

高引火点引火性液体ミストの静電気放電による着火危険性の調査†

遠藤 雄大*1 崔 光石*1

灯油や軽油のような高引火点引火性液体は、常温下では液面での蒸気濃度が爆発下限を超えることはないが、ミスト状態では引火点以下でも着火することが知られている。近年、高引火点引火性液体のミストが静電気放電により着火したことに起因するとみられる火災事例も報告されているが、火花放電以外の静電気放電によるミストの着火危険性に関する研究はほとんど行われておらず、一般にはその危険性が十分に認識されていない。特に、灯油や軽油のような液体を取り扱う際には、配管内での流動やマイクロフィルタによる濾過時に大きく帯電し、液面と付近の導体との間でブラシ放電等の静電気放電が発生する可能性があることから、これらを点火源とした場合の着火危険性を十分に調査する必要がある。そこで本研究では、国内外で火災事例のある灯油に着目し、粒径約 5 μm のミスト状態での着火エネルギーおよび、ブラシ放電による着火危険性を調査した。その結果、測定された着火エネルギーは従来データよりも小さな値となる 1 mJ 以下であり、ブラシ放電等の静電気放電による着火危険性が高いことが確認された。また、外部電界を用いて発生させた模擬的なブラシ放電を点火源とする着火実験により、灯油ミストが着火することを確認した。以上の結果から、高引火点引火性液体ミストはブラシ放電等の静電気放電による着火危険性があり、十分な対策が必要であることが示された。

キーワード: 静電気, 爆発・火災, 灯油, 高引火点引火性液体, ミスト

1. はじめに

消防庁の発表する消防白書¹⁾によると、近年(平成 24 年～令和 3 年)発生した化学工場等の危険物施設における火災事故(2,049 件)について、出火原因物質に着目すると引火性液体が約半数(948 件, 46.3%)を占め、着火原因に注目すると静電気放電が最多(338 件, 16.5%)となっている。一般的に考えて、これらの中には、引火性液体(蒸気, ミスト)が静電気放電により着火し発生した火災も多く含まれるだろう。

また、火災年報²⁾によると、静電気に起因する火災は毎年 100 件程度発生しており、帯電物体に着目すると液体(管中の流動液体, 容器内流動体)が全体の約 15%を占め、衣類(約 19%), 粉体(約 12%)と並び、主要な静電気発生源となっている。

以上より、危険物施設の火災件数減少を目指すうえで、静電気および引火性液体が関係する火災の防止は優先度の高い課題といえるが、その一方で、現在までに災害発生メカニズムや災害防止対策に関する研究が十分に行われておらず、現在の静電気災害防止対策に関する各種指針(静電気安全指針 2007³⁾, IEC⁴⁾, NFPA77⁵⁾)では上記の火災を完全にカバーできていない。

灯油や軽油のような高引火点引火性液体は、常温では液面の蒸気濃度が爆発下限界に達することはなく着火の危険性が低い、ミスト状態では常温下でも点火源があれば容易に着火することが広く知られている。高引火点引火性液体を取り扱う際、高流速で配管輸送する場合に

は、流動帯電により液体が静電気帯電することが知られており、特にポンプやフィルタを通過する際には帯電量が大きくなる^{3,7)}。また、タンク充填の際、液体がタンク底や液面で跳ね返り飛散するように充填(スプラッシュローディング, スプラッシュフィリング)すると、タンク内に微小のミストが形成される可能性がある。そもそも、このような充填方法は、特に静電気安全の観点からは避けることが推奨されている^{3,5)}。タンク内の液体が強く帯電し、さらにミストが形成されるような場合には、火花放電(タンク内の非接地導体が帯電液面からの静電誘導を受け発生)やブラシ放電(帯電液面と付近の導体との間で発生)のような静電気放電によりミストが着火し、火災に至る危険性がある。実際に、国内外において、常温下において帯電液面から発生した静電気放電により灯油ミストが着火したと推測される火災事例も報告されている⁸⁻¹⁰⁾。

一方で、各種指針においても、高引火点引火性液体ミストが可燃性雰囲気形成することが示されているが、高引火点引火性液体ミストの静電気放電による着火危険性および着火エネルギーに関する記述は十分とはいえない。これまでに、後述のように、火花放電による着火は実験的に確認されているが、他の静電気放電による着火性については十分な検討が行われていない。今後、同種の災害を防止するうえで、火花放電以外の静電気放電が高引火点引火性液体ミストの着火源となり得る場合には、それを念頭に十分な安全対策を示すことが重要である。

そこで本研究では、近年火災事例もある灯油に着目し、粒径数 μm の微小なミスト状態における静電気放電による着火危険性を調査するために、灯油ミストの着火エネルギーの測定および、タンク充填時などに帯電した液面から発生する可能性のあるブラシ放電を点火源として灯油ミストの着火実験を行った。

† 本報の一部は、安全工学, 第 60 巻 3 号, pp.191-197, 2021, 安全工学シンポジウム 2023 講演予稿集, pp.194-195, 2023 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
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 遠藤雄大
E-mail: y.endo@s.jniosh.johas.go.jp

2. 灯油ミストの着火エネルギー測定

1) まえがき

灯油や軽油等の高引火点の石油系炭化水素について、ミスト状態における常温下での着火エネルギーについては、約1~200 mJ (粒径: 約5~100 μm) までの報告例がある¹¹⁻¹⁶⁾。これらの測定結果の差は、測定時のミストの粒径や濃度、着火源となる火花放電発生装置の放電電極間隔等の測定条件がそれぞれに異なることに起因すると考えられる。したがって、測定条件次第では、さらに小さなエネルギーでも着火する可能性があると考えられる。特に、粒径が小さくなるほど着火エネルギーも小さくなる傾向が確認されており、粒径次第では着火エネルギー1 mJを下回る可能性も示されている¹⁶⁾が、実測による確認はされていない。

静電気放電の中でも、帯電した導体(作業着や金属製品等)から発生する火花放電は、エネルギーが10 mJ以上となることも珍しくなく、そもそも着火エネルギー測定において点火源として使用されていることから、十分に高引火点液体ミストに対して着火源となり得る。また、シート状の帯電絶縁物表面で発生する沿面放電や、帯電粉体堆積面で発生するコーン放電も火花放電と同程度のエネルギーになり得る静電気放電である。帯電絶縁物表面から発生するブラシ放電についても、そのエネルギー(ただし、火花等価エネルギー)は最大4 mJ程度にもなることから⁴⁾、数値的にはブラシ放電が高引火点液体ミストの着火源となる可能性も否定はできない。ブラシ放電は、帯電した絶縁性液体表面からも発生するため、帯電しやすい絶縁性の高引火点液体を取り扱う現場においても発生し得る。

現在までに高引火点液体ミストの着火特性について、多くの研究が行われているものの、着火エネルギーの測定方法も確立されておらず、現実的に着火エネルギーが最小となる条件での測定も行われていない。また、各種指針において、静電気放電に起因するミスト着火事故の危険性およびこれに対する対策も十分に示されていない状況にある。

上記の背景から、本研究では、国内でも火災事例のある灯油に着目し、高引火点液体ミストの着火エネルギーと測定条件の関係を調査するために、可燃性粉じんの着火エネルギー測定において国内外で標準的に使用される粉じん最小着火エネルギー測定用の吹上げ方式着火試験装置(MIKE-3, Kühner AG)を転用し、超音波ミスト発生器で生成したメディアン径約5 μmの灯油ミストの着火エネルギー測定を各種条件で試みた。また、比較として、灯油蒸気の着火エネルギー測定も実施した。

2) 実験装置および方法

・灯油ミスト

本実験では、液体試料として、市販の一般的な灯油を使用した。灯油の物性を表1に示す。ミスト着火実験時の灯油の液温は16℃であり、引火点を大きく下回ること

が改めて確認できる。

本実験には、市販用の超音波式ミスト発生器(NE-U780, オムロン)を使用し、灯油をミスト化した。レーザー光式粒度分布測定装置で測定した灯油ミストの粒径は、メディアン径(D_{50})は4.62 μm、ザウター平均粒径(SMD)は3.87 μmである。ミスト発生器による灯油ミストの時間当たりの供給量は、 15.9 ± 0.34 mg/sである。

表1 灯油の物性

引火点[°C] ¹⁷⁾	38-52
爆発限界[vol%] ¹⁷⁾	0.7-5
炭素数 ¹⁸⁾	C12-C18
分子量 ¹⁸⁾	170-254 (平均: 212)

・灯油ミストの着火実験装置および方法

ミストの着火エネルギー測定には、国内外で標準的に用いられている粉じんの最小着火エネルギー測定用の吹上げ方式着火試験装置(MIKE-3, Kühner AG)を一部改良して使用した。実験装置の概観を図1に示す。本実験では、放電電極の間隔 d [mm]を3通りに設定した。先行研究において、高引火点引火性液体ミストの着火エネルギー測定値が電極間隔に依存し、ある距離で極小となることが確認されている¹⁶⁾。なお、粉じん着火試験における推奨値は6 mmである¹⁹⁾。また、コンデンサと放電電極間にインダクタンス($L: 1$ mH)を挿入でき、この有無により着火能力を調整可能である。

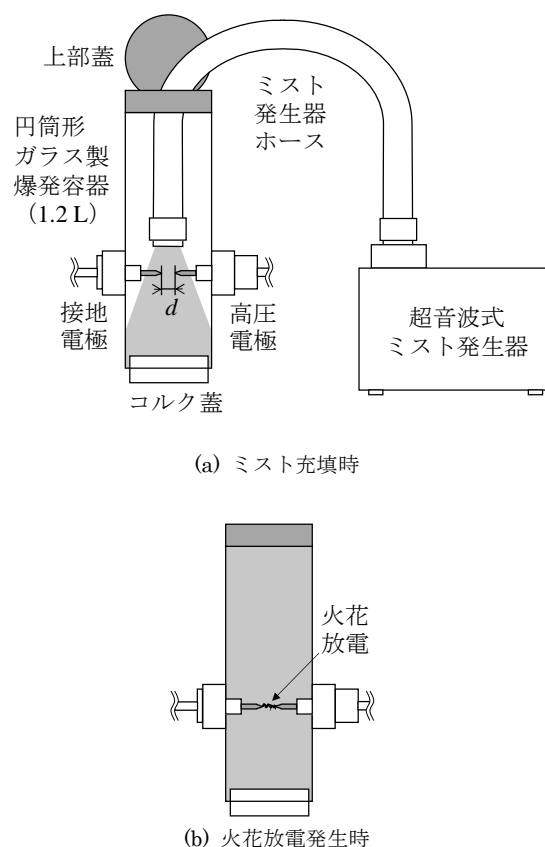


図1 灯油ミストの着火実験装置

実験では、ミスト充填後、所定のエネルギーの静電気放電を発生させて着火の有無を判定した。実験時の室内環境は、温度 15°C、相対湿度 40%であり、灯油の液温は 16°Cであった。

・灯油蒸気の着火実験装置および方法

本研究では、国内で一般的に使用されている測定装置および方法で灯油蒸気の着火性について調べた。灯油蒸気の着火試験装置の概観を図 2 に示す。本装置を用いて、所定の温度および濃度の灯油蒸気の着火エネルギーを測定した。ここでは、放電電極の間隔は 2.5 mm に設定した。実験手順の概略は次の通りである。

- a) 灯油 30 mL を試料容器に入れる。
- b) 恒温槽内を所定の温度 (30°C, 50°C, 80°C) まで加温する。
- c) 爆発容器内を真空に引く。
- d) 試料容器のバルブを開き、灯油蒸気を爆発容器内に所定の分圧 (1.0 vol%~3.0 vol%) まで入れる。
- e) 空気を爆発容器内に大気圧まで導入後、混合気が安定するまで 2 分間保持する。
- f) 放電電極間に所定のエネルギー (~120 mJ) の火花放電を発生し、着火の有無を判定する。
- g) 温度と放電エネルギーを変えて測定を繰り返す。

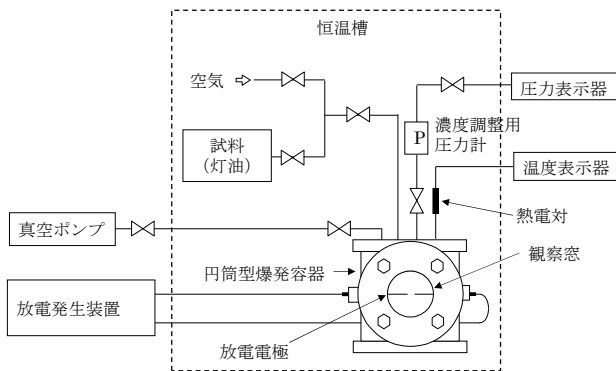


図 2 灯油蒸気の着火実験装置

3) 実験結果および考察

・灯油ミストの着火・伝播の様子

本実験における典型的な灯油ミストの着火パターンを図 3 に示す。爆発容器内への灯油ミストの充填 (図 3(a))、放電による着火 (図 3(b))、上・下部への火炎伝播 (図 3(c))、及び消炎 (図 3(d),(e)) という一連の様子が確認できる。

次に、異なる放電エネルギー (1 mJ, 3 mJ) によるミストの着火・伝播の様子を高速度カメラ (撮影速度: 1,000 fps) で撮影した動画から、約 10 フレーム毎に抽出した画像を図 4 に示す。分析の結果、両方 (1 mJ, 3 mJ) とも放電開始直後から放電電極間で発生した火種が球状に伝播している。これは、爆発容器内のミストの濃度がほぼ均一であることを示している。また、放電エネルギーの差に着目すると、放電エネルギーが大きいほど火炎核 (kernel) が大きく、初期段階での火炎伝播速度

が速いことが明らかである (図 4(b))。これは、既存研究の結果と良く一致している²⁰⁾。しかし、同じ当量比では、火炎半径が 10 mm 以上になると火炎伝播速度が同じになることが知られており²⁰⁾、火炎が大きくなった範囲での解析は行っていない。

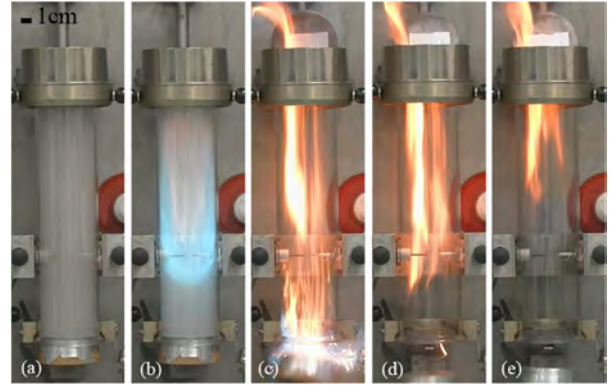


図 3 灯油ミストの典型的な着火の様子 (放電電極間隔: 6 mm, ミスト充填時間: 10 s, 放電エネルギー: 1 mJ, インダクタンス挿入)

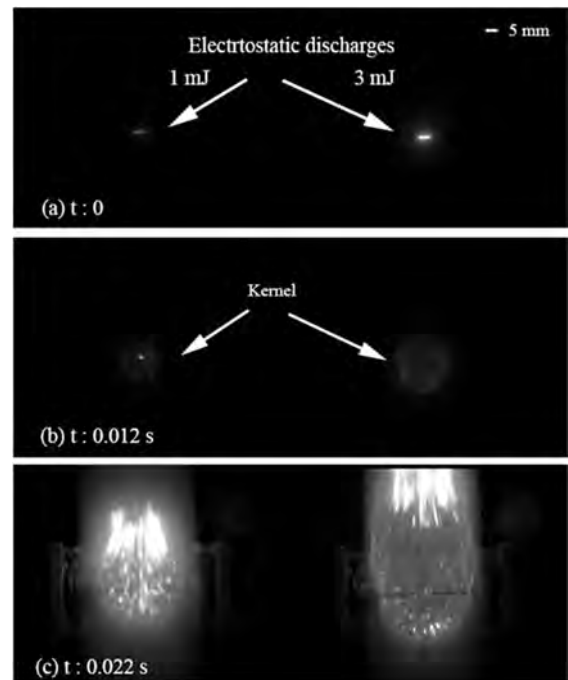


図 4 異なる放電エネルギーによる着火の様子 (t: 放電発生時からの経過時間, 電極間隔: 6 mm, ミスト供給時間: 10 s, インダクタンス挿入)

・灯油ミストの着火実験結果

各ミスト充填時間における着火実験の結果を表 2 に示す。充填時間 5 s 以上では、全ての条件で着火し、充填時間 3 s では全ての条件で非着火となることが確認できる。着火エネルギーは、着火時と非着火時の放電エネルギーの間の値となるため、灯油ミストの着火エネルギーは 1 mJ 以下と推定される。なお、本実験では、測定装置の限界により放電エネルギー 1 mJ 以下では実験でき

ないため、灯油ミストの正確な着火エネルギーは測定できなかった。

ここで、爆発容器内濃度は、ミスト発生器から供給されたミストが容積 1.2 L の爆発容器内に均一に分布すると仮定した場合の重量濃度である。灯油の分子量を 212、爆発容器内の圧力を 1,013 hPa と仮定して灯油蒸気の爆発下限界濃度 0.7 vol% を重量濃度に換算すると 62.8 mg/L となる。表 2 より、着火時の爆発容器内濃度は全て 62.8 mg/L 以上であり、蒸気状態における濃度特性と一致する。先行研究¹⁹⁾においても、同種の液体についてはミストと蒸気の爆発下限界濃度がほぼ一致することが報告されている。

次に、各電極間隔における着火実験の結果を表 3 に示す。ここでのミスト充填時間は 10 s である。電極間隔 4 mm と 6 mm では全ての条件で着火、電極間隔 2 mm ではインダクタンス非挿入時には放電エネルギー 3 mJ 以下で非着火となった。したがって、電極間隔 2 mm、インダクタンス非挿入時の実際の着火エネルギーは 3 mJ と 10 mJ の間の値と推定される。この結果から、電極間隔が 2 mm の場合には、4 mm、6 mm の場合よりも放電の着火能力が低くなるとともに、インダクタンス挿入の有無により着火能力に明確な差が生じることが示唆される。電極間隔と着火エネルギーの関係について、粉じん（炭じん）について、電極間隔 4～7 mm で着火エネルギーがほぼ一定かつ最小値を示すことが報告されている²¹⁾。

表 2 ミスト充填時間ごとの着火実験の結果（電極間隔：6 mm，○：着火，×：非着火）

放電エネルギー [mJ]	ミスト充填時間[s] (爆発容器内のミスト濃度[mg/L])		
	3 (39.9)	5 (66.5)	10 (132.9)
1	×(×)	○(○)	○(○)
3	×(×)	○(○)	○(○)
10	×(×)	○(○)	○(○)

括弧内：インダクタンス挿入時

表 3 電極間隔ごとの着火実験の結果（ミスト充填時間：10 s，○：着火，×：非着火）

放電エネルギー [mJ]	電極間隔[mm]		
	2	4	6
1	×(○)	○(○)	○(○)
3	×(○)	○(○)	○(○)
10	○(○)	○(○)	○(○)

括弧内：インダクタンス挿入時

・灯油蒸気の着火実験結果

灯油蒸気の着火実験結果を表 4 に示す。ただし、灯油ミストの着火エネルギーは室温 15℃において測定したが、灯油蒸気の場合には、様々な温度(30℃, 50℃, 80℃)で測定を行った。一般に、灯油の着火性は引火点(38～

52℃)と大きく関係しており、引火点より低い温度では、静電気放電でも、アーク放電でも着火することはない。しかし、今回の実験で明らかになったように灯油がミスト状態になり、表面の面積が非常に大きくなった場合は、引火点以下の温度(常温)でも 1 mJ 程度の小さな放電エネルギーで着火する。これは、液体試料が噴霧によって、微粒子化され、空気との接触表面積が大きくなったためと考えられる。一方、蒸気状態では、灯油の引火点と同程度の 50℃までは放電エネルギー 120 mJ (試験装置の上限値)でも着火しなかったが、引火点を超える 80℃では、濃度 1.0 vol%～3.0 vol%で着火が確認され、1.5 vol%～2.5 vol%では 1 mJ 以下で着火した。最小着火エネルギーは 2.0 vol%において、0.19 mJ～0.20 mJ (0.19 mJ で非着火、0.20 mJ で着火)であった。

表 4 灯油蒸気の着火実験の結果

蒸気温度[°C]	蒸気濃度	着火エネルギー[mJ]
	[vol%]	
30	データなし	非着火
50	データなし	非着火
80	1.0	8.53～9.10
	1.5	0.75～0.82
	2.0	0.19～0.20
	2.5	0.24～0.25
	3.0	1.63～1.73

4) まとめ

本研究では、高引火点液体ミストの着火特性を調査するために、常温下においてメディア径約 5 μm の灯油ミストの着火エネルギー測定を各種条件で実施した。また、比較のために蒸気状態の灯油の着火エネルギーも測定した。次のような結果が得られた。

- (1) 灯油ミストは、放電電極の間隔が 6 mm の場合には、爆発容器内のミスト濃度が 66.5 mg/L 以上(充填時間 5 s 以上)となると、インダクタンス挿入の有無に関わらず放電エネルギー 1 mJ で着火した。この濃度は、灯油蒸気の爆発下限界濃度 0.7 vol% を重量濃度に換算した値と概ね一致する。
- (2) 灯油ミストは、放電電極の間隔が 2 mm かつインダクタンス非挿入時は、放電エネルギー 10 mJ まで着火しなかった。一方で、電極間隔 2 mm かつインダクタンス挿入時及び、電極間隔 4 mm と 6 mm ではインダクタンス挿入の有無に関わらず 1 mJ で着火した。
- (3) 実験装置の限界により、1 mJ を下回る火花放電による測定はできなかったが、実験において 1 mJ での着火が確認されていることから、灯油ミストの実際の着火エネルギーは 1 mJ 以下と推定される。
- (4) 灯油蒸気は、引火点と同程度の温度 50℃までは放電エネルギー 120 mJ (試験装置の上限値)で

も着火しなかったが、80℃では濃度 1.0 vol%～3.0 vol%で着火が確認され、2.0 vol%において最小着火エネルギーが 0.19 mJ～0.20 mJ となった。

以上のように、灯油ミストについて、各種条件（ミスト濃度、放電電極間隔、インダクタンス挿入の有無）と着火エネルギーの関係を把握できた。また、灯油ミストと灯油蒸気、粉じんの着火特性に一部共通性が見られた。今後、同様の測定方法を用いて、灯油以外の高引火点液体についても着火特性の調査を行いたい。

3. 灯油ミストのブラシ放電による着火危険性の調査

1) まえがき

灯油や軽油等の高引火点の石油系炭化水素について、ミスト状態における常温下での着火エネルギーについては、約 1～200 mJ（粒径：約 5～100 μm）までの報告例がある¹¹⁻¹⁶⁾。筆者らは、同様に火花放電を着火源とする装置により、超音波でミスト化したメディアン径 (D_{50}) 約 5 μm の灯油が 1 mJ 以下で着火することを確認した²²⁾。

ブラシ放電の着火能力については、最小着火エネルギー 4 mJ 程度までの可燃性ガス・蒸気に対して着火源となることが知られており⁴⁾、最小着火エネルギーに着目すると高引火点引火性液体ミストについても着火源となり得ると考えられる。ただし、可燃性粉じんに対しては、最小着火エネルギーが 1 mJ 以下のものであっても、大気中での実験ではブラシ放電による着火は確認できていない^{23,24)}。可燃性ガス・蒸気・ミスト、可燃性粉じんの最小着火エネルギーは火花放電を着火源とした装置で測定されるため、火花放電のエネルギーが基準となった数値である。一方で、ブラシ放電は火花放電と比較して、空間的・時間的に大きく異なるエネルギー分布を示すため、各物質（ガス・蒸気、粉じん）に対する着火特性も火花放電とは異なる⁴⁾。このような火花放電とブラシ放電との間の着火特性の差は、ミストに対しても存在すると考えられることから、ブラシ放電によるミストの着火危険性を評価する際には、ブラシ放電を着火源とした実験が必要である。

そこで本研究では、国内外での災害事例⁸⁻¹⁰⁾がある灯油に着目し、常温下での灯油ミストのブラシ放電による着火危険性を調査した。実験では、背面に高電圧が印加可能な円板電極付き PTFE 平板と、その上方に所定の距離で固定された接地球電極との間で生じる模擬的なブラシ放電を着火源として、灯油ミストの着火の有無のほか、着火危険性と印加電圧との関係についても調査した。

2) 実験装置および方法

本実験では、液体試料としてケロシン（関東化学）を使用した。ケロシンミストの生成には、市販用の超音波式ミスト発生器（NE-U780, オムロン）を使用した。レーザー光式粒度分布測定装置（東日コンピュータアプリ

ケーションズ, LDSA-1400A) で測定したケロシンミストのメディアン径 (D_{50}) は 4.45 μm であった。さらに、ケロシンミストの MIE を筆者らの先行研究²²⁾と同様の方法で測定した結果、1 mJ（電極間隔 6 mm, インダクタンス非挿入, ミスト充填時間 10 s）で着火が確認されたことから、MIE は 1 mJ 以下と考えられる。

図 5 に、ブラシ放電を着火源とする実験装置を示す。本実験では、爆発容器（内径 200 mm, 高さ 250 mm, 厚さ 10 mm, 蓋は金属製）内にケロシンミストを満たした後、高圧電源（GT100, グリーンテクノ）により瞬時に充電された金属円板（直径 300 mm, 厚さ 2 mm）から発生する電界により、PTFE 平板（500 mm×500 mm, 厚さ 5 mm）表面と上方に固定された金属球電極（直径 40 mm）との間でブラシ放電を発生させ、着火の有無の確認および放電電荷量の測定をクーロンメータ（NK-1002A, 春日電機）で行った。各電圧における球電極と PTFE 平板間の距離は、100 mm (-105 kV), 85 mm (-95 kV), 70 mm (-85 kV), 55 mm (-75 kV) である。各電圧においてブラシ放電の発生が確認される最大距離に金属球電極を設置した。

実験時の室内環境は、温度 25℃, 相対湿度 59% であった。これらは実験期間中の平均値である。ケロシンの液温も室温と同程度であり、引火点 (40～75℃) を十分に下回る。

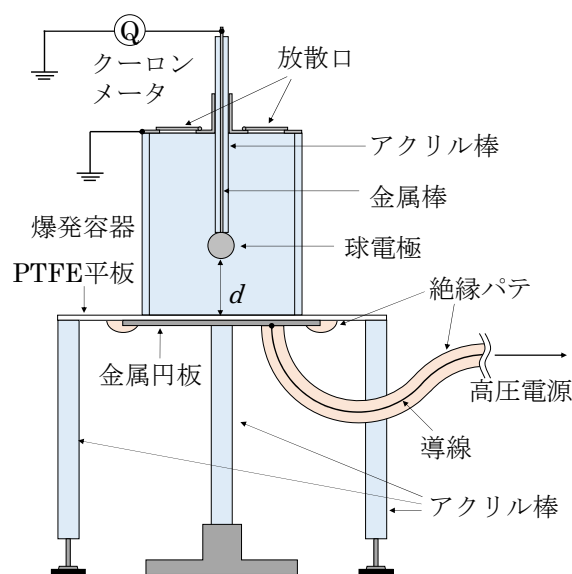


図 5 実験装置

3) 実験結果および考察

表 5 に、各印加電圧において、着火・非着火の回数および放電電荷量の測定結果を示す。これより、-105 kV では試行の半数以上、-95 kV, -75 kV でもそれぞれ 1 回の着火が確認された。今回の実験では -85 kV において着火が確認されなかったが、-75 kV でも着火が見られたことから、さらに試行を重ねれば着火する可能性はあると考えられる。また、本実験では検討していないが、より小さな印加電圧でも着火が起こる可能性は否定できない。

非着火時の放電電荷量は電圧に依存する傾向が見られるが、着火時の放電電荷量は著しく大きく、ほぼクーロンメータの測定上限値 (-9,999 nC) に達した。これは、火炎には導電性^{25,26)}があるため、ケロシンミストの着火により生じた火炎が導電路となり、さらなる放電が誘発されたことによると推測される。

少なくとも非着火時においては、ブラシ放電より放電電荷量が大きくなる火花放電や沿面放電の発生は視覚・聴覚的に認められなかった。

表 5 着火実験の結果

印加電圧 [kV]	着火		非着火	
	回数	電荷量[nC]	回数	電荷量[nC]
-105	6	-9,760±472	4	-1,592±143
-95	1	-9,781	9	-1,568±483
-85	0	データなし	10	-1,245±187
-75	1	-9,536	9	-789±175

4) まとめ

主な実験結果は以下の通りである。

- (1) 超音波式ミスト発生器で生成したケロシンミスト (MIE は 1 mJ 以下) が、ブラシ放電と見られる放電により着火することが確認された。
- (2) 着火回数および非着火時の放電電荷量は、金属円板の印加電圧に依存することを確認した。
- (3) 本実験における最小の印加電圧である -75 kV でも着火が確認されたことから、さらに小さな電圧でも着火する可能性がある。

以上の結果から、高電位に帯電した絶縁物表面から発生するブラシ放電により、MIE が 1 mJ 以下の高引火点引火性液体ミストが着火する可能性は、現状では否定できない。

4. おわりに

本研究では、高引火点引火性液体ミストの静電気放電による常温下での着火危険性を調査した。実験では、国内外で静電気放電によりミスト状態で着火したとされる火災事例もある灯油を液体試料とした。

まず、高引火点引火性液体ミストの着火エネルギー測定に関する先行研究を参照し、現時点で着火エネルギーが可能な限り小さくなると考えられる条件で測定を行った。その結果、メディアン径約 5 μm の灯油ミストの着火エネルギーが 1 mJ 以下となることが確認され、静電気放電のなかでも比較的エネルギーの小さいブラシ放電 (放電エネルギー: 最大 4 mJ 程度) により着火する可能性が示された。

次に、ブラシ放電による灯油ミストの着火危険性について調査した。実験では、外部電界により PTFE 平板と球電極間で発生する模擬的なブラシ放電を点火源とした。その結果、PTFE 平板背面の電極への印加電圧 -75 kV から着火が確認された。

以上の結果は、灯油ミストについて、常温下でも火花放電以外の静電気放電により着火する危険性があり、灯油等の高引火点引火性液体の取り扱い時において十分な災害防止対策を講じる必要性を示すものである。

弊所発行の静電気安全指針 (最新版は、静電気安全指針 2007) は、国内の多くの現場で静電気災害対策を講じる際の参考資料とされているが、高引火点引火性液体ミストの着火に関する記述は十分ではない。本指針の次回改訂の際には、本研究で得られた知見を基に追記を行い、安全指針としての強化を図りたい。

謝 辞

灯油ミストのブラシ放電による着火危険性の調査に関わる実験にあたり、職業能力開発総合大学校総合課程電気専攻仲山朝陽氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 総務省消防庁. 消防白書.
- 2) 総務省消防庁. 火災年報.
- 3) 労働安全衛生総合研究所. 静電気安全指針 2007. JNIOOSH-TR-NO.42. 2007.
- 4) International Electrotechnical Commission (IEC). IEC/TS 60079-32-1: 2013 Explosive atmospheres-Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance. 2013.
- 5) National Fire Protection Association. NFPA77 Recommended Practice on Static Electricity 2007 Edition. 2007.
- 6) 加藤勇. 石油類の静電気災害とその対策. 静電気学会誌. 1978; 21: 17-28.
- 7) 森田豊. 可燃性液体の帯電と災害対策. 安全工学. 1981; 20(6): 314-319.
- 8) タンクローリー全焼で 2 人死亡、整備工場の元社長を書類送検 消防への届けなく、器具も使用せず / 狭山署. 埼玉新聞. 2019 年 10 月 2 日.
https://www.saitama-np.co.jp/news/2019/10/02/03_.html (最終アクセス日 2023 年 7 月 27 日)
- 9) 炭谷不二男. 石油工場における静電気事故とその分析. 静電気学会誌. 1978; 21: 2-9.
- 10) R.C. Santon. Mist fires and explosions - an incident survey. Proc. IChemE Hazards XXI (Manchester, UK). 2009; 370-374.
- 11) 松井英憲, 大塚輝人. 可燃性ミストの最小着火エネルギーの測定. NIIS-SRR-No.17. 1999; 13-18.
- 12) 崔光石, 山隈瑞樹, 大澤敦. 静電気放電による噴霧液体の着火特性 (その 1). JNIOOSH-SRR-No.38. 2008; 23-29.
- 13) 西岡由紀子, 柏倉幸一郎, 新莊良一, 松村知, 駒宮功額. 油ミスト最小発火エネルギーの酸素濃度・温度依存性. 安全工学. 2000; 39(1): 19-23.

- 14) S. El-Zahlanieh, I. Souza Dos San, D. Brunello, B. Tribouilloy, C. Blanchard, C. Koenig, A. Vignes, O. Dufaud. Mist can explode, but still no standard! Proposal of a combustible sprays test method. Chem. Eng. Trans. 2022; 90: 79-84.
- 15) K.V.L. Rao and A.H. Lefebvre. Minimum ignition energies in flowing kerosine-air mixtures. Combust. Flame. 1976; 27: 1-20.
- 16) D.R. Ballal and A.H. Lefebvre. Ignition and flame quenching of flowing heterogeneous fuel-air mixtures. Combust. Flame. 1979; 35: 155-168.
- 17) International Labour Organization (ILO). 国際化学物質安全性カード(ICSCs). ICSC: 0663.
https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=j a&p_card_id=0663&p_version=2 (最終アクセス日 2023年7月27日)
- 18) 潤滑油協会. 石油製品の分子量.
<http://www.jalos.jp/jalos/qa/articles/002-350.htm> (最終アクセス日 2023年7月27日)
- 19) 日本粉体工業技術協会. 日本粉体工業技術協会規格. SAP 12-10-2010. 可燃性粉じん・空気混合気の最小着火エネルギー測定方法.
<http://appie.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/10/SAP12-10.pdf> (最終アクセス日 2023年7月27日)
- 20) M. Zhou, G. Li, J. Liang, H. Ding, Z. Zhang. Effect of ignition energy on the uncertainty in the determination of laminar flame speed using outwardly propagating spherical flames. Proc. Combust. Inst. 2019; 37 2: 1615-1622.
- 21) 石浜渉, 榎本兵治, 駒井武, 梅津実, 盧鑑章. 粉じん雲の着火エネルギーに関する研究 II—従来型火花放電発生装置による着火エネルギーの測定—. 安全工学. 1983; 22 1: 25-31.
- 22) 遠藤雄大, 崔光石. 灯油ミストの着火特性の調査. 安全工学. 2021; 60 3: 191-197.
- 23) M. Glor and K. Schwenzfeuer. Direct ignition tests with brush discharges. J. Electrostat. 2005; 63: 463-468.
- 24) 山隈瑞樹. 不導体からの静電気放電による着火性の検討. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告. JNIOOSH-SRR-NO.43. 2013; 25-30.
- 25) 小山健一, 関口忠. 燃焼火炎プラズマの導電率の測定. 電気学会雑誌. 1967; 87 945: 1145-1151.
- 26) 糸谷成章. 火災火炎の電気伝導. 消防研究所報告第 36 号. 1973; 13-17.