

7. 噴霧装置の帯電特性—スプレー缶およびエアレス塗装機—*

山隈瑞樹**

7. Electrostatic Properties of Spraying Devices - Spray Cans and an Airless Paint Sprayer*

by Mizuki YAMAGUMA**

Abstract; According to our survey on accidental explosions and fires due to electrostatic sparks in industrial processes, about half of these are related to spraying devices, such as hand-held spray cans and paint sprayers. Spray cans used for the liquid-penetrant testing (PT) and airless paint sprayers, especially, are found to be the dominant ignition sources. A variety of measurements were carried out in order to clarify the electrostatic properties of these devices. The results for spray cans and an airless paint sprayer are summarized as follows:

(1) Spray cans

The charge generation was greatly affected by the polarity of the liquid materials, the solid fine particles suspended in the solution, the bore of the nozzle, and the temperature. One of the PT spray cans containing fine silica powder produced current and charge above 50 nA and 30 $\mu\text{C}/\text{kg}$, respectively, at a high temperature (ca 30°C). Such levels are quite dangerous when an operator is not grounded. When two popular propellents, liquefied petroleum gas (LPG) and dimethyl ether (DME), were compared, DME was found to generate a charge that was considerably higher than that generated by LPG. This was probably because DME is a polar compound that enables dissolution of numerous ions. By slightly enlarging the bore of the nozzle, the charge was drastically reduced, which suggests that an antistatic version of a spray can could be devised with a minor modification of the current nozzle.

(2) An airless paint sprayer

Paint containing glass flakes was sprayed at various values of liquid pressure while the size of the nozzle orifice was changed. The spraying current and the specific charge of paint mist reached as high as 200 nA and 1.6 $\mu\text{C}/\text{kg}$, respectively. In some cases, not only the level but also the polarity of the static charge changed when the size of the orifice was changed. When the dilution ratio of the paint was changed to 10 wt% from the original 3 wt%, the spraying current increased ca five fold. The electric potential of the sprayer in operation in conjunction with the human body, when they were electrically isolated, reached over 12 kV within 30 s. These findings revealed that the spraying apparatus must be maintained to assure safety, because it is always possible that a high level of static charge could be generated.

Keywords; Airless paint sprayer, Explosion, Liquid-penetrant testing, Spray can, Spray electrification

* 安全工学誌Vol.44, No.2 (2005)において一部誌上発表した。

** 電気安全研究グループElectrical Safety Research Group

1. はじめに

液体の噴霧に伴う帯電現象は古くからよく知られ、恰好の研究対象となってきた。産業災害との関連においては、1954年、当時の西ドイツでの炭酸ガス消火設備による石油タンクの爆発¹⁾、並びに1969年に相次いだ大型タンカーの油槽を高圧の海水ミストで洗浄中に発生した爆発・沈没²⁾は特に有名であり、それぞれ災害原因究明にあたり集中的かつ国際的な取り組みがなされ、帯電機構及び着火原因の解明の面で数々の成果が得られた。一方、今日、産業現場において噴霧を伴う装置は多く用いられており、噴霧物に含まれる可燃性物質が着火し、爆発・火災となる事例も多い。しかし、噴霧装置がどの程度の静電気危険性を有するかについての具体的な測定例は少ない。多種・多様な噴霧装置が使用されているが、最も爆発・火災と関係の深い装置を優先的に研究対象とすべきである。このような観点から、過去の災害事例(厚生労働省の災害調査調査資料。1989～2004年分。)を調査したところ、噴霧に伴う爆発・火災のうち静電スパークが原因と考えられるものはFig. 1のように分析された。これによると、災害事例の半数は噴霧装置に起因するものであり、かつ、スプレー缶と塗装機が最も危険性が高いものである。さらに詳細に分析すると、スプレー缶に起因する5件の事例はすべて非破壊検査(浸透探傷試験法(Liquid Penetrant Testing)。以下PTという。)作業中に発生しており、塗装機ではエアレス塗装機2件、エア式塗装機1件、静電塗装機1件であった。これらの結果をふまえ、スプレー缶(PT用を中心に)およびエアレス塗装機について帯電特性に関する測定を行うこととした。

なお、スプレー缶については、かつては噴射剤に主として不燃性であるフロンが用いられていたが、オゾン

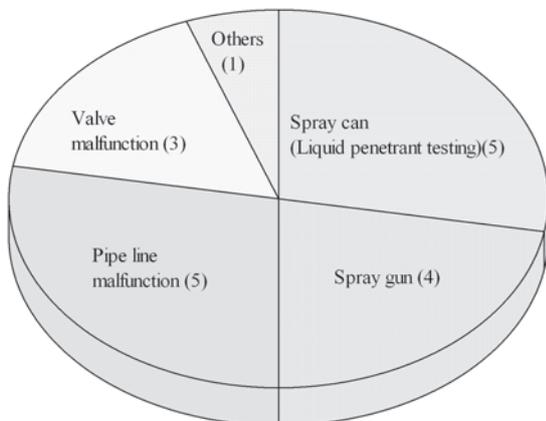


Fig. 1 Causes of explosions or fires associated with spraying of liquid (1989-2004).
噴霧に伴う爆発・火災の要因分析

層破壊物質であることから既に法的に禁止され、現在ではボタンとプロパンから成る液化石油ガス(LPG)およびジメチルエーテル(DME)が主流となっている。したがって、通気性の悪い場所で使用すると低温でも爆発性雰囲気容易に形成する。

2. 実験

2.1 スプレー缶

スプレー缶を保持し、一定の圧力で任意の時間ノズルを押下するためにFig. 2に示すような治具(鉄製)を製作した。缶はPTFEシートにより治具と電気的に絶縁した。缶の上部には交流ソレノイドで駆動するプッシュロッドを取り付け、遠隔操作によりバルブの開閉が可能ないようにした。バルブの開度は全開とした。同治具をカメラ用三脚に取り付けることにより、噴霧時の反動によっても動かないようにするとともに、任意に缶の傾斜角を設定可能とした。

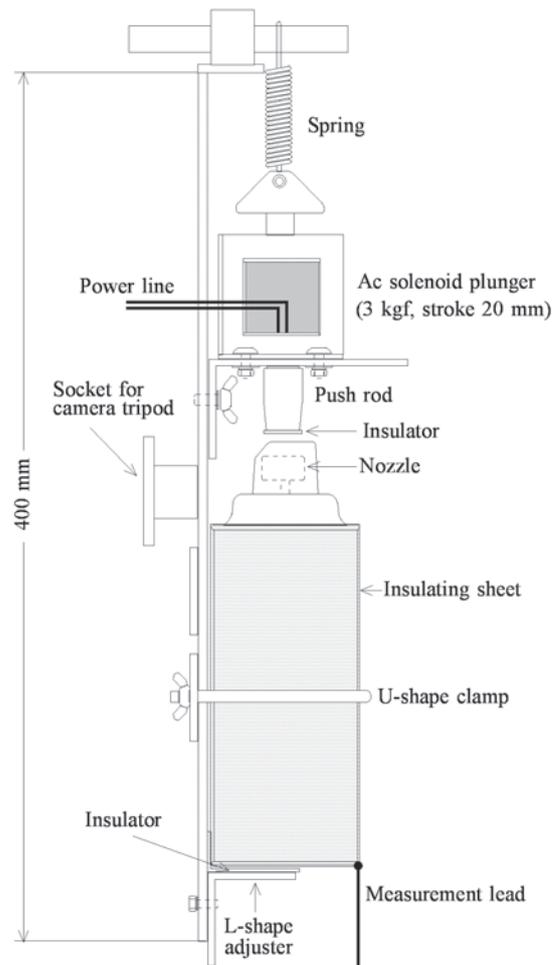


Fig. 2 Spray can holder with a solenoid plunger.
スプレー缶噴射装置

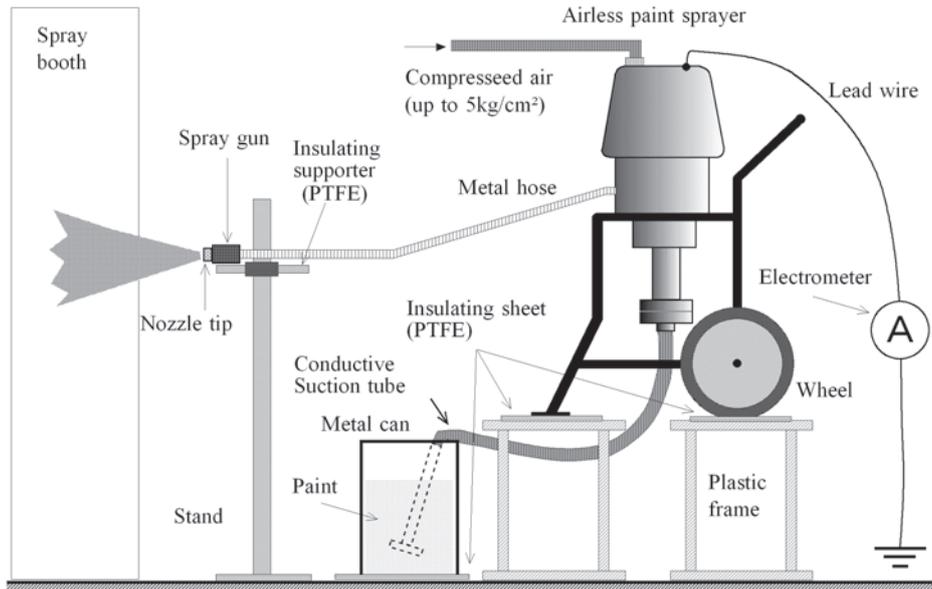


Fig. 3 Airless paint sprayer and static-current measuring system.
エアレス塗装機の噴霧電流測定装置

缶の一部にリード線を接続し、電流をエレクトロメータ (Keithley 6514/J) で測定した。噴霧物の電荷密度 q (C/kg) は次式で求めた。

$$q = -\frac{1}{m} \int_0^{t_s} i dt \quad (1)$$

ただし、 m (kg) は噴霧物の質量、 i (A) は噴霧電流、 t_s (s) は噴霧時間である。

実験に供したスプレー缶は、PT用に加え、一般に用いられている他のスプレー缶ならびに本研究用に特別に充填した噴射剤のみのスプレー缶 (LPGおよびDME) についても測定対象とした。PT用については、染色浸透液 (以下、浸透液 (Penetrant))、洗浄・除去液 (以下、除去液 (Remover))、および現像液 (Developer) の3種類がある。これらについて、国内の代表的な製造業者3社から各種類をサンプルとして購入した。本報では以後、製造業者の記号 (A, B および C) の後に現像液、除去液および浸透液を表す記号 (D, R および P) を付記して表す。

PT用スプレー缶の内容物は次の通りである。

- (1) 浸透液には、染色用としてアゾ系赤色染料が原液の最大5wt%程度含まれる。また、比較的沸点の高い炭化水素系溶剤 ($C_{10} \sim C_{14}$) を中心に、グリコールエーテル、フタル酸ジオクチル等を含む。アゾ系赤色染料は溶剤に溶解している。噴射剤はDMEである。
- (2) 除去液には、沸点が低く揮発性が高い炭化水素系溶剤 (主にヘプタン) が使用されている。ただし、唯一、B社のものは炭化水素系溶剤に加えて、アルコール

(エタノールおよびイソプロピルアルコール (IPA)) を原液の30wt%程度含む。噴射剤はLPGである。

- (3) 現像液には、炭酸塩類および SiO_2 を主成分とする数種の白色の無機微粉末 (粒径数 μm) が原液の最大10wt%程度含まれている。溶剤として揮発性の高いアルコール (エタノールを主にIPAを少量) および炭化水素系溶剤 (ヘプタン) の混合液を含む。無機微粉末は非溶解性であり沈殿しているため、使用前に缶を振って攪拌し均一な懸濁液とする。噴射剤はLPGである。

2.2 エアレス塗装機

実験装置の構成をFig. 3に示す。使用したエアレス塗装機は、エアコンプレッサで最大圧力 $5kg/cm^2$ (0.49 MPa) の圧縮空気を作り、これによってペローズ式エアレスポンプを駆動し塗料を噴霧する機構を有するものであり、ごく一般的なものである。塗料の吐出圧力は、設計上コンプレッサの空気圧の45倍であるので、最大 $225 kg/cm^2$ (22.1MPa) である。この塗装機を架台に載せ、塗装機と架台間に厚さ5mmのPTFEシートを挟み込んで電氣的に絶縁した。スプレーガンもスタンドにPTFE棒を介して固定し、絶縁した。スプレーガンおよびノズルチップは金属製であり、また、塗料を供給するホース (内径9mm、長さ10m) も金属メッシュを有するものであるため、ノズルチップと本体は電氣的に導通していた。そこで、塗装機本体 (金属製) の一部にシリコン被覆リード線を取り付け、エレクトロメータで噴霧電流を測定した。1回当たりの噴射時間は5sとし、同条件で3~4回の

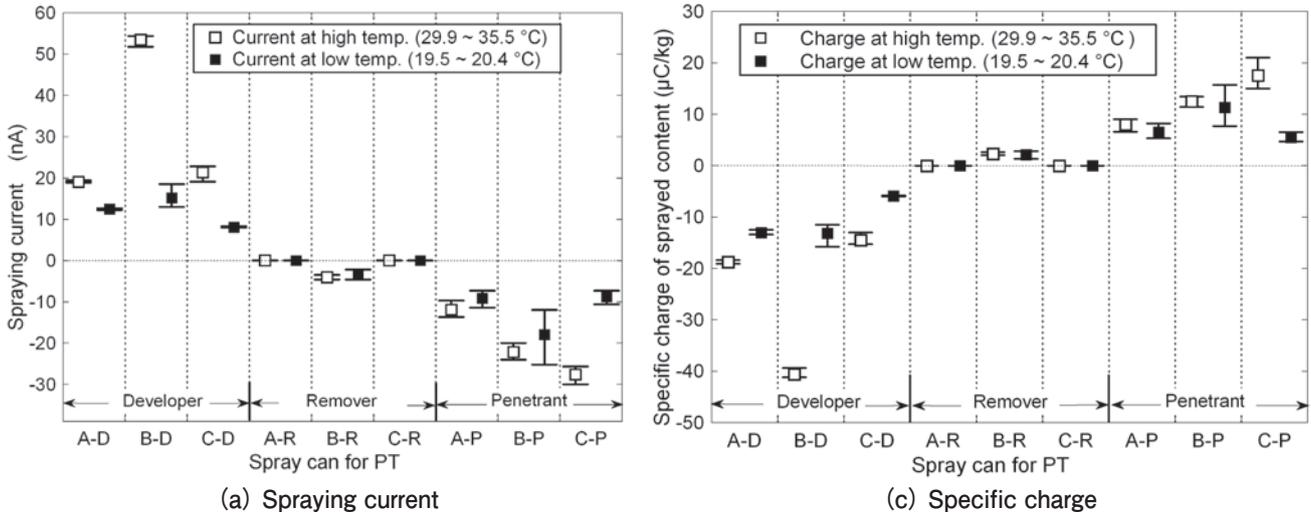


Fig. 4 Static electricity associated with the ejection of spray cans for PT.

PT用スプレー缶噴霧に伴う静電気の発生量 ((a) 噴霧電流, (b) 噴霧物の比電荷量)

Table 1 Specification of nozzle tip for airless paint sprayer.

エアレス塗装機のノズルの仕様

Tip No.	Orifice size [mm]	Delivery rate*1 [mL/min]	Pattern width*2 [mm]
G427	0.69	2300	200~250
G531	0.79	2500	250~310
G543	1.09	3000	250~310

*1 at the viscosity of 20cP and the fluid pressure of 110kg/cm²

*2 at 30 cm from the nozzle

Table 2 Ingredient of Paint and Diluent.

塗料および希釈液の成分

Liquid	Ingredient	Ratio [wt%]
Paint	Vinyl ester resin	51.7
	Pigment (two kinds)	16.8
	Glass flake*3	19.9
	Additive	4.2
	Styrene monomer	6.9
	Hardening agent	0.5
Diluent	Xylene	100

*3 Particle size distribution: < 45µm: 25%, 45~300µm: >70%

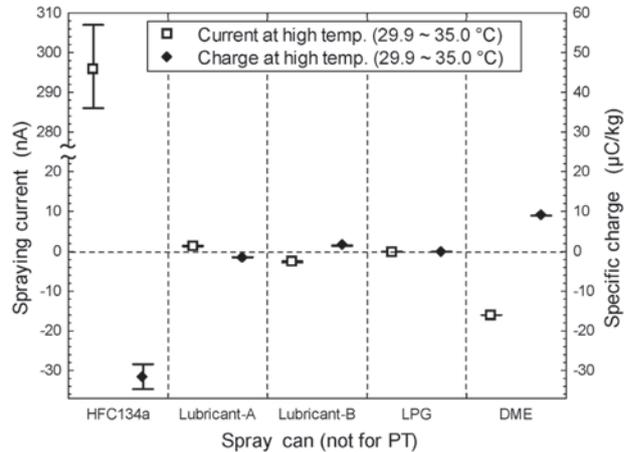


Fig. 5 Specific charge and spraying current of other spray cans.

その他のスプレー缶の噴霧電流及び比電荷量

3wt%の希釈液を加えることとし、これを標準とした。更に、希釈率の影響を調べるため、一部の項目については10wt%とした。粘度は3wt%希釈時15P、10wt%希釈時11P(測定温度15℃)であった。実験環境は、気温15.8℃、湿度45.9%、塗料液温11℃であった。

3. 実験結果および考察

3.1 スプレー缶の帯電特性

3.1.1 噴霧帯電量(噴霧電流および電荷密度)

バルブを10秒間開放して噴霧電流を測定した。代替フロン缶以外では、傾斜角度による噴霧量および帯電量への影響はほとんどみられなかったため、直立時のデータを採用した。代替フロン缶は、角度によって噴射状態

測定を行った。ミスト状で噴射された塗料の電荷密度 q (C/kg)は(1)式で計算した。今回使用した塗装機のノズルの仕様および塗料の成分をTable 1およびTable 2に示す。

通常、塗料のみでは粘度が高すぎるので希釈液を添加する。添加量は作業環境の温度で最適な粘度となるように加減される。本実験においては、塗料に対して

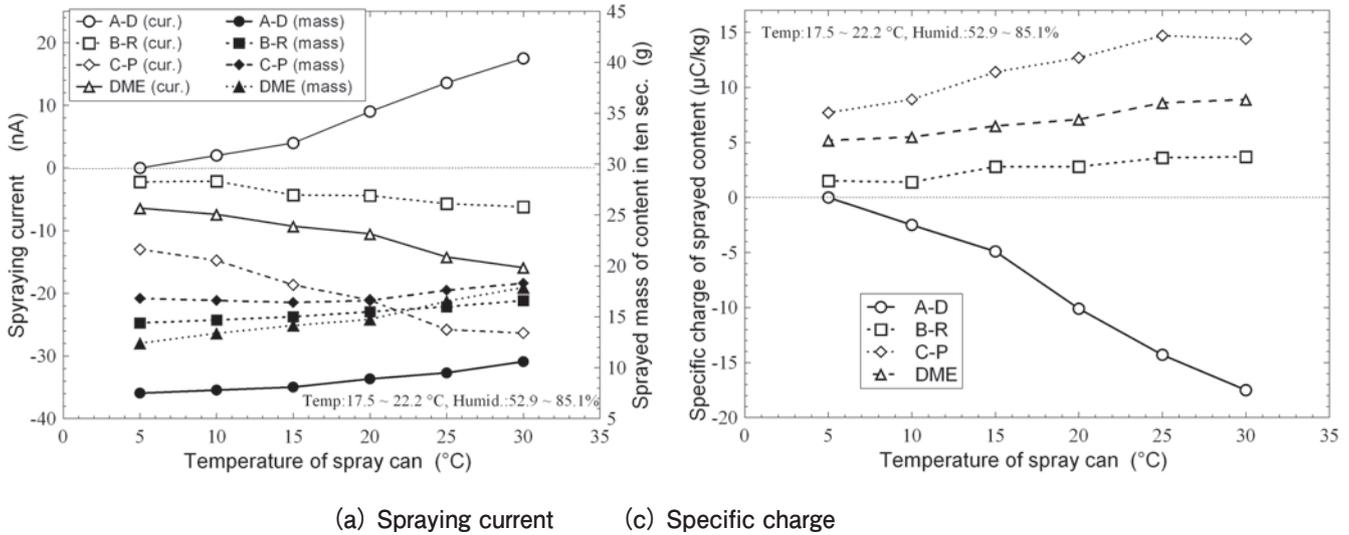


Fig. 6 Effect of temperature of spray can on electrostatic properties.

静電気の発生量に対する温度の影響 ((a) 噴霧電流, (b) 噴霧物の比電荷量)

が変化したので、直立(ガスのみ)および倒立(スノー状の昇華性固形物を含む)で実験を行った。

なお、バルブ開放中の電流変化は時間経過とともに漸減する傾向があった。これは、内圧が徐々に低下していったことを示唆しているが、数分間のインターバルを置けば、再現性あるデータが得られた。

(1) PT用スプレー缶

PT用缶の噴霧電流をFig. 4 (a) に示す。高気温時(約30°C)には、現像液では+20~+53nA、除去液では+15pA~-5nA、そして浸透液では-12~-28nAが得られた。同種類の液剤を比較すると噴霧電流の大きさには若干の差があるものの、帯電極性は等しかった。現像液および浸透液に関しては各社ともに成分はほぼ同様であるが、各成分の配合比の違いが噴霧電流値に影響していると考えられる。また、除去液ではA-RおよびC-Rは約+15pAと極めて微小な噴霧電流であったが、B-Rは安定的に約-5nAが得られた。

低気温(約20°C)になると噴霧電流は大幅に減少し、およそ半減したのもあった。

噴霧物の電荷密度は、Fig. 4 (b) に示すように、高気温時には現像液では-15~-40 μC/kg、除去液ではC-Rのみ+2.3 μC/kgで他はほぼゼロ、浸透液では+8~+17 μC/kg程度であり、大小関係は噴霧電流の場合と同じである。これは、同種液剤については単位時間当りの噴出量がほぼ同じ(約1~1.5g/s)であったためである。

(2) PT用以外のスプレー缶

PT用以外のスプレー缶のうち、ダスト除去用の代替フロン缶(HFC-134a)、潤滑油2種類および噴射剤2種

類について、噴霧電流および噴霧物の電荷密度をFig. 5 に示す。潤滑油の噴射剤は共にLPGであった。噴霧電流が際立って大きいのは代替フロンであった。このときの噴霧物には噴射時の断熱冷却によって昇華してスノー(雪)状となった微粒子が含まれていた。代替フロン缶は、噴霧量が約10g/sと大きいので、噴霧物の電荷密度で比較すると、平均32 μC/kgと現像液および浸透液と大差ない値となった。なお、イメージインテンシファイア付き高感度カメラ観測では、代替フロンを微粒子状にして噴霧している間、ノズル近傍でコロナ放電が発生していた。この放電より、発生した電荷の一部は中和されたと考えられる。この放電現象は、CO₂のドライアイスの噴霧時に見られるもの³⁾と同様に、帯電微粒子によってノズル近傍に形成された電界によって生じたと推定される。

噴射剤のみの場合、LPGでは噴霧電流と電荷密度は測定限界以下の極めて小さな値であったが、DMEでは-16nAおよび+8.9 μC/kgと比較的大きな値が得られた。

3.1.2 スプレー缶の液温の影響

3.1.1で述べたように、噴霧時の気温が帯電量にも大きく影響したことから、スプレー缶の温度が噴霧状態および帯電量に与える影響を調べた。缶を先ず冷凍庫で0°Cに冷却し、その後外気中で缶の表面温度が所定の値(5~30°C)となったときに断熱材(ウレタンシート)を巻いて治具にセットして噴霧を行った。実験対象は、帯電量が比較的大きかったA-D(現像液)、B-R(除去液)、C-P(浸透液)、およびDME(噴射剤のみ)の4種類とした。

噴霧電流および噴出量の測定結果をFig. 6 (a) に示す。温度上昇と共に噴出量は増加し、また、電流の増加率は

Table 3 Bore-sizes and materials of nozzle button assembly for spray can.
ノズルの孔径とノズルボタンの材質

Name	Nozzle		Push button
	diameter (mm)	Material (color)	Material (color)
Small metal bore	0.6	Ni-galvanized brass	PE (white)
Large metal bore	0.8	Ni-galvanized brass	PE (white)
Small resin bore	0.4	PE (red)	PE (red)
Large resin bore	0.46	PE (yellow)	PE (white)

PE: Low-density polyethylene

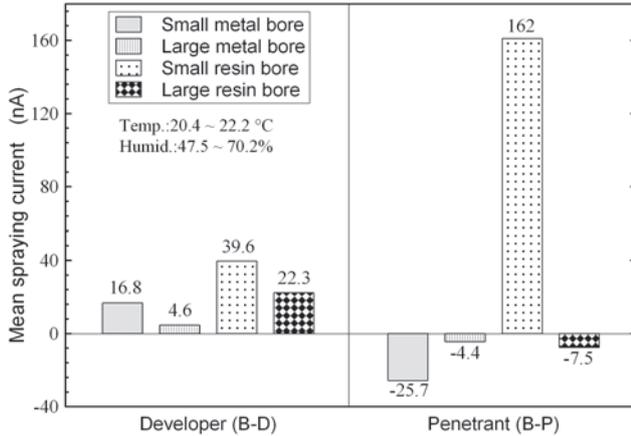


Fig. 9 Suppression of spraying currents by widening the nozzle bore.
ノズル孔径の噴霧電流に対する影響

更に大きいものとなった。特に、A-Dは5°Cではほとんど噴霧電流が発生しないのに対し、15°Cを超えるあたりから大きな増加率を示した。これは、エタノールと微粉末の帯電極性が反対であるので、5°C付近では相殺し合ってゼロであるが、温度上昇とともに微粉末の電荷が急増することが原因と考えられる。また、Fig. 6 (b) に示すように、噴霧物の電荷密度も温度とともに上昇する傾向が全ての缶において見られた。とりわけ、A-Dは温度依存性が顕著であった。

3.1.3 ノズルの影響

本研究で使用したPT用スプレー缶は全て同じ材質および構造であり、ノズルボタン(ノズルおよび押下用ボタンアセンブリの通称)も全く同じタイプのものであった。ノズルの影響を知るために、数種のノズルボタンを用いて帯電性を比較した。本実験で用いたノズルボタンは、Table 3に示すような特徴を有するものであり、これらは材料および孔径から、金属スモールボアおよびラージボア並びに樹脂スモールボアおよびラージボアと呼ぶことにする。実験対象として、PT用の中で比較的大きな帯電量を示した現像液(B-D)および浸透液(B-P)

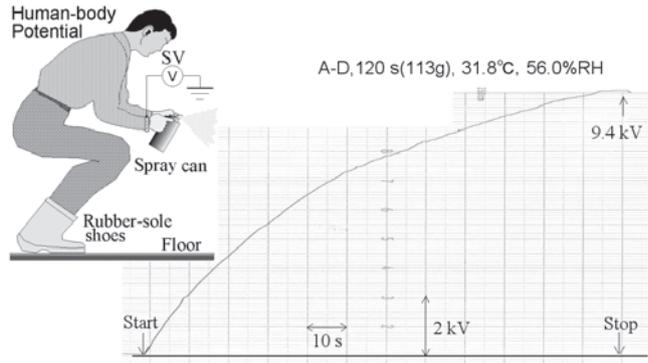


Fig. 10 Human-body potential during spraying of A-D; wearing a pair of synthetic rubber-sole shoes.
スプレー缶噴霧中の人体電位の変化(A-D)
(合成ゴム底靴着用)

を選択した。

噴霧電流の測定結果(3回の平均値)をFig. 9に示す。一般的傾向として、同様の材質であればノズル孔径が大きい方が帯電量が小さい金属の場合(1/4~1/5倍)という傾向が得られた。また、樹脂ノズルについては、浸透液の場合に、スモールボアとラージボアでは、大きさのみならず帯電極性も異なるという結果が得られた。

孔径の拡大によって噴出量は、金属ノズルでは13~16%、樹脂ノズルでは16~27%増加した。ノズル断面積は金属ノズルでは1.8倍、樹脂ノズルでは1.3倍であるから、噴出速度はそれぞれ0.64~0.65倍及び0.88~0.96倍となり、ラージボアの方が若干流速が遅くなっている。また、ノズルの円周は、それぞれ1.3倍及び1.2倍である。ノズル長は等しいので、噴出物がノズル内面と毎秒当たり接触する面積は、金属ノズルでは0.85~0.87倍、樹脂ノズルでは1.0~1.1倍となる。噴出速度、接触面積はともに帯電量に影響を与えるファクタであり、本実験の条件では、特に噴出速度の影響が大きいようである。ノズル径と帯電量の関係は帯電防止技術の発展のために重要であるので、今後のさらに究明すべき課題としたい。

3.1.4 長時間噴霧時の電流変化と人体の帯電電位

スプレー缶(A-D)を手を持って連続的に噴霧したときの人体電位の変化の例をFig. 10に示す。被験者には合成ゴム底靴(抵抗約 $10^{12}\Omega$)を着用させた。人体を漏洩抵抗Rと静電容量Cの並列回路とし、噴霧電流Iを電流源(一定)とすると、人体電位Vは(2)式のように近似できる。例えば、 $I = 15\text{nA}$ 、 $C = 100\text{pF}$ 、 $R = 10^{12}\Omega$ (合成ゴム底靴の抵抗)を(2)式に代入すると、VはほぼFig.10に一致する。

$$V = RI \left[1 - \exp \left\{ - \frac{t}{RC} \right\} \right] \quad (2)$$

3.2 スプレー缶の帯電特性に関する考察

3.2.1 スプレー缶の帯電に影響する因子

3.1.1～3.1.3の実験結果から、スプレー缶の帯電に影響する主要な因子として以下の4点が指摘できる。

(1) 内容物の極性または導電率

DME、エタノール等の極性溶剤または化合物を含む缶は、LPG、ヘプタン等飽和炭化水素のみを含有する缶よりも2～3桁大きい噴霧電流であった。このように極性溶剤において帯電量が大きい理由として、イオンの含有量が多いことが挙げられる。

一般に、極性溶剤は、自らの電離または電解質不純物の溶解によってイオンを有しており、そのため、例えばエタノールは $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{S/m}$ と大きな導電率を示す⁴⁾。DMEは常温で気体であるため、導電率を実測することは技術的に困難であるが、製造工程において、わずかながらメタノール、水等の有極性不純物を含有することを考慮すれば⁵⁾、ある程度のイオンが含まれていると推測される。

一方、無極性溶剤である飽和炭化水素は電離せず、かつ、極性物質との溶解性も極めて低いので、イオンの含有量は少なく、このため、例えば、ヘプタンは $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{S/m}$ と極めて小さな導電率を示す⁴⁾。LPGについては、DMEと同様に測定は困難であるが、分子構造からみて、導電率は小さいと考えられる。

以上のようなイオン含有量と噴霧帯電の関係は、最初にSmoluchowski (1912年) が理論モデルで仮定したことであるが、その後多くの実験によって証明されている⁶⁾。

(2) 固体微粒子

SiO_2 および炭酸塩の微粒子を含む現像液缶は、噴霧電流は正となり、噴霧物は負に帯電した。この缶に含まれるエタノールは、B-Rに関する実験によれば正に帯電したので、微粒子の実際の帯電量は見かけよりも大であったと推定される。なお、光電子分光装置(理研計器製AC-2)による測定によれば、固体微粒子の仕事関数は4.6～4.7eVであった。一方、ノズル(ニッケルメッキの真鍮製)は4.5 eVであったので帯電極性は帯電列理論に従っている。また、代替フロン缶もスノー状での噴霧したときは大きな帯電を示した。

増田は、高圧ガスの噴出実験において含有固形物と管壁との摩擦帯電が支配的であることを⁷⁾、また、Heidelbergらは CO_2 の噴霧においてはドライアイスとノズルの摩擦によって強力に帯電することを報告しているが³⁾、これらと同じ現象がスプレー缶においても生じていると考えられる。

(3) ノズルの材質および孔径

ノズルの材質は、固体に対しては摩擦帯電特性に、液体に対してはイオンの選択的吸着性に影響する⁷⁾。また、

ノズル孔径は流速および噴霧後の粒子径に影響を与える⁶⁾。これらが複合的に作用して、3.1.3に示すように、帯電量および帯電極性に極めて大きな影響を与えたものと考えられる。

(4) 温度(圧力)

スプレー缶の温度が内部に与える物理的影響としては、噴射ガスの気相での圧力変化が挙げられる。公開資料⁸⁾によれば、例えば、DMEは 5°C では0.22MPaであるが 30°C になると0.59MPaと約3倍の圧力となる。噴射圧力が大きくなると流速が増加する。一般に摩擦帯電および流動帯電においては流速が大きいほど帯電量も増加することが知られているから、これと同様の機構が働いているものと考えられる。

3.2.2 帯電量軽減方法

内容物の成分や缶の構造に大幅な変更を行うことなく帯電量を軽減する方法として、ノズルの孔径または材質を変更することが有効である。

3.1.3に示した通り、ノズル孔径を僅かに拡大することにより大幅に帯電量を減少させることが可能である。材質についても、帯電量に大きく影響を与えたことからみて、内容物によっては低下させる組み合わせがあると思われる(例えば、固形内容物の場合には、仕事関数の差が小さいものを選択する)。また、Hughesらは、逆に帯電量を増加させる目的で材質と共にノズル断面の形状を工夫しているが⁹⁾、帯電量減少の面でも同様のアプローチが可能と考えられる。

なお、ノズル孔径の拡大によって噴出速度が遅くなるので、噴霧物の到達距離は短くなるが、PT作業はノズルからターゲットまで距離が短いので作業性に大きな影響を与えることはないと思込まれる。

3.3 エアレス塗装機の帯電特性

3.3.1 噴射圧力の影響

今回用いたノズルチップおよび塗料の組合せにおいて、噴射圧力と吐出量の関係を実測した結果をFig. 11に示す。Table 1の仕様(公称値)通り、同じ塗料を用いた場合、同一噴射圧力に対してG427、G531およびG543の順に吐出量が増加した。また、塗料の希釈率の大きい方が粘度が低いので同一噴射圧力に対して大きな吐出量となった。当然ながら、圧力が高いほど吐出量も大きくなった。ただし、仕様(Table 1)によれば、例えばG543とG427の吐出量の比は1.3(吐出圧力 110kg/cm^2 時)となるはずであるが、実測(Fig. 11)ではその比は約1.6～1.7(同 $90 \sim 225 \text{kg/cm}^2$)とやや大きくなった。これは、ノズルチップ製造上のばらつきおよび塗料の成分(特にガラスの粒子が含まれるので、小孔径では流動性が低下する)等が影響したものと考えられる。なお、圧

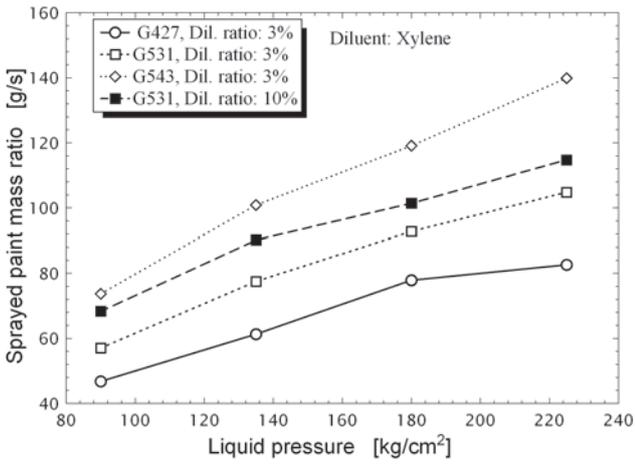


Fig.11 Sprayed paint mass per second with respect to liquid pressure.
吐出圧力と塗料噴出量の関係

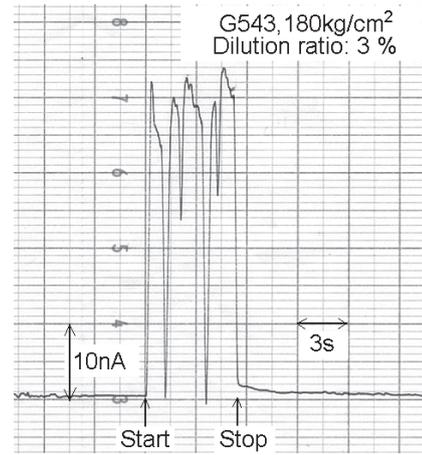
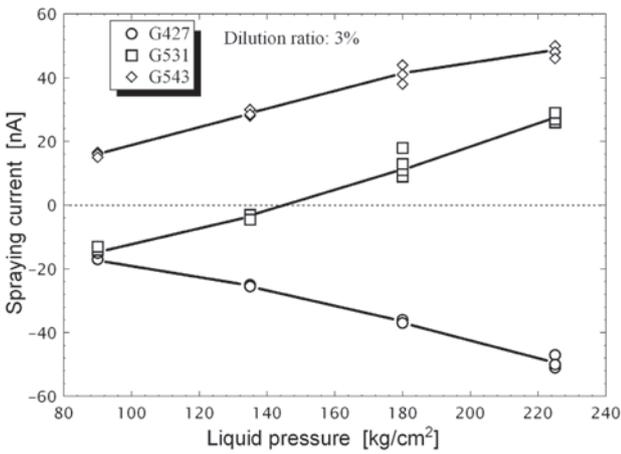
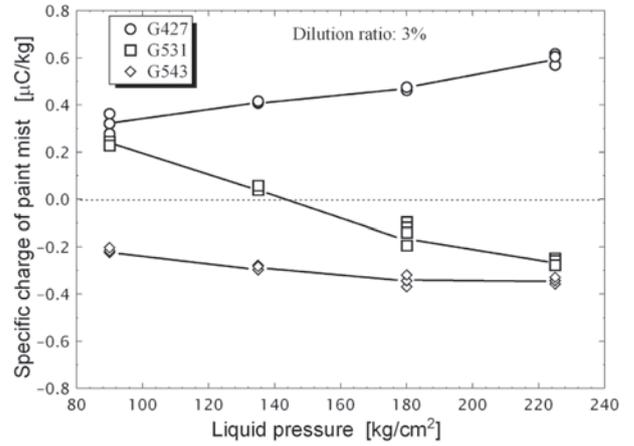


Fig.12 Typical profiles of spraying current.
噴霧電流波形の例

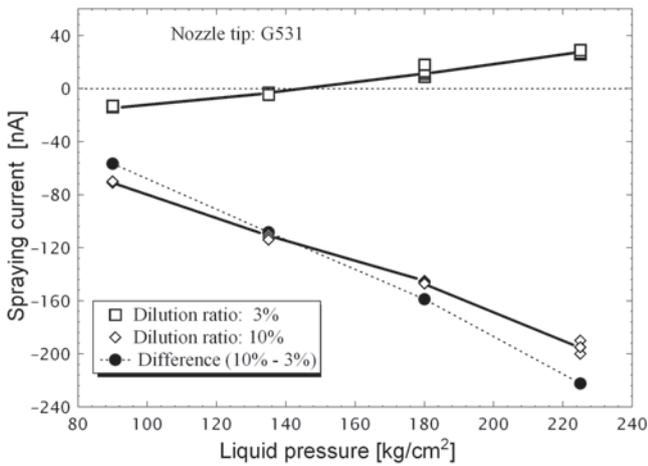


(a) Spraying current

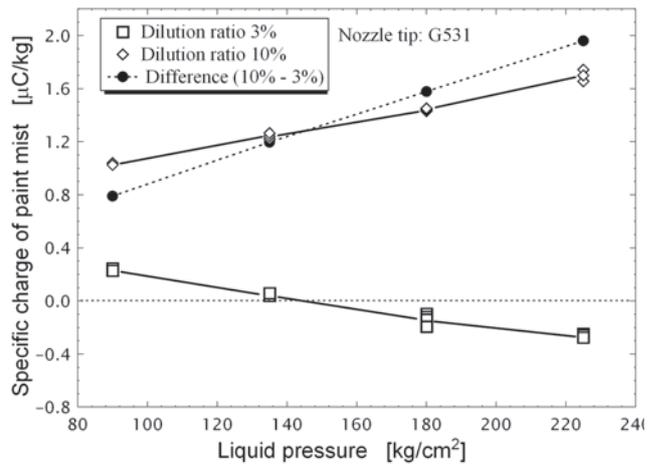


(b) Specific charge of paint mist

Fig. 13 Effect of nozzle type on electrostatic properties of the airless paint sprayer.
エアレス塗装機の帯電特性に対するノズル形式の影響



(a) Spraying current



(b) Specific charge of paint mist

Fig. 14 Effect of dilution ratio on electrostatic properties of the airless paint sprayer.
エアレス塗装機の帯電特性に対する希釈度の影響

力の増加は単に吐出量を増やすのみではなく、噴霧液滴をより微細なものにするので、帯電特性にも影響することが予測できる⁶⁾。

ノズルの噴霧電流波形の一例をFig. 12に示す。噴霧直後から電流が急激に立ち上がり、変動はあるものの、噴霧時間中ピーク値はほぼ一定に維持された。ところどころの電流の落ち込みは、塗料中に存在する気泡によって吐出圧力が瞬間的に減少することによるものであり、この種の噴霧装置では機構上回避は困難である。

噴出圧力に対する噴霧電流および塗料ミストの電荷密度をFig. 13 (a) および (b) に示す。ノズルチップの種類によって、帯電量のみならず帯電極性(正か負か)が異なる等、各々特徴的な帯電特性となった。塗料には、顔料およびガラスの固体微粒子が含まれることから、少なくとも液体相の分裂による帯電、固体相とノズル摩擦による帯電、および固体相と液体相の相対運動による電荷分離という三つ帯電過程が含まれている⁷⁾。孔径および圧力が変化することにより、これらの帯電過程のうちどれが支配的であるか、現時点では明確には分からないが、少なくとも最小径(G427)と最大径(G543)では全く異なった帯電過程が支配的であり、中間径(G531)では、低圧では最小径と、高圧では最大径と同じ帯電過程が優勢となることが指摘できる。

以上のように、多相系となった場合には、複数の帯電過程が存在し、かつ、孔径、圧力等の違いによって優勢となる帯電過程が異なるので帯電量の予測は困難なものとなる。

3.3.2 希釈度の影響

希釈液(キシレン)の濃度の影響を調べるために、塗料に対して10wt%の希釈液を添加し、ノズルチップG531を用いて帯電特性を測定した。結果をFig. 14 (a) および (b) に示す。同図には、同じノズルチップを用いた3wt%希釈塗料の特性およびこれらの差もプロットしている。3wt%希釈塗料と10wt%希釈塗料では圧力に対する噴霧電流または電荷密度の変化率が正反対となった。吐出圧力225kg/cm²のとき、絶対値で比較すると、10wt%希釈では噴霧電流は3wt%の場合の約6倍となった。また、Fig. 13 (a) および (b) のG427 およびG543と比較しても3倍以上の噴霧電流および電荷密度となった。特にG427、3wt%希釈塗料の場合と帯電特性が類似しているので、これと同様の帯電過程で、かつ、①粘度の低下により噴霧液滴の微細化にともなう液体相の分裂帯電の活発化、および②固体微粒子の相対的な減少にともない固体粒子が関係する帯電過程の劣勢化の相乗的な効果による帯電量の増加があったことが示唆される。なお、塗料の導電率は3 wt% 希釈の場合 6.6×10^{-7} S/m、10 wt% 希釈の場合 6.0×10^{-7} S/m と大きな違いはな

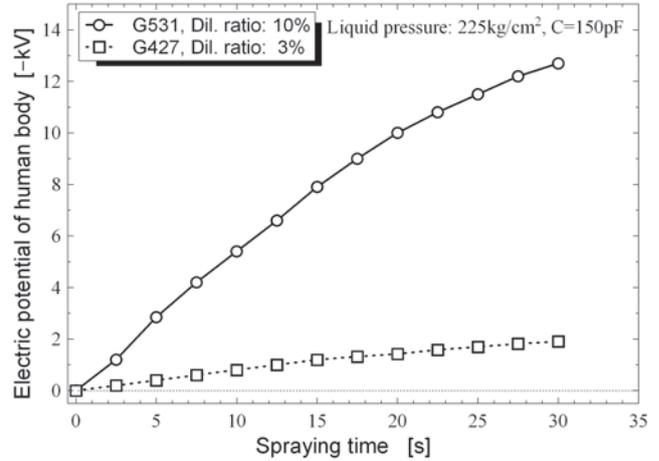


Fig.15 Electric potential of human body in operation.
塗装機使用中の人体電位

かったので、スプレー缶の噴霧の際にみられたような液中の導電率すなわちイオン濃度に起因する帯電量の変化があったとは考えにくい。

帯電過程は不明な点が多いが、全く同じ成分であっても成分比を変えるによって帯電量が大きく変化することがあるという実験事実は、噴霧工程の安全技術を確立する上で重要である。

3.3.3 塗装機および作業者の電位

噴霧電流が大きいものであったので、塗装機および作業者の身体の接地が不十分な場合には、噴霧によって発生した電荷がこれらに蓄積して電位が上昇するものと見込まれた。そこで、塗装機および人体を不導体シート(PTFE)によって絶縁し、噴霧に伴う電位変化を測定した。噴霧条件は、①ノズルチップG427、3wt%希釈塗料、噴射圧力225kg/cm²、および②G531、10wt%希釈塗料、225kg/cm²の2種類とした。また、噴射時間は、塗料の量が限られていたため、一律に30sとした。

その結果、Fig. 15に示すように、①の条件では-2kVに、②の条件では-12 kVに達した。図からわかるように、30sではまだ飽和レベルには達していないので、噴射時間が長くなれば電位は更に上昇することが予測される。人体および塗装機の静電容量は合計150pFであったので、これらに蓄積した電荷量は、①では $0.3 \mu\text{C}$ 、②では $1.8 \mu\text{C}$ であり、これは、それぞれの噴霧電流から予測される値 $1.4 \mu\text{C}$ および $5.8 \mu\text{C}$ に比べてかなり小さいものであった。噴霧停止後の電位の減衰はほとんどなかったことから、ノズル近傍に形成される電界による液滴の誘導帯電による電荷減殺効果、塗料ミストの人体や塗装機への付着による電荷中和等、噴霧中の諸現象が理由として考えられる。また、このときの静電エネルギー

は0.3mJおよび10.8 mJと計算できる。したがって、もし火花放電が発生したとすると、①の条件では有機溶剤蒸気に、②では蒸気のみならず高引火点溶剤のミストにも着火する可能性がある¹⁰⁾。

4. まとめ

噴霧工程での爆発・火災の主要な発生源であるスプレー缶とエアレス塗装機について、静電気特性を測定した。いずれも接地が不十分であると短時間で可燃性ガス・蒸気へ着火しうるだけの静電エネルギーを蓄積することが実験的に証明された。静電気特性として重要なものは次の通りである。

4.1 スプレー缶

- (1) 高気温時には、浸透液および現像液は強く噴霧帯電し、例えば現像液では噴霧電流および噴霧物の電荷密度は、それぞれ+20~+53nAおよび-15~-40 $\mu\text{C}/\text{kg}$ となった。
- (2) DME、エタノール等の極性溶剤を含む場合は、噴霧電流は負となり、噴霧物は正に帯電し、そのレベルは注意を要するものであった。一方、LPG、高沸点飽和炭化水素等の非極性物質のみを含有する場合には、安全上問題のないレベルの帯電量であった。
- (3) 固体微粒子を含む場合または噴霧時に相変化によってスノー状の固体微粒子を形成する物質を含む場合は、これら微粒子とノズル壁面の摩擦帯電によって、極めて大きな帯電を示した。
- (4) 液温が上昇すると、スプレー缶の内圧が上昇するとともに、帯電量が増加する傾向にあった。特に、微粉末を含む現像液は顕著な増加を示した。
- (5) ノズル径を僅かに拡大することにより、現像液、浸透液ともに帯電量を数分の1に低下させることが可能であった。これは、帯電抑制型スプレー缶開発上のヒントとなり得る。

4.2 エアレス塗装機

- (1) ガラスフレークを含む塗料を噴出したところ、噴霧電流および塗料ミストの電荷密度は、最大200nAおよび1.6 $\mu\text{C}/\text{kg}$ に達した。
- (2) ノズル孔径によっては帯電量のみならず帯電極性も変化することがあった。
- (3) 塗料成分の濃度によっても帯電量は著しく変化した。たとえば、希釈剤であるキシレンの濃度を10 wt%にすると3wt%の場合に比べて1 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 以上大きな電荷が観測された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々に技術情報、実験資材、実験場所および労力の提供をいただいた。要望に従い匿名とするが、心より謝意を表する。

参考文献

- 1) Schon, G.: VFDB-Ztschr, 5, pp.75 (1956)
- 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) Heidelberg, E., Nabert, K. and Schon, G.: Arbeitsschutz, 11, pp.222 (1958)
- 4) 産業安全研究所技術指針, RIIS-TR-87-1, 産業安全技術協会 (1988)
- 5) 資源エネルギー庁:「DME 検討会」報告書 (2001)
- 6) Bailey, A. G.: Electrostatic Spraying of Liquids, pp.1-41, Research Studies Press LTD. (1988)
- 7) 増田閃一: 最近の静電気工学, pp.1-70, 高圧ガス保安協会 (1974)
- 8) 大洋液化ガス株式会社, http://taiyolpg.com/lpg-air_property.html# (平成21年1月16日アクセス)
- 9) Hughes J.F, Gaunt, L.F. and Gaynor P.T.: Electrostatic targeting for allergen removal and pest control applications, JES, 55, pp.237-245 (2002)
- 10) 松井英憲, 大塚輝人: 可燃性ミストの最小着火エネルギー測定, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.17 (1999)

(平成20年12月18日受理)