

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 15 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350470

研究課題名(和文) 絶縁性コート表面で発生するブラシ・沿面放電のモード遷移と着火性評価

研究課題名(英文) Brush and propagating brush discharges associated with insulating coats and the evaluation of their incendivity

研究代表者

大澤 敦 (Ohsawa, Atsushi)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・電気安全研究グループ・統括研究員

研究者番号：20358435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：金属容器・配管やドラムなどによく用いられる絶縁性コートおよびライナー(内袋)で発生する静電気放電のブラシ放電又は沿面放電が着火源となる火災・爆発がいまだに発生している。本研究では、化学プロセスで用いられるこれらのコート・ライナーで発生するブラシ・沿面放電の着火性を評価する方法を得るために、種々の材料、厚さのシートを用いてこれらの放電を実験的に調査した。実験結果に基づいて、放電の着火性を定量的に評価するためのブラシ放電の放電電荷および沿面放電の開始条件を表すコート・ライナーの誘電率と厚さを考慮した統一式を見出し、リスクアセスメントに応用できる新規の着火性評価法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Insulating inner coats and liner bags often used in metal tanks, pipes, drums, etc., have sometimes caused electrostatic ignitions in chemical processes. Two types of discharge, brush discharge (BD) and propagating brush discharge (PBD), can occur on a charged insulating coat or liner in contact with a grounded conductor when a grounded object approaches it. This study is an experimental investigation of these discharges on charged insulating surfaces with different materials and thicknesses in contact with a grounded backing plate to gain a guide for the risk assessment of ignition by the discharges on insulating coats and liners often used in chemical processes. Based on the result, we provide unified expressions of the charge transferred by BD and of a criterion for the onset of PBD with the estimation of their discharge energies for the quantitative analysis of ignition hazards associated with the coats and liners in the consideration with their permittivity and thickness.

研究分野：静電気安全

 キーワード：ブラシ放電 沿面放電 絶縁性コート・ライナー 帯電 放電電荷 可燃性ガス・蒸気・粉じん 放電
着火 静電気障害防止

1. 研究開始当初の背景

金属容器・配管等の絶縁性のコートやライナー（内袋）は、製品純度の保持、金属容器・配管の腐食等の防止の観点から用いられることが多いが、接地金属が絶縁物で覆われるため、帯電電荷の逃げ道（電荷緩和）がなくなり、容器等内の製品およびコート・ライナーの帯電による生産障害や、接地導体が帯電したコート・ライナーに近づくことによって発生する静電気放電のブラシ放電または沿面放電が着火源となる火災・爆発がいまだに発生している。ブラシ放電は、コート・ライナーの表面電位が比較的低いときに発生し、放電が近づいた接地導体付近の領域に限られるので、着火性は低く、ガス・蒸気の可燃性雰囲気着火源となる。沿面放電は、表面電位が高いときに起き、表面で放電が進展して、着火性が著しく高くなり、ガス、蒸気および粉じん可燃性雰囲気着火源となる。放電の着火性は放電電荷の大きさ（ガス・蒸気の爆発グループ IIA では 60 nC, IIB では 25 nC, IIC では 10 nC, 粉じんの III では 100 nC）で同定でき、これまでの知識から、最近ではブラシ放電は粉じん雰囲気の着火源にならないとされている。

この放電電荷がコート・ライナーに用いられる材料（誘電率）とその厚さを考慮した関係として求められていないので、着火性評価のためにはコート・ライナーごとに、これの帯電状態を予測して、放電電荷の試験または直接的な評価となる着火試験をせざるを得ない。また、沿面放電の開始条件は、それ自体も明らかにされていないが、誘電率と厚さを考慮して求められれば、着火フリーの粉体プロセスが可能となる。コート・ライナーの絶縁破壊電圧が沿面放電開始電圧よりも小さいと、沿面放電は生じないので、沿面放電に対する着火性評価のためには、絶縁破壊試験と沿面放電開始電圧の関係をコート・ライナーごとに調査することになる。実際には、電荷緩和によって表面電位が制限される現象も沿面放電を生じさせないことになるので、この現象も評価に含まれなくてはならないので、これを評価する何らかの帯電性の試験方法も開発されなくてはならないであろう。これらの煩雑な試験なしに、科学的根拠のある実用的な絶縁性コート・ライナーの静電気対策と評価手法を提供するためには、ブラシ放電の放電電荷と沿面放電の開始条件をコート・ライナーの誘電率と厚さを考慮して、明らかにする

必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、絶縁性コート・ライナーにともなうブラシ放電の放電電荷および沿面放電開始条件を、コート・ライナーの誘電率と厚さを考慮して、それぞれの統一表式を見出し、これまでにない科学的根拠に基づいた、より現実的で信頼性の高い絶縁性コート・ライナーの静電気対策（リスクアセスメント手法、着火フリーコート・ライナーの設計）を提供することである。

3. 研究の方法

ブラシ放電の放電電荷および沿面放電開始条件の統一表式を求めるために、接地金属板上のシート状の種々のサンプルを帯電させ、初期表面電位と放電電荷の関係および沿面放電が開始する初期表面電位を主に実験的に調査した。用いたサンプルはコートによく用いられる PTFE（厚さ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mm）とホウ珪酸ガラス（BS: 厚さ 0.1, 0.21, 0.3, 0.55 mm）およびライナーによく用いられるポリエチレン（PE: 厚さ 0.05, 0.07, 0.08, 0.1 mm）のシート（22 cm × 22 cm）である。静電気現象は湿度に影響されるので、実験は静電気の標準試験によく用いられる測定環境の温度 23 °C、相対湿度 25 %の恒温恒湿室内で行い、サンプルは 24 時間以上この室内に置いて調湿した。また、サンプルシートの表面以外にある電荷は測定に影響されるので、木製の実験台および人体を接地した。

このサンプルシートを接地金属板上に置いて、サンプルを帯電させる方法は図 1 に示すトリオードコロナ帯電（7 本の直径 0.05 mm のコロナワイヤーと穴あき金属板を使用）を用いた。単なるコロナ配列電極の代わりにこのトリオード帯電を用い、多くの試行錯誤を積み重ねることによって、帯電表面電位の一様性と再現性および測定放電電荷のばらつきを著しく改善できたことは統一式導出に大きく貢献した。

放電電荷の測定には、保護回路付きの、被測定範囲に適合させた自作のクローンメータを用いた。このクローンメータ入力には直径 2.54 cm の金属球を取り付けて一体化しており、これを帯電シート表面に近づけて放電を発生させた。このときの測定電荷には、真に測定した

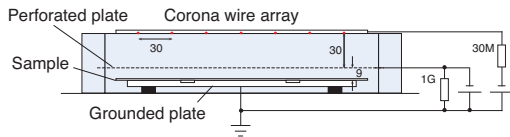


図 1: トリオードコロナ帯電

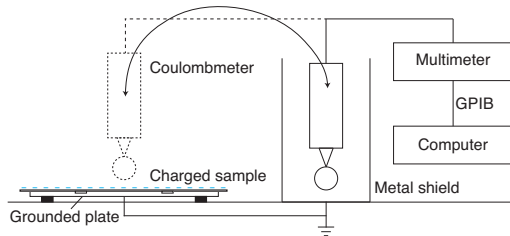


図 2: 放電電荷の測定

い放電電荷の他に表面電荷の静電誘導電荷が含まれる。これを除去するため、図 2 に示すように、始めにクーロンメータをシールドされた場所に置いてから、シートに近づけて放電させ、その後、シールド内に戻して、図 3 のように、シールド内にクローンメータがある放電前後の測定電荷の差から放電電荷 q_t を求めた。このようなシールドを用いた誘導電荷の除去は、ブラシ放電電荷の統一式の導出に貢献した。

ブラシ放電の放電電荷の統一式を求めるために、サンプルを帯電後、すぐに表面電位測定、放電電荷を測定し、すべてのサンプルに対して放電電荷とシート表面電位の関係を調査した。なお、放電後のシート表面の残存電荷および測定環境に蓄積された電荷は、サンプルの帯電および電荷測定それぞれに大きく影響した。したがって、ひとつの測定ごとに、これらの電荷を除電することは統一式の導出に重要であった。

沿面放電開始の統一式を求めるためには、放電電荷測定なしに、すべてのサンプルに対して沿面放電を生じさせた最低の表面電位を調査をした。

4. 研究成果

(1) ブラシ放電

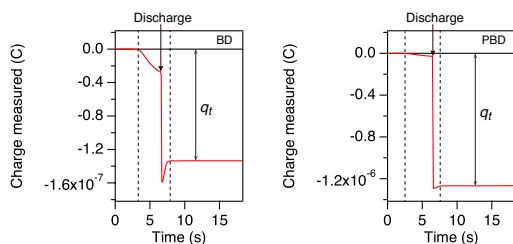


図 3: ブラシ・沿面放電の典型的な測定電荷のトレース

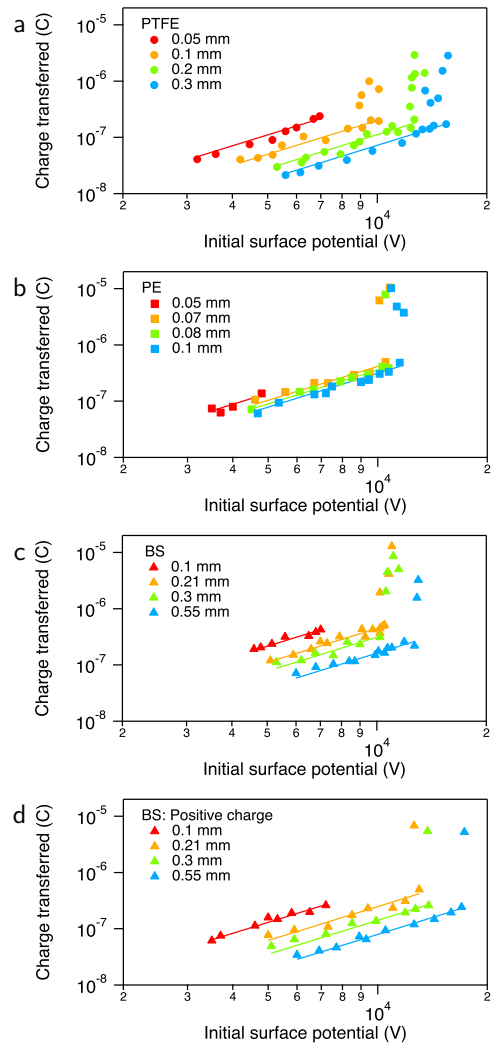


図 4: 放電電荷と初期表面電位との関係：負帯電の PTFE (a), PE (b) and BS (c), 正帯電の BS (d).

放電電荷 q_t と初期表面電位 V_{s0} との関係は、図 4 に示すように低い初期表面電位で起こる低い放電電荷のブラシ放電と高い初期表面電位で起こる急激に高い放電電荷となる沿面放電の 2 つのモードに分けることができる。ブラシ放電による放電電荷は log-log プロットで直線で表され、初期放電電荷の 2 乗に比例している (図 4 の直線)。沿面放電の放電電荷はブラシ放電電荷に相当するこの直線から大きく外れた高い放電電荷のプロットとなる。放電電荷は、シートの誘電率 ϵ の増加とともに、また、厚さ d が薄くなるとともに増加する。このことは、より低い誘電率の材料を用いたより厚いコート・ライナーほどブラシ放電による着火リスクを低減できることを意味しており、また、ブラシ放電電荷はコート・ライナーの単位面積当たりの静電容量 $\frac{\epsilon}{d}$ に比例していることを示している。静電容量に比例しているのは、放電が初期表面電荷をソースとして発生しているからであり、

その電荷密度 σ_0 は

$$\sigma_0 = \frac{\varepsilon}{d} V_{s0} \quad (1)$$

で表される。以上の特性から、ブラシ放電電荷 q_{tBD} は、この静電容量で正規化して、図 5 の直線で示される式

$$\frac{q_{tBD}}{\frac{\varepsilon}{d}} = aV_{s0}^2 \quad (2)$$

で統一的に表現できることを見出した。係数 a は、負帯電のとき、

$$a_- = 1.33 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}\text{m}^2 \quad (3)$$

であり、この係数は、次のようにサンプルシートの材料にわずかに依存した。

$$\begin{aligned} a_{PTFE-} &= 1.16 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}\text{m}^2 \text{ (PTFE)}, \\ a_{PE-} &= 1.47 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}\text{m}^2 \text{ (PE)}, \\ a_{BS-} &= 1.52 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}\text{m}^2 \text{ (BS)}. \end{aligned} \quad (4)$$

このわずかな違いは、シート表面での光電子放出の材料による違いからくるのかもしれない。摩擦帯電列からホウ珪酸ガラスは正に帯電する傾向があるが、正帯電のときの放電電荷は、負帯電のときよりも半分程度低い放電電荷となり（他サンプルについても同様な傾向がある）、係数 a は

$$a_{BS+} = 7.48 \times 10^{-9} \text{ V}^{-1}\text{m}^2 \text{ (BS)} \quad (5)$$

となる。

ブラシ放電電荷の統一式 (2) は、単位表面積当たりの初期静電エネルギー（エネルギー密度） W_0 を用いて

$$q_{tBD} = a \frac{\varepsilon}{d} V_{s0}^2 = 2aW_0. \quad (6)$$

のように書き換えられ、ブラシ放電電荷は、コート・ライナーに蓄積された初期静電エネルギー密度に比例していることを示している。

ブラシ放電の実用的な着火性評価には、安全マージンを考慮して、係数 $a \geq 2.5 \times 10^{-8} \text{ V}^{-1}\text{m}^2$ (図 5 に示す破線) を用いるのが負帯電のとき妥当であろう。評価対象となるコート・ライナーの初期表面電位は経験的に推測できるであろうから、コート・ライナーの誘電率と厚さを考慮した統一式 (2) から求められる放電電荷（先に示したように放電の着火性は放電電荷の大きさから同定できる）からブラシ放電の着火性が評価できることになる。

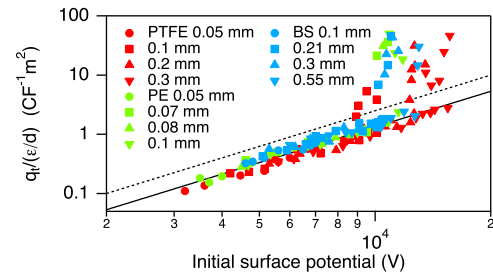


図 5: ブラシ放電電荷の統一表式（負帯電）、ただし、実線から離れたプロットは沿面放電に相当する。

(2) 沿面放電

厚さ 0.05 mm の PTFE は絶縁破壊、厚さ 0.1 mm のホウ珪酸ガラスは電荷緩和、また、0.05 mm のポリエチレンのシートは、絶縁破壊と電荷緩和の両方により沿面放電が生ずることがなかった（図 4）。つまり、コート・ライナーの材料（誘電率）と厚さを適切に選定すれば、沿面放電を防止できることを実証している。

沿面放電を生じさせた最低の表面電位 V_{PBD} は、図 6 に示すように単位表面積当たりの静電容量 $\frac{\varepsilon}{d}$ に関係しており、

$$V_{PBD} = b \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{-1/2}, \quad (7)$$

で統一的に表現できることを見出した。係数 b は、正・負帯電のコート・ライナーに対してそれぞれ

$$\begin{aligned} b_+ &= 5.46 \text{ VF}^{1/2}\text{m}^{-1}, \\ b_- &= 4.01 \text{ VF}^{1/2}\text{m}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

で表される。式 (7) は沿面放電開始が

$$\frac{\varepsilon}{2d} V_{PBD}^2 = W_{PBD0} = \frac{b^2}{2}, \quad (9)$$

の一定の初期表面エネルギー密度 W_{PBD0} で表せることを示している。ブラシ放電の放電電荷および沿面放電の開始がともにコート・ライナーの初期表面エネルギー密度で表現できることは大変に興味深い。正・負帯電のコート・ライナーに対して

$$\begin{aligned} W_{PBD0+} &= 14.9 \text{ J/m}^2, \\ W_{PBD0-} &= 8.05 \text{ J/m}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。正帯電の方が沿面放電開始電圧が高くなるのは、放電で生成した電子は、正に帯電した表面に引き寄せられて消滅してしまうからであろう。

すべての沿面放電は、長い放電ギャップのブラシ放電の後に、さらに、接地電極を表面に近

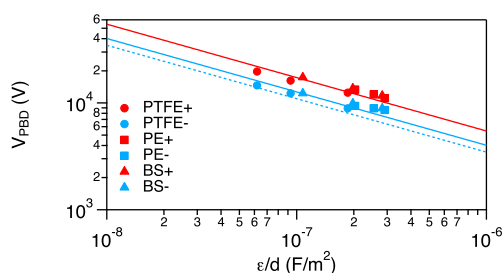


図 6: 沿面放電開始の表面電位と単位面積当たりの静電容量との関係 (赤: 正帯電; 青: 負帯電)

づけて、より短い放電ギャップで発生することがわかった。沿面放電の生起するような高い表面電位では、長いギャップで放電開始 (絶縁破壊) となるのは当然であり、このときの放電は沿面放電にはならず、ブラシ放電が発生し、このブラシ放電によって表面電荷が局所的に減少し、表面に平行な電界を表面上に形成することになる。接地電極がさらに近づくことによって形成される電界にこの電界が重畳され、放電チャネルを進展しうる電界を表面上に形成して沿面放電を発生させていると推定できる。つまり、沿面放電の発生には、その前にブラシ放電が発生することが必須であることを示している。

沿面放電の生起有無の実用的な評価としては、負帯電では、安全マージンを考慮した $W_0 \leq 6 \text{ J/m}^2$, つまり, $b_- \leq 3.46 \text{ VF}^{1/2} \text{ m}^{-1}$ (図 6 の破線) の利用が妥当であろう。また、絶縁破壊または電荷緩和により式 (7) の直線以下になるようなコート・ライナーの誘電率と厚さを選定すれば沿面放電の発生が防止できるので、粉体のみを取り扱うプロセスでは着火フリーのコート・ライナーを設計できることになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- [1] A. Ohsawa, *Brush and propagating brush discharges on insulating sheets in contact with a grounded conductor*, J. Electrostat., 査読有, **88** (2017) 171–176, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.01.006>

〔学会発表〕 (計 3 件)

- [2] A. Ohsawa, *Brush and propagating brush discharges on insulating sheets in contact with a grounded conductor*, Electrostatics 2017, 査読有 (4/10, 2017) Frankfurt, Germany.
- [3] 大澤敦, 絶縁性コート上で発生するブラシ放電の放電電荷の統一表式, 第 40 回静電気学会全国大会 (9/12, 2016) 桐生
- [4] 大澤敦, 広範囲の表面電位で一様な表面電荷分布を形成するための帯電法, 第 39 回静電気学会全国大会 (9/14, 2015) 八王子

6. 研究組織

1) 研究代表者

大澤 敦 (OHSAWA, Atsushi)
労働安全衛生総合研究所・電気安全研究
グループ・統括研究員
研究者番号: 20358435

2) 研究協力者

- 大内幹夫 (OHUCHI, Mikio), 東京電機大学・教授
- 泉房男 (IZUMI, Fusao), 産業安全技術協会
- 太田潔 (OTA, Kiyoshi), 住友化学
- R. Morrow, University of Sydney, Honorary
- J.J. Lowke, CSIRO, Honorary
- A.B. Murphy, CSIRO, Senior Principal Scientist
- M. Glor, Swiss Process Safety Consulting GmbH, CEO
- P. Holdstocks, Holdstock Technical Services
- J. Smallwood, Electrostatics Solutions
- U. von Pidoll, PTB