

## 噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価法の検討\*

大澤 敦\*\*

### On the Assessment Methods of Electrostatic Hazards during Liquid Spraying\*

by Atsushi OHASAWA\*\*

**Abstract;** During liquid spraying, for example, cleaning by water jets or solvents, charged clouds consisting of droplets in space are built up. The clouds create high electric field causing electrostatic discharges leading to ignition hazard. The hazard depends not only on the spray liquid and spraying parameters but also on the geometry of the spray space. The aim of this study is to construct a method to estimate the electrostatic hazards during liquid spraying, i.e., whether or not the charged sprays can lead to conditions enabling discharges to occur. Following the evaluation methods with the aid of computer calculation to estimate the maximum electric field have been examined;

- (1) Measuring space charge density in a cylindrical cage with a field-meter;
- (2) Measuring space charge density by a suction Faraday tube;
- (3) Measuring space potentials by a floating probe.

The measured values by each method above are used to compute the electric field distribution in a given space based on the Poisson's equation and  $\mathbf{E} = -\nabla V$ , and the methods are compared.

In this paper, a spraying with two phase flow (purified water and compressed air) is used to compare the evaluation methods. The method using the suction Faraday tube gives the charge distribution with high resolution but measurements at many points are required, so that it may be useful for detailed evaluation. The floating probe method, however, is inadequate for the assessment because of inaccuracy. Consequently, the method using the cylindrical cage with a field-meter may be useful and reasonable for the hazard assessment to determine the maximum electric field because of easy measurement and a good agreement with the method with the suction Faraday tube giving the high resolution measurement, so that in future work, it will be employed in comprehensive experimental study with wide ranging parameters of spraying.

**Keywords;** Liquid spraying, Electrostatic hazards, Space charge density, Electric field distribution, Space potential distribution

---

\* 第28回静電気学全国大会(2004)にて一部発表

\*\* 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

## 1. はじめに

配管やノズルなどから液体が噴出すると、配管やノズル内での流動および噴出後の液体の分裂によって液体・液滴に静電気が発生する。原油タンカーのジェット洗浄中の爆発、CO<sub>2</sub> 消火器、高圧ガス、液化ガスの漏洩噴出の際の爆発などの災害事例からみてもこの噴霧・噴出帯電が原因と予想された災害が発生している。これらの災害を契機に安全工学の立場から、Bailey<sup>1)</sup>によってまとめられているように、帯電機構、静電気放電の可能性など多数の研究が行われ、すでにかかなりの成果が収められている。

しかしながら、最近の各種産業の工程では、液体の噴霧を伴う造粒、冷却、洗浄、反応、散布、塗装、剥離、研磨、切断などにみられるように噴霧プロセスの応用は多岐に渡ってきており、また、それに伴い噴霧条件も静電的に危険側に推移することもあり、災害も様相を変えながら未だに起きている。このようなことから、液体の噴霧・噴出における静電気災害の防止技術および静電気危険性の評価技術の確立が求められており、実際にも実施している工程の噴霧帯電の静電気危険性に関する問い合わせも少なくない。また、静電気の危険性は噴霧条件だけではなく、噴霧される空間の境界条件にも強く依存するので、同じような工程でも噴霧空間の形状や規模にも依存し、特定の条件で静電気の危険性を評価するための電界を求めることができたとしても、これをもとに一般的な議論に展開することは容易ではない。このような場合、コンピュータを用いた数値計算が有効となる。

そこで、既存あるいは新規の各種工程の現場において噴霧・噴出帯電の静電気危険性を評価するための方法を構築することは工程(労働環境)の安全化と静電気による着火の防止対策の指針を与え、安全工学の立場からも重要である。本研究ではこの噴霧・噴出の静電気危険性の評価法を構築することを目標として、噴霧帯電のモデル実験により、ノズルでの流動帯電、液滴の粒径分布、噴流速度、空間電荷分布、電界測定などによる計測と計測結果に基づく理論的な計算(コンピュータによる数値計算)により噴霧・噴出における静電気の危険性を予測・評価する方法を検討した。

本報告では、噴霧液滴による帯電電荷雲で形成された電界によって放電が起こりうるかを、以下に示すような3つの測定方法での計測とそれに基づくコンピュータ計算により、それぞれ電界強度分布を求めて、静電危険性を評価する方法を提案し、これらの方法を検討する。

- (1) **接地円筒ケージと電界計** 噴霧空間に置いた接地円筒ケージの側面の電界を電界計で測定し、測定電界が最大となる位置の最大電界から電荷密度を求める。この電荷密度が均一に噴霧空間にあるとしてポアソン方程式より数値的に電界分布を求める。求めた電界分布を空気の絶縁破壊電界と比較することによって評価する。
- (2) **吸引ファラデーチューブ** 噴霧した空間の数点で電荷密度を吸引ファラデーチューブで測定し、測定データの内挿と平滑化により電荷密度分布を求める。この分布を用いてポアソン方程式より数値的に電界分布を求めて同様に評価する。これは、円筒ケージの方法の妥当性の検討、詳細に評価が必要とされたとき(たとえば、上記(1)の簡易評価で絶縁破壊電界が生ずることが予測されたとき)を考慮した評価法である。
- (3) **フローティングプローブ** フローティングプローブにより計測した電位分布から電界を計算する評価法についても検討する。

なお、本評価法はすでに災害調査に適用して原因究明に貢献している。

## 2. 測定診断

### 2.1 測定装置

本実験に用いた測定装置の概略をFig. 1に示す。装置は噴霧装置、測定子(接地円筒ケージ、吸引ファラデーチューブ、フローティングプローブ)およびノズル電流、各測定子のための測定機器とGPIBを経由したコンピュータによって構成されている。

### 2.2 噴霧装置

噴霧は噴霧装置(圧搾空気ドライフォグ2流体ノズル: いけうちAkiJet)用いて行った。この装置は微小な水ミストを噴霧生成して室内を調湿することにより静電気障害を防止するために用いられている。微小粒径の液滴は2つの金属ノズルを配置して噴流を衝突させることにより生成している。

噴霧液体は精製水(導電率:  $9.8 \times 10^{-5}$  S/m)を用いた。各ノズルの口径は0.4 mm、噴霧圧力は0.25MPa、噴霧量は $4.06 \times 10^{-4}$  L/sである。レーザ粒度分布測定装置(LDSA-1400A、東日本コンピュータアプリケ

噴霧・噴出帯電の静電気リスク評価法の検討

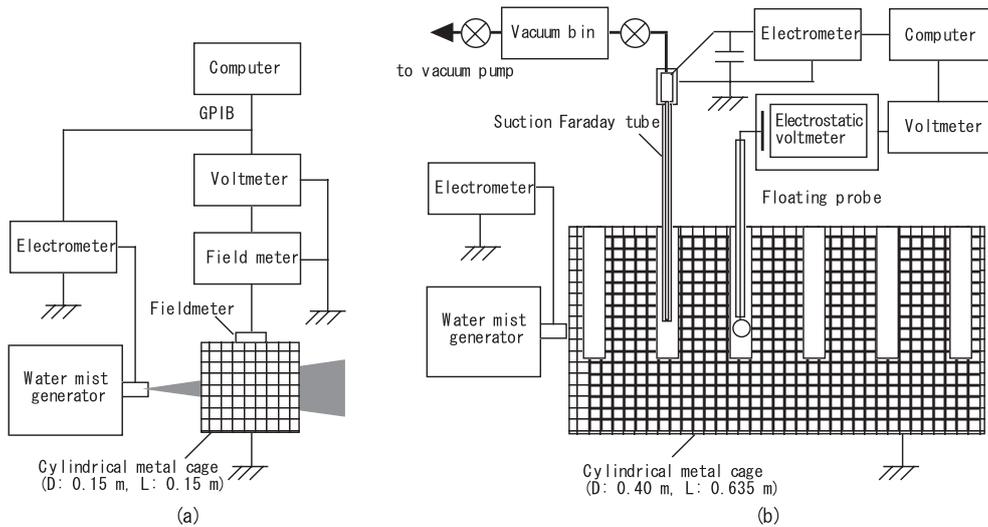


Fig.1 Experimental apparatus. (a) Space charge measurement with a grounded cylindrical cage with a field-meter, (b) space charge measurement with a suction Faraday tube and potential measurement with a floating probe. 測定装置(a) 接地円筒ケージと電界計, (b) 吸引ファラデーケージとフローティングプローブ

ーションズ) によって測定された液滴の平均粒径は 7 - 8  $\mu\text{m}$  である。

### 2.3 噴霧容器

噴霧対象は直径40 cm, 長さ63.5 cm の接地した円筒金属製ケージである。このケージはノズルからの軸方向位置  $z = 3, 9, 16, 31, 48, 62$  cm に吸引ファラデーチューブやフローティングプローブなどの測定子を挿入できるようにしてあり, これらの測定子は鉛直・水平方向に可動である。

### 2.4 ノズル電流

噴霧装置をテフロン板の上に置いて電氣的に絶縁してノズルにエレクトロメータ(Keithley 6517A)を接続し接地して液体のノズルから噴出する直前の噴流電流に相当する電流を計測する。ただし, 噴流電流はノズル電流と正負が逆となる。

### 2.5 測定子

#### 2.5.1 接地円筒ケージと電界計

Fig.2のように直径15 cm, 長さ15 cm の接地した円筒金属製ケージを噴霧空間に配置して, 円筒ケージ壁の電界を電界計(春日電機KSD0303)で計測することによって帯電液滴群の空間電荷密度を測定した。ただし, ケージの位置は測定電界が最大となる点に配

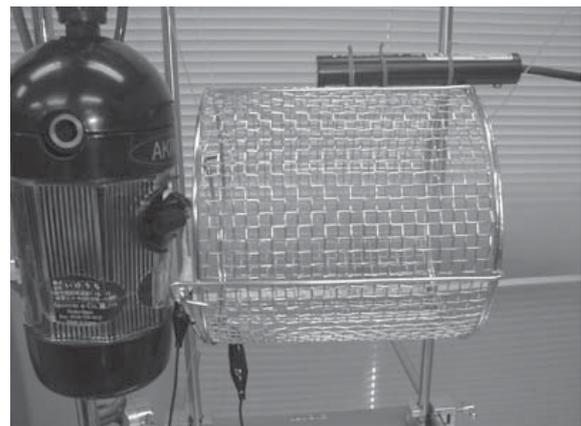


Fig.2 Grounded metal cage with a field-meter. 接地金属円筒ケージと電界計

置した。帯電液滴がこの円筒ケージ内に一様に分布しているとガウスの定理より

$$2 \ aE = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{a^2 \rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

とおけるので, 電荷密度  $\rho$  は測定限界  $E$  を用いて

$$\rho = \frac{2 \ \epsilon_0 E}{a} \quad (2)$$

より求めることができる。ここで,  $a$  はケージの半径,  $Q$  はケージ内の単位長さあたりの総電荷,  $\epsilon_0$  は空間の誘電率である。

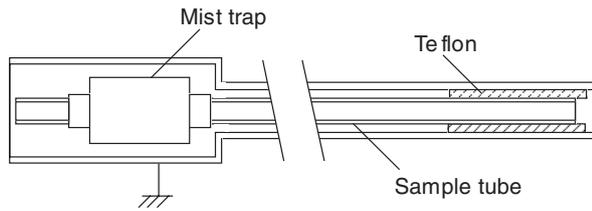


Fig.3 Suction Faraday tube.  
吸引ファラデーチューブ

### 2.5.2 吸引ファラデーチューブ

吸引ファラデーチューブ (Fig 3) は同軸円筒構造で外側 (12 mm ステンレスパイプ) は接地し、内側は 1/4 in. ステンレスパイプであり、終端に液体のトラップ用フィルタがある。吸引は一回の吸引毎に真空にされる 100 mL 容器に接続された電磁バルブによって制御している。ファラデーチューブ内の電荷量の測定にはエレクトロメータ (Keithley 6517A) を用いている。

この方法は空間電荷密度を高分解能に測定できることから、もっとも確からしい結果を与えられるので、この結果を元に他の方法の妥当性を検討することにする。

### 2.5.3 フローティングプローブ

フローティングプローブの構造は二重円筒電極であり、外側円筒は接地してあり、内側の円柱の先にプローブとなる直径 12.7 mm の金属球が取り付けられている。このプローブに電気的に絶縁した金属板を接続し、その金属板の電位を静電電位計 (KSD0303) で計測する。この方法はプローブの浮動電位が空間電位にほぼ等しいとき用いることができる。

## 3. コンピュータ計算

ここで提案する方法は測定データからポアソンの方程式

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

および

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4)$$

より最終的に噴霧空間の電動強度  $\mathbf{E}$  の分布を求めて、噴霧によって形成された帯電雲により放電が起きるかを評価するものである。ここで、 $V$  は空間電位、 $\mathbf{E}$  は電界ベクトルである。以下に各測定法において、測定データから電界強度分布を求めるコンピュータ計算の方法を示す。

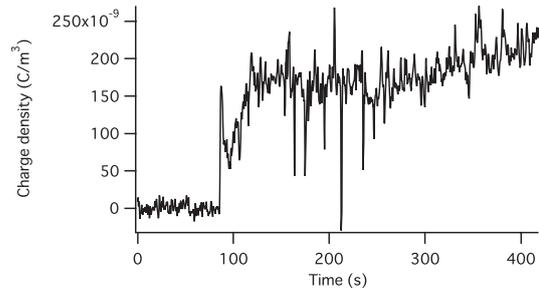
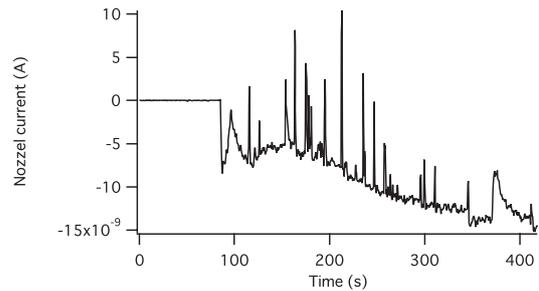


Fig.4 A set of (a) measured nozzle current and (b) space charge density obtained from the method of the cylindrical cage with a fieldmeter.  
ノズル電流と円筒ケージ・電界計の方法により測定された電荷密度

- (1) 接地円筒ケージ・電界計で測定した電荷密度を一様にもつ噴霧帯電雲があると仮定して、電界強度分布を計算する。
- (2) 吸引ファラデーチューブによる測定電荷密度からデータの内挿と平滑化により計算に必要な格子点上の電荷密度を求め、電界強度分布を計算する。
- (3) フローティングプローブによる測定電位分布から内挿と平滑化により計算に必要な格子点上の電位を求め、電界強度分布を計算する。

この計算に必要な境界条件としては、接地した噴霧容器 (2.3 節) の壁で電荷密度と電位が 0 であり、軸対称の噴霧帯電雲の中心軸上で径方向電界、径方向の電荷密度の勾配が 0 であることを用いている。

## 4. 結果および検討

### 4.1 噴霧電流

測定法の妥当性を検討するためにこのときのノズル電流を Fig. 4a に示す。電流連続、電荷保存則から電荷密度の時間変化はノズル電流と極性が反対でほぼ同じ形態となるはずである。Fig. 4b に示す測定電荷密度はこれに矛盾がないことから、円筒ケージの電界

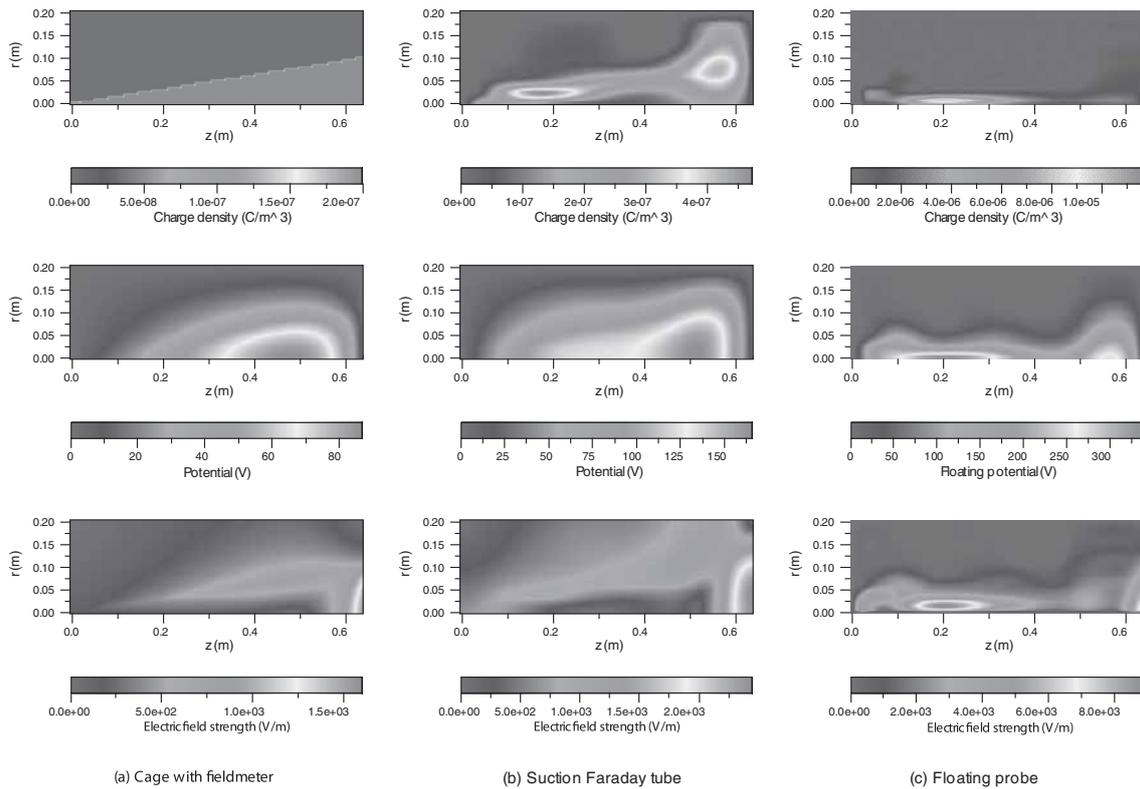


Fig.5 Evaluation results obtained from each method.

円筒ケージ・電界計，吸引ファラデーチューブおよびフローティングプローブの各方法による評価結果

計測から電荷密度を求める方法は妥当であることが示される。また，この空間電荷密度の値は吸引ファラデーケージによって測定されたものとも良く一致した。このノズル電流は負( - 10 nA程度)であるので，噴霧液滴の総電荷は正である。噴霧液体の単位質量あたりの電荷量  $Q_m$  はノズルで計測した噴流電流  $I_s$  と液体の流量 から

$$Q_m = I_s / \quad (5)$$

を用いて求めることができる。この噴霧システムを用いた噴霧条件では， $I_s \approx 8 \text{ nA}$ ， $\dot{m} = 4.06 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  より，噴霧精製水の比電荷量は  $Q_m \approx 20 \text{ } \mu\text{C/kg}$  となる。この比電荷量は原油タンカー事故調査<sup>2)</sup> の比電荷量  $10 \text{ } \mu\text{C/kg}$  よりも大きい。しかしながら，本噴霧装置の流量  $4.06 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$  は原油タンカー事故の流量  $4.2 \text{ kg/s}$  に比べて十分に小さい。また，式(5) より，原油タンカー事故の噴流電流は  $42 \text{ } \mu\text{A}$  と大きな値となっていたことがわかる。このように，ノズル電流を計測することによってもある程度の静電危険性の予測・評価が可能となるであろうが，ノズル電流によって静電気の危険性を評価するためには噴流電流と空間電荷密度の関係を明らかにする必要がある。

暗室で intensified camera( C3100, 浜松ホトニクス )を用いても放電を観測できなかったが，Fig. 4a,b に同時に生ずるいくつかのパルスはごく小さな放電によるものと考えられる。この噴霧装置には放電を起こす可能性のある金属としてノズルと噴霧装置ヘッド内部にある接地されていない金属があり，このカメラで測定できないほどの微弱な放電がノズルで生じているか，ヘッド内部の金属部で放電が生じているものと考えられる。

#### 4.2 接地円筒ケージと電界計による評価

直径15 cm，長さ15 cm の接地円筒ケージの外側面に取り付けられた電界計によって，測定電界が最大となるノズル近傍の電界を計測した。帯電ミストが円筒ケージに一樣として求めた電荷密度は約  $2.0 \times 10^{-7} \text{ C/m}^3$  である( Fig. 4b )。この電荷密度がこの噴霧装置によって形成される円錐状の噴霧空間に一樣にあるとした空間電荷分布，この電荷密度分布をもとに計算した電位分布および電界強度分布をFig. 5a に示す。この電界強度分布の形状は後に示す吸引ファラデーチューブの測定結果を元に求めた電界強度分布とよく一致する。

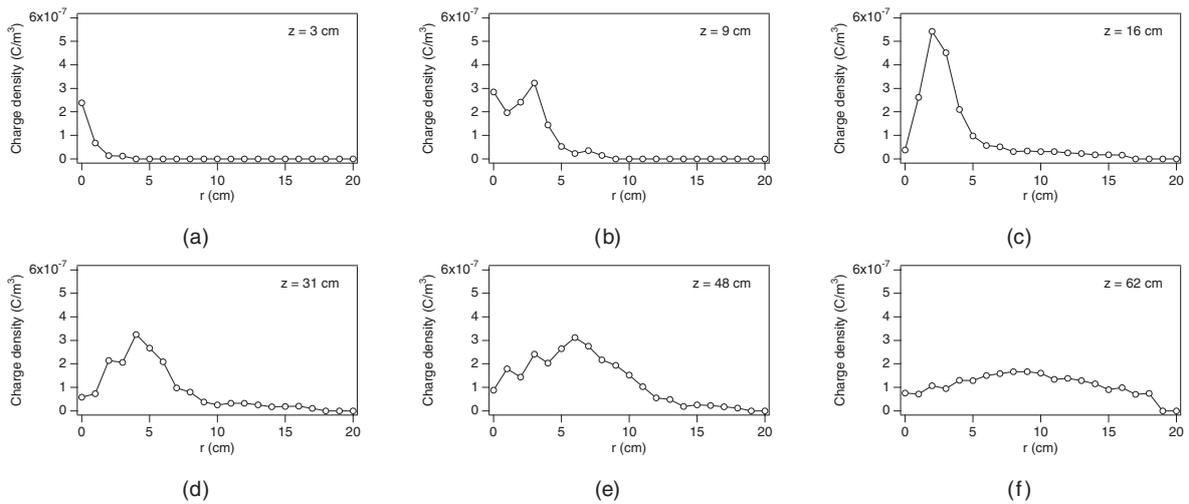


Fig.6 Measured space charge densities with the suction Faraday tube.  
吸引ファラデーチューブにより測定された空間電荷密度

### 4.3 吸引ファラデーチューブによる評価

Fig. 6 に吸引ファラデーチューブにより測定された空間電荷密度を示す。これらの電荷密度から求めた空間電荷密度分布，空間電位分布および電界強度分布を Fig. 5 b に示す。

吸引ファラデーチューブを用いて測定した電荷密度分布はノズルのごく近傍を除いて，中心で凹んだ分布となることは興味深い。中心付近( $r = 0 - 2 \text{ cm}$ )で吸引ファラデーチューブによって計測したとき負の電荷が測定されることもあることから，帯電液滴は両極性であることが示されている。噴流電流の極性から液体は総電荷として正に帯電していることから，大多数の液滴が正に帯電し，負帯電の液滴が少数であることがいえる。この場合，負帯電液滴は主たる正電荷で形成された電界によって中心に集まることが明らかであるので<sup>3)</sup>，測定したような分布となる。この負電荷の生成はこの噴霧装置にある2つのノズルの噴流液滴の分裂によるものであると考えられる。

### 4.4 フローティングプローブによる評価

浮動電位による評価結果( Fig. 5c)は吸引ファラデーチューブの結果と異なり，プローブの浮動電位による方法は静電危険性を評価するには不適であることを示している。これは，空間電位がプローブの浮動電位に等しいという測定原理の仮定から外れることによるものと考えられる。また，フローティングプローブの静電容量への電荷の充電電位，帯電液滴の移動による誘導電位の変化など現象が複雑となり，この誤差の解析は困難である。

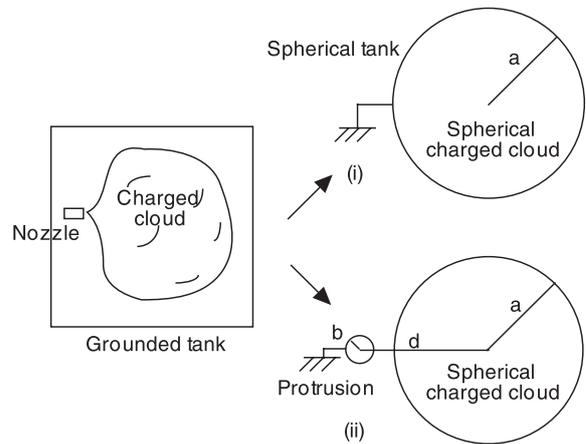


Fig.7 Model for convenient evaluation of discharge hazards during liquid spraying.  
噴霧帯電雲の簡易評価のモデル

### 4.5 静電気危険性の評価

これらの評価結果から，この噴霧装置による噴霧帯電では空気の絶縁破壊電界3 MV/mを超えることがないから，静電気放電が生じることはないことが予測できる。噴霧容器壁に近傍の電界を強める接地した突起物などがあり，放電が起こったとしてもストリーマに進展するための0.5 MV/m 以上の電界も存在しないことから，この噴霧装置は静電気の危険性を与えるものではないと評価できる。ここで，このような突起物による電界の強調は突起物の近傍のみであり，電界分布全体に影響を与えることはない。

また，Fig. 5b の最大電界はFig. 5a の1.5 倍程度であるので，円筒ケージ・電界計の方法で電荷密度を

測定して評価する場合，安全マージンとして測定値の 5 - 10 倍程度の電荷密度をもとに評価すれば良いであろう。

次に，この噴霧装置を用いた場合に静電気放電が生起する条件を Fig. 7 のような評価モデルを用いて考察する。

( i ) この噴霧装置によって生成する噴霧空間( 接地タンクなどを模擬する ) を球状( 半径  $a$  ) において電荷密度が一様にあるとすると，その電界はタンク壁で最大となり，

$$E_{max1} = \frac{a\rho}{3\epsilon_0} \quad (6)$$

となる。放電開始の条件  $E_{max1} > 3\text{MV/m}$  より

$$a\rho \geq 7.97 \times 10^{-5} \quad (7)$$

となる。測定電荷密度は約  $\rho = 2 \times 10^{-7} \text{C/m}^3$  であるので，放電が生成するための噴霧空間( タンク ) の半径は 400 m も必要になる。

( ii ) ノズルや突起物からの放電を評価するために，ノズルや突起物に相当する曲率半径  $b$  の接地球と中心間の距離  $d$  にある半径  $a$  の球状帯電雲( 総電荷  $Q_c = 4\pi a^3 \rho / 3$  ) との放電の可能性をこの帯電雲電荷による接地球の誘導電界の最大値  $E_{max2}$  ( 最大点は 2 つの球の中心を結ぶ線上で突起物を模擬した接地球表面上にある )

$$E_{max2} = \frac{Q_c(1 + \frac{b}{a})}{4\pi\epsilon_0 b d (1 - \frac{b}{a})^2} \quad (8)$$

より予測する。この式は球状帯電雲の電荷の映像電荷による上記の最大点の電界を計算することによって求まる。 $a \approx d, b = 5 \times 10^{-3} \text{m}$  すると半径 1.4m 程度以上の帯電雲となると突起表面で絶縁破壊電界以上になり放電の可能性がある。よく知られているように帯電雲のみによる放電よりも突起物の放電の可能性はより高いことがわかる。

評価法の改良点としては，Fig 5 に結果を示したモデルに突起物を模擬した計算が必要であろう。また，定常状態の電荷密度はタンクの大きさに依存して小さくなるので<sup>1, 4)</sup>，精度良い評価のためには評価に用いた式に液滴粒子の連続式を連立して定常状態の電荷密度分布を計算するモデルの検討も必要である。ただし，( ii ) で示した評価結果はノズル近傍の電荷密度の最大値を用いており，小さな容器でもこの値を超えることがないので安全マージンをとった結果となり，

危険性評価として問題とはならない。

## 5. 結論

液体のノズル噴出・噴霧における静電気の危険性を評価する 3 種類の方法を検討した。高空間分解能で測定できる吸引ファラデーチューブの評価結果と良く一致した円筒ケージと電界計を用いた評価法は，簡便に計測できるので現場での評価方法として妥当であろう。しかしながら，フローティングプローブによる評価法は適していないことが示された。今後はノズル電流の計測と円筒ケージ・電界計および吸引ファラデーチューブによる評価法を用いて広い範囲の噴霧条件での包括的な実験により，噴霧条件と噴霧帯電の静電気危険性との相関を明らかにする。

## 参考文献

- 1) Bailey A.G., Electrostatic hazards during liquid transport and spraying, in Ed. Chang J-S. Kerry A.J. and Crowley J.M., Handbook of electrostatic processes, Marcel Dekker, 723-731 (1995).
- 2) Bright A.W. and Hughes J.F., Research on electrostatic hazards associated with tank washing in very large crude carriers (supertankers) I. Introduction and experimental modelling, J. Electrostat., 1, 37-46 (1976).
- 3) Ali F.S., Ali M.A., Ali R.A. and Inculet I.I., Minority charge separation in falling particles with bipolar charge, J. Electrostat. 45, 139-155 (1998).
- 4) Vos B., Electric charge generation during tank washing- Influence of contaminants and electric field strength on charge generation, J. Electrostat., 1, 165-171 (1975).

(平成17年12月27日受理)

## 抄 録

### 静電粉体塗装用塗料の着火性に関する研究(その1)

崔 光石, 山隈瑞樹, 鄭 載喜

近年、静電粉体塗装は一般の吹付塗装に比べ、生産効率が高く、環境にやさしいという大きなメリットから普及率が極めて高い。しかし、静電粉体塗装は高電圧印加により塗料を帯電させ、接地した被塗物に向かって移動させる工程であり、放電による粉塵爆発・火災の発生が危惧されていることから、粉体塗料の最小着火エネルギー(MIE)を測定した。測定には、国内外で標準的に用いられているIEC規格に準拠した吹上げ方式着火試験装置(ハルトマン式、MIKE-3)を使用し、着火試験用粉体塗料としては、ポリマーを主成分とする粉体塗料(ポリエステル、エポキシ、ポリエステル/エポキシ、アクリル、ナイロン)及び5種類(色別)のポリエステル粉体塗料の計10種類を用いた。その結果、粉体塗料は数mJの小さい放電エネルギーでも着火する危険性が明らかとなった。特に、粉体塗料の粒径を考慮すると、エポキシ粉体塗料の方が他の粉体塗料に比べて、着火しやすいという結果が得られた。また、粉体塗料に含まれている顔料などの成分によっては、MIEはほとんど変化しないことが明らかになった。

(図5, 表2, 参考文献19)

### 噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価法の検討

大澤 敦

配管やノズルなどから液体が噴出すると液体および液滴に静電気が帯電して着火源となることがあるので、各種工程の現場において簡便に噴霧・噴出帯電の静電気危険性を評価する方法を構築することは工程の安全化と静電気による着火の防止対策の指針を与え、安全工学の立場からも重要である。本研究では噴霧・噴出の静電気危険性を評価するための測定技術とこの測定データを元に評価する手法を構築することを目標としている。測定技術として接地円筒ケージと電界計による空間電荷密度の測定、吸引ファラデーチューブによる空間電荷密度の測定また

はフローティングプローブによる電位測定の方法を検討した。また、評価手法としては、各測定データを元にポアソンの方程式と $E = -V$ を用いて噴霧空間の電界強度分布を求め、静電気放電の可能性を評価する方法を検討した。圧搾空気ドライブオグ2流体ノズルを用いた噴霧帯電のモデル実験により、これらの3つの測定方法を検討して、接地円筒ケージ・電界計と吸引ファラデーチューブの測定が妥当な結果を導き、現場で簡便に測定できることを考慮すると接地円筒ケージ・電界計による方法が適していることを示した。また、静電気放電の可能性を評価するための簡便なモデルも提案している。

(図7, 参考文献4)

### 破碎を伴う落石現象の物理モデル化に関する研究

伊藤和也, 豊澤康男, 日下部治

落石は道路、鉄道、住宅等へ影響を及ぼす斜面災害の中でも発生頻度が比較的高い災害現象の一つである。また、落石に起因する労働災害について調査したところ、過去10年間で40件程度報告されていた。中には落石が突破・跳躍して落石対策工により保護されている箇所にはいた労働者が被災する事例も報告されており、落石の運動形態や衝突現象など、落石対策の計画・設計に必要な事柄についても未だ十分には解明されていないのが現状である。そこで本研究は、多くのパラメーターが自明となり、応力条件を等価にすることが出来る遠心模型実験手法を用い、破碎を伴いながら衝突と跳躍を繰り返すような落石現象について物理モデル化を行い、その運動形態・衝突現象の解明を試みた。本報では、新たに開発した遠心場落石発生装置の概要と、それを用いて行った落石実験の落石軌跡および落石の破碎状況を確認した。その結果、球形タイプの落石形態は回転運動が主であるが、破碎を伴うと回転運動から跳躍運動に変化し、破片は大きな跳躍をすることが確認された。

(図4, 表5, 写真12, 参考文献28)