

3. 高圧水噴霧中の空間電荷密度の測定 *

大澤 敦 **

3. Measurements of Space Charge Density in Clouds Produced by High-pressure Water Sprays *

by Atsushi OHSAWA **

Abstract; Charged clouds produced by water spraying used in industrial operations are potential hazards of ignition by electrostatic discharges. Since this ignition risk can be assessed by electric fields created by the charges in a cloud, estimation of the charge density of the cloud is necessary to determine whether the electric fields can initiate an incendive discharge. This paper presents the results of measurements of charge densities in clouds during water spraying at water pressures up to 84 MPa. The results show that use of tap water, which is highly conductive, effectively reduces the risk in washing operations; in addition, relatively thicker nozzles reduce the charge in clouds.

Keywords; Space charge cloud, Electrostatic ignition, Washing operations, Risk assessment

* 第30, 31回静電気学会全国大会(2006, 2007), 静電気学会研究会(2008)にて一部発表

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

1. はじめに

最近の各種産業の工程における噴霧プロセスの応用は造粒、冷却、洗浄、反応、散布、塗装、はく離、研磨、切断、加湿などにみられるように多岐にわたっており、噴霧条件も静電的に危険側に推移することもあり、障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、液体噴霧における静電気危険性の評価技術の確立が求められている。この静電気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、数値計算が有効となり、着火性放電を防止する条件を求めることも可能となる¹⁾。この防止条件は、帯電雲が接地タンク内に形成されるとき、着火性放電を防止するためのタンク半径と帯電雲の空間電荷密度との関係を与えて、静電気着火リスクを評価するもの(安全プロセス条件を与えるもの)である。これの適用には各種の噴霧プロセスで形成される帯電雲の空間電荷密度がどの程度なのか知っておくことも重要である。ここでは、タンク洗浄を対象に実施した空間電荷密度の測定結果について報告する。つまり、洗浄工程で着火性放電を発生するような帯電雲を形成するかを調査することを目的にしている。

2. 実験

測定に用いた超高压水ジェットは洗浄機(スギノマシン, JPCM-93014, 最大常水圧84 MPa, 最大流量11 L/min)である。ノズル(ステンレス製で接地)は口径 $D_n = 0.6\sim 1.1$ mmを用いた。水は水道水(導電率: 1.1×10^{-2} S/m)とイオン交換樹脂フィルタをとおした水道水(精製水, 4.5×10^{-5} S/m)を用いた。

超高压水ジェットの利点は、洗浄液に用いることもある有機溶剤・洗浄添加剤が、高压ジェットにより不要となることである。これは環境保全だけでなく、可燃性雰囲気形成の低減にも寄与している。

空間電荷密度の測定には接地した金属製円筒かご(直径、長さともに15 cm または20 cm)の側面に取り付けた電界計(Rion, EA-07A)²⁾を用いた。ここで、空間電荷密度はガウスの定理(またはポアソンの方程式)を用いて電界計の測定値から変換している。かご内の電荷密度分布が一樣あるいは軸対称で一定とすればその計算も容易である。たとえば、一樣とすると電荷密度は $2\varepsilon_0 E/a$ (ε_0 : 空間の誘電率, E : 測定電界, a : 金属かご半径)より求めることができる。

噴霧は全面が接地したステンレス板でできたシールド

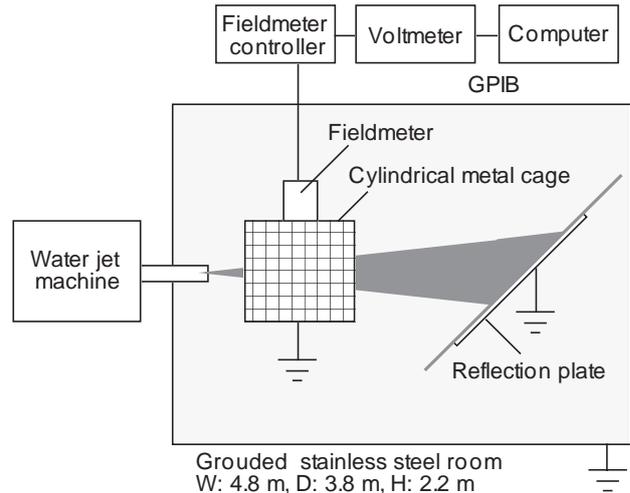


Fig. 1 Schematic diagram of measuring system of space charge density during spraying.
実験装置の概略

ルーム内(水が蓄積しないように床面には排水口を設けている)で行い、この測定子を任意の場所(高さはノズルの高さと同じ)に置いて空間電荷密度を測定した(Fig. 1)。さらに、実験の目的は静電気着火リスク評価であるため、これにより電荷密度が空間的に最大となる場所も探し出した。

タンク洗浄におけるタンク壁でのジェットの反射の影響を考察するため、Fig. 1のように噴流に対して45度の角度でノズルから90 cmの位置に接地した反射金属板を設置した実験も行った。

比較的に低い水圧の帯電雲の空間電荷密度も調査するため洗浄機(いけうち, 最大水圧2 MPa, 最大流量10 L/min)を用いた。この洗浄機は圧搾空気(最大空気圧1 MPa)を用いた二相流体についても調査できるようになっている。

3. 結果および検討

3.1 超高压水ジェット噴霧(≤ 84 MPa)

3.1.1 噴流内の空間電荷密度

Fig. 2aに代表的な測定空間電荷密度の結果を液圧の関係として示す。図中の空間電荷密度はノズルから距離45 cmのところの測定値である。ここで、最大となる空間電荷密度はノズル近傍の噴流ジェット内で測定されたときであるので、ここに示した電荷密度は最大であると考えてよい。

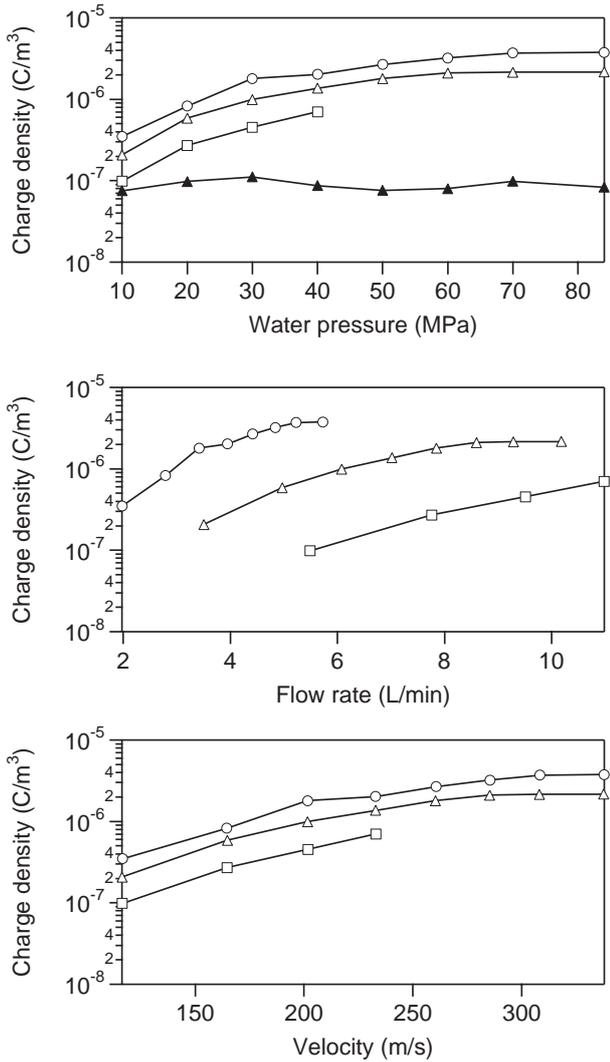


Fig. 2 Space charge densities in cone jets during high-pressure water jet spraying at the distance of 45 cm from nozzle and with a reflection plate. Space charge density versus (a) water pressure, (b) flow rate, and (c) velocity; ○: nozzle hole diameter of $D_n = 0.6$ mm, △: $D_n = 0.8$ mm, and □: $D_n = 1.0$ mm with purified water and ▲: $D_n = 0.8$ mm with tap water.

超高压水ジェット内の空間電荷密度

ここで、ノズル口径1 mmのプロットが40 MPaまでしかないが、この超高压水ジェット洗浄機の最大液流量11 L/minの制限によるものである。したがって、各プロットは液圧力が上昇するとともに液流量も増加していることに注意されたい。このため、Fig. 2bには液流量（ノズル径と液圧から求められる）と空間電荷密度との関係に書き換えたものを示す。また、噴出速度は液圧に関係するので、Fig. 2aと類似となると考えられるが、流量

をノズル断面積で除して得られる噴出速度との関係をFig. 2cに示す。

精製水の場合、同一のノズル径で液圧が高くなるほど帯電雲の空間電荷密度が高くなる傾向がある（Fig. 2a）。液圧が高いほど噴出速度が高くなるのが理由として考えられる。また、高い液圧では、空間電荷密度が飽和する傾向にある。

同一液圧であると、ノズル径が小さいほど、電荷密度が高くなる（Fig. 2a）。これも同様にノズル径が小さくなるほど噴出速度が高くなるからであると考えられる。ノズル径が小さくなると、液流量が減少するので、液体の電荷自体が高くなっていると推測できる。この推測が正しいことは、Fig. 2bから示される。同一流量のときノズル径が小さくなるほど、空間電荷密度が高くなっている（ノズル径が小さいほど）液体自体の電荷が高くなっていることがわかる。

このように噴霧による帯電は、噴出する際の速度が支配的に影響しているようである。しかしながら、Fig. 2cに示すように同一速度においてさえもノズル径が小さいほど空間電荷密度が高くなっている。ここではノズル径が小さいほど、流量が小さくなっているため、噴流内の液体の密度はノズル径が小さいほど低くなっている。つまり、同一速度でも、ノズル径が小さいほど液体自体の電荷が高くなっていないかを示している。これを説明するためには速度以外に帯電に寄与する要因があることを示している。噴出による帯電はノズルにおける電荷分離（電荷の発生）と電荷緩和（電荷の消滅）に依存する。この電荷分離はノズルでの接触面積に、電荷緩和は接地されたノズルとの接触時間に影響されるであろう。電荷分離の量はこの接触面積が大きいほど大きくなり、電荷緩和は接触時間が短いほど小さくなる。このうち速度に起因しないのは接触面積であるが、ノズル径が小さくなるほど大きくなる空間電荷密度を説明することができない。したがって、他にノズル径が小さくなることによって生じる要因があるはずである。ノズル付近に存在する液体量に関係するのかもしれない。同一速度でもノズル径が小さいとそこにある液体量は少なくなり、ノズルでの発生電荷が同じであっても液体の単位質量あたりの電荷が大きくなることに起因しているのかもしれない。

これらの傾向から、空間電荷密度は $v^k D_n^m$ (v は噴出速度) に比例することが予測できるが、適切な指数 k, m を求めることができていない。さらに詳細な調査が必要である。

ノズル径が小さくなることによって空間電荷密度が高くなることは明らかで、ノズル径を大きくすることによって着火リスクを低減できることを示している。このとき、ノズル径を大きくすることによって着火性放

電の原因となる水スラグの発生のおそれがあるので、ISGOTT³⁾のノズル径の制限に従う必要がある。

Fig. 2aの▲に示されるように高い導電率となる水道水を用いると空間電荷密度が精製水のそれ(同一口径0.8 mmの△プロット)よりも減少することがわかった。導電率が高い洗浄水の利用は静電気着火リスクを低減できることを示している。また、このときの空間電荷密度は液圧(噴出圧力)に依存しなくなることが示されている。導電率が高くなることによって電荷緩和が促進して、いずれの液圧においても帯電が飽和している(飽和帯電に達している)ものと考えられる。

3.1.2 タンク壁での反射

タンク壁を洗浄するので、噴流の壁への衝突という現象が必然に起こるが、このことが、空間電荷密度の上昇につながるかを調査するために実施した実験である。ここでは壁の反射を観測するためにFig. 1のように反射板を設けている。これによって大量の微小ミストが形成されて向かいの壁がみえなくなるほどになる。このミストの空間電荷密度の代表値として、円錐状の噴流の軸から鉛直方向に90 cm離れた(反射板の中心からも90 cm離れた)位置で測定した空間電荷密度をFig. 3に示す。小さい水滴が負に帯電することが知られているように負の空間電荷密度が測定されている。また、これらの値はFig. 2と比較してわかるように噴流内の空間電荷密度よりも十分に小さい。

ここで、0.6 mmのノズルのときにジェット外での空間電荷密度が正となることがあるのは、電荷密度が高くなることから径方向電界も高くなり、帯電ミストがジェットから径方向に移動する(広がる)ためと考えられる。

噴流は壁に衝突すると壁に沿って流れるので、Fig. 4のように噴流自体の空間電荷密度は壁等の反射によって影響されないことも、この測定によって示された。

噴流が正に帯電して、その周りが噴流内よりも電荷密度が十分に低く、負に帯電した空間電荷雲が形成されているので、その周りの電荷密度がゼロの場合(反射がない場合)よりも、タンク壁での電界が小さくなることを示唆している。つまり、噴流のタンク壁での反射は危険側に推移させるとはいえないことが示された。

3.2 高圧水噴霧(2 MPa)

Fig. 5に先ほどとは異なる洗浄装置を用いて比較的低い液圧2 MPa一定でバルブ操作により液流量を制御して同様に空間電荷密度を測定した例を示す。ここで液体は超高压水ジェットと同様な精製水である。

液圧が超高压水ジェットより十分に低い2 MPaでは、先の液圧の依存性からもわかるように大幅に空間電荷密度が低下している。

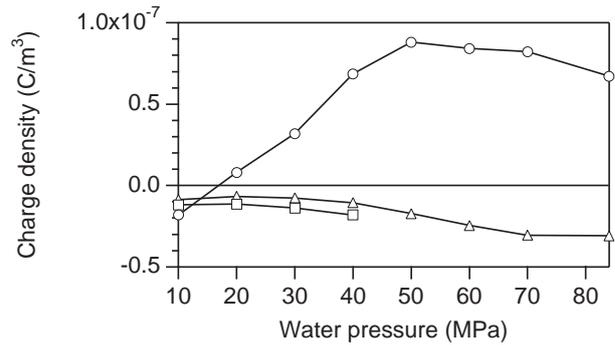


Fig. 3 Space charge densities in charged clouds outside cone jets during high-pressure water jet spraying with a reflection plate. ○ : $D_n = 0.6$ mm, △ : $D_n = 0.8$ mm, and □ : $D_n = 1.0$ mm with purified water.
噴流ジェット外の帯電雲中の空間電荷密度

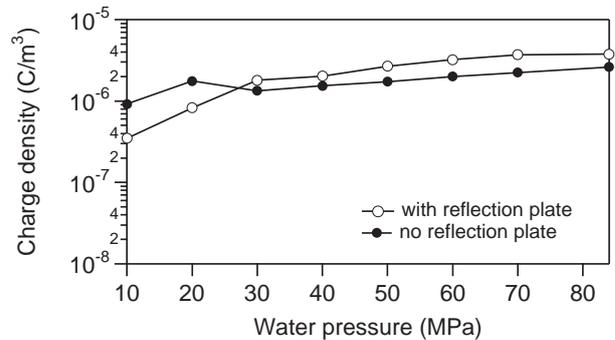


Fig. 4 The effect of the reflection plate on charge density in cone jets with purified water measured at the distance of 45 cm from the nozzle with $D_n = 0.6$ mm.
噴流ジェット内の空間電荷密度への壁反射の影響

圧搾空気を付加できるノズルの構造上、圧搾空気無しで噴霧することができなかったため、直接的に圧搾空気の影響を調査できなかったが、圧搾空気を付加した液体の二相流において帯電の極性が変化することは興味深い。

3.3 着火性放電の可能性

すべての実験において、放電は放電検出器(Trek, Model 900)で検出されなかった。

着火性放電の防止条件¹⁾: $\rho \leq 2.3 \times 10^{-6} R^{-1}$ ($MIE \geq 0.2$ mJ; ρ : 空間電荷密度, R : 接地円筒タンクの半径, MIE : タンク内雰囲気気体の最小着火エネルギー) を水道水

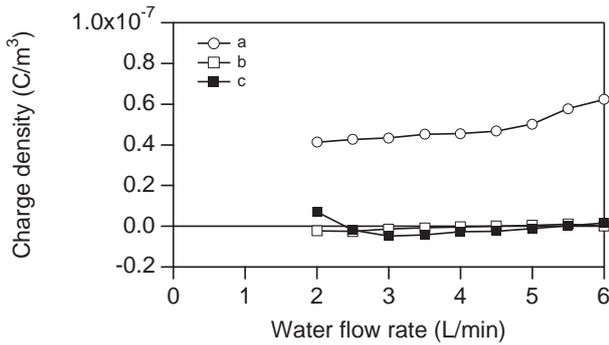


Fig. 5 Space charge densities in charged clouds during high-pressure purified water spraying at 2 MPa. a: $D_n = 1.8$ mm, b: $D_n = 3.3$ mm with pressurized air at 0.2 MPa, and c: $D_n = 3.3$ mm with pressurized air at 0.3 MPa.
高圧水噴霧の帯電雲中の空間電荷密度

の最大測定電荷密度 ($0.11 \mu\text{C}/\text{m}^3$) に適用すると, $R \leq 20.9$ mのタンク洗浄の着火リスクを低減できることが示される。また, 精製水でも十分に高導電率であるので, タンク容積を限定すれば静電気着火リスクを低減できる。50 MPa, 5 L/sの洗浄機で静電気着火の安全性を確認している実験⁴⁾ にもあるように水による洗浄は静電気着火リスクは高くないことがいえる。

ここで, 局所的に最大となる電荷密度分布をもつある大きさの空間電荷雲よりも, その最大電荷密度で一様で同じ大きさの空間電荷雲の方が電界が高くなるので, 最大測定電荷密度で一様とした帯電雲は危険側で着火リスクを考察することになり, リスク評価としては問題とならない。

4. おわりに

過去に測定例がない84 MPaという超高压水ジェットによって形成される帯電雲の空間電荷密度を測定し, 水道水のように導電率の高い水を使用すればタンク洗浄の静電気着火リスクを広範囲のタンク径に対して低減できることが示された。洗浄水の導電性のほかにも, ノズル径の選択によって着火リスクを低減できることが示された。

参考文献

- 1) Ohsawa, A.: Prevention criteria of electrostatic ignition by a charged cloud in grounded tanks, J. Electrostat. (to be published), または, 本特別研究報告書, 大澤敦: 帯電雲による放電着火のリスク評価
- 2) 大澤敦: 噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価の検討, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-2005, pp.9-16 (2006)
- 3) ISGOTT: International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals, 5th Ed. (2006)
- 4) Post, L., Glor, M., Lüttgen, G., Maurer, B., The avoidance of ignition hazards due to electrostatic charges occurring during the spraying of liquids under high pressure, J. Electrostat., 23, pp.99-109 (1989)

(平成20年12月10日受理)