

審査の結果の要旨

氏名 風間 彰

本論文は、主に合金化溶融亜鉛めっき鋼板を対象として、表面の欠陥部、油痕部、正常部の物理性状と偏光まで考慮した光学的反射特性を明らかにすることにより、それらに基づいて欠陥と油痕とを識別する方法を考案することに取り組んでいる。さらに、工業的に高速かつ確度の高いオンライン表面検査技術を実用化することを目的としたものである。

第 1 章では、鉄鋼業の現状について述べるとともに、自動車用鋼板の品質保証における近年の課題について説明し、さらに本研究の背景と目的および本論文の構成について述べている。

第 2 章では、自動車用鋼板の品質保証の課題について概説したのち、鋼板の製造工程と表面検査の課題について説明している。さらに鋼板のオンライン表面検査に関する従来技術について述べることにより、本研究で対象とした自動車用鋼板の品質保証と表面検査の技術課題の整理を行っている。すなわち、鋼板表面の正常部、欠陥部、油痕部のマイクロ性状を調査することによりそれらの光学モデルを作成し、偏光まで考慮した光反射特性を解明することが重要であり、さらにそれらを識別可能な方法を提案し工業的実用化を図ることが必要であることを述べている。

第 3 章では、鋼板表面のマイクロ性状の分析と光学反射モデルについて述べている。正常部表面は Fe-Zn 合金結晶の粗面であり拡散反射面であり、欠陥部には微小な鏡面要素が存在し拡散反射と鏡面反射の要素が混在する、油痕部には Fe-Zn 合金の拡散反射と油液による鏡面反射要素が混在することを述べている。

第 4 章では、鋼板表面各部の偏光反射特性の解析のための理論と実験について述べている。欠陥部分には鋼板面と平行かつ平坦な平坦部が存在し、正反射の主要な役割を担っており、またその反射輝度は平坦部の面積率に比例することを示している。平坦部が鏡面であると仮定して、欠陥の反射特性からマクロに観察されるコントラストを推定した結果が実験結果とよく一致することを示しており、正常部に対する欠陥部の輝度に関する定量的な説明を行っている。また、油の付着量とコントラストの関係を実験によって明らかにし、四角錐に

よる簡易モデルを用いて実効的コントラストを求めた結果、油部の絶対反射率は欠陥部の 1/5 であるが面積率では 5 倍程度であり、それによって通常の観察手段では、欠陥部と同等のコントラストとして観測されることを説明している。

第 5 章では、方向角の偏光画像を用いた欠陥識別原理の提案を行っている。すなわち、光学モデルを基に欠陥と油痕の偏光反射特性について、方位角に依存した反射輝度の特性に相違があることを理論的に予測し実験で検証している。その結果、欠陥と油痕それぞれの鏡面要素の複素屈折率に起因する以下の現象を解明している。入射光を $+45^\circ$ 直線偏光とした場合、誘電体である油痕部からの反射光は、直線偏光を保持した反射軌跡を示す、その結果受光側検光子との消光効果により、受光輝度は検光方位角に依存して正常部に対し明暗が変化する。また、金属反射である正常部からの反射は楕円偏光となり、偏光方位に依存せず、常に正常部に対する明るさは正極性である。これらの結果より、欠陥と油痕の識別方法として以下を考案している。実験手法としては、入射側に 45° 直線偏光を用い、受光側に $+45^\circ$ 、 0° 、 -45° の 3 種の方位角における偏光画像を採取する光学系を設ける。解析手法としては、3 種の偏光画像より抽出されたオブジェクトを用いて欠陥の識別が可能であることを示している。すなわち、欠陥はどの偏光方位においても正常部に対し正極性の輝度を示す、それに対して油痕は偏光方位に依存して正常部に対する明るさの極性が変化する。

第 6 章では、以上の結果に基づいて、3 種の偏光方位角画像($+45^\circ$ 、 0° 、 -45°) における輝度の極性を欠陥と油痕との識別に用いる「3 チャンネル偏光式表面検査」を考案し、また実用化するための研究開発を行い以下の成果を得たことを述べている。すなわち、検査装置を設計・製造して合金化溶融亜鉛めっきの製造工程において実用化し、検出率 100%、過剰検出 1%未満の技術目標を達成した。検査装置の光学装置としての感度解析を行い、また実使用におけるデータから材料依存性などを調査して、工業装置として必要な設計指針を得た。さらに、表面検査装置の工業的実用化と展開を図り商用運用に至り、鋼板の欠陥部にマーキングを施してユーザーへ出荷することで、鉄鋼メーカーとユーザーである自動車メーカーの両者の合理化効果をもたらすビジネスモデルを実現した。

第 7 章以下では、これまでの研究成果のまとめるとともに、得られた知見をもとにした今後の研究の発展性や応用展開について述べている。

以上、本論文は新しい光学的検査技術を開発することにより、鋼板製造プロセスにおける高能率化によるコストダウンが可能であることを実証したものであり、今後さらに高度化するであろう鋼板製造プロセス分野や他の生産分野において、これら技術やその発展技術が活用されることが期待され、マテリアル工学の発展への寄与が大きいと判断できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。