

論文の内容の要旨

論文題目 鋼板表面の偏光反射特性の解析とその応用による高速検査技術の実用化

氏 名 風間 彰

鉄鋼製品の中で自動車のフェンダー、ドアパネル等に使用される合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (Galvannealed iron-zinc Alloy ; 以降「GA」) は主力製品のひとつであり、強度、プレス加工性、防錆性、溶接性など多くの項目に高い性能とその品質保証が求められ、重要な品質保証項目に表面欠陥がある。欠陥検査装置には主にレーザー式と画像式があり、1980年代以降、GA の検査では画像式が主流である。検査対象の欠陥には付着物、凹凸、色合いの異常など複数の種類があるが、最も重大な欠陥として図 1(a)に示すようなコントラストの低い模様状の欠陥 (以降「欠陥」) がある。欠陥は鋼の製造時に生成する金属酸化物に起因しており、欠陥の下層に高い確率で金属酸化物が存在する。図 1(b)は欠陥部の電子顕微鏡による断面写真の例であり、表層下に黒く点在するオブジェクトが金属酸化物である。金属酸化物は鋼より硬いため、自動車メーカーにおける鋼板の加工の際にプレス内壁を損傷させて生産を大きく阻害する。従って、このような欠陥は金属酸化物の指標として鉄鋼メーカー側において流出を防止しなければならない。欠陥は特段の凹凸や極端な輝度の変化を伴わずコントラストが低い場合が多い。一方で、鋼板表面には製造工程において不可避免的に表面へ付着する微少な油の付着痕 (以降「油痕」) が多数存在する。図 2 に欠陥と油痕の正反射画像の例を示す。図に見える通り、通常の光学系による観察では欠陥も油痕も共に鋼板の正常部に対して同程度の正のコントラストを成しており、識別が困難である。

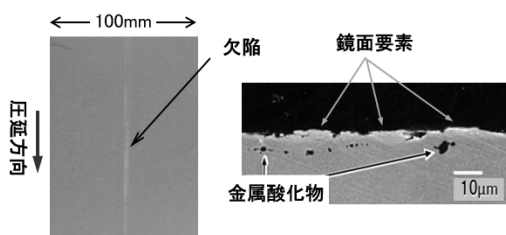


図 1(a)

図 1(b)

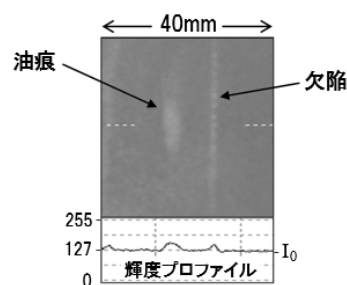


図 2

油痕は無害であるにもかかわらず度々欠陥として過剰に検出されるため、その頻度が多いと確認に手間がかかり、検査を含む製品の生産性を低下させる。そこで旧来より光源と撮像装置の光学配置の工夫や、抽出されたオブジェクトを幾何学的な形態と輝度情報から判定するロジックなどの工夫が成されてきたが、原理的側面からの根本的な解決は成されていない。基本的な問題として、凹凸の無い低コントラストの欠陥、及びそれと同程度のコントラストを成して過剰な検出オブジェクトとなる油痕のマイクロ性状がどのようなものなのか解明されていない。故にそれらの光学的反射特性も明らかではなく、欠陥と油痕の識別は試行錯誤に頼らざるを得なかった。

本研究の目的は、以上の状況に鑑みて GA 表面の 3 種のオブジェクトすなわち、欠陥部、油痕部及び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し、それらに基づいた物理的根拠をもった欠陥と油痕とを識別する方法を考案することである。また、工業的には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する。研究の技術課題は以下である。

課題(1) 鋼板表面の 3 種のオブジェクト、①正常部、②欠陥部、③油痕部（無害模様部）のマイクロ性状を調査して光学モデルを立て、偏光まで考慮した光反射特性を解明する。

課題(2) 3 種のオブジェクトを光反射特性上の物理的原理に基づいて識別可能な方法を探索し提案する。

課題(3) 上記方法による鋼板表面検査技術を開発し、オンライン検査装置として工業的実用化を図る。この際に欠陥検出率 100%、過剰検出 1%未満を実現する。

上記の技術課題に対し以下の手順で研究を進め、各々以下の成果を得た。

- (1) GA 鋼板表面の欠陥、油痕、正常部の 3 部位につき、マイクロ性状と偏光反射特性を、光学的方法及びマイクロ観察によって分析し、以下の結果を得た。（第 2, 3, 4 章）
 - 1) 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いる。またその反射輝度は、平坦部の面積率に比例する。
 - 2) 平坦部が鏡面であると仮定して、欠陥の反射特性を考慮した上で、マクロに観察されるコントラストを推定したところ実験結果とよく一致し、正常部に対する欠陥部の輝度に関して定量的な説明を得た。
 - 3) 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、また四角錐による簡易モデル及びこれまでの観察結果を用いて実効的コントラストを求めた。結果、油部の

絶対反射率は欠陥ファセット部の 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がわかった。結果として、低コントラスト欠陥の検出において、油による無害な模様（油痕）が過剰な検出オブジェクトとなる原因は、油部分の面積率が欠陥部の面積率に比べて反射率の相違を補う程度に高いために、欠陥部と同程度の光量を反射してコントラストを生成することによるという事実を明らかにした。また、この結果に基づいて光学モデルを立てた。

(2) 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た。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事実を解明した。（第 5 章）

- 1) 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。
- 2) 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。

以上の 1), 2) に関する実験結果の代表例を図 3 に示す。

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た。

- 3) 入射側に 45° 直線偏光を用い、受光側に $+45, 0, -45^\circ$ 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。（図 4）
- 4) 3 種の偏光画像より抽出されたオブジェクトの識別論理として以下を用いる。
 - ① 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。
 - ② 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。

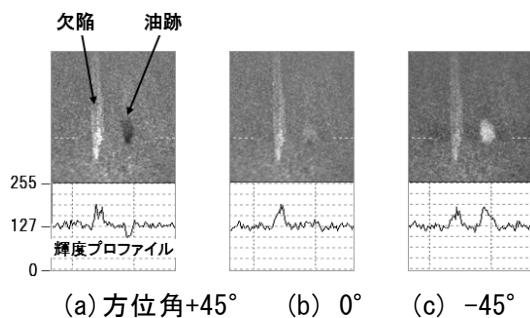


図 3

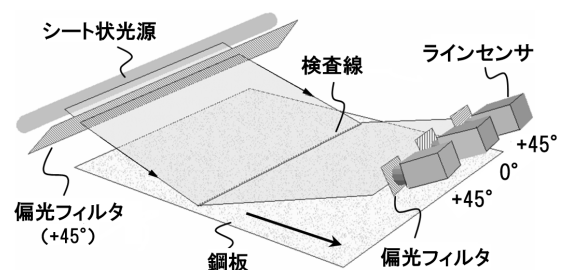


図 4

(3) 以上の研究結果に基づいて 3 種の偏光方位角画像(+45, 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。(第 6 章)

- 1) 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。
 - 2) 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。
- (4) 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った。結果、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へ合理化効果をもたらすビジネスモデルを実現した。

本研究の展開としては、3 種の方位角の偏光画像情報を同時採取する検査技術の特徴を活かし、動く対象の偏光パラメータ Δ, Ψ を計測可能な方法を創案した。予備的実験結果を含め以下のようにまとめられる。

- (1) 0, +45, -45° の 3 種の方位角を同時採取する光学系において、光強度から偏光パラメータ Δ, Ψ を導出する定式化を行い、サンプル実験を実施した。
- (2) Δ - Ψ 平面にオブジェクトをプロットすることで、オブジェクトの偏光状態を反映した分布を得た。結果、欠陥、油痕及び化成液は Δ - Ψ 平面上で互いに異なる領域に分布することが分かった。
- (3) Δ, Ψ 画像において、油痕は明確なコントラストを示した。さらに、通常光学系及び方位角画像のみでは不可視だったオブジェクトが観測され、無偏光の通常光学系または単独の偏光画像のみでは得られない情報を得た。(第 8 章)

このようなリアルタイムの偏光パラメータ面計測技術は、表面処理や錫、樹脂薄膜などのコーティング、飲用缶ラミネートフィルムなど多様な製品の表面の状態を光学定数として観測することで、より高度で厳密な品質管理が実現できると期待できる。

以上。