

粉体の空気輸送中の貯蔵槽での静電気放電による電圧の測定†

富田 一*1

静電気放電による粉じん爆発災害を予防する対策の一環として、貯蔵槽のような金属容器の内部で発生する静電気放電を検出するため、静電気放電が発生する時にループアンテナに誘導される電圧を主たる検出信号とする実験を行った。実規模の粉体空気輸送装置を用いて、ループアンテナに誘導される電圧と貯蔵槽の電圧を測定した結果、伝導性の電磁ノイズが存在する電磁環境下においても、静電気放電に伴う誘導電圧を検出可能なことが確認された。誘導電圧のレベルは突然に大きくなっており、バルク表面放電のように着火性の強い静電気放電の予兆現象を捉えることは現状では不可能であった。ただし、着火性静電気放電と推定される誘導電圧を検出したときに、除電器を稼働させて帯電粉体を電的に中和するなど適切な帯電防止策を講じれば、静電気放電に起因する爆発災害の発生確率を低減することは可能であることから、誘導電圧の常時モニターは静電気災害の予防に役立つと考えられる。

キーワード: 静電気放電, 誘導電圧, 空気輸送, 貯蔵槽

1 はじめに

粉体の輸送、集じん等の粉体取扱工程においては、静電気の発生と帯電が問題となり、静電気放電を着火源とした粉じん爆発災害が発生している。当研究所において1989～2005年の間に粉体の取扱において静電気に起因する爆発火災の災害事例112件を調査した結果、粉じん爆発は29件で全体の約1/4を占めていた¹⁾。例えば、アルミニウムの研磨工程で発生したアルミニウム粉じんを集じん機を用いて捕集していたところ、ダクト内で静電気放電を着火源としたと推定される粉じん爆発災害が発生している²⁾。静電気放電は集じん中の摩擦帯電が一因と推定されている。

上記の粉じん爆発災害の対策の一環として、本研究においては、貯蔵槽のように静電気のセンサを取り付けることが容易でない場合に、金属容器の内部で発生する静電気放電の発生を検出する手法について検討した。既に検出する手法としては、帯電した金属からの火花放電を検出するためにループアンテナ³⁾、帯電した金属からの火花放電とコロナ放電の検出と識別を目的としてモノポールアンテナを用いた方法⁴⁾が報告されている。

本研究では、帯電粉体から静電気放電が発生した場合にループアンテナに誘導される電圧を主たる検出信号として活用することを実験的に検討するために、実規模の粉体空気輸送装置を用いて、ループアンテナに誘導される電圧と貯蔵槽の電圧とを測定した。その結果、静電気放電に伴う誘導電圧をループアンテナによって検出可能なことが確認された。着火性の強いバルク表面放電と推定される放電現象は、誘導電圧と貯蔵槽の電圧によって捉えられる可能性のあることがわかった。また、ループ

アンテナへの誘導電圧が静電気放電に起因することがフォトセンサによって確認された。

2 実規模空気輸送実験装置による実験方法

実験に用いた実規模空気輸送実験装置(図1)は、縦置き円筒型貯蔵槽(SUS製、直径φ1.5m、胴長2m、容量15m³、以下、「貯蔵槽」という)及び全長23m、外径寸法4インチの空気輸送用配管などから構成されている。試料粉体にはポリプロピレン(PP)ペレット(平均粒径:3mm)を300kg使用した。ポリプロピレンペレット(以下、「ペレット」という)の空気輸送においては、ペレットは貯蔵槽の底部からロータリーバルブによって輸送配管へ排出され、輸送配管内を空気輸送されたペレットが再び貯蔵槽上部から貯蔵槽に投入される。実験条件は、輸送空気温度:30℃、輸送空気湿度:30%、粉体供給量:25kg/min、圧送ブロー風量:10m³/minとした。

空気輸送に伴って帯電したペレットからの静電気放電を検出するセンサにはセミリジッドケーブルを用いた直径60mm(ETS・Lindgren 7405-901B、上限共振周波数:790MHz)のループアンテナと併せて貯蔵槽に接続された電圧プローブ(Tektronix P5100、入力抵抗:10MΩ、入力容量:2.75pF 未満、DC～250MHz)を用いた。前記ループアンテナ及び電圧プローブをデジタルストレージオシロスコープ(Tektronix DPO70404B、周波数帯域:DC～4GHz、以下、「オシロスコープ」という)に接続し、ループアンテナ及び電圧プローブの端子の入力インピーダンスをそれぞれ50Ω、1MΩに設定した。オシロスコープでの測定データはパソコンに転送されて保存された。なお7405-901Bは、貯蔵槽内部の円筒部分の最下部より100mm上方にループ面を水平の向きとして、中央に配置した。

3 実験結果と考察

1) 輸送空気のみ循環させた場合

輸送空気のみを循環させたときの、各センサでの電圧を測定した。図2(b)に示すように貯蔵槽の電圧(以下、

† 原稿受付 2012年12月26日

† 原稿受理 2013年02月18日

*1(独)労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

(独)労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ 富田一*1

E-mail: tomita@s.jniosh.go.jp

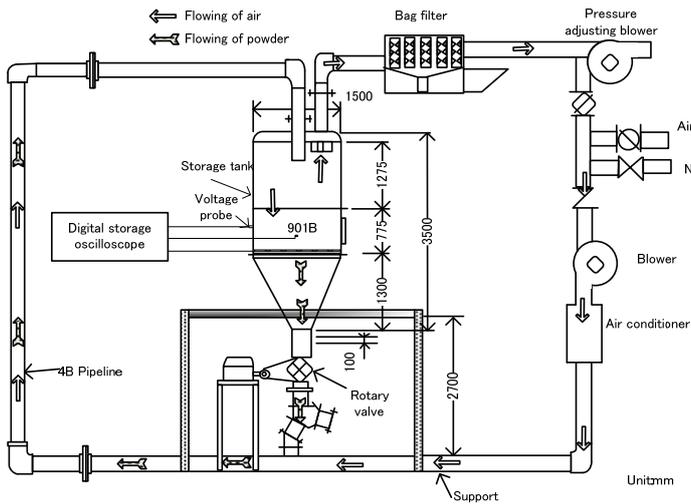
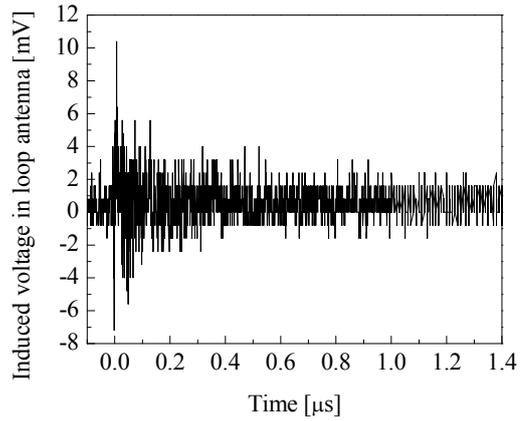


図1 実規模空気輸送実験装置

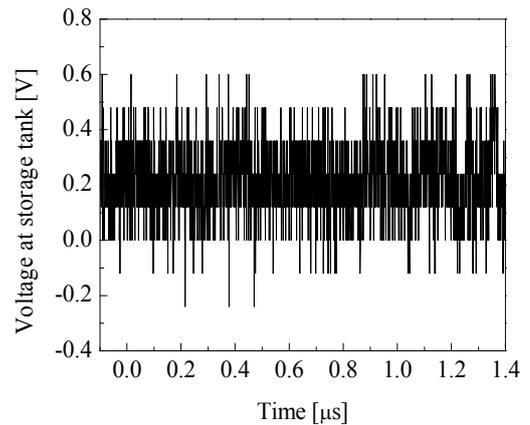
「貯蔵槽電圧」という)には電動機の接地線などを介した伝導性の電磁ノイズがピークピーク値で約 $1.8V_{p-p}$ 測定されたが、図 2(a)に示すように 7405-901B での誘導電圧 (以下、「アンテナ誘導電圧」という)は、オシロスコープに起因する電圧変動 (アナログ信号をデジタル信号に変換する際に生ずる誤差など) はあるものの、伝導性の電磁ノイズによる影響を受けないことが確認された。したがってループアンテナでは貯蔵槽内での静電気放電に起因する信号のみを捉えられることとなる。

2) ペレットを循環させた場合

輸送空気のみを循環させる状態からペレットを循環さ

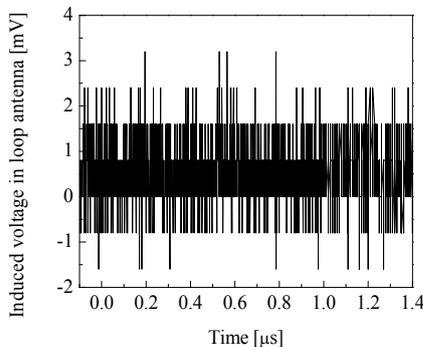


(a) アンテナ誘導電圧

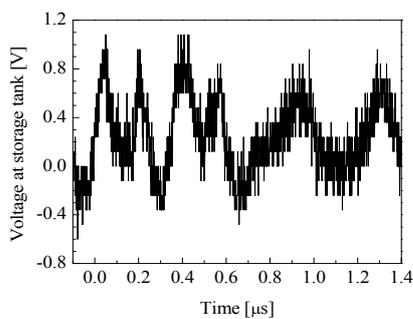


(b) 貯蔵槽電圧

図3 No.13の測定電圧波形



(a) アンテナ誘導電圧



(b) 貯蔵槽電圧

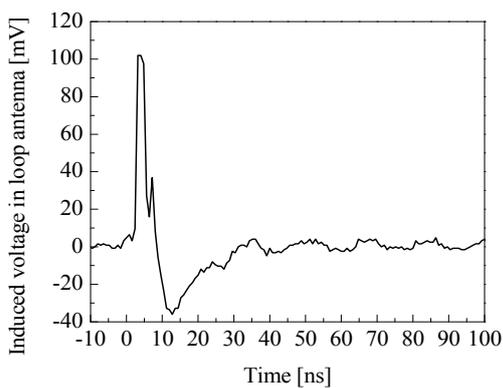
図2 輸送空気循環時の測定電圧波形例

せる状態に切り替えながら、約 0.4 秒間隔で連続的にアンテナ誘導電圧、貯蔵槽電圧を 204 回測定した。測定開始から連続的に No を付したところ、帯電ペレットからの静電気放電によるアンテナ誘導電圧、貯蔵槽電圧は No.11 より観測された。

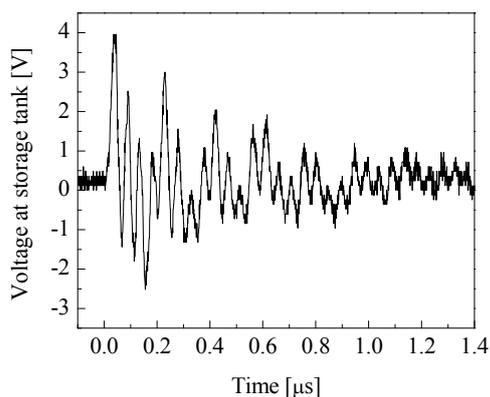
以下、特徴的な測定波形について述べる。図 3 は No.13 の波形であって、貯蔵槽電圧に変化がない一方で、アンテナ誘導電圧が変動していることから、帯電したペレットの領域での静電気放電と推定される。

図 4(a)に示すように、No.20 ではピークピーク値で約 $140mV_{p-p}$ のアンテナ誘導電圧が測定されている。アンテナ誘導電圧の持続時間が 30ns、図 4(b)のように貯蔵槽電圧のピークピーク値が約 $6.5V_{p-p}$ であって、現象の持続時間に基づき絶縁された導体からの静電誘導に起因しての火花放電の可能性が考えられる。

その後 No.22~No.31 までは類似した波形が観測されている。たとえば、No.22 のアンテナ誘導電圧と貯蔵槽電圧とを図 5 に示す。アンテナ誘導電圧のピークピーク値は約 $11mV_{p-p}$ 、持続時間約 300ns となり、同時に測定された貯蔵槽電圧のピークピーク値は約 $5V_{p-p}$ 、持続時間は約 1000ns となっている。次の理由によって、帯電したペレットから貯蔵槽へのブラシ放電に起因した電圧と推定される。

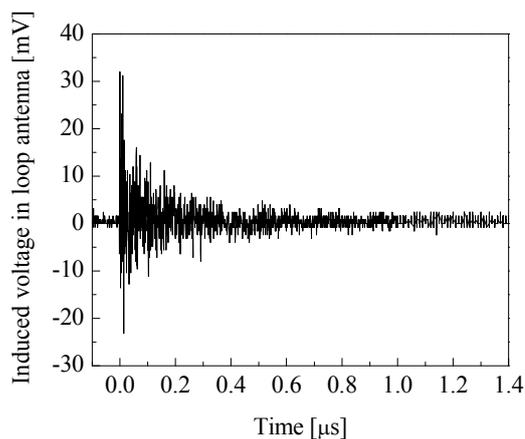


(a) アンテナ誘導電圧

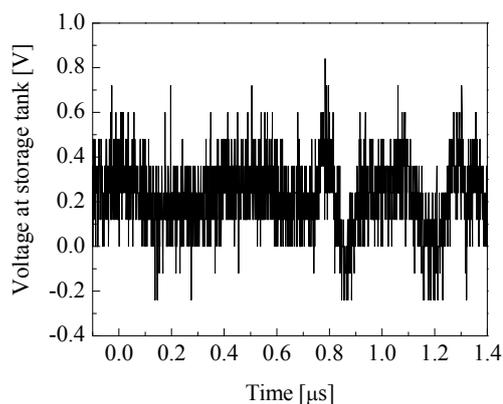


(b) 貯蔵槽電圧

図4 No.20の測定電圧波形

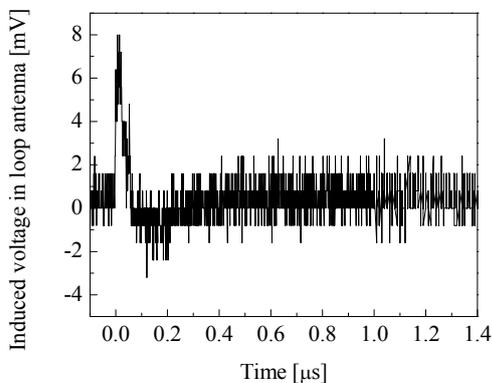


(a) アンテナ誘導電圧

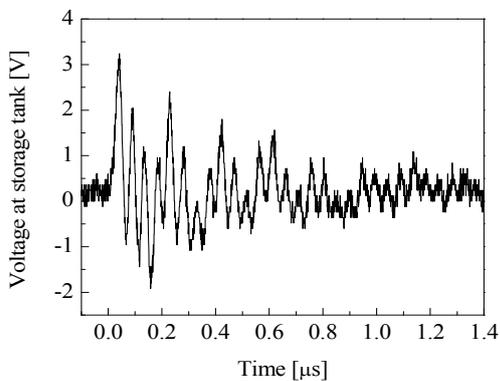


(b) 貯蔵槽電圧

図6 No.33の測定電圧波形



(a) アンテナ誘導電圧



(b) 貯蔵槽電圧

図5 No.22の測定電圧波形

No.22~No.31 の場合には静電気放電が発生したときにアンテナ誘導電圧、貯蔵槽電圧のいずれにも電圧が現れている。ブラシ放電は絶縁性の帯電物体と曲率半径が5mm以上の接地体との間での放電と考えられている。貯蔵槽の内壁の直径は1.5mであることから、帯電したペレットと貯蔵槽の内壁との間での静電気放電は主にブラシ放電となると推定される。

その後 No.33 では、図6に示すように、アンテナ誘導電圧のピークピーク値として約60mV_{pp}が測定され、持続時間が800ns程度となっている。同時に測定された貯蔵槽電圧のピークピーク値は約1.1V_{pp}であって、主に測定系固有のノイズと推定される。この放電は次の理由によってバルク表面放電と推定される。バルク表面放電は帯電した粉体の表面に沿って発生する放電現象であることから、放電が連続することによってブラシ放電と比較して長い距離が放電路になるとともに、必ずしも接地体への放電とはならない。このバルク表面放電の特徴を図6は示していると考えられる。

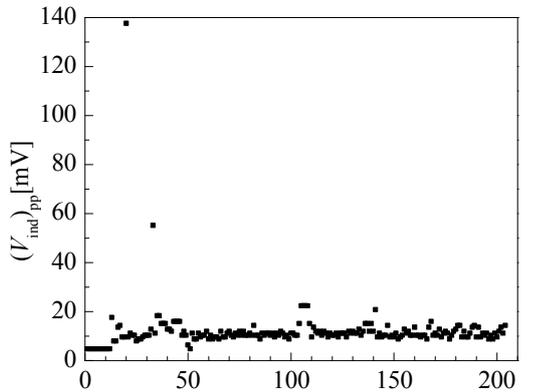
3) 測定電圧の推移

アンテナ誘導電圧のピークピーク値($V_{ind,pp}$)と貯蔵槽電圧のピークピーク値($V_{tank,pp}$)の推移を図7に示す。 $(V_{ind,pp})$ はペレット循環開始直後であるNo.11からレベルが大きくなり、No.20, No.33ではおのおの約140mV_{pp}, 60mV_{pp}が測定されたが、他の測定点では25mV_{pp}以下であった。

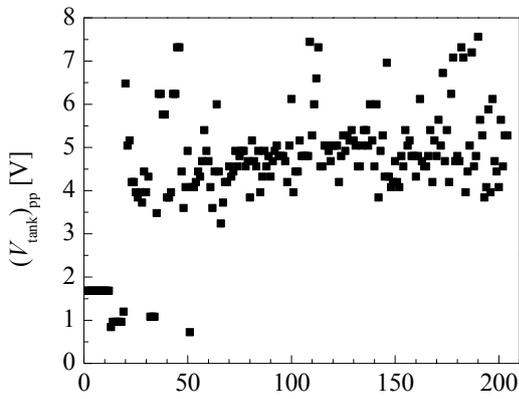
貯蔵槽電圧のピークピーク値($V_{\text{tank}}_{\text{pp}}$)は、ペレット循環開始直後から50回の測定までの間に $1.5V_{\text{pp}}$ 以下の測定が数回あるが、他の測定では $3V_{\text{pp}}$ を超えるものであった。 $(V_{\text{tank}})_{\text{pp}}$ が $3V_{\text{pp}}$ を超える場合には、伝導性の電磁ノイズによる貯蔵槽電圧の波形、ピークピーク値とは異なることから、貯蔵槽内での静電気放電に起因する貯蔵槽電圧の変化と判断される。 $(V_{\text{tank}})_{\text{pp}}$ が $1.5V_{\text{pp}}$ 以下の場合には、貯蔵槽内部の帯電したペレットの領域で静電気放電が発生したために、貯蔵槽電圧にほとんど変化が現れなかったものと推定されるが、伝導性の電磁ノイズが重畳している可能性もあり、検討中である。

放電の種類を推定するための試みとして、貯蔵槽電圧のピークピーク値($V_{\text{tank}}_{\text{pp}}$)に対するアンテナ誘導電圧のピークピーク値($V_{\text{ind}}_{\text{pp}}$)の比($=V_{\text{ind}}_{\text{pp}}/(V_{\text{tank}})_{\text{pp}}$)を算出した。結果を図8に $V_{\text{ind-tank}}$ として示す。測定開始後50回以内でレベルが大きくなっている。 $V_{\text{ind-tank}}$ のレベルが大きい場合の一つは、貯蔵槽電圧が大きくなるのに対して、アンテナ誘導電圧が大きくなっている場合である。これはペレットの堆積した領域で静電気放電が発生していて、貯蔵槽に向かっての放電とはならない場合と考えられる。典型的な場合としては、バルク表面放電が考えられる。

一方、 $V_{\text{ind-tank}}$ のほとんどの値は0.004以下であった。



(a) アンテナ誘導電圧のピークピーク値



(b) 貯蔵槽電圧のピークピーク値

図7 アンテナ誘導電圧と貯蔵槽電圧の推移

ブラシ放電と推定される図5では、 $V_{\text{ind-tank}}$ が0.002である。今回の実験においては、 $V_{\text{ind-tank}}$ が0.004以下の場合には、図5と類似した波形となっていることから、ブラシ放電であると推定される。

4) 静電気放電に伴う発光の測定

静電気放電には発光を伴うことから、アンテナ誘導電圧が静電気放電に起因することを確認するために、貯蔵槽内部での発光をアンテナ誘導電圧と同時に測定した。

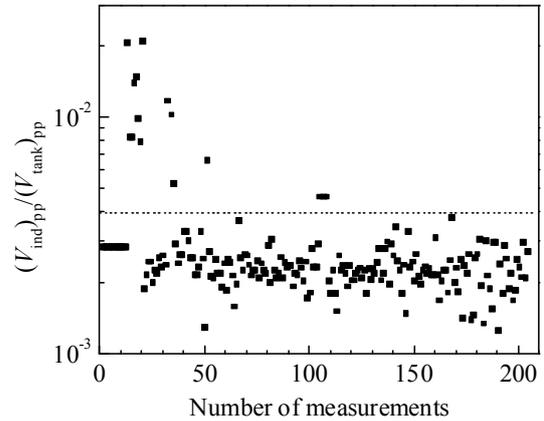


図8 $(V_{\text{tank}})_{\text{pp}}$ に対する $(V_{\text{ind}})_{\text{pp}}$ の比, $V_{\text{ind-tank}}$

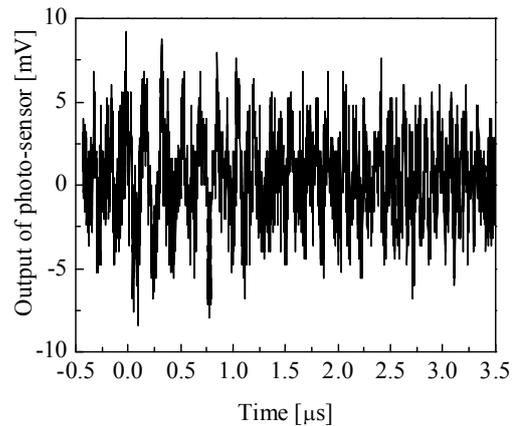


図9 ブラシ放電と推定される放電時のフォトセンサ出力波形

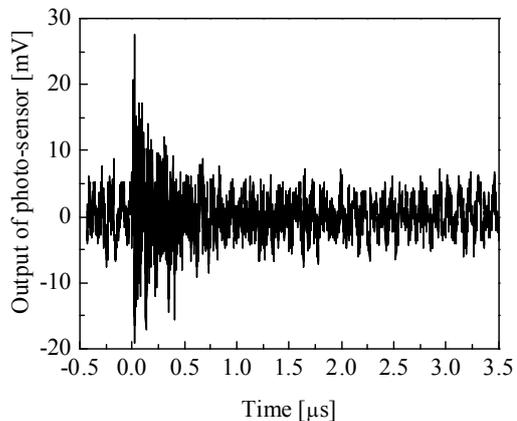


図10 バルク表面放電と推定される放電時のフォトセンサ出力波形

貯蔵槽外部からの光を遮光するために、観測窓には暗幕を取り付けた。発光の測定のためフォトセンサアンプ（浜松ホトニクス、C6386-01、周波数帯域：DC～10MHz）の出力端子に同軸ケーブル(1m)を介して増幅器（HP8447D、0.1～1300 MHz、増幅度:25dB）を接続した。増幅器の出力端子はオシロスコープの50Ω入力端子に接続した。フォトセンサアンプの光入射端の受光面は貯蔵槽の円筒部分の下端から約1.2mの高さで、円筒の中心から約25cmの距離にペレット表面に対向するように固定した。

図5に示すブラシ放電と推定される場合と類似したアンテナ誘導電圧を測定した時のフォトセンサでの出力波形を図9に示す。ループアンテナからトリガ起動信号をオシロスコープが受信した時のタイミングである-0.35μsに連動して、フォトセンサからの出力レベルがわずかに大きくなっている。出力の変動は静電気放電による発光と考えられる。フォトセンサの出力波形は測定系でのノイズを含んで複雑に変動しており、静電気放電の特徴を抽出することは困難と判断される。

図6に示すバルク表面放電と推定される場合と類似したアンテナ誘導電圧測定時のフォトセンサでの出力波形を図10に示す。トリガ起動信号をオシロスコープが受信した0sと同期して約1000ns、静電気放電時の発光に伴うフォトセンサからの出力電圧が観測されている。

以上のことから、本実験で測定されたアンテナ誘導電圧は静電気放電に起因することが確認された。

4 まとめ

実規模の粉体空気輸送装置を用いて、静電気放電が発生したときにループアンテナに誘導されるアンテナ誘導電圧と貯蔵槽での電圧とを測定した。また、静電気放電に伴う発光を測定した。

その結果、伝導性の電磁ノイズが存在する電磁環境においても、静電気放電に伴うアンテナ誘導電圧を検出可能なことが確認された。

バルク表面放電と推定される放電に起因するアンテナ誘導電圧のレベルは突然に大きくなっており、着火性の強い静電気放電の予兆現象を捉えることは困難であった。

ただし、着火現象は確率的なことから、一度の着火性のある静電気放電現象を捉えられたときに、除電器を稼働させて帯電粉体を電氣的に中和するなど適切な帯電防止策を講じれば、静電気放電による爆発災害の発生確率を低減することは可能であると考えられる。

以上の理由から、誘導電圧の常時モニターは静電気災害の予防に役立つと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご協力頂いた大澤上席研究員、春日電機（株）西田氏に深謝致します。

文 献

- 1) 実務者のための粉じん爆発・火災安全対策．(社)日本粉体工業技術協会粉じん爆発委員会編．東京：オーム社；2009：62-69.
- 2) 職場のあんぜんサイト：労働災害事例
http://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/SAI_DET.aspx
- 3) J.N.Chubb,S.K.Erents,I.E.Pollard.Radio Detection of Low Energy Electrostatic Sparks. Nature. 1973; 245: 206-207.
- 4) G.D.Butterworth. The detection and characterization of electrostatic sparks by radio method. Inst.Phys.Conf. Ser.1979; 48:97-105.

Measurement of Voltages due to Electrostatic Discharge in a Storage Tank during the Pneumatic Conveyance of Powders

Hajime TOMITA*¹

As a part of countermeasures against powder dust explosions, induced voltages in a loop antenna and voltages in a storage tank in the event of electrostatic discharge (ESD) were measured for the detection of ESD inside a storage tank. As a result of a full-scale experiment using a pneumatic conveying system for powders, it was possible to detect induced voltages due to ESD even if conductive electromagnetic noises existed. It was not possible to detect a precursory phenomenon before an incendiary ESD, such as bulking brush discharge occurring, because the high-level induced voltage due to a presumed incendiary ESD occurred suddenly without any precursory phenomenon. However, the continuous monitoring of induced voltages is considered useful to prevent electrostatic accidents because it is possible to decrease the probability of explosion accidents due to ESD by neutralizing charged powders with a static eliminator when a presumed incendiary ESD is detected.

Key Words: electrostatic discharge, induced voltage, pneumatic conveyance, storage tank

*1 Electrical Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health