

不導体からの静電気放電による着火性の検討

山隈瑞樹*1

帯電した不導体からの放電にはブラシ放電と沿面放電がある。これらの放電の特徴と可燃性物質への着火性をシート状絶縁物を用いて実験的に調べた。ブラシ放電は放電用球電極の直径によって放電開始距離、放電ストリーマの広がりおよび電流波形が異なることを観測した。また、絶縁物の帯電電位によって最大の着火能力を有する球径が異なり、例えば40 kVで球形30 mmのとき0.8 mJ、60 kVでは球形50 mmのとき2.4 mJの火花等価エネルギーが得られた。しかし、粉じんへの着火の能力は確認することができなかった。一方、沿面放電は堆積状態の粉体に着火することが可能であるが、浮遊粉じんの場合と比べて二桁程度大きな放電電荷が必要であった。高速度カメラによる観測では、放電とはほぼ同時に放電路に沿って粉じんが舞い上がり、やや遅れて着火し火炎が伝播する様子が確認された。粉体の種類によって着火および非着火時の放電電流波形が明瞭に異なり、着火性の判定に応用できることが示唆された。

キーワード: 粉じん爆発, 静電気, ブラシ放電, 沿面放電, 不導体

1 はじめに

産業現場では、袋、容器類、配管等にプラスチック等の電気的絶縁物（以下、絶縁物という。）を用いることが多い。この絶縁物は、低湿度環境では摩擦等によって容易に帯電し、様々な静電気放電を引き起こす。

シート状の絶縁物が帯電すると、その背後に接地された導体がない場合はブラシ放電、ある場合は沿面放電という着火性放電が生じる。このうちブラシ放電については、多くの研究者によって長く研究されてきたが、ガス・蒸気への着火は実験的に再現できるものの、常温常圧の空気中において粉じんへの着火を再現した報告はなく、『ブラシ放電には粉じんへの着火性はない』との見方が支配的となっている¹⁾。一方、沿面放電は、その発生条件がよく調べられており²⁾⁴⁾、粉じんへの着火性が極めて高いことも周知されているが⁵⁾、その着火メカニズムの解明は十分とはいえない。

本プロジェクト研究においては、検知された放電の着火性がどの程度であるかの判定を行うことが主要課題の一つであり、これに対するアプローチのひとつとして、多様な可燃性物質と放電の組み合わせにおいて、ブラシ放電の着火特性および沿面放電における着火のメカニズムを実験装置および観測機器を用いて詳細に調べたので報告する。

2 実験方法

1) ブラシ放電着火実験装置

図1にブラシ放電による着火実験装置を示す。この装置は、直径420 mm、厚さ3 mmのPTFE (polytetrafluoroethylene)またはPVC (polyvinyl chloride)製円板をモーターで回転（最大106 rpm）させ、これを毛皮、木綿布等の摩擦体を使って摩擦帯電させる。さらに、下部から試験粉体を圧縮空気で吹き上げ、円板と接地金属球の間で生じるブラシ放電で着火を試みるというものである。空気の整流および安全のため、全体をPVC製のカバー（フード）で覆った。

本研究では、帯電した円板に直径19 mm、30 mm および50 mmの接地した金属球を接近させてブラシ放電を発生させた。

放電電流は、電流プローブ (Tektronix, TCP0030, 帯域DC~120 MHz)で電流・電圧変換し、デジタルオシロスコープ (Tektronix, DPO3032, 帯域DC~500 MHz)で波形観測した。また、放電光はイメージインテンシファイア (浜松ホトニクス, C9016-04)で観測した。さらに、粉じんへの着火を試みる前に、図2に示す着火プローブ⁶⁾を用いて所定濃度のエチレン・空気混合気への着火の有無を調べることによって、ブラシ放電の火花等価エネルギー（着火能力を相当する火花放電エネルギーで評価した値）を求めた。

2) 沿面放電着火実験装置

図3に沿面放電による着火実験装置を示す。この装置は、接地した金属平板の上に薄いポリシートを敷いている。このシート上に試験粉体をまぶし、さらにコロナ放電式荷電装置を用いてポリシート (ポリエチレンテレフタレート (PET)またはポリエチレン (PE), 厚さ0.1 mm) を帯電させ、球電極を接近させて沿面放電を発生させ、試験粉体の着火を試みるというものである。着火の様子は高速度カメラ (フォトロン, FASTCAM SA5) を用いて観測した。

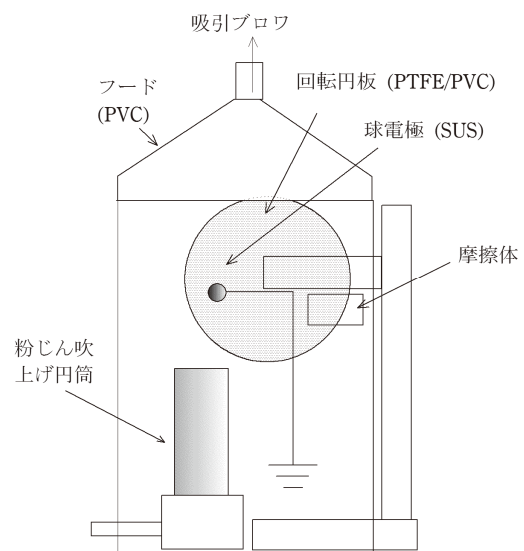


図1 ブラシ放電着火実験装置

*1 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

3 結果および考察

1) ブラシ放電

(1) ブラシ放電の特徴

PTFE 円板を毛皮で摩擦して表面電位約 50 kV に帯電させ、球電極の径を 19, 30 および 50 mm として放電電流波形、放電電荷の測定（放電電流の時間積分）および放電光の観測を行った。

その結果、図 4 に示すように、放電は複数のパルスで構成されており、電極径が大きくなるほど電流のピーク値は大きくなり、放電時間は短くなり、かつ、パルスの数が減少し、パルス間隔は小さくなる傾向がみられた。放電は、電極径が小さいほど遠距離から発生し、かつ、ストリーマの空間的広がりも大きくなっている。これらの現象は、電極径が小さくなるほど球面近傍の電界が大きくなるため、より遠方において放電開始電界(30 kV/cm)を超えること

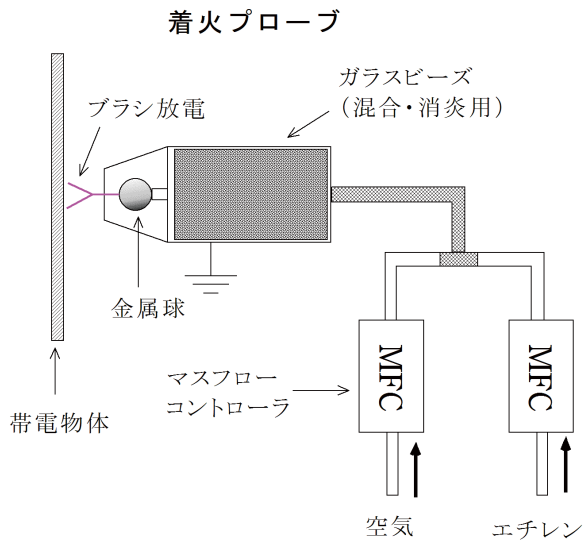


図 2 ブラシ放電の火花等価エネルギー測定装置

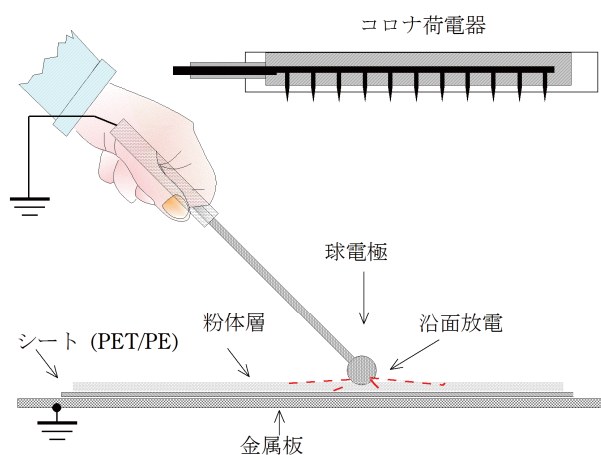


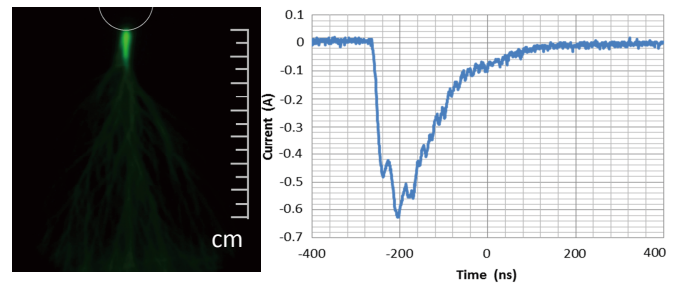
図 3 沿面放電着火実験装置

3) 試験粉体

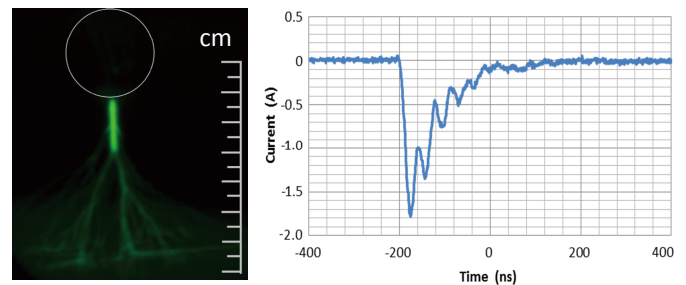
ブラシ放電による着火試験においては、本研究におけるブラシ放電の可燃性ガス・蒸気に対する火花等価エネルギーが 3 mJ 以下であることを考慮して、ビスクロヘキサノールおよびビスフェノール A の 2 種類を選択した。着火試験装置(Kühner AG, MIKE-3)で実測した最小着火エネルギーはいずれも 1 mJ 以下である。

また、沿面放電による着火試験に用いた粉体は、ビスクロヘキサノール、ビスフェノール A、トナー、アントラキノン、PMMA (polymethyl methacrylate) および石松子の 6 種類であり、最小着火エネルギー、分散性等が多様となるよう選択した。これらの主な物性および着火エネルギーは、本プロジェクト研究報告書「可燃性粉じん・空気混合気の最小着火エネルギー測定における放電回路条件の影響」に詳述されている。

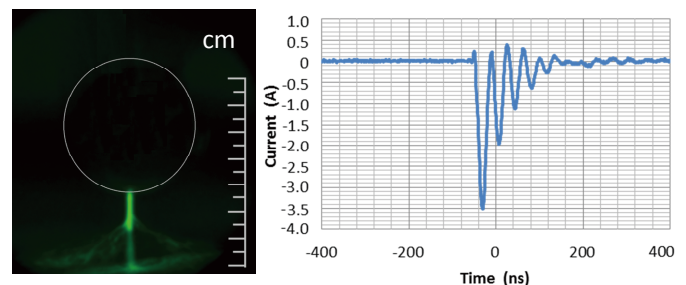
実験は 20 °C, 20 %RH の環境で実施した。



(a) 電極径 19 mm



(b) 電極径 30 mm



(c) 電極径 50 mm

図 4 ブラシ放電：電極径による放電の変化

(左：放電発光(目盛 1 cm/div)，右：放電電流波形)

(PTFE 電位 -50 kV)

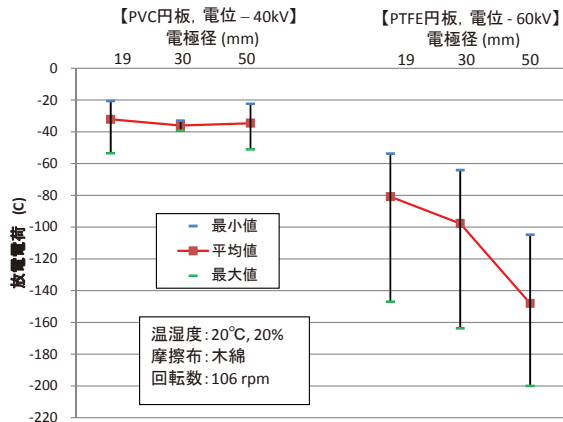


図5 ブラシ放電：帯電電位、電極径と放電電荷 (左：-40 kV, 右：-60 kV, 試行回数各 50 回)

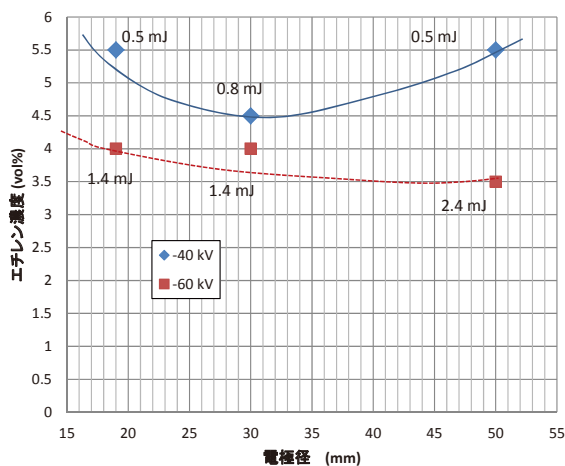


図6 エチレンガスを用いた火花等価エネルギー

となったこと、また、距離が長いほど各パルスで消費される電荷が小さいため、電極近傍の電界が維持され、放電が継続しやすくなること等に起因すると考えられる。

放電エネルギーが空間的な広がりを持つことということは、同じ放電エネルギーを有する火花放電に比べて着火性が低いことを予想させるものであると同時に、一律に放電電荷またはエネルギーによって着火性を論じることが困難であることをも示唆する。

一回の放電で放出される電荷量を測定すると、図5の結果（各条件で50回試行）が得られ、帯電電位によって電荷量が最大となる電極径が異なることがわかる。数値のばらつきが大きい、平均値で比較すると比較的低い電位(-40 kV)では電極径 30 mm において電荷量が最も大きく、高い電位(-60 kV)では 50 mm が最も大きかった。これは帯電電位が高いほど放電ギャップが大きいため、円板平面の電位低下が抑制され、放電に寄与した円板上の面積が大きくなったためと考えられる。

(2) 可燃性ガスへの着火性

ブラシ放電の可燃性ガスへの着火能力を知るためにエチレン・空気混合気を用いて着火実験を行った。まず、コンデンサを充電し、これによる火花放電によって着火試験

を実施してエチレン濃度と着火エネルギーの関係を求めた。その後、着火プローブを用いて帯電した円板と球電極間で発生するブラシ放電による着火実験を実施した。着火の判定にあたっては、着火プローブを回転中の円板に接近させて約1分間連続してブラシ放電を発生させ、その間に火炎が目視確認された場合に「着火」と、火炎が目視確認されなかった場合に「非着火」とした。その結果、図6に示すような結果が得られた。これによれば帯電電位-40 kVにおいては直径30 mmの電極を用いたときに0.8 mJ、-60 kVにおいて直径50 mmの電極を用いたときに2.4 mJの等価放電エネルギーが得られた。これは、図5で示した最大電荷の発生条件と合致しており、電位が高いほど曲率の小さな導体からのブラシ放電の方が着火能力が高くなることを示している。

なお、過去の研究においてはブラシ放電の火花等価エネルギーは1~4 mJというが報告されており^{7,8)}、今回の実験で得られた値もこれらにほぼ一致するものであった。

(3) 粉じんへの着火性

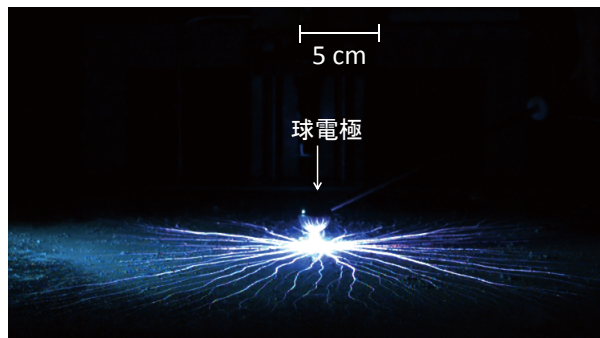
ビスフェノール A およびビスクロヘキサノールを用いてブラシ放電による粉じん・空気混合気への着火を試みたが、一度も着火することはなかった。粉じんと空気の混合状態には問題はなかった（火花放電による着火を確認済み）、放電エネルギーが不十分であったためである。ただし、これは粉じんが舞い上がった直後に円板に付着し、電位が低下したためにブラシ放電が弱まったことが主たる要因と考えられ、粉じんへの着火能力の有無を判定するまでには至らなかった。この種の研究では、過去にブラシ放電による着火成功例がほとんど見られないのは実験の困難さにも起因すると考えられ、今後新たな工夫が必要である。

2) 沿面放電

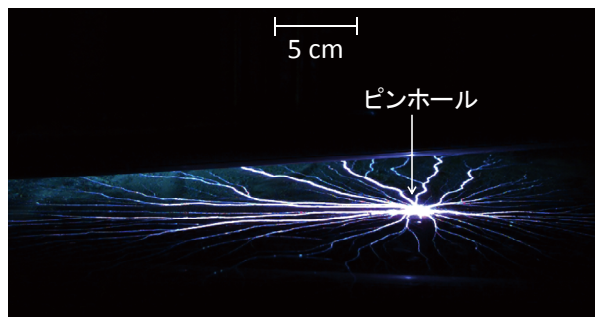
(1) 沿面放電の観測

図7(a)および(b)は、それぞれ PET シートおよび PE シートを帯電させ、電極の接近およびシートの絶縁破壊を契機として発生した放電である（高速カメラ 7,000 FPS で撮影したうちの1フレーム）。後者の放電条件は放電電流等の電氣的測定が困難であるが、帯電電位が等しければ放電光の広がりもほぼ同様となることが観測されたことから、両者はほぼ同様の放電エネルギーを有していると考えられる。

一般に放電は非常に高速の現象であるので、その放電光の成長パターンを光学的に捕らえることは技術的に難しいが、本研究では、放電回路に 100 kΩ を挿入して放電光の進展を緩慢にすることによって 1,500,000 FPS での高速ビデオ撮影を試みた。図8は、数フレームを合成したものであり、主たる放電ストリーマ①~④が、その番号の順に 0.7~1.4 μs 間隔で発生・成長していることが確認された。図7では樹枝状の放電ストリーマが同時に発生しているように見えるが、実際にはそれぞれ時間的なずれを伴って発生していることが示唆される。



(a) PET シート上での放電 (電極接近)



(b) PE シート上での放電 (絶縁破壊)

図 7 沿面放電発光パターン (帯電電位・20 kV)

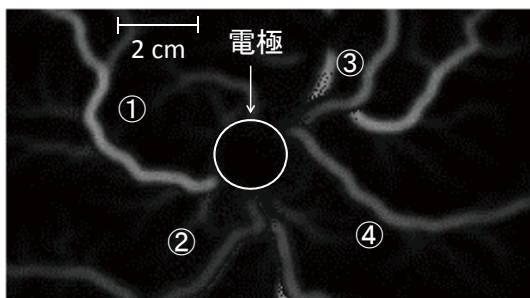


図 8 沿面放電路の発生順序(100 kV 挿入)

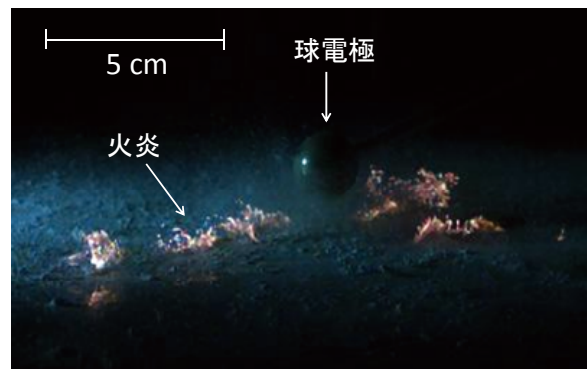
(2) 沿面放電による堆積粉じん着火の観測

沿面放電による堆積状態の粉じんへの着火・爆発の機構を知るために、高速度カメラによる撮影を行った。この実験に用いた 6 種類の粉体については、着火から爆発への進展パターンがそれぞれ異なり、特に、放電から着火までの時間および着火ポイントに違いがみられた。放電から粉じんが浮遊しはじめるまでの時間 (浮遊開始時間)、放電から着火が開始するまでの時間 (着火開始時間) および着火場所をまとめると表 1 のようになる。粉じんが浮遊するのは放電ストリーマ周辺で生じる衝撃波によるものと考えられるので浮遊開始時間には大きな差はない。一方、着火開始時間はそれぞれ異なっており、また、着火開始場所は、着火開始時間が比較的短い試料 (ビスフェノール A、トナー、アントラキノン) では、図 9 (a) に示すように、放電路の近傍であるのに対し、着火開始時間が比較的長い

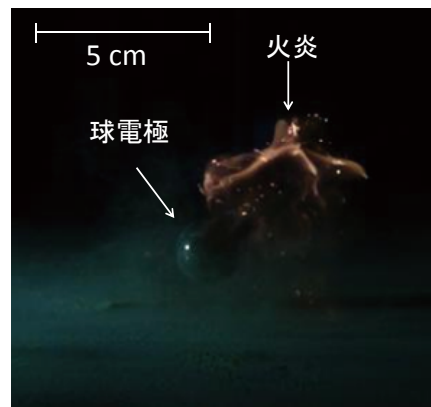
試料 (ビスクロヘキサノール, PMMA, 石松子) では、図 9 (b) に示すように、放電電極近傍であった。着火開始時間の違いは、個々の物質の燃焼反応速度との関係が深いと考えられるが、詳細の解明は今後の課題である。

表 1 各種粉体試料における着火の特徴

粉体	浮遊開始時間 (ms)	着火開始時間 (ms)	着火開始場所
ビスクロヘキサノール	0.28	9.14	電極近傍または放電路
ビスフェノール A	0.28	0.28	放電路
トナー	0.14	0.14	放電路
アントラキノン	0.14	0.14	放電路
PMMA	0.28	12.3	電極近傍
石松子	0.28	31.1	電極近傍



(a) 放電路での着火 (ビスフェノール A)



(b) 電極近傍での着火 (石松子)

図 9 沿面放電による粉じんへの着火ポイント

(3) 堆積粉じんの着火に要する放電電荷

沿面放電による着火の有無を放電電荷の観点からまとめたものが図 10 である。また、本実験で得られた着火に必要な電荷の最小値 (最小着火電荷という。) を浮遊粉じんのそれと比較したものを表 2 に示す。

堆積粉じんの場合には、着火が生じるためには、浮遊粉じんの場合の 100 倍程度の電荷が必要ということがわか

る。ただし、これは粉じんを浮遊させるために多くの電荷が費やされたためであり、すでに浮遊状態となっている場合には、着火に要する電荷はかなり少なくなること考えられる。

また、ばらつきはあるが、最小着火エネルギーが小さい物質ほど、沿面放電の最小着火電荷も小さくなる傾向が認められる。

(4) 堆積粉じん着火と放電電流波形

放電電流波形の観測から、沿面放電の際には、放電路に粉じんが堆積している場合と堆積していない場合には放電電流波形が異なること、また、物質によっては、**図 11**に示すように、着火時と非着火時には放電電流波形に明瞭な違いがあることが分かった。

放電時間と着火の関係をもとめると**図 12**のようになる。これによれば、ビスフェノール A およびピシクロヘキサノールは、着火時と非着火時の放電電流波形に大きな違いが認められる。着火の有無が放電電流波形に影響を与えるということは、放電時において既に着火の前駆現象が開始し、イオン等荷電粒子が生じていることを意味すると考えられる。したがって、物質に制限はあるが、放電電流波形または電磁波をモニターすることによって着火性であるか否かの判定が可能になると考えられる。

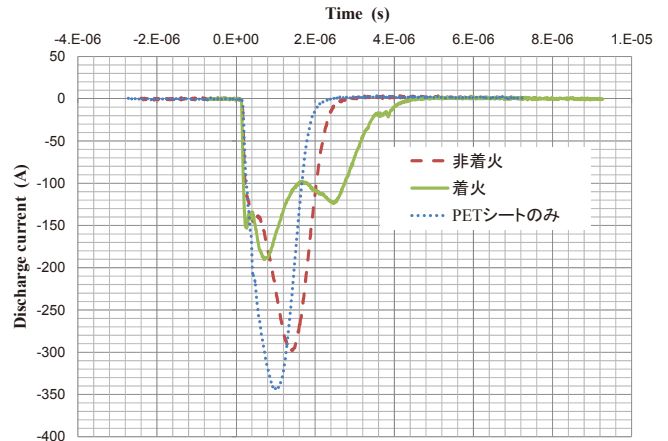


図 11 着火時と非着火時の放電電流波形の違い (石松子)

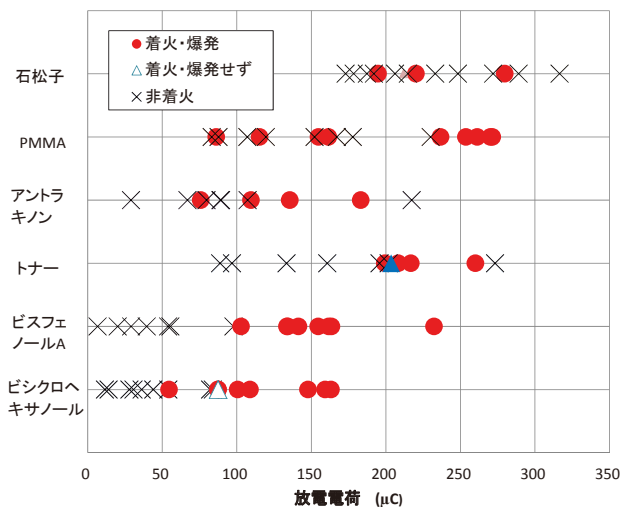


図 10 放電電荷による各種粉体の着火の有無

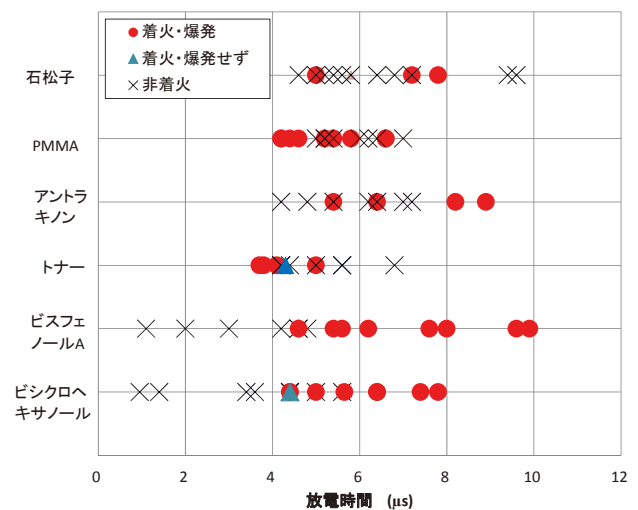


図 12 放電時間による各種粉体の着火の有無

4 まとめ

帯電した不導体から発生するブラシ放電および沿面放電の特徴および可燃性物質(ガス、粉じん)への着火性を実験的に調べた。その結果をまとめると次のとおりである。

- (1) ブラシ放電は複数のパルスから成り、球電極の直径が大きくなるほどパルスは大きくなり、発生個数は減少する。
- (2) ブラシ放電の着火能力は放電電荷と相関性があり、絶縁物の帯電電位が高くなるほど、より直径の大きな球電極の方が着火能力は高くなる。帯電電位-40 kV で 0.8 mJ、-60 kV で 2.4 mJ の火花等価エネルギーが得られた。
- (3) 最小着火エネルギー1 mJ 以下の粉体を用いてブラシ放電による着火を試みたが着火は確認されなかった。
- (4) 沿面放電による堆積粉じんの着火においては、先ず放電によって粉じんが舞い上がり、その後やや遅れて火花が出現する。着火場所は放電路に沿うものと放電電極付近傍の二種類がある。
- (5) 沿面放電による堆積粉じんの着火に必要な電荷は、浮遊粉じんの火花放電による着火と比べて約 100 倍が必

表 2 各種粉体試料における着火の特徴

粉体	堆積粉じんの沿面放電による最小着火電荷(μC)	浮遊粉じんの火花放電による最小着火電荷(μC)
ピシクロヘキサノール	55.7	< 0.2
ビスフェノール A	103	< 0.2
トナー	199	0.6 ~ 2
アントラキノン	75.8	0.6 ~ 2
PMMA	86.2	0.6 ~ 2
石松子	173	2 ~ 6

要である。

- (6) 沿面放電による堆積粉じんが着火に際しては、物質によっては放電電流波形が明瞭に変化する場合があります、着火性放電の判定に応用が期待できる。

謝 辞

実験に当たり、工学院大学工学部電気システム工学科斎藤優駆氏（卒研究生）に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) M. Glor and K. Schwenzfeuer, Direct ignition tests with brush discharges. J. Electrostat. 2005; 63; 463-468
- 2) E. Heidelberg, in Proc. 1st Int. Conf. Static Electricity, Vienna, Austria. 1970; 351
- 3) M. Yamaguma and T. Kodama, Observation of propagating brush discharge on insulating film with grounded antistatic materials, IEEE Trans. on Industry Applications, 2004; 40; 451-456
- 4) A. R. Blythe, G. E. Carr, Characteristics of propagating electrostatic discharge on dielectric films, J. Electrostat. 1981; 10; 321-326
- 5) Electrostatics-code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity, CENELEC PD CLC/TR 50404 (2003)
- 6) JIS C 61340-4-4:2009 (IEC 61340-4-4:2005), 静電気—第 4-4 部：特定応用のための標準的試験方法—フレキシブルコンテナの静電的分類，日本規格協会 (2009)
- 7) M. Glor, Ignition of gas/air mixtures by discharges between electrostatically charged plastic surfaces and metallic electrodes, J. Electrostat., 1981; 10; 327-332
- 8) 藤岡清吾他，帯電したプラスチックシートからの静電気放電の等価エネルギー，静電気学会誌. 1979; 3; 160-166