

みずのだいすけ
氏 名 水野大輔
授与学位 博士(工学)
学位授与年月日 平成26年3月26日
学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 知能デバイス材料学専攻
学位論文題目 自動車用防錆鋼板の腐食寿命予測および最適防錆設計に関する研究
指導教員 東北大学教授 原信義
論文審査委員 主査 東北大学教授 原信義 東北大学教授 成島尚之
東北大学教授 鈴木茂

論文内容要旨

亜鉛系めっき鋼板は、その優れた耐食性から幅広い分野において製品や構造物の品質確保に貢献している。特に自動車における防錆品質は、防錆鋼板の開発および適用とともに飛躍的に向上してきた。自動車における防錆品質の要求はさらに厳格化している。一方で、自動車市場の急速な拡大、製造コストのミニマム化、金属資源の枯渇など自動車産業を取り巻く環境も刻々変化している。本論文は、近年の自動車防錆設計の課題を鑑み、自動車用防錆鋼板の開発および選定を適切に行うための腐食寿命予測および最適防錆設計に関する研究内容をまとめたものである。論文は、全6章から構成されており、各章における要旨は以下のとおりである。

第1章では、序論として本研究の背景と目的について述べた。自動車における腐食は、北米や欧州などの寒冷地において路面凍結による事故防止のために散布される融雪剤により引き起こされ、1970年代社会問題にまで発展した。自動車の耐食性を高めるために、腐食が激しい部位に亜鉛系めっき鋼板が適用され、自動車の防錆品質は飛躍的に向上した。亜鉛系の自動車用防錆鋼板は、今日においても自動車の防錆品質において非常に重要な役割を果たしている。亜鉛系めっき鋼板の開発は、自動車の防錆対策とともに進められ、これまでにめっきの組成や付着量などが異なる様々な種類の自動車用防錆鋼板が開発されてきた。防錆鋼板の開発は、自動車の開発期間短縮への要求から、短時間で材料の耐食性の優劣を見極めるために、腐食促進試験による評価を中心に進められてきた。しかし腐食促進試験と実際の自動車における防錆鋼板の腐食との相関性は十分に明らかにされておらず、腐食試験では耐食性が優れていても実車において十分な耐食性が得られないなど防錆鋼板の開発の方向性を誤る可能性がある。また、近年自動車市場はアジア地域を中心に拡大を続けている。これまでは北米や欧州、国内などの融雪塩散布地域を中心に防錆対策が講じられてきた。しかし、アジアなど新しい市場における自動車使用環境の腐食性は十分に把握されておらず、このような地域に対する防錆品質とトータルコストミニマムを両立する最適防錆設計が要求されている。そこで本研究では、このような自動車用防錆鋼板の開発および防錆設計の課題に対して、自動車の腐食実態把握、腐食促進試験法と実際の自動車の腐食との相関性、自動車使用環境の腐食性

の定量化に取り組み、自動車用防錆鋼板の腐食寿命予測と最適防錆設計の方法についての提案を行うことを目的とした。

第2章では、自動車用防錆鋼板の耐食性を適切に評価、選定するための前提として、まず実際の自動車の腐食実態を把握することを行った。これまでも融雪塩散布地域における自動車の腐食実態について報告はされているが、気候変動や法規行政などにより自動車環境も年々変化しており、継続的な解析によりトレンドを追跡することは重要である。また市場拡大による新しい使用地域における腐食実態は必ずしも明らかにされていない。本研究では、融雪塩散布地域であるカナダ、欧州から計9台(使用年数5~9年)の自動車を回収するとともに、自動車市場拡大を牽引しているアジアの中から高温多湿な気候のタイからも9台(使用年数9~23年)回収を行い、腐食実態の解析を行った。腐食解析は、ドア、サイドシルなどの外板を中心に、現在でも重要な防錆課題と位置づけられている「穴あき腐食」に着目して行った。各地域における防錆鋼板の腐食の経時変化を解析した結果、カナダと欧州から回収した車両のドアおよびサイドシルにおける亜鉛めっきの腐食速度は、 $10\text{g m}^{-2}\text{ yer}^{-1}$ 以上でありほぼ同程度であった。一方、タイから回収した車両の亜鉛めっきや鋼の腐食速度は、カナダや欧州における腐食速度の約半分であり、高温多湿環境であっても欧米の寒冷地域に比べて腐食が緩慢であることが明らかになった。また、亜鉛系めっきの下地鋼を防錆する期間に及ぼすめっき種の影響は少なく、めっきが厚いほど防錆期間が長くなることから、めっき付着量の依存性が大きいことを明らかにした。さらに実車の異常腐食部の解析から、防錆鋼板を使用する前提として、使用部位の構造や副資材の使われ方が重要であることを見出した。本章では解析結果から自動車の各地域における防錆鋼板の腐食挙動を明らかにするとともに、解析結果に基づき亜鉛めっきおよび下地鋼の腐食速度を推定し、部品の防錆寿命を仮定した場合の最適な板厚やめっき付着量を予測する最適防錆設計方法について提案しており、自動車の防錆仕様や腐食促進試験法の設計への寄与が期待される。

第3章では、腐食促進試験により防錆鋼板の穴あき腐食を適切に評価するために必要な試験片について、実際の自動車における亜鉛系めっき鋼板の腐食挙動と比較することで検討した。従来、防錆鋼板の穴あき腐食に対する耐食性を腐食試験により評価するために、鋼板合わせ部を模擬した試験片が用いられている。しかし、鋼板合わせ部の内側を意図的に無塗装にした試験片や、スペーサーを介して鋼板を重ねることで実際の自動車の鋼板合わせ部よりも広いクリアランスを有する試験片が使用されている。本研究では、種々の亜鉛系めっき鋼板を用いて、2枚の鋼板を直接重ね合わせて接合し、そのまま化成処理、電着塗装を行った自動車の生産工程にならい作製した試験片と、意図的に合せ部の内側に無塗装部を設けクリアランスを変化させた試験片を腐食試験に供し、これらの腐食挙動を実際の自動車における腐食と比較した。その結果、無塗装部や広いクリアランスを設けた試験片は、実車で観察された腐食挙動とは異なり、穴あき腐食の抑制に及ぼすめっき付着量の影響は少なく、亜鉛ニッケルなどの合金めっきの耐食性が純亜鉛系めっきに比べて著しく優れ、めっき種の影響が顕著に現われることが分かった。この原因を考察するために行った電気化学測定から、広いクリアランスでバルク溶液に浸漬した場合には、カソード反応の酸素還元電流の差として純亜鉛めっきと合金めっきの耐食性の差が現われる可能性が

あること。またクリヤランスを変えた試験片の腐食試験結果から、クリヤランスが広がることで鋼板合わせ部内の腐食生成物が外部へ流出し易くなり、亜鉛腐食生成物によって下地鋼の腐食を抑制する効果が低減することを明らかにした。これらの結果を踏まえて、実車腐食を再現し穴あき腐食を適切に評価するための試験片として、鋼板どうしを直接重ねて接合し、自動車の生産工程どおりに化成処理、電着塗装した試験片を用いるべきであることを提案した。本研究による成果は、これまであまり議論されていなかった穴あき腐食評価における試験片形状の重要性を提起し、腐食試験により防錆鋼板を開発する上で重要な知見である。

第4章では、穴あき腐食の評価に用いられている腐食促進試験法と実車の腐食との相関性を評価し、腐食試験による防錆鋼板の耐食性評価から実車の耐食性を適切に予測する技術の開発を行った。現在穴あき腐食の評価に用いられている様々な腐食試験法で、各種の亜鉛系めっき鋼板の耐食性を評価し、実車の腐食解析結果との比較を行った。亜鉛系めっき鋼板の穴あき腐食挙動は、腐食試験の条件によって大きく変わり、材料間の耐食性の序列が入れ替わることもあることが明らかになった。実車の腐食挙動において明瞭であった亜鉛めっきが下地鋼の腐食を抑制する期間は、腐食試験では試験条件による違いが顕著であった。そのため、亜鉛めっき鋼板が腐食によって穴あきに至る過程に着目し、腐食試験と実車における腐食の相関性を評価するための指標として、下地鋼の腐食速度と亜鉛めっきの腐食速度の比で表される穴あき腐食指標 (Perforation Corrosion Index) を考案した。本研究で実施した腐食試験における PCI は 16~98 であり、使用地域に関わらず実車における PCI は 60 以上の値であった。PCI が実車に近い値となる腐食試験では、防錆鋼板の耐食性がめっき種ではなくめっき付着量によって支配される傾向があり、PCI が実車から乖離した腐食試験ではめっき種が耐食性に大きく影響を及ぼすことが分かった。実車における亜鉛系めっき鋼板の耐食性では、めっき付着量の影響が最も支配的要因であることから、腐食試験の実車腐食の相関性を PCI によって評価できることを提案した。さらに亜鉛ニッケルなどの合金めっきの耐食性が PCI に対して連続的に変化したことから、PCI が異なる複数の腐食試験から耐食性の PCI に対する変化を捉えることにより、実車における耐食性を予測できることを示した。本研究の成果は、穴あき腐食の評価に用いられる腐食試験の信頼性評価、条件適正化、さらに防錆鋼板の実車耐食性予測技術への展開により、自動車の最適防錆設計および次世代の防錆鋼板の開発への貢献が期待される。

第5章では、使用環境や部位によって異なる自動車の腐食環境を腐食センサーにより定量的に評価し、その腐食性に応じた最適防錆設計を行う腐食モニタリング技術の開発を検討した。鋼基板上に絶縁体を介して Ag をスリット状にペーストした Fe-Ag 系 ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサーを用いて、自動車各部位の環境の腐食性を走行試験によりモニタリングした。走行試験に用いた車両は、車体を左右半分に区別し、片側には塩水を反対側には純水を定期的に散布することで、1台の試験車両で2つの使用地域を模擬した。腐食モニタリングの結果、ACM センサーを用いて自動車各部位の腐食性を連続的に計測することができた。センサーが腐食することにより検出される出力電流と気象条件や走行履歴との関係を解析することで、各部位の腐食要因を推定することができた。また ACM センサーの出力と走行試験に同時に供した炭素鋼および亜鉛めっき鋼板

の腐食量には良好な相関性があることが確認された。この相関関係を用いることで、任意の自動車の使用地域、部位において、センサー計測結果から鉄鋼材料の腐食速度を予測し、要求仕様に応じた最適な材料選定を行う方法を例示した。本研究の成果は、市場のグローバル化に伴う新しい腐食環境における効率的な防錆設計や、腐食試験法開発における実車腐食要因の抽出などに活用することで、将来の防錆鋼板の選定や開発に貢献することが期待される。

第 6 章は、本論文の総括であり、各章における研究成果をまとめるとともに、本研究の成果の工業的な意義および将来の発展性について述べた。

論文審査結果の要旨

自動車産業を取り巻く環境の変化とともに、自動車の防錆品質への要求はさらに厳格化している。本論文は、自動車用防錆鋼板の開発および選定に関わる腐食寿命予測および最適防錆設計に関する研究であり、全6章から構成される。

第1章は、序論として研究の背景と目的を述べている。

第2章は、実際の自動車の腐食実態を解析している。異なる地域、カナダ、欧州、タイから車両を回収し、ドア、サイドシルなどにおける亜鉛系めっき鋼板の穴あき腐食挙動を明らかにした。各地域における腐食速度を推定するとともに、実車における耐食性支配因子がめっき種ではなく、めっき付着量であることを明らかにした。

第3章は、腐食試験で防錆鋼板の穴あき耐食性を評価するための最適な試験片について検討している。腐食試験に用いる試験片に意図的に無塗装部や広いクリヤランスを設けることで、亜鉛系めっき鋼板の電気化学反応や腐食生成物の滞留が変化し、実際の自動車の腐食挙動が再現されないことを明らかにした。実車の腐食を再現するために、鋼板どうしを直接重ねて接合し、自動車の生産工程にならい化成処理、電着塗装した試験片を用いることを提案した。

第4章は、腐食試験法と実車の腐食との相関性を評価し、腐食試験から実車の耐食性を予測する技術開発を行っている。各種の亜鉛系めっき鋼板の腐食挙動を代表的な腐食試験法と実車において比較し、その相関性を評価する指標 PCI (Perforation Corrosion Index : 穴あき腐食指標) を考案した。PCI が実車に近い腐食試験では、実車と同様に耐食性がめっき付着量に支配されることを明らかにした。また材料の耐食性の PCI に対する変化から、実車で耐食性を予測できる可能性を見出した。

第5章は、腐食センサーにより自動車の使用環境や部位毎の環境の腐食性を評価し、それに応じた最適防錆設計を行う腐食モニタリング技術の開発を行っている。ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサーを用いて各部位の腐食を計測し、部位毎の腐食要因を推定した。またセンサー出力と鋼板の腐食速度に相関があることを確認し、モニタリング結果から材料の腐食速度の予測、最適な材料を選定する方法を示した。

第6章は、本研究で得られた結果の総括として、研究成果の意義と将来の展望について述べている。

以上、本論文は、自動車用防錆鋼板の腐食寿命予測技術および最適防錆設計に関する研究をまとめたものであり、知能デバイス材料学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。