

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「IoT 活用による遠隔地多品種少量生産対応型塗装システムの開発」

研究開発成果等報告書

2019（平成31）年3月

担当局 関東経済産業局

日本パウダーコーティング協同組合会員企業で2例目となる㈱ヒバラコーポレーション様におけるサポイン事業がこの3月で終了されました。（2016年度－2018年度）
今回、パウダー誌夏季号向けに研究開発成果等報告書として提出された資料をまとめていただきましたので組合トピックスとして掲載させていただきます。今後のサポイン事業の参考にさせていただければ幸いです。（事務局より）

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的

1-1-2 研究開発の概要

1-2 成果概要

第2章 研究開発

2-1 AIデータ活用塗装自動化システムの開発

2-1-1 センサの選択

2-1-2 熟練技術者の塗装操作軌跡のデータベース化とその伝送方法開発

2-1-3 ロボットへのティーチング手法の開発

2-2 遠隔地リアルタイム管理システムの開発

2-2-1 各種センサの評価・選択

2-2-2 塗装プロセスごとの情報の収集システムの開発

2-2-3 センサから収集したデータの現地作業指示書へのフィードバック

2-2-4 現地塗装工場へのアラームシステム

2-2-5 現地塗装工場へのロボットAI軌跡データの送信

2-3 高品質多品種少量一貫ライン処理

第3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景・研究目的

塗装の目的は、極寒地や灼熱の砂漠など、非常に厳しい使用環境下においても製品の初期機能を維持することであり、塗装品質の安定性・耐久性がとりわけ強く要求されている。工業製品の塗装とコンサルティングを営む弊社は、地元部品業者からの塗装工程受託や大手企業製造ラインでの塗装工程の直接請負や請負業者への塗装技術支援が主業務である。

川下企業の産業機械や電機、自動車、建設業界は、コスト削減による国際競争力強化の観点から、グローバル展開を図っており、特に自動車メーカのような大手企業の大量生産品では、環境対応から有機溶剤排出量削減に寄与する塗料使用量削減や塗着効率向上の目的で、手吹き塗装からロボット塗装へ展開している。しかし、それ以外の多品種少量、複雑形状製品に対しては、塗装工程を外部企業に依存しており、それを請負う塗装業者も必然的に海外や遠隔地での対応を要求され、BPO（Business Process Outsourcing）の一部を担っている。

工業製品の塗装の市場規模は、図 1-1 に示すように特にリーマンショックを皮切りに、国内での10人～100人の金属塗装事業者と川下企業内にある塗装現場で、塗装高度技術者が激減している。一方中国など海外での塗料生産量は、図 1-2 に示すように増大し、東南アジア圏での塗装受託会社を含め、塗装と技術支援を要望する市場規模は3000社を超えると想定している。

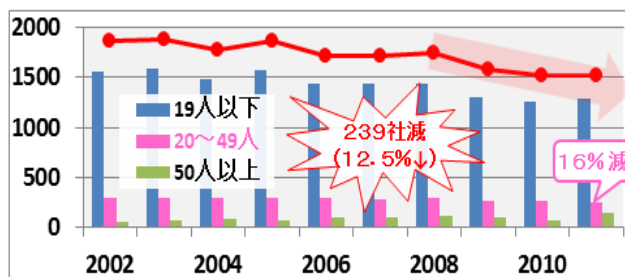


図 1-1 塗装業界の状況

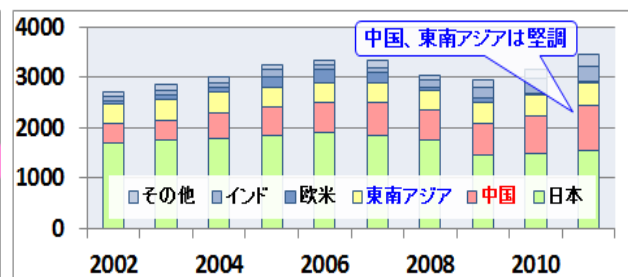


図 1-2 塗料生産量

塗装業務は、図 1-3 に示すようであり、塗装技術は、図 1-4 の特性要因図で示すように非常に他分野にわたるものである。

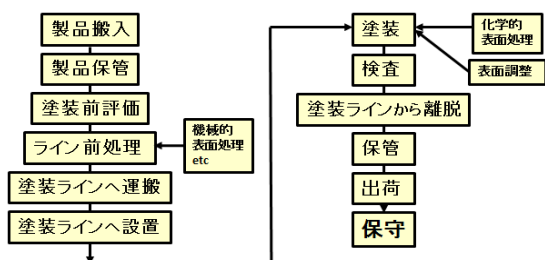


図 1-3 塗装業務プロセス

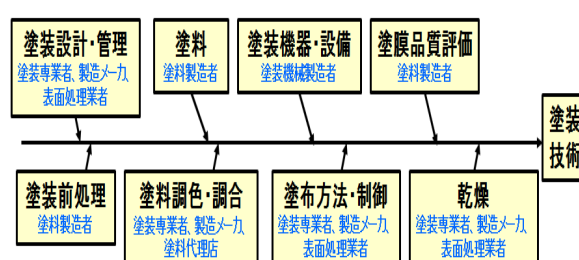


図 1-4 特性要因図

業務プロセスでは、品物の流れの他、お金の流れ、ものの情報の流れまでを管理しなければならない。このため、ヒバラコーポレーションでは、顧客の見積もり・受注処理から工場の稼働状況管理、納品請求書まで、ネットワークを活用した生産管理システム（HIPAX）を開発・提供し、小規模ではあるがものづくり連携としてIoT（Internet of Things）化を構築し、設計～製作～塗装・メッキ～

組立というように水平分業可能なソフトウェアを提供してきた。

しかしながら、遠隔地の塗装業者での塗装不良においては、作業指導書と技術伝承で対応してきたが、地域の文化・作業等々の課題もあり、技術者育成が非常に困難な状況である。不具合時には出張で対応しているが、塗装後の対応ではそのプロセスが不明であり、要因究明と対応に多大な時間・費用を費やし、最終的には顧客満足度低下の要因になっているのが実態である。

また、海外で塗装工程を請負っている企業からも塗装設備の改善（ロボット塗装、最適噴霧粒径ノズル等）から塗装技術の高度化、自動化が要求されている。

ヒバラコーポレーションの生産管理システム（HIPAX）の課題は、モノとお金の流れを管理するシステムであるが、技術とモノの流れに対応するシステムがないことである。

そのため本開発では、IoT（Internet of Technology）により塗装技術を遠隔地においてもマザー工場と同一塗装品質を得るようなサポート管理・支援するシステムの構築を目指すものである。

1-1-2 研究開発の概要

図1-5に従来技術と研究開発で取り組むべき項目を示す。

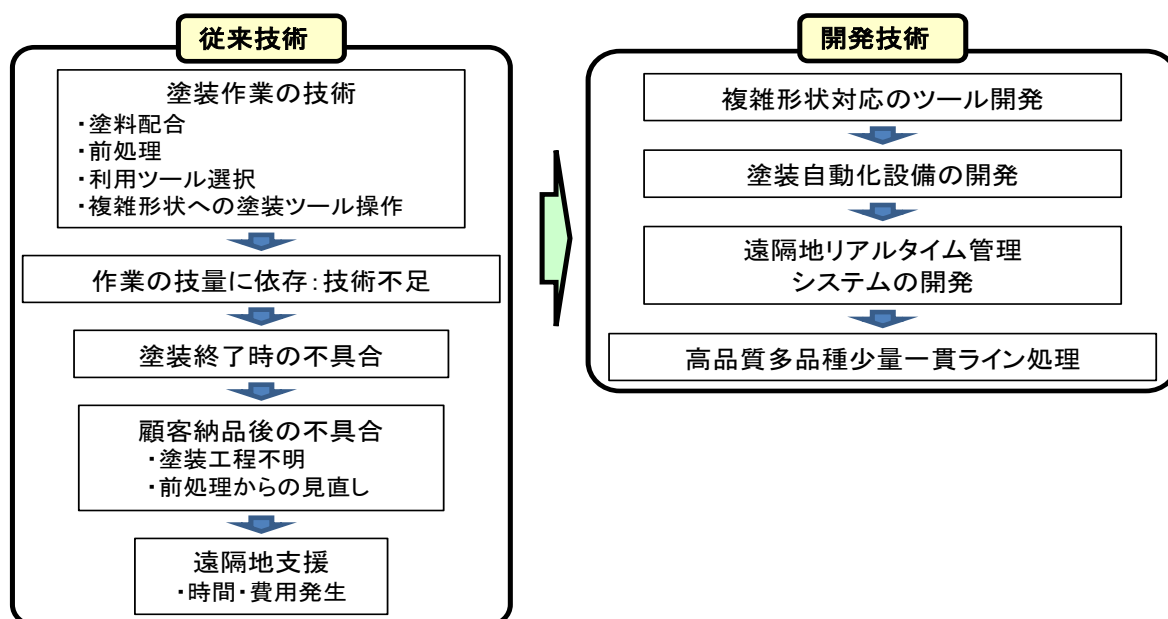


図1-5 従来技術と開発技術

【塗装自動化システムの開発】

手吹き塗装では、塗料の霧化圧力や吐出状況を塗装部位ごとに調整しながら行うには高度技術が必要であり、さらに使用塗料量の削減、塗着効率、飛散に伴う環境課題を考慮すると、ロボット塗装が望まれている。しかし、ティーチングといわれる軌跡データやそれに伴う塗装条件をロボットに教えることは非常に時間がかかり、自動車メーカー等大手メーカーでも量産現場のみに実施される程度で、当社や大手メーカーのBPO、多品種少量生産現場では、手吹き（スプレー）塗装となっている。

熟練技術者は、製品形状、材質、要求塗膜厚さ等を考慮し、スプレーノズルの操作を行い、要求品質に仕上げる。この手吹き操作を簡単にロボットにティーチングし、多品種少量生産でも対応可能なシステムとする。

マスターアームにスプレーノズルを設け、塗装動作をセンシングし、ロボットアームを動作するシステ

ムを開発する。

【遠隔地リアルタイム塗装管理システムの開発】

塗装は、塗装部材の種類、その塗装面の状況及び塗装現場での温度・湿度等の環境、塗装前工程での洗浄等下地処理など各種の条件が整わなければ、塗着・塗装表面等の品質信頼性は確保できない。

このため、気温・湿度等の環境やボンデ処理等化学的処理や、塗装面への機械的処理及び表面調整等塗装に入る前工程等での塗装情報を検出・対応することが必要である。特に化学的処理プロセスに関しては、各種情報をセンシング、評価するシステムとする。

さらに、遠隔地の現場センサから得られた各種環境データをリアルタイムに収集し、過去の蓄積データと比較し、最適な現場環境になるように配信することが重要である。また、塗装プロセスごとに情報を生産管理に渡し、トレーサビリティ等と連携した塗装の生産管理システムを構築する。

川下企業のニーズに合わせ、構築したシステムのパッケージ・レンタル販売等柔軟に対応できるシステムを目指す。

1-2 成果概要

平成28年度から30年度の3年間の計画と成果概要を表1-2-1に示す。

表1-2-1 計画と成果概要

項目	計画時目標	成果項目
1 複雑形状対応補正スプレーノズルの開発	- 膜厚均一性：36%（条件膜厚 5～10 μ）以上の誤差 - 補正必要箇所 刷毛塗り G50±25	- 膜厚誤差 10 μ 以内確保/10 cm² 98%達成 - 被塗装物の形状（平板）で近接塗装で膜均質性は達成。 1cm 噴霧で難形状対応も可能
2 AI データ活用塗装自動化システムの開発	- ティーチング 時間 24 分 - 生産効率指標：生産 ST250/8Hr（多品種5種類） - 不良率 3%以下	- 試作品での例：ティーチング 時間 3分、ST27/10Hr 達成し 87%であるシミュレートでの確認時間 5分当初目標の 1/4 - 塗装業界以外の業種よりティーチングマシンへの引合い大（2社対応中） - 内部不良率は 0.16%達成
3 遠隔地リアルタイム管理システムの開発	- 環境測定：リアルタイム、効率 35%up - 塗料混合指示の自動化トレーサビリティ確保により - 不具合対応時間：75%削減 - 作業指示時間：40%削減 - コスト：30%削減 - データ伝送からミッシングまで 15 分	- 前処理リアルタイム監視完了 - 配合条件データベース構築完了 - H社トライアルで不具合ゼロ継続中 従い不具合予備対応指示時間ゼロ - 塗料ミッシングのデータ伝送目標達成

4 高品質多品種少量 一貫ライン処理	・塗装工場管理【生産管理請負】 現地出張対応：1 件/月 ・川下企業へのリアルタイム展開による受注確保	・デバッグ 企業出張対応：1 件/月に て工場ラインの標準運営確保 ・H 社に開発品を提示し、連携しながらトライアル実施、受注確保。現地不具合なし
-----------------------	--	--

第2章 研究開発

2-1 AI データ活用塗装自動化システムの開発

従来の塗装ロボットを用いた塗装作業では、ティーチペンダントを使用してロボットの位置指令や吐出量指令などを教示している。この方式は大量生産型の塗装工場には適用できるものの多品種少量生産型の塗装工場には不向きであった。

このため、ロボットの制御の観点からいくつかの方法を検討し、マスターアーム方式を採用し熟練工の動きをデータベース化し被塗物のパターン化を図ることで多品種少量生産型に対応したロボット活用を促進させる。

(図2-1-1)

要求

- (1)高い測定精度(位置精度0.1mm, 姿勢精度2分)
- (2)高い機構透明性(測定装置の有無による運動の差異が生じない)

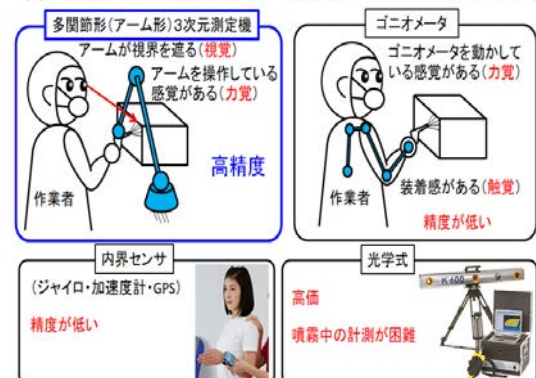


図2-1-1 ロボット解析の導入評価

2-1-1 センサの選択

(1) ロボットアーム式運動計測システムのロボットアーム部の試作機の製作

従来の試作機は機構透明性（作業者がロボットアームを操作していると感じない特性）を高め、かつ安価なアルミ材と鋼材のみで構成し、板材の切り出し加工した部品を組み合わせることで構成した、関節を用いた試作機を開発した。試作機全体の写真を図2-1-2に示す。

試作機の手首関節を図2-1-2(a)に、肘関節を図2-1-2(b)に示す。

板材の切り抜き加工した部品を組み合わせることで、軽量化を実現した。

試作機の手首機構のスプレーガンは、図2-1-2(c)に示す。

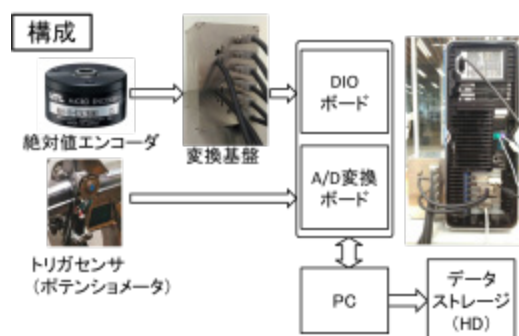


図 2-1-3 センサデータ収集システムの構成

(2) センサデータ収集システムの構築

上述のロボットアームは運動計測センサとして絶対値エンコーダを使用している。この信号をリアルタイムに収集・データ変換することで、スプレーガンの位置・姿勢を計測する。この計測システムの全体構成を図2-1-3に示す。これらを配置した変換基盤を介してデジタル入カインターフェースを組み込んだPCを用いてデータ収集システムを構築した。

2-1-2 熟練技術者の塗装操作軌跡のデータベース化とその伝送方法開発

センサデータから運動データへの変換システムの修正については、現場での導入が容易に行える GUI のシステムの Windows を OS とし、VisualBASIC を用いた。操作は全て GUI で、ボタンで行うことができ、操作も単純化され、現場の作業者でも容易に操作を覚えることができるシステムとしている。また、ティーチングシステムとも一体化しており、一つのプログラムでキャリブレーション、計測、ティーチング（ロボットの目標運動創成）を行うことができる。



(a) 手首関節



(b) 肘関節



(c) スプレーガン取付部

図 2-1-2 試作 2 号機の関節構造



図 2-1-3
試作機全体

2-1-3 ロボットへのティーチング手法の開発

(1) 熟練作業者の塗装運動の特徴の把握

本システムを用いて計測した熟練作業者の塗装運動の軌跡を図 2-1-4 に示す。本システムを用いることで、運動が計測できていることがわかる。軌跡だけではロボットの目標運動とすることができないので、塗装運動の時間変化を調べてみた。結果の一例を図 2-1-5 に示す。

特に速度を調べることで、熟練作業者の運動の特徴が良くわかる。これらを、いろいろな塗装運動に対して行うことで、熟練作業者の塗装運動の特徴の把握を行った。さらに、未熟練作業者の運動も同様に計測し、その比較を行うことで、さらなる熟練作業者の運動の特徴の把握を行った。

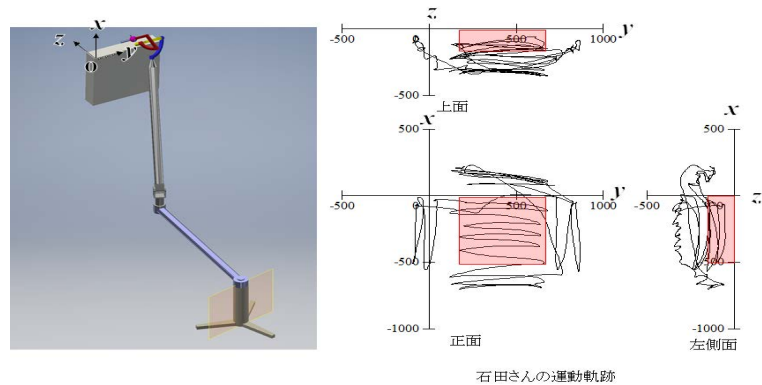


図 2-1-4 熟練作業者の塗装運動の軌跡

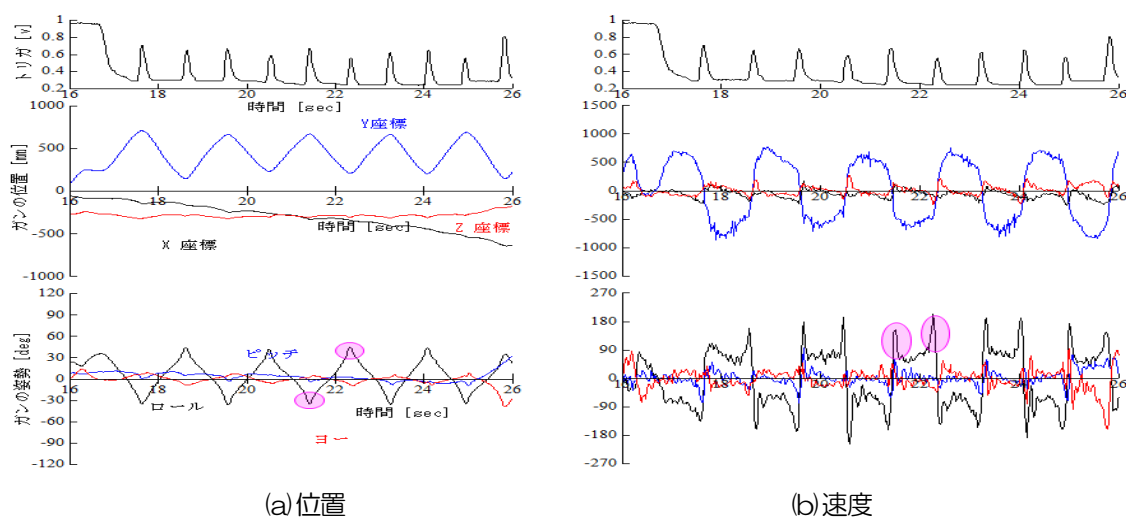


図 2-1-5 熟練作業者の塗装運動の時間変化

(2) 熟練作業者の塗装運動のパターン化による目標運動の創成システムの構築

箱型のワークを塗装する場合の熟練作業者の運動は図 2-1-6 に示す 10 の運動パターンに分割して考えることにした。塗装運動と、塗装する面の移動を行う移動運動の 2 つの運動に分け、どの面を塗装するのか、どの面からどの面への移動を行うのか、によってさらに運動を分割する。

このようにして、塗装運動をいくつかのパターンに分割し、それぞれ分割した運動に対してロボットの目標運動を創成する。このように分割することで、運動の単純化ができると同時に、ワークの形状変化や寸法変化に対しても、対応できるシステムとしている。

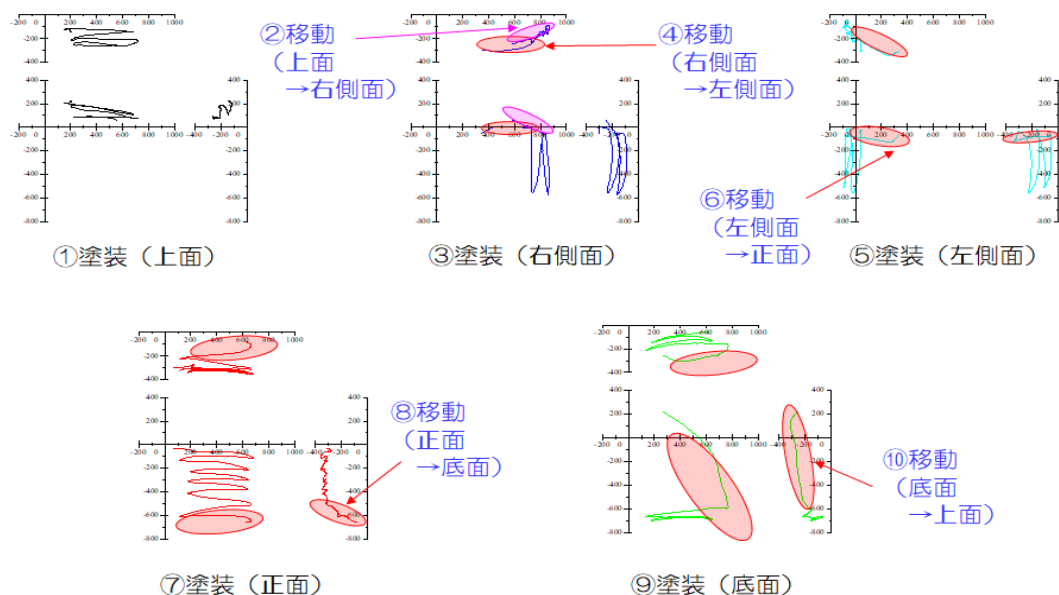


図 2-1-6 熟練作業者の塗装運動のパターン化

2-2 遠隔地リアルタイム管理システムの開発

2-2-1 各種センサの評価・選択

塗装の前処理工程では「脱脂」、「水洗」、「除錆」、「水洗」、「化成」、「水洗」、「湯洗」の順に、手作業による滴定や目視により各槽の液を管理しており、これを遠隔地から管理可能とする。

現行の各項目管理方法の例を表 2-2-1 に示す。

表 2-2-1 各項目管理方法一覧

槽 (工程)	液種類	酸(アルカリ)度		鉄分	促進剤	透明度	温度	液面位置
		遊離	全					
①(脱脂)	アルカリ	●	—	—	—	—	●	●
②(水洗)	水	—	—	—	—	●	—	●
③(除錆)	酸	●	—	●	—	—	●	●
④(水洗)	水	—	—	—	—	●	—	●
⑤(化成)	化成	●	●	—	●	—	●	●
⑥(水洗)	水	—	—	—	—	●	—	●
⑦(湯洗)	湯	—	—	—	—	●	●	●
現行管理法		中和滴定		酸化還元滴定	窒素ガス量測定	目視	温度計	目視

上記で示した工程の例では、アルカリ脱脂液槽、徐錆槽、化成処理槽の反応機構を考慮し、pHメータ、酸化還元電位測定器、電気伝導度測定器の3つのセンサを選定し、実サンプルを想定し、工場の実環境状況で、鉄板の処理状況のセンサの変化と特徴を確認し、実稼働中のマスター工場槽に設置し、他の管理情報とともに収集した。

表 2-2-2 各槽のセンサ値の変化傾向まとめ

	pH	酸化還元電位	電気伝導度
アルカリ脱脂槽	変化なし	増加傾向	変化なし
徐錆槽	変化なし	減少傾向	変化なし
化成処理槽	増加傾向	減少傾向	変化なし

各日のデータ及び調整のための補給液の履歴から特性の把握や、数値のモニタリング及び電極の劣化の確認を行い、安定的なデータ取得のためのメンテナンスの指標等、実運用時の指針を決定した。

2-2-2 塗装プロセスごとの情報の収集システムの開発

塗装技術は、非常に多技にわたっており、それを実行するプロセスにおいても、多品種少量生産型で対応するには、手配に関する被塗物の図番・品番・仕様書や金属材料・その時々環境（湿度・温度）等技術分野に関しても塗装プロセスは大きく異なってくる。

製品の搬入から保管、塗装前評価の段階でも各種準備が必要である。各プロセスでの収集項目の全自動化がよいか、人が介在した方がよいかがあり、コストとの関連が生じる、以下に各プロセスでの重要な情報収集項目について調査・検討した結果を示す。

（１）製品搬入・保管・塗装前評価

受付・審査時には、塗装面積や表面状況の把握が必要で、顧客から図面添付がある場合は活用、ない場合は受付時に画像処理や担当者からの寸法を収集し、被塗物データの伝票データとして工程に反映させた。

（２）ライン前処理

受入れ時のデータをもとに処理方法を評価し、機械的処理が必要なものはグラインダやロボット研磨等処理を実施する。図 2-3-1 は、さび落としや凹み部分へのパテ処理のような機械的処理のトライした事例であり、図 2-3-2 に研磨ロボからのデータ収集システムを示す。

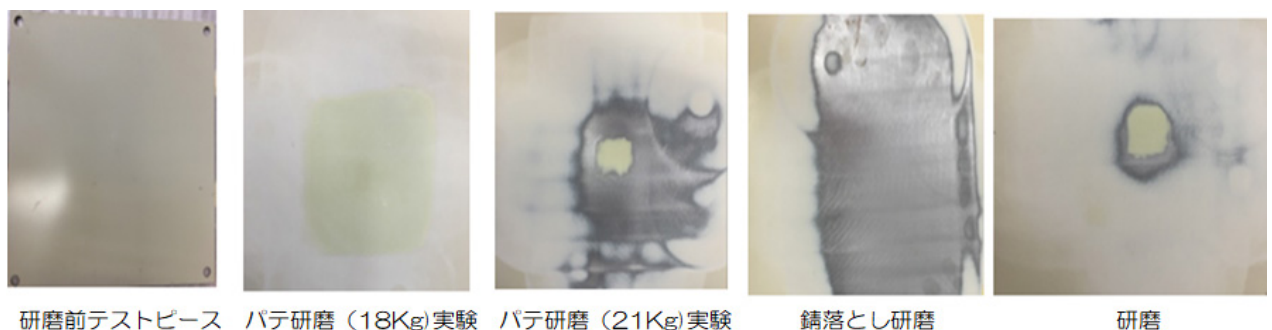


図 2-3-1 機械的処理例

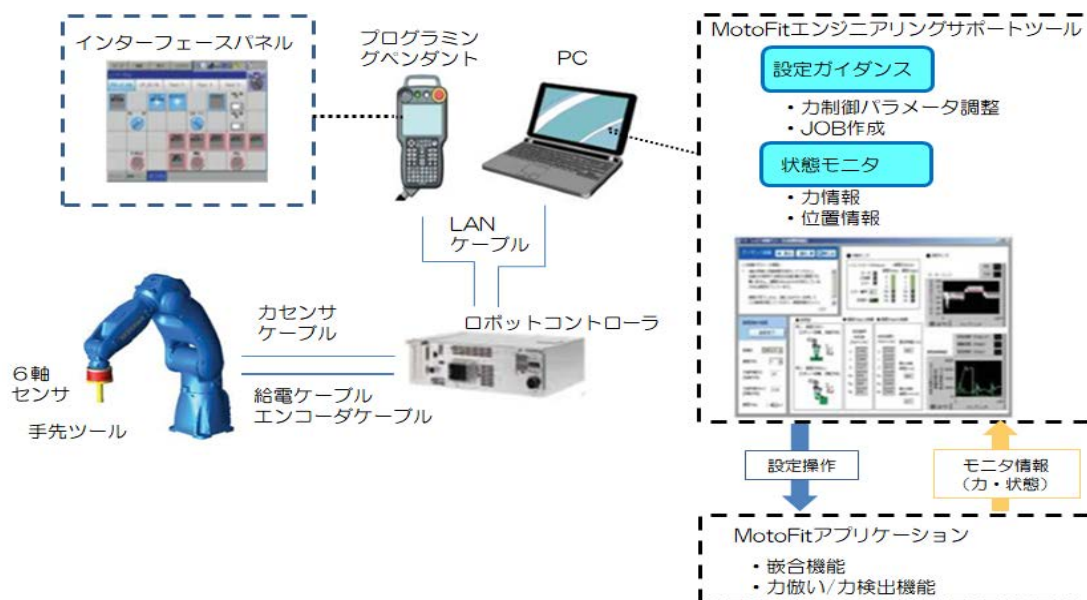


図 2-2-2 研磨ロボブロック線図

化学的な薬液処理のものは、脱脂・除錆・化成被膜・湯銭時間及びその有無をマザー工場のDBから提示する。

薬液処理では、各液槽の状態をセンサで、①脱脂では遊離アルカリ度＋処理温度、②除錆では遊離酸度＋処理温度、③皮膜処理では全酸濃度・遊離酸濃度・促進剤濃度＋処理温度を定期的に管理し、各液槽のポイント範囲を維持できるようにした。

図 2-2-3 にはセンサを活用した液槽管理について示す。リアルタイム処理性及び運用のしやすさを重視し、センサ管理値を設定し、指定した箇所に送信するシステムとした。

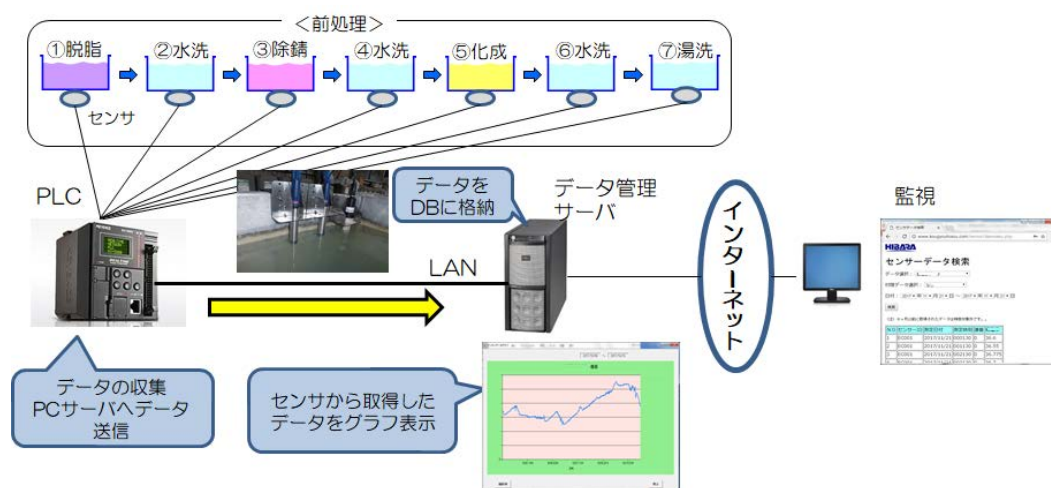


図 2-2-3 液槽センシング管理システム

(3) 塗装

1) ロボット塗装データ再現評価

塗装工程では、複数の熟練技術者の塗装技法の腕の動き、吐出レバーの動きをデータ化し、これをロボット動作プログラムに変換して塗装を行う。また、ロボットが動作できない特異点が発生しないかも評価する。マスターアームを製作しロボットの動作データ、姿勢データをセンサから取得し、PCに取り込み、実際の塗装ロボットに転送し、実動作トライアルを実施した。

2) 被塗物自動分類による省力化

被塗物をどの塗装ラインで流すかは、現在人が被塗物を見て判断している。この判断をシステムで自動的に行うことにより、塗装スケジュール作成を省力化できると判断し、塗装分類毎の塗装条件パラメータを自動選択していくことを進めた。

この分類に、AIの手法のひとつであるDeep Learningでの実現性について検討を行った。分類精度を改良し、実用的なレベルまでにした。

3) 塗装データ収集評価

被塗物に最適な条件(温度、湿度、エア圧、吐出量等)のデータベース化するシステムの開発を行い、データの蓄積を始めた。データはどのパラメータを使用したか作業指示書に記入してもらい、それを毎朝画面から入力する運用とした。(図2-3-4 参照)

また、塗装制御装置と通信を行い、塗装パラメータの送受信、エラー履歴情報の受信等を行うシステムを開発し、生産管理システムHIPAXⅡと連動させ、作業指示書のバーコードを読み取って最適な塗装パラメータを塗装制御装置に送信し、塗装するシステムとした。(図2-3-5 参照)

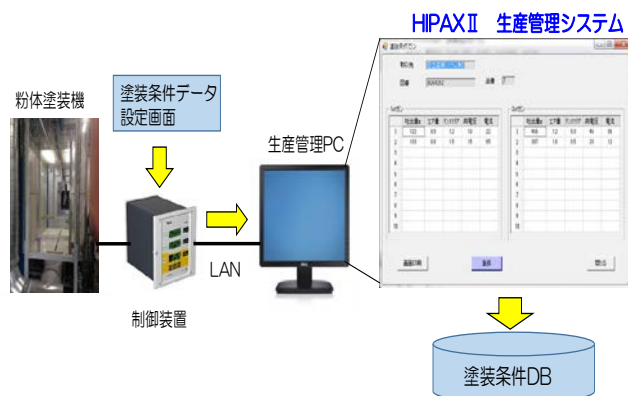


図 2-3-4 塗装パラメータ DB 化

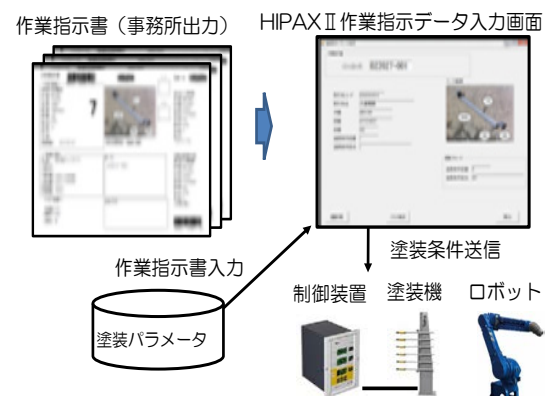


図 2-3-5 HIPAXⅡ との連動

(4) ロボットへの塗装プログラムの送信

インターネット経由で遠隔地の塗装ロボットへ塗装プログラムを送信した。(図2-3-6 参照)

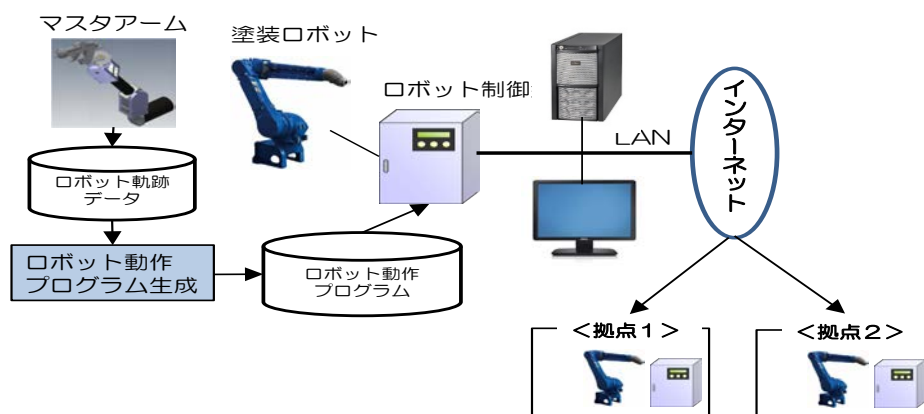


図 2-3-6 ロボットへのプログラム送信

(5) 検査

検査データ（塗装膜厚等）をスマホ経由でPCにデータを自動で取込む方式を検討中し、システム開発し

た。(図 2-2-4 参照) また、スマホから音声入力で膜厚データを入力するシステムも開発した。

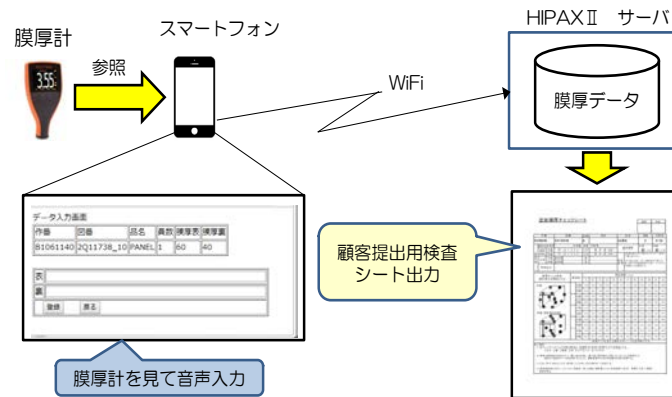


図 2-2-4 音声による膜厚データ入力

(6) HIPAX II によるトレーサビリティの実現

各塗装プロセスについてどのような条件で実施したか、ワーク毎に過去に遡って調査できる機能の実現性について検討し、開発した。(図 2-2-5 参照)

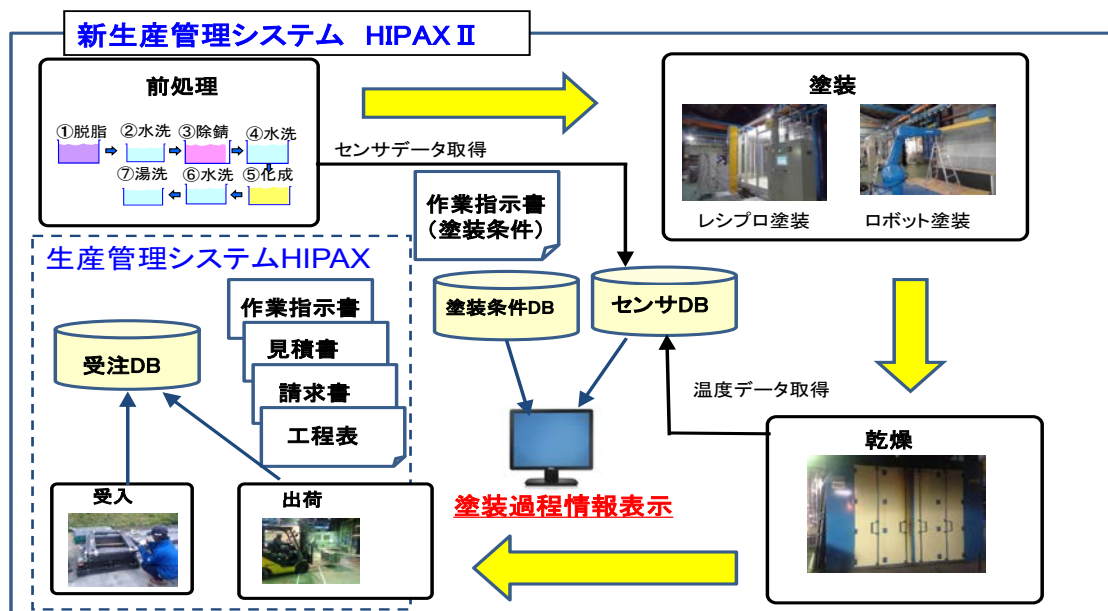


図 2-2-5 トレーサビリティの実現

2-2-3 センサから収集したデータの現地作業指示書へのフィードバック

開発システムの川下企業へのトライアル展開を通し、収集データを作業指示書への展開ではなく、センサ情報の作業員へのメール配信が有効ということで対応した。

2-2-4 現地塗装工場へのアラームシステム

研究開始当初、遠隔地工場にパトランプ的な方式としたが、川下企業からメール配信方式の要望があり、当面メール対応システムとした。

2-2-5 現地塗装工場へのロボットA I 軌跡データの送信

生産管理ソフト（HIPAXⅠ）を使いロボット軌跡データを伝送格納し遠隔塗装工場のロボットコントローラーに出力し、PC側でプログラムを管理した。

軌跡データのAI活用は理論検証を進め、実装データとワークのデータで検証した。川下企業へのデータ送信は、他データ送信と同レベルであり対応可能である。

2-3 高品質多品種少量一貫ライン処理

多品種少量生産型塗装工場の稼働状況を総合的に簡単に分かりやすくするためのシステム検討を行い、稼働状況をカメラや生産情報とリンクしたバーコード情報と関連把握し、一貫した塗装製品の生産高やコンプライアンスを確保可能なシステムとし、通常業務を通し、その信頼性確保に努めた。

川下企業とのトライアルについては、塗装の前処理槽のセンサを用いた薬液管理、及び塗料の希釈率を過去データから計算して求めるシステム及び塗装レシピロ機とPCの連動による塗装条件管理システムで行った。さらに、遠隔監視カメラを導入し、問題点の解決方法のコンサルテーションを行える環境を構築した。また、上記のHIPAXⅡの機能を実現するため、塗装業向生産管理システムの導入も行った。

図 2-3-1 に示すように、この生産管理システムの導入により、作業指示書の出力を行えるようにし、この作業指示書にHIPAXⅡの情報（希釈率、塗装条件 NO 等）を印字して作業者に知らせられるようにした。

本工場は、設計、製缶、塗装までの一貫処理を行っている工場であり、すでに塗装以外の工程で生産管理システムが導入されていたので、この生産管理システムのデータを取込形でのシステムとした。

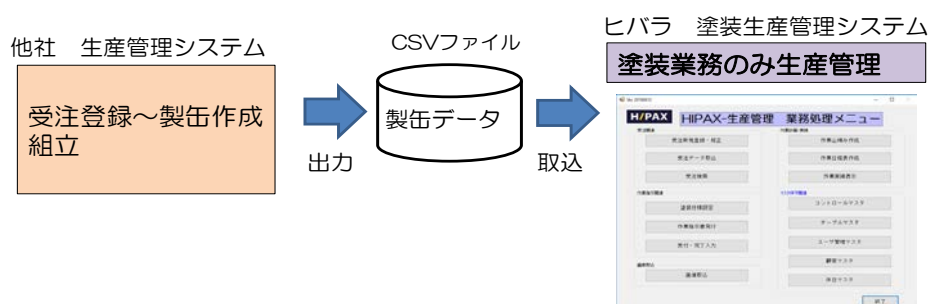


図 2-3-1 塗装生産管理システム

図 2-3-2 で示すように、クラウド上に過去の配合条件データを登録し、遠隔地工場からの問い合わせに対し、このクラウド上で計算した結果を返す機能を実装した。

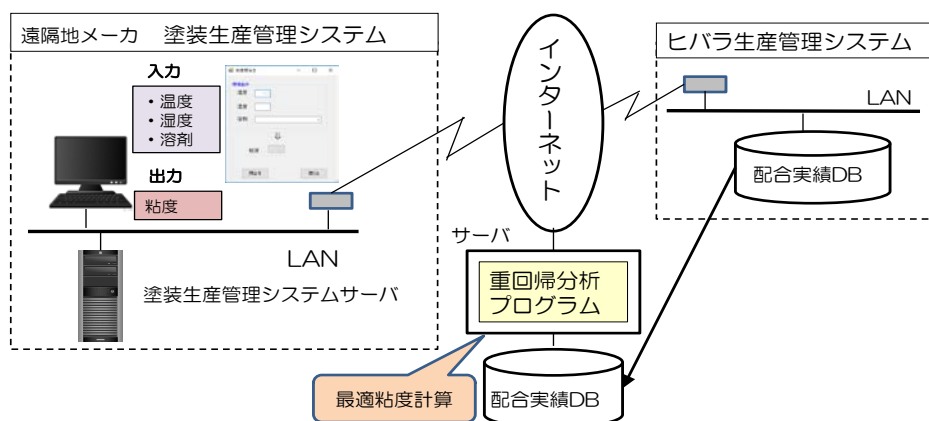


図 2-3-2 配合条件アドバイザー

塗装レスプロケータとPCを連動し、生産管理システムのデータから塗装条件を特定し、そのデータを塗装機に送る。(図2-3-3参照) また、塗装レスプロケータの稼働状況(稼働時間、エラー情報等)をPCに転送し、PC側の画面で確認した。

塗装前処理槽のセンシングシステムを導入し(図2-3-4)、遠隔工場内で値の確認、グラフ化ができるようにした。また、管理工場でこれらの値を確認し、管理値を超えた場合、アラームメールを送信するシステムとした。

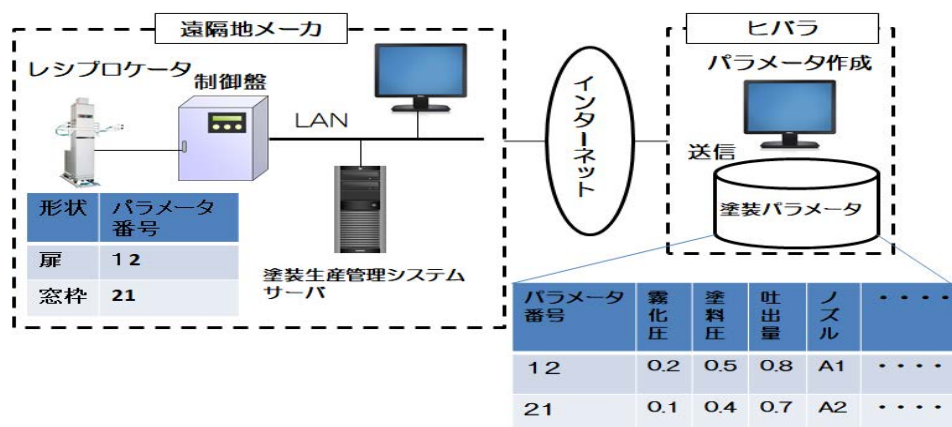


図2-3-3 遠隔工場での塗装機とPCの連動

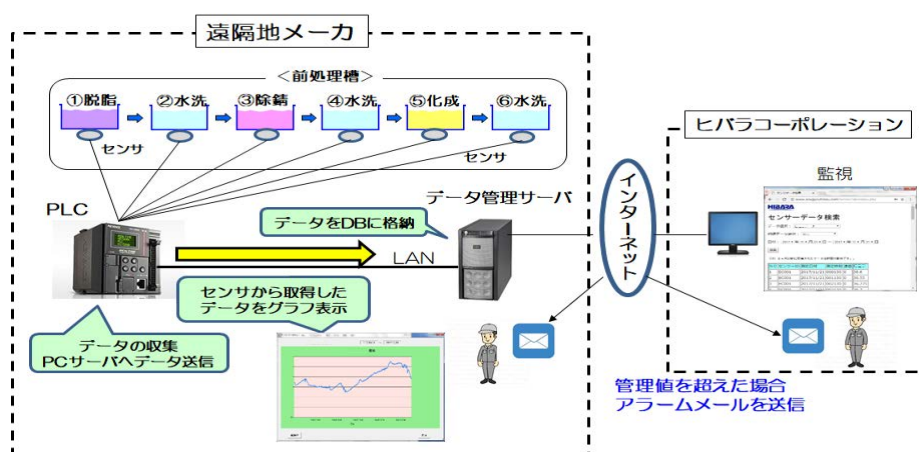


図2-3-4 前処理槽センシングシステム

第3章 全体総括

本サポイン事業の開発の纏めを以下に示す。

1. 解析主導による手法で、目標3cmで噴霧可能なスプレーノズルを開発し、塗装難形状部品につきトライした。
2. 熟練塗装作業者の塗装運動を、作業者の運動を妨げることなく計測する設備と計測データを収集するシステムを構築した。
3. 計測システムにより計測したデータをスプレーガンの運動に変換するシステム、およびこれを視覚的に確認できるシミュレータを開発し、熟練作業者と未熟練作業者との差を明らかにした
4. 熟練作業者の塗装運動をいくつかのパターンに分け、熟練作業者の塗装運動に基づくロボットの目標運動を創生するシステムを開発した。

5. 前処理薬液の管理を中和反応利用滴定方式からセンサ検出データの組合せによる管理手法を確立した。
6. 液槽管理システムを構築し、塗装パラメータをDB化した。音声入力方式の検査膜厚データの入力方式を作成するとともに、トレーサビリティ可能な新生産管理システム及び塗料の配合条件アドバイザーシステムを構築した。
7. 遠隔地の顧客と連携し、構築システムのトライアルや導入に伴う各種の課題解決を実施し、一部を導入いただいた。

以上