

令和 3 年 7 月 12 日現在

機関番号：82629

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13963

研究課題名(和文) 静電気災害防止を目的とした噴霧帯電の基礎的特性に関する研究

研究課題名(英文) Research on the basic characteristics of spray electrification for the purpose of preventing electrostatic disasters

研究代表者

遠藤 雄大 (Endo, Yuta)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・電気安全研究グループ・主任研究員

研究者番号：80778324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：液体がノズル等から噴出する際に起こる噴霧帯電現象(液体の静電気帯電現象の一つ)は、可燃性有機溶剤を大量に取り扱う施設で火災の原因にもなる。本研究では、噴霧帯電量が大きくなる条件および、帯電量の低減方法を調査した。その結果、噴霧帯電量が噴霧する液体の種類、導電率、ノズル材質等の条件に大きく依存することが確認できた。したがって、現場の状況とこれらの条件を照らし合わせることで、噴霧帯電の危険性のある程度予見し、より強固な安全対策を取ることが可能となる。また、アルコール等の高導電性の液体については、ノズルに数十ボルト程度の電圧を印加することで噴霧帯電量を大きく低減することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体の噴霧帯電に起因する火災等が起こる背景の一つに、噴霧帯電現象に関する知見の不足がある。本研究では、噴霧帯電量が液体の種類、導電率、ノズル材質等の各種噴霧条件に依存することを確認した。したがって、現場の状況とこれらの条件を照らし合わせることで、噴霧帯電の危険性のある程度予見し、より強固な安全対策を取ることが可能となる。一方で、状況によっては、噴霧帯電量そのものを低減させる対策も必要となる。そこで本研究では、アルコール等の高導電性の可燃性液体の噴霧帯電量を大きく低減可能な方法を提案し、その効果を確認した。以上の成果は、噴霧帯電に起因する災害防止を講じるうえで有用な知見になると考える。

研究成果の概要(英文)：The spray electrification (a kind of electrostatic charging phenomenon of liquids) that occurs when liquids are sprayed out of nozzles, etc., can cause fires in facilities that handle large amounts of flammable organic solvents. In this study, we investigated the conditions under which the charge generated by the spray electrification becomes large and how to reduce the charge. As a result, it was confirmed that the charge greatly depends on the conditions such as the type of liquid to be sprayed, electrical conductivity, and nozzle material. Therefore, from these conditions, the danger of spray electrification can be predicted in advance to some extent. For highly conductive liquids such as alcohol, the charge could be greatly reduced by applying a voltage of several tens of volts to the nozzle.

研究分野：静電気安全

キーワード：静電気 噴霧帯電 噴出帯電 液体 有機溶剤 火災 導電率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

消防白書によると、危険物施設(消防法で指定されている数量以上の危険物を扱う取扱所、製造所、保管所などの施設)の火災は年間 200 件程度発生しており、このうち 2 割程度は静電気スパークによる着火が原因で起こっている¹⁾。静電気は、他の着火原因(高温表面熱、過熱着火、裸火など)と比較すると、些細な原因で容易に発生(帯電)する、作業者の知識不足により危険に対する認識が乏しい、危険箇所の特定が難しい等の要因により、防止対策に不備が生じていると考えられる。

近年、高圧の液体がノズル等から噴霧された際に生じた静電気(噴霧帯電)による火災事故が散見される²⁾⁻⁴⁾。なお、液体の噴霧は、洗浄、塗装、造粒など、様々な工程で行われている。現在までに、噴霧帯電の基礎的な特性(どのような液体が、どのような条件で強く帯電するのか等)は十分に解明されておらず、明確な防止対策も示されていないため、現場では危険性が十分に認識されずに作業が行われている状態にある。

申請者が過去に、ある化学プラントで発生した火災事故を調査したところ、発生状況より酢酸エチルの噴霧帯電が原因と推定された。なお、酢酸エチルを含む複数の液体試料について噴霧帯電量を測定した結果、酢酸エチルが最も強く帯電し、これに近い導電率を持つ液体ほど帯電量が大きくなることを見出した⁴⁾。いくつかの先行研究⁵⁾⁻¹⁰⁾においても、噴霧帯電量が噴霧時の各種条件(液体の導電率、噴出速度、空気の混入状況など)に依存することが示唆されているものの、これらの条件と噴霧帯電量の明確な関係性については検討されておらず、解明には至っていない。このような状況もあり、従来の噴霧帯電対策は、導体の接地の他、液体の噴霧自体を避けるなど作業方法に関するものがほとんどであり、工学的な噴霧帯電量の低減方法もほとんど検討されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、噴霧帯電に起因する災害防止対策を講じるうえで参考となる知見(どのような液体をどのように噴霧すると強く帯電するのか)を得ることおよび、安全な噴霧帯電量低減方法を開発することである。申請者の所属する研究所は、労働・製造現場における静電気に起因する災害を防止するための技術的指針(静電気安全指針)を出版しており、産業界で広く利用されている。本研究で得られた知見および、有効性が確認された噴霧帯電量低減方法は、本指針の改訂時に参照され、将来的に災害防止に大きく寄与できる可能性がある。

本研究では、先行研究において噴霧帯電量に影響することが示唆されている各種条件(液体の導電率、液滴の噴出速度、空気などの絶縁性異物の混合状況)と噴霧帯電量の関係を詳細に調査し、噴霧帯電の基礎的な特性についてさらに進んだ知見を得る。ここで得られた知見を用いることで、液体取り扱い現場において噴霧帯電の危険性を事前に把握し、より強固な静電気災害対策を講じることが可能となる。また、現場によっては、従来の対策では噴霧帯電による危険性を十分に下げることができず、噴霧帯電量そのものを低減する必要が生じる場合もあり得るため、噴霧帯電量を安全に低減するための新たな対策を開発する。

3. 研究の方法

3.1 噴霧帯電量と各種条件との関係の調査(研究方法)

図1に示す噴霧帯電量測定装置を用いて、各種条件(液体種類、液体導電率、ノズル種類、ノズル材質、ノズル径、液体タンク圧力)において噴霧帯電量の測定を行った。本実験の実施条件は表1の通りである。ただし、2流体ノズル使用時は、液体供給用のチューブに加えて、エア供給用チューブもノズルに接続される。

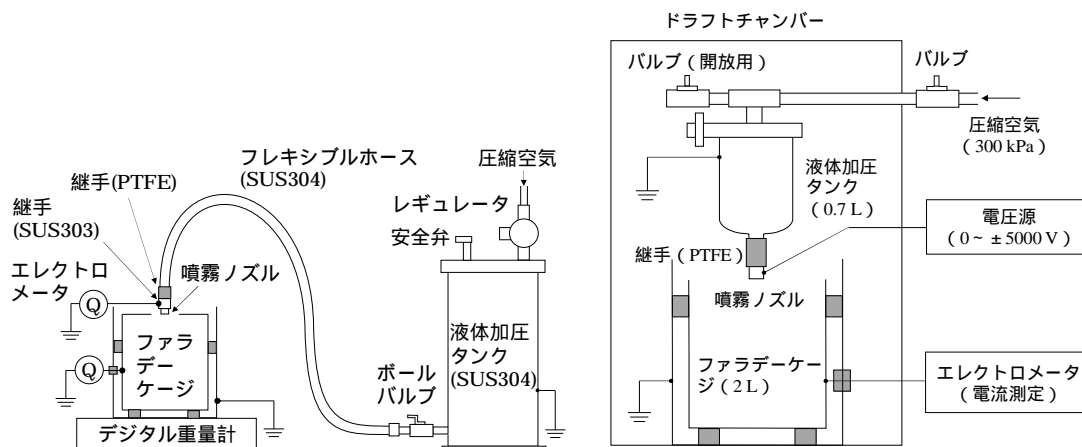


図1 噴霧帯電量測定装置(1流体ノズル使用時) 図2 噴霧帯電量低減効果の評価実験装置

表1 噴霧帯電量測定実験の各種条件

項目	条件
液体試料 (導電率[S/m])	混合液体* ($2.5 \times 10^{-13} \sim 1.5 \times 10^{-6}$) 酢酸エチル (7.6×10^{-8}) エタノール (7.8×10^{-6}) 水道水 (8.8×10^{-5}) <i>n</i> -ヘキサン (1.3×10^{-11})
ノズル種類 (噴霧方式)	1 流体ノズル、2 流体ノズル (外部混合外気型)
ノズル材質	SUS303、PTFE
ノズル径[mm] (1 流体ノズル)	1.5、2.0、3.0
ノズル径[mm] (2 流体ノズル)	0.5
液体圧力 (ゲージ圧[MPa])	0.1、0.3、0.5
エア圧力 (2 流体ノズル、ゲージ圧[MPa])	0.1、0.3、0.5

*ミネラルスピリットに導電性添加剤 (Statsafe 3000、Innospec) を様々な濃度で添加したもの

3.2 噴霧帯電量の低減方法の開発 (研究方法)

本研究では、噴霧帯電量を安全に低減するために、噴霧ノズル周囲に装着した電極に 100 V 程度の低電圧を印加して、噴霧液体への電荷供給により噴霧帯電を相殺する方法について、その有効性の評価を行った。図 2 に、噴霧帯電量低減効果を評価するための実験装置を示す。噴霧ノズルの周囲にブチルゴム製絶縁テープを厚さ 1 mm 程度巻き付け、その上にアルミテープを巻き付けて電極としている。本実験では、提案方法による効果が容易に得られると予想される高導電性液体について評価した。

表2 噴霧帯電量低減実験の各種条件

項目	条件
液体試料 (導電率[S/m])	水道水 (8.7×10^{-5}) イソブチルアルコール (3.0×10^{-6})
ノズル種類 (噴霧方式)	1 流体ノズル
ノズル材質	SUS303、PTFE
ノズル径[mm]	0.4
液体圧力 (ゲージ圧[MPa])	0.3

4. 研究成果

4.1 噴霧帯電量と各種条件との関係の調査 (研究成果)

図 3 に、各種条件と噴霧帯電量の関係をそれぞれ示す。ここでは、液体の噴霧帯電量は、比電荷 (単位重量あたりの液体もしくはノズルの電荷量[C/g]) で示している。

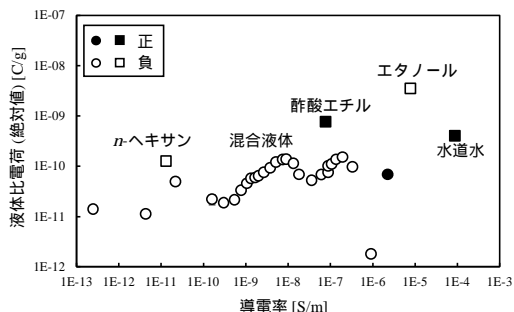
まず、図 3(a)、(b)より、混合液体に着目すると、噴霧帯電量は導電率に大きく依存し、導電率 10^{-9} S/m \sim 10^{-8} S/m で液体比電荷がピークとなることが確認できる。ノズル材質に着目すると、ピーク導電率付近の比電荷は、PTFE ノズルの方が SUS ノズルと比較して一桁程度大きくなることを確認できる。一方で、PTFE ノズルの場合にはピーク導電率から離れると比電荷は単調に低下していき、SUS ノズルの場合には 10^{-6} S/m 以上において帯電極性の変化を伴う比電荷の増加が見られる。さらに、その他の液体 (酢酸エチル、エタノール、水道水、*n*-ヘキサン) に着目すると、どちらの材質のノズルにおいても、混合液体と同様の導電率特性が見られる。一方で、これらの液体について、同等の導電率の混合液体と比電荷の大きさを比較すると、一桁程度大きくなることを確認できる。

次に、図 3(c)より、液体圧力が高い程、比電荷は大きくなることを確認できる。これは、圧力上昇に伴う時間あたりの噴霧量増加に対して、流速上昇による帯電量増加がより大きいことを表している。また、図 3(d)より、ノズル径が小さい程、比電荷は大きくなる傾向が確認できる。これは、ノズル径が小さい程、噴霧量に対する液体-ノズルの接触面積の割合が大きくなるためと考えられる。

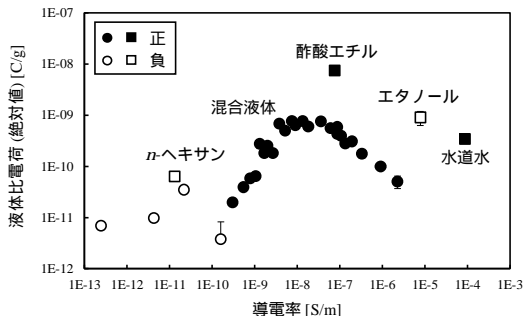
最後に、図 3(e)、(f)より、外部混合外気型の 2 流体ノズル使用時は、導電率に着目すると、比電荷は 10^{-8} S/m 付近でピークを示した後、 10^{-6} S/m 以上でさらに増加する様子が確認できる。このような導電率特性は、1 流体ノズルの場合と概ね一致する。 10^{-8} S/m 付近の比電荷は、ノズル材質により顕著な差が見られるが、 10^{-6} S/m 以上の比電荷では差は見られない。また、比電荷の大きさは、様々な条件が異なるため単純に比較はできないが、1 流体ノズルの場合と同程度である。ノズルに供給されるエアの圧力が高い程、比電荷も大きくなることを確認できる。

以上のように、液体の噴霧帯電量は、導電率に大きく依存するが、液体の種類によっても大きく上下すると考えられる。また、ノズルの材質によっても、噴霧帯電量の大きさ、導電率特性には差が生じることが確認できた。さらに、ノズル径、噴霧時の各種圧力 (液体、エア) と噴霧帯電量との関係も確認できた。本実験では、噴霧方式の違い (1 流体ノズル、2 流体ノズル) に

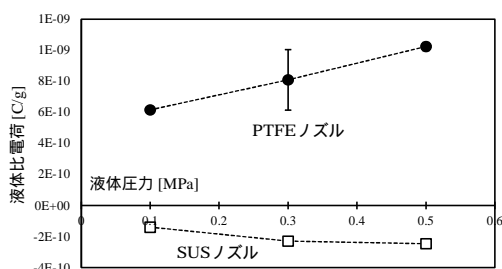
より噴霧帯電量（比電荷）の大きさに明確な差は見られなかった。



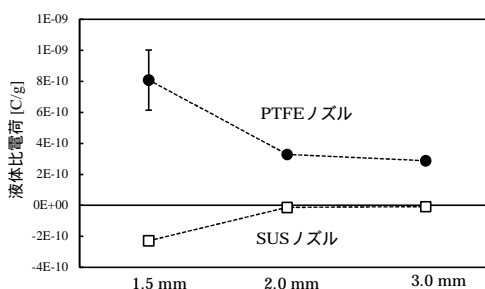
(a)比電荷 vs 導電率 (ノズル種類: 1 流体ノズル、ノズル材質: SUS303、ノズル径:2 mm、液体圧力: 0.3 MPa)



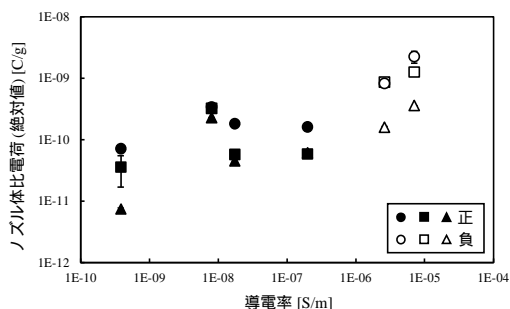
(b)比電荷 vs 導電率 (ノズル種類: 1 流体ノズル、ノズル材質: PTFE、ノズル径:2 mm、液体圧力: 0.3 MPa)



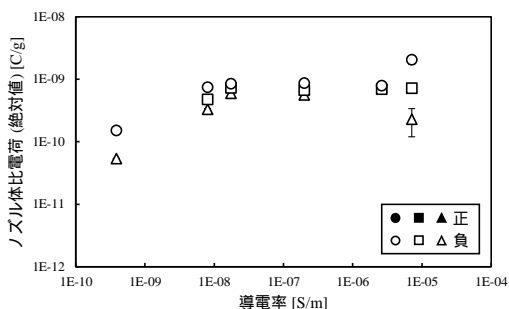
(c)比電荷 vs 液体圧力 (液体試料: 混合液体、導電率: 7.4×10^{-9} S/m、ノズル種類: 1 流体ノズル、ノズル径:2 mm)



(d)比電荷 vs ノズル径 (液体試料: 混合液体、導電率: 7.4×10^{-9} S/m、ノズル種類: 1 流体ノズル、液体タンク圧力: 0.3 MPa)



(e)比電荷 vs 導電率 (液体試料: 混合液体、ノズル種類: 2 流体ノズル、ノズル材質: SUS303、液体圧力: 0.1 MPa、エア圧力: 0.5 MPa、0.3 MPa、0.1 MPa)



(f)比電荷 vs 導電率 (液体試料: 混合液体、ノズル種類: 2 流体ノズル、ノズル材質: PTFE、液体圧力: 0.1 MPa、エア圧力: 0.5 MPa、0.3 MPa、0.1 MPa)

図 3 噴霧帯電量と各種条件の関係

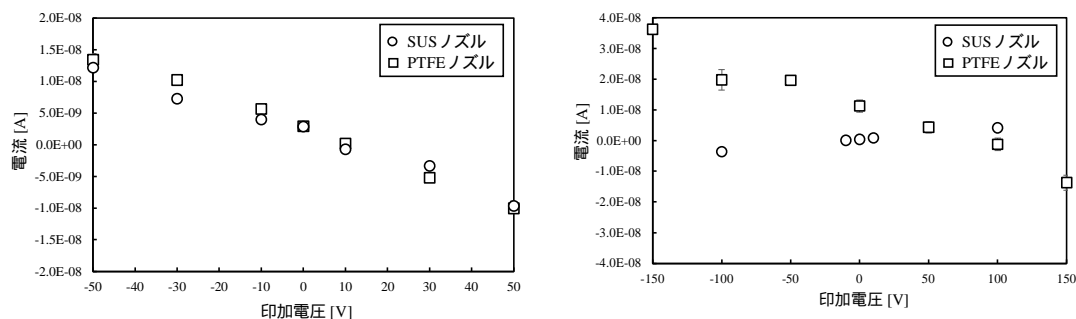
4.2 噴霧帯電量の低減方法の開発 (研究成果)

図 4 に、各液体試料について、印加電圧と噴霧帯電量の関係を示す。ここでは、液体の噴霧帯電量は、噴霧液体を受けるファラデーケージから発生する電流で示している。

図 4(a)より、水道水については、ノズル材質による差はほとんど見られず、印加電圧に対して発生電流は直線的に変化しており、印加電圧 10 V 程度で噴霧帯電による発生電流は大きく低減されている。また、図 4(b)より、イソブチルアルコールについては、ノズル材質により印加電圧に対する発生電流の変化極性は異なるものの、100 V 以下の電圧印加により発生電流は大きく低減されている。

以上のように、液体の種類により、印加電圧に対する発生電流の変化の傾向は異なるものの、本実験で対象とした 2 種類の導電性液体については、提案方法により噴霧帯電量は大きく低減

が可能と考えられる。なお、100 V 以下の低電圧ではあるものの、場合によってはこれが着火源となり得るため、安全性の確保について今後検討したい。また、中～低導電性の液体についても提案方法の有効性を評価したい。



(a) 電流 vs 印加電圧 (液体試料：水道水)

(b) 電流 vs 印加電圧 (液体試料：イソプロピルアルコール)

図4 噴霧帯電量と印加電圧の関係

5. まとめ

本研究では、液体の噴霧帯電について、噴霧帯電量と各種噴霧条件の関係の調査および、噴霧帯電量の安全な低減方法の開発を行った。研究結果は以下の通りである。

- (1) 混合液体を用いた実験により、噴霧帯電量は液体の導電率に大きく依存し、 10^{-9} S/m ~ 10^{-7} S/m でピークを示すことが確認された。また、SUS製1流体ノズルおよび外部混合外気型2流体ノズルについては、 10^{-6} S/m 以上でも帯電量の増加傾向が見られた。
- (2) 酢酸エチル等複数の液体を用いた実験からも、混合液体と同様の導電率特性が見られた。ただし、これら液体の噴霧帯電量は、同程度の導電率の混合液体よりも1桁程度大きくなり、導電率のみでなく液体の種類によっても噴霧帯電量は大きく上下することが示唆された。
- (3) 一部例外はあるものの、PTFE製ノズルは、SUS製ノズルと比較して噴霧帯電量が大きくなる傾向が見られた。また、ノズル材質により、噴霧帯電量の導電率特性にも差が見られた。
- (4) 液体圧力が高い程、また、ノズル径が小さい程、重量あたりの噴霧帯電量(比電荷)は大きくなった。
- (5) 1流体ノズル、2流体ノズルでは、噴霧帯電量(比電荷)の大きさに大きな差は見られなかった。
- (6) 噴霧ノズルの周囲に電極を装着し、低電圧を印加する噴霧帯電量低減方法は、 10^{-6} S/m 以上の高導電性液体については有効性が確認された。

以上のように、噴霧帯電量と各種条件の関係について多くの知見が得られた。これにより、液体取り扱い現場の状況から、噴霧帯電による危険性を事前に把握でき、対策を強化することが可能となる。また、従来の対策では噴霧帯電による危険性を排除できない場合を想定し、低電圧印加による安全な噴霧帯電量低減方法を提案し、一部の液体について有効性を確認した。

参考文献

- 1) 総務省消防庁, 消防白書, <https://www.fdma.go.jp/publication/#whitepaper>
- 2) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, p.352, オーム社 (1988)
- 3) U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Case Study: Static Spark Ignites Flammable Liquid during Portable Tank Filling Operation, No. 2008-02-I-IA (Sep. 2008)
- 4) 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 ポ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, 56-5, pp.362-373 (2017)
- 5) 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, 106-7, pp.339-344 (1986)
- 6) 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, pp.59-63 (1999)
- 7) 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)
- 8) 大澤敦, 高圧水噴霧中の空間電荷密度の測定, JNIOHS-SRR-No.38, pp.17-21 (2008)
- 9) 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, 9-4, pp.262-270 (1985)
- 10) 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. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 遠藤雄大	4. 巻 59
2. 論文標題 可燃性溶剤の噴霧帯電量と導電率の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 安全工学	6. 最初と最後の頁 175-183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18943/safety.59.3_175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤雄大	4. 巻 59
2. 論文標題 酢酸エチルの噴霧帯電量と噴霧条件の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 安全工学	6. 最初と最後の頁 296-307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18943/safety.59.5_296	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 遠藤雄大, 崔光石	4. 巻 69
2. 論文標題 液体・粉体取り扱い工程における静電気災害対策	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 火災	6. 最初と最後の頁 29-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 ノズルへの電圧印加による導電性液体の噴霧帯電量低減効果
3. 学会等名 2021年度静電気学会春期講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 酢酸エチルの1流体ノズルからの噴霧帯電特性
3. 学会等名 第53回安全工学研究発表会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 2流体ノズルの噴霧帯電と各種噴霧条件の関係
3. 学会等名 第44回静電気学会全国大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 酢酸エチルの噴霧帯電と各種噴霧条件の関係
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2020
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 酢酸エチルの噴霧帯電量測定
3. 学会等名 2020年度静電気学会春季講演会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 有機溶剤の噴霧帯電量と各種条件の関係
3. 学会等名 第52回安全工学研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Yuta Endo
2. 発表標題 Conductivity dependence on spray electrification
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 有機溶剤噴霧による2流体ノズルの帯電
3. 学会等名 第43回静電気学会全国大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 有機溶剤の噴霧帯電と導電率の関係
3. 学会等名 安全工学シンポジウム2019
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 遠藤雄大
2. 発表標題 有機溶剤の噴霧帯電における導電率依存性
3. 学会等名 2019年度静電気学会春季講演会
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

着火火災の原因となる液体の静電気帯電現象
https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/mail_mag/2018/114-column-1.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関