

密閉された金属容器内で発生する災害予兆放電の外部検出の研究

市川 紀充*1 大澤 敦*2 富田 一*2

粉体用サイロやダクト内で粉体を空気輸送すると、粉体の帯電が原因で放電が発生し、火災や爆発災害を引き起こすことがある。その火災や爆発災害を防止するには、例えば導電性のサイロやダクト内で発生する災害予兆放電（コロナ放電）を早期に検出し、空気輸送の速度を下げるなどの防止対策を講じることが必要になる。しかし粉体用サイロやダクトの導電性の容器内で発生する放電を、導電性の容器の外部から検出することは難しい。本研究では、導電性の粉体用サイロやダクト内で発生する放電を容器の外部から検出することを目的として、電力プラントで用いられていた外被電極法を用いて、密閉された金属容器内に発生する負コロナ放電の特性を検討した。本実験の結果、ノイズレベルの低い実験室内では、密閉された金属容器内で発生する負コロナ放電を検出でき、金属容器の大きさや容器に接続された接地電線の長さが放電波形に及ぼす影響を検討することが可能になることが明らかになった。本研究の成果は、密閉された金属容器内で発生するコロナ放電の特徴を捉えるための基礎として役立つと思われる。

キーワード: 密閉された金属容器, コロナ放電, 外被電極法, 外部検出, 災害予兆放電。

1 はじめに

静電気放電は、粉体等を着火させ、化学プラントの火災や爆発災害の原因となる。静電気放電が原因で起こる災害は、時として大規模な爆発災害を引き起こす可能性があり、社会からその防止が強く望まれている。

粉体用サイロやダクト内で粉体を空気輸送すると、その粉体が帯電し、帯電した粉体と接地導体間の放電により火災や爆発を引き起こすことがある¹⁾³⁾。粉体用サイロやダクト内で発生する放電を検出するために、容器内に突起のあるアンテナなどを取り付けると、その突起が原因で放電が発生しやすくなる。またアンテナを取り付けるために容器に穴を空けてしまうと、容器内の電磁界環境を乱してしまう可能性がある。したがって、粉体用サイロやダクトの容器内で発生する放電を検出するために、容器内に突起のあるアンテナを取り付けることは望ましくない。

導電性の容器内で発生する放電を、その容器の外部から検出することは難しい。その理由として、次のことが挙げられる。一般に火災や爆発の予兆放電とされるコロナ放電は、数十 μ A～数百 μ A程度の放電電流であり、外部のノイズレベルと比べてそれほど大きな電気信号ではない。コロナ放電の電気信号は、スイッチング電源などから発生するノイズ信号と似た信号になることがあり、その判別が簡単ではない。導電性の容器内で発生するコロナ放電による電磁波は、容器の外部にはほとんど生じない。このようにコロナ放電による電気信号を正確に捉えるには、コロナ放電の特徴を明らかにする必要がある。

コロナ放電の特徴から火災や爆発の原因になる火花放電が発生するかどうかを判断するには、コロナ放電の発生から火花放電が発生するまでの放電特性を明らかにする必要がある。本研究では、密閉された金属容器内で発

生する負コロナ放電の放電特性を、外被電極法を用いた外部検出により明らかにすることを目的として、銅製の円筒形の金属容器内に棒対平板電極を配置し、放電特性の実験的検討を行った。外被電極法⁴⁾⁶⁾とは、GIS（ガス絶縁開閉器）内で発生する部分放電による金属タンクの電位上昇を、絶縁シートと電極からなる外被電極を用いて検出する方法として電力分野で用いられていた方法である。本研究の結果、ノイズレベルの低い実験室内では、密閉された金属容器内で発生する負コロナ放電を検出でき、金属容器の大きさや容器に接続された接地電線の長さが放電波形に及ぼす影響を明らかにできた。本研究の成果は、密閉された金属容器内で発生するコロナ放電の放電特性を検討するために役立つと思われる。

2 実験装置および方法

粉体用サイロやダクト内の密閉された金属容器内で発生する放電を模擬するために、図1の実験装置を用いて実験を行った。

図1は、実験装置の配置を表している。金属容器内で放電を発生させるため、銅製の金属容器内に鋼鉄製の棒電極（直径6 mm ϕ , *j）を配置した。その棒電極は、直流高電圧電源（スペルマン社製、UHR30N30/100）に接続した。接地された金属容器を模擬するために、金属容器を絶縁電線（*e）と抵抗器（1 Ω ）を用いて銅板（*h）に接続した。その銅板は、抵抗器（1 Ω ）と銅箔テープ（*n）を用いて実験室の接地端子に接続した。

金属容器内で発生する放電を外部から検出するために、塩ビシート（*l）と銅板（*m）からなる外被電極を、金属容器の裏面に図のように貼り付けた。外被電極を50 Ω の抵抗器を直列接続した検出器に絶縁電線で接続した。検出器は、銅板（*h）に絶縁電線で接続した。

実験は、次の手順で行った。棒電極に負極性の電圧を印加する。本電極配置では、棒対平板電極間のギャップ長が12 mmに設定してあり、放電開始電圧の-13 kVで負コロナ放電が発生し始め、-19.6 kVを超えると火花放

*1 工学院大学工学部電気システム工学科電気安全研究室。

*2 労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ

電が発生する。負コロナ放電は、放電開始電圧から火花電圧まで連続して発生する。本研究では、災害予兆放電の負コロナ放電の発生する条件で実験を行った。

実験は、温度 14℃～16℃、相対湿度 36%～43%の環境で行った。

3 実験結果および考察

図 2(i)は、棒対平板電極間に-13.5 kV を印加したとき、外被電極法で得られた負コロナ放電を表している。同図(ii)は、-19.6 kV の電圧を印加したときに得られた負コロナ放電を表している。この図から、印加電圧の増加に伴って、負コロナ放電で生じるパルスの発生頻度が高くなっていることがわかる。この特徴は、一般に知られている負コロナ放電の特徴⁷⁾⁹⁾を表している。

図 3は、棒対平板電極間に-19.6 kV を印加したときに、各導体を流れる電流をそれぞれ表している。金属容器と銅板(*h)間に接続した絶縁電線の長さは、1 m とした。図中の i_1 は金属容器と銅板(*h)に接続した絶縁電線を流れる電流、 i_2 は外被電極法の外被電極と検出器を流れる電流、 i_3 は銅板と接地端子間に接続した銅テープを流れる電流をそれぞれ表している。いずれの電流も減衰振動波形になっていることがわかる。電流 i_1 が最も大きく、正の最大値は 60 mA で、負の最大値は-58 mA となる。それらの最大値を規格化して、電流 i_2 と i_3 と比較すると、表 1 が得られる。

表 1 は、負コロナ放電が発生したときに各導体を流れる電流の最大値と、電流 i_1 を規格化したときの各電流の最大値を割合で表している。その表から、外被電極法で

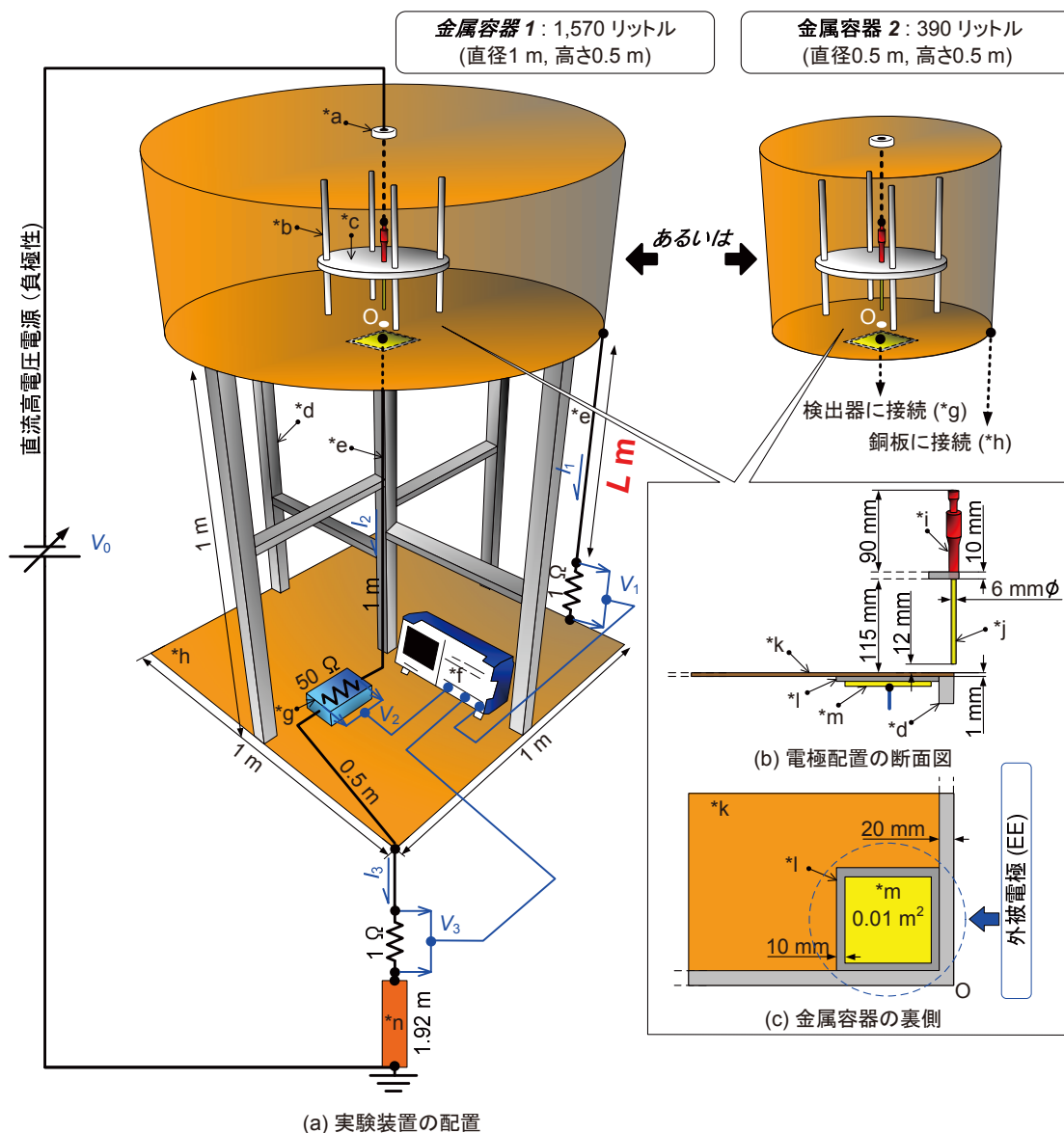


図 1 実験装置の配置。*a はアクリル樹脂製 (PMMA) のプッシング, *b: ポリカーボネート棒, *c: アクリル板, *d: アクリル柱, *e: 絶縁電線 (12-1389, JIS 374084, 極東電線社製), *f: 絶縁型オシロスコープ (TPS2024, テクトロニクス社製), *g: 検出器 (50 Ω), *h: 銅板, *i: マイクロメータヘッド (シグマ光機), *j: 鋼鉄製棒電極, *k: 金属容器の底部, *l: 塩ビシート, *m: 銅板, *n: 銅箔テープ。

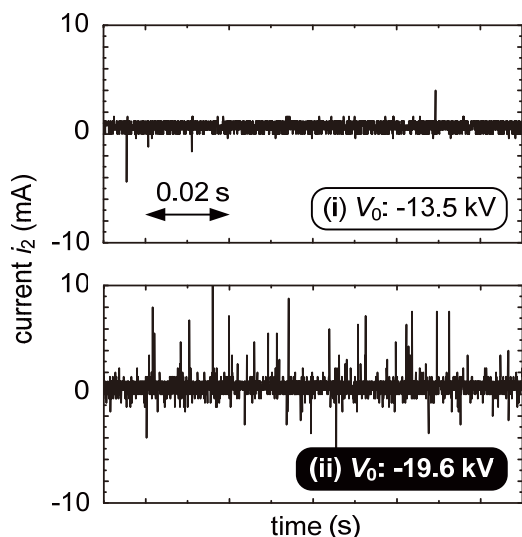


図2 外被電極法で検出した負コロナ放電

得られる電流 i_2 は、電流 i_1 の 12%~18% の大きさになることがわかる。一方で、電流 i_3 は i_1 の 31%~33% の大きさになる。電流 i_3 が i_1 よりも小さくなる理由として、電流の反射による影響と考えられる。電流 i_3 が i_1 よりも小さくなる理由として、銅板 (*h) の対地静電容量を流れる電流による影響も考えられるが、関連研究として対地静電容量を変えて実験を行ったが、その影響はほとんど見られなかった。

図4は、金属容器と銅板間の絶縁電線の長さを7mに

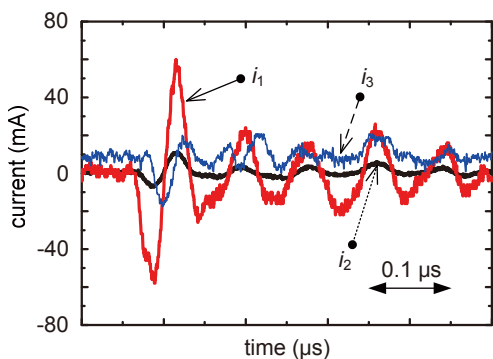


図3 各導体を流れる電流(電線 L の長さ: 1 m). i_1 : 金属容器と銅板(*h)間の絶縁電線を流れる電流, i_2 : 外被電極法(外被電極と検出器を流れる電流)で得られる電流, i_3 : 銅板(*h)と接地端子間の銅テープを流れる電流。

表1 電流 i_1 の最大値と各電流 i_2 と i_3 の比較

電流	最大値 (mA)	
	負極性	正極性
i_1	-58 (100%)	60 (100%)
i_2	-7 (12%)	11 (18%)
i_3	-18 (31%)	20 (33%)

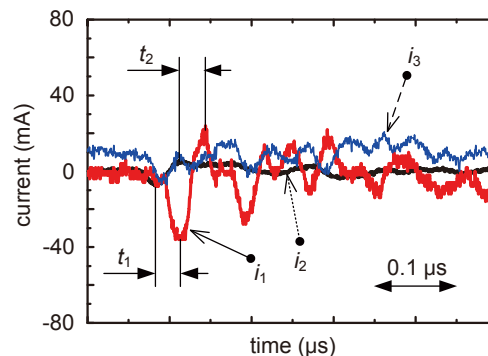


図4 各導体を流れる電流(電線 L の長さ: 7 m).

表2 電流 i_1 の最大値と各電流 i_2 と i_3 の比較

電流	最大値 (mA)	
	負極性	正極性
i_1	-36 (100%)	24 (100%)
i_2	-8 (22%)	6 (25%)
i_3	-7 (19%)	17 (71%)

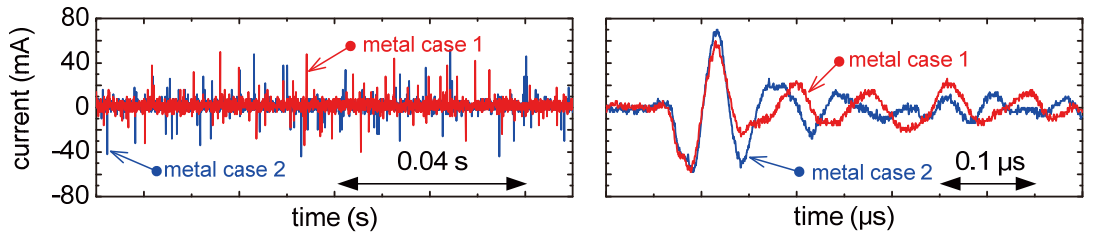
し、棒対平板電極間に 19.6 kV を印加して負コロナ放電が発生したとき、各導体を流れる電流をそれぞれ表している。図中の各電流 $i_1 \sim i_3$ は、図3と同じ電線を流れる電流を表している。この図から、電線 L を長くすることにより、 i_1 の正の最大値が図3の電流よりも小さくなることがわかる。電流 i_1 を規格化して、各電流 i_2 と i_3 を比較すると、 i_2 は 22%~25%、 i_3 は 19%~71% の大きさになる。その割合と大きさを、表2にまとめた。図4から、電流 i_1 の最大値は、 i_2 の最大値よりも遅れていることがわかる。電流 i_1 と i_2 の最大値間の時間差を比較すると、表3が得られる。式(1)の位相速度の式から、電流パルスの移動距離 l m を求めると、約 8.4 m となる。したがって、電流 i_1 の正と負の最大値が、 i_2 の最大値よりも遅れる理由は、金属容器と銅板間に接続した電線の長さを 7 m にしたため、電流パルスの到達時間差が生じたためと説明できる。

$$l = v_p t = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \frac{(t_1 + t_2)}{2} \quad (1)$$

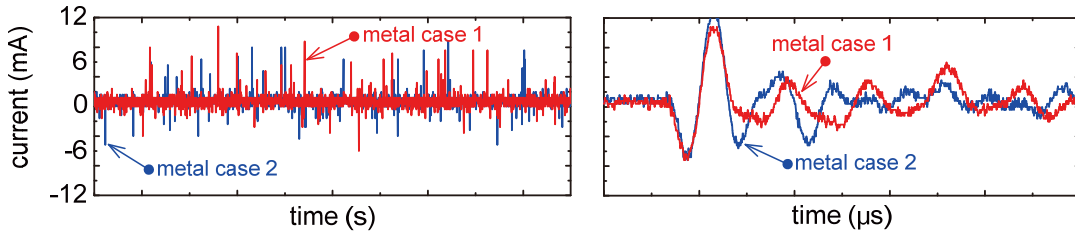
ここで、 v_p は電流の位相速度 (m/s)、 t_1 は負極性の最大値間の時間差 (s)、 t_2 は正極性の最大値間の時間差 (s)、 ϵ_0 は真空中の誘電率 (8.855×10^{-12} F/m)、 μ_0 は真空中の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) である。

表3 図3の電流 i_1 と i_2 の最大値間の時間差

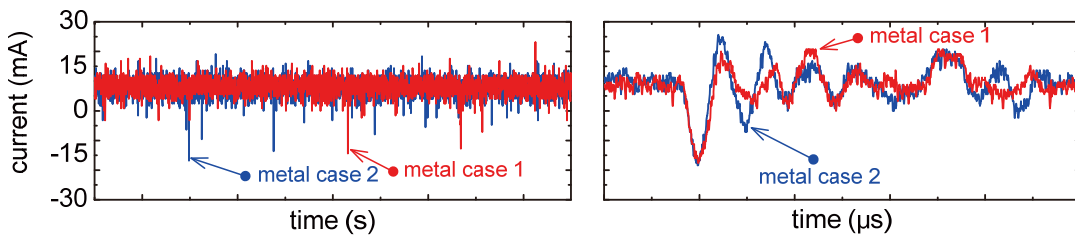
電線 L の長さ (m)	時間差 (ns)	
	負の最大値間 t_1	正の最大値間 t_2
7	25	31



(a) 電流 i_1 (金属容器と銅板間の電線を通る電流)



(b) 電流 i_2 (外被電極法による外被電極と検出器を通る電流)



(c) 電流 i_3 (銅板と実験室の接地端子間を通る電流)

図5 金属容器の大きさを変えたときに各導体を通る電流. 棒対平板電極間の電圧は 19.6 kV, 電線 L の長さは 1 m.

図5は、金属容器の大きさを変えたときに各導体を通る電流を測定した結果を表している。金属容器の大きさを 1570 l (金属容器1) あるいは 390 l (金属容器2) とし、それ以外の実験条件はすべて同じ条件とした。図中の(a)~(c)の結果からわかる通り、減衰振動波形は金属容器の大きさを変えてもほとんど変わらないことが明らかになった。その理由は、金属容器の大きさを変えても、針対平板電極間の静電容量がほとんど変わらないためと考えられる。図中の左側に負コロナ放電で発生するパルス列を表しているが、それらの図では最大値の異なるパルス列が複数発生している。これは、実験に使用した絶縁型オシロスコープの表示に問題があるため、それぞれのパルス列の大きさが異なるように見えるだけである。実際のパルス列は、それぞれほぼ同じ大きさのパルス列が発生していることを確認した。このように負コロナ放電の特性は、金属容器の大きさにほとんど無関係であることがわかる。

金属容器と銅板間の絶縁電線の長さ、金属容器の大きさが測定波形に及ぼす影響を検討するため、実験装置を図6の電気回路モデルを用いて、以下の通りに説明する。

図6は、図1の実験装置の電気回路モデルを表している。図中の(a)は金属容器内の棒対平板電極(放電ギャップ付き)、(b)は外被電極、(c1)~(c3)は絶縁電線をそれぞれ表している。電圧 V_1 から V_3 は、図1の各絶縁電線に直列接続した抵抗に電流 $i_1 \sim i_3$ が流れたときに生じる電圧を表している。また金属容器と銅板間に接続した絶縁電線と抵抗 R_5 (1 Ω) までをインピーダンス Z_1 、外被電極から検出器 (R_4 : 50 Ω) までを Z_2 、銅板と接地端子間に接続した抵抗 R_6 (1 Ω) と銅箔テープを Z_3 とした。図6の電気回路モデルから、電流 i_1 と i_2 の関係は式(2)で表せる。

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_2 + R_4 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1}\right)}{R_1 + R_5 + j\omega L_1} \quad (2)$$

表1の電流 i_1 と i_2 の最大値間の大きさの比 (i_1/i_2) は約 6.6 に対して、表2のその最大値間の比は約 4.3 になる。その比 (i_1/i_2) が小さくなった理由は、次のように説明できる。絶縁電線の長さを 1 m から 7 m に替えたとき、 Z_2 の R_2 と L_2 の大きさが 7 倍になったと考え、式(2)からその比は小さくなるといえる。本実験で観測された電圧(電流)波形の固有周波数は約 12 MHz であり、

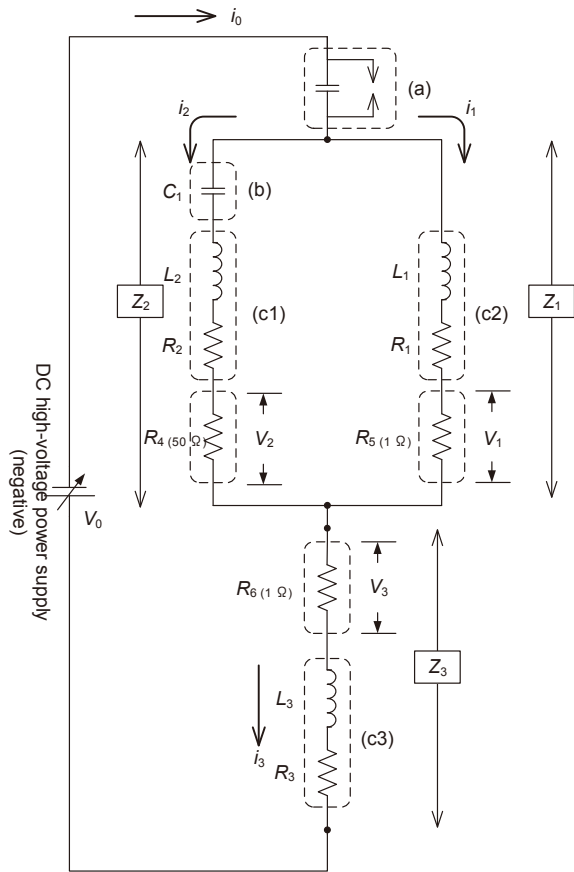


図6 実験装置の電気回路モデル.

波長は 25 m になる。本実験装置は、その波長よりも短いため、図 6 の集中回路モデルで電流の比を検討した。

また表 1 と表 2 の電流 i_3 の最大値間の大きさが i_1 よりも小さくなった理由は、次のように説明できる。本実験装置では、図 1 中の銅板 (*h) を配置し、その銅板に絶縁電線を接続している。したがって、絶縁電線を銅板に接続することで特性インピーダンスが変わり、電流の反射が発生したため、電流 i_1 が i_3 よりも小さくなったと考えられる。

4 まとめ

本研究では、粉体用サイロやダクト内で発生する静電気放電が原因で起こる火災や爆発災害を防止することを目的として、密閉された金属容器内で発生するコロナ放電（災害予兆放電）を外被電極法を用いて検出を行い、負コロナ放電の特徴を検討した。本研究で得られた成果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 本実験環境では、外被電極法を用いて負コロナ放電を検出することが可能になる。
- (2) 金属筐体と接地導体に接続する導体の長さを長くすると、その電線を通る負コロナ放電は外被電極法で得られる電流よりも遅れる。
- (3) 負コロナ放電により発生する電流は、金属容器の大きさにはほとんど依存しない。

実際に発生する負コロナ放電の電気信号は、スイッチング電源から発生するノイズと似たパルス波形になるため、電流値のピークだけでなく周波数特性も考慮する必要があると考えられる。外被電極法をサイロ等へ適用する際は、その装置で発生する放電電流の固有周波数を求め、その周波数帯に絞ってスペクトルの検出を行うことで、放電電流のスペクトルの有無を判別できる可能性がある。静電気放電は金属容器内の空間で消滅することもあるため、本研究成果の実用化にはそのような静電気放電の検出についても検討する必要がある。今後は、金属容器内で消滅する静電気放電の検討を行い、実用化の可能性を検証したい。本研究で得られた成果は、密閉された金属容器内で発生する放電を外部から検出するための基礎として役立つと思われる。

文 献

- 1) 富田一. 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. 労働安全衛生研究. 2012; 5: 17-21.
- 2) Atsushi Ohsawa, Norimitsu Ichikawa. ESD detection by transient earth voltage. Journal of Physics: Conference Series, 2013; 418: 012054 (6pp).
- 3) 富田一. 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. 労働安全衛生研究. 2013; 6: 15-20.
- 4) Gary L. Ford, Steven A. Boggs, Frank Y. Chu. Transient ground rise in SF6 substations investigated. *Transmission and Distribution*, 1979; 46-48.
- 5) Gary L. Ford, Steven A. Boggs. Transient high voltages on the grounded enclosures of gas-insulated transmission equipment. *Second International Symposium on Gaseous Dielectrics*, 1980; 349-357.
- 6) Sueo Kusumoto, Shunichi Itoh, et al. Diagnostic technique of gap insulated substation by partial discharge detection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980; PAS-99: 1456-1465.
- 7) Norimitsu Ichikawa, Katsuo Okumura, et al. Characteristics of negative corona discharge using CWT with and without airflow. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005; 12: 34-40.
- 8) Norimitsu Ichikawa. Diagnostic technique for electrical installation using external electrode method: relationship between size of metal case and detected signal. *2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2007; 711-714.
- 9) Norimitsu Ichikawa. Study on detection of negative corona discharge generated in rod-plane air gap by using external electrode method. *Plasma Science and Technology*, 2007; 9: 687-689.