

論 文

電界カーテン式粉体塗装ブースの運転について

増田 閃一*, 伊藤 孜**, 安藤 嶽**
宇賀神 耕朗**, 山本 雅洋**, 岡本 康成**

(1977年12月6日受付)

Electric Curtain Spray Booth for Powder Coating

S. MASUDA,* T. ITOH,** I. ANDO,** K. UGAJIN,**
M. YAMAMOTO** and Y. OKAMOTO**

(Received December 6, 1977)

This paper relates to the operation of Electric Curtain Spray Booths (EC Booths) in commercial powder coating plants and the safety precautions of Electric Curtain devices (EC devices) used in EC Booths. Uses of EC Booths in commercial production lines during period exceeding a year have shown the following advantages: i) Color changing can be easily effected within a minimum of time. ii) Oversprayed powder can be recovered and reused very efficiently. iii) Space savings result from the compact structure of EC Booths compared to plant employing separate recovery systems. There are two kinds of safety precautions incorporated in the EC devices. a) Prevention of ignition of powder cloud, caused by initial and continuous electric sparks, by employing a grouping method of electrodes and high current-limiting resistances. The values of the resistances were determined by experiments. b) Prevention of electrical shock by employing safety resistances. These precautions proved to be effective, even when the EC devices has been damaged.

1. はじめに

粉体塗装法における技術的課題である短時間の色替えおよび回収粉の高効率再使用の解決策として、筆者らは電界カーテン原理¹⁾に基づく機能素子——電界カーテンデバイスを使用した静电粉体塗装ブース(電界カーテンブース)を提案し、これのパイロットプラントによる研究結果についてさきに報告した²⁾。

本報文では、この結果に基づき実用ライン用に設計製造した2種類の電界カーテンデバイス(電界カーテンパネルと電界カーテンフィルタ)の構造、性能および安全性について述べる。さらに、すでに生産ラインで使用されている例に基づき、これらのデバイスを使用した電界カーテンブースの構造、運転方法ならびに1年以上にわたり運転した結果、判明した性能・効果等について以下に報告する。

2. 電界カーテンデバイスの構造と性能

2.1 電界カーテンパネル (ECP)

ECPは、図1に示すような形状(300(縦)×300(横)×7(厚さ) mmと300×200×7 mmの2種類がある)で、接触型電界カーテン³⁾をユニット化し、粉体を接触帶電のうえ反発浮上させ輸送するための機能素子である。ECP内には、多数の平行線状電極が埋めこまれている。

* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

** 小野田セメント株式会社開発部 (135 東京都江東区豊洲 1-1-7)

Development Department, Onoda Cement Co., Ltd., 1-1-7, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135, Japan

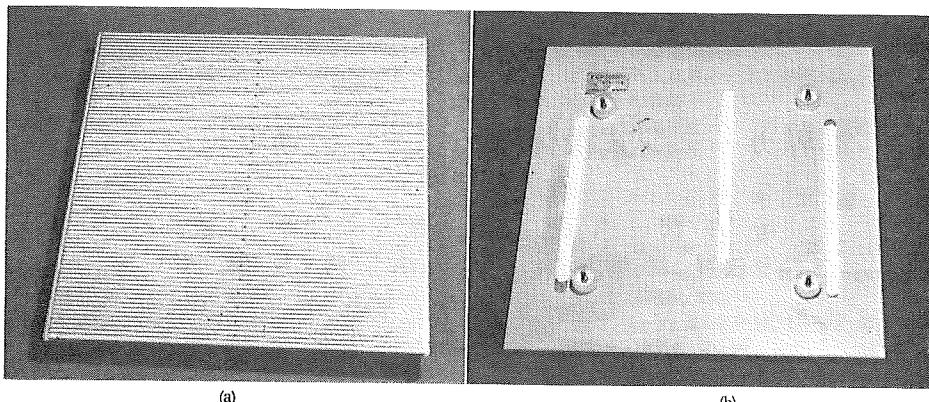


図 1 電界カーテンパネル (ECP)
(a) 表面, (b) 裏面
Fig. 1 Electric curtain panel (ECP).

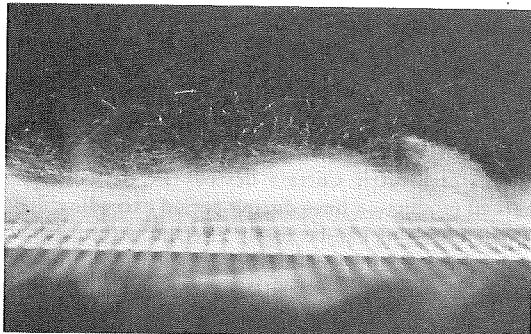


図 2 ECP の動作状況
Fig. 2 Operation of ECP.

表 1 電界カーテンパネル (ECP) の特性
Table 1 Characteristics of electric curtain panel (ECP).

印加電圧	6~9 kV, 50/60 Hz, 3φ
皮相電力	25 VA (at 9 kV)
適用粉体	アクリル, エポキシ, ポリエステル, ナイロン, ポリエチレン等の通常の粉体塗料
輸送能力	250 g/min (ECP 幅 30 cm について)
寿 命	15,000 時間以上

これらの電極に商用周波数の 3 相交流電圧を印加することにより、ECP 表面に置かれた粉体を平行電極に直角な方向に空気を使用せず、進行波電界の作用のみで図 2 に示すように反発輸送させることができる。また、3 相交流の相方向を逆転させることにより輸送方向を逆向きにすることができる。ECP への 3 相交流の印加は裏面のコネクタ (図 1) によって行なわれる。このコネクタは ECP 自体の取付け器具も兼ねており、専用工具を使

って容易にブース内壁に取付け・取外しができるようになっている。

ECP の基本的な特性を表 1 に示す。

ECP のような接触型電界カーテンでは、粉体の帶電は電界カーテン表面における粉体の接触あるいは摩擦帶電によるものと考えられている³⁾。しかし粉体の種類によっては印加電圧値を上げて無声放電を発生させると粉体の反発・輸送効果が急激に活発化することが判明した。

ECP には通常 6 kV を印加するが、短時間間欠的に 9 kV に上昇させ、上記効果を積極的に利用することにより輸送能力の増強をはかっている。この動作をラッシュオフとよび、使用条件によって適当なラッシュオフ比 (=ラッシュオフ時間/全運転時間) を選択する。この値は通常 1/10 から 1/3 としている。

粉体の粒子径が数 μm 以下になると空気の粘性抵抗が顕著になるため、電界カーテンの理論的輸送速度が低下することが知られている。通常の粉体塗料の場合では、平均数十 μm のものでも数 μm 以下の微粉が数 % は混在している。このような粉体塗料を ECP で輸送した結果によると粒径数 μm の微細粒子もほとんどすべて大きな粒子と一緒に輸送されることがわかった。これは微細粒子の凝集あるいは大粒子への付着にもよるが、また粒子雲の移動により生ずる気流の同伴効果によるものと考えられる。

2.2 電界カーテンフィルタ (ECF)

あとにふれるが、電界カーテンブースでは塗装ガンより吹出された塗料のうち、被塗物に塗着されなかった塗料 (オーバスプレー) をすべてブース内で回収する。このためにブースの限られた内壁面に取り付けることのできるフィルタシステムとして ECF を利用する。ECF は非接触型電界カーテンによる払落し機構をもち、これに

より高滌布通過風速 ($0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}$) を可能にしている。

ECF は図 7 に示すように、滌布の前面に絶縁物で被覆された払落し用棒状電極を平行に配設したフィルタシステムである。粉体を含んだ空気は手前より電極・滌布を通り抜け、その際粉体は滌布前面に堆積する。この堆積粉体層は間欠的に滌布背面より逆風を与える、さらに電極に電圧を印加し、電界カーテン作用を利用することにより有効に払い落とされる。電極には ECP と同様に $6 \sim 9 \text{ kV}$ の 3 相電圧が、ECF 給電部を通して印加される。

3. 電界カーテンデバイスの安全性

上述したように電界カーテンデバイスは交流高電圧を印加するため、これらを粉体塗装ベースに適用するにあたっては安全の確保が最大の課題である。この場合正常な状態ではもちろん、デバイスが電気的あるいは機械的に破壊した場合においても、なおかつ十分な安全が保証されなければならない。安全対策は次の二つに分けられる。

3.1 デバイス表面での放電による粉体塗料への着火防止

デバイスが正常な状態では電極は絶縁物で覆われているため、無声放電が起こる場合でもこれによる粉体塗料(着火エネルギーは通常 20 mJ 以上)への着火は絶無である。このことは次の実験により確認された。すなわち、粉体塗料雲の代わりに、これより 1 衍程度以上着火エネルギーの低い爆発性気体(都市ガスと空気の容積比 1:5 の混合気体、着火エネルギー $< 2 \text{ mJ}$) 霧団気中に電界カーテンデバイスを置き、これに約 1 分間最大許容電圧を印加して、無声放電を発生させる試験を行なったが、着火しなかった。

次にデバイスが電気的あるいは機械的に破壊し、電極の絶縁物が破壊した場合はその表面にスパークが発生する。このスパークによる着火を防止するには、次の二つの条件を満たす必要がある。

3.1.1 第 1 スパークによる着火防止の条件と方法

電極間の絶縁が破れると、その瞬間両電極間の静電容量に蓄積されていた全エネルギーが瞬時に放電路に放出される(容量性スパーク)。この第 1 スパークのエネルギーは破壊時の電圧によって異なるが、最悪の場合には下記のような値をとりうる。

$$E_1 = (1/2) \cdot C V_{\max}^2 \quad (1)$$

ただし、 C = 当該電極間の静電容量

V_{\max} = 電極間電圧の最大値

このスパークにより塗料粉体雲の着火を生じないためには、 E_1 はそれの安全エネルギー 5 mJ 以下でなければ

ならない。この条件から C の許容上限値が定まる。前述の実用電界カーテンデバイスでは、余裕をみてこの上限値より十分小さい C となるように、各相電極を数組ずつ区分して給電している。

3.1.2 連続スパークによる着火の防止条件と方法

上記第 1 スパークに続いて、断続的なスパークが交流の半周期ごとに継続発生する。これを連続スパークと呼ぶ。連続スパークは、次式で与えられる比較的小さいエネルギー E_2 の放出を伴うスパークが半周期中継続して発生するものである。

$$E_2 = (1/2) C V_s^2 \quad (2)$$

ただし、 V_s = 連続スパークの火花電圧

したがって、単位時間内の発生エネルギー(電力) P_2 は下記のようになる。

$$P_2 = E_2 \cdot N_s \cdot 2f \quad (3)$$

ただし、 N_s = 半周期のスパーク回数

f = 電源周波数

第 1 スパークによる着火防止の条件が満たされていても、連続スパークの場合、 P_2 がある許容値を超えると着火は起りうるものと想定された。

この P_2 の値を着火限度以下に抑えるためには N_s を減少させる必要があり、その手段として上記 1 組の電極ごとに安全抵抗を直列に入れる方法を採用した。この抵抗値は、以下に述べる実験の結果に基づいて決定した。

図 3 は、この抵抗値を実験的に求めるために使用した試験装置である。この回路で、電極はスパーク発生中のデバイス破損部、 C は当該デバイス電極の上記 1 組間の

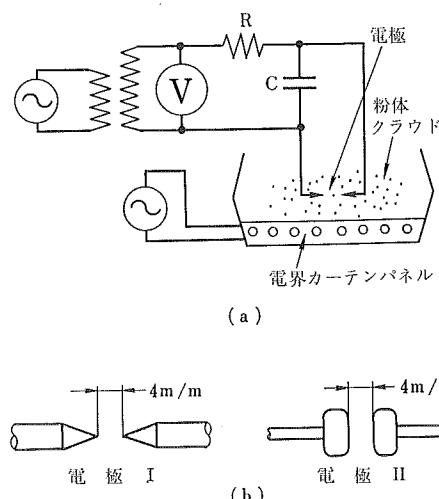


図 3 連続スパークによる着火電圧測定装置

(a) 試験回路, (b) 電極

Fig. 3 Experimental apparatus of ignition test for continuous AC sparks.

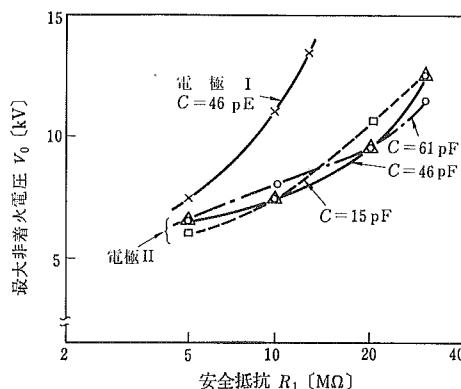
図 4 最大非着火電圧-安全抵抗 R_1 の関係

Fig. 4 Maximum non-ignition voltage V_0 vs. safety resistance R_1 and capacity C under continuous AC sparking.

容量を代表している。この回路の静電容量 C をパラメータとして、安全抵抗値 R_1 と最大非着火電圧 V_0 (繰返し着火試験において着火確率 0 となる電源出力電圧) との関係を求めた。すなわち、図 3(a)でコンデンサ C 、抵抗 R を固定し、単相型電界カーテンにより電極の周囲に爆発限界濃度内の塗料粉体雲を作り、着火試験を行なう。電極に印加する電圧を下げていき、着火しなくなる電圧を求める。電極には図 3(b) の 2 種の異なる電極を使用し、電極の形状による影響もあわせて試験した。

図 4 には、この試験の結果得られた安全抵抗値 R_1 と最大非着火電圧 V_0 の関係がいくつかの C の値について示してある。各曲線の下側はまったく着火しない領域であり、上側は着火の可能性のある領域を意味する。この場合の電極間の電圧波形を図 5 に示す。

図 4 と図 5 から、電極 II が電極 I に比較して 1 サイクル中の放電の回数が少ないにもかかわらず、最大非着火電圧が低く危険であることがわかる。これは電極 II のほうが火花電圧 V_s が高いためと考えられる。すなわち、式 (3) における半周期中の連続放電回数 N_s は、充電時の電圧回復が直線的であると仮定すると

$$N_s = kV(1/2f)(1/C R_1)(1/V_s) \quad (4)$$

ただし、 V = 電源出力電圧 (過渡値)

したがって、上記 (2), (3) 式より

$$P_2 = (1/2)(kV_s)(V/R_1)$$

したがって、いま連続スパークによる着火が、放出電力値

$$P_2 = P$$

において起こるものとすると、このとき $V = V_0$ となるから、

$$V_0 = 2P R_1 / kV_s \quad (5)$$

となって、 V_0 は V_s に反比例し、 R_1 に比例するとともに C に依存しなくなるはずである。

図 4 からわかるように、実験的にもこの範囲の C の値では、最大非着火電圧 V_0 はコンデンサ C の影響を受けず、かつ近似的には R_1 に比例して上昇している。このことから上記連続スパークによる着火に対しての解析はほぼ妥当なものと判断される。

図 6 はコンデンサ C の値を変えたときに生ずる電極間電圧波形の変化を示すもので、 C の大きさに伴う放電回数の減少は反比例より著しくなっている。

図 4 の試験結果をもとに電界カーテンデバイスには裕度をみた安全抵抗値を採用している。

ECP の場合はさらに、電極自身を高抵抗材料で製造し、電極抵抗によって R_1 を構成している。この場合には分布定数回路となっているので、放電部への電極全体からのエネルギー集中を抑制でき、より高い安全性が得られている。

3.2 デバイス表面の破損箇所に人がふれた場合の感電防止

デバイスの表面へ人がふれた場合、最大の電流が流れるのは、たまたま電極の絶縁被覆が破損しており、この箇所にふれた場合である。このような最悪の条件下でも感電を防止するため、次のような防止策をとった。

人体が感じる電流レベルは、個人差はあるが商用周波数の交流の場合で 1 mA 程度であることが知られている⁴⁾。したがって、前述の電界カーテンデバイスでは、破損した部分を接地させた場合に流れる電流が上記電流レベルより十分に小さくなるように、デバイスの給電側に保護抵抗 R_2 を入れる必要があり、その値は下記の条件を満たさねばならない。

$$R_2 > V_e / 1 \times 10^{-3} \quad (6)$$

ただし、 V_e = 対地相電圧

また、場所によっては前述の安全抵抗 R_1 自体が条件 (6) を満たしているので、この場合には R_2 を省略した。

4. 電界カーテンベースの実用例

ここに例として取り上げる電界カーテンベースは、前述した 2 種類の電界カーテンデバイスを使用し表 2 に示した条件のもとに、実用ラインで 1 年以上運転を続けているものである。

4.1 構造

図 7 は、本ベースをコンベヤの進行方向に対して直角に切った断面図である。

ベースの前面には、塗装を行なうための開口部、両側面には被塗物をハンガコンベヤで搬入・搬出するための開口部がある。ベースの背面すなわち開口部の向い側に

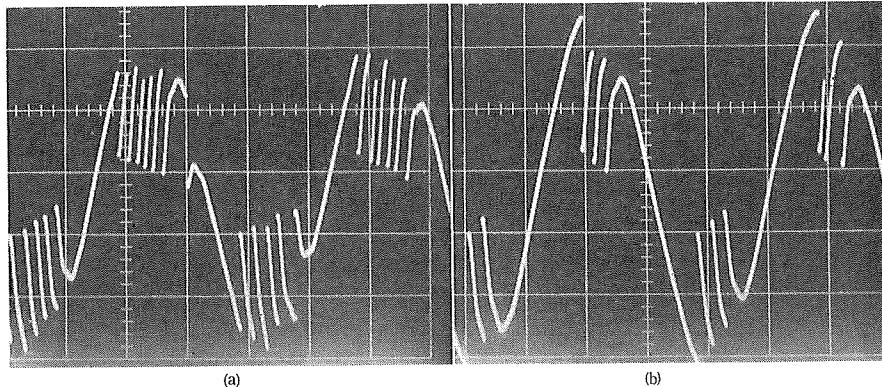


図 5 電極形状の異なる場合の電圧波形

(a) 電極 I, (b) 電極 II

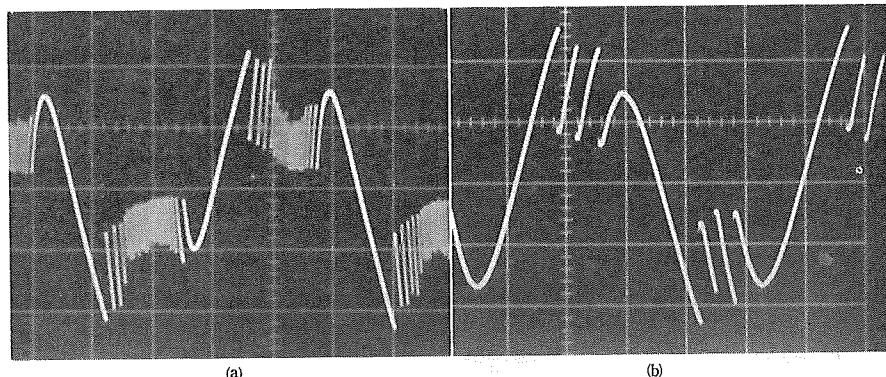
Fig. 5 Comparison of gap voltage at sparking between electrode unit I and II.
($C=60\text{ pF}$, $R_1=10\text{ M}\Omega$ and $V_{\text{eff}}=10\text{ kV}$)

図 6 コンデンサ C の値の異なる場合の電圧波形

(a) $C=15\text{ pF}$, (b) $C=60\text{ pF}$ Fig. 6 Comparison of wave form of gap voltage at sparking between low and high C -value. (Electrode unit II, $R_1=20\text{ M}\Omega$, $V_{\text{eff}}=12\text{ kV}$)表 2 例の場合の電界カーテンブースの使用条件
Table 2 Operating condition of an example of electric curtain spray booth.

被塗物	インテリヤ家具
塗装ガン	ハンドガン 1 台
	吐出し量 100~150 g/min
塗着効率	30~50%
塗 料	エポキシ粉体塗料 ブラウン, グリーン, ブラック, レッド 4 色
オーバスプレ	回収し再使用
色替え頻度	1 回/1.5 日

は、6組の前述のECFが取り付けられている。それぞれのECFの後側は別々の吸引チャンバにつながっている。それぞれのダンパの片側はECFの払落し空気配管

に接続されている。

ブースの底面、傾斜面、側面には、前述のECFが取り付けられている。

ガンから吹き出された粉のうちオーバスプレ分は、図7に示すようにECPとECFにより、すべてブース内で回収され、回収ボックスに集められる。

図8は運転中のブース内部を示している。

4.2 運転

4.2.1 通常運転

ECPの周期的な電圧の切換えと6組のECFの順次払落し操作は、専用の制御盤により自動的に行なわれる。

4.2.2 色替え作業

色替えのための作業は、ガンを停止後下記の手順で行ない、そのあと新しい色による塗装を開始する。

(1) ブース内を圧縮空気によりブローし、ECF取付け枠、ECFの目地等に若干残留した粉を除去する。

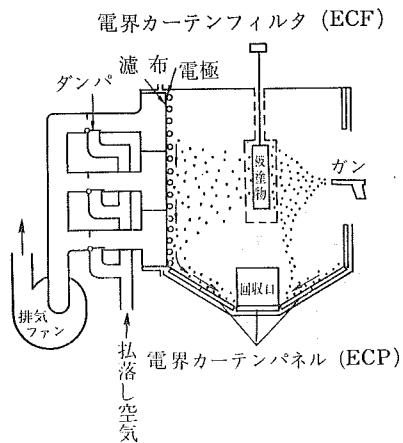


図 7 電界カーテンブースの構造

Fig. 7 Vertical cross section view of electric curtain spray booth.

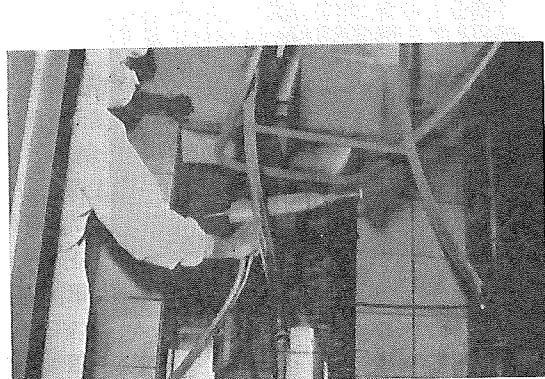


図 8 運転中の電界カーテンブース

Fig. 8 Electric curtain spray booth in operation.

- (2) ECF の濾布のみを取り外し、新しく使用する色専用の濾布に取り替える。ECF 電極と給電部は取り替えない。
- (3) 新しい色による捨て吹きを行なう。

4.3 性能・効果

実際に使用した結果、電界カーテンブースは前述の構造とすることにより、在来の空気搬送式ブースに比べて下記のような機能上の特徴を有することが明確となつた。

i) ブース内部でのオーバスプレ回収

本電界カーテンブースは、排氣中に混在した粉体塗料を捕集する装置を別に設置する必要がなく、汚れやすい接粉部分の面積を極端に小さくできる。

一方、在来ブースの場合は、粉体捕集装置としてサイクロン、バッグフィルタを別に設置するため、これらに至る配管、捕集装置自体の内面等の接粉部の面積が大き

くなる。

ii) オーバスプレの時々刻々の回収

電界カーテンブースでは電界カーテンデバイスの動作により、オーバスプレはブース内に滞留することなく時々刻々回収できる。

一方、在来ブースの場合には、ブース内あるいは捕集装置内にオーバスプレの一部が残留し、塗料にとって好ましくない雰囲気に長時間設置されるため、塗料の劣化、凝集（ブロッキング）が生じ、回収塗料の再使用の際問題となっている。

電界カーテンブースは上記の機能上の特徴により、下記の性能・効果を発揮することが実ラインで使用した結果判明した。

a) 色替えは簡単な作業で短時間で可能

在来のブースでは配管、粉体捕集装置の内部まで清掃を行なう必要があるため、半日あるいはそれ以上を要している。そのためとくに色替えを短時間で行なう必要がある場合は、ブースを各色ごとに設置しているが、この場合設備費が高くなる。

電界カーテンブースでは接粉部分の面積が少なく、また粉の残留が少ないので、色替えのための清掃も簡単で短時間で可能である。

前述の色替え作業で、ガン、ホッパ、回収ボックス、あるいはなどの清掃を含めて、1時間以内で完了している。

上述したブースとは別のブースの例であるが、とくに混色をきびしく問題としている場合に、ECP の表面を水等で洗っている。この場合でも、2時間以内で色替え作業を完了している。

このように短時間で色替えができるようになったため、1台のブースで1回/1日程度の色替えが可能となつた。

b) オーバスプレの高効率回収、再使用が可能

電界カーテンブースでは、オーバスプレはバッグフィルタ等の捕集装置のなかに長時間滞留することなく回収されただちに再使用することができるので、劣化等の問題を生じることが著しく少なくなる。したがってあるいはを通す程度で、新粉との混合をとくに行なわなくても、回収粉のみで塗装を行なうことができ、オーバスプレの回収・再使用率は90~95%以上である。

在来のブースで、バックフィルタによって回収を行なった場合、回収装置に長時間滞留し変質した粉体塗料が間欠的に排出され、これにより発生する色むら等の問題がある。また、サイクロンの場合は、回収粉の粒度分布が新粉のそれと変わってくるため、良質で安定した塗装を行なううえで問題が多いといわれている。

c) 設置面積が小さい

電界カーテンブースは在来のブースとは異なり、別にサイクロン、バッグフィルタ等の捕集装置を設置する面積を考える必要がなく、比較的狭いスペースでも設置可能である。

上記以外に安全の面でも下記の利点が考えられる。

在来のブースの場合のバッグフィルタ、サイクロンのような“閉じた”（内容積に比し入口、出口等の開口部が小さい）空間でないために、万一塗料に引火した場合粉じん爆発の可能性がなく、それだけ安全性が高いと考えられる。

以上述べた点から、電界カーテンブースは、在来ブースの使用されているところではもちろん使用できるが、とくに下記のいずれかの条件が満たされる対象で効果を発揮することが期待できる。

- (1) 色替えの頻度が多い場合。
- (2) 塗装しにくい形状等のために塗着効率が低い場合、あるいは塗着効率はそれほど悪くないが経済的な理由等で総合塗着効率を上げたい場合。
- (3) ブースおよび捕集装置の設置面積が大きくとれない場合。

5. む す び

以上に電界カーテンデバイスの構造、性能および安全

な電界カーテンデバイスを設計する条件および方法について述べた。これらのデバイスを使用した電界カーテンブースを実ラインに適用した結果、在来の空気搬送式ブースに比し、いくつかの利点を有することが判明した。これらにより粉体塗装のかかえていた問題のいくつかの解決に役立っていると考える。

最後に、日頃ご尽力いただいている扶桑動熱工業株式会社三澤輝彦社長、大木康幸常務取締役に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) S. Masuda, K. Fujibayashi and K. Ishida : Staub-Reinhalt. Luft, 30, 11 (1970), 449.
- 2) 増田閃一、森茂二郎、吾御俊二、伊藤 政、櫻井宗和、山本雅洋、岡本康成：昭和 50 年電気学会全国大会予稿集, p. 1179 (1975).
- 3) S. Masuda and Y. Matsumoto : Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt (1973).
- 4) C.F. Dalziel, J.B. Lagen and J.L. Thurston : AIEE Trans., 60 (1941), 1073.