

## 論 文

## 空気輸送粉体用自己放電式除電器の除電特性

児玉 勉<sup>\*1</sup>, 山隈瑞樹\*, 鈴木輝夫\*\*, 最上智史\*\*, 編野 哲\*\*\*

(2004年8月23日受付; 2004年12月10日受理)

## Electrostatic Charge Reduction Performance of Passive-Type

## Electrostatic Eliminator for Pneumatic Powder Transport

Tsutomu KODAMA<sup>\*1</sup>, Mizuki YAMAGUMA\*, Teruo SUZUKI\*\*,

Tomofumi MOGAMI\*\* and Satoru WATANO\*\*\*

(Received August 23, 2004; Accepted December 10, 2004)

In order to prevent a dust explosion caused by electrostatic discharges in a silo during loading of particulate products via a pneumatic transport system, we have developed a novel passive-type eliminator installed at the end of the loading pipe inside a silo. It consists of a short length of insulating pipe and nozzle-type ionizers without a power supply mounted on it. Each ionizer is equipped with a grounded needle electrode within an insulated nozzle. To make clear the charge elimination mechanism, the elimination performances for different materials of the plastic pipe were tested using the real-size experimental apparatus and polypropylene pellets. It was found that effective elimination was achieved by the electrification of the plastic pipe with the same polarity as the pellets and that the charging on the pipe was caused by tribo-electrification between the pipe and the pellets. The eliminator using PTFE for the pipe material was practically effective for reducing the static charge on the pellets.

## 1. はじめに

粉体の空気輸送において配管との摩擦等によって帶電した粉体がサイロ内に持ち込まれると、静電気放電が着火源となって粉塵爆発を誘発する危険性がある<sup>1,2)</sup>。その防止のため筆者らはサイロ充填パイプの端末に取り付ける粉体用除電器の開発を行っている<sup>3,6)</sup>。これは充填パイプとほぼ同径の短管の周囲に数個のノズル型イオナイザを取り付けたものである。ノズル型イオナイザは、ノズル内の針電極でコロナ放電を起こさせ、生成された空気イオンを圧縮空気によって吹き出させるもので、このイオンによって短管通過中の粉体の電荷が中和される。

我々が開発中の粉体用除電器はイオン発生方式の違いによって電圧印加式と自己放電式に大別することができる。電圧印加式は、ノズル型イオナイザの針電極と金属ノズル間に交流又は直流の高電圧を印加するものである。電圧印加式の一般的な特性として、交流印加では除電不足になりがちであり、

直列印加では細かな除電制御を要するという問題があるが、ノズル型イオナイザを取り付ける短管としてPVC(ポリ塩化ビニル)を用いると、交流印加時の除電不足が改善された<sup>3)</sup>。短管の帶電が除電効果に影響することは、PVC短管の内面に貼った金属シートの印加電圧を変える実験により確認された<sup>4)</sup>。自己放電式は、短管の帶電を積極的に利用し、高電圧を使用しないものであり、PVC短管の使用によりPP(ポリプロピレン)ペレットの除電効果が確認された<sup>5)</sup>。この除電器は、ペレットの経時変化等の影響を受けるなど、除電特性が不安定であったため、ノズルの構造、PVC短管のサイズ、ノズルの取り付け方法等について検討を行った<sup>6)</sup>。

本研究では、安全性及び経済性に利点を持つ自己放電式粉体用除電器の実用化に向けて、短管材質を変える実験を行って除電機構を検討するとともに、PTFE(テフロン)短管を使用した除電器の除電特性を評価した。以下にその結果について述べる。

## 2. 自己放電式粉体用除電器

実験に使用した自己放電式粉体用除電器(以下、除電器といふ)は、図1に外観、図2に構造を示すように、絶縁性短管(管径4インチ、長さ20cm以下、絶縁パイプといふ)の外周上に6個の小穴を設け、その各箇所にノズル型イオナイザ(以下、イオナイザといふ)を取り付けたものである。イオナイザ内の針電極は、火花放電抑制のため50MΩの高抵抗を介して接地される。ノズルは、金属製でこれが絶縁され

キーワード：静電気、除電器、コロナ放電、粉体、サイロ

\* 産業安全研究所 (204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)

National Institute of Industrial Safety, 1-4-6, Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, Japan

\*\* 春日電機株式会社 (144-0031 東京都大田区東蒲田2-16-18) Kasuga Denki Inc., 2-16-18, Higashi-karnata, Ota-ku, Tokyo 144-0031, Japan

\*\*\*大阪府立大学工学部 (599-8531 大阪府堺市学園町1-1) Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1, Gakuen-cho, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

<sup>1</sup> t\_kodama@shishido-esd.co.jp

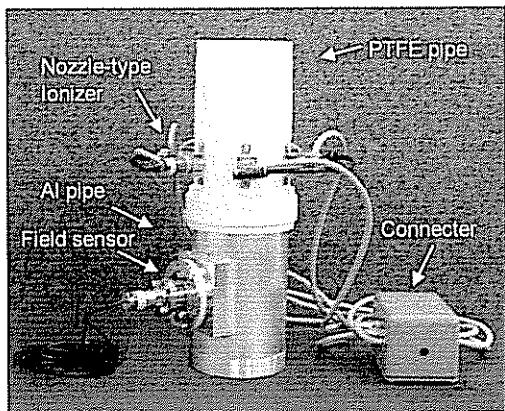


図1 自己放電式粉体用除電器（上段）及びパイプ壁電界測定器（下段）

Fig.1 Passive-type electrostatic eliminator for powder and measurement apparatus for field-strength on pipe.

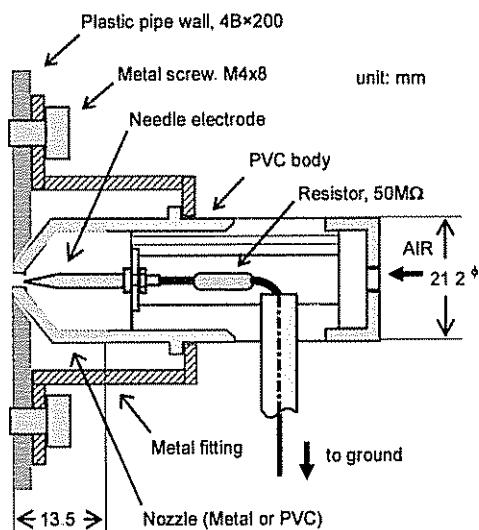


図2 自己放電式粉体用除電器の構造

Fig.2 Schematic diagram of passive-type electrostatic eliminator for powder.

たもの（以下、金属ノズルという。）及びPVC製のもの（以下、絶縁ノズルという。）の2種類を用いた。金属ノズルの静電容量は1.4pFであった。

金属ノズルは、ペレット通過時の帶電物体（主として絶縁パイプ）から静電誘導を受けてその電位が2kV以上になると、針電極尖端部で連続的にコロナ放電が発生する<sup>5)</sup>。一方、絶縁ノズルでは、針電極の近傍に導体がないので、帶電物体による電界が針先端に集中してコロナ放電が発生する。

ノズルには、粉体の侵入防止及び絶縁パイプ内部への空気イオン圧送のため、200～300kPaの圧縮空気を供給した。

絶縁パイプの素材は、帶電列を考慮してPTFE、PVC、ナイロン66、PP及びPE（ポリエチレン）を用いた。ここで、

PPとPEの場合は、PVC短管の内面全体に厚さ3mmのシートを貼ったものとした。

### 3. 実験装置及び方法

粉体空気輸送実験装置<sup>3,6)</sup>の概要を図3に示す。実験では、SUS製サイロ（直径1.5m、胴長2m）に350～400kgのPPペレット（粒径4～5mm）を充填した後、圧送プロアを運転し、続いてロータリーバルブを稼働させて、ペレットをサイロ底部からSUS製空気輸送配管（管径4インチ、長さ約20m）へ導き、再びサイロ上部からサイロ内へ落とし込む、循環運転を行った。今回の実験では圧送空気の風量を10m<sup>3</sup>/min一定、温度を30°C一定とし、相対湿度及びペレット流量はそれぞれ30%及び28kg/minを標準とした。

除電器は、図4に概要を示すように、サイロ内の充填パイプの末端に接続した。サイロ壁電界 $E_s$ は、ペレット堆積面から25～40cm上部のサイロ側壁開口部にエアバージ型電界センサを取り付けて測定した。パイプ壁電界 $E_p$ は、同型の電界センサを、除電器の後に接続した金属パイプ（管径4インチ、長さ20cm。以下、測定パイプという。）の管壁開口部に取り付けて測定した（図1参照）。イオナイザ電流 $I_n$ は、各イオナイザの針電極用リード線をコネクタでボンディングし、これとアース間にエレクトロメータを接続して測定した。除電の停止は、この接続を切り離すことによって行った。

ペレットの重量比電荷は、サイロ内を落下するペレットを絶縁性ハンドルが付いた金属柄杓（ファラデーペール）を用いて採取して、その電荷量を重量で除して求めた。なお、除電器で生成された空気イオンが柄杓に付着する場合は、測定値はみかけの重量比電荷となるが、ここでは単に比電荷と記す。比電荷及び落下量はサイロの中央、側壁付近、及びその

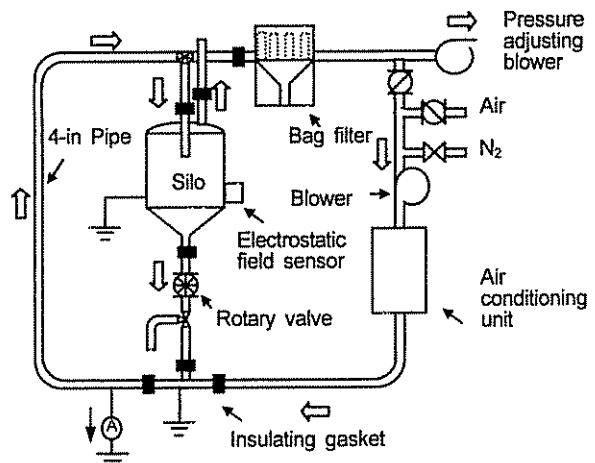


図3 粉体空気輸送帶電実験装置の概要

Fig.3 Schematic diagram of experimental facility for pneumatic powder transport.

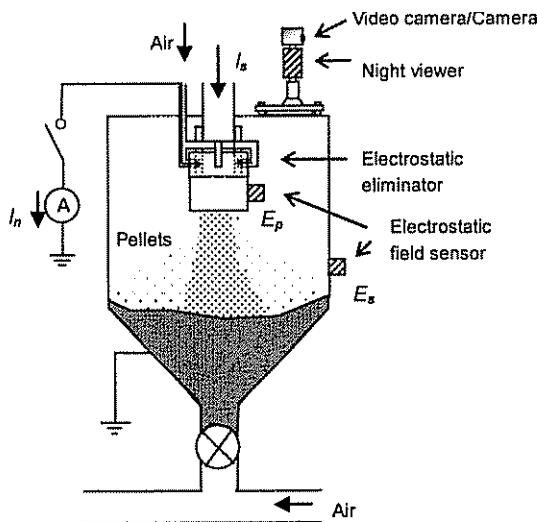


図4 実験用サイロの概要

Fig.4 Schematic diagram of silo used in experiment.

中間位置の3箇所で測定し、径方向の分布を求めた。

絶縁パイプ電位は、ノズルからパイプ軸方向上部へ5cm離れた位置における外面の表面電位を非接触式の電位測定器で測定した。なお、測定値は絶縁パイプに金属シートを貼り、これに既知電圧を印加して校正した。

サイロ内の放電発生状況は、サイロ屋根の覗き窓からイメージインテンシファイア（浜松ホトニクス製ナイトビュアC3100、平均ゲイン 60,000）付きのビデオカメラ又は光学カメラを用いて観測した。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 除電効果の検討

PTFE 製の絶縁パイプに 6 個の金属ノズル型イオナイザを取り付けた除電器をサイロ内充填パイプに取り付け、除電停

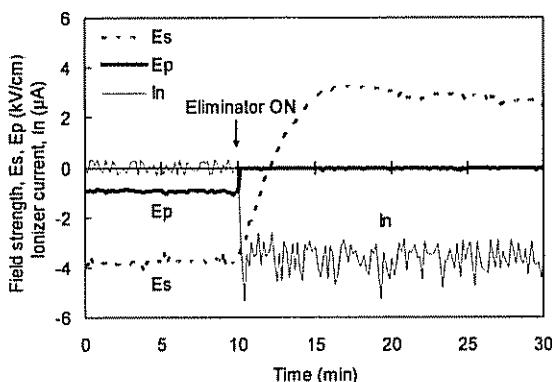


図5 除電前後のサイロ壁電界、パイプ壁電界及びイオナイザ電流の時間変化

Fig.5 Temporal change in field strength at silo-wall, pipe-wall and ionizer current before and during elimination.

止（針電極を絶縁）の状態でしばらく循環運動を行った後に除電開始（針電極を接地）に切り替えたときのサイロ壁電界  $E_s$ 、パイプ壁電界  $E_p$  及びイオナイザ電流  $I_n$  の時間変化の一例を図 5 に示す。除電を開始すると、 $I_n$  が瞬時に  $-4\mu\text{A}$  に立ち上がり、 $E_p$  は  $-1\text{kV/cm}$  からほぼ 0 へ低減した。一方、 $E_s$  は除電前では  $-4\text{kV/cm}$  に達したが、除電を続けると、徐々に正極性方向へ変動し、数分後には飽和値の  $+2.5\text{kV/cm}$  に達した。

除電開始前には肉眼でも観察できる強い放電発光が頻繁に観察された。この放電は堆積したペレットの表面で起こっていることから、可燃性粉塵に対して着火性を持つバルク表面放電（コーン放電）である<sup>1,2)</sup>。

バルク表面放電の発生は堆積したペレットの帯電量に依存するので、その発生条件は  $E_s$  と相関がある。今回の実験条件では負極性で絶対値が  $2\text{kV/cm}$  以上のときバルク表面放電が観測された。バルク表面放電は除電開始とほぼ同時に消滅し、 $E_s$  が正の飽和値に達しても再び現れるることはなかった。

除電器によって帶電物体の極性が反転してしまうことを逆帶電と呼ぶ。除電時に  $E_s$  が  $+2.5\text{kV/cm}$  に達していることから、ペレットの一部が逆帶電したことは明らかであるが、平均帯電量が低減したため、バルク表面放電が発生しなかった

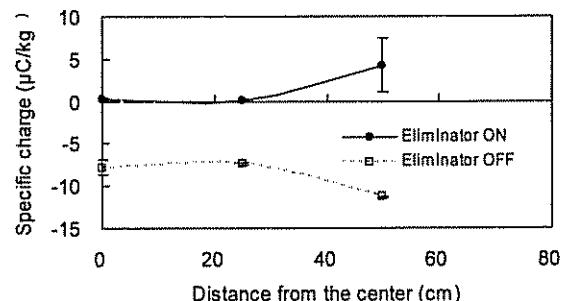


図6 除電の有無における落下ペレット比電荷のサイロ径方向分布

Fig.6 Horizontal distribution of specific charge of falling pellets before and during elimination.

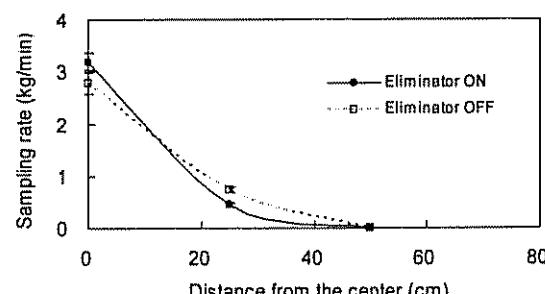


図7 除電前後におけるペレット落下量のサイロ径方向分布

Fig.7 Horizontal distribution of sampling rate of falling pellets before and during elimination

ものと推測される。このことは、サイロ内を落下するペレットの比電荷及び落下量のサイロ径方向分布から裏付けられる。除電前及び除電時の比電荷の分布を図6に示す。除電時であっても逆帶電したペレットの一部がクーロン力により側壁方向へ広がるため、側壁近くの比電荷は $+4.2\mu\text{C}/\text{kg}$ と大きくなり、これによりサイロ壁電界が高くなる。しかしながら、ペレット落下量の分布を図7に示すように、側壁近くの落下量は中央付近の100分の1程度に過ぎない。サイロ中央付近に落下する大部分のペレットの比電荷は、除電前の $-7.8\mu\text{C}/\text{kg}$ に対して除電時には $+0.24\mu\text{C}/\text{kg}$ となり、絶対値が約3%に低減している。そのため除電時にはバルク表面放電の発生が抑制される。

ペレット流量を変化させたときの除電前及び除電時のサイロ壁電界及びパイプ壁電界の飽和値（以下、同じ。）の測定結果を図8に示す。この流量範囲では、 $E_s$ は除電前の $-3.7\sim-3.2\text{kV}/\text{cm}$ から除電時には $+2.4\sim+1.3\text{kV}/\text{cm}$ となるが、 $E_p$ は $-0.88\sim-1.4\text{kV}/\text{cm}$ から $-0.001\sim-0.01\text{kV}/\text{cm}$ に低減している。

平均比電荷はパイプ壁電界と比例関係にあると考えられるので、除電率 $\eta(\%)$ を次式で定義した。

$$\eta = \frac{|E_{p0}| - |E_{p1}|}{|E_{p0}|} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $E_{p0}$ 及び $E_{p1}$ ：除電前及び除電時のパイプ壁電界  
パイプ壁電界 $E_p$ は、電荷分布が均一であれば近似的に次式で表される。

$$E_p = \frac{r_p q_p}{2\epsilon_0} \quad (2)$$

ここで、 $r_p$ ：測定パイプ内半径( $=54\text{ mm}$ )、 $q_p$ ：測定パイプ内空間電荷密度、 $\epsilon_0$ ：真空の誘電率( $=8.854 \times 10^{-12}\text{F}/\text{m}$ )

空間電荷密度 $q_p$ は次式で表される。

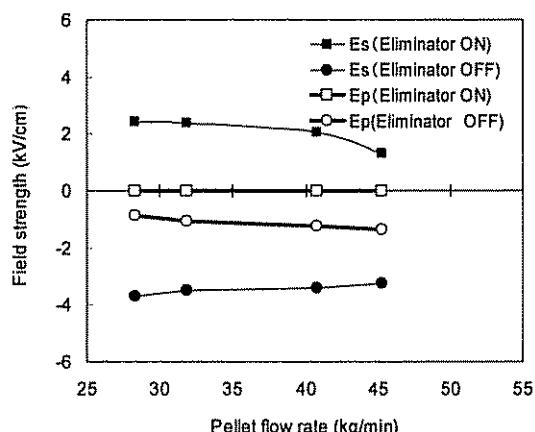


図8 除電前後におけるサイロ壁電界及びパイプ壁電界とペレット流量の関係

Fig.8 Effect of pellet flow rate on field strength at silo wall and pipe wall before and during elimination.

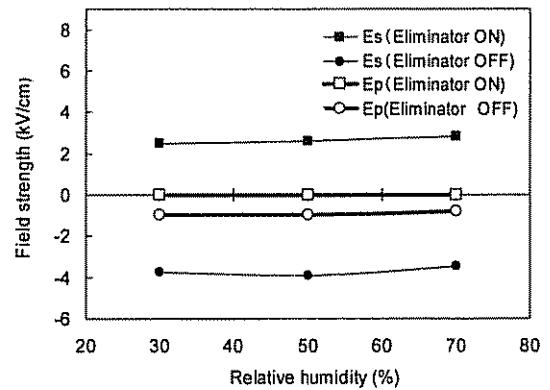


図9 除電前後におけるサイロ壁電界及びパイプ壁電界と相対湿度の関係

Fig.9 Effect of relative humidity on field strength at silo wall and pipe wall before and during elimination.

$$q_p = \rho \frac{V_p}{V_a} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$ ：比電荷、 $V_a$ ：風量( $=10\text{m}^3/\text{min}$ )、 $V_p$ ：ペレット流量

(2)及び(3)式より比電荷 $\rho$ は次式で表される。

$$\rho = \frac{2\epsilon_0 E_p}{r_p V_p} \quad (4)$$

この式より、ペレット流量 $V_p=28.3\text{kg}/\text{min}$ における除電前のパイプ壁電界実測値 $E_{p0}=-0.88\text{kV}/\text{cm}$ から比電荷を求める $-10.2\mu\text{C}/\text{kg}$ となる。これは上述のサイロ中央における比電荷の実測値 $-7.8\mu\text{C}/\text{kg}$ よりわずかに大きい値である。この違いは、測定パイプ内及びサイロ内のペレットの帶電分布がどちらも均一でないことによる。しかしながら、パイプ壁電界とサイロ中央部の比電荷には比例関係が認められたことから、除電性能は除電率によって評価が可能である。図8から算出した除電率はペレット流量に依らず99~100%である。

圧送空気の相対湿度を変化させたときの、サイロ壁及びパイプ壁電界の測定結果を図9に示す。絶縁パイプが吸湿性の小さいPTFEであるため、相対湿度30~70%の範囲では湿度の影響を受けず、除電率は99~100%であった。

#### 4.2 絶縁パイプ材質の影響

除電性能には絶縁パイプの帶電特性が影響することから、絶縁パイプの材質を変えて実験を行った。図10は、ペレット流量に対する除電前及び除電時のサイロ壁電界の測定結果である。除電前のペレットの帶電は主としてSUS配管との摩擦によって起こるので、除電器を停止した場合は、サイロ壁電界は絶縁パイプの材質に依存せずほぼ一定となる。図10には除電前の値として5種類の絶縁パイプの平均値を示す。ナイロン、PE、PPでは除電時のサイロ壁電界が負極性でその大きさがバルク表面放電の発生限界( $-2\text{kV}/\text{cm}$ )よりも低減せ

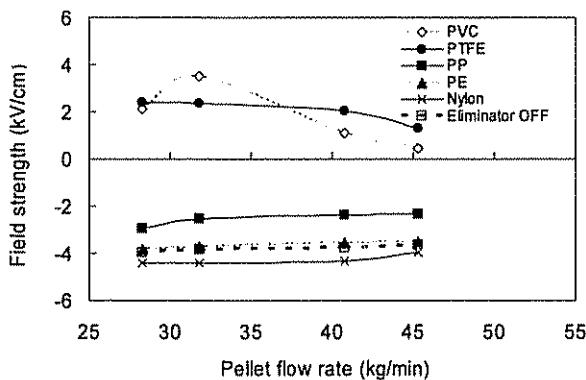


図 10 各種パイプ材質の除電器における除電前後のサイロ壁電界とペレット流量の関係

Fig.10 Effect of pellet flow rate on field strength at silo wall before and during elimination for eliminators with various pipe materials.

ず、放電発光も消滅しなかった。一方、PTFE と PVC の場合は除電開始とほぼ同時にバルク表面放電は消滅し、以降逆帶電に至っても現れなかった。

除電率を図 11 に示す。PTFE と PVC ではペレット流量にかかわらずほぼ 100% の除電率を示すが、PP ではペレット流量が低い場合に除電率が低下し、PE とナイロンではペレット流量にかかわりなく極めて低い値を示す。

この実験におけるイオナイザ電流、除電前及び除電時の絶縁パイプ電位を図 12 に示す。イオナイザ電流は各針電極のコロナ電流の総和に等しいので、その大きさ及び極性が除電特性に直接関係する。特に極性は重要であり、ペレットの帶電と同極性でないと除電できない。測定結果を見ると、除電率が高い PTFE と PVC でのイオナイザ電流はペレットの帶電と同極性であり、同じ同極性であっても除電率の低い PE に比べて電流値は著しく大きい。除電率が極めて低いナイロンでは極性が異なる。

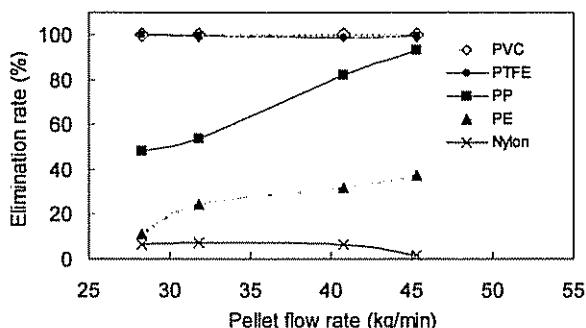


図 11 各種パイプ材質の除電器における除電率とペレット流量の関係

Fig.11 Relationship between elimination rate and pellet flow rate for eliminators with various pipe materials.

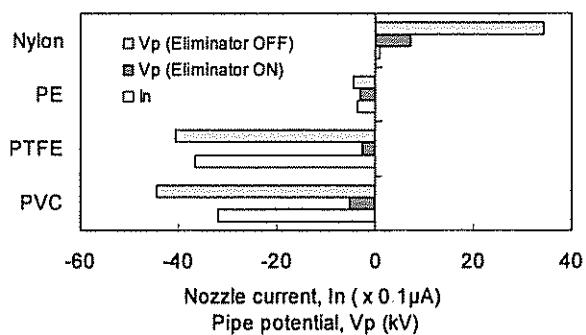


図 12 各種パイプ材質の除電器におけるイオナイザ電流及び除電前後のパイプ電位

Fig.12 Ionizer current and pipe potentials before and during elimination for eliminators with various pipe materials.

図 12 に示すように、イオナイザ電流は除電前の絶縁パイプ電位の大きさ及び極性と相関があることから、イオナイザ電流は主としてペレット通過時の絶縁パイプの帶電によってもたらされると推測できる。絶縁パイプの帶電傾向は帯電列<sup>7)</sup>とほぼ一致し、負極性側から PTFE, PVC, PP, PE, ナイロンの順となる、すなわち、絶縁パイプの帶電は摩擦(衝突)帶電によってもたらされている。

#### 4.3 除電機構の検討

PTFE を絶縁パイプとする除電器による PP ペレットの除電機構を検討する。帯電列により、ペレットは SUS 配管との摩擦によって負に帯電し、ペレットとの摩擦により PTFE パイプも負に帯電する。帯電した PTFE からの電界を受けてノズル型イオナイザで正コロナ放電が起こり、生成された正イオンが PTFE パイプ内に吹き込まれて、ペレットの電荷が中和される。PTFE との摩擦によりペレットの一部が正に帯電(逆帶電)するが、その量は全体に比べると少ない。また、イオナイザによる正イオン供給量がペレットの帶電量より勝る場合は正の過剰イオンとなり、これも逆帶電の原因となる。この機構では、ペレットの帶電も PTFE の帶電も摩擦帶電であるので、例えばペレットの帶電が大きいほど、イオン生成量も多くなるような除電の自己調整作用が働くと推測される。同様に逆帶電の大きさも制限される。

まとめると、粉粒体との摩擦によって元々の粉粒体の電荷と同極性に帶電する絶縁パイプを選択すれば除電が可能となる。例えば、配管との摩擦により負極性に帯電する粉粒体に対しては、帯電列の負極性エンドに近い PTFE パイプを用いることにより有効な除電が行われる。なお、帯電列が PTFE と近い PVC パイプの場合は、内面に PP ペレットの溶融膜が生じ、除電特性が劣化する現象が起こった。

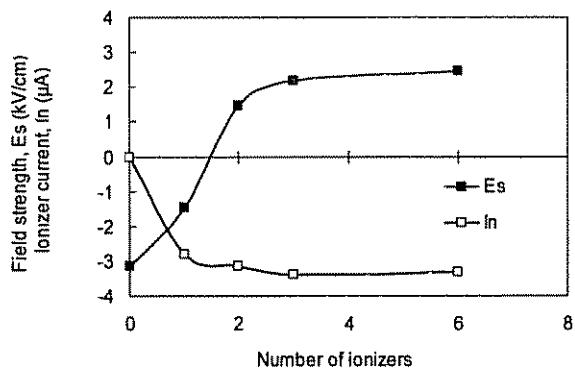


図 13 サイロ壁電界及びイオナイザ電流とイオナイザ本数の関係  
Fig.13 Effect of number of ionizers on field strength at silo wall under eliminator with PTFE pipe.

PTFE パイプを使用する除電器は安定した除電性能を示したので、以下の検討はこれによって行う。

#### 4.4 イオナイザ本数の影響

これまでの検討はイオナイザの本数が 6 本のものについて行ったが、PTFE パイプでは逆帶電が起こった。そこで、逆帶電を少なくするため、イオナイザの本数を変える実験を行った。その結果を図 13 に示す。この図から、イオナイザ 1 本では除電不足であり、2 本以上で除電効果があり、3 本以上で飽和する傾向が示される。

除電器ではペレットの流入に伴う流動電流がイオナイザ電流としてアースへ流れることによって除電が行われる。ここで、流動電流  $I_s$  は、次式のようにペレット流量  $V_p$  と比電荷  $\rho$  の積で表される。

$$I_s = \rho V_p \quad (5)$$

ペレット流量が 28.3 kg/min のときのサイロ中央部の比電荷測定値  $-7.8 \mu\text{C/kg}$  を(5)式に適用すると、流動電流は  $-4.0 \mu\text{A}$  となる。図 13 ではイオナイザ 1 本のときのイオナイザ電流は  $-2.8 \mu\text{A}$  であるので、流動電流に比べて小さく除電不足である。2 本ではイオナイザ電流は計算上では 2 倍の  $-5.6 \mu\text{A}$  になるので、ほぼ 100% 除電できることになる。自己放電式除電器では物体の帶電を利用してコロナ放電が起こるので、イオナイザの本数が増えても、流動電流を上限としてイオナイザ電流が飽和する傾向を示す。今回の実験条件では、対称性も考慮してイオナイザの本数は 3 本が適当である。

#### 4.5 ノズル種類の影響

これまで金属ノズル型イオナイザを用いた除電器について検討したが、ここでは構造が簡単な絶縁ノズル型イオナイザを使用する除電器について検討する。両者の除電性能を比較するため、同じ PTFE パイプに金属ノズル型イオナイザ又は絶縁ノズル型イオナイザを取り付けて、各イオナイザの

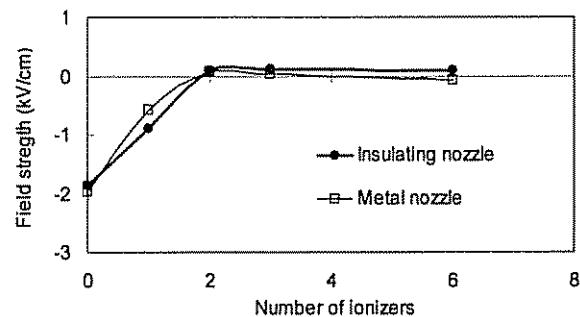


図 14 金属ノズル及び絶縁ノズルにおけるパイプ壁電界とイオナイザ本数の関係

Fig.14 Effect of number of ionizers on field strength at pipe wall under eliminator with PTFE pipe and different materials of nozzle

本数を変える実験を行った。パイプ壁電界の測定結果を図 14 に示すように、両者除電器はほとんど同じ除電特性である。このことから、両者イオナイザの針電極の電界強度に本質的な違いがないことが示される。

#### 5. まとめ

粉体空気輸送によるサイロ充填時の粉体帶電防止、特に着火性放電の抑制を目的として、絶縁パイプの周囲にノズル型イオナイザを取り付けた自己放電式粉体用除電器を開発し、実規模実験によって除電機構及び除電性能を検討した。その結果、粉体との摩擦によって粉体が元々持っていた電荷と同極性に帶電する絶縁パイプを選択すれば除電が可能であり、絶縁パイプの帶電機構は粉体との摩擦帶電であることが判明した。一例として、負極性の帶電列エンドに近い PTFE パイプを使用する除電器は、金属配管輸送によって負極性に帶電する PP ペレットに対して安定した除電性能を示した。この除電器は、金属配管との摩擦で同じく負極性の帶電傾向を示す他の高分子樹脂など多くの粉粒体に対して適用が期待される。

#### 参考文献

- 1) B. Maurer: Ger. Chem. Engrg. **2** (1979) 189
- 2) M. Glor: *Electrostatic hazards in powder handling*, p.93, Research Studies Press, Letchworth (1988)
- 3) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, S. Yagi and S. Watano: *Conf. Record (CD) of 2000 IEEE/IAS Annual Meeting*, p.652, Rome (2000)
- 4) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, S. Yagi and S. Watano: *J. Electrostat.* **55** (2002) 289
- 5) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, T. Mogami, and S. Watano: *Conf. Record (CD) of World Congress on Particle Technology 4*, Sydney (2002)
- 6) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, T. Mogami, and S. Watano: *Powder Technology*, **135-136** (2003) 209
- 7) J. Henniker: *Nature*, **196** (1962) 474