

## ループアンテナを用いた静電気放電による誘導電圧の測定†

富 田 一\*1

粉体の貯槽, 集じん工程に用いられるサイロやダクト内部では粉体の摩擦等に伴う静電気の発生と帯電によって, 静電気放電を着火源とした粉じん爆発が発生することがあり, その結果労働者の火傷などの死傷災害が発生している. 本研究では, このような静電気放電を着火源とした粉じん爆発災害の対策の一環として, サイロやダクトなどの金属筐体内で発生する静電気放電を, 着火危険性の低い初期の段階で検知するために, ダクトの内部周囲に取り付けられたループアンテナに静電気放電によって誘導される電圧を観測した. その結果, 着火性の低いコロナ放電を誘導電圧から検知できることが確認された. コロナ放電による誘導電圧はレベルが小さいことからループアンテナは 1m 程度の間隔で配置する必要性のあることがわかった.

**キーワード:** 粉じん爆発, 静電気放電, 誘導電圧, ループアンテナ, コロナ放電, 火花放電

## 1 はじめに

粉体の貯槽, 集じん等の粉体取扱工程においては, 静電気の発生が問題となり, 静電気放電に起因した粉じん爆発災害が発生している<sup>1)</sup>. 例えば, 接地不良となった金属などの導体が帯電粉体などからの静電誘導によって電位が高くなり, その導体と接地体との間での静電気放電が着火源となって粉じん爆発が発生している. バグフィルタ用固定バンドに取り付けられた接地線が外れたために接地不良となるケースもみられた.

本研究においては, 静電気放電を着火源とした粉じん爆発災害防止のために, 静電気の発生が問題となるダクトやサイロなど金属筐体内で発生する静電気放電を初期の段階で検知するための基礎的な実験を行った. 具体的には, 金属ダクト内でコロナ放電と火花放電を発生させてループアンテナに誘導する電圧を観測した. その結果, 誘導電圧によって着火性の低いコロナ放電を検知できることが確認された. またコロナ放電による誘導電圧は数 mV のオーダーであることから, アンテナは 1m 程度の間隔で設置することが必要ことがわかった.

集じん機などのダクトを模擬した実験装置を図 1 に示す. 模擬ダクトとしては, ステンレス製のダクト (直径  $\phi$ : 500mm, 厚さ  $t$ : 1.2mm, 長さ 1,000mm) 3 本を直列に接続して, 絶縁シートが敷かれた導電性床の上に設置した. 各ダクトの電気的な接続には粘着剤に導電性を有する銅テープを使用した.

放電は, 図 1 に示すダクトの左端からの距離 ( $d$ ) 50mm, 500mm, 950mm の 3 箇所のダクト内部で発生させた.

一方誘導電圧測定用のループアンテナにはステンレス製のダクトの内周に収まるように  $\phi$ : 約 450mm である

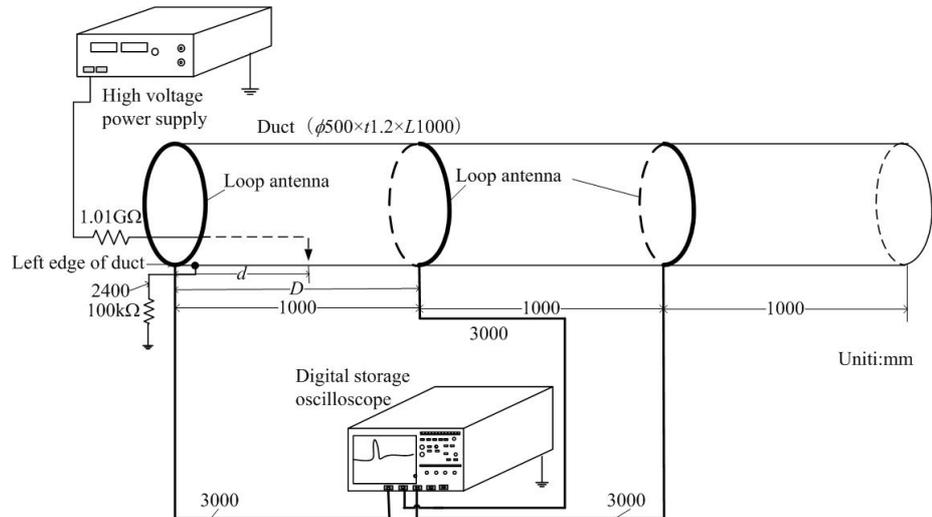


図 1 実験装置

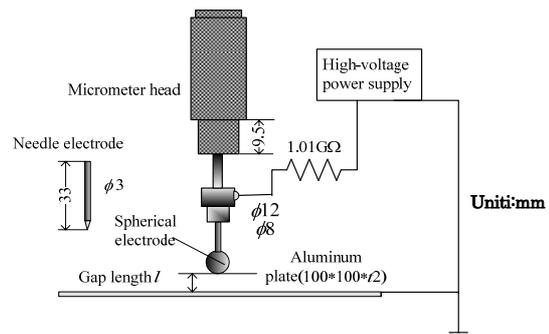


図 2 放電電極と放電回路

## 2 実験

## 1) 誘導電圧の測定方法

† 原稿受付 2011 年 12 月 06 日

† 原稿受理 2012 年 02 月 21 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

セミリジッドケーブル製ループアンテナを用い、ダクトの左端からの距離  $D=0\text{m}$  である左端およびダクトのつなぎ目となる位置である、ダクト左端から  $D=1\text{m}$  及び  $D=2\text{m}$  の位置にダクトの内周に沿うように設置した。アンテナは長さ  $3\text{m}$  の SMA ケーブルを介して、デジタルオシロスコープ (DC-4GHz, サンプル周波数:  $25\text{GHz}$ , 量子化ビット数: 8 ビット) の  $50\Omega$  入力端子に接続されている。セミリジッドケーブルを用いたのは、電界シールドによって電界によるアンテナへの影響が抑制されることによる。そのため帯電物体による静電界の影響を受けることがほとんどない。またループアンテナの銅製の外周は  $10\text{mm}$  程度の部分を除いて接地されていることから、アンテナ自身が放電する物体となる可能性が低いことにある。これらのアンテナの外周と模擬ダクトとの電気的な接続によって、模擬ダクトはアンテナを介して接地されている。

放電のための電極と放電回路を図 2 に示す。模擬帯電物体はマイクロメータヘッドと放電電極とを組み合わせ、放電電極にはコロナ放電発生用の針電極と火花放電発生用の真鍮製球電極 ( $\phi: 9.83\text{mm}$ ) を用いた。対向する接地電極にはアルミニウム製の接地板 ( $t: 2\text{mm}$ ) を用いた。接地板はダクト内の底面に水平となるように設置した。コロナ放電あるいは火花放電を間欠的に発生させるために、直流高電圧電源と放電電極間には  $1.01\text{G}\Omega$  の高耐圧抵抗を直列に挿入した。

## 2) 放電発生条件

本研究では着火危険性が小さい段階での放電の検出を目的としていることから、放電が発生するときの最低の電圧を  $3\text{kV}$  程度とした。針電極でのギャップ長:  $l$  (図 2 参照) を  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$  とし、球電極でのギャップ長  $l$  を  $0.5\text{mm}$ ,  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$  とした。針電極を用いてギャップ長  $l$  を  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$  とした場合には、コロナ開始電圧はおおよそ  $3.1\text{kV}$ ,  $3.8\text{kV}$ ,  $4.2\text{kV}$  となり、球電極を用いてギャップ長  $l$  を  $0.5\text{mm}$ ,  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$  とした場合には、火花電圧はおおよそ  $3.1\text{kV}$ ,  $4.6\text{kV}$ ,  $8.0\text{kV}$  となった。なお、球電極のギャップ長  $l$  が  $0.5\text{mm}$  における静電容量約  $4\text{pF}$  と火花電圧  $3.1\text{kV}$  を用いると静電エネルギーは約  $20\mu\text{J}$  と算出され、可燃性粉体に対しては着火性が無い。

## 3 実験結果と考察

### 1) 誘導電圧測定結果

#### (1) 火花放電の場合

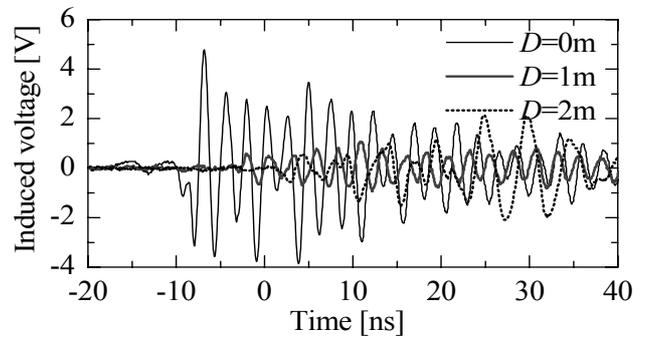
図 3 にはギャップ長  $l=0.5\text{mm}$  における誘導電圧の波形例を示す。同図(a)に示すように、ダクト端からの距離  $d=50\text{mm}$  のダクト内部で球電極による火花放電が発生した場合には、誘導電圧は振動減衰波形となっている。放電発生源とアンテナとの距離が離れるとともに、誘導電圧のピーク値は小さくなっている。これは放電に伴って発生する磁界強度が放電発生源から離れるとともに小さくなることに因っている。また、誘導電圧には磁界の伝搬による時間差が見て取れる。誘導電圧が観測される

順番はアンテナの設置位置が  $D=0\text{m}$  が最初で、ついで  $D=1\text{m}$ ,  $2\text{m}$  の順となっている。

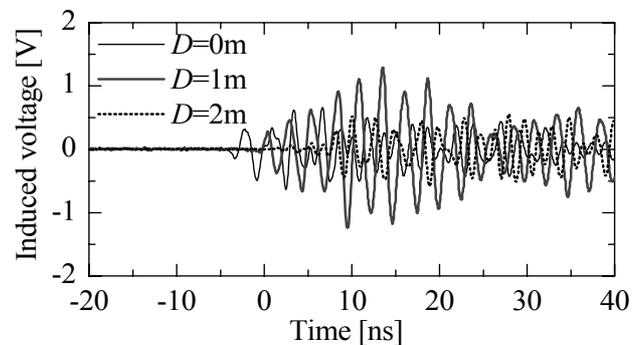
ダクト端からの距離  $d=500\text{mm}$  において火花放電を発生させた場合の誘導電圧波形を図 3(b)に示す。この場合には  $D=1\text{m}$  に設置されたアンテナへの誘導電圧が最もレベルが高くなっている。また  $d=950\text{mm}$  において火花放電を発生させた場合 (図 3(c)) にも、 $d=500\text{mm}$  の場合と同様に、 $D=1\text{m}$  の箇所に設置されたアンテナへの誘導電圧が最もレベルが大きくなっている。

なお図 3 で誘導電圧の時間変化が 0 以外で開始しているが、 $D=1\text{m}$  で検出した誘導電圧をトリガ信号として用いていることに起因している。

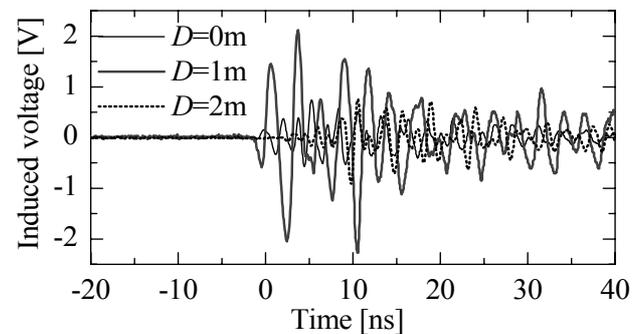
ギャップ長  $l$  を  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$  とした場合も含めて、放電点と誘導電圧のピーク値 ( $v_p$ ) との関係を図 4 に示す。同図は 10 回の放電実験を統計処理したものであり、シ



(a)  $d=50\text{mm}$



(b)  $d=500\text{mm}$



(c)  $d=950\text{mm}$

図 3 火花放電による誘導電圧の波形例  
(ギャップ長  $l=0.5\text{mm}$ )

ンボロは平均値，エラーバーは標準偏差を示している。

ギャップ長が 1mm, 2mm のいずれの場合においても，定性的にはギャップ長が 0.5mm の場合と同様の特性を示している。また，ギャップ長が広がると火花電流の立ち上がり時間が長くなることから<sup>2)</sup>，磁束の時間微分によって得られる誘導電圧のレベルも，ギャップ長が広がると，小さくなっている。

**(2)コロナ放電の場合**

針電極を用いてギャップ長  $l$  を 1mm として  $d=50\text{mm}$  の点でコロナ放電を発生させた場合の誘導電圧の測定例を図 5(a)に示す。火花放電の場合と同様に，放電点からアンテナが離れるとともに，誘導電圧も小さくなっていく。ただし，誘導電圧のレベルは火花放電に比較して，小さいことがわかる。コロナ放電の方が火花放電よりも放電電流の周波数成分が低域に存在することに因る<sup>2)</sup>。

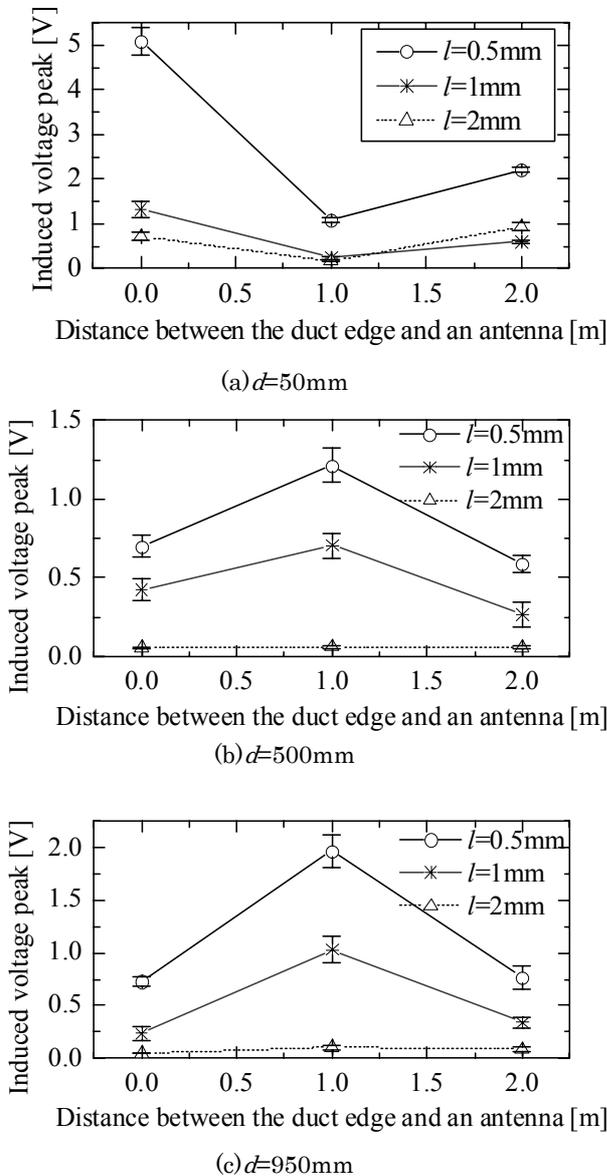


図 4 火花放電による誘導電圧の火花長，放電源からの距離依存性

すなわち誘導電圧はアンテナに鎖交する磁束の時間微分に依存することから，火花放電よりも低帯域の周波数成分を有するコロナ放電は火花放電よりも誘導電圧のレベルが小さくなる。ダクト端からの距離  $d=500\text{mm}$  の箇所でコロナ放電を発生させた場合には，誘導電圧レベルのアンテナの設置位置への依存性が小さいものであった (図 5(b)).  $d=950\text{mm}$  の位置でコロナ放電を発生させた場合にも，誘導電圧のアンテナの位置に対する依存性は小さいものであった (図 5(c)).

各条件で 10 回放電させた場合に放電点と誘導電圧のピーク値との関係を図 6 に示す。同図でシンボロは平均値，エラーバーは標準偏差を示す。火花放電による誘導電圧に比較して，コロナ放電による誘導電圧のレベルは約 1/10 から 1/100 である場合が多く，概略小さいことがわかる。ただし，図 7 に示すとおり， $D=0\text{m}$  での誘導電圧について，ギャップ長が 2mm で  $d$  が 500mm あるいは 950mm の火花放電の場合よりも，ギャップ長が 1mm，

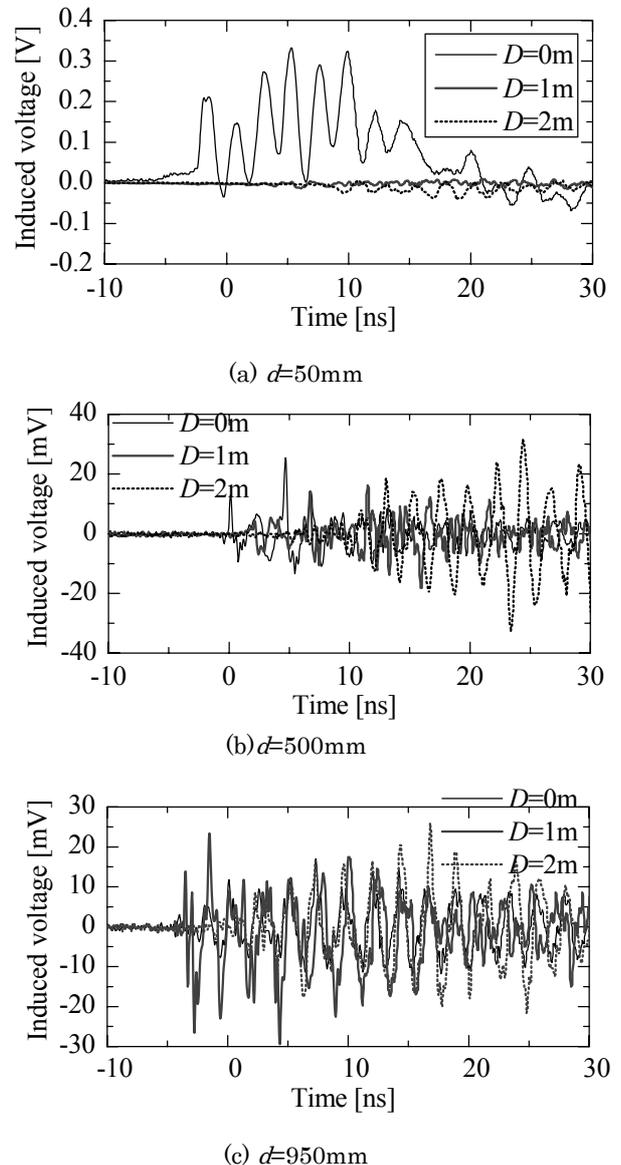


図 5 コロナ放電による誘導電圧の波形例 (ギャップ長  $l=1\text{mm}$ )

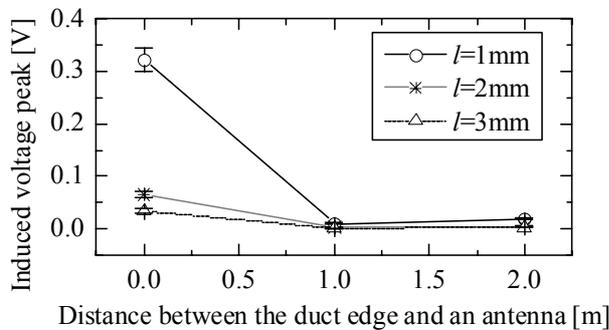
$d=50\text{mm}$  のコロナ放電の場合の方が、誘導電圧ピーク値が大きくなるケースも観測された。

以上のように、コロナ放電あるいは火花放電に伴うループアンテナへの誘導電圧によって、放電の発生を検知できることを確認できた。

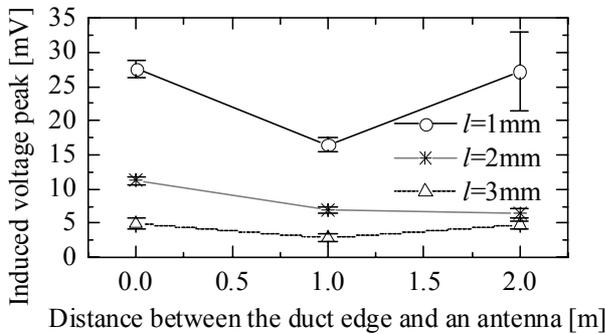
2) 考察

粉体の取り扱い工程では静電気の発生とともに帯電電荷量も増大することから、帯電電位も時間とともに高くなることが予想される。このような場合であれば、静電気発生初期の段階では着火性の低いコロナ放電の出現する可能性が高く、本研究の手法によって着火性の低い放電現象を捉えられると考えられる。

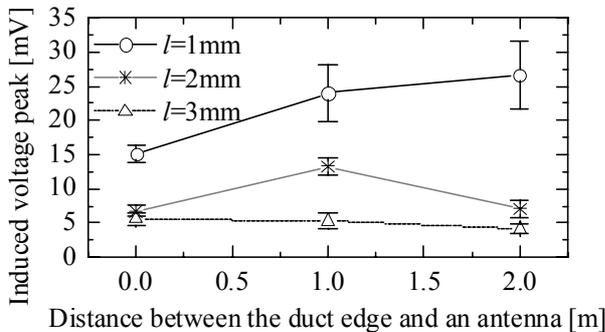
本研究での手法のようにループアンテナを配置する場合には、最も弱い放電による誘導電圧を検知できるようにアンテナを配置することが必要となる。本研究で用い



(a)  $d=50\text{mm}$



(b)  $d=500\text{mm}$



(c)  $d=950\text{mm}$

図6 コロナ放電による誘導電圧のギャップ長、放電源からの距離依存性

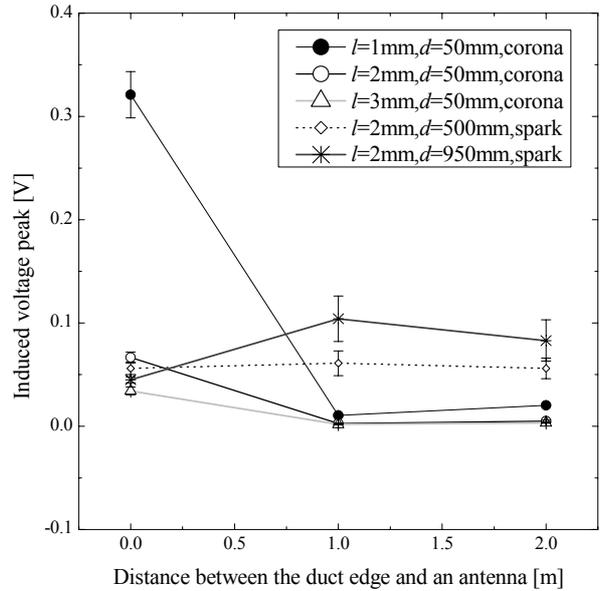


図7 コロナ・火花放電による誘導電圧の比較

た実験装置の場合では、ギャップ長が 3mm におけるコロナ放電による誘導電圧が約 5mV 程度であったこと、及び図 5, 6 から、アンテナは 1m 程度の間隔で配置すればよい。

本研究で用いた口径の大きなループアンテナを放電の検出器として用いる方法は信号の増幅などを必要としないことから比較的安価に放電の有無を検出できる利点がある。アンテナはダクトの内周に沿って配置できることから、内部を流動する粉体などの移動への影響はほとんど無い。また、アンテナの大部分が接地されていることから、アンテナが帯電することや放電源となる可能性は小さい。

放電による磁界がダクト壁面で伝播と反射を繰り返して複雑となることから、得られる誘導電圧のスペクトルは複雑となっており、誘導電圧のスペクトルの分析から放電の種類を区別することは困難と考えられる。放電の種類の評価には先に報告した接地電流の評価<sup>2)</sup>など、他の検出信号を用いた評価との複合した情報による評価が必要と考えられる。

4 まとめ

ダクト内での静電気放電の検出方法として放電時の磁界による誘導電圧を電界シールド型のループアンテナで測定した。誘導電圧によって放電を検知できることを確認した。またコロナ放電を検知するためには、本研究の場合には 1m 程度の間隔でアンテナを配置することが必要であった。

文献

- 1) (社)日本粉体工業技術協会粉じん爆発委員会. 実務者のための粉じん爆発・火災安全対策. 東京: オーム社; 2009: 62-69. .
- 2) 富田一. コロナ放電と火花放電による接地線の電流の比較, 労働安全衛生研究. 2011; 4(2): 79-83.

## Measurement of Induced Voltage in Loop Antenna due to Electrostatic Discharge

by

Hajime TOMITA\*<sup>1</sup>

Dust explosions caused by electrostatic discharge sometimes occur due to static electrification of powder during the pneumatic conveyance of powder and dust collection, and induce accidents to workers, e.g. burn injuries. This paper reports a method for detecting a precursory discharge inside a duct or silo. For the purpose of detection, induced voltages in a loop antenna were measured when electrostatic discharges occurred inside the corresponding metal duct. As a result of the experiment, it was confirmed that a corona discharge could be detected by the voltage induced in the loop antenna. It was also found that the antennas may need to be spaced at about 1 meter intervals in order to detect the corona discharges.

**Key Words:** dust explosion, electrostatic discharge, induced voltage, loop antenna, corona discharge, spark discharge

---

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