

塗装技術強化への取組み

竹本洋平* 藤原淳史*
柴田洋平* 満田理佐*
澤田準平*

Initiatives to Strengthen of Painting Technology

Yohei Takemoto, Yohei Shibata, Jumpei Sawada, Atsushi Fujiwara, Risa Mitsuda

要 旨

三菱電機では、製品に付加価値を付与する目的で、タービン発電機等の大型構造物から板金筐体(きょうたい)等の金属部品、空調機用の意匠パネルの樹脂部品等、多岐にわたる国内及び海外生産品を対象に塗装技術を適用している。各生産拠点で適正な塗装品質を安定して確保することは製品の寿命・デザイン性を確保する上で重要である。

当社は塗装技術を製造基盤技術と位置付け、2009年度から塗装品質の向上・安定化と技術者育成を目的とした技術の深掘りと形式知共有化を進め、技術の蓄積と海外も含めた製造現場への展開を継続的に行っている。塗装技術の強化活動と成果の製品適用による品質向上・生産安定化の活動事例を次に挙げる。

(1) 塗装技術力の強化

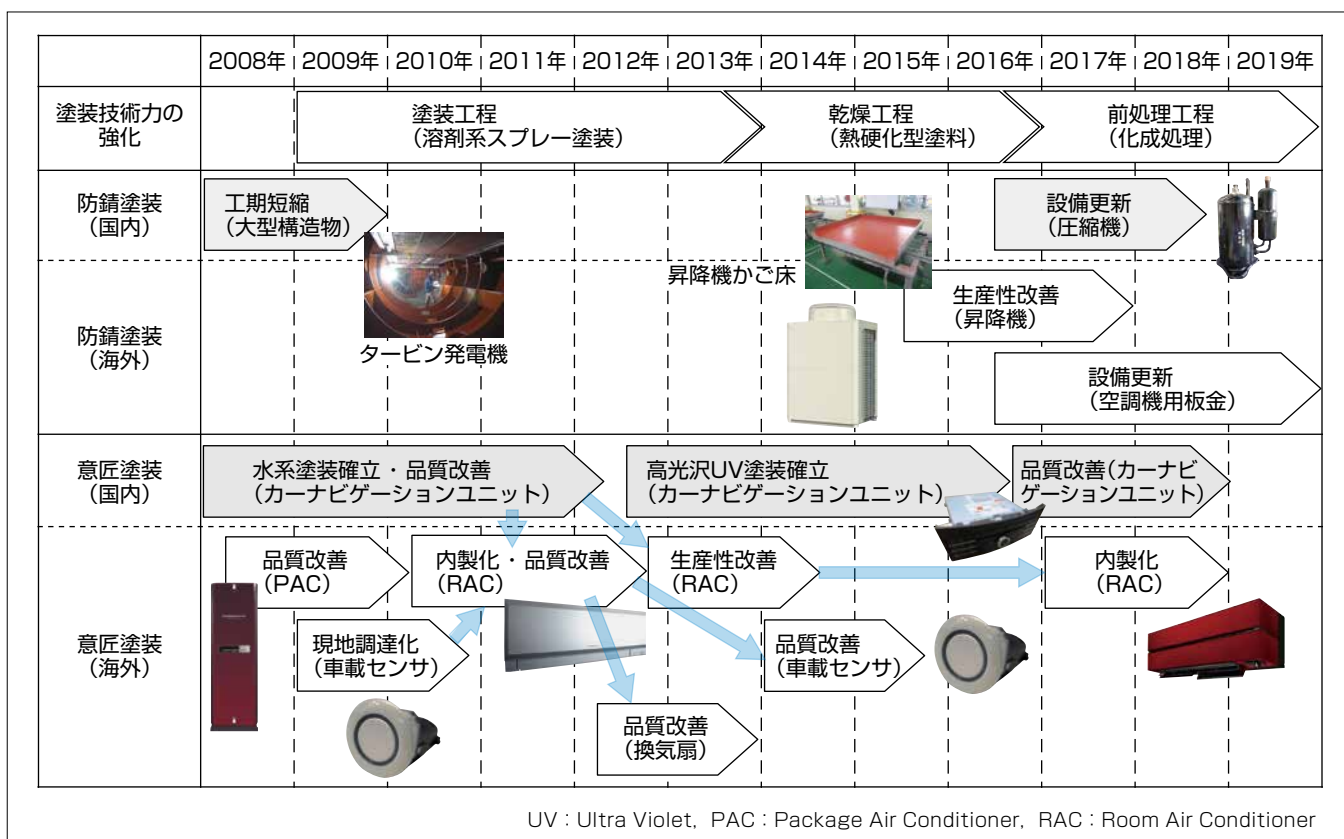
塗装の各工程を物理/化学現象として把握、技術に落とし込み、塗装技術の蓄積と製造現場への展開をしている。

(2) 防錆塗装技術の強化と品質安定化

被塗装物の材質や表面状態・寸法に応じた塗装工法と求められる性能を原理検証・現物評価の両面から把握し、その安定化を推進している。

(3) 意匠塗装技術の強化と品質安定化

海外工場での生産品質を確保するため、形式知化した技術を用いた製造条件の確立や塗装品質の安定化を推進し、また、環境に優しい水系塗装技術を確立し、製品へ適用している。



当社の塗装技術強化への取組み状況

当社では、塗装技術力の強化活動として、塗装の各工程を物理/化学現象として把握・分析し、技術として蓄積し、国内・海外の製造現場へ展開して塗装品質を向上させる活動を進めている。また、タービン発電機や昇降機等の大型構造物から空調機用の圧縮機、板金筐体等の金属部品、空調機用の意匠パネル、カーナビゲーションユニット、車載センサ等の樹脂部品を対象に塗装技術を適用しており、製品の付加価値の向上に寄与している。

1. ま え が き

当社では、製品に耐食性、意匠性等の付加価値を付与する目的で、タービン発電機、昇降機等の大型構造物から空調機用の圧縮機、板金筐体等の金属部品、空調機用の意匠パネル、カーナビゲーションユニット、車載センサの樹脂部品等、多岐にわたる国内及び海外生産品を対象に、塗装技術を適用している。国内・海外の各生産拠点で適正な品質の塗装を施すことは、製品の寿命・デザイン性を確保する上で重要である。

当社は塗装技術を製造基盤技術と位置付け、2009年度から塗装品質の向上・安定化と技術者育成を目的とした技術の深掘りと技術の形式知共有化を進め、技術の蓄積と海外も含めた製造現場への展開を継続的に行っている。

本稿では、当社の塗装技術力の強化と品質安定化に向けた活動に関して、この10年間の活動事例について述べる。

2. 塗装技術力の強化

当社では、製品の品質向上や技術者育成のため、塗装要素技術の深掘りと技術の形式知共有化を目的とした活動を2009年度から行っている。塗装は官能作業と捉えられることも多く、作業品質が技能に依存する部分があり、品質の安定化が難しい技術であると一般に言われている。また、品質の確認には大掛かりな装置や破壊検査が必要な場合も多く、製造現場での物理/化学分析が困難であるため、製造品質の安定化が重要なポイントとなる。

そこで、塗装の各工程(前処理工程、塗装工程、乾燥工程)を物理/化学現象として把握・分析し、技術に落とし込むことで塗装技術として蓄積し、製造現場へ展開する活動を進めている。次にこれまでの活動事例を述べる。

2.1 前処理工程(リン酸亜鉛化成処理)

前処理工程は塗膜の付着強度や耐食性に関係し、塗膜剥離や腐食等の品質不具合の原因になりやすい。しかし、工程内で不具合を検出することが難しく、不具合を発生させないプロセス管理が重要である。塗装の前処理として広く採用される化成処理であるリン酸亜鉛化成処理を中心に技術の深化を進めている。化成処理を化学反応として理解し、原理検証を行った結果を図1に示す。同一の処理液で処理条件を変化させ、形成したリン酸亜鉛皮膜をSEM(Scanning Electron Microscope)観察した結果である。プロセ

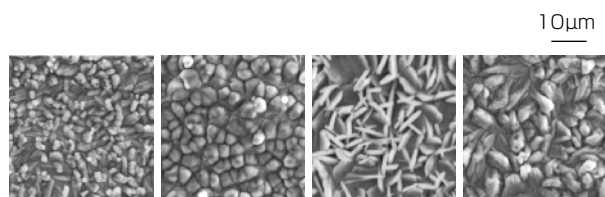


図1. リン酸亜鉛皮膜のSEM観察像(2,000倍)

スと処理条件が皮膜の結晶成長に与える影響を定量的に把握することで結晶性状の制御が可能になった。また、腐食促進試験によって皮膜の性状が塗装後の耐食性に与える影響を体系化している。

2.2 塗装工程(溶剤系塗料のスプレー塗装)

溶剤系塗料のスプレー塗装は広く用いられる塗装方法であるが、スプレー塗装での圧縮空気や塗料の流れ、塗料微粒化等の塗装現象は、塗着効率、塗膜の平滑性に影響を与えるにもかかわらず理論的な解明は乏しく、技能者の感覚に依存する部分が多い工法である。技能を技術として確立するため、スプレー塗装プロセスである塗料の調整、塗装ガンの選定、微粒化、塗着、平滑化に対して、塗料粘度やエア圧の変化、スプレーミスト径、塗着効率等を実測し、現象把握による技術の確立を試みた⁽¹⁾。

塗膜表面の平滑化を検討するため、希釈率の異なる塗料を噴霧し、ミストの塗着～ぬれ拡がりの様子を高速カメラで撮影した結果を図2に示す。塗膜表面を平滑化する状態変化の時間依存性や影響因子等を定量的に把握した。

2.3 乾燥工程(溶剤系熱硬化型塗料)

塗膜が母材に付着していることは機能発現の前提条件である。そのため、製品の品質管理で、塗膜の付着強度の特性を把握することは極めて重要であるが、定量的に測定する評価手法があまりなく、付着強度の評価手法は碁盤目試験など定性的な手法が一般的である⁽²⁾。

塗膜の付着強度は経験上、硬化条件で変動することが知られている。塗装の乾燥工程は熱風乾燥方式が一般的であり、板厚によって硬化条件がばらつくことが予想される。そこで、硬化時の温度の影響度を把握するために、塗膜の付着強度の測定手法としてSAICAS(Surface And Interfacial Cutting Analysis System)法を用いることで硬化温度と付着強度の関係を明らかにした(図3)。さらには、その影響因子として内部応力に着目し、遊離塗膜の物性値を測定することで硬化した塗膜に残留する内部応力を導出した(図4)。これによって、硬化温度が高い場合には、内部応力が增大することで付着強度が低下する傾向を確認し、塗装乾燥工程の温度管理の重要性を明らかにした⁽³⁾。

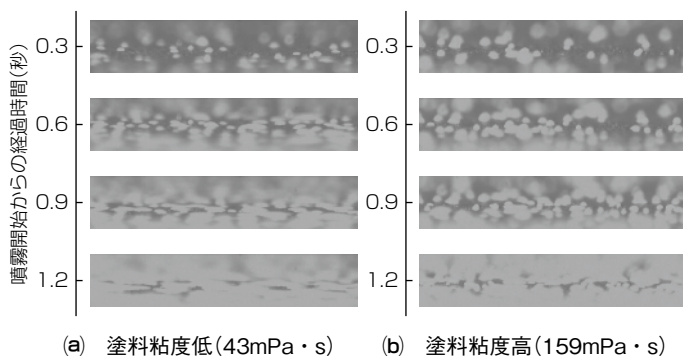


図2. 塗料塗着と流動の高速カメラ画像

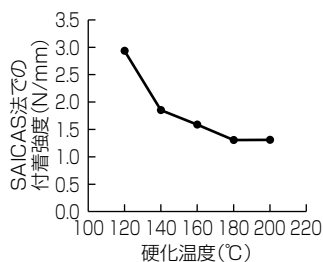


図3. 硬化温度と付着強度

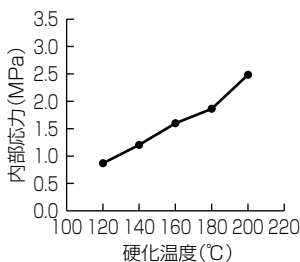


図4. 硬化温度と内部応力

3. 防錆塗装

当社では、タービン発電機等の大型構造物から板金筐体等の金属部品を対象として防錆塗装を採用している。製品の材質や寸法によって求められる塗装品質や工法が異なり、個々の製品に応じて必要な機能を把握し、その品質を確保できる塗装条件・プロセスを決定し、品質の安定化を進めている。

3.1 大型構造物防錆塗装

大型構造物の大きいものは10mを超えるので乾燥炉による強制乾燥ではなく、1液乾燥塗料を使用した常温自然乾燥で塗装品質を確保する必要がある。防錆塗装では厚膜が要求されることが多く、場合によって100μm以上の塗装膜厚が必要となるため、重ね塗りが必要であり、硬化時間が長くて作業が長期化するという課題がある。

3.1.1 温度上昇時の腐食反応性

腐食反応には水と酸素が不可欠である。大気環境では水の供給が律速になり、相対湿度80%以上で進行しやすい。ISO9223では“ぬれ時間：0℃以上かつ相対湿度80%以上の時間”と定義し、腐食速度に影響を及ぼす因子として挙げている。ぬれ時間(Time of Wetness：TOW)は式(1)で得られる。

$$TOW = 8766 \times P(RH) \times P(T) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、P(RH)は相対湿度(RH)による確率係数、P(T)は温度(T)による確率係数を各々示す。これを用い、内外部両面の塗装を必要とする密閉型構造物の外部と内部の腐食反応性を比較した結果を表1に示す。内部は運転時に50℃程度まで温度上昇するため相対湿度とぬれ時間が低下する。反応性を論じる上で重要な速度定数は、概算結果が近い値を取ったため10℃2倍則で考えた。その結果、構造物外部の反応性を1とすると、内部は0.06と反応性が非常に低く、塗装仕様を見直す余地があることを確認した。複合サイクルと塩水噴霧試験の結果を基に、耐食性の確保に必要な塗装膜厚に調整し、噴霧塗装作業工数を22%削減した。

3.1.2 腐食電位測定

内部に雨水等が浸入し、塗装膜が吸水して素地に水が到達した場合、腐食反応の進行に加え、水の浸透による塗装膜の剥離が懸念される。管理方法の指標とするため、素地

表1. 腐食反応性の比較

	温度(°C)	相対湿度(%)	P(T)	P(RH)	TOW	速度定数	反応性
外部	30	90	0.999	0.859	7522	1	1.00
内部	50	31	0.999	0.012	105	4	0.06

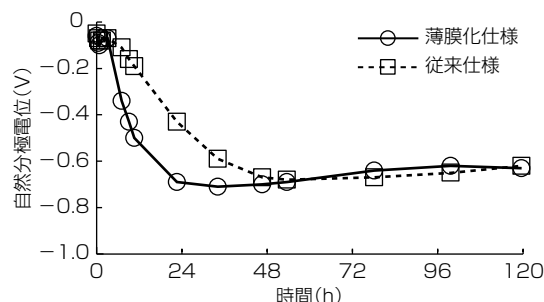


図5. 腐食電位の測定結果

に水が到達する時間を測定した。参照電極に銀/塩化銀電極を用いた4電極式の腐食電位測定で評価した。

図5に測定結果を示す。薄膜化仕様では従来仕様の約半分の時間で塗膜が吸水した。これに基づき、24時間以上水と接触することがないように、管理方法の参考にした。

3.2 空調機用圧縮機の防錆塗装

空調機用圧縮機は、腐食の影響因子である水との接触の機会は限定的であり、それに応じた耐力設計がなされてきた。しかし、近年の使用環境及び用途の拡大から、次世代圧縮機の塗装仕様を確立する必要があった。圧縮機は溶接部や局所的な薄肉部を持つ複雑形状の塗装品であるため、均一な塗膜を各部位に形成し、要求される耐食性を圧縮機全体に付与することが課題である。また、熱容量が大きい組立品を塗装する工程となるため、塗装工程の省エネルギー化が課題である。

3.2.1 耐食性の強化

当社は、2018年に一部の機種を対象とした圧縮機用の塗装ラインを立ち上げた。ここで、圧縮機の製造工程を図6に示す。まず、耐食性の強化を目的として化成処理剤の選定と新塗料の開発を実施した。化成処理剤にはジルコニウム化成処理剤を採用することで、塗装品の耐食性と塗装設備の省スペース性・メンテナンス性の両立を実現した。塗装工程では、複雑形状である圧縮機を均一に塗装することが必要であり、特に、薄肉である足部のエッジ部での膜厚の確保が必要であった。そのため、均一塗装性に優れる電着塗装を採用し、さらに、塗料中の樹脂の配合を調整し、塗料の硬化初期での粘度の低下を抑制することでエッジ部の膜厚を確保した(図7)。

3.2.2 塗装・乾燥工程の省エネルギー化

新規に塗装ラインを立ち上げるに当たり、工程の省エネルギー化にも配慮した。圧縮機は、厚肉のシェルの内部に電装品を持っており、熱容量が大きいため塗装・乾燥時に多量のエネルギーを消費する。また、電着塗料は、顔料

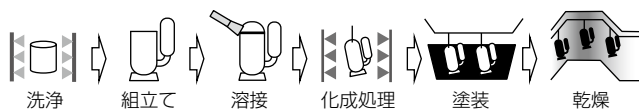


図6. 圧縮機の塗装工程

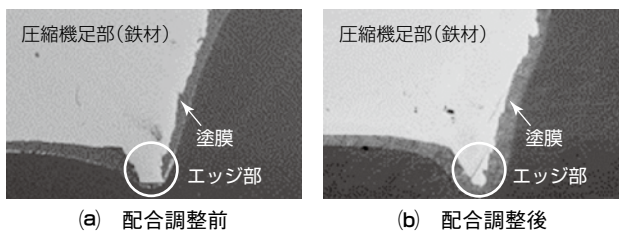


図7. 圧縮機足部の断面観察像

や樹脂の沈降を抑制するため、大型の塗料槽を常時攪拌(かくはん)することが要求される。耐食性を維持したまま、塗料に低温硬化・低攪拌の機能を付与することで、乾燥炉及び電着槽の省エネルギー化を実現した。

これらによって、圧縮機全体への耐食性の付与と塗装工程の省エネルギー化を同時に実現した。

4. 意匠塗装

当社では、空調機用意匠パネル等の多くの樹脂部品を対象に製品付加価値の向上を目的とした意匠塗装を行っている。意匠塗装では、溶剤塗装のほかに、環境負荷の低減が可能な水系塗装の導入も積極的に行っている。また、近年のグローバル化に伴い、当社の意匠塗装品は海外工場での生産も多く、海外現地を考慮した製造条件の確立や塗装品質の安定化を進めている。

4.1 空調機用樹脂部品の溶剤塗装

当社の海外向け空調機の生産拠点である、タイのMCP社では、RAC室内機の意匠性を高めるため、樹脂部品の意匠塗装をキーとなる生産技術と位置付け、2010年から意匠塗装を内製化している。内製化に際し、タイ現地を考慮した製造ライン・プロセス設計と品質の維持・管理が課題であった。

4.1.1 海外に対応したライン設計と生産立ち上げ

現地作業員の身長・体格を考慮した作業高さ(作業性)、現地のエネルギー事情に基づいた塗装ブース・ライン・乾燥炉の設計、塗料の顔料であるアルミフレークの分散性と配向性から色むらが生じにくい塗料の選定、また、現地調達が可能な治具・備品を基にしたプロセス設計と品質の作り込みを行った。生産開始後は、現状分析→課題抽出と評価→改善案の立案と実行→効果の把握の一連の改善サイクルを現地メンバーと共同で実践し、生産性・品質改善活動の必要性や進め方を個々のメンバーに浸透させ、自主的な組織活動としての独り立ちを促進した。

4.1.2 大型樹脂部品に対応した新工法の開発

海外工場では作業員の離職が問題となる。特に手吹き塗

装の場合、作業員の育成に時間を要し、また、塗装作業員間で品質のばらつきが生じる。最終的には人に左右されない生産効率・生産品質の向上が課題となり、この課題に対応するため、自動塗装システムとして、大型部品への適用が困難とされるスピンドル塗装を採用した。特有の課題である塗装むらと膜厚のばらつきに対し、手吹き塗装と比較して、塗料を低粘度化して吐出量・霧化圧を増加させ、広範囲に噴霧することで極薄膜を多層成膜し、1層当たりのばらつきを平均化して解決した。また、同時に求められていた生産性の向上と部分塗装品への対応として、塗装の上下動とスピンドルの回転動作を別機構で分担し、部分塗装も同一システムで処理できる方式にすることで、塗装動作の高速化と安定化を可能にし、塗装時間を12%短縮した(図8)。

4.2 車載センサ用の高精度溶剤塗装

当社の海外工場であるタイのMETA社では車載センサを製造している。この製品は車体バンパーに取り付けられる部品であり、塗装色をバンパーの色に合わせなければならない。このため、塗装色に要求される管理範囲は狭く、塗装工程で塗装色を高精度に制御できる品質の作り込みが課題である。

次に述べる三つの対策によって、ばらつきが小さく、規格中央値で成膜可能な塗装工程を確立し、品質の安定化を実現している。

4.2.1 塗装膜厚の均一化

車載センサの塗装に使用される塗料は、クリア塗料にアルミフレーク顔料を含んだ光透過性の塗料であり、膜厚に依存して塗装色の変動するため、塗装色を高精度に制御するには膜厚の均一化が必要である。そこで、塗装ステージ上の膜厚分布を実測、その結果をフィードバックし、塗装ロボットの動作プログラムを適正化することで膜厚分布を均一化し、塗装色のばらつきを低減した(図9)。

4.2.2 塗料粘度・膜厚の適正化

塗装色は膜厚のほか、塗膜内部でのアルミフレーク顔料の配向性に依存して変動する。塗装色のばらつきを低減するには、顔料配向性のばらつきを抑制する必要がある。そこで、理論計算によって、塗料中の顔料が沈降する速度を見積もり、顔料の配向性がばらつく要因を塗料粘度、膜厚と推定し、塗料粘度の増加と塗装膜厚の薄膜化によって、アルミフレーク顔料の配向性を均一化し、更なる塗装色のばらつき抑制を実現している(図9)。

4.2.3 塗料の調整

塗装色の平均値を規格中央値に合わせ込むため、塗料メーカーと協同して塗料を調色した。

4.3 水系塗料の量産品への適用

近年の環境意識の高まりから、製造業に対しても、環境負荷の小さい塗装工程の構築が望まれており、当社で

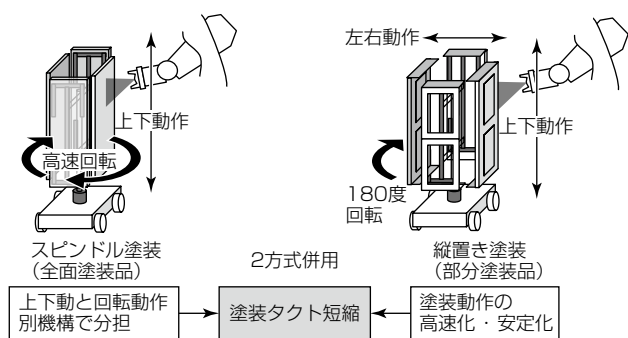


図8. 大型樹脂部品のスピンドル塗装

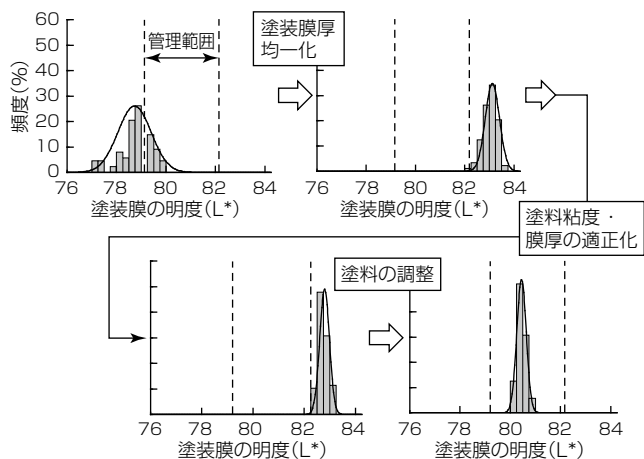


図9. 塗装色のばらつき低減効果

は、2009年から揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds : VOC) の排出が低減可能な水系塗料を量産品に適用している。水系塗料では、従来、粘度調整に用いていたシンナーの大半を水で代替しており、VOC発生量を約80%削減可能である。一方で、水系塗料では、粘度調整に水を用いることから塗料の表面張力が大きいため、被塗装物に対するぬれ性が低下し(図10)、塗装剥離が発生しやすいという課題がある。また、樹脂に対する相溶性がないことに起因して手直し塗装が不可能であるため、不良発生時の廃棄ロスが大きいという課題がある。

4.3.1 塗膜の付着強度の向上

塗装剥離防止の観点から、被塗装物である樹脂成形品に対して汚染物の除去によってぬれ性を改善する脱脂工程と、樹脂成形品の表面を改質して表面を活性化するコロナ処理工程を持つ製造工程を構築した。塗料側の高い表面張力に起因するぬれ性の低下を、被塗装物側の表面を清浄化・活性化することで、被塗装物表面での塗料のぬれ性低下を改善し、塗膜の付着強度を向上させた。

4.3.2 廃棄ロスの抑制

水系塗装では手直し塗装が不可能であることから、高い直行率が必要とされる。当社では、水系塗装を量産品に適用する上で、塗装での頻出不良であるゴミが塗膜面に付着

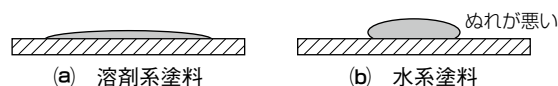


図10. 溶剤系塗料と水系塗料のぬれ性の比較

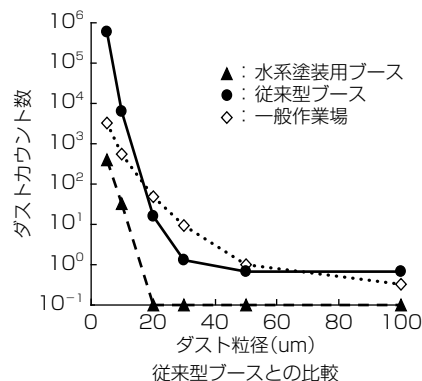


図11. ダストカウント数

して発生する外観不良に着目し、この不良を極力発生させない設備仕様を検討した。代表的な仕様として、ライン全体(脱脂→塗装ブース→焼付け乾燥炉)のクリーンルーム化と塗装ブース内の気流制御が挙げられる。これらの対策によって、ラインへのゴミの侵入を抑制し、また、ゴミの原因となる、塗装ブース内での塗装ミストを効率的に除去した。その結果、従来型ブースと比較して高い清浄度を確保し(図11)、溶剤塗料と同等の不良率を達成。水系塗装に特有の材料ロスを抑制している。

5. むすび

塗装工程は多量のマンパワー、エネルギー、スペースを使用する工程であり、その基本的な構成は数十年前から大きく変わっていない。今後の社会情勢を考慮すると、自動化、省エネルギー化、省スペース化の要求がますます厳しくなることが予想され、本稿で述べたようなプロセス技術の開発に加えて、AI(Artificial Intelligence)・IoT(Internet of Things)技術の活用、前後工程との連結といった設備・システム技術の開発と塗装工程への適用が不可欠と考える。今後は、現状の改善だけでなく、塗装工程の革新にも取り組み、持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 澤田準平, ほか: 二流体スプレー塗装 噴霧塗料ミスト径の予測, 第28回塗料・塗装研究発表会講演予稿集, 46~50 (2013)
- (2) 日本工業規格JIS K 5600-5-6: 付着性(クロスカット法) (2008)
- (3) 藤原淳史, ほか: 塗膜の硬化温度と付着力との相関性の評価, 第34回塗料・塗装研究発表会講演予稿集, 20~24 (2019)