

粉体用除電器によるサイロ内着火性放電の抑制*

児玉 勉***, 鈴木輝夫***, 最上智史***

Suppression of Incendiary Electrostatic Discharge in a Silo Using a New Electrostatic Charge Eliminator for Powder*

by Tsutomu KODAMA**, Teruo SUZUKI*** and Tomofumi MOGAMI***

Abstract: In a pneumatic powder transport system, large amounts of electrostatic charge generated by friction within pipe walls accumulate on powders with high electric resistivity. Loading such powders into a silo from the top raises the electric field strength inside the silo and may generate electrostatic discharges, causing the ignition of flammable dusts when fine powders are present at a concentration higher than the lower explosion limit. In order to prevent such a dust explosion during the loading of particulate products, we have developed a new nozzle-type electrostatic charge eliminator to neutralize the static charge on products before entering a silo, and we have confirmed the suppression performance against incendiary electrostatic discharges in a silo by using a full-sized experimental facility for pneumatic transportation and 350-400kg of polypropylene pellets. The eliminator is installed at the end of the loading pipe inside a silo. The eliminator used in the experiment consists of an SUS short pipe with an inner diameter of 10cm and a length of 10cm, as well as 16 nozzle-type ionizer arranged along the double circumference line of the SUS short pipe. In each ionizer, high voltage is impressed between a needle electrode and a grounded metal nozzle to produce air ions by corona discharges. The ions are blown inside the SUS short pipe by compressed air at a pressure of 250-300kPa to neutralize the static charge on pellets within it. The experimental facility consists of an SUS silo with a diameter of 1.5m and a capacity of 1.5m³, an SUS pipeline with a diameter of 10cm and a length of approximately 20m, an air blower with an air volume of 15m³/min and an air conditioning unit. Incendiary discharges which occur along the pellet heap in the test silo are observed using a camera/CCD camera with an image intensifier set on the window of the silo roof. The charging tendency on pellets is mainly evaluated using an air-blow-type electrostatic field sensor set on the side wall of the silo. The experimental results are as follows:

-) Applying 50Hz ac high voltage to the eliminator results in an elimination shortage. On the other hand, applying dc high voltage requires control of the impressed voltage because of reverse charging.
-) Elimination ability increases as the frequency of the ac voltage increases. However, control of the frequency or voltage is also needed because of reverse charging.
-) Incendiary discharges can be satisfactorily suppressed by feedback control like ON-OFF control or proportional control utilizing the output signal of an electrostatic field sensor.

Keywords: Electrostatic eliminator, Nozzle-type ionizer, Powder silo, Electrostatic discharge, Dust explosion

* 2000 IEEE/IAS Annual Meeting (2000), 静電気学会全国大会 (2001, 2003) 及び安全工学研究発表会 (2001, 2002) にて一部口頭発表

** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

*** 春日電機株式会社 Kasuga Denki Co. Ltd.

1. 緒言

工場、事業場では近年、取り扱いの便利さからプラスチック原材料、化学薬品・医薬品の中間体・半製品、穀物など多くの原材料・製品が粉体の形で取り扱われ、その輸送には空気輸送がよく用いられている。粉体の空気輸送では、配管内壁等との摩擦あるいは粉体同士の衝突等によって粉体に多量の静電気が発生し、粉体の抵抗率が高いとこれが帯電する。帯電粉体をサイロに充填すると、サイロ内気相空間で静電気放電が発生し、粉じん濃度が爆発下限界以上である場合は、粉じん爆発を引き起こす危険性がある^{1,2)}。粉じん爆発の着火源となり得る静電気放電（以下、着火性放電という。）としては、雷状放電と沿面放電の2種類が考えられる^{3,4)}。前者はサイロ内の粉じん雲の規模及び帯電電荷密度が共に大きくなったときに雷の稲光に似た樹枝状の発光を伴って起こる空間放電である³⁾。後者は粉体の帯電量が極めて高くなったときに堆積粉体の表面に沿って強い発光を伴って発生する放電で、コーン放電とも呼ばれ、これは穀物やプラスチック粉体のサイロにおける粉じん爆発の着火源としては雷状放電よりも有力視されている⁵⁻¹⁶⁾。ただし、コーン放電は、静電気による粉じん爆発を起こさない粒径が1~10mmの粒体を取り扱う際に発生しやすいので、この放電によって粉じん爆発を起こしやすいのは、これら粒体と共に粒径100 μ m以下の粉体が混在する場合である。

粉体の空気輸送サイロにおいて静電気による粉じん爆発を防止するためには、取り扱う粉体の粒径を大きくすること、粉じん濃度を高めないこと、窒素ガスで置換・シールすること、等の可燃物管理が重要であるが、これに加えて着火性放電を起こさないような着火源管理もまた重要である。その一つとして粉体用除電器が産業界から求められ、超音速ノズル型除電器等が開発されている¹⁷⁻¹⁸⁾。筆者らは、サイロ内充填パイプに取り付けて充填直前の粉体を除電する粉体用除電器の開発を試み、グリッド電圧による除電制御¹⁹⁾や自己放電型イオナイザの除電特性²⁰⁻²²⁾について研究を行った。

粉体用除電器は、浮遊粉じんが存在する環境で使用するため、除電に必要なイオン生成のためのコロナ放電が粉じんの着火源にならない性能を有することが必要となる。また、粉体が放電電極部に付着すると安定なコロナ放電が得られず、有効なイオン生成が不可能となるため、粉体の付着防止機能も必要である。

ここでは、ノズル型イオナイザを使用した粉体用除電器の開発を目的として、ノズル型イオナイザの基本

的特性を把握するとともに、試作した電圧印加式粉体用除電器による着火性放電の抑制効果について実規模大の粉体空気輸送装置を用いて評価を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 粉体用除電器

粉体用除電器は、金属製短管にノズル型イオナイザを取り付けたもので、除電用空気イオンを同短管内部に吹き込んで通過する粉体を除電する装置である。以下、ノズル型イオナイザの構造及びイオン生成能力の評価方法、及び粉体用除電器の概要について述べる。

2.1.1 ノズル型イオナイザの構造

使用したノズル型イオナイザ（以下、イオナイザと記す。）の構造及び寸法の概要をFig. 1に示す。空気イオンを放出するノズル部分は金属製であり、これは接地される。先端がノズル開口部に位置する金属針には50Mの抵抗を介して高電圧が印加される。印加電圧がコロナ開始電圧以上であると、金属針端とノズル先端間でコロナ放電が発生し、空気がイオン化される。印加電圧が正極性であると、正の空気イオンが生成され、反対に負極性であると負の空気イオンが生成される。交流高電圧であると、正と負の空気イオンが半周期ごとに生成される。50Mの高抵抗は針電極への接地体の接触、過剰電圧印加等の異常時にも可燃性粉じんの着火源となる火花放電を起こさせないための放電制限抵抗である。ノズル内への粉体侵入防止、針電極

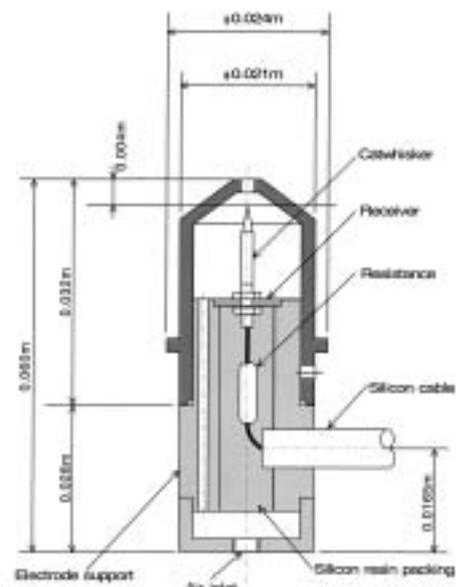


Fig. 1 Nozzle-type ionizer.
ノズル型イオナイザの概要

への粉体付着防止のため、また空気イオンの吹き付けのため、ノズルには200～300kPaの圧縮空気が供給される。

2.1.2 イオナイザのイオン電流特性評価装置

イオナイザの除電特性を評価するため、一般の除電器の除電性能として採用されている有効除電電流の試験方法²³⁾を参考に、Fig. 2 に概要を示す装置によって除電に利用されるイオン電流を測定した。30cm角の絶縁された金属平板は帯電物体を模擬するもので、この金属平板（以下、帯電板と記す。）には一般に5kVの正又は負の直流電圧が印加される。電流計には可動コイル型の直流マイクロアンメータを用いる。イオナイザは帯電板から通常5cm離してその中央部に対向して設置される。イオナイザの電源電圧としては、目的に応じて商用周波交流電圧、直流電圧、可変周波数の正弦波又は方形波電圧が印加される。

2.1.3 除電器の概要

後述するように実験に用いたサイロ内の充填パイプはSUS製4インチ管であるので、粉体用除電器（以下、除電器と記す。）も同じ4インチSUS短管を用い、その2列の円周上に1列につき8個、計16個のノズル型イオナイザを取り付けた。短管の長さは10cmであった。除電器の概要をFig. 3 に示す。Photo. 1 は実験に用いたフランジ接合用ハウジング付き除電器の外観である。

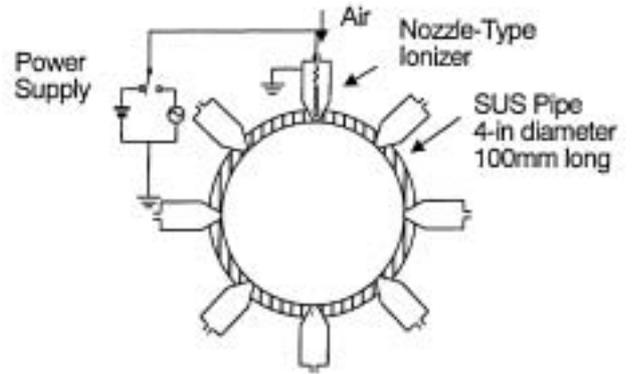


Fig. 3 Schema of nozzle-type electrostatic eliminator. 除電器の概要



Photo. 1 Flange-type electrostatic eliminator. フランジ付き除電器

2.2 粉体空気輸送実験装置

2.2.1 粉体空気輸送装置

開発した除電器の除電性能の評価には、実規模大の粉体空気輸送実験装置を使用した。同装置は、Fig. 4 に概要を示すように、サイロ、配管系、フロア、空調ユニット等からなる。サイロは直径1.5m、胴長2m、容量1.5m³のSUS製円筒型、配管系は長さ約20mの4インチSUS管、フロアは最大風量15m³/minのインバータ制御型、空調ユニットの調整範囲は温度30～60℃、相対湿度30～80%である。試料はポリプロピレンペレット（粒径4～5mmの楕円球状）を用いた。実験では、サイロ内に350～400kgのペレットを充填した後、フロアを運転し、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配管系へ導き、配管系を輸送後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。ペレットの流量はインバータ制御型ロータリーバルブの回転数を可変して調整した。

2.2.2 帯電量測定装置

Fig. 4 に示すように、配管系及びサイロはPTFE（テフロン）パッキンを用いて相互に、かつ、大地が

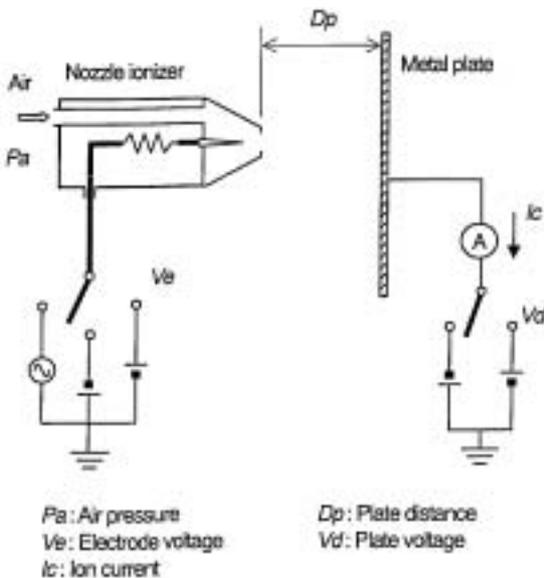


Fig. 2 Schema of the measurement apparatus for the ion current of the nozzle-type ionizer. イオナイザのイオン電流測定装置

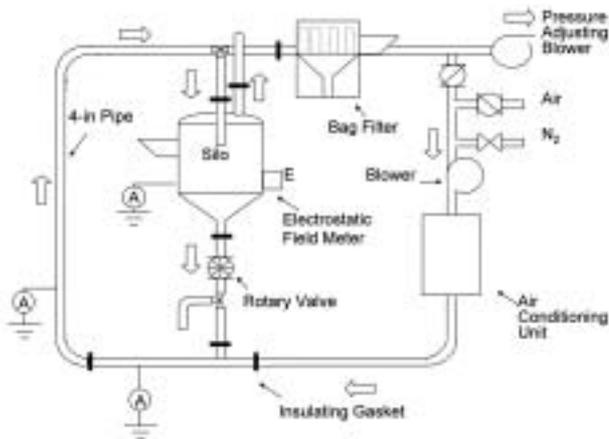


Fig. 4 Schema of the Experimental facility for pneumatic powder transport test.
粉体空気輸送実験装置の概要



Photo. 2 Air-purge-type electrostatic field sensor.
エアパーージ型静電界センサ

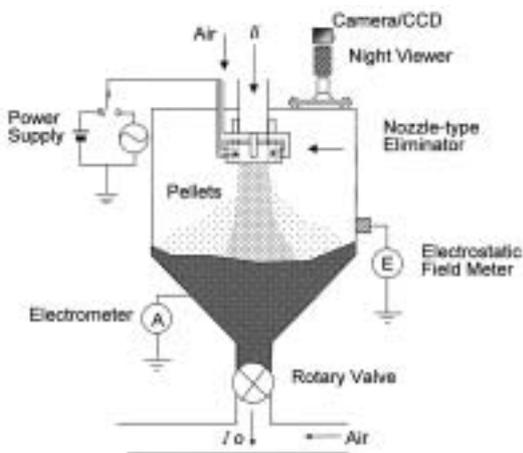


Fig. 5 Schema of the test silo and eliminator.
テストサイロ及び除電器

ら絶縁されている。絶縁された配管と大地間にエレクトロメータを接続して配管接地電流を測定した。この電流は配管とペレットの摩擦による静電気発生量の目安になるものである。また、絶縁されたサイロと大地間にエレクトロメータを接続して測定されるサイロ接地電流はサイロ内に流入するペレットによって持ち込まれる帯電量の目安となる。

Fig. 5 に示すように、除電器はテストサイロの充填パイプの末端に取り付けた。除電器の除電性能は主としてサイロ側壁に設けたエアパーージ型静電界センサ及び静電界検出システム（春日電機製，KSV-800AP）で評価した。センサ取り付け位置は堆積ペレット表面より25～40cm上部と堆積面に近いことから、この電界は主として側壁近くに堆積した帯電ペレットによって誘起される。静電界センサの外観をPhoto 2 に示す。静電界センサには内部に粉体が侵入しないように電界検出孔から外部へエアパーージするほか、センサヘッド



Photo. 3 Electrostatic field detector for pipe.
配管電界検出器

面に粉体が付着しないようにエアカーテン機構も有している。除電器のフィードバック制御実験では、同じ型の静電界センサをSUS製4インチ短管（長さ20cm）の側壁に取り付けて短管内を通過するペレットの帯電量を検出した。これを以下、配管電界検出器と呼ぶ。同検出器はサイロ充填パイプに接続した除電器のもう一方の端に接続して除電後のペレットの帯電量を検出した。配管電界検出器の外観をPhoto 3 に示す。

サイロ内を落下するペレットの帯電量を直接検出するため、サイロ側壁マンホールから絶縁性柄をもつ金属製柄杓を挿入して一定時間ペレットをサンプリングし、これを外へ取り出した。このときの柄杓の電位をエレクトロメータで測定し、柄杓と大地間に接続されたコンデンサの静電容量と電位の積によってペレットの帯電電荷量を算出した。次に、電子天秤によりペレットの重量を測定して、ペレットの落下流量及び重量比電荷（単位重量当たりの電荷量で、以下、単に比電荷と記す。）を算出した。サンプリングは側壁からの距離を変えて繰り返し行い、径方向分布を求めた。

2.2.3 放電発光観測

サイロ内の着火性放電を観測するため、サイロ屋根の覗き窓にイメージインテンシファイア付きのCCDビデオカメラ（浜松ホトニクス製，C3077）又は光学カメラを設置してサイロ内部を撮影した。イメージインテンシファイアとしては暗視装置（浜松ホトニクス製，ナイトビューC3100，平均ゲイン60,000）を用いた。CCDカメラの映像出力は画像改善装置（浜松ホトニクス製，DVS3000）によりリアルタイムでコントラスト増強してビデオ録画した。観測の結果，一部肉眼でも観測される強い発光を伴う着火性放電は堆積ペレットの表面で起こることがわかった。

3. 実験結果及び検討

3.1 イオナイザの特性

実験に用いたイオナイザ（Fig. 1）のイオン生成特性を調べるため、イオン電流測定装置（Fig. 2）において、直流高電圧及び50Hz商用交流高電圧をイオナイザに印加してイオン電流を測定した。帯電板の電圧は - 5 kV，帯電板とノズル間の距離は 5 cmとした。Fig. 6 は、ノズルへ供給する圧縮空気圧力を250kPaとしたときの、帯電板と大地間に流れるイオン電流とイオナイザ印加電圧（以下、イオナイザ電圧と記す。）の関係である。ここで、直流は正極性であり、交流電圧の表示は実効値（以下、同じ。）である。交流、直流ともイオナイザ電圧が 4 ~ 8 kVのとき安定したコロナ放電が発生し、イオン電流は電圧の上昇に連れて飽和する傾向をもって増加するが、電圧が同じ場合、交流印加によるイオン電流は直流印加に比べてかなり小さい。直流印加では帯電板の電荷中和に必要な正イオンを連続して生成するのに対して、交流印加では半周

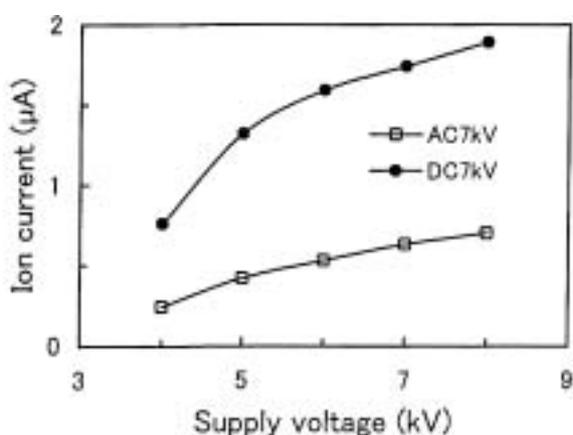


Fig. 6 Relationship between the ion current and the applied voltage to the ionizer.
イオナイザ電圧とイオン電流の関係

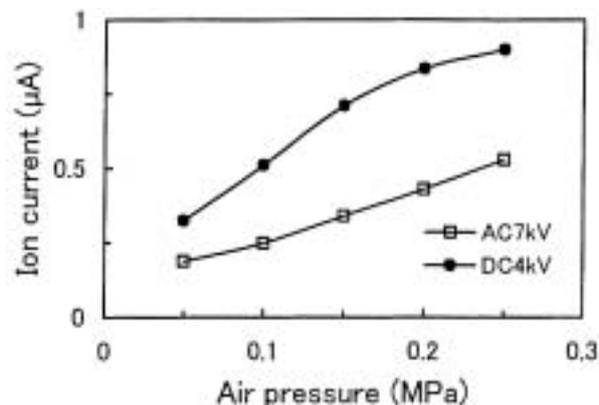


Fig. 7 Relationship between the ion current and air pressure of the ionizer.

イオナイザの空気圧とイオン電流の関係

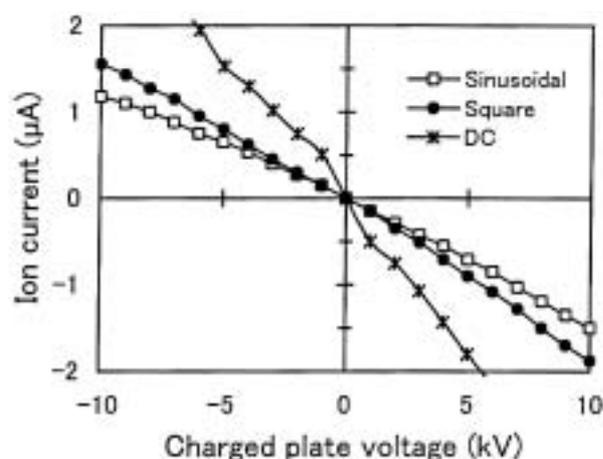


Fig. 8 Relationship between the ion current and the applied voltage of the charged plate.

帯電板電圧とイオン電流の関係

期毎に正イオンと負イオンを生成し、このうち負イオンは帯電板に反発されるため電荷中和に寄与しない。さらに正弦波では、正極性周期であってもコロナ開始電圧（このイオナイザでは約3.5kV）より低い電圧区間ではイオンを生成しない。したがって、Fig. 6 に示すように、電圧が同じ場合、交流印加によるイオン電流は直流印加の約1/3となる。

同じ装置を用いてノズル空気圧とイオン電流との関係を測定した結果をFig. 7 に示す。イオナイザ電圧は、交流では 7 kV，直流では + 4 kVである。空気圧を増加すると、これにほぼ比例してノズル風量・風速が増加して、生成イオンが効率よくノズルから引き出されるとともに帯電物体方向に運ばれるため、イオン電流は空気圧にほぼ比例して増加する。同様に 7 kVの正弦波及び矩形波の交流電圧並びに直流電圧をイオナイザに印加し、帯電板電圧を変えてイオン電流を測定した。その結果をFig. 8 に示す。ここで、ノズル空気圧

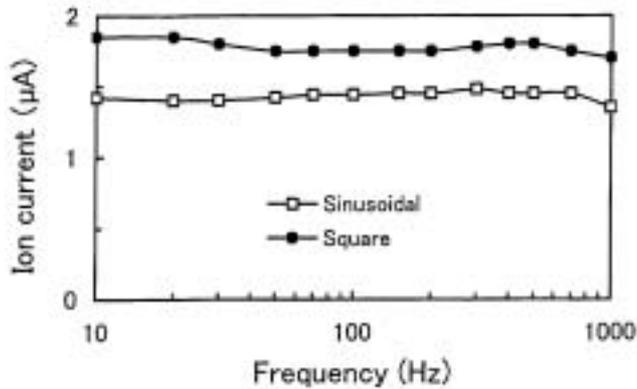


Fig. 9 Relationship between the ion current and frequency of the applied voltage of the ionizer.
イオナイザ印加電圧の周波数とイオン電流の関係

は250kPaとし、直流電圧は帯電板と逆極性のものをイオナイザに印加した。ノズルでの生成イオンは逆極性の帯電板に吸引されて引き出されるので、イオン電流は帯電板電圧にほぼ比例する。矩形波電圧の波高値は直流電圧と同じ大きさであるので、矩形波によるイオン電流は直流の約半分となる。帯電板の極性は正の方が負よりはイオン電流が20%ほど大きいのは、正コロナと負コロナの特性の違いによるもので、交流でも負イオンの方が正イオンより多く生成される。

交流型イオナイザを移動速度が大きい帯電物体の除電に用いる場合、少なくとも半周期は除電に寄与するイオンを生成しないので、その期間は除電されず、いわゆる除電ムラを生じる。その対策として周波数を高めることが考えられるので、正弦波及び矩形波についてイオナイザ電圧の周波数を変えてイオン電流を測定した。その結果をFig. 9に示す。帯電板電圧は -5 kV、ノズル空気圧は250kPaとした。交流では波形にかかわ

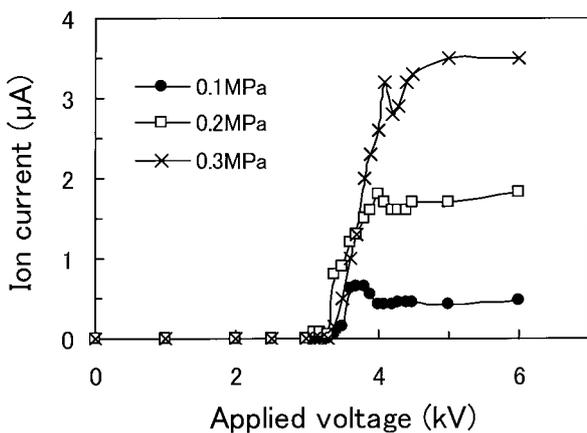


Fig. 10 Relationship between the ion current and the applied voltage of the ionizer.
イオナイザ電圧とイオン電流の関係

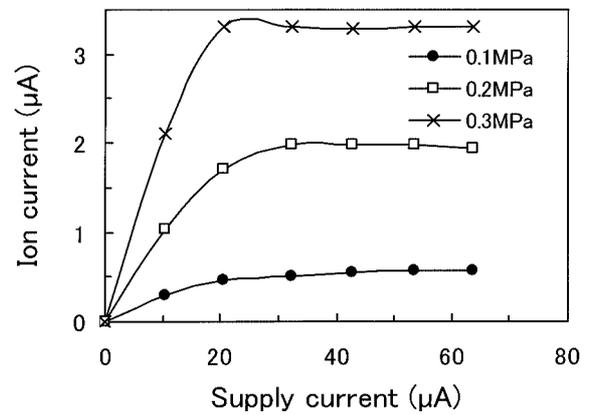


Fig. 11 Relationship between the ion current and the supply current for the ionizer.
イオナイザ供給電流とイオン電流の関係

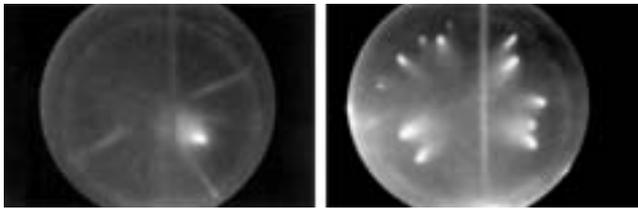
らず半周期ごとに帯電板と逆極性のイオンが生成され、その一部が帯電板に吸引され衝突する。一方、帯電板と同極性イオンは帯電板から完全に反発されるので、イオン電流の平均値は周波数にかかわらずほぼ一定となる。

50Hz商用交流電圧を印加する除電器では一般に除電不足となることが後述する実規模空気輸送実験の結果明らかとなったので、その対策として直流を印加し、その大きさをフィードバック制御することが考えられた。この場合、イオナイザの印加電圧又は供給電流を制御する二つの方法が考えられる。その選定のための基礎データとして両者についてイオン電流特性を測定した。ここで両者の違いを強調するため、帯電板とイオナイザ間の距離は1 cmとした。帯電板は縦横各20cmの金属平板とし、これに -5 kVの直流電圧を印加した。コロナ放電は印加電圧に敏感に反応するため、Fig. 10に示すように3.5 ~ 4 kVの狭い電圧範囲でイオン電流が大きく変化する。一方、Fig. 11に示すように、イオナイザ供給電流が0 ~ 20 μAの範囲ではイオン電流は緩やかに変化する。以上から、除電器の制御としては、イオナイザ用電源装置の出力電流を可変する方法が適していることが判明した。

3.2 空気輸送実験結果

3.2.1 着火性放電の発生特性

400kgのポリプロピレンペレットを風量10m³/min、ペレット流量25 ~ 32kg/min、搬送空気温度30 ~ 40、相対湿度30 ~ 70%の輸送条件で循環運転させ、イメージインテンシファイア付き一眼レフ光学カメラで撮影した。ペレット流量32kg/minにおける堆積ペレット表面での放電発光例をPhoto 4に示す。放電は大別して



(a) Temperature : 30 , Humidity : 30% , Disposure time : 3s
 (b) Temperature : 40 , Humidity : 60% , Disposure time : 10s

Photo. 4 Examples of electrostatic discharges along the piled pellet surface in the test silo. 堆積ペレット表面での放電発光

線状発光を伴うものと、面状発光を伴うものの2種類が観測された。線状放電はサイロ側壁から中心に向かって直線状に発光が伸びる放電で、面状放電は主に側壁と中心との中間部で発生し、発光が広がる放電である。湿度60%の観測例をPhoto 4 (b) に示すように、湿度が高くなると線状放電が減少し、面状放電が増える傾向にある。湿度70%でも同様の発光が見られた。これより加湿は着火性放電防止の対策にならないことが示唆される。

搬送空気温度30℃、湿度40%を一定とし、ペレット流量を変化させ、その間の放電発光状況をイメージインテンシファイア付きCCDカメラで撮影しビデオ録画し、その画像から線状放電と面状放電のそれぞれの発生回数を目視によりカウントした結果をFig.12に示す。ペレット流量が増えると、面状放電の頻度はほとんど変化しないが、線状放電は頻度が増加した。Fig.13は、サイロ内の側壁付近、中心位置、及び両者の中間位置の3箇所に金属柄杓を挿入して、それぞれ落下するペレットの比電荷を測定した結果であり、ペ

レット流量が増すと、中間位置 (Qa2) 及び側壁付近 (Qa3) の落下粉体の比電荷が増加し、逆に中心部 (Qa1) のそれは減少する傾向を示した。ペレット流量が増加すると、ペレット濃度が高まるため、充填パイプから離れた後、相互のクーロン力 (反発力) により帯電の大きいペレットが壁面方向へ反発されやすくなり、中心以外の比電荷が増加し、一方ペレット濃度の増加は配管との摩擦回数の少ないペレット量を増加させるので、サイロ中心を落下するペレットの比電荷が減少したと考えられる。結果的に堆積表面における径方向の電荷密度の差が大きくなり、このことが壁面付近から中央部に向かう線状放電の頻度増加をもたらしたものと推察される。一方、面状放電の発生機構は不明であるが、その発生頻度はサイロに持ち込まれる単位時間当たりのペレットの帯電量に比例すると推察される。

3.2.2 除電器による放電抑制特性

4インチ短管円周上に2列、計16個のイオナイザを設けた除電器 (Photo 1) をサイロ内充填パイプの末端に取り付けてその除電性能の評価実験を行った。共通の実験条件は、ペレット量350kg、搬送空気風量10m³/min、イオナイザ空気圧250kPaである。

温度30℃、相対湿度40%、ペレット流量32kg/minとし、除電器 (正確にはイオナイザ) に直流又は50Hz商用交流の高電圧を印加して実験を行った。Photo 5及びPhoto 6は、それぞれ交流及び直流の印加電圧を変えて、堆積ペレット表面における放電発光をイメージインテンシファイア付き一眼レフカメラで撮影した結果である。シャッター開放時間は10秒とした。イオナイザに電圧を印加しないときは、強い発光を伴う複数の面状放電と線状放電が観察される。交流印加では、

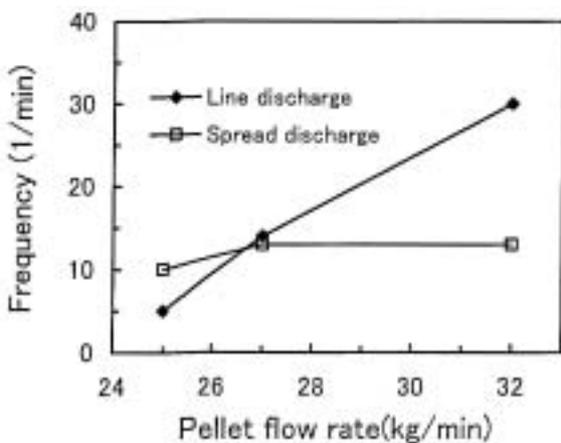


Fig. 12 Relationship between the frequency of incendiary discharges and pellet flow rate. 着火性放電の発生頻度とペレット流量の関係

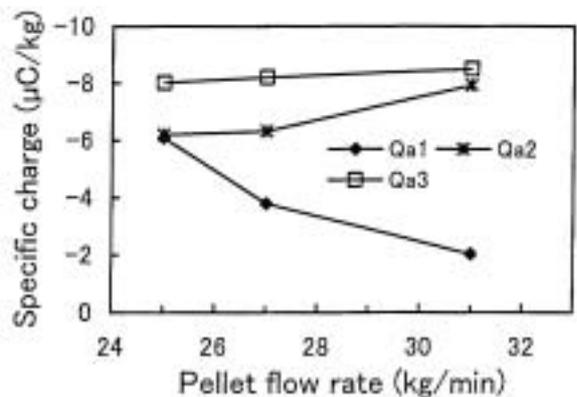


Fig. 13 Relationship between the specific charge of falling pellets and pellet flow rate. サイロ落下中ペレットの重量比電荷とペレット流量の関係

電圧を高くするに連れ、これら着火性放電の発生頻度は低下するが、最大使用電圧に近い7 kVまで上げてても放電を防止できない。一方、直流印加では、+3 kVで着火性放電の発生頻度がかなり低下し、+3.5及び+5 kVで放電が消滅する。以上のように、直流の方が交流よりも除電能力が高いが、このことはイオン電流特性 (Fig. 6) から容易に予想された。

上記除電効果を確認するため、除電器を作動させた状態でペレット循環を停止し、堆積ペレットの表面電位を測定した。具体的には、循環停止直後にサイロ側壁のマンホールを開け、側壁から20cm内側の堆積ペレット表面に対して、その上部60cmからハンディタ

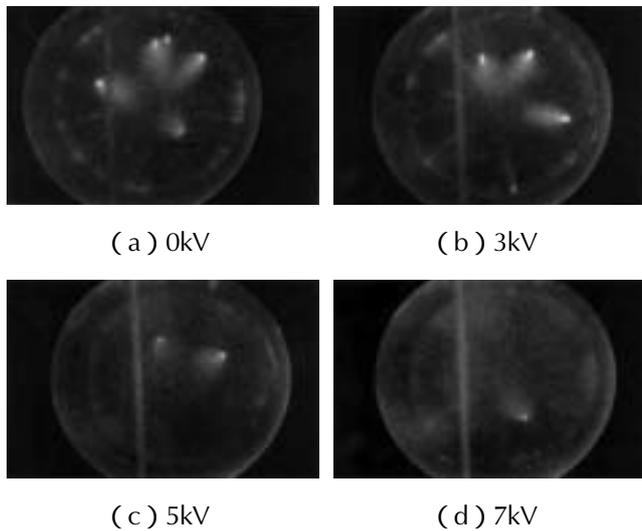


Photo. 5 Electrostatic discharges and applied ac voltage of the eliminator.
除電器印加電圧 (交流) と放電発生状況

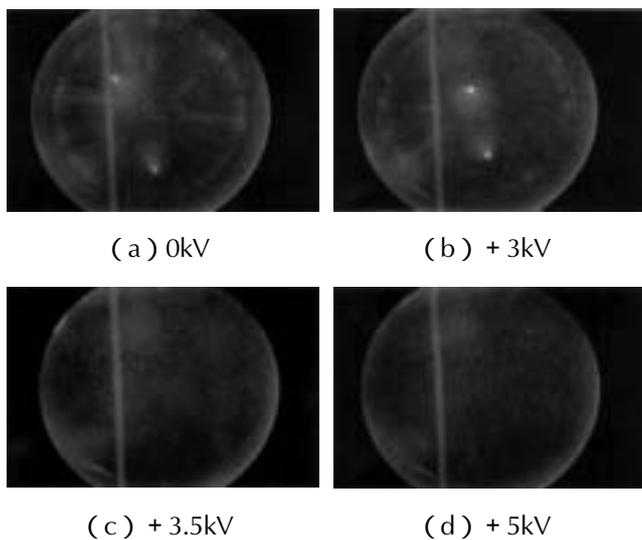


Photo. 6 Electrostatic discharges and applied dc voltage of the eliminator.
除電器印加電圧 (直流) と放電発生状況

イブ表面電位計を向けて測定した。Fig. 14は、除電器電圧を交流7 kV及び直流+5 kVとしたときのペレット流量と表面電位計指示値の関係を表す。ここで、表面電位計の正規の測定距離は10cmであるので、指示値は真の表面電位に比べてかなり低い値となる。いいかえれば、ペレットの表面電位は指示値の6倍程度と見込まれるので、実際の表面電位は直流+5 kV印加では+90kV、交流7 kV印加では-130kVになる。すなわち、交流7 kVでは除電能力不足であり、直流+5 kVでは除電前と逆極性の帯電 (逆帯電という。) が起こる。Fig. 15は、同じ除電条件で上記表面電位測定位置において落下するペレットの比電荷を測定した結果であり、除電中の比電荷は除電しない場合のそれ - 8 μ C/kg (Fig. 13) に比べて1/10程度まで抑制されてい

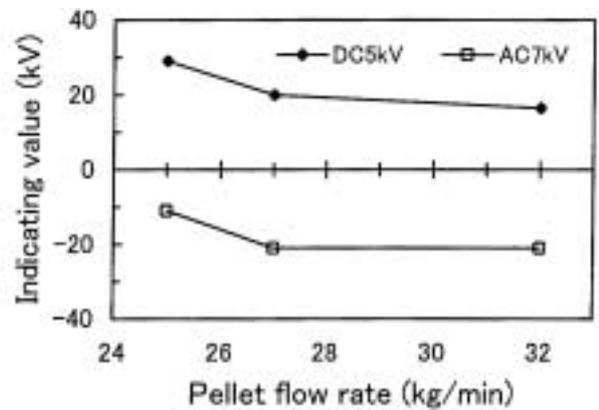


Fig. 14 Relationship between the indicating value of the surface potential meter for the piled pellet surface and pellet flow rate after stopping the pellet circulation using the eliminator.
堆積ペレットに対する表面電位計指示値とペレット流量の関係

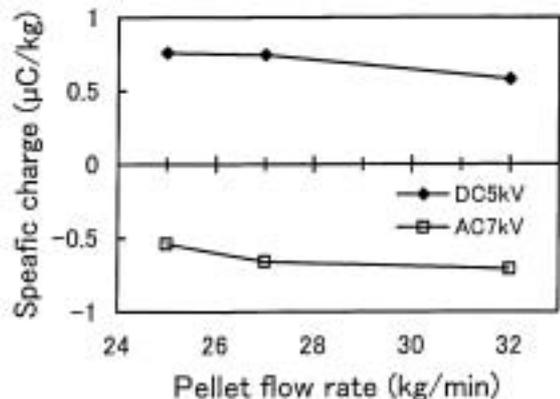


Fig. 15 Relationship between the specific charge of falling pellets and pellet flow rate during the pellet circulation using the eliminator.
サイロ内落下中ペレットの比電荷とペレット流量の関係

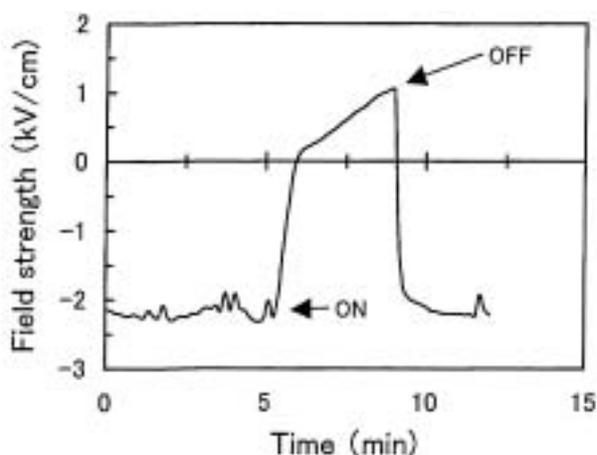


Fig. 16 Time change of the field strength at the silo wall for +7kV supply to the eliminator.
除電器への直流 +7 kV印加の有無によるサイロ側壁電界強度の時間変化

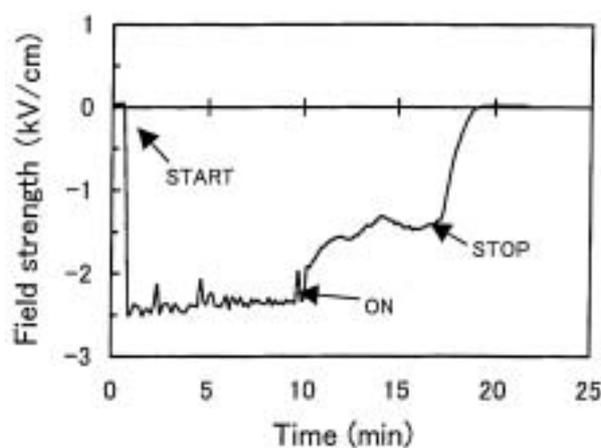


Fig. 17 Time change of the field strength at the silo wall for ac 7kV supply to the eliminator.
除電器への交流 7 kVの印加の有無によるサイロ側壁電界強度の時間変化

る。この値は、一般的な安全指標⁴⁾とされている $0.1 \mu C/kg$ に比べると大きく、必ずしも十分な除電ではない。

Fig. 16及びFig. 17は、搬送空気温度 $30^\circ C$ 、相対湿度30%、ペレット流量 $28 kg/min$ として、除電器に直流 +7 kV及び交流 7 kVをそれぞれ印加したときの静電界検出システムによるサイロ側壁電界強度の時間変化の測定例である。これらの結果はペレットの帯電量測定 (Fig. 14及びFig. 15) と傾向が一致するものであり、直流 +7 kVでは逆帯電が発生し、交流 7 kVでは電界強度が $-1.4 kV/cm$ 程度までしか抑制されない。

以上のように、直流印加では、除電に必要な印加電圧以上であると危険な逆帯電が起こるので印加電圧の制御が必要である。さらに帯電物体の極性と反対の極性の電圧印加が必要であるので、正、負両方の帯電物体に適用するためには、正負両極性の電圧発生が必要である。交流印加では、帯電物体の極性にかかわらず使用できる利点はあるが、50Hz交流では除電不足になる。

交流の利点を生かしつつ、除電不足を解決することを目的に、周波数増加の影響を調べた。交流としては正弦波のほかに矩形波を除電器に印加した。空気温度 $30^\circ C$ 、相対湿度30%、ペレット流量 $24 kg/min$ として、周波数とサイロ側壁電界強度の関係を測定した結果を Fig. 18に示す。この実験条件では着火性放電が観測されるか否かの限界値としての電界強度は $1 kV/cm$ (絶対値)であった。電圧を印加しないときの電界強度は $-1.4 kV/cm$ であり、図に示されるように、正弦波、方形波ともに周波数を増加すると除電効果が上がり電界強度が減少するが、周波数をさらに上げると極性が反転し絶対値が上昇に転じる (逆帯電)。ペレット帯

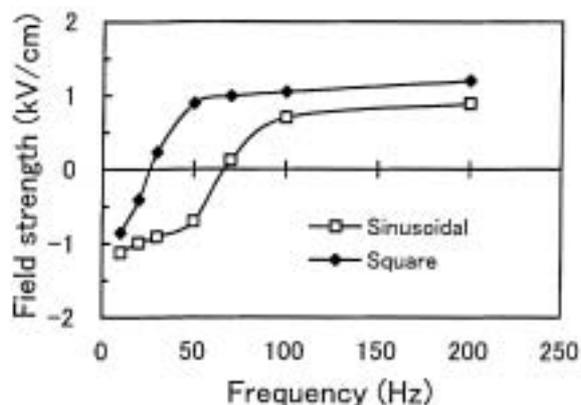


Fig. 18 Relationship between the field strength at the silo wall and the frequency of the ac power supply for the eliminator.
サイロ側壁電界強度と除電器電圧周波数の関係

電量が周波数に影響される原因は除電ムラと推定される。すなわち、周波数が低いと除電ムラが生じ除電効果は低くなり、周波数を高めると除電ムラが少なくなるため除電効果が高まり、逆帯電に移行する。更に周波数を高め、除電ムラが無視できるようになると逆帯電は飽和値に達する。ここで、周波数50Hzにおける除電ムラは、風速 $20 m/s$ と半周期 $10 ms$ の積から $20 cm$ と算出される。なお、イオン電流特性 (Fig. 9) では、帯電板が導体であり除電ムラが生じないため、イオン電流平均値は周波数に影響されない結果となる。同じ周波数では、方形波の方が正弦波に比べて除電能力が高い (一方で逆帯電を起こしやすい) のは、正弦波ではコロナ放電を起こさない区間があるのに対して、方形波ではコロナ放電が連続的に起こり、結果的に方形波の方がイオン生成量は多くなるためである。

以上のように、交流の場合も、最適な除電のためには印加電圧又は周波数の制御が必要になることが判明した。

3.2.3 除電制御による放電の抑制

(1) ON-OFF制御

上記結果から明らかなように、サイロにおける着火性放電を防止するためには、除電制御が必要である。その一つとして、サイロ側壁静電界検出システムの出力量をその設定値と比較して除電器電圧をON-OFFする方法を試みた。

実験条件は空気温度30℃、相対湿度30%、ペレット流量28kg/minとした。今回実験条件ではサイロ側壁電界強度の絶対値が1.2kV/cm以下では着火性放電が観測されなかったことから、電界強度を ± 1 kV/cmの範囲内に抑制することを目標として制御を行った。静電界検出システムの測定値に基づく除電器のON-OFF制御の概要をFig. 19に示す。

実験条件では、除電しない場合の電界強度は約 -2 kV/cmとなるので、これを除電するため、除電器電圧は正極性とし、除電開始とともに制御を開始し、以降電界強度がその設定範囲より外れるタイミングに同期して除電器をON-OFFする。このとき電界強度が負のときON、正のときOFFとなるようにする。今回は実際にはこれらの動作を手動で行った。ON-OFFする除電器電圧を+4 kVとし、電界強度の設定値を ± 0.5 kV/cm及び ± 0.1 kV/cmとしたときの制御結果をそれぞれFig. 20及びFig. 21に示す。設定値が ± 0.5 kV/cm及び ± 1 kV/cmのとき、電界強度はそれぞれ -1 ~ +0.5 kV/cm及び -0.5 ~ +0.2 kV/cmの範囲内に制御することができ、両者ともに着火性放電の発生が消滅することを確認した。しかし、除電器をONにしたときよりOFFにしたときの電界変化の速さが大き過ぎて、制御

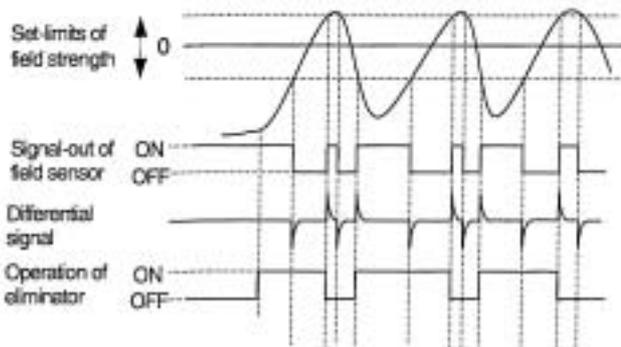


Fig. 19 ON-OFF control of the power supply for the eliminator by the measurement value of the field sensor.
電界強度による除電器のON-OFF制御の概要

結果が振幅の大きな鋸歯状波になり、負極性電界が設定値より大きく越えてしまう結果となった。

(2) 比例制御

上記ON-OFF制御ではサイロ側壁電界強度測定値に基づいて除電器の制御を行ったが、実際のサイロでは堆積面の高さが時々刻々変わるため、側壁電界強度の測定は一般的ではない。また、制御としてもON-OFF制御よりも比例制御やPID制御の方が一般的である。そこで、一つの試みとして配管電界検出器 (Photo 3) の出力信号によって除電器を比例制御するフィードバック制御システムを試作し、除電の自動制御を試みた。

除電能力をコントロールする方法として、印加電圧制御と供給電流制御の二つの方式が考えられるが、イオナイザへの印加電圧及び供給電流を可変したときのそれぞれのイオン電流特性 (Fig. 10及びFig. 11) から

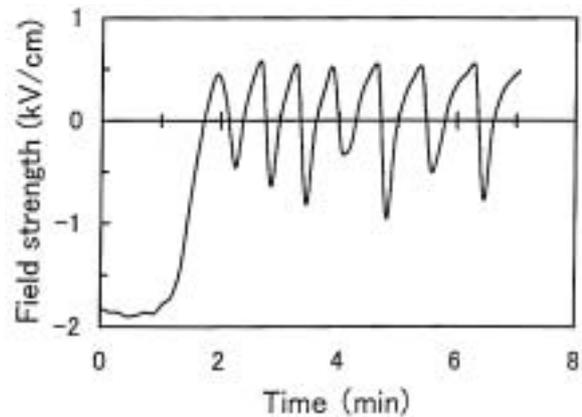


Fig. 20 Result of ON-OFF control for the set values of ± 0.5 kV/cm.
サイロ側壁電界強度設定値 ± 0.5 kV/cmにおけるON-OFF制御結果

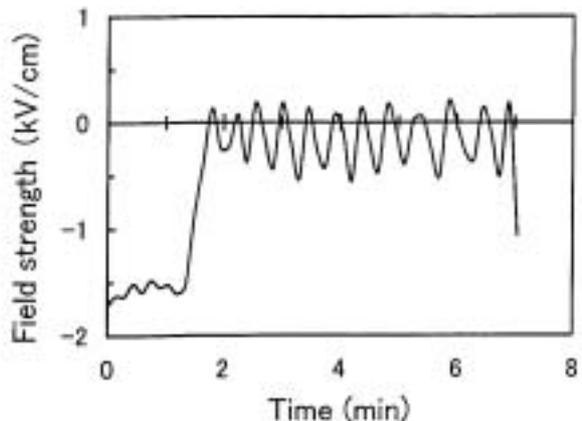


Fig. 21 Result of ON-OFF control for the set values of ± 0.1 kV/cm.
サイロ側壁電界強度設定値 ± 0.1 kV/cmにおけるON-OFF制御結果

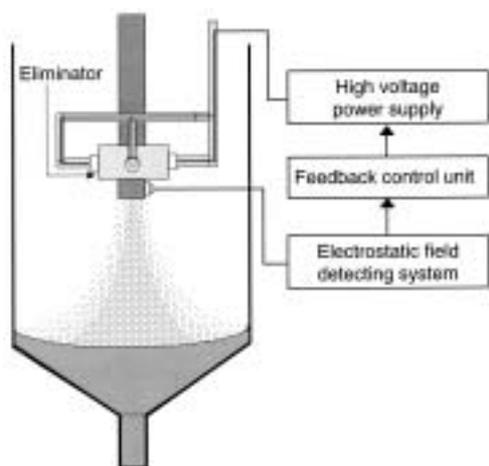


Fig. 22 Schema of the feedback control of the eliminator.

除電器のフィードバック制御の概要

安定した制御には後者が適していると判断されたので、配管用検出器の出力信号ゼロを設定点として除電器供給電流をフィードバック制御した。

フィードバック制御の概要図をFig. 22に示す。具体的には配管電界検出器のアナログ出力をAD変換し、デジタル信号をノートパソコンに取り込み、比例制御の演算を行い、その結果をDA変換し、アナログ信号として高電圧増幅器（トレック社製MODEL 664）に入力し、定電流高電圧出力を発生させ、これをイオナイザに供給した。Fig. 22中のフィードバック制御ユニットは上記AD変換、比例制御演算及びDA変換を行うもので、実際にはノートパソコンと計測制御インターフェースを用いた。

比例制御の演算式を(1)式に示す。

$$U(t) = -K_p \cdot \alpha(t) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha(t)$ は制御偏差であり、設定値を電界強度ゼロとしたので、これは電界強度瞬時値に正比例する。 $U(t)$ は訂正信号であり、この場合は高電圧増幅器の入力信号に正比例する。 K_p は制御要素のゲインで、比例常数である。負号は訂正動作を表す。

除電システムの特性を確認するため、空気温度30℃、相対湿度30%、ペレット流量24kg/minとし、ペレットの空気輸送実験を行った。実験結果をFig. 23に示す。縦軸はサンプリング法で測定したサイロ内落下ペレットの比電荷及び配管電界検出器の測定値で、横軸は制御要素のゲインである。図中のQ1, Q3, 及びQ2はそれぞれサイロ中心、壁面近く、及びその中間を表す。ゲインが0は除電器OFFに相当する。ゲインの値を増すと電界強度が低くなり、比電荷も減少する。ゲインが2で電界強度及び各位置の比電荷はほぼ0になる。ゲインが2～3.5では、電界強度及び比電荷の極性が

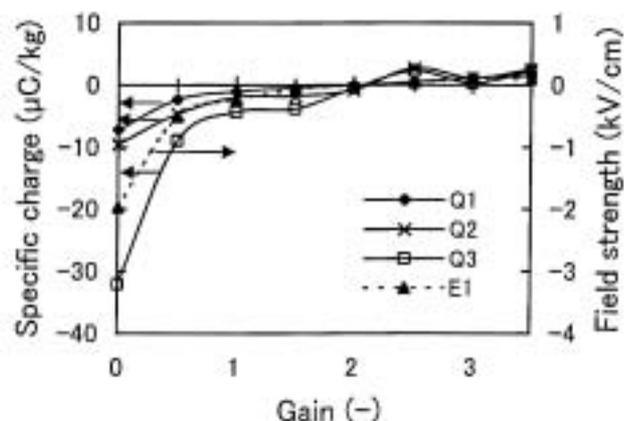


Fig. 23 Change of the specific charge of falling pellets and field strength obtained from the field detection pipe with gain of the control element in the feedback-controlled elimination system.

フィードバック除電システムにおけるゲインとペレット比電荷及び配管電界強度の関係

反転（逆帯電）を生じるが、その大きさは小さい。ゲインが1～3.5では着火性放電も消滅した。

以上の結果、配管電界検出器の出力信号に基づく除電器供給電流の比例制御により着火性放電の抑制が可能であることが判明した。しかし、原理的に比例制御では負荷変動の大きさや速度が大きい場合は、オフセットを生じ、又は振動的になり非減衰振動（ハンチング）を起こすことがあるので、これらを防止するため、今後はより高度なPID制御システムについて検討する予定である。

4. 結論

粉体空気輸送用サイロにおける静電気放電火花を着火源とする粉じん爆発を防止するため、サイロ充填パイプに取り付ける粉体用除電器を開発し、実規模大の空気輸送実験により除電性能の確認を行った。

具体的には、粉体用除電器として、サイロ充填パイプと同径のSUS短管の円周上に2段・計16本のノズル型イオナイザを配置したものをを用い、ポリプロピレンペレットを試料とする空気輸送実験を行い、サイロ内の着火性放電抑制に関する次の結果を得た。

- ）除電を行わない場合、サイロ内の堆積ペレット表面で強い発光を伴う着火性放電が発生し、放電の発光形態及び発生頻度は、ペレットの重量比電荷の大きさ及びそのサイロ径方向の分布に関係する。この放電は搬送空気の湿度を高めても防止が困難である。
- ）粉体用除電器に50Hz商用交流を印加すると、印加電圧が高くなるほど着火性放電が減少するが、7

kVまで上げてても消滅せず除電不足を呈する。一方、直流を印加すると、+3.5~5 kVで着火性放電は消滅するが、さらに電圧を上げると、ペレットは逆帯電し着火性放電が再び発生する。

-) 粉体用除電器へ印加する交流の周波数を50Hz以上に高めると、除電ムラの低下等により除電効果が高まるが、印加電圧によって定まるレベルで飽和する。印加電圧が7 kVであると、着火性放電を発生する逆帯電を起こす。これらの傾向は正弦波より矩形波の方がより顕著である。
-) サイロ側壁電界強度の設定値を超えるタイミングで粉体用除電器の直流電圧をON-OFF制御すると、着火性放電を防止できるが、電界強度は振動的となり、設定値から大きく外れる。
-) 粉体用除電器の後に取り付けの配管電界検出器の出力信号により除電器供給電流を比例制御するフィードバック制御システムにより着火性放電の抑制が可能である。

結論として、配管電界検出器と組み合わせたフィードバック制御方式の粉体用除電器によりサイロ内の着火性放電の抑制が可能なが明らかとなった。今後は、より安定性の高いPID制御等について検討を行う。

謝辞

本研究に関して大阪府立大学 綿野 哲 助教授には種々の助言をいただいた。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 静電気学会編, 新版静電気ハンドブック, pp.150-364, オーム社 (1998)
- 2) 産業安全研究所技術指針, 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1 (1988)
- 3) M.Glor, Electrostatic Hazards in Powder Handling, pp.59-102, Research Studies Press (1988)
- 4) T.B.Jones and J.L.King, Powder Handling and Electrostatics, pp.4-24, Lewis Publishers (1991)
- 5) B. Maurer, "Discharges due to electrostatic charging of particles in large storage silos," Ger. Chem. Engrg., 2, pp.189-195 (1979)
- 6) R. Blythe and W. Reddish, "Charging on powders and bulking effects," Institute of Physics Conf. Ser. No. 48, pp.107-114 (1979)
- 7) M. Glor, Proceedings of Int. Conference on Safe Handling of Flammable Dusts, organized by VDI, Nürnberg, VDI-Berichte, 494, p.119 (1983)
- 8) M. Glor, "Condition for the appearance of discharges from the gravitational compaction of powders," J. Electrostatics, 15, pp.223-235 (1984)
- 9) M. Glor, "Hazards due to electrostatic charging of powders," J. Electrostatics, 16, pp.175-191 (1985)
- 10) M. Glor, Electrostatic hazards in powder handling, Research Studies Press, Letchworth, pp.93-102 (1988)
- 11) G. Lüttgens and M. Glor, Understanding and controlling static electricity, Expert Verlag GmbH (1989)
- 12) B. Maurer, M. Glor, G. Lüttgens, and L. Post, "Test rig for reproducible generation of discharges from bulked polymeric granules," J.Electrostatics, 23, pp.25-34 (1989)
- 13) M. Glor, G. Lüttgens, B. Maurer, and L. Post, "Discharges from bulked polymeric granules during the filling of silos-characterization by measurements and influencing factors," J. Electrostatics, 23, pp.35-43 (1989)
- 14) M. Glor and B. Maurer, "Ignition tests with discharges from bulked polymeric granules in silos (cone discharges)," J. Electrostatics, 30, pp.123-134 (1993)
- 15) M. Glor, Proceedings of eighth Int. Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Antwerp, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1995)
- 16) M. Glor and K. Schwenzfeuer, "Occurrence of cone discharges in production silos," J. Electrostatics, 40 & 41, pp.511-516 (1997)
- 17) J. Taillet, P. Poidras, M. Glor, and B. Maurer, "Testing a new device for suppressing electrostatic charges on polymer granules," J. Loss prevention in the process industries, 5, pp.235-237 (1992)
- 18) J. Taillet, "Elimination of static charges in the processing of bulk material," J. Electrostatics, 30, pp.181-190 (1993)
- 19) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, S. Yagi, and S. Watano, "Static charge elimination on pellets in a silo using a new nozzle-type eliminator," J. Electrostatics, 55, pp.289-297 (2002)
- 20) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, T. Mogami, and S.Watano, "A new nozzle-type static charge

- eliminator used in a silo during pneumatic powder transport, " Conf. Record (CD) of World Congress on Particle Technology 4, Sydney (2002)
- 21) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, T. Mogami, and S. Watano, " Electrostatic charge elimination on powder by nozzle-type ionizers ", Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety (APSS2003) pp.363-366, Taipei (2003)
- 22) T. Kodama, T. Suzuki, K. Nishimura, T. Mogami, and S. Watano, " A new passive-type electrostatic eliminator used in a powder storage silo, Powder Technology ", 135-136, pp. 209-215(2003)
- 23) 産業安全研究所技術指針, 静電気用品構造基準「交流電圧印加式除電器の防爆構造, 性能及び試験方法」, RIIS-TR-91-1 (1988)
- (平成16年1月26日受理)