

論文・解説

35

## 環境にやさしい新塗装技術の開発 Development of Eco-friendly New Coating Technology

重永 勉<sup>\*1</sup> 山根 貴和<sup>\*2</sup> 神田 輝夫<sup>\*3</sup>  
Tsutomu Shigenaga Takakazu Yamane Teruo Kanda  
亀迫 裕介<sup>\*4</sup> 小笠原 敏文<sup>\*5</sup> 掛 正喜<sup>\*6</sup>  
Yusuke Kamesako Toshifumi Ogasahara Masaki Kake

### 要約

近年、世界規模での環境保全への意識の高まりの中で、自動車生産における環境負荷物質の排出量削減の取り組みは非常に重要なものになっている。塗装工場では、塗料に含まれる揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds：以下VOC）の削減や塗装ブースの空調、乾燥炉におけるエネルギー消費により発生するCO<sub>2</sub>の削減が急務となっている。これに対して水性塗料に代表される従来の環境対応技術は、大幅なVOC削減は達成できるが、CO<sub>2</sub>の増加やコストアップを伴うものであった。そこで、我々は、従来と同等以上の塗装品質を維持しながらVOC削減とCO<sub>2</sub>削減を両立する環境にやさしい新塗装技術の開発に成功し、2002年7月に防府工場に導入した。この新技術は3ウエットオン塗装と呼ばれるもので、従来の中塗り工程を上塗り工程に集約し工程短縮することで、包括的な環境対応を図るものである。この技術の導入により、VOCは水性塗装を採用する欧州規制水準以上を達成し、同時にCO<sub>2</sub>を従来塗装に比べ15%以上削減できた。

### Summary

It is very important to decrease the amount of environmentally hazardous material in automotive industry because environmental protection is internationally focused on. In automotive mass-production plants, Because paint processes emit environmentally hazardous material, such as Volatile Organic Compounds (VOC) and CO<sub>2</sub>, consumed for air-conditioning and baking, measures against them are essential. A large amount of VOC can be reduced with conventional Eco-friendly technology, such as water-base paints, which caused increases in CO<sub>2</sub> and production cost. Therefore, Eco-friendly technology, having quality more than conventional coating and significantly reducing VOC and CO<sub>2</sub>, was developed and introduced into Hofu plant in July, 2002. This technology is called "Three-Layer Wet Paint System" for all-inclusive environmental measures by integrating primer process with topcoat process. This technology materializes a level under the average of European VOC regulations, and CO<sub>2</sub> reduction more than a conventional method by more than 15%.

\* 1, 2 技術研究所  
Technical Research Center

\* 3 ~ 6 車両技術部  
Body Production Engineering Dept.

## 1. はじめに

環境保全の観点から、塗装工場で塗装時や乾燥時に排出されるトルエンやキシレンなどのVOCや、塗装ブースの空調、乾燥炉における膨大なエネルギー消費により発生するCO<sub>2</sub>排出量の削減が望まれている。

一般的なVOC排出量の削減手法である水性塗料やVOC燃焼装置の導入では、溶媒である水を揮発させるための乾燥設備や排出溶剤を直接燃焼するための燃焼装置の追加により、CO<sub>2</sub>排出量が従来塗装に比べて増加することになり、環境対応技術としては十分でない。しかも、大幅な設備投資や塗装コストの増加を伴う。そこで、従来の溶剤型塗料のままVOCおよびCO<sub>2</sub>の排出量を同時に削減し、かつ低コスト化が可能な新しい塗装方法「3ウエットオン塗装技術」を開発したので、その技術内容について紹介する。

## 2. 開発目標とアプローチ

### 2.1 開発目標

VOC排出量の目標値は、現在世界で制定されている規

Table 1 VOC Regulations in the World

Area	VOC emission
Germany(TA-Luft)	Less than 35 (g/m <sup>2</sup> )
UK (EPA PG6/20)	Less than 60 (g/m <sup>2</sup> )
USA (CAAA RACT)	E-Coat Process: 0.16 (kg/l) Primer Process: 1.40 (kg/l) Topcoat Process: 1.47 (kg/l)

Table 2 Kyoto- protocol Outline

Item	Contents
Object gas	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC, PFC, SF <sub>6</sub>
Standard age	1990
Deadline	2012
Japan reduction	6%

Table 3 Development Targets

Emission	VOC	60→35 g/m <sup>2</sup>
	CO <sub>2</sub>	6% reductions
Cost	Less than conventional coating	
Coating quality	Equal to conventional coating	

制値の中で最も厳しいドイツの35 g/m<sup>2</sup>以下とした (Table 1)。CO<sub>2</sub>排出量は、気候変動枠組条約第3回締約国会議 (COP3 京都会議) にて規定された6%削減<sup>(1)</sup>を目標値とした (Table 2)。塗装コストは現行塗装工程と同等以下を、塗装品質は現行塗装工程と同等を目標とした (Table 3)。

### 2.2 開発アプローチ

従来の塗装工程は、電着 / 中塗り / 上塗り (ベース塗装 / クリア塗装) で構成されている。この内の中塗り工程を上塗り工程に集約し、中塗り / ベース塗装 / クリア塗装を連続して塗装後、3層を一度に焼付けする3ウエットオン塗装 (Fig.1) を採用する。この3ウエットオン塗装はこれまでツートン下部色部分に適用されていたが<sup>(2)(3)</sup>、表面光沢が低下するなどの課題のため車全体に適用することはできなかった。この課題を新規低溶剤型塗料、塗料使用量削減技術および工程集約技術の開発により解決し、車全体に適用する。開発の狙いと開発アイテムの関係をFig.2に示す。

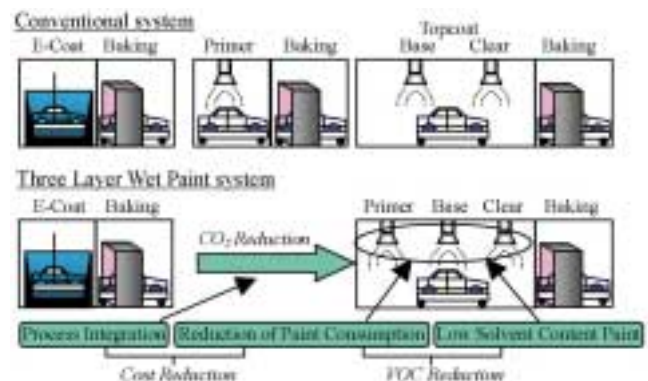


Fig.1 Comparison of Paint Systems

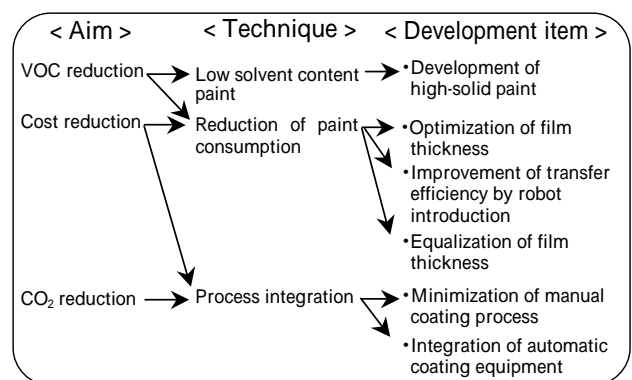


Fig.2 Development Approach

### 3. 塗料の低溶剤化

塗料中の溶剤の動きは、塗料の粘度を塗装可能な状態に低下させることと塗装後の塗装面の平滑性を確保することにある。したがって、単純に溶剤を削減すると塗料粘度が上昇し、一般的なエア霧化式塗装や静電ベル型塗装では塗装できない、あるいは塗装面の平滑性が低下する、などの悪影響がある。そこで、塗料を低溶剤化するために中塗り、ベース、クリア塗料の分子量を小さくし、樹脂粘度を低下させる手法を採用した。

しかし、3ウエットオン塗装では、中塗り/ベース塗装を焼付けなしで連続して塗装するため、樹脂の低粘度化により、中塗り/ベース界面で塗料が混ざり (Fig.3)、色の濁りが発生した。

混ざりを防ぐには中塗りの高粘度化が有効であるが、塗装作業との両立を図るために中塗り/ベース界面のみ高粘度化させることとした。具体的な達成手法として、中塗り塗料の基本樹脂 (ポリエステル樹脂) を低粘度化し、その樹脂と溶解性パラメータ (SP) の異なる高粘性樹脂 (アクリル樹脂) を補助樹脂として添加した塗料を開発した。この塗料は、基本樹脂中に添加した高粘性樹脂が塗装後に低粘度樹脂とのSP値の差により中塗り塗膜表面に偏析し、ベース塗料との混ざりを防ぐバリアー層として機能するため色の濁りを防止できる (Fig.4)。本塗料の開発により、中塗り/上塗り塗料中のVOC量を合計で約30%削減することができた。

### 4. 塗料使用量削減

塗装工程からのVOC排出量の削減を狙う場合、使用する塗料に含まれる溶剤量の削減と併せ、塗料使用量の削減が有効である。塗料使用量の削減方法として、塗装膜厚の適正化、塗着効率の向上、塗装膜厚の均一化の3つの観点から取り組んだ結果、塗料使用量を15%削減することができた。

#### 4.1 塗装膜厚の適正化

一般的に塗装面の平滑性はウエットな状態の塗装膜厚 (ウエット膜厚) と相関関係があり、ウエット膜厚を厚くするほど塗装面の平滑性は向上する<sup>(4)</sup>。これは塗装焼付け前の流動性を有するウエット膜により下地の鋼板や電着塗装の荒れた下地表面を覆い隠すためと考えられる。

3ウエットオン塗装では中塗り焼付け工程が廃止されるため、焼付け工程前のウエットな状態の塗膜構成は、従来の中塗り塗膜単層に対し、ベースおよびクリア塗膜も加わる。したがって、流動性を有するウエット膜厚が従来塗装に比べ厚くなるため、塗装面の平滑性に対しては有利となり、単層当たりの塗装膜厚を削減できる。

##### (1) 中塗り塗膜の薄膜化

従来の中塗り塗膜には、外観確保と耐久性確保の2つの要求機能があり、外観確保のためには30 $\mu$ m以上の膜厚が、耐久性確保のためには20 $\mu$ m以上の膜厚が必要である。したがって従来塗装では両方の機能を満足させるために30 $\mu$ m塗装していた。しかし、3ウエットオン塗装では、中塗り塗装、ベース塗装およびクリア塗装を一度に塗装するため、外観確保に必要なウエット状の塗装膜厚30 $\mu$ mは中塗り塗膜単独で確保する必要がない。よって中塗りの機能は耐久性のみに限定されることにより膜厚を20 $\mu$ mまで薄膜化できた。

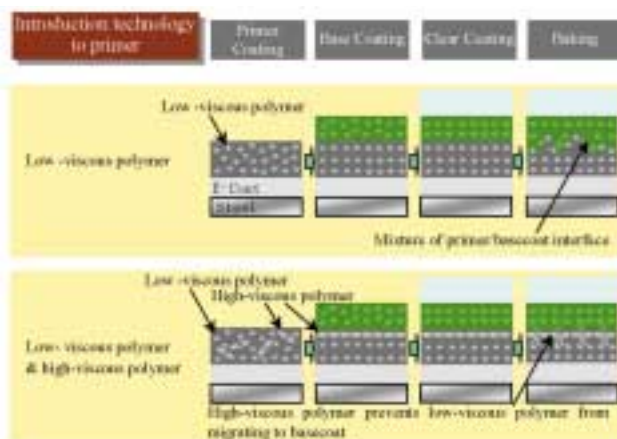


Fig.4 Function of High-viscous Polymer

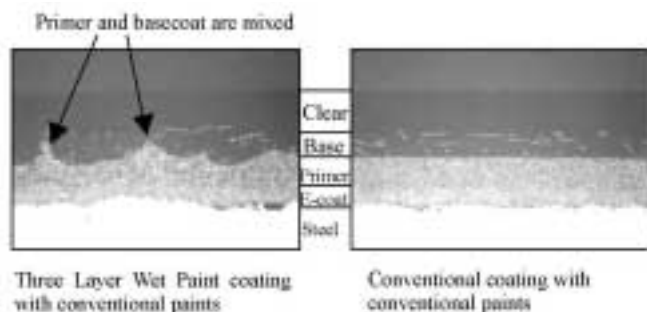


Fig.3 Comparison of Coating Cross-sectional Surface

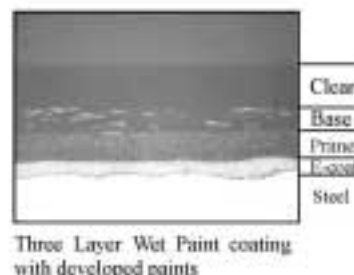


Fig.5 Cross-sectional Surface of Developed Coating

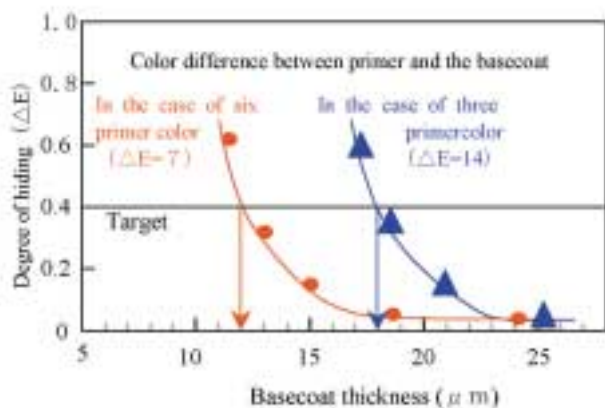


Fig.6 Relationship between Primer/Basecoat Color Difference and Degree of Hiding

(2) ベース塗装の薄膜化

ベース塗装塗膜の要求機能は発色の確保である。下地である中塗りの色はベース塗装の色と異なるため、中塗りの色を隠蔽しベース塗装本来の塗色を得るには一定量以上の塗装膜厚が必要である。この必要膜厚は、ベース塗装と中塗りの色差 ( E ) により変化し、 E を小さくすることにより薄膜化できる。自動車には種々の塗色が設定されており、多岐に渡るベース塗装色域の幅により中塗り/ベース塗装間の E は大きくなるため、ベース塗装膜厚の抑制には複数の中塗り色採用が有効である。今回、中塗りを3色から6色にすることで、中塗り/ベース塗装間の E を14以下から7以下に近づけることができた。この結果、塗装の隠蔽度を変えることなく、ベース塗装の塗装設定膜厚を18 μmから12 μmに薄膜化できた ( Fig.6 )。

(3) 内板部への中塗り塗装の廃止

従来の中塗り塗装は、外板塗装時に内板へ付着する塗装ダストによる肌荒れを解消する目的でボデーの外板部に加えてドアやキャブサイドなどの内板部にも塗装されていた。しかし、3ウエットオン塗装ではダストとして付着している中塗り塗料がウエットな状態でベース塗装が塗装されるため、中塗りダストとベース塗装がなじみ、肌荒れが発生しない ( Fig.7 )。このメリットを活かし内板部への中塗り塗装を廃止した。

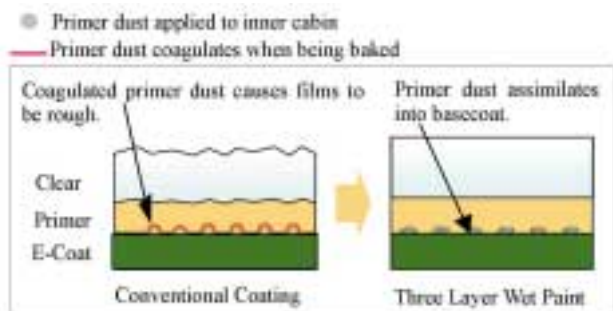


Fig.7 Effect of Three Layer Wet Paint on Film Smoothness

4.2 ロボット塗装による塗着効率向上

塗着効率とは、塗装面に対して塗装された塗料が塗装面に付着する割合を示す。塗着効率が高いほど塗装時の塗料ロスが少なくなる。

この塗着効率が悪化する原因としては、塗装時の塗料の非塗物以外への飛散と跳ね返りがあり、以下の対策を実施した。

静電ベル型塗装機の塗装条件を整理し、塗着効率に対する寄与率を実験計画法により明らかにした ( Table 4 )。その結果、塗着効率は塗装距離との相関が最も高く、一定の塗装距離を保つことが塗着効率を向上させる上で最も有効であることが分かった。

この塗装距離を一定に保つため、新たに塗装ロボットを導入し、車体を形状の似通ったブロック毎に塗装することとした ( Fig.8 )。この結果、塗装距離のばらつきを ± 50mm から ± 10mm に削減することができ、塗着効率をベース塗装で63%から75%に、中塗りおよびクリア塗装で75%から85%に向上できた。

Table 4 Verification by Design of Experiment

Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased estimate of population variance	F0	R-Square
Speed of bell	13	2	6.3	1.65	0.8%
Painting distance	355	2	177.3	46.24	59.3%
Amount of exhaust	52	2	25.8	6.72	7.5%
Rotation speed of bell	55	2	27.7	7.23	8.2%
Flowing quantity of S/A	13	2	15.4	4.02	4.0%
Impressed voltage	27	2	13.3	3.46	3.2%
E	54	14	3.8	-	17.0%
Total	585	26	-	-	100.0%

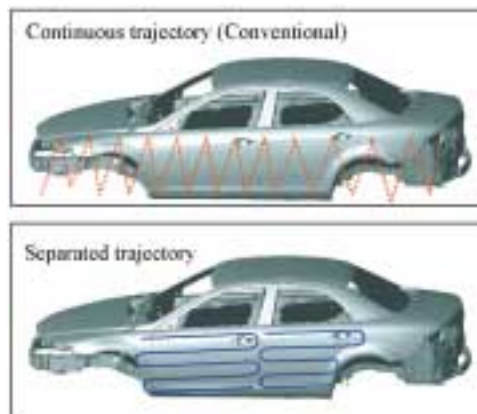


Fig.8 Comparison of Robot Trajectory

### 5. 工程の集約



Fig.9 Reduction of Over Spray

#### 4.3 塗装精度の改善による塗装膜厚の均一化

車体をブロック毎に塗装する場合、ブロック間の隣接部は、塗装膜厚が不均一になりやすい。これは隣接部の塗装が2度塗り（オースプレー）となるため、塗装膜厚を均一化するためには、オースプレーを抑制すること、すなわち塗装の一時中止（塗装カット）が効果的であり（Fig.9）、この塗装カットを精密にコントロールする必要がある。塗装カット条件としては、塗装時と未塗装時の切換え反応スピードが最も重要であり、これに対応する塗装制御技術を開発した。

切換え反応スピードは、車体の塗装スピードから逆算し、0.08sec以下にする必要があるが、この切換えスピードを阻害する原因として電気信号およびエア信号の遅れが考えられる。この対応として、電気信号に対しては処理ソフトの高速化と処理経路の単純化を行い、エア信号に対しては要因となるホース長の最短化を行い、全ロボットに対して狙いの応答性を確保した。

CO<sub>2</sub>排出量の削減、光熱費および人件費の削減を狙い、従来の上塗りブース（長さ75m、幅5m、高さ3.8m 目標値）を延長することなく中塗り工程を上塗りブース内に集約し、従来使用してきた中塗りブースの完全停止を目指した。

このために、人間が塗装するマニュアルゾーン、塗装ロボットが塗装する自動塗装ゾーンを見直し、各々に対して無駄なく配置できるレイアウトに集約した（Fig.10）。

#### 5.1 マニュアルゾーンの極小化

従来の上塗りブースレイアウトでは、ベース塗装の2ステージ間に自動塗装ゾーンとマニュアルゾーンを交互に配置していたため、ブース内に塗装作業を行わない無駄なスペースが多く存在していた。

そこでベースゾーンにおいて自動塗装ゾーンとマニュアルゾーンを1箇所ずつにまとめることで無駄なスペースを減らした。また、マニュアルゾーンの作業者の配置や担当作業の配分を見直すことで、必要な仕事量とラインスピードを確保したままライン長を短縮した。この確保した上塗りブースの空きスペースに中塗り塗装工程を移管することにより、中塗りブースの完全停止を実現した。

#### 5.2 自動塗装設備の集約

今回導入した塗装ロボットを、上塗りブース内の制約されたスペースに効率的に集約するため、塗装機数の削減に取り組んだ。

従来のレシプロ塗装機は、作動自由度が低いため部位によってポデー1台当たりの仕事量、つまり塗装面積の差が大きく、平均の仕事量も少ない状態であった。そこで、塗装ロボットでは1台当たりに分担させる塗装範囲を平準化して塗装機1台当たりの仕事量を引き上げた。また塗装機

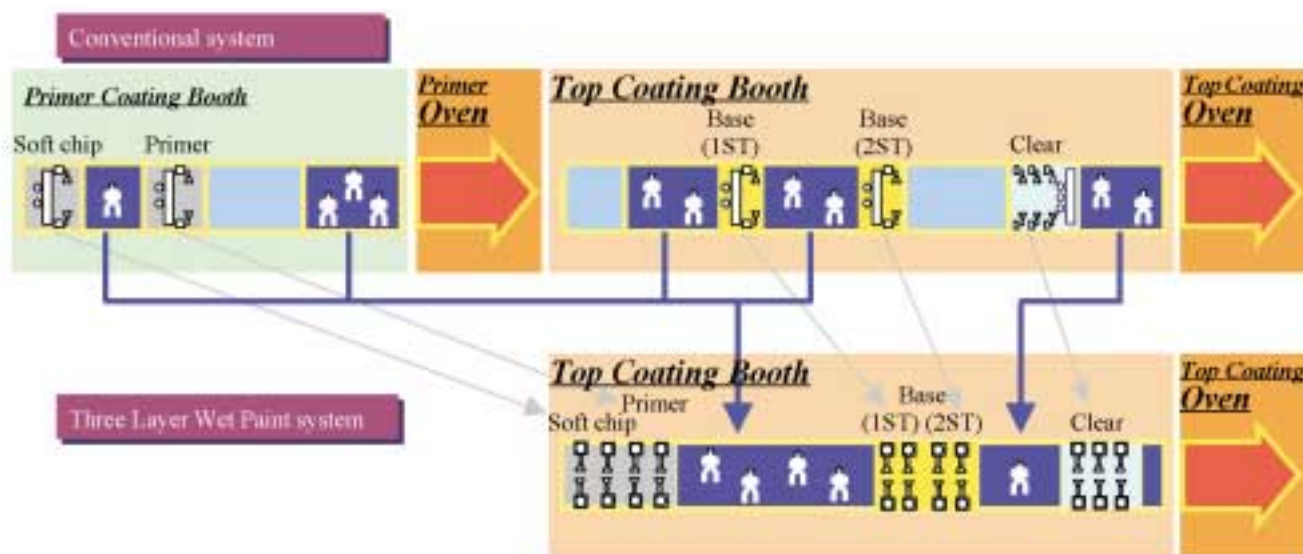


Fig.10 Integration of Paint Booths

の軌跡を見直すことで、塗装後の折り返し時間を短縮し未塗装状態での動作を少なくすることで塗装機の効率を向上させた。これら塗装機の効率アップにより、中塗りおよび上塗りの塗装機数を従来の30基から22基に削減し、75mの上塗りブースの中に、チップングプライマー、中塗りおよび上塗り塗装に必要な全ての塗装ロボットを配置することができた。

またブース内の配置を考えた場合、塗装ロボットは動作自由度が大きいことから、他ロボットや付帯設備およびブース内壁との干渉が懸念される。そこで各ロボットの動作空間をもとに、高さ/幅方向に最もコンパクトに塗装できる設置位置およびロボット姿勢をRobcadを用いて机上検証することにより、上塗りブース幅5m、高さ3.8mの制約の中で塗装可能なロボット配置を実現した。

## 6. 導入結果

以上のように3ウエットオン塗装技術を開発し、2002年2月より量産車への適用を開始した。その後、順次適用色を拡大、7月に全塗色への適用を完了した。

この技術の導入による効果は以下の通りである。

### (1) VOCおよびCO<sub>2</sub>排出量の削減

VOC排出量は従来の60g/m<sup>2</sup>からドイツ規制値並みの35g/m<sup>2</sup>となり、約45%の削減を達成した。また、CO<sub>2</sub>排出量は、従来の中塗りブースでの発生分と同量である15%を削減でき、開発目標値である6%削減を過達することができた。

### (2) 塗装品質

塗装外観は、色調、平滑性共に従来塗装と同等の品質を維持することができた。

また、耐候性、耐チップング性などの耐久品質においても従来塗装と同等であった。

### (3) 塗装コスト

ボデー1台当たりの塗装コストは、従来塗装に比べて15%削減できた。

## 7. おわりに

塗料の低溶剤化、塗料使用量の削減、工程集約の三つの対応により包括的な環境対応技術として3ウエットオン塗装を完成することができた。

今後、本技術をマツダの新たな標準塗装として他工場に展開していくと同時に、水性塗料への適用など更なる技術開発に取り組むことによって、環境対応技術としてより一層の熟成を図っていく。

## 参考文献

- (1) 小松澤俊樹：環境保護と主要法規制（第1回）、塗料の研究（関西ペイント）、No.138、p.42-45（2002）
- (2) 森政義：ツートン色の中塗り同時工法、塗装工学、Vol.33、No.4、p162-165（1998）
- (3) 亀迫裕介ほか：ツートン車の3Wet-on塗装技術の開発、マツダ技報、No.18、p119-125（2000）
- (4) 山根貴和ほか：高仕上がり塗装技術の開発、自動車技術会学術講演会前刷集、No.891、p127-130（1989）

## 著者



重永 勉



山根貴和



神田輝夫



亀迫裕介



小笠原敏文



掛 正喜