

化学プラントにおける静電気災害・障害の発生機構の解明と対策—有機溶剤の小分け作業時における静電気危険性と対策—†

山隈 瑞樹*1, 遠藤 雄大*1,

化学プラント等においては、ホース等を使って有機溶剤を小分けする際に、静電気放電で着火したと推定される火災・爆発事故事例が多い。本研究では、過去の災害事例を参考にホースとボールバルブからなる液体流動・噴出実験装置を構築し、酢酸エチルを含む数種類の有機溶剤について静電気帯電量の測定を行うとともに、根本的な静電気対策を検討した。その結果、バルブでの液滴生成時の噴出帯電が支配的であり、発生電荷は溶剤の導電率によって変化し、 10^{-8} S/m 付近でピークを示す傾向が得られた。例えば、酢酸エチル (1.8×10^{-8} S/m) の電荷は他の溶剤よりも顕著に大きな値を示し、ごくわずかな放出量 (100 g 程度) でも着火を引き起こす静電エネルギーレベルに達することが判明した。また、ノズルの先端を小口径にしてバルブ内部を完全に液体で満たすことによって放出時の液滴発生を抑制することにより、電荷をほぼ安全なレベルにまで低減できることを明らかとした。

キーワード: ボールバルブ, 有機溶剤, 酢酸エチル, 小分け作業, 噴出帯電

1 はじめに

化学プラント等では、生産プロセスにおいて多種・多量の有機溶剤が使用されている。有機溶剤は、一般に引火性が高く、気化して可燃性混合気を広汎に形成するので、付近に着火源が存在すれば爆発や火災となる可能性が高い物質である。したがって、法令、指針等で規制を設け、更に現場ごとに作業手順を定め安全な取扱い方法を指示しているにもかかわらず、しばしば爆発・火災が発生している。例えば、消防白書¹⁾によれば、平成 18～27 年の 10 年間に発生した危険物施設における火災 (爆発を含む) 1,902 件において、出火原因物質として第 4 類危険物 (引火性液体) が過半数 (1,035 件) を占め、着火原因の 2 割程度 (340 件) を静電気火花が占めている。このような災害は、もちろん、関係する法令・指針または作業手順書等を遵守することによってほとんどは未然防止が可能であるが、現実にはハザードの見落としや対策の不完全さがあり、そのため近年においても静電気着火事故がコンスタントに生じていると考えられる。

これに関連して、筆者等が最近注目しているのは、産業現場から特定の有機溶剤、特に酢酸エチルを、ホースを使って小分けする際に静電気放電が原因となったと推定される火災の相談が増えていることである。ある事例では、酢酸エチルの小分け作業時に、ボールバルブを開けて金属容器に注入を開始した直後に突然発火した。このときの注入量は 100 g 程度であったので、酢酸エチルの最小着火エネルギーからみて、電荷量は数 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 程度という高いレベルにあったと推定される。

一般に、ホースおよびバルブで別の容器等へ溶剤を小分けする際には、ホースを液体が流れるときの流動帯電現象、および末端からミスト状で噴出するときの分裂帯電現象 (噴霧帯電) によって静電気が発生することが知

られており、多くの報告がある^{2,3,4,5)}。それらによれば、液体の導電率と帯電量にある程度のある関係があること (例えば、不導体の領域 ($> 10^{-11}$ S/m) では、導体の領域 ($< 10^{-8}$ S/m) よりも明らかに電荷量が小さい⁵⁾) が示されているが、特定の溶剤、特に酢酸エチルまたはそれと同程度の導電率の液体の帯電量の危険性には言及していない。一方、文献⁶⁾には酢酸エチル等の特定の溶剤について、帯電量が多いことが記載されているが、対象となる工程や発生電荷量については具体的には示されていない。

このような背景から、我々は、小分け作業において、液体が液滴となって噴出する際の静電気による発火現象を解明するために、ホースとボールバルブからなる液体流動・噴出実験装置を構築し、酢酸エチル以外にも一般的に使用されている液体試料を用いて、静電気帯電量の測定を行った。また、根本的な静電気リスク軽減の目的で、小分け作業時の電荷を低減できるノズルの構造についても実験的検討を行った。その結果、酢酸エチルおよびこれと同等の導電率を有する液体において、他の液体試料と比較して極めて大きな帯電性を示し、容易に着火を生じる程度の電荷密度に達するなどの興味深い実験結果が得られるとともに、液滴の生成を抑制することにより、電荷密度を実用レベルで低減できるノズルの原理的構造を明らかにできた。

2 実験

1) 実験装置

図 1 に、液体小分け時の電荷を測定するための実験装置の構成を示す。本装置は、液体試料を充填する耐圧容器 (耐圧 1 MPa, 内容積 28 L)、液体を流動輸送するステンレス鋼 (SUS304) 製フレキシブルホース (内径 23 mm, 長さ 2 m。内面が無加工のものおよび内面にポリテトラフルオロエチレン (PTFE) をライニングしたものの 2 種類使用。以下、ホースという。)、ホース先端に装着する

*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*1

E-mail: y.endo@s.jniosh.johas.go.jp

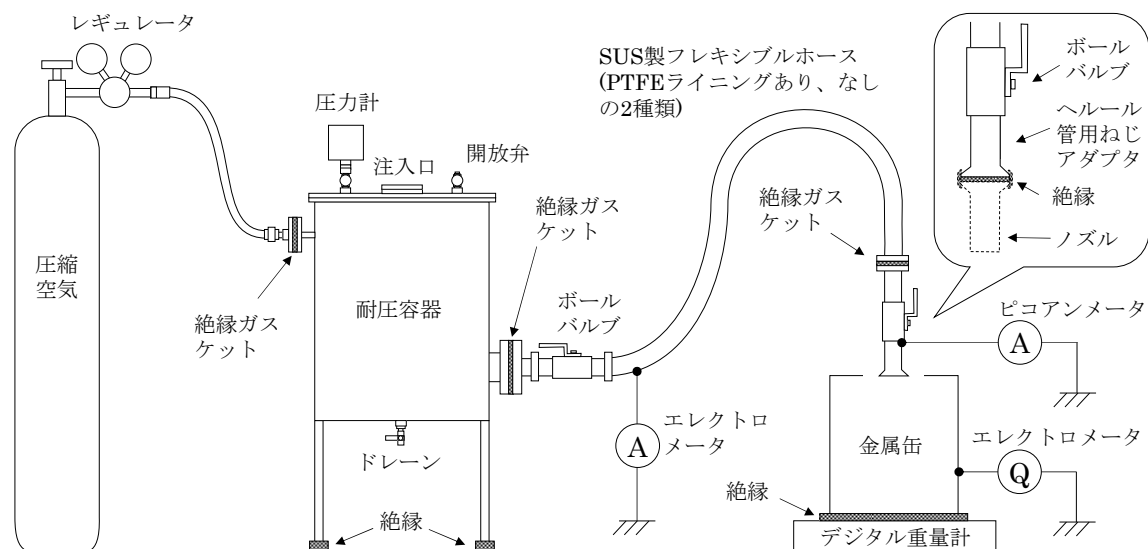


図1 実験装置

表1 液体試料

No.	液体試料	導電率 (S/m)	比誘電率 ⁷⁾	緩和時定数 (s)	比重 (kg/m ³)
1	トルエン	4.9×10^{-12} (7.0 °C)	2.38	4.3	860 ⁸⁾
2	酢酸エチル	1.8×10^{-8} (8.2 °C)	6.02	2.9×10^{-3}	900 ⁸⁾
3	混合液体 (アセトン/トルエン: 20/80)	2.1×10^{-8} (6.5 °C)	データなし	データなし	データなし
4	アセトン	2.3×10^{-6} (7.4 °C)	20.7	8.1×10^{-5}	790 ⁸⁾
5	メタノール	3.3×10^{-6} (6.3 °C)	32.7	8.9×10^{-5}	790 ⁸⁾
6	精製水	2.0×10^{-5} (8.0 °C)	80.4	3.6×10^{-5}	998 ⁹⁾

ボールバルブ、噴出された液体を収容する金属容器（内径 390 mm、深さ 390 mm、有効容積 45 L）などからなる。現場での通常の使用方法を勘案し、ボールバルブ先端には SUS 製ヘルール管用ねじアダプタ（内径 23 mm、長さ 50 mm、以下、アダプタという）を装着した状態を標準条件として実験を行った。この時、バルブの弁体（ボール）からアダプタの吐出口までの距離は 56 mm である。以下、特に説明のない限り、ボールバルブとアダプタとの一式をバルブという。

耐圧容器内に空気ボンベから圧縮空気を供給して加圧しておき、バルブを開放することで液体試料が流動・噴出するようにした。バルブの開度を変化して、液体の時間あたりの吐出量（以下、噴出量という）を調節した。

ホースおよびバルブには、そこで発生する微小な静電気電流を測定するため、ピコアンメータ (Keithley, 6485/J)

およびエレクトロメータ（同 6514/J）をそれぞれ接続した。また、金属容器には、噴出した液体の電荷量を測定するために、エレクトロメータ (Keithley, 6517A) を接続した。

なお、標準実験条件では、ホースおよびバルブは絶縁状態としており、各部で発生した静電気はそれぞれ区別して測定される。しかしながら、液体試料の導電性が大きい ($>1 \times 10^{-7}$ S/m) 場合には、液体により各部に接続された電流計間が導通するため、どの部位で静電気が発生したのか明確に区別できなくなることがわかった。そこで、このような場合には、ホースに接続されたピコアンメータを取り外すと同時に、ホースとボールバルブとの間をジャンパ線でボンディングし、両部位の総合的な帯電量として測定した。

バルブから金属容器に注入される液体の質量は、デジタル重量計 (A&D, GP-100KS) で連続測定した。

2) 液体試料

表 1 に、今回の実験に使用した 6 種類の液体試料を示す。このうち混合液は、酢酸エチルに近い導電率となるように、アセトン (20 vol%) とトルエン (80 vol%) を混合したものである。同表中、導電率(conductivity)は実測値 (1 V 印加による 1 分値) であり、文献⁷⁾に示される液体用電極およびエレクトロメータ (Keithley, 6517A) を用いて測定した。比誘電率および比重は文献値^{7,8,9)}である。また、これらの値から次式により液体の緩和時定数を求めた。

$$\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{\kappa} \quad (1)$$

ここで、 τ は緩和時定数(s)、 κ は導電率(S/m)、 ϵ_0 は真空の誘電率(8.85×10^{-12} F/m)および ϵ_s は比誘電率である。

なお、緩和時定数は物質の帯電性を示す指標の一つであり、接地していれば、 τ の値が小さいほど電荷はより短時間でアースに流れて消滅する。

3) 実験方法

本研究では、耐圧容器に液体試料を充填後、圧縮空気により容器内 500 kPa (ゲージ圧) に保ちながら、バルブ (ノズルなしまたは各種ノズル装着) から噴出させた。このとき、バルブの開度は“小”、“中”および“大”の三段階に定めた。そのときの流量は、概ね 10~15 g/s, 30~100 g/s および 200~400 g/s であった。なお、バルブ全開時の角度 90°に対して、開度“小”は 20°、“中”は 25°、“大”は 30°程度であった。噴出時間は、“小”および“中”では 30 s, また“大”では 10 s を標準実験条件とした。

本研究では、液体試料の帯電特性を、液体の比電荷 (単位質量当たり電荷量) (C/kg) で評価することとした。ホース内の流動およびバルブからの噴出の際に帯電した液体の比電荷は、液体を収容した金属容器の電荷量と液体重量から求められる。これらには、次の関係が成り立つ。

$$Q_h = \int_0^T i_h dt \quad (2)$$

$$Q_v = \int_0^T i_v dt \quad (3)$$

$$Q_s = Q_h + Q_v = -Q_l \quad (4)$$

$$q_l = \frac{Q_l}{M} \quad (5)$$

ここで、式(2)の Q_h および i_h はホースで発生する電荷 (C) および電流 (A) であり、式(3)の Q_v および i_v はバルブで発生する電荷 (C) および電流 (A) である。 T は液体噴出時間 (s) である。各部で測定される電流を液体噴出時間にわたって積分した値は、各部で発生した電荷と等しくなることを示している。式(4)の Q_s はホース・バルブで発生する総電荷 (C)、 Q_l は金属容器に収容された液体の電荷 (C) である。式(5)の q_l は比電荷 (C/kg)、 M は噴出した液体の質量 (kg) である。

4) 安全衛生上の配慮

本研究では引火性が高く、かつ、毒性のある有機溶剤を大量に取り扱うため、安全衛生面では特に慎重に対策を講じた。実験装置は耐火性のある建屋に設置し、可燃性蒸気が滞留しないように局所排気装置を動作しながら実験を行った。蒸気濃度は、防爆形 PID 式 VOC 濃度計 (Ion Science Ltd, PhoCheck TIGER) を用いて常時監視し、爆発下限界未満であることの確認を行った。また、静電気対策として、周辺の装置類は全て接地またはボンディングし、かつ、実験担当者には、帯電防止服および静電靴を着用させた。さらに、中毒防止のため、必要に応じて有機溶剤用防毒マスクを装着させた。当然、万一、爆発・火災が発生した場合に備えて、初期消火、避難路の確保、通報体制等についても入念に事前打合せを行った。

実験時の気温、相対湿度はそれぞれ、 $7.3 \pm 1.1^\circ\text{C}$, $48 \pm 11\%$ であった。

3 実験結果および考察

1) 液体小分け中の帯電特性

図 2 に、液体試料として酢酸エチルを用いて噴出した場合に、バルブにおいて発生した静電気の電流の典型例を示す。バルブの開度が大きい (流量が大きい) ほど、発生電流も大きいことがわかる。特に、“大”においては最大 1.4 μA に達したが、これは各種噴霧装置 (塗装機、スプレー缶) において観測された噴霧電流 (最大 300 nA) の数倍であり¹⁰⁾、産業現場で観測される静電気帯電に伴う電流としてはかなり大きい部類に入ると思われる。

図 3 に、液体試料ごとの比電荷と噴出量の関係を示す。ここでは、通常の SUS 製ホース (以下、SUS ホースという) を使用した場合の測定結果に加えて、内側が PTFE でライニングされたホース (以下、PTFE ホースという) を使用した場合の測定結果も示す。

図 3(a) からは、酢酸エチルの比電荷が最も大きいことが確認できる。ほとんど全ての条件において、比電荷は 4 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 以上であり、特に、流量が小さい場合には 6 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 以上が観測されている。もし、接地されていない金属容器 (静電容量を 100 pF とする) に対して 4 $\mu\text{C}/\text{kg}$ の酢酸エチルを 100 g 充填したとすると、金属容器の電位は 4 kV となり、その静電エネルギーは 0.8 mJ であるから、酢酸エチル蒸気の最小着火エネルギー 0.46 mJ を上回り、着火の可能性があることがわかる。また、発生電流が 1.4 μA ならば 0.3 秒以内で同じレベルに達することになる。つまり、少量または短時間で着火に必要な静電エネルギーが蓄積することを意味する。

アセトンとトルエンの混合液においても、酢酸エチルに次いで大きな帯電量を示すことが確認された。この混合液は酢酸エチルと同等の導電率であるため、この結果は、導電率が噴出帯電量と相関性があることを示唆しているが、両者の比電荷には依然 2 倍以上の開きがあるため、必ずしも導電率だけでは現象を説明できないと考えられる。

ホースの材質に関しては、酢酸エチル、混合液ともに、明瞭な差は確認できなかった。

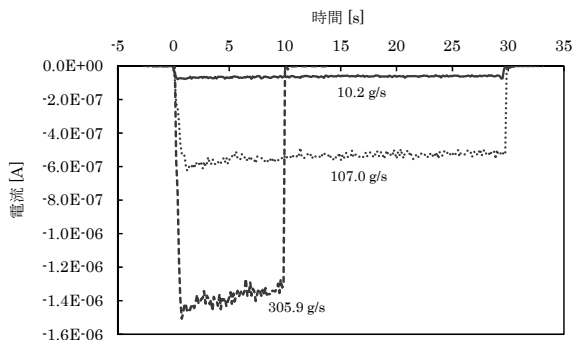
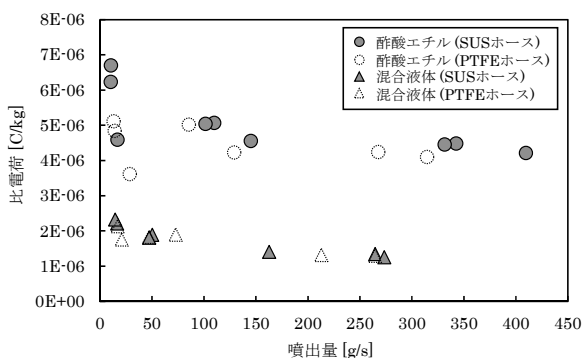
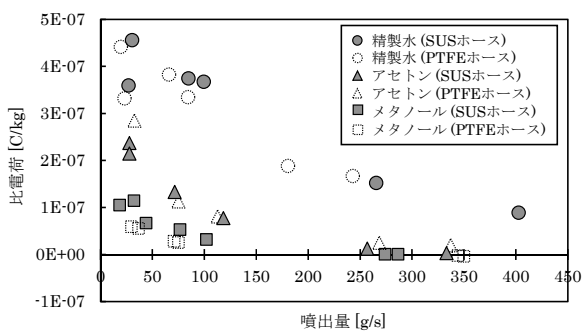


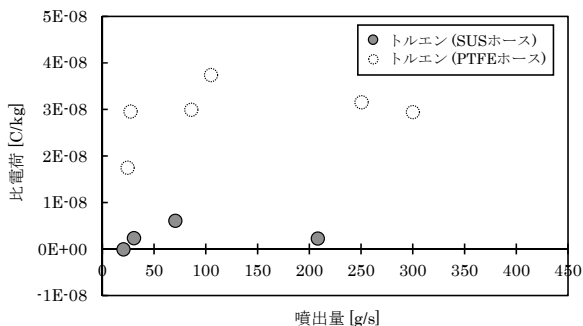
図 2 酢酸エチル噴出時にバルブで発生する電流波形の例 (SUS ホース使用)



(a) 酢酸エチル, 混合液体



(b) 精製水, アセトン, メタノール



(c) トルエン

図 3 噴出された各種液体試料の比電荷

精製水, アセトンおよびメタノールについては, 図 3 (b)に示すように, 一部の条件を除き, 比電荷は, 酢酸エ

チルの 1/10 以下に小さくなる事が確認できる. また, アセトンとメタノールは同程度の帯電量を示している一方で, これらよりも導電率が 10 倍程度高い精製水の方が全体的に大きな帯電量を示した. なお, これらのいずれにおいても, ホースの材質による比電荷の差はほとんど確認できなかった.

図 3(c)からは, トルエンの比電荷は, 酢酸エチルや混合液と比較すると約 1/100 であり, 精製水, アセトン, メタノールと比較しても 1/10 程度である事が確認できる. 一方で, 他の液体と比較すると, PTFE ホースが SUS ホースよりも顕著に大きな値を示した. これについては詳細を後述する.

液体試料の導電率と比電荷の関係をまとめたグラフを図 4 に示す. ただし, この図では, バルブの開度“中”での代表的数値をプロットしている. これによると酢酸エチルの導電率である 10^{-8} S/m 付近で比電荷がピークを示すことがわかる. 他のバルブ開度でも同様の傾向を示している. このような傾向となった要因としては, 次のことが挙げられる.

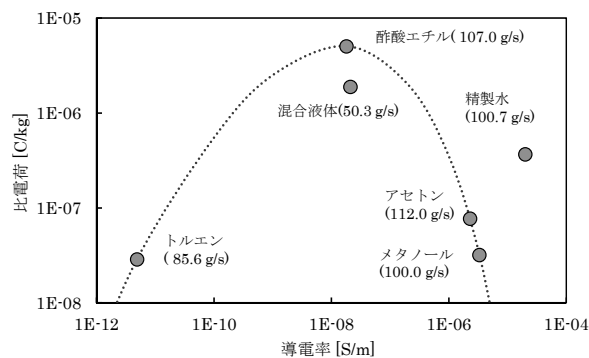


図 4 液体試料の導電率と比電荷の関係 (SUS ホース使用)

液体の噴出帯電における電荷の実体は液中の電離イオンであり, 液体表面近傍では電荷不均衡となっており, 表面が分離する際に, 正または負極性のいずれか一方のイオンを過剰に含むことが原因とされている¹¹⁾. 今回の実験条件では, 液体表面部分がバルブの隙間において圧力を受けて変形し, 一部がちぎれて帯電液滴となる. 同じ液体であれば, 質量当たりの液滴数が多いほど比電荷が大きくなると予想される. 今回の実験において流量が小さい場合に比電荷が大きい理由は, 液滴となった割合が大きいためと考えられる. なお, 本稿には掲載していないが, 別途筆者らが圧力を 300~700 kPa の範囲で変化させて実験を行ったところ, より高圧であるほど比電荷が大きくなる (バルブ開度“中”において, 300 kPa, 500 kPa および 700 kPa のとき, それぞれ概ね $2 \mu\text{C/kg}$, $4 \mu\text{C/kg}$ および $6 \mu\text{C/kg}$), ビデオ観測によっても, より液滴が微細となっていたことから, 液滴となる機会が多いほど比電荷も大きいと推測できる.

液体の導電率が大きいほど電離度も大きく, したがってイオン濃度が高い. 一方で, イオン濃度が高いと電荷

不均衡が生じた際の正・負イオンの再結合も促進される。この再結合の速さは緩和時定数で相対比較することができる。液体の導電率が高く、緩和時定数が短い場合には、液滴が切り離されるまでの時間に電荷不均衡が解消され、ほとんどの電荷が緩和するだろう。一方で、液体が絶縁性の場合には、例えばトルエンでは緩和時定数は4.3秒と十分に長い。液体内にはそもそもイオンが少ないため、液滴自体がほとんど電荷を有しない。以上の理由により、噴出帯電量がある導電率においてピークをもつと考えられる。ただし、詳細な帯電機構の解明にあたっては、導電率や緩和時定数以外の要因、例えば、液滴の大きさに影響する表面張力、粘性率などの物理的性質やイオンの配向も考慮する必要がある¹²⁾。これについては今後の課題としたい。

2) 部位別の帯電量

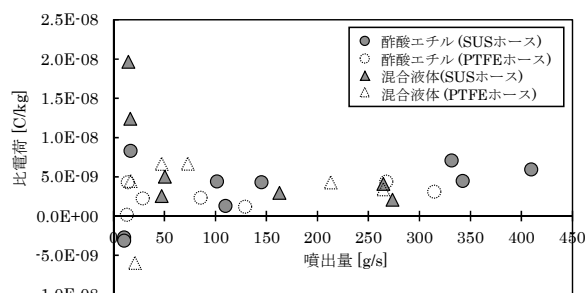
先に示した液体の帯電量には、ホース・バルブ系で発生した総電荷であるので、これを(2)および(3)式に従って、各部での電流を積分して電荷を算出し、ホースとバルブのそれぞれで発生する電荷に分けて検討する。

図5に、酢酸エチル、混合液、トルエンの部位別の帯電量を示す。なお、高導電性液体である精製水、アセトン、メタノールについては、液体により各部位が短絡状態となるので部位別の測定はできなかった。

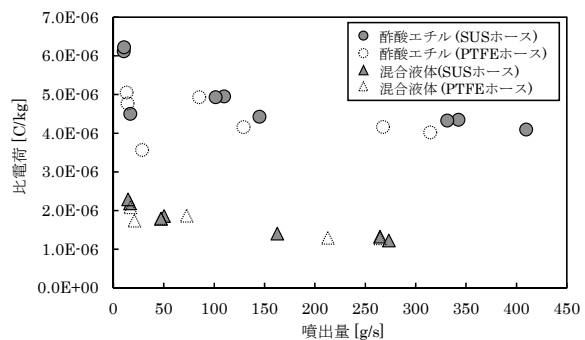
図5(a)および(b)からは、酢酸エチル、混合液においては、ホースでの流動帯電はバルブでの噴出帯電と比較すると2~3桁程度小さく、液体の帯電にはほとんど寄与していないことが確認できる。ここで、小噴出量において、ホースでの流動帯電量が大きくなっているが、この領域では電流が極めて小さい(数nA)ので、測定機器や周囲の環境に起因するノイズの影響を受けているものと考えられる。なお、図3(a)と同様に、これらの液体においては、ホースでの流動帯電、バルブでの噴出帯電ともに、ホースの材質による影響がほとんどないことが確認できる。

一方、図5(c)からは、トルエンにおいては、ホースの材質により帯電特性が大きく変化することが確認できる。SUSホース使用時には、ホースでの噴出帯電量がバルブでの噴出帯電量の半分程度であるが、PTFEホース使用時には、流動帯電量が噴出帯電量よりも1桁程度大きくなる¹³⁾ことが確認できる。先の報告¹³⁾においても、m-キシレンや灯油などの絶縁性液体では、PTFEホース使用時に流動帯電量が大きくなる¹³⁾ことが確認されている。

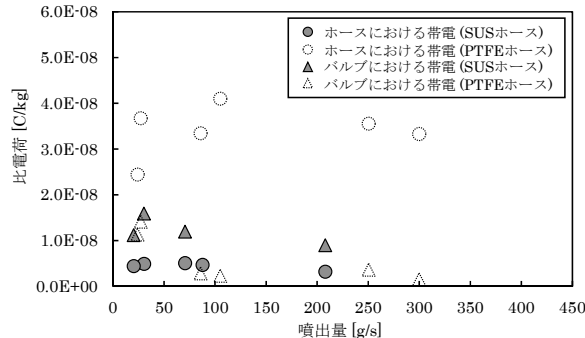
流動帯電の基本原理は、電気化学ポテンシャルの違いに起因して起こる、管路内壁に対する液体中の正負イオンの選択的吸着現象と考えられている¹⁴⁾。したがって、トルエン内の正負イオンのSUSおよびPTFEに対する電気化学ポテンシャルの差によって流動帯電量にも差が生じたと考えられる。すなわち、PTFEの場合には、負イオンを強く吸着するため、流動液体中には正イオンが多く含まれることになる。一方で、緩和時定数で示されるように、イオンの再結合に伴う電荷緩和が生じるが、表1に示すようにトルエンでは緩和に時間がかかる



(a) 酢酸エチル、混合液体のホースにおける帯電



(b) 酢酸エチル、混合液体のバルブにおける帯電



(c) トルエンのホースおよびバルブにおける帯電

図5 液体試料の各部位における帯電量

($\tau=4.3$ s) こと、および、抵抗が極めて高いPTFE層を介した電荷の減衰も小さいため、流動電荷が大きかったと考えられる。

以上の結果から、酢酸エチル等のある程度大きな導電性 ($>10^{-8}$ S/m) を有する液体では、ホースの材質によらず、流動帯電量は噴出帯電量と比較して無視できるほど小さいこと、および、トルエンのような絶縁性液体 ($<10^{-12}$ S/m) では、ホースの材質にもよるものの、液体の帯電量における流動帯電量の割合が大きくなる¹³⁾ことが確認された。

4 噴出帯電低減対策の検討

現場でこの種の作業を行う際には、ホース、バルブ、金属容器等の接地およびボンディングを確実にすれば導体への静電気の蓄積はないので、火花放電のような着火性の高い放電が生じることはほとんどない。しかしながら、現実には接地不良による静電気災害は数多く起きて

おり、徹底することは難しいと思われる。そこで、バルブの先端に取り付けるノズルによって、電荷を安全なレベルまで低減し、潜在的リスクの解消が可能なかを試みた。なお、ホース、バルブ、ノズルが SUS 製であれば、これらは SUS 製クランプバンドで接続されるため、通常は接地・ボンディングされた状態となる。したがって、ここでは、金属容器のみが接地不良の状態を想定している。先の報告¹³⁾では、バルブ先端に短管または長管を装着し、吐出口までの距離を延長することで、バルブから噴出した液滴をノズルの内壁に接触させ、電荷緩和を促進させる噴出帯電低減方法を提案し、実際に、酢酸エチル等の帯電量を低減でき、その効果もノズルが長いほど高いことを確認した。本稿では、更に 4 種類の SUS ノズル (図 6(c)~(f)) による帯電量低減効果を検証した。なお、本検討では、全て SUS ホースを用いた。

1) 噴出帯電量低減用ノズル

バルブの先端に、バルブから飛沫となって噴出する液体の整流および電荷緩和を目的として、図 6 に示すように、6 種類のノズルを装着した。ノズルは全て SUS316 製である。(a)および(b)は、ともに直管であり、内径は 23 mm、長さはそれぞれ 110 mm、260 mm である (以下、それぞれ短管および長管という)。(c)は、内

径 23 mm、半径 55 mm の 90°エルボアダプタである (以下、エルボという)。(d)は、内径 12 mm、長さ 50 mm のホース継手 (通称、タケノコニップル) である。(e)は、エルボ先端にホース継手を装着したものである (以下、エルボ&ホース継手という)。(f)は、長さ 55 mm、内径が 29 mm から 23 mm にテーパ状に絞られた形状のレジューサの先端にホース継手を装着したものである (以下、レジューサ&ホース継手という)。

上記の各ノズルはヘルール接続によって、バルブ先端 (ヘルールねじアダプタ付き) に装着した。

なお、液体がノズルを通過する際の電流を測定するために、バルブとノズルの間を PTFE パッキンで絶縁し、ノズルにもエレクトロメータ (Keithley, 6514/J) を接続した。この実験では、無加工のホース (SUS ホース) を使用した。

2) 実験結果および考察

図 7 に、装着したノズル別に、酢酸エチルの比電荷を示す。図 7(a)によれば、短管、長管、エルボを装着した場合には、ノズル無しの場合と比較して全体的に帯電量が減少しているが、桁が変わるほどの変化ではない。一方で、ホース継手を単独で装着した場合には、噴出量の

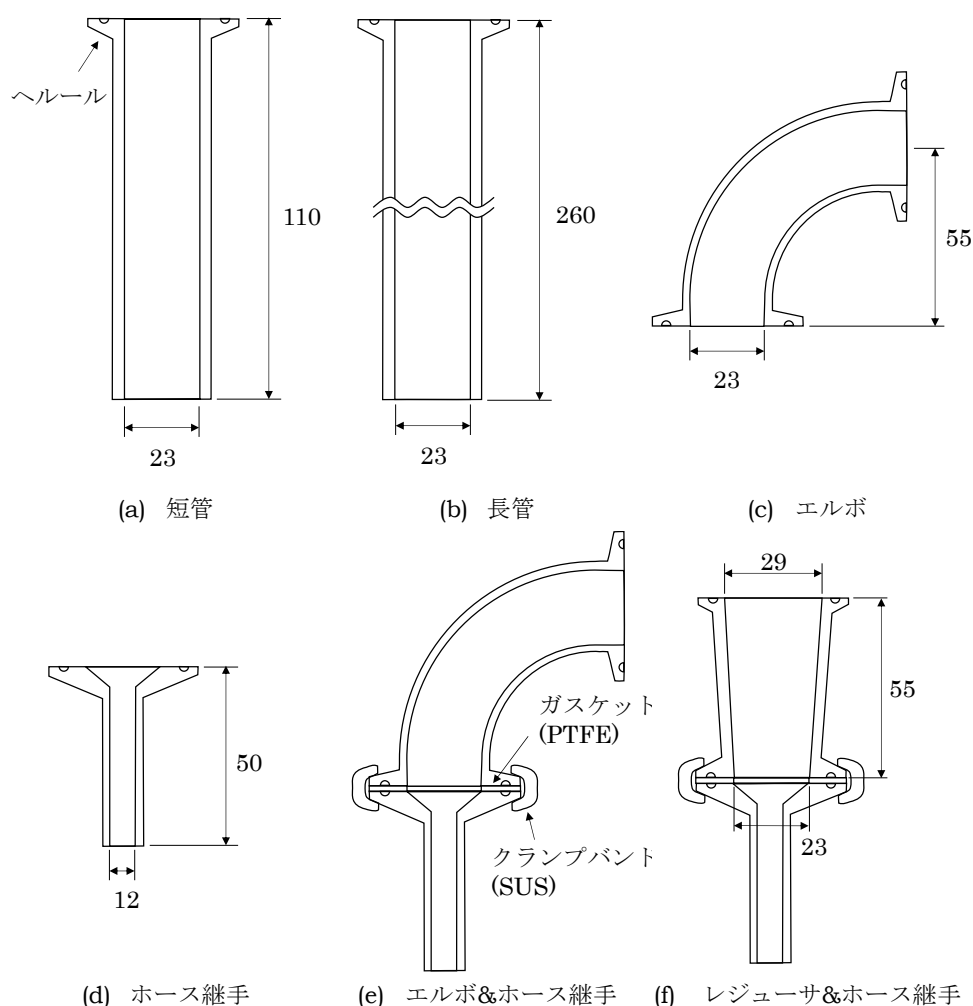
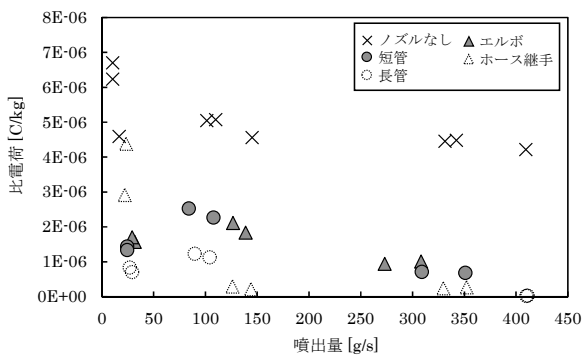
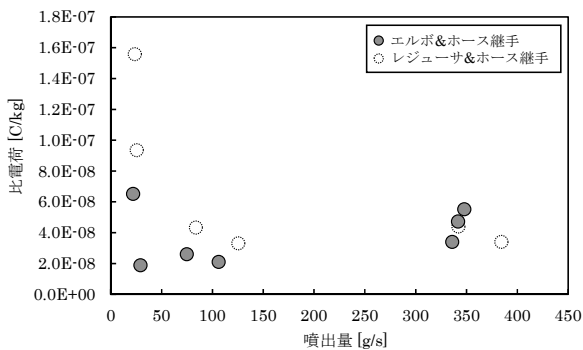


図 6 バルブに装着する各種 SUS 製ノズル (帯電軽減実験)

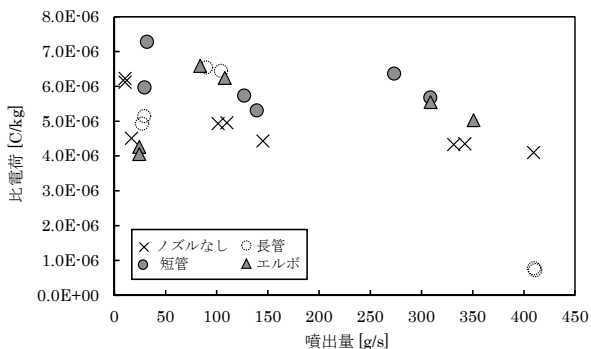


(a) ノズルなし, 短管, 長管, エルボ, ホース継手

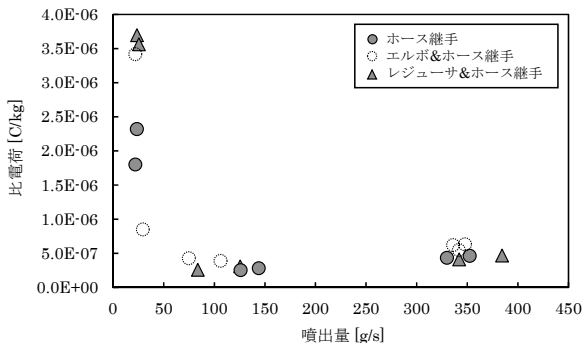


(b) エルボ&ホース継手, レジューサ&ホース継手

図 7 各種ノズル装着時の酢酸エチルの比電荷

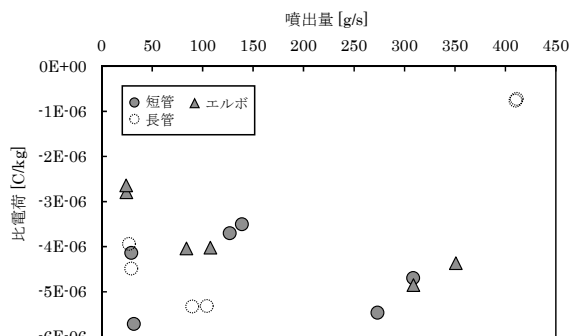


(a) ノズルなし, 短管, 長管, エルボ

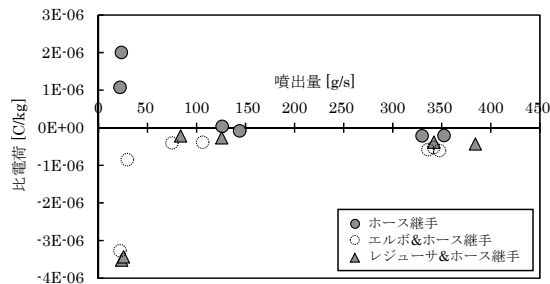


(b) ホース継手, エルボ&ホース継手, レジューサ &ホース継手

図 8 各種ノズル装着時のバルブにおける帯電量 (酢酸エチル)



(a) ノズルなし, 短管, 長管, エルボ



(b) ホース継手, エルボ&ホース継手, レジューサ &ホース継手

図 9 各種ノズルにおける電荷緩和量 (酢酸エチル)

増加に伴い帯電量が顕著に減少していることが確認できる。

図 7 (b) によれば, エルボ&ホース継手, レジューサ &ホース継手を装着した場合には, 他のノズルよりも大きな帯電量低減効果が確認できる. 特に, エルボ&ホース継手においては, 比電荷はノズル無しの場合の 1/100 程度に減少している。

ノズル装着による帯電量低減効果について, バルブでの噴出帯電量, ノズルでの電荷緩和量を挙げてより詳細に評価する. 図 8 に, 装着したノズルごとにバルブでの噴出帯電量を示す. 図 8 (a)からは, 短管, 長管およびエルボでは, 一部の場合を除いて帯電量の減少が確認できない. 一方で, 図 8 (b)より, ホース継手, エルボ &ホース継手, レジューサ&ホース継手においては, 噴出量 50 g/s 付近を境にして帯電量そのものが大きく減少していることが確認できる。

これより, ホース継手には, バルブでの噴出帯電量そのものを低減する効果があると考えられる. これは, ホース継手の内径が小さいので圧力損失が増加して流速が低下するため, バルブから押し出される液体がノズル内を満たし, バルブから液体が噴出する際の帯電液滴の形成が抑制され, ひいては噴出帯電過程が機能しなくなるためと推定される。

図 9 に, 装着したノズルでの電荷緩和量を示す. この図では, 正の数値は電荷の発生を, 負の数値は電荷の緩和を意味する. 図 9 (a)より, 短管, 長管, エルボでは, バルブでの帯電量と同程度の緩和量が確認できるものの,

図 8 (a)と比較すると、全体的に緩和量が帯電量よりも小さいことがわかる。図 9 (b)より、ホース継手では、噴出量が小さい領域において、ノズルでも $1 \mu\text{C}/\text{kg}$ を超える大きな帯電が生じていることが確認できる。一方、エルボ&ホース継手、レジャーサ&ホース継手では、ホース継手単独装着時のような帯電は生じておらず、バルブで発生した電荷をノズルで緩和できていることが確認できる。ホース継手単独使用時のノズルでの帯電原因の詳細は不明であるが、ビデオカメラによる目視観測では、ホース継手単独の場合には液滴の量がより多いことが確認されているので、バルブで生じた液滴を抑えることができなかったことが原因の一つと考えられる。

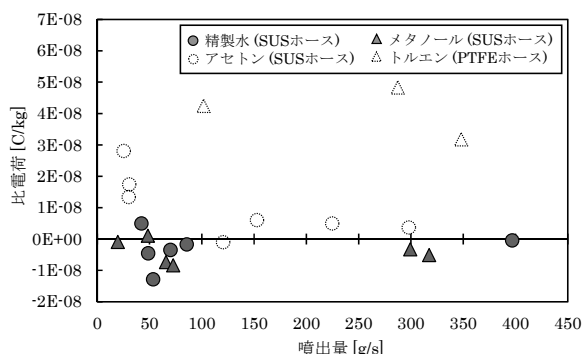


図 10 レジャーサ&ホース継手装着時の各種液体試料の比電荷

以上の結果から、ホース継手を使用しない場合、バルブでの噴出帯電は防止できないが、ノズルにおいて電荷が緩和されるため、液体の帯電量を低減できることが確認できた。なお、測定結果から、これらのノズルを用いた場合でも、液体の電荷を完全に緩和させることは難しいことがわかる。一方、内径の小さいホース継手を使用した場合、バルブでの噴出帯電そのものを防止できるうえに、電荷緩和効果も得られるため、液体の帯電量を大きく低減できることが確認できた。また、バルブからホース継手までの距離が不十分な場合には、噴出量が小さい場合にノズルでも帯電することも確認できた。

最後に、酢酸エチル以外の液体に対する SUS ノズル装着による噴出帯電量低減効果を確認するために、精製水、アセトン、メタノール、トルエンについても、レジャーサ&ホース継手を装着した際の液体帯電量を測定した (図 10)。

これより、導電性液体である精製水、アセトン、メタノールにおいては、図 3 のノズル無しの場合と比較すると、帯電極性の逆転が見られるが、全体的に大きく帯電量が減少していることが確認できる。一方、絶縁性液体であるトルエンについては、若干ではあるが帯電量が増加した。これは、ノズル装着により、流動帯電を起こす部位が延長されたためと考えられる。

以上のように、SUS ノズル装着による噴出帯電量低減の手法は、導電性液体には有効であるが、絶縁性液体にはむしろ逆効果となることが分かった。

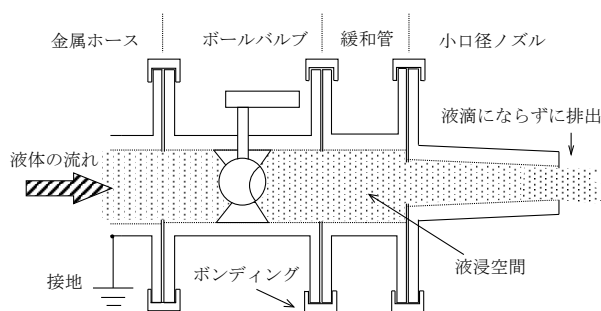


図 11 実用的な帯電防止バルブシステムの原理的構造図

5 静電気を低減できるバルブシステムの提案

今回の実験結果から、噴霧帯電機構を抑制するためのバルブシステムとしては、図 11 に示すように、バルブユニットに、緩和管を取り付け、さらに小口径のノズルを取り付ける構造とすることがよいと考えられる。この構造により、まずノズルでの圧力損失によって液体が緩和管に充満し、その間に電荷がアースに流れて減少し、かつ、ボールバルブの吐出口が完全に液中に没することによって噴霧帯電機構も働かなくなるため電荷発生も抑制され、結果的に噴出時の帯電は無視できるほどに小さくなると期待できる。

緩和管の長さについては、流速が最大 1 m/s とすると、酢酸エチルのような導電性液体の緩和時間 (緩和時定数の約 3 倍) は $1/100$ 秒以下であるから 1 cm 以上あればよいことになるが、短すぎるとバルブで発生した液滴を管内に封じ込むことができなくなるので、ノズルからの液滴の放出が十分少なくなる程度 (10 cm 程度) まで長くしておく必要がある。

この方法は特殊な部品を必要せず、また、利便性もそれほど損なわないので、筆者としては、現場での採用を推奨する。ただし、このことは、金属製品 (容器、台車等)、人体などに対する従来の帯電防止対策をないがしろにするものではなく、よりリスクの低減を図るものであることを理解していただきたい。

なお、この方法は SUS 製のバルブおよびノズルが接地・ボンディングされた状態 (実験では、電流計を通じて接地されている) を想定している。樹脂製ホース等の使用により、結果的にバルブおよびノズルが接地不良となる場合には、同様の帯電量低減効果が得られない可能性がある。

6 まとめ

化学プラント等で行われる液体の小分け作業を想定し、フレキシブルホース先端に装着されたボールバルブから液体が液滴となって噴出する際の帯電特性および、バルブへの SUS ノズル装着による噴出帯電量低減対策について検討した。その結果、詳細な機序については更に検討を要するものの、現時点で実用的側面から要点をまとめると次のようになる。

- 1)液体の比電荷には、液体の導電性との相関がみられ、 10^{-8} S/m 付近でピークを示し、それより小さいかまたは大きい領域では減少した。特に、酢酸エチルおよび、これと同程度の導電率をもつ混合液は他の液体と比較して顕著に大きな値を示した。この結果から、酢酸エチルの小分けにおいては、微量（100 g 以下）または短時間（1 秒以内）でも着火可能なレベルの電荷が発生することが確認された。
 - 2)トルエンのように低導電性でない限り、ホースの材質によらず流動帯電量は噴霧帯電量と比較して無視できるほど小さいものであり、材質の影響もほとんどなかった。一方、トルエンでは流動帯電の方が大きな値を示し、かつ、PTFE ライニングホースでは顕著に増加した。
 - 3)噴出帯電を減少させるために、ノズルとして口径を絞ったホース継手（例えば、タケノコニップル）をバルブ端部にレジャーサなどの短管とともに装着することにより、バルブ内での液滴の生成を抑え、かつ、放出口での再飛散を防止することにより、ほぼ危険のないレベルにまで静電気の発生を抑えることができる。これは、現場で容易に実施できる手法であるので推奨される。
- 10) 山隈瑞樹, 噴霧装置の帯電特性—スプレー缶およびエアレス塗装機—, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOSSH-SRR-NO.38, pp. 49-58 (2008)
 - 11) 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, vol. 108, no. 4, pp. 362-368, (1988)
 - 12) 増田閃一: 最近の静電気工学—基礎, 応用, 測定法, 放電, 事故事例解説, 高圧ガス保安協会(1974)
 - 13) 遠藤雄大, 山隈瑞樹: 液体噴出時の静電気の測定および安全対策に関する研究, 第 49 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp. 73-74, (2016)
 - 14) 有本匡男, 大橋朝夫, 上田實: イオン吸着モデルによる流動帯電現象の電算機シミュレーション, 電気学会論文誌 A, vol. 105, no. 7, pp. 403-409, (1985)

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ある国内企業から酢酸エチルを含む各種の有機溶剤を使用する現場の事情に関する情報および実験資料・資材の提供があった。要望に従って匿名とするが、ご協力に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 総務省消防庁消防白書, <http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h28/h28/index.html>
- 2) Van der Meer, D.: Electrostatic charge generation during washing of tanks with water sprays-I: General introduction, Static Electrification 1971, pp.153-157, Inst. of Phys. and Phys. Soc., London (1971)
- 3) 田島泰幸, 児玉勉, 大澤敦: 噴霧による液体の帯電特性, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-NO.17, pp. 59-63 (1999)
- 4) 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, 1-1, pp. 73-76 (2008)
- 5) 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, 6-2, pp. 49-57 (2013)
- 6) IEC/TS 60079-32-1:2013, Explosive atmospheres - Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance (2013)
- 7) 労働安全衛生総合研究所, 静電気安全指針 2007, JNIOSSH-TR-No.42 (2007)
- 8) 国立環境研究所, WebKis-Plus (化学物質データベース), <http://www.nies.go.jp/kis-plus>
- 9) 化学便覧 基礎編 改訂 5 版, 日本化学会, 丸善