小型接地確認装置の開発に向けた基礎特性と着火性放電抑制の特性†

崔 光 石[*1] 長 田 裕 生[*2] 鈴 木 輝 夫[*2]

本報は，静電容量による電荷分割方式を基に開発した小型接地確認装置の接地検出と着火性放電抑制性能の定量的評価を行ったものである．小型接地確認装置を使って測定対象の導体の静電容量などを変えた場合の接地検出特性を評価した．また，本装置の先端にある抵抗結合型接触電極を使って着火性放電の抑制性能を検討した．主な実験結果より，今回の測定対象の導体の静電容量が 11-1270 pF の範囲で接地の場合は 0 V，非接地の場合は測定対象の導体の静電容量によって分割された電圧の値となり，接地検出が可能であることが明らかとなった．また，接触電極に接続される抵抗が 50 MΩ 以上であれば着火性放電が抑制された．

キーワード: 静電気，接地確認装置，接地，火災，爆発

1. はじめに

静電気に起因した事故は 1992 年から 2020 年まで年間約 100 件発生している[1)]．その原因のうち 7 割以上は人体を含む接地不良の導体から発生する火花放電によると報告されている[2)]．例えば，金属製容器に粉体を投入する作業中に火災が発生した．原因は接地不良の金属製容器が帯電し，周りの接地導体に向かって火花放電が発生したと推定される[3)]．

他にも接地及びボンディングが施されていないことで発生する火花放電によって可燃性物質が着火する事故が少なくない．また，接地対策された導体の中には，対策の管理が不十分で，接地線の接続不良や断線，あるいは人為的ミスなどによって接地されていない場合がある．

これらのことを防止するためには，予め導体が接地されていることを確認する必要がある．接地を確認する一般的な方法としては，市販のテスターを用いた測定対象の導体と接地間の導通の判断がある．他にも，大型クリップを用いて常時接地を確認する装置があり，主な用途はドラム缶などに接続することである．これによって，絶縁性の高い粉体または液体などの投入作業をしている間に常時接地された状態かどうかを確認することができる[4)]．しかし，上記の方法で接地の確認を行う前に，何らかの理由で接地不良の導体が帯電した状態で大型クリップを接触すると，火花放電などの着火性静電気放電が発生する可能性がある．

そこで本報では，小型で簡単かつ安全に接地の確認ができる小型接地確認装置を開発し，その接地検出と着火性放電抑制の性能を調べた結果について報告をする．なお，本報の一部は安全工学会誌[5)]に掲載済みである．

2. 小型接地確認装置

小型接地確認装置は，測定対象物が接地または非接地の状態かを判定するものであり，内部の構造を図 1 に示す．小型接地確認装置の接地検出原理について，図 1 を用いて説明する．まず，接地確認装置を接地した状態でスイッチ S を閉じて測定用コンデンサ C_c [pF]（実測値：1270 pF）に電源電圧 V_a [V]を印加した後，スイッチ Sを開いて，C_cに電荷量 Q_c [pC]（= $C_c \times V_a$）を充電し，保持された状態にする．ただし，コンデンサ C_cは，漏洩抵抗が高いポリプロピレンフィルムコンデンサを用いる．この状態で接地確認装置の接触電極が測定対象の導体に接触すると，検出電極 A とスプリングは接地電極と接触しているため，測定対象の導体が接地されたことになる．これによって，もし測定対象の導体が帯電していたとしても，導体の帯電電荷は測定器の抵抗結合型接触電極に流れ込み高抵抗 R_c（= 100 MΩ）を介して接地に安全に逃がすことができる．小型接地確認装置をさらに導体に押し付けると，スプリングが縮んで接触電極が内部に押し込まれる．その結果，検出電極 A が接地電極から離れて検出電極 B に接触し，Q_cが接触電極を通じて帯電していない測定対象の導体に流れ込む。

測定対象の導体が接地されている場合，Q_cはすべて測定対象の導体を通じて接地に流れるので 0 nC となる．測定対象の導体が非接地である場合は，測定対象の導体の静電容量 C_x [pF]と C_cによって Q_cは分割されるため，C_xと C_cは並列接続となる．この時の C_cの電圧 V_c [V]は並列合成容量（C_x + C_c）で電荷量 Q_cを除した値となって安定する．V_cは高入力インピーダンスの電圧計で測定される．V_cの測定が終了して導体から接触電極を分離する時，検出電極 A は検出電極 B から分離されて再び接地電極を通じて接地されるので，測定対象の導体も接地される．故に，測定対象の導体を帯電したままの状態にすることはない．

さらに，本装置では，接地不良の帯電した導体に接触した時に発生する火花放電を抑制して可燃性雰囲気で着火することを防ぐために，浮遊容量を 1.7 pF（実測値）と小さくした接触電極（SUS，直径：1.7 mm，長さ：40 mm，先端の形状： 針）に放電電流制限抵抗（R_c：100 MΩ）を挿入した．次に，この抵抗結合型接触電極

---

† 本報の一部は，安全工学，第 60 巻 4 号，pp.183-190，2021 の記述の一部を加筆修正し，まとめ直したものである．

*1 労働安全衛生総合研究所電気安全研究グループ

*2 春日電機株式会社

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6
労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ 崔光石
E-mail: choiks@s.jniosh.johas.go.jp

This document is provided by JAXA.

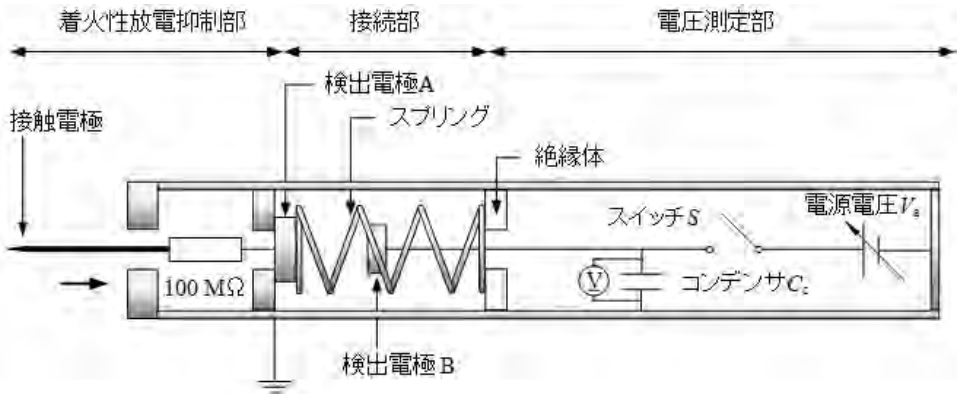


図 1　小型接地確認装置の構造

の着火性放電の抑制メカニズムについて説明する．接触電極が帯電した導体に接触するまでに，接触電極で静電気放電が発生すると，放電電荷によって接触電極が帯電した導体とほぼ同じ電位まで充電されて，放電が一旦停止する．次に，接触電極に充電された電荷は，高抵抗の 100 MΩ を通って接地に流れる．これにより接触電極の電圧が下がり，帯電導体と接触電極間の電位差が放電開始電圧より大きくなると，再び静電気放電が発生し，接触電極が充電されて上記のように放電が停止することになる．これを接触電極が測定対象の帯電導体に接触するまで繰り返し発生する．通常は，帯電した導体と接地された導体間で発生する放電は着火能力が高い火花放電である．しかし，浮遊容量が小さい接触電極と高抵抗を組み合わせることで，接触電極に充電される電荷量が小さくなり，一回の静電気放電の放電電荷量も小さく制限される．その小さな放電電荷量をもつ放電は，接触電極の浮遊容量と高抵抗との積による緩和時間で繰り返し発生することになる．故に，放電電荷量の大きな火花放電が多数の小さい放電電荷量をもつ放電に分割されることになる．したがって，帯電した測定対象の導体と抵抗結合型接触電極の接触過程で発生する静電気放電では，可燃性ガス・蒸気の雰囲気に着火しにくくなり，可燃性雰囲気が形成されている環境でも安全に接地確認ができるようにした．

3. 実験装置と方法

小型接地確認装置の開発にあたって，図 2 に示した I 型を製作した．図 2 は電荷分割方式での接地検出原理を確認するために図 1 に示した構造の基礎的な回路のみとした．図 3 は，V_c の測定値を見るために作製した II 型である．また，小型接地確認装置が受ける静電気放電は回路以外に接触電極が考えられる．そこで，接触電極の先端を用いて，帯電物体から発生する静電気放電による可燃性ガス着火の有無を検討した．

3.1）接地検出の原理の検証

実験は，図 2 の装置を用いて C_x の測定対象の導体が接地または非接地の場合の V_c の時間変化を測定し，接地検出原理について検討した．実験では，小型接地確認装置 I 型，測定対象の導体（直径: 430 mm，高さ: 460 mm，図 4 参照），直流電源装置（Model 7335, Kikusui Electronics），エレクトロメータ（Model 6514, Keithley），

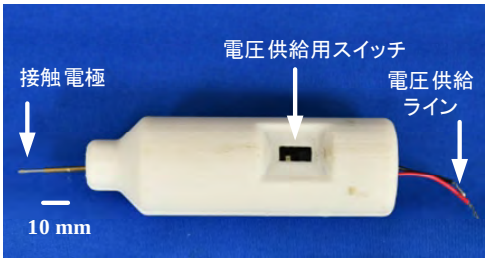


図 2　小型接地確認装置 I 型

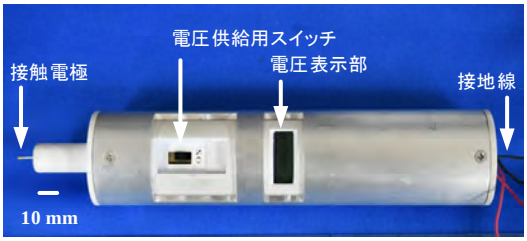


図 3　小型接地確認装置 II 型



図 4　測定対象の導体

This document is provided by JAXA.

データロガ（Midi LOGGER GL240）などを使用した．V_a = 5.0 V の下，C_x が 74 pF（実測値）の測定対象の導体に接触した時の V_c の変化を，接地または非接地の場合についてエレクトロメータで計測し，その時間変化をデータロガに記録した．

3.2）測定対象物体の静電容量による接地検出への影響

産業現場において測定対象の導体の静電容量の範囲は大きさと形状によって異なるものの，1-1000 pF であることが知られている[6]．そこで今回は，測定対象の導体の代わりに C_x の異なる複数のポリプロピレンフィルムコンデンサを用いた V_c の時間変化を計測した．今回使用したコンデンサの静電容量 C_x は 11, 34, 149, 510, 1270 pF（実測値）の 5 種類である．

3.3）測定対象物の漏洩抵抗の影響

実際の産業現場では，様々な抵抗を持つ測定対象物が存在する．そこで，今回使用した小型接地確認装置がこれらの物体に対してどの程度の抵抗まで接地確認ができるのかを検討した．方法は，漏洩抵抗が大きい測定対象物を模擬して，C_x が 74 pF の測定対象の導体に抵抗（R_m = 1, 10, 100, 1000 MΩ）を接続し，3.1 と同様に V_c の時間変化を計測し，得られた結果から緩和時間 τ_m [s]を求めて，計算によって求めた緩和時間 τ_c [s]との比較を行った．

3.4）測定用コンデンサの V_a による接地検出特性

小型接地確認装置の防爆化を検討するためには V_a を低く抑える必要がある．そこで，図 3 の小型接地確認装置 II 型を用いて V_a = 1.5, 3.0 V の低電圧を測定用コンデンサ C_c に印加して，3.2 で使用した異なる C_x のコンデンサに対する V_c を測定した．

3.5）抵抗結合型接触電極の着火性放電抑制性能

小型接地確認装置の抵抗結合型接触電極の着火性放電抑制性能を定量的に調べるために，プロパン—空気混合ガス（濃度：5.25 vol%，MIE = 0.25 mJ[7]）中で，帯電した導体からの火花放電のエネルギーおよび接触電極の抵抗を変えて着火試験を行った．着火実験装置の概要を図 5 に示す．この実験装置は，電極間距離 d が 4.0 mm の針状の放電電極（高電圧電極，抵抗結合型接触電極）と爆発放散口を有した内容積 1.90 L の円筒形の金属製爆発容器，任意の放電エネルギーの静電気放電を発生する静電気放電発生装置（MIES-10 型，環境衛生研究所製）から構成されている．この他，爆発容器の真空度を確認するための真空計（AP-31K，KEYENCE），プロパン—空気の混合ガス濃度を測定するためのガス濃度計（FI-8000，理研計器）などを用いた．金属製爆発容器の前面には，着火の有無を確認するための覗き窓（直径 50 mm）が設置されている．

実験方法は，爆発容器内を真空に引き，プロパンガスを真空計で所定の圧力まで挿入した後，空気を大気圧までに注入して混合ガスを形成させる．爆発容器にガス濃度計を接続して，プロパン—空気混合ガスの濃度が 5.0 ± 0.5 vol%になっていることを確認する．混合ガスの濃度が所定の濃度になっていることを確認した後，静電気放電発生装置によって，任意の放電エネルギー W の放電を発生させて，着火の有無を確認する．放電を 300 回繰り返し発生させても着火しない場合は着火なしとし，発生した場合は着火とした．

今回の実験で使用した針状の抵抗結合型接触電極（直径 1.8 mm，長さ約 120 mm）は，無抵抗と 10, 50, 100 MΩ の 4 種類（図 6）である．W は，静電気放電発生装置内部のコンデンサの静電容量 C_1 [pF]，静電気放電装置の高電圧出力端子から放電電極までの放電回路系の浮遊容量 C_2 [pF]，充電電圧 V[kV]より，下記の（1）式から求めた．

$$W = \frac{1}{2}\frac{C_1^2}{C_1 + C_2}V^2 \qquad (1)$$

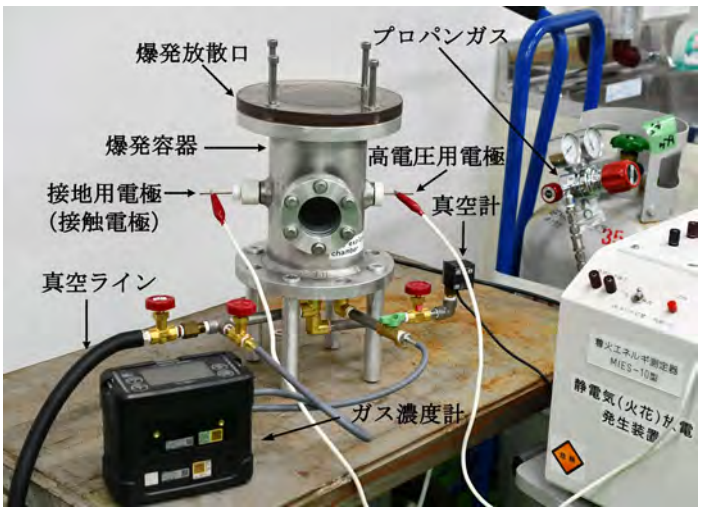


図 5　着火試験装置

This document is provided by JAXA.

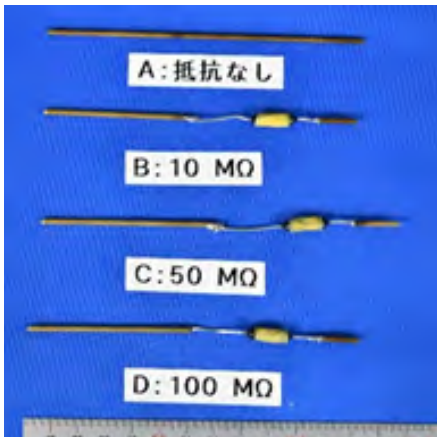


図 6　抵抗結合型接触電極

4. 結果と考察

4.1）接地検出原理の検討

小型接地確認装置の測定用コンデンサ C_c に $V_a = 5.0$ V を印加して，測定対象の導体に接触したときの V_c の時間変化の一例を図 7 に示す．縦軸は V_c［V］，横軸は t［s］である．図 7 より，測定対象物が接地されている場合は，接触開始した後に V_c は直ちに減衰して 0 V になっているのに対して，接地されていない場合は，測定用コンデンサ C_c の電荷が測定対象物体の静電容量 C_x で分割されることにより V_c は僅かに減衰して 4.73 V で安定した．測定対象の導体が接地されている場合については，減衰直前の電圧からその 37 %値まで減衰するのに要した時間を時定数 τ_m とすると，$\tau_m = 0.14$ s であった．この値は，小型接地確認装置のコンデンサと抵抗による応答時間（$\tau_c = R_c C_c = 0.13$ s）とほぼ一致することが確認できた．このコンデンサの電圧 V_c の減衰は，下記の（2）式で表される．

$$V_c = V_a \exp\left(-\frac{t}{R_c C_c}\right) \qquad (2)$$

一方，測定対象の導体が接地されていない場合については，接触後の V_c の値が，このコンデンサ C_c に充電された電荷量 Q_c がコンデンサ C_c とコンデンサ C_x で分割された結果となる．この時の V_c は，下記の式（3）で表すことができる．

$$V_c = V_a \frac{C_c}{C_c + C_x} \qquad (3)$$

式（3）より算出した V_c の値は 4.72 V であり，実験値の 4.73 V とほぼ一致していることが分かった．

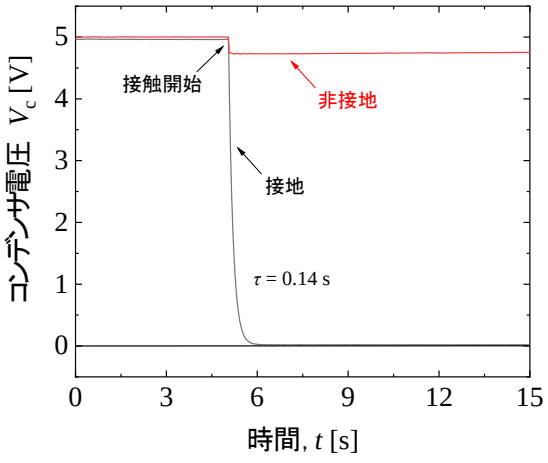


図 7　接地確認装置内部のコンデンサ電圧の時間変化

4.2）測定対象物体の静電容量の影響

各 C_x における V_c の時間変化を図 8 に示す．縦軸は測定用コンデンサの電圧 V_c［V］，横軸は時間 t［s］である．この結果によると，どの C_x の値においても接触開始した後の V_c は減衰して所定の値で安定しており，C_x が大きくなるほど減衰後の V_c は小さくなる傾向が見られた．また，減衰した後の V_c は 11 pF で 4.96 V，34 pF で 4.87 V，149 pF で 4.36 V，510 pF で 3.63 V，1270 pF で 2.48 V であった．式（3）から求めた各 V_c（= 4.96, 4.87，4.47，3.57，2.50 V）の値と比較すると，ほぼ同じ値が得られたことから，C_c と C_x による電荷分割が確認された．なお，C_x が接地されていた場合の V_c は，接触した後に直ちに減衰してすべて 0 V になることも確認された．

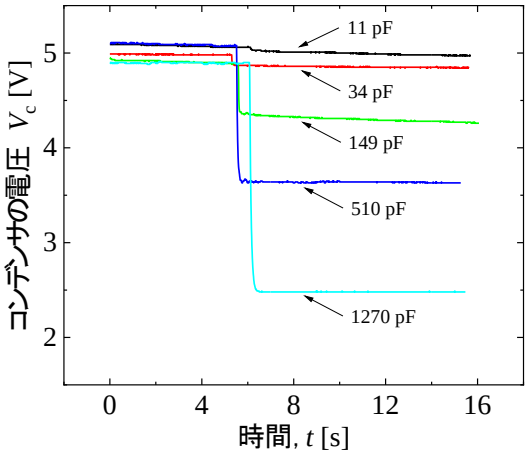


図 8　C_x を持つコンデンサに接触した後の V_c の時間変化

4.3）測定対象物体の漏洩抵抗の影響

小型接地確認装置の接地検出特性において，測定対象の導体の漏洩抵抗の影響を調べた結果を表 1 に示す．ただし，抵抗 R は小型接地確認装置内部の R_c と測定対象の導体に接続した高抵抗 R_m が直列に接続されているので，それらの和をとったもの（$R = R_c + R_m$）である．表 1 より，R が増加するほど，τ_m も増加する傾向が得られ，

表 1　各 R における τ_m と τ_c

R [MΩ]	τ_m [s]	τ_c [s]
101	0.14	0.13
110	0.15	0.14
200	0.26	0.25
1100	1.35	1.39

This document is provided by JAXA.

τ_c と比較してもほぼ同じであることが分かった．したがって，漏洩抵抗が 1000 MΩ までであれば，接地確認は可能である．

4.4）測定用コンデンサの V_a を変えた時の接地検出特性

C_c に印加する V_a の大きさを変えた時の V_c の実測値と計算値を図 9 に示す．ただし，縦軸は測定用コンデンサの電圧 V_c，横軸は C_x である．比較のために図 8 の各 C_x に接触して減衰した後の V_c の値を掲載した．実測値は各 C_x に小型接地確認装置で 5 回接地検出をした時の V_c の平均値で，計算値は式(3)から求めたものであり，実測値と比較するために示される．この実験結果より，V_a = 1.5 V と 3.0 V においても C_x の大きさを変えた時の V_c は，計算値とほぼ一致していることが分かる．なお，V_a = 1.5, 3.0 V でも C_x が接地されている状態では V_c が 0 V になった．したがって，小型接地確認装置は低電圧でも正常に機能し，測定器の防爆化が容易となった．

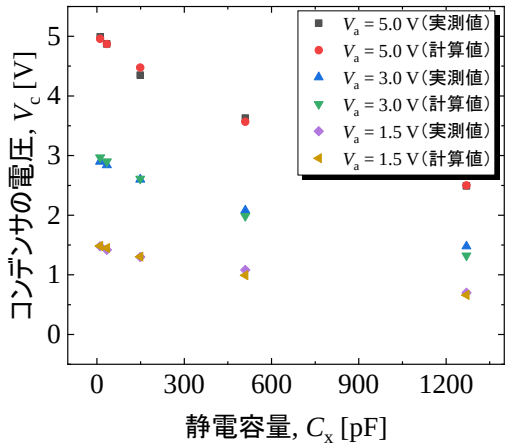


図 9　異なる V_a による C_x に対する V_c の変化

4.5）抵抗結合型接触電極の着火性放電抑制性能

3.5 の実験装置および方法を用いて，小型接地確認装置の着火性放電抑制の性能を評価した．着火実験装置を用いて，無抵抗の接触電極に 5.75 mJ の放電エネルギーを与えた場合に得られた LPG の典型的な着火パターンを図 10 に示す．この結果より，今回は（a）爆発前，（b）静電気放電による着火・爆発，（c）消炎の様子の順番で観察された．

接地確認装置が安全に使用できることを確認するために，放電エネルギーが W = 180 mJ 程度の大きな静電気放電を発生させて抵抗値が異なる 4 種類の接触電極についての着火の有無を調べた結果を表 2 に示す．この結果によると，今回与えられた放電エネルギーでの混合ガスは，無抵抗と R_c = 10 MΩ の接触電極には，1 回目の放電で着火したのに対して，R_c = 50, 100 MΩ の接触電極には，着火しないことが確認された．なお，表 2 には示していないが，抵抗なしと R_c = 10 MΩ を使用した場合，約 0.3 mJ の小さい火花放電の放電エネルギーを与えても容易に着火することも確認している．故に，接触電極が着火性放電抑制性能を有するのに必要な抵抗の値は，R_c = 50 MΩ 以上であることがわかった．R_c = 50 MΩ の接触電極において，180 mJ 程度の静電気放電が与えられた場合の波形の一例を 図 11 に示す．結果によると，抵抗の影響により単発波形ではなく多数の小さな放電パルス波形が見られ，放電エネルギーが分散されていると推測できる．また，全体的な放電持続時間は約 0.2 s で

表 2　各 R_c における着火の有無

抵抗 R_c [MΩ]	W [mJ]	着火の有無
0	180	有
10	180	有
50	180	無
100	180	無

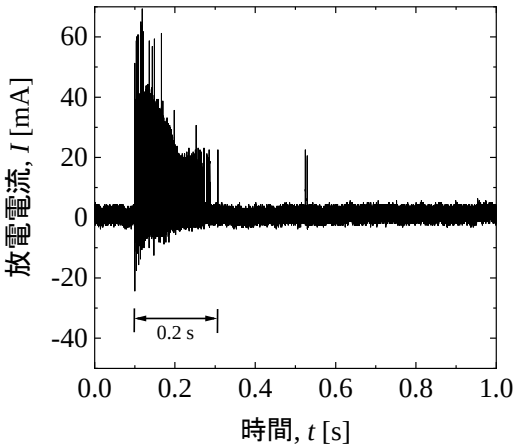


図 11　50 MΩ の接触電極からの放電波形の一例

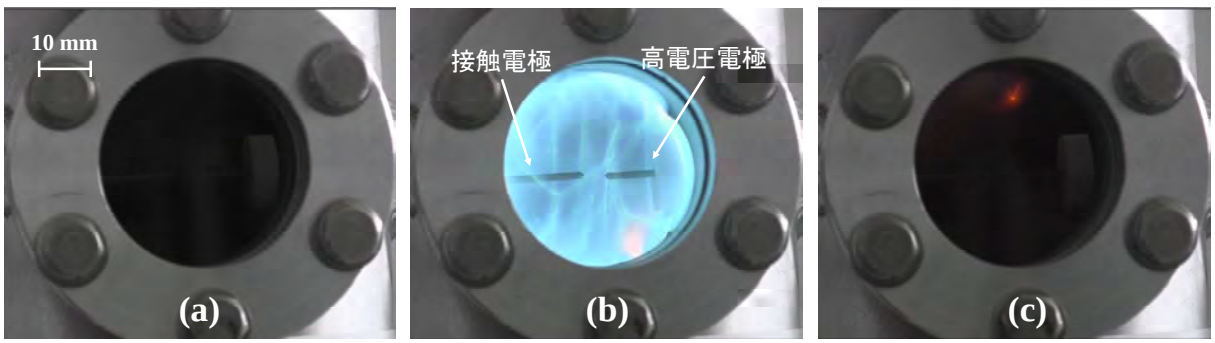


図 10　爆発容器内部のプロパン–空気混合ガスの着火プロセス

This document is provided by JAXA.

非常に長く, 放電電流のピーク値は 70 mA 以下であり，着火性の静電気放電を防止するための放電パルス電流のピーク値は 100 mA 以下[8] であることから，着火性放電を発生するレベルではないことが示唆された．以上のことから，2 で述べた抵抗結合型接触電極の着火性放電抑制のメカニズムが実証された．

5. まとめ

作業者が簡単かつ安全に使用できる小型接地確認装置を開発し，その基礎特性と着火性放電抑制の特性について評価した．その結果，測定対象の導体が接地および非接地の場合のコンデンサ電圧はそれぞれ電圧減衰によって 0 V になること，並びに，静電容量による電荷の分割によって特定の値で安定することが明らかとなった．測定対象の導体の静電容量は 1-1000 pF の範囲で，漏洩抵抗が 1000 MΩ オーダーまでであれば接地確認が可能であることが分かった．さらに，小型接地確認装置の電源電圧は 1.5 V と 3.0 V であっても接地の確認ができることが確認された．抵抗結合型接触電極の着火性放電抑制では，50 MΩ 以上の抵抗であれば，着火性放電は抑制され，安全に使用することができる．以上のことから，抵抗結合型接触電極と接地確認回路の低電圧化を採用することで，可燃性物質を取り扱っている工場・事業所のような危険場所でも安全に使用できる接地確認装置の開発を前進することができた．

参 考 文 献

1) 総務省消防庁．火災年報．1992 年－2020 年.
2) A Ohsawa. Statistical analysis of fires and explosions attributed to static electricity over the last 50 years in Japanese Industry. J. Phys. Conf. Ser. Conference on Electrostatics. 2011; 301: 1-6.
3) 八島正明，崔光石．化学工場製品倉庫で発生した火災．火災．2014; 64 6: 42- 47.
4) 最上智史，橋元文明，廣田友樹，鈴木輝夫，山田文男，野村信雄．接地確認装置の開発．静電気学会全国大会講演論文集．2014; 105-106.
5) 長田裕生，鈴木輝夫，崔光石．ハンディータイプ接地確認装置の開発に関する実験的研究．安全工学．2021; 60 4: 183-190.
6) 労働安全衛生総合研究所．静電気安全指針 2007．JNIOSH-TR-NO.42．2007; 20.
7) 労働安全衛生総合研究所．静電気安全指針 2007．JNIOSH-TR-NO.42．2007; 137.
8) 労働省産業安全研究所．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-91-1．1991; 8.

This document is provided by JAXA.