

液体の噴出帯電に起因する災害防止のための研究†

遠藤 雄大*1

液体の静電気帯電に起因する火災は多く発生しているが、静電気安全に関わる各種指針においても、この種の災害に関する記述は十分とはいえない。液体の静電気帯電現象に着目すると、液体がノズル等から噴出する際に発生する噴出帯電については、筆者の先行研究の結果から、液体の種類によっては、少量・短時間の噴出でも十分に火災の原因となり得ることが確認されているが、そのメカニズムについては十分に解明できておらず、帯電特性、帯電量低減方法などに関する知見は不足している状況にある。これまでに、筆者らは、噴出帯電量が液体の導電率やノズル材料等に依存することを確認してきたが、さらにメカニズムの解明を進めるために、本研究では、顕著な帯電性を示す酢酸エチルと類似の化学的構造を持つ他の酢酸エステルの帯電特性を調査するとともに、従来の対策が適用できない状況下で必要となる、噴出帯電量を強制的に低減する方法についても検討した。その結果、噴出帯電のメカニズムに関する新たな知見を得るとともに、提案する帯電量低減方法が導電率 10^{-6} S/m 程度までの導電性液体で有効であることを確認した。並行して、任意の液体とノズル材料における潜在的な帯電危険性を簡易的に評価可能な方法を開発し、その有効性を確認した。

キーワード: 静電気, 爆発・火災, 噴出帯電, 引火性液体

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(蒸気, ミスト)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、危険物施設での火災事故の中には、引火性液体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、この種の災害について、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いるとはいえず、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⁾, IEC/TS 60079-32-1⁴⁾, NFPA77⁵⁾)では完全にカバーできていない状況にある。

液体の静電気帯電現象のうち、配管内での流動時に起こる帯電(流動帯電)、攪拌時に起こる帯電などについては、過去に多くの研究が行われており、主に低導電性の液体が対象となることが確認されており、各種指針ではこれらの帯電現象に起因する災害の防止対策が重点的に

定められている。

一方で、液体がノズル等から噴出する際には、液体とノズルは互いに逆極性に帯電する。これは噴出帯電と呼ばれる静電気帯電現象である。ここで、使用するノズルや帯電液体を受ける容器が金属製でなおかつ非接地となる場合には、これらの電位が上昇し付近の導体との間で火花放電を起こし、周囲に可燃性混合気が存在すればこれを着火させ爆発・火災に至る可能性もある。実際に、噴出帯電が原因と考えられる危険物施設の火災事例はいくつか報告されている⁶⁻¹¹⁾。これらの事故の多くは、付近の金属製品を接地すれば防止可能であるが、そもそも噴出帯電の発生を予見できず適切な防止対策を講じなかったために発生していると考えられる。この背景には、噴出帯電量が危険なレベルに達する可能性のある液体の種類や、噴出条件等に関する知見が不足している状況があると推測される。したがって、同種災害を減らすためには、噴出帯電特性の解明が必要と考える。また、その一方で、筆者らも噴出帯電について研究を進めていくなかで、その解明が容易ではないことを実感しており、これと並行して噴出帯電の危険性を簡易的実験により評価する方法も必要であると考え。そこで本研究では、噴出帯電に起因する災害の防止を目的として、噴出帯電特性の調査および、簡易的な危険性評価方法の開発を行った。

2. 液体の噴出帯電特性の調査および帯電量低減方法に関する研究

1) まえがき

現在までに、液体の噴出帯電については、事故原因調査や防止対策提案等の目的で様々な研究がなされている¹²⁻¹⁹⁾。研究ごとに使用するノズルの形状や材質、噴霧時の液体圧力、液体試料等の条件は様々であるが、以下のようにある程度共通する噴出帯電特性が確認されている。

- ・水やアルコール等の高導電性の極性液体が大きく帯

† 本報の一部は、安全工学, 第61巻1号, pp.45-52, 2022, 労働安全衛生研究, 第15巻2号, pp. 137-142, 2022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

電し噴霧液体質量当たりの電荷量（比電荷）が数十 C/kg に達する¹²⁻¹⁴⁾。

- ・ 絶縁性液体においては、純粋な状態よりも、これらに粉体等の不溶性の異物が混入すると帯電量が著しく増加する^{15,16)}。
- ・ ノズル径が小さいほど帯電量は大きい^{14,17)}。
- ・ 噴霧時の液体圧力が高いほど大きく帯電する^{15,17)}。
- ・ ノズル材質に着目すると、polytetrafluoroethylene (PTFE) 製のノズル使用時に帯電量が大きい^{12,19)}。

筆者はこれまでに液体の導電率に着目し噴出帯電の特性を調査してきた^{20,21)}。実験では、低導電性液体（ミネラルスピリット）に市販の導電性添加剤（Statsafe3000, Innospec）を様々な比率で加えた液体試料（以下、混合液体と呼ぶ、導電率 $10^{-13} \sim 10^{-6}$ S/m）および、導電率の異なる 4 種類の純粋な液体（酢酸エチル、エタノール、水道水、*n*-ヘキサン）について、2 種類の 1 流体噴霧ノズル（PTFE 製、ステンレス製）を用いて噴出帯電量測定を行った。その結果、混合液体および 4 種類の液体について同様の導電率特性が確認され、噴出帯電量は 10^{-9} S/m \sim 10^{-7} S/m においてピークを示すとともに、ステンレス製ノズル使用時には 10^{-6} S/m 以上でも増加傾向が見られた。ただし、純粋な液体の帯電量は、同程度の導電率の混合液体と比較すると全体的に大きく、最大一桁程度の差が生じたことから、導電率は噴出帯電量を大きく左右する要素の一つではあるが、液体ごとの化学的構造その他の要因も影響すると推測された。IEC/TS 60079-32-1:2013⁴⁾においても酢酸エチルおよび酢酸イソプロピルのような酢酸エステル他、エーテル類、アセトンを除く高次のケトン類が大きく帯電することが指摘されており、やはり液体の化学的構造が帯電量にも影響するものと考えられる。

酢酸エチルは、筆者の先行研究^{8,21)}において噴出帯電量が特異的に大きくなる傾向が確認されているが、類似の化学的構造を持つ他の酢酸エステルについても、同様に噴出帯電量が大きくなる可能性がある。そこで本研究では、酢酸エステルの噴出帯電による危険性を調査するために、酢酸エチルと他 3 種の酢酸エステル（酢酸メチル、酢酸イソプロピル、酢酸ブチル）の噴出帯電量を測定し、静電気災害の危険性を評価した。

この研究に加え、絶縁性樹脂製器具の使用により接地による事故防止対策が取れない状況等を想定し、噴出帯電量そのものを低減する方法についても検討した。噴出帯電量の低減方法として筆者らは以前、先端に短管が装着されたボールバルブを操作して行う液体小分け作業時の噴出帯電量を低減するために、単管に緩和管を装着し液中の電荷を除去する方法を提案した⁸⁾。この方法は、液体がスプレー状に噴出されることを防止するため、用途によっては適さない。半導体デバイス洗浄工程等において問題となる純水の噴出帯電量を低減する方法として、ノズル前方に高電圧が印加された誘導電極を設置する方法²²⁾の有効性が確認されているが、酢酸エチル等の引火性のある中導電性液体への有効性については検討されて

いない。そこで本研究では、誘導電極からの放電による着火危険性を考慮し、より低電圧の印加でも効果が期待される、ノズルに誘導電極を装着する方法について帯電量低減効果を調査した。

2) 実験装置および方法

図 1 に実験装置の概要を示す。本装置は、液体加圧タンク内の各種液体試料を圧送してノズル（ステンレス製、PTFE 製の 2 種類）から噴霧し、これをノズル下方に設置されたファラデーケージで受け、噴出帯電により時間当たり発生する電荷量を電流としてエレクトロメータで測定するものである。また、各測定では、噴霧ノズル周囲に装着されたシート状電極に電圧を印加し、電流の変化を観察する（図 2）。実験に使用した液体試料の種類および各種物性値を表 1 に示す。実験では、ファラデー

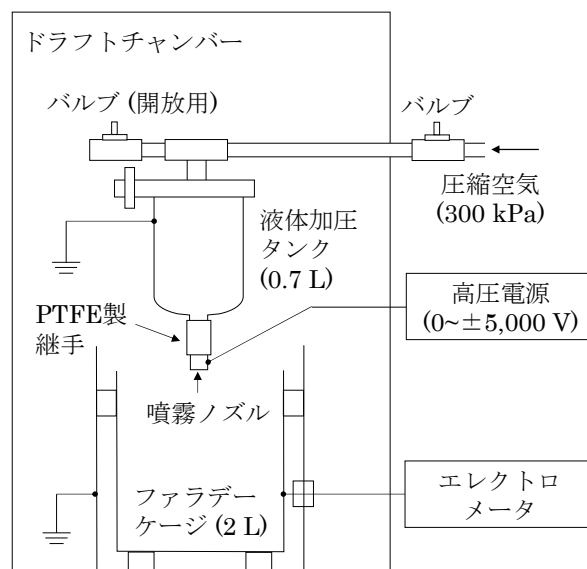


図 1 実験装置



(a) SUS303 製ノズル (b) PTFE 製ノズル

図 2 噴霧ノズル

表 1 液体試料

	導電率[S/m]	密度[kg/m ³]*
水道水	8.70×10^{-5}	997
イソブチルアルコール	3.07×10^{-6}	802
酢酸メチル	1.11×10^{-7}	932
酢酸イソプロピル	8.67×10^{-9}	902
酢酸エチル	7.55×10^{-9}	870
酢酸ブチル	2.82×10^{-9}	882

*SDS より

ケージで回収された液体の重量および噴霧時間を測定し、時間あたりの回収量[kg/s]を求め、これで平均電流[A=C/s]を除き、液体重量あたりの電荷量(比電荷) [C/kg]を算出した。

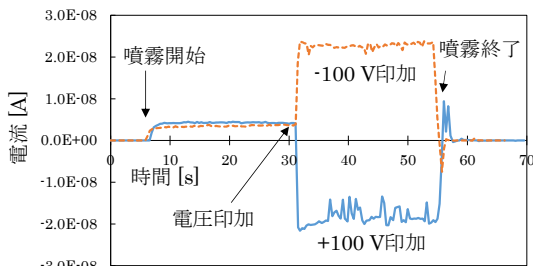
3) 実験結果および考察

表 2 に、全ての液体試料の電圧無印加時の平均比電荷を示す。これより、一部の液体を除き、ノズル材料により比電荷は顕著に変化し、PTFE ノズル使用時により大きくなる傾向が確認された。これは、従来知見とも一致する。4 種類の酢酸エステルの比電荷は、水道水、イソブチルアルコールと比較して顕著に大きく、5 C/kg 以上と噴出帯電量としては非常に大きい。ここで、4 種類の酢酸エステルの導電率は 10^{-9} S/m \sim 10^{-7} S/m であり、先行研究で確認された噴出帯電量がピークを示す導電率範囲に含まれるが、液体ごとに噴出帯電量には有意な差が生じた。特に、酢酸エチルと酢酸イソプロピルの導電率はほぼ同等であるため、帯電量に生じた 3 倍程度の差は液体の化学的構造に起因すると考えられる。

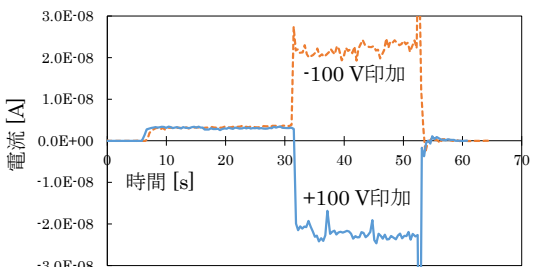
図 3 に、電圧印加時の測定データ(電流波形)の一例を示す。水道水については、電圧印加により電流が顕著

表 2 電圧無印加時の比電荷

	比電荷 [C/kg]	
	SUS ノズル	PTFE ノズル
水道水	0.296 \pm 0.0465	0.292 \pm 0.0658
イソブチルアルコール	0.0404 \pm 0.0155	1.31 \pm 0.232
酢酸メチル	12.5 \pm 1.27	14.5 \pm 2.40
酢酸イソプロピル	5.23 \pm 0.511	13.5 \pm 1.05
酢酸エチル	5.41 \pm 1.00	42.4 \pm 5.53
酢酸ブチル	5.70 \pm 1.38	5.35 \pm 0.727



(a) SUS ノズル

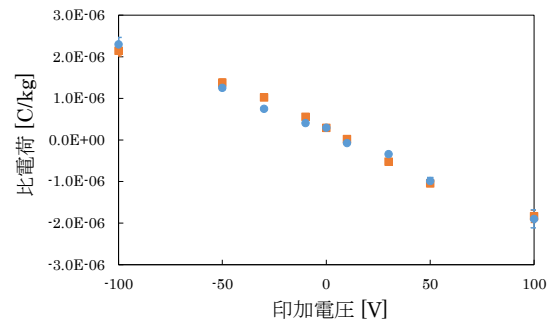


(b) PTFE ノズル

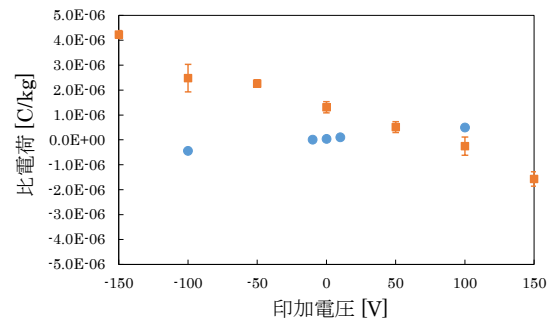
図 3 水道水噴霧時の電流波形の一例

に変化し、電流の変化は印加電圧とは逆極性であることが確認できる(図 3(a),(b)).

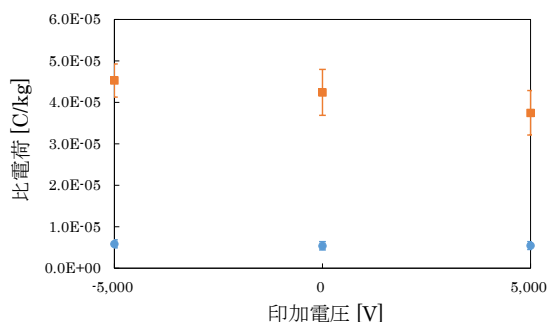
図 4 に、水道水、イソブチルアルコール、酢酸エチルについて、比電荷と印加電圧の関係を示す。水道水、イソブチルアルコールについては、電圧印加により比電荷に顕著な変化が見られ、イソブチルアルコール \times SUS を除き、比電荷が印加電圧と逆極性に直線的な変化を示した(図 4(a),(b)). 現状、電圧印加による比電荷変化時の極性の関係については十分な考察はできていないが、これらの液体については全ての条件で、 ± 100 V 以下の印加電圧において比電荷 0 C/kg と交差するように変化しており、提案方法により噴出帯電量を十分に低減可能と考えられる。一方で、酢酸エチルについては、 $\pm 5,000$ V を印加しても顕著な比電荷の変化は見られなかったことから、提案方法は適用できないと考えられる(図 4(c)).



(a) 水道水



(b) イソブチルアルコール



(c) 酢酸エチル

図 4 比電荷と印加電圧の関係(●:SUS ノズル, ■:PTFE ノズル)

4) まとめ

本研究では、4 種類の酢酸エステルの噴出帯電量を測定し静電気災害の危険性を評価するとともに、噴霧ノズ

ル周囲に装着したシート状電極への電圧印加による噴出帯電量低減方法について検討した。その結果は下記の通りである。

- (1) 4種類の酢酸エステルの電圧無印加時の噴出帯電量は全て 5 C/kg 以上となり、少量の噴霧でも静電気放電による着火を引き起こす危険性がある。これは、筆者の先行研究で得られた各種液体の噴出帯電量と比較しても大きい。
- (2) 酢酸エチルと酢酸イソプロピルの導電率は同程度であるが、両者の帯電量を比較すると酢酸エチルが3倍程度大きくなった。この差は、液体の化学的構造によるものと考えられる。
- (3) 水道水とイソブチルアルコールについては、電圧印加により噴出帯電量が顕著に変化し、±100 V 以下の低電圧で帯電量を 0 にすることも可能であることを確認した。
- (4) 酢酸エステル4種類については、±5,000 V までの電圧印加により噴出帯電量に顕著な変化は見られなかった。このような液体については、別の噴出帯電量低減方法を検討する必要がある。

3. 簡易的な噴出帯電の危険性評価方法の開発

1) まえがき

ここまでの研究により、噴出帯電の危険性が液体の種類や配管（ノズル）材料に強く依存し、一部の液体を除くと、ステンレス製ノズルと比較して PTFE 製ノズル使用時に帯電量がより大きくなる傾向が確認された^{20,21,23}。ただし、そのメカニズム解明は不十分であり、これらの化学的・物理的性質からその危険性を評価できる段階には至っていない。また、ノズルには上述2種類以外にも様々な材料が使用されているが、そのほとんどについては現状では未検討である。

産業の現場では、無数の種類の液体が使用されることから、適切な安全対策を講じるために、使用する液体および配管材料の組み合わせについて噴出帯電の危険性を事前に把握することが重要となる。しかしながら、上述の通り、噴出帯電量と液体の種類やノズル材料との関係については測定データおよび知見が不足しており、これらの情報のみから帯電危険性を事前に予見することはできない。したがって、現状では、液体とノズル材料の組み合わせごとの帯電危険性を評価するためには、実際に液体をノズルから噴出させ、帯電量を測定する必要がある。一方で、このような方法は、筆者の経験上、実験装置の構築や測定作業に要する労力が大きく、安定した測定結果を得るためには液体試料を多量に消費する必要がある。安全性や経済性の面においても容易とはいえない。また、現場の作業者が操作時に流量等の設定を誤った場合や、配管の破損による漏洩時には、通常使用時よりも大きく噴出帯電する可能性があるため、このような事態も想定し、より帯電量が大きくなる悪条件での帯電危険性評価が必要である。

そこで本研究では、任意の液体とノズル材料の組み合わせについて、潜在的な噴出帯電危険性を簡便に評価する方法を提案する。これは、ノズルを模した平板状の材料片上に滴下された少量の液体試料を、高压のエアブローガンで瞬間的に吹き飛ばし、その前後の材料片の電荷量を測定するもので、噴出時に液体がノズルから分離して液滴化する状況を、より単純化して再現したものである。液体の帯電現象の多くは、配管や容器等の固体と液体との接触界面において液中のイオンや双極子が電気二重層²⁴⁾を形成し、その付近において電荷の極性に空間的な偏りが生じることに基づくと考えられる。噴出帯電の詳細なメカニズムは現在までに解明されていないが、電気二重層を形成するノズルと液体の接触界面付近から、正負どちらか一方の電荷がより多く含まれる液滴が分離することで生じると仮定できる。したがって、実際に液体をノズルから噴出させずとも、提案方法のように液体を材料片表面から分離させることで、噴出帯電と同様の帯電現象が起これると考えられる。

本研究では、提案する噴出帯電危険性評価方法により8種類の液体試料および3種類の材料片の各組み合わせで帯電量測定を行い、組み合わせごとの帯電性の差を明確に確認できるか、また、今回得られた測定値が、先行研究の測定値（噴霧ノズル使用）^{20,21,23)}と比較して著しく小さくなり、危険性を過小評価する恐れがないか調査した。

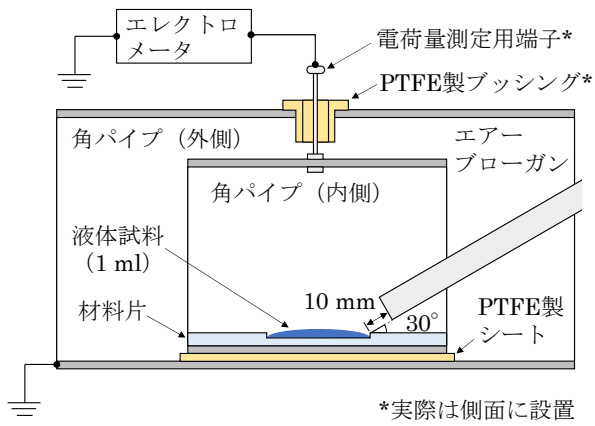
2) 実験装置および方法

図5に実験装置を示す。実験装置は、角パイプ型フレアケーシング、3種類（SUS304, PTFE, MC ナイロン）の平板状材料片、エアブローガン、エレクトロメータから構成される。実験では、液体試料 1 ml を材料片中央の凹みに滴下した後、エアブローガンで液体を吹き飛ばし、その前後の材料片の電荷量をエレクトロメータで測定した。実験に使用した液体試料の物性値を表3に示す。

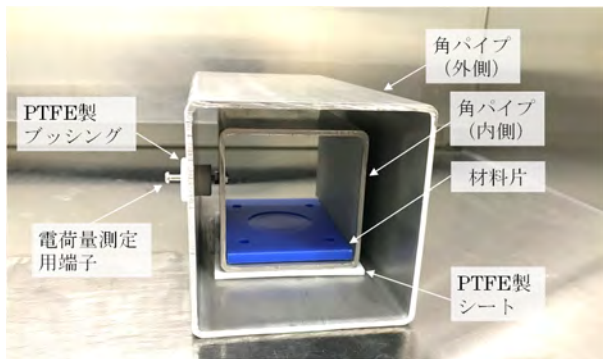
3) 測定結果および考察

図6に、エアブローガンに供給される圧縮空気の圧力ごとの測定結果を示す。図6(a)は 0.2 MPa、図6(b)は 0.4 MPa の圧縮空気でブローした結果である。これらは、液体と材料片の各組み合わせについて、液体 1 g あたりの電荷量（比電荷）を示している。

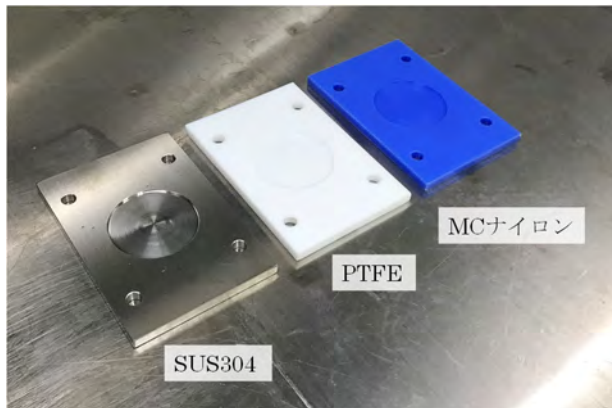
ブロー時の圧力が帯電量に与える影響に着目すると、水道水×PTFE を除く全ての組み合わせにおいて、0.4 MPa における帯電量は 0.2 MPa と比較して顕著に大きく、一部の組み合わせでは1桁程度の差が生じた。ノズルからの噴出時においても同様に、液体に印加する圧力が高いほど帯電量が大きくなることが確認されている^{20,21)}。これは、ノズル等からの液体の分離に用いる液圧や風圧が高いほど、液滴の分離に要する時間が短くなることで電荷緩和の影響も小さくなり、液体中の電荷の偏りがより多く維持されるためと考えられる。一方で、水



(a) 実験装置概観



(b) 角パイプ型ファラデーケージおよび材料片



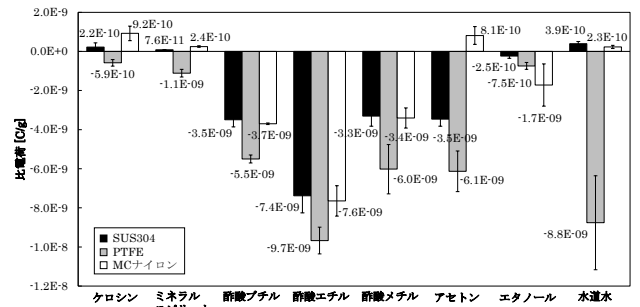
(c) 平板状材料片 (3種類)

図5 実験装置

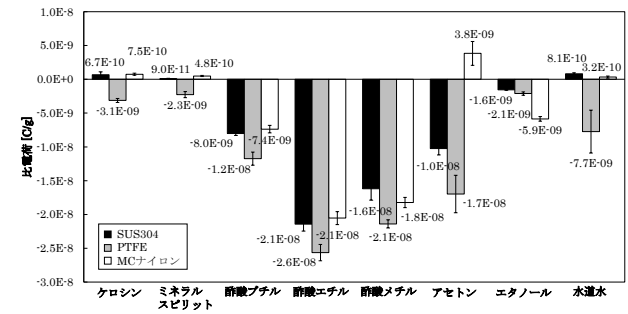
表3 液体試料の物性値

液体	導電率 [S/m]	密度 [g/cm ³]*
ケロシン	1.78×10^{-12}	0.75~0.81
ミネラルスピリット	2.89×10^{-12}	0.79
酢酸ブチル	1.33×10^{-9}	0.878~0.883
酢酸エチル	9.88×10^{-9}	0.898~0.902
酢酸メチル	7.65×10^{-8}	0.930~0.935
アセトン	8.83×10^{-7}	0.789~0.792
エタノール	9.71×10^{-6}	0.789~0.791
水道水	2.81×10^{-5}	0.997

* SDS 記載の数値 (水道水を除く)



(a) 0.2 MPa



(b) 0.4 MPa

図6 測定結果

水道水×PTFEについては、他の組み合わせとは反対に、0.2 MPaでブローした場合の帯電の方が大きくなった。水のような有極性液体では、ノズル等の固体からの分離の他、空気との界面付近から液滴が分裂する際にも帯電（分裂帯電）が起こり、微小な液滴は負に帯電することが知られている²⁵⁾。ブロー後に液体が材料片に残る場合には、本研究で対象とする材料片から液体が分離する際の帯電と分裂帯電が同時に起こると考えられる。したがって、風圧が低く液体が残りやすい0.2 MPaでブローした場合の方が、0.4 MPaよりも帯電量が大きくなったと考えられる。なお、水道水について再測定を行った際、材料片をアセトンで洗浄したところ、水道水×PTFEの帯電量について、0.2 MPaでは当初の測定結果(図6(a))とほとんど差はなかったが、0.4 MPaでは図6(b)の結果から大きく増加し、酢酸エチル×PTFEと同程度 (-2.6×10^{-8} C/g) となった。水道水と他の材料片のほか、酢酸エチルとエタノールについても同様の再測定を実施したが、これらについては測定結果に大きな変化は見られなかった。水道水×PTFEについて、再測定時に帯電量が顕著に変化した原因は不明であるが、他の組み合わせと比較して、帯電量が測定時の材料片の表面状態等の条件により強く依存する可能性がある。

表4に本実験の測定結果の最大値および、比較のためにノズル使用時の噴出帯電量の従来データを示す。ただし、一部の液体およびMCナイロン製ノズルについては、先行研究では対象外のため従来データはない。本実験結果と従来データを比較して、概ね同様の帯電特性が確認でき、また、一部の条件を除き比電荷の値も同等以上となることから、本実験の方法によりノズル使用時の噴出帯電を概ね再現できており、噴出帯電の危険性を妥当に

表4 測定結果および従来データ

液体	本研究における材料片の帯電量[C/g]			先行研究 ^{20,21,23)} におけるノズルの帯電量[C/g]	
	SUS304	PTFE	MC ナイロン	SUS303	PTFE
ケロシン	6.7e-10	-5.9e-10	9.2e-10	データなし	データなし
ミネラルスピリット	9.0e-11	-2.3e-9	4.8e-10	7.1e-13	-3.0e-12
酢酸ブチル	-8.0e-9	-1.2e-8	-7.4e-9	-5.7e-9	-5.4e-9
酢酸エチル	-2.1e-8	-2.6e-8	-2.1e-8	-5.4e-9～ -5.8e-10	-4.2e-8～ -1.3e-9
酢酸メチル	-1.6e-8	-2.1e-8	-1.8e-8	-1.3e-8	-1.5e-8
アセトン	-1.0e-8	-1.7e-8	3.8e-9	データなし	データなし
エタノール	-1.6e-9	-2.1e-9	-5.9e-9	3.4e-9	8.9e-10
水道水	8.1e-10	-8.8e-9	3.2e-10	-4.1e-10～ -3.0e-10	-3.5e-10～ -2.9e-10

評価可能と考えられる。一方で、酢酸エチル×PTFE およびエタノール×SUS のように、本研究の測定値が先行研究の測定値を若干下回る組み合わせも見られたことから、一部の組み合わせについては、提案方法により帯電危険性を過小評価する可能性もある。

提案方法とノズル噴出との間において、帯電量や帯電極性に顕著な差異が生じる組み合わせについては、まずその原因を明らかにする必要がある。そのうえで、提案方法の適用範囲も制限することを検討する必要がある。

4) まとめ

本研究では、ノズル使用時の液体の噴出帯電について、帯電量が液体とノズル材料の組み合わせに強く依存することに着目し、任意の組み合わせにおける帯電危険性を簡便に評価できる実験方法を提案し、液体と材料の各種組み合わせについてその有用性を検証した。

その結果、提案方法で得られた帯電量は、組み合わせごとに顕著な差を生じ、ノズル使用時の噴出帯電に関する先行研究^{20,21,23)}で確認された帯電特性と一致する傾向を示した。また、比較可能な組み合わせについて、本研究と筆者の先行研究で得られた帯電量を比較したところ、一部の組み合わせを除き、本研究で得られた帯電量は、先行研究で得られた帯電量と同等以上であった。

以上の結果から、提案方法により、ノズル使用時の噴出帯電を簡便に再現でき、各組み合わせでの帯電危険性を良好に評価可能と考えられる。

一方で、一部の組み合わせについては、帯電量や帯電極性に顕著な差異が生じたことから、提案方法により帯電危険性を過小評価する可能性もあるため、差異が生じる原因を明らかにするとともに、提案方法の適用範囲について検討する必要がある。

4. おわりに

本研究では、液体の噴出帯電に起因する災害の防止を目的として、噴出帯電特性の調査および、簡易的な危険性評価方法の開発を行った。

前者の研究の結果、酢酸エステル類の噴出帯電量が他の液体と比較して顕著に大きくなることが確認されたことから、これまでの研究から得られた知見と合わせて、噴出帯電の強さは、液体の導電率、ノズル材料、流速に加えて、さらに液体の何らかの化学的構造にも依存することが明らかになった。ただし、その詳細なメカニズムの解明については今後の課題としたい。また、噴出帯電量の低減方法についても検討した結果、提案手法により導電率 10^{-6} S/m 程度までの導電性の液体については低減効果が得られたが、より低導電率の酢酸エステル類では効果が見られなかったことから、別の方法を検討する必要がある。

後者の研究の結果、提案方法により、実際に液体をノズルから噴出した場合と同様の帯電特性が確認され、帯電量のレベルも同等以上となることが確認されたことから、本方法により、任意の液体とノズル材料における噴出帯電の潜在的危険性を把握することができると考えられる。今後は、本方法を用いて様々な液体とノズル材料との組み合わせについて評価を行い、帯電危険性に関する知見の収集を進めたい。

本研究で得られた噴出帯電特性に関する知見や、簡易的評価方法を活用することで、液体取り扱い設備における噴出帯電の危険性を把握し、適切な災害防止対策を講じることができるようになると考えられる。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、噴出帯電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。

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) 静電気学会編. 静電気ハンドブック. オーム社. 1988; 352.
- 7) U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Case Study: Static Spark Ignites Flammable Liquid during Portable Tank Filling Operation. No. 2008-02-1-IA (Sep. 2008). 2008.

- 8) 遠藤雄大, 山隈瑞樹. 有機溶剤の取扱いにおける静電気危険性に関する研究 —ボールバルブからの液体小分け時の電荷量測定および電荷軽減策の検討—. 安全工学. 2017; 56 5: 362-373.
- 9) 職場のあんぜんサイト. ヒヤリハット事例. 洗浄剤の n-ヘキサンに引火し火炎放射状になった.
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/hiyari/hiy_0214.html (最終アクセス日 2023 年 7 月 27 日)
- 10) 一般財団法人 消防防災科学センター. 消防防災博物館. 火災・事故防止に資する防災情報データベース. 蒸発釜からのシンナー廃液を抜き取り中の出火.
<https://www.bousaihaku.com/wp/wp-content/uploads/2017/04/010009008.pdf>(最終アクセス日 2023 年 7 月 27 日)
- 11) 失敗知識データベース. 振動によりフランジがゆるんで漏洩したことによる合成ゴムプラントの火災.
<http://www.shippai.org/fkd/cf/CC0200084.html> (最終アクセス日 2023 年 7 月 27 日)
- 12) 藤林宏一, 村崎憲雄, 松井満, 鈴木靖雄. 絶縁物製ノズルによる水の噴霧帯電. 電気学会論文誌 A. 1986; 106 7: 339-344.
- 13) 田島泰幸, 児玉勉, 大澤敦. 噴霧による液体の帯電特性. NIIS-SRR-No.17. 1999; 59-63.
- 14) 山隈瑞樹. スプレー缶噴霧時の帯電危険性—非破壊検査用スプレー缶を中心として—. 安全工学. 2004; 43 4: 229-237.
- 15) L. Post, M. Glor, G. Luttgens, B. Maurer. The avoidance of ignition hazards due to electrostatic charges occurring during the spraying of liquids under high pressure. J. Electrostat. 1988; 23: 99-109.
- 16) 山隈瑞樹, 水谷高彰, 山内章, 清水康雄. 安全弁の作動に伴う液体噴出時の静電気測定. 労働安全衛生研究. 2013; 6 2: 49-57.
- 17) 大澤敦. 高圧水噴霧中の空間電荷密度の測定. JNIOSH-SRR-No.38. 2008; 17-21.
- 18) 梅津勇, 浅野和俊. 噴出液体の帯電と流れに関する一考察. 静電気学会誌. 1985; 9 4: 262-270.
- 19) 崔光石. 液体漏洩噴出時の静電気による着火危険性. 労働安全衛生研究. 2008; 1 1: 73-76.
- 20) 遠藤雄大. 可燃性溶剤の噴霧帯電量と導電率の関係. 安全工学. 2020; 59 3: 175-183.
- 21) 遠藤雄大. 酢酸エチルの噴霧帯電量と噴霧条件の関係. 安全工学. 2020; 59 5: 296-307.
- 22) 清家善之. 環境を配慮した半導体デバイス洗浄プロセスにおける静電気障害防止技術の確立. 財団法人 日比科学技術振興財団 平成 29 年度 研究報告書. 2017; 123-129.
- 23) 遠藤雄大. 酢酸エステルの噴霧帯電量測定と帯電防止方法の検討. 安全工学. 2022; 61 1: 45-52.
- 24) 駒形作次. 界面電気化学概要. 昭晃堂. 1948; 26-42.
- 25) 浅野和俊. 純水・超純水の噴霧・接触・流動帯電とその制御. 電気学会論文誌 D. 1988; 108 4: 362-368.