

# 粉体の空気輸送中の貯蔵槽内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に、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とを測定した結果、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。連続した粉体の空気輸送に伴う静電気放電による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。粉体の取扱における静電気に起因した爆発・火災の災害事例 112 件 (1989～2005 年) を当研究所において調査した結果、粉じん爆発は 29 件で全体の約 1/4 を占めていた<sup>1)</sup>。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ろ布式の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が着火源と推定される粉じん爆発災害が発生している<sup>2)</sup>。この時の静電気放電の発生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、貯蔵槽のように内部に静電気放電を検出する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外部から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を用いる方法<sup>3)</sup>、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る方法<sup>4)</sup>が報告されているが、これらの手法を粉体を取り扱う工程において静電気放電を早期に検出し、放電の種類を推定する目的には適用されていない。

本研究においては、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放電の種類を推定することを実験的に検討するために、当研究所が保有する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同時に測定した。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とによって推定できる可能性のあることがわかった。

## 2 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 $\phi$ 1.5m、胴長:2m、容量:15m<sup>3</sup>、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 300 kg 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て貯蔵槽と配管とを循環する。実験条件は、輸送空気温度: 30°C、輸送空気湿度: 30%、粉体供給量: 25kg/min、圧送ブロア風量: 10m<sup>3</sup>/min とした。

空気輸送に伴って帯電したペレットから発生する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ループアンテナ (ETS・Lindgren 7405-901B,  $\phi$ : 60mm, 上限共振周波数: 790MHz) と併せて、貯蔵槽の側面に接続された電圧プローブ (Tektronix P5100, 入力抵抗: 10M $\Omega$ , 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 50 $\Omega$ , 1M $\Omega$  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。なおループアンテナは、貯蔵槽内部の円筒部分の最下部より 100mm 上方の箇所にループ面を水平の向きとして、中央に配置した。

\*1 労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ

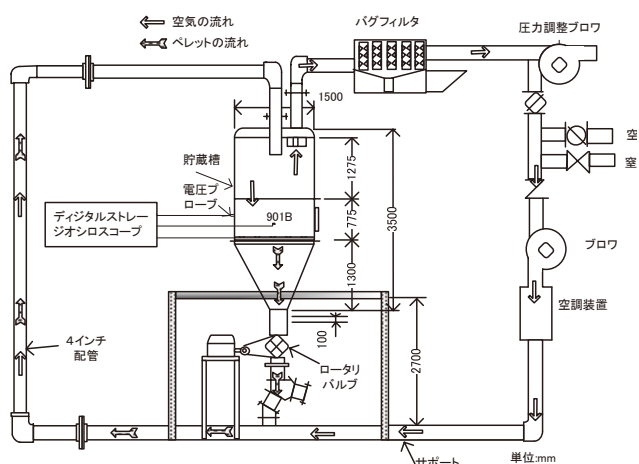
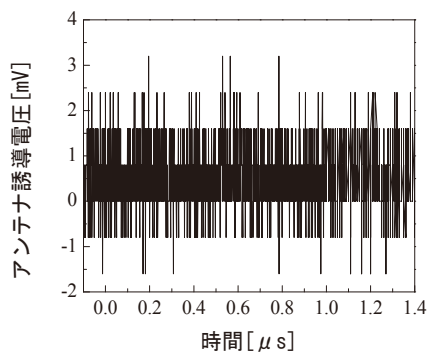


図1 実規模空気輸送実験装置

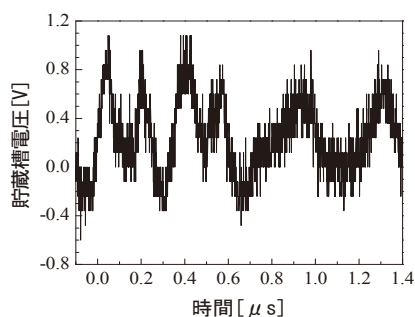
### 3 実験結果と考察

#### 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、「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  $1.8V_{pp}$  測定されたが、図2(a)に示すようにループアンテナでの誘導電圧（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。

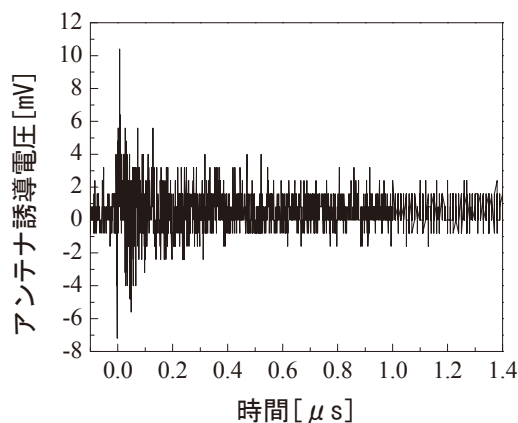


(a) アンテナ誘導電圧

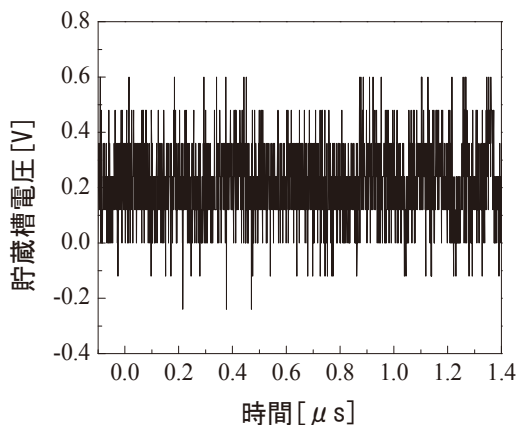


(b) 貯蔵槽電圧

図2 輸送空気循環時の測定電圧波形例



(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

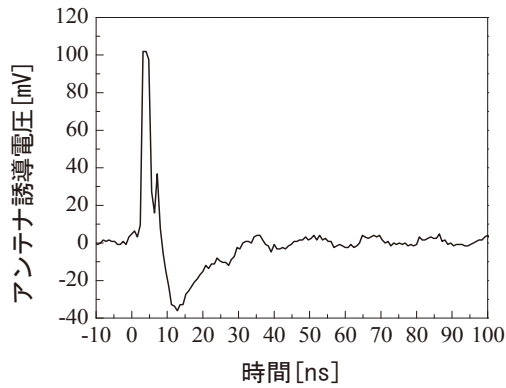
#### 2) ペレットを循環させた場合

輸送空気のみを循環させる運転状態からペレットを循環させる運転状態に切り替え、約 0.4 秒間隔で連続的にアンテナ誘導電圧と貯蔵槽電圧とを同時に 204 回測定した。測定開始から連続的に No.11 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は No.11 より過渡的な振動波形として測定された。このときオシロスコープのサンプリング間隔は 0.8ns、サンプル数は 2,000 とした。

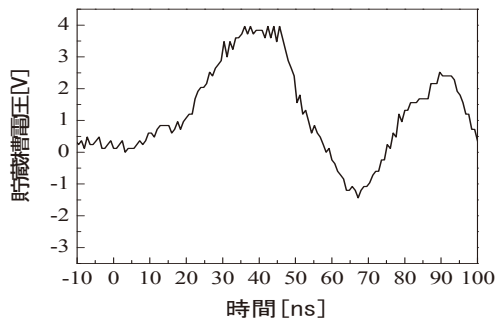
以下、特徴的な測定波形について述べる。図3は No.13 の波形であって、貯蔵槽電圧に変化がない一方で、アンテナ誘導電圧が変動していることから、帯電したペレットの領域における静電気放電と推定される。測定された波形は複雑に変化しており、アナログ信号からデジタル信号への変換に伴うものである。なお、図2(b)に示す伝導性電磁ノイズは連続的に発生しないことから、図3(b)では伝導性電磁ノイズの影響が現れていない。

図4(a)に示すように、No.20 ではピークピーク値で約  $140mV_{pp}$  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 であって、金属からの火花放電による放電電流の持続時間は数十 ns 程度であることから、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た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

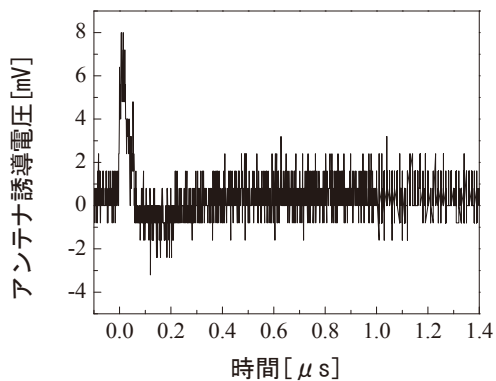


(a) アンテナ誘導電圧

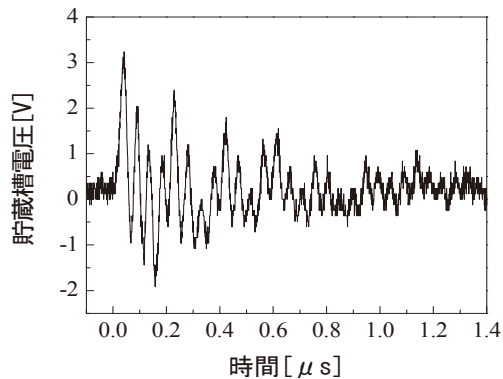


(b) 貯蔵槽電圧

図 4 No.20 の測定電圧波形

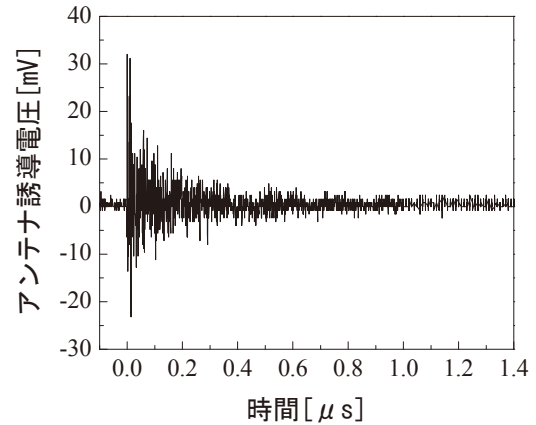


(a) アンテナ誘導電圧

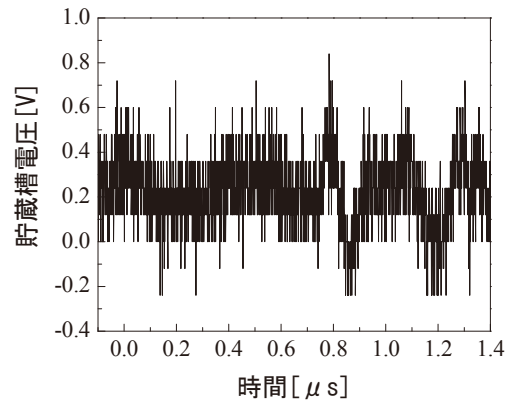


(b) 貯蔵槽電圧

図 5 No.22 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

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  $11\text{mV}_{\text{p-p}}$ 、持続時間約  $0.5\mu\text{s}$  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  $5\text{V}_{\text{p-p}}$ 、持続時間は約  $1\mu\text{s}$  となっている。図 5 は次の理由によって、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。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及び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  $5\text{mm}$  以上の接地体との間での放電と考えられている。①貯蔵槽の内壁の直径は  $1.5\text{m}$  であること、②帯電した絶縁性シートからブラシ放電による放電電流の持続時間が  $0.2\mu\text{s}$  程度<sup>5)</sup>と No.22 のアンテナ誘導電圧の持続時間と同程度であることから、帯電したペレットと貯蔵槽の内壁との間で発生する静電気放電は主にブラシ放電と推定される。

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  $60\text{mV}_{\text{p-p}}$  が測定され、持続時間が  $0.8\mu\text{s}$  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  $1.1\text{V}_{\text{p-p}}$  であって、主に測定系固有のノイズと推定される。図 6 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ず、貯蔵槽電圧の変化が表れにくい。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。また、貯蔵槽で発生する放電はブラシ放電とバルク放電の2種類であって、バルク表面放電の発光現象はブラシ放電に比較して強いことから<sup>6)</sup>、放電電流の大きさもバルク表面放電の方がブラシ放電よりも大きいと考えられる。したがって、放電電流によるアンテナ誘導電圧もバルク表面放電の方がブラシ放電よりも大きくなると考えられ、図5に比較して図6の方がレベルが大きくなっていることも、図6がバルク表面放電と推定される理由である。

No.22, No.33 に示すアンテナ誘導電圧の離散フーリエ変換によって得られた周波数成分の絶対値を振幅スペクトルとして図7に示す。なお、本計算においては、窓

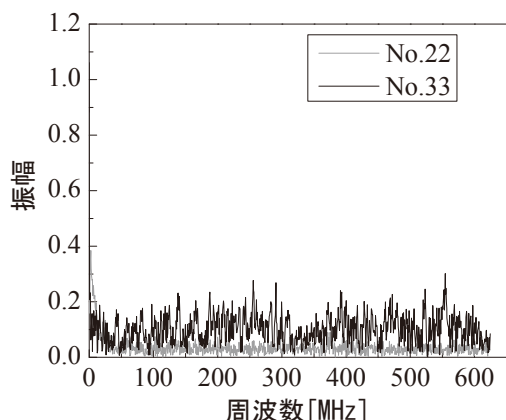


図7 No.22, 33の振幅スペクトル

関数は使用していない。約50MHzよりも高い周波数において、No.33の振幅の方がNo.22の振幅に比較して、レベルが大きくなる。これは図5, 6に示すように、バルク表面放電と推定される放電による誘導電圧である図6(a)の方がブラシ放電の場合の図5(a)に比較して、誘導電圧の過渡的な変化が高速であることに起因している。

### 3) 測定電圧の推移

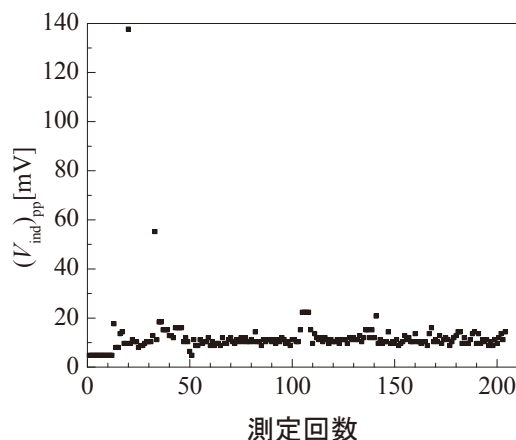
アンテナ誘導電圧のピークピーク値( $V_{ind,pp}$ )と貯蔵槽電圧のピークピーク値( $V_{tank,pp}$ )の推移を図8に示す。 $(V_{ind,pp})$ はペレット循環開始直後であるNo.11からレベルが大きくなり、No.20, No.33ではおのおの約 $140mV_{pp}$ 、 $60mV_{pp}$ が測定されたが、他の測定点では $25mV_{pp}$ 以下であった。

貯蔵槽電圧のピークピーク値( $V_{tank,pp}$ )は、ペレット循環開始直後から50回の測定までの間に $1.5V_{pp}$ 以下の測定値が数回あるが、他の測定値は $3V_{pp}$ を超えるものであった。 $(V_{tank,pp})$ が $3V_{pp}$ を超える場合には、図2に示す伝導性の電磁ノイズによる貯蔵槽電圧の時間的な変動及び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。 $(V_{tank,pp})$ が $1.5V_{pp}$ 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

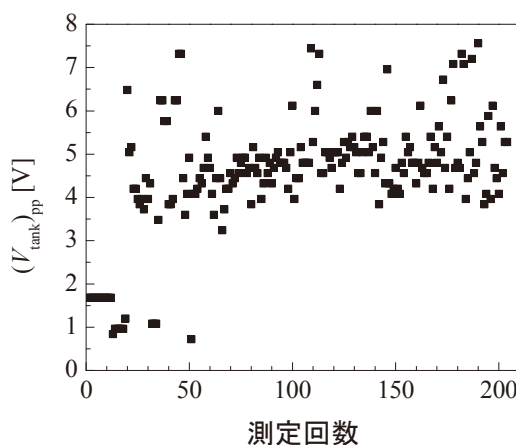
るが、伝導性の電磁ノイズが重畳している可能性もあり、検討中である。

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( $V_{tank,pp}$ )に対するアンテナ誘導電圧のピークピーク値( $V_{ind,pp}$ )の比( $=V_{ind,pp}/(V_{tank,pp})$ )を算出した。結果を図9に $V_{ind-tank}$ 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。 $V_{ind-tank}$ のレベルが大きくなる場合の一つは、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。典型的な放電としては、バルク表面放電が考えられる。

一方、 $V_{ind-tank}$ のほとんどの値は0.004以下であった。ブラシ放電と推定される図5では $V_{ind-tank}$ が0.002である。今回の実験において $V_{ind-tank}$ 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。ただし、0.004を上回るアンテナ誘導電圧の場合でも、本実験においてブラシ放電と推定したアンテナ誘導電圧と類似していたことから、0.004は絶対的な数値ではなく、放電の種類を特定するには直接放電電流を測定するなどより詳細な分析が必要と考えられる。



(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8 アンテナ誘導電圧と貯蔵槽電圧の推移



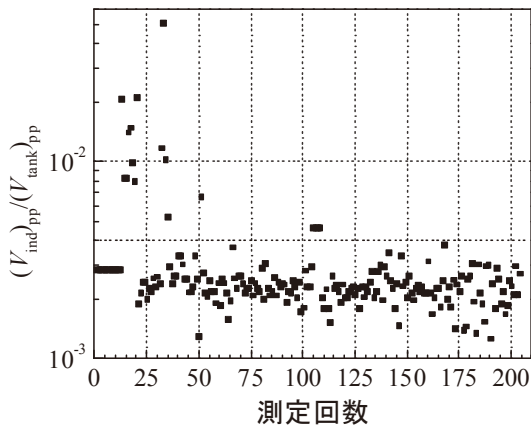


図9  $(V_{\text{tank}})_{\text{pp}}$  に対する  $(V_{\text{ind}})_{\text{pp}}$  の比,  $V_{\text{ind-tank}}$

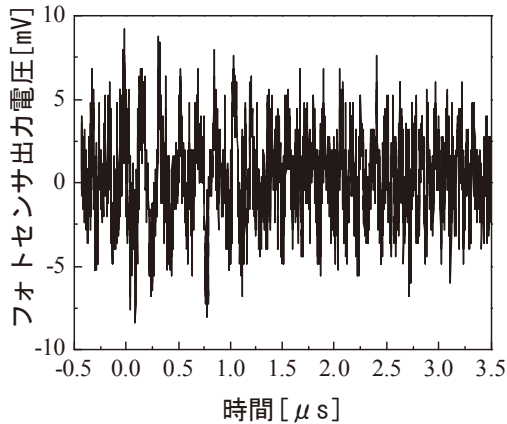


図10 ブラシ放電と推定される放電時のフォトセンサ出力波形

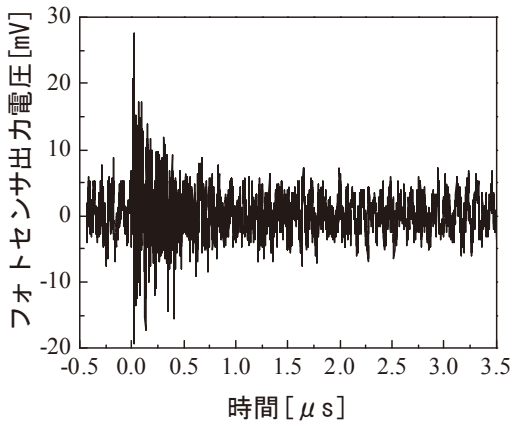


図11 バルク表面放電と推定される放電時のフォトセンサ出力波形

#### 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。

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(アジレント・テクノロジー, 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10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プが受信したタイミングである-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を測定した時のフォトセンサでの出力波形を図11に示す。トリガ起動信号をオシロスコプが受信した0sと同期して約1μs、静電気放電とともに発生する発光に伴うフォトセンサからの出力電圧が測定されている。

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実験装置を用いて、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同時に測定した。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、特に着火性のあるバルク表面放電と推定される放電による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粉体空気輸送中に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不可能であった。ただし、放電から着火に至るのは、確率的な現象であること、バルク表面放電と推定される放電を一度捉えられたときに、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、実験にご協力頂いた春日電機(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](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.
- 5) 大澤敦, 市川紀充. 過渡接地電圧による静電気放電の検出. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, 2013:JNIOOSH-SRR-NO.43.
- 6) 崔光石, 最上智史, 鈴木輝夫. 粉体貯蔵槽での光センサによる静電気放電の検出.労働安全衛生総合研究所特別研究報告, 2013:JNIOOSH-SRR-NO.43.