

5. 静電気放電による噴霧液体の着火特性 (その2)*

崔 光石**, 山隈 瑞樹**, 大澤 敦**

5. Characteristics of Ignitability of Sprayed Liquids due to Electrostatic Spark (II)*

by Kwang Seok CHOI**, Mizuki YAMAGUMA** and Atsushi OHSAWA**

Abstract; Explosions and/or fires involving liquid while spraying frequently occur due to electrostatic sparks in various chemical processes. Accordingly, the quantitative research into the ignitability and the electrostatic charge of sprayed liquids will be necessary to assess hazards in industrial operations under various conditions and to propose effective countermeasures. In the current paper, we deal with Minimum Ignition Energy (MIE) due to an electrostatic spark of a sprayed liquid relative to the percentage of nitrogen (N₂), including compression in an air cylinder. Four different mixtures, A (O₂: 20 %, N₂: 80 %), B (O₂: 15 %, N₂: 85 %), C (O₂: 10 %, N₂: 90 %), D (O₂: 5 %, N₂: 95 %) were used. The charge amount while spraying and electrostatic sparks in a sprayed region were also observed. Two types of hand-held spray guns and a supply of air pressure in the range of 0.1 to 1 MPa were used in this study. A liquid was supplied to the spray tube (liquid input line) with air from the pressure supply line. The liquid was automatically sprayed for 10 s and 15 s, respectively to measure the ignitability and the charge amount. With regard to the materials, kerosene (conductivity, σ : 3.50×10^{-14} S/m) was selected for ignition tests while spraying, and water (σ : 0.1 S/m), including sodium chloride (0.5wt% NaCl), was used to investigate the charge amount of the sprayed liquid. The following noteworthy results were obtained: The ignitability of sprayed liquid was dramatically reduced by atomizing with an air changing the percentage of N₂ instead of pressurized pure air, and its efficiency increased with increasing the supply of air pressure. This fact suggests that both conditions, a 90% rate (or over) of N₂ in air and 0.3 MPa (or over) of P , are necessary to prevent effectively explosions and fires that are the result of electrostatic sparks in a practical industry. The charge amount values of some obtained in this study were unsafe in the painting industry, and several electrostatic sparks were observed while spraying, even though no incendiary sparks were detected in our tests. These sparks were particularly conspicuous at the nozzle. This fact suggests that the spraying of liquids (especially solvents such as toluene, acetylene, and xylene) under high pressures of several tens of MPa as water jets or airless paint spray must be carefully managed since it is possible that incendiary electrostatic sparks could occur.

Keywords; Electrostatic spark, Sprayed liquid, Ignitability, Minimum Ignition Energy, Nitrogen

* Japanese J. Applied Physics, PT.1, Vol. 46, No. 12, pp. 7861-7864 (2007) 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

石油などの可燃性液体は、石油・化学製品の原料や燃料として、石油工業、化学工業をはじめとする製造業で広く使用されている。一般に可燃性液体は低導電性のものが多く、金属配管内の輸送などで発生した静電気が蓄積するため、取扱い時に静電気放電による爆発・火災を起こす危険性が高い。化学プラント等では、静電気放電が可燃性液体の着火源となって引き起こした爆発火災災害が数多く見られる。なかでも、可燃性の高圧液体が漏洩・噴出した時には、空气中に噴霧された液体は空気によって絶縁されるため、水や有極性溶剤などの高導電性物質であっても噴霧帯電が生じる。最近の生産工場では、散布、エアレス塗装、静電塗装、高圧ジェット洗浄など噴霧プロセスが多く行われており、噴霧帯電や静電気による着火危険性を明らかにし、災害のより効果的な防止対策を確立することが求められている。

このような背景から、我々は第一ステップとして、4種類の低引火性液体の噴霧状態における着火特性について測定を行い、前報で報告した^{1,2)}。そこでは、ミストになると、引火点と関係なく、室温(約30℃)において数mJの放電エネルギーで着火することや、噴霧空間内において最小着火エネルギーの分布を測定した結果からは、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ことなどがわかった。

しかし、いまだに解明されていない部分が多く、データも不足している。そこで、本報では、前報に引き続き、爆発防止対策の一環として高圧空気に不活性ガスを添加することによる噴霧液体の着火性の変化や、噴霧液体とノズル間で発生する噴霧電流の測定を行ったので、結果を報告する³⁾。

2. 実験

2.1 実験装置および方法

噴霧液体着火試験装置は、前報の実験で使用したものとはほぼ同じで、その構造はFig.1に示すとおりである。着火試験装置は市販のノズル口径1mmのスプレーガン(W-100, アネスト岩田製)、高圧空気ポンプ、空気減圧弁、噴霧コントロール装置、排気装置(風量: 90 m³/min, WB-10D M5, アネスト岩田製)及び静電容量型高電圧電源(MIES-10型, 環境衛生研究所製)などから構成されている。

高圧空気(0.1~0.5 MPa)によって、実験用液体試料が放電間隙約2mmのステンレス電極に向かって10秒間ミスト状で自動噴霧され、その噴霧ミストに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2回繰り返すうちに着火し、Fig.2のよ

うに火炎が目視で観測され、10cm以上伝搬するのに要する最小のエネルギーを求め、その値をミストの最小着火エネルギー(MIE_s)とした。MIE_sはキャパシタの静電容量C及び充電電圧Vを $CV^2/2$ に代入して計算した。実験に当たって、より安全性を考慮し、着火試験装置の上方及び前方には金属製メッシュを取り付け、液体の着火・爆発時にフレームアレスタとして機能し、発生する熱及び圧力を低く抑えることを可能とした。さらに火種による火災・爆発を防止するため、排気装置では水カーテンを設置した。

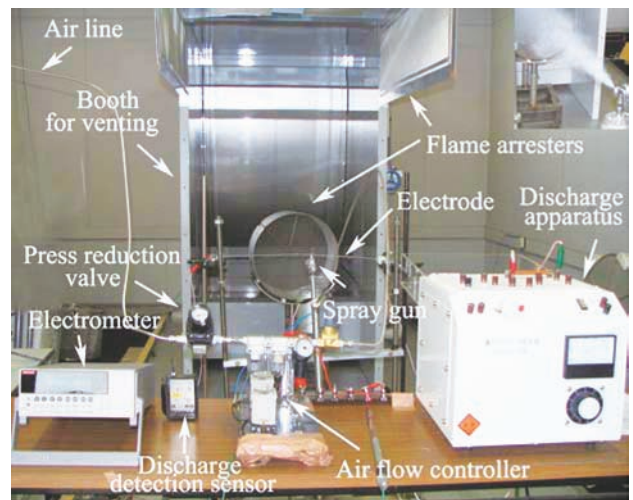


Fig. 1 MIE measurement system for sprayed liquid. 噴霧液体の最小着火エネルギー試験装置

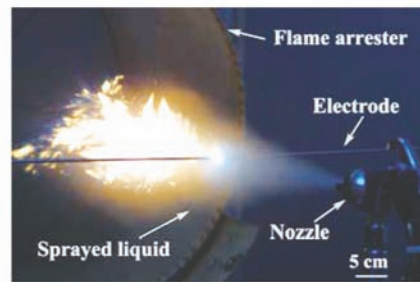


Fig.2 Ignition of sprayed liquid. 噴霧液体の着火

高圧空気(0.1~1 MPa)を流すことによって、スプレーガンに発生する噴霧電流を測定するために、スプレーガンは絶縁材(PTFE)を使用して電氣的に絶縁した。スプレーガンに銅線を接続し、噴霧電流をエレクトロメー

タ (Keithley-6514) で測定した。得られた噴霧電流から、噴霧液体の電荷密度 q [c/kg] は式 (1) で求めた。

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

ただし、 m [kg] は噴霧液体の質量、 i [A] は噴霧電流、 t [s] は噴霧時間である。

2.2 試料

着火性の試験には、測定結果を既存のデータ²⁾と比較するために、低導電性の可燃性液体の代表として、市販用の灯油 (引火点: 50 °C, 導電率: 3.50×10^{-14} S/m) を用いた。着火試験に先立って、灯油試料は液体専用のマイクロフィルタ (Wako Industrial, IF1AJ, 10 l/min) 及び吸着剤 (シリカゲル) を使用して循環通過 (12 時間) させ不純物を除去した。なお、噴霧電流測定試験には、塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液 (0.5 wt%, 水道水, 導電率: 0.1 S/m) を用いた。測定は全て、気温 30 ± 3 °C, 湿度 60 ± 5 % RH の条件下において行った。

3. 実験結果および考察

3.1 高圧空気に含まれる不活性ガスの割合が噴霧液体の着火性に及ぼす影響

実際の現場で着火源の除去が困難な場合、可燃性物質を含む混合気体等に不活性ガス (窒素, 炭酸ガス, 水蒸気など) を添加することによって、着火爆発を防止することができる⁴⁾。空気の代わりに、二酸化炭素を駆動ガスとして使用し、噴霧エタノールの着火性を測定したデータが報告されている⁵⁾。しかし、地球温暖化を防止するために二酸化炭素などの温室効果ガスの使用を抑制するという環境面や取扱いの容易さから、本稿では不活性ガスとして窒素を使用した。窒素の割合が異なる高圧ガスボンベ4種類 (A (O₂: 20%, N₂: 80%), B (O₂: 15%, N₂: 85%), C (O₂: 10%, N₂: 90%), D (O₂: 5%, N₂: 95%)) を用意し、噴霧圧力を0.1, 0.2, 0.3 および0.5 MPa に設定し着火実験を行った。目的は、爆発防止対策の一環として、様々な噴霧圧力に対して、高圧空気中の窒素濃度と噴霧液体の着火性の関係を定量的に分析することである。実験結果をTable 1~Table 4 に示す。どの場合でも、最も着火し易い領域は、スプレーガンから電極までの距離 (X 軸) が200 mm~400 mm の近傍であった。これらの結果は前報の実験結果とほぼ同様である。一方、窒素を利用することで、噴霧液体の着火危険性が大幅に低減することが明らかになった。最小着火エネルギーの増加値 [倍] は、噴霧圧力が大きくなるほど増加した。例えば、Fig.3 に示すようにガスボンベBを使用した場合、..は普通の高圧空気を使用した

場合 (MIE: 7.2mJ) より、0.1 MPa の時は1.7 倍 (12.8 mJ), 0.2 MPa の時は2.9 倍 (21 mJ), 0.3 MPa の時は5.2 倍 (38 mJ), 0.5 MPa の時は14 倍 (125 mJ) に増加した。

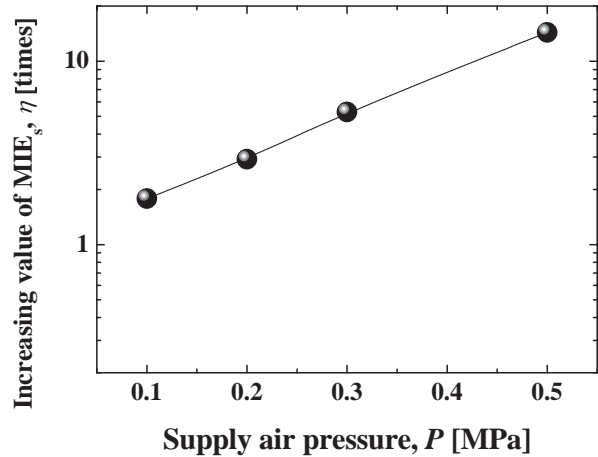


Fig. 3 η with a B cylinder as a function of air pressure supplied to the nozzle.
噴霧圧力によるMIEsの増加値 (ガスボンベBを使用した場合)

これは、噴霧圧力が低いほど、周りの酸素が巻き込まれやすく、爆発下限界の酸素濃度以上になり、噴霧液体が小さいエネルギーでも着火したと考えられるが、詳細な検討が必要である。結論として、産業現場において、静電気放電による着火爆発災害を防止するには、窒素濃度90%以上、噴霧圧力0.3 MPa以上で使用すると静電気着火の防止に効果的である。

3.2 噴霧液体とノズル間で発生する噴霧電流

約15秒間噴霧を行った時、スプレーガンのノズルからアースへ流れる電流 (噴霧電流) を測定した。ノズルはアルミニウム製で口径1 mmの市販用 (スプレーガンA, Fig.4 (a)) と、口径3 mmの試作品 (スプレーガンB, Fig.4 (b)) の二種類を用いた。LCRメータ (Yokogawa: 4332A) を使用し、スプレーガンA及びBの静電容量を測定した結果はそれぞれ65 pF, 84 pFであった。

噴霧電流の測定結果をFigs.5, 6に示す。これらの結果、

(1) スプレーガンAでは+1~2.7 nA, スプレーガンBでは+5~60 nAの噴霧電流が観測された。一般的には同様の材質であればノズル口径が大きい方が噴霧電流 (帯電量) は小さいという傾向を示すが⁶⁾, スプレー

Table 1 Ignitability of a sprayed liquid (kerosene) as a function of the composition ratio of air under 0.1 MPa. 高圧空気中の窒素濃度と噴霧液体の着火性の関係 (噴霧圧力: 0.1 MPa)

Composition ratio of air	Minimum ignition energy (mJ)								
	X*50	X100	X200	X300	X400	X500	X600	X700	X800
A (O ₂ : 20 %, N ₂ : 80 %)	180	29.4	7.20	9.80	21.6	38.4	38.4	128	NI
B (O ₂ : 15 %, N ₂ : 85 %)	320	50	12.8	12.8	29.4	50	72	NI	NI
C (O ₂ : 10 %, N ₂ : 90 %)	NI**	50	12.8	12.8	29.4	50	72	NI	NI
D (O ₂ : 5 %, N ₂ : 95 %)	NI	72	21.6	12.8	38.4	128	NI	NI	NI

*X: Horizontal distance from the nozzle tip, mm, **NI: No ignition

Table 2 Ignitability of a sprayed liquid (kerosene) as a function of the composition ratio of air under 0.2 MPa. 高圧空気中の窒素濃度と噴霧液体の着火性の関係 (噴霧圧力: 0.2MPa)

Composition ratio of air	Minimum ignition energy (mJ)								
	X*50	X100	X200	X300	X400	X500	X600	X700	X800
A (O ₂ : 20 %, N ₂ : 80 %)	NI**	50.0	9.80	7.20	21.6	29.4	38.4	72	128
B (O ₂ : 15 %, N ₂ : 85 %)	NI	72	29.4	21	38.4	72	128	NI	NI
C (O ₂ : 10 %, N ₂ : 90 %)	NI	72	29.4	21	50	72	320	NI	NI
D (O ₂ : 5 %, N ₂ : 95 %)	NI	128	38.4	50	50	NI	NI	NI	NI

*X: Horizontal distance from the nozzle tip, mm, **NI: No ignition

Table 3 Ignitability of a sprayed liquid (kerosene) as a function of the composition ratio of air under 0.3 MPa. 高圧空気中の窒素濃度と噴霧液体の着火性の関係 (噴霧圧力: 0.3MPa)

Composition ratio of air	Minimum ignition energy (mJ)								
	X*50	X100	X200	X300	X400	X500	X600	X700	X800
A (O ₂ : 20 %, N ₂ : 80 %)	NI**	180	12.8	7.20	12.8	29.4	29.4	72.0	180
B (O ₂ : 15 %, N ₂ : 85 %)	NI	180	38.4	50	320	320	NI	NI	NI
C (O ₂ : 10 %, N ₂ : 90 %)	NI	180	50	98	NI	NI	NI	NI	NI
D (O ₂ : 5 %, N ₂ : 95 %)	NI	180	128	NI	NI	NI	NI	NI	NI

*X: Horizontal distance from the nozzle tip, mm, **NI: No ignition

Table 4 Ignitability of a sprayed liquid (kerosene) as a function of the composition ratio of air under 0.5 MPa. 高圧空気中の窒素濃度と噴霧液体の着火性の関係 (噴霧圧力: 0.5MPa)

Composition ratio of air	Minimum ignition Energy (mJ)								
	X*50	X100	X200	X300	X400	X500	X600	X700	X800
A (O ₂ : 20 %, N ₂ : 80 %)	NI**	180	29.4	7.20	7.20	7.20	9.8	21.6	21.6
B (O ₂ : 15 %, N ₂ : 85 %)	NI	NI	180	125	320	NI	NI	NI	NI
C (O ₂ : 10 %, N ₂ : 90 %)	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI
D (O ₂ : 5 %, N ₂ : 95 %)	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI

*X: Horizontal distance from the nozzle tip, mm, **NI: No ignition

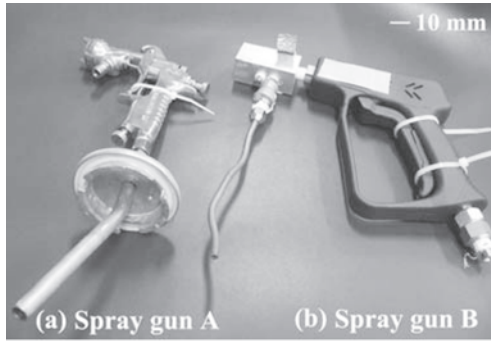


Fig. 4 Photo of spray guns.
スプレーガン

ガンBは液体がより多量に噴霧できるように、ノズル前方に長さ50 mm、径11 mmのパイプを装着した影響で、スプレーガンAより大きな電流が流れたと考えられる。

(2) 両スプレーガンとも、噴霧電流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、大きな値を示した。これは液体がノズルの小さな開口部から噴出する時、噴霧圧力が強くなることにより、噴霧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。

(3) Table 5 に示すように、スプレーガンBの場合、スプレーガンAより噴霧量が大量であるから、噴霧液体の電荷密度の大きさに大差はなく、スプレーガンAでは $-1.72 \sim -2.62 \mu\text{C}/\text{kg}$ 、スプレーガンBでは $0.82 \sim 3.75 \mu\text{C}/\text{kg}$ 程度であった。

塗装現場では塗料を霧化させるので、他の現場と異なって溶剤が蒸発し易くなる。スプレーの方式によっても異なるが、エアスプレーで溶剤量の60～70%が蒸発するという報告がある⁷⁾。また、塗装現場で使用される代表的な可燃性溶剤はトルエン、アセトン、キシレンなどがあり、それらの蒸気状態における最小着火エネルギーは約0.2mJである⁸⁾。塗装現場では自動型とハンディ型の二種類のスプレーガンが一般的に使われている。自動型の場合、インターロックなどのシステムが採用され、接地不良や断線による事故を防止できるが、移動可能なハンディ型の場合、接地の付け忘れによる事故が多数報告されている。したがって、ここではハンディ型を対象として詳細に考察する。上記の0.2 mJ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184 pF（人体：100 pF、スプレーガンB：84 pF）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。この時の電荷量は $0.27 \mu\text{C}$ になる。一方、実験で得られた電荷密度はTable 5 に与えたとおり、最

小値を示した0.1 MPaの場合でも、 $-1.76 \mu\text{C}/\text{kg}$ （スプレーガンA、噴霧量噴霧：0.60 g/s）、 $-0.82 \mu\text{C}/\text{kg}$ （スプレーガンB、噴霧量噴霧：8.50 g/s）である。つまりスプレーガンAを用いた場合は約250秒、スプレーガンBの場合は約40秒噴霧すると、この程度帯電してしまう。

なお、水溶液（0.5 wt%のNaCl溶液水道水）を噴霧する際に、ノズルの近傍や噴霧空間などで発生する静電気放電の発光状況をイメージインテンシファイア（Hamamatsu Photonics, Ltd., Night Viewer C3100, Gain 60,000）と一眼レフカメラからなる撮影装置を利用して撮影した。その観測結果をFig. 6 に示す。

噴霧条件としては、スプレーガンAを用いて、噴霧圧力は0.5 MPaとした。結果によると、噴霧空間のどの

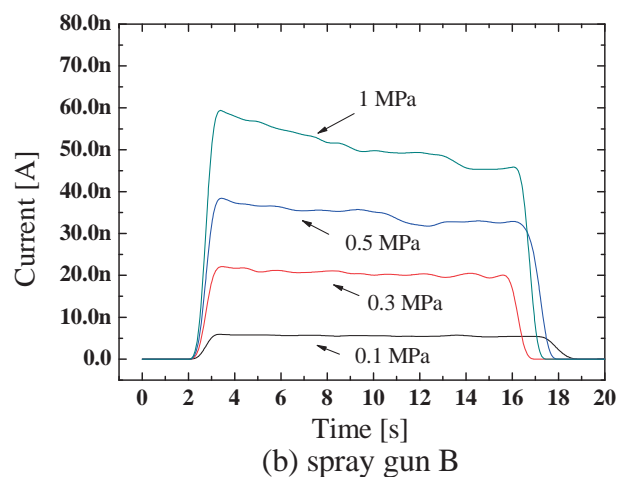
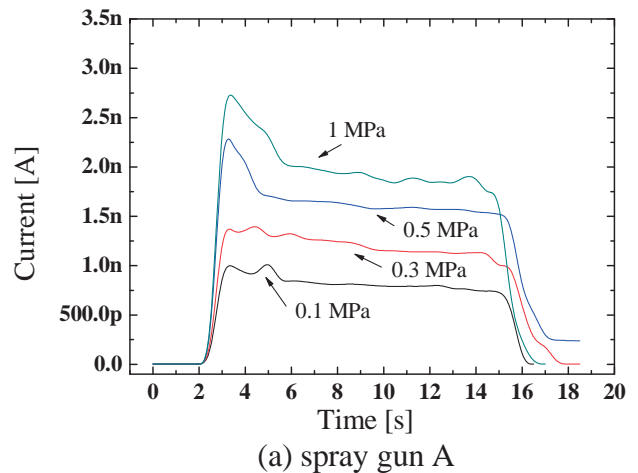


Fig. 5 Change in current during spraying using spray guns A and B.
液体漏洩噴出中のノズルからアースへ流れる電流の変化

Table 5 Flow rate and charge density of liquid with various air pressures supplied to a nozzle.
液体の噴霧量および電荷密度

Substance	0.1 MPa*		0.3 MPa		0.5 MPa		1 MPa	
	m^{**} [g/s]	q^{***} [$\mu\text{C}/\text{kg}$]	m [g/s]	q [$\mu\text{C}/\text{kg}$]	m [g/s]	q [$\mu\text{C}/\text{kg}$]	m [g/s]	q [$\mu\text{C}/\text{kg}$]
Water (spray gun A)	0.60	-1.76	0.72	-2.19	0.87	-2.51	0.98	-2.62
Water (spray gun B)	8.50	-0.82	15.0	-1.78	15.7	-2.81	17.5	-3.75

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

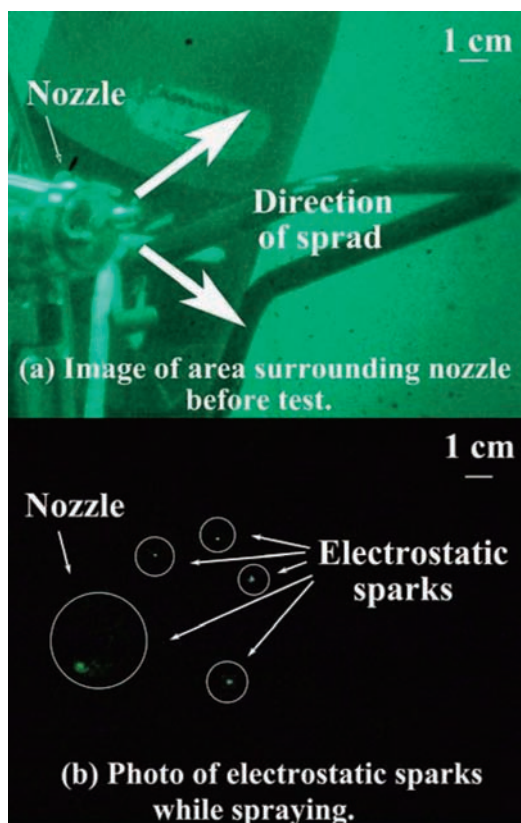


Fig. 6 Observation of the electrostatic sparks while spraying.
噴霧中の静電気放電の発光状況

領域でも火花放電のような着火性放電は観測できなかったものの、噴霧空間やノズルの周囲に多数のコロナ放電が観測された。しかし、上記の噴霧電流の測定結果にも述べたように、噴霧帯電量は噴霧圧力が大きくなるにつれて大きくなる。現場のエアレス塗装機や高压ジェット洗浄装置では数十MPaまで達する高压を使用しているため、噴霧中において着火性放電が発生しないとは断言できない。実際、過去には原油タンクで海水によるジェット洗浄中に爆発が相次いで発生している⁹⁾。この災害の原因は未解明であるが、着火源の候補として静電気が挙げられている。

4. まとめ

可燃性液体の噴出・噴霧において、静電気放電による爆発・火災を防止するためのデータを得ることを目的とし、噴霧状においての様々な実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 不活性ガスの窒素が噴霧液体（灯油）の着火を容易に抑制することが明らかになった。静電気放電による着火爆発災害を防止するためには、高压空気に含まれる窒素の割合を90%以上で、噴霧圧力を0.3 MPa以上で使用すると効果的である。
- (2) 噴霧電流を測定した結果、噴霧電流は噴霧圧力への依存性が高く、噴霧圧力が増加するに伴って、大きな値を示した。
- (3) 噴霧液体（0.5 wt% のNaCl 希釈水道水）とノズル間で発生する静電気放電を観測した結果、どの噴霧領域でも着火性放電は観測できなかったが、噴霧空間やノズルの周囲に多数のコロナ放電が観測された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、元理化学研究所の中島諄二氏に協力及び助言を頂いたことに感謝する。

参考文献

- 1) 崔 光石, 山隈瑞樹, 大澤 敦, 静電気学会全国大会, pp.15-16 (2006)
- 2) K. S. CHOI, M. YAMAGUMA, and A. OHSAWA, Advanced Powder Particles, Vol. 18, No. 1, pp.105-115 (2007)
- 3) K. S. CHOI, M. YAMAGUMA, and A. OHSAWA, Japanese J. Applied Physics, PT.1, Vol. 46, No. 12, pp. 7861-7864 (2007)
- 4) 産業安全研究所編, 静電気安全指針, RIIS-TR-87-1, p. 38-39 (1988).
- 5) 松井英憲, 大塚輝人, NIIS-SRR-No.17, p. 13-18 (1999).
- 6) 山隈瑞樹, 安全工学, Vol. 43. No.4 pp.229-237 (2004)
- 7) 日本塗装機械工業会, 新しい塗装実務ハンドブック入門編, p.129 (2000)
- 8) 山隈瑞樹, 第38回安全工学研究発表会, pp.1-2 (2004)
- 9) 増田閃一, 最近の静電気工学, 高圧ガス保安協会 KHKE 006, p. 64 (1974)

(平成20年12月8日受理)