

## 2. 帯電雲による放電着火のリスク評価\*

大澤 敦\*\*

## 2. Assessment of Static Ignition Risk by a Charged Cloud in Grounded Cylindrical Vessels\*

by Atsushi OHSAWA\*\*

**Abstract;** This paper presents the criteria of space charge density and wall electric field required to prevent incendive discharges produced by a charge cloud in cylindrical tanks. To obtain them, the threshold charge density of a homogenous cloud for initiating a discharge between the cloud and grounded protrusion is numerically calculated, and then the transferred charge and energy of the discharge are obtained to investigate the incendivity. In addition, the maximum electric field at the side wall of the tank at the threshold charge density is obtained for evaluating and monitoring the risk. Since such calculations give conditions required to prevent such an incendive discharge, those with wide-ranging dimensions in the tank and protrusion may be useful in assessing the static ignition risk. Consequently, we found that protrusions less than 2 mm in radius of curvatures never lead to incendive discharges; in other words, such protrusions may safely reduce the charges in tanks, but when their radii exceed 2 mm, an incendive discharge is possible. The conditions of  $\rho \leq 2.3 \times 10^{-6} R^{-1}$  ( $\rho$ : charge density,  $R$ : tank radius), and an electric field of  $\leq 1.1 \times 10^5$  V/m at the side wall of the tank may reduce the static ignition risk caused by a discharge in flammable atmospheres of minimum ignition energy  $\geq 0.2$  mJ, which corresponds to most hydrocarbons, in tanks up to  $\approx 1.5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>.

**Keywords;** Space charge cloud, Electrostatic ignition, Corona discharge, Brush discharge, Lightning-like discharge, Streamer, 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

接地金属容器内の帯電雲と突起物との静電気放電による着火の可能性を事前評価しておくことは、洗浄、容器充填など空間電荷雲を形成しうる工程のリスクアセスメントに重要であり、開発した噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価法<sup>1)</sup>を適用する際にも有用である。

帯電雲による着火性放電の発生に関する研究は、実験的に多くなされており、3隻のスーパータンカーの洗浄中の爆発事故に関連して1970年代前半に包括的になされ、十数編の論文が主にJ. Electrostatics, vol. 1とStatic Electrifications 1971, IOP Conference Series No. 11で発表されている。これらの報告によると、タンク中心部に挿入された接地電極により発生する放電は着火リスクがないコロナ放電であり、帯電雲(約 $10^{-8}$  C/m<sup>3</sup>)の最大電位も20 kVを超えることはなく、洗浄水を再利用しても40 kVであった<sup>2-4)</sup>。このことから、着火性放電には少なくとも70 kVの空間電位が帯電雲によって形成される必要があることが結論づけられている<sup>5)</sup>。したがって、絶縁した導体となる長くのびた水スラグからの火花放電が静電気に関与する着火源としてもっとも考えられる候補として挙げられたが<sup>3, 4)</sup>、APIの最終報告<sup>6)</sup>にもあるように明確な着火原因は判っていない。事故後のタンカー洗浄の対策として、静電気着火の危険性が危惧される洗浄機を使用する場合はディーゼルエンジンの廃ガスをタンク内に導入するなどして可燃性雰囲気形成しないようにすることが規定されるようになった<sup>7, 8)</sup>。後の解析<sup>9)</sup>により、規定されたノズルサイズ<sup>7, 8)</sup>を使用すれば、水スラグによる火花放電は発生しないことも導かれている。

最近の静電気災害防止に関するいくつかの規格<sup>7, 10-12)</sup>の洗浄に関する項目は、任意の洗浄機と容器に対して実施された実験を根拠として決められたもので、熟慮の上のものであろうが、あまりにも基となるデータが少なく、また、実験条件が異なることから重要な数値(たとえば、タンク容量、水圧、流量などの制限)が規格によって異なっており、実際にリスクアセスメントするときに問題が生ずることもあるであろう。

直径3 m (60 m<sup>3</sup>)のタンクの粉体帯電雲の実験<sup>13)</sup>と15000 m<sup>3</sup>以下のタンク洗浄<sup>14)</sup>で雷状放電が観測されなかったことから、いまでは、産業レベルで形成できる帯電雲では雷状放電は起きないと結論されている。また、先に述べたように帯電雲による着火性放電の発生条件として空間電位が70 kV以上であることが必要であるが<sup>5)</sup>、実際にはGaussian limit(ノズルやタンク内にある突起物のため生ずる放電)により電位上昇が制限される。つまり、危険な高電位が発生する前にタンク内の構造物などの突起部分からコロナ放電が発生して、空間電位が

70 kV以上になることは困難で着火性の放電が生成されないと解釈できる。実際に水噴霧・噴出実験では、最も電位が高くなるタンク中心に接地した突起物を挿入しても着火性放電を観測できていない<sup>1-4, 15, 16)</sup>。さらに、噴出ノズル近傍に帯電電極を設けて液滴の電荷を高くしても着火性放電は観測されていない<sup>17, 18)</sup>。噴霧・噴出で生じる電荷自体が高くない場合は、時間とともに空間電荷密度が増加しても、突起物先端で生じる放電は着火リスクの低いコロナ放電になることを示している。

しかしながら、噴霧・噴出で生じる電荷自体が高くなり、空間電荷密度がさらに高くなることがあると、上記のコロナ放電が初めから着火性の放電となると予測できる。最近の研究では、コロナ荷電による粉体を開放空間に噴出し高電荷密度の帯電雲(約 $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$ <sup>19)</sup>)を形成して、その帯電雲内に挿入した接地電極から50 cm程度のストリーマを発生できている<sup>20)</sup>。また、3~5気圧の水蒸気を先細り亜音速ノズルを用いたジェットで $1.5 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  C/m<sup>3</sup>という著しく高い電荷密度の帯電雲を形成させて接地板上の金属棒に取り付けた球状電極との間に40 cm程度の人工的な雷放電を発生させるのに成功している<sup>21)</sup>。このような高い空間電荷密度の帯電雲が産業工程のレベルで形成されるかという疑問である。あるとすれば、荷電機能を有する塗装工程ぐらいであろう(実際には局所排気されているので、高い空間電荷密度の帯電雲は形成されていないであろう)。また、この2つのいずれの放電も放電電極周辺に電界を集中させる構造の電極が用いられていることから、帯電雲による放電には突起物が必要であることがいえる。

ここまで述べてきたように帯電雲が形成される産業工程の静電気着火リスク評価に適用できる普遍的データが不足している。着火性放電を形成する帯電雲の条件を予め求めておくことは各種工程の静電気リスクアセスメントの情報として重要であると考え。先述したように放電開始には突起物が必要であるので、帯電雲と突起物との放電を調査することとする。

このような背景から、実際の作業現場で帯電雲の静電気リスクを評価できるような噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価法を開発している<sup>1)</sup>。この方法は、噴霧・噴出で発生する帯電雲の空間電荷密度をいくつかの異なる場所で測定して、そのうちの最大電荷密度で一様に接地タンク内に分布したときの電界分布を計算することによって着火性放電の可能性を評価するものである。ここで、最大電荷密度での一様分布は最も危険側となるのでリスク評価として問題はない。

本論文は、開発した評価法を支援するデータを与えるものであり、接地タンク内面上の突起物(導電性)と帯電雲との着火性放電の発生条件(空間電荷密度)を広範囲のタンクおよび突起物サイズに対して、コンピュータ

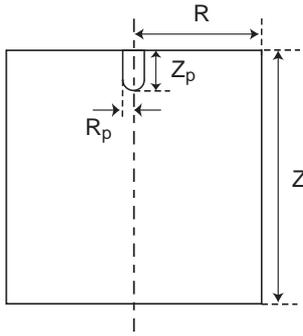


Fig. 1 Cylindrical vessel and protrusion to be modeled.  
円筒容器と突起物

モデリングにより導出し、静電気着火リスクを低減するための条件を求めることを目的としている。

コンピュータモデリングを用いたリスク分析手法は特定のタンクやタンカーおよび空間電荷密度に対してなされた電界計算の報告<sup>23-25)</sup>にあるように静電気着火リスクの評価に有用である。

## 2. モデル

帯電雲によって形成された電界が空気の絶縁破壊電界以上になると、そこで放電が発生し、この放電によって帯電雲の静電エネルギーの一部を放出する。この放出されたエネルギーがその雰囲気中の着火エネルギーよりも大きいときに着火することになる。ここで提案するモデルは、Fig. 1のように半径R、高さZの接地円筒金属容器の上部の中心に曲率半径R<sub>p</sub>、長さZ<sub>p</sub>の突起物がある場合に、電界が最も高くなる突起物表面で放電が起きうる条件とこの放電の着火性を調査するものであり、以下の手順でこれらを求めた。

ここで、水スラグによる放電と雷状放電の考慮は、Sec. 1. に示した理由から除外できる。

1. 最大電界が大気圧空気の絶縁破壊電界 $E_b = E_{b1} = 3 \times 10^6$  V/mとなるための帯電雲の電荷密度（容器内に一様に分布すると仮定）をポアソンの方程式より求める。以下、このしきい値のことを臨界電荷密度 $\rho_c$ と呼ぶことにする。また、 $E_{b1}$ は平等電界における絶縁破壊電界であるので、放電開始電界が突起物の曲率半径R<sub>p</sub>に依存するとき( $E_b = E_{b2} = 2.28 \times 10^6 [1 + (10^2 R_p)^{-1/3}]$  V/m<sup>22)</sup>の臨界電荷密度も考慮して包括的に放電着火リスクを検討する。ここで、容器および突起物の寸法が決まれば、一様な電荷密度分布を仮定しているので

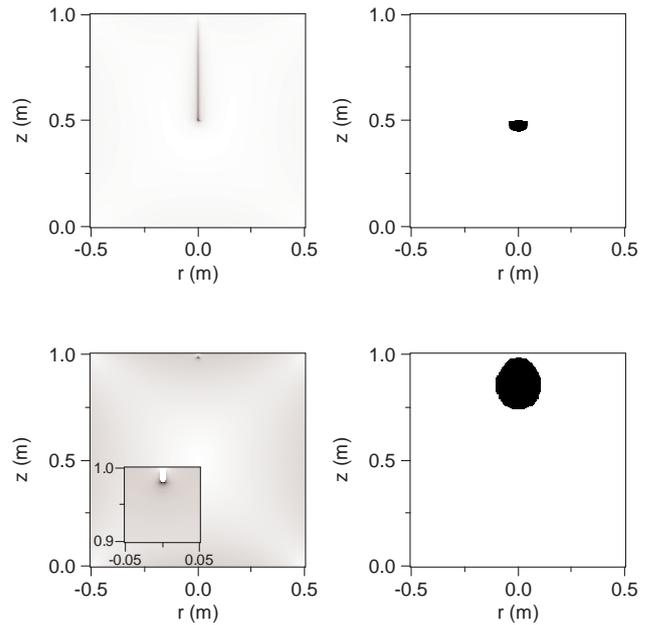


Fig. 2 The electric field distribution at the charge density threshold for the inception of a discharge,  $\rho_{cd} = 5.37 \times 10^{-6}$  C/m<sup>3</sup>, (a) and discharge region (b) at  $R = 0.5$  m,  $Z/R = 2$  ( $Z = 1$  m),  $R_p = 5$  mm, and  $Z_p = 0.5Z = 0.5$  m for  $E_b = E_{b2} = 51.5$  kV/cm, and electric field distribution (c) and discharge region (d) at  $\rho_{cd} = 2.57 \times 10^{-5}$  C/m<sup>3</sup>,  $Z_p = 2$  cm and others are the same. Figure c includes a zoomed field distribution around the protrusion.

臨界電荷密度のときの電界分布および放電領域の例

電界は空間電荷密度に比例する。適当な電荷密度で電界分布を計算すれば、この比例の関係により臨界電荷密度を求めることができる。

2. この放電開始の電荷密度のときの電界分布(たとえば、Fig. 2a, c)より、容器側壁の最大電界を求め、放電開始の最大側壁電界の条件を求める。
3. 突起物から平均電界が $5 \times 10^5$  V/m(ストリーマ進展の条件)以上となる領域(たとえば、Fig. 2b, d)を求め、この領域内の電荷をゼロとして、この中和電荷を放電電荷として見積もる。
4. この放電前後の容器内の静電エネルギーの差  $\int_v \frac{1}{2} \rho \phi^2 dv - \int_v \frac{1}{2} \rho' \phi'^2 dv$  からこの放電のエネルギーを計算できる。ここで、 $v$ :体積、 $\rho, \rho'$ ,  $\phi, \phi'$ : 放電前後の電荷密度および電位である。この放電エネルギーは、等価エネルギー(着火に寄与される実効エ

エネルギー)よりも大きくなるであろうが、危険側となるので着火リスクの評価としては妥当である。  
 この手続きを容器半径  $R = 0.1 \sim 25$  m, 容器の高さ  $Z = R, 2R, 3R$ , 突起物の曲率半径  $R_p = 2 \sim 10$  mm, 突起物の長さ  $Z_p = 2 \sim 10$  cm および  $Z_p = \frac{Z}{4}, \frac{Z}{2}, \frac{3Z}{4}$  という広範囲の条件 (3,852 通り) で計算して得られた着火性放電 (放電エネルギー 0.1 mJ 以上) の発生条件から安全係数 2 倍以上を確保した着火性放電の防止則を求めている。

### 3. 結果および検討

#### 3.1 突起物有無の影響

突起物がある場合はその先端に電界が集中 (局所化) するので、放電開始電界を与えるための電荷密度は突起物がない場合に比較して低くなる (Fig. 3)。たとえば、 $R = 0.5$  m,  $Z = 1.0$  m ( $Z/R = 2$ ) のタンクで絶縁破壊電界  $E_b = E_{b1}$  を形成するための臨界電荷密度は突起物がないときに  $1.02 \times 10^{-4}$  C/m<sup>3</sup> であり、 $R_p = 5$  mm,  $Z_p = 0.5$  m の突起物があるときの  $3.13 \times 10^{-6}$  C/m<sup>3</sup> よりも十分に高い。したがって、この突起物がある方が放電が起こりやすいことになり、ここでは帯電雲による放電着火リスクを評価するので、低い電荷密度で放電が生成する可能性がある突起物がある場合を対象にすればよいことになる。ここで、明確な突起物がなくてもタンクなどに取り付けられた接地金属配管などのエッジ部やタンク構造物が突起物と同様な振る舞いとなる。換言すれば、このような突起物を対象としてモデル化していることになる。

#### 3.2 容器形状の影響

容器の高さ  $Z$  と半径  $R$  の比の臨界電荷密度への影響を調べるため  $Z/R = 1, 2, 3$  について計算したが、その結果の例を Fig. 4 に示すように、この比の影響は大きくない。この臨界電荷密度が比  $Z/R$  にほとんど依存しないことから、得られる側壁の最大電界、放電電荷および放電エネルギーもこの比に大きく影響されない。

#### 3.3 容器半径の影響

突起物先端の電界は帯電雲の総電荷に関係するので、換言すれば、突起物先端の電界は帯電雲の局所電荷による電界を帯電雲内の全電荷に対して求めて、これをベクトル和したものとなるので (重ねの理)、容器半径が大きくなるほど放電開始のための帯電雲の臨界電荷密度は小さくなる。また、このことは、容器内を接地した導体で区画化 (静電シールド) して実効的なタンク容積を小さくすることによって、放電開始の臨界電荷密度を高くするので、放電リスクを低減できることを示唆している。

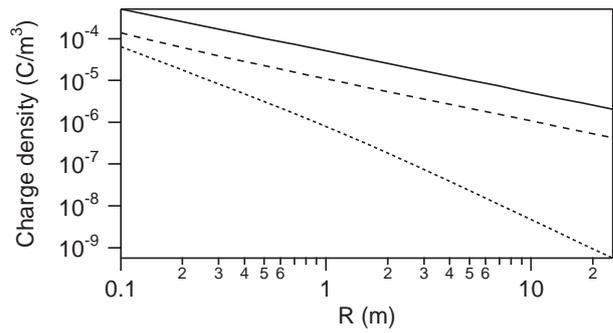


Fig. 3 Effect of protrusion on space charge density threshold for discharge inception for  $E_b = E_{b1}$  at  $Z/R = 2$ , no protrusion (—solid),  $R_p = 5$  mm and  $Z_p = 0.5$  m (····· dotted), and  $R_p = 10$  mm and  $Z_p = 2$  cm (---dashed).  
 突起物の影響

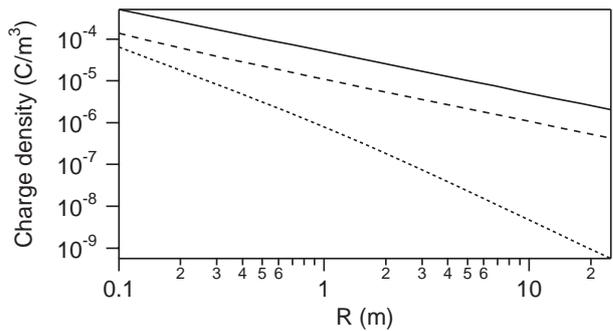


Fig. 4 Effect of the ratio of height  $Z$  to radius  $R$  of vessel on charge density threshold for inception of a discharge for  $E_b = E_{b1}$  at  $R_p = 5$  mm and  $Z_p = 5$  cm. —  $Z/R = 1$ , ···  $Z/R = 2$ , and - -  $Z/R = 3$ .  
 容器形状の影響

#### 3.4 突起物の長さの影響

突起物の長さが長くなり、その先端が接地されたタンク壁面から遠ざかるとともに (タンク中心に近づくとともに)、先端周辺に電界が集中する度合いが高くなるので、臨界電荷密度は突起物先端がタンク中心に近づくとともに小さくなる (Fig. 5)。この電界集中の度合いは同じ曲率半径の突起物で長さの違う場合の電界分布を示した Fig. 2 からわかる。

したがって、壁面の最大電界、放電電荷および放電エネルギーは突起物の先端がタンク壁面に近づくにつれて高くなることが Fig. 5 からわかる。

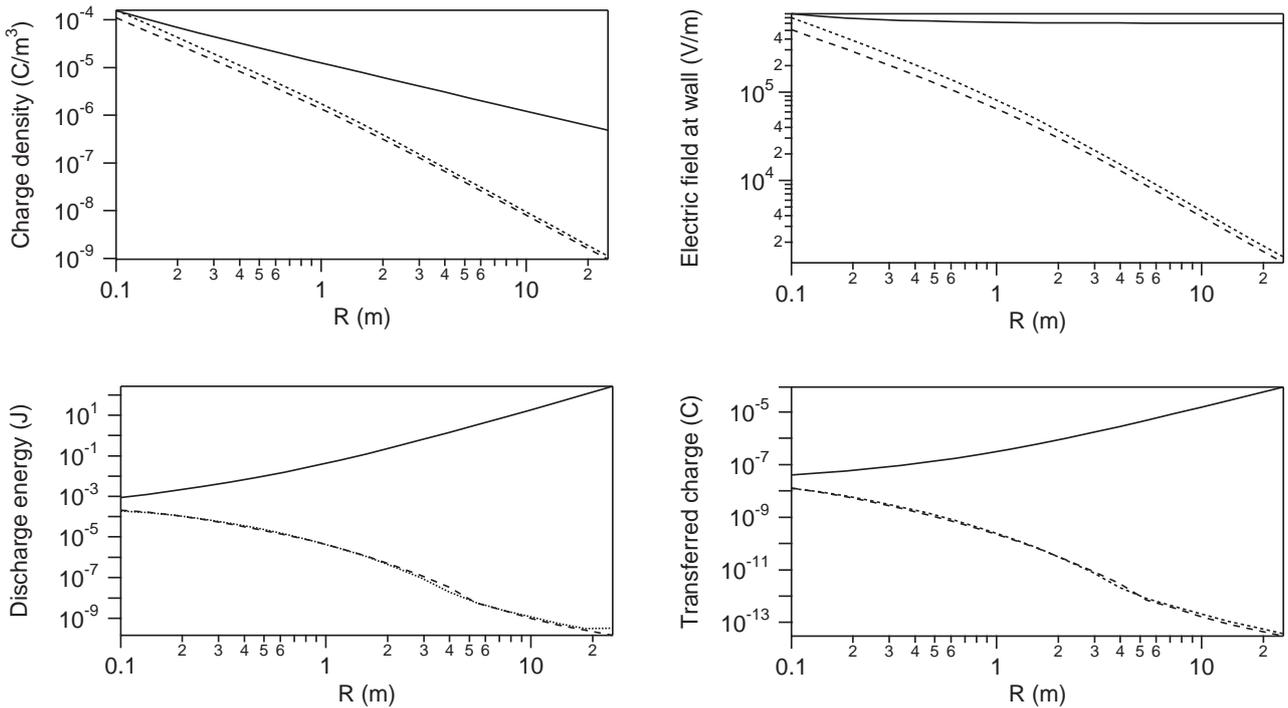


Fig. 5 Effect of the length of protrusion  $Z_p$  on (a) charge density threshold for discharge inception for  $E_b = E_{b2}$ , (b) maximum electric field at wall, (c) discharge energy and (d) transferred charge by the discharge at  $Z/R = 2$ ,  $R_p = 5$  mm and  $Z_p = 2$  cm (—),  $Z_p = 0.5Z$  (---), and  $Z_p = 0.75Z$  (···).

突起物の長さの影響

### 3.5 突起物の曲率半径の影響

突起物の半径が小さくなるとともにその先端周辺に電界が集中する度合いが高くなるので、臨界電荷密度は突起物の半径が小さくなるほど小さくなる (Fig. 6)。したがって、壁面の最大電界、放電電荷および放電エネルギーは突起物の曲率半径が大きくなるほど高くなる。

### 3.6 放電開始電界の影響

本モデルでは放電開始電界として考えられる  $E_{b1} = 3 \times 10^6$  V/m と  $E_{b2} = 2.28 \times 10^6 [1 + (10^2 R_p)^{-1/3}]$  V/m の 2 通りについて考慮した。これは臨界電荷密度については明らかに、 $E_{b1}$  を採用すればこの電荷密度は小さくなるので、放電リスクを考察する場合はよいであろう。しかし、実際に生ずる放電生成のための電極形状からは、平等電界 ( $E_{b1}$ ) で考察するよりも不平等電界 ( $E_{b2}$ ) での放電モデルの方がよいことは明らかである。また、 $E_{b2}$  を採用する場合、放電開始の臨界電荷密度および電界も高くなり、放電エネルギーが高くなることが予測できる。したがって、静電気放電による着火リスクを考察する場合はどちらを採用すべきかは計算をしてみないと決定で

きない。このようなことから、提案したモデルでは両者を考慮して、包括的に着火リスクを調査している。

計算結果からいえることは、着火リスクを考察する場合は後者の  $E_{b2}$  を採用すべきであるということである。この理由は、 $E_b = E_{b2}$  のとき放電開始の臨界電荷密度は高くなり、突起物周辺の電界も高くなり、放電領域 (平均電界が  $5 \times 10^5$  V/m 以上の領域) も広がり、そのため、放電電荷および放電エネルギーがより高くなるからであり、結果として、あるしきい値のエネルギーを持つ着火性放電を生成させるための臨界電荷密度が  $E_{b1}$  のそれよりも 1/2 程度低くなるからである。

### 3.7 着火性放電

このモデルに基づいて計算された放電エネルギーが着火性 (0.1 mJ 以上とする) となるものは、突起物周辺に電界が比較的局所化しにくい曲率半径と長さをもつものである。電界が突起物周辺に局所化されると、放電開始電界を与える帯電雲の電荷密度が低くなり、放電領域も狭くなり、結果として放電電荷およびエネルギーが小さくなるからである。したがって、放電開始の臨界電荷

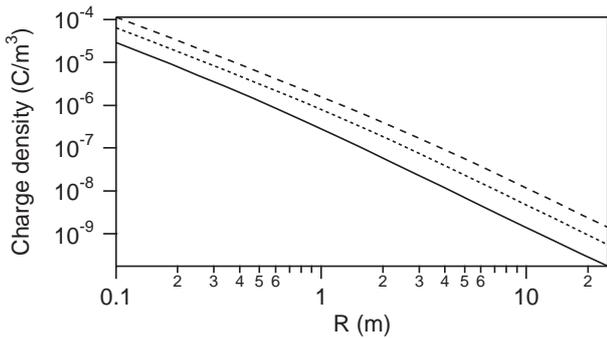


Fig. 6 Effect of the radius of protrusion at  $Z_p = 0.5Z$  and  $R_p = 2$  mm (—),  $R_p = 5$  mm (···), and  $R_p = 10$  mm (-·-) at  $Z/R = 2$ .  
突起物の曲率半径の影響

密度が高くなる、つまり、電界が突起物先端に局所化されにくい、太く、短い突起物が着火性放電を誘起しやすいことが示された。このような容器内構造物を排除することによっても、静電気着火リスクを低減できるであろう。ただし、突起部が長くても、対面の壁に接近するほど長くなると別であり、着火性放電の可能性は短いものと同様となる。ただ、これに相当するようなタンク内構造物はないであろう。

Fig. 5 の  $Z_p = 2$  cm の放電エネルギーに示されるように突起物の長さが短くなると ( $Z_p < 10$  cm)、放電電荷および放電エネルギーが容器半径とともに高くなることは興味深い。これは、容器壁が存在することによる電界の上昇が起因している。ガウスの定理から明らかのように、電界は容器壁で高くなるが、突起物が短いと、この容器壁があることによる電界が重畳されて放電領域（平均電界が  $5 \times 10^5$  V/m 以上の領域）が広がるためであり、また、電界の局所化の度合いも低くなるので、臨界電荷密度も高くなる。このことは、Fig. 2 に示した電界分布の色の濃さの比較と放電領域の比較からもわかる。このような放電領域の拡張は放電が長く伸びたストリーマに進展していることを示唆しており、突起物が地上にある避雷針などのように振る舞っており、雷状放電の生成条件を示唆するものであることは興味深い。この放電領域の最大値は 18 m ( $R_p = 10$  mm,  $Z_p = 2$  cm,  $R = 25$  m,  $Z = 75$  m) にも達している。しかしながら、ここで計算によって得られたような臨界電荷密度で一様で、かつ、大きな体積をもつ帯電雲が産業工程で形成することは困難であると考えられる。

実験的調査により突起物の半径が 2 mm 以下では水素の可燃性雰囲気でも着火しないこと<sup>27)</sup>、また、半径が 3.5 mm より小さい突起物では各種の炭化水素の可燃性雰囲気を着火させないこと<sup>28)</sup> が知られているように曲率

半径が 2 mm では着火性放電は生じず、最大でも約 0.07 mJ であった。このように細い突起物表面ではコロナ放電のようなエネルギーの低い放電が起きていると予測でき、除電の効果があることを示している。電界が局所化する曲率半径が小さく (2 mm 以下)、そして長い突起物は静電気放電の着火リスクなく、帯電雲の電荷を低下できることを示唆している。

### 3.8 着火性放電の防止条件

このモデルに基づいて容器半径  $R = 0.1 \sim 25$  m、容器の高さ  $Z = R, 2R, 3R$ 、突起物の曲率半径  $R_p = 2 \sim 10$  mm、突起物の長さ  $Z_p = 2 \sim 10$  cm および  $Z_p = 0.25Z, 0.5Z, 0.75Z$  で計算した結果、次のような着火性放電の防止条件が得られた。空間電荷密度  $\rho$  の条件として、あるいは空間電荷密度が測定によって既知の場合は容器半径の条件として

$$\begin{cases} \rho \leq 1.5 \times 10^{-6} R^{-1} (MIE \geq 0.1 \text{ mJ}) \\ \rho \leq 2.3 \times 10^{-6} R^{-1} (MIE \geq 0.2 \text{ mJ}) \\ \rho \leq 4.0 \times 10^{-6} R^{-1} (MIE \geq 1 \text{ mJ}) \end{cases} \quad (1)$$

のようにすれば着火性放電を防止できる。ただし、 $MIE$  は容器内雰囲気のみ最小着火エネルギーである。なお、この条件は着火性放電の生起条件に対して安全係数 2 倍以上を確保している。

また、容器側壁電界の最大値  $E_w$  が

$$\begin{cases} E_w \leq 0.85 \times 10^5 \text{ V/m} (MIE \geq 0.1 \text{ mJ}) \\ E_w \leq 1.1 \times 10^5 \text{ V/m} (MIE \geq 0.2 \text{ mJ}) \\ E_w \leq 1.6 \times 10^5 \text{ V/m} (MIE \geq 1 \text{ mJ}) \end{cases} \quad (2)$$

となるようにしても帯電雲による着火性放電を防止しできる。式 (1) および (2) を Fig. 7 に示す。タンク側壁に付けた電界センサーによるリスク評価およびモニタリングとしても有効であろう。

曲率半径が 2 mm 以下の突起物では着火性放電が生じることがなかったため、曲率半径 2 mm の突起物のときの放電開始の臨界電荷密度と側壁電界も着火性放電の防止条件として適用できる。この突起物で最も臨界電荷密度が高くなる時の条件を Fig. 7 に追加的に示す。

## 4. おわりに

接地された金属容器内に形成される帯電雲による着火性放電を防止する条件を広範囲の条件に対して導出した。帯電雲の電荷密度と容器半径との関係および側壁電界の条件を導出しているため、リスクアセスメントに活用されたい。

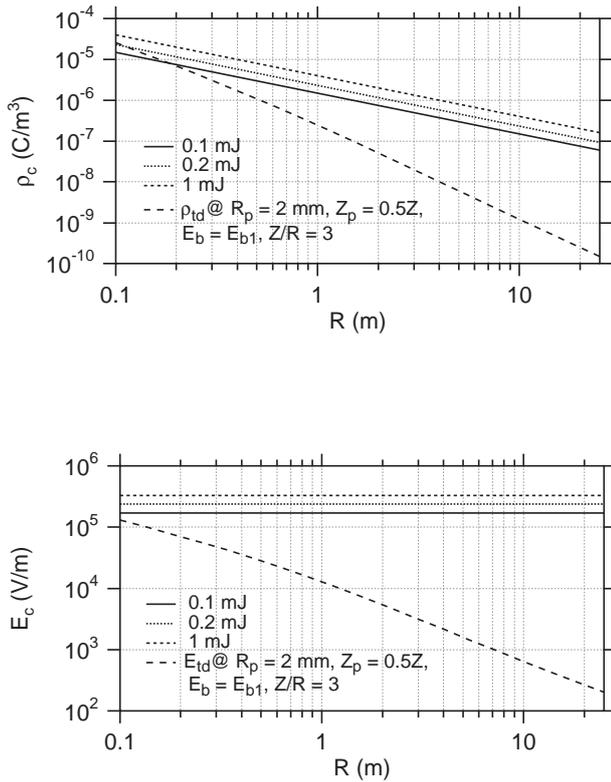


Fig. 7 Criteria of charge density (a) and wall electric field (b) for preventing incendive discharges in charged clouds. —: 0.1 mJ, ....: 0.2 mJ, ····: 1 mJ, - - -:  $\rho_{td}$  and  $E_{td}$  at  $R_p = 2$  mm,  $Z_p = 0.5Z$ ,  $E_b = E_{bt}$  and  $Z/R = 3$ .  
帯電雲による着火性放電の防止条件

### 参考文献

- 1) 大澤敦：噴霧・噴出帯電の静電気危険性の評価，産業安全研究所研究報告，NIIS-RR-2005，pp.9-15 (2006)
- 2) van de Weerd, J.M.: Electrostatic charge generation during the washing of tanks with water sprays-II: Measurement and interpretation, Static Electrifications 1971, IOP Conference Ser. No. 11, pp.158-177 (1971)
- 3) Hughes, J.F., Bright, A.W., Makin, B., Parker, I.F.: A study of electrical discharges in a charged water aerosol, J. Phys. D: Appl. Phys., 6, pp. 966-975 (1973)
- 4) van de Weerd, J.M.: Electrostatic charge generation during tank washing-Spark mechanisms in tanks filled with charged mist, J. Electrostat., 1, pp. 295-309 (1975)
- 5) Bustin, W.M., Dukek, W.G.: Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry, Research Studies Press (1983)
- 6) American Petroleum Institute: Final report, Tanker Accident Study Committee, November 27 (1974)
- 7) ISGOTT: International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals, 5th Ed. (2006)
- 8) International Chamber of Shipping, Tanker safety guide chemicals, 3rd Ed. (2002)
- 9) Walmsley, H.L.: Electrostatic hazards from water slugs formed during the washing of ships tanks: Spark energy calculations, J. Phys. D: Appl. Phys., 20, pp.329-339 (1987).
- 10) NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity 2000 Ed. (2000)
- 11) BS 5958-2:1991: Code of practice for control of static electricity-Part 2. Recommendations for particular industrial situations (replaced by BS PD CLC/TR 50404: 2003<sup>12)</sup>) (1991)
- 12) PD CLC/TR 50404:2003: Electrostatics — Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity (2003)
- 13) Boschung, P., Hilgner, W., Lüttgens, G., Maurer, B., Widmer, A.: An experimental contribution to the question of the existence of lightning-like discharges in dust clouds, J. Electrostat., 3, pp.303-310 (1977)
- 14) Walmsley, H.L.: the avoidance of electrostatic hazards in the petroleum industry, J. Electrostat., 27, pp.1-200 (1992)
- 15) 大澤敦：液体噴出・噴霧の静電気危険性の評価法，静電気学会講演論文集04，pp.289-290 (2004)
- 16) 大澤敦：帯電雲による放電着火リスクの評価-超高压水ジェット洗浄への適用，静電気学会講演論文集07，pp.219-220 (2007)
- 17) 杉本俊之，浅野和俊，東本禎夫：帯電液滴群の内部に挿入した接地針電極からのコロナ放電，電気学会論文誌A，114-1，pp.18-14 (1994)
- 18) 杉本俊之：帯電液滴空間電荷雲内での微小放電の形成，電気学会論文誌A，117-6，pp.599-604 (1997)
- 19) Higashiyama, Y., Sugimoto, T., Takahashi, M.: Electrical discharge occurring from a space charge cloud formed with charged particles, J. Electrostat., 51-52, pp.382-386 (2001)
- 20) Sugimoto, T., Kikuchi, H., Higashiyama, Y.:

- Positive discharge from a grounded electrode toward negatively charged particle cloud, *J. Electrostat.*, 63, pp.609–614 (2005)
- 21) Temnikov, A.G., Orlov, A.V., Bolotov, V.N., Tkach, Yu.V.: Studies of the parameters of a spark discharge between an artificial charged water-aerosol cloud and the ground, *Tech. Phys.* 50–7, pp.868–875 (2005)
- 22) 静電気学会編. 新版静電気ハンドブック, オーム社, (1998)
- 23) Chubb, J.N.: Practical and computer assessments of ignition hazards during tank washing and during wave action in partballasted OBO cargo tanks, *J. Electrostat.*, 1, pp.61–70 (1975)
- 24) Chubb, J.N., Brown, K.P., Butterworth, J.: Computer modelling of electrostatic conditions and hazards in tank washing, *J. Electrostat.*, 9, pp.71–88 (1980)
- 25) Butterworth, J., Brown, K.P.: Assessment of electrostatic ignition hazards during tank filling with the aid of computer modelling, *J. Electrostat.*, 13, pp.9–27 (1982)
- 26) Gibson, N., Lloyd, F.C.: Incendivity of discharges from electrostatically charged plastics, *Brit. J. Appl. Phys.*, 16, pp.1619–1631, (1965)
- 27) Tabata, Y., Masuda, S., Minimum potential of charged insulator to cause incendiary discharges, *IEEE Trans. Ind. Appl. IA-20*, pp.1206–1211 (1984)
- 28) Britton, G.L., Smith, J. A., Static hazards of drum filling, *Plant/Operation Progress*, 7–1, pp.53–78 (1988)

(平成20年12月10日受理)