

文

論

異種多層フィルムの帯電安全性の評価

-回転霧化静電塗装機の汚れ防止機構-

山 田 幸 雄*^{,1}, 今 西 辰 典*, 吉 田 治*, 水 野 彰** (2009年12月22日受付; 2010年6月30日受理)

A Safety Assessment of Electrostatic Discharge from the Hetero Multi-Layer Film

-Contamination Reducing System for Electrostatic Rotary Atomizer-

Yukio YAMADA,*,1 Tatsunori IMANISHI,* Osamu YOSHIDA* and Akira MIZUNO**

(Received December 22, 2009; Accepted June 30, 2010)

The use of an electrostatic rotary atomizer reduces the effect on the environment. Recently, Water-borne painting processes have been developed and applied to reduce the amount of volatile organic compound (VOC) emissions. During the Water-borne painting process, the atomizer body is easily contaminated by paint overspray. The contamination has been a serious problem to be solved in factories. A contamination proof system has been developed using a hetero multi-later film that is attached to the atomizers. The function is based on Coulomb repulsive force between the charged film and suspended charged paint particles with the same polarity as the film. The system works properly; however, there is a safety concern with electrostatic discharge from the film. An experimental measurement of current pulses was made to assess the discharge energy when a ground electrode approached the charged film. The discharge energy of the repetitive pulse has been estimated to be smaller than the minimum ignition energy of normal hexane or acetic ether having the lowest values among the thinners used in painting.

1. まえがき

回転霧化静電塗装機は最も効率の良い塗装機の1つである. その塗着効率は80-90%と、一般のスプレーガンの30-40%程 度に対し、効率に2倍以上の差がある¹⁾.その回転霧化静電 塗装機の特徴を以下に記す.

- ・ 塗料の無駄を大幅削減.
- ・ 揮発性有機化合物(以下 VOC と記す)の排出削減.
- ・等方向性霧化パターン由来の塗装操作性の良さ.(ロボ ットでの塗装作業に適する.)

キーワード:静電塗装機,汚れ低減,水性塗料,異種多層フィルム,汚れ反発シート、クリーンコート

ABB Technical Center, 948-1 Ohka, Shimada-shi, Shizuoka Pref. 427-0033, Japan

** 国立大学法人 豊橋技術科学大学(441-8580 愛知県豊橋市 天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

National University Corporation Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-cyo, Toyohashi-shi, Aich Pref., 441-8580, Japan / Proceedings of the Institute of Electrostatics Japan, c/o Center for Academic Publications Japan, 2-4-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

¹ yukio.yamada@jp.abb.com

・高い塗装品質が得られる.

・柔軟な塗料吐出量率対応による膜厚品質,量産安定性. これらの特長は高価な塗料を大量に使用し,かつ高い塗装品 質を求める業界の支持を受けており,世界中の自動車生産工 場で使用され続けている.

安全面と実績に関しては、1941年に実用化され今日まで、 電車や飛行機の翼などの大きなものから小物部品まで、多様 な塗装に利用されてきた.塗装ブースは、天井から床全面の メッシュに向かって強制換気が施され、可燃ガスが滞留しな い環境をつくりだしている.IEC60079における危険場所のク ラス分けで考えた場合、Zone 2のレベルが採用されている²⁾. これは「通常作業において可燃ガス・蒸気発生雰囲気になる 可能性が低いか、なったとしても短い期間のみである場所」 と定義されている.また静電塗装機自体もリスクを減らす取 り組みを行っており、高圧ケーブルレスをはじめ多様な保護 監視機能や高電圧部の静電容量の低減などを継続的に進化さ せてきた.

近年,自動車生産において更なる VOC 削減が行われ,溶 剤塗料から水性塗料へと代わってきたが,溶剤塗料に比べ電 気抵抗が低く誘電率が高いことに起因して塗装機の汚れが増 加するようになった.塗装機に堆積した汚れが飛散し塗装面

^{*} ABB 株式会社 (427-0033 静岡県島田市相賀 948-1 ABB テ クニカルセンター)



図1 汚れ防止機構

(カートリッジ型回転霧化静電塗装機用)

Fig.1 Contamination reducing system on the electrostatic bell rotary atomizer called "Cartridge-bell".

に着くと生産不良になるため、塗装機の清掃が頻繁に必要で あり、不良撲滅、生産性向上、清掃廃棄物削減の理由から、 汚れない塗装機が強く望まれている.

2. 汚れ防止機構の概要

筆者らは塗装機と塗料粒子間のクーロン力を利用した汚れ 防止機構の開発,実用化を報告した³⁾.これは以下の3種の 要素から構成されている.(図1参照)

- ・コロナリング:コロナ放電を発生させる.塗装機樹脂 表面,異種多層フィルムおよび吹き戻ってきた塗料粒子 に負極性帯電を与える.
- ・ブラケット:異種多層フィルムを取り付ける絶縁支持具 である.帯電部から接地部へのリーク電流を抑制する.
- ・異種多層フィルム:塗装機の低電位部分を覆い、帯電
 を維持する.(特に着脱容易なようファスナーホック加
 工を施したものを汚れ反発シートとも呼んでいる.)
- ここで, 異種多層フィルムの性能は以下の通りである.
 - (a) 負極性帯電がしやすい.
 - (b) 抵抗が大きく漏れ電流が少ない.
 - (c) 少ない帯電電荷量で高い電位(電界)になる.

(d) 表面の帯電による反発電界がより均一である.

通常の絶縁フィルムで覆った場合は表面の電位にばらつき ができ、これにより反発力が一様でなくなるため、局部的に 汚れが付着する状態が起きる.

異種多層フィルムは半導電フィルムを 2 枚の Ethylene tetrafluoroethylene 絶縁フィルム(以下略称 ETFE)で挟み込ん だ各 0.1 mm 厚の 3 層構造から成っている. 異種多層フィル ムの汚れ反発効果が得られる理由の1つとして、最外層フィ ルムの表面電位の安定性がある.フィルムの表面に与えられ るイオン密度が概ね均一である場合、局所的な表面電位は対 地間の浮遊容量に依存する. 単層の絶縁フィルムを使用した 場合,背面に誘電率の大きな絶縁体が存在する箇所では電位 が他の部位より下がり帯電粒子への反発力が低下し汚れると いう実験結果がある.一方、単層の導電フィルムを配置した 場合は浮遊容量の局部ばらつきはなくなるが、見かけの対地 容量が大きくなるため、少ないイオン密度で高い電位を得る ことができず汚れてしまう. これに対し, 適度な導電率の半 導電層を絶縁フィルムの背後に設けている異種多層フィルム では少ない電荷で安定した高い電位を確保でき、高い汚れ防 止効果が得られることが確認されている.

3. 実験の目的

この異種多層フィルムは導電体ではないため、その帯電を 除電するのは容易ではない。そのため何らかの異常によって 異種多層フィルムの帯電が接地物に対し放電した場合を想定 し、着火に対する安全性を確認することが必要と考えた.そ こで異種多層フィルムからのパルス放電エネルギーのレベル を測定し有機溶剤の最小着火エネルギー(MIE)と比べ、そ の安全性の評価を行った.

実験方法と結果

4.1 静電電位計の校正

使用した表面電位計(春日電気, KSD-0109)は測定対象物 が 50 mm×50 mmの平面として設計調整されているため,今 回の測定のように平面でない場合誤差が生じる恐れがある. このため以下の方法で校正した.

異種多層フィルムの代わりにアルミ箔をブラケットに取り 付け,既知電圧を印加し,表面電位計とアルミ箔の最短距離 Dを変え表面電位計の表示値を図2の通り確認した.本文の 測定は本校正を適用しすべてD=10 cmにて測定している. 表面電位測定箇所は異種多層フィルムの長手方向の中央でか つBell cupに向かって真左の位置(図1のA部分)である. 測定はすべて塗装ブースの環境を模擬した恒温恒湿チャンバ ー内にて実施した.

4.2 表面電位の測定

図3は異種多層フィルムの帯電飽和時間ならびに減衰特性 を調査した結果である.静電塗装機に異種多層フィルムを取 り付け,静電塗装機に-90 kVを一定の時間印加した後の表面 電位を測定した.印加継続時間は1分,3分,5分,30分で



図2 表面電位計の校正

Fig. 2 Calibration of the electrostatic voltmeter.

Input voltage for the calibration (applied voltage to an aluminum foil) vs. readings of the electrostatic voltmeter with reference to distance between the sensor of electrostatic voltmeter and the hetero-multilayer





Fig. 3 Surface charge potential and decay characteristics with the time difference of applied voltage. Decay characteristics of charge of hetero-multilayer film with the time difference of applied voltage to the atomizer.

実施し、高電圧停止からの表面電位の経時変化の測定結果で ある.電圧を印加中は電位計の破損防止と不要な放電の影響 を除くため電位計の検出部は接近させず、印加終了後直ちに 検出部を対向させ測定を開始した.図中の誤差バーは同一条 件にて独立測定したデータの±2 σ の範囲を示している.印 加時間1分では初期帯電電位は他の条件より低いが、3分間 以上印加すれば帯電は飽和するものと判断される.また外挿 により、表面電位の絶対値は20 kV 以下と推察される.

図4は先の測定と同じく電圧印加停止後の表面電位の経時 変化である.帯電から測定までの一連の作業を各種フィルム に対し各10回前後くり返して平均値を結んだラインと2gの 範囲を記したグラフである.各フィルムとも印加停止3秒後 の表面電位に顕著な差は見受けられない.しかし電位の減衰 特性は大きく異なり,単層 (Single),2層(Double) ETFEの2 種類のフィルムは共に表面電位が-10 kV 以下では電位の減



図4 フィルム別の帯電の減衰特性

Fig. 4 Decay characteristics of the surface potential between each film.

Measured points denote the decay characteristics of potential of each film. Each film was attached to the atomizer as the repelling film and voltage was applied for 3 min.



sphere electrode

図5 放電試験に用いた接地電極

Fig. 5 Grounded electrode for discharge tests.

衰時間が短く,単純な帯電容量と漏洩抵抗では説明が付かな い減衰特性を示した.一方,異種多層フィルム(Hetero film)は, より安定した指数減衰カーブになっており,高い表面電位を 長時間維持し続けている.この減衰特性が異なる原因は,単 層や2層フィルムでは,電荷疎密が著しく,より高い電界を 有する部位からの局所的な気中コロナが発生するためである と考えている.異種多層フィルムでは中層の半導電シートが 導電体のように電位勾配を完全に打消しはしないが,絶縁体 に比べより変化の少ない電位になっているため表面でコロナ 放電が発生しにくいと考えられる.

4.3 放電電流の測定

高電圧印加中に何らかの原因で接地物が異常接近した場合, 高電圧コントローラーは充電電流の変化に反応し,火花放電 に至る前に電源停止し放電接地するが,表面が絶縁物である







- 6a: Example of long-term measurement
- 6b: Example of medium-term measurement

6c: Example of short-term measurement



図7 ブラシ接地電極への異種多層フィルム放電電流の例

Fig. 7 Example of the discharge current from the heteromultilayer film to the blush electrode.
7a: Example of long-term measurement
7b, 7c: Example of medium-term measurement

異種多層フィルムには帯電が残っている.この帯電による放 電着火のリスクを考察するため,異種多層フィルムから接地 物に放電させ,電流波形の積分から放電電荷量を得ることに



図8 球接地電極への異種多層フィルム放電電流の例 Fig. 8 Example of the discharge current from the heterogeneous multilayer to the sphere electrode. 8a: Example of long-term measurement 8b: Example of medium-term measurement

8c: Magnified waveform of Pulse-A in 8b

した.まず,コロナリングに-90 kV を3 分間印加し異種多層 フィルムに帯電を施す.続いて電源遮断直後サーボモーター で異種多層フィルムへ1 m/s の速度で電極を接近させ放電電 流を観測した.接地電極には図5に示す針状,ブラシ状,球 状の3種類を用いた.電流検出には20 kΩの無誘導抵抗を用 いメモリースコープにて波形を採取した⁴.

図6から図8に放電波形例を示す.針電極とブラシ電極で は小さな放電が多数見受けられる.針電極のほうがパルスの 波高値が大きい.球電極は電界が小さいため、放電を開始す る絶縁距離が近く、スパーク時により大きな電流パルスが発 生する傾向がある.

5. 放電の着火に対する安全性評価

帯電物が導電体の場合は一斉に放電するため帯電の全エネ ルギーをもって着火の危険性の評価をするが、絶縁フィルム からの放電着火に対する評価基準は明確ではない. 意図的に 一斉放電させようとしても簡単なことではない. そこで、後 述する評価方法を提案し、異種多層フィルムの帯電が使用環 境において着火源となり得るか評価した.

5.1 着火エネルギー

点火(着火)とは燃焼の発生のことであり、燃焼とは発熱

を伴う熱化学反応で,発生する熱エネルギーや活性化学種に よって自発的に反応が継続される現象と定義されている.

火花放電による初期火炎核からの火炎伝播により,熱粒子 や荷電粒子,活性化学種(以下まとめてラジカルと呼ぶ)の 生成が行われる.それらが一定量以上できると安定な火炎球 に成長し燃焼反応が継続進行する.火花の点火エネルギーを 小さくしてゆくと,初期火炎核から安定な火炎球に成長する 速度がしだいに低下し臨界値以下では火花エネルギーは熱伝 導によって単に消散するだけになり,火炎が伝播しなくなる. この臨界値が最小点火(着火)エネルギーと述べられている⁵⁾.

ただし最小着火エネルギーは一般に定められた試験器具の 電極間距離や,放電回路定数などの条件で測定された値とな っており,多くの因子の影響を受ける値である.同一量エネ ルギーであっても与える体積でラジカルの発生量や温度上昇 は異なる.しかしながら実際にこうした伝播させる体積を規 定するのは難しく,現実的でない.

5.2 多重パルス放電の評価方法

多重パルス放電は同一場所で発生したほうが,離れた場所 で放電した場合より少ない放電エネルギーで着火が起こりや すいと考えた.以降は,多重パルス放電での着火可能性を考 える際は安全側に放電が同一位置で生じているものとして考 えることとする.

1 発の放電パルスによるエネルギー E_1 が系に注入され, ラ ジカルが生成され, 次の放電までの休止時間に拡散し, その 残存割合をkとした場合, 次の E_2 の放電時にその影響は, k・ E_1 と考えられる. このk・ E_1 が E_2 に重畳して着火に寄与す ると考え, これを等価エネルギーとして着火可能性を評価す ることとした.

拡散方程式である(1)式はフィックの法則と粒子数保存則 から得られるものである.この式から(2)式の長さ ℓ の円筒直 線系での拡散緩和時間 τ が導かれる.いま,パルス放電が発 生したとき,放電エネルギーに比例した数のラジカル粒子が リーダーチャネルを中心に生成される.生成されたラジカル 粒子は経過時間とともに拡散し,リーダーチャネル経路内の ラジカル粒子密度は t時間経過後には $\exp(-t/\tau)$ まで減衰して いると考えられる⁶⁾.ここで, n=n(x,y,z,t)は粒子の数密度 cm⁻³, また D は拡散係数 cm²/s であり,物質,温度に固有の値であ る.

このとき荷電粒子の移動距離はリーダーチャネルの半径と して考えた,Kurimoto らは大気中の不平等電界のギャップで のリーダーチャネルの大きさをシュリーレン法により測定し, 直径 0.6 mm で飽和するとの報告している⁷⁾.また,Gibret ら も同様な計測からリーダーチャネルの物理特性を明らかにし ており空気中では 0.54 mm の径を導き出している⁸⁾.こうし た測定例から,リーダーチャネルの直径を安全側に1 mm と 丸めて評価することとした.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -D\left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}\right) \tag{1}$$

$$\tau = \frac{\ell^2}{\pi^2 D}$$

リーダーチャネルの中心に存在した荷電粒子がその半径の 0.5 mm に均一に拡散する時間があれば、リーダーチャネルの 範囲から一番逃げにくい中央部の荷電粒子も範囲外に到達で き、続く放電に関与しないと考え (2) 式に ℓ =0.05 cm, 拡散 係数 D には 20°Cの窒素分子の自己拡散係数 D=0.20 cm²/s⁶ を適用すると緩和時間 τ =1.3 ms が得られた.

いま, n+1回の多重パルス放電が発生し,最後にエネルギ $-E_0$ の放電が起きたとき,それ以前の放電の影響を考える. 1 つ前の放電エネルギーとパルス間隔を E_1 , T_1 , 2 つ前の放 電エネルギーとパルス間隔を E_2 , T_2 とすると n 回前の影響を 考えた等価エネルギーE は,

 $E = E_0 + E_1 \cdot \exp(-T_1 / \tau) + E_2 \cdot \exp(-(T_1 + T_2) / \tau) + \cdot \cdot \cdot$

• • • +*E*n·exp(-(ΣT n)/ τ) (3)

となる.また、放電エネルギーと時間間隔がすべて同じで E_0 とTと仮定した場合は、

 $E = E_0 (1 + \Sigma \exp(-nT/\tau)) = a \cdot E_0$ (4) として表される.

この(4) 式の係数 a をグラフ化すると図9となる. このグ ラフからパルスの時間間隔から導いた減衰率 $\exp(-T/\tau)$ の値 が0.7 程度であれば10 回以上前のパルス放電の影響は無視で きることが判る. また,放電のパルス間隔が τ の1/10 程度の 短い周期の繰り返しパルスが永久に続いたとしても,10 倍の 等価エネルギーで飽和することが判る.

ただし多重パルス放電でリーダーチャネルが幾何学的に一 致しているという条件や,実際の放電に伴う熱粒子の拡散速 度がより速い点,電界による力と外気流速を考慮していない ことから考え,実際よりもかなり前駆放電の影響が残りやす く安全側に見積もられるものと考えられる.

5.3 着火に対する安全性の評価

塗装に取り扱われかもしれない溶剤で着火エネルギーがより小さなものにノルマルヘキサン 0.24 mJ や酢酸エチル 0.35 mJ などがある. 多重パルス放電が発生した場合, こうした値より等価エネルギーが下回るかどうかで安全性を判断できるものと考えた.

最も波高値の大きなパルスであった図8の球接地電極への 放電を考察してみる.数十回の観測中最も大きな第1波目の パルスの最大電荷量は積分よりQ=5.1 nC と算出された.また, 3.2 項の表面電位の計測結果から安全側にV=20 kV と絶 対値で考えると,1波目の放電エネルギーは $E_I=1/2 \cdot QV=51$

(2)





Fig. 9 Multiple factor of previous discharge vs. the decay rates which was calculated from interval time between each discharge pulse *T* and relaxation time constant τ .

μJ と算出された. 続いてパルスを(3) 式にて考慮すると, 図8bの2波目の時点では30μJ,3波目では20μJ,以下12μJ, 7μJ 相当の等価エネルギーとして得られる. その等価エネル ギーの変化は図10で表わされる. いずれの等価エネルギーも 溶剤の着火エネルギーに比べ1桁低いことがわかる.

続いて、図6の針電極に関して考察してみる.パルスの間 隔は図 6b のとおり1 ms 強であり、1 波の放電電荷量は観測 中最大のものでも1.1 nC であり、11 µJ 相当であった.パル ス間隔 T = 1.0 ms, $\tau = 1.3$ ms より exp($-T/\tau$)の値は 0.46 とな る.図9から近い値の 0.5 の曲線を拾うと、パルス5発程度 で十分飽和に達し、1 パルスの2 倍を等価エネルギーとして 考えれば良く 22 µJ と評価される.また、図7のブラシ電極 の場合はパルス間隔が図7c のとおり1 ms 前後でばらついて いる.1パルスのエネルギーを2µJ、パルス発生周期を 0.6 ms として安全側に考慮すると、exp($-T/\tau$)=0.63 より、図9か ら 0.7 の曲線で確認すればよい、10 パルスで十分飽和に達し、 1 パルス分のエネルギーの 3.3 倍の等価エネルギーとして取 り扱え、6.6µJ と評価される.

6. まとめ

帯電した異種多層フィルムのからの接地放電電流に対し, 粒子拡散,リーダーチャネルの大きさを考慮した間欠パルス 放電の等価エネルギーの算出方法を提案し,有機溶剤の最小





Fig. 10 Equivalent energy calculated from superimposed pulse of discharge pulse at the sphere electrode in Fig. 8b.

着火エネルギー(MIE)と比べ安全性を評価した. 異種多層 フィルムからの等価放電エネルギーは、ノルマルヘキサンの MIEに比べ、十分小さく、着火の危険性はないと評価できた. また次の特性がわかった.

- (1) 異種多層フィルムの帯電電圧は単層フィルムと大差な かったが、表面電位が-10 kVより低い電位のもとでは 異種多層フィルムの帯電緩和が他のフィルムより遅い.
- (2) 異種多層フィルムに接地電流は間欠パルスになり、1 波 のエネルギーとしては球電極が最も大きい.

参考文献

- K. Toda, Y. Tanigawa, G. Kusunoki and T.E. Quinn: "Toyota's Bell Application System For Waterborne Metallic Base Paint Main Features Of The Toyota Expanded Paint Shop In Kentucky", *IBCE'94 Automotive Body Painting*, p.53(1994)
- CENELEC: Stationary electrostatic application equipment for ignitable liquid coating material - Safety requirements, EN 50176:2009
- 3) Y. Yamada, T. Imanishi, S.Yasuda, O. Yoshida, A. Mizuno: IEEE Trans., 16 (2009) 641
- 4) 独立行政法人労働安全衛生総合研究所著:労働安全衛生総 合研究所技術指針 JNIOSH-TR-NO.42, p.96, 社団法人産業 安全技術協会 (2007)
- 5) 水谷幸夫: 燃焼工学, p.22, 森北出版 (2002)
- 6) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブ ック, 上巻, p.61, オーム社(1998)
- 7) A. Kurimoto, O. Farish and D.J. Tedford: Proc. IEE, 125, 8 (1978) 767
- K. Gibret, O. Farish and P. Bayle: J. Phys. D; Appl. Phys., 16 (1983) 1493