

論 文

粉粒体空気輸送用円筒型除電器の除電特性

荷 福 正 治*, 増 田 閃 一**

(1986年6月27日受理)

Neutralizing Characteristics of Pipe-shaped Static Charge Neutralizer
for Pneumatic Transportation of Powders

M. NIFUKU* and S. MASUDA**

(Received June 27, 1986)

One of the authors had developed a pipe-shaped static charge neutralizer, and its more detailed neutralizing characteristics were investigated in this research. The effect of powder charge polarity, residence time, transport velocity and concentration of powders on the neutralization performance were studied. The powder sample used was calcium carbonate. The results indicate that the plasma induced by high frequency surface corona provides enough neutralizing ions (up to 6.3×10^{11} [number/(cm²·s)] at +10 kV), and that the neutralization performance is not much affected by the polarity of powder charge and powder concentration. Whereas the performance is greatly dependent on the residence time as well as velocity. With increasing velocity the residual ratio of powder charge rises, but it becomes constant independently of residence time, accompanied by a large fluctuation of its measured values. This suggests that the charge neutralization process is off-set by the frictional charging in this device, which would be enhanced with the increase in velocity and concurrent enhancement of turbulence. In conclusion, this device indicates the most cost-effective performance, so far as the velocity be selected at a certain value (5-8 m/s) by a suitable selection of its cross-sectional area.

1. はじめに

粉粒体の空気輸送用円筒型除電器については、その構造と基本特性の一部をすでに報告した¹⁻³⁾。この除電器の除電性能は、帶電粉体雲の濃度、除電電流密度などいろいろなファクタに影響を受け、また正イオンのほうが負イオンより多量に（約1.8倍）抽出されることが示された。さらに除電電流密度は、帶電粉体雲の平均速度にも影響を受けることが明らかとなった。しかし、上記の研究では除電試験に用いた粉体試料はもっぱら摩擦帶電によって予備荷電したので、その極性を自由に選択する余

地がなかった。また、流送速度も3.9~5.3 m/sと比較的低く、粉体濃度選択の範囲も小さかった。

一方、実際の粉体空気輸送はさまざまな条件で行なわれ、とくに流送速度は上記の値よりも高くするのが普通である。本除電器の除電性能は逆極性イオンによる除電過程のみでなく、除電器自体での摩擦帶電という逆過程のバランスで定まり、とくに後者は流送速度とともに増大するものと予想される。

したがって、本研究においては、円筒型除電器の除電特性を、さらに詳しく調べるため、試料粉体の帶電極性、粉体雲濃度、および粉体雲の流速と除電率の関係を調べ、除電特性を明らかにすることとした。

2. 実験方法

2.1 除電器の基本特性

本除電器の構造を改めて示すと、図1のとおりであり、パリエックスガラス円筒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を形成している。ガラス円筒内壁には、タンゲステン線放電極1（直径0.2 mmのもの16本）

* 工業技術院公害資源研究所 (305 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-3)

National Research Institute for Pollution and Resources, Agency of Industrial Science and Technology, 16-3, Onogawa, Yatabe-cho, Tsukuba-gun, Ibaraki, 305 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, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

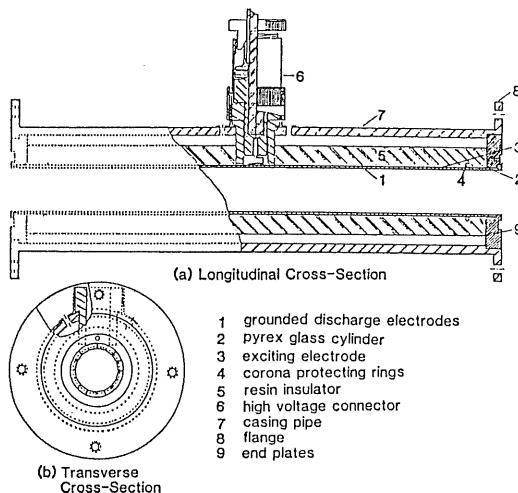
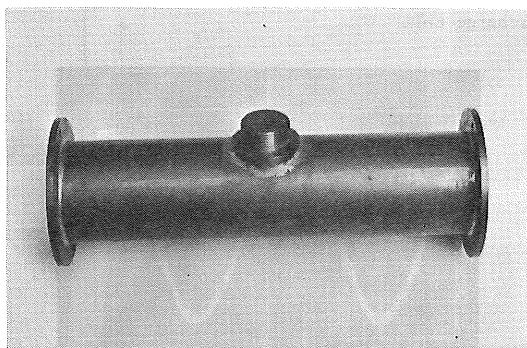
図 1 除電器の構造³⁾Fig. 1 Structure of neutralizer.³⁾

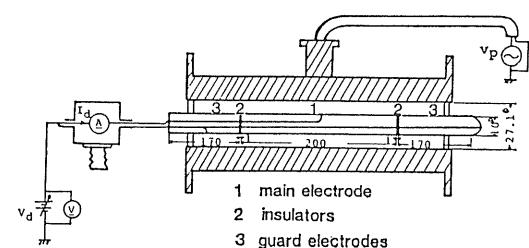
図 2 除電器の外観

Fig. 2 Neutralizer.

が軸方向に張られている。この放電線は接地してある。本除電器の外観は図2に示すとおりで、長さ30cmのものを1ユニットとし、これを必要個数直列に接続して所望の除電効果を得るモジュール構造となっている。

励起電極と放電極との間に高周波高電圧を印加すると各放電極からガラス内壁に沿って沿面コロナ放電を生じ、除電に必要な正負イオンを含むプラズマを形成する。この場合、良好な除電効果を得るにはプラズマのイオン密度は十分に高く、十分な除電用イオンを供給できなければならない。これを調べるために、図3に示す電流プローブを用いて、除電器のイオン供給特性を調べた。プローブは外径10mm、内径8mmの真鍮パイプで作られ、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。

イオン供給測定は、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

図 3 イオン供給特性の測定³⁾Fig. 3 Probe measurement of ion emission.³⁾

V_d を印加して行なわれる。このとき、主電極に流入するイオン電流 I_d を主電極の管壁面積で除し、管壁1cm²当りの電流密度 J_d を求め、除電器の特性を表わす量とした。

なお、これまでの報告¹⁻³⁾における試験条件の範囲内では、除電器の電流密度は、除電器に2kHzの交流電圧2.5kVを印加したとき、最大であったので、本研究ではこの値を用いた。

2.2 空気輸送中の粉体の除電試験

空気輸送中の粉体の除電試験は、予備荷電した粉体雲を本除電器の中を通過させ、その帶電量の減衰を求めて

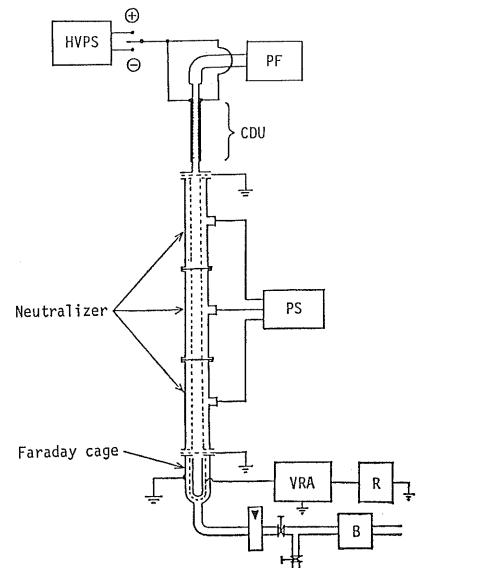


図 4 空気輸送中の粉体の除電試験装置

Fig. 4 Experimental apparatus for charge neutralization tests in pneumatic transportation of powder.

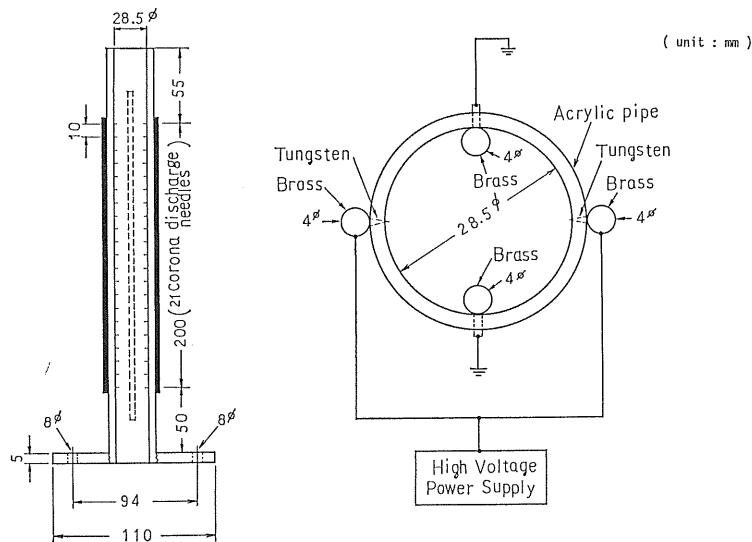


図 5 コロナ荷電部

Fig. 5 Corona discharge unit.

行なう。試験装置は図4に示すとおり、除電器3個を直列に接続し、空気輸送経路に挿入してある。粉体はフィーダー(PF)より一定量ずつ供給され、コロナ荷電部(CDU)で、正または負に予備荷電され、除電器で除電されたあと、吸引式ファラデーケージの中に入る。ファラデーケージに入った粉体は、振動容量型電流電位計により、その単位時間当たりの帶電量を測定し、その結果をペンレコーダに記録する。除電器を駆動したときとしないときの粉体帶電量の比より除電特性が求められる。

コロナ荷電部は、図5に示してあるが、コロナ放電用針を1cmおきに21個設けた電極2本を対向させ、中間部に接地極2本を設けてある。コロナ放電は、正または負の8kVの直流電圧を印加して行なった。この電圧(8kV)は、コロナ荷電部がストリーマ放電を発生しない最大のコロナ放電電圧である。

本研究に用いた粉体試料は炭酸カルシウムである。

3. 実験結果および考察

3.1 除電器のイオン供給特性

除電器に2kHz, 2.5kVの規定交流電圧を印加したときの電圧波形を図6に示す。この図は代表的な波形であるが、波形にいくらかの歪を生じた除電器もあった。本研究で使用した除電器はこれまでの場合¹⁻³⁾より、電圧の歪が大きいが、これは使用したネオントランジスの飽和によるものと思われる。除電器内の放電状態を調べてみたところ、各放電線は紫色によく発光していた。

プローブによるイオン供給量の測定結果を図7に示

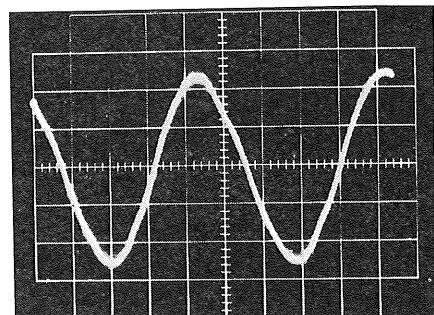


図 6 電圧波形

Fig. 6 Voltage wave form at 2.5 kV and 2 kHz.

す。各除電器のイオン供給特性はほぼ同じであったが、イオン電流密度のばらつきは印加電圧10kVのとき最大で、その差は約70nA/cm²であった。この結果によると、印加電圧 V_d の増加とともにイオン電流密度 J_d も大きく増加し、測定範囲内では空間電荷制限による飽和傾向は現われない。

プローブに印加する電圧 V_d の極性がイオン電流密度 J_d に及ぼす影響をみると、除電器や印加電圧によって多少のばらつきはあるものの、これまでの報告¹⁻³⁾と同様、正イオンのほうが負イオンより多量に抽出できることが示された。

除電器管壁1cm²当り1秒間に発生するイオン数 N [個/(cm²·s)]は、プローブに正電圧10kVをかけた場合、

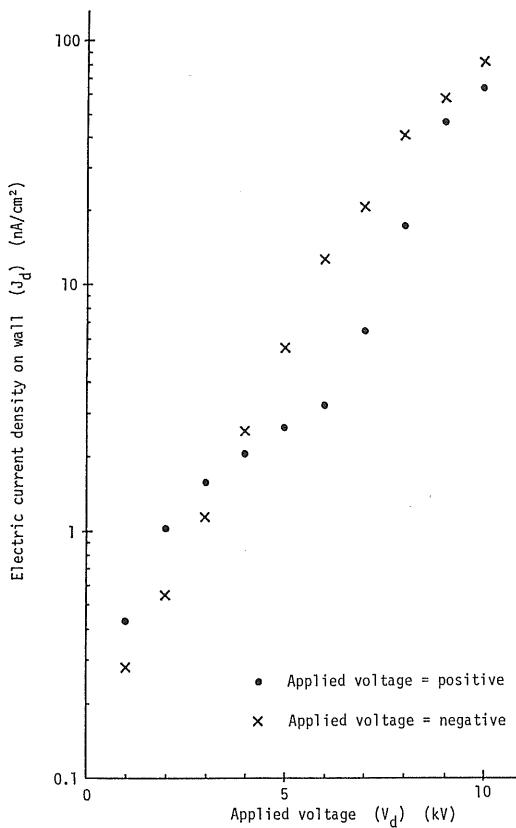


図 7 除電器のイオン供給特性

Fig. 7 Probe characteristics of neutralizer.

$$N^- = (10 \times 10^{-9} \sim 100 \times 10^{-9}) / (1.6 \times 10^{-19}) \\ = 6.3 \times 10^{10} \sim 6.3 \times 10^{11} [\text{個}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (1)$$

負電圧 10 kV をかけた場合、

$$N^+ = (15 \times 10^{-9} \sim 82 \times 10^{-9}) / (1.6 \times 10^{-19}) \\ = 9.4 \times 10^{10} \sim 5.1 \times 10^{11} [\text{個}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (2)$$

で、3 個の除電器とも十分な正負イオンを発生していると考えられる。

なお、除電器を駆動しないとき、発生する電流密度 J_d は、プローブ電圧を 10 kV にしても、除電器を駆動した場合の 1% 以下であり、除電器を駆動しないときの除電効果はほとんどないものと考えることができる。

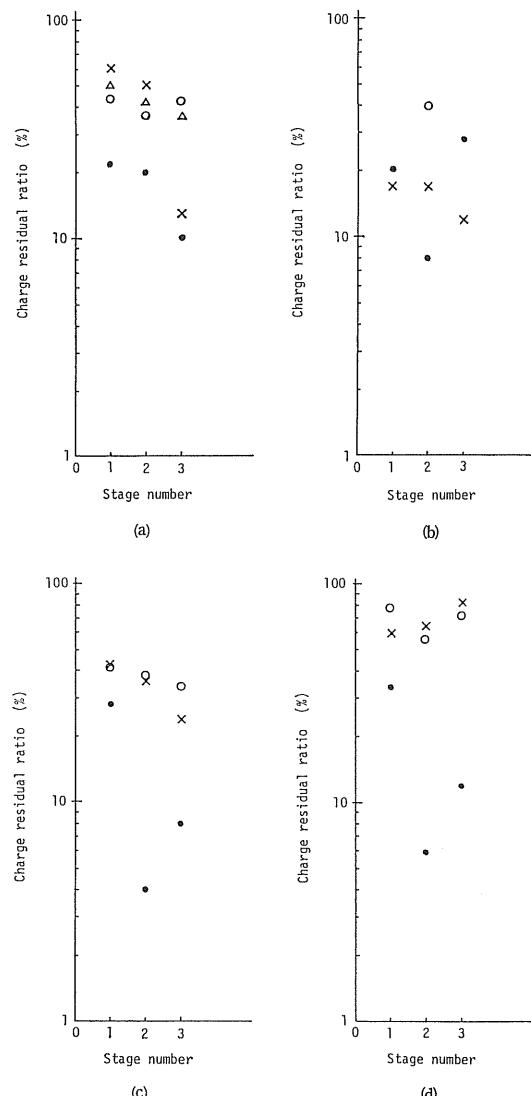
3.2 コロナ荷電部の荷電特性

コロナ荷電部に正または負の電圧 8 kV を印加するとコロナ放電が発生し、放電針から紫色の発光を観察できる。このときの放電電流を測定すると、+8 kV 印加のとき、放電電極側で +5~5.5 μA、接地極側で +2~2.2 μA、-8 kV 印加のとき、放電電極側で -10~-11 μA、接地極側で -17~-18 μA であった。コロナ荷電部の印加電圧を 9 kV 以上にすると、放電電極からス

トリーマ放電が発生し、高圧電源がトリップする。

コロナ荷電部の長さは 20 cm で、放電針 21 本をもつ電極 2 本を対向させてあるので、上述の放電電流を考慮すると、かなり強力な荷電を行なうことができるものと考えられる。

コロナ荷電部に粉体を流送すると、粉体が接地極に付着する現象があるが、この粉体付着を防ぐため、実験中、コロナ荷電部を外部から軽く叩いて、細かい振動を



Precharger voltage; (a), (c) : +8 kV, (b), (d) : -8 kV
Powder concentration; (a), (b) : 51 g/m³, (c), (d) : 101 g/m³
Air velocity; ● : 5, × : 10, ○ : 15, △ : 18 m/s

図 8 除電器段数と除電率の関係

Fig. 8 Relationship between neutralizer stages and neutralizing ratio.

与えた。これにより、粉体の付着を防ぐことができた。

3.3 除電器の除電特性

3.3.1 除電時間と除電率

5 m/s 以上の高い速度で流送中の炭酸カルシウムに正負のコロナ荷電をし、除電器の段数を変えて除電試験をしたときの残留電荷比は、図 8 に示すとおりである。粉体濃度 51 および 101 g/m³ のとき、コロナ放電電圧 +8 kV の場合除電器段数を増すに従って、炭酸カルシウム粉体の残留電荷が減少している。図 8 (b)(c)(d)ではこの傾向にばらつきが現われており、マイナス放電の場合には必ずしもこのようにならないが、一般的な傾向として、除電器段数の増加により粉体の残留電荷が減少していることが推察できる。これらのことからすると、除電器段数の増加により、除電効率が上がるものと考えられる。また、正のコロナ放電の場合は、負のコロナ放電よりもこの関係がはっきりしている。しかし、前報¹⁻³に比較して粉体濃度が高いため除電効率は低く、かつ前報¹⁻³に見られたような明確な指數関数的減衰は見られない。そこで、除電器段数による粉体滞在時間を計算し、残留電荷比との関係をプロットすると図 9 のようになつた。滞留時間がより除電時間が長くなるにつれ、除電率が大きくなつておる、その傾向は粉体濃度 51 および 101 g/m³ のときともあまり差がないが、粉体電荷が負極性の場合にはかなり大きなばらつきがみられる。正極性の場合にはばらつきが少なく、かつ滞留時間に対する

より明瞭な指數関数的減衰の傾向が現われている。これらのばらつきは流速上昇に伴う摩擦帶電効果の増加によるものと予想される。

そこで、残留電荷比を $y(%)$ 、時間を $t(s)$ とするとき、

$$y = \exp(\alpha t + c) \quad (3)$$

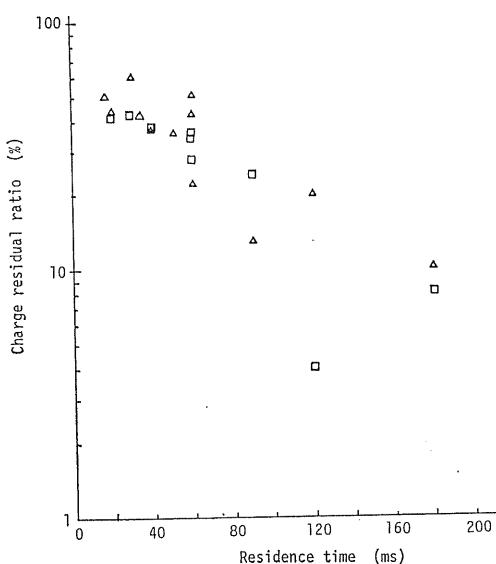
となる (α は係数、 c は定数)。図 9(a)において、この関係は、近似的に、

$$y = 100 \exp(-18.4t) \quad [\%] \quad (4)$$

となることが示される。

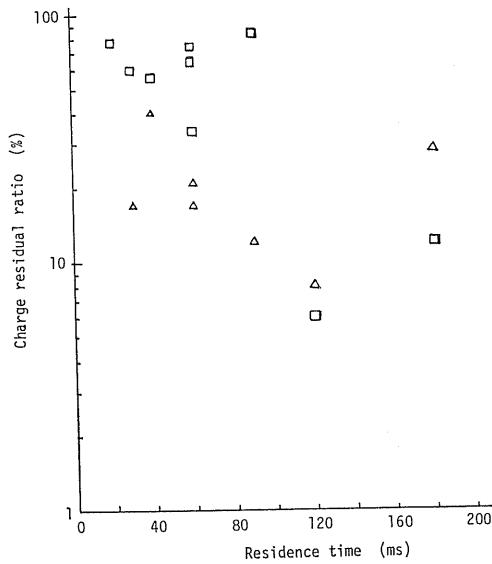
3.3.2 粉体の流送速度と除電率

粉体の流送速度を 5, 10, 15, 20 m/s に変えたときの残留電荷比は図 10 に示すとおりである。この図によれば、流送速度が小さいと残留電荷比が小さく(つまり、除電率は大)、流送速度を大きくすると残留電荷比が大きく(つまり、除電率は小)なっている。これは、流送速度が小さいと、粉体の除電空間滞留時間が長くなり、それだけ除電が良好になされたためと考えられる。また、粉体の流送速度がある程度以上になると、たとえ段数を増しても残留電荷比の低下はわずかとなって本除電器による除電はうまく行なわれないようになる。これは除電器内における摩擦帶電効果の存在を明白に示すものである。すなわち本除電器の使用に当たっては除電器内での速度をある臨界値以下に下げる必要があり、その値はダストの種類や粉体濃度にもよるがほぼ 5~8 m/s



(a) Precharger voltage = +8 kV

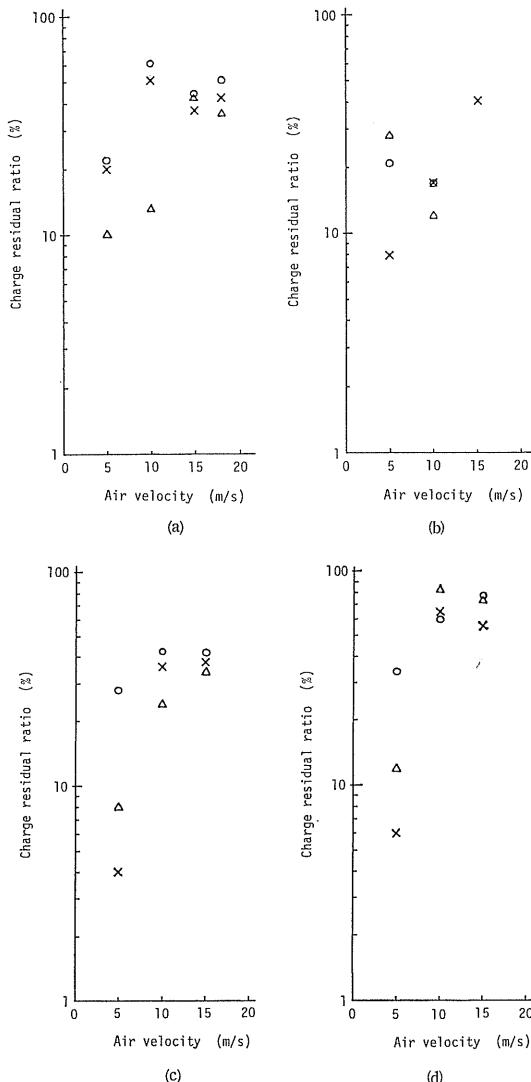
Powder concentration; △ : 51, □ : 101 g/m³



(b) Precharger voltage = -8 kV

図 9 除電時間と除電率の関係

Fig. 9 Relationship between residence time and neutralizing ratio.



Precharger voltage; (a), (c) : +8 kV, (b), (d) : -8 kV
Powder concentration; (a), (b) : 51 g/m³, (c), (d) : 101 g/m³
Stage number of neutralizer; ○ : 1, × : 2, △ : 3

図 10 粉体の流送速度と除電率の関係

Fig. 10 Relationship between transportation velocity of sample powder and neutralizing ratio.

の程度である。

3.3.3 粉体の帶電極性と除電率

試料粉体の帶電極性と除電率の関係は図 8 ~ 図 10 に示されているが、これらの図によると、粉体の流送濃度 51 g/m³ のとき、粉体が負に帶電しているほうより残電比がやや小さく(つまり、除電率が大)なっている。流送濃度 101 g/m³ のときは、この関係ははっきりしていない。

この結果からすると、本除電器の除電性能は、粉体の

帶電極性にはあまりよらないものといえよう。

3.3.4 粉体の流送量と除電率

本研究においては、粉体の流送濃度をいろいろに変えて除電実験をする予定であったが、ファラデーケージ内のフィルタが目詰りを起こすため、流送速度の変動が大きくなり、粉体濃度を細かく変えても精度の高い実験を行なうことができなかった。そのため流送濃度は 51 および 101 g/m³ とし、この濃度のときの実験結果は図 8 ~ 図 10 に示されている。粉体が正に帶電しているときは、双方とも大体同じ残留電荷比となっている。粉体が負に帶電しているときは、流送濃度 51 g/m³ のほうが残留電荷比がやや小さい。

これらの結果を総合すると、少なくとも上記濃度の範囲内では、本除電器の除電性能は粉体の濃度にあまり関係がないものと考えられる。これは、プラズマのイオン供給が十分なため、上記濃度範囲では粉体濃度の影響が現われないためであろう。

4. ま と め

管路内を空気輸送される粉粒体帶電雲用の除電器の除電特性を広い条件範囲にわたって調べたところ次の結果を得た。

- (1) 本除電器で用いる高周波沿面放電プラズマは十分なイオン供給特性がある。
- (2) 帯電粉体が除電空間内に滞留する時間が長いほど、除電率がよい。
- (3) 粉体の流送速度を大きくすると除電効果が低下し、かつ除電率のばらつきも大きくなる。流送速度がある程度以上になると除電率は滞留時間を増大しても向上しない。したがって、本装置を有効に使用するには除電装置内の速度をある臨界速度(5~8 m/s)以下で用いる必要がある。
- (4) 以上の事実から、除電効果はプラズマによる除電過程と、除電器管壁との摩擦帶電という逆過程のバランスからなること、後者は流送速度の上昇、それに伴う乱流の増大に伴って増加し、その結果として除電率の大きなばらつきを生ずるものと推定される。
- (5) 本除電器の除電特性は粉体の帶電極性にあまり依存しない。また、実験条件の範囲では粉体の流送濃度にも依存しない。

以上のことより、本除電器は器内速度をある臨界値以下に保つようその断面積を選定することにより空気輸送中の粉粒体の除電を効果的に行なうことができるものと考えられる。

参考文献

- 1) 増田閃一, 菅部忠, 斎藤俊行: 静電気学会講演論文集
'81, p. 237, 静電気学会 (1981)
- 2) S. Masuda, T. Sonobe and T. Saitoh: *Conference Record IEEE-IAS-1982 Annual Meeting*, p.
1140 (1982)
- 3) 増田閃一, 菅部忠, 斎藤俊行: 静電気学会誌, 6(1982)
392