

9 . 噴霧による液体の帯電特性

田島泰幸*, 児玉 勉**, 大澤 敦**

9 . Electrostatic Charging on Liquid Caused by Spraying

by Yasuyuki TABATA*, Tsutomu KODAMA** and Atsushi OHSAWA**

Abstract : Leakage accidents of pressurized flammable liquids and discharges of liquefied gases or steam, which are accompanied by spraying of liquid, often occur in chemical plants. Also, there are a lot of spraying processes such as coating, cooling, cleaning, chemical reaction, sprinkling, painting and so on in industry. A large amount of electrostatic charges generated by liquid flow, separation from nozzle and division of liquid drop accumulate on liquid drops and mist in spite of electric conductivity of the liquid. The charged cloud consisting of such charged liquid drops and mist raises electrostatic field strength and may generate electrostatic discharges. Furthermore it sometimes causes an ignition of flammable mixtures in case the charged cloud is large in scale and high in concentration.

In order to prevent such an explosion during spraying of liquid, proper safety evaluation applicable to actual liquid spraying and countermeasures against the ignition are required in industry. The purpose of this research is to clarify the basic characteristics of electrostatic charging and to discuss the evaluation method for ignition risk during spraying of liquid. Using a small scale of experimental apparatus consisting of a two-fluids nozzle we measured the nozzle current from the isolated metal nozzle to the ground, and the mesh current from a metal mesh with 19 cm diameter to the ground using an electrometer, respectively. The mesh was placed at 2 m distance from the nozzle. Electrostatic potential at the edge of the charged cloud was measured with a hand sized electrostatic surface potential meter. Flow rate of liquid drops was calculated from the weight of liquid trapped on a paper filter attached to the metal mesh.

The results obtained from the experiments are as follows :

(1) Charge to mass ratio on water drops at the position of 2 m in front of the nozzle was two figures larger than that at the nozzle and reached more than $1 \mu\text{C}/\text{kg}$ because of a large amount of charges generated by division of liquid drops after the spraying.

(2) Electrostatic charging of methanol, gasoline and their mixtures during the spraying was almost the same level and approximately a half of that of water.

(3) It was found that electrostatic potential at the edge of the charged cloud could be estimated assuming a uniform space charge distribution in the radial direction.

(4) Incendiary discharges are likely to occur when the charge cloud is large in scale and high in concentration because a large amount of charges generate on liquid drops during spraying.

Keywords ; Static electricity, Electrostatic charging, Spraying of liquid, Incendiary discharge, Explosion and fire

*所長 Director-General

**物理工学安全研究部 Physical Engineering Safety Research Division

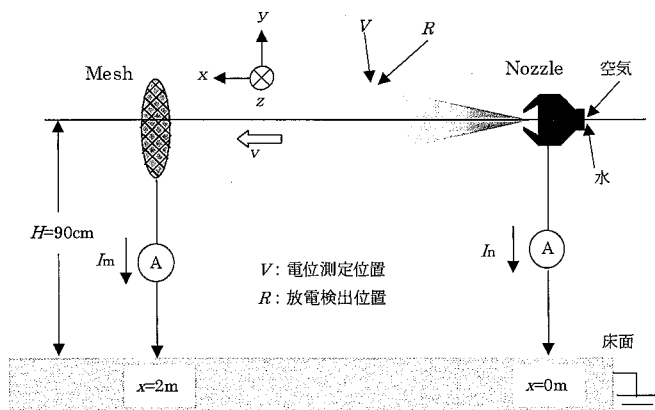


Fig. 1 Schematic of experimental set-up for spray charging.
噴霧帯電実験装置の概要

1. はじめに

液体がノズルから噴霧すると、ノズル内での流動、ノズルからの分離、噴霧後の分裂等によって噴霧後の液滴に静電気が帯電する。この帯電現象は一般には噴霧帯電または噴出帯電と呼ばれている。液体の分裂による帯電はレナード効果 (Lenard effect) として知られている¹⁾。

液体が配管内を流動するときの流動帯電の場合は、導電率の高い有極性液体であると、電荷の緩和が早いいため、タンク内では大きな帯電は起こらず、静電気放電を着火源とする爆発・火災等の静電気災害の問題は起きないが、噴霧帯電の場合は、噴霧した液滴が空気によって絶縁されるため、その導電率にかかわらず帯電する。災害事例をみても、原油タンクの海水によるジェット洗浄中にスーパータンカーの爆発²⁾が過去に相次いで発生したほか、水蒸気の放出時の帯電が原因となってピット等に滞留する溶剤蒸気の爆発・火災が多発している。化学プラント等では、可燃性の高压液体、液化ガス等が漏洩噴出した際にも多くの爆発・火災事例が起きているほか、液状のプロパンをボンベから放出する際にも噴出帯電が原因と推定される災害が発生している³⁾。また、最近の工場・事業場では、以上のような水蒸気の漏洩、放出に伴う噴出のほか、造粒、冷却、洗浄、反応、散布、塗装等、新原材料を含む可燃性液体の噴霧プロセスが多く行われていて、これらにおける静電気災害の防止技術の確立が求められている。

噴霧帯電の問題は今後益々重要となると予想されるが、これについては国内外を問わず研究はほとんど行われていないのが実状である。そこで、ここでは噴霧帯電に関する基本的現象、危険性評価等の基礎資料を

得るため、2流体ノズルを用いる水等の噴霧帯電実験を実施したので、以下にその結果を報告する。

2. 実験方法

噴霧帯電について基本的実験を行うため、液体試料として取り扱いの容易な水を用いた実験装置の概要を Fig. 1 に示す。ここで、水はイオン交換水 (導電率 1 μS/cm) であり、ノズルは充円錐型の2流体ノズル (いけうち、ドライフォグノズル AKIMISUT-B) を用いた。噴霧時のノズルでの静電気発生量を測定するため、金属ノズル部を絶縁してこれと大地間にエレクトロメータ (Keithley, 614 型) を接続して、その接地電流 (以下、ノズル電流と記す。) を測定した。また、目視によって水滴の挙動を観察したところ、ノズルから 2 m 前方では噴霧水滴が直径約 75 cm の広がりをもってほぼ均一に噴霧していたため、この点に直径 19 cm の金網を設置して、その接地電流 (以下、メッシュ電流と記す。) を同様に測定した。また、ノズル付近及びノズル前方 2 m 位置における水滴の広がり端部における帯電電位をハンディタイプの静電気測定器 (春日電機, KD-0101) を用いて測定した。また、この位置の噴霧流量を推算するため、金網に乾燥した濾紙を取り付けて、これにトラップされる水滴の重量を測定した。そのほか、静電気の放電の有無を放電検出器 (デーシー, EMI ロケータ) によって検出した。

上記と同じ実験装置を用いて、比較のため可燃性液体の例としてメタノール、ガソリン及びこれらの混合液の噴霧帯電特性を測定した。

3. 実験結果

3.1 水の噴霧実験結果

水の噴霧帯電に関する実験結果の概要を Table 1 に示す。ここで、ノズル前方方向を x 軸、ノズル位置を x=0 とすると、x=2 m の水滴流量は直径 19 cm の濾紙へトラップされた水滴重量から求めたものである。ただし、この値は 10 回の測定の平均値であるが、測定に濾紙を用いたため、これが水滴の噴霧状態に影響を及ぼす等、必ずしも正確ではなく概算値である。x=2 m では水滴が直径 75 cm の円筒状に広がって噴霧しているため、その径方向で濃度が均一と仮定すると、x=2 m における全流量は (1) 式によって算出される。

$$W = W_m \frac{A}{A_m} \tag{1}$$

ここで、W は噴霧流量 (kg/s)、W_m はメッシュ

Table 1 Experimental results of spray charging of water.
水の噴霧帯電実験結果

測定項目	測定結果		備考
	ノズル部 ($x = 0$ m)	ノズルの前方 ($x = 2$ m)	
発生電流	最大 +30 nA 平均 +20 nA	最大 +2.5 nA 平均 +1.5 nA	$x = 0$ m の値はノズル電流 (極性は異なる) $x = 2$ m の値はメッシュ電流
帯電電位	+100~200 V	+80~150 V	水滴の広がり端部で測定
水滴流量	平均 800 mg/s	平均 1.6 mg/s	$x = 0$ m の値はノズルの流量 $x = 2$ m の値は直径 19 cm の濾紙で測定
水滴速度	—	平均 1 m/s	目測による測定
放電検出	間歇的に検出	検出なし	放電検出に同期してノズル電流にもノイズが侵入

Table 2 Experimental results of spray charging of flammable liquids.
メタノール、ガソリンの噴霧帯電実験結果

液体の種類	発生電流 ² (nA)		ノズル流量 (mg/s)	帯電電位 ³ (V)		
	平均値	最大値		0 m	0.5 m	1 m
メタノール	+3	+5	400	20~40	0~40	30~60
混合液 ¹	+5	+8	450	10~60	20~90	0~30
ガソリン	-6	-8	420	20~30	30~80	30~50

¹メタノール 85%/ガソリン 15% (体積比), ²ノズル電流 (極性は異なる), ³ノズルからの各距離における測定値

部の流量 (kg/s), A は噴霧断面積 (m^2), A_m は濾紙の面積 (m^2) である。噴霧断面の直径 75 cm, 濾紙の直径 19 cm, 濾紙による流量測定結果 1.6 mg/s を (1) 式に代入すると, $x = 2$ m における噴霧流量は 25 mg/s となる。Table 1 に示すようにノズル流量は 800 mg/s であるので, $x = 2$ m の位置における噴霧流量 25 mg/s はノズル流量の 3% に過ぎない。今回使用したノズルによる水滴の粒径 (5~120 μm) が微細であるため, ノズルから噴霧した水滴の大部分が 2 m 位置に到達する前に周辺へ蒸発または周辺へ逸散するか, あるいは粒径の大きい水滴が床へ落下したものと推定される。

放電はノズル付近で検出されたが, 放電音, 放電の発光は確認できなかった。また, ノズル内部の金属部分を接地すると, 放電の頻度が減少した。このことから, 放電は主としてノズル内部で発生していることが示唆された。

3.2 可燃性液体の噴霧実験結果

上記と同様の方法でメタノール, ガソリン及びメタノール・ガソリン混合液についてそれぞれ噴霧実験を行った結果を Table 2 に示す。発生電流はノズル電流の極性を変えたものである。帯電電位はノズル前方距離 0 m, 0.5 m, 1 m において噴霧液滴の端部で測

定した結果である。

4. 実験結果の検討

4.1 液滴の帯電電荷密度

噴霧液滴の濃度が径方向 (y 軸方向) に対して均一であり, $x = 2$ m の近傍では液滴がほぼ円筒状に移動すると仮定して考察する。ノズル前方 x における液滴の濃度を M (kg/m^3), 液滴の噴霧断面積を A (m^2), 液滴の x 方向の移動速度を v (m/s) とすると, 液滴の流量 W (kg/s) は (2) 式から算出される。

$$W = MAv \quad (2)$$

一方, 液滴の単位重量当たり電荷量 (以下, 比電荷と記す。) を ρ (C/kg) とすると, 帯電液滴の移動によって x の点に流れる電流 I は (3) 式で与えられる。

$$I = MAv\rho \quad (3)$$

(2), (3) 式から次の (4) 式が導かれる。

$$\rho = \frac{I}{W} \quad (4)$$

(4) 式に水の噴霧実験結果 I 及び W を代入して水滴の比電荷 ρ を求めた結果を Table 3 に示す。なお, $x = 0$ m における値はノズル流量とノズル電流を (4) 式に適用して求めたものである。Table 3 から

Table 3 Calculated values of charge density on water drop.
水滴の比電荷算出結果

測定位置	比電荷	
	最大値	平均値
x = 0 m ¹	+38 nC/g	+25 nC/g
x = 2 m	+1.6 μC/g	+0.94 μC/g

¹ノズル電流から算出

明らかのように、比電荷は $x = 0$ m と $x = 2$ m の位置では 2 桁異なっている。これはノズル電流には噴霧後の水滴の分裂帯電が含まれていないため、前者が小さな値になり、一方、前述したようにメッシュ位置には比較的帯電量の大きい微細粒径の水滴が多く到達するため、後者が大きな値になったものと推定される。そのほか、後者にはメッシュ通過時の摩擦による静電気発生も影響することが考えられる。

同様の方法でメタノール、メタノール・ガソリン混合液、ガソリンのノズル電流 (Table 2) から液滴の比電荷を算出した結果を Table 4 に示す。この結果は、いずれの液体もほぼ同程度で約 10 nC/g であった。強いて大きさを比較すると、ガソリン、メタノール・ガソリン混合液、メタノールの順となり、極性はガソリンのみ負極性であった。比電荷を水滴のそれ ($x = 0$ m) と比較すると約半分である。これらの結果から、ノズルが同じ場合、ノズル電流は液体の種類によって差があるものの桁が変わるほどではないといえる。

4.2 噴霧液滴の帯電電位

ノズル前方 2 m の位置における噴霧液滴の帯電電位の推算と実測値との比較について以下に検討する。いま、 $x = 2$ m の近傍では水滴が円筒状に移動しており、その濃度は径方向について均一とし、単位長さ当たり帯電電荷を q_0 (C/m) とすると、(5) 式が成立する。

$$I_m = q_0 v \frac{d_m^2}{d^2} \quad (5)$$

ここで、 d_m は電流測定用円形メッシュの直径、 d は円筒状に広がっている噴霧断面直径である。式 (5) に水噴霧の実験結果である $I_m = 1.5$ nC/s、 $v = 1$ m/s、 $d_m = 19$ cm、 $d = 75$ cm を代入して、 q_0 を求めると 2.3 nC/m となる。

一方、円筒状に広がっている噴霧液滴の端部における電位の近似値 V は (6) 式⁴⁾で表される。

Table 4 Calculated values of charge density on flammable liquids.
メタノール、ガソリンの比電荷算出結果

液体の種類	比電荷 ²	
	最大値	平均値
メタノール	+12.5 nC/g	+7.5 nC/g
混合液 ¹	+17.8 nC/g	+11.1 nC/g
ガソリン	-19.0 nC/g	-14.3 nC/g

¹メタノール 85%/ガソリン 15% (容量比)

²ノズル電流から算出

$$V = \frac{q_0}{2\pi\epsilon_0} \log \frac{2H-r}{r} \quad (6)$$

ここで、 r は円筒状の噴霧液滴の半径、 H は同円筒中心軸の床面から距離である。(6) 式に (5) 式で求めた $q_0 = 2.3$ nC/m 及び $H = 90$ cm、 $r = 37.5$ cm を代入すると $V = 530$ V となる。この結果を実測値 (最大 150 V) と比べると、桁が一致しているもののその 3.6 倍である。この差の理由として、(6) 式は円筒内で電荷分布が均一、かつ、円周部の電位が一定と仮定した近似式であるが、実際には電荷分布が必ずしも均一でなく、また、円周の位置によって静電容量が異なるためその電位も一定にはならないことが挙げられる。そのほか静電気測定器を接近する際の静電容量の増加によって測定電位が低下することも影響する。したがって、(6) 式は概算に用いられるものである。ちなみに、 $x = 2$ m の位置にテフロン板を水滴の噴霧方向と直角に置いて、これに水滴を付着させてその電位を測定したところ、Fig. 2 に示すように、その電位は水滴の付着とともに上昇し、ある一定電位に飽和した。飽和電位は約 150~200 V であったことから、噴霧水滴の帯電電位は 200 V 程度であったと推定される。

メタノール、メタノール・ガソリン混合液、ガソリンの噴霧液滴の帯電電位の測定結果 (Table 2) はいずれも 30~60 V であり、水滴に比べて約 1/3 である。このことから、噴霧条件が同じ場合、ノズル電流と同様に帯電電位も液体の種類によって差が生じるが、桁が変わるほどではないといえる。

4.3 帯電液滴雲からの放電危険性

液滴の空間濃度 M (kg/m³) は (2) 式から算出される。(1) 式から求めた $x = 2$ m の位置における噴霧流量 $W = 25$ mg/s、水滴の x 方向の移動速度 $v = 1$ m/s、噴霧断面積 $A = 0.44$ m² (直径 75 cm) を (2) 式に代入すると、 $M = 57$ mg/m³ となる。空間電荷密度 q (C/m³) はこの濃度 M と比電荷 ρ か

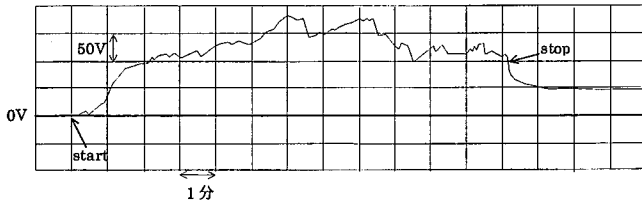


Fig. 2 Record of electric potential on a PTFE plate.
テフロン板の帯電電位測定記録

ら (7) 式によって求められる。

$$q = M\rho \quad (7)$$

この式に $M = 57 \text{ mg/m}^3$, $\rho = 1 \text{ } \mu\text{C/g}$ を代入すると $q = 57 \text{ nC/m}^3$ となる。

円筒状に分布した帯電液滴雲の外周部の電界強度 E (V/m) は、次式で表される。

$$E = \frac{rq}{2\epsilon_0} = \frac{rM\rho}{2\epsilon_0} \quad (8)$$

ここで、 r は帯電雲の半径、 q は空間電荷密度、 ϵ_0 は空気の誘電率 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)、 M は液滴濃度、 ρ は液滴の重量比電荷である。仮に、 $r = 1 \text{ m}$, $x = 2 \text{ m}$ における $q = 57 \text{ nC/m}^3$, $M = 57 \text{ mg/m}^3$, $\rho = 1 \text{ } \mu\text{C/g}$ を (8) 式に代入すると $E = 3.2 \text{ kV/m}$ となる。この大きさは静電気安全指針⁵⁾で推奨する着火性放電の発生限界の指標 100 kV/m の約 $1/30$ に過ぎないが、(8) 式に示すように電界強度は帯電雲の半径及び帯電液滴濃度とともに比例するため、噴霧の規模が大きくなり、また、噴霧時間が継続すると帯電液滴の濃度が増加し着火危険性が高まる。例えば、液滴濃度が 2 g/m^3 になると、帯電雲の半径が 1 m であっても電界強度は 112 kV/m に達する。

以上の検討の結果、液体の噴霧によって液滴の比電荷が $1 \text{ } \mu\text{C/kg}$ 以上の大きな値になることから、噴霧の規模が大きくなり、高濃度の帯電雲が生起されると、着火性放電が起きる危険性が高いといえる。

液体の噴霧中に静電気放電が発生すると電磁ノイズが発生する。今回の水の噴霧実験でもノズル近傍において静電気放電が検出された (Table 1 参照)。放電に伴う電磁ノイズの強度は不明であるが、放電検出器の感度からみて、その放射ノイズは電子機器等を誤作動させるようなレベルではないと推定される。また、ノズル内部の金属を接地すると、ノイズの発生頻度、レベルがともに減少したことから、大部分はノズル内部での静電気放電であったと推定されるが、帯電液滴雲からの静電気放電も完全に否定されたわけではない。

5. むすび

可燃性液体等の漏洩・放出に伴う噴出あるいは噴霧プロセスにおける静電気に起因する爆発・火災の防止のための基礎資料を得るため、2流体ノズルを用いて水等の噴霧実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) ノズルから 2 m 離れた位置における噴霧水滴の比電荷 (単位重量当たりの電荷量) は、ノズルから分離直後の値に比べて2桁大きく、 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ C/kg}$ に達したことから、噴霧後の液滴の分裂による帯電が大きいことが示唆された。
- (2) メタノール、ガソリン、及びこれらの混合液を噴霧した場合の帯電量は噴霧水滴の約半分であったことから、帯電量は液体の種類によって変化するが、噴霧条件が同じであれば桁が変わるほどではないことが示唆された。
- (3) 噴霧液滴の広がり端部における帯電電位の測定値は、噴霧方向と直角方向 (径方向) について空間電荷密度が均一と仮定した近似式から求めたものの約 $1/3$ であったことから、近似式が帯電電位の概算に有用であることが示唆された。
- (4) 噴霧帯電による液滴の比電荷が大きいことから、帯電雲の規模・濃度が大きくなると、着火性放電の発生危険性が高いことが示唆された。

謝 辞

本研究の実施に当たって、(株) いけうち・米澤正晴氏及び当研究所研究生の春日電機 (株)・西村浩次郎氏には実験等に多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, p.1062, オーム社 (1988)
- 2) 増田閃一, 最近の静電気工学, 高圧ガス保安協会 KHK E 006, p.64 (1974)
- 3) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, p.352, オーム社 (1988)
- 4) 例えば電気学会編, 電気磁気学, p.45, 電気学会 (1962)
- 5) 労働省産業安全研究所, 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1 (1987)

(平成 10 年 11 月 25 日受理)