

論 文

静電粉体塗装用樹脂製ブースの静電気安全に関する考察

柳田建三^{*}, 山本雅洋^{**}, 竹内学^{***}

(1998年6月25日受付; 1999年3月15日受理)

Study on Electrostatic Safety of Plastic Booth for Powder Coating

Kenzo YANAGIDA,^{*} Masahiro YAMAMOTO,^{**} and Manabu TAKEUCHI^{***}

(Received June 25, 1998; Accepted March 15, 1999)

A plastic wall of a powder spraying booth may be charged by a powder spray gun, to which a high voltage of -100 kV is usually applied during powder coating materials are sprayed to objects to be coated in the booth. Incendiary discharges may occur between the charged plastic wall and a grounded conductor which is placed in the booth if there is a grounded conductor behind the plastic wall. However, there are few studies on such a problem as the electrostatic hazard causing ignition in an actual plant for powder coating. The purpose of this study is to obtain the basic data on the electrostatic safety of the plastic booth for its design. The characteristics of discharges between a charged plastic plate and a grounded metal sphere were experimentally investigated with an apparatus which was modeled a configuration of a plastic booth. The safety assessment of the booth, which was deduced from experimental results, is reported in this paper.

1. はじめに

静電粉体塗装は、塗膜の高品質性、作業の安全性、環境保護、省資源等の面から優れた塗装方法として注目され、工業用塗装として普及している。また、近年、エアコン、冷蔵庫、洗濯機等の家電製品を初めとして、多くの粉体塗装製品は、市場ニーズの多様化により、多色化傾向となってきた。たとえば塗料の色数は、数色から数十色に及び、その場合には色替え作業に長時間を要する従来の塗装設備では対応できなくなっている。この問題を解決する目的で、ブース壁材にプラスチックを使用し、塗料回収装置にも工夫した色替えブースシステムが開発、実用化され塗装の多色化への対応が可能となり、この結果、静電粉体塗装の特色を

生かした付加価値の高い製品を効率的に生産できるようになった¹⁾⁻⁵⁾。

上述のように、プラスチック使用のブース（以下、プラスチックを壁材に使用したブースを「プラスチックブース」と略記する）は、主要な部材がプラスチック壁であるため、後述する優れた機能を有する反面、帯電による放電危険の恐れも考えられる。つまり帯電したプラスチック壁面に接地導体が接近すると放電が生じ、粉塵の着火爆発や電撃等の静電気災害を誘発する確率が零ではない。このため、プラスチックブースの設計にあたっては機能性と安全性の両面について充分配慮しなければならない。

本研究では、安全なプラスチックブース設計の基礎データを得る目的でモデル実験を行ない、プラスチックブースの安全性について検討した。実験では、帯電したプラスチック板に接地導体を接近させる過程で生じる1回の放電に着目した。この放電により放出されるエネルギーが着火源と成り得る条件を求め、放電危険を避ける方策について検討を行なった。その結果、プラスチックブースを設計するための技術上の安全指針を得たので報告する。

キーワード: 静電粉体塗装、塗装ブース、帯電、プラスチック、静電気放電

* 茨城大学大学院 理工学研究科 (316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 12-1, Nakanarusawa-cho 4-chome, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

** 日本パーカライジング株式会社 アイオニクス事業部 (135-0062 東京都江東区東雲2-13-27)

Ionics Division, Nihon Parkerizing Co. Ltd., 13-27, Shinonome 2-chome, Koto-ku, Tokyo, 135-0062 Japan

*** 茨城大学 工学部 電気電子工学科 (316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Ibaraki University, 12-1, Nakanarusawa-cho 4-chome, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

2. プラスチックブースの帯電による放電危険

2.1 プラスチックブースの構造・機能

図1に示すようにプラスチックブースは、ブース壁材が絶縁性プラスチックであるため、静電粉体塗装ガンから発生する電界が被塗物に集中し、高効率で塗装できる利点を

有する。このためブース壁へ飛来するオーバースプレー粉体塗料は少なく、飛来しても塗料の付着はごく少量で、エアブローで容易に除去できる。そのほか、塗料回収用導電性ベルトコンベアや静電除去装置の採用等の工夫により、人手による清掃作業を極力少なくし、色替え時間の短縮化を図っている。

2.2 放電危険の生じ得る状態

図2に帶電物体（プラスチック板）とこれに接近する接地導体（接近接地導体）間の放電の様子を示す。ここで接近接地導体とは以下のようないものをさす。

- ①人体の一部
- ②金属製の道具（工業用掃除機、清掃用エアガン等）
- ③被塗物
- ④電圧無印加状態の静電粉体塗装ガン

図2において、(a)はプラスチック板の背面に接地導体（背面接地導体）がない場合^{6), 7)}、(b)はある場合を示す⁸⁾。

(a)の場合には、接近接地導体のごく近傍でのみ放電が発生するため、帶電物体表面より放出される放電エネルギーはごく少量である。一方、(b)の場合、帶電物体の見かけのキャパシタンスが大きくなるので、帶電物体表面の電位上昇は抑制されるが、蓄積される電荷量は増大する。この状態において、帶電物体に接地導体が接近すると、帶電物体表面に沿った広範囲な放電（沿面放電）が発生する。このため、(a)に比較して、放電エネルギーは極めて大きくなり、着火性放電の発生する可能性が高くなる⁹⁾。

本論文で図2の(b)は、実際のプラスチックブースに、

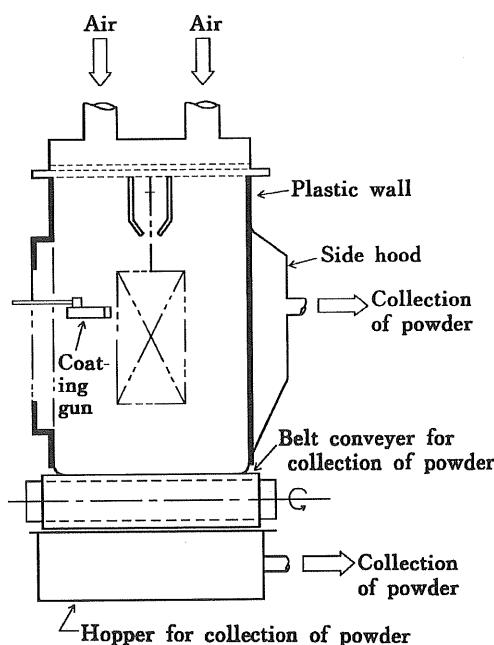


図1 プラスチック製ブースの構造

Fig. 1 Structure of plastic booth for powder spraying.

壁材であるプラスチック板のほか、その補強支持材として鋼製角材、板材等が使用されており、これを模擬したものである。また、床面は、オーバースプレー塗料を回収するために、導電性のベルトコンベアを使用しており、壁材と接触している。さらに、主要な装置である塗装ガンは、レシプロケータに搭載されプラスチックブースの内壁に沿って往復運動をしている。

以上のように、プラスチックブースは塗装に必要な装置や構造上の理由により絶縁体と導体で構成されており、種々の金属、導電性部材等が壁材に接触あるいは接近した背面接地導体の状態で存在する。通常、壁材が帶電しても付近の背面接地導体との間では、粉体塗料の着火源となる着火性放電は生じない。しかし、帶電した壁材に背面接地導体が存在し、それに接近接地導体が接近すると、条件によっては着火性放電の発生する恐れがある。

3. 実験へのモデル化

プラスチックブースを単純化したモデル実験装置を用いて、2.2で述べた放電危険について調べた。

3.1 帯電絶縁板と接近接地導体間の放電現象モデル

図2の現象をモデル化した模式図を図3に示す。図3において、(a)は背面接地導体が平板の場合、(b)は角材の場合である。ここで、 d 及び L 、 t 、 x は、それぞれ帶電したプラスチック板背面と背面接地導体間の距離、帶電したプラスチック板と接近接地導体をモデル化した接地金属球間の距離、帶電したプラスチック板の厚さ、接地金属球と角材との中心間の水平方向の距離である。

3.2 帯電絶縁板に直交した接地導体のモデル

プラスチック板と直交して接地導体が存在する場合をモデル化した模式図を図4に示す。これは、実際のプラスチックブースのプラスチック壁と直交している導電性ベルト、

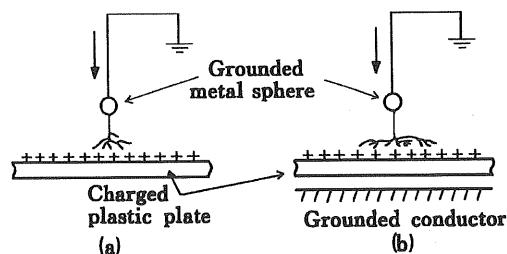


図2 接地導体の帯電プラスチック体への接近による放電

(a)背面接地導体のない場合、(b)背面接地導体のある場合

Fig. 2 Discharge caused by approach of grounded conductor to charged plastic plate.

(a) is a discharge without backing grounded conductor, and

(b) is a discharge with backing grounded conductor.

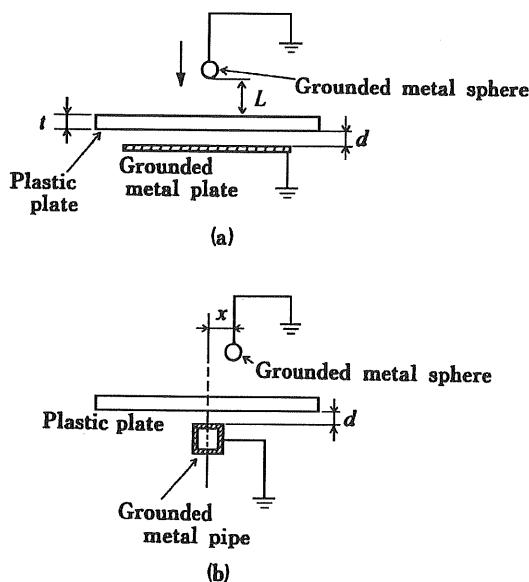


図3 帯電プラスチック板と接地導体球間の放電
(a)背面接地導体が平板,(b)背面接地導体が角材の場合

Fig. 3 Discharge occurring between charged plastic plate and grounded metal sphere.

Backing grounded conductor is (a) metal plate, and (b) metal pipe.

レシプロケータのガンホルダー等が放電特性に及ぼす影響を調べる目的で、モデル化したものである。

実験では、図4に示すように、プラスチック板に対して接地導体（鋼管、アルミニウム板）を垂直に設置し、その状態でプラスチック板を帯電させた後、接地金属球をプラスチック板に向けて徐々に接近させる。その時発生する放電特性を測定することにより、直交接地導体の影響を調べる。ここで、図中のxは、接地金属球の中心から直交接地導体までの距離を表わす。

また、図5は、プラスチック板上に接地導体（スチール線、導電性テープ等）を設置した場合である。これは、プラスチックブース付近に存在している接地導体の影響を調べるためにモデル化したものである。ここで、図中のxは、接地金属球の中心から接地導体の中心までの距離である。

4. 基本実験

4.1 実験装置

プラスチック板と種々の接地導体から成る実験装置、及び測定回路の概要を図6に示す。図中の記号Pは、プラスチックブースの壁材に相当するプラスチック板を示しており、後述する5.7の実験を除いて、大きさが800×800 mm、厚さ10 mmで、材質が硬質塩化ビニールのものを使用した。5.7の実験では、前述のプラスチック板以外に、同材質で厚

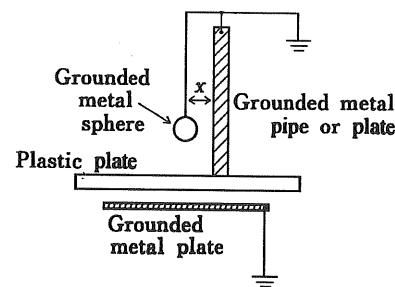


図4 帯電プラスチック板に直交している接地導体の影響

Fig. 4 Influence of grounded conductor vertically set on charged plastic plate on discharges.

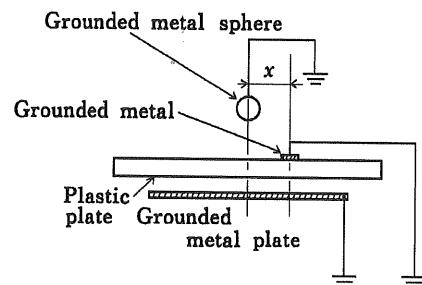


図5 帯電プラスチック板上に配置された接地導体の影響

Fig. 5 Influence of grounded conductor set on charged plastic plate on discharges.

さのみを変えたもの(3, 6 mm), 同じサイズで材質を変えたもの(アクリル樹脂板)を使用した。

接近接地金属球Mは、直径が8, 9.5, 12.5, 19, 25, 38 mmのものを使用した。Bは、ブース補強材に相当する背面接地導体で、後述する5.4の実験を除いて、大きさが600×600 mmのアルミニウム板を使用した。5.4では、アルミニウム板の代わりに下記鋼製角材を使用した。

- ①鋼製角材a: 断面寸法100×100 mm, 長さ800 mm
- ②鋼製角材b: 断面寸法50×50 mm, 長さ800 mm

この背面接地導体Bは、 $d = 0 \sim 300$ mmの範囲で移動できるようになっている。Fは、ベルトコンベアやレシプロケータのガンホルダーに相当する直交接地導体で、本実験では下記導体を使用した。

- ③アルミニウム板: 大きさ250×250 mm
- ④鋼管a: 口径20 mm, 長さ500 mm
- ⑤鋼管b: 口径50 mm, 長さ500 mm

実験は、図6の配置において、直交接地導体Fや接地金属球Mの無い状態で、静電粉体塗装ガン(日本パーカライジング製)の生成するイオンシャワーによってプラスチック板を帯電させ、そのときのPの表面電位を表面電位計

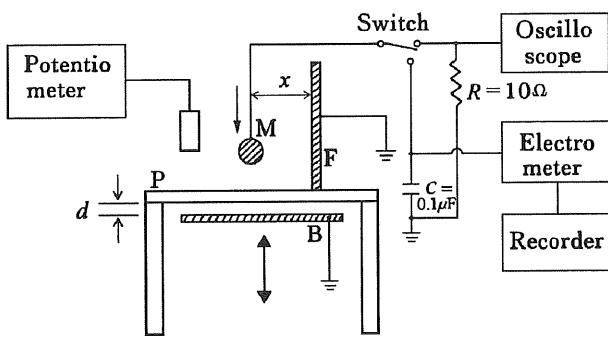


図 6 実験装置

Fig. 6 Schematic diagram for experimental apparatus.

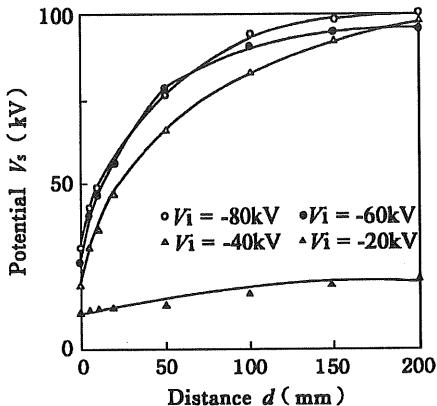


図 7 帯電プラスチック板と背面接地導体間の距離に対する表面電位の変化

Fig. 7 Surface electrostatic potential of charged plastic plate versus distance between charged plastic plate and backing grounded conductive plate.

(春日電機製：KSD-6110) で測定した。全ての実験及び測定は、恒温恒湿（温度：24 °C, 相対湿度：20%）の大気中で行なった。¹⁰⁾

4.2 プラスチックの帯電と帯電特性

図 7 は、プラスチック板 P の背面に接地導体 B を密着させた状態 ($d = 0\text{ mm}$) で、ガンに電圧 V_i を印加してイオンシャワーを発生させ、P を帯電させた後、徐々に B を P から離していくときの距離 d に対する P の中央部における表面電位 V_s の変化を示している。なお、プラスチック板への帯電は、本論文の目的が放電危険の解明であるため、負に帯電させた。実際の帯電は、プラスチック表面全体に一様にイオンシャワーが降りかかるように、ガンと P との距離を 100 mm 一定に保ちながらガンを動かして行った。

図 7 に示すように、 V_s は B が P から離れるに従って高くなっていくことがわかる。これは、P の表面に付着している電荷が保持されたまま、見かけのキャパシタンスが小さくなるためである。

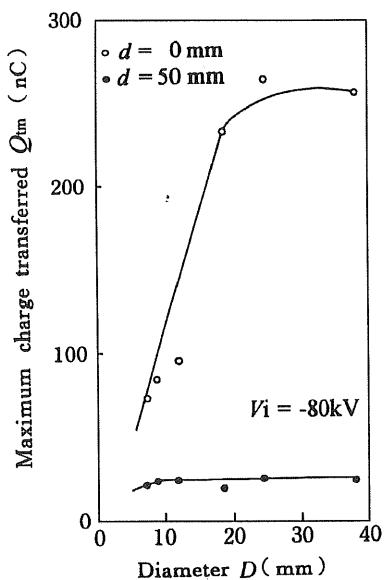


図 8 接地導体球の直径に対する最大移動電荷の変化

Fig. 8 Maximum charge transferred versus diameter of grounded metal sphere.

なお、 V_i が-20 kV の場合、他の水準に比べ V_s は著しく低い値を示しているが、これはガンの放電開始電圧が-20 kV 附近であり、そのときのイオン発生量が著しく減少するためと推察される。

5. 放電実験

5.1 実験方法

実験装置は、4.1 と同じもの（図 6）を使用した。プラスチック板帯電時のガン印加電圧は、-80 kV 一定とした。帯電したプラスチック板 P 及び P に約 6 mm/s の速度で接近する接地金属球との間で発生する放電について、その放電電荷量をエレクトロメータ（KEITHLEY 製：614）で測定し、放電電流波形はオシロスコープ（LECROY 製：9400）で観測した。なお、実験は、同一の条件の下で、測定を 10 回またはそれ以上行ない、実験結果は 1 回の測定で得られた最大値に注目し、同一条件で繰り返し行って得られた平均値を採用した。

5.2 接地金属球径の影響

図 6 の実験装置（直交接地導体 F は未設置とする）において、プラスチック板 P に接地金属球 M を接近させる過程で生じる放電によって、P から M に移動する電荷量（以下、単に「放電電荷量」と称する） Q_t を測定した。 Q_t は、放電が生じた際の測定用キャパシタの電位上昇値 V_c 及び静電容量 C から、次式によって算出した。

$$Q_t = CV_c \quad (1)$$

一般に、1 回の接近過程で生じるパルス放電は、数回ランダムに発生し、放電の大きさ、発生する時間間隔、発生の頻

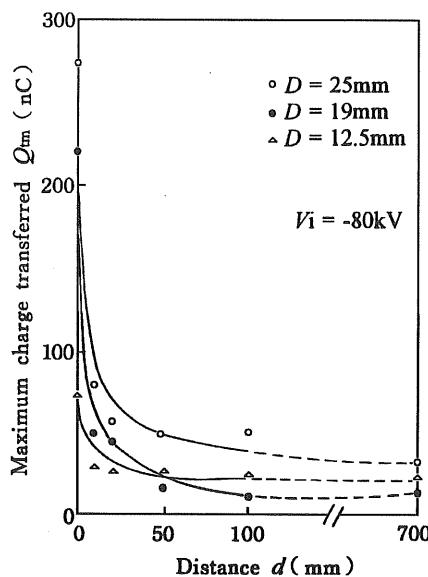


図 9 帯電プラスチック板と背面接地導体(板材)間の距離に対する最大移動電荷の変化

Fig. 9 Maximum charge transferred versus distance between charged plastic plate and backing grounded metal plate.

度等はかなりばらつく¹¹⁾。そこで、本実験では、1回の接近過程で生じるパルス放電のうち最大のものに着目し、その放電電荷量（以下「最大放電電荷量」と称する） Q_{tm} について調べた。図8はMの直径Dを変えたときの Q_{tm} の変化を示しており、Dが大きくなるに従って Q_{tm} は増加するが、D=20 mm付近で飽和傾向を示している。

5.3 背面接地導体位置の影響

図3、(a)において、プラスチック板Pと背面接地導体Bとの距離dを変えた時の最大放電電荷量 Q_{tm} の変化を測定した。その結果を図9に示す。接地金属球Mの直径Dは、12.5, 19, 25 mmとした。図9に示すように、 $d < 50$ mmの範囲では、dが短くなるに従って Q_{tm} は増加している。PにBを密着させた状態($d = 0$ mm)のとき、 Q_{tm} は最大値を示しており、具体的にはMの直径12.5, 19, 25に対して、 Q_{tm} はそれぞれ約80 nC, 220 nC, 280 nCとなっている。一方、BをPから離していくと、 Q_{tm} は急激に減少し、 $d \geq 50$ mmで飽和傾向を示した。そのときの Q_{tm} の値は、各水準とも50 nC以下であった。以上の実験結果から、PとB間の距離dに応じて、下記のような放電形態の変化が確認できる。

(1) $d < 50$ mm: この範囲における放電は、背面接地導体Bの影響を受けており、Bの接近に従い放電エネルギーが増加している。例えば、接地金属球Mの直径が19 mmの場合、 $d = 50$ mmにおける Q_{tm} が30 nC未満であるのに対し、 $d = 0$ mmでは220 nCに増加している。この値は、後述

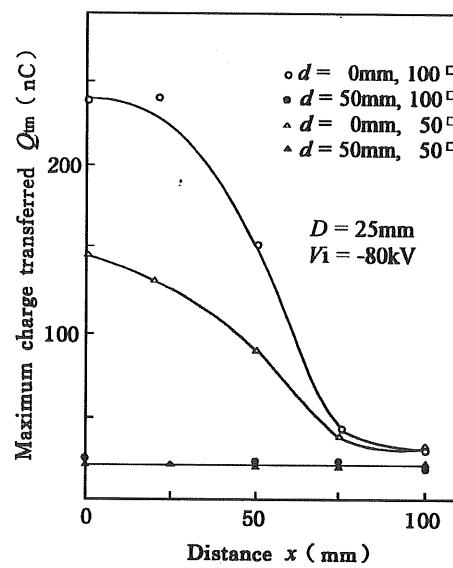


図 10 接地金属球と背面接地導体(角材)間の距離に対する最大移動電荷の変化

Fig. 10 Maximum charge transferred versus distance between grounded metal sphere and backing grounded metal pipe.

する非着火性放電電荷量の上限値の2倍以上に相当する。したがって、このときの放電形態は、着火危険の伴う沿面放電であると考えられる。

(2) $d \geq 50$ mm: この範囲での放電における Q_{tm} は、 $d = 50$ mm付近で飽和傾向を示し、その値は50 nC以下であった。このとき発生した放電は、背面接地導体Bの影響をほとんど受けていないと考えられる。したがって、その放電形態は、沿面放電ではなく、放電範囲のごく限られた非着火性の放電であると推察される。

5.4 背面接地導体形状の影響

図3、(b)に示したように、背面接地導体Bを鋼製角材に変えた場合の最大放電電荷量 Q_{tm} の変化を測定した。その結果を図10に示す。接地金属球Mの直径Dは25 mmとした。図10において、 $d = 0$ mmでは、Bの顕著な影響が見受けられる。例えば、 $x = 0$ mmにおける Q_{tm} は、角材a(断面: 100 × 100 mm, 長さ: 800 mm), 角材b(断面: 50 × 50 mm, 長さ: 800 mm)に対し、それぞれ235 nC, 140 nCとなっており、Pへの接触面積のより大きな角材aの方がより大きな放電エネルギー値を示している。したがって、このとき生じた放電は、着火性の沿面放電と考えられる。一方、 $x = 100$ mmでは、 Q_{tm} はいずれも35 nC以下の低い放電エネルギー値を示しており、このとき生じた放電は非着火性であると推察される。また、 $d = 50$ mmにおける Q_{tm} は、 x の値に依存せず、25 nCでほぼ一定であった。したがって、この条件の下では、Bの存在は放電エネルギー

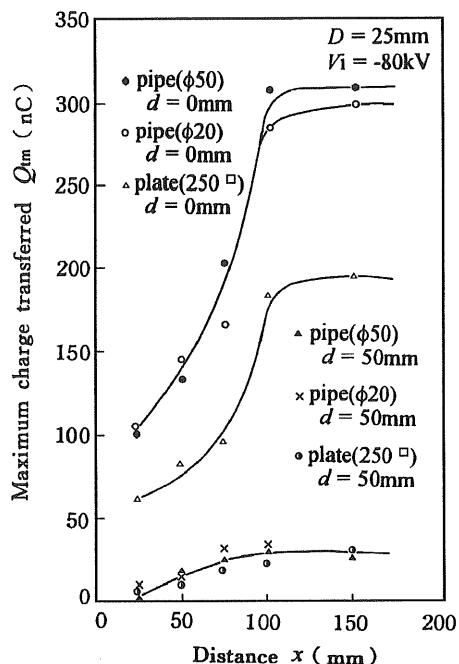


図 11 帯電プラスチック板に直交している接地導体の影響

Fig. 11 Influence of grounded conductor vertically set on charged plastic plate on discharges.

にほとんど影響を与えることなく、発生した放電は非着火性であると考えられる。

5.5 直交接地導体の影響

図 6 に示したように、プラスチック板 P に対して接地導体 F を直交するように設置した状態で、P を帯電させた後に Q_{tm} を測定した。その結果を図 11 に示す。図 11 は、直径 D が 25 mm の接地金属球 M を P に接近させた時の結果であり、距離 x が 100 mm 以上になると Q_{tm} に対する F の影響はほとんど無く、 x がそれ以下であると P と F との間に形成される電界の影響によって Q_{tm} は減少することが判明した。

5.6 プラスチック板上の接地導体の影響

帯電しているプラスチック P 上に設置された接地導体の影響を調べるために、図 5 に示した状態で Q_{tm} を測定した。この実験で使用した接地導体を以下に示す。

- ①アルミニュームテープ：幅 50 mm、長さ 800 mm
- ②スチール線：直径 2.5 mm、長さ 800 mm

実験結果を図 12 に示す。図 12 で、接近接地金属球と P 上の接地導体間の距離 x が 0 ~ 300 mm の範囲において、 x が短くなるに従って Q_{tm} の値は減少傾向を示している。これは、 x が短くなるに従い、P の帯電が P 上の接地導体の影響を強く受けるようになり、P の表面電荷密度が小さくなるためと考えられる。一方、 $x = 300$ mm における Q_{tm} の

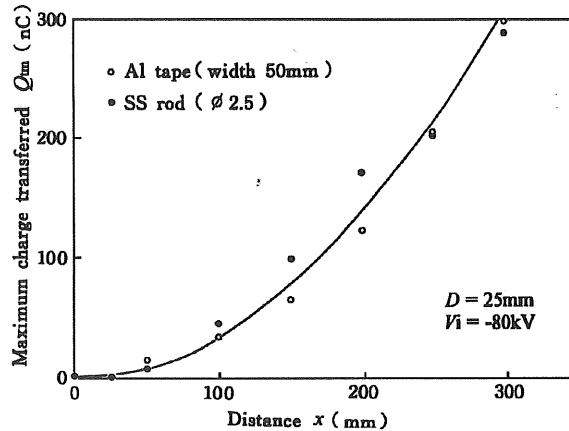


図 12 帯電プラスチック板上に置かれた接地導体の放電電荷への影響

Fig. 12 Influence of grounded conductor set on charged plastic plate on charge transferred.

表 1 プラスチック板の厚さに対する最大放電電荷量の変化

Table 1 Change in maximum charge transferred with thickness of plastic plate.

Material	Thickness (mm)	Maximum charge transferred (C)	
		$d = 0$ (mm)	$d = 50$ (mm)
Vinyl chloride	3	2.5×10^{-5}	4.3×10^{-8}
Vinyl chloride	6	7.1×10^{-7}	3.5×10^{-8}
Vinyl chloride	10	2.8×10^{-7}	3.3×10^{-8}
Acrylic acid resin	10	3.2×10^{-7}	4.9×10^{-8}

値は、P 上に接地導体のない場合、即ち図 3, (a) の場合とほぼ同等であり、P 上の接地導体の影響をほとんど受けないことが判明した。

5.7 プラスチック板厚の影響

プラスチック板 P の厚さを、それぞれ 3, 6, 10 mm に変えた時の Q_{tm} の値を測定して P の厚さが Q_{tm} の値に及ぼす影響を調べた。参考のために P をアクリル板（厚さ 10 mm）とした場合の Q_{tm} についても測定した。

実験結果を表 1 に示す。表 1 において、 $d = 50$ mm では、P の厚さに対して、 Q_{tm} の値はほとんど変化していない。一方、 $d = 0$ mm では、板の厚さが薄くなるに従って、 Q_{tm} は増加傾向を示し、厚さ 3 mm の塩化ビニール板では、 2.5×10^{-5} C となっている。

一般に、沿面放電の生じる条件下では、P の見かけのキャパシタンス C_p と板厚 t_p との間には、下記関係が成立立つ。

$$C_p \propto 1/t_p \quad (2)$$

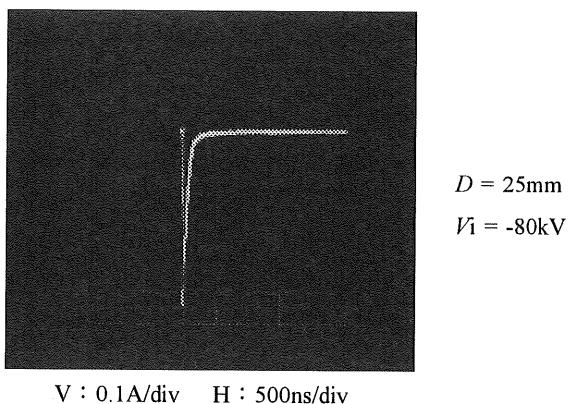


図 13 接地導体球の帶電プラスチック板への接近時に発生するパルス状放電電流波形

Fig. 13 Current waveform of pulsive discharge caused by approach of grounded metal sphere to charged plastic plate.

上記関係において、 ρ_p が薄くなるに従って、 C_p は増加するので、 Q_{tm} も増加するはずである。表 1 の実験結果において、 $d = 0 \text{ mm}$ では、上記関係が成立しており、 Q_{tm} も $2.8 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ C}$ の高い値を示している。したがって、このときの放電は、着火危険を伴う恐れのある沿面放電であると推察される。一方、 $d = 50 \text{ mm}$ での結果は、上記関係が成立しておらず、 Q_{tm} の値も $3 \sim 5 \times 10^8 \text{ C}$ と低い値を示している。したがって、背面接地導体が帶電物体より 50 mm 以上離れた状態では、帶電物体と接近接地導体間で沿面放電のような着火性放電は、発生しないと考えられる。

5.8 放電波形の観測

図 6 の実験装置 (F は未設置とする) において、接地金属球 M と大地間に抵抗を接続し、放電時に発生する電流信号をオシロスコープで観測した。

図 13 は、放電電荷量が大きい $d = 0 \text{ mm}$ としたときの放電電流波形をオシロスコープで観測したもので、放電電流のピーク値は、約 0.45 A となっている。電流波形の存続時間は 1 ms 未満であり、急峻なパルス状の波形となっている。

6. 放電着火危険性の考察

6.1 基本概念

帶電した絶縁物と接近する接地導体間での放電において、絶縁体表面より放出される電荷量は、接近接地導体が接近した近傍での電荷移動に限定され、その移動量は接地導体の形状、大きさに大きな影響を受ける。図 8 に示したように、接地金属球の直径がおよそ 20 mm までは、直径の増加に従い Q_{tm} も増加傾向を示す。一方、球の直径が 20 mm 以

上になると、 Q_{tm} は飽和傾向を示す。これは、Gibson と Lloyd (1965 年) の報告と一致している¹²⁾。

一般に放電特性は、放電エネルギーの総量が同じであっても、その時間密度である電力によって異なる。例えば、連続性のコロナ放電は、全体として同エネルギーの瞬間的な火花放電よりも非着火性である¹³⁾。本実験では、5.8 で述べたように、 $d = 0 \text{ mm}$ の場合、放電波形は立ち上がりの急峻なパルス波形となる電力の大きな放電になっているので、着火性放電と考えられる。

6.2 モデル実験結果の考察

6.2.1 危険放電の判断基準

放電電荷量は、放電危険を評価するための物理量として必要十分条件ではないが、可燃性物質の着火源になる危険な放電は、放電電荷量がある一定以上のものである。本論文では、その尺度を仮に $Q_{tm} > 100 \text{ nC}$ とした。その根拠について以下に説明する。

一般に、帶電体と接近接地導体間で生じる放電において、帶電体が導体である場合には、通常導体に蓄えられる容量性エネルギーは放電エネルギーに等しいと考えられる。従って、このときの放電エネルギー W_c は、下記 (3) 式で与えられる。

$$W_c = Q_{tm} V_1 / 2 \quad (3)$$

一方、帶電体が絶縁体の場合には、放電時に帶電体に蓄えられた電荷の一部のみが放出される。この場合の放電エネルギー W_i は、(4) 式で与えられる。

$$W_i = (\int q_1 V_1 dS - \int q_2 V_2 dS) / 2 \quad (4)$$

ここで、 q_1, q_2 は帶電体表面上の位置(x, y)における放電前及び放電後の電荷密度を、 V_1, V_2 は帶電体表面上の位置 (x, y) における放電前、放電後の表面電位を表す。(4) 式に示すように帶電体の電位や電荷密度は、位置の関数であって一義的に定めることができない。このときの最小着火エネルギーを正確に求めようとすれば、帶電体表面上の電荷密度と形状から数値的に求めざるを得ない。本稿の目的は、精密な検討よりも静電粉体塗装用樹脂製ブースの設計における安全基準を定めることであるので、ここではあまり深く追求しない。

本稿において検討対象としているのは、帶電絶縁体の背面近傍に接地導体が存在する場合である。この場合、発生する放電は 2.2 で述べたように沿面放電になると考えられるので、(4) 式をそのまま適用できない。このような場合、放出される放電エネルギーは、背面接地導体のない場合に比較して極めて大きくなる。この静電気現象の解明は非常に興味深いが、着火性放電を引き起こす最小放電エネルギーを正確に算出するには注意深い検討を要し、容易な作業

ではない。そこで、問題を単純化するために、本稿では(3)式を採用することとした。(3)式は前述のように帯電導体の場合にのみ成立するが、接地導体の接近速度や形状等が同じ条件であれば、(3),(4)式で求められる放電エネルギーは下記関係にある。

$$W_c > W_i \quad (5)$$

従って、(3)式より算出した放電エネルギーが、粉体塗料の最小着火エネルギー W_p を越えなければ、非着火性であると判断して差し支えないと考えられる。

一般に、空気中における粉体塗料の最小着火エネルギーは 9 ~ 30 mJ であるが¹⁴⁾、1986 年に発行された欧州規格 EN50050 では粉体塗装ガンの放電エネルギーは 5 mJ を越えてはならないと規定されている¹⁵⁾。通常、粉体塗装プロセスにおいては有機溶剤を使用しないので、5 mJ 以下の放電エネルギーであれば着火の危険はないと考えてよい。従って、下記条件を満たす Q_{lm} を求めればよい。

$$W_p \leq 5 \text{ mJ} \quad (6)$$

図 7 より V_s の最大値は約 -100 kV であるので、(4)及び(6)式より下記関係が得られる。

$$Q_{lm} \leq 100 \text{ nC} \quad (7)$$

なお、万一何らかの理由で有機溶媒の蒸気が存在する場合には、最小着火エネルギーは 5 mJ よりはるかに小さな値となるので注意を要する。前記欧州規格 EN50050 において規定されている最小着火エネルギーは、粉体塗装用ガンの場合が 5 mJ であるのに対し、有機溶媒を含有する溶剤塗料用の場合には 0.24 mJ となっている。

6.2.2 背面接地導体の影響

図 9 及び表 1 に示したように、帯電したプラスチック板 P の背面近くに、背面接地導体 B が存在する場合であっても、 $d \geq 50 \text{ mm}$ の範囲では、P の厚さや接近接地金属球 M の直径に関係なく、最大放電電荷量 Q_{lm} の値は、50 nC 以下であった。したがって、6.2.1 で求めた条件 ($Q_{lm} \leq 100 \text{ nC}$) より、この放電は非着火性であると判断できる。

また、B の無い場合は、P と B 間の距離が無限大と考えれば良いので、着火性放電の生じる可能性は、さらに低くなるはずである。一方、表 1 で $d = 0 \text{ mm}$ の場合、 Q_{lm} の値は 280 nC 以上となっており、この放電は着火性であると考えられる。

6.2.3 直交接地導体の影響

図 11 に示したように、直交接地導体 F の近傍 ($x \leq 100 \text{ mm}$) では、距離 x の減少に対し、 Q_{lm} も減少傾向を示す。これは、ガンで帶電させる際、ガンから放出されるイオンの一部（直交接地導体の近傍では大部分）が、直交接地導体を通じて大地に流れてしまい、プラスチック P 表面の帶電が抑制され、その結果 P の電位が上昇しないためである。

したがって、接地導体 F の存在は、危険というよりも、むしろ安全な方向に作用するといえる。

6.2.4 モデル実験結果のまとめ

6.2.2, 6.2.3 で述べたモデル実験の結果より、接地金属球 M が帶電したプラスチック板 P に接近したときに発生する放電には、少なからず背面接地導体 B あるいは直交接地導体 F が影響し、背面接地導体の状態によっては、放電電荷量の大きな放電が発生する可能性のあることが明かとなつた。（例えば、図 9 で $d = 0 \text{ mm}$ の場合、あるいは図 11 で $x \geq 100 \text{ mm}$ かつ $d = 0 \text{ mm}$ の場合に、着火性放電の生じる可能性が高い。）

以上述べたように、静電気的に危険な放電の発生は、主として背面接地導体の状態に依存しており、プラスチックブースの設計にあたっては、この点を配慮しなければならないことがモデル実験より示唆された。

6.3 危険性放電抑制の試み

6.2 で述べたように、背面接地導体をプラスチック板から離して固定するならば、安全であるといえる。実際のプラスチックブース設計の場合は、ブース壁材を導電性の支持材で固定する際に、壁材背面から 50 mm 以上離せば安全上問題が無いといえる。設計上どうしても支持材を壁材に密着させなければならない場合には、他に対策を講じて、プラスチックに蓄えられるエネルギーが、塗料の最小着火エネルギーを超えないようにしなければならない。

5.6 で述べたように、プラスチック壁背面に接地導体がある場合、その近くのプラスチック壁表面上に、比較的小面積の接地導体を設置し、その効果を調べるための実験を試みた。この実験の目的は、前記接地導体近傍におけるプラスチック壁の帶電電位の上昇を防ぎ、着火性放電抑制の効果を確認することにある。実際の実験は、図 5 のモデル実験装置により行った。その実験結果を示した図 12 において、 $Q_{lm} < 100 \text{ nC}$ となる範囲は、アルミニュームテープの場合で $x \leq 150 \text{ mm}$ 、スチール線の場合 $x \leq 180 \text{ mm}$ となっている。なお、図 5 の状態で背面接地導体が鋼製角材（ブースの補強支持材に相当）の場合については、図 10 の実験結果を参照できる。即ち、図 10 に示したように、背面接地導体の影響が及ぶ範囲は、 $x < 100 \text{ mm}$ であり、それ以上の範囲では、背面接地導体のない場合と同様に考えて良い。

以上の実験結果より、プラスチックの帶電面上に設置された接地導体による着火性放電抑制の効果は、充分期待できるものと考えられる。

7. むすび

プラスチックブースの安全性について検討するため、前

記ブースのモデル実験装置によって放電実験を試みたところ、以下の知見が得られた。

(1) 壁材であるプラスチック板背面に接触した状態で接地導体が存在する場合、プラスチック板に他の接地導体が接近したとき、通常危険な放電とされている放電電荷量100 nC 以上着火性放電が発生することもある。

(2) プラスチック板背面から 50 mm 以上離れた状態で背面接地導体が存在する場合、他の接地導体が接近しても危険な放電の発生する確率は極めて少ない。

(3) プラスチック板に対して接地導体が直交している場合は、直交接地導体の影響により電界が変化し、塗装ガンによるその近傍のプラスチック板の帶電電荷量は減少する。このため、他の接地導体がプラスチック板に接近した場合でも危険な放電が発生する確率は極めて少ない。

(4) 上記 (1) ~ (3) より、プラスチックブースの安全性を確保するためには、プラスチックブースを構成する導電性部材、特にブース壁背面に配置される金属製補強支持材を移動導体近傍に使用する場合、同支持材がプラスチック材に接触しないよう配慮しなければならない。

(5) 上記 (4) で、どうしても背面接地導体をプラスチック外壁に接触させなければならない場合には、プラスチック内壁上に接地導体を設置すること。ただし、このときは、接地導体の大きさは、塗装に影響しないように極力小さく

するべきである。

最後に、本研究の遂行に際してご指導、ご助言を賜った労働省産業安全研究所 田畠泰幸所長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古谷信夫：塗装技術, 27 (1988) 141
- 2) J. F. Hughes : 静電粉体塗装, (長坂秀雄、緑川真知子訳) p.78, コーテック (1986)
- 3) 岡本康成, 河添勝年 : 工業塗装, 88 (1987) 48
- 4) 岡本康成, 中村 哲 : 塗装技術, 35 (1996) 62
- 5) 柳田建三 : 色材協会誌, 71 (1998) 45
- 6) K. Asano: J. Appl. Phys., 48 (1977) 1013
- 7) E. Heidelberg, PTB-Mitt., 80 (1970) 440
- 8) 労働省産業安全研究所編 : 静電気安全指針, p.9 (1988)
- 9) 静電気学会編 : 静電気ハンドブック, p.760, オーム社 (1981)
- 10) 柳田建三, 田畠泰幸, 山本雅洋 : 静電気学会講演論文集 '89, p.257, 静電気学会 (1989)
- 11) Y. Tabata and S. Masuda: IEEE Trans. Ind. Applications, IA-20 (1984) 1206
- 12) N. Gibson and F. Lloyd: Br. J. Appl. Phys., 16 (1965) 1619
- 13) 松原美之 : 静電気学会誌, 12 (1988) 292
- 14) 労働省産業安全研究所編 : 静電気安全指針, p.153 (1988)
- 15) CENELEC : European Standard EN 50 050, p.2, British Standards Institution, London (1986)