

論 文

粉粒体の空気輸送における新しい円筒型除電器について

増田 閃一*, 菊部 忠**, 斎藤 俊行***

(1982年6月14日受理)

Pipe-shaped Static Charge Eliminator for Air Conveyer Line of Powders

S. MASUDA,* T. SONOBE** and T. SAITO***

(Received June 14, 1982)

A pipe-shaped novel static charge eliminator with a high performance and safety has been developed to be used in an air conveyer line of powders. It consists of grounded tungsten wires attached on the inner surface of a glass cylinder and a conducting paint exciting electrode covering its outer surface and moulded in resin insulator. The electrode system is encapsulated in a metal casing, and connected to a pipe line of the air conveyer. A high frequency exciting voltage with typical 2 kHz frequency and 2.5 kV peak voltage is applied between the tungsten discharge wires and the exciting electrode to produce over the inner surface of the glass cylinder streamer corona discharge serving as a plasma ion source. The voltage-current characteristics of this unit and its ion emission capability are measured. The charge elimination equation containing a relaxation time or relaxation length is derived. Then, the charge elimination by this device is measured using four different kinds of powders. The results obtained support the validity of the equation. The value of the relaxation length reaches 35.5 cm at less than 100 g/m³ mass-loading with 30-40 μm particle size so that the present charge eliminator can reduce charge of the powder down to 5% of its initial value with only 90 cm effective length.

1. まえがき

管路内を空気輸送される粉粒体帶電雲の、安全でかつ有効な新しい除電方式を開発した^{1,2)}。従来の除電器が交流高電圧を印加された針電極からの交流コロナ放電を用いている³⁾のに対し、本除電器は管路形状の一部を構成する円筒内壁に接地された放電線を設け、これに絶縁物を介して対向させた埋入状態の励起電極に高周波またはパルス電圧を印加し、放電線に生ずるストリーマコロナ放電により正負両イオンを必要領域に安全かつ豊富に供給することを特徴とする。

本論文では、まず本除電器の基本構造と基本特性について記述する。ついで、帶電粉体の空気輸送システム内に本除電器を挿入した場合の除電理論と除電の実測結果ならびにその理論の比較について報告する。

2. 除電器の基本構造と除電原理

2.1 基本構造

本除電器の基本構造を図1に示す。パイレックスガラス円筒2(管長300 mm, 外径30 mm, 内径27.1 mm)の外壁に導電性塗料を塗布して膜状励起電極3を形成し両端にルンドウング用の円環4を設けて端部への電界集中を防ぐ。その外側はシリコンゴム絶縁物5でモールドする。内壁にタングステン線放電極1(直径0.2 mm; 16本)をガラス円筒2および絶縁物5に固定された両端の同心円状固定板9にネジ止めし軸方向に張る。このようにして構成したエキサイタ本体はレセプタクル側コネクタ6を取り去れば右方向にスライドして外側の接地された金属円筒ケーシング7から抜いて放電線の点検修理を行なえるようになっている。

2.2 除電原理

安全のため放電線1を接地し、これと励起電極3との

* 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, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

** 東京電機大学工学部電気通信学科(101 東京都千代田区神田錦町 2-2)

Department of Communication Engineering, Tokyo Denki University, 2, Kanda-Nishiki-cho 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 101 Japan

*** 三協電業株式会社(152 東京都目黒区中央町 1-8-11)
Sankyo Densyo Co., Ltd., 8-11, Chuo-cho 1-chome, Meguro-ku, Tokyo, 152 Japan

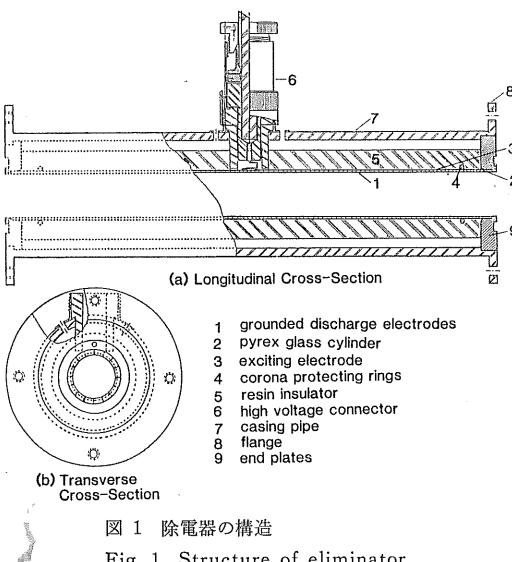


図 1 除電器の構造
Fig. 1 Structure of eliminator.

間に高周波ないしパルス高電圧を印加すると放電線からガラス円筒の内壁に沿ってストリーマコロナ放電が起こり、円筒面状のプラズマイオン源が形成される。管路内に帶電粉体を通すと、除電器により生成された正負イオン中、この帶電粉体と逆極性のイオンがクーロン力により帶電粉体へと吸引される。その結果、帶電粉体の電荷は減少ないし中和され、除電されることになる。

2.3 理論的考察

除電空間における帶電粉体雲はその外側から逆極性イオンの射突・進入を受け除電されるはずであるが、一方激しい乱流のため常に内側と外側が入れ替わり、軸に垂直な断面上では近似的に一様な空間電荷密度分布を保つつつ除電していくものと考えることができる。この場合、プラズマイオン源から放出される除電イオン電流密度の大きさが除電速度を決定するから、問題はこの値がいかなる大きさをとりうるか、ということになる。

さて、粉体濃度が高く、円筒内壁から放出される除電イオンが十分深くは帶電雲内に侵入できない、と仮定する。除電イオンは帶電雲の最外殻部領域の粉体電荷を中和の上逆極性に荷電、後続イオン流に対しポテンシャル障壁を作つてこれを阻止する。このモデルはベルト形静電発電機におけるイオン注入プロセスに類似している。除電イオンはその領域の空間電荷電界強度 E_0 に比例する逆極性電荷密度に達するまで最外殻領域に注入される。除電電流密度 J はこの空間電荷電界強度 E_0 と帶電粉体雲の平均流速 v に比例することになる。

$$J = A v E_0 \quad (1)$$

ここに定数 A は粉体濃度に依存する。さらに、 E_0 ないし v の値が大きくなると除電電流密度 J はプラズマ中の

イオン発生率で決定される飽和値 J_s に達する。

$$J_s = e \alpha N \quad (2)$$

ここに α はイオン抽出率、 N は毎秒単位面積当たりのイオン発生率 ($\text{個}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) である。 J_s はエキサイタの設計および運転モードにより決定され、最大イオン放出能力を表わすプラズマ特性パラメータとなる。 J_s は除電器の性能限界を表わすことになる。

したがって、上記の仮設が成立する場合、除電の性能は A および J_s の二つのパラメータによって判定することができる。

3. 除電器の基本特性

3.1 無負荷励起特性

まず粉体の存在しない無負荷時にエキサイタの放電線群と励起電極間に 50 Hz, 500 Hz および 2 kHz の交流電圧を印加するときの電圧電流特性を測定した。その結果を図 2(a), (b) に示す。図中の v_p , i_p は印加電圧と流入電流の波高値である。印加電圧が放電開始電圧を越え

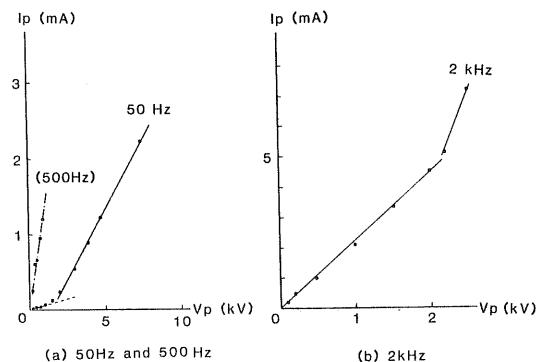


図 2 無負荷電圧電流特性 (波高値)

Fig. 2 Voltage-current characteristics of exciter in air load (peak values).

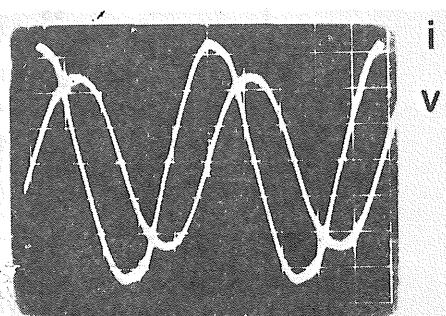


図 3 電圧電流波形 (2.5 kV, 2 kHz)

Fig. 3 Voltage and current wave forms at 2.5 kV and 2 kHz.

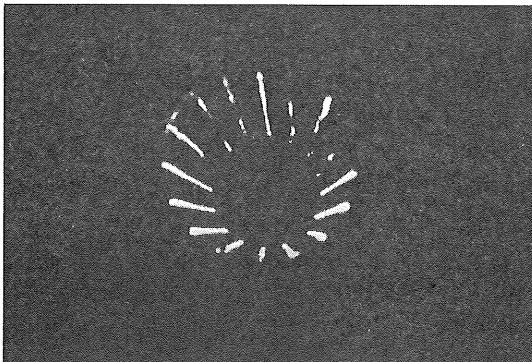


図 4 コロナ放電
Fig. 4 Corona discharge.

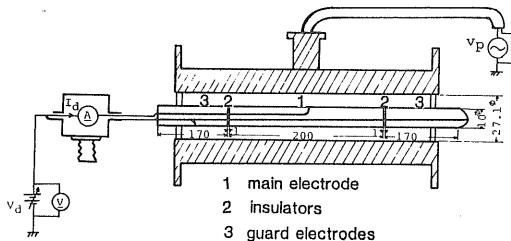


図 5 イオン供給のプローブ測定
Fig. 5 Probe measurement of ion emission.

ると充電電流に放電電流が加わる。図3は2kHz, 2.5 kVのときの放電波形で電流波形*i*は電圧波形*v*より約90°位相角が進んでいるが、電流の山(電圧の最大勾配)の右側のところが正弦波から少し欠けた波形となっており、ここでパルス的なストリーマコロナ放電を生じている。図4はこの条件下での管路内面の放電状態を示す写真である。各放電線は紫色によく発光している。

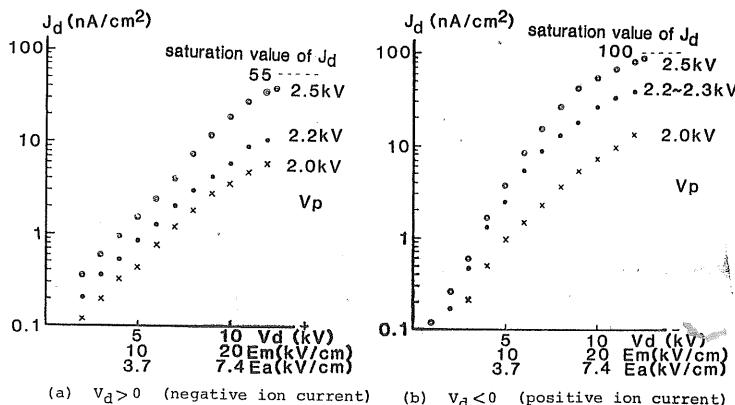


図 6 除電器のプローブ特性
Fig. 6 Probe characteristics of charge eliminator.

3.2 イオン供給のプローブ特性

図5の電流プローブを用いて、本除電器のイオン供給特性を測定した。プローブは外径10mm、内径8mmの真ちゅうパイプで作られ、図のように主電極1、保護電極3から成り、両者を絶縁物2(テフロン)で絶縁してある。

プローブを除電器内の中心軸に沿って挿入し、主電極、保護電極に正または負の直流電圧 V_d を印加する。このとき主電極に流入するイオン電流を I_d とする。また I_d を管壁面積で除してえられる、管壁 1cm^2 当りの電流密度を J_d とする。除電器に2kHzの交流電圧を印加し、その波高値 v_p をパラメータにしてえられた V_d と J_d の測定結果を図6に示す。エキサイタを励起しない($v_p=0$)とき、 I_d はほとんど流れなかった。

(a)はプローブに正電圧を印加した場合で負イオンが、(b)は負電圧を印加した場合で正イオンがそれぞれキャリアとなっている。

図中 E_m はプローブ表面の電界強度で、イオン空間電荷の影響を無視して

$$E_m = \{V_d/(d/2)\}/\ln(D/d) \approx 2.006 V_d \quad (\text{kV/cm}) \quad (3)$$

から求めた。ただし、 D はガラス円筒の内径で2.71 cm、 d はプローブ外径で1.0 cmである。 E_a は放電極面の電界強度として、同じく

$$E_a = \{V_d/(D/2)\}/\ln(D/d) \approx 0.7403 V_d \quad (\text{kV/cm}) \quad (4)$$

より計算した。

J_d はプローブ電極を挿入、電圧印加した条件下でえられる本除電器特性を表わすもので、2.3項で論じた帶電粉体雲に対する除電電流を表わすものではない。図から明らかのように、 J_d は印加電圧 V_d とともに急激に

上昇し、ついにその上昇率が鈍化し飽和傾向を示すようになる。この飽和値は 2.3 項で論じた飽和除電電流密度 J_s と一致ないし比例するものと考えられる。 J_d の上昇域での上昇割合は V_d の小さな範囲ではほぼ V_d^2 に比例するが V_d が大きくなるとこれよりも急となり、しかる後に飽和傾向を示し、さらに V_d を大きくすると全路破壊へと移行する。

最初の V_d の低い範囲では J_d は空間電荷制御値をとるが、それより V_d の高い領域ではこれを上まわる値をとっていることになる。この場合、粉体の逆極性空間電荷（イオン空間電荷を打ち消す）は存在しないから、上記の原因としては、プローブの作る電界が励起作用を促進する効果を有するため、と考えられる。

飽和除電電流密度 J_s として、 $V_p=+2.5 \text{ kV}$ のとき $J_s^- = 55 \text{ nA/cm}^2$ （負イオン）で $v_p=-2.5 \text{ kV}$ のとき $J_s^+ = 100 \text{ nA/cm}^2$ （正イオン）となる。その比は

$$J_s^+/J_s^- = 1.8 \quad (5)$$

となる。正イオンのほうが多量に抽出できるが、これは正ストリーマのほうが沿面方向に延びやすいため、と考えられる⁴⁾。

除電器管壁 1 cm^2 当り 1 秒間に発生する抽出可能なイオン数 N （個/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ）は、(a)では $v_p=+2.5 \text{ kV}$ で $N^- \simeq (55 \times 10^{-9}) / (1.6 \times 10^{-19}) = 3.9 \times 10^{11}$ （個/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ）

(6)

(b)では $v_p=-2.5 \text{ kV}$ で

$$N^+ \simeq (100 \times 10^{-9}) / (1.6 \times 10^{-19}) = 6.2 \times 10^{11} \quad (\text{個}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \quad (7)$$

で正負両イオンとも、十分な量といえる。

4. 鋼球落下除電試験

あらかじめ一定の値に静電誘導を利用して正または負に帯電させた直径 3 mm の鋼球を除電器中心軸に沿って自由落下させ、ファラデー・ケージで受けたその残留電荷を測定することによりその除電効果を調べた。電源をオフにしたときにえられる電荷初期値 q_0 、電源をオンにしたときの残留電荷 q を種々の動作条件のもとで測定した結果を図 7(a), (b) に示す。() 内に平均残留率 (q/q_0) を記入した。なお、除電効率は

$$\eta = 1 - (q/q_0) \quad (8)$$

によって定義することができる。残留電荷 q の値も 50

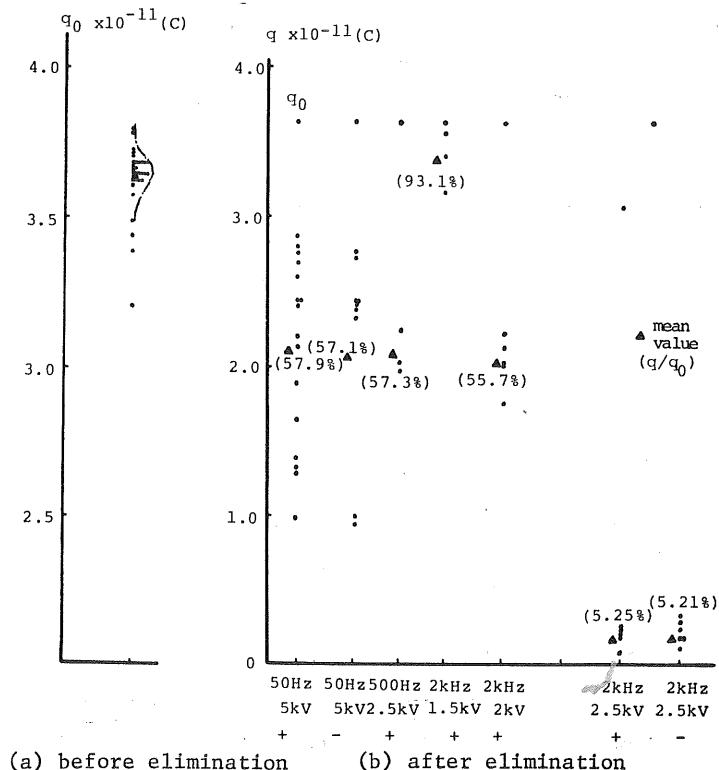


図 7 鋼球落下除電試験結果

Fig. 7 Charge elimination of free-falling eliminator.

Hz の場合を除くと比較的一定している。

鋼球の平均速度は 1.21 m/s, 除電器内の有効滞留時間は 247 ms である。2 kHz, 2.5 kV の励起条件で、正帯電、負帯電のいずれについても除電効率約 95% がえられ、本装置のすぐれた除電性能が実証された。

5. 空気輸送システムにおける除電試験

5.1 試験方法

本除電器 3 個を直列に接続して粉体の空気輸送径路に挿入、2 kHz, 2.5 kV で励起し、その上流側で粉体をマイクロフィーダより供給、サイクロントライボチャージャで摩擦帶電させたうえで空気輸送径路に導入し本除電器の除電能力を測定した。その構成図を図 8 に示す。粉体の残留電荷量を、下流に設けたフィルタ式吸引ファラデー・ケージとディジタルエレクトロメータ (Keithley 616) で測定し、出力電流をペンシレコーダに記録する。この電流の時間積分 q と電子上皿天秤で測定した粉体の捕集量 m から除電前後の粉体の比電荷 q/m を求めた。

試料粉体としては、炭酸カルシウム、アクリル樹脂、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂の 4 種類の粉体を用いた。

5.2 性能評価パラメータ

いま、初期空間電荷密度 ρ_0 (C/m³) の帶電粒子雲が除電器内の距離 l (m) を通過することにより除電作用を受け、その値が ρ (C/m³) に下がったとする。除電は帶電粒子雲によって作られる空間電荷電界によってプラズマから引き出されるイオンにより行なわれ、次式に従はずである。

$$\pi a^2 (d\rho/dt) = -2\pi a J \quad (9)$$

ここに a はガラス管内壁の半径である。いまこの除電電

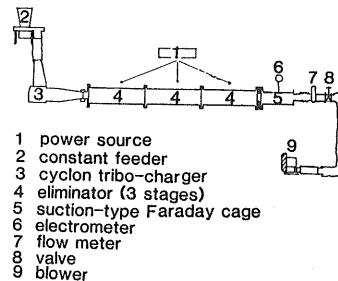


図 8 管路輸送システムでの除電試験

Fig. 8 Experimental setup for charge elimination tests in pneumatic conveyer line.

流密度が式(1)に従うものとすると、ガウスの定理からプラズマ表面での空間電荷電界強度 E_0 は、

$$E_0 = (a/2\epsilon_0)\rho \quad (10)$$

で与えられるから、式(1), (10)を式(9)に代入して、除電式

$$\rho = \rho_0 \exp(-t/\tau) \quad (11)$$

をうる。ただし、 t は除電器内の帶電体雲の滞留時間、 τ は緩和時間で

$$\tau = \epsilon_0 / A v \quad (12)$$

さらに除電器の有効長を l とすると $l = vt$ ゆえ、式(11)は

$$\rho = \rho_0 \exp(-l/l_0) \quad (13)$$

となる。ここに

$$l_0 = v\tau = \epsilon_0 / A \quad (14)$$

は緩和長である。したがって、除電器の性能は緩和時間 τ ないし緩和長 l_0 で表わすことができる。

5.3 試験結果

除電器励起条件 2 kHz, 2.5 kV のもとで、除電器段

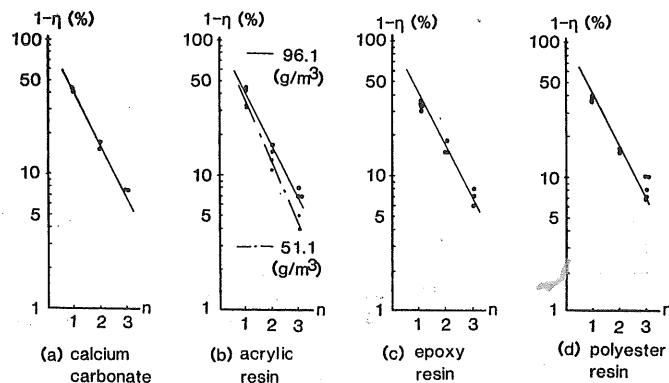


図 9 除電特性

Fig. 9 Charge elimination characteristics.

数 n を 1, 2, 3 とすることにより除電器の有効長 l を変え比電荷 q/m を測定する。それをもとに段数 n に対し、残留電荷比 $(1-\eta)$ (η : 除電効率) をプロットする。図 9 はこのようにしてえた結果である。

表 1 と図 9(a)は平均粒径 $D_{p50} \approx 30 \sim 40 \mu\text{m}$ の炭酸カルシウムをマイクロフィーダから一定割合 14.06 g/min , 流速 $3.9 \sim 5.3 \text{ m/s}$ で供給、したがって粉体濃度もこれに応じて $105 \sim 76.7 \text{ g/m}^3$ で供給したときの試験結果である。粉体濃度の変化にもかかわらず、これをプロットした図 9(a)の結果はきわめてよく式(13)に従っており、これから $l_0 = 35.5 \text{ cm}$ を得る。この値を使って表 1 の No. 6 ($v = 4.4 \text{ m/s}$) と No. 5 ($v = 5.3 \text{ m/s}$) に対する τ の値を算出すると、 $\tau = 80.6, 66.9 \text{ ms}$ 、したがって、 $3\tau = 242, 201 \text{ ms}$ を得る。表中 ball と記したものは鋼球落下除電試験の結果である。その滞留時間は 247 ms で上の 3τ と同程度、その除電効率は 95% で式(11)に 3τ を代入してうる除電効率 95% とよく一致している。

表 2、図 9(b)は $D_{p50} = 30 \mu\text{m}$ の塗装用アクリル粉体を 7.67 g/min と 14.42 g/min (濃度は 51.1 g/m^3 と 96.1 g/m^3) で供給したときの試験結果である。濃度の薄いほうが若干除電効率がよいが、顕著な差はみられない。

表 3、図 9(c)は $D_{p50} = 30 \mu\text{m}$ の塗装用エポキシ粉体を 14.05 g/min (濃度 93.7 g/m^3) で供給したときの試験結果である。

表 4、図 9(d)は $D_{p50} = 30 \mu\text{m}$ の塗装用ポリエチル粉体を 13.96 g/min (濃度 93.1 g/m^3) で供給したときの試験結果である。

図 9(a)～(d)から、試料粉体による有意差はなく、3段

で除電器は粒径 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 、濃度 100 g/m^3 以下の粉粒体に対しては、その種類に関係なく緩和長 $l_0 = 35.5 \text{ cm}$ のきわめてよい除電能力を有することが判明した。

6. あ と が き

管路内を空気輸送される粉粒体帶電雲の有効かつ安全な除電器を開発し、その除電理論を検討すると同時に除電特性を実験的に調べた。それにより次の結果を得た。

- 1) 勵起条件 $v_p \geq 2.5 \text{ kV}$, $f \geq 2 \text{ kHz}$ で十分な除電性能を発揮する。
- 2) 除電電流密度 J は、その表面に作用する電界強度と粉体雲の流速に比例する。
- 3) 本除電器による帶電粉体雲の除電は滞留時間または除電器有効長に対して指數関数減衰式に従う。
- 4) この場合の長さに対する除電式の緩和長の値は粒径 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 、濃度 100 g/m^3 以下の場合、粉体によらず緩和長 $l_0 = 35.5 \text{ cm}$ となる。
- 5) 有効長 $l = 90 \text{ cm}$ で、帶電粉体初期電荷の 5% に除電することができる。
- 6) 帯電鋼球の除電に対してもその除電効果は粉体雲の場合と定量的に一致した結果を示す。

したがって、本装置は粉粒体の管路輸送における除電に有効な手段を提供するものと思われる。

なお、除電電流密度が式(1)に従うことは実験的に確かめられたが、そのより詳細な機構に立ち入っての論議およびその適用範囲についての実験的・理論的研究結果については、次回に報告する。

参 考 文 献

- 1) 増田閃一、菌部 忠、斎藤俊行：静電気学会講演論文集

表 1 炭酸カルシウムに対する試験結果

Table 1 Test results for calcium carbonate.

No.	Stage number	Gas velocity (m/s)	Residence time (ms)	Concen- tration (g/m ³)	(Mean) Current (nA)		Charge-to-mass ratio (nC/g) (q/m) _{off}	Eliminating efficiency η (%)	Charge residual ratio $1 - \eta$ (%)
					i_{off}	i_{on}			
1	1	4.2	72	99.3	16	7	64.2	28.2	56
2		3.9	77	105	14	6	87.6	37.8	57
3	2	4.2	143	99.0	16.5	3	95.4	17.4	82
4		4.2	143	99.3	27.5	4.5	158.4	25.8	84
5		5.3	170	76.7	31.25	2.5	237.6	19.2	92
6	3	4.4	205	93.8	40	3	385.2	28.8	92
7		4.4	205	93.8	23	3	93.6	12.2	87
ball	1		247					94.7	13

表2 アクリル樹脂に対する試験結果
Table 2 Test results for acrylic resin.

No.	Stage number	Residence time (ms)	Concen- tration (g/m³)	(Mean) Current (nA)		Charge-to-mass ratio(nC/g)		Eliminating efficiency η (%)	Charge residual ratio $1-\eta$ (%)
				i_{off}	i_{on}	$(q/m)_{off}$	$(q/m)_{on}$		
1	1	68.3	51.1	39.2	12.4	329.3	104.2	68	32
2				36.0	16.0	321.4	142.8	56	44
3				38.4	16.4	334.9	143.0	58	42
4	2	137	96.1	36.0	4.4	351.8	43.0	88	12
5				40.4	4.4	296.9	32.3	89	11
6				46.0	6.0	326.8	42.6	87	13
7	3	205	137	27.6	1.2	275.7	12.0	96	4
8				35.2	2.4	329.3	32.4	93	7
9				39.2	2.0	350.8	17.9	95	5
10	1	68.3	96.1	48.0	16.0	275.5	91.8	67	33
11				42.8	14.0	244.3	79.9	68	32
12	2	137	205	40.0	6.8	332.7	56.6	83	17
13				48.4	7.2	338.5	50.4	85	15
14				47.2	7.2	309.9	47.3	85	15
15				47.2	8.0	286.7	48.6	83	17
16	3	205	205	51.2	3.6	275.4	19.4	93	7
17				48.8	3.6	267.8	19.7	93	7
18				43.6	3.6	231.6	19.1	92	8

表3 エポキシ樹脂に対する試験結果
Table 3 Test results for epoxy resin.

No.	Stage number	Residence time (ms)	Concen- tration (g/m³)	(Mean) Current (nA)		Charge-to-mass ratio(nC/g)		Eliminating efficiency η (%)	Charge residual ratio $1-\eta$ (%)
				i_{off}	i_{on}	$(q/m)_{off}$	$(q/m)_{on}$		
1	1	68.3	93.7	24.0	7.2	186.9	56.1	70	30
2				20.0	6.8	191.1	65.0	66	34
3				15.2	5.6	133.1	49.0	64	36
4	2	137	205	18.4	6.0	161.6	52.7	67	33
5				18.0	6.0	145.1	48.4	67	33
6				26.4	4.0	237.8	36.0	85	15
7	3	205	205	22.0	4.0	194.6	35.4	82	18
8				22.0	3.2	207.9	30.2	85	15
9	1	137	137	21.2	1.2	210.0	11.9	94	6
10				23.2	1.6	213.2	14.7	33	7
11				48.0	4.0	303.5	25.3	92	8

表 4 ポリエスチルに対する試験結果
Table 4 Test results for polyester resin.

No.	Stage number <i>n</i>	Residence time (ms)	Concentra- tion (g/m ³)	(Mean) Current (nA)		Charge-to-mass ratio(nC/g)		Eliminating efficiency η (%)	Charge residual ratio $1-\eta$ (%)
				<i>i</i> _{off}	<i>i</i> _{on}	(<i>q/m</i>) _{off}	(<i>q/m</i>) _{on}		
1				53.2	21.6	258.2	104.8	60	40
2	1	68.3	93.1	44.0	17.2	211.7	82.7	61	39
3				48.8	18.4	234.3	88.3	63	37
4				45.2	7.2	214.5	34.2	84	16
5	2	137		43.2	6.8	195.6	30.8	84	16
6				46.8	6.8	219.6	31.9	85	15
7				62.0	5.2	358.8	30.1	92	8
8	3	205		50.8	3.6	259.1	18.4	93	7
9				40.8	4.2	220.4	22.7	90	10
10				49.2	5.0	241.6	24.5	90	10

'81, p.237, 静電気学会 (1981)

- 2) S. Masuda, T. Sonobe and T. Saitoh : *Rec. of IEEE/IAS Annu. Meet.*, p. 1140 (1982)
3) 静電気学会編 : 静電気ハンドブック, p.819, オーム社

(1981)

- 4) 放電ハンドブック出版委員会 : 放電ハンドブック, 電気学会編, p.226, オーム社 (1978)