times 10^{-5}$			
Mica	+	121	0.996	0.278	35.4	32.4
	-	333	0.998	0.235		
	neutral	125	$\times 10^{-5}$			
Potato-starch	+	223	0.869	0.101	-3.29	48.0
	-	145	1.040	0.112		
	neutral	106	$\times 10^{-5}$			
Lactose	+	207	5.32	0.305	-38.8	61.6
	-	205	7.85	0.404		
	neutral	521	$\times 10^{-5}$			

Table 2 Amount of charge on various kinds of powder in saturated vapour (Silver net)

Sample	Polarity	Number of particles	Mean charge of particle (e.s.u.)	Mean charge of particle (e.s.u./cm <sup>2</sup> )	Mean charge of particle (e.s.u./g)	Mean diameter ( $\mu$ )
Polyvinyl chloride	+	19	0.640	0.099	-4.43	42.2
	-	92	0.842	0.115		
	neutral	22	$\times 10^{-5}$			
Mica	+	189	0.211	0.126	33.8	21.1
	-	204	0.151	0.089		
	neutral	19	$\times 10^{-5}$			
Potato-starch	+	65	1.17	0.120	3.39	51.2
	-	107	1.09	0.116		
	neutral	75	$\times 10^{-5}$			
Lactose	+	108	0.581	0.118	28.8	36.9
	-	97	0.486	0.091		
	neutral	56	$\times 10^{-5}$			

Table 3 Amount of charge on various kinds of powder in atmosphere (Copper and Stainless steel nets)

Sample	Polarity	Number of particles	Mean charge of particle (e.s.u.)	Mean charge of particle (e.s.u./cm <sup>2</sup> )	Mean charge of particle (e.s.u./g)	Mean diameter ( $\mu$ )
Polyvinyl chloride	+	24	0.608	0.126	51.9	40.1
	-	32	0.662	0.099		
	neutral	12	$\times 10^{-5}$			
Potato starch	+	10	0.249	0.064	-44.9	40.4
	-	21	0.996	0.129		
	neutral	6	$\times 10^{-5}$			
Potato starch	+	29	0.685	0.091	-44.1	52.6
	-	76	1.74	0.164		
	neutral	53	$\times 10^{-5}$			
Potato starch	+	13	1.31	0.118	-46.9	53.6
	-	66	1.69	0.171		
	neutral	25	$\times 10^{-5}$			

cm<sup>2</sup>, (-0.116~0.126)e.s.u./cm<sup>2</sup> である。

この2つの結果と Fig. 6~9 からの飽和蒸気圧下での帯電量は空気中における帯電量よりも減少していて, その傾向は粒子径の大きい程その帯電量は少なくなっている。Table 3 はホッパー網の仕事関数の異なる銅 (上段), ステンレス (下段) でおこなった結果であるが, 観測粒子数が少ないために, かたよがりがあると思われるので比較できない。

Fig. 2~9, 14~17 は各試料の粒子個々の大きさと帯電量との関係を全体的に見たものである。すなわち, 縦軸に粒子径の2乗, 表面積をとり, 横軸に帯電量をとり, また横軸を境にして上が正領域, 下が負領域で各粒子ごとにプロットしたものである。この Fig. 2~9, 14~17 は次の4つに分ける。

(1) Fig. 2~5 は銀網を用いたときの空気中におけるとき

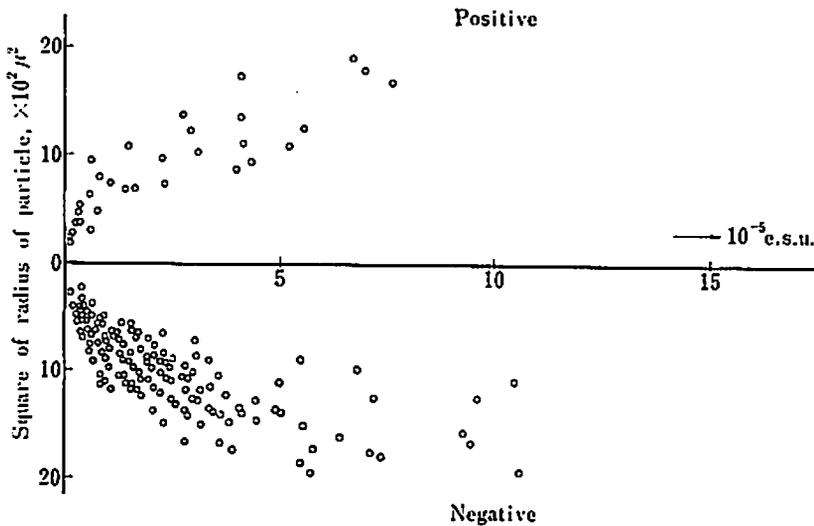


Fig. 2 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Polyvinyl chloride. (Silver net)

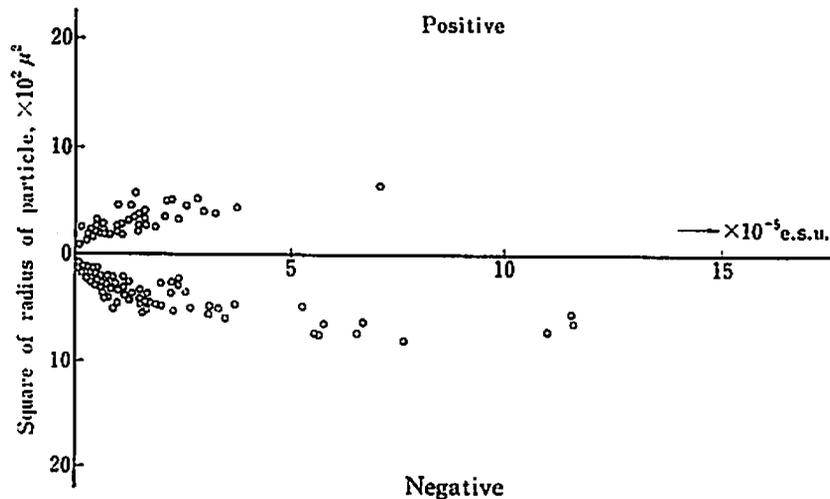


Fig. 3 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Mica. (Silver net)

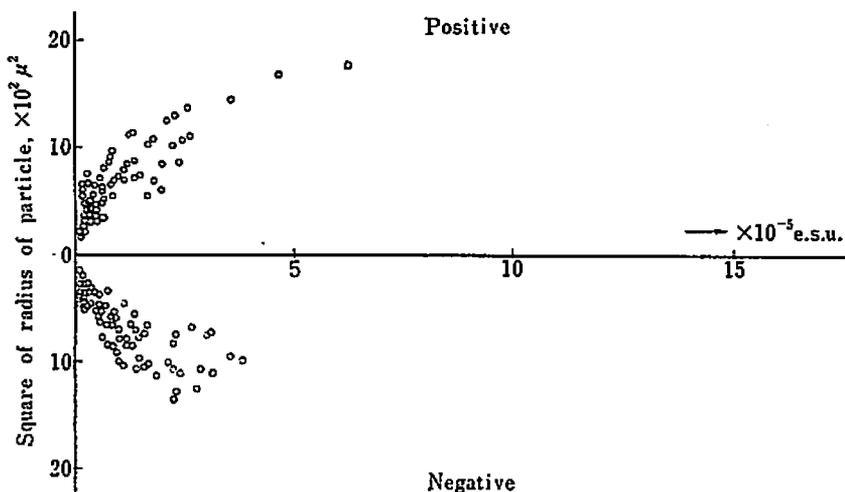


Fig. 4 Amount of chage vs. surface area of particle in atmosphere. Potao-starch. (Silver net)

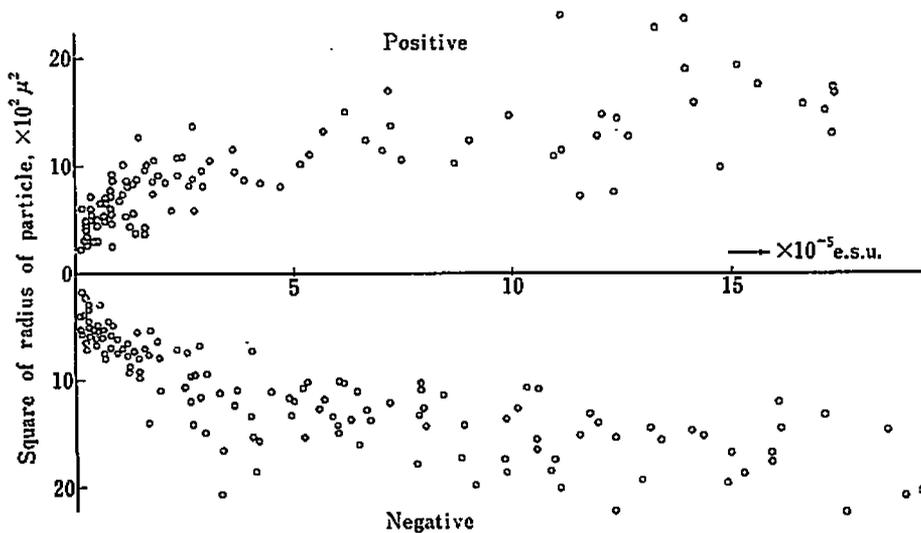


Fig. 5 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Lactose. (Silver net)

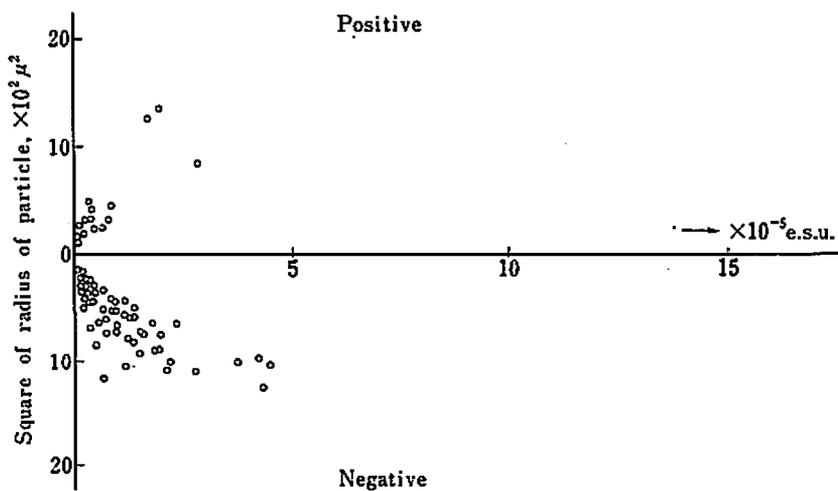


Fig. 6 Amount of charge vs. surface of particle in saturated vapor. Polyvinyl chloride. (Silver net)

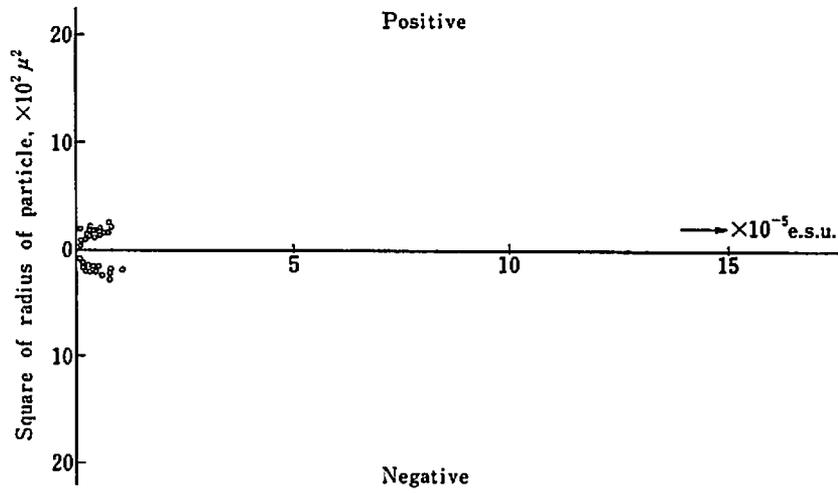


Fig. 7 Amount of charge vs. surface area of particle in saturated vapour. Mica. (Silver net)

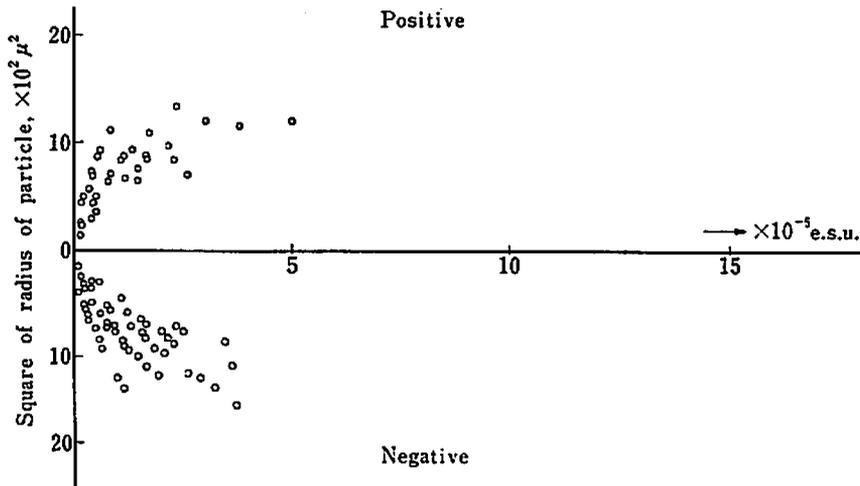


Fig. 8 Amount of charge vs. surface area of particle in saturated vapour. Potatostarch. (Silver net)

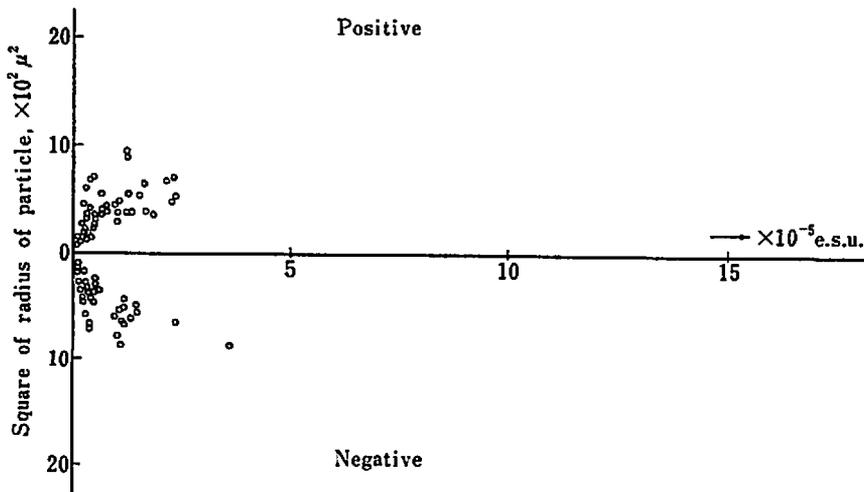


Fig. 9 Amount of charge vs. surface area of particle in saturated vapour. Lactose. (Silver net)

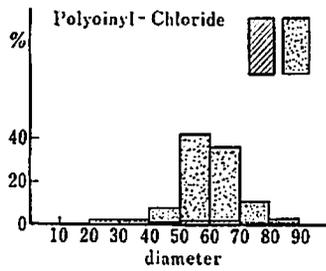


Fig. 10 Distribution of charge on particles of polyvinyl chloride in atmosphere

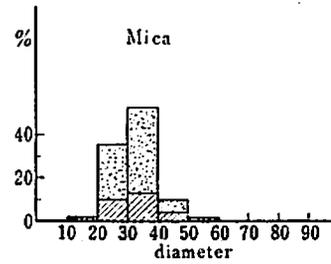


Fig. 11 Distribution of charge on particles of mica in atmosphere

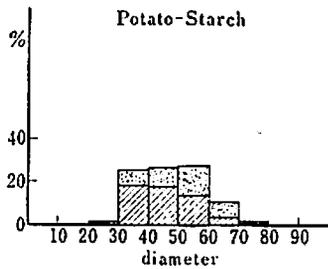


Fig. 12 Distribution of charge on particles of potato-starch in atmosphere

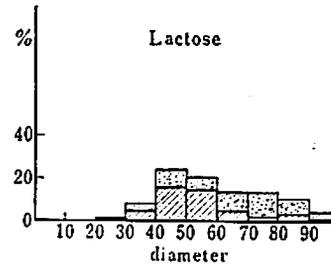


Fig. 13 Distribution of charge on particles of lactose in atmosphere

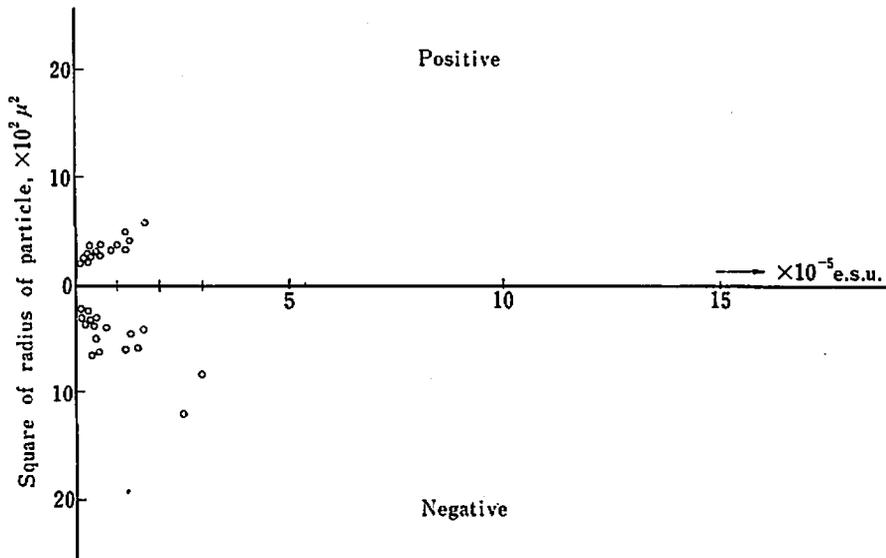


Fig. 14 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Polyvinyl chloride. (Copper net)

- (2) Fig. 6~9 は銀網を用いたときの飽和蒸気圧中におけるとき
- (3) Fig. 14, 16 は銅網を用いたときの空気中におけるとき
- (4) Fig. 15, 17 はステンレス網を用いたときの空気中におけるとき

Fig. 2 から塩化ビニール粉の帯電量が  $16 \times 10^3 \mu^2$  まで直線関係にある。このことは粒子の直径  $80 \mu$  までの増加とともに帯電量も増える。同様に Fig. 3 からマイカのそれは  $50 \mu$ , Fig. 4 からバレイショデンプンのそれは  $70 \mu$ , Fig. 5 から乳糖のそれは  $70 \mu$  であった。このことから帯電量が表面積に比例するのは直径約  $10 \mu$  から  $70 \mu$  ないし  $80 \mu$  である。その後の帯電量の増

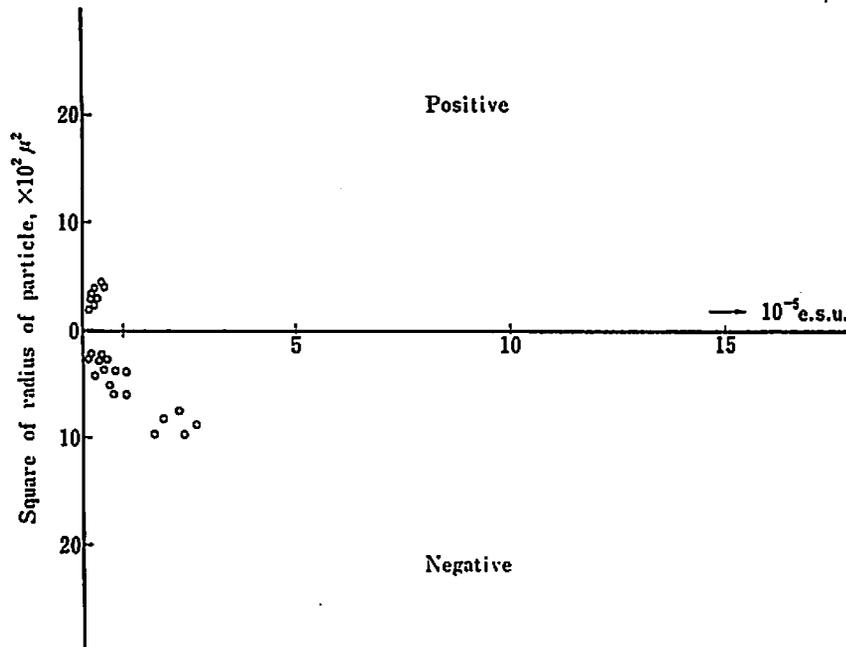


Fig. 15 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Polyvinyl chloride. (Stainless steel net)

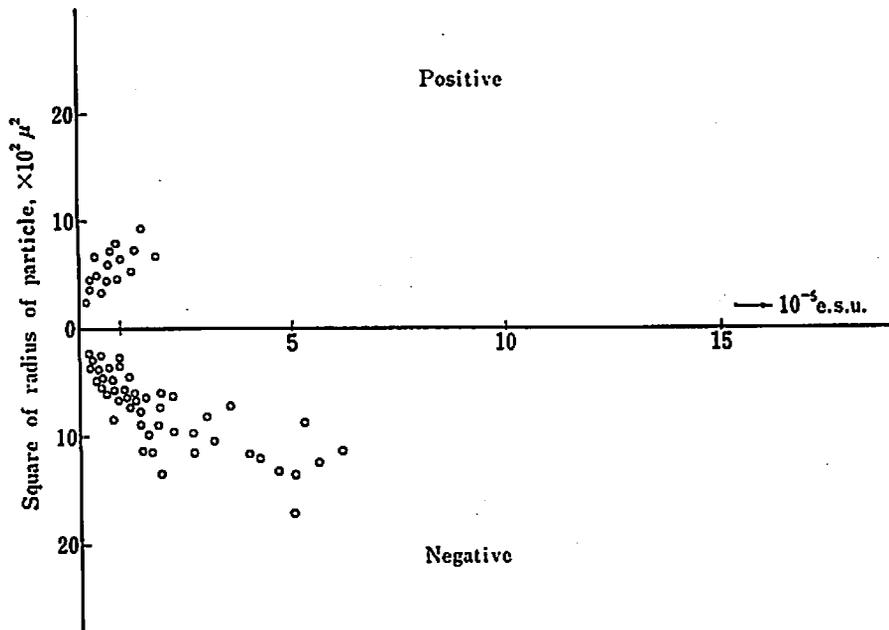


Fig. 16 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere. Potato-starch. (Copper net)

加は半径の3乗と帯電量との関係が直線的であるから体積電荷になっているものと考えられる。

飽和蒸気圧においてみられる除電現象が特に著しく現われたのはマイカ, 乳糖である (Fig. 6~9)。すなわち, それらの図から体積に比例していた部分の中性化がおこなわれたものと考えられる。

また, Fig. 14~17 は仕事関数の異なる銅, ステンレスホッパー網で観測をおこなったものであるが, 湿度に比してホッパー材質においては大きな差異はみられない。このことは, 粉体の空

気輸送のパイプなどは良導体であればよいことが推測される。

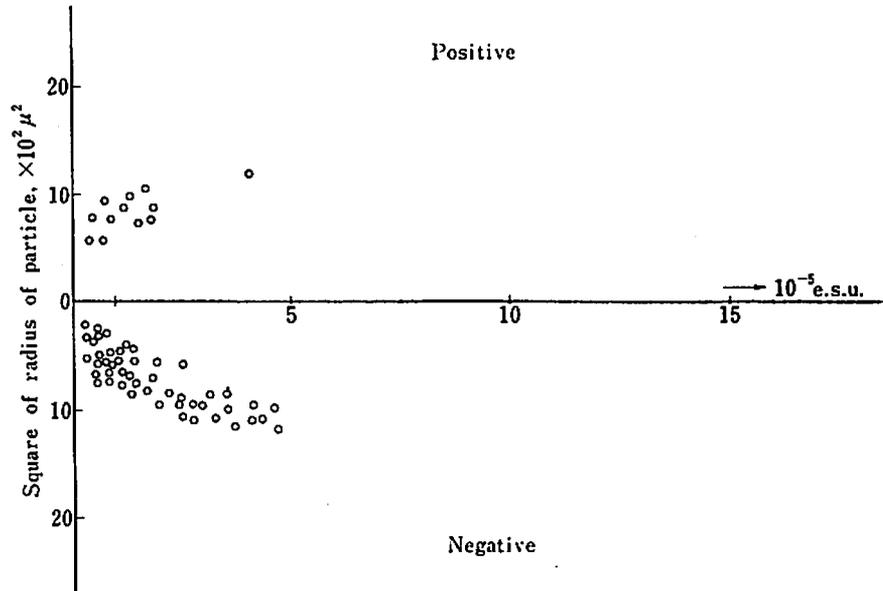


Fig. 17 Amount of charge vs. surface area of particle in atmosphere.  
Potato-starch. (Stainless steel net)

種谷は次のように報告している。粉体の粒子個々の極性は小粒子は相対的に正電荷粒子数が多く粒径の大きくなるにしたがって負電荷粒子数が増加し、直径  $80 \mu$  以上の粒径は中性粒子数がほとんどである。全粒子、すなわち粉体としての極性は正である。また粉体の場合、小粒子すなわち単一粒子および単一粒子の結合によってできる大きい粒子の2つの相違から単一粒子径範囲では表面積に、結合粒子は質量に比例すると考え粉体の帯電量は  $(-13.1 \sim 11.4) \times 10^{-5} \text{ e.s.u.}$ 、平均表面電荷密度は  $(-1.850 \sim 1.306) \text{ e.s.u./cm}^2$  の範囲である。

また孫野<sup>6)</sup>の研究から雲粒の帯電量は体積または質量に比例して電氣量が増加し、この現象を粉体の大きい粒子が小粒子の結合からできているとの解釈と同様な取り扱いをして質量に比例すると結論をだしている。

粉体では全粒径に対して同一比例定数で帯電量が増加するのではなく、大きい粒径は小さい粒径より一般に電荷増加量が小さい。これは比較的大きい粒子は単一粒子ではなく異種の粒子結合によるものと説明される。

一般に静電気発生に対してその除電対策として、粉体用器のアース、あるいは電荷をもった粉体に放射線の照射または雰囲気を高湿度にする対策がある。しかし実際そこにどのような相関々係が成立っているか明確な報告はない。

著者はこの Fig. 6~9 から次の実験事実を得た。すなわち、飽和蒸気圧下では静電気減少は起る。それは粒径が大きく体積に比例していた部分が除電され、粒径の小さい表面積に比例する電荷が残存するという事を知った。このことは、写真の軌跡からいうことができる。粒子の軌

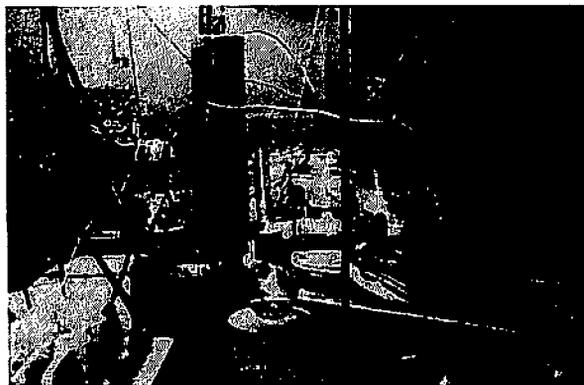


Photo. 1 Whole apparatus for measuring the charged particles

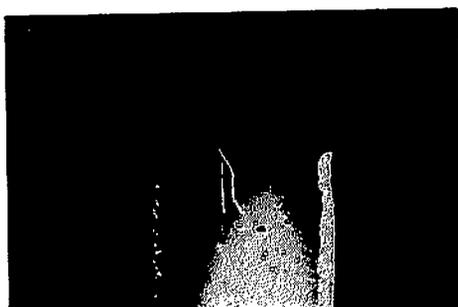


Photo. 2 Sine-wave trajectories of particles

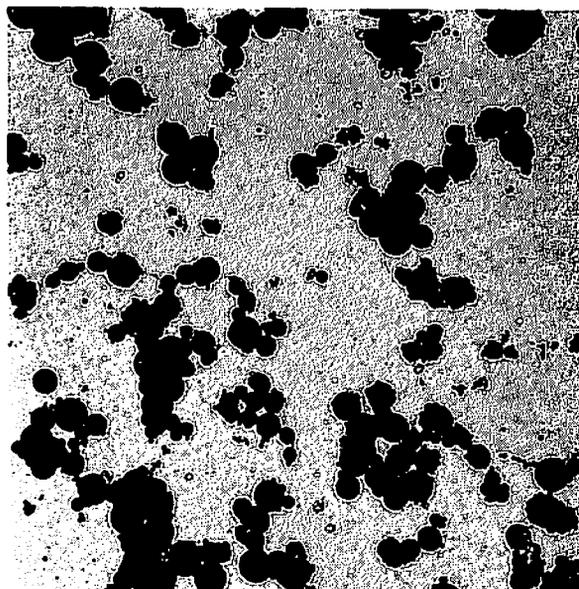


Photo. 3 An electron microphotograph of polyvinyl chloride. ( $\times 7500$ )

跡幅から体積に比例する大きな粒子の粒径を計算すると、 $100\mu$  以上で数多くの異種粒子の集まりで中性化がおこなわれ不連続流動として落下する。

この現象は空気中ではまれにしか見られなかった。なお、種谷は Stokes の沈降速度と軌跡幅から粒径の比較計算で  $\pm 10\mu$  でおさまると報告している。ところが、飽和蒸気圧下では比較数約  $1/3$  であるが極性の逆転は起らず、マイナス粒子の数が多く残った。このことは蒸溜水の小滴の極性、直径  $70\mu$  でマイナスからプラスに起ることから、ここで小滴は  $70\mu$  以下と考えると説明できる。すなわち、粉体の極性の逆転はプラスからマイナスへ  $60\mu$  附近で起り、そこへ多くのマイナス電荷を持った水滴が観測筒に入って粉体のプラス単一粒子を中性化し、マイナス粒子を残すからである。

終りに、本研究をおこなうに当り御指導を頂いた雪印乳業研究所、種谷真一氏、法工大、津々見教授、並びに池田助手に深く感謝の意を表する次第である。

(昭和42年2月4日受理)

### 参 考 文 献

- 1) W.R. Harper, Phil. Mag. suppl., 6, 365 (1957).
- 2) 橋高, 葛西, 堀内, 応用物理学会報告要旨集, 秋期大会, 50 (1961).
- 3) Anna Szagnok, J. Appl. Phys., 31, 211 (1960); 31, 451 (1960).
- 4) Charles J. Brasefield J., Franklin Institute, 270, 283 (1960).
- 5) 種谷真一, 応用物理, 30, 852 (1961); Appl. Phys., 2, 798 (1963).
- 6) 孫野長治, 菊地勝弘, 雪氷, 22, 1 (1960).