

|               |                                 |            |
|---------------|---------------------------------|------------|
| 15.2          | 作業による静電気着火ハザードのリスク見積            | 113        |
| 15.3          | 作業による静電気着火のリスク低減策               | 113        |
| <b>第 16 章</b> | <b>リスクアセスメントの実施例</b>            | <b>115</b> |
| 16.1          | 液体への粉体投入                        | 115        |
| 16.1.1        | 設備・作業概略                         | 115        |
| 16.1.2        | 可燃性雰囲気形成ハザード同定                  | 116        |
| 16.1.3        | 帯電ハザード同定                        | 117        |
| 16.1.4        | 静電誘導ハザード同定                      | 119        |
| 16.1.5        | 放電ハザード同定                        | 120        |
| 16.1.6        | 静電気着火リスク見積・評価                   | 122        |
| <b>付録 A</b>   | <b>可燃性雰囲気の見積</b>                | <b>124</b> |
| A.1           | 可燃混合ガス・蒸気の LEL および UEL の推算      | 124        |
| A.2           | LEL および UEL の見積                 | 124        |
| A.3           | 限界酸素濃度の見積                       | 125        |
| A.4           | 危険場所のクラス分けの例                    | 125        |
| A.5           | 危険場所の範囲の例                       | 126        |
| A.5.1         | プロセス容器の可燃性雰囲気                   | 126        |
| A.5.2         | 屋外液体タンクの可燃性雰囲気                  | 126        |
| <b>付録 B</b>   | <b>Fault tree analysis: FTA</b> | <b>128</b> |
| B.1           | FTA                             | 128        |
| <b>付録 C</b>   | <b>静電気事故の統計的分析</b>              | <b>130</b> |
| C.1           | はじめに                            | 130        |
| C.2           | 静電気着火ハザード                       | 130        |
| C.2.1         | 可燃性雰囲気の形成                       | 130        |
| C.2.1.1       | 気体による可燃性雰囲気の形成                  | 131        |
| C.2.1.2       | 液体蒸気による可燃性雰囲気の形成                | 131        |
| C.2.1.3       | 粉じんによる可燃性雰囲気の形成                 | 132        |
| C.2.1.4       | ハイブリッド可燃性雰囲気の形成                 | 132        |
| C.2.2         | 帯電の原因                           | 132        |
| C.2.2.1       | 流動・攪拌                           | 132        |
| C.2.2.2       | 摩擦・衝突                           | 133        |
| C.2.2.3       | 漏洩・噴出                           | 133        |
| C.2.2.4       | はく離                             | 134        |
| C.2.2.5       | 噴霧                              | 134        |
| C.2.3         | 静電気放電のタイプと原因                    | 134        |
| C.2.3.1       | 火花放電                            | 135        |
| C.2.3.2       | ブラシ放電                           | 136        |
| C.2.3.3       | 沿面放電                            | 136        |
| C.2.3.4       | コーン放電                           | 136        |
| C.2.4         | 工程・作業                           | 137        |

---

|          |             |     |
|----------|-------------|-----|
| C.2.4.1  | メンテナンス作業    | 137 |
| C.2.4.2  | 液体充てん       | 138 |
| C.2.4.3  | 粉体充てん・排出    | 138 |
| C.2.4.4  | 液体への粉体の注入   | 138 |
| C.2.4.5  | トラブル対応      | 138 |
| C.2.4.6  | サンプリング      | 139 |
| C.2.4.7  | ガス充てん       | 139 |
| C.2.4.8  | 粉体袋詰め       | 139 |
| C.2.4.9  | 塗装          | 139 |
| C.2.4.10 | 通常工程・作業中の漏洩 | 139 |
| C.2.4.11 | その他         | 139 |
| C.3      | まとめと対策      | 139 |
|          | 参考文献        | 141 |

# 第1章 リスクアセスメント

## 1.1 はじめに

物質がある限り静電気は多かれ少なかれ必ず発生する。この静電気がある程度大きくなり、この静電気によって形成される電界が空気の絶縁破壊電界以上になったときに静電気放電が発生する。この静電気放電が着火源となって重大な損害となる火災・爆発という災害を生じさせている。このような静電気災害を防止するための対策が静電気対策である。

この静電気対策を実施するためには、組織的な安全管理が必要である。これまでの安全管理の方式は、基準・規格を厳正に守るという、いわゆる、安全基準遵守型であった。基準・規格の方も災害をゼロにしようと「こうしなさい、こうするな」という「させる」というものであった。このような管理方式（基準・規格のあり方）はある程度までは事故を減らすことができるが、どうしても限界がある。さらに、突発的な事態に対応が遅れるという重大な欠点をもつ。事故が減少しないというこの限界は、基準・規格の利用者がお膳立てされた規格に従っていれば安全は確保できると勘違いしているところにあるようだ。

静電気災害を考えると、物質がある限り静電気は必ず発生する。そのうえに、可燃性物質を扱っているので、絶対安全はあり得ないのである。したがって、災害をゼロにする規格には所詮無理があり、規格にある対策も絶対安全な対策ではなく、リスクを低減するための対策であると解釈すべきである。余談であるが、ISO/IEC Guide 51<sup>1</sup> [1] では誤解を避けるために、例えば安全ヘルメットを保護ヘルメットに書き換えるなどして、規格の中で「安全」という言葉を不用意に使用しないことを注意しているほどである。安全管理の劇的変動（安全基準遵守型からリスク低減型の管理方式）はいくつかの産業事故に由来しており、欧州で数十年の試行錯誤の末、リスクアセスメントが安全技術として確立された。現在、安全分野で先進した欧米など諸外国ではリスクアセスメントを当然のこのように実施している。我が国でもようやく労働安全衛生法にリスクアセスメントが義務づけられるようになった（初期段階であるので、まだ努力義務であるが）。この規則改正の貢献は大きいですが、日本ではまだ、始まったばかりという段階から脱却できていない。支援技術の提供が必要である。

誰かが決めた基準に従っていれば、安全は確保できるという考えは捨てて、安全は自分たち自身で確保するものであるということを認識して、是非ともリスクアセスメントを実施してほしい。リスクアセスメントは事前に自らが危険なところを見つけ、これに対して自らが対処・対策するというものである。どのように対処するかという意味は、その危険の生起確率、これによる損害、また、この危険を誘引するもの・ことを用いることによる利点も考慮してリスクを総合的に見積もって、そのリスクが合理的に許容可能 (ALARP: As Low As Reasonably Practicable) か判断して決定される。本書ではこの意思決定の支援としての静電気着火のリスク分析手法を示す。

<sup>1</sup>規格作成者が規格に安全面を導入するためのガイドラインである。

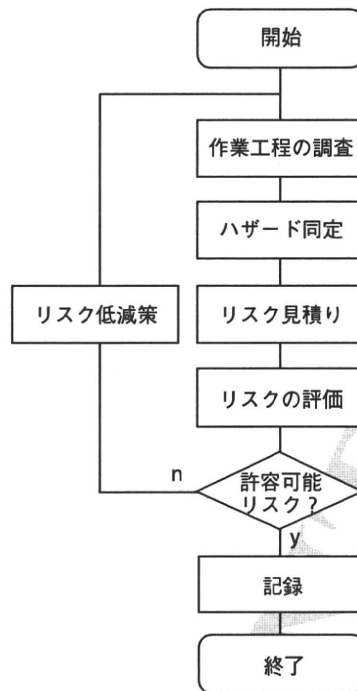


図 1.1: リスクアセスメントの手順

## 1.2 リスクアセスメント

リスクとは単に危険と日本語に訳すことができるが、ISO/IEC Guide 51 [1]にあるように安全分野での定義は「危害の発生する確率および危害のひどさの組合せ」である。この危害とは人的な損害あるいは設備などの財産の損害あるいは環境に対する損害などを表している。静電気安全分野での「危害の発生する確率」とは静電気によって火災・爆発という危害が発生するわけであるから、「静電気着火リスク」は「静電気危険源（ハザード）が生ずる確率およびそれによる損害の組合せ」に置き換えることができる<sup>2</sup>。静電気着火リスクはこれを見積もることによってなされる。

ある工程のリスクアセスメントをするとき、科学的、網羅的にハザードを同定する作業から開始する。このハザード同定にはその工程に係わる全員が参加する必要がある。このプロセスではかなり多くのハザードがリストアップされるであろうが、すべてに対してリスク見積り・評価をしなくてはならない。また、その工程に係わる全員が参加するので見落としを少なくすることも可能であり、施したリスク低減策（静電気対策）の意味が良く理解でき、安全意識が高まるという効用もある。次に、同定された一つ一つのハザードにより生ずるリスクを（できれば数値的に）見積もる。この二つのプロセス（ハザード同定とリスク見積り）をリスク分析といい、この系統的なリスク分析に基づいて許容可能なリスク（tolerable risk）であるかどうかリスクの評価を行う。そうでない場合は許容可能なリスクとなるまでリスク低減策を講ずることになる。このようにリスク低減策を講じた後の残存リスクについても検討する。以上のプロセスをまとめると図 1.1 [1] のようになる。

これまでも実際にはこのリスクアセスメントに似たようなことは行われていると思うが、このように科学的にかつ網羅的に予めハザードを同定し、そのリスクを見積り・評価し、リスクの高い順に許容できるリスクになるまでリスク低減策を系統的に行うので、合理的、効率的で、また、経済的でもある。

<sup>2</sup>ただし、危害のひどさは実施対象に依存するので、本書では単にハザードが生ずる確率をリスクと呼ぶこともある。



## 第2章 静電気安全の基礎

### 2.1 静電気基礎の理解

静電気による災害は、静電気放電による着火である。この静電気放電は何らかの原因により静電気（電荷）が蓄積して（これが帯電である）、空気の絶縁破壊電界以上の電界が形成されるときに起こる。この放電によって放出されるエネルギーがガス分子に輸送されることによって、化学反応を促進する。この放電が可燃性ガス、蒸気または粉じんと空気（酸素）で構成される可燃性雰囲気で起こり、この実効的なエネルギー輸送量はその雰囲気の最小着火エネルギーを超えるときに着火が起こる。このような着火のためには、可燃性雰囲気の形成と十分な着火エネルギーを有した静電気放電が不可欠である。つまり、可燃性雰囲気の形成を防止する、または、着火性放電を防止することによって静電気着火リスクを低減できることになる。静電気のリスクアセスメントでは、このような着火性放電というハザードを抜けがなく同定できることが重要であり、そのためには静電気現象の基礎を理解している必要がある。本章ではリスクアセスメントに必要な静電気現象の基礎を解説する。

### 2.2 静電気帯電はどのようにして起こるのか

静電気の発生を防止して静電気対策（リスク低減策）を実施するためには、静電気発生の機構とこれに影響する要因を熟知する必要がある。静電気の発生は主に電荷分離によって生ずる。何らかの原因で正・負電荷の分離が起こると、本来は電氣的に中性状態である物体の表面において正または負のどちらかの極性の電荷が過剰となり電荷の不均衡が生じる。この過剰電荷が静電気であり、発生した静電気が物体表面に蓄積することにより静電気が帯電している。

物体に電荷が発生する主要な機構は

- 固体の接触分離（摩擦も含む）による電荷分離
- 液体－固体、液体－気体<sup>1</sup>、液体－液体の界面での電荷分離
- 静電誘導によるもの
- 荷電粒子（イオンなど）によるもの

である。

#### 2.2.1 電荷分離による帯電

電荷分離は主たる静電気発生の機構である。概略は図 2.1 に示すとおりである。

<sup>1</sup>たとえば、水と空気の界面では配向双極子の負極性が空気界面に向けて配列して、この双極子の反対側では負イオンがより多く引きつけられる

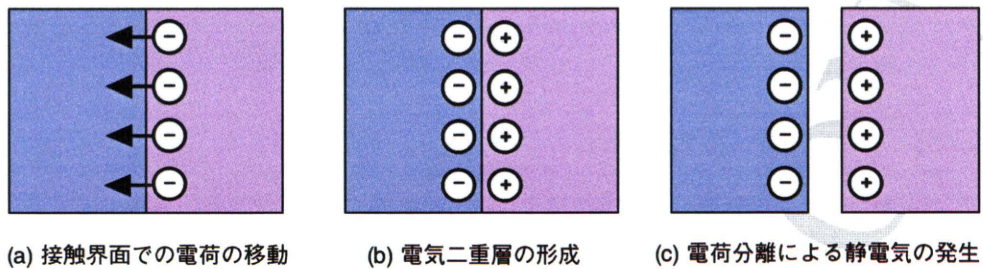


図 2.1: 電荷分離による静電気の発生

- (1) 電気的に中性である二つの異種の物体（固体-固体，固体-液体，液体-液体，液体-気体）が接触すると，
- (2) その界面で電荷が移動して電気二重層<sup>2</sup>を形成する。この状態はまだ電気的に中性である。
- (3) この二重層のクーロン力に打ち勝つ何らかの仕事によりこれらの物体が分離すると，その界面の電荷がそれぞれに残る。この電荷分離により，この二つの物体に正・負の静電気が帯電する。

たとえば，ロールによるフィルム・紙などの搬送，液体<sup>3</sup>や粉体の移し替えやパイプ輸送などにおける帯電現象は接触・分離する際の電荷分離による。

## 2.2.2 電荷緩和

物体に静電気が発生しても，一般には発生した静電気がすべて蓄積するのではなく，その一部は消滅する。これを電荷緩和または電荷漏洩という。電荷緩和は物体の静電容量（誘電率）と漏洩抵抗（抵抗率）に依存し，それぞれが大きいほど緩和時間が長くなる。接地やボンディングはこの電荷緩和の現象を利用した静電気の対策である（図 2.2）。

この電荷緩和は 2.2.1 で説明した接触・分離の際にも起きている。したがって，実際の電荷分離では，分離されたすべての電荷が残るのではなく，その一部は電荷緩和によって消滅している。分離する際に表面全体が同時に離れることはなく，微視的に見ればいくつかの接触点がある。接触する物体の表面抵抗が小さいとき，この微視的に見た離れる点で，分離して発生した正・負の電荷が互いに中和する。これは，シートのはく離を考えてみればよくわかる。シートをはがす最後の接触部で電荷緩和が起きている<sup>4</sup>。

また，離れるときにその分離電荷によって形成される電界が空気の絶縁破壊電界以上になって気体放電が生じるときも分離電荷の一部が消滅される。

電荷緩和は物体の静電容量  $C$  と漏洩抵抗  $R$  で構成される電気回路<sup>5</sup>（図 2.3a）で表すことができ，発生時の電荷が  $Q_0$  で，その後，電荷の発生がなくなったときの  $t$  秒後の物体の電荷  $Q$  は

$$Q = Q_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2.1)$$

<sup>2</sup>界面でできる電荷分布であり，互いに逆符号の電荷をもつ二重の層のこと。

<sup>3</sup>液体の場合は，正・負どちらかの電荷（イオン）が選択的に界面に集まる（吸着・配向など）ことによって電荷分離する。

<sup>4</sup>ゆっくりとはがすときの方がシートの帯電が小さいのはこの電荷緩和が関与する時間に関連している。帯電が速度に依存するのはこの電荷緩和によるものである。

<sup>5</sup>このモデルは静電容量を定義しているので，正確には帯電物体は導電性の（表面電位が同電位となる）物体である。

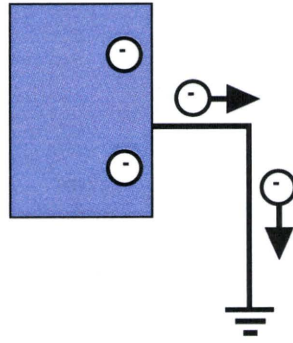


図 2.2: 電荷緩和

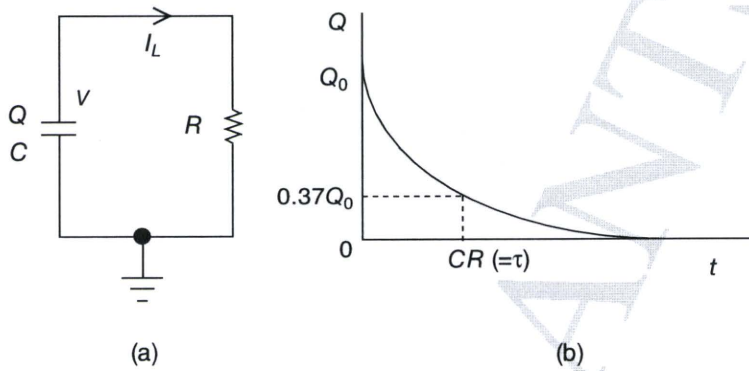


図 2.3: 電荷緩和の回路モデル

$$\tau = CR = \varepsilon\rho, \quad (2.2)$$

で表され、物体の帯電量は電荷緩和により時間とともに指数関数的に減少する。すなわち、帯電した物体も電荷の発生をなくすことができれば、帯電量は徐々に減少していつかはなくなることを示している。ここで、 $C$ 、 $R$ 、 $\varepsilon$ および $\rho$ はそれぞれ、物体の静電容量、漏洩抵抗、誘電率および抵抗率である。また、 $\tau$ を電荷緩和時間（または電荷緩和時定数）といい、初期電荷の $1/e$ （約37%）となる時間である。参考に、式(2.1)の導出を脚注<sup>6</sup>に示す。式(2.1)から、電荷緩和は物体の静電容量（誘電率）と漏洩抵抗（抵抗率）に依存し、それぞれが大きいほど緩和時間が長くなることがわかる。導体のように電荷緩和がオーミック<sup>7</sup>な物質の場合は、電荷緩和は式(2.1)に従うが、多くの絶縁物（低導電率の液体など）の電荷緩和ではこれに従わないこともある。これは、電荷密度に起因するもので、液体では双曲線緩和(Hyperbolic relaxation [2])として知られているが、緩和時間はオーミックな緩和よりも十分に早い。

<sup>6</sup>図 2.3a から電荷緩和の電流（漏洩電流） $I_L$  は

$$I_L = -\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{CR} = \frac{Q}{\tau}$$

とおける。この式を電荷  $Q$  について解くと式(2.1)を得る。

<sup>7</sup>オームの法則に従う物質。この場合、電荷緩和は電圧に依存する電気伝導がないことを意味する

### 2.2.3 電荷蓄積

静電気の帯電量  $Q$  は単位時間当たりの電荷の発生（電荷分離） $I_G$  と電荷の消滅（電荷緩和） $I_L$  によって決まり、単位時間当たりの帯電電荷の変化は

$$\frac{dQ}{dt} = I_G - I_L \quad (2.3)$$

となる。これを回路モデルで示すと図 2.4a のようになる。つまり、静電気の帯電は電荷分離と電荷緩和現象の平衡状態で決まることを意味している（図 2.4b）。電荷緩和が十分に大きいとき、静電気が発生しても電荷が物体に蓄積されないため静電気の帯電が起こらず、逆に電荷緩和が小さいとき、電荷が物体に蓄積され、静電気の帯電量が大きくなる。たとえば、液体がパイプを流れるとき、このパイプが金属であり接地すると、式 (2.2) の電荷緩和時間は著しく短く（式 (2.3) の  $I_L$  が大きく）なり、パイプで発生した電荷を瞬時に大地に漏洩できる<sup>8</sup>。逆に絶縁物のパイプを用いるあるいは金属パイプを接地しない場合は電荷緩和がないため、発生した静電気がパイプに蓄積されることになる。この電荷の蓄積が静電気の帯電として現れて災害の原因となる。したがって、この蓄積を減少するために電荷の漏洩を大きくすること（物体の静電容量を小さくする、または、漏洩抵抗を小さくすること）は静電気災害防止の重要な対策の一つである。

次に電荷蓄積の定常値（静電気帯電量）を求める。求めるものは定常値であり電荷の時間変化がないので、式 (2.3) の  $dQ/dt = 0$  となり、 $I_L = I_G$  となる。この  $I_G$  が漏洩抵抗  $R$  に流れるので、定常状態の物体の帯電電位  $V$  は

$$V = I_G R \quad (2.4)$$

となる。帯電電荷量は  $V = Q/C$  の関係から

$$Q = I_G C R = I_G \tau \quad (2.5)$$

となる。参考に、式 (2.4) と式 (2.5) は脚注<sup>9</sup>のようにしても導出できる。式 (2.4) は、後に示す導体の静電気対策に必要な漏洩抵抗値の根拠となる式である。また、これらの式は発生電流を推定できれば、漏洩抵抗および静電容量が既知の導体の電位、電荷および静電エネルギーを見積もることができるので、リスクアセスメントや事故分析に活用されている。

### 2.2.4 電荷分離による種々の帯電現象

電荷分離による帯電は多くの産業工程にみられる接触、摩擦、衝突、剥離、流動、攪拌、混合、噴霧・噴出、沈降・浮上、粉碎、滴下（しずく）など接触・分離の際に起こる帯電である。

作業現場で起こる代表的な電荷分離による帯電現象は以下のとおりである。

- 摩擦（異種の物体の摩擦 → ベルトとローラ、粉と袋類などの摩擦）

<sup>8</sup>パイプ自体の電荷は漏洩するが、絶縁性の液体のとき液体の電荷はほとんど漏洩されない。

<sup>9</sup>式 (2.3) は

$$\frac{dQ}{dt} = I_G - \frac{Q}{CR}$$

となる。 $t = 0$  で  $Q = 0$  とすると、 $t$  秒後の電荷は

$$Q = I_G C R [1 - \exp(-t/CR)]$$

となる。この式を示しているのが図 2.4b である。定常値を表す式 (2.5) はこの式の定常値であることがわかる。



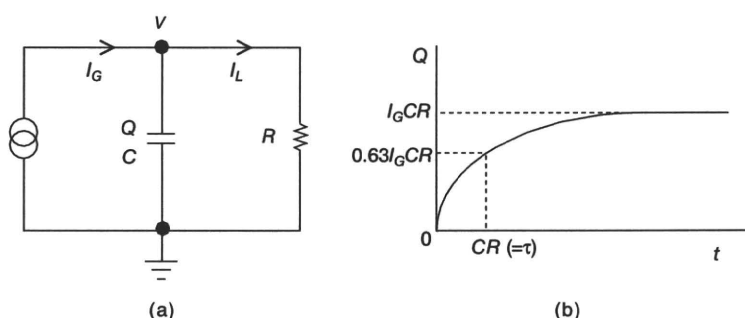


図 2.4: 電荷蓄積（静電気帯電）のモデル

- はく離（密着している物体のはく離 → 紙，フィルム等のはく離やプラスチック成型後の型外し）
- 液体流動（固体壁への正または負イオンの選択的吸着 → 液体のパイプ輸送，流動液体とフィルタ）
- 噴霧・噴出（ノズル・開放部での電荷分離 → スプレー・漏洩による噴出）
- 分裂（分裂による電荷分離 → 噴霧・噴出による液体の分裂，粉碎，固体の破壊・分裂）
- 沈降・浮上（液体内の異種の物体の接触と沈降 → 液中の水滴・不純物などの沈降・浮上）
- 衝突（異種の物体の衝突 → 粉体の空気輸送）

### 2.2.5 電荷分離による帯電に影響する要因

一般に，電荷分離による帯電は分離電荷に影響する要因と電荷緩和に影響する要因に分けられる。

- 分離電荷に影響する要因
  - － 物質の種類  
帯電列で知られるように，接触・分離する二つの物体の種類によって発生電荷の大きさと極性が影響を受ける。
  - － 不純物  
不純物が含まれると，この不純物が発生に影響し，一般に発生が大きくなる傾向がある。
  - － 接触面積  
接触面積が大きくなるほど電荷分離する面積が大きくなるので，静電気の発生は大きくなる傾向がある。摩擦すると帯電が大きくなるのは，この理由である。
- 電荷緩和に影響する要因
  - － 界面の抵抗  
界面の抵抗率が低いと電荷緩和によって帯電が小さくなる。
  - － 接触後の分離速度  
分離速度は分離過程の電荷緩和に関係するため，結果的には静電気の帯電量に影響する。速度が速いと，電荷緩和過程の時間が短くなり，帯電量が大きくなる。

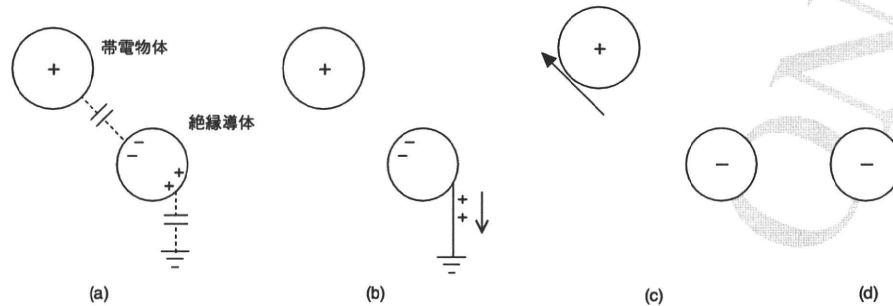


図 2.5: 誘導帯電 (a) 静電誘導, (b) 導体を接地すると, 帯電物体と同極性の電荷が大地に流れ, (c) 接地をはずし帯電物体を離すと, (d) 導体は帯電物体と逆極性に帯電する

### 2.2.6 静電誘導と誘導帯電

接触・分離の電荷分離による帯電のほかに静電誘導による帯電がある。これは導体にのみ起こる現象である<sup>10</sup>。帯電物体の近くに電氣的に絶縁された導体があると、静電誘導により導体表面で電荷の不均一分布が生じ、その結果として接地との間に電位差が現れる。これが静電誘導であり、これに起因する帯電を誘導帯電という。図 2.5a に示すように、正に帯電した物体に電氣的に絶縁された導体が近づくと帯電物体に近い表面では負の電荷が、反対側には正の電荷が現れる<sup>11</sup>。これを静電誘導という。さらに、図 2.5b のように導体を一旦接地すると、帯電物体と同極性の電荷が大地に逃げ、また、反極性の電荷は帯電物体の電荷のクーロン力により導体に維持される。接地をはずした後に帯電物体を離すと導体は図 2.5c のように帯電物体と逆極性に帯電する。また、図 2.5b の接地をしないで帯電物体を離すとき、真電荷の移動がないためこの導体は帯電していない元の状態に戻る。

たとえば、絶縁靴を履いた作業者がロール工程のフィルムや粉体の充填されたフレキシブルコンテナなどの帯電物体に近づいて静電誘導により、作業者に、帯電物体に近い方と遠い方に電荷の分離が生じ (図 2.5a)、周辺にある接地導体に触れると放電により電撃を受ける (図 2.5b)。さらに、その場から離れると (図 2.5c)、作業者は誘導帯電して (図 2.5d)、離れた場所で接地導体に触れると 2 度目の電撃を受ける。電撃で済めばまだましであるが、可燃性雰囲気でのような放電が起これば着火する可能性が高く、絶縁導体の静電誘導による着火事故事例は極めて多い。導体を接地することが重要である。

## 2.3 静電気放電と着火

### 2.3.1 静電気放電

電荷の発生と緩和の差で電荷の蓄積が起こり帯電することを 2.2.3 で説明したが、電荷緩和がないとき無限大に帯電するわけではなく、帯電電荷によって形成される電界が空気の絶縁破壊電界  $E_b$  以上になると気体放電が起こり、電荷の一部がこれにより失われるので帯電が制限される。これを、回路モデルで示すと図 2.6a のようになる。ただし、このモデルは帯電物体が導体のときに適用される。電荷分離 (電荷発生) が連続的に起こる場合、帯電電位が放電開始電界を与える電位

<sup>10</sup>人は静電的には導体として扱えるので人も静電誘導を受ける。

<sup>11</sup>これは、導体の表面電位はいたるところ同じである (表面で接線成分の電界がゼロとなる) が、帯電物体があることにより導体表面の接線成分に現れようとする電界を打ち消すように電荷が表面で再分布することによる。また、電荷は再分布 (分離) しているだけで、総電荷量としては変わらない。

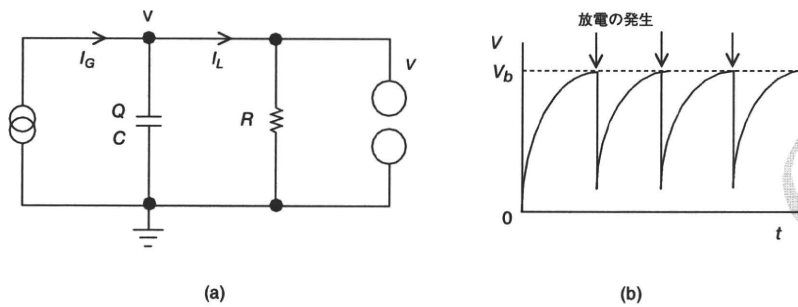


図 2.6: 帯電と静電気放電

$V_b$  になったとき、断続的に静電気放電が生じ、そのときに帯電電荷のほとんどが消滅（中和）する（図 2.6b）。これは、後に 2.4.1 で示す導体同士の放電の火花放電のモデルとして適用できる。帯電物体が絶縁物の場合は火花放電とはならず種々の異なる放電形態となる。静電気対策のためには、各種の放電の発生機構および着火性を熟知することが重要である。各種放電の種類および着火のための防止対策の概要を表 2.1 に示す。

また、空気の絶縁破壊電界  $E_b$  は

$$E_b \approx 3 \text{ MV/m} (= 30 \text{ kV/cm}),$$

であるから、放電が開始するときの帯電物体の表面電荷密度（換言すれば、帯電の最大表面電荷密度） $\sigma_{max}$  は

$$\sigma_{max} = \epsilon_0 E_b \approx 27 \text{ } \mu\text{C/m}^2 \quad (2.6)$$

となる。

### 2.3.2 放電エネルギー

帯電物体が導体の場合、その物体に蓄積されている静電エネルギー  $W$  は次のようになる。

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (2.7)$$

ただし、 $C$  は物体の静電容量、 $Q$ 、 $V$  は物体の帯電電荷および電位である。静電気放電が起こると、この静電エネルギーのほとんど、あるいは一部が放電エネルギーとして放出される。この放電エネルギーによって可燃性物質が着火し、爆発や火災などの静電気災害を誘起している。したがって、静電気災害防止の対策は着火性静電気放電の防止が主眼となる。

### 2.3.3 着火

何らかの着火源によって可燃性物質と空気（正確には酸素などの支燃（助燃）ガス）との混合物が着火し、燃焼を開始して火炎が伝搬することによって爆発・火災が起きる。燃焼（爆発）を誘発する三大要素は燃料（可燃性物質）と酸素（支燃性物質）そして着火源であり、具体的には、

- (1) 可燃性物質が爆発下限・上限の範囲の濃度である。
- (2) 酸素が爆発限界濃度（限界酸素濃度）以上である。

(3) 着火源のエネルギーが最小着火エネルギー以上である。

の3つが必須条件であり、このうち一つでも条件を満たさないようにすれば着火は防止できる。すなわち、可燃性雰囲気を生成させないこと、あるいは着火源をなくすことである。

静電気放電も爆発・火災を誘引する重要な着火源の一つであり、静電気放電による爆発・火災事故は、平成5(1993)年から16(2004)年までの総務省消防庁の火災年報の統計によれば、毎年70-110件<sup>12</sup>程度発生している。静電気が原因となった火災の内訳は、作業者の帯電、粉体の帯電、液体の帯電の順にそれぞれ約15%ずつで多く、つづいて静電塗装、噴出、ロール工程の順となっている。

### 2.3.4 最小着火エネルギー

一般に、着火エネルギーは可燃性物質の濃度に依存し、この濃度を横軸としてプロットした最小着火エネルギーの曲線は可燃性物質と酸素が化学量論組成比となる濃度付近で最小となるU字型のカーブとなる。この混合気が可燃性物質と空気の場合、酸素に比べて2桁ほど最小着火エネルギーは高くなる。また、最小着火エネルギーは温度や圧力にも依存し、温度の上昇とともにほぼ指数関数的に低下し、圧力のはほぼ2乗に比例して低下することが知られている [3]。

最小着火エネルギーは静電気危険性を評価する上で重要なデータ(静電気安全指針2007 [4] 参照)であり、予測できる放電エネルギー  $W_d$  と最小着火エネルギー  $W_{mie}$  を比較して相応の対策を講じている。すなわち、

$$W_d \geq W_{mie} \quad (2.8)$$

によって、静電気のリスクを評価する。最小着火エネルギーは空気中で一般にガス・蒸気(0.02 mJ以上)、粉体(1 mJ以上)それぞれに大まかな範囲があるが、個々の物質の値は実験的に求められる。

## 2.4 等価エネルギー

可燃性物質の静電気放電に対する着火性は最小着火エネルギーによって特徴づけられる。したがって、静電気放電の電力密度(時間的要素)と空間的な広がり(空間的要素)を考慮して、放電の着火性(放電エネルギー)を議論しなければならない。しかしながら、火花放電を除いて、静電気放電の全エネルギーでさえ求めることは簡単なことではない。ましてや、そのうちのどのくらいのエネルギーが着火に寄与しているのかを求めることはさらに難しくなる。このようなことから、時空間的にもエネルギー密度が高く、容易に放電エネルギーを求めることができる火花放電が着火エネルギーの測定に用いられている。つまり、着火エネルギー測定では火花放電エネルギー(静電エネルギー)の大部分が着火に寄与していると仮定している。

火花放電以外の静電気放電は、最小着火エネルギーがX Jの可燃性雰囲気を着火させたときにその静電気放電の等価(equivalent)エネルギーをX Jであると定義する [5]。着火エネルギーと対照して放電エネルギー(等価エネルギー)が実験的に求められているので、着火のリスク分析に便利である。これ以降に示している火花放電以外の放電エネルギーはこの等価エネルギーであることに注意されたい。最近では、その静電気放電がどのくらいの最小着火エネルギーを持つ可燃性物質の着火に有効であるかという観点から、この等価エネルギーを有効または実効(effective)エネルギー [6] と呼ぶこともある。

<sup>12</sup>消防が調査した静電気による火災の件数である。



表 2.1: 各種の静電気放電とその特徴および静電気対策

| タイプ   | 放電エネルギー       | 着火能力                    | 対策              |
|-------|---------------|-------------------------|-----------------|
| 火花放電  | 1 J 程度まで      | ガス・蒸気 <sup>a</sup> , 粉体 | 接地・ボンディング       |
| コロナ放電 | 数十 $\mu$ J まで | 水素, アセチレンなど             | 一般に対策不要         |
| ブラシ放電 | 3 mJ 程度まで     | ガス・蒸気                   | 絶縁物の静電気対策       |
| 沿面放電  | 10 J 程度まで     | ガス・蒸気, 粉体               | 薄い絶縁性物体の帯電電荷の制限 |
| コーン放電 | 数十 mJ 程度      | ガス・蒸気, 粉体               | 電荷の蓄積防止         |

<sup>a</sup> 蒸気とは可燃性液体の蒸気のこと

表 2.2: 導体の静電容量と火花放電の着火性 (危険な帯電電荷・電位)

| 物体                     | 静電容量<br>(pF) | 帯電電荷 (nC) |           | 帯電電位 (kV) |        |
|------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------|
|                        |              | 0.2 mJ    | 5 mJ      | 0.2 mJ    | 5 mJ   |
| 小さな金属物: フランジ, 小道具など    | 10           | 63        | 320       | 6.3       | 32     |
| 小容器: バケツなど             | 10-100       | 63-200    | 320-1000  | 6.3-2.0   | 32-10  |
| 中容器: ドラムなど (150-500 L) | 50-300       | 140-350   | 710-1700  | 2.8-1.2   | 14-5.8 |
| 人                      | 100-300      | 200-350   | 1000-1700 | 2.0-1.2   | 10-5.8 |
| 大きな金属物: タンク, タンクローリなど  | 100-1000     | 200-630   | 1000-3200 | 2.0-0.63  | 10-3.2 |

## 2.4.1 火花放電 (スパーク)

### 2.4.1.1 火花放電の発生

火花放電は平等電界が形成される平板あるいは間隔よりも大きな曲率半径の導体間で起こり, このギャップ間は放電路によって橋絡する (図 2.7a)。火花放電は導体間で起こる放電であり, 放電によってほとんどの帯電電荷が消滅するので, 放電エネルギーは静電エネルギーの式 (2.7) で見積もることができる。そのエネルギーは比較的高く 1 J 程度までに達することがある。

作業現場等において静電気によって生じる火花放電は容量性放電と呼ばれることもあるように, キャパシタとして作用する電気的に絶縁された導体と接地された導体間で起こる。たとえば, 絶縁された導体とは電気的に絶縁された金属製の容器, ショベル, ホッパー配管材, パイプや絶縁性の靴を履いた作業員などである。表 2.2 に作業現場で起こりうる火花放電の着火性を示す。このように作業現場で生ずる火花放電はガス・蒸気, 粉体と空気の混合気を着火せしめるに十分な放電エネルギーを有している。また, 静電気放電による粉じん爆発の多くはこの火花放電が原因ともいわれている。

人からの火花放電は最小着火エネルギーが 100 mJ 以下の可燃性雰囲気を着火するというガイドライン [7] があるように, 作業員も着火源となるので作業員の静電気対策は重要な要素である。この 100 mJ という値は大きすぎであり, 現在では, 人体からの火花放電エネルギーは 30 mJ まで, 等価エネルギーでは 10 mJ<sup>13</sup>までとされている [8]。

### 2.4.1.2 火花放電の危険性評価

静電気による火花放電は導体が帯電して接地導体との距離が近づくときに起こる導体間での放電である。火花放電の発生の可能性は導体の最大帯電電位と大気圧空気中での火花開始電圧の最小値 (330 V) との比較

$$V_{max} \geq 330V \quad (2.9)$$

<sup>13</sup>実験的に得られた値であり, 人体抵抗等での損失と解釈されている

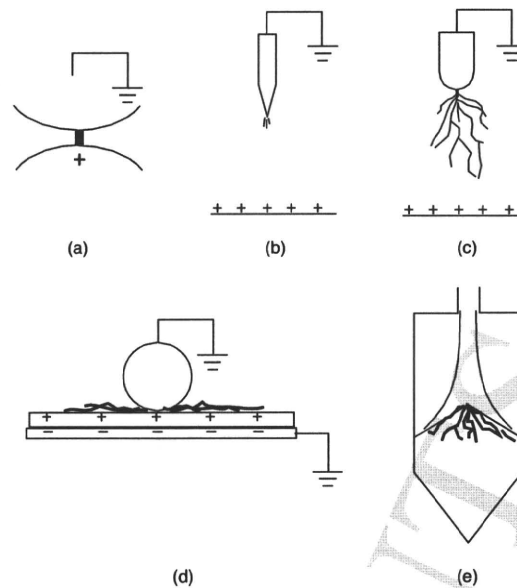


図 2.7: 静電気放電 (a) 火花放電, (b) コロナ放電, (c) ブラシ放電, (d) 沿面放電, (e) コーン放電

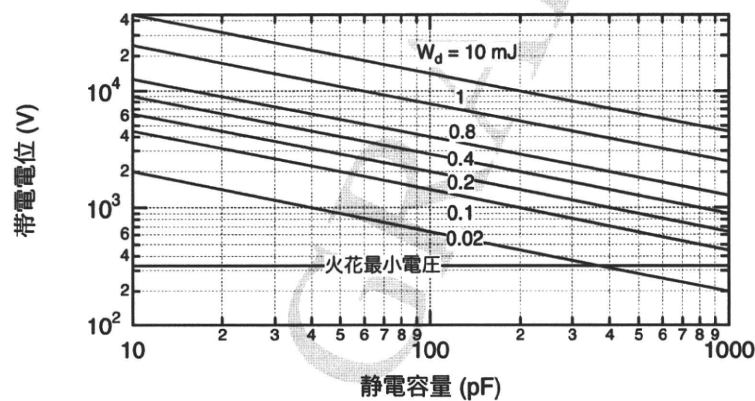


図 2.8: 火花放電の危険性評価 (導体の危険帯電レベル)

によって評価できる。火花放電による着火リスクは、この火花放電による放電エネルギー  $W_d$  が放電前の静電エネルギー  $W$  にほぼ等しいので、最小着火エネルギー  $W_{mie}$  との比較

$$W_d \approx W = \frac{1}{2} C V_{max}^2 \geq W_{mie} \quad (2.10)$$

によって評価ができる。図 2.8 は火花放電の危険性評価 (導体の危険帯電レベル) を示す。

### 2.4.1.3 火花放電の防止

火花放電の防止のためには、導体の設備・道具や人の接地に対する電圧を 100 V 以下にする [9]。この 100 V という値は平等電界場での空気の絶縁破壊電圧の最小電圧の約 330 V に安全マージンを確保した値である。具体的な対策としては、すべての導体 (作業者も含む) を接地・ボンディングすることであり、

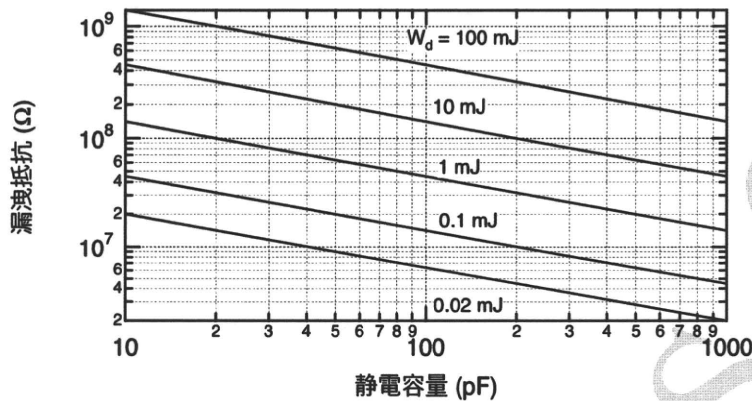


図 2.9: 導体の漏洩抵抗による火花放電の危険性評価 (導体の危険漏洩抵抗レベル,  $I_G = 100 \mu\text{A}$  で計算)。各直線より上のレベルが火花放電のリスクがある。

- (1) 漏洩抵抗を人以外の物体に対しては  $10^6 \Omega$  以下<sup>14</sup>
- (2) 人の場合は  $10^8 \Omega$  以下<sup>15</sup>

にする。

また、式 (2.4) と式 (2.10) から、火花放電の危険が生ずる導体の漏洩抵抗を求めることができる。

$$R = \sqrt{\frac{2W_d}{CI_G^2}} \quad (2.11)$$

産業レベルでは発生電流は  $100 \mu\text{A}$  を超えることがまずないので、この電流値を用いて、式 (2.11) の導体の漏洩抵抗と火花放電エネルギーの関係を示したのが図 2.9 である。また、式 (2.4) から、火花放電防止の帯電電位  $100 \text{V}$  以下を満たす漏洩抵抗は

$$R \leq \frac{100}{I_G} \quad (2.12)$$

となる。

### 2.4.2 コロナ放電

コロナ放電は、先の尖った針電極、細線電極や曲率半径の極めて小さい電極の近傍に不平等電界場が形成され、この局所的に高くなった電界により起こる放電である (図 2.7b)。一般に曲率半径が  $5 \text{mm}$  以下で起こる [10]。

コロナ放電の特性は電極の極性に大きく依存し、極性の違いによって負コロナ、正コロナと呼ばれる。コロナ放電は電圧の増加によってもその形態が変化し、最終的にはどちらも火花放電に移行する。この極性や電圧による形態の変化は生成された電子・イオンによって形成される空間電荷の

<sup>14</sup> $10^6 \Omega$  という漏洩抵抗は式 (2.4) に  $V = 100 \text{V}$  (火花放電防止ための電位) と作業現場でありうる大きな電荷の発生電流  $I_G = 100 \mu\text{A}$  を代入して得られた値である。

<sup>15</sup>人の漏洩抵抗を  $10^6 \Omega$  以下にすることは容易ではない。また、人の静電気発生は比較的小さいことから、 $10^8 \Omega$  は静電気の発生電流を  $1 \mu\text{A}$  として得られる値である。また、人の静電容量は  $100\text{--}300 \text{pF}$  程度であり、漏洩抵抗は  $10^8 \Omega$  であると緩和時間は  $10^{-2} \text{s}$  程度となり、人の行動 (たとえば、歩行) の時間を考慮するとこの緩和時間で十分である。このようなことから、漏洩抵抗は人以外の導体よりも高く設定されている。

相違に起因している。コロナ開始電圧は電極の曲率に依存し、曲率が小さいほど電極近傍の電界は大きくなるので、コロナ開始電圧は小さくなる。たとえば、曲率半径が1000  $\mu\text{m}$  ではコロナ開始電圧は6 kV程度であるが、100  $\mu\text{m}$  では2 kV程度となる [3]。したがって、電極電位の値はあまり重要ではなく、作業現場に照らし合わせれば、帯電電位が小さくても、コロナ放電は起こりうることを意味する。

作業現場では、帯電した物体表面に曲率半径の極めて小さな部分を持つ接地金属が近づく場合、逆に接地された金属容器のエッジ部分などに帯電物体が近づく場合にコロナ放電が発生する。

このコロナ放電を防止するためには鋭いエッジや突起部分をなくすことである。しかしながら、コロナ放電の放電エネルギーは比較的lowく、水素のように着火エネルギーが極めて小さなガスを除いて、ほとんどの可燃性物質を着火させることはない [9]。むしろ、コロナ放電は帯電物体の除電機能として働く。したがって、除電器、帯電防止服やフレキシブルコンテナなど繊維製品の帯電防止に 응용されている。

## 2.4.3 ブラシ放電

### 2.4.3.1 ブラシ放電の発生

ブラシ放電は正極性コロナ放電の電位が高い場合や電極となる突起物などの曲率半径が5–50 mmになると発生する (図 2.7c)。主に絶縁物が帯電し、曲率のある接地導体が近づくときに起きる。このブラシ放電はストリーマコロナ放電と呼ばれることもある。ブラシ放電は帯電物体の表面電荷密度が3  $\mu\text{C}/\text{m}^2$  以上で表面電界が0.5 MV/m (= 5 kV/cm) 以上のときに起こるとされている [10–13]。

このブラシ放電もコロナ放電と同様に電極の極性に依存し、帯電物体が負に帯電し曲率半径のある接地導体がこれに近づくときなどのように、正極性の放電の方が着火性が高いことが知られている。

ブラシ放電の等価エネルギーは1–3 mJ程度までで [12, 14, 15]、4 mJを超えることはない [16]。可燃性ガス・蒸気の着火源になりうる。粉じんについては多くの実験でも確認されているようにブラシ放電で着火するという確証はない。現在では、実践的経験、実験的な根拠および事故事例がないことから粉じんのみの可燃性雰囲気ではブラシ放電は着火源にならないとされている<sup>16</sup> [8]。

ブラシ放電が生産現場等で起きる例を次に示す。

- 粉や液体が搬送される絶縁パイプ、プラスチック (ビニール) 袋、絶縁性のコンベアベルト等に接地金属や人の指先が近づいたときに起きる放電
- プラスチック袋から粉を排出する際に振るなどしてプラスチック袋が接地金属に近づくときに起きる放電
- タンクに液体や粉体を充填するときやタンク内に蓄積された液体・粉体が帯電しているとき、タンク入口のエッジ部分や充填レベルを計るプローブなどの内部の突起部で起きる放電
- 粉の搬送用のフレキシブルコンテナと接地導体 (人も含む) との接触で起きる放電

<sup>16</sup>粉じんを着火させるためには、粉体表面の物質が気化される必要がある。この過程の後に放電エネルギーが気化されたガスへと輸送されて粉じん着火を誘引している。つまり、気化過程を含めると放電持続時間が十分に長くなる必要があるが、静電気のブラシ放電は十分な持続時間を有していない。通常のブラシ放電の放電期間は数  $\mu\text{s}$  以下である。酸素リッチの硫黄粉じん雰囲気では、15 M $\Omega$  の抵抗を接地電極に挿入して、放電回路の時定数を150 ms と通常よりも放電時間をかなり長くして、300回のテストで3回ようやく着火したという報告がある [17]。したがって、粉じん雰囲気では、ブラシ放電は着火源とならないと考えてよい。

主に絶縁物が帯電し、この帯電物体が接地された金属の道具や設備のエッジや突起部あるいは指先に近づくことによって起きている。なお、突起部などの曲率半径が3.5 mm以下 [6] ではブラシ放電ではなくコロナ放電が生じていることが多い。

### 2.4.3.2 ブラシ放電の危険性評価

ブラシ放電の開始電圧は電極の曲率半径に依存し、絶縁性物体の静電容量は求められないので、帯電電位に関して発生限界を理論的に計算することは容易ではない。

ブラシ放電の着火性と帯電電位の関係の参考例を以下に示す。

- 1 m<sup>3</sup> の絶縁性タンク [18] あるいは直径1.6 m [19] の金属製タンクで負に帯電した炭化水素液体上の接地電極によるブラシ放電（正極性）を用いた着火実験で着火した液面電位は58 kVである。
- その結果から40 kV程度の帯電が着火性ブラシ放電の発生に必要であると結論づけている [19]。
- また、実験室レベルの装置では-25 kVである [20]。
- これらの実験例は、液体が負に帯電しているので正極性ブラシ放電であり、負極性ブラシ放電では80 kVの帯電でも着火しない [20]。
- 欧州規格 [21] では、そのしきい値を58 kVにしている。

帯電電位に関して発生限界を理論的に計算することは容易ではないとしたが、絶縁性物体表面の平均電位（電位計で計った電位に相当する） $\bar{V}$  とブラシ放電の等価エネルギーとの関係が、

$$W_d = k \left( \bar{V} Q_{tm} - \frac{Q_{tm}^2}{2C_d} \right), \quad (2.13)$$

によって表されることを理論と実験（直径25 mmまでの接地導体球と帯電プラスチックシート間のブラシ放電による水素とプロパンの着火実験）により示されている [22]。ここで、 $Q_{tm}$  は放電電荷の最大値および  $C_d$  は放電した部分の見かけの静電容量である。 $Q_{tm}$ 、 $C_d$  および  $k$  は実験的に次のように決定している。

$$Q_{tm} = 1.4 \times 10^{-9} D^{1.7}, \quad (2.14)$$

ただし、 $D$  は接地導体球の直径で、単位は mm である。 $D > 20$  では  $D = 20$  とする。

$$C_d = 9.8 \times 10^{-12}, k = 0.08. \quad (2.15)$$

これにより、表面電位計の測定電位から等価エネルギーを推定することができる。また、逆に、環境の雰囲気最小着火エネルギーから許容帯電電位を推定することもできる。これを考慮して、図 2.10 にブラシ放電の等価エネルギーと絶縁性物体の帯電電位の関係を示す。この式の解析から、 $\bar{V} = 4$  kV 以下または  $D = 2$  mm 以下では IIC の水素-空気の混合気に対してでも着火性の放電が生成されないことも導出している [22]。

### 2.4.3.3 ブラシ放電の防止

ブラシ放電の発生条件とならないように絶縁性物体の表面電荷密度を  $3 \mu\text{C}/\text{m}^2$  以下にする必要があるが、絶縁性物体の帯電抑制は困難であるので、一般には静電遮へい（11.5.4 参照）により面積・幅を制限する方法（表 11.1）を用いてブラシ放電を防止する。ほかに、除電器を用いる方法（11.5.6 参照）もあるが、除電器自体が着火源となることもある [11] ので注意する。

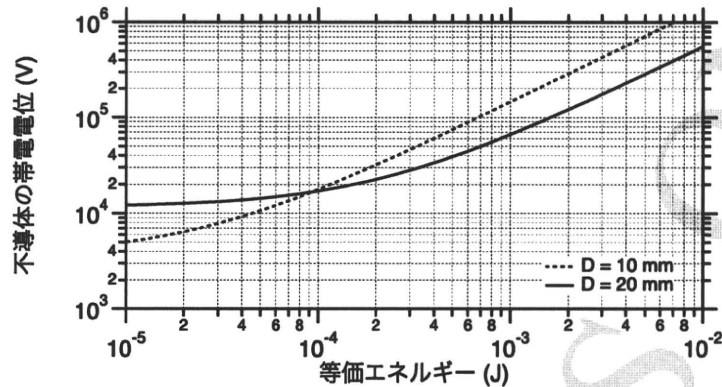


図 2.10: 絶縁性物体表面の平均電位（電位計による測定電位）とブラシ放電の等価エネルギーとの関係（式 (2.13)）

## 2.4.4 沿面放電

### 2.4.4.1 沿面放電の発生

絶縁物体の表面に保有できる最大の表面電荷密度は式 (2.6) から  $27 \mu\text{C}/\text{m}^2$  となる。しかしながら、この絶縁物体の厚さが薄くなると、絶縁物の表と裏面に異符号の電荷の電気二重層が形成されるので、さらに大きな表面電荷を保持することができるようになる。これは、各々の表面電界が他方の層の表面電荷による電界によって弱められることにより説明される。このような電気二重層が形成される絶縁物の表面に沿って起こる放電が沿面放電であり（図 2.7d）、英語の専門書では propagating brush discharge と呼ばれている放電である。この放電もコロナやブラシ放電と同様に表面電荷の極性に依存する。

沿面放電は、この電気二重層に電極を近づけたり、この絶縁層表面のピンホールなどによる電気二重層の閉回路がきっかけとなり放電が開始する。この放電の空間電荷により表面に沿って径方向に電界が発生し、放電が開始された点を中心とした径方向に広がる多くの放電のチャンネルが絶縁層の表面に進展し、沿面放電として観測される。長い間、沿面放電には薄い絶縁物の背面に接地導体が必要と考えられていたが、絶縁性のタンク、パイプ、フレキシブルコンテナなどの表面に見られるように、現在では背面接地導体の存在は必ずしも本質的ではないとされている<sup>17</sup> [3, 10]。

この沿面放電は表面電荷密度が  $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$  以上になると起こり（この表面電荷密度は電気二重層が形成されない通常の帯電物体の表面電荷密度の 10 倍程度大きくなる）、絶縁層の厚さが 8 mm 以下でないと起こらないとされている [23-25]。また、沿面放電の限界が実験的に求められた図 2.11 [23] に示されるように絶縁層の絶縁破壊電圧が 4 kV 以下のときは沿面放電は起こらない。絶縁層に蓄えられている静電エネルギーは数  $\text{J}/\text{m}^2$  から数  $\text{kJ}/\text{m}^2$  程度までであり、放電エネルギーは 10 J 程度までに達することがある。したがって、沿面放電は可燃性ガス・蒸気だけでなく可燃性粉体の着火源にもなりうる。たとえば、絶縁層の厚さ  $d = 150 \mu\text{m}$ 、面積  $A = 0.25 \text{ m}^2$ 、比誘電率  $\epsilon = 2$ 、表面電荷密度  $\sigma = 10^{-3} \text{ C}/\text{m}^2$  とすると、これに蓄えられている静電エネルギー  $W$  は

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Ad\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} = 1 \text{ J} \quad (2.16)$$

である。

<sup>17</sup> 絶縁性タンクなどの内側が帯電していると、外側では、これにより誘起されたコロナやブラシ放電で生じた電荷により外側を反極性に帯電していき、結果的に電気二重層が形成される。

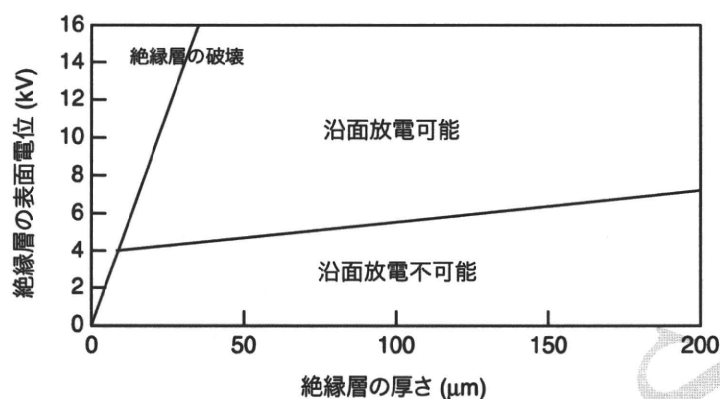


図 2.11: 沿面放電の発生限界 [23]

生産現場等では

- 絶縁性パイプ、グラスライニングなど絶縁物を内部にコーティングしたパイプを粉体・液体が高速輸送されるとき
- 絶縁性容器、内部が絶縁コーティングされたタンク、サイロやフレキシブルコンテナ等に液体や粉体が充填されるとき
- 絶縁性容器、内部が絶縁コーティングされた容器、あるいはガラス等の窓材のある容器の粉体の流動乾燥・液体攪拌
- ダストセパレータなど粉体が連続的に絶縁板に衝突するとき
- 絶縁物がコーティングされた、あるいはフィルム、テープが巻かれた金属ロール

などで絶縁層の表裏に反極性の電気二重層が形成されて沿面放電が起きている。また、絶縁性袋類に付着した粉体が剥がれるときに起きる放電もこの沿面放電であると考えられる。付着した粉体電荷がとれると反対側の電荷のみが残り、この電荷による電界で沿面放電が開始する。

#### 2.4.4.2 沿面放電の防止

沿面放電の防止としては沿面放電の発生限界である厚さ 8 mm 以下の薄い絶縁物の表面電荷密度を  $2.5 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$  以下にする、または、絶縁層の絶縁破壊電圧を 4 kV 以下にすることである。

FIBC には沿面放電を防止する Type B がある。さらに、導電繊維を織り込んだ静電気対策品(袋類に多い)は、コロナ放電を生起させて着火性放電を防止する効果がある。

#### 2.4.5 コーン放電

##### 2.4.5.1 コーン放電の発生

サイロなど比較的大きな容器へ絶縁性の粉体を充填(主に空気輸送)する際に帯電粉体が堆積する円錐(コーン)状のヒープ(heap)表面で図 2.7e のように放電が発生する [10, 14, 26]。この放電をコーン放電という。コーン放電の生成のための正確な条件は求まっていないが、次の条件が満たされるときに多く起こる。



- 粒径が比較的に大きい：粒径 1 mm 以上で多く起こる。
- 粉体の抵抗率が大きい： $10^{10} \Omega \cdot m$  以上で多く起こる。
- 粉体の質量比電荷が大きい： $1 \mu C/kg$  以上で多く起こる。
- 充填流量が大きい：連続的に大量（数千 kg/h 以上）の充填で多く起こる。たとえば、粒径 1-2 mm 以上の粉体で  $2 \times 10^3 \text{ kg/h}$  以上、0.8 mm 程度で  $20-30 \times 10^3 \text{ kg/h}$  以上。

放電エネルギーは数十 mJ 程度以下であり、コーン放電はガス・蒸気、粉体の着火源になる可能性がある。粉じん爆発の場合、上記のようなコーン放電を生成する条件の比較的大きな粒径の粉体では空間に浮遊することが不可能なため可燃性雰囲気形成が困難である。したがって、この放電によって着火が起きるためには、粒径が数 100  $\mu m$  以下の微粉体が含まれていることが必要である。

$10^{10} \Omega \cdot m$  以下の粉体で、接地した容器に充填されるときコーン放電は起こりにくいが、 $10^{10} \Omega \cdot m$  以上になると起こるようになり、 $10^{12} \Omega \cdot m$  以上では防止が困難である。

参考に、サイロの直径が 0.5-3.0 m のサイロで、粉体の平均粒子径（個数中位径）が 0.1-3 mm に対して、コーン放電の最大等価エネルギーは次の実験式 [27] によって見積もることができる。

$$W = 5.22D^{3.36}d^{1.46} \quad (2.17)$$

ただし、 $W$  はコーン放電の最大等価エネルギー (mJ)、 $D$  は接地サイロの直径 (m)、 $d$  は堆積粉体の中位径 (mm) である。比較的大きな粒径の粉体でコーン放電が起こりやすいが、この式の条件にあるように、放電の頻度はかなり減少するが、粒径 0.1-0.2 mm の微粉体に対してもコーン放電が観測されている [27]。

#### 2.4.6 雷状放電

サイロなどへの粉体の投入や搬入、あるいはタンク内でジェット洗浄すると、帯電粉体あるいはミストが気相空間中を浮遊し空間電荷雲（帯電雲）を形成する。この帯電雲から接地されたサイロやタンク壁に対して雷のような放電が起こる可能性があるとされている。この放電を雷状放電 (lightning-like discharge) という。この放電は可燃性粉体や液体蒸気の着火源になりうるだろうが、この空間電荷による雷状放電の可能性を実験的に調査された結果は、

- 60 m<sup>3</sup> あるいは直径 3 m 以下までのサイロにおいて観測されない [28]。
- 液体ミストの帯電雲による雷状放電も  $3 \times 10^4 \text{ m}^3$  までのタンカーの洗浄において観測されない [29]。

である。英国の規格 [7] では、ジェット洗浄において上記の 1/10 の 3000 m<sup>3</sup>（球とすると半径 8.947 m）のような大容量のタンク（接地金属）まで許容しているほどである。一般に上空での雷は帯電雲の大きさとして少なくとも数十から数百メートル必要とされている。また、雷のように長く伸びた放電部であるストリーマの維持・進展には平均電界 5 kV/cm [30]、つまり、500 kV/m もの電界が必要である。以上のことから、産業プロセスにおける条件では雷状放電は起こらないとされている。