

塗装や塗装設備の知っておきたい基礎知識

中村 芳生*

本稿では、主にこれから塗装作業や生産技術などの実務にあたるフレッシューズに対し、工場内の塗装設備で塗装が行われている「工業塗装」の分野において、知っておきたい基礎的な知識やポイントについて以下の順に説明していきたい。

1. 塗装の目的
2. 工業塗装について
3. 塗装の基本条件
4. 液体塗料の霧化方式について
 - (1) エア霧化方式
 - (2) エアレス霧化方式
 - (3) 回転霧化方式
5. 静電塗装
6. 粉体塗装
7. 自動塗装
 - (1) レシプロ塗装
 - (2) ロボット塗装
8. 塗装設備
 - (1) 前処理装置
 - (2) 電着塗装
 - (3) 塗装ブース
 - (4) 乾燥設備
9. 工業塗装で重要な 3つの要素
 - (1) 生産効率

- (2) 歩留まり率
- (3) 塗着効率
10. 今後の工業塗装の展望

1. 塗装の目的

塗装において、塗装すべき製品は“被塗物”または“ワーク”(以下ワーク)と称され、このワークの表面に対しスプレーなどにより塗布された塗料は“塗膜”となる。塗装は我々の生活環境の中でもありとあらゆる“製品”に対して施されているが、そもそも“どうして塗装が必要とされているか”の理由については、塗膜に何かしらの性能が求められるためであり、この塗装の目的は大きく分けて①と②の2つに分類される。

[塗装の目的]

- ① 塗膜性能による素材の保護
(防錆・耐候性・耐熱・遮熱・防水・耐火・耐薬品性・耐摩耗など)
- ② 塗膜による外観品質
(美観・模様・色合い・光沢など)

2. 工業塗装について

工業塗装は、自動車や家電製品をはじめとする工場などの屋内で塗装を行っているあらゆるメーカーや塗装業者の全般(以下ユーザー)が一括りとされている。しかし工業塗

*なかむら よしお (株)フサメ工業 東京事業部 営業部

装は裾野が広く、各ユーザーが生産のために使用する塗装装置、塗装設備、塗装方法などを1本化(単一化)することがほぼできない業界となっている。工業塗装が1本化できない理由としては、ユーザーによって“ワーク”も異なれば、塗装に伴う“あらゆる条件”が異なるためであり、塗装設備においてはその設備の仕様やスペックだけでなく計画の規模まで異なることから、そのほとんどがオーダーメイドになりやすいのが実態となっている。

このあらゆる条件はユーザーにとって必要となる塗装装置、塗装設備、塗装方法を選定していくにあたっての“基本条件”となるため、重要な要点であることから最初に説明しておきたい。

3. 塗装の基本条件

工業塗装における代表的な基本条件を第1表に示す。

この第1表に示されるように、ユーザーによって“①ワーク条件”をはじめとするあらゆる条件が異なることから、これらの基本条件を満たした塗装装置、塗装設備、塗装方法などが必要とされる。この基本条件はユーザーにとって必要な要求条件(要求仕様)で

あるため、塗装設備や塗装装置の仕様検討やレイアウト設計などを展開するうえではこの基本条件を明確にしておくことが重要であり、計画構想のスタート段階でこれらの条件をあらかじめ設定しておく必要がある。

補足として、要求条件によってはクリーン度などの“空間条件”や、温湿度が空調された“給気条件”など、第1表中に示されていない基本条件が必要とされる場合もある。

本誌の購読者においても、自社の塗装設備や塗装装置はこうした基本条件を基に仕様設計されているはずであり、塗装設備の納入仕様書(完成図書・取り扱い説明書)や設計図面などを確認のうえ、自社の塗装設備スペックを念頭に入れておくと実務のノウハウが吸収しやすくなると考えられる。

4. 液体塗料の霧化方式について

ハケやローラーなどにより液体塗料を1滴もムダなく塗装ができた場合は塗着効率=100%に近づけることができる。しかし、ハケやローラーでは十分な仕上がり外観や均等な膜厚分布などの塗装品質を得ることが難しいため、一般的には塗料を霧化(微粒化)してワークに塗布する“スプレー塗装”が主流となっている。

第1表 代表的な基本条件

	条件項目	主な基本条件
①	ワーク条件	寸法, 形状, 重量, 材質, 品種数
②	生産条件	生産数量 (***** 式/月, **** 式/日, *** 式/hr)
③	稼働条件	稼働時間 (〇〇日/月, 〇〇hr/日)と有効稼働時間 (〇〇hr/日×〇〇%稼働)
④	吊り掛け条件	吊り姿, 吊り掛け高さ, 吊り掛けピッチ, 吊り掛け数量 (ハンガー当たり) など
⑤	搬送条件	ライン搬送速度, 搬送仕様, 搬送高さなど
⑥	前処理条件	必要な前処理仕様, 必要処理時間, 必要処理温度など
⑦	水切り条件	タレ切り, 水切りエアブロー, 水切り乾燥時間, 水切り乾燥温度など
⑧	塗装品質条件	塗装の合格品質基準, サンプル条件, 膜厚分布, グロス, 色差, タレ, スケなど
⑨	塗料条件	使用する塗料 (溶剤/粉体/水性) の種類や樹脂, 塗料粘度など
⑩	塗装条件	吐出量, 霧化・パターン条件, ガン数, ガン速度, ガン距離など
⑪	乾燥条件	セッティング時間, 乾燥処理温度, 乾燥時間 (物温 ****°C **min キープ) など
⑫	設置条件	工場内の設置が可能なエリア, 設置が可能な高さ, 障害物, ワークフローなど

この液体塗料を霧化する方式としては“(1)エア霧化方式”,“(2)エアレス霧化方式”,“(3)回転霧化方式”の3つが代表的であるが,先に示した基本条件によっても適した霧化方式や塗装機器の選定が異なるので,それぞれの特性も押えておきたい。

(1) エア霧化方式

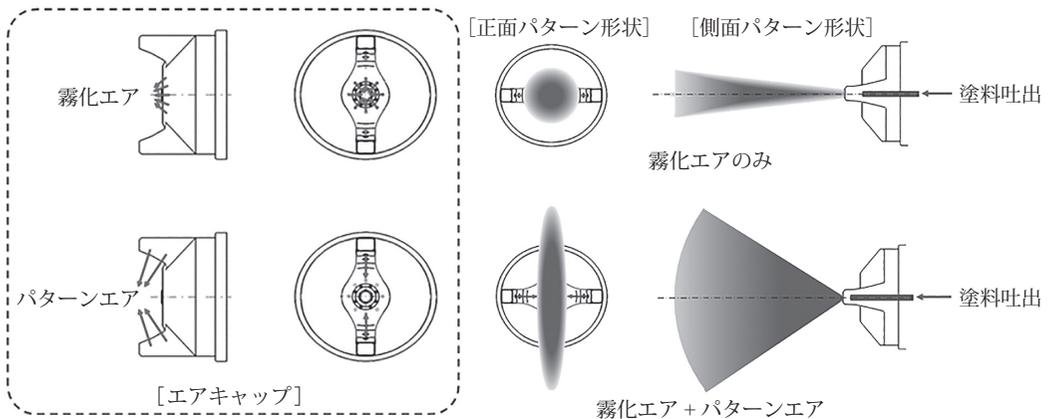
エア霧化方式は3つの霧化方式の中で最も多く採用されているスプレー塗装であり,このエア霧化の原理を第1図に示す。

スプレーガンはガン先端の塗料ノズルから吐出した塗料を霧化(粒子化)する霧化エアと,霧化した塗料を扇形のパターン幅に調整するパターンエアを必要に適したエア圧にガン手元のニードルなどで減圧調整して塗装する。

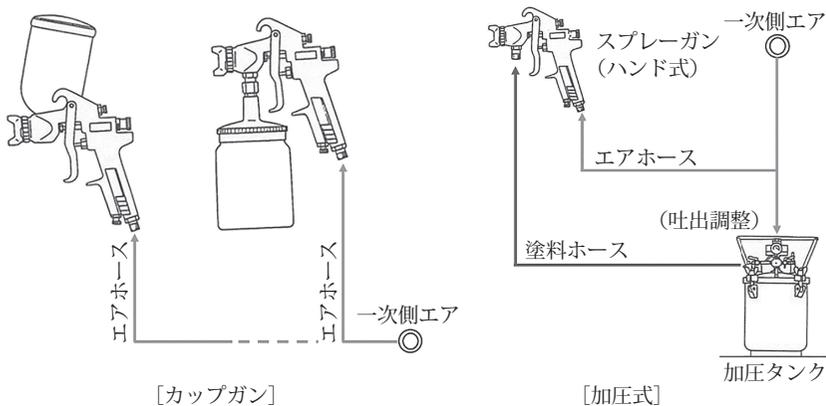
エア霧化に必要とするユーティリティは,コンプレッサーにより0.6~0.7MPa程度の高い圧力に圧縮された空気(以下圧縮エア)をエアホースからスプレーガンへ供給する。減圧するエア圧は塗料の吐出量や粘度により適正な圧力が異なるが常用で0.1~0.3MPa程度となる。

エア霧化方式の塗装(1回塗り)で得られる膜厚は塗料内部の固形分量や塗料粘度によっても異なるが,おおよそ10~30 μ m程度となる。エア霧化方式のスプレー塗装は,高い仕上がりの外観品質や高輝度塗装ができるスプレー方式となる。

エア霧化式のスプレーガンのうち,第2図のように塗料カップを搭載したスプレーガンのカップガンという。カップガンの場合,備



第1図 エア霧化式スプレーガンの原理



第2図
カップガンおよび
スプレーガンへの
塗料供給フロー例

え付けの塗料カップに必要な塗料を充填できるため、塗料ポンプや加圧タンクなどの塗料供給装置を必要とせず圧縮エアのみでスプレー塗装が可能である。このカップガンはムダな塗料のロス削減や色替え時の洗浄シンナーが少量で済むことに利点があるが、塗装ラインなどでの連続塗装には不向きである。

これに対して、スプレーガンへ連続して塗料を供給するためには塗料ポンプや加圧タンクなどの塗料供給装置が必要となる。この塗料供給装置には、塗料タンクを圧縮エアで加圧しタンク内の塗料を内圧で押し出す“加圧式”，圧縮エアを動力とするダイアフラムポンプが主流の“圧送式”と、吐出量を定量安定供給する電動式ギヤポンプなどの“容積式”がある。

(2) エアレス霧化方式

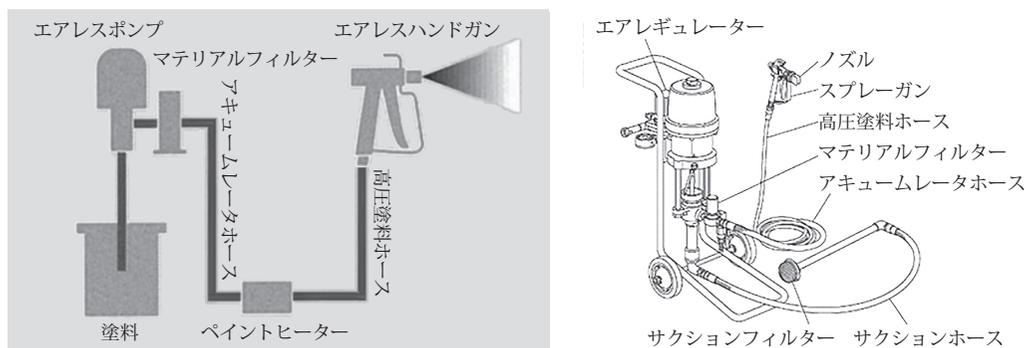
エアレス霧化方式は、エアレスガン先端のエアレスノズル(またはノズルチップ)から吐出される塗料を高い液圧(吐出圧)で噴霧させることを霧化の原理としたスプレー方式で“エアレス塗装”と称される。エアレス霧化方式はエア霧化方式とは異なり、塗料を霧化するために圧縮エアを要さない霧化方式となる。この霧化に必要とする吐出圧は、塗料の粘度や吐出量などにより異なるが汎用レベルでは数 MPa～20MPa 程度と高圧で圧送させる必要があるため、塗料供給装置にはエアレスポンプ(プランジャーポンプ)を採用する必要がある。このエアレスポンプの

動力には建築など屋外で使用される場合にはエンジン式や電動式のポンプもあるが、工業塗装では塗装作業が工場内であるため、圧縮エアを動力としたエアモーター式が汎用化している。

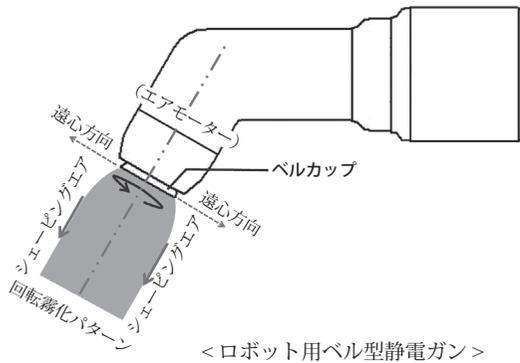
エアレス塗装は主に高粘度塗料を用いた厚い塗膜を必要とする塗装に使用され、エア霧化方式で2～3回の塗り重ねを必要とする厚膜塗装が1回塗りでも可能となる。エアレスポンプは塗料粘度や吐出量に応じてポンプを選定する必要があり、かつエア霧化式のスプレーガンとは異なりエアレスガン手元での吐出量やパターン幅の調整ができないため、必要とする吐出量やパターン幅に応じて適したエアレスノズルを選定することも必要である(第3図参照)。

(3) 回転霧化方式

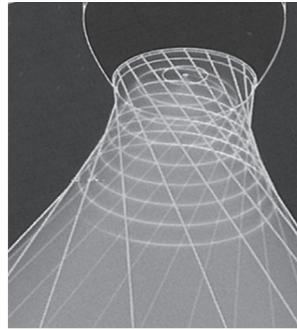
回転霧化方式の塗装機はベル型塗装機と称され、霧化方式の原理は高速回転するベルカップから吐出した塗料を遠心力により霧化し、霧化された塗料粒子に対してシェーピングエアを与えることでワークへ向けたパターンを生成する霧化方式である。塗料を適正に霧化させるためのベルカップの回転数は汎用レベルで2万～3万 r.p.m 程度となる。この回転霧化方式は、エア霧化方式やエアレス霧化方式と比較して高い塗着効率が得られると同時に、高い仕上がり品質の塗膜が得られるのが特徴であり、自動車の外装などの高輝度塗装で多く採用されている(第4図参照)。



第3図 エアレス塗装の機器構成



<ロボット用ベル型静電ガン>



回転霧化イメージ

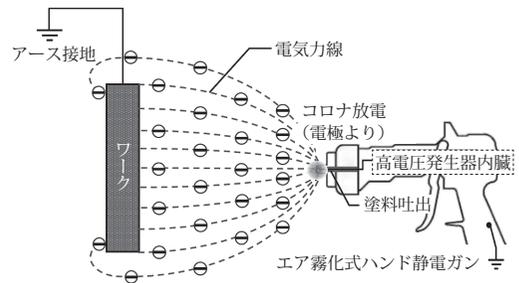
第4図
回転霧化イメージ

5. 静電塗装

静電塗装は後述する“9. 工業塗装で重要な3つの要素 (3)塗着効率”を向上させるための塗装方法として大きなメリットがあり、この原理を第5図に示す。静電塗装は、ガン先端で印加させた高電圧によって⊖電荷を帯びた塗料粒子が、コロナ放電によりアースに接地されたワークとの空間に生成された電界中の電気力線に沿って、クーロン力により効率よくワークへ塗着する特性があるため、非静電の場合と比較して飛躍的に塗着効率が向上する塗装の原理である。

この印加電圧は、第5図のような静電ハンドガンの場合で -30～-60kV 程度であり、印加電圧が高いほど静電効果は高いが凹部への塗り込みの際には静電反発により塗り込み難い特性があるため、凹部への塗り込みの際には印加電圧を下げる、または静電をOFFするなどが必要な場合もある。

先述に示した3つの“エア霧化方式”、“エアレス霧化方式”、“回転霧化方式”のいずれにも“静電塗装”が可能であり、工業塗装ではベーシックに採用されている。なお、静電塗装を行うためには、塗料抵抗値を100～150MΩ前後の静電塗装に適した抵抗値に調整する必要があり、塗料抵抗値が高い塗料の場合にはアルコール成分などを含む静電シンナーを用いて塗料抵抗値を下げるための希釈が必要となる。また、水性塗料においては電



第5図 静電塗装の原理

気伝導率が高い“水”を用いて希釈するため塗料抵抗値が低く、溶剤塗料と同様の塗装装置を用いて静電塗装することは不可となる。この水性塗料で静電塗装する場合においては、塗料タンク～塗料供給装置(塗料ポンプ)～塗料経路～ガン間の全体を絶縁させることで高電圧の印加を可能とした絶縁方式か、あるいは、水性塗料を霧化した直後の空間で帯電させる外部帯電方式の静電ガンを選定することにより静電塗装が可能となる。

6. 粉体塗装

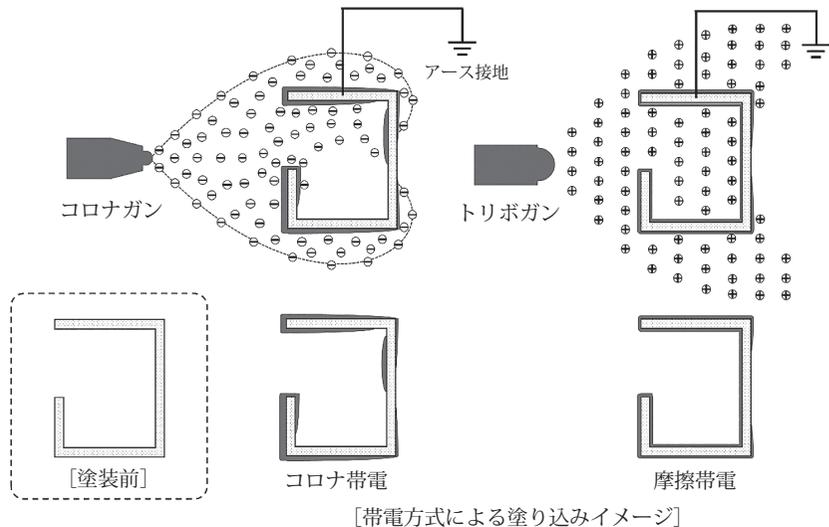
粉体塗装は、液体塗料とは異なりVOCを含まない粉末状の塗料を用いた塗装であり、この粉体塗装は近年でも特に需要が伸びている。

粉体塗料は、樹脂、顔料、硬化剤・帯電制御剤などからできており、粒子の大きさは一般的に20～40μm程度の粒子に粉碎した粉末状の塗料である。粉体塗料には、エポキシ、ポリエステル、フッ素などの樹脂を180℃程

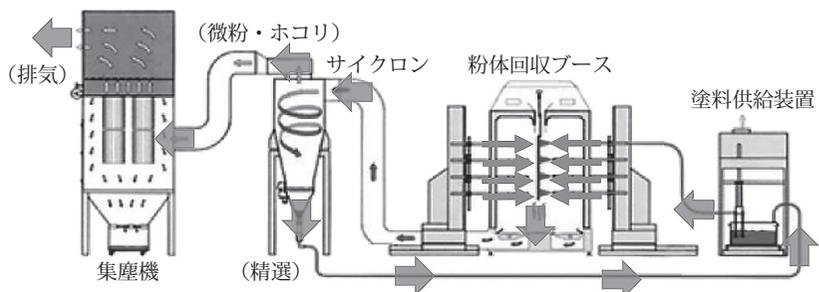
度の熱で架橋反応することで塗膜を生成する熱硬化性の粉体塗料と、塗料自体を高温の熱により溶融(メルト)することで塗膜を生成している熱可塑性の粉体塗料がある。粉体塗装は液体塗料とは異なり粉体塗料だけではワークに塗着しないため、塗装の原理としては静電塗装に限られている。粉体塗料を帯電させる方式としては第6図に示すように、ガン先端のコロナ電極に高電圧を印加し、コロナ放電によって発生したイオンにより粉体塗料を⊖帯電させるコロナ放電式と、樹脂粉末であることの性状を生かした摩擦によって⊕帯電させる摩擦帯電式(トリボ)の2つの方式がある。コロナ放電式は静電効果により高い塗着が得られるが、静電反発により凹部への塗り込みが難しく、こうした凹部への塗り込みが必要な場合には印加電圧を下げるなどで塗装条件を調整する必要もある。

これに対して摩擦帯電式の場合は静電反発が起こらないため、凹部に対しても塗り込み性が高いことと、きれいな仕上がり肌の塗膜が得られることにメリットがあるが、塗着はコロナ放電式に劣るため、膜厚塗装には不向きとなる。

粉体塗装の大きな特徴の1つは溶剤塗装のように熟練した技術はおおむね必要なく、塗装の未経験者であっても習得しやすいことが挙げられる。また、粉体塗料は“回収→再利用”できることも大きな特徴である。この粉体塗料を“色替え→回収”する際の機器構成としては第7図のように色替え作業に適応した粉体ブースに加え、集塵機やサイクロンなど粉体回収機能を有した粉体色替えシステムを必要とする。また、粉体塗料の色替え作業は、塗料経路をシンナー洗浄できる溶剤塗料と比べ、色混じりのコンタミを少なく



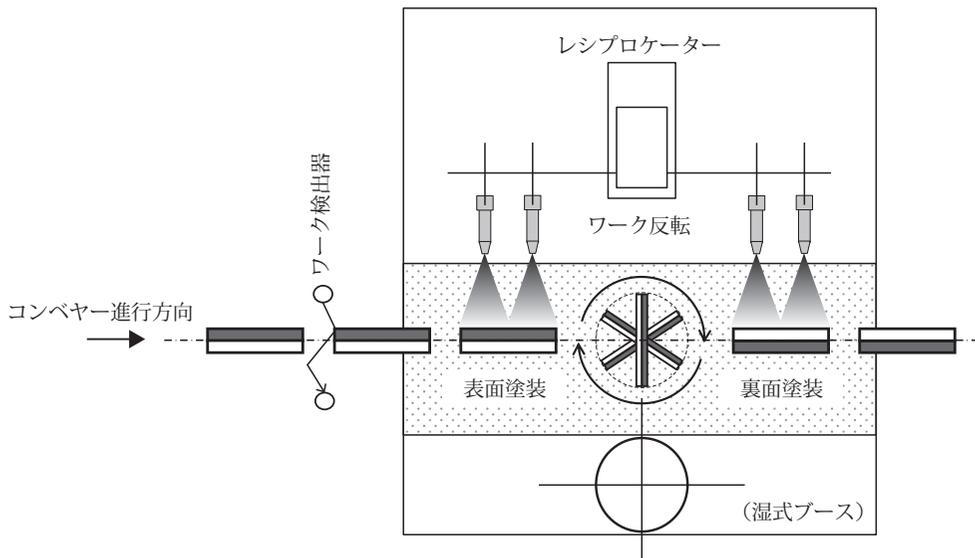
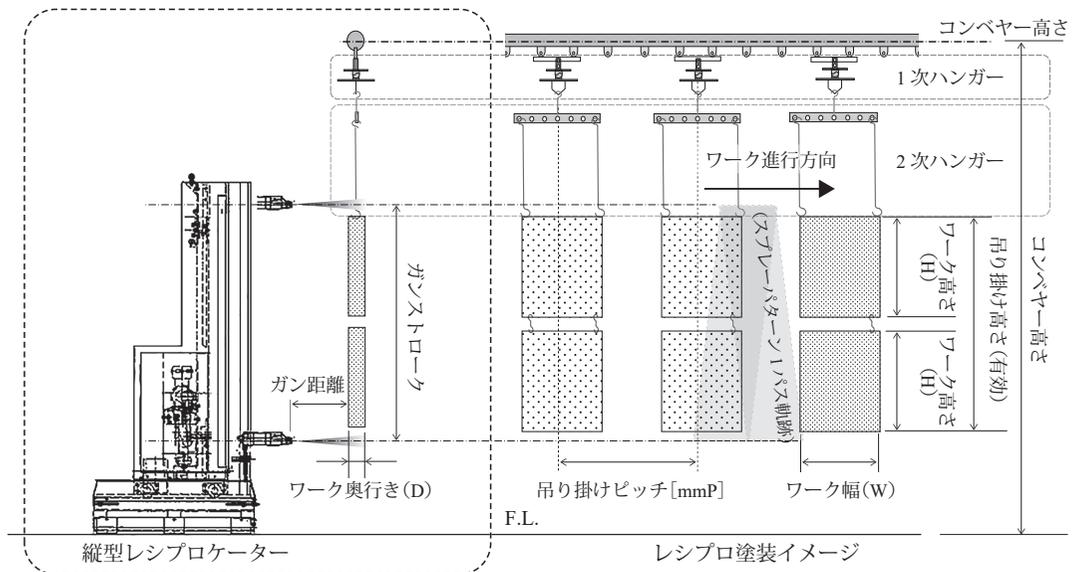
第7図
粉体回収システムの装置構成



するためには塗装装置や塗料経路だけでなく粉体塗装ブース内も併せてエアブローなどでしっかりと清掃する必要がある。この粉体の色替え作業には色にもよるが0.5～1時間程度の色替え時間を要するため、色替え作業によりライン生産効率低下に起因することも念頭に入れておく必要がある。そのため、粉体塗装において色替え作業が頻繁に必要な場合においては回収再利用せずに“吹き

捨て→廃棄”となってしまうやすいことが実状である。

粉体塗料は溶剤塗料とは異なりシンナーなどの揮発性有機化合物(VOC)を含まないため、環境対応型の塗料であるが、塗装後の乾燥処理(物温約160～200℃×20～30分)に多くの熱量[kcal]を必要とするため、主な熱源であるガスの燃焼によるCO₂の発生が伴う一面を持つ。



第8図 レシプロ塗装の解説

7. 自動塗装システム

(1) レシプロ塗装

レシプロ塗装は第8図に示すように、主にオーバークラウド式コンベヤーによって連続搬送するワークを塗装ブース内に設置したレシプロケーターによりガンのストロークを往復させてレシプロ前方を通過するワークに対して自動塗装する方法をいう。

レシプロ塗装はパネル形状などの平面塗装を量産する際の自動塗装に適しているが、スプレーの軌跡が縦(または横)のストロークを往復する動作であるため、ワークの形状が複雑になるほど塗り込みにバラツキが生じやすく、レシプロ塗装で塗り込みができない塗装面に対しては手吹き塗装による前補正か後補正が必要となる。

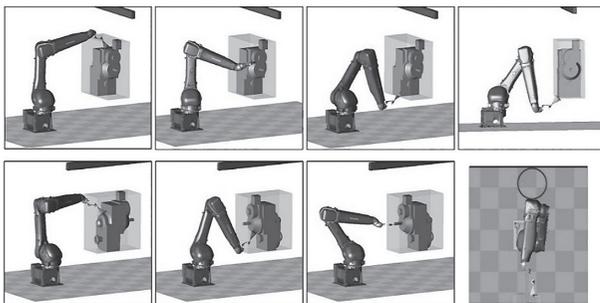
(2) ロボット塗装

ロボット塗装は主に電動6軸型の塗装ロボットを採用した自動塗装が主流であり、塗装の仕上がり品質の再現性(=塗装品質の安定化)に大きなメリットがある。ロボット塗装のプログラムは、ワークごとにティーチペンダントを用いて教示(以下ティーチング)する必要がある。このティーチングにより精度の高い凹凸部への狙い込み、ガン速度、ガン距離、ガン角度などの動作の他、併せてロボットに搭載された自動塗装ガンの吐出量や霧化エアなどのスプレー条件や、スプレーや

静電のON/OFF制御も併せてプログラミングできるため、動作のみならず塗装条件の全ての再現を可能にした自動塗装である。

また、先述のレシプロ塗装では縦(または横)のガンストロークで行う面直塗装となるが、ロボット塗装では複雑形状のワークの凹凸部などに対しても面直に狙い込みした塗装が可能のため、塗装のロボット化によって塗着効率を向上させることも可能となる。しかしながらこのロボット塗装はワーク1つひとつに対してティーチングする必要があるため、少量多品種生産など対象ワークの品種が多い場合にはティーチング対応やティーチングにかかる所要時間などが現実的かどうかをよく見極めておくことも必要である。なお、対象ワークが多い場合のティーチングとしては、ロボット本体の実機(マニピュレーター)によるティーチング対応では生産ラインを停止する必要が伴うが、これに対しPC上でのティーチング対応を可能としたシミュレーションソフトを採用することにより、塗装ラインの稼働停止を避けたティーチング対応(オフラインティーチング)も可能である。なお、オフラインティーチングには対象ワークの3Dデータを作成する必要がある(第9図参照)。

補足として、揮発性有機溶剤(VOC)を含む溶剤塗装の場合には、揮発した溶剤ガスは引火性のガスでもあるため、塗装ロボットに



インターフェース画面

YASKAWA © 2021 YASKAWA Electric Corporation
[樹安川電機 高精度ロボットシミュレータ [MotoSim EG-VRC]]

ティーチペンダント
[DX200]

第9図 シミュレーションソフトによるロボット塗装の動作イメージ

は防爆型塗装ロボットを採用することが必要である。なお、VOCを含まない粉体塗装の場合には非防爆型の塗装ロボットの採用で十分である。

8. 塗装設備

(1) 前処理装置

ワークに対して塗装を施すためには一般的に塗装の前工程で何かしらの前処理が必要となる。

ワークが樹脂の場合には、エアブロー、ワイピング、除塵・除電などが主流となるが、金属塗装の場合には多くで前処理装置が採用されている。これはワーク表面に油成分やゴミなどが付着した状態では塗膜を適正に密着させることができないため、塗装の前工程において脱脂洗浄などの処置を行う必要があり、これが前処理工程となっている。この前処理工程においてワーク表面に付着した油成分を洗浄する脱脂処理や、塗膜の密着性を高めるための化成被膜を生成させる化成処理があるが、これらは薬液工程であるため、この薬液工程の後工程には薬液を洗い流すための水洗工程が設けられている。前処理で採用される代表的な化成処理としては、リン酸鉄、リン酸マンガン、リン酸亜鉛などのリン酸塩皮膜処理がある。このうち前処理装置で最も多く採用されているのはリン酸亜鉛皮膜化成処理であり、第10図はこの処理工程を示している。前処理の方法としては写真-1の

ように上・下・左・右の複数のノズルからワークに処理液を噴射するシャワー方式と、槽内の液体中にワーク全体を浸漬するディッピング(DIP)の方式が主である。

前処理工程を経たワークには水洗洗浄後の水滴や液溜まりが生じており、そのままでは塗装をすることができないため、前処理工程の後には100~120℃程度の熱風により水切りを目的とした乾燥工程が必要となるが、これを水切り乾燥という。この水切り乾燥は、樹脂ワークやすでにアッセンブリされたワークなどの高温処理ができないワークには適さないことから、薬液や水洗が伴う前処理装置の採用はおおむね金属ワークの場合に限られている。

(2) 電着塗装

スプレー塗装と異なる塗装としてはカチオン電着塗装が代表的な方法である。電着塗装は第11図に示すように主にリン酸亜鉛皮膜化成処理などの前処理工程の直後に連続した

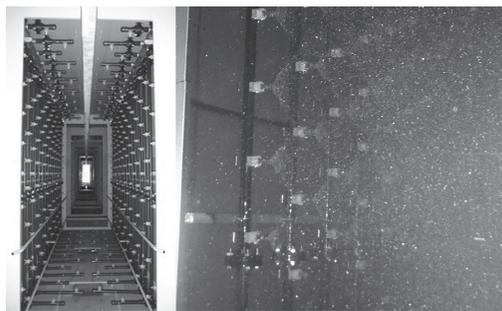
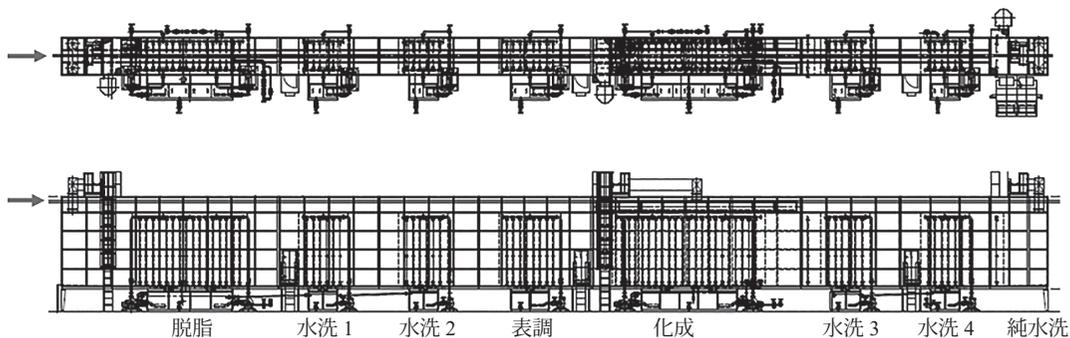
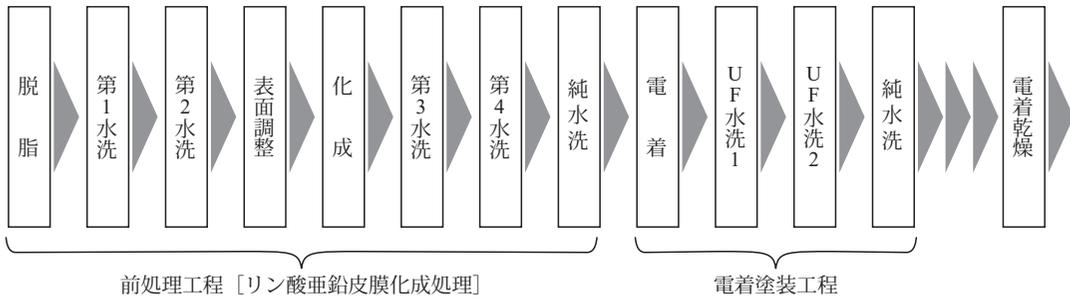


写真-1 前処理装置のシャワー



第10図 リン酸亜鉛皮膜化成処理[シャワー式]



第 11 図 前処理—電着塗装の工程例

工程で配置される。

電着塗装は水溶液塗料槽中（電着槽内）に全没で浸漬（フルディップ式）させて、ワーク全体表面に対して電着槽内で電氣的に塗膜を生成（析出）させる塗装方法であり、この電着塗装は自動車のボディーやトラックの下廻りなどの金属製品に多く採用されている。自動車やトラックのフレームなどの下廻りの多くに黒色の塗装が施されているが、これらの多くは電着塗装のみの状態となる。また、自動車外装のボディー塗装にはこの電着塗装を下塗りとして、この後に中塗り→上塗り→クリヤーの塗装が施されている。

電着塗装の大きなメリットは、スプレーでは塗り込めない箇所に対しても浸漬塗装により塗膜が生成できるため、ワークの耐食性が十分に得られることにある。自動車ボディー

などの電着ラインでは浸漬したワークの凹部にはエアポケットや液溜まりが生じやすいため、この対策としてワーク自体を回転させるなどで処理不良の対策をしている事例もある。また、電着塗膜の乾燥には物温 160°C × 10 分程度の焼き付け処理が必要となる。

(3) 塗装ブース

有機溶剤含有物を用いて行う塗装作業は法令〔有機溶剤中毒予防規則（略して有規則）〕（第 12 図参照）により定められた“有機溶剤業務”に該当するため、塗装を行う場合においては蒸発（揮発）した有機溶剤ガスにより塗装業務に従事する人の健康に被害が及ばないように有機溶剤ガスの濃度を低く抑えるための設備が必要とされており、これが局所排気装置やプッシュプル式換気装置などの塗装ブースである（第 13 図参照）。

有機溶剤中毒予防規則

労働安全衛生法及び労働安全衛生法施行令の規定に基づき同法を実施するため有機溶剤中毒予防規則を定める。

- 第一章 総則
- 第二章 設備
- 第三章 換気装置の性能等
- 第四章 管理
- 第五章 測定
- 第六章 健康診断
- 第七章 保護具
- 第八章 有機溶剤の貯蔵及び空容器の処理
- 第九章 有機溶剤作業主任者技能講習

- ・規則に於いて用いられる用語の意義
- ・有機溶剤等の区分
- ・有機溶剤作業
- ・作業場所の範囲
- ・予防措置の定義
- ・適用の範囲
- ・認定基準
- ・申請手続き …等

労働基準法
→ 労働安全衛生法
→ 労働安全衛生規則
→ 『有機溶剤中毒予防規則』

第 12 図 有機溶剤中毒予防規則の概要

塗装ブースはこの有機則に示されているように揮発した溶剤ガス濃度を低く抑えるための換気装置としての役割を持つが、実際の塗装作業を行うにあたっては、塗装作業を行う空間中に砂やホコリなどが浮遊した状況下ではこのホコリなどがワーク表面のゴミ・ブツ不良の要因となってしまうため、塗装ブースはこの空間を囲い、外部の空間と仕切ることによって塗装に適したクリーンな環境を保持する役割も必要とされる。この場合、塗装ブースは常時排気していることからこの排気に相当した風量の給気も必要となるが、この給気には外部空間中の砂やホコリなどを塗装ブース内に引き込まないようにするために、給気フィルターを介してクリーンな給気を作ることも必要である。また、塗装ブース内においては、塗料をスプレーすることで塗装ブース内に塗料ミストが飛沫するため、塗装ブース内の空気がこの給排気によって常時換気されたクリーンな空間として保たれていることも管理ポイントとなる。

なお、クリーンな空間を保持するためには塗装ブースの給排気性能が一定に保たれることが重要であり、塗装ブースにおいては特に適正な頻度で清掃管理することも肝要となる。

補足として、塗装ブースは塗装作業を行うにあたってワークに塗着することができなかった塗料ミスト（オーバーミスト）を捕集する“掃除機”に相当した役割を持つため、

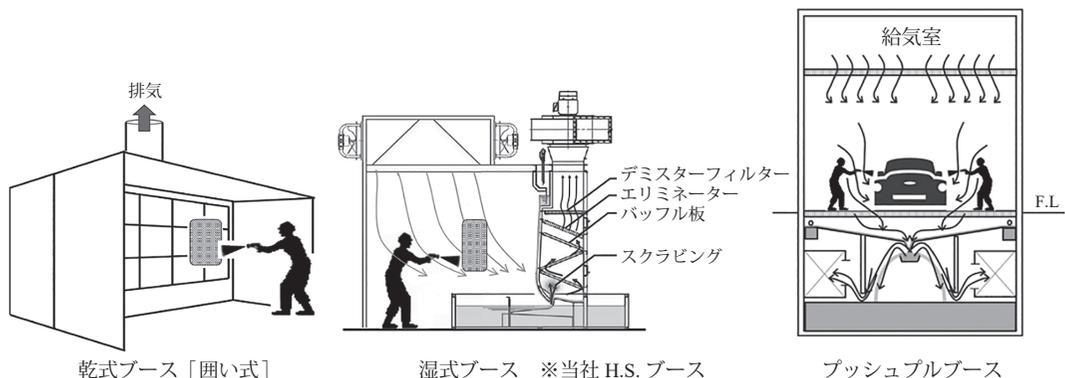
塗装作業に適した塗装ブースの大きさは対象ワークの大小に限らず、塗料の使用量なども考慮して余裕を持った大きさの塗装ブースを導入することが望ましく、この計画検討のためにも基本条件を明確にしておくことがポイントとなる。

(4) 乾燥設備

焼き付け乾燥などに必要となる乾燥設備において、最も一般的な方式が熱風循環式乾燥設備（以下乾燥炉）となる。

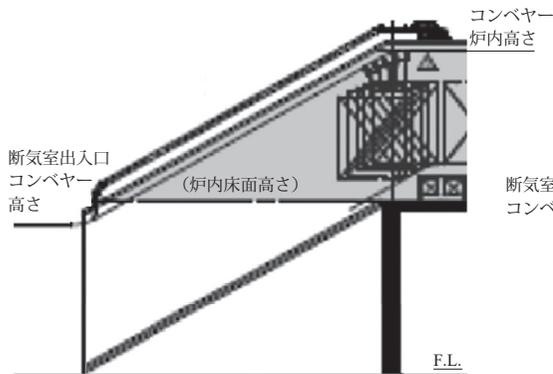
工業塗装で最も多い金属焼き付け塗装において、乾燥炉に必要な熱風発生装置の熱源としては、ガス・電気・蒸気などがあるが、プロパンガス（LPG）や天然ガス（LNG）を燃焼させて必要な熱量を発生させるガスバーナーが主流であり、この乾燥炉の方式としては熱風循環式が主流となっている。樹脂部品のように高温で乾燥処理ができないワークや低温乾燥が必要な塗料などの場合には、電気を熱源とした電気式乾燥炉や、熱交換器を用いた間接加熱式の乾燥炉が採用される例もあるが、方式としては熱風循環式がベーシックである。

塗膜を乾燥処理するための乾燥炉は、メラミン樹脂塗料を代表とする焼き付け型塗料においては 120°C 以上、粉体塗装の場合には 180°C 以上（低温焼き付けタイプでは 160°C）でワークの物温を必要時間キープすることが必要であり、この乾燥炉の設計には熱量計算

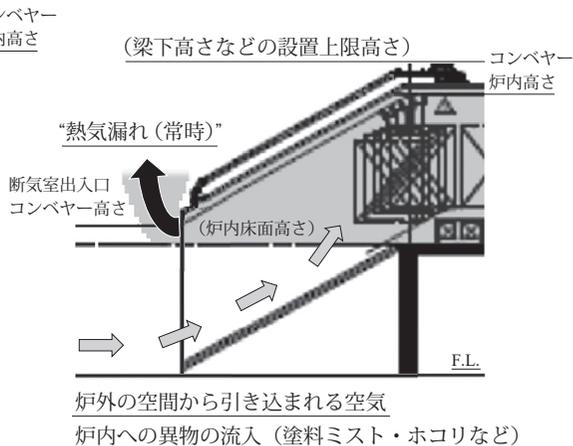


第 13 図 さまざまな方式の塗装ブース

“完全山形乾燥炉”



“非完全山形乾燥炉”



第 14 図 熱風循環式山形乾燥炉のポイント

が必要となる。この熱量計算には先述の基本条件に示す、①・②・④・⑤・⑪などの基本条件を基に乾燥炉の炉体を設計したうえで、炉体自体を昇温させるための熱量も含めて計算する必要がある。また、焼き付け塗装などの連続塗装ラインに最も多く採用される山形乾燥炉の場合、熱ロスを発生させない熱風循環の構造としては第 14 図のように完全山形乾燥炉であることが重要なポイントである。

9. 工業塗装で重要な 3 つの要素

工業塗装において基本条件が異なることと同じように、ユーザーによって課題となる“改善すべき点”、“対策すべき点”、“見直すべき点”はいずれも異なるが、どのような環境下にあっても以下に示す 3 つの要素“(1)生産効率”、“(2)歩留まり率”、“(3)塗着効率”は共通したポイントであり、企業にとってこの 3 つの要素は連鎖した関係性を持つことから、工業塗装のうえではあらゆる環境下においてもそのバランスが重要となる。

(1) 生産効率

塗装のみならず、産業では一貫して“生産効率”が重視される。これは生産性が向上するだけでなく人件費やユーティリティなどの

コストの浪費も抑えられるためであり、つまり企業として生産効率は利益改善に直結するためである。

塗装において生産効率を向上させるためには“安定した塗装品質”も重要である。“手吹き塗装”の場合は人によって処理の速さも品質にもバラツキが発生しやすい。手吹き塗装は、経験者ほど“安定した塗装品質”を“手早く処理する”ための熟練した塗装技術を習熟しているが、この域に達するまでには一朝一夕とはいかないものであり、品質の可否の判断基準や限度範囲を習得する過程では失敗の経験も必要であるため、塗装実務に従事する場合においては失敗を恐れずにチャレンジを繰り返しながら経験を積み重ねていくことが肝要となる。

なお、“安定した塗装品質”とは塗装の合格品質基準を満たした良品を安定して生産することを示すが、生産効率を向上させるためには、生産効率のみならず塗装不良を低減し、良品の直行率を高めることも併せて重要である。この直行率を示した用語を“歩留まり率(%)”と称している。

(2) 歩留まり率

塗装を行うユーザーにとって、塗装の“歩留まり率(%)”の意識は重要である。

第2表 塗装不良の要因と対策一覧

	主な発生源	塗装不良の主な潜伏要素	主な塗装欠陥	主な対策例
①	外気の温湿度の変化	ワーク表面の結露 塗料の乾燥性（色差，グロス）	密着不良 仕上がり品質不良	室内を空調する 素材の保管時の物温管理
②	工場外部からの影響	外気吹き込みによる場内の乱気流	ゴミ・ブツ不良	工場内・外を隔離する (クリーンルーム化，2重シャッター等)
③	工場内環境	工場内が負圧になる 梁や周囲の設備に堆積したホコリ	ゴミ・ブツ不良	適切な給排気バランスの確保 場内の清掃管理
④	工場内の他工程の影響	工場内の他設備の影響やプラスト， 研磨等による内部で発生する要素	ゴミ・ブツ不良	工場内の設備の給排気を整備する 発生源と塗装設備の距離を離す
⑤	ワークの素材の状態	梱包材，油，汚れ，バリ，キズなど ワークの素材自体が抱える不安要素	密着不良 ゴミ・ブツ不良	前工程であらかじめ処置する 運搬方法を改善する
⑥	静電気	ワーク表面に帯電した静電気 作業者に帯電した静電気	ゴミ・ブツ不良	除塵・除電装置，洗浄など 帯電防止対策，静電服，導電靴着用
⑦	塗装ライン作業者	着衣の糸ゴミなど 手アカや皮脂汚れ	ゴミ・ブツ不良 ハジキ	静電服，導電靴などを着用 手洗い，静電気対策手袋
⑧	コンベヤー（搬送装置）	コンベヤーが起因とするゴミや油 コンベヤー上部に堆積したホコリや粉塵	ゴミ・ブツ不良	維持管理清掃，ゴミ落下防止対策 清掃や場内の乱気流対策
⑨	ハンガー	ハンガーに付着した塗料カス ワーク落下，アース不良	ゴミ・ブツ不良 塗り込み不良	適宜剥離，清掃，養生など ハンガリング見直し，汚れ防止対策
⑩	前処理工程	洗浄不良，処理不良 化成スラッジ，薬液の持ち出し	密着不良 ゴミ（化成スラッジ）不良	シャワー吐出の維持管理，pH管理 維持管理清掃，次工程への持ち出し低減
⑪	水切り乾燥	水切り不良，タレ切り不良 炉内に堆積したゴミなど	密着不良	処理条件再調整，ハンガリング改善 維持管理清掃，ゴミ対策
⑫	塗料	塗料ゴミ，コンタミ，色混じり 希釈条件，塗料粘度，レベリング	仕上がり品質不良 ゴミブツ不良	ろ過，攪拌，洗浄チェックなど 希釈条件管理，シンナー調整など
⑬	塗装機器	ノズル不具合，ノズル選定 吐出量，微粒化性能	仕上がり品質不良 スケ，タレ，ムラ	塗装装置全体の適正仕様のチェック 吐出量の安定化，機器類見直し
⑭	塗料経路	経路内コンタミ，色混じり エア噛み	ゴミ，ブツ不良 仕上がり品質不良	マテリアルフィルター採用，洗浄見直し 塗料残量チェック，攪拌機調整
⑮	塗装条件	霧化エア圧，パターンエア圧 吐出量，ガン距離	仕上がり品質不良 膜厚分布不良	良品条件の数値管理，低圧化 安定吐出，膜厚管理
⑯	自動塗装	仕上がり品質の再現性 ティーチング精度	スケ，タレ，ムラ 塗装不良	条件管理，ハンガリング改善 ティーチング修正
⑰	手吹き塗装	仕上がり品質の再現性 ワークに接触する	スケ，タレ，ムラ 塗装不良	教育，訓練，経験，習熟 吊り掛け姿や吊掛けピッチの改善
⑱	塗装ブース	陽圧/吸い込み不良，塗料ミスト飛沫 負圧/ゴミ・ホコリの引き込み	ゴミ・ブツ不良	風速測定，給排気バランス調整 ブース清掃，飛沫対策
⑲	セッティング	給排気による空間の乱流 指触乾燥不良，グロス	ゴミ・ブツ不良 ワキ，仕上がり品質不良	給排気バランス調整（塗装ブースも含む） 時間管理，清掃管理
⑳	焼き付け乾燥炉	異物の引き込み・持ち込み・循環バランス 処理温度，温度分布，処理時間	ヤニ， ゴミ・ブツ不良 乾燥不良，色変	清掃管理，ハンガー剥離，完全山形化 雰囲気温度測定，物温測定，温度分布調整

塗装後の品質検査が合格基準を満たしていればそのまま出荷できるため“直行”として歩留まり率の向上にカウントされるが、塗装不良が発生した場合はカウントされずに歩留まり率を低下させてしまうため、塗装不良はできる限り少なく抑えることが肝要となる。この歩留まり率の低下は、先の“(1)生産効率”の低下にも大きく影響を及ぼす。

一般的に塗装不良が発生した場合、リコートや挽回生産が必要となるが、この代償として必要となる時間、労力、資源、エネルギーなどは直行した場合と比較しておよそ2倍前後のコストを浪費するため、生産効率を低下させるだけでなく利益さえ損失してしまうこととなり、企業にとっては全くメリットがないことから、塗装不良低減のためには最善の対策が必要とされる。

[塗装不良に伴う浪費や利益損失]

- i. リコートに費やす時間が増えてしまい生産効率が上がらない。“生産効率低下”
- ii. 人件費を浪費して利益を損失してしまう。“人件費の浪費”
- iii. 電気やガスなどの塗装設備を稼働させるエネルギーの消費が増えてしまう。“エネルギー損失”

- iv. ムダな塗料や資材を消費して生産原価が上がってしまう。“資源の浪費”，“利益損失”

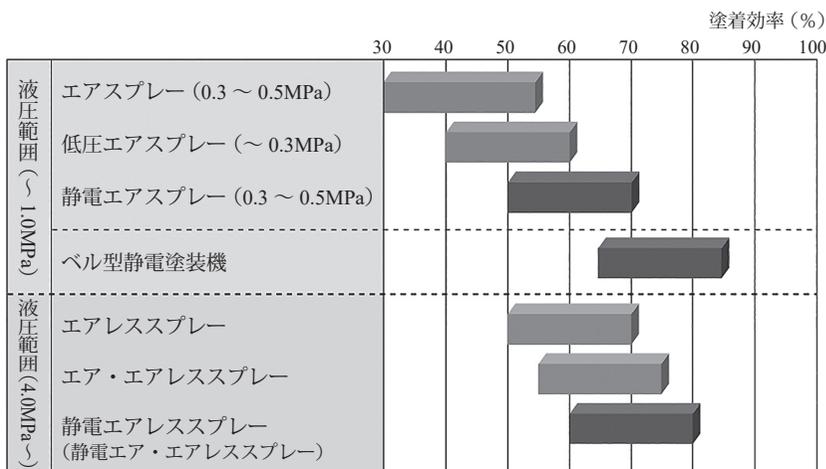
この塗装不良の要因にはユーザーの環境により異なるが、第2表に示すようなさまざまな要因が考えられる。塗装不良低減のためには不良の要因を調査のうえ管理をマニュアル化するなどの品質管理(QC:QualityControl)が必要となる(本誌2023年11月号「維持管理改善による塗装不良低減」参照)。

(3) 塗着効率

“塗着効率(%)”とは、スプレーで吐出した塗料のうちワーク表面で塗膜となる塗料の割合を示す。

たとえば、塗料中の固形分量(NV値^{※1})が30%で希釈された塗料により、1m²(1×1m)の平面上に30μm(DRY)の乾燥塗膜を必要とした時、被塗物には30μm/0.3=100μm(Wet)のウェット塗膜を平面上に塗布する必要がある。

※1 塗料固形分量(NV値) = (乾燥後の塗料分質量) / (乾燥前の塗料分質量) × 100



- ※ () 内数値は霧化するエア圧力を示す。
- ※ 塗装品目、形状、塗装条件により塗着効率の数値は変わる。
- ※ 塗膜の仕上がり要求を満たす塗装機を選ぶ必要がある。
- ※ 塗料の種類により塗装機を選ぶ必要がある。

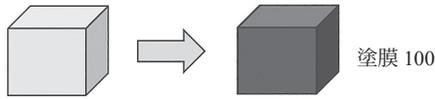
出典：日本塗装機械工業会 [CEMA]

第15図
スプレーガンの種類と塗着効率の関係

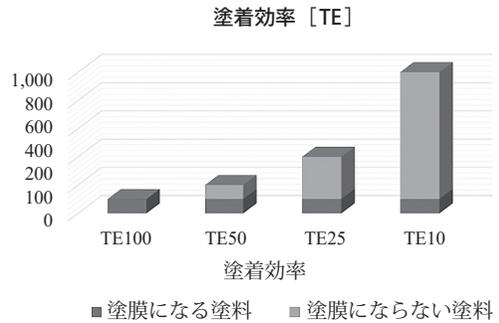
塗着効率 [TE]

※スプレーした塗料のうち塗膜になる塗料の割合

1つの製品の塗膜になる量を“100”とした時



	塗着効率			
	TE100	TE50	TE25	TE10
塗膜になる塗料	100			
塗膜にならない塗料	0	100	300	900
塗料使用量	100	200	400	1,000



第 16 図 塗着効率と塗料の使用量について

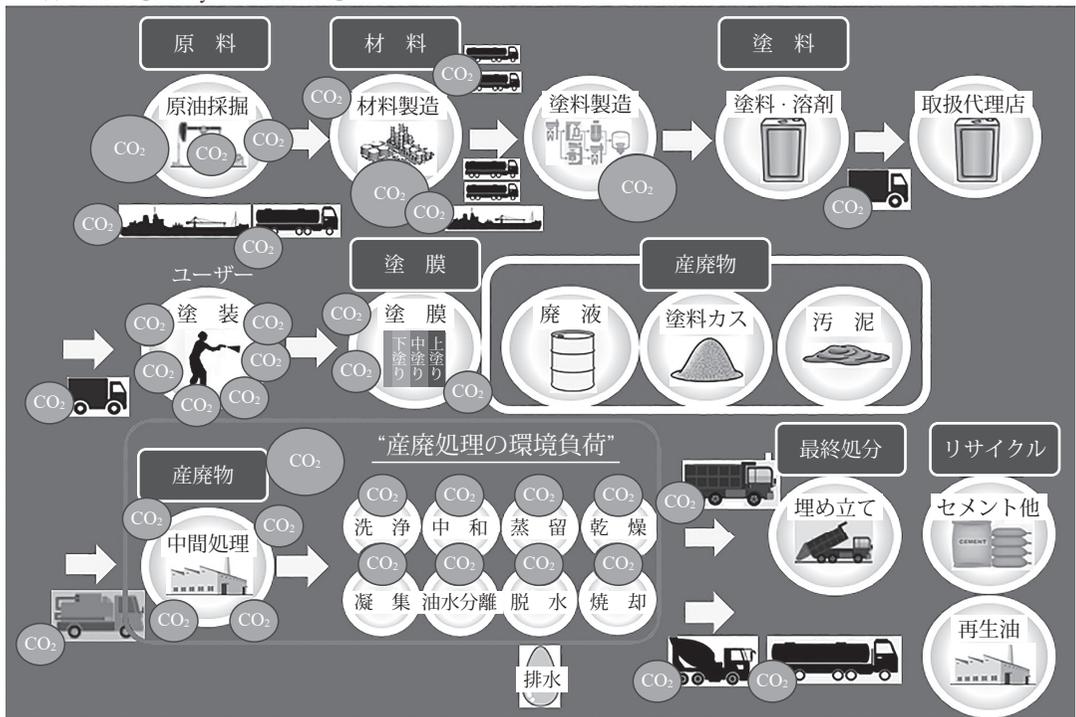
この時の平面上の塗料を容積に換算すると $1\text{m}^2 \times 100 \times 10^{-6}\text{m} = 10^{-4}\text{m}^3$ であり、平面上には $0.1\text{L} = 100\text{mL}$ (Wet) が塗膜となる必要がある。

この場合に必要な塗料使用量は、塗着効率 $TE = 100\%$ であればムダな塗料は発生しないため 100mL の塗料使用量で塗装が済むことになる。しかし、 100% の塗着効率を実現で

きるスプレー塗装の実現に向かってはかなりハードルが高いのが現状であり、実際には平面に対する塗着効率であっても第 15 図に示されるレベルの塗着効率が現実的な限界値となっている。

また、この第 15 図からは先に紹介した“エア霧化式”、“エアレス霧化式”、“回転霧化式”のスプレー方式と比較しても大きく塗着効率

塗料の LCA [Life Cycle Assessment]



第 17 図 塗料の LCA とサプライチェーン排出量 (CO₂) の関係

が異なることがわかる。

この塗着効率は第16図に示されるように、塗装に必要となる塗料使用量と大きく関係している。

たとえば「塗装の静電化によって塗着効率が、“TE25 → TE50”に向上」できた場合の改善効果としては、“塗料使用量50%削減(改善前400 → 改善後200)”できることになり、塗料コストは50%削減できる。また、塗料スラッジなどの塗膜にならなかった塗料は改善前との比では1/3(改善前300 → 改善後100)にまで減少できたことになる。

このように、塗着効率の向上を図る改善は塗料コストが削減できるばかりでなく、産廃削減、維持管理コスト削減の他、気候変動などの環境負荷低減や地球資源の節約としても大きな効果が得られることになる。これは、第17図に示す塗料のLCAからもわかるように、“塗膜になり得なかった塗料”は、塗料が製造されるまでの過程やユーザーの塗装現場だけでなく、塗装現場で発生した産業廃棄物として中間処理場から最終処分場に至るまでの廃棄におけるサプライチェーン排出量^{*2}を大きくしていることがわかる。ここからもわかる通り、“塗着効率の向上”はカーボンニュートラルに向けた取組と直結していることから工業塗装にとって重要な課題となっている。

※2 サプライチェーン排出量：サプライチェーンとは、原料調達・製造・物流・販売・廃棄に至るまでの一連の流れ全体を示し、サプライチェーン排出量はこの一連の流れにより発生したCO₂を主とする温室効果ガスの排出量の合計を示す。「気候変動対策を盛り込んだ企業経営(脱炭素経営)」に向けた取組として、すでに上場企業をはじめにサ

プライチェーン排出量を“算定し報告する”(スコープ3の開示義務化)というグローバルスタンダードの実践がスタートしている中、今後は中小企業においてもサプライチェーンの一部を担う企業として、この排出量の算定および情報開示が義務付けられることも考えられる。

10. 今後の工業塗装の展望

近代産業は、SDGs(持続可能な開発目標)にも示された指針に沿って、高度経済成長期を経て大量生産、大量消費、大量廃棄をもたらした直線型社会から脱却し、新たな循環型社会に向けた取組が急務となっている。こうした中でも工業塗装は、特に気候変動やサプライチェーンの面で多くの課題を抱えた業界であり、カーボンニュートラル(脱炭素社会)の実現のためにも多くを改革していかなければならない業界となる。そのため工業塗装はこの新たな循環型社会に向けて、これまでの塗装に満足することなく、あらゆる効率改善を追求していくことが肝要となっている。塗装において“生産効率”、“歩留まり率”、“塗着効率”などあらゆる効率100%を目標とした時には現状ではハードルが高すぎることもあるが、これは“まだまだ改善や対策が尽きない”という建設的な捉え方もできる。この改善や対策へのチャレンジ精神こそがこれからの工業塗装の存続と発展につなげていくためのスローガンとなり、この循環型社会の実現に向けてフレッシューズが企業にも社会にも大きく貢献していただけることを期待したい。また、これからの工業塗装業界においてこの改善や見直しが新たな市場として発展し、日本の経済発展に寄与していくことも併せて期待したい。