

環境負荷低減に貢献する革新的塗装技術

Innovative Coating Technology for Reducing Environmental Impacts



中川文寛^① Fumihiro Nakagawa
 足立尚義^② Takayoshi Adachi
 川本英樹^{③※} Hideki Kawamoto
 朝戸達健^④ Tatsutoshi Asato
 内藤義貴^⑤ Yoshiaki Naito
 石友真^⑥ Yuma Ishi

川崎重工グループはカーボンニュートラルへの取組みとしてScope1,2を2030年、Scope3を2040年までに完了することを目標としている。製品製造中の塗装工程のみならず、塗料の製造や物流に関連して多くのCO₂を排出しており、塗料の廃棄量を減らす必要がある。環境負荷低減への取組みとして塗料の廃棄量削減を目指し、洗浄性の高い二液混合塗装機や高効率な塗装を実現するための複雑な塗装ロボットティングをVR技術で簡単に実現できるシステムにより、革新的な塗装技術を開発した。

The Kawasaki Heavy Industries Group is committed to achieving carbon neutrality, targeting Scope 1 and 2 emissions by 2030 and Scope 3 by 2040. Given the significant CO₂ emissions from our coating processes during product manufacturing and the production and logistics of coatings, minimizing coating waste is essential. To achieve this objective as part of our efforts to reduce environmental impacts, we have developed an innovative coating technology. This includes a two-component coating machine that is easy to clean and a virtual reality system that simplifies teaching complex operations to coating robots for highly efficient coating.

まえがき

塗装職場では水・蒸気・都市ガス・電気など多くのエネルギーを使用して生産を行っている。カーボンニュートラルを実現する上で、これらのエネルギー使用量を削減することは重要である。さらに、塗装職場で使用する塗料を減らすこと、塗料の製造や物流を含めたライフサイクル全体を考えたカーボンニュートラルへの取組みとして重要である。川崎重工グループはカーボンニュートラルへの取組みとしてScope1,2を2030年、Scope3を2040年までに完了することを目標としており、カワサキモータースでは、塗料の廃棄量削減を目指している。

1 塗装工程での課題

塗装には、図1に示すように大きく分けて2つの廃棄口が発生する。1つ目は調合塗料の廃棄である。モーター サイクルの樹脂カウリングや燃料タンクには二液硬化型の塗料を使用しており、主剤と硬化剤を混合し低温の乾燥炉で硬化するように設計している。デメリットとして常温でも硬化反応が進むことがあげられ、1日20回程度の色替え

が必要な塗装職場では、日々多くの塗料を廃棄している。2つ目は噴霧した塗料の廃棄である。塗装機から噴霧された塗料に対する被塗物への付着量を示す塗着効率は、塗装ロボットによる静電塗装で約40~50%、手作業による非静電塗装ではわずか10%程度となっている。付着しなかった塗料はそのまま廃棄されることになる。



図1 塗装工程で生じる廃棄
Fig. 1 Waste from a coating process

2 塗料廃棄量削減に向けた二液混合塗装機開発

二液硬化型の塗料は調合した塗料が余ったとしても翌日に使うことができないため、日々洗浄および廃棄する必要があり、二液混合塗装機を導入することが一般的である。ただし、当社のようにさまざまな塗料を扱う職場においては、従来の二液混合塗装機では安定した品質で塗装することが難しいという問題がある。

(1) 従来の二液混合塗装機の課題

(i) 洗浄性の課題

一般的な二液混合塗装機であるベル型静電塗装機の断面図を図2に示す。図中のフィードチューブから塗料が供給され、高速回転しているベルカップで塗料が霧化される。図3に示すスタティックミキサーが塗装機のフィードチューブに内蔵されており、主剤と硬化剤がスタティックミキサーを通して混合攪拌できる仕組みとなっている。しかし、スタティックミキサーは複数の複雑な形状の羽が備わっているため、洗浄性が悪く洗浄溶剤の消費量増加や洗浄不足による塗料カスの蓄積が起因の塗装不良が発生する可能性が高くなる。

(ii) 混合性の課題

主剤と硬化剤の供給経路を図4に示す。主剤経路の途中から硬化剤経路が繋がっている仕組みとなっている。主剤と硬化剤の供給圧力が同程度であれば問題とならないが、硬化剤の圧力が弱くなると硬化剤を投入できなくなり硬化

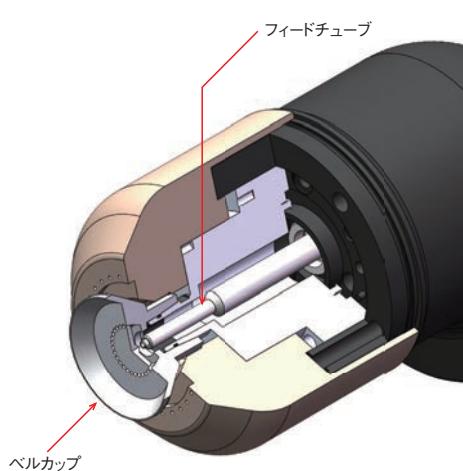


図2 ベル型静電塗装機の断面図

Fig. 2 Section of a Electrostatic rotary atomization bell



図3 塗装機に内蔵されたスタティックミキサー

Fig. 3 Built-in static mixer of a coating machine

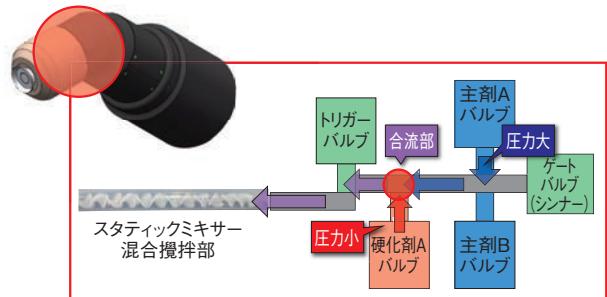


図4 塗装機内部の主剤・硬化剤供給経路

Fig. 4 Feeding paths for main and catalyst inside a coating machine

不良の原因となる。自動車産業の塗料のように主剤と硬化剤の割合が3対1で固定されていれば問題とならないが、当社が扱う塗料は3対1から11対1まで多種多様である。特に硬化剤の割合が小さい条件では、供給圧力を一定に保ちながら微量の硬化剤を供給することが難しく硬化不良となる。

(2) 先端二液混合塗装機の開発

新しい二液混合塗装機の開発では、従来とは異なる流体力学的な発想を基にした革新的な混合機能によって、従来型の課題を克服した¹⁾。

ベル型静電塗装機は内部に二重管構造のフィードチューブがあり、中心部に塗料、外側部に洗浄溶剤が供給される。この二重管構造のフィードチューブに着目して開発したフィードチューブを図5に示す。二重管構造のフィードチューブにテーパー型のノズルキャップを取り付けたシンプルな構造である。この構造では二重管の中心部を硬化剤、外側部に主剤を投入し、ノズルキャップ内で合流させ、ノズルキャップの断面積が徐々に絞られる事により流速が早くなり互いに混ざり合うことを期待した。

本構造の有効性を検証するために、2パターンの数値流体力学(CFD)解析を行った。検証1では二重管構造のフィードチューブの中心部に硬化剤、外側部に主剤を投入したケースとし、検証2は検証1と同条件でフィードチューブ先端にノズルキャップを取り付けたケースである。解

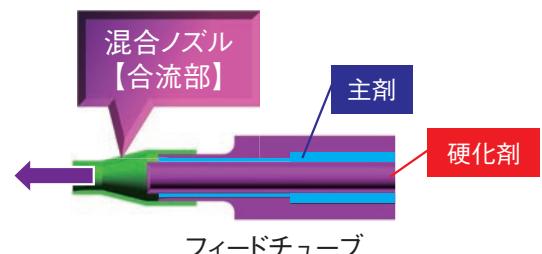


図5 開発したフィードチューブ

Fig. 5 Paint feed tube developed by Kawasaki Motors.

析の結果を図6に示す。硬化剤が赤色、主剤が青色、混合状態が良好な部分を白色で示している。図6(a)に示すように検証1では高速回転するベルカップに衝突してから主剤と硬化剤が混合し始めているのに対し、図6(b)に示すように検証2ではノズル内部で混合が始まると、ノズル出口では十分に混合されていることがわかる。この結果から主剤と硬化剤は両者の境界面で流速差によるせん断力が発生し、さらにノズルによって流れが加速されることで両者の混合が促進されていると推測される。

本解析結果を元に塗装機メーカーと共同で開発した。開発した塗装機の断面図を図7に示す。

本構造はスタティックミキサーが不要であり、フィードチューブ先端にノズルキャップが追加された極めて簡単な

構造であるため洗浄性に優れている。そのため塗装不良の懼れがない。また、主剤経路と硬化剤経路の合流部がノズル内部であるため、流速差を持つ2液のせん断力で両者が混合されることから、従来のように厳密に供給圧力を揃える必要がなくなった。

(3) 導入事例

本塗装機は当社グループのグローバルスタンダードの塗装機として設定し、順次国内外の拠点へ展開する予定である。現在までに日本の樹脂塗装工場とメキシコの樹脂塗装工場(図8)で運用しており、調合塗料の廃棄量削減に貢献している。

また、塗装機メーカーと共同開発した塗装機であるため

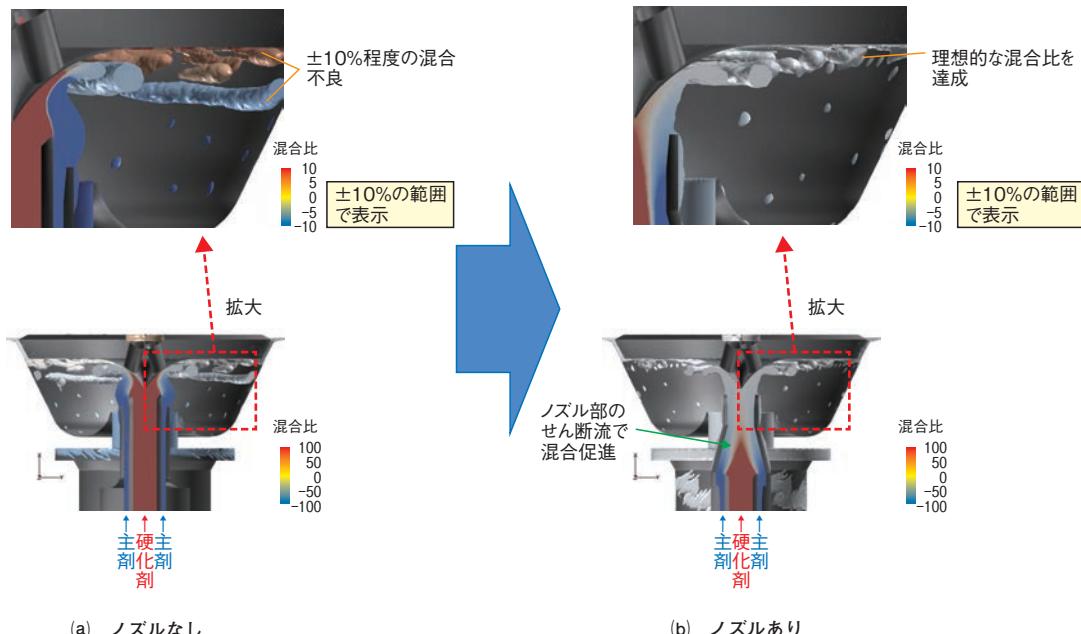


図6 CFD解析の結果
Fig. 6 CFD analysis results

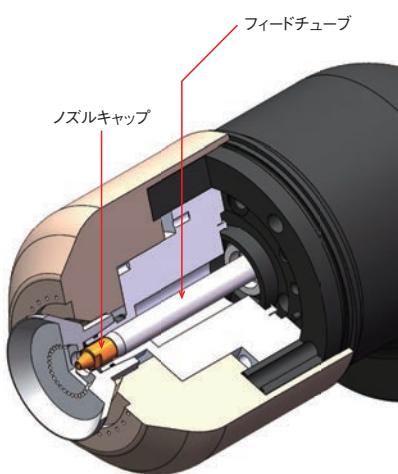


図7 先端二液混合塗装機断面図
Fig. 7 Section of the coating machine that blends two components at the tip



図8 メキシコ工場の導入事例
Fig. 8 Installation at a factory in Mexico

一般販売も開始しており、この技術を通して塗装業界全体で塗料の廃棄量を削減し、持続可能なものづくりの未来を築いていきたいと考えている。

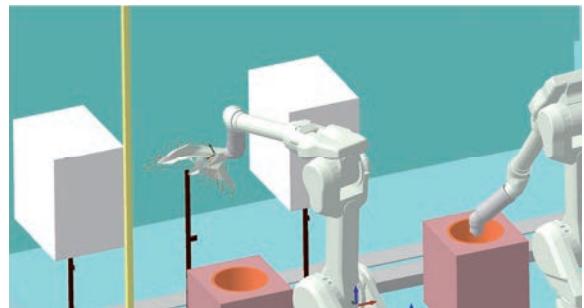
3 塗装時の塗料廃棄量削減に向けたロボットティーチング

(1) 塗装ロボットのティーチングプログラム作成

塗装時の塗料廃棄量を削減するには、塗着効率を向上させることが最も効果的である。近年、高塗着タイプのベル型静電塗装機による近接塗装が主流になりつつあり、当社も導入を開始している。しかし、塗着効率が良い近接塗装は、塗装機と被塗物の距離を従来よりも150mm近い100mmにしなければならない。図9に示すように、塗装機を被塗物へ近づければ衝突するリスクが増加するため、ロボットをどのように動かすのかが重要となる。さらに、被塗物に多くの塗料が付着することで、被塗物のエッジに塗料が溜まり塗装不具合につながることから、従来と異なる軌跡でロボットを動かすティーチングプログラムを作る必要がある（図10）。すなわち高効率な塗装を実現するためには、今まで以上にロボット塗装が重要であり、塗装ロボットを巧みにティーチングするスキルが求められる。



(a) ティーチペンダントを使用したティーチング



(b) OLPを使用したティーチング

図10 塗装ロボットのティーチング手法
Fig.10 Method for teaching coating robots



(a) 従来の塗装



(b) 近接塗装

図9 高塗着塗装時の塗装機と被塗物の距離

Fig.9 Bell type coating: distance between a coating machine and an object to be coated

塗装ロボットに塗装機の運行を教える方法は図10に示すように2種類あり、現場でティーチペンダントを用いて行う方法とOLP（Off-Line Programming）を用いてティーチングする方法である。現場でティーチングを行う場合、工場の生産が終了してから行う必要があるため、夕方から夜間の作業となり生産技術員の負担が増加する。一方、パソコンを使ったOLPでは、現場の生産状況に関係なく作業ができるメリットがあるものの、1部品あたり約1日程度の時間を要することもある。そのため、簡単で効率的にティーチングプログラムを作成することが可能な新たなOLPツールが求められている。

(2) OLPを活用したティーチングの課題

OLPで作成した塗装ロボットのティーチングプログラムを最大限活用するためには、現実世界の環境（塗装ロボットの位置や被塗物の位置）とOLP内の環境を合わせなければならない。OLP内の環境と実際の環境に差異が生じている場合、ロボットの動作軌跡にも差異が生じることになり、塗着効率の良い塗装機を用いたとしても塗着効率は下がってしまう。

当社では3DCADを用いた製品設計を実施しているため、被塗物である樹脂カウリングや燃料タンクなどの部品は精度の高い3Dモデルが存在する。しかし、塗装ブースなどの設備については2D図面から製作されていることも

あり、精度の高い3Dモデルが存在しない。さらに、塗装設備は大型の構造物であるため、施工段階で図面と異なる点もあり、精度の高い3Dモデルを2D図面から作ることも難しい状況である。そこで、実際の塗装設備をLiDAR (Light Detection and Ranging) でスキャンし、そのデータから点群モデルを構築することで2D図面から作成した3Dモデルと比較し差異を確認した(図11)。

(i) 塗装ロボットの差異

点群モデルと3Dモデルの比較を図11(a)に示す。塗装設備の施工時に塗装ロボットのベースプレート設置位置が図面と若干異なる結果、塗装ロボットの設置位置にズレが生じ、塗装ロボットの塗装機と被塗物の相対位置が異なっていた。

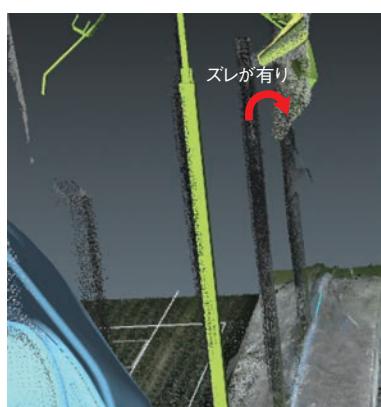
(ii) 塗装治具の差異

点群モデルと3Dモデルの比較を図11(b)に示す。塗装用の治具は3DCADを用いて設計を行っているが、被塗物の自重や重心による傾き、垂れ下がりを考慮できていなかった。さらに、現場で使用していた塗装治具は経年劣化により変形が生じ、3Dモデルと異なった状態のものが運用されていた。

OLPで使用する3Dモデルの精度を向上させるために



(a) 塗装ロボットの差異



(b) 塗装治具の差異

図11 点群モデルと3Dモデルの比較
Fig.11 Comparison of point-cloud and 3D models

は、実際の塗装設備の点群モデルを構築し比較することが重要である。その結果を元に3Dモデルを修正することで、実際の環境との差異を減らすことができた。この作業により一部の塗装ラインではOLPで作成したティーチングプログラムを現地調整なしで使用することができ、現地作業時間の大幅な削減が可能となった。

(3) 次世代ロボットティーチングシステムの開発

川崎重工業が開発したロボットの遠隔協調システムである「塗装Successor」(図12)の技術を活用して次世代ロボットティーチングシステムの開発を行った。「塗装Successor」は、ロボットの操作時にティーチペンダントの代わりとして、Wizardと呼ばれる専用のコントローラを動かすことによって、人の手の動きに合わせて直感的にロボットを遠隔操作する技術である。この技術で使用されている、コントローラのトラッキング技術を活用して人間の手の動きをロボットの教示点作成に利用し、目的の場所に正確に素早く教示点を配置することを目指すことにした。また、VR技術と組み合わせることでOLP内に作られた環境に入り込み、実際のティーチングと同じような感覚で作業できることも合わせて取り組んだ²⁾。

本システムで使用するVRデバイスは、安全のためVRゴーグルを装着していても周囲の環境が視認できるように、シースルー機能が搭載されたMeta Quest 3を選定した。パソコンにはOLPとしてVR機能に対応した特別な「K-ROSET」が導入されており、3Dモデルの入れ替えなどは「K-ROSET」を使用して操作する。「K-ROSET」はロボットの動作を高い精度で模擬可能なシミュレータである。ロボットの操作は図13のようにMeta Quest 3に付属しているコントローラを用いており、人間の手の動きでロボットを直感的に操作することができる。現実世界のロボットティーチングでは実現できないVRならではの視覚効果として、教示点や軌跡を視覚的にわかりやすく表示(図14(a))することや、ロボットと被塗物との干渉表示(図14(b))なども実現している。現在もティーチング補助



図12 塗装Successor
Fig.12 Successor Wizard

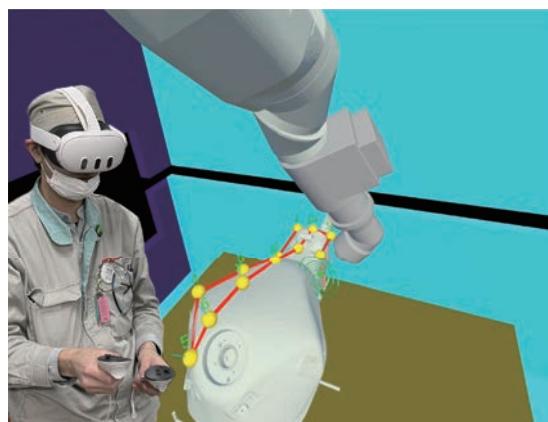
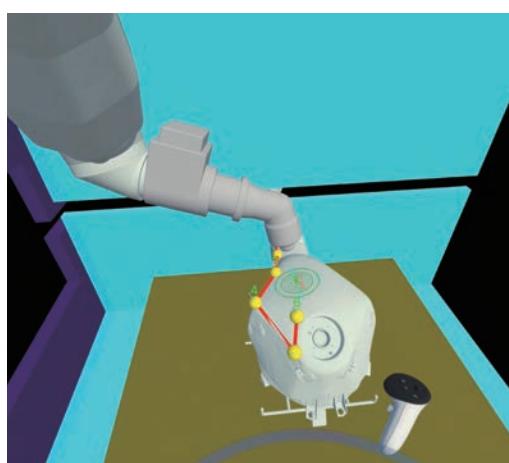


図13 選定したVRデバイス
Fig.13 Selected VR device



(a) VR表示機能：教示点や軌跡の表示



(b) VR表示機能：ロボットとの干渉
Fig.14 Example of VR display functionality

機能は開発中であり、随時機能アップする予定である。

本システムは、実際の工場設備と同じスケールの3Dモデルの中で作業ができることとロボットを自身の動作で直感的に操作が可能であるため、誰でも簡単に扱うことができるOLPとなった。現在は塗装ロボットのティーチング作業をメインに開発を進めているが、将来的にはハンドリングや溶接といった工程でも使用できるように目指していきたい。

あとがき

環境負荷低減を目指した塗装技術の開発を行い、部分的に導入を進め効果を検証してきた。今後は、このような技術を国内外の拠点に順次導入を進めることで、環境負荷低減を川崎重工グループ全体で達成する。

塗装工程は製品の保護と美観を向上するために行われるものであるが、多くのエネルギーを必要とし、また多くの廃棄物を生み出しているのが現状である。今後も地球環境への負荷低減を追求していくことで、持続可能なものづくりの未来を目指す。

参考文献

- 1) 特許 第7064657号，“塗装液混合装置及び塗装液の混合方法”
- 2) 中川：“次世代塗装ロボット教示システム Successor+VRの開発”，自動車技術協会関西支部ニュース,第62号 (2023)



中川文寛



足立尚義



川本英樹



朝戸達健



内藤義貴



石友真