

論文・解説

24

塗装部の耐食性迅速評価法を活用した品質異常予知技術

Quality Abnormality Prediction Technology Utilizing Accelerated Evaluation Techniques for Corrosion Resistance of Painted Parts

江崎 達哉^{*1} 浅田 照朗^{*2} 佐々木 将展^{*3}
Tatsuya Ezaki Teruaki Asada Katsunobu Sasaki
足立 崇勝^{*4} 重永 勉^{*5} 高見 明秀^{*6}
Takamasa Adachi Tsutomu Shigenaga Akihide Takami

要 約

自動車の防錆品質は、お客様の安全・安心に、直結し非常に重要である。自動車には世界のさまざまな過酷な環境でも腐食しないように、塗装などの防錆対策が施される。これまで著者らは、塗装部の耐食性を迅速に定量評価する技術を開発した。この技術の活用により、防錆品質を閾値によって定量的に管理できることに加えて、耐食性の定量評価により得られる電流と電圧からなるプロファイルの解析に機械学習を適用することで、品質異常の予兆を検知することが可能となった。

Abstract

The rust prevention quality in vehicles is extremely important for the safety and security of customers. Rust preventive measures such as painting, etc. are taken to prevent corrosion even in various harsh environments around the world. We have developed the accelerated evaluation techniques to assess corrosion resistance quantitatively. Utilization of this developed technology enables us to detect signs of quality abnormalities by using machine learning for analysis of the profiles that consist of current and voltage obtained by corrosion resistance evaluation, in addition to being able to quantitatively control the rust prevention quality with a threshold value.

Key words : Materials, Paint, Test/Evaluation, Corrosion resistance, Coating

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、自動車業界では電動化とそれに伴う軽量化が加速している。特に、市場実績のない車両構造や部品の適用、マルチマテリアル化の拡大が著しい。更に、ライフサイクルアセスメント（LCA）削減のために製造設備や製造方法の変更も急速に進んでおり、商品開発プロセスの変革による開発の効率化がより一層求められている。安全・安心を担保する基本品質と社会生活をいきいきと送るための魅力品質を向上させることが、人とクルマの共生には必須である。そのため、自動車には世界のさまざまな過酷な環境でも腐食しないように、塗装に代表される防錆対策が施される。従来の防錆評価は、市場の代表的な腐食環境に基づき試験槽内で腐食を促進することで、市場15年相当分の耐久性を2~4か月程度かけて試験するが（以降、実腐食試験と記載）、材料、工法、生産条件などに影

響する因子が多岐にわたり防錆品質を造り込むためには複数回の試験が必要で、ひとつの技術を開発するために少なくとも数年を要するといった課題がある。自動車の防錆技術の更なる発展、カーボンニュートラル対応やLCA削減をタイムリーに実現するためには、耐食性（防錆機能）を迅速に定量的に評価する技術が必須であり、それを活用した効率的な品質管理も重要である。

これまでに著者らは、塗装部の腐食は、水やイオン物質などの腐食因子が防錆塗膜を透過して素地金属に到達することで始まり、素地金属の溶出に伴い発生した電子を消費する電気化学反応で腐食が進展するというメカニズムから、塗装部の防錆機能を①腐食抑制期間と②腐食進展速度の2つで整理し（Fig. 1）、その双方を電気化学的な手法で数分~数時間程度と迅速に定量評価する技術を実用化した^(1~5)。本研究では、防錆機能の迅速評価法の中で、①腐食抑制期間を評価した際の分極プロファイル（電流/電圧プロファイル）について、電着塗膜の故

*1~6 技術研究所
Technical Research Center

障モードとの関連性を明らかにする。更には、塗膜の品質異常を予知することをねらい、データ解析に機械学習を活用した技術の開発にも言及した。

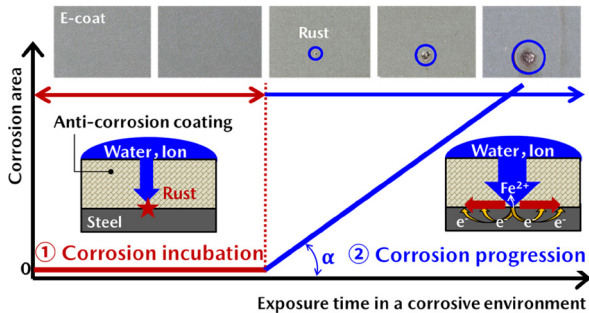


Fig. 1 Functions of Anti-corrosion Coating

2. 電着塗膜の故障モード

自動車用の電着塗料は、主にエポキシ樹脂により構成される。膜厚が厚く、膜質がよいものほど、腐食因子である水やイオン物質の遮断性が高く、錆の発生が遅いと考えられる。このことから電着塗膜の故障モードは、膜厚異常と膜質異常に大別できると考えられた。膜厚異常を細分化すると、素材自体（鋼板）の表面凹凸により凸部で有効膜厚が減少する場合、塗膜中のコンタミ（溶接スパッタや鉄粉など）で有効膜厚が減少する場合、塗料や塗装条件が悪くガスピンホールが発生して有効膜厚が減少する、の3つに分類できる。膜質異常の原因は、塗料中に含まれる硬化触媒の不足や炉内での加熱不足により樹脂の架橋密度が低下する、市場において紫外線の影響によって電着樹脂の架橋が切れる⁽⁶⁾ことが考えられた (Fig. 2)。

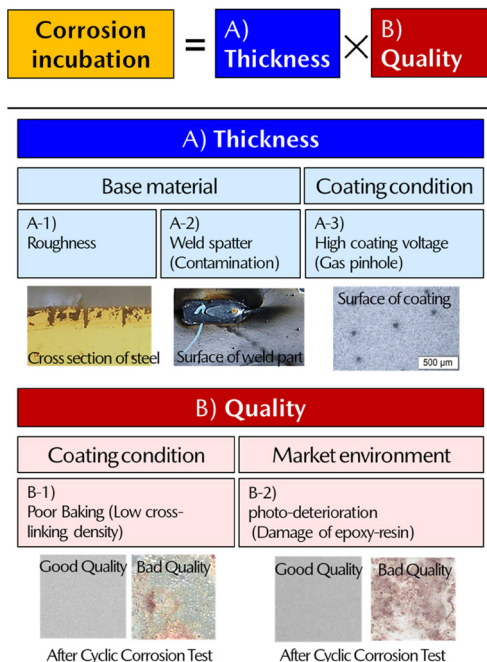


Fig. 2 Failure Mode of Anti-corrosion Coating

3. 実験手法と機械学習手法

3.1 腐食抑制期間（分極プロファイル）の評価・解析方法

塗装面上に電解質溶液を保持した状態で、塗装金属材料の鋼板と塗膜表面との間に時間に対して徐々に増大する電圧を印加し、水とイオン物質を強制的に塗膜に透過させる。あらかじめ設定した電流値に到達した時の電圧値に基づいて耐食性を評価する。この電圧値と従来の実腐食試験で塗装金属材料に錆が出始めるまでの期間との関係をあらかじめ求めておくことで、塗装金属材料の絶縁電圧から腐食抑制期間を求めることができる^(1~5)。本研究では、第2章で示したあらかじめ故障モードの分かっている電着塗装試験片を使用した (Fig. 2)。また、電解質溶液として 5wt% 塩水を用い、1V/s の速度で昇圧を行った。その際に得られた分極プロファイル（電流/電圧プロファイル）を解析した (Fig. 3)。

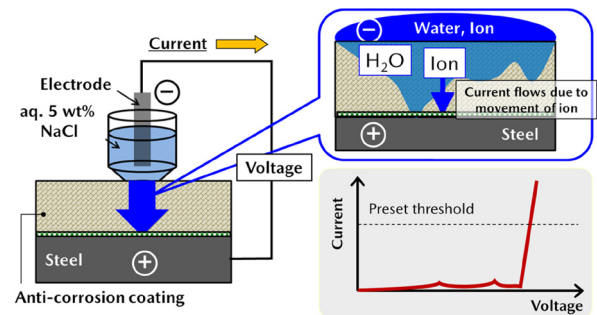


Fig. 3 Evaluation Method of Corrosion Incubation

3.2 分極プロファイルの機械学習

正常塗膜、及び代表的な故障モードの試験片を用いた試験から得られた分極プロファイル（電流/電圧プロファイル）を入力として、正常、異常（膜厚異常、膜質異常）の分類を出力とした多クラス分類モデルをランダムフォレスト分類器⁽⁷⁾で構築した。教師データは、分極プロファイルとその判定ラベルをセットとした合計 62 仕様の試験結果を使用した。その内訳は、正常塗膜 19 仕様、異常塗膜 43 仕様（膜厚異常 19 仕様、膜質異常 24 仕様）である。

4. 実験結果と考察

4.1 電着塗膜の代表的な故障モードと分極測定における通電モデル

電着塗膜の代表的な故障モードと腐食抑制期間評価における通電モデルを示す (Fig. 4)。正常塗膜では、塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く、塗膜内の最も脆弱な部位で高い電圧で絶縁が破壊され通電すると考える (Fig. 4 上段)。従って、分極プロファイルは電圧が上昇しても初期には電流が流れず、数百Vの高い電圧で絶縁が破壊され急激に電流が増加する傾向を示すことが分かっている。

次に、膜厚異常の代表例として、塗膜内に溶接スパッタや鉄粉などのコンタミが存在する場合について考える。溶接スパッタや鉄粉が存在する部位は局部的に塗膜の有効膜厚が減る。水やイオン物質は正常塗膜と同様に塗膜内へ浸透し難いが、水とイオン物質がスパッタや鉄粉に接触すると低い電圧で通電が起こる (Fig. 4 中段)。その際に閾値として設定した電流値以下の通電が起こる場合、水の電気分解で発生したガスが通電起点を一時閉塞し、分極プロファイルに一つの凸形状が形成される。大きさの異なる複数のスパッタや鉄粉が塗膜中に存在すれば、分極プロファイルは幾つもの凸形状をもつことが分かっている。

最後に、膜質異常の代表例として、加熱不足で樹脂同士が十分に架橋していない場合について考える。この場合には塗膜全体に水とイオン物質が容易に浸透して素地金属に到達するため、膜厚が同等であれば、正常塗膜と比較すると低い電圧で塗膜内全体に微弱な電流が流れ始めると考えられる (Fig. 4 下段)。このことから、膜質の悪い塗膜の分極プロファイルは、正常塗膜と同様に初期には電流が流れない状態が続く、正常塗膜よりも低い電圧で通電し、その立ち上がりの傾きは緩やかになる。

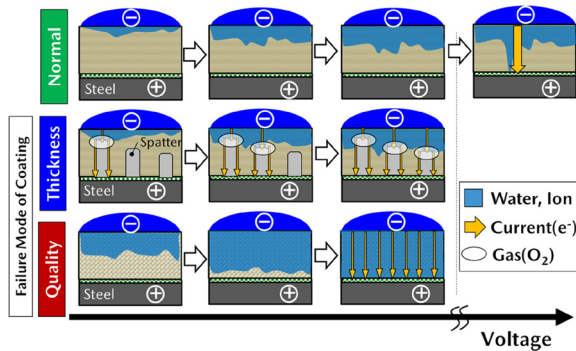


Fig. 4 The Energization Model in Evaluation of Typical Failure Mode and Anti-corrosion Coating

4.2 電着塗膜の膜厚と分極プロファイル

溶接部近傍において鋼板表面に存在するスパッタの個数が異なる試験片に電着塗装を行った。何れの試験片も電着塗装時の加熱温度は 423K、加熱時間を 1200s とした。塗装前の溶接ビード周辺のスパッタの存在状態、及び塗装後の分極測定の結果を示す (Fig. 5)。写真は代表的な部位について示したものである。図中のスパッタ個数はデジタルマイクロスコープ ((株)キーエンス製, VHX-5000) を用いて 10 倍で 5 視野を観察した結果を基に試算した。分極測定は、電解質溶液 (5wt% 塩水) を用い、電解質溶液と電着塗膜の接触面積は $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ とした。スパッタの個数が多い試験片ほど分極プロファイルに凸形状が多いことが分かる。一方、鋼板表面にスパッタの存在しない試験片では凸形状は認められなかった。凸形状が発生する理由は 4.1 節の通電モデルで示し

たように、溶接スパッタが存在する部位で局部的に塗膜の有効膜厚が減ることに起因すると考えられた。塗膜内への水やイオン物質が浸透し、スパッタや鉄粉に接触すると通電が起こる。その際に閾値として設定した電流値以下の通電が起こる場合には、水の電気分解で発生したガスが通電起点を一時閉塞し、分極プロファイルに一つの凸形状が形成される。また、この凸形状の数と単位面積当たりのスパッタ数は良い相関を示した (Fig. 6)。ガスピンホールが存在する試験片においても同様の傾向が認められた。以上のことから、電着塗装面における局所的な膜厚異常の検知には、分極プロファイルの凸形状の数を分析することが効果的であると考えられた。

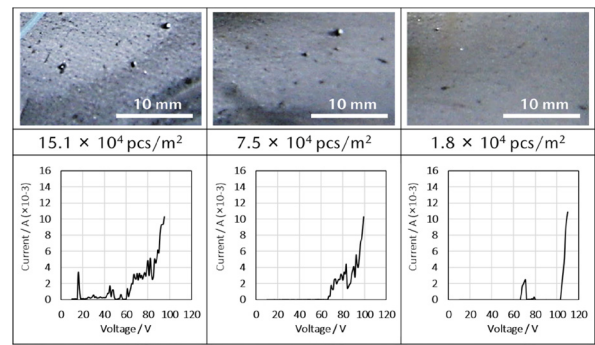


Fig. 5 Polarization Profile of Test Pieces with Different Spatter Amounts, Baking Temperature: 423K, Baking time: 1200s, Thickness: $30 \times 10^{-6} \text{ m}$

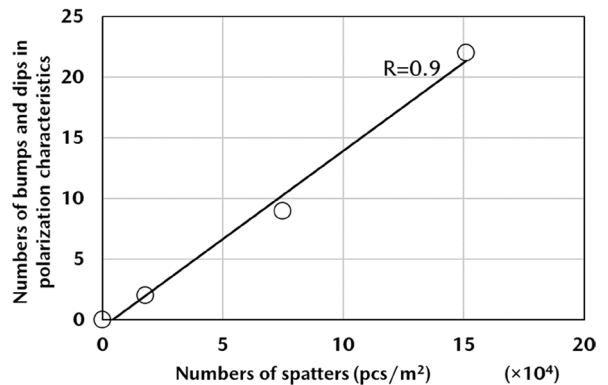


Fig. 6 Relationship Between the Number of Spatters and the Number of the Convex Shapes in the Polarization Profile, Baking Temperature: 423K, Baking time: 1200s, Thickness: $30 \times 10^{-6} \text{ m}$

4.3 電着塗膜の膜質と分極プロファイル

加熱によって樹脂の架橋反応を進行させる自動車用の電着塗料において、樹脂の熱劣化が起こらない加熱温度範囲 (408~463K 程度) であれば、樹脂の架橋密度は加熱温度が高く、加熱時間が長いほど高くなる。樹脂の架橋レベルの代用評価法として、一般にゲル分率 (%) が用いられる。ゲル分率 (%) は、未硬化の樹脂分をアセトンで還流して溶出させ、その際の塗膜の重量変化から未硬化の樹脂量を試算することで算出できる。今回、電

着塗装時の加熱温度を 408~433K, 加熱時間を 900~1200s とし, ゲル分率が 78.4~95.3% の試験片を作製して分極プロファイルの解析を行った。ゲル分率が 90% 未満は本電着塗料の適正使用範囲から外れる領域である。分極測定の結果, ゲル分率が低くなるに従い, 通電開始電圧が低下した (Fig. 7)。この通電時の立ち上がりの傾きを, 視覚的にわかり易くするために, 測定時の最大電流値と最大電圧値でまとめた (Fig. 8)。ゲル分率が 90% 以上の正常な塗膜の分極プロファイルは, 初期には電流が流れず, 高い電圧で急激な立ち上がりを示した。

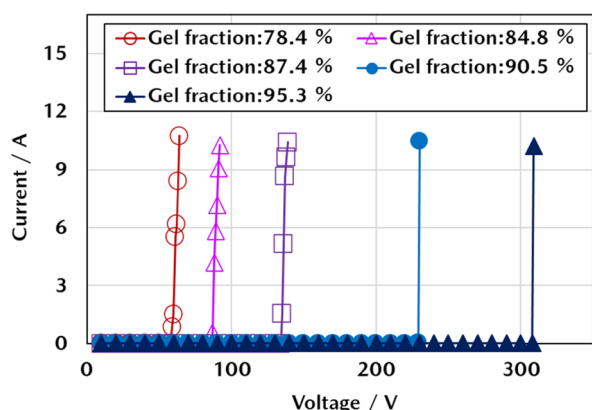


Fig. 7 Polarization Profile of Test Pieces with Varying Gel Fractions, Baking Temperature: 408-433K, Baking Time: 900-1200s, Thickness: 10×10^{-6} m

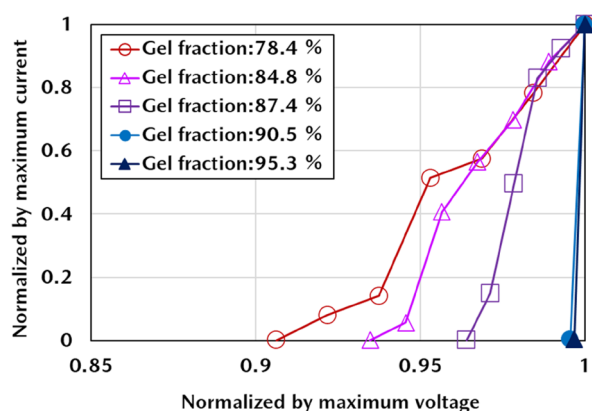


Fig. 8 Polarization Profile Normalized by Maximum Current Value and Maximum Voltage Value, Baking Temperature: 408-433K, Baking Time: 900-1200s, Thickness: 10×10^{-6} m

これは前述したように, 正常塗膜では, 塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く, 高い電圧に到達した際に最も脆弱な部位で急激に絶縁破壊 (通電) が起こるためであると考えられる。一方, ゲル分率が 90% 未満と低く膜質が悪い塗膜では, 正常塗膜と比較すると低い電圧で通電が開始し, 緩やかな傾きの立ち上がりを示した。塗膜全体に水とイオン物質が浸透して素地金属に到達し, 微弱な電流が塗膜全体を介して流れたためであると考えられる。紫外線を照射して劣化させた塗膜においても同様の

傾向が認められた。これらのことから, 電着塗膜の分極プロファイルの解析から, 膜質変化をとらえるためには, 通電開始の電圧値に加え, 分極プロファイルの立ち上がりの傾きを分析することが重要であると考えられた。

4.4 分極プロファイル解析に対する機械学習の適用

通電モデルを基に解析した分極プロファイルとその特徴から, 電着塗膜の故障モードの判定に機械学習を適用した。機械学習手法はランダムフォレスト分類を使用した。構築した分類モデルの精度は, 一点除外交差により評価した。

まず, 正常塗膜・異常塗膜の 2 クラス分類のモデルを構築し, 分類精度を確認した結果, 100% であった。すなわち, 正解ラベルが正常塗膜である 19 仕様は全て正常塗膜と判定され, 正解ラベルが異常塗膜である 43 仕様は全て異常塗膜と判定された。次に, 異常塗膜の中で異常原因を細分化し, 塗膜の故障モード別 (膜厚異常, 膜質異常) に分類し, 3 クラス分類のモデルを構築した。分類精度は, 正解ラベルが正常塗膜の仕様が 100%, 膜厚異常の仕様が 100%, 膜質異常の仕様が 95% であった。すなわち, 正解ラベルが膜質異常である 24 仕様のうち, 1 仕様のみ膜厚異常と判定された (Fig. 9)。

Failure mode	Classification accuracy	Example of Cyclic Corrosion Test results
Normal	100 %	
Abnormal	100 %	Abnormal of thickness
		Abnormal of quality

Fig. 9 Failure Mode of Coating, Classification Accuracy in Machine Learning, Example of Cyclic Corrosion Test (CCT) Results

図の右列 (Fig. 9) に各故障モードの試験片における実腐食試験後の腐食状態の一例を示した。正常塗膜に錆の発生はないが, 同条件で実腐食試験を行った膜厚異常の塗膜には局所的な腐食が認められた。膜厚が薄い部分が局所的に存在し, その部分が早期に錆びたと考える。膜質異常の塗膜では全面に腐食が認められた。膜質が悪い塗膜では, 塗膜全体に水とイオン物質が浸透して素地金属に早期に到達し, 全面が腐食したものと考えられ, これらの現象は分極測定における通電モデルと合致する。以上のことから, 分極プロファイル解析に機械学習を適用することで, 専門家が都度データを詳細に解析することなく, 正常から異常な状態へ変化していく早期の段階で問題を発見できると考えられた。

4.5 耐食性迅速評価法の品質管理での活用

防錆品質管理システムの例を示す (Fig. 10)。工場ごと

に本評価装置を配備し、製品検査工程で耐食性評価を行い分極プロファイルデータを得る。この分極プロファイルデータをデータサーバーに集約して一元管理するとともに、事前に機械学習により構築した分類モデルを用いて分極プロファイルの解析を行うことで、一般的な閾値管理に加え、品質が正常から異常な状態へ変化していく早期の段階で、問題発生の有無を発見できる。解析の結果、異常の予兆を検出した場合には工場に品質異常アラートを送信し、工程を点検することで品質異常を未然に防ぐことが可能となる。このように、品質管理に未然防止の仕組みを導入することができると考えられた。

本技術はエポキシを主とする自動車の電着塗装以外に、幅広い塗装系にも適用可能であることから、自動車業界のみならず、塗装鋼板を取り扱う他業界への展開も期待できる。

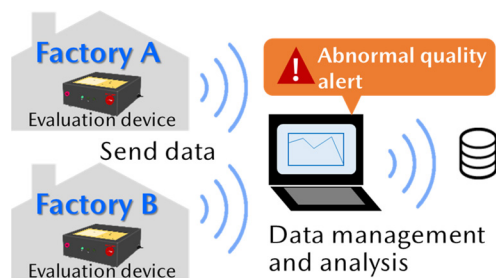


Fig. 10 System to Control the Rust Prevention Quality

5. まとめ

(1) 防錆定量法の分極プロファイルを分析することで、電着塗膜の異常原因を推察できることを明らかにした。

(2) 正常な電着塗膜の場合には、塗膜内へ水やイオン物質が浸透し難く、腐食抑制期間の分極測定において、数百Vの高い電圧に到達した際に最も脆弱な部位で絶縁が破壊され急激な通電が生じることが分かった。

(3) ゲル分率が90%未満と低く膜質に異常のある塗膜では、塗膜全体に容易に水とイオン物質が浸透して素地金属に到達するためであると考えられるが、正常塗膜と比較して低い電圧で通電が開始し、緩やかな傾きの立ち上がりを示すことが分かった。

(4) スパッタなどのコンタミにより局所的な有効膜厚低下が生じている塗膜は、分極プロファイルに複数の凸形状を生じることが分かった。また、凸形状の数と単位面積当たりのスパッタ数は高い相関 ($R=0.9$) があることを見出した。分極プロファイルに凸形状が生じる理由は、塗膜内へ浸透した水やイオン物質がスパッタに接触すると通電が開始し、この時の電流値が閾値として設定した値以下であれば、水の電気分解で発生するガスが通電起点を一時閉塞して電流が流れなくなることに起因すると推定した。

(5) 分極プロファイルの特徴を基に機械学習モデルを構築し、電着塗膜の故障モードを自動判定する技術を開発した。

(6) 正常塗膜、及び代表的な故障モードの試験片を用いた試験から得られた分極プロファイルから、まず、正常・異常の2クラス分類を実施した。その結果、分類精度は100%であることがわかった。

(7) 異常塗膜の中で原因を更に分類すると膜厚異常の分類精度は100%、膜質異常は95%であった。分極プロファイル解析に機械学習を適用することで、専門家が都度データを詳細に解析することなく、品質異常を予知することが可能となった。

本技術を活用した防錆品質管理システムにより、品質管理に未然防止の仕組みを導入することが期待される。

参考文献

- (1) 浅田照朗ほか：モデルベース研究による防錆定量評価法を活用した品質異常予知技術，自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，ROMBUNNO.284 (2022)
- (2) 浅田照朗ほか：塗装部の耐食性迅速評価技術のモデルベース研究開発，マツダ技報，No.38，pp.133-138 (2021)
- (3) 浅田照朗ほか：高電圧印加法を用いた電着塗装鋼板の耐食性評価，材料と環境，Vol.68，No.4，pp.92-97 (2019)
- (4) 浅田照朗ほか：塗装部の新規耐食性短期評価法の開発，及び防錆技術開発・品質管理への活用，自動車技術会春季大会 学術講演会講演予稿集，pp.1148-1151 (2017)
- (5) 浅田照朗ほか：塗装部の耐食性評価法とその活用事例，第63回材料と環境討論会 講演集，pp.175-176 (2016)
- (6) 矢部政実ほか：各種耐光性試験による塗膜の劣化メカニズムの解析，塗料の研究，No.146，pp.8-15 (2006)
- (7) 川久保秀子：重みつきランダムサンプリングによるランダムフォレスト法，情報処理学会研究報告 数理モデル化と問題解決 (MPS)，Vol.2011-MPS-86 No.33，pp.1-2 (2011)

■著者■



江崎 達哉



浅田 照朗



佐々木 将展



足立 崇勝



重永 勉



高見 明秀