

液体漏洩噴出時の静電気による着火危険性[†]崔 光石^{*1}

近年、生産現場では、塗装、冷却、洗浄など可燃性液体の噴霧工程が多く行なわれており、さらに、予期しない液体の漏洩、放出に伴う突発的な噴出も発生している。それに伴って起こる静電気災害の防止対策の確立が求められている。本報では噴霧液体の着火試験装置と漏洩噴出模擬実験装置を試作し、様々な条件において液体漏洩噴出時の静電気による着火危険性を調べた。試料は、灯油、デカン、キシレン、スチレンの低引火性液体、一部の試験では安全性や長時間、大量に使用することを考慮して、水道水を用いた。着火性(MIE)を調べた結果、噴霧状液体は、引火点と関係なく、室温において10mJ以下で着火する。特に、スチレンの場合、4 mJという小さい値を示した。MIEは噴霧空間内における着火源の位置に大きく依存し、最も着火し易い領域が存在する。模擬実験装置での実験結果では、フランジ接続部やドレインバルブの締め付け不良、パイプにあいたピンホールなどから液体が噴出した時に、帯電量は液体の種類、ガスケットの材料、噴出孔の大きさなどによって大きく変化する。いずれの場合も、水の帯電量が灯油に比べて1桁大きい。今回の実験では比電荷量及び電界値は静電気による危険なレベルではない、等が明らかとなった。

キーワード: 静電気, 漏洩噴出, 液体, 帯電, 着火性, 爆発・火災

1 はじめに

産業現場において、噴霧中に起こる災害には、塗装、散布、造粒、冷却などのような噴霧プロセスで発生するものや、配管の亀裂、フランジ接続部のガスケットの老化などで偶発的に漏洩噴出し発生するものがある。実際、漏洩噴出した液体が着火し、ときには大規模な爆発・火災を誘発することが、多くの事故事例から知られている。それらの原因の一つは静電気放電であると考えられる。噴霧された液体は空気によって絶縁されるため、水、有機性溶剤などのように、高導電性物質であっても静電気が問題となる。それらの静電気による災害を防止するために、静電気安全指針 2007¹⁾、CENEREC 規格²⁾、NFPA のような規格³⁾が決められ、さらに多くの実験研究が行われているが、いまだに静電気に起因する災害は頻発している。このような背景から、可燃性液体などを取り扱う施設においては、液体の漏洩噴出による爆発・火災の被害拡大を防止するために、着火危険性を予め把握しておく必要がある。本報では、まず、生産工場の噴霧プロセスを念頭において、噴霧液体の静電気着火や帯電特性を調べた⁴⁾。次に偶発的に発生する災害を考慮して、漏洩噴出時の液体帯電を調べた⁵⁾。それらの結果をまとめ報告する。

2 実験

1) 実験装置及び方法

(1) 噴霧プロセスでの静電気着火および帯電特性

噴霧液体の着火試験装置の構造を写真1に示す。着火試験装置は市販のノズル口径1 mmのスプレーガン(Anest Iwata, W-100)、空気弁、空気コンプレッサー、噴霧コントロール、静電容量型高電圧電源(MIES-10)

などから構成されている。安全性を考慮し、実験装置の上方には着火・爆発時にフレームアレスタとして機能する金属製メッシュを取り付け、さらに前方には排気装置(Anest Iwata, Wd-10D)を設置した。

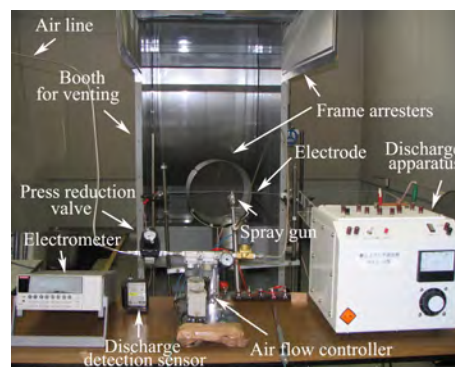


写真 1 噴霧液体の着火試験装置

圧縮空気(0.1~0.3 MPa)によって、実験用液体が放電間隙約3 mmの電極に向かって、7秒間ミスト状に自動噴霧され、その噴霧液体に1秒間に1回の割合で外部電源を用いて静電気放電を発生させる。この過程を3回まで繰り返すうちに着火し、火炎が10 cm以上伝搬するのに要する最小のエネルギーを求め、その値を液体の最小着火エネルギー(MIE_m)とした。MIE_mは静電気放電に用いたキャパシタの静電容量C及び充電電圧Vを $CV^2/2$ の式に代入して求め、可燃性蒸気の着火性測定装置を利用して測定した蒸気状態の値(MIE_v)と比較した。特に、一部の試料に対しては放電電極とガンの距離(X軸)とガンの軸からの高さ(Y軸)を変化させて、噴霧空間内におけるMIE_mの分布の測定も行った。

噴霧液体時の帯電量測定では、高圧空気(0.1~1MPa)を流すことによってスプレーガンに発生する噴霧電流*i_e*はスプレーガンをPTFEにより電氣的に絶縁し、エレクトロメータで測定した。得られた*i_e*から、噴霧液体の電荷密度*q* [C/kg]は次式(1)で求めた。

[†] 原稿受理 2008年1月18日

^{*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

E-mail: choiks@s.jniosh.go.jp

$$q = -\frac{1}{m} \int_0^t i_e dt \text{-----(1)}$$

ただし、 $m[\text{kg}]$ は時間 t 秒間の噴霧液体の総質量、 i_e [A]は噴霧電流、 $t[\text{s}]$ は噴霧時間である。

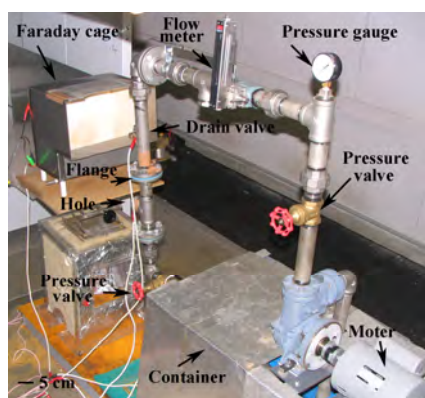


写真2 液体用の漏洩噴出模擬実験装置

(2) 偶発的な漏洩噴出時の帯電特性

液体用の漏洩噴出模擬実験装置の構造を写真2に示す。模擬実験装置は、約4mの1^{1/4}インチSUS配管、圧力計(Yamamoto Keiki, Max.:1MPa)、止水弁2個、流量計(Tokyo Keiso, Max.:40L/min)、液体槽(100L)、液体循環ポンプ(Ebara, Max.:0.6MPa)及び、分相モーター(Hitachi)、データ処理用コンピュータなどから構成されている。

液体循環ポンプ(0.1~0.3MPa)でパイプの中の液体を流し、約30秒間漏洩噴出を行った時、ファラデーケージからアースへ流れる電流 i_e [A]を測定した。得られた i_e から、噴出液体の q [C/kg]は式(1)を用いて求めた(ただし、直接に液体を採取したことから、式(1)の右辺の符号は+)。その他、液体試料の漏洩噴出時に着火性放電の有無を放電検出器によって観測した。

3 実験結果及び考察

1) 噴霧プロセスでの静電気着火や帯電特性

今回、実験で得られた典型的な噴霧液体の着火パターンを写真3に示す。液体の噴霧(a)、着火(b)、火炎伝播(c)、及び消炎(d)という一連の動作が示されている。

試験用液体の MIE_m と MIE_v を測定した結果を表1に示す。全ての試験試料で、 MIE_v は温度が上昇するほど低下した。また、 MIE_v は温度に依存するが、引火点付近以外の温度では蒸気濃度が爆発下限界を超えないため、着火しなかった。一方、噴霧してミスト状になると、 MIE_m は室温においても、数mJの放電エネルギーでも着

火するということが明らかになった。スチレンの場合、4mJという小さい MIE_m を示した。液体試料が噴霧によって、微粒子化され、空気との接触表面積が大きくなり、着火したと考えられるが、詳細な検討が必要である。この実験から液体が微粒子化されると引火点よりも低い温度でも着火可能であることが実証された。

表1 噴霧液体と蒸気状態における試料の MIE [mJ]の比較

Specimen	F.P.* [°C]	MIE_m	MIE_v				
			30 °C**	30 °C	50 °C	100 °C	150 °C
kerosene	50	7.2	N.A	N.A	1.20	0.37	
n-decane	46	7.2	N.A	N.A	0.40	0.26	
m-xylene	25	9.8	N.A	0.57	0.40	0.40	
styrene	32	4.0	N.A	0.63	0.26	0.26	

*:Flash Point, **:Below 30 °C, N.A: Not Available

噴出圧力を0.1、0.2および0.3MPaに変化させて、噴霧空間内において MIE_m の分布を観測した。その結果の一例を表2に示す。着火エネルギーは、着火源の位置に大きく依存した。着火源がノズルに近い位置では、ミスト状の液体や空気の流速が速いので(50m/s以上)冷却効果が大きいため着火せず、ノズルから遠ざかると流速は遅くなるものの(2m/s以下)、液体の濃度が低くなるためやはり着火しにくくなるということがわかった。則ち、最も着火し易い領域が存在し、例えば、噴霧圧0.1MPa、噴霧量0.7g/sにおいて、最も着火し易い領域はガンから電極までの距離(X軸)が200mm、その点の高さ(Y軸)が0mmの近傍であった。

表2 噴霧空間内における MIE [mJ]の分布 (灯油)

	X*50	X100	X200	X300	X400	X500	X700
Y**100	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I
Y 50	N.I	N.I	180	180	180	98	N.I
Y 30	N.I	N.I	11	11	21.6	38.4	N.I
Y 0	180	29.4	7.2	9.8	21.6	38.4	128
-Y 30	N.I	N.I	21.6	21.6	21.6	72	N.I
-Y 50	N.I	N.I	N.I	320	245	N.I	N.I
-Y 100	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I	N.I

*, **: ガンから電極までの距離(X, mm), その点での高さ(Y, mm), N. I.: No Ignition

噴霧液体とノズル間で発生する i_e の測定では市販のスプレーガン(A)と試作したスプレーガン(B)を使用した。結果によると、両ガンとも i_e は噴霧圧力への依存性が顕著であり、噴霧圧力が増加するに伴って、大きな値を示

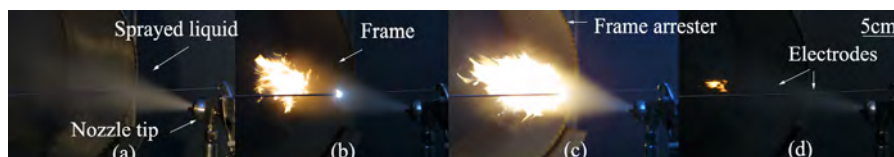


写真3 典型的な噴霧液体の着火パターン

した。液体の噴霧量及び電荷密度を表3に示す。一般的に有機溶剤の着火エネルギーは約0.2mJである。今回の実験で、0.2mJの値はハンディ型のスプレーガンを使用した場合、作業者とスプレーガンの静電容量を約184pF(人体:100pF, スプレーガンB:84pF)と考えると、スプレーガンを握っている作業者が約1.5kVに帯電した場合の静電エネルギーに等しい。

表3 液体の噴霧量および電荷密度 (0.5wt%NaCl 希釈水道水)

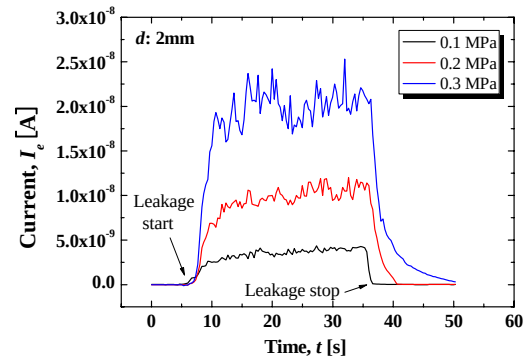
Substance	0.3 MPa*		0.5 MPa		1 MPa	
	f^{**} [g/s]	q^{***} [$\mu\text{C/kg}$]	f [g/s]	Q [$\mu\text{C/kg}$]	f [g/s]	q [$\mu\text{C/kg}$]
spray gun A	0.72	-2.19	0.87	-2.51	0.98	-2.62
spray gun B	15.0	-1.78	15.7	-2.81	17.5	-3.75

*: air pressure supplied to nozzle, f^{**} : flow rate, q^{***} : charge to mass ratio.

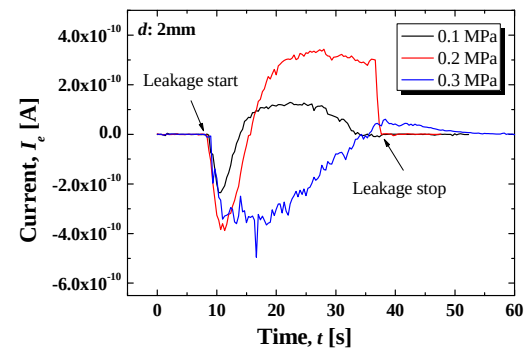
2) 偶発的な漏洩噴出時の帯電特性

漏洩噴出模擬実験装置での漏洩噴出時に、得られた i_e の一例(ピンホール($d: 2\text{ mm}$))を図1に示す。両試料(水、灯油)とも、 i_e の最大値(絶対値)は噴出圧力への依存性が顕著であり、噴出圧力が増加するに伴って、大きな値を示した。これは液体試料がピンホールの小さな開口部から噴出する時、噴出圧力が強くなることにより、液体と開口部との摩擦や流動が増加したためであると考えられる。水の実験では、噴出時間中にどの圧力でも極性は同じで i_e もほぼ一定値であったのに対して、灯油の場合は、噴出時間にともない i_e 値の変動が激しく、極性も変化した。極性の反転に至る時間は噴出圧力に影響を受け、圧力が高いほど長くなる傾向であった。これらの違いは噴出によって、灯油の方が水に比べ、ピンホール開口部の表面あるいはガスケットの切り口を被覆しやすく固体表面と液体の接触状態が変化するためと推定される。

これに関しては現在、接触角度を分析中である。



(a) 水



(b) 灯油

図1 液体漏洩噴出中の i_e の変化

噴出液体の q を求めた結果を表4に示す。(1) いずれの場合も、水の q (最大値)は0.12~0.83 $\mu\text{C/kg}$ 、灯油の値(最大値)は-0.04~0.16 $\mu\text{C/kg}$ であり、水の帯電量が灯油値に比べて1桁大きい。漏洩噴出時の帯電量は液体の種類に依存していることから、実際の産業現場で使用する液体に対しての帯電性を評価する必要がある。(2) 両試料とも、漏洩噴出時の帯電特性はガスケットの材質を変えると違いが出ているが、水の場合、桁が変わるほ

表4 液体の漏洩・噴出帯電量

Substance		Water		kerosene		***ESD	etc
		$q[\mu\text{C/kg}]$					
		Ave.	Max.	Ave.	Max.		
Pressure	0.1 MPa	0.82	0.83	**0.00018	**0.0012	Not occur	d 2mm
	0.2 MPa	0.15	0.15	**0.0020	**0.0030	Not occur	d 2mm
	0.3 MPa	0.24	0.24	**-0.0011	**-0.0027	Not occur	d 2mm
Size and shape of hole	1 mm	0.35	0.35	-0.0013	-0.0024	Not occur	p 3 MPa
	2 mm	0.24	0.24	-0.0042	-0.0082	Not occur	p 3 MPa
	3 mm	0.33	0.34	**0.0039	**0.0054	Not occur	p 3 MPa
	Slit (20×1 mm)	0.34	0.36	**-0.00084	**-0.0023	Not occur	p 3 MPa
*Drain valve	25°	0.31	0.33	0.058	0.10	Not occur	p 3 MPa
	50°	0.15	0.15	0.016	0.020	Not occur	p 3 MPa
	75°	0.16	0.16	0.013	0.010	Not occur	p 3 MPa
Gasket on flange	Asbestos	0.16	0.17	-0.034	-0.043	Not occur	p 3 MPa
	Non Asbestos	0.12	0.12	-0.0057	-0.011	Not occur	p 3 MPa
	PTFE	0.18	0.20	0.058	0.16	Not occur	p 3 MPa

*: Opening degree on drain valve, **: Polity of current changed while leakage as - to +. ***: Incendiary Electrostatic Discharge

どでは無い。一方、灯油の場合、PTFE 材では、他の材料に比べ、桁違いに大きな差が出た。この原因の分析は困難であるが、接触する液体と固体の帯電列に関係があると考えられる。PTFE のガスケット材がよく使われる薬品、食品関連企業では液体の種類に関係なく、特に注意が必要である。(3)バルブの開閉の実験では、漏洩・噴出が始まる開口角度 25° の場合は出口で摩擦が大きいため、帯電が大きいが、それ以上の開口角度では急激に帯電量が減少する(ただし、開口角度 0° はバルブが完全に閉まっている状態である)。(4) 着火性放電は全ての条件に対して確認できなかった。

ここからは噴出液体による静電気放電危険性を、帯電液体が形成する電界(噴出前方 10cm)を基にして詳細に考察する。液体試料としては表 4 の結果から、帯電性がより高い、水を採用した。

噴出液体の半径 a [m]は測定用円管ケージの半径 r [m]より小さいものとし、噴出液体は一樣に電荷が分布していると仮定して、電界 E [V/m]は以下の式により求めることができる。

①噴出ポイントの前方 x における、噴霧液体の流量を w [kg/s]、噴霧断面積を A [m²]、液体の x 方向の移動速度を v [m/s]とすると、噴出液体の濃度 M [kg/m³]は式(2)から計算される。ここで、 A や v は今回の実験では PIV システムで測定を行った。

$$M = w / Av \text{ -----(2)}$$

②空間電荷密度 ρ [C/m³]は、質量比電荷 q [C/kg]、噴霧液体の濃度、 M [kg/m³]から計算できる(式(3))。

$$\rho = q \times M \text{ -----(3)}$$

③電界 E [V/m]は空間電荷密度の計算値 ρ 用いて式(4)から算出することができる。

$$E = \rho \cdot a^2 / (2 \cdot \epsilon_0 \cdot r) \text{ -----(4)}$$

ただし、噴霧液体の半径を a [m]、空気の誘電率を ϵ_0 [F/m]、円管ケージの半径を r [m] (ここでは 0.075 m)とする。

例えば、噴出圧力 0.3 MPa、コックの開口角度 75° の時は噴霧ポイントの前方 10 cm において、 v 、 a 、 q は min.6~max. 17 m/s, 0.045 m, 0.16 μ C/kg であり、これらの値を式(2), (3), (4)に代入すると、 E は 3.1 ~ 8.9 V/cm になる。一方、同じ条件で、直径 15 cm、長さ 15 cm 接地した円管ケージを噴出前方に配置し、円管ケージ壁の電界を電界センサー (Rion, EA-07A) で測定した。その値 (平均 14 V/cm) を計算値(8.9 V/cm) と比べると大きな差はないので、静電気危険性を評価する際に計算値が有効であることが示唆された。ここで、安全面から考えると、最大電界値 E_{max} [V/cm]になるのは、 a と r が等しくなった場合であり、その時の E_{max} は E の約 3.3 倍になる。今回の主な実験条件において、噴出電界を算出し、まとめると表 5 のようになる。電界値(E , E_{max})はいずれも、数十 V/cm 程度であり、安全マージンとし

て 10 倍程度を考慮してもこれらの値は静電気安全指針で推奨する電荷雲での着火性放電の発生値、1kV/cm 以下である。今回の実験で得られた電界値は噴出孔から数十 cm の距離であれば危険なレベルではないと推定される。しかし、産業現場で液体を使用する工程においては、不純物除去用フィルタの使用や数十 MPa の高圧の利用により、噴出による液体の比電荷が大きくなり、また、帯電雲の規模・濃度が大きくなると、静電気放電による危険性を完全に否定することは出来ない。従って、可燃性液体を取り扱う施設においては、静電気による爆発・火災の危険性について、十分な注意が必要である。

表 5 漏洩噴出時の液体の電界値 (噴霧ポイントの前方 10 cm)

Substance		a [m]	V [m/s]	E [V/cm]
Pressure	0.1 MPa	0.032	8- 11	0.7-0.9
	0.2 MPa	0.022	5- 17	1.3-4.4
	0.3 MPa	0.017	8- 22	2.2-6.1
Size and shape of hole	1mm	0.037	9- 18	0.6-1.2
	2mm	0.022	5.6-21	2.3-8.8
	3mm	0.017	9- 22	5.1-12
	Slit (20×1)	0.027	9- 20	4.2-9.5
*Drain Valve	75°	0.045	6- 17	3.1-8.8
Gasket on Flange	Asbestos	0.01	4-12	1.1-3.5
	**N.Asbestos	0.012	4-13	0.6-2.0
	PTFE	0.022	4-14	1.2-4.5

*: Opening degree on drain valve. **:Non Asbestos

4 ま と め

可燃性液体の漏洩噴出における静電気放電に起因する爆発・火災の防止の為の基礎データを得る目的で、様々な実験を行なった。次のような結果を得た。

- (1) 液体は、霧状になると、引火点と関係なく、室温において数 mJ の放電エネルギーで着火する。
- (2) 噴霧空間内において着火源の位置に大きく依存し、最も着火し易い領域が存在する。
- (3) 帯電量は液体の種類、ガスケットの材料、噴出孔の大きさなどによって大きく変化する。いずれの場合も、水の帯電量が灯油に比べて 1 桁大きい。
- (4) 噴出孔から 10 cm の距離で得られた電界値は、今回の実験条件では静電気による危険なレベルではない。

文 献

- 1) 静電気安全指針 2007, JNIOOSH-TR-No.42(2007)
- 2) CENEREC, PD CLC/TR 50404(2003).
- 3) NEPA, NFPA 77 (2000).
- 4) CHOI KS, YAMAGUMA M, and OHSAWA A, Ignitability of spraying liquid due to electrostatic spark. Adv. Powder Part., 2008; Vol. 18 (1): 105-115
- 5) CHOI KS, YAMAGUMA M, and OHSAWA A, Experimental study on electrostatic hazards in sprayed liquid. Jpn. J. Appl. Phys., 2007; PT.1, Vol. 46 (12): 7861-7864