

論文・解説

39

中上塗り塗装工程内品質保証技術の開発 Development of Quality Assurance Technology in Primer and Topcoat Process

山本 充 億*¹ 掛 正 喜*² 世 良 和 也*³
Mitsuyasu Yamamoto Masaki Kake Kazuya Sera
岩 尾 剛*⁴
Tsuyoshi Iwao

要 約

マツダは、環境にやさしい新塗装技術として、中塗り（プライマ）工程を上塗り（ベース/クリア）工程に集約した3ウェットオン塗装を開発し、2002年に世界で初めて自動車の塗装工場に導入した⁽¹⁾。現在では、マツダの標準塗装システムとして国内の全工場に展開している。同システムでは、塗装ブース内へのゴミの持込みの排除やバラツキのない安定した塗装品質を確保するため、ロボットで塗装する無人化工程を実現している。無人の塗装工程では、設備不具合等で塗装不良が発生した場合、最終の検査工程まで不良を発見する機会がないため、最悪の場合、数十台の不良が連続して発生する可能性がある。従って、設備の異状をその場で発見し、不具合発生を未然に防ぐことが重要課題であった。本稿では、塗装品質に影響を与える設備の管理項目とその基準値を明らかにし、それを常時監視することで、塗装品質を保証する（工程内品質保証）技術について紹介する。

Summary

Mazda developed Three-Layer Wet Paint System created by integrating primer process with topcoat process as an environment-friendly new coating technology, which was introduced into a painting factory for the first time in the world in 2002. At the present, it has been developed to all domestic factories as a standard paint system of Mazda. In order to eliminate carrying dust into a paint booth and to assure high quality, a fully-automated process with robots has been adopted. If paint failure occurs due to any bad production facilities, the fully-automated process has no opportunity to discover it until the process reaches the last process of inspection. In the worst case, dozens of sets of product defects may flow continuously, and the critical issue to be addressed in this process was to find facilities defect and to take immediate measures for prevention of any possible production line problem. This paper describes quality assurance technology to realize the fully-automated system.

1. はじめに

自動車の塗装工場は一般に、錆/防音等の機能品質を保証する脱脂/電着/シーラ工程および、外観品質を保証する中塗り/上塗り工程、そして最終的に品質を保証する検査/修正工程で構成されている。地球環境保全への取り組みが進む中、マツダでは、揮発性有機化合物やCO₂の排出量を削減するために、中塗りと上塗りを集約した3ウェットオン塗装を開発し、国内の全工場に展開してきた⁽¹⁾。

本塗装方式では、塗装ブース内へのゴミの持込みの排除、バラツキのない安定した高品質/高効率の確保のため、全工程をロボットで塗装する無人化工程を実現している。こ

の方式では、防錆処理された後、プライマ/ベース/クリアの各塗料の塗布から乾燥まで一切人の手を介さず、短工程で塗装することができる。その反面、稼働中に、機器の経年変化等に起因する突発の設備不具合で適正に塗装が行われなかった場合、数十台の品質不良が連続して発生する可能性がある。この問題を解決するためには、監視員を配置し、常時塗装状態を確認しておくことで不具合を検知するという手段がある。しかし、現実的には塗色数が約30色、ロボットが約40台あり、人に頼ったチェックでは膨大な要員が必要となる。そこで、塗装設備自体が自動的に不具合を検知し、設備を停止させる技術と、不具合を事前に検知して自動的に補正する技術を開発し、塗装不良を次工程に

*1~4 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

送らない工程内品質保証に取り組んだ。

2. 開発目標とアプローチ

まず、中/上塗り塗装システムの構成と原理の概略を説明する。中/上塗り塗装の方式は、静電ベル塗装と呼ばれ、塗料をベルで微粒化し、印加電圧によりボデーに付着させる方式である。ベルはエアモータによって高回転で回転しており、設定量の塗料がギアポンプから供給され、回転遠心力で塗料を微粒化している (Fig.1)

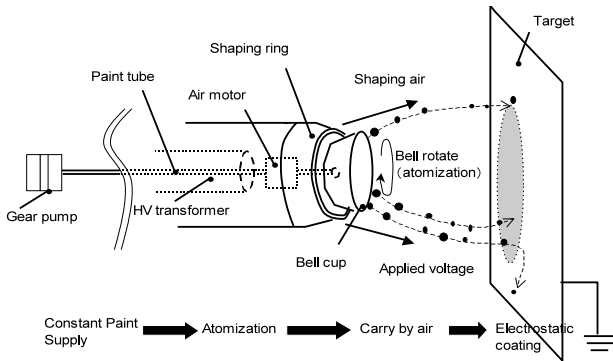


Fig.1 Electrostatic Coating

中/上塗りの塗装品質を左右する塗装条件には、塗料の微粒化条件、塗装効率、外部条件が挙げられ、以下にそれらの構成因子を示す。

- (1) 微粒化条件
 - ① 塗料の吐出量
 - ② エアモータの回転数
 - ③ シェーピングエア流量
(吹き出し面積を形成するためのエア流量)
- (2) 塗着効率
 - ① 塗装距離(ベルと塗装面との距離, ロボットの軌跡)
 - ② 塗装速度(ロボットの動作速度, コンベア搬送速度)
 - ③ 印加電圧(塗料を付着させるための電圧)
- (3) 外部条件
 - ① ブース温・湿度

Table 1に、塗装品質、塗装条件およびそれらに影響を与える設備構成要素の関係を示す。

この表を基に品質保証に必要な要件を整理し、取り組む課題を抽出した。

これらの内、塗装効率(塗装距離, 塗装速度, 印加電圧)はロボットと搬送設備、印加電圧発生器の各コントローラ、外部条件はブース制御装置によって制御されており、状態は常に監視されている。しかし、微粒化条件の塗料吐出量・エアモータ回転数およびシェーピングエア流量については、状態の監視ができていなかった。この領域は、検出器を取り付けること自体が品質に悪影響を及ぼす可能性があることや、検出器の価格やメンテナンス費用が高く、コ

Table 1 Relationship between Paint Quality and Component Parts of Facilities

Quality	Factors			Painting facilities to control									
	Coating thickness	Smooth surface	Color matching	Coating factors	Control factors	Electropneumatic converter for air motor	Gear pump	SQL V	Electropneumatic converter for shaping air	Applied high voltage	Robot	Booth	Conveyor
Fluctuation factors	○	○	○	Atomization condition	Amount of exhaust								
	○	○	○		Rotating speed	○							
	○	○	○	Adhesion condition	Shaping								
	○	○	○		High voltage						●		
	○	○	○	Painting distance	Operation accuracy							●	●
	○	○	○		Trajectory of bell							●	●
	○	○	○	Painting speed	Conveyance accuracy							●	●
	○	○	○		Trajectory of bell							●	●
	○	○	○	Painting pitch	Trajectory of bell							●	●
	○	○	○		Cycle time of robots							●	●
	○	○	○	Spray cut	Trajectory of bell							●	●
	○	○	○		Cycle time of robots							●	●
○	○	○	Others	Temperature								●	
○	○	○		Humidity									●

●: The factors constantly monitored.

スト負担が大きいということが阻害要因となっていた。

そこで、課題として、

- ① 塗料の吐出状態保証
- ② エアモータ回転数・シェーピングエア流量保証

の二つを取り上げ、微粒化条件を保障するための安価で品質に影響を与えない検出方法を開発し、吐出状態については不具合検知、エアモータ回転数・シェーピングエア流量については自動補正を行うことで、工程内で品質を保証することを目標に取り組んだ。

3. 開発内容

今回開発する部位をFig.2の概略フロー図に示す。

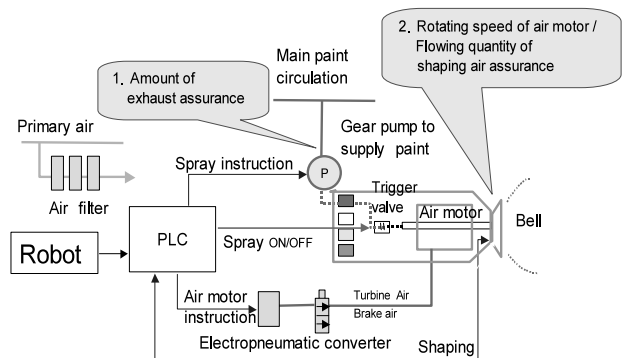


Fig.2 General Flow

3.1 塗料の吐出状態保証(不具合検知技術)

塗料は、ギアポンプによって定量吐出される仕組みであり、この吐出量を保証するためには、塗料の流量を直接計測するのが一般的である。しかし、塗装色は約30色あり、塗色ごとに流量計を取り付ければ、イニシャルコストが増大し、共通部分に取り付ければ洗浄ロスに伴うランニングコストの増加につながる。そこで、流量を直接計るのではなく、吐出量をばらつかせる主要因を検出するシステムの開発に取り組んだ。その主要因とは、トリガバルブの不良、ギアへの塗料の噴込み、クラッチのつながり具合の異常である。ギアポンプは、サーボモータにより一定速度で回転

制御されるが、それらの異常が発生するとトルク負荷が増大することに着眼して、その負荷量を常時監視することで吐出量を保証するシステムとした。

負荷の計測 (Fig.3) には、アナログメモリーハイコーダ計測器を用い、サーボモータコントロール用のアンプに入力されるフィードバックトルク電圧と回転速度指令電圧を計測した。回転速度指令電圧は、PLC (Programmable Logic Controller) からD/A (デジタル アナログ) 変換器を経由してサーボアンプに出力している。

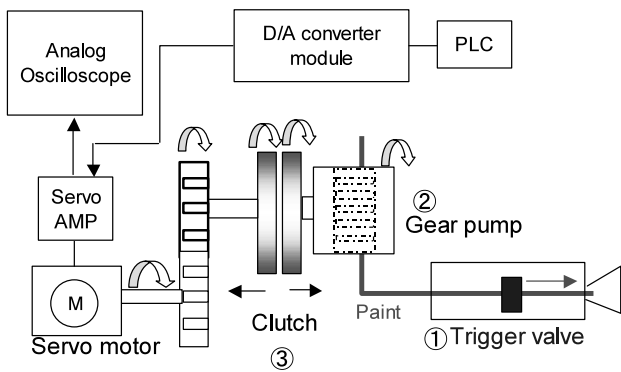


Fig.3 Measurement of Gear Pump Load

このトルク電圧 (負荷量) は、ギアの回転速度指令電圧と線形関係にあれば、トルク電圧を監視することにより、正常状態と異常状態に区分けして吐出量を保証する方式が可能となる (Fig.4)。

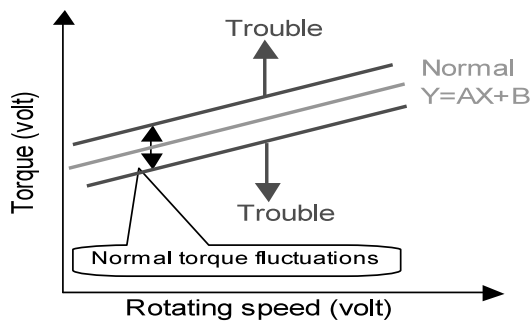


Fig.4 Concept of Trouble Detecting System by Torque

実験は、正常時の状態と以下の三つの異常状態をつくり実施した。

- ① バルブ不良.....トリガバルブの強制閉
- ② 塗料噴込み不良.....ギアポンプへの外部負荷
- ③ クラッチ不良.....クラッチの強制閉

Fig.5は正常時のトルク電圧波形である。

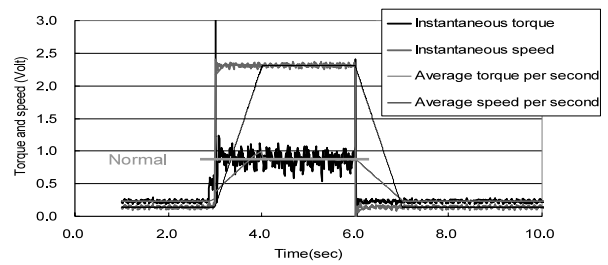


Fig.5 Normal Waveform of Torque

① バルブ不良

トリガバルブを閉じて、吐出動作させトルク電圧波形を計測した。その結果、Fig.6のように回転速度指令電圧は正常時と比べて大差ないが、トルク値の平均値が0.9Vから1.4Vとなり、1.5倍に上昇した (Fig.6)。

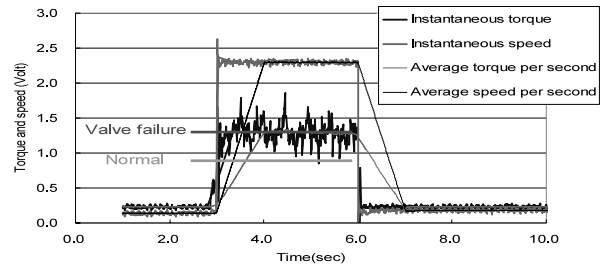


Fig.6 Waveform of Valve Failure

② 塗料噴込み不良

塗料噴込み不良状態を想定し、ギアポンプに外部から負荷をかけてトルク電圧波形を計測した。その結果、バルブ不良時と同様に異常時は、トルク瞬時値・平均値ともに正常時とは異なった波形を示した (Fig.7)。

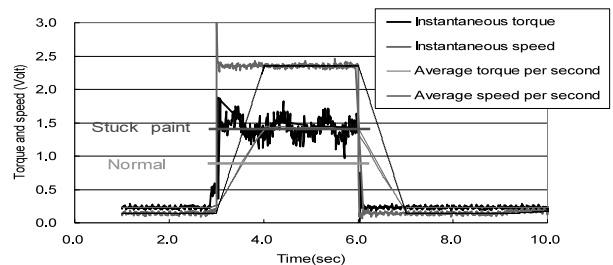


Fig.7 Waveform of Stuck Paint

③ クラッチ不良

クラッチすべり不良状態を想定し、クラッチを強制的に開放してトルク電圧波形を計測した。その結果、トルク瞬時値は振幅周期が波打っている傾向があり、トルク平均値

は正常時とほとんど同様の波形を示した (Fig.8)

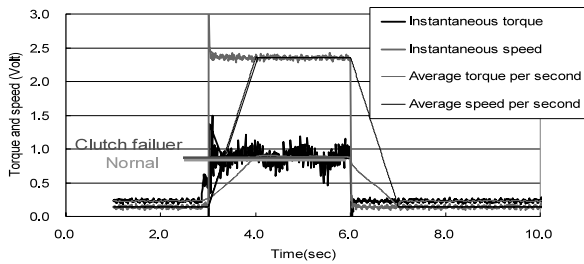


Fig.8 Waveform of Clutch Failure

次に、塗料の種類や塗色による粘度差がトルク電圧に与える影響を加味し、正常時と異常時の差異を確認するために、塗料の種類によるトルク平均値のバラツキ、回転速度指令電圧とトルク平均値の関係について実験を行った。

塗料の種類2種 (ソリッド, メタリック), 塗色15色による正常時のトルク電圧を計測し、粘度が最もトルク電圧に影響するように使用範囲内の最高吐出量を設定した。その結果、トルク電圧は、約0.3Vのバラツキがあるが、トルク電圧は異常電圧以下であることが確認でき、正常時と異常時の判別ができることが分かった。また、トルク電圧と回転速度指令電圧の関係は比例関係にあることも確認できた。Fig.9に、負荷の大きい代表色の結果を示す。

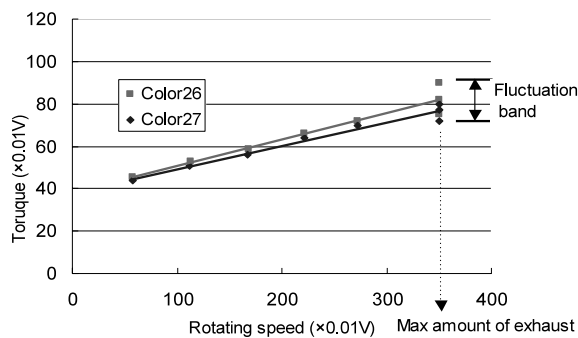


Fig.9 Relationship between Torque and Rotating Speed

以上の結果から、バルブ不良と塗料噴込みに対してはトルク平均値を監視し、正常時のトルク平均値と比較することで吐出状態が保証できる。また、吐出量の使用範囲内では、正常時のトルク平均値は、異常時 (トリガバルブの不良や塗料噴込み不良) のトルク平均値には到達せず、固定の閾値で判別でき、Fig.10のように、トルク平均値が閾値 (一定値) 以上になれば、回転速度指令電圧によらず異常を検出できるシステムとした。また、システムの誤判断を防止するために、立ち上がり時 (吐出開始時) の突入電流によるピークを無視し、トルク平均値の精度を向上させるため、不感帯を設定した (Fig.11)。また、クラッチ不良については、平均値では判別できないことが分かり、波形

の形状特性による判別システムを現在開発中である。

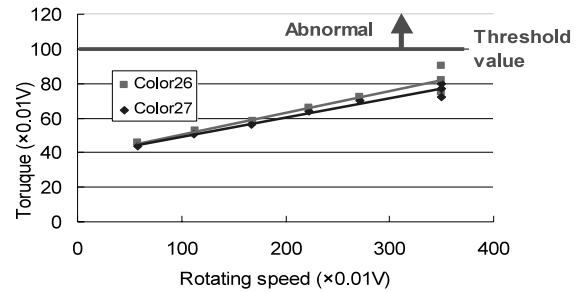


Fig.10 Relationship between Normal Torque and Abnormal One

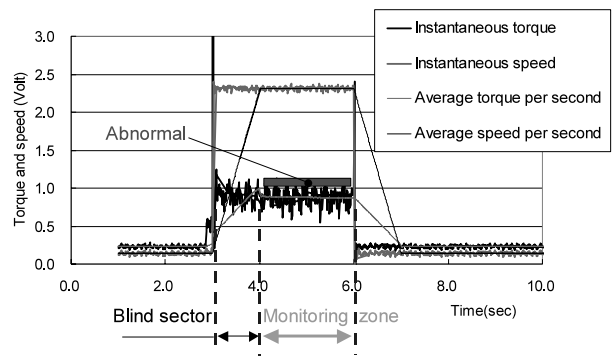


Fig.11 Monitoring Zone

3.2 エアモータ回転数・シェーピングエア流量保証 (自動補正技術)

当社では、塗装の最適化を狙い、塗装パターン、吐出量および吐出のオン、オフなどの細分化を展開している。その中で、ベルを回転させるエアモータの回転が変動すると塗料の微粒化状態がばらつき、肌や色合いなどの品質が確保できなくなる。そこで、従来のPID (Proportional Integral Derivative) 制御に加えて、追従性を高めたエアモータの回転を安定させるシステム開発に取り組んだ。

従来のエアモータの回転は、次に挙げるフローでPID制御している (Fig.12)

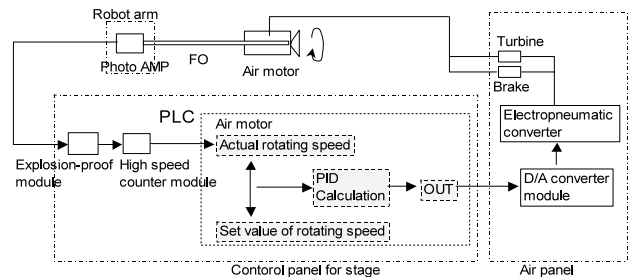


Fig.12 Previous Control Flow

- ① 実回転数を光アンプで検出 (パルス信号)
- ② 回転パルス信号を高速カウンタに取り込む
- ③ 設定回転数と実回転数を比較しPID演算
- ④ 出力値を決定し、電空変換器に出力
- ⑤ タービンエア、ブレイキエア流量を制御

塗料を吐出していない時は、安定した回転数で制御しているが、吐出している状態では、回転数が下降してしまう。また、吐出状態から塗料カット状態に切り替わる時は、回転数が上昇する。一旦下降した回転数は、PID制御で設定回転数に戻そうと制御するが、回転数が安定する前に吐出がオン・オフされると、狙いどおりに回転数が変化せず安定しなくなる。つまり、吐出開始時の立ち上がり遅れや吐出オン・オフによって回転数のオーバーシュート、アンダーシュートが発生し、安定した回転状態とならない (Fig.13)

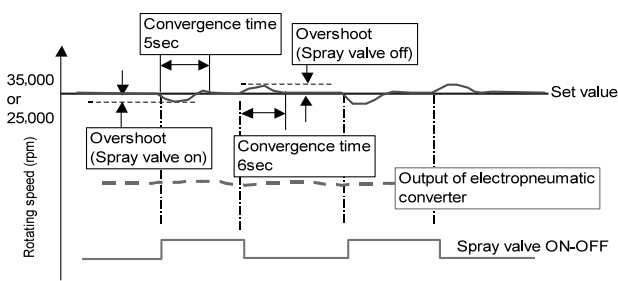


Fig.13 Previous Response of Rotating Speed of Air Motor

回転数の変動は、塗料の吐出状態が変化する時に発生するため、この時にエアモータに何らかの抵抗がかかっていると考えた。この抵抗を発生させる要因としては、塗料の種類 (粘度) と吐出量が挙げられ、回転数と塗料粘度、吐出量の関係を調べるために、既存の回転数モニタシステムを活用し実験を行った。塗料の粘度に対して3水準 (大, 中, 小), 吐出量に対して3水準 (大, 中, 小) の回転数のバラツキを計測した。

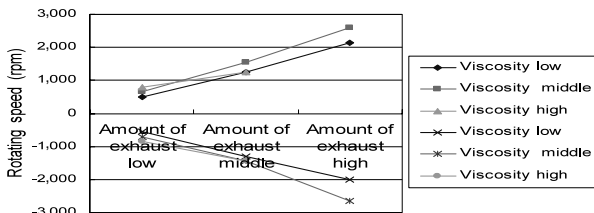


Fig.14 Relationship between Amount of Exhaust and Variation of Rotating Speed

その結果、Fig.14に示すように、粘度、吐出量ともに大きいほど、回転数のバラツキが大きくなり、その中で吐出量の影響度が大きいことが分かった。

そこで、吐出オン時には、回転数が低下しないようにエア出力量を増加させ、吐出オフ時には、回転数を増加させ

ないようにエア出力量を減少させるコントロールロジック (フィードフォワード制御) を開発した。

吐出量を3段階 (0~150cc, 150~300cc, 300cc以上) に分割し、吐出時の設定回転数に対して増減させる割合 (: 吐出オン時, : 吐出オフ時) を吐出量ごとに設定可能なシステムとした。この割合を吐出オン, オフ時の出力値に掛けて電空変換器に出力し、回転数を安定させるロジックである (Fig.15)。この補正出力時間は、オーバーシュート量, アンダーシュート量とそれらの収束時間を最小限に抑えることができる1スキャン (0.1sec) と定めた。

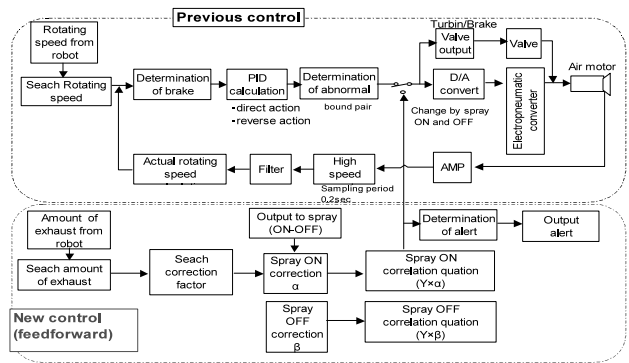


Fig.15 New Feedforward Control Flow

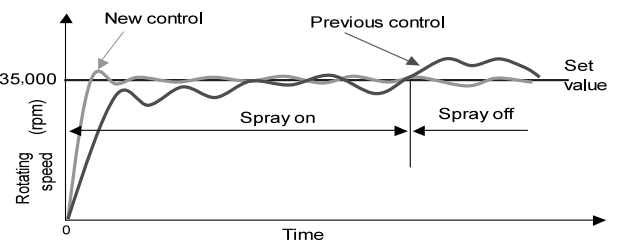


Fig.16 Response of Feedforward Control

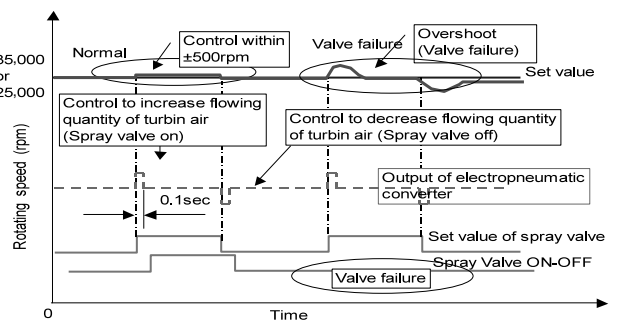


Fig.17 New Response of Rotating Speed of Air Motor by Feedforward Control

Fig.16, 17は、フィードフォワード制御による状態を示したものである。実際の使用回転数の範囲でオーバーシュートする回転数のバラツキを ±2,200rpm から ±500rpm に抑えることができた。また、エアバルブが動作不良をおこし

た場合には、回転数のオーバーシュートが大きくなり異常として検出している。

シェーピングエア流量は、流量センサでエア流量を直接計測しているが、エアホースの長さや径によって応答性が変化する。塗装途中に搬送設備が一旦停止すると、塗装機は、その場で塗装を中断し待ち状態となる。塗装再開時には、塗料の使用量を最小にするため、その場から塗装を開始する動作をする。このため、塗装再開と同時に塗装面積を形成するシェーピングエアの応答性は重要である。この応答性を高めるために、実流量にキャリブレーションをかけて電空変換器に出力するフィードフォワード制御を採用し、常に安定した流量を確保できるシステムとした (Fig.18, 19)

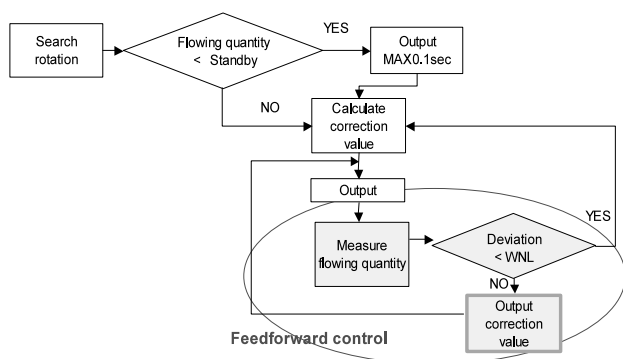


Fig.18 New Logic Flow of Flowing Quantity of S/A

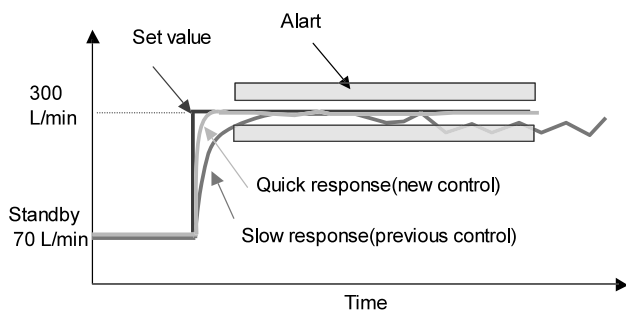


Fig.19 New Response of Flowing Quantity of S/A

4. 導入効果

2003年11月に本技術を防府工場に導入した。導入前は塗装不良件数が2ヶ月間で12件発生していたが、導入後は、0件と完全に次工程への品質不良流出を防止している。現在は、国内の全工場に本技術を展開済みである。

更に当技術導入の付随効果として、不良流出による手直し・再塗装の塗料使用量を排除できるため、VOC (Volatile Organic Compounds) 排出量削減が可能である。また、塗装機器の劣化などによる設備不具合の要因追求を早期に行うことができ、品質の安定化が図れた。

5. おわりに

常にお客様に満足して頂ける車を提供していくことが我々の使命である。そのために、自動車を作る各工程内できっちりとした品質を造り込み保証していくことが重要である。従来の方式にとらわれず、品質を保証すると同時に、ロスをミニマム化できるシステム開発に取り組むことで、お客様が満足する品質を低コストで提供できるようにしていきたい。

参考文献

- (1) 小笠原敏文ほか：環境にやさしい新塗装技術の開発，マツダ技報，No.21，p.205-210(2003)

著者



山本充徳



掛正喜



世良和也



岩尾剛