

帯電フィルムの横から接近させて得られる接地針電極からの沿面放電の電荷量とエネルギーの関係

長田 裕生*, 鈴木 輝夫*, 崔 光石**¹

(2026年1月13日受付; 2026年3月23日受理)

Relationship between Energy and Charge Transfer of Propagating Brush Discharge from Grounded Needle Electrode on Approaching Parallely to Charged Film

Yuki OSADA*, Teruo SUZUKI* and Kwangseok CHOI**¹

(Received January 13, 2026; Accepted March 23, 2026)

Energy of propagating brush discharge (PBD) was investigated by the relationship between surface potential of a film before and after PBD and total charge transfer during approaching a grounded needle electrode parallel to it. As for the result, the slope of curve, energy divided by charge transfer, is different from polarity. It is indicated the number of branches affects the difference of surface potential before and after PBD despite the same charge transfer.

1. はじめに

沿面放電のエネルギーを正確的に求めることは難しいが、実験および算出方法に関する取り組みが行われている。例えば、一般的に知られている帯電物体の静電エネルギーの式を用い、接地球電極の接近によって沿面放電が発生する前後の絶縁体内部の電界 E の値の差分を用いて放電エネルギーが求められ、数 J の放電エネルギーが算出された¹⁾。また、接地針電極を使用した場合、帯電したフィルムの横から接近させると発生することが報告されている²⁾。しかし、沿面放電が発生する時の接地電極が針の場合エネルギーの放電電荷量に対する傾向は知られていない。そこで、本報では接地針電極を用いて、各極性における沿面放電の電荷量とエネルギーとの相関関係を明らかにしたことを報告する。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略を図1 (a, b) に示す。接地金属板上のポリエチレンテレフタレートフィルム (500 mm × 300 mm × 0.1 mm) を予め負または正極性に帯電させ、帯電フィル

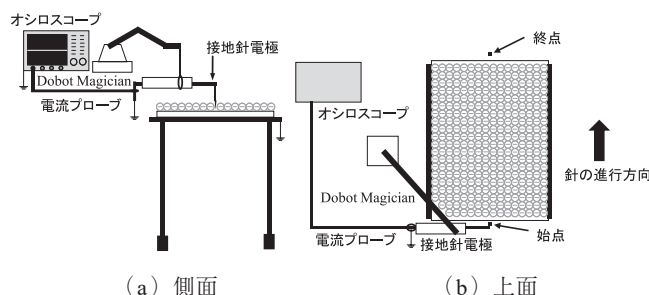


図1 沿面放電発生装置

Fig.1 Apparatus of PBD generation.

ムの中心で表面から 100 mm 離れた位置での表面電位 V_{s1} を測定後、曲率半径 0.25 mm の接地針電極をフィルムの始点から終点まで 500 mm の距離でフィルム表面に平行に接近させた。ただし、接地針電極先端と PET フィルム表面とのギャップ長は 1 mm である。接近中に複数回の沿面放電を発生させて終点に達した後に再び同じ箇所表面電位 V_{s2} を測定する。なお、PET フィルムを帯電させた直後の表面電位分布は均一であることを確認した。沿面放電の発生によって得られた電流波形は電流プローブを通じてオシロスコープで表示され、立ち上がり開始時間 t_1 から立下り終了時間 t_2 までの範囲で電流の時間積分を行うことにより、電荷量 Q_i を算出した (式 1)。

$$Q_i = \int_{t_1}^{t_2} i_k dt \quad (1)$$

今回は複数回 (n 回) 発生した沿面放電の総放電電荷量 ΣQ_i は、式(1)による各 Q_i の総和で表される (式 2)。

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (2)$$

ただし、 i は変数であり、 $i = 1$ は最初の値、 $i = n$ は最後の

キーワード：沿面放電, エネルギー, フィルム

* 春日電機株式会社静電気技術部

(〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 2-4)

Electrostatic Technology Kasuga Denki, Inc. 2-4 Shin-Kawasaki, Kawasaki, Kanagawa 212-0032, Japan

** 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

Electric Safety Group National Institute of Occupational Safety and Health, 1-4-6, Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, Japan

¹ choiks@s.jniosh.johas.go.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2026.50.3.104>

値である。本研究では、フィルムの表面電位によって発生する回数が異なるため、終端の添字を n とした。放電エネルギー ΔW は、以下の式で表す (式 3)。

$$\begin{aligned} \Delta W &= W_{\text{before}} - W_{\text{after}} \\ &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r (E_{\text{before}}^2 - E_{\text{after}}^2) S d \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 ϵ_0 [F/m] は真空の誘電率、 ϵ_r [F/m] は物質の比誘電率、 S [m²] はフィルムの面積、 d [m] はフィルムの厚さである。 E_{before} と E_{after} [V/m] は d で規格した放電前および後の見かけ上の電界であり、以下の式で表す (式 4)。

$$E_{\text{before}} = \frac{V_{s-1}}{d}, \quad E_{\text{after}} = \frac{V_{s-2}}{d} \quad (4)$$

ただし、式 (4) は誘電体の片側の表面電荷密度および電位の式から 2 つの電界の式を得て³⁾、これらの関係式を表したものである。以上により、フィルムが負または正極性に帯電した場合に得られた ΣQ_i と ΔW との関係調べた。

3. 結果および考察

図 2 に接地針電極をフィルムの横から接近させる過程で発生した沿面放電の電荷量の合計値 ΣQ_i とエネルギー ΔW との関係を示す。ただし、各プロットは一度に接近させて得られた ΣQ_i および ΔW の 5 回分の平均値であり、エラーバーはその誤差である。比較のために正極性帯電の場合も図示する。この結果より、どの極性においても ΣQ_i の増加に伴って ΔW は増加する傾向にあり、 ΣQ_i が大きい程 ΔW の増加割合が大きくなる傾向となった。この傾向を基にフィッティングカーブを引いて得られた数式は、負極性帯電で $\Delta W = 2E-5\Sigma Q_i^2 + 1.2E-3\Sigma Q_i - 0.004$ 、正極性帯電で $\Delta W = 2E-5\Sigma Q_i^2 + 2.0E-3\Sigma Q_i + 0.1463$ であり、負極性に帯電した場合の方が正極性よりも傾きが高い傾向となった。なお、接地針電極を接近させている過程でコロナ放電は発生していることも報告²⁾ されているが、微弱かつ間欠的であるため、今回はその影響は無視した。 Q_i が 530 μC である時、正極性帯電フィルムの V_{s-1} と V_{s-2} の差分 ΔV は +14.8 kV、負極性帯電の場合は -18.6 kV であり、沿面放電の特性が極性によって異なることが考えられる。そこで、この時に発生した沿面放電のチャンネルをフィルムの上から撮影した結果を図 3 (a, b) に示す。この結果より、沿面放電のチャンネルの特徴は各極性で異なっており、(a) では (b) よりチャンネルが細く、枝分かれの数が多い。このことを定量的に測定するために OpenCV と Python を用いて二値化と輪郭の抽出をし、枝分かれの数、放電チャンネルの面積を求めた所、枝分かれの数はそれぞれ 406 個と 176 個であり、帯電したフィルムに占める放電チャンネルの面積は負極性帯電の場合は 229,793 px²、正極性帯電の場合は 375,348 px² で

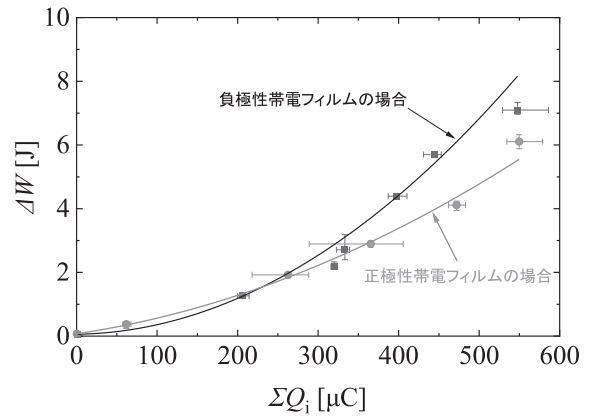
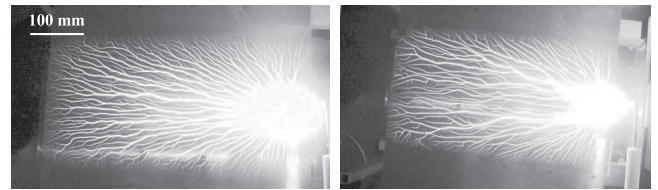


図 2 各極性における ΣQ_i と ΔW との関係
Fig.2 Relationship between ΣQ_i and ΔW on each polarity.



(a) $V_s = -32 \text{ kV}$, $V_{s-1} = -20 \text{ kV}$ (b) $V_s = +33 \text{ kV}$, $V_{s-1} = +20 \text{ kV}$

図 3 沿面放電のチャンネル
Fig.3 Channel of PBD.

あった。一般的に放電チャンネルを通じて電荷が移動することが知られており、図 3 (b) より、放電チャンネルの太さが正極性帯電の場合の方が負 (図 3 (a)) よりも大きく、放電チャンネル先端がより細くないこと、および放電チャンネルの縦方向の間隔が (a) の方が (b) よりも狭いことから、今回は枝分かれの数が多いたことが ΔV の違いに寄与したと言える。

4. おわりに

接地針電極を用いて帯電したフィルムの横から接近させた場合に発生する沿面放電の電荷量とエネルギーとの相関関係を調べた。その結果、両極性共にエネルギーは放電電荷量に対して二次関数的な挙動を示す傾向であったものの、傾きは負極性帯電の場合の方が高く、各極性における沿面放電のチャンネルの枝分かれの数の違いによって、同じ放電電荷量でもエネルギーが異なることが分かった。

参考文献

- 1) Z. Á. Tamus, I. Kiss, N. Szedenik and M. Keindl: Effective method for measuring the energy of propagating brush discharge, *J. Electrostat.*, **67** (2009) 267
- 2) 長田裕生, 鈴木輝夫, 崔 光石: 負極性帯電フィルムと接地針電極との間で発生する沿面放電に関する実験的研究. *安全工学会誌*, **64** [5] (2025) 327
- 3) G. S. P. Castle and I. I. Inculc: The electrostatic Fields and Discharge Hazards of Insulating Sheets Close to a Conductor: Review, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **33** [1] (1997) 274