

博士論文

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

風間 彰

目次

1. 緒論	
1-1. 鉄鋼業の概要	・・・(1)
1-2. 自動車用鋼板の品質保証における近年の課題	・・・(2)
1-3. 研究の背景と目的	・・・(3)
1-4. 本論文の構成	・・・(4)
2. 自動車用鋼板の品質保証と表面検査の技術課題	・・・(7)
2-1. 自動車用鋼板の品質保証	・・・(7)
2-1-1. 自動車用鋼板の用途と仕様	
2-1-2. 鋼板の表面欠陥	
2-1-3. 品質保証の課題	
2-2. 鋼板の製造工程と表面検査の課題	・・・(17)
2-2-1. 自動車用鋼板の製造工程	
2-2-2. 介在物起因による表面欠陥の生成	
2-2-3. 表面欠陥の評価指標「SN比」と「コントラスト」	
2-2-4. 表面欠陥の評価指標「特徴量」	
2-2-5. 品質保証レベルの変遷と検査自動化の必要性	
2-3. 鋼板のオンライン表面検査に関する従来技術	・・・(33)
2-3-1. 表面検査の自動化に必要な基本的事項	
2-3-2. 鋼板表面検査装置の種類	
2-3-3. レーザー式検査装置の特徴と課題	
2-3-4. ラインセンサ式検査装置の特徴	
2-3-5. ラインセンサ式による鋼板表面オブジェクトの見え方	
2-4. 第2章まとめ ～技術課題の整理～	・・・(42)
3. 鋼板表面のマイクロ性状と光学反射モデル	・・・(49)
3-1. 欠陥部のマイクロ性状	・・・(49)
3-1-1. ミクロ性状 ～ファセット(微小鏡面)群の存在～	
3-1-2. 欠陥暴露部分の成分分析	
3-2. 油痕部のマイクロ性状	・・・(60)
3-2-1. 不透明液体による油痕部観察	
3-2-2. 環境制御型 SEM による油痕部マイクロ性状の直接観察	
3-3. 鋼板表面各部位の光学反射モデル	・・・(67)
3-3-1. 正常部と欠陥部の光学モデル	
3-3-2. 油跡部の光学モデル	
3-4. 第3章まとめ	・・・(69)

4. 鋼板表面各部の光反射特性の解析 ～理論と実験～	…(73)
4-1. 欠陥部の光反射特性とコントラスト	…(73)
4-1-1. 正常部と欠陥部の光反射特性	
4-1-2. 微小鏡面要素の面積率	
4-1-3. 欠陥部の反射率とコントラスト	
4-2. 油痕部の光反射特性とコントラスト	…(86)
4-2-1. 油の付着量とコントラストの確認実験	
4-2-2. 油付着実験の考察	
4-2-3. 油痕部のマイクロ構造モデル	
4-3. マクロ観察における欠陥の輝度に関する考察	…(94)
4-4. 第4章まとめ	…(97)
5. 3種の方位角の偏光画像を用いた欠陥識別原理の提案	…(99)
5-1. 金属面と誘電体面における偏光反射の予備考察	…(99)
5-2. 金属面と誘電体面における偏光反射特性の分析	…(101)
5-2-1. 偏光反射モデルの理論式	
5-2-2. 偏光パラメータ Δ, Ψ の計算	
5-2-3. 方位角に沿った油痕部と正常部の光強度軌跡	
5-3. 方位角に沿った偏光画像採取実験	…(108)
5-4. 実験結果の考察	…(109)
5-5. 偏光画像上の輝度極性による部位の識別方法	…(112)
5-6. 光学系の基本設計と感度解析	…(114)
5-6-1. 投受光角度の設定	
5-6-2. 受光方位角の設定	
5-7. 第5章まとめ	…(120)
6. 実用装置の開発	…(123)
6-1. オンライン検査に必要な仕様と光学検査ヘッド	…(123)
6-1-1. オンライン検査の基本仕様	
6-1-2. 光学センサヘッド	
6-2. 画像処理と欠陥検出・判定処理	…(128)
6-2-1. 画像採取方法	
6-2-2. 画像処理	
6-2-3. 欠陥候補の抽出ロジック	
6-2-4. 信号処理装置の構成	
6-3. 全体システム	…(134)
6-4. 性能の検証	…(136)
6-4-1. 識別能力の検証	
6-4-2. 検出性能の検証	

6-5. 材質に依存した実運用課題の考察	・・・(140)
6-5-1. 鋼板の厚みと画像ノイズ	
6-5-2. 調質圧延荷重の影響	
6-5-3. 材質特性(TS)の影響	
6-5-4. 両面に現れる欠陥	
6-6. p,s偏光位相差制御によるノイズ除去機能	・・・(147)
6-7. 工業的実用化と商用運用	・・・(149)
6-8. 第6章まとめ	・・・(151)
7. 研究の成果と今後の展開	・・・(153)
7-1. 技術課題に対する研究の成果	・・・(153)
7-2. 今後の課題	・・・(155)
7-3. 本研究に基づく技術の展開に関する考察	・・・(156)
7-3-1. リアルタイム偏光パラメータの面計測への可能性	
7-3-2. ビッグデータを活用する表面検査技術への展開	
7-3-3. 技術展開まとめ	
7-4. 本研究の結論	・・・(172)
8. 結言	・・・(175)
Appendix	・・・(177)
謝辞	

第1章 緒言

1-1. 鉄鋼業の概要

鉄は、人類が造りだした素材の中でも最も古い素材のひとつである。その用途は多様であり、道路、橋梁などの社会インフラ、建物、乗り物から身近な生活品にいたるまで、文明の基盤を成す素材として、そして何度でも再生して使える便利な材料として利用されてきた。鉄は炭素の成分調整によって「鋼」となり、添加元素や熱処理によって様々な相と組織を生じて多様な硬さや伸び等の特性を変えられることから、膨大な研究・開発が行われ、無数の種類の鋼が実用化されてきた。鋼の原料である粗鋼の世界生産量は、2001年の8.5億tに対し2018年には約18億tと急激な伸びを示しており、中国とアジアの発展途上国を主軸に今後も生産量が増加していくと考えられる^{1-1), 1-2)}。このような規模で利用される素材は他になく、しかも研究開発により鋼の特性は進化を続けている。

鉄鋼製品は主に鋼材(造船用の厚板、レール用の条鋼など)、ガス輸送用等の鋼管、そして自動車、家電ほかに広く使われる薄鋼板(熱延板、冷延板、めっき鋼板等)に分類される。鋼材は建設用、高速道路、港湾といった社会インフラ向けの製品と造船、大型機械に使用され、製造ラインにおける寸法は幅5m前後に及び、製品では長さ20m、厚さ40mmなどがある。これらは平板として使用されるほか、建築用のコラム、石油や天然ガスの輸送パイプ等にも加工される。一方、自動車や家電などの日常規模の鉄鋼製品には厚さ0.01~4mm程度の鋼の板が使用され「薄鋼板」と呼ばれる。

日本の鉄鋼業は、第二次大戦後の1955年には戦前の粗鋼生産量を回復し、その後約20年間大きな成長を遂げた。1980年代から成長率は低くなったものの粗鋼生産1億t前後で推移し、量のみならず引張強度、伸び率、靱性等の基礎特性、及び特性のバラツキと欠陥の少なさといった品質においても世界最先端の性能を維持し続けてきた。2000年の段階では、急進する韓国に対しなお10年進んでいると考えられていたが、製造設備の老朽化が進む日本に対し韓国は最新の設備を導入し、かつ研究を強化して急速に技術レベルを上げ、また中国も最新の大型設備と膨大な労働力をもって大量の中間品質の製品を作り出し、価格競争において日本の鉄鋼メーカーは厳しい立場に立たされている。こうしたアジア諸国の追い上げの中で、主に自動車用鋼板と、ガスなどのエネルギーパイプライン用の鋼管等が牽引して、今現在も日本製品は総合的な性能と品質において世界のトップを維持している。

1-2. 自動車用鋼板の品質保証における近年の課題

鉄鋼製品の主要な使用先である自動車産業は、技術面においてドイツ、アメリカと並び日本は世界をリードしている。自動車の品質の重要な一端を担う素材が自動車用鋼板であって、日本の自動車用鋼板は、国内自動車メーカーからの高度な要望に応えながら世界最高レベルの強度や伸び率等の性能と、欠陥の少ない品質を維持してきた。近年はその優位性を保つべく高品質の維持向上が至上課題となっており、鉄鋼メーカーにおいては、製造技術向上と共に、品質管理の徹底に努め、鋼板ユーザーへの品質保証を製品の付加価値とみて取り組んでいる。品質保証(Quality Assurance)と品質管理(Quality Control)は、QA/QCと呼ばれ、鉄鋼のみならず、製造業における基本的な取組みである。

薄鋼板(以降、「鋼板」と呼ぶ)は一般消費者の目に直接触れる製品に使用されることが多いため、例えばビルのフレームに使われるような厚みのある「鋼材」に比べて、一般にその表面品質に要求されるレベルは厳しい。幅、厚さ、平坦度という基本的な寸法精度に関する項目以外に、鋼板の表面品質にはおよそ以下の項目があり、ユーザーの使用目的に依って項目はさらに細分化される。

鋼板の表面品質項目；(1)粗さ、(2)色(模様)、(3)光沢、(4)欠陥

この中で(1)(2)(3)に対しては測定器が市販されており、ユーザーに依って重要視する測定項目が異なる場合もあるが、定量化指標が存在する。一方、(4)欠陥は、それ自体の定義も管理基準も標準化されておらず、未だ官能検査に頼る部分が多い。特にめっきと塗装を施されて自動車の最も外側に用いられる「自動車外板(ガイハン)用鋼板」は、最終的な自動車の意匠性を司る重要な製品である。また鉄鋼製品の中でも最も総合特性が優れている上、品質保証基準が厳しいため製造が難しい製品である。その中でも高級な代表品種は、合金化溶融亜鉛めっき鋼板(Galvannealed iron-zinc Alloy; 以降 GA と呼ぶ)である。

自動車用鋼板の表面検査が標準化・機械化されていない理由は主に以下の通りである。

- (1) 表面欠陥の形態は多種多様であり、かつユーザーである自動車メーカーによって、同種/同程度の欠陥であっても品質管理上の扱い(重要度合)が異なる。
- (2) 欠陥に依って検出に最適なセンサが異なる。
- (3) 「表面欠陥とは何か」が定量的に分析/分類/定義されていない。
- (4) 品質保証上求められる検出対象の欠陥に対し、検査技術が追いついていない。

理由(1)、(2)については各社さらには工程毎に欠陥の呼称すら異なる場合がある。また(3)、(4)は、標準化が成されない根源的要因と言える。

1-3. 研究の背景と目的

1960年代より凹凸欠陥など目視でも明らかに識別可能な欠陥については光学式の様々なタイプの表面検査装置が実用化されてきた¹⁻³⁾。缶用錫めっき鋼板，一般用途向けの冷延鋼板などでは光学式の表面検査装置は十分な検査能力を有し品質保証に広く使用されている。鋼板の表面欠陥には大きく分けて，鋼の鑄造及び薄く延伸(圧延)される前の加熱炉にその原因があるものと，圧延を含めた鋼板の製造工程において発生するものがある。鋼板の製造工程において発生する欠陥については，多くの既存の表面検査装置によって検出が可能であり，特殊な欠陥に関しては専用の検査装置を適用するなどの方法によっても自動化が図られている。一方で，特にGAを代表とする高級自動車用鋼板では，発見しやすい凹凸のある欠陥の発生はほぼ抑制され，よりコントラストが低い欠陥まで確実に検出しなければならなくなってきた¹⁻⁴⁾。こうした状況下，欠陥の検出感度が低い場合，むやみに検査装置の感度を上げると，不可避免的に発生する欠陥以外のオブジェクトも大量に検出し，自動検査装置の運用が困難になる事態が生じていた。これに対して鉄鋼メーカーでは，検査装置を稼働させると共に，鋼板の製造後に検査専用の工程へ製品を送り，ごく低速での目視検査を実施する運用を行ってきた。これには余分な手間と人間による目視検査のバラツキが課題となっていた。従って，低コントラストの欠陥検査に関し，欠陥を確実に検出しながらも過剰な検出を抑制し，より確度の高い自動検査を実現することは，表面検査技術において未解決の重要課題であった。

過剰に検出されるオブジェクトの代表的なものが鋼板の製造工程に不可避免的に表面へ付着する防錆油または圧延油の痕跡(以降，油痕)である。油痕の光学的反射特性は，検査対象である欠陥と類似であるため，検査装置の感度を上げると過剰検出の要因となる。過剰検出抑制のための努力は，主に光源と撮像装置の光学配置の工夫と，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ソフトウェアの工夫につぎ込まれてきた。これらの試行錯誤は，検査装置メーカーと鉄鋼メーカーによって行われてきたが，油痕を主体とする過剰検出抑制のための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，凹凸が無くコントラストの低い欠陥，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とはどのようなものなのかが解明されておらず，それらの光学的反射特性も明らかではないため試行錯誤に頼らざるを得なかった。低コントラスト欠陥の内，特にGA鋼板表層に存在する金属氧化物に起因する欠陥は，自動車メーカーのプレス機内壁を損傷させるため重要な品質保証対象である。

本研究の目的は、こうした状況に鑑み、GA 表面オブジェクトの物理性状と光学的反射特性を明らかにした上で、原理原則に基づいて欠陥を確実に検出し、かつ過剰な検出を抑制可能な、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である。GA は日本製鋼板の最高ランクの製品であるため、上の目的は、鋼板表面検査技術における未解決かつ最も重要な技術課題への取り組みと言える。また、鋼板製品の品質向上に伴う品質保証レベルの向上は欠くことのできないビジネス上の課題であり、信頼性の高い検査技術の実用化によって、鉄鋼メーカーと自動車メーカーとの新しい品質保証のスタイルを確立することがビジネス上の目標である。

1-4. 本論文の構成

本研究論文は、以下の内容で構成されている。

第 1 章； 緒論

第 2 章；自動車用鋼板の品質保証と表面検査の技術課題

鋼板の品質保証と表面欠陥について述べる。そして鋼板の製造工程を追いながら、介在物に起因した重大な表面欠陥が生成する工程を考察する。その上で、従来の検査技術では、検査感度を上げた際に、主に防錆油若しくは圧延油のごく薄い痕跡との識別が困難になる事実と、従来の光学的検査手法における課題を述べて、本研究の技術課題を設定する。

第 3 章；鋼板表面のマイクロ性状と光学反射モデル

主要な鋼板表面の 3 種のオブジェクト、すなわち ①正常部、②欠陥部、③油痕部についてマクロ、ミクロな観察を行い、これまで知られていなかったその物理的なマイクロ性状を明らかにし、マクロに観察される欠陥と油痕のコントラストの要因が、ミクロな鏡面要素であることを明らかにする。これに基づきそれぞれの光学モデルをたてる。

第 4 章；鋼板表面各部の光反射特性の解析 = 理論と実験 =

光学モデルに基づき、欠陥部と油痕部の微小な鏡面要素の面積率がその部分のコントラストの要因であることを、それぞれの光反射特性より推定し、実験的に確認する。これにより正反射観測において欠陥と油痕が共に微小鏡面要素に起因して正常部に対するコントラストを生成することを立証する。加えて、通常の光学系では油痕が欠陥と同程度のコントラストを成して過剰な検出となる原因を明らかにする。

第5章；3種の方角の偏光画像を用いた欠陥識別原理

欠陥と油痕に関し、さらに詳細な偏光特性を分析する。特に誘電体である油痕部の反射光強度は、正常部に対するコントラストの明暗極性が偏光方位角に依存して変化することを理論的に導き、また実験的に検証する。以上の知見を基に、3種の方角の偏光画像を同時採取して油痕の過剰な検出を抑制し介在物起因の欠陥のみを検出可能な新たな表面検査技術を考案し、工業的に実用化可能な方法として提案する。

第6章；実用装置の開発

第5章で示した識別原理に基づくリアルタイム高速鋼板表面検査装置の実用化について述べる。また、装置の性能検証、検査対象である鋼板の材質の影響等について感度分析と考察を行い、設計指針を固める。

第7章；研究の成果まとめ

本研究の課題に対する研究成果をまとめ、今後の課題を整理する。また、本研究を応用した以下の2項目について考察し、本研究を発展させ広く活用していく技術的な展望について述べる。

- ① 鋼板ほか検査対象表面の光学物性値をリアルタイムで検査可能な技術の理論的な検討及び基礎実験。
- ② 本研究のセンシングで扱う大量画像データなどを、近年著しく進歩したビッグデータ処理、データサイエンス、AI等を用いて積極的に活用する技術に関する展望。

第8章；結言

第1章 参考文献；

- 1-1) 鉄鋼統計要覧，日本鉄鋼連盟編，東京(2002)，40.
- 1-2) 鉄鋼統計要覧，日本鉄鋼連盟編，東京(2019)，40.
- 1-3) 「光学式表面欠陥検査」，鉄鋼便覧，第5版，第5巻，日本鉄鋼協会編，東京，レタープレス（株）(2014)，81-88.
- 1-4) 風間彰，大重貴彦，「日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-15 3チャンネル偏光式鋼板表面検査装置の開発」，日本鉄鋼協会 ふえらむ，Vol.11, No.5 (2006)，300.

第1章 以上.

第2章 自動車用鋼板の品質保証と表面検査の技術課題

鉄鋼製品に限らず製品の品質保証とは、メーカーがユーザーに対して一定の規格や仕様に準じ、不良率または欠陥数を含む一定水準以上の品質の製品を、納期内に供給する契約であり、それが満たされない場合は、代替製品の提供、賠償金の支払いなどの項目が含まれる。鋼板の場合は、厚さ、長さ、幅、成分等とそれらのバラツキ、張力、伸び率、耐食性などの素材としての特性、不良部分の混入率などが保証項目である。以下、本章では研究の背景である自動車用鋼板における従来の品質保証とその課題について詳細に述べる。

2-1. 自動車用鋼板の品質保証

2-1-1. 自動車用鋼板の用途と仕様

自動車用鋼板の材料特性とは、弾性変形の強さを表す「引張強度」、塑性変形の限界である「降伏強度」、プレスした際の伸び易さ「延性」、耐食防食性を言う。本研究における表面検査の対象である GA ほか自動車用鋼板には、鉄鋼材料の特性として最も一般的な引張強度(250~1800MPa 前後)と共に、優れた伸び特性、潤滑性、溶接性、塗装性等が要求される^{2-1), 2-2), 2-3)}。自動車用鋼板は、多くの品種がある鉄鋼材料の中でも総合的に最も優れた特性を持つ製品のひとつであり、自動車の進歩に伴って進化してきた。

自動車はこの半世紀に著しい発展を遂げ、走る、運ぶという機能に加えて、デザイン、安全性、環境性能においても大きく進歩した。例えばデザインにおいては 図. 2.1.1 にみるとおり 1950 年代には箱型をベースとした単純な面構成のデザインだったが、現在の自動車は、流麗かつ複雑な曲線で構成される。昔も一部の趣味性の高い車種でこうしたデザインは存在したが、職人の叩き出しによる手作りであった。鋼板素材の特性と加工技術の



図 2.1.1 自動車デザインの変遷

進歩^{2-4), 2-5)}により、微妙な曲線と深い絞りによる複雑な成形が可能になったのは、1980年頃からである。

そしてこの四半世紀で自動車用鋼板の特性はさらに改善され^{2-6), 2-7)}、20世紀後期の標準的な引張強度の2倍近い1,2GPa程度の強度において複雑な造形が可能となり、流麗なデザインの自動車が一般的になった。また、以前は複雑な形状の部品は別々にプレスして接合していたが、最近では鋼板の伸び特性などが進歩し、一枚の鋼板からプレス成型が可能となって工数が減りコストも抑えられた。さらに、強度と耐食性の向上により、自動車の軽量化と安全性、耐久性も向上した。このように、自動車用鋼板の特性向上は自動車の発展に大きく貢献してきた²⁻⁸⁾。

鉄鋼メーカーから出荷される製品としての自動車用鋼板はコイル状に巻かれ、幅1000～2000mm、長さ1～3km(重量10～25t)のコイルとして自動車メーカーへ出荷される。自動車メーカーでは、それを巻きほぐしながら適当な長さに切断してプレス工程に送られる(図2.1.2)。プレス機は、各々の部品毎に用意され、各々に金型がある。最近の自動車は設計段階から工程を少なくする工夫が成されており、ドアのパネルを一枚の鋼板でプレスすることは珍しくな。サイドメンバーと呼ばれる自動車の側面構造の主要部材も、一枚の鋼板をプレスして製造される場合が多い。

一般的な1.5-1.8Lクラス(重量1500kg前後)の自動車における鋼の使用量は700～800kgであり、ガソリン車の場合、重量の約40～50%程度である。そのなかで、ボンネットフード、フェンダー、ルーフ等、塗装されて最も外側の目に見える箇所に使用される外板用鋼板は、プレス性、塗装性、防錆性等の総合品質要求が厳しく、鉄鋼製品の中でも材料特性が総合的に最も優れている故、製造の難しい製品である。その代表がGAである。

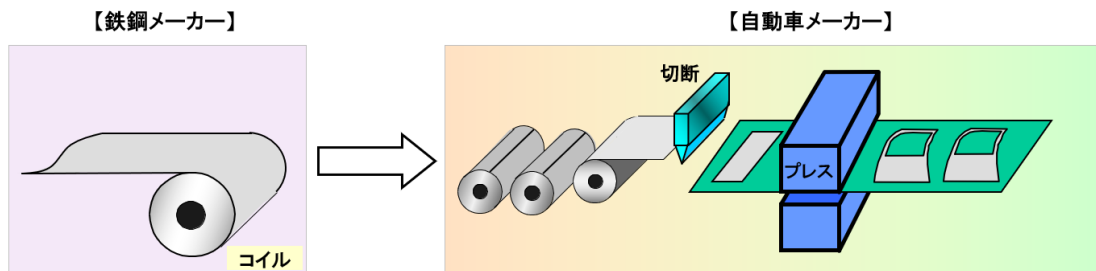


図 2.1.2 自動車用鋼板の出荷と使用形態の概略

鋼板の厚さは用途によって様々であるが、自動車用鋼板では0.5~2mm程であり、2000mm四方に切断した場合に、厚さのバラツキが0.5%以内であることなどが製品の厚さの仕様とされる。そして、重要な項目が「鋼板に欠陥がないこと」である。欠陥には、色合い、粗さといった外観の異常、また、意図しない穴、凹凸/変形、異物、変色等がある。典型的な自動車外板用鋼板の使用部位を図.2.1.3に示す。これらの部分は、成型、塗装されて人目に触れるため、表面に欠陥が無いことは、鋼板を鉄鋼メーカーから自動車メーカーへ出荷する際の製品仕様の一部であり、重要な品質保証項目である。

前述の如く近年の自動車製造では図.2.1.3に示すように主要部品がパネル化され、一体化・大型化が進んでいる。従って例えばプレス後のドアパネルに1箇所でも欠陥があればドア1枚分が無駄になり、その鋼材はスクラップとなるため、欠陥のない鋼板の供給は鉄鋼メーカーの至上命題である。

なお鋼板には、表面のみならず内部にも介在物等(2-1-3節,2-2-2節に詳述)の欠陥が存在するため、缶用鋼板などでは磁気式や超音波式の欠陥検査装置も併用して検査をおこなう。ただし、GA鋼板は1mm前後の厚みであるため、プレス等の実使用時に実害のある内部欠陥は表面に影響を及ぼして表面欠陥として現れるため、光学式の表面検査装置を用いて検査を行うことが一般的である。

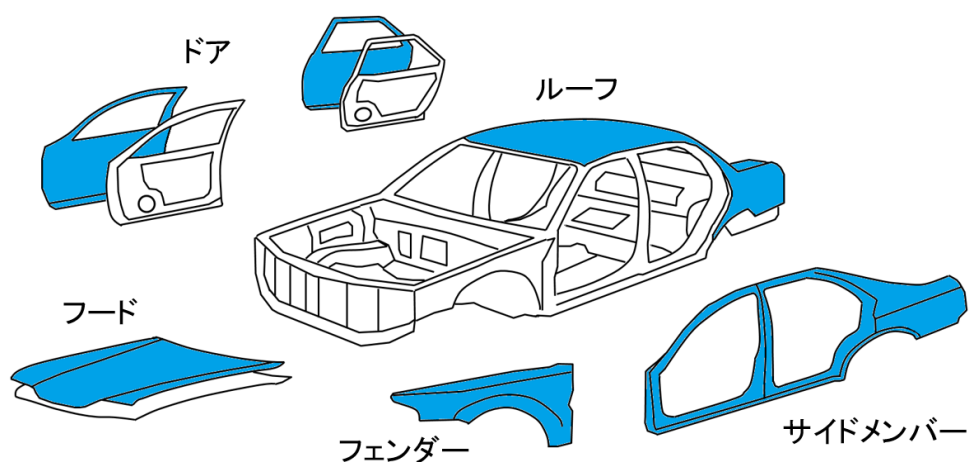


図 2.1.3 自動車部品のパネル化と外板用鋼板の使用部位(ハッチング部分)

2-1-2. 鋼板の表面欠陥

鋼板表面は、冷延鋼板の場合、一般に銀色の金属系色調を呈し、錫めっき鋼板では、なめらかな鏡面を呈する。一方で、GA 表面は算術平均粗さ Ra が $1\mu\text{m}$ 前後のつや消しの外観を有する。このような鋼板表面における「欠陥」とは、その外観の異常部であり、光学的観測手段をもって撮像した場合に周囲と異なる輝度を有する箇所である。欠陥には無数の形態があるが、原因別に大きく 3 種に区分され、程度の軽い順に、

(1) 付着物、(2) 加工性欠陥、(3) 原板性欠陥

である。表 2.1 に主な表面欠陥についてまとめた。

(1) 付着物は、製造中若しくは製造後の鋼板表面に、埃あるいは蚊などの小さな昆虫が付着したもので、多くの場合外観が明確で見つけ易く、かつ払拭によって除去可能であって、実害はごく少ない。加工性欠陥に比べると発生頻度も低い。

(2) 加工性欠陥は、圧延ロールと鋼板がスリップした場合に、鋼板に長さ方向のスジが付くなど、素材とは無関係に、製造プロセス自体から鋼板表面に付けられるものである。鋼板製造時のロール表面に硬い異物が付着して鋼板表面にロールの周長毎に凹みが転写される場合は「ロールキズ」などと呼ばれ、大量の不良を生む危険性がある重度の欠陥となる。また、ロールによる鋼板のスリップでは鋼板表面に長さ方向の細い溝が刻まれる場合がある。これは「スリキズ」などと呼ばれ、鋼板をプレスして曲げる際に応力が集中して割れが生じる危険性がある。

このように、加工性欠陥は重大な不良を誘発する可能性がある重度の欠陥であるが、多くの場合、スジ状の凹凸、周期的な凹凸があり、正常な部分と比較して光沢または表面粗さの相違があるなど、物理性状が明確であって、光学的手法によって見つけやすい。

(3) 原板性欠陥は、鑄造プロセス等において製品表層に取り込まれた金属酸化物が原因の欠陥であり「介在物欠陥」などとも呼ばれる。介在物とは、スラブ鑄造または中間工程における加熱の際に、材料内部に残った金属酸化物であって、自動車メーカーにおけるプレス工程において顕在化する場合がある。主な成分は、 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等があり、鉄の酸化物も絡んでスラブ段階で数十 mm～数 mm 程度のクラスター状に存在することが多い。これらが数多くの圧延工程を経て、鋼板と共に薄く延伸され、低コントラスト欠陥の原因となる。原板性欠陥の要因である介在物と鋼板製造工程との関連及び欠陥生成に関しては、2-2 節に詳しく述べる。

2-1-3. 品質保証の課題

鉄鋼製品表面(及び内部)の欠陥は、いかなるものであっても流出を防止することが品質保証の基本事項である。そもそも欠陥が発生しないよう対策を講じることは、製造者である鉄鋼メーカーの責任であるが、実際のところ欠陥には非常に多くの原因と種類と程度がある上、製造上不可避免的に発生するものも多く、全ての流出を防止することは技術的、経済的に非常に困難である。そこで、鉄鋼メーカーでは、どのような種類・形態・程度の欠陥がユーザー側にとって大きな不都合を生む有害な欠陥であるのかを、ユーザーである自動車メーカーとの協議あるいはクレームによって把握し、目標を定めて流出の防止に努めてきた。GA 鋼板の場合、自動車メーカー側で問題になるケースは主に、プレス型内側への転写の有無、及び割れの起点になるかどうかである。無論、著しい表面粗さや色調のムラなども自動車表面の仕上がりに影響があるため、流出防止を求められる。

以下、表 2.1.1 に準じて種別毎に品質保証の考え方と方策を説明する。

(1) 付着物等：

目視または検査装置による検査にて比較的に見つけやすく、見つけた場合は、一旦製造ラインを停止してふき取るなどの措置をとって流出を防止する。また、小さな昆虫や浮遊粉じんへの対策としてライン全体をフィルムや蚊帳で覆うなどの対策も講じている。製造ラインの方々に溜まる埃、塵も塊で鋼板上に落下すれば汚れとなるため、定期的なラインの清掃は欠かせない。

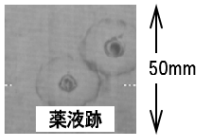
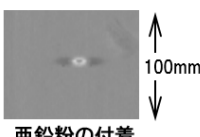
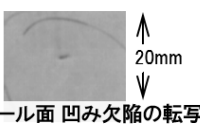
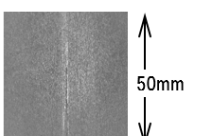
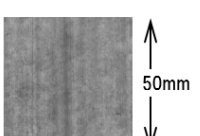
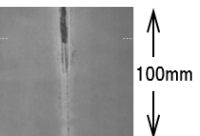
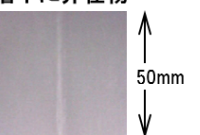
(2) 加工性欠陥：

原因が多様であるため外観も極めて多様である。深い「スリキズ」は凹凸形状を成すものが多く、プレス型の内側に凹凸が転写し、以降にプレスされる鋼板に再転写されて大量のプレス不良品を生じてしまう危険性がある。

そこで、鉄鋼メーカー側では、目視または表面検査装置を用いて発見に努めている。基本的には鋼板表面に凹凸あるいは物理性状(形状)変化を伴って現れるため、発見した場合は、小規模であれば砥石をかけて消去するなどの対策をとるが、使用部位の用途やグレードに依存して扱いは異なる。

周期性欠陥の場合は、例えば直径 300mm のロールによる欠陥は約 1m 毎に鋼板上に繰り返して発生するため、1 体の大きさが数百 μm 程度でも検出対象となる場合がある。

表 2.1.1 鋼板表面欠陥の種類

	外観, 特徴	生成原因	成分, 性状	名称 (参考)
(1) 付着物等 検査・除去容易	(1)-1 視認が容易な付着物など。 	埃、小虫等が付着, 処理液等の落下・固着	色合い相違、 凹凸あり サイズ・形状は多様	ムシアト, アブラアト
(2) 加工性欠陥 場合に依り 専用検出装置	(2)-1 点状・粒状の凹凸 視認し易い。 	めっき浴にて未溶解の 亜鉛の塊が付着, 一部酸化	Zn, Zn酸化物 0.5~10mm	ドロス, メダマ
	(2)-2 周期性の凸または凹み 	ロール表面欠け等の 凹凸欠陥が鋼板へ転写 点状金属酸化物等の 異物付着/噛込	凹凸 0.5~数mm 点状の黒点 0.5~1mm程度	オシキズ, ロールキズ カミコミ スケール
	(2)-3 微小な凹み			
	(2)-4 凹凸のある地肌の子ズ 	ロール表面異物または 鋼板表面の硬い異物に よる摺りキズ, カキキズ	長さ方向の カキキズ様の 明確な凹凸欠陥	スリキズ, スリパー
	(2)-5 地肌の粗さムラ, 色ムラ 表面粗さのムラ, 色調ムラ 	酸化膜残存ムラ, 表面処理のムラ等 ロールの荒れ, 酸化膜, 処理膜残存等	油脂, 化成薬剤, 鉄酸化膜, 表面粗さムラなど	ハダアレ, イロムラ
(3) 原板性欠陥 (介在物起因) 低コントラストは 検出に課題	(3)-1 コントラスト高い 表面が割れて介在物が露出。 	鑄造パウダー巻き込み, 鑄造時の異物, スラブ加熱炉における 生成スケール等	鑄造パウダー (CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ など) 鉄系金属酸化物	ヘゲ, ラミネーション
	(3)-2 コントラスト低い 表層下に介在物 			ヘゲ

周期性欠陥には凹凸が数十ミクロン程度のわずかなものもあり、検出しにくい場合もあるが、鋼板ユーザーにおけるプレスや塗装後に顕在化するレベルの欠陥は、投受光の角度の工夫によって発見が可能である。スリキズ及び何らかの原因で発生する地肌のキズも多くは明確な凹凸があるため画像に写りやすく、既存の装置で検出可能である。一方、0.5mm以下の微小な点状の欠陥が群発するような欠陥も存在する。微細な鉄酸化物や亜鉛粉などに起因する欠陥であり、単独であれば問題にならないが、群発すると塗装後にその部分が曇って見えるなど有害な欠陥となる。これに対しては特別に分解能を高めて顕微鏡視野のカメラによって観測するなどの手段がとられている²⁻⁹⁾。以上のように、加工性欠陥にも重大なものがあるが検査手段としては概ね解決が図られている。

(3) 原板性欠陥（介在物欠陥）：

原板性欠陥の生成原因の多くは鋼板の製造工程に起因した表層付近の介在物（金属酸化物）であり、**図. 2.1.4(a)**に示すように表面に露出するものと、**図. 2.1.4(b)**に示すめっきの表層下に隠れているものがある。露出していれば、凹凸を伴った外観の異常を呈するため検出は容易である。一方、介在物が表層下に隠れている場合は、その影響(2-2-2 節で詳述)で僅かに表面に模様が見れるもののコントラストが低く、かつ表面に明確な凹凸が現れないために検出困難な場合がある。本研究において扱う欠陥は、このタイプである。

図. 2.1.5 に、**図. 2.1.4(b)**のような模様状に観察される GA 表面の欠陥の断面 SEM(Scanning Electron Microscope) 写真を示す。表層下に見える空隙が介在物クラスターのある箇所である。

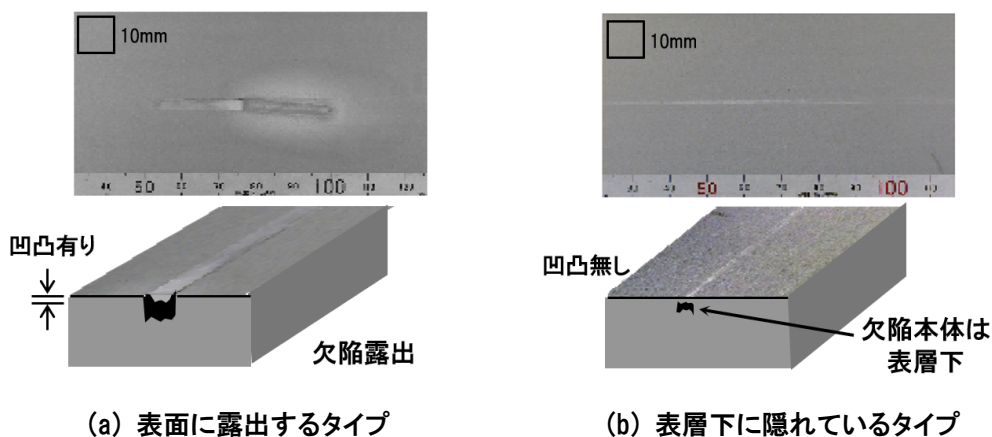


図 2.1.4 原板性欠陥の形態

図. 2.1.6 は、介在物起因の表面欠陥による顕在化の例である。鉄鋼メーカーにおける鋼板製造時の段階(図. 2.1.6(a))ではほとんど凹凸のない薄い模様状の外観を呈しており重要度が高く見えない。

ところが、図. 2.1.6(b)に示すように、自動車メーカーのプレス成型において、表層下にあった介在物が表面を破って露出し欠陥として顕在化している。

介在物の主成分である CaO_2 , SiO_2 はビッカース硬度 600HV(ガラス)-1100HV(結晶)であり鋼製のプレス金型材(500HV 前後)より硬いためにプレス金型の表面にダメージを与え、次回以降のプレス製品表面が荒れてしまう。金型は生産の要である上に高価な生産設備であるため、このような事態は自動車メーカーから鉄鋼メーカーへのクレームになることがある。プレス機にダメージを与えるかどうかは、介在物の大きさ、形状、プレスの状況などに依存し、また各々の状況でダメージの程度も異なるが、時折、鉄鋼メーカーから自動車メーカーへ原板性欠陥が流出して自動車の生産に支障をきたすことがある。従って鉄鋼メーカー側における鋼板の品質保証体勢の中では、このような原板性欠陥の流出防止は、最重要課題である。

欠陥の外観の寸法は、幅 0.5mm~10mm、長さ 1mm~500mm 程度であり、製造方向に長細い形状のものが多いが、そのどこに介在物が存在するかは特定できないため、このような

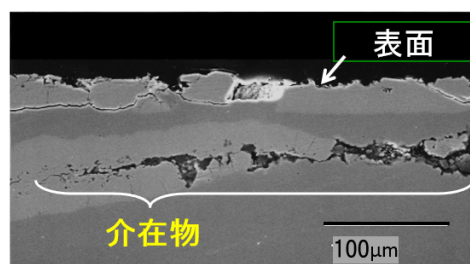
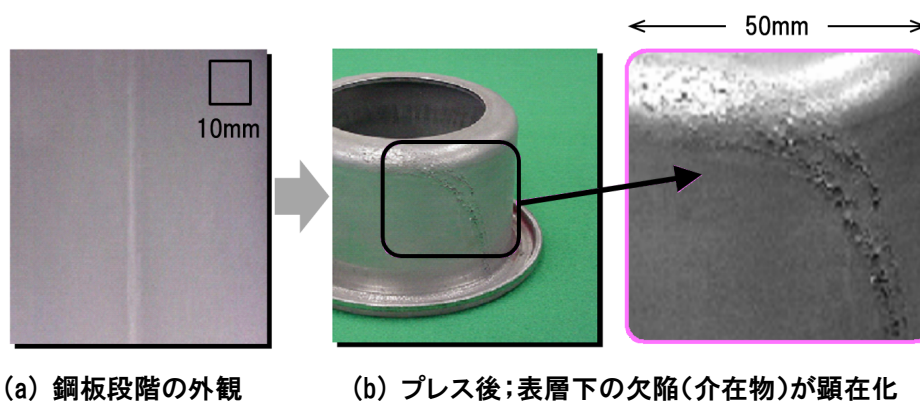


図 2.1.5 介在物の断面 SEM 写真



(a) 鋼板段階の外観

(b) プレス後;表層下の欠陥(介在物)が顕在化

図 2.1.6 表層下に隠れた原板性(介在物起因)欠陥の外観と顕在化

表面欠陥の全長が検出対象となる。なお、表面への介在物曝露の有無については、元素分析を行うことで確認できる。実際の欠陥分析例については、3-1-1節で述べる。

自動車用鋼板の表面欠陥に関する品質保証の課題をまとめると、以下の通りである。

- (1) 表面欠陥には、付着物、加工性欠陥、原板性欠陥があり、全て正常部とは異なる部位であるため、鉄鋼メーカーから自動車メーカー出荷する段階までに検出し、除去する必要がある。
- (2) 特に原板性欠陥は、プレス機内壁を損傷する危険性があるため、鉄鋼メーカーからの流出防止は最重要である。
- (3) 原板性欠陥では、介在物が表層下に隠れていて、欠陥としての外観のコントラストが低い場合があり、流出リスクが高い。

鋼板の品質保証内容は一般に鉄鋼メーカーとユーザーとの協議によって決められる。自動車用鋼板においては、原則的に鉄鋼メーカーからの納入品について、欠陥の混入は認められていない。しかしながら、現実問題として無欠陥の製品を製造し続けることは現在の技術では不可能なため、ある程度の混入を許容する内容にならざるを得ない。

介在物は鋼板の表裏どちらにあってもプレスされた際に、プレス型内壁にダメージを与えるため、欠陥は欠陥評価の基準幅となる長さあたりの表裏合計数または全長で割った混入割合などで管理される。例えば、「幅 2000mm、長さ 2km、厚さ 1mm の鋼板であれば、加工性欠陥と原板性欠陥の合計が 5 体以内は許容」といった保証規定がとられる。また欠陥が 1 体あればプレス製品全体が無駄になるため、欠陥 1 体が占める面積または長さが決められる場合もある。「欠陥 1 体につき、前後 1m を不使用とする」などである。この場合すなわち、2km のコイルの内 10m 分は、欠陥の混入を許容する」などである。こうした条件の緩和がない場合、鉄鋼メーカー側では全ての欠陥部分を切断する必要がある。すると本来 2km の連続した製品が細切れのコイルとなって自動車メーカーにとってもハンドリングが増え効率を損なう。そこで、ある程度の欠陥混入を認める品質保証の形態もある。

以上は、無欠陥製品製造が非常に困難であることから生じた品質保証上の緩和措置であるが、鉄鋼メーカーにとっては、対象となる表面欠陥を確実に検出しなければならない状況は変わらない。鋼板を製造しながら保証緩和範囲を超えた段階で一旦製品を切断し、そこで 1 本のコイルを完結させなければならないが、一方で欠陥でない箇所を誤検出すると、本来はもっと長いコイルとして出荷できたはずのものが、短くなることでハンドリングの手間が増えて生産効率が低下する。さらに、欠陥自体は高々数 mm 径であっても、切断代は

数百 mm 必要な上、鋼板全幅を切断するので、鋼板に大幅な無駄が生じ歩留も低下する。従って、表面検査の確度が高いことは鋼板の製造において非常に重要な要素である。

図 2.1.7 に、介在物欠陥を対象とした表面検査範囲の概念を示す。鋼板表面には①の短破線領域に示す様々な欠陥があり、その中に検出目標である②介在物欠陥(グレーハッチング)がある。一方で、長破線で表した③油痕など無害なオブジェクトがある。一方、装置は必ずしも欠陥だけを完全に仕分けて検出できるわけではないため、装置の検出範囲は、実線で表した④の領域となる。ここで油痕などを余分に拾ってしまう領域が斜線ハッチングで示した⑤過剰検出の領域である。さらに装置には欠陥の見落としもあり、これは⑥未検出または検査不要の領域に含まれる。⑥には本研究の対象とは別の種類の検出必須の欠陥もあるが、これらの欠陥に対しては必要に応じて別な検査手段が採られる。

検出目標領域②について、現状では定量的な指標は確立されておらず、欠陥のサイズや視覚的な濃度等によってこの領域が経験的に決められる。また、本来は②の介在物欠陥の全てを検出した上でプレス内壁を壊す可能性のある欠陥のみを仕分けることが理想であるが、これも実現されておらず、さらに将来の課題である。

コントラストの低い欠陥を検出するために検出感度を高めるだけでは、欠陥以外のオブジェクトを過剰に検出してしまい、生産性と歩留りを阻害する。欠陥の候補となるオブジェクトの数は欠陥の数百倍に及ぶため、検出の都度確認を行うことは現実的ではない。従って、検査装置の確度を高めること、すなわち確実に欠陥のみを検出して極力⑤の過剰検出を抑制することは、製造の生産性向上に欠かせない。これが自動車外板鋼板の品質保証と製造における重要な課題である。

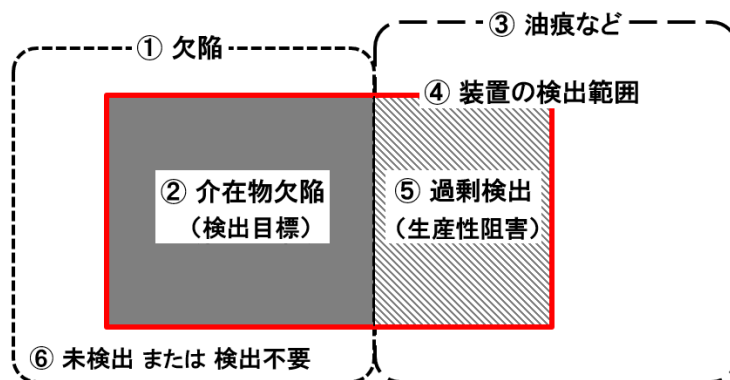


図 2.1.7 原板性欠陥(介在物欠陥)と、表面検査範囲の概念図

2-2. 鋼板の製造工程と表面検査の課題

鉄は、原料である鉄鉱石を焼結鉱として焼き固めた上で、熱源かつ還元剤である石炭(コークス)と共に高炉に投入し、銑鉄として最初の原料を得る。その後、精錬、鋳造、圧延等を経て鋼板となる。鉄鋼製品の欠陥は鋳造以降の全ての工程において不可避免的に発生するものであるが、本章では鋼板の製造工程を詳細に追いながら、原板性欠陥の原因となる介在物の混入と欠陥の生成過程について述べる。

2-2-1. 自動車用鋼板の製造工程

本研究の対象である鋼板製造の一般的な流れを説明する。製造工程の概略を図 2.2.1 に示す。基本的な流れは以下の通りである。

- (1) 高炉；鉄鉱石を還元し「銑鉄」を得る。(高温熔融状態)
- (2) 精錬；炭素ほか成分調整し「鋼」とする。(高温熔融状態の溶鋼)
- (3) 連続鋳造；溶鋼を徐々に固めて鋼のプレート(以降「スラブ」)を鋳造。
- (4) 圧延；スラブを薄く伸延する。(熱間圧延, 冷間圧延)
- (5) 表面処理；化成処理により最終製品とする。

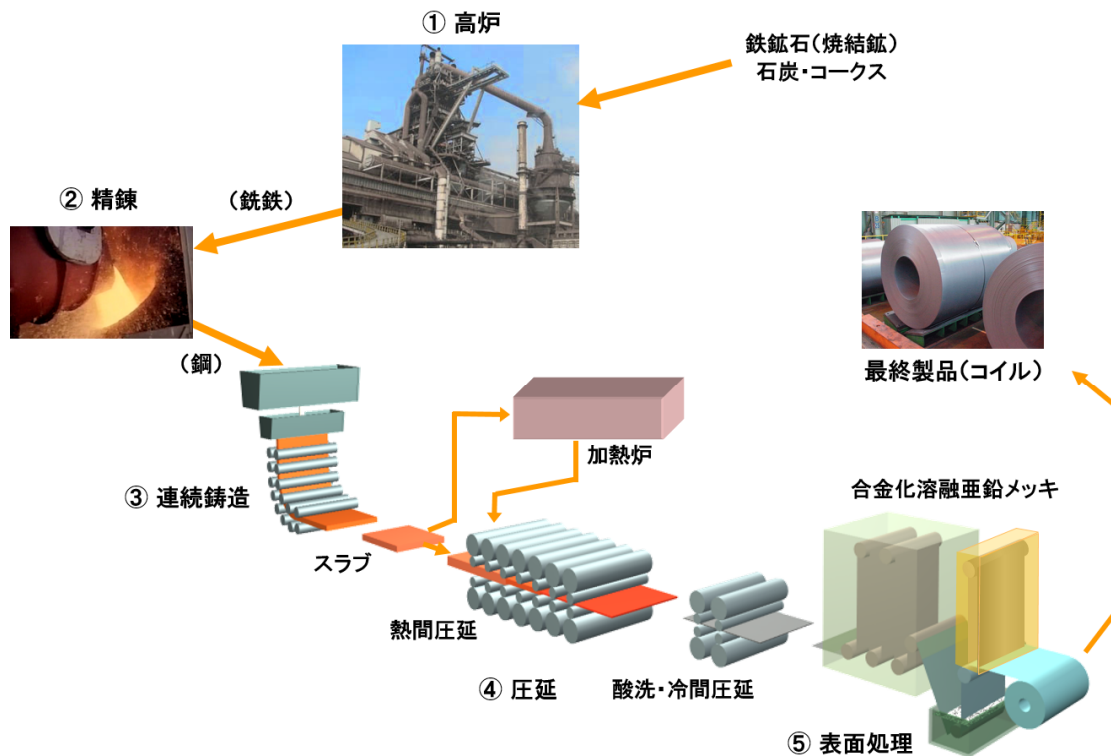


図 2.2.1 自動車用鋼板の製造工程概略

本研究の対象である自動車外板用鋼板では厚さ 1mm 前後の製品が多く、製造工程の最後に合金化溶融亜鉛めっきを施す。

鋼板は、高炉に投入される原料の段階から品質が管理されている。世界で産出する鉄鉱石や石炭には、それぞれ成分に特徴があり、焼結鉱やコークスとして固めて高炉へ投入する段階で、鋼の最終的な特性や耐食性などに悪い影響を与える硫黄、銅などの不純物が極力少なくなるよう、また高炉から出る銑鉄における炭素ほかの成分比が大きく変動しないように原料が配合される。

高炉から得られる 1500℃以上の高温溶融状態の銑鉄は、そのままでは炭素が 4-5%程度含まれており、固まっても脆くて使用できないため、真空炉中の高温溶融状態で酸素を吹き込む精錬工程「脱炭」において炭素を CO₂ または CO ガスとして除去する。これにより銑鉄中の炭素濃度を 0.04~2%程度の鋼(溶鋼)へと変える。同様にシリコン(Si)、燐(P)、硫黄(S)も取り除かれる。

溶鋼は、連続鋳造工程²⁻¹⁰⁾において厚さ 100-500mm 程度の鋼のスラブに成型され、その後 1000℃前後で引き伸ばされる熱間圧延、常温で引き伸ばされる冷間圧延等を経て 0.5~2mm 程度に薄く引き延ばされ、最後に防錆の表面処理が施されて製品となる。以上の製造過程にいくつか欠陥の生成原因がある。

精錬プロセスでは、最終製品の特性に決定的な影響を与えるマンガン(Mn)、シリコン(Si)ほかの微量成分の調整が行われる。ステンレス鋼を製造する場合は、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)等も添加される。

精錬プロセスにおける成分調整後の連続鋳造では、溶けた鉄(融点 1356℃以上)を、モールドに入れ、徐々に凝固させながらスラブが作られる。スラブは 900~1300℃の温度で多段ロールによって厚さ数 mm~1mm 前後まで引き伸ばされる。これを「熱間圧延(熱延)」と呼ぶ。熱延工程に装入するスラブは高温でなければならないが、必ずしも全てのスラブを連続鋳造から直接熱延へ送るわけではなく、一旦、屋外等の専用のヤードへストックされる場合もある。このようなスラブを熱延プロセスへ通すためには加熱炉を用いて再度昇温して熱延工程へ装入される。加熱炉における温度と滞留時間、熱延直後の水冷プロセスを含めた鋼板の温度履歴は、鋼の相と組織を決定し、成分と同様に引張強度、伸び性能等の鋼板の基本特性を大きく左右する。熱間圧延を含む上工程では、製品表面では常に酸化が進行する。表面の鉄酸化物を「スケール」と呼び、これを除去する酸洗処理等を経て、防錆のための表面処理工程に入る。一方、熱延の後にさらにほぼ常温にて圧延を行って板を薄

くしていく「冷間圧延(冷延)」工程に回る材料もある。

鋼板製造の最終工程である表面処理にはいくつかの方法があるが、自動車外板用鋼板には多くの場合、亜鉛系の「めっき」が CGL(Continuous Galvanizing Line) 工程²⁻¹¹⁾によって施される。して自動車メーカーへ出荷される。その代表的かつ最も高級な処理が合金化溶解亜鉛めっき GA である。Fe-Zn 合金である GA は自動車メーカーにおけるプレス成型時の潤滑性が良好で、かつ防錆性能が高い上に塗装との相性も良いという優れた特徴を持つ。

CGL の最後に表面検査が行われ、防錆用のオイルが全長全面に塗布されて製品コイルとなり、防錆紙に梱包されて自動車メーカーまたは、その関連部品メーカーへ出荷される。製品としての GA 自動車用鋼板のコイルの諸元は、厚さ 0.8mm、幅 2100mm、長さ 2km、重量 25t のようになる。

2-2-2. 介在物起因による表面欠陥の生成

表面欠陥の原因である介在物は、製造工程のうち主に連続鋳造と熱延前の加熱炉にあると考えられており^{2-12), 2-13)}、スラブ表層における介在物が後工程において表面欠陥として顕在化するメカニズムに関しては多くの実験が行われ^{2-14), 2-15), 2-16)}、知見が得られている。以下にその概要を述べる。

連続鋳造では、溶鋼を徐々に固めつつ下方へスラブとして引き抜いていく(図 2.2.2)。この際に溶鋼と水冷モールドとの熱的な緩衝と潤滑のため、金属酸化物が主体の各種パウダー(粉体)が使用される。成分は、 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 、 Na_2O 、 MnO 、 TiO_2 などであり、凝固に伴って鋼が下方へ移動する際にスラブの表層(凝固殻)に固着するか、場合によっては凝固するスラブ内部へ巻き込まれる。鋳造速度やモールドを上下に揺らすオシレーション動作、パウダーの成分、熔融部への磁場の印加などで巻き込みは抑制できるが²⁻¹⁷⁾、スラブ表層へのある程度のパウダー巻き込みは不可避であって、これが介在物となって圧延以降に欠陥となる^{2-18), 2-19)}。

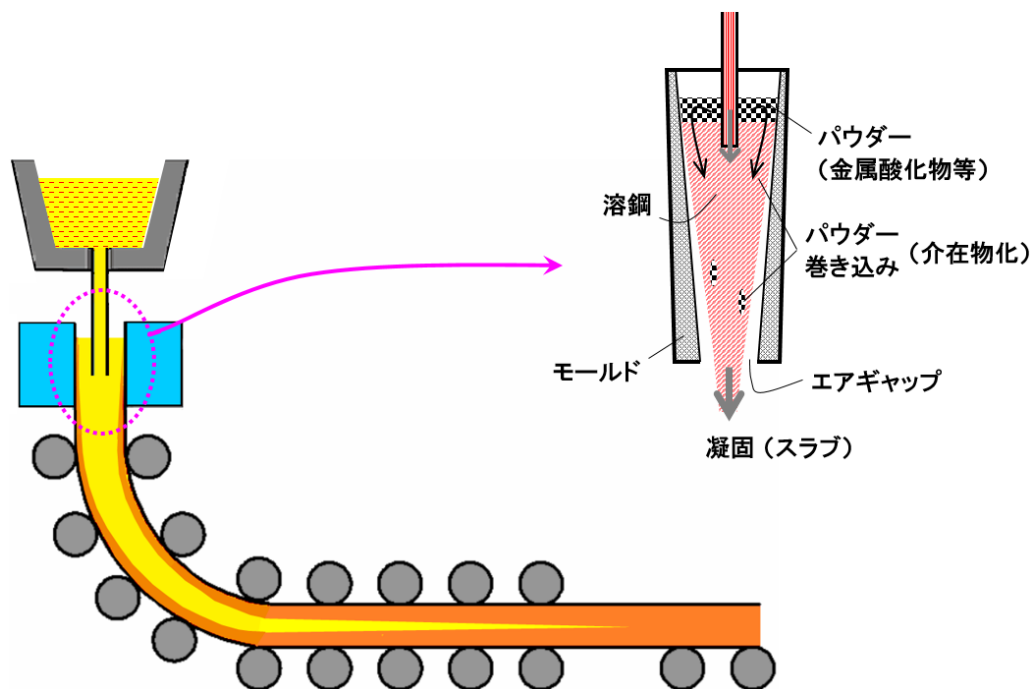


図 2.2.2 連続 casting 装置(左下)とモールド部(右上)における介在物混入過程の概念図

また、溶鋼は周囲から次第に固まるため、物質の凝固現象に則ってスラブ中心部に不純物が析出する(中心偏析)。これも鉄酸化物やマンガン化合物などの介在物であるが、Mn 濃度が 1%未満の自動車外板用 GA 鋼板の場合、中心偏析が表面に出てくることは少ない。

次に、熱間圧延における介在物生成がある。熱間圧延では、1000℃前後のスラブを装入する必要があるため、加熱炉でスラブが昇温される。加熱は通常大気中で行われるため、スラブの表層では鋼が激しく酸化して厚い酸化物層(スケール)を形成する。

スケールは圧延を阻害するため、熱間圧延装入直前に高圧の水ジェットによってスケールの剥離が施される。しかしスケールの一部はスラブに根を張っており、剥離し切れずに表層に残存する場合がある²⁻²⁰⁾。また、加熱炉における熱収縮に伴ってスラブ表面に割れが発生する場合もある。割れの内部には即座に酸化物が生成されるので、こうしたスケール及びそれに付随した鋼板表層が圧延工程で 2 重層を作ることによって、スケールが表面から隠れて介在物となる²⁻²¹⁾。

このような欠陥生成過程を推定した図を図 2.2.3 に示す。図 2.2.3 上段(a)は、鋼板が

複数のロールによって次第に薄くされていく様子、下段(b)は、圧延に伴って鋼板の単位部分が薄く長くなっていく様子の推定図である。図 2.2.3(b)のように表面の微小な割れや凹凸において鉄の酸化が深く進行した部分がある場合に、圧延に伴って酸化物部分が薄く伸び、表層下の薄い介在物層となって、表面には欠陥として現れるものと考えられている²⁻²¹⁾。本論文で扱う介在物欠陥は、前述のパウダー起因と、このタイプである。

その他、製造工場内においてスラブを移動させるための機構によってスラブ表面が鋭く削られ、そこを起点に折れ込みや酸化鉄の厚い部分が生成し、やはり熱延で伸長されて表層の介在物となるケースもあると考えられている²⁻²²⁾。

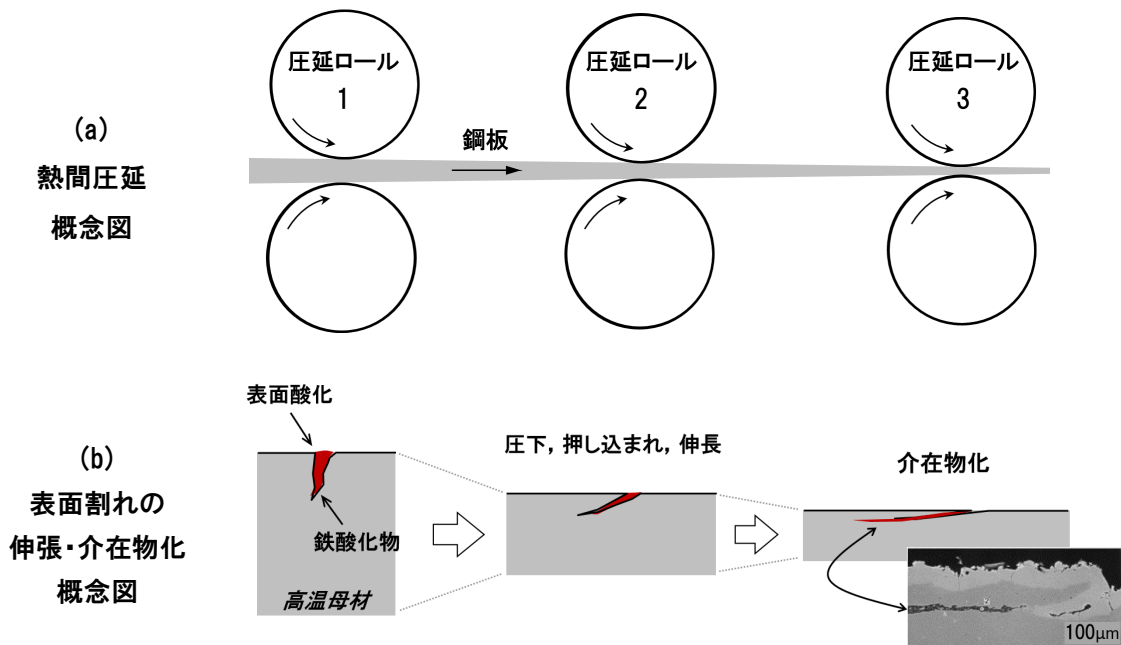


図 2.2.3 熱延工程における表層介在物の生成過程（推定）

以上に述べたように、原板性欠陥の実体は金属酸化物による介在物であり、数多くの圧延工程を経て鋼板と共に薄く延伸される。その際に表面に露出して凹凸欠陥となるものと、表層下に隠れたままになるものがある(図 2.1.4~1.1.6 参照)。表層下に介在物が隠れる機構は、圧延によって開口部が密着封印されることで表面に現れない場合と、仮に僅かな開口部があっても、めっきプロセスによって覆われて見えなくなる場合があると考えられる。

自動車用 GA 鋼板は、合金化溶融亜鉛メッキ工程を経て最終製品になるが、この際に表面に形成される Fe-Zn 合金層の下に介在物が隠れることがある。この過程の概要を図 2.2.4 に示す。原板は、図 2.2.4 左側(入側)から工程に装入され、熱処理を経て図中央の溶融亜鉛ポットへ入る。この直前の段階①では、介在物のごく表層、若しくは表面に在る。しかし溶融亜鉛ポットを経て表面にめっきが付着した後の②の段階では、めっきに隠れて介在物自体は見えなくなる。しかし、2-1-3 節で述べた通り、介在物部分の表面にはその痕跡が薄く現れる。これが本研究で対象とする表面欠陥である。

こうした過程によって生成された介在物起因の欠陥は、顕在化していなくとも表層下に硬い介在物が存在する可能性がある以上、品質保証の対象であって、製造下で検出し自動車メーカー等への流出を防止しなければならない。

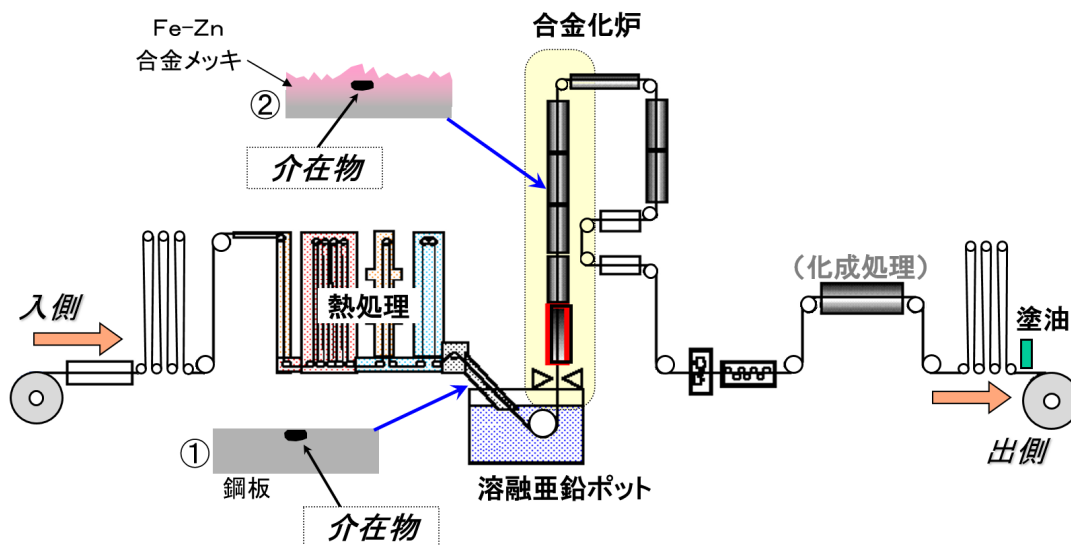


図 2.2.4 溶融亜鉛めっきプロセスと介在物の挙動

2-2-3. 表面欠陥の評価指標「SN比」と「コントラスト」

欠陥自体が露出している場合は、加工起因の欠陥と同様に凹凸があるため見つけやすく、自動検査装置が普及していなかった 1960 年代までは、あらゆる鋼種の生産ラインにおいて熟練検査員による目視検査が行われていた。1970 年代に自動検査装置が実用化され、次第に目視による官能検査は装置に置き換えられた。

以降、画像式の表面検査におけるオブジェクト評価の指標を示した上で、鋼板の品質向上の歴史に追従した表面欠陥検出のための自動検査装置の必要性、及び光学式検査技術の変遷について概観する。

表面欠陥検査の自動化の初期は、撮像管で鋼板表面の画像を採取し、単純な2値化処理によって異常な部分を抽出して、欠陥または異常な部分の有無を判定する方法だった。その後、信号強度による欠陥の程度の判定が行われるようになり、少なくとも輝度レベルによる正常部のノイズ信号と欠陥信号との強度比すなわちSN比、及び欠陥部のコントラストは、欠陥や異常部を評価する基本的な指標となっており、本研究においてもこれらを使用する。

ここで、本研究において以降使用する画像の仕様と欠陥の評価指標であるSN比とコントラストについて定義しておく。

[画像輝度の正規化]

欠陥検出等の画像処理では多くの場合、画像内における異常部(欠陥)の検出のために、画像は一定の輝度へ正規化される。本研究においても以降、撮像された画像の輝度を、その平均値で正規化する。画像の画素数を n 、個々の画素の輝度を I_i とすれば画像の平均輝度 I_{ave} は(2-1)式である。

$$I_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad \dots (2-1)$$

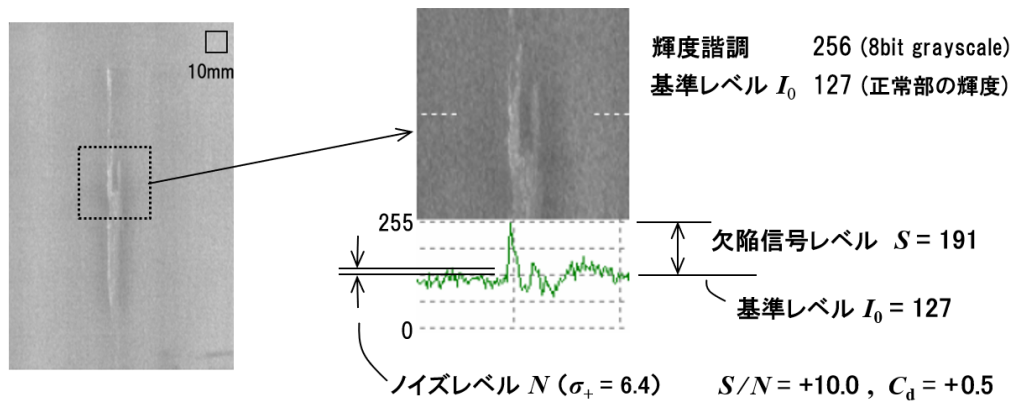
ここで、各画素の輝度 I_i を I_{ave} で正規化する。その際のバイアスを b 、倍率を f とおいて、正規化された輝度 I'_i は以下(2-2)式で表される。

$$I'_i = (I_i - I_{ave}) \times f + b \quad \dots (2-2)$$

本研究においてバイアス b は、グレースケール 256 階調 (8bit) の中心をとって 127 とし、改めて基準レベル I_0 とする。この設定は、鋼板等の課印刷対象の正常部を 127 輝度にとった場合に、欠陥部等の明暗が視認し易く、また数値上も階調の中心レベルであって記述し易いため、多用される。本論文内の画像も特に断らない限りこの設定とする。倍率 f は画像の明暗を強調する際の調整要素であるが、通常は 1 とする。

[SN比の定義]

GA 鋼板の正常部は一般に表面粗さ R_a が $1\sim 5\mu\text{m}$ であって、可視光領域では正反射率は低く、拡散反射が主となる粗面である (3-1-1 節に詳述)。また、鋼板表面にはめっきの微小なムラ、あるいは圧延による微小なキズが無数に存在し、 R_a 値以上のランダムな凹凸があるため、正反射付近の角度で画像を採取し輝度プロファイルを描くと、**図 2.2.5 (b)** にあるように、表面の細かな形状による反射に起因したノイズが存在する。



(a) 介在物が露出した欠陥像

(b) 欠陥画像の輝度プロファイルと S/N 計算例

図 2.2.5 介在物が露出した GA 表面欠陥の外観例と信号のプロファイル。 $S/N = 4.5$

欠陥検査では、欠陥の程度を評価する指標として、正常部の平均輝度レベルを基準値 I_0 としたノイズレベルの標準偏差 σ と、 I_0 と (2-2) 式で計算された欠陥信号のピーク値 I_d との輝度レベルの差を用い、SN比として (2-3) 式のように定義する場合が多い。本論文でもこの表記を採用する。

$$S/N = \frac{(I_d - I_0)}{\sigma} \quad \dots (2-3)$$

ここで、ノイズレベルの標準偏差は以下のように表される。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (I_i - I_0)^2} \quad \dots (2-4)$$

[コントラストの定義]

また、画像または画像内におけるオブジェクトの、明暗としての見え易さを評価するパラメータとしては、一般にコントラストが使用されている。コントラストは、基準の輝度レベルに対する対象信号輝度の比であり様々な定義があるが、本研究においては、基準値 I_0 と欠陥または模様等の信号強度値の差と I_0 との比を使用する。すなわち、欠陥のコントラスト C_d を、(2-5)式で定義する。

$$C_d = \frac{I_d - I_0}{I_0} \quad , \quad -1 \leq C_d \leq 1 \quad \dots (2-5)$$

図 2.2.5 において画像は 8bit (256 階調)のグレースケールで撮影しており、鋼板正常部の輝度を中心階調である 127 輝度へ正規化している。以降、本論文では正常な鋼板表面輝度の基準値 $I_0 = 127$ とする。従って、 $I_d = I_0$ なら コントラストはゼロ(=0)である。また、基準輝度に対して明るく見える最大値の 255 輝度の場合、 $C_d = 1$ 、輝度 0 では $C_d = -1$ となる。また、SN 比およびコントラストは、基準レベルに対して正側すなわち鋼板の正常部に対して明るく見える側と、負側(暗く見える)とを区別する。これは鋼板表面の反射画像において、欠陥が明るく見える場合と暗く見える場合があり、かつノイズについても、 I_0 に対する明側ノイズと暗側ノイズが等しいとは限らないからである。

本論文では必要な場合、基準輝度レベル127へ正規化された正常面に対し明るい正極性と暗い負極性のノイズとオブジェクトの輝度の差分値、コントラスト及びSN比について、それぞれ「+」、「-」の符号で区別して標記することとする。また、特に符合を付けない場合

は正極性をあらわすこととする。 例として図2.2.5の欠陥では、

$$S/N = [\text{欠陥信号ピーク値 } 191 - \text{基準輝度 } 127] / \sigma_+(\text{正側}) + 6.6 = +10.0$$

$$C_d = (191 - 127) / 127 = +0.50 \text{ となる。}$$

2-2-4. 表面欠陥の評価指標「特徴量」

欠陥の評価・判定の指標はSN比の他にも、信号処理過程の様々なパラメータを用いて表現される。例えば、あるしきい値で画像を2値化し、長さ、幅、面積といった幾何学的判定指標を定義できる。このような欠陥信号の情報は欠陥の「特徴量²⁻²³⁾」と言われ、目視検査においても長さ、幅、濃度等は検査記録に残される。主な特徴量は広く知られた画像処理におけるものと同様であって、図2.2.6に示すような幾何学的な情報と信号強度(輝度)の情報である。

特徴量は品質保証を行う上で欠陥の種類と程度を判断する指標であって、判断の際に優先順がある。特徴量の主な項目としては表2.2.2に示すようなものがあり、輝度の特徴量では欠陥周囲の正常部に対して明るく見えるのか暗く見えるのかを表す「極性」は、多くの欠陥において重要性が高い。小さくても黒く濃く見えるオブジェクトは最も重大な欠陥

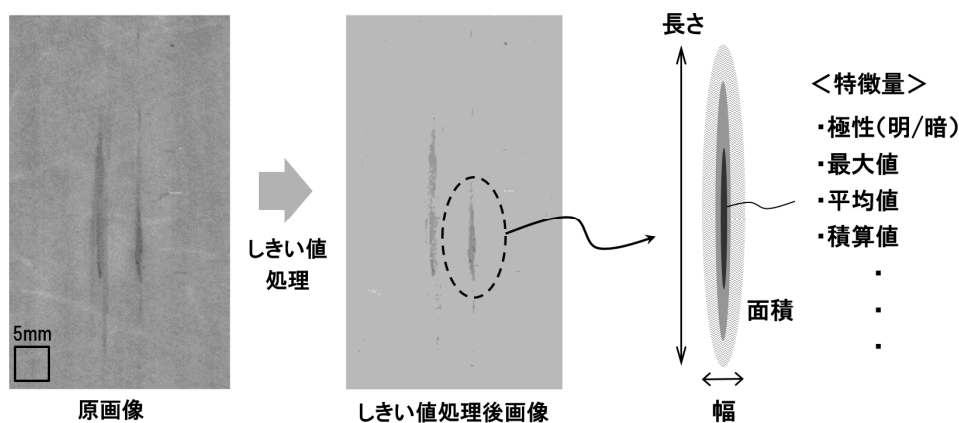


図 2.2.6 欠陥画像の処理と特徴量の例

表 2.2.2 欠陥の主な特徴量

輝度の特徴量	極性, 輝度最大値, SN比, 輝度平均値, 輝度積算値など
形状の特徴量	長さ, 幅, 縦横比, シェイプ (丸/四角/三角...)など
その他	発生位置, 発生密度, 周期性, 表裏同時性など

である「表裏に貫通した穴」の可能性もあり、ユーザーへの流出を 100% 防止しなければならないからである。また、1 個 1 個の欠陥は小さく問題ないレベルであっても、それが密集して発生する場合や、群発的または周期的に発生すれば表面外観、防錆性能、あるいはプレス性(潤滑性)に影響を及ぼすことがあるため重大な欠陥として扱われる。一方、鋼板のエッジ部に発生する欠陥は、ユーザーの工程で切り落とされる場合があるため、品質保証の対象としては軽度にも扱われることもある。

以上のように欠陥検査では、その1個1個の特微量のみならず、群発性/周期性、発生位置等も特微量として重要な要素である。また「縦横比」など、複数の基本的な特微量を組み合わせることで新たな特微量を組むこともある。特微量を様々な基準で判定することで欠陥の種類と程度を類別し、はじめて実用的な検査装置となるが、ある光学条件の下で、その欠陥が検出可能であるかを判断する最も基本的な特微量は輝度値によるSN比とコントラストである。すなわち欠陥検出においては第一に「欠陥が正常部と区別して見えるのか」が重要である。

2-2-5. 品質保証レベルの変遷と検査自動化の必要性

鋼板のほか、紙、フィルム、繊維生地等は製造下では薄く平坦な素材が多く、途切れなく連続的に製造され、最終的に巻物(コイル)のように製品化される。このような WEB 状製品の製造下検査(以降「オンライン検査」)は、光学的手法を中心に 1960 年台から実用化されていた²⁻²⁴⁾。鉄鋼分野では欧米が先行し、1965 年には撮像管を用いた鋼板表面の自動検査法の報告²⁻²⁵⁾等がある。

日本において鉄鋼関連の表面検査技術の報告が公開され始めた時期は 1970 年代である。日本鉄鋼協会の「鉄と鋼」における最初の表面検査装置の報告が 1978 年の「熱間スラブ探傷用 TV システム²⁻²⁶⁾」であり、スラブ表面の凹凸を検査して介在物の原因になる部分を観察使用した例である。これはリモート観察装置であって検査を自動化するものではないが、この頃から日本でも鉄鋼製品の表面を光学的手法で観察・検査する試みが広がっていった。こうした取り組みは船用の 50mm 以上の厚い鋼材の表面欠陥を自動検査する装置等、その後も続き^{2-27), 2-28)}、それまで検査員の目視に頼ってきた官能検査の自動化が進みはじめた。

自動車用鋼板における自動検査が本格化するのは 1980 年代である。1970 年に撮像管による検査技術も検討されていた²⁻²⁹⁾が、レーザーを用いた検査技術が確立され、1980 年頃から普及した^{2-30), 2-31), 2-32)}。レーザー式検査装置の概要と特徴は 2-3-3 節で述べる。

自動化の必要性の観点からみると、熱間工程のスラブにおける目視検査は、1000℃前後の熱い対象を至近で連続的に目視し続けることが困難であったことから開発されたものである。当時はまだ撮像装置も画像処理も十分な性能がなかったため、目視でも追従可能な比較的ゆっくり流れる厚い対象への適用であり、現在のリモート監視に近い運用であった。一方、当時すでに10m/s以上の速さで製造されていた連続焼鈍、冷間圧延等の鋼板表面の検査は、目視では追従不可能なため、1960年代まではほとんど行われていないか、視認できる範囲で検査されていた。ただし、GA鋼板の製造速度は1~2m/s程度であり、熟練検査員なら目視で大きな欠陥は見つけられたため、品質要求の厳しい製品では、複数の検査員が並び、2000mm程度の幅の鋼板の左右を分担して目視検査する体制も組まれていた。しかしながら、日本の工業製品一般の品質向上に伴い、自動車も世界最高の品質が追求されはじめ、鋼板表面欠陥に対する自動車メーカーの品質要求は次第に厳しくなっていた。

目視検査の代替として表面検査装置が導入されはじめた1960~70年代は、目視でも確認できる明確な欠陥の検査が主眼であった。先にSN比の説明で示した図2.2.5は、当時主な検出対象だったレベルの欠陥画像(当該欠陥自体の採取は1996年頃)の例と、欠陥信号の輝度プロファイルである。欠陥は図2.1.5に示したような介在物自体、若しくはそれによる空隙が数mmに渡って表面に露出したものであるもので、視覚・触覚でも明らかに凹凸がある。元々は数百 μm 程度のクラスターだったものが、図2.2.3のようなメカニズムで伸延され、かつ表面がめくれてこのような状態になったものと推察される。

熟練した検査員は、1~2m/sの速度範囲であればこの程度の欠陥はほぼ確実に見つけられ、まだ分解能や識別能力が不十分だった検査装置との併用により自動車メーカーへの流出はほぼ食い止められて、品質保証が成立していた。

図2.2.7は、目視による鋼板表面検査の概念図である。鋼板から1~2m程度の距離に検査台を設け、照明の下で連続的に移動する鋼板表面を目視する。照明は、多数の蛍光灯若しくは平面状の光源を天井に均一に配し、特定の反射角度のみの光による観察にならないよう工夫されている。また、鋼板の反射率は比較的一定であるものの、照明の光量が変化すると目視観察能力に影響を及ぼす²⁻³³⁾ため、蛍光灯特有のちらつきなどが発現しないように安定な明るさに保たれている。

鋼板の進行方向に対してどのような向きから観察するかは様々であるが、横から観察すると首の動きが頻繁になりがちで疲労が激しいため、進行方向において順方向若しくは反対方向から観察するケースが多い。また、照明のタイプも、どのような欠陥を重点的に検査

するかによって異なる。表面が鏡面状の錫めっき鋼板では図 2.2.7 とは異なり、水平に近い角度で横方向から照らし、鋼板面の垂線方向から観察してゴミや欠陥からの散乱を目視するなどの方法が採られていた。目視検査の範囲は、鋼板の長さ方向（製造の進行方向）と幅方向の広範囲に及ぶ。

通常の製造において鋼板表面はほぼ全て正常である。一方、本研究で対象としている欠陥の発生率は、2m 幅、1000m あたり 0~10 個程度であるので、欠陥 1 個の大きさを 1mm 幅×20mm 長程度とし、仮に 1000m あたり 10 個発生するとして、面積率では高々 10^{-8} である。これは、2m/s の製造速度において、検査台で鋼板表面を観察していると平均 50 秒に 1 個の頻度で通過する頻度である。こうした数値からも、2m/s で流れる鋼板上の欠陥を見逃さないよう長時間集中する作業は、検査員にとって疲労の激しい仕事であることが理解される。

目視検査には最も単純な問題として個人の視力のバラツキがあるが、製造下にある鋼板検査では動体視力に関する課題がある。人間の動体視力は、観察対象が動く速さが速いほど低下し、また照明条件に大きく依存することが知られている^{2-34), 2-35)}。そしてそれ以上に個人の視力の能力差が大きく²⁻³⁶⁾、目視に依存しては確実な品質保証は困難であった。こうした背景から、特に製造速度が速く目視追従が困難な冷延鋼板（表面処理を施さず出荷する製品）、ブリキ板等では検査の自動化が GA に先行して進んだ。これらの製品で導入が先行した理由としては、GA と比較すると表面が鏡面に近いいため欠陥や異常部のコントラストが高く、検出が容易であったことも挙げられる。

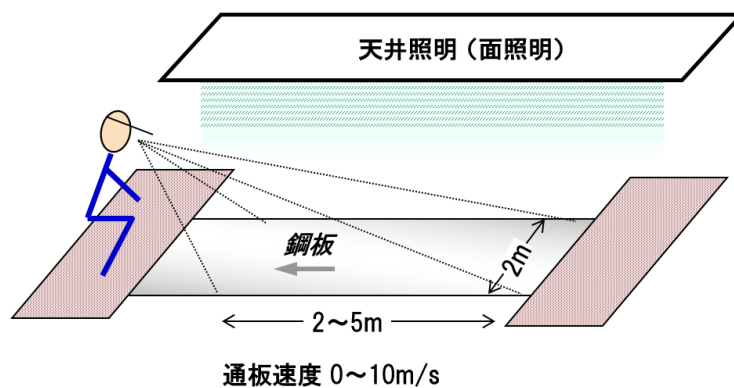


図 2.2.7 目視による鋼板表面検査の概念図

図2.2.8に、鋼板の表面検査技術の変遷の概略を示す²⁻³⁷⁾。横軸は年代、縦軸は欠陥の検査指標であるSN比を示した概念図であり、全体として年代に沿った鋼板の適用先と品質保証レベルの向上の関係と検査方法の変遷を表している。

1980年頃までは、構造用一般鋼材などの製造が主体で、高度な表面品質が求められず、ともかく目立つ欠陥の流出を防止することが最優先であった。そこで、視認できる $5 < S/N$ 程度の欠陥を検出対象として1980年代にはレーザー式、1990年代にはCCDカメラ式等の光学式検査装置が導入され、目視との併用で運用された。その後次第に自動車用ほか鋼板の表面品質保証レベルが厳しくなり、1990年代後半には、 $S/N=2$ 程度の欠陥を検出する検査条件も稀ではなくなった。そうすると、ノイズレベルや欠陥のサイズにも依存するが、 $S/N < 2$ ではコントラストが低いため、オンラインの目視検査による発見が困難となり、なおかつ検査装置を用いても十分な検出が困難となった。

こうして、1990年代後半より再び目視検査が多用されるようになり、複数の検査員が専門に鋼板表面を目視するなどの対策のほか、別な検査専用ラインを設置し、製造後に再度、低速で目視検査を行うなど、鉄鋼メーカーでは、品質保証強化のために多大な工程と人員の増強を行った。

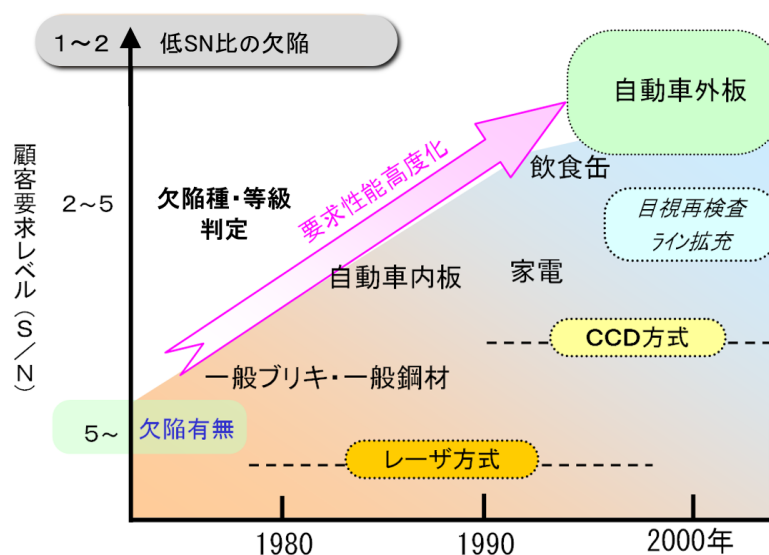


図 2.2.8 鋼板表面欠陥の品質保証レベルと検査方法の変遷

低コントラストの欠陥の例として図 2.2.9 に、外観の $S/N = 1.7$ 程度の原板性欠陥の画像を示す。256 階調の輝度レンジの画像において、欠陥部正極性の輝度が+6、鋼板ノイズの正極性標準偏差 $\sigma = +3.52$ である。欠陥の正極性コントラスト $C_d = +0.05$ は非常に低く、目視の限界であり、サイズも図 2.2.5 の欠陥に比べて小さい。サンプル板を手にとってじっくり観察すれば存在を確認できるものの、製造下 2m/s で流れる幅 2m の鋼板上で目視検出することは非常に困難である。

以上のように、鋼板表面への品質要求は時代とともに厳しくなり、検出すべき原板性欠陥は、より SN 比の低いものへと遷ってきた。「SN 比が低い原板性欠陥の品質保証」とは、より小さい介在物の流出を防止することであり、自動車メーカーにおいても、プレス内壁の損傷を抑制し、かつより微細な表面キズを防止し、美しく品質の高い自動車を、より高い歩留で製造することに直結する。従って、検出確度の高い高性能な表面検査装置の導入は、それぞれの時代に常に求められてきた。

加えて、鋼板は通常 1~2m/s、最大 10m/s 程度の高速で製造される。この速度で検査が実現できなければ生産性を阻害することになり、多くの欠陥候補から信号処理によって欠陥を抽出する装置の実現には、センシング自体の開発に加えて、エンジニアリングの工夫を要する。

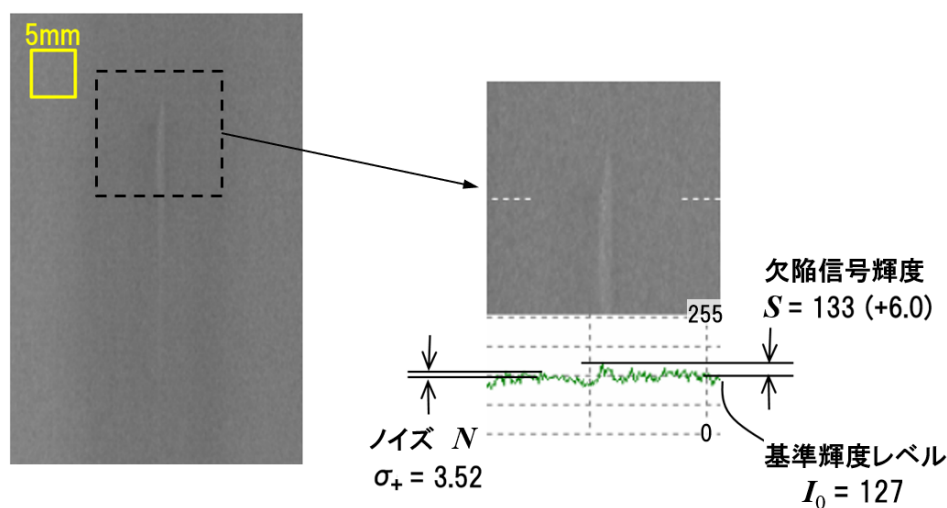


図 2.2.9 介在物起因の模様状欠陥の外観例 ($S/N = +1.7$, $C_d = +0.05$)

鋼板の表面検査自動化(機械化)の必要性を、メリットで整理すると、以下のようなものである。

<表面検査自動化のメリット>

① 高速な検査

- ・目視追従不能な速さにおける検査が可能になり、品質保証対象の製品が増加する。
- ・目視確認のための減速がなくなり、生産性が向上する。

② 定量的で安定な検査

- ・検査員個人の能力、疲労、判断等に依存しない客観性と安定性の高い検査が可能。

③ 省プロセス化，省力化

- ・検査専用工程の省略によるコストダウンと生産性の向上。検査員の省力化。

④ 一般化（技術の転用）

機械化により検査技術の移植性が向上し、検査員の育成等を考慮せずに、同レベルの品質保証を、別なラインへ展開可能。

以上述べてきたとおり、自動車用鋼板の表面品質向上へ向けた品質保証レベルの厳格化に伴い、目視検査の自動化は必須となって検査装置が導入されてきた。いくつかの方式が開発・実用化されて鉄鋼メーカーにおける鋼板の品質保証レベルは大きく改善されてきたが、自動車の品質は、その内容と共に外板にも及び、1990年代後半には、 $S/N \approx 2$ 程度の幽かな欠陥も検出対象となってきた。そして、より高感度かつ確度の高い検査技術が必要となったが、高感度化に際して重大な課題が発生した。次節以降に詳細を述べる。

2-3. 鋼板のオンライン表面検査に関する従来技術

これまで述べてきたとおり，鋼板表面の品質保証すなわち欠陥の流出防止のために，目視を代替する装置の開発と導入が行われてきた．装置導入初期に検出対象とした比較の見つけ易い付着物や加工性欠陥については，確実な検出によって原因が掴め，対策が施されて，次第に減少した．例えば付着物では，埃や小さな昆虫が挙げられ，清掃の徹底，ラインの密閉化などの対策が採られた．また，ロールのキズが鋼板に転写される欠陥，あるいはロールの回転不良によって表面にできるスリキズなどの加工性欠陥では，ロールの管理が徹底されて欠陥は低減された．介在物欠陥に関しても，鑄込み条件の適正化によって1mmを超える大きな介在物は低減され，また露出している介在物欠陥は検出が容易であるため，その部分を切断するなどして自動車メーカー，電機製品メーカー等への流出は防止できるようになった．

こうして，よりコントラストの低い欠陥の検出が残りの課題となったが，これらを検出しようとする際，検査装置の感度を上げることで，欠陥以外の表面オブジェクトも多数検出され，欠陥との識別が困難になるという「過剰検出」の課題が発生した．

本節では主要な従来検査技術の原理と装置の特徴をレビューした上で，過剰検出の課題の詳細を述べる．

2-3-1. 表面検査の自動化に必要な基本的事項

人間の検査能力にはムラはあるものの，様々な情報を一度に処理し，検査対象が有害なのか無害なのかを総合的に判断できる能力がある．鋼板の表面検査においても，熟練検査員は様々な方向から欠陥を眺め，時には一旦鋼板の搬送を停止して詳細な確認を行うという運用を行っている．しかしながら欠陥は1体ごとに全て異なり，さまざまな様態を現すため目視官能検査の基準は，欠陥毎に種類と程度の近いものを「代表」または「典型」とした実欠陥のサンプルであり，多くのサンプルを用意して経験的に基準を学習する方法が採られてきた．

一方，官能検査の自動化においては，先ず検出対象を定量的に定めることが必要であるが，検査装置においては光学系が限定されているため，得られる情報も限定的である．代わりに画像処理等による安定した定量化が期待され，このような機械化の特性を考慮して表面検査装置に求められる基本的な事項を目視検査と対比してまとめると，表 2.3.1 のようである．

基本事項の中で最も期待される項目は、①安定な感度 であって、⑥稼働率と耐久性 にも関係するが、ムラなく連続的に稼働できることのメリットは大きい。ただし、装置の導入初期は効果が出たものの、感度が向上するに連れて検査速度の優位性は別として、②補正能力、③識別能力 において次第に目視との能力差が課題となった。

表 2.3.1 目視検査との対比による自動検査装置に求められる基本事項

項目	目視検査	自動検査装置 (要求される事項)
① 感度	かなり高い。 $S/N \cong 1$ でも検出	高い。 $2 < S/N$
② 安定性	不安定。 (個人差, 疲労度合い等で判定に揺らぎ)	安定。
③ 補正能力	照明等の影響を経験的に補正。	自動補正 または 絶対値計測。
④ 識別能力	・種別判定, 程度判定共に かなり高い。 ・経験に依存。	・程度判定能力高いが 種別判定弱い。 ・未知対象への学習機能。
⑤ 定量性	・定義はあるが 定量性低い。 (代表サンプル, 限度サンプル等利用)	欠陥の特徴量を定量的に測定。
⑥ 稼働率・耐久性	・数時間毎に検査要員の交代を要す。	・連続稼働。

鋼板の表面欠陥に関しては、物理量の絶対値を指標とした品質規程は存在しないため、検査装置による欠陥判定では、目視で行われている判定と齟齬がないように調整を行えなければ品質保証レベルを維持できない。すなわち検査装置の実用化にあたっては、表 2.3.1 に挙げた基本事項に加え、目視検査の判定と装置からの出力値との整合をとることが必要である。

2-3-2. 鋼板表面検査装置の種類

目視に代わる性能と機能の自動検査装置は、1-2 節で述べた通り 1960 年代後半から実用化が始まり、1970 年代には普及し始めた^{2-38), 2-39)}。鉄の素材を鋳造する段階など、毎秒数 cm 程度の移動速度の対象にはテレビ画像に 2 値化などの単純な画像処理を施して欠陥を検出する装置が考案されていた^{2-40), 2-41), 2-42)}。しかし圧延以降の鋼板の製造速度は秒速 1m 程度と鋳造に比べて速くなり、1960-70 年当時の技術では撮像の露光、分解能、処理速度の何れもオンライン検査には適用不可能であった。

そこで、鋼板表面に対しては1980年代までは、電灯による点光源と光電素子による反射率測定系²⁻⁴³⁾や、レーザー式が適用された²⁻⁴⁴⁾。1980年代後半から1990年代前半にかけてレーザー式は高度に改良され²⁻⁴⁵⁾、また半導体撮像素子が発達してカメラによる検査装置が広く普及し、多くの開発と実用化が成された²⁻⁴⁶⁾。日本の自動車産業が大きく発展した1980年代後半以降の実用検査装置の主流であるレーザー式とカメラ式について、以下にそれぞれの構成と特徴、及び技術課題を述べる。

2-3-3. レーザー式検査装置の特徴と課題

この方式はヨーロッパで開発され、1970年代には欧米における鋼板表面検査の標準的な方式となった²⁻⁴⁷⁾。日本でも同年代の鉄鋼製品の急速な拡大と品質の向上に伴って普及した。Flying spot 式とも呼ばれるこの方式の概略を図2.3.4に示す。光の通過順に原理を説明すると以下の通りである。

- (1) 高速で回転するポリゴンミラーを用いてレーザービームスポットを鋼板上の検査線幅方向に走査する。
- (2) 検査線上に凹凸欠陥があると、レーザーの回折反射パターンが正常部とは異なった形態を示す。
- (3) 受光側では、予めいくつかの凹凸形状に対して用意した受光パターンに応じた空間マスクと、光電子増倍管等の受光素子を配備し、特定の回折パターンが検知された時に「欠陥」と判定する。

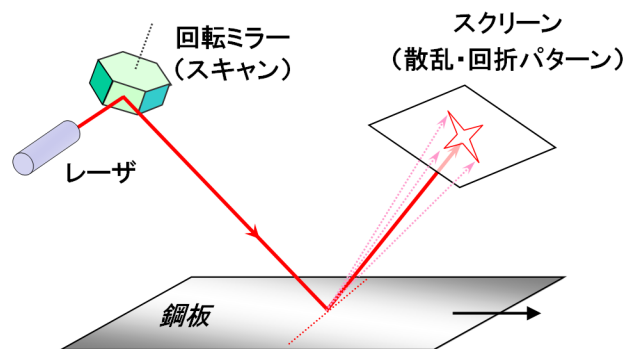


図 2.3.1 レーザー式鋼板表面検査装置の原理図

レーザー光源は主として 2~10mW の He-Ne レーザー(波長 633nm)が用いられていた。1990 年代後半以降は半導体レーザーも使用されている。コヒーレンシの高いレーザー光は、凹凸の変化または有無に敏感であって、例えばスポット径が 3mm 程度であっても、1mm 以下の凹凸欠陥を検知できる場合がある。

レーザーの反射パターンは反射表面の正常によって大きく変化するが、**図 2.3.5**に示した例のように、(a)の正常部における一様な反射パターンに対し、点状の凹欠陥であれば(b)、縦に長い凹欠陥であれば(c)のように変化する。従って欠陥の形状と反射パターンを蓄積した上で、特定のパターンを捕捉できる装置を用意することで所望の形状の欠陥を検出できる。1970-80 年代の市販装置では、受光部にスクリーンの代わりに複数のガラスロッドを配置して空間フィルタを構成する²⁻⁴⁸⁾など、工夫を施した検査装置が実用化され、このタイプの装置は日本の鉄鋼メーカーだけでも数百台規模で導入されたと推定される。

レーザー方式の大きな特徴は高速性である。1970 年代後半には既に連続焼鈍(Continuous Annealing Line)において鋼板の製造速度は 10m/s を超えていた²⁻⁴⁹⁾。当時の一般的な検査基準は明確ではないが、直径 5mm 程度の大きさの欠陥は検出する必要があったと推定され、仮に鋼板搬送方向 5mm 毎にレーザービームを幅方向に 1 回走査するとすれば、1 秒間の走査必要回数は、 $10\text{m}/5\text{mm} = 2000$ 回/s である。当時このような高速な撮像装置は実用化されておらず、回転ポリゴンミラーによるレーザー स्क্যানのみが、このような高速検査を実現できた。

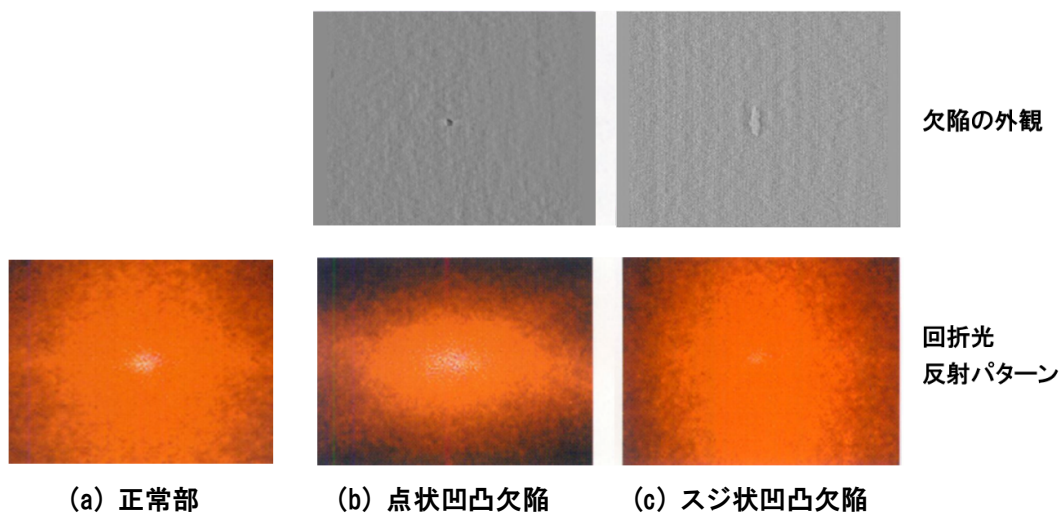


図 2.3.2 レーザー光反射パターンの例

第2の特徴は、レーザーのコヒーレント性を活かし回折を利用して鋼板上の凹凸を感度良く検出することである。基本的な考え方は鉄鋼に限らず例えば半導体 Si ウェーハの表面検査等でも広く実用化されている²⁻⁵⁰⁾。1980年代以降は CCD カメラ式への移行が進んだが、レーザー式は現在も錫めっき鋼板など反射率の高い鋼板の検査では使用されている。こうした優れた特徴を有する一方、原理的側面から次のような課題があった。

レーザー式の課題；

鋼板表面には表面粗さ Ra で数ミクロン程度の細かい凹凸がある(3-1節で詳述)。レーザー光の反射はスペckルパターンを有し受光信号の時間変動が激しいため、一般的には信号強度の移動平均を取る²⁻⁵¹⁾。従って、凹凸欠陥部における回折の変化は良く捉えるが、本研究の検出対象となる正常部と欠陥部の境界が不鮮明な欠陥やパターンは検出しにくい。さらに、レーザーの入射角度に依存した反射輝度を補正する目的で、走査方向に輝度信号の移動平均をとって微分処理を施すため、鋼板表面性状や色の緩やかな変化は平坦化されて検出できない。実際、図 2.3.3 に示す $S/N = 1.7$ 、 $C_d = 1.05$ (図 2.2.10 と同じ欠陥)のような薄い模様状の欠陥はレーザー式では検出困難である。

また、レーザースポットの鋼板表面スキャンの反射光強度を画像化し、欠陥が検出されると検査員がその画像を確認するという運用も行われている²⁻⁵²⁾が、模様状の欠陥が画像化されにくい点は変わらない。

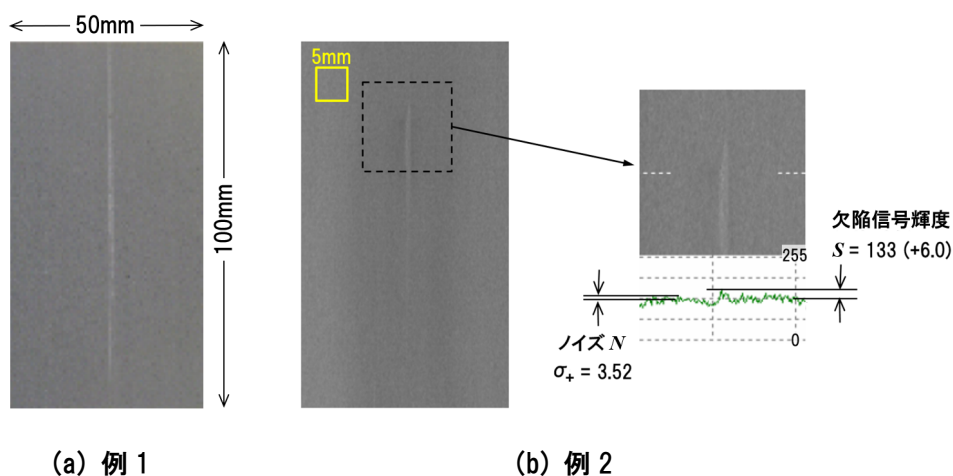


図 2.3.3 レーザー式では検出困難な欠陥例

濃い色の変化すなわち極端に反射率が異なる箇所は画像による検出が可能であるが、回折の影響で受光信号が大きく変動し、得られる画像と目視との相違が大きいため、目視との照合に支障をきたす場合があった。

実際、GA 鋼板におけるコントラストの低い模様状の欠陥が問題になってきた 1990 年代以降、亜鉛めっき系の鋼板を主軸に表面検査装置は、以上の理由をもってカメラ式へ移行した。またカメラ式への移行にはカメラが高速化されるなどの進歩も後押しした。

2-3-4. ラインセンサ式検査装置の特徴

カメラ式の表面検査装置は 2 次元画像を得るエリアカメラ式と 1 次元画像を得るラインセンサ式が用いられるが、視野内の明るさを均一に得られ易い理由から鋼板の表面検査では主にラインセンサ式が用いられる。この方式の光学系の概要を図 2.3.4 に示す。通常はシート状に光を照射する光源を用い、受光は正反射角度(明視野)と拡散反射角度(暗視野)にセットすることが多いため明暗式とも呼ばれる。

撮像素子のラインセンサ自体はリニアアレイ、1 次元 CCD などとも呼ばれ、Si 系撮像素子を直線状に並べたもので、例えば 1000 素子を 10MHz で駆動して撮像信号を取り出すと、0.1ms の撮像周期が得られる。観察対象の移動距離に同期して撮像することで、その画像をメモリ上に展開する。鋼板幅方向に複数のカメラを配置することで、空間分解能を高めることができる (2-53), 2-54)。

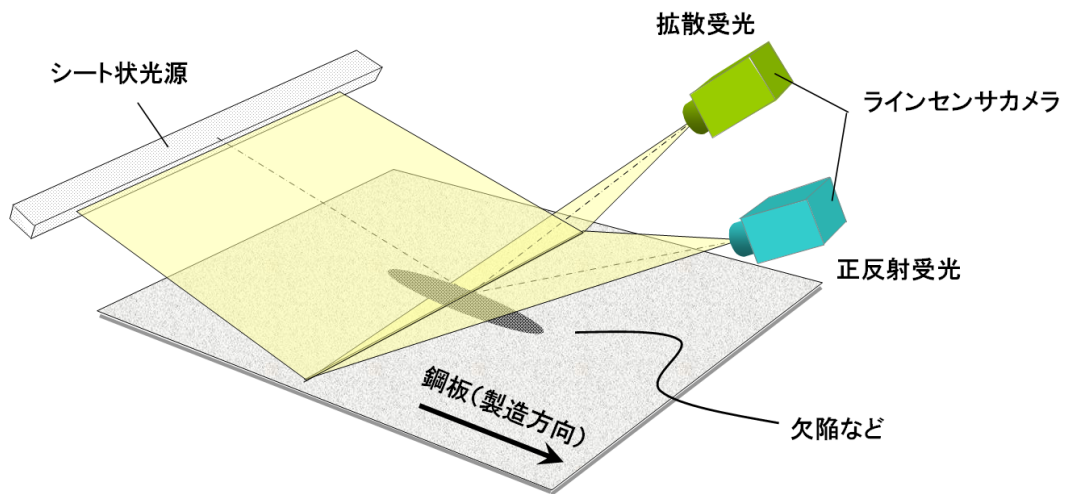


図 2.3.4 ラインセンサカメラによる明暗式検査装置 概略

ラインセンサは読み出し素子数が2次元撮像素子に比べて少なくすむため、高速撮像が可能である。2000年代になって2次元素子も高速なものが実用化されたが、1980年代～2000年頃までは撮像信号の読み出しに時間のかかるCCD方式が一般であったため、特に鋼板やフィルムのような連続シート状製品の高速撮像にはラインセンサが多用された。2000年以降、C-MOS型撮像素子も市販され、2000素子で撮像周期50KHz、露光時間20 μ s以下の高速撮像が可能となっている。ラインセンサによる検査装置は、投受光角度が全ての撮像素子において同一であって、光学的条件を一定にできることも大きな特徴であり、鋼板、フィルム、紙といったシート状の製品やロールの検査には多用される。

2-3-5. ラインセンサ式による鋼板表面オブジェクトの見え方

鋼板表面における欠陥は、その物理的性状によりいくつかに分類され、観察する光学系によって得られる画像におけるコントラストの出方にも特徴がある²⁻⁵⁵⁾。以下に、欠陥部の代表的な物理性状と、代表的な検査撮像系である正反射/拡散反射における欠陥部のコントラストの生成の特徴を整理する

(A) 色調または色の濃淡起因の欠陥 (図 2.3.5 参照)

鋼板表面に汚れが付着するなどして正常部とは異なる色調を呈している箇所は欠陥である。これには表 2.1.1 に挙げた加工起因欠陥が多いが、錆や小さな昆虫などが表面に付着する場合もある。鋼板を使用する際に有害かどうかは場合に依るが、GAではFe-Zn合金化が不十分な箇所において、物理的な凹凸と粗さは正常部と変わらずに、黒ずんだ色調になることがある。あるいはZnが酸化して白くなる場合もあり、このような箇所は後にめっきが乗りにくいなどの問題があるため有害である。色調起因の欠陥の特徴は、観測波長域における反射率が正常部と異なるため、正常部に対する欠陥のコントラストの極性が

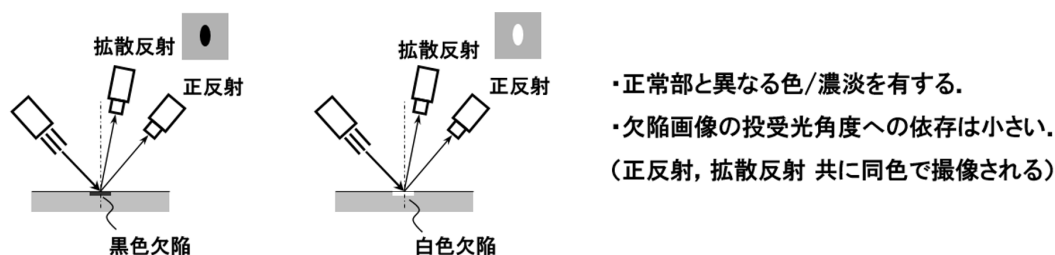


図 2.3.5 色調/濃淡に起因する欠陥の見え方

受光角度に依存しないことである。すなわち、およそどのような角度で観察しても黒い欠陥は黒く、白い欠陥は白く観察される。このような欠陥は、サンプルとして切り出して通常室内照明の下で目視観察しても、例えば黒い汚れは黒く見える。

(B) 凹凸のある欠陥 (図 2.3.6 参照)

製造中にある正常な GA 表面の平面度²⁻⁵⁶⁾ は数 μm 程度であって極めて平らであるが、介在物が顕在化していれば、数十 μm 以上の凹凸が生じる(図 2.1.5)。また、何らかの異常な付着物は明らかな凹凸または正常部との反射率の相違があるため、こうした欠陥は適当な照明と撮像系を用いて比較的容易に検出可能である。

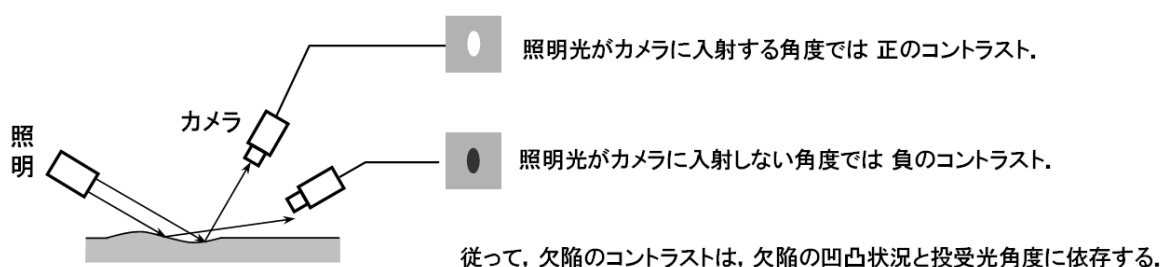


図 2.3.6 凹凸に起因する欠陥の見え方

(C) 表面粗さに起因する欠陥 (図 2.3.7 参照)

欠陥部がマクロな観察で認識されるもうひとつの大きな要因は、表面粗さに起因する反射率の差異である。一様な表面に粗さの異なる部位があれば、どのような角度で観察しても、その部分はコントラストを持つ。ただし、正常部と欠陥部の粗さの大小関係は、正反射画像における欠陥部の明暗コントラストに影響を及ぼす。

図 2.3.7(a)に示すように、欠陥部の表面粗さが正常部より小さく鏡面性が高い場合は、正反射角度において多くの光が受光部へ反射されるので、画像では欠陥部が正のコントラストで明るく見える。一方、拡散反射像では欠陥部は暗く見える。本研究で扱う介在物起因欠陥はこのタイプであって、照明角度一定の条件下では、正反射受光では明るく観察される。一方、通常の室内照明下でも介在物起因欠陥は明るく見える場合が多い。GA 表面におけるこの理由はこれまで明確ではなかったが、本研究における欠陥部のマイクロ構造の解明によって理由が明らかになる。(3-1-1 節に詳述)

反対に、図 2.3.7(b)のように正常部の鏡面性が高く欠陥部の表面粗さが正常部より大きい場合、正常部の多くの光は正反射方向へ反射するため、正反射角度においては欠陥部からの受光強度が正常部からの反射より相対的に少なくなり、負のコントラストで暗く見える。一方、欠陥部からは拡散角度へ照明光が反射するため、欠陥部は正のコントラストで明るく見える。

(D) 複合的要因による欠陥

實際上、多くの欠陥は上記(A)-(C)の複合的要因によって周囲の正常部に対するコントラストを持っており、鋼板表面の多種多様な欠陥についての標準的な分類は存在しない。またこれらの物理性状が系統的に詳細に調べられた例もなく、ユーザーへの流出が問題になる欠陥があると、各鉄鋼メーカーは、従来の光学系を基本として試行錯誤によって最良の検出条件を探索するのが一般的である。加工性欠陥など実際の欠陥全体では、こうした複合的要因によってそのコントラストが構成されているものが多いと推察される。

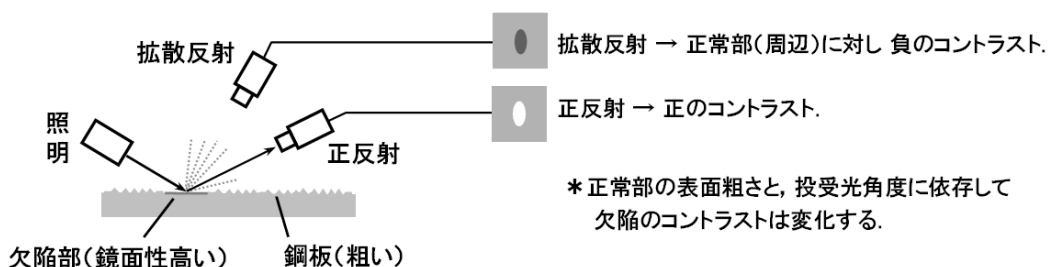


図 2.3.7(a) 表面粗さに起因する欠陥の見え方; 欠陥部粗さ < 正常部粗さ の場合

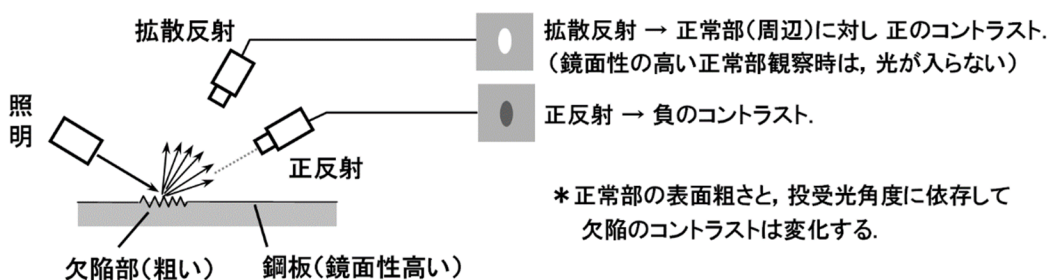


図 2.3.7(b) 表面粗さに起因する欠陥の見え方; 正常部粗さ < 欠陥部粗さ の場合

2-4. 第2章まとめ ～技術課題の整理～

以上のように、光学式検査手法においては、光学配置を工夫することで様々な性状の表面欠陥を検出することができる。目視可能な欠陥はほぼ検出可能であって、表面に欠陥以外のオブジェクトが無い場合は、検査装置の導入と運用は順調に進む。しかし、鋼板の表面には欠陥以外のオブジェクトが多く存在し、それらが過剰に検出されることで検査装置の運用に支障をきたす。その代表的なものが防錆油や圧延油(油性剤とも言う)による模様である。鋼板の製造工程には無数といえるロールが配置され、ロール潤滑のほか、鋼板保護のためにも工程中で塗布される場合がある。その他油圧シリンダなどでも油が使用されており、鋼板表面には不可避免的に油成分が付着する。また、表面に化成処理を施す製品では、工程通過後に脱脂処理液を用いて洗浄するものの、充分洗浄されず部分的に液滴が残る、外観上のコントラストを生じて誤検出される。連続焼鈍工程では、鋼板表面の微小な酸化箇所も誤検出の要因となる。

このような模様の例を図 2.3.8 に示す。上段は油痕、下段は化成処理液の跡である。左端の原画像から、しきい値処理、欠陥候補の抽出処理の結果を示しており、(c)は $2 < S/N$ 程度の欠陥を検出する設定における欠陥候補の抽出結果である。この例にみるとおり、これらは欠陥ではないためプレス機にとっては無害な単なる模様であるが、明らかな付着物とは異なり、溶剤を用いない場合は容易に払拭できず「シミ」様に鋼板表面に残り、かつ

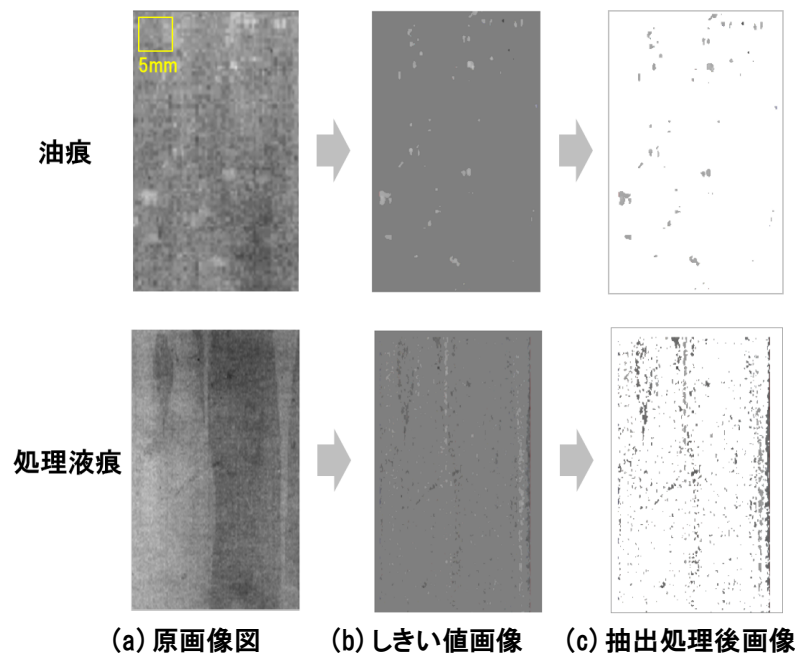


図 2.3.8 鋼板製造工程において発生する無害模様と抽出処理例

これらのコントラストは欠陥と同等以上の値を示す場合がある。 $S/N < 2$ の模様状の低コントラスト欠陥の検出において、これらは過剰に検出され、鋼板表面に多数の欠陥があるかのような検査結果をもたらす。こうした状況では検査装置は事実上使用不能となる。

これに対し、従来の光学式検査方法においては投受光角度の工夫、オブジェクトの形態の分類などによって真の欠陥と無害な模様を成す油痕等を仕分ける試行が行われてきたが、外観の類似するオブジェクトを明確に区分する技術はこれまで確立されていない。また、基本的な課題として、コントラストの低い欠陥及び油痕の物理的性状は明らかにされていない。以上を整理すると、従来の検査方法の課題として次の項目が挙げられる。

- 1) コントラストの低い欠陥を検出するためには、検査感度そのものを高感度化する必要がある。
- 2) 感度を向上させると、鋼板表面の油痕に代表される無害な模様が過剰に検出され、検査に支障を来す。
- 3) 従来の検査方法では、欠陥と油痕を明確に区分する方法が確立されておらず、製造後の別な工程における目視の再検査を要する。
- 4) 検出率 100%(見逃し無し)は達成できても、過剰な検出が多く実用的ではない。

以上は、従来の光学検査装置では実現されない未解決課題である。これに鑑みて以下を本研究の課題として設定し、解決に取り組む。なお、無害な模様には大多数を成す油痕のほか酸化膜、化成処理液、その他の汚れなどがあるが、GAの検査において最も障害となるオブジェクトは油跡であり、本論文においては以降、油痕を無害な模様の代表として扱い、研究対象とする。

課題(1) GA 鋼板表面の 3 種のオブジェクト、①正常部、②欠陥部(めっき表層下に金属酸化物の介在物が存在するタイプ)、③油痕部(無害な模様)のマイクロ性状及び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、製造速度 10m/s において欠陥検出率 100%、過剰検出 1%未満を実現する。

ここで、数値目標としての「検出率」及び「過剰検出率」を定義しておく。

① 検出率 r ;

検査を行った製品表面に存在する検出対象欠陥の総数 n_T に対し、装置が正しく検出した欠陥数 n の割合。

$$r = \frac{n}{n_T} \times 100[\%] \quad \dots (2-6)$$

② 過剰検出率 r_e ;

欠陥として検出したオブジェクトの総数 N_T の内、油痕など欠陥ではないオブジェクトの数 n_e の割合。

$$r_e = \frac{n_e}{N_T} \times 100[\%] \quad \dots (2-7)$$

対象とする介在物性欠陥の検出率は 100%を目標とする。一方、「過剰検出 1%未満」の目標は、100 件に 1 件の余計な検出であれば、運用上問題ないという頻度である。理想的にはゼロが望ましいが、照合の元となる目視検査が完全とは言えないため、工業的な目標としてこの頻度を設定した。

第2章 参考文献；

- 2-1) 関田貴司, 金藤秀司, 蓮野貞夫, 佐藤昭夫, 小川隆生, 小倉邦明, 「自動車用材料と利用技術」, JFE 技報, No. 2 (2003), 1-16.
- 2-2) 吉武明英, 小野守章, 「自動車用鋼材の評価・適用技術(加工)-軽量化, 衝突特性向上と開発期間短縮に貢献する鋼材の加工・利用・評価技術-」, JFE 技報, No. 4 (2004), 1-7.
- 2-3) 藤田展弘, 楠見和久, 松村賢一郎, 野中俊樹, 友清寿雅, 「自動車用超高強度鋼板の開発状況と今後の動向」, 新日鉄技報, 第 393 号 (2012), 99-103.
- 2-4) 黒田光太郎, 「戦後日本における鉄鋼製造技術の技術革新-自動車用薄鋼板の技術革新-」, 第 4 回国際シンポジウム「日本の技術革新-理工系における技術史研究-」 (2008), 155-158.
- 2-5) 黒田光太郎, 松尾宗次, 「戦後日本における鉄鋼製造技術の技術革新-自動車用薄鋼板製造技術の開発-」, 本特定領域報告書『日本の技術革新大系』(2010), 259-267.
- 2-6) 杉本芳春, 櫻井理孝, 加藤千昭, 「自動車用高潤滑表面処理鋼板—プレス成形性に優れた合金化溶融亜鉛めっき鋼板—」, JFE 技報, No. 4 (2004), 44-47.
- 2-7) 岡野洋一郎, 白沢秀則, 「自動車用高強度鋼板の現状と今後の課題」, 神戸製鋼技報,
- 2-8) 高橋学, 「薄板技術の 100 年 -自動車産業と共に歩んだ薄鋼板と製造技術-」, 鉄と鋼, Vol. 100, No. 1 (2014), 82-93.
- 2-9) 高田英紀, 岡野陽祐, 山平尚史, 「ステンレス酸洗鋼板の微小スケール残り検査装置の開発」, JFE 技報, No. 35 (2015), 28-32.
- 2-10) 「連続鋳造」, 鉄鋼便覧, 第 3 版, 第 II 巻, 「製鉄・製鋼」, 日本鉄鋼協会編, 東京, 丸善(株) (1975), 611-670.
- 2-11) 「CGL」, 鉄鋼便覧, 第 3 版, 第 VI 巻, 「二次加工・表面処理・熱処理・溶接」, 日本鉄鋼協会編 東京, 丸善(株) (1975), 428-431.
- 2-12) 小舞忠信, 野田郁郎, 野呂克彦, 伊賀一幸, 押田淳, 堀利男, 「連続鋳造鋳片表層部における非金属介在物の集積とその低減対策」, 鉄と鋼, Vol. 70, No. 1 (1984), 81-88.
- 2-13) 村井 剛, 伊藤 陽一, 三木 祐司, 岸本 康夫, 「鋼板での表面欠陥発生機構解明のための再現ラボ実験」, 鉄と鋼, Vol. 98, No. 11 (2012), 567-574.
- 2-14) 山口純, 中島隆雄, 澤井隆, 「連続鋳造技術の進展と今後の展望」, 新日鉄技報, 第 394 号 (2012), 12-19.

- 2-15) 柏谷悦章, 佐藤章, 石井邦宜, 「55% Al-Zn 合金めっき鋼板上の欠陥の種類と生成機構」, 日本金属学会誌, Vol. 71, No. 4 (2007), 379-387.
- 2-16) 浦井正章, 有村光史, 堺裕彦, 「合金化溶融亜鉛めっき鋼板の突起状表面欠陥に及ぼすめっき原板疵の影響」, 鉄と鋼, Vol. 81, No. 2(1995), 129-134.
- 2-17) 山田亘, 清瀬明人, 中島潤二, 福田淳, 岡沢健介, 宮沢憲一, 「連铸铸型内での介在物の凝集と凝固シェルへの捕捉」, 材料とプロセス, Vol. 12, No. 4(1999), 682.
- 2-18) 安中弘行, 山中量一, 井上健, 斎藤忠, 「極低炭素鋼の表層部に発生する気泡および介在物欠陥」, 鉄と鋼, Vol. 81, No. 5(1995), 592-534.
- 2-19) 鉄鋼便覧, 第5版, 第1巻, 日本鉄鋼協会, 東京(2014), 423-424.
- 2-20) 武田実佳子, 大西隆, 向井陽一, 「鉄鋼1次スケールの構造・密着性に及ぼすSi濃度の影響」, 神戸製鋼所技報, Vol. 55, No. 1(2005), 31-36.
- 2-21) 瀬々昌文, 田中新, 辻野良二, 「酸化スケール起因の薄板線状表面疵の生成機構」, 鉄と鋼, Vol. 87, No. 2(2001), 15-22.
- 2-22) 河野耕二, 藤浦正巳, 後藤莞爾, 山崎二郎, 「ウォーキングビーム型加熱炉について」鉄と鋼, Vol. 55, No. 14(1969), 1392-1398.
- 2-23) 「光学式表面欠陥検査」, 鉄鋼便覧, 第5版, 第5巻, 日本鉄鋼協会編, 東京, レタープレス(株)(2014), 82.
- 2-24) Quarterly Bulletin & review, p.xix, Symposium on On-line inspection of moving surface, Trans. Soc. Instrument Technology (1963), 15-3.
- 2-25) B.E.Stapley, "Automatic Inspection of Metal Strip for Visible Defects, Iron & Steel Engineer, (1965)
- 2-26) 白岩俊男, 広島龍夫, 松井健一, 久保幸雄, 尾崎孝三郎, 「熱間スラブ探傷用TVシステム」, 鉄と鋼, Vol. 64, No. 13 (1978), 2020-2025.
- 2-27) 上杉満昭, 山本倫久, 坪井邦夫, 山下元, 小森重喜, 松村勝己, 「铸片熱間表面疵自動検査装置の開発」, 鉄と鋼, Vol. 70, No. 9 (1984), 1188-1193.
- 2-28) 岩崎全良, 中井康秀, 西元善郎, 辻邦夫, 広瀬勇, 小林章, 「リアルタイム画像処理を用いた赤熱分塊スラブの自動探傷装置」, 鉄と鋼, Vol. 70, No. 9 (1984), 1194-1201.
- 2-29) 清水孝雄, 阿久津昭司, 渡辺康正, 「表面欠陥自動検査装置」, 川崎製鉄技報, Vol. 3, No. 4(1971), 162-166.

- 2-30) B.J. Aalderink, M.W.C. De Jones, Ijmuiden, "Automatic surface inspection of cold-rolled sheet at the temper mill", 国際圧延フォーラム Proc. (1976), 223-230.
- 2-31) Saridis, G.N., Brandin, D.N. , "An automatic surface inspection system for flat rolled steel", Decision and Control including the 15th Symposium on Adaptive Processes 1976 IEEE Conference (1976), 392-397.
- 2-32) 相澤均, 福高善己, 増野豊彦, 三宅秀和, 「冷延鋼板の表面欠陥検査システム」, 鉄と鋼, Vo79, No. 17 (1993), 833-840.
- 2-33) 塚田由紀, 豊福芳典, 青木義郎, 「順応光の明るさが急変した時の視覚特性」, 交通安全環境研究所報告, 第8号 (2005) . 31-41. (コントラスト感度)
- 2-34) Pollock, W. T., "The visibility of a target as a function of its speed of movement," Journal of Experimental Psychology, Vol.45, No.6 (1953), 449-454.
- 2-35) 上笹恒, 犬飼幸男, 「動体視力に関する研究(Ⅰ) 動体視に含まれる諸要因」, 産業工芸試験所報告, No. 58(1969), 17-25.
- 2-36) 犬飼幸男, 上笹恒, 「動体視力に関する研究(Ⅱ) 3次元動体視に及ぼす視標速度と観察距離の効果」, 産業工芸試験所報告, No. 58(1969), 27-34.
- 2-37) 風間彰, 大重貴彦, (白石記念賞講演)「鋼板表面検査技術の開発」, 材料とプロセス, Vol. 25, No. 1(2012).
- 2-38) Quarterly Bulletin & review, p.xix, Symposium on On-line inspection of moving surface, Trans. Soc. Instrument Technology (1963), 15-3.
- 2-39) B.E.Stapley, "Automatic Inspection of Metal Strip for Visible Defects, Iron & Steel Engineer, (1965)
- 2-40) 白岩俊男, 広島龍夫, 松井健一, 久保幸雄, 尾崎孝三郎, 「熱間スラブ探傷用TVシステム」, 鉄と鋼, Vol. 64, No. 13 (1978), 2020-2025.
- 2-41) 上杉満昭, 山本倫久, 坪井邦夫, 山下元, 小森重喜, 松村勝己, 「鑄片熱間表面疵自動検査装置の開発」, 鉄と鋼, Vol. 70, No. 9 (1984), 1188-1193.
- 2-42) 岩崎全良, 中井康秀, 西元善郎, 辻邦夫, 広瀬勇, 小林章, 「リアルタイム画像処理を用いた赤熱分塊スラブの自動探傷装置」, 鉄と鋼, Vol. 70, No. 9(1984), 1194-1201.
- 2-43) 宮川一男, 市嶋勇, 「薄板の表面きず検出」, 計測と制御, 第11巻, 第9号 (1972), 805-812.

- 2-44) 相澤均, 福高善己, 増野豈彦, 三宅秀和, 「冷延鋼板の表面欠陥検査システム」, 鉄と鋼, Vo79, No. 17 (1993), 833-840.
- 2-45) 深沢千秋, 渡部利克, 相沢健治, 「知識工学応用表面検査装置 TOSPECTRON」, 東芝レビュー, 第 44 号 (1989), 413-416.
- 2-46) 「光学式表面欠陥検査」, 鉄鋼便覧, 第 5 版, 第 5 巻, 日本鉄鋼協会編, 東京, レタープレス(株) (2014), 82-84.
- 2-47) "Advancement of surface inspection instrumentation for cold-rolled steel strip", Technical steel research, Measurements and analyses, COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, Luxembourg, No.7210 (1980).
- 2-48) 縄田康隆, 浜本康男, 池田元樹, 吉岡紀幸, 岩永祐人, 曾根至郎, 「パイプレシーバー型表面疵検査装置の実用化 (薄鋼板表面疵検査システムの開発-1)」, 材料とプロセス, Vol. 4, No. 2 (1991), 350.
- 2-49) 福岡嘉和, 西本昭彦, 野副修, 「薄板連続焼鈍技術の進歩 (薄板・表面処理鋼板特集)」, 日本鋼管技報, 第 105 号 (1984), 29-40.
- 2-50) 秋山伸幸, 谷口雄三, 塚越雅樹, 小泉光義, 「ウェーハ異物検査システムの活用」, 日立論評, Vol. 73, No. 9, (1991), 55-60.
- 2-501) 波田野勇治, 畠中信夫, 小手川純一, 「連続塗装ラインにおける表面検査機の開発」, 材料とプロセス, Vol. 12, No. 2, (1999), 287.
- 2-52) 三宅秀和, 増野豈彦, 女鹿節男, 貝原利一, 古川九州男, 銭場敬, 吉田守, 「高精細度カメラを用いた冷延鋼板表面欠陥検査システム」, 材料とプロセス, Vol. 3, No. 5 (1990), 1266.
- 2-53) 岩田穰, 梅田成二, 大中実, 横山廣一, 「ステンレス冷延鋼板用表面傷検査機の開発」, 材料とプロセス, Vol. 8, No. 2 (1995), 371.
- 2-54) 吉原敦, 田中宏幸, 「CCD 超高速画像処理型疵検査装置の CAPL への適用」, 材料とプロセス, Vol. 8, No. 2 (1995), 370.
- 2-55) 「光学式表面欠陥検査」, 鉄鋼便覧, 第 5 版, 第 5 巻, 日本鉄鋼協会編, 東京, レタープレス(株) (2014), 82.
- 2-56) 平面度 : JIS B 0621-1984 の 5.2

第 2 章 以上.

第3章 鋼板表面のミクロ性状と光学反射モデル

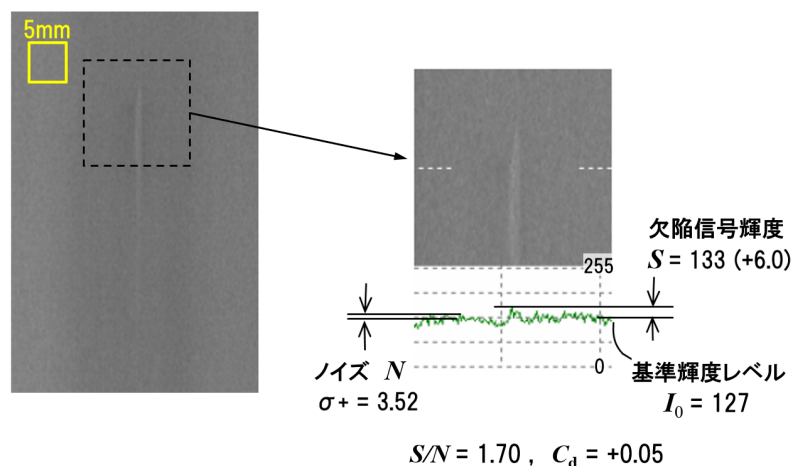
本章では、前章において整理した鋼板表面検査の「課題(1)：鋼板表面の3種のオブジェクトのミクロ性状」と、「課題(2)：3種のオブジェクトの光反射特性」について、主に実験的観察によって調査し、各々の光学モデルを立てる。

3-1. 欠陥部のミクロ性状

3-1-1. ミクロ性状 ～ ファセット(微小鏡面)群の存在 ～

2-2-2 節に、鋼板の製造過程において介在物が鋼板表層に生成され、原板性欠陥の元になることを示したが、ここでは、先ずGAの表面と欠陥部がどのようなミクロ性状をもっているのかを調査し、また合金化溶融亜鉛めっき工程を通過後、この工程において、表層下にある介在物が「表面欠陥」としてマクロに観察されるようになる過程をより詳細に追って、欠陥の物理性状を明らかにする。

図3.1.1(a), (b) に、再度 SN比とコントラストの低い欠陥のマクロ画像の例(図2.2.9と同じ)を示す。これらの欠陥サンプルは、いずれも製造後に再検査ラインにおいて製品コイルを開き、低速で走行させながら目視で検出して切り出したものである。外観は薄いスジ状の模様のように見えるが、表層下に介在物が存在する可能性の高い欠陥である。



(a) 低コントラスト欠陥の例 1

(b) 画像例 2 と 輝度プロファイル (256 階調)

図 3.1.1 模様状欠陥のマクロ画像例

欠陥を含む GA 鋼板のサンプルを、図 3.1.2 のような撮像光学系を用いて鋼板表面の画像を採取した。シート状に光束を照射する光源を入射角 60 度に設定し、鋼板サンプルをラインセンサカメラで撮像する。サンプルはリニアステージにて入射面と平行な方向へ移動させて 2 次元画像を得る(図 3.1.3)。受光角度 0-50° 度の範囲で撮像すると、欠陥の外観は正常部に対し明るく見え、通常の室内照明下における目視とほぼ変わらない像が得られる。画像の輝度階調は 256(8bit)グレースケールである。なお、既出の表 2.1.1 などの画像も同じ撮像系を用いた。

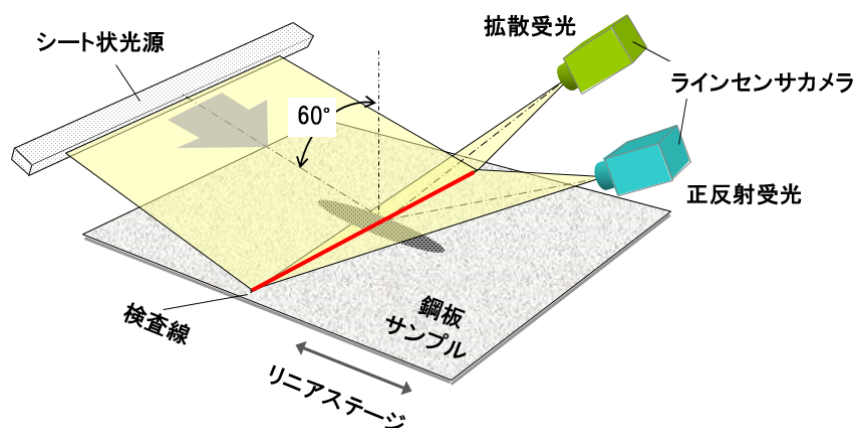


図 3.1.2 鋼板表面画像の撮像系

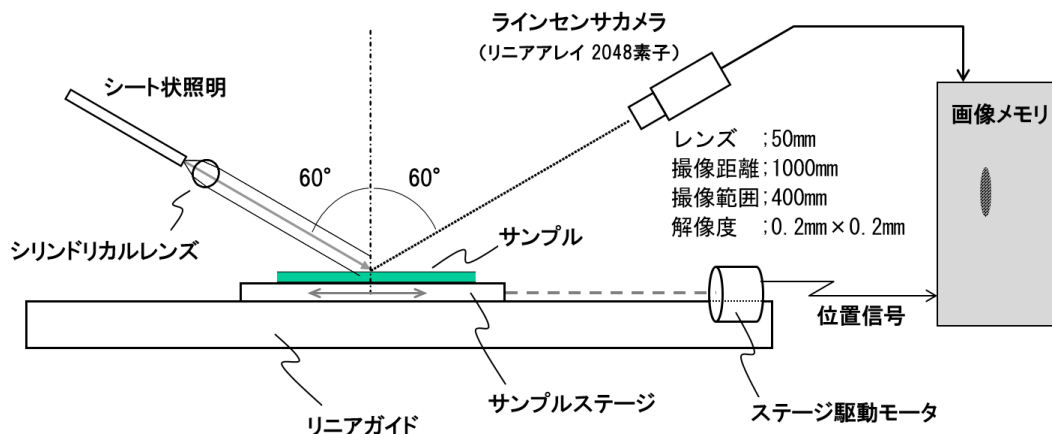


図 3.1.3 撮像光学系の横断面概略図

次に、GA 表面のマイクロ構造を知るために、SEM を用いて表面の観察を行った^{3-1), 3-2), 3-3)}。

図 3.1.4 は、いくつかの倍率における GA サンプル表面の様子である。左列(a)~(c)は正常部、右列(d)~(f)は欠陥部の拡大写真である。これによれば GA 表面は、微細な Fe-Zn 合金の針状結晶がランダムに成長した複雑なテクスチャを呈している。(c), (f)の観察結果から、これは GA 表面の特徴的な構造であり、結晶の大きさは太さ 1 μm 程度、長さは様々なものが見られ、光学的には可視領域で粗面であると言える。実際の目視観察でも観察者の顔が映るということはなくマットな艶消しであり、色調としてはシルバーを呈している。

欠陥部(d), (e)の写真において特徴的なことは、表面に数 10 μm ~100 μm 径のフラットな部分(以降「ファセット」と呼ぶ)が、正常部(a), (b)と比べて多く存在することである。これを判り易く拡大した写真が図 3.1.5 である。

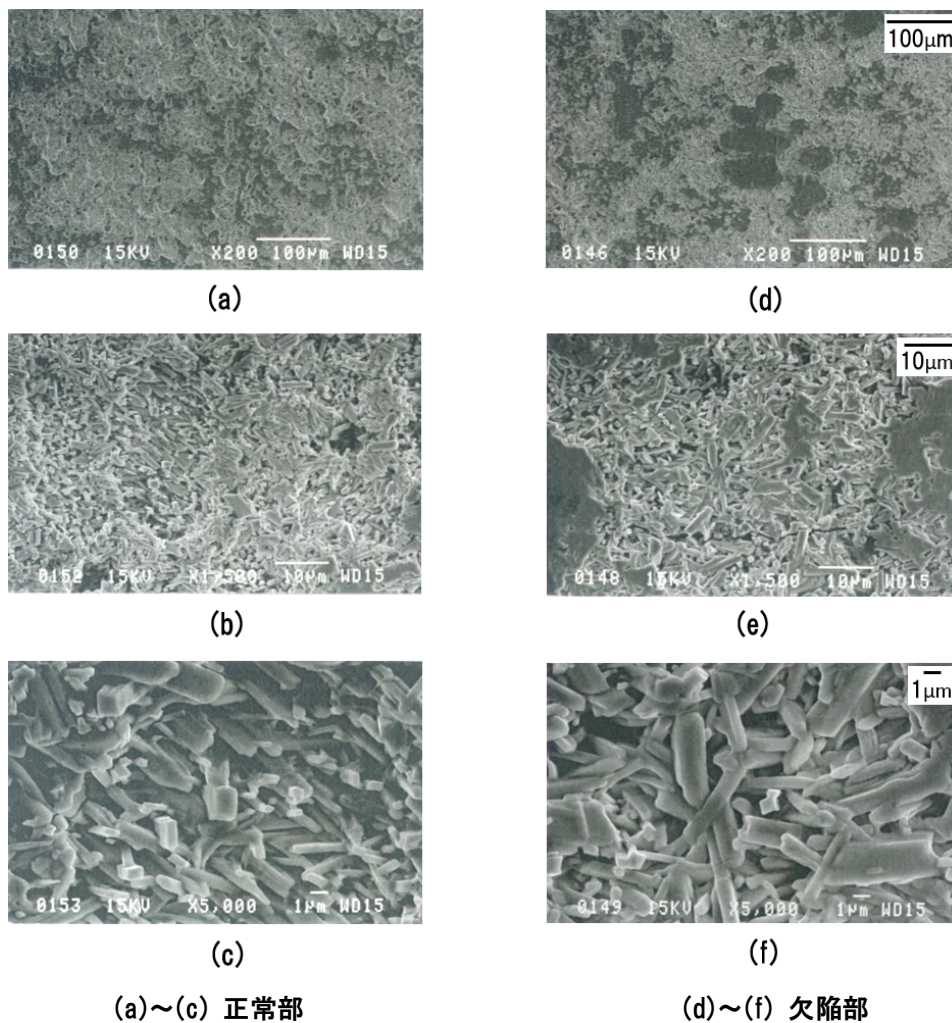


図 3.1.4 GA 鋼板表面の SEM 画像

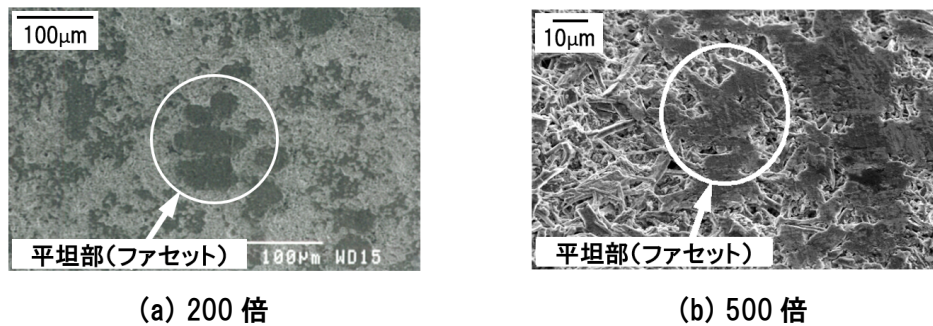


図 3.1.5 欠陥部に存在する平坦部(ファセット)の SEM 画像

このファセットは、鋼板製造工程において鋼板を搬送するための多くのロールによって表面構造が潰されて生成したと考えられ、以下この工程を追ってみる。

図 3.1.6 に再度、新たに介在物の状態を推定した熔融融亜鉛めっきプロセスを示す。

めっき工程の左端から装入された原板を熱処理炉を経て熔融した亜鉛の入ったポットに浸漬して表面に亜鉛を付着させる。その直後に長い縦型の合金化炉を通して一定以上の温度と時間を保持することで、鋼板表面に Fe-Zn 合金を生成させる。その後、鋼板の硬さと反りを修正する調質圧延等、若干のプロセスを経て、最後にオイラーで油が塗布されて製品コイルとなる。このプロセスにおいて、表層下にある介在物と鋼板表面の状態を追うと、およそ以下の通りである。

① 熔融亜鉛ポットへの原板装入；

図 3.1.6 の左側から原板を装入し、熱処理を経て 400℃前後の熔融亜鉛ポットに入浸漬する。この際に介在物が表層下に隠れていれば、熔融亜鉛が表面に付着することによる特段の変化はない。もし介在物が表面に露出していれば、既に凹凸欠陥として表面に顕在化しており、以降のプロセスでもその性状はほぼ変わらない。

② 合金化；

熔融亜鉛ポットで表面に亜鉛を付着させた後、鋼板は 400～600℃の連続炉に装入して表面に Fe-Zn 合金層を形成させる。露出した介在物があれば合金化は起こらないため、介在物部分は凹凸欠陥としてそのまま表面に露出する。一方、表層下に隠れた介在物は

隠れたままであり，この段階では外部から欠陥としての識別は困難である．このとき，表層下に介在物があると，その部分は正常部に比べて合金層が厚めに成長すると推察される．

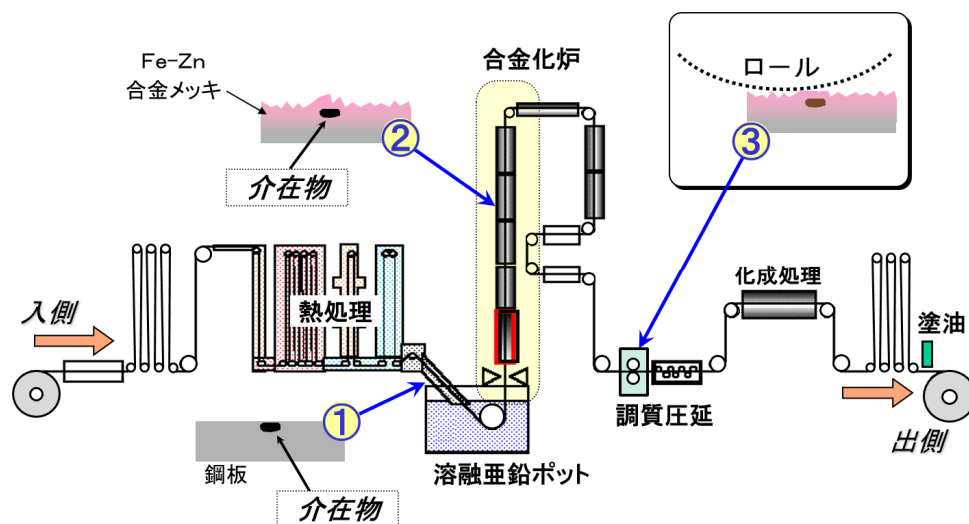


図 3.1.6 合金化溶融亜鉛めっきプロセスと介在物の状況

③ 調質圧延以降；

図 3.1.6 の③に示した調質圧延以降，合金層が厚めに成長した介在物部分には，当然通常部分に比べて圧力が多く加えられ，次第に突起や厚い部分がつぶれて平らになっていくと考えられる．この概念図を図 3.1.7 に示した．鋼板は無数の鋼製ロールで搬送されており，ロールを通過するたびに表面が圧加され，周辺より厚い部分は図 3.1.7(b)のように平坦に均される．図 3.1.4(d)に見られる平坦な部分の存在は，このようなメカニズムで生成されたものと考えられる．一方，図 3.1.4(a)の正常部にも小さいながらファセットは確認できる．これも製造工程における多くのロールによって表面の微小な突起が均された結果であると理解できる．

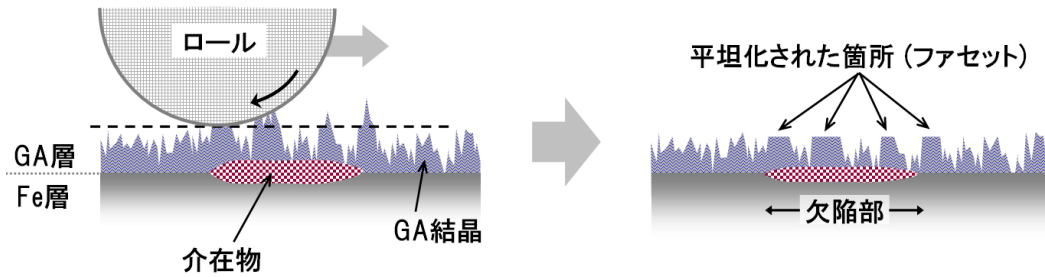
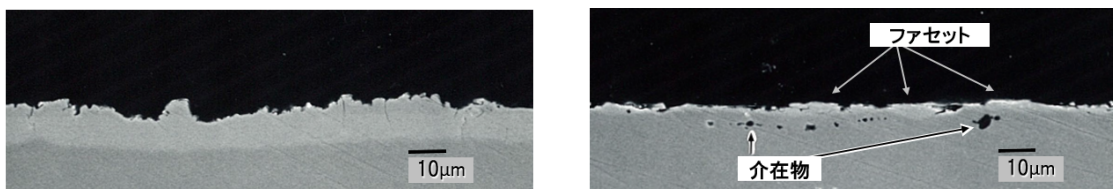


図 3.1.7 介在物部分における欠陥(ファセット)の生成概念図

次に、この考察の裏づけとして鋼板表層下の介在物と欠陥部との関係を鋼板断面で観察してみる。

GA 鋼板表層付近の断面を観察した代表的な写真を図 3.1.8 に示す。(a)は正常部の断面であり、写真上半分の黒い部分は空間、下半分のグレー部分が鋼板である。鋼板の上ほぼ半分のやや薄い部分が Fe-Zn 合金の層であり、表面はランダムな粗面である。

一方、欠陥部分の断面である図 3.1.8(b)には、図内に示すように表層下に介在物が認められる。そして表面には、微小なファセットが複数形成されており、推察した生成原因を裏付ける。ファセットの長さは 10~50 μm である。



(a) 正常部の断面 SEM 写真

(b) 欠陥部の断面 SEM 写真

図 3.1.8 SEM による GA 表層の断面観察像

確認されたファセットは、周囲の正常部分に比べて平坦であって、光学的には鏡面性が高い部分と推察される。すなわち欠陥部とは、微小な鏡面要素が群を成し、その数密度または面積密度の高い箇所であろうことが確認された。

2.3.5 節及び図 2.3.7(a)で説明したように、正常部に対し鏡面性の高い部分は、正反射

観察では正のコントラストで見え、拡散反射では負のコントラストで見えるはずである。GAの正常部の表面粗さRaは概ね1~3 μm であり1本のコイルのなかでは全面に渡ってほぼ均一である。表面はマットで鏡面性は低く、従ってフラットなファセット群を有する欠陥部では照明光が正反射方向へ多く反射されるため、正常部に比べて正反射率が高く正極性で観察される。一方、拡散受光角度では正常部に比べて反射される光量が少ないため、欠陥部は負極性で観察されると考えられる。

以上を確認するために、図3.1.2の実験装置において受光角度を変化させて画像を採取した。図3.1.9にその結果を示す。投光角度は60°に固定した。

受光角度60°正反射画像である図3.1.9(a)において、周辺の正常部に対し正極性すなわち明るく観察される欠陥部は、図3.1.9(b)の20°拡散反射受光ではコントラストを無くし、また後方-50°受光すなわち光源と同一方向の受光画像では、暗い負極性で観察された。

この結果の内、特に欠陥部が負極性に観察される図3.1.9(c)の画像は、欠陥部に鏡面反射要素が存在することで、光がより多く前方へ反射されて後方へ反射光が返らないことによる、と説明できる。

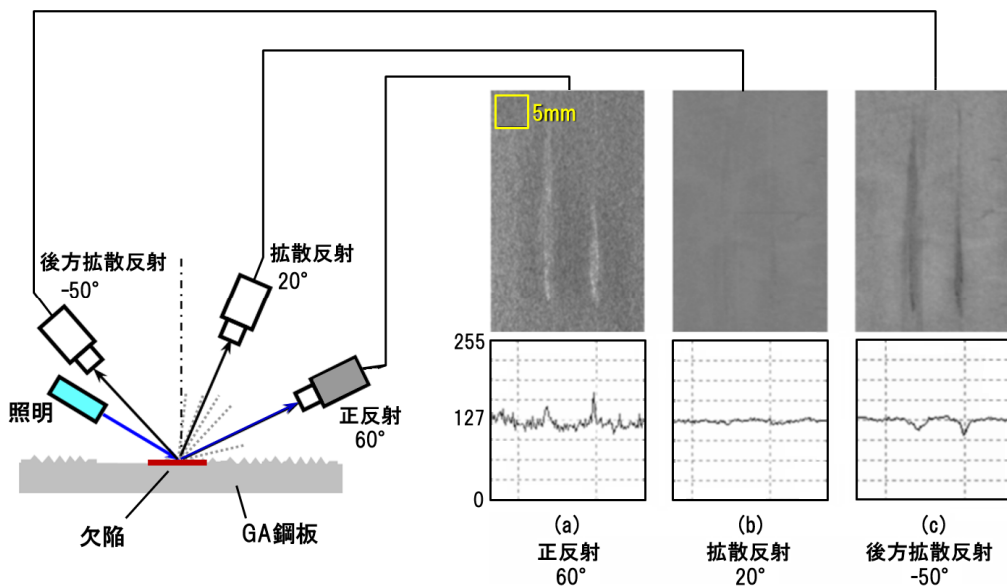


図 3.1.9 受光角度に依存した欠陥部輝度の変化

以上の GA 欠陥部の調査結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 欠陥部には、GA 表面がロールで潰された直径 10~100 μm 程度の平面状のファセットが存在し、正常部に比べてファセットの面積比率が高い。
- (2) ファセットは鏡面性が高いため、欠陥部の実効的な正反射率は、正常部に比べて高くなる。

なお、これまでの欠陥部に関する考察の中で「介在物のある箇所合金層は厚くなる」と推定してきたが、原板に開口部がある場合は、その周辺の合金化が促進されてめっきが厚くなる³⁻⁴⁾ことが知られており、本研究の調査結果を支持する。これを含め以下のような理由が考えられる。

- (1) 合金化は温度が高いほど速く進行する。従って比熱が高い金属酸化物である介在物は、炉内での加熱時に高温を維持し易いため、合金化が余計に進行して厚くなる。
- (2) 合金化プロセスへの装入前の原板においても既に介在物部分は硬いために充分圧延されず、正常部より若干厚い。
- (3) 合金化速度は、添加元素によって抑制されており^{3-5), 3-6)}、介在物はそれら元素を吸着するため、介在物付近は合金化が抑制されずに厚くなる。

欠陥のマイクロ部分の形態生成の理由は本論文の主旨でないため、これ以上追求しないが、いずれの理由にせよ、介在物のある部分に鏡面性の高いファセット群が生成され、マクロな目視観察では主に薄いスジのような模様状の欠陥が出現するとの解釈に間違いはないと考えられる。

なお、この種の欠陥は、図 3.1.2 の撮像系に限らず、ごく普通の室内照明下の観察においては、周辺の正常部に対して正極性で観察される。この理由についても、これまで明らかにされていなかったが、本章において欠陥の光反射特性を分析の結果、明らかになる。

(3-3-5 節に詳述)

3-1-2. 欠陥暴露部分の成分分析

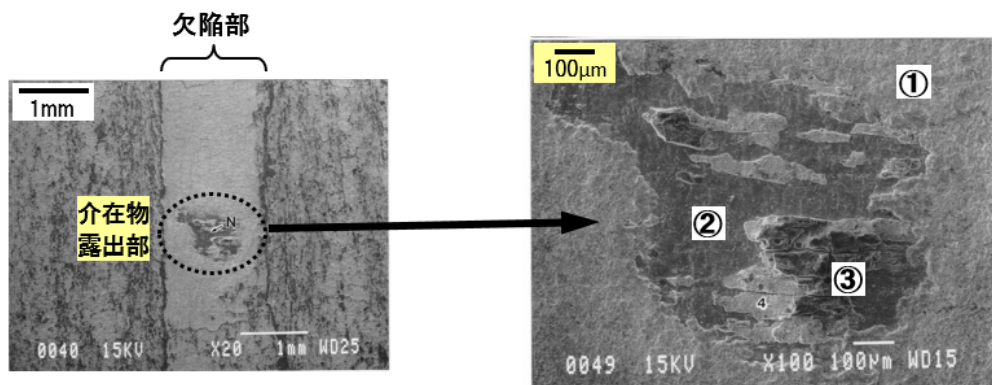
ここで、表面に介在物が現れている欠陥と、表層下に隠れている欠陥とを、表面の元素分析によって明らかにしておく。表 2.1「原板性欠陥」にも示したように、介在物が曝露した欠陥は、多くの場合表層がめくれているか、表面に凹みが観察され、異物のようなものが目視でも確認できる。このような欠陥と、介在物が表層下に隠れたままの欠陥の表面について元素分析を行った結果を図 3.1.10、図 3.1.11 に示す。

図 3.1.10(a)は、一部の介在物が曝露した図 2.2.5 に示したような欠陥部の拡大写真である。図 3.1.10(b)は、これをさらに拡大したもので、図中の以下のポイントを EDX(エネルギー分散型 X 線分析：Energy Dispersive X-ray spectrometry)によって分析した。EDX では非破壊で分析対象の構成元素を同定できる。

- ①；介在物が露出していないと思われる箇所。
- ②；鋼板の鋼地肌と思われる箇所。
- ③；介在物の露出部と思われる箇所。

分析結果のチャートを図 3.1.11(a)～(c)に示す。これによれば、図 3.1.11(c)において、本来 GA 表面にあるはずのない、Si, Ca, S といった介在物の成分元素が検出され、介在物が曝露していることが明瞭に示されている。また図 3.1.11(b)によれば Fe も検出されており、このサンプルの場合は鋼の地肌の一部も露出していることがわかる。

本研究で対象とする模様状欠陥の表面では、これらの元素は検出されておらず、このような欠陥では介在物が表面に露出していないことが確認できる。



(a) 介在物の露出した欠陥部

(b) 露出部拡大画像と EDX 分析部分(数字)

図 3.1.10 EPMA による欠陥の外観と介在物曝露の有無分析結果

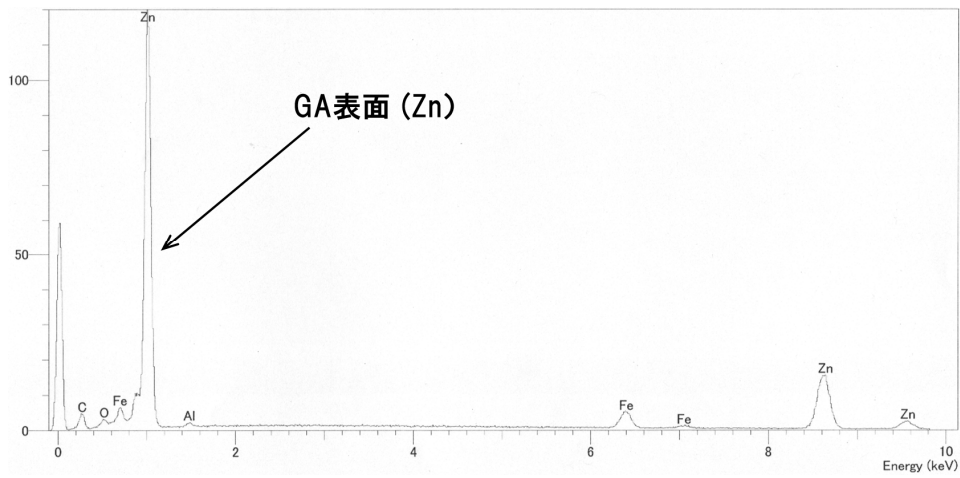


図 3.1.11(a) EDX による 部分①の元素分析結果

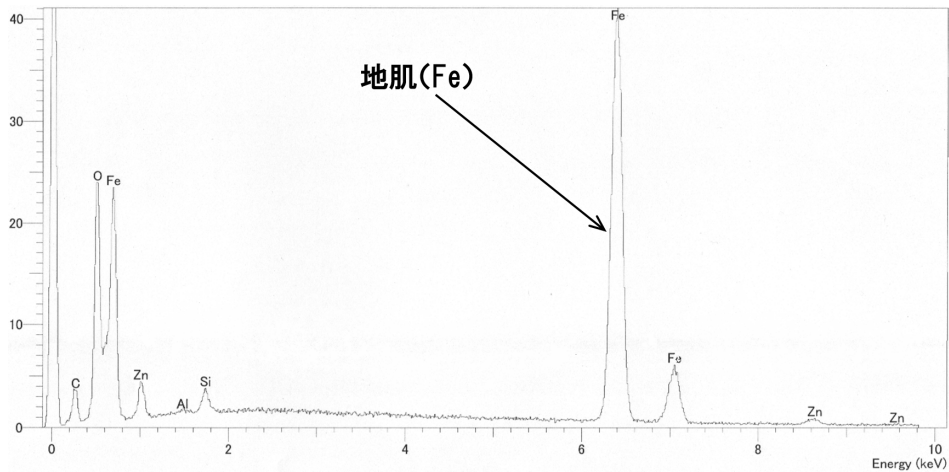


図 3.1.11(b) EDX による 部分②の元素分析結果

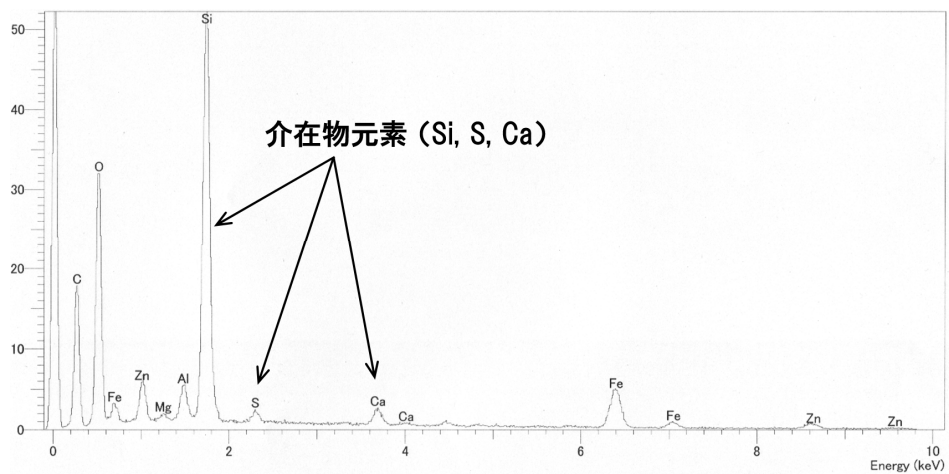


図 3.1.11(c) EDX による 部分③の元素分析結果

また、分析した欠陥の露出部分の断面を SEM 写真(図 3.1.12)によって観察したところ、介在物の存在が確認された。連続鋳造時に厚さ 200mm のスラブに巻き込まれたパウダー(金属酸化物)は直径数 mm と考えられ²⁻¹¹⁾、圧延によって数百分の 1 程度のサイズに引き伸ばされて、数 μm ~数十 μm の厚さをもって主に長さ方向へ広がる。この断面写真では介在物は表面に達していないが、図 3.1.10 では、介在物の最も厚い部分が表面に露出したものと考えられる。

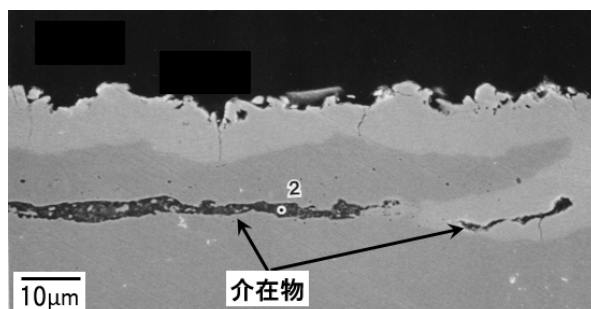


図 3.1.12 EDX 分析した露出型欠陥の断面 SEM 写真

3-2. 油痕部のミクロ性状

1-3 節で述べたとおり，鋼板表面検査の際にノイズとして過剰に検出される最も多いオブジェクトとして防錆油や圧延油(油性剤とも言う)による模様がある．鋼板の製造工程には無数といえるロールが配置され，ロール潤滑のほか，鋼板保護のためにも工程中で塗布される場合がある．その他油圧シリンダなどでも油が使用されており，鋼板表面には不可避免的に油成分が付着する．また，表面に化成処理を施す製品もあり，工程通過後に脱脂処理液を用いて洗浄するものの充分洗浄されず部分的に液滴が残り，外観上のコントラストを生じて誤検出される．このような無害な模様の外観は，**図 3.2.1** のようである．

模様を成す部分の主な成分は油分若しくは化成処理液であり，発現頻度の高い油痕の主成分は鉱物油，牛脂，または合成エステル系の油であって，単体ではやや黄色のかった透明な液体である．代表的な油の複素屈折率の実測値は， $1.46+0.03i$ である．こうした模様は，明らかな付着とは異なり，溶剤を用いない場合は容易に払拭できず，「シミ」様に鋼板表面に残る．斑点または点状の場合と，面状若しくは波スジ状のものもあり，生成原因としては少量の油が鋼板表面に付着し，多数のロールを通過する間に払拭されながら，GA 表面の複雑なストラクチャに僅かな量が残るものとみられる(以降「油痕」と呼ぶ)．

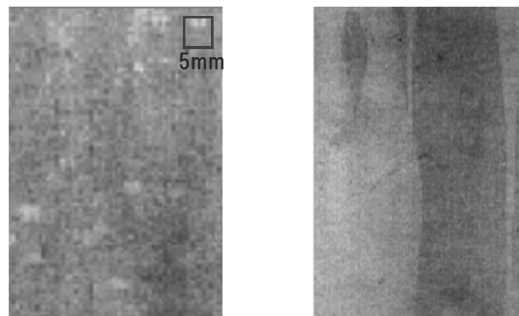


図 3.2.1 鋼板製造工程において発生した無害模様の例

油痕部のマクロ観察例を**図 3.2.2** に示す．油は実験のために平筆にて意図的に付着させた．投光角度を 60° とし，正反射受光(**図 3.2.2(a)**)と拡散反射受光(**図 3.2.2(b)**)にて画像を採取した．ここに見られるように，正反射角度では高い反射率により鋼板地肌に対し正極性のコントラストが得られ，また拡散反射では負の極性であって，**図 3.1.9** の欠陥部と同じ極性であることから鏡面要素をもっていることは間違いないと考えられる．

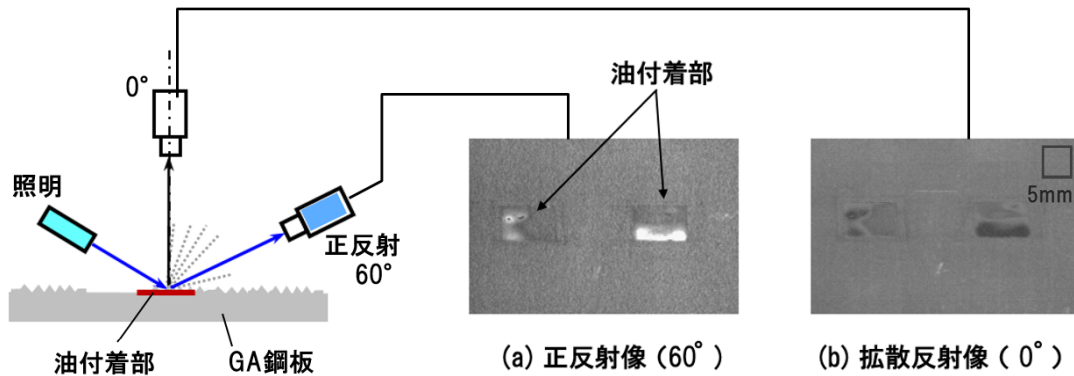
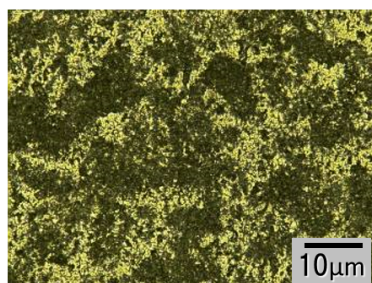


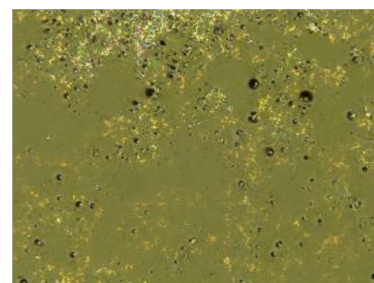
図 3.2.2 試験的な油付着部のマクロ観察像（投光角度 60°）

3-2-1. 不透明液体による油痕部観察

油痕は、50～200 倍程度の光学顕微鏡倍率で観察を行っても透明であるため欠陥部分でみられたような明確な要素は見つけれられず、付着状況を観察することが困難である。また、油は誘電体の液体であるため、高真空中で運転される通常の電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy ; 以降, SEM) による観察も困難である。そこで、透明な油の代替として不透明な墨汁を GA 表面に塗布した際の表面形状を光学式のマイクロSCOPE (キーエンス社 VHX-5000) を用いて観察を試みた。図 3.2.3 に実験結果の画像を示す。図 3.2.3 (a) は墨汁を塗布する前の正常部のマイクロSCOPE による画像であり、(b) は適量を塗布した後の画像である。(b) では、明らかに墨汁の液が複雑な GA のストラクチャを埋めて表面が平坦になっている様子が観察できる。



(a) 塗布前



(b) 塗布後(同一箇所,同一倍率)

図 3.2.3 墨汁塗布試験の表面観察像（正常部のマイクロSCOPE 像）

墨汁を塗布した後の鋼板表面の凹凸をマイクロスコープにて測定した結果を図 3.2.4 に示す。破線が塗布前、実線が塗布後である。(a)～(c)の順に塗布量が多いが、どの量でも塗布によって谷が埋まり、実線で示されるように平坦な部分の割合が増えることが確認できる。表面の観察結果と同じく、何らかの液体はGA表面の複雑なストラクチャを埋めて鏡面反射の要素を形成し、マクロに観察される模様の原因であろうと推定できる。

油部の生成に関し、この結果によっておよその説明はつくが、実際の鋼板に付着している油痕部の油量はごく少量と思われ、より実際に近い付着量の再現と観察方法が必要である。

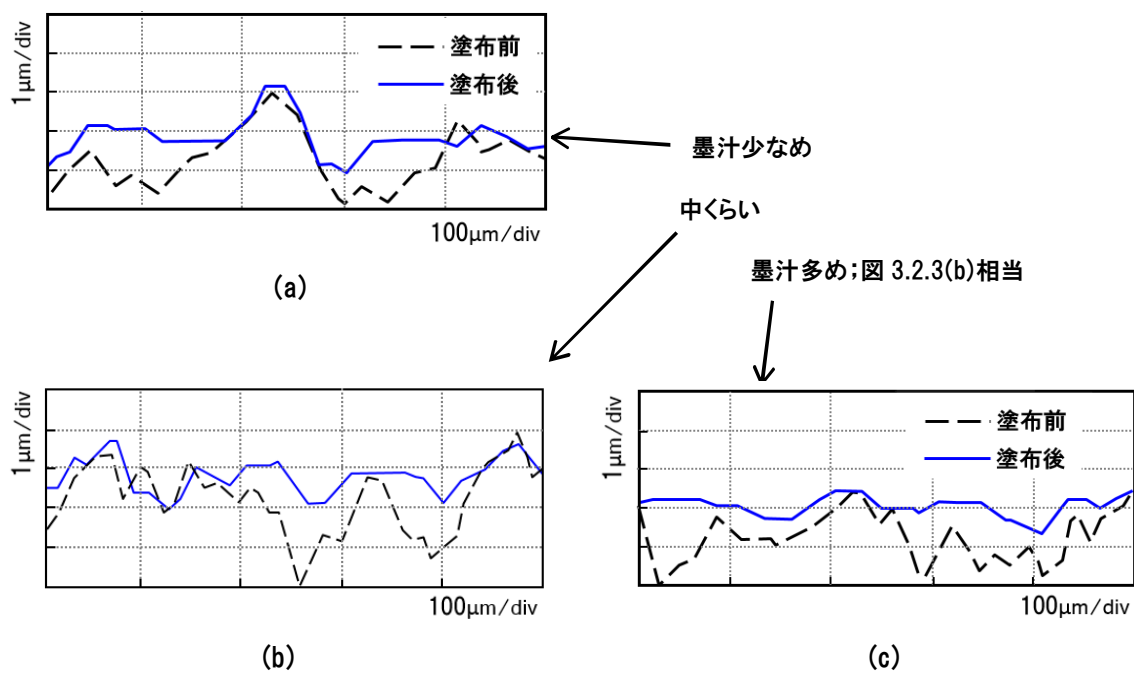


図 3.2.4 墨汁塗布試験前後のマイクロ形状

3-2-2. 環境制御型 SEM による油痕部マイクロ性状の直接観察

以上の結果から GA 表面に防錆油等が付着した場合のモデルは、付着した油が複雑なテクスチャを埋めて平坦な部分を生成していると推測した。このモデルが正しければ、油部分の反射についても GA 自体のファセットモデルと同様に扱える。しかしながら、前述のとおり油の付着に関しては、従来の SEM では直接の観察が困難な事情があり、光学モデルの推察に当たっては 3-1-2 節のような間接的な方法に留まっていた。

一方で近年、金属酸化物や油脂類のような非導電体(誘電体)の観察に適した低真空低加速の「環境制御型 SEM」が発達してきた。

通常の SEM は、 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ Pa 程度の高真空環境で運転され、油は短時間に揮発するため観察は困難である。一方、このような観察の要求に対応し低真空で運転される環境制御型 SEM は、近年盛んに研究され応用が広がっている^{3-7), 3-8), 3-9)}。これは、今回の観察対象である油のような誘電体(非導電体)の観察において、1 次電子照射によってプラスに帯電するガスを試料室に用い、電子による試料のマイナス帯電を中和することで像の輝度飽和を緩和し、観察を容易とする技術である。

また、油の SEM 観察において、通常の加速電圧である 30kV 程度以上では、1 次電子が数 μm の油を透過するため、表面に付着していても 2 次電子を放出せず、従って SEM 像では透明となって観察が困難である。環境制御型 SEM では、油脂、金属酸化物などの誘電体ほか様々な組成の物質に対して、加速電圧を低く抑えることで電子の透過力を下げ、油脂などの誘電体でも SEM 像を得られるようになってきた³⁻¹⁰⁾。この技術は鉄鋼材料表面にも広く適用されてきている^{3-11), 3-12), 3-13)}。

以上の特徴を有す環境制御型 SEM を用い、300Pa の低真空運転、5kV 程度の低加速電圧にて、GA 表面に付着した防錆油のマイクロな状態の直接観察を試みた³⁻¹⁴⁾。

図 3.2.5(a), (b)に防錆油を平均厚 $5\mu\text{m}$ 程度付着させた GA 表面の SEM 観察結果を示す。(a)は加速電圧 30kV による通常の SEM 像、(b)はそのまま加速電圧を 5kV に下げた際の像である。図 3.1.16(c)には、これら像内の特徴的な部位を示した。

図 3.2.5(a)は、従来の SEM の加速電圧による観察例であり、GA 表面の複雑なストラクチャが観察される。これによれば、深い穴状のストラクチャも多く見られ、付着した油の相当量がこうした場所へ浸透すると考えられる。

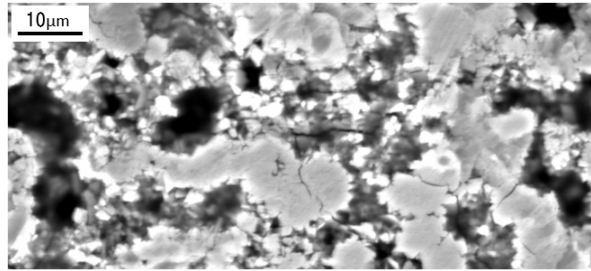


図 3.2.5(a) 加速電圧 30kV における防錆油の付着した GA 表面 SEM 像

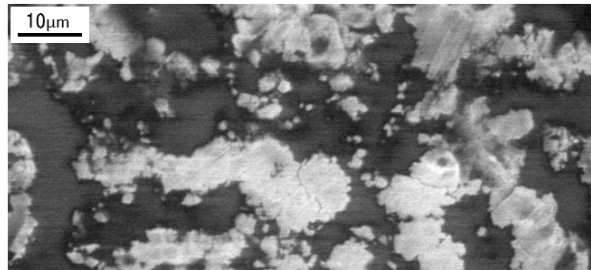


図 3.2.5(b) 加速電圧 5kV の SEM 像；油の存在が確認できる。

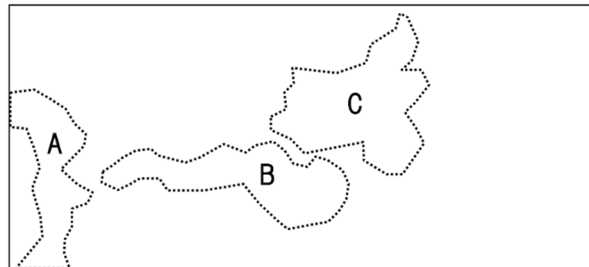


図 3.2.5(c) 油付着 SEM 像の特徴的な部位

図 3.2.5(a)の実写に対応した模式図の図 3.2.5(c)の B に示す部分は、表面の一部がロールによって圧下され平坦になった部分であり、欠陥部でなくとも、ロールによる圧下が強ければ、こうしたファセット状の部分が形成される。また C 部分は、Fe-Zn 合金結晶の地肌であって、通常の SEM 加速電圧下の図 3.2.5(a)ではよく見える。ここでは深い穴状の構造が多数見えているおり、奥まで油が侵入すると推察される(4-2-1 節にて詳述)。

一方、同一箇所を低加速電圧(5kV)の環境制御型 SEM にて観察した像が図 3.2.5(b)であ

る。これをみると部位 A 及び C の部分のほか、多くの部分が濃いグレーに映り、谷を埋めた湖のような様相を呈して深部の像を遮っており、付着した油が GA 表面の複雑なストラクチャを埋めている様子が明確に見てとれる。

油で埋まった部分が平坦であることは、SEM 像における輝度が観察対象表面の相対的な高さを示すことから、輝度プロファイルを取ってみるとさらにわかりやすい。図 3.2.6 に、両方式の SEM による油部の輝度プロファイルを示した。(b)の環境制御型 SEM による表面高さのプロファイルに見られるとおり、油が GA 表面に平坦な箇所を生成していることがわかる。

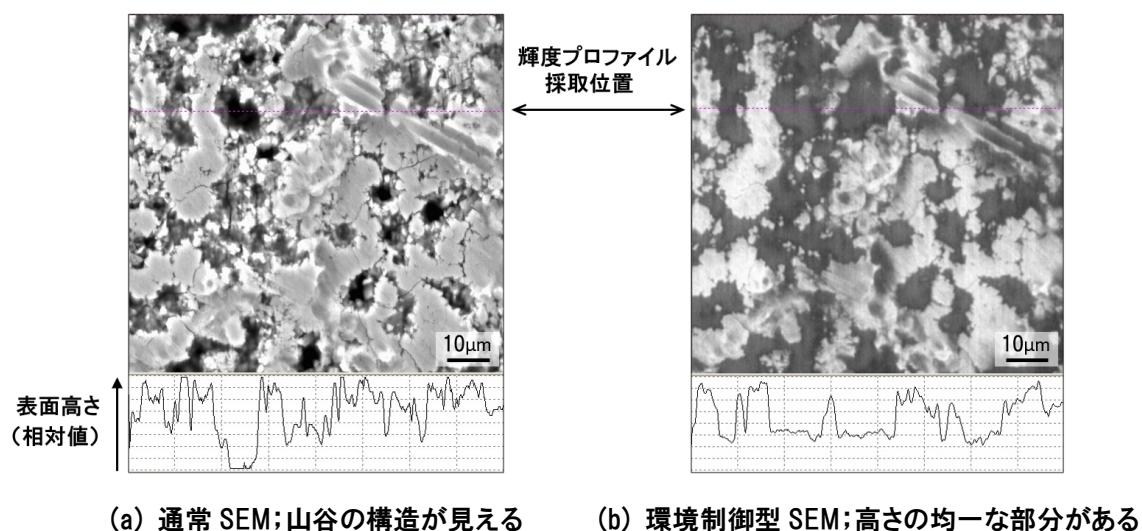


図 3.2.6 通常 SEM と環境制御型 SEM による相対的高さプロファイルの例

以上の調査・観察の結果をもって、油付着部分の物理性状について、図 3.2.7 の断面図で考えてみる。

まず、正常な何も付着しない状態での GA 表面は、図 3.2.7(a)のような針状結晶が入り組んだストラクチャである。そこに液体である油が付着すると、油は先ず柱状結晶群が成す複雑な構造の深部に浸透し、深部の空隙を満たした後は、油自身で平坦な領域を形成する。これが低加速 SEM 像の図 3.2.5(b)で観察された状態であって、断面は図 3.2.7(b)のモデル図のように、油による平坦な部分は光学的には鏡面反射要素になると考えられる。油がさらに大量に付着すれば全面を覆い、マクロには「濡れた」状態に見えるようになると考

えられる。

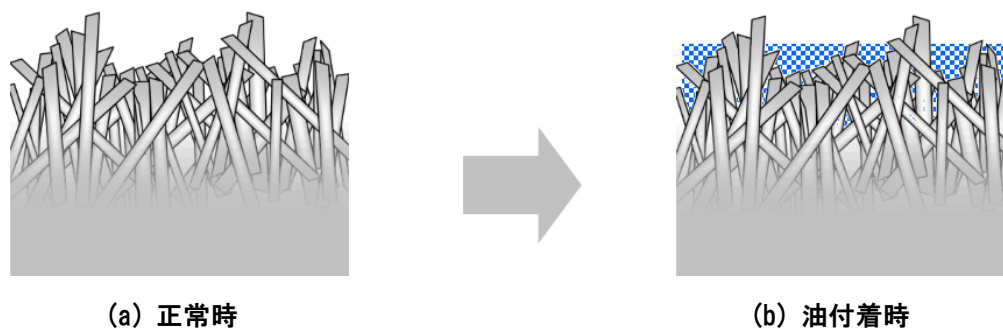


図 3.2.7 GA 表面における防錆油付着時のモデル

ここで、油痕部分の物理性状についてまとめると以下のようなものである。

- (1) 油痕部は、GA の複雑な表面ストラクチャを油成分が、ある程度埋めた構造である。
- (2) 油で埋まった部分は平坦な鏡面反射要素であり、この鏡面要素は油痕部を正常部に比べて正反射率が高くなるよう作用する。

すなわち、欠陥部と油痕部におけるマイクロな反射の様子は、微小な鏡面反射要素を有しており、互いに極めて類似したものであると結論できる。

3-3. 鋼板表面各部位の光学反射モデル

本節では、研究の目標の一つである GA 鋼板表面の 3 種の部位 (①正常部, ②欠陥部, ③油痕部) の識別方法の手がかりを得るため、前説までに明らかになった各部のマイクロ性状に基づき、それらを簡略化した可視光領域における幾何学光学モデルを検討する。

3-3-1. 正常部と欠陥部の光学モデル

GA の正常部は、図 3.1.4(c)に見られるとおり、細かい Fe-Zn 合金の針状結晶がランダムに成長した特有の表面構造を有する。結晶の大きさや方向に特段の規則性はなく、接触式表面粗さ計³⁻¹⁵⁾による測定によれば、算術平均粗さ Ra が 1~3 μm 、山谷平均間隔 RSm は 1~3 μm である。

正常部の断面を模式化すると 図 3.3.1(a)に示すように、ベースである鉄(Fe)の表層に Fe-Zn 合金の結晶群が形成された入り組んだ構造で表現でき、可視光領域の光学モデルとしては 図 3.3.1(b)に示すように、入射した光が正反射角度を中心に拡散反射する粗面としてよいと考えられる。

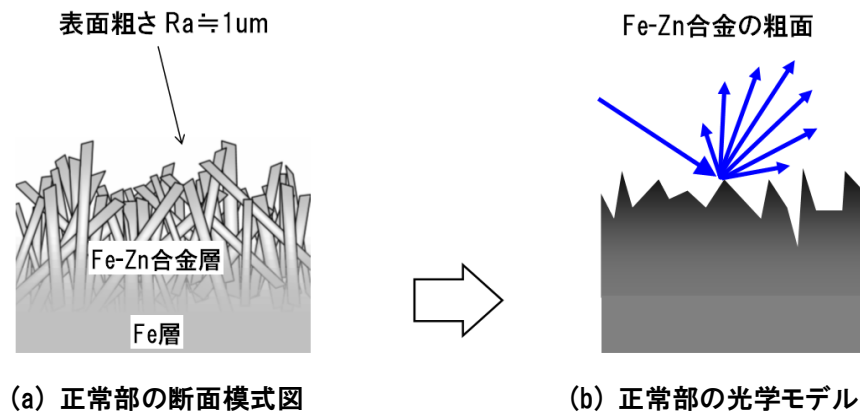


図 3.3.1 正常部の光学モデル

一方、欠陥部には図 3.1.5 で見たとおり、正常部の粗面の中に、ロール圧加によって形成されたファセットが相応の面積率で存在する。また、図 3.1.4 にて説明した生成状況及び図 3.1.8(b)の SEM 断面写真から判断して、ファセット面は鋼板表面に平行であるとしてよい。従って欠陥部は図 3.3.2(a)のように、Fe-Zn 合金の粗面と、Fe-Zn 合金の鏡面部分

が混在しており、光学モデルとしては、図 3.2.2(b)に示すように、拡散反射と鏡面反射とが混在するモデルで表現できる。

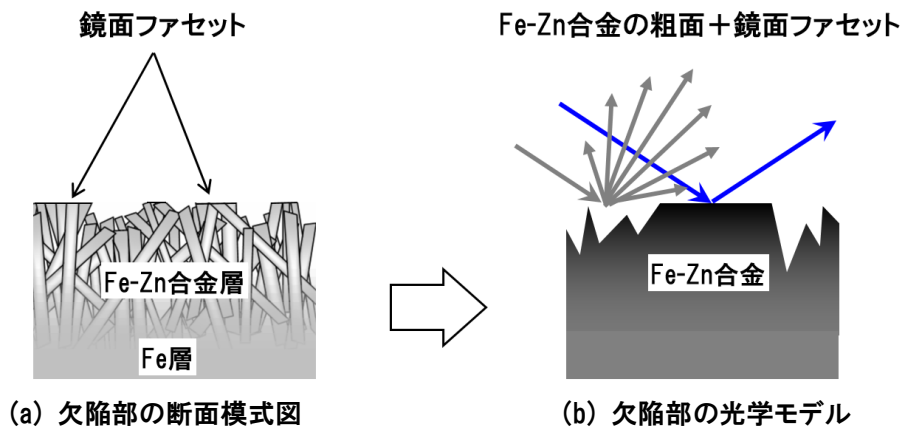


図 3.3.2 欠陥部の光学モデル

3-3-2. 油痕部の光学モデル

3-1-2.にて調査した通り、油痕や処理液跡などの模様部分のマイクロ性状は、複雑なGAの針状結晶群に油などが浸潤して埋め、その液面が微小な鏡面要素を成す形態であり、模式的には図 3.3.3(a)のような構造と推察される。すなわち、油痕部の光学モデルも欠陥部と同様に、粗面と液の鏡面部とが混在した図 3.3.3(b)の形で表現できる。また液の付着量に応じて鏡面部分の面積率が変化するであろうことは容易に推察できる。

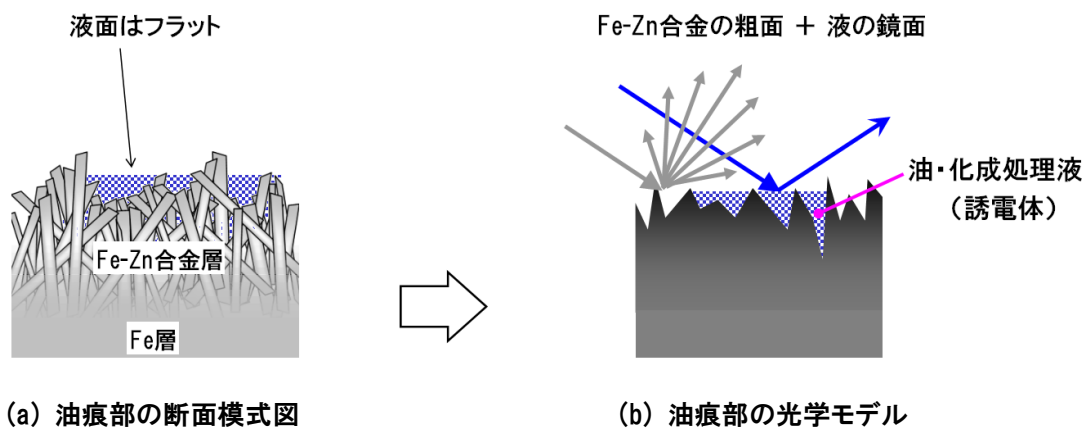


図 3.3.3 油痕部の光学モデル

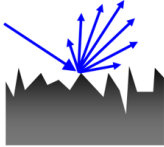
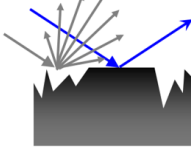
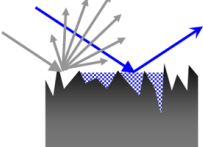
3-4. 第3章まとめ

第3章の目的は、GA表面の3種のオブジェクト ①正常部、②欠陥部、③油痕部のマイクロ性状を明らかにして、その光学反射モデルをたてることである。これまでの実験と考察による本章の目的に対する結果を表3.4.1にまとめた。

反射形態でみると、欠陥部と油痕部はどちらもGA地肌の粗面による拡散反射と鏡面反射の要素とが混在した表面であり、幾何学的要素は同一である。ただし、鏡面部の反射物質は異なる。

1-3-2節及び1-3-3節で述べた表面検査の重要課題である「誤検出・過剰検出」は、欠陥と油痕のマクロな反射特性が類似であるが故に起きる問題である。これまでに3-1-1節、3-1-2節において分析した欠陥部と油痕部のマイクロ性状及び、整理した両者の光学モデルをみると、過剰な検出の主原因は、欠陥部と油痕部の光の反射形態の同一性、すなわち両者共に拡散反射と鏡面反射が混在した形態であることと推察される。ただし、GAの鏡面反射率が0.40であるのに対し、油の表面反射率は0.078(第4章に詳述)であって、GAの1/5程度であり、反射率のみからは、油痕が欠陥と同等のコントラストや輝度を成して過剰な検出の要因となる理由を十分説明できない。

表 3.4.1 GA 鋼板表面各部の光学モデル

	正常部	欠陥部	油痕部
光学モデル			
反射形態	拡散	拡散, 鏡面 (混在)	拡散, 鏡面 (混在) *
反射物質	Fe-Zn合金	Fe-Zn合金	拡散部; Fe-Zn合金 鏡面部; 油, 化成液

* 欠陥部と油痕部の基本的な光学モデルは同一。

以上、本章で分析した各部のマイクロ性状と、その形態から過剰な検出の要因として考慮すべき事項を整理すると以下のようである。

- (1) 正常部表面は Fe-Zn 合金結晶の粗面であり、拡散反射面である。
- (2) 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。
- (3) 油痕部には Fe-Zn 合金の拡散反射と、油等の液による鏡面反射要素とが混在する。
- (4) 油痕部の過剰検出は、欠陥部と類似の微小な鏡面反射要素の存在による。
- (5) ただし、油の反射率は GA 鏡面の 1/5 程度と小さいため、鏡面要素としての類似性だけでは、欠陥に対する過剰検出の要因として説明が困難であり、別な要因が考えられる。

ここで、欠陥部と油痕部の相違は、欠陥部が Fe-Zn 合金のみであるのに対し、油痕部は GA 地肌素材である金属とは異なる誘電体である。この相違が、以降の研究において重要な要素となる。

第3章 参考文献

- 3-1) A. Kazama and T. Oshige, "A defect inspection technique using polarized images for steel strip surface," Proc. of SPIE, 7072 (2008), 70720L1-9.
- 3-2) 風間彰, 大重貴彦, 「複数方位の偏光イメージにおける相対的輝度特性を利用した鋼板表面検査技術」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47. No. 12 (2011), 591-596.
- 3-3) A. Kazama and T. Oshige, "Correlation of Optical Microstructure and Macroscopic Intensity of Defects on Steel Strip Surface," ISIJ International, Vol.54, No.8 (2014), 1843-1848.
- 3-4) 浦井正章, 有村光史, 堺裕彦, 「合金化溶融亜鉛めっき鋼板の突起状表面欠陥に及ぼすめっき原板疵の影響」, 鉄と鋼, Vol. 81, No. 2 (1995), 129-134.
- 3-5) 浦井正章, 有村光史, 寺田誠, 山口雅彦, 堺裕彦, 野村伸吾, 「合金化溶融亜鉛めっき鋼板のパウダリングに及ぼすめっきならびに合金化条件の影響」, 鉄と鋼, Vol. 77, No. 7 (1991), 971-978.
- 3-6) 鈴木善継, 杉本芳春, 藤田栄, 「高強度鋼板の溶融亜鉛めっきぬれ性および合金化挙動に及ぼす内部酸化の影響」, JFE 技報, No. 16 (2007), 21-27.
- 3-7) Danilatos, G.D., and Robinson, V.N.E., "Principles of scanning electron microscopy at high specimen pressures," Scanning 2 (1979), 72-82.
- 3-8) Danilatos, G.D., "Foundations of Environmental Scanning Electron Microscopy," Advances in Electronics and Electron Physics, ESEM Research Laboratory North Bondi (Sydney), Australia, Vol. 71 (1988), 109-250.
- 3-9) 河田眞太郎, 「環境制御型走査型電子顕微鏡」, 精密工学会誌, 57(7) (1991), 1178-1181.
- 3-10) L. Reimer, "Image Formation in Low Voltage Scanning Electron Microscopy," Vol. TT12, Bellingham, WA, SPIE (1993).
- 3-11) 河野崇史, 名越正泰, 佐藤馨, 「極低加速走査電子顕微鏡(SEM)による鋼板表層の微細構造観察技術」, JFE 技報, No. 13(2006), 5-8.
- 3-12) 河野崇史, 名越正泰, 佐藤馨, 「極低加速走査電子顕微鏡でみた実材料表面」, 表面技術, Vol. 54No. 1 (2003), 31.
- 3-13) 佐藤馨, 名越正泰, 河野崇史, 「低加速電圧走査電子顕微鏡の鉄鋼表面解析への応用」, 鉄と鋼, Vol. 93, No. 2(2007), 169-175.

- 3-14) 風間彰, 河野崇史, 丹所昂平, 大重貴彦, 「鋼板表面における微小油部の微細構造と光反射特性」, 実験力学会論文集, Vol.19, No.4 (2019), 327-331.
- 3-15) 表面粗さ : JIS B 0601 (1994)・JIS B 0031 (1994).

第3章 以上.

第4章 鋼板表面各部の光反射特性の解析 ～理論と実験～

前章において、GA 鋼板表面における 1) 正常部、2) 欠陥部、3) 油痕部 の3種の部位に関してマイクロ性状を調べて光学反射モデルを立てた。本章では、表面検査における過剰な検出を防止するための解決方法を探る前準備として、各部位のモデルに基づき偏光を考慮した反射率の理論計算を行う。また、実験・実測によって各部位を分析し、欠陥及び油痕が正常部に対してコントラストを成す理由すなわち、欠陥及び油痕は何故見えるのかを明らかにする。

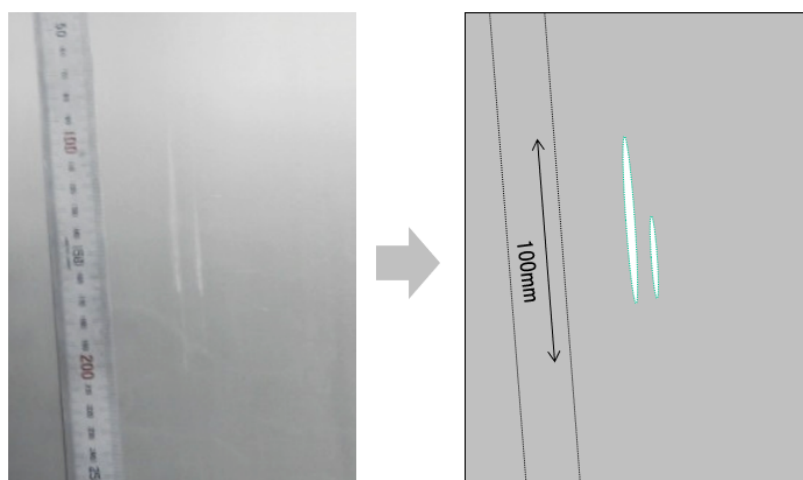
具体的には以下のような項目について研究する。

- (1) 欠陥部の光反射特性の分析
- (2) 欠陥部鏡面部の面積率と実効的反射率、及びコントラストの関係の分析と考察
- (3) 油痕部の反射特性の分析
- (4) 油痕部の面積率と実効的反射率、及びコントラストの関係の分析と考察

4-1. 欠陥部の光反射特性とコントラスト

4-1-1. 正常部と欠陥部の光反射特性

以降、図 4.1.1 に示す GA のサンプルについて分析を行う。このサンプルには2体の低コントラストの模様状欠陥が並んでおり、コントラストの高い部分から低い部分までを含んでいるため、分析用サンプルとして好適である。



(a) サンプル板外観

(b) 欠陥位置 模式図

図 4.1.1 GA 表面欠陥 分析用サンプルの外観

図 4.1.1(a) は、通常の室内照明の下で、水平のデスク上に置いて法線より数度傾いた位置から撮像したものであり、鋼板のサンプルを目視する際の代表的な観察条件である。介在物に起因する模様状欠陥は、こうした撮像条件下では、正常部に対し正のコントラストをもって観察される。図 3.1.2 の光学系を用い、図 4.1.1 のサンプルについて、予め入射光の強度を測定した上で、3 種の投受光角度の正反射における p 偏光・s 偏光及び無偏光の反射率を測定したデータを図 4.1.2 に示す。無偏光の反射率 R_n は、p 偏光反射率と s 偏光反射率の平均値である(本節にて後述)。投受光 60° における R_n の実測値は 0.034 である。 R_n の値は、表面粗さと Fe-Zn の合金化度合いに依存して変化し、0.025~0.050 程度の幅があるが、1 本のコイルまたは生産ロットの中では、中心値に対し 10% 程度の変動幅に収まるように製造条件が管理されている。以降、実際に自動車メーカーで使用される GA 鋼板のサンプルである図 4.1.1 の正常部の正反射率として $R_n=0.034$ を用いることとする。

GA 鋼板を通常の室内照明環境下または周辺光の多い昼間屋外で観察すると、艶消しシルバーの色合いを呈し、視覚として比較的明るく見えるが、正反射率は上記値が示すように非常に低い。観察において明るく見える理由は、粗面であるため全反射率が高く、あらゆる方向からの光を拡散反射することに依ると考えられる。この裏付けとして、積分球を装備した分光器(島津製作所 UV-3100)による GA の分光反射率を図 4.1.3 に示す。積分球を用いた測定による全反射率は可視光領域においてほぼフラットであって 0.4 である。この分光反射特性は、周辺光による目視観察におけるシルバーの外観を裏付けており、かつ可視領域においては

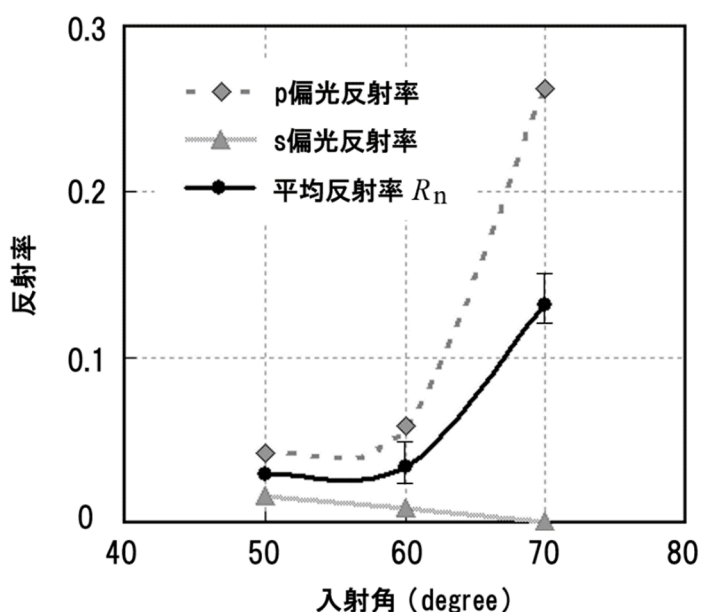


図 4.1.2 GA 表面 正常部の反射率の実測値 (60° にて $R_n=0.034$)

複素屈折率が波長依存性をもたず、一定値であることを示している。

可視波長領域の画像による GA 表面の複素屈折率に波長依存性がないことは、様々な考察を簡素化する重要な要素であり、本研究では以降、波長依存性を問題にしないこととする。また、図 4.1.1 に示すような通常の観察において欠陥部に正のコントラストが生じる原因は、全反射率と正反射率の 10 倍以上の差によるものと推察されるが、これについては 4-1-3 節において考察する。

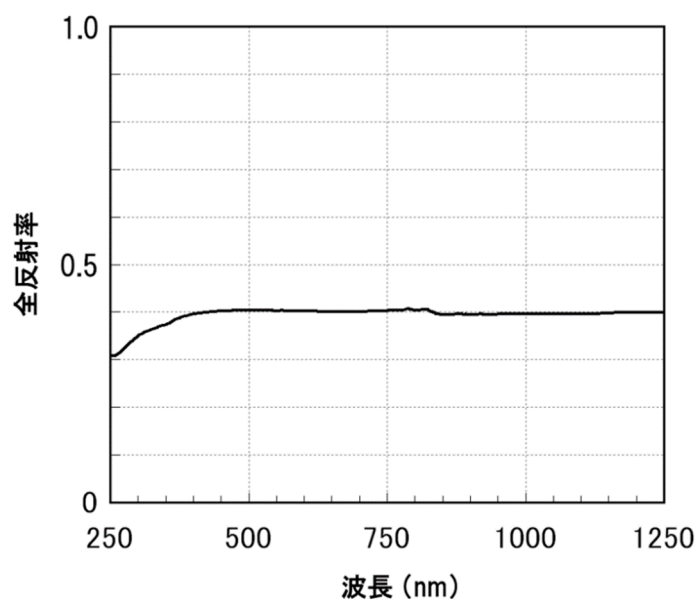


図 4.1.3 GA 鏡面の分光反射率
(分光器;島津製作所 UV-3100 積分球による全反射率)

次に、欠陥部の実効的な反射率を見積もってみる。図 4.1.4 に見られるような欠陥部を模式的に表し、図 4.1.5 のように拡散面の正常部に、鏡面部がある面積率をもっているモデルで表現してみる。ここで正常部の正反射率を R_n 、鏡面部の正反射率を R_{GA} とし、単位面積あたりに面積率 g をもって鏡面部が存在するとする。カメラ画像では、このような状態をマクロに観測していることになり、画像に映る欠陥とは、正常部からの正反射光強度に対し、鏡面ファセット群からの正反射光の総量が勝るために正のコントラストをもって明るくみえるものと推定される。以降、この推論を理論的に立証するため図 4.1.5 をモデルとして正反射角度において照明光が欠陥部に反射した場合にカメラで撮像される画像のコントラストを計算してみる。

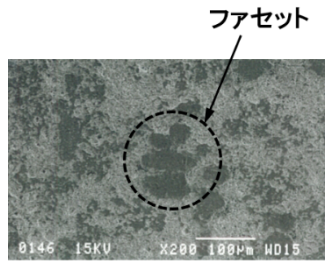


図 4.1.4 欠陥部の鏡面ファセット

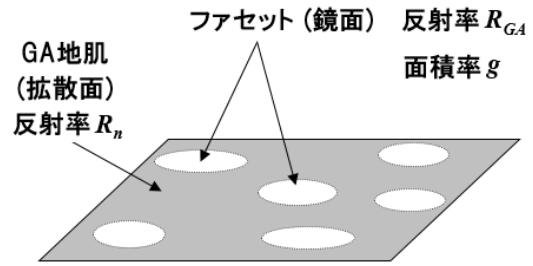


図 4.1.5 GA 表面の模式図(単位面積)

画像の輝度は、撮像素子の露光時間中にそれぞれの画素に入射する光のエネルギーに比例する。従って反射されるエネルギー E_{ref} は、ファセットからの鏡面反射と、地肌からの反射との合計である。単位面積当たり存在する複数の鏡面部の面積率を g ($0 < g < 1$) で表し、入射エネルギーを E_{in} とすれば、 E_{ref} は、反射率 R_{GA} 、面積率 g の鏡面部と、反射率 R_n 、面積率 $g-1$ に配分された反射エネルギーの合計値であり、以下のように表される。

$$E_{\text{ref}} = E_{\text{in}}(g \cdot R_{\text{GA}} + (1 - g)R_n) \quad \dots(4-1)$$

すなわち、欠陥部の実効反射率 R_{eff} は(2)のように表現できる。

$$R_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{ref}}}{E_{\text{in}}} = g \cdot R_{\text{GA}} + (1 - g)R_n \quad \dots(4-2)$$

そして、 R_{eff} と正常部の反射率と R_n より、欠陥部の検出評価指標であるコントラスト C_d は、(2-5)式を反射率で置き換え(4-3)式として求められる。

$$C_d = \frac{R_{\text{eff}}}{R_n} - 1 \quad \dots(4-3)$$

ここで、 R_n は図 4.1.2 で実測済みにつき、鏡面であるファセットの反射率 R_{GA} とその面積密度 g が分かれば(4-2)、(4-3)式より欠陥部の実効反射率 R_{eff} とコントラストが計算できるはずである。そこで次に R_{GA} を求めるため先ず GA の反射率を計算する。

複素屈折率 N_1 の媒質 1 から N_2 の媒質 2 への光の経路では、界面で Snell の法則(4-4)式が成り立つ。(図 4.1.6 参照)

$$N_1 \sin \phi_1 = N_2 \sin \phi_2 \quad \dots (4-4)$$

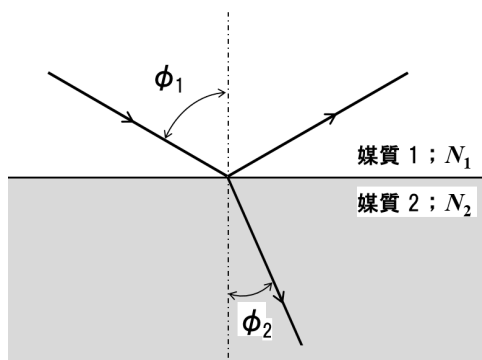


図 4.1.6 表面反射における光路

Snell の法則と、p 偏光、s 偏光成分の反射と透過成分の電界及び磁界の振幅和が入射成分と等しいという保存則から、Fresnel により 2 種の媒質境界における光の反射率について、(4-5)、(4-6)式が導かれている。(Fresnel 反射式；変数は複素数)

$$\frac{E_{rp}}{E_{ip}} = r_p = \frac{N_2 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_2}{N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2} \quad \dots (4-5)$$

$$\frac{E_{rs}}{E_{is}} = r_s = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_2 \cos \phi_2}{N_1 \cos \phi_1 + N_2 \cos \phi_2} \quad \dots (4-6)$$

E_{ip} ; 入射光 p 偏光の電界振幅, E_{rp} ; 反射光 p 偏光の電界振幅,

r_p ; p 偏光のフレネル反射率,

E_{is} ; 入射光 s 偏光の電界振幅, E_{rs} ; 反射光 s 偏光の電界振幅,

r_s ; s 偏光のフレネル反射率

GA 表面の反射において、媒質 1 は空気(複素屈折率 $N_1=1.0+0i$)であり、媒質 2 は Fe-Zn 合金であるので、GA 鋼板表面の複素屈折率を改めて N 、表面への光の入射角を θ とおくと、実数としての p 偏光及び s 偏光の反射率 R_p , R_s は、Fresnel 反射式を用いて(4-7), (4-8)式のように記述される。

$$R_p = |r_p|^2 = \frac{|N^2 \cos \theta - \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2}{|N^2 \cos \theta + \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2} \quad \dots (4-7)$$

$$R_s = |r_s|^2 = \frac{|\cos \theta - \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2}{|\cos \theta + \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2} \quad \dots (4-8)$$

Fe-Zn 合金である GA 鋼板サンプルの表面の一部を鏡面状態にし、多入射角分光エリプソメータ(J. A. Woollam 社' VASE')を用いて測定した複素屈折率の実測値は $N = 2.2+2.2i$ であった。 N の実測値及び(4-7), (4-8)式から、横軸を入射角度 θ として、p, s 偏光の反射率を計算した結果を図 4.1.7 に示す。

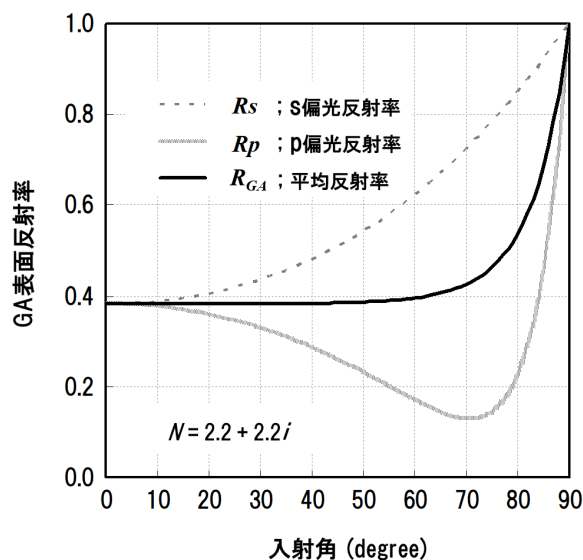


図 4.1.7 GA 表面の正反射における p,s 偏光反射率及び平均反射率 (GA の複素屈折率の実測値 $N=2.2+2.2i$ を用いた計算値)

ここで、2つの偏光成分を合わせたトータルが通常の反射率 R_{GA} であるので、入射光強度を I_0 、全反射光強度を I_r とすれば、 R_{GA} は、(4-9)式のように R_p と R_s の平均値で表現される。

$$R_{GA} = \frac{I_r}{I_0} = \frac{R_p + R_s}{2} \quad \dots (4-9)$$

図 4.1.7 における実線が R_{GA} であり、例えば入射角度 60° における GA 鏡面部の平均反射率は、 $R_{GA} = 0.40$ である。なお、複素屈折率を測定した際の投受光角度 60° における実測反射率は、 0.38 ± 0.05 であって、実測した GA 鏡面の複素屈折率より (4-9) 式から求めた反射率計算値とほぼ一致する。反射は光学物性がもたらす結果であるので、本論文では以降、欠陥部、油痕部共に複素屈折率から求められた反射率を使用することとし、GA 鏡面については $R_{GA} = 0.40$ を用いる。

4-1-2. 微小鏡面要素の面積率

次に、欠陥部における鏡面部の占める面積率 g を実験的に求めてみる⁴⁻¹⁾。 g がわかれば (4-1)、(4-2)、(4-3) 式より欠陥部のコントラストを計算できるはずである。鏡面部の抽出は、

図 4.1.8 に示す欠陥サンプル上の「鏡面部抽出エリア」を対象に行う。

すなわち、欠陥部と正常部とに渡る部分について、横方向に鏡面部の面積率を求める箇所を決めて実験的に求めてみる。

鏡面部の抽出には図 4.1.9 に示す同軸落射照明による顕微光学系を用いた。この光学系において、GA 表面を法線方向から観察すると、光軸と同軸かつ平行に照明光が鋼板に照射される。すると、鏡面反射に近い部分は、正常部と比較して法線方向(光の入射方向)へ著しく高い反射輝度を示

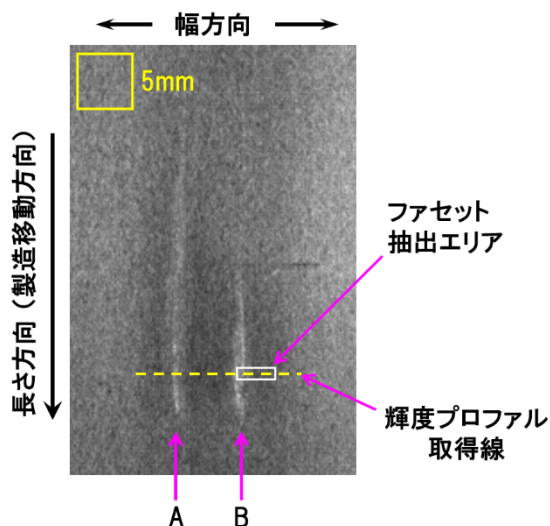


図 4.1.8 欠陥サンプル上の鏡面部抽出処理位置

すと考えられ、2 値化等の画像処理によって容易に抽出することができる。この実験光学系では、サンプル面に水平に鏡面が在れば、法線に対し±1.2 度の範囲が入射光強度の 1/2 以上の強度で反射される。

この光学系を用いて欠陥部を撮像した輝度ヒストグラムの例を図 4.1.10 に示す。

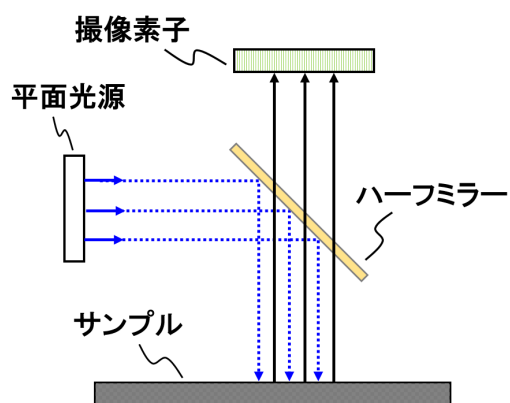


図 4.1.9 同軸落射照明による撮像系

輝度は一般的な 8bit 256 階調、撮像素子の有効画素数は、160 万画素である。ヒストグラムの右端部に明らかに他の部分に対して輝度の卓越した部分がある。ここでは、しきい値としてヒストグラム曲線が右下がりから右上がりに転ずる輝度 (224) すなわち右端からみて最も頻度の低い輝度レベルをしきい値として、それ以上の部分を鏡面部とした。

ここから鏡面部を抽出する手続きを、図 4.1.11 に沿って説明する。

- ① 画像のヒストグラムを採取する。
- ② ヒストグラム右端部における、特段に輝度の高い領域を鏡面部分からの反射とみなし、他の一般の反射輝度との仕切りを、図 4.1.10 に示す通り右端からみて最も頻度の低い輝度レベルに設ける。これを、鏡面部抽出のための 2 値化しきい値とする。
- ③ 2 値化処理を行い、鏡面部分を抽出する。
- ④ 鏡面部として抽出された画素の総数をカウントする。
- ⑤ 鏡面部の面積率を計算する。面積率 g は、観測画像の総画素数を n_T 、鏡面部として抽出された画素数を n_F とすれば、(4-10) 式より求められる。

$$g = \frac{n_F}{n_T} \quad \dots (4-10)$$

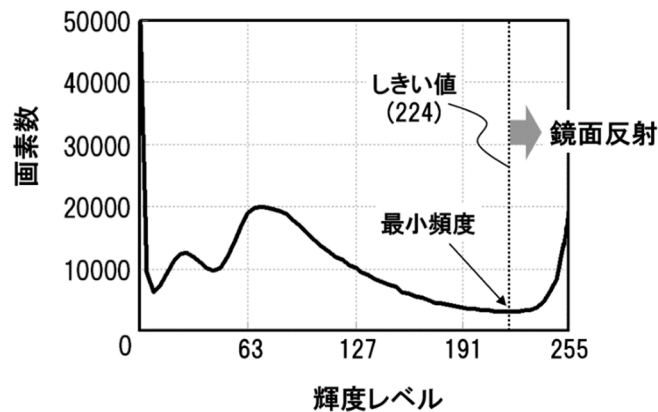


図 4.1.10 欠陥サンプル上の鏡面部抽出処理位置

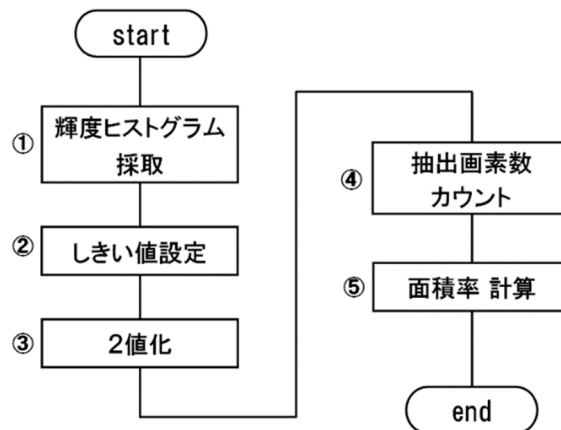


図 4.1.11 鏡面部の抽出フロー

図 4.1.8 上の欠陥 B の鏡面部抽出位置に関して以上の処理を実施した例を図 4.1.12 に示す。上段は同軸落射光学系の原画像，下段が鏡面部抽出後の画像である。これによれば正常部に比べて欠陥部における鏡面部の占有面積が大きいことが明らかである。

欠陥部と正常部にまたがる約 100 か所について画像を採取し，以上の処理を施し，マクロに観察される画像内での輝度と，鏡面部の面積率との関係を調査した。(Appendix. A-2)

図 4.1.13 に欠陥画像とその位置方向の輝度プロファイルを示す。輝度は，正常部の輝度レベルが基準輝度 127 になるように正規化した。欠陥部 B のコントラスト $C_d = 0.26$ である。

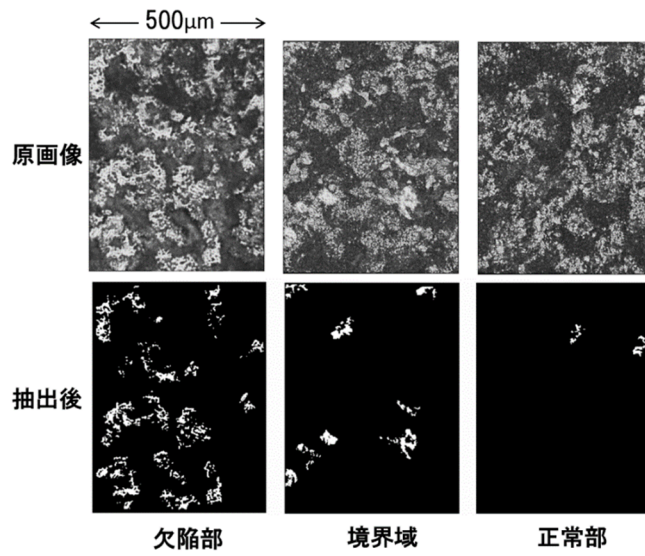


図 4.1.12 GA 表面の同軸落射原画像(上段)と 鏡面部抽出語(下段)

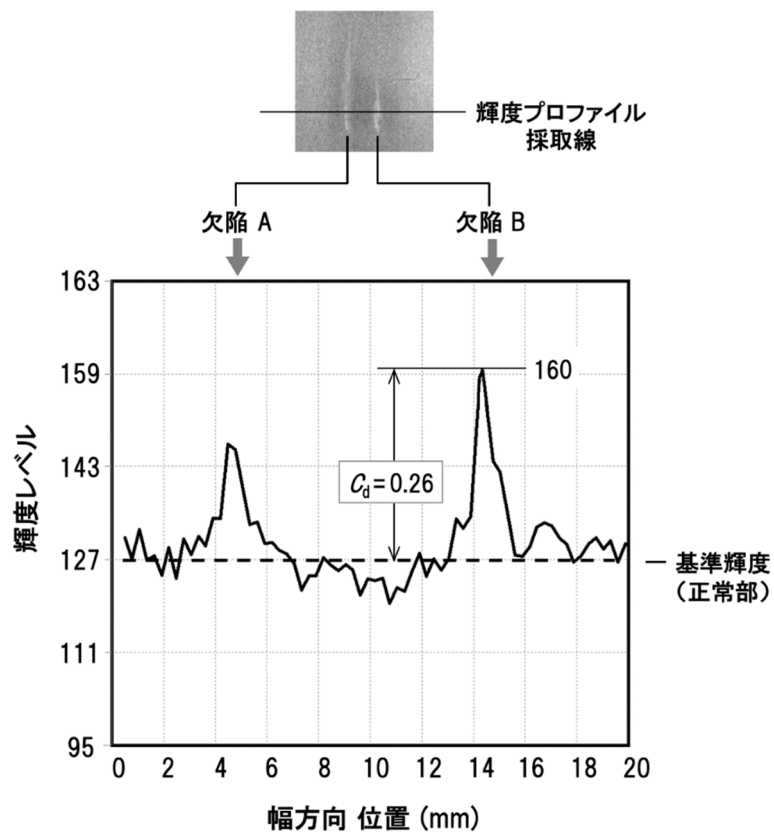


図 4.1.13 欠陥画像と輝度プロファイル

ここで、輝度プロファイルと鏡面部の面積率を位置方向で照合してみると図 4.1.14 のようになる。これによれば、鏡面部の面積率と欠陥のコントラストとの相関は明白である。

さらに、鏡面部の面積率と欠陥の輝度との関係を定量的に把握するために、面積率を横軸に、輝度を縦軸にとった両者の関係を図 4.1.15 に示す。これより、平坦部面積率と輝度はほぼ線形関係にあることが認められる。反射輝度は反射率に比例するので、(4-1), (4-2) 式の関係が確認された。欠陥 A においても同様の分析を行い、同様の関係が認められた。

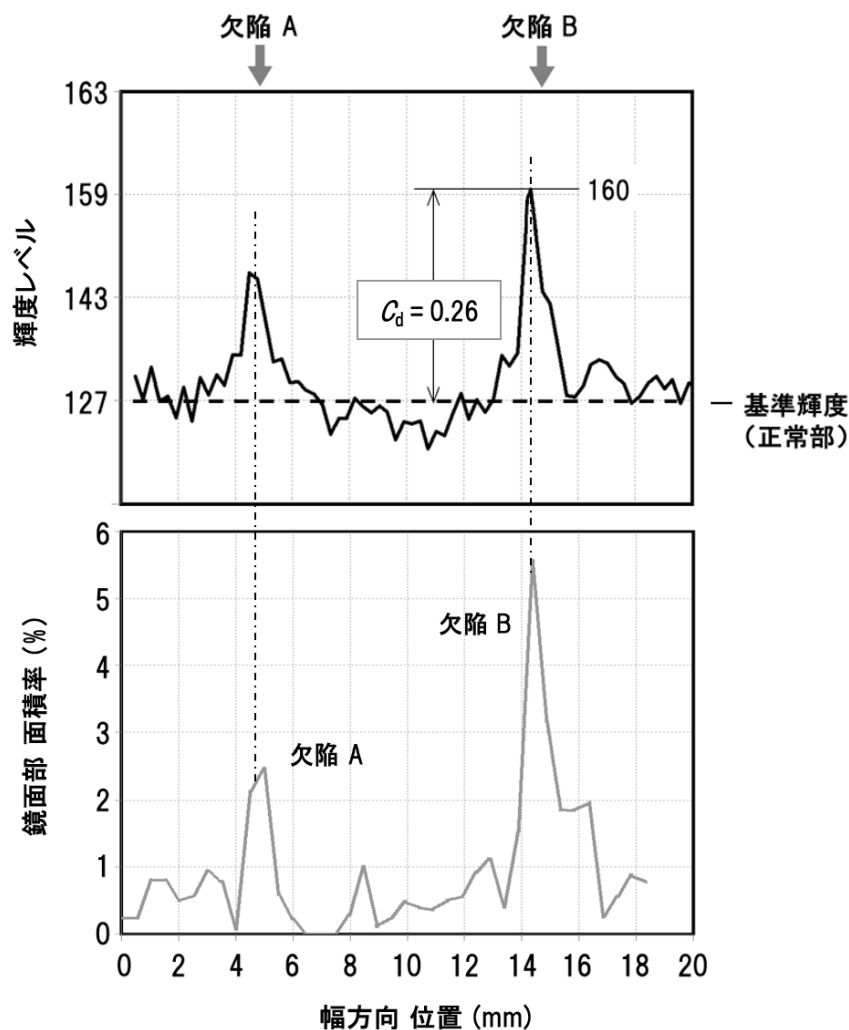


図 4.1.14 欠陥部の輝度と鏡面部面積率との位置相関

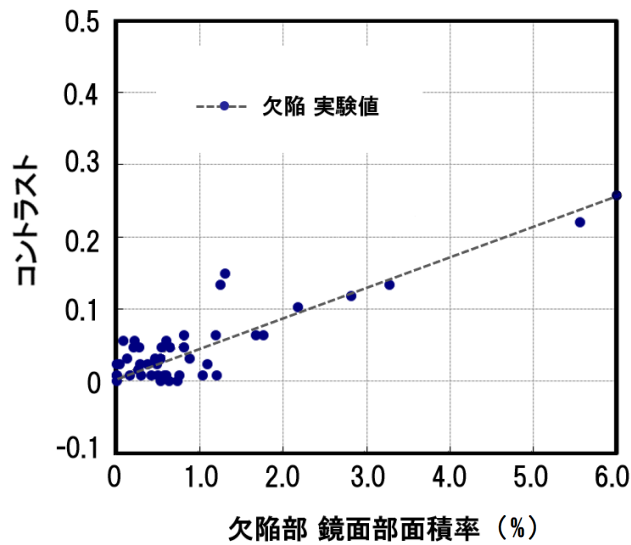


図 4.1.15 欠陥部における 鏡面部面積率 vs コントラスト

4-1-3. 欠陥部の反射率とコントラスト

以上の分析の結果，ここで初めて(4-2)式より欠陥部の実効反射率 R_{eff} が，また(4-2)，(4-3)式をより，正常部に対する欠陥部のコントラスト C_d の理論値を求めることができるようになった．そこで欠陥 B について，実効反射率ほか各種測定値から，コントラスト及び輝度を計算した結果を表 4.1 に示す．基本的な事項として GA の鏡面反射率 0.4(図 4.1.6 から得られる表 1.1 の 1 行目)がある．GA 正常部の粗面反射率の測定値は 0.034(同 4 行目)，欠陥部分が 0.054(同 3 行目)であり，従って計算で求められる欠陥 B コントラストは 0.60(同 5 行目)である．一方，図 4.1.12 の輝度プロファイルから求められる C_d 実測値は 0.26(同 6 行目)であった．また，欠陥 A についても同様の手続きを行った結果，コントラストの計算値は 0.28，実測値は 0.17 であった．

表 4.1 の結果において，コントラスト C_d は基準輝度 I_0 によって正規化された ± 1 のレンジ内の値である．従って，光の反射エネルギーとして輝度 0 ($C_d = -1$) から輝度 255 ($C_d = +1$) に換算すると，計算値が $1.6 / 2.0 \times 255 = 204$ 輝度(7 行目)，実測値は 160 輝度(8 行目)である．計算値と実測値に 20%程度の相違があるものの，図 4.1.5 のモデルによる鏡面部の反射率とその面積率から成る欠陥部の実効的反射率が，マクロに測定される輝度と線形関係にあり，これがマクロに観察される欠陥部のコントラストの主要因であることが確認できる結果が得られた．すなわち，欠陥部が見える理由が説明できた．

表.4.1 欠陥部 B のコントラスト計算の数値表.

1	GA 反射率 (鏡面) R_{GA}	0.400	GA鏡面の実測複屈折率 $N = 2.2 + 2.2i$ と (4-7),(4-8),(4-9) 式からの計算値.
2	欠陥部 ファセット面積率 (ピーク位置) g	0.055	実測値.
3	欠陥部 実効反射率 R_{eff}	0.054	(4-2)式からの計算値.
4	GA 正反射率 (正常部) R_N	0.034	実測値. (60°)
5	欠陥部 コントラスト 計算値 C_d	0.60	以上の手順後, (4-3)式からの計算値.
6	欠陥部 コントラスト 実測値	0.26	図4.1.8 画像, 図4.1.13グラフからの実測値.
7	欠陥部 輝度 計算値	204	C_d より輝度値へ換算.
8	欠陥部 輝度 実測値	160	図4.1.13 における実測値.

一方, このモデルによる輝度の見積値は欠陥 A, B どちらについても実測値より大きい値で計算されている. これには以下のような理由が考えられる.

- 1) 鏡面部には, まだ拡散要素が残っており, 鏡面部を完全鏡面と仮定した計算値に対し実効反射率が低い.
- 2) モデル計算は平坦部が完全に鋼板表面に平行と仮定しているが, 実際は角度にバラツキがあり, 正反射として観測されない部分がある.
- 3) 平坦部の抽出画像処理において, しきい値の決定方法, サンプル位置の代表性のバラツキ排除等が十分でない. こうした項目は今後の検討課題である.

4-2. 油痕部の光反射特性とコントラスト

次に、通常の光学系において欠陥検出を行う際に、過剰な検出の要因となる油痕部の反射輝度とコントラストについて考察する。

4-2-1. 油の付着量とコントラストの確認実験

3-2 節における分析とモデルのとおり、油が GA 表面に付着すると表面に平行な鏡面群が形成され、ある面積率をもって正反射に貢献すると考えられる。GA 表面のストラクチャは極めて複雑であるため、観察されるとおりを幾何学モデルとして厳密に構築することは困難であろうと思われる。そこで先ず、油痕の主要因である圧延油の GA 表面への付着量とコントラストの関係を実験的に確認してみる。GA 表面における極微量の油付着量は、 $1\mu\text{m}$ 前後またはそれ以上である^{4-2),4-3)}。鋼板表面のごく微量の油計測は、レーザ励起式などオンラインで使用可能な方法⁴⁻⁴⁾ もがあるが、付着量換算で数 g/m^2 であり、原液のまま塗布することが困難な少量であるため、有機溶剤で希釈して付着させる方法を採用した⁴⁻⁵⁾。

先ず、ごく薄い油膜を生成するために、図 4.2.1 に示す方法で実験を行った。実験手順は以下の通りである。

- (1) GA 上に 8~12mm ϕ の穴をくり抜いた厚さ 2mm のビニールシートを密着させる。
- (2) 揮発性有機溶剤にて目標膜厚に対応する濃度に希釈した油液を、くり抜き部分に滴下する。溶剤が乾燥すると、くり抜き部分に油のみが残る。
- (3) 希釈濃度、滴下量、くり抜き穴の直径を調整することで所望の付着量を得る。
- (4) ビニールシートを剥がし、図 3.1.3 の光学系にて付着部分の正反射画像を採取。
- (5) 実験値の範囲

希釈濃度 ; 50 - 500 倍, 滴下量 ; 0.03 - 0.05mL, 付着量 ; 5 水準

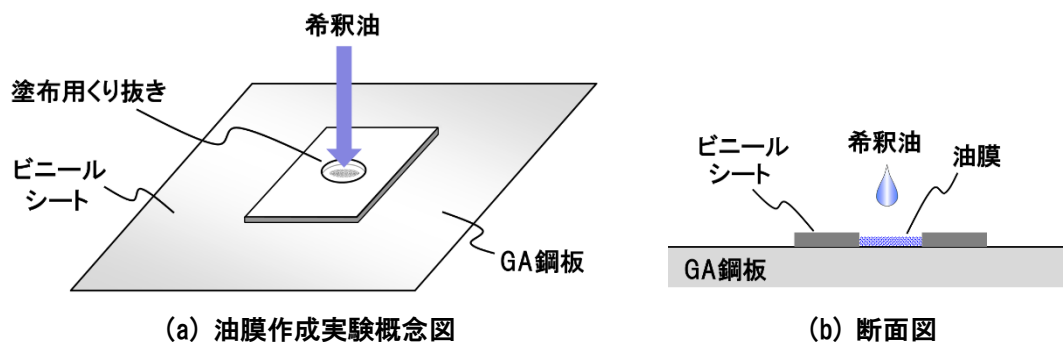


図 4.2.1 GA 表面への極薄油膜付着実験

以上の実験によって油を薄く付着させたサンプルについて、投受光 60° 正反射の画像を採取した結果を図 4.2.2 に示す。(a)～(e)へ次第に油付着量を増加させており、膜厚の増加に伴って反射輝度も増加することが画像の目視でも確認できる。

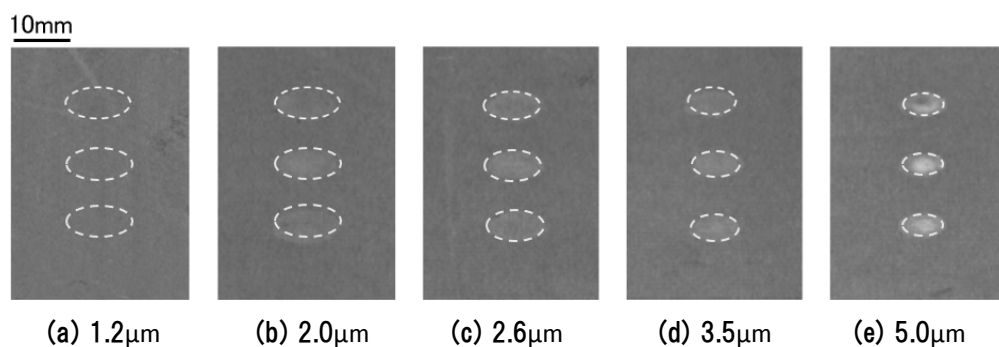


図 4.2.2 GA 表面への油付着実験画像
(楕円点線は油付着箇所を示すマーカー)

各膜厚水準において3箇所ずつ付着させ、(a)～(e)における白い楕円内の輝度データを採取し、希釈濃度と塗布面積から換算した平均油膜厚を横軸に、輝度をGA正常部とのコントラストに換算して縦軸にとった実験結果を図 4.2.3 に示す。油の付着量の増加に伴ってコントラストが増加することがわかる。

GAの表面及び表層下の構造は入り組んでおり、表面側から観察すると深い複雑な穴状の構造も多数見られる。Fe-Zn合金の結晶の成長方向はランダムであって、互いの結晶間に空隙

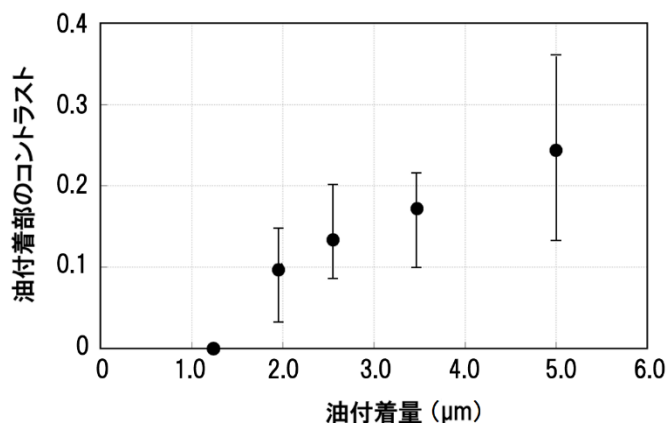


図 4.2.3 GA 表面への油付着量 vs 油部のコントラスト

が見られ、結果的に穴状構造が生成されるとみてよい。すなわち油部分の断面モデルとしては、図 4.2.4 のように、油がごく少量の場合は図 4.2.4(b) のように表面下の空隙に油が溜まるため、GA 表面で油が光を反射する面積は小さく、付着量が増すと 4.2.4(c) のように油面上昇して光を反射する面積が増加し、コントラストが高くなるモデルが、より実際の付着現象を的確に説明できる。図 4.2.3 において、付着量 $1\mu\text{m}$ までコントラストが現れないのは、以上の理由と推察される。また、油膜厚 $5\mu\text{m}$ におけるコントラスト $C_{oil}=0.24$ である。

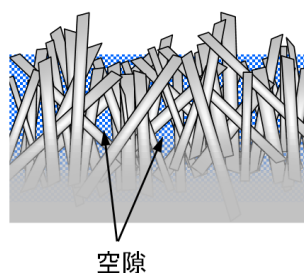


図 4.2.4(a) GA 表層における油付着の様子 推定図

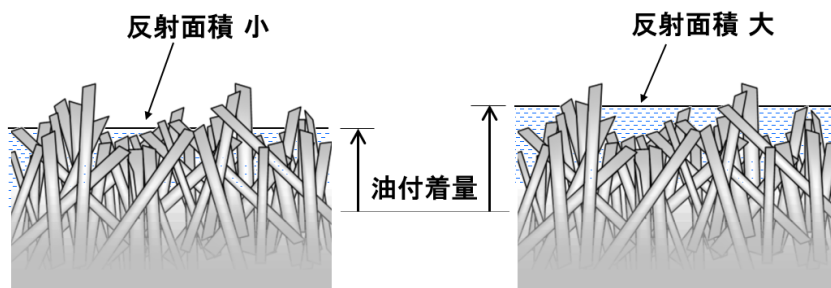


図 4.2.4(b) 空隙充填後の油付着量と鏡面反射面積の関係

ここで、油痕部の鏡面反射に寄与する平坦部が、どの程度の面積率をもっているのかを、3-2-2 節に続いて環境制御型 SEM を用いて計測してみる。手順としては、SEM 像から得られる油による平坦部分の面積率を求める方法を探る。

図 4.2.5 に、GA 表面に 5 μm の油を付着させた部分(図 4.2.2(d))，を加速電圧 5kV の環境制御型 SEM によって採取した像と輝度プロファイルを示す． 図 4.2.5(a)は，通常の SEM における加速電圧 30kV の像であり，複雑な結晶群による表面構造の深部まで写っていて，輝度プロファイルにも凹凸の様子がみえる．

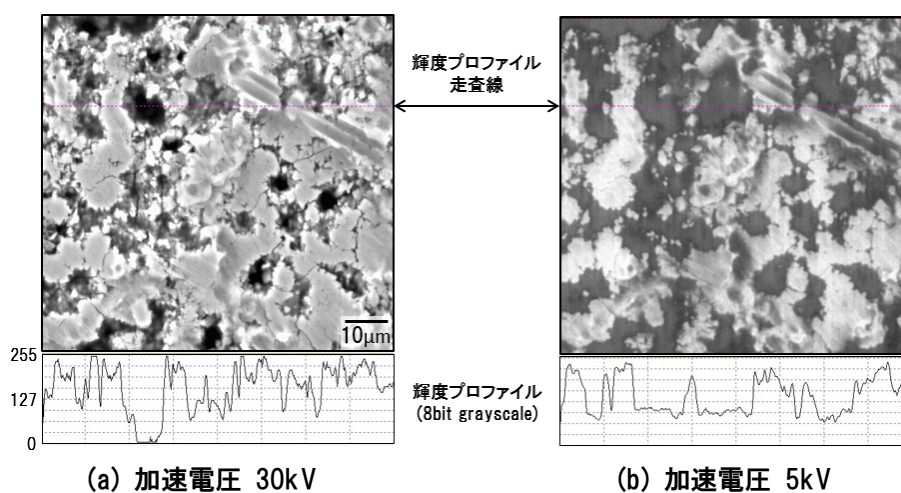


図 4.2.5 環境制御型 SEM による GA 油付着部の観察像

一方，図 4.2.5(b)は加速電圧 5kV の像である． 環境制御型 SEM 画像においては同一の材料は同一輝度レベルで撮像されるため，図 4.2.5(b)には濃いグレーの，谷を埋めた湖のような箇所が多くみられ，輝度プロファイルにおいてもフラットな箇所が見られる． すなわち，付着した油が複雑なストラクチャを部分的に埋め，鏡面要素群を構成している様子が見えていと解釈できる．

この画像より，平坦部を示す輝度範囲 62~128 を抽出(図 4.2.6(a))し，全画素数に対する抽出部分の合計画素数の割合を求めることで，油付着部における鏡面要素の面積率を計算した． ただし SEM 画像には孤立のスパイクノイズがあるため，輝度範囲を超える孤立点の除去と，像のボケサイズに応じて 4 画素以内の空隙を埋めるフィルアウト処理を加えた． 結果，画像の総画素数 262144 に対し，白抜き部すなわち鏡面部の合計画素数は 79692 であった． 従って鏡面部の面積率として $79692 / 262144 \times 100 = 30.4\%$ が得られた⁴⁻⁵⁾．

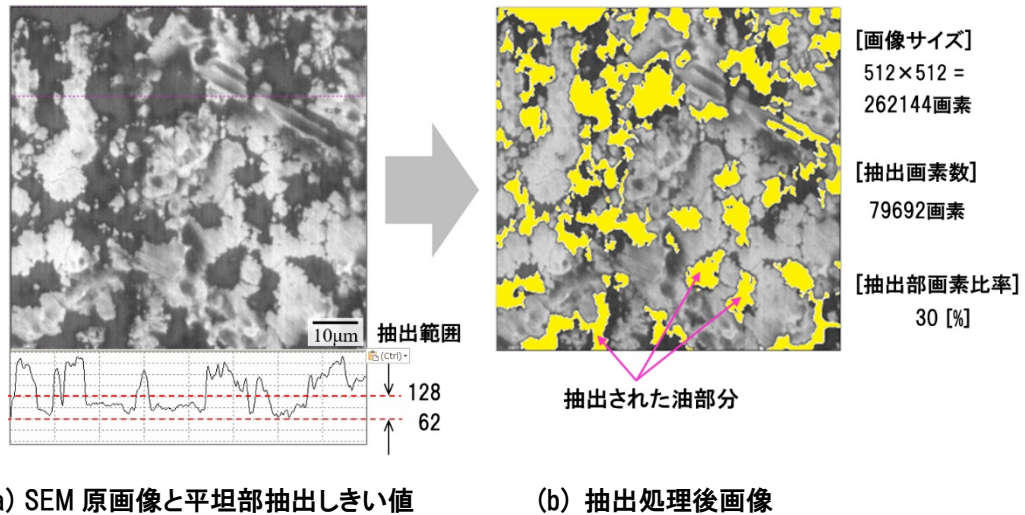


図 4.2.6 油痕部の油溜まりによる鏡面要素の面積率測定

4-2-2. 油付着実験の考察

以上の実験の結果、図 4.2.3 における油付着 $5\mu\text{m}$ では、コントラスト $C_{oil} = 0.24$ 、その部分の鏡面部の面積率は 30%であった。一方で、図 4.1.15 の欠陥部とコントラストの関係をみると、グラフ右端の鏡面部面積率 6%の油部のコントラストは 0.26 である。この値は油付着 $5\mu\text{m}$ におけるコントラスト 0.24 に近い。これら数値の関係を表 4.2 に整理した。

欠陥部と油部のコントラストをほぼ同等の値とみなすと、油部鏡面部の面積率は欠陥部の 5 倍大きい。GA 鏡面の反射率 R_{GA} と油の反射率 R_{oil} との比は、

$$R_{GA} / R_{oil} = 0.40 / 0.078 = 5.1$$

であって、表 4.2 に示すとおり面積率の倍率とほぼ一致する。すなわち、油の反射率が GA 鏡面の反射率に対し 1/5 であるにもかかわらず、欠陥部と同等のコントラストで観察される理由は、鏡面部の面積率が欠陥鏡面部の 5 倍程度を有し、結果として油部からの総反射光量と、欠陥部からの総反射光量が同等になることが要因であると説明できる。

表.4.2 同等コントラストにおける欠陥部と油付着部の数値及び倍率.

	欠陥部	油付着部	倍率
反射率	0.40	0.078	5.1 (欠陥/油)
鏡面部 面積率	0.06	0.30	5.0 (油/欠陥)
コントラスト	0.26	0.24	≈ 1.0

4-2-3. 油痕部のマイクロ構造モデル

前節において油付着部が欠陥部と同等のコントラストを成す要因を実験的に解明したが、鏡面部の面積率と正反射光量が成すコントラストは線形関係であるため、以上の説明は鏡面部の面積率に依存せず、より広いコントラストの範囲で成立すると考えられる。これについて本節では、GA 表面の粗さのモデルを用いて、油部鏡面部の面積率とコントラストの関係を導いてみる。

GA 表面は複雑な構造を有するが、触針式表面粗さ計による測定では算術平均粗さ R_a は $1\mu\text{m}$ 程度である。そこで、付着量に応じて溜まり部分の面積が変化する幾何学モデルとして、図 4.2.7 に示すような、ピラミッド状のピットすなわち、底辺が正方形の四角錐を交互に敷き詰めた構造などが考えられる。このストラクチャでは、付着した油は下向き四角錐のくぼみ部分に油が溜まり、付着量が増えるに従って反射面の面積が増える。

欠陥部の鏡面部は圧延によって形成されるものであり、GA 表面の多結晶構造からみて、ごく初期の鏡面部は結晶部が突出した部分であって、そこにロールによる圧加重が集中するために比較的容易に形成されるが、ある程度圧延されると、圧力が分散するために鏡面部の形成は鈍化すると推定される。一方、圧延油の付着においてはそのような制限はなく、着いた分だけ平坦部が形成されていくことは明らかである。従って圧延油が GA 表面に付着すれば、鏡面要素の面積率は容易に増加すると推察される。付着量が潤沢であれば、GA の表面ストラクチャを完全に埋め、油滴として容易に認識されるオブジェクトになるものと考えられる。そこで、この幾何学モデルを用いて、油の付着量と鏡面要素の面積率との関係、続いて反射輝度との関係について予備的な考察を行ってみる。

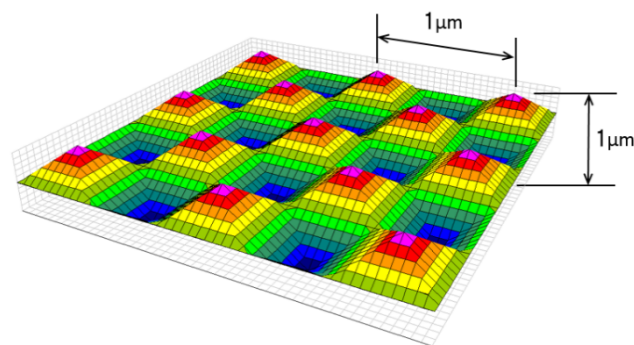


図 4.2.7 GA 表面の四角錐ピットモデル

まず、油痕部における光学反射モデルは、鏡面部の材質を除いて欠陥部と同じであるので、欠陥部の実行反射率を求める計算をそのまま適用できるとしてよい。すると、油による微小鏡面の反射率を R_{oil} 、その面積率を f とすれば、油部の実効反射率 $R_{eff,o}$ が(4-11)式によって計算され、正常部の反射率を R_n として油痕部のコントラスト C_{oil} は(4-12)式で求められる。

$$R_{eff,o} = f \cdot R_{oil} + (1 - f)R_n \quad \dots (4-11)$$

$$C_{oil} = \frac{R_{eff,o}}{R_n} = \frac{R_{oil}}{R_n} + (1 - f) \quad \dots (4-12)$$

ここで、鋼板の粗さの代表値として $Ra=L=1(\mu m)$ 、付着した油の平均厚さとして測定された代表値⁴⁻²⁾ $d=170nm=170 \times 10^{-9}$ (m) を用いれば、 $h=0.8\mu m$ であり、油部を平坦と仮定した場合の四角い pit の面積率として、 $g_{oil} = (0.8 \times 0.8) / 2 = 0.32$ が求められる。圧延油の平均反射率 R_{oil} は、代表的な圧延油の複素屈折率 $1.46 - 0.03i$ を用いて(4-7)、(4-8)、(4-9)式の変数を油部に置き換えて求められ、投受角度 60° において 0.078 である。(図 4.2.8)

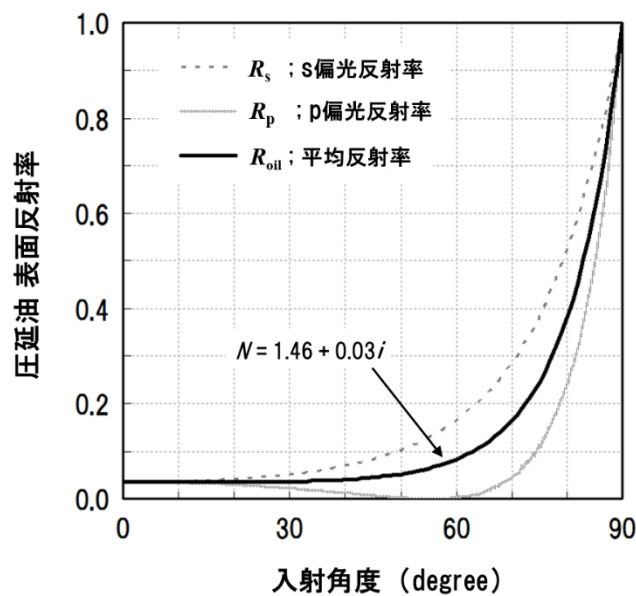


図 4.2.8 圧延油の反射率

正四角錐モデルにおいては、錐に溜まる油の体積 V と反射面すなわち底辺の四角の表面積 S とは $2/3$ 乗の比例関係(4-13)式にあり、油の付着量に伴って反射面積も線形よりやや緩やかに増加する。図 4.2.3 にはそのような傾向がみられる。(Appendix A-3)

$$V \propto S^{\frac{2}{3}} \quad \dots (4-13)$$

以上を用いて四角錐ストラクチャにおける圧延油の面積率とコントラストの計算値を、図 4.1.4 に追記したグラフが、図 4.2.9 である。図には 4-2-1 節における油部の環境制御型 SEM による観察の結果得られた $5\mu\text{m}$ の油付着量における油部鏡面部面積率 30% のプロット(右端の白抜きの丸)も印した。図の実線が計算値であり、図 4.2.7 は簡易なモデルであるものの、実験的に求めた欠陥部の鏡面部面積率 vs コントラストの関係と、モデルによって求めた油部の鏡面部面積率 vs コントラストの関係が近いレンジにあるという結果を示した。この結果は 4-2-1 節の実験結果を支持するほか、今後 GA 以外の鋼板表面における欠陥以外のオブジェクトのコントラストの見積もりに有効と考えられる。

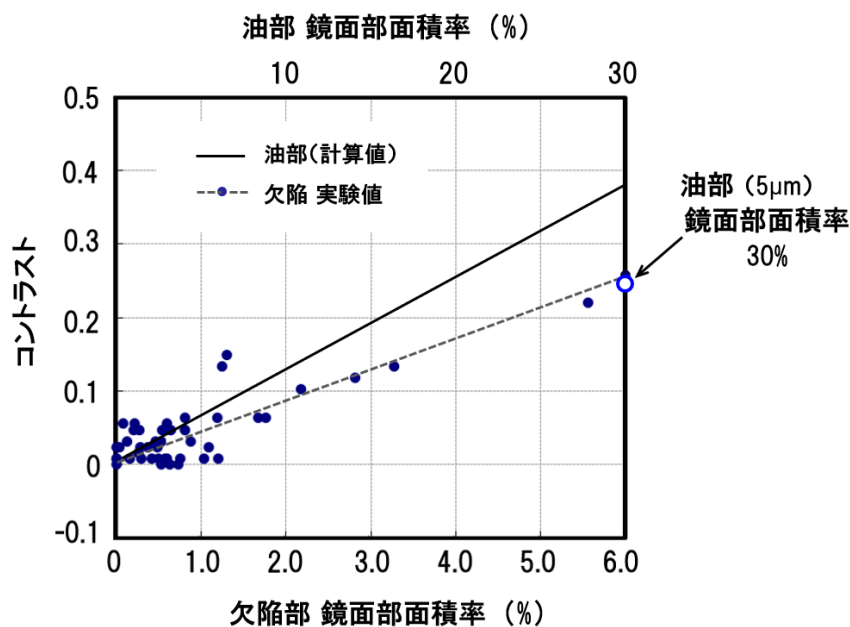


図 4.2.9 欠陥及び圧延油の鏡面部面積率とコントラスト

4-3. マクロ観察における欠陥の輝度に関する考察

4-1 節において、欠陥の表面性状について分析を行い、正反射における欠陥のコントラストの定量的な説明が成された。一方、欠陥部が通常の室内照明下の観察では、多くの観察角度において正常部に対し正極性すなわち明るく観察される明確な原因は不明であった。ここで、4-1 節の知見に基づいてその理由を考察する。

まず、欠陥部には正常部に対し反射率の高い鏡面ファセット群が存在し、その反射率の比は、例えば欠陥 B では 12.5 倍である。これは欠陥部の鏡面ファセット群が実効的な正反射率を高めているためであり、欠陥のわずかなコントラストを形成する。ここで、**図 4.3.1** のように満遍なく周囲光がある光学的条件の下で欠陥部を観察する状態を考えてみる。正常部は拡散反射であって反射率は低く、欠陥部は鏡面反射要素を有して正反射率が正常部に対し 10 倍程度高いものとする。すると、欠陥部については、どのような角度からの周囲光も拡散反射である正常部からの反射輝度より 10 倍程度高いレベルで観察者の視野へ届くと考えられる。そして、この状況は法線方向から外れた角度で鋼板を観察しても同様である。すなわち、**図 4.3.1** のように均一な周囲光の下、反射率の低い正常部に反射率が高い鏡面部が面に並行に存在すれば、その部分はどのような角度から見ても相対的に明るく見えるはずであり、その部分のコントラストは正常部との実効反射率の比に依存すると考えられる。従来、通常の室内照明下において GA 表面の欠陥が正常部に対し相対的に正極性で観察される理由は以上のように説明できる。

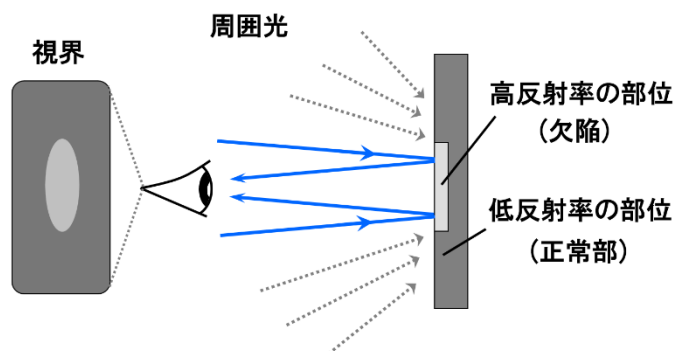


図 4.3.1 低い正反射率領域にある高い正反射率領域の見え方 概念図

この説明を、3D レンダリングツールを用いて検証してみた。(Appendix. A-4 参照)

図 4.3.1 のモデルを、レンダリングにおけるモデルとして以下のように設定した。(図 4.3.2)

- (1) 正常部；反射率 0.04 の鉄の粗面(低反射率)
- (2) 欠陥部；反射率 0.4 の鉄の鏡面(高反射率)
- (3) 照明環境；上方全面に拡散照明

この空間内においてサンプルを水平から 60° の角度で法線方向から観察した場合と、 10° 倒した場合、 30° 倒した場合、及び適当な角度で斜めに観察した場合にどのように観察されるかをシミュレートした。結果を図 4.3.3 に示す。これによれば、欠陥部は正極性に観察され、正面観察から角度を倒すと欠陥部のコントラストが小さくなる点も再現されており、図 4.1.1 のモデルと説明の正しさを裏付ける。

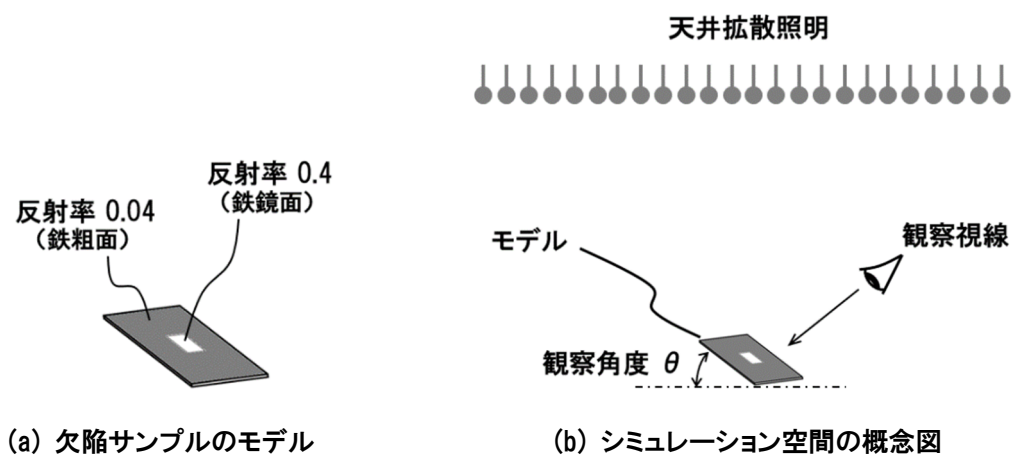


図 4.3.2 GA 欠陥の 3D レンダリングシミュレーションのモデル

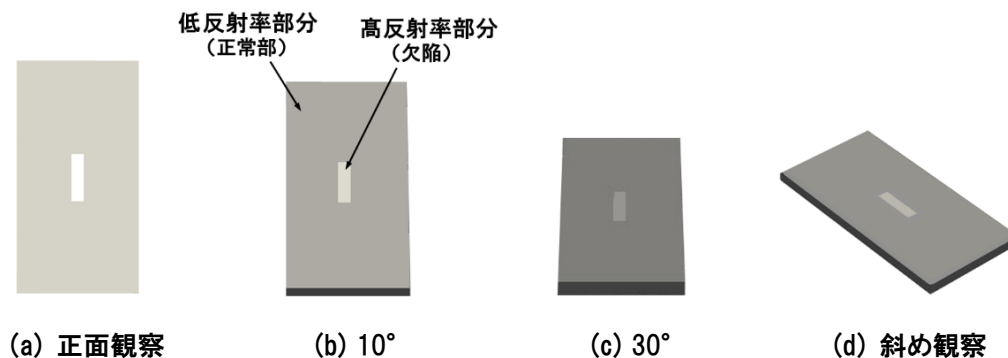


図 4.3.3 3D レンダリングモデルによる GA 欠陥の見え方の検証結果

一方、GA 表面に圧延油が GA の針状結晶群を覆うほどに十分付着すると、通常照明下においては、照明との正反射条件で観察しない限り、図 4.3.4(a)のように正常部に対し負極性で観察される。これは、図 4.3.3(b)に示すように、GA 表面に液体が付着すると、表面反射率が低いこと、及び界面下に入り込んだ光は複雑なストラクチャに吸収され、表面へ戻って来ないことによると推察される。ただし、4-2 節の考察の通り、付着量が針状結晶を覆うまでの量でない場合は、GA の反射光量との大小が拮抗し、欠陥と同様に面積率に依存して欠陥との識別が困難なコントラストを形成して過剰検出の要因になると考えられる。



(a) 通常照明下における外観の観察例

(b) 油部に入射し吸収される光路の推定図

図 4.3.4 GA 表面への圧延油付着の観察例と光学モデル

4-4. 第4章まとめ

本章では、介在物起因の模様状の表面欠陥について、マイクロ構造とマクロな観察像との関係进行分析し、以下のことが得られた。

- (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) 平坦部を鏡面であると仮定し、欠陥部の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が成された。
- (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行反射率を求めた結果、欠陥部の実行反射率と同オーダーであることが示された。
- (4) 欠陥部と油部の実効反射率は、互いに近い領域に存在している。
- (5) 油の絶対反射率は欠陥鏡面部の1/5であるが、面積率では5倍程度であり、それによって欠陥部と同等の光量を反射するため、欠陥と同等のコントラストを成す。

第4章の結論として、油痕部が欠陥と同程度のコントラストを成す主要因は、油付着部における鏡面部の面積率が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成すことが主要因であるという事実を明らかになった。(図4.4.1)

以上、本章において判明した油痕のコントラストの生成及び欠陥のコントラストと同様のレベルをしめす原因は、従来の画像による表面検査において課題であった油跡の過剰な検出の原因を説明するものであり、これまでは知られていなかった新たな知見である。

光学反射モデル	欠陥部	油付着部	倍率
	鏡面 + 拡散	鏡面 + 拡散	
反射率	0.40	0.078	5.1 (欠陥/油)
鏡面部 面積率	0.06	0.30	5.0 (油/欠陥)
コントラスト	0.26	0.24	≈ 1.0

図 4.4.1 欠陥部と油痕部の反射パラメータとコントラスト

第4章 参考文献

- 4-1) A. Kazama and T. Oshige, "Correlation of Optical Microstructure and Macroscopic Intensity of Defects on Steel Strip Surface," *ISIJ International*, Vol.54, No.8 (2014), 1843-1848.
- 4-2) A. Kazama and T. Oshige, "A defect inspection technique using polarized images for steel strip surface," *Proc. of SPIE*, 7072 (2008), 70720 L1-9.
- 4-3) 風間彰, 大重貴彦, 「複数方位の偏光イメージにおける相対的輝度特性を利用した鋼板表面検査技術」, 計測自動制御学会論文集, Vol.47, No.12 (2011), 591-596.
- 4-4) A.Torao, I.Yarita, Y.Yamashita, T.Yasumi : Portable Measuring Apparatus of Oil Film Thickness by Using Laser Fluorescence, IMEKO 15th World Congress, Osaka Japan (1999).
- 4-5) 風間彰, 河野崇史, 丹所昂平, 大重貴彦, 「鋼板表面における微小油部の微細構造と光反射特性」, 実験力学学会論文集, Vol.19, No.4 (2019), 327-331.

第4章 以上.

第5章 3種の方位角の偏光画像を用いた欠陥識別原理の提案

これまでに、欠陥部における主要な正反射要素は微小な鏡面部(群)であり、また油痕部(模様部)でも、GA のミクロな凹凸表面が油によって部分的に埋められた鏡面要素群が主要な正反射要素であることが判明した。

この結果を踏まえ本章では、両者の光反射特性を偏光の側面から詳細に分析し、マクロな観察においてどのような相違が生じるかを理論と実験によって考察する。そして、その結果を基に欠陥部、油痕部それぞれの偏光反射特性の相違を利用した両者の明確な識別方法を提案する。

5-1. 金属面と誘電体面における偏光反射の予備考察

欠陥部と油痕部の光学モデルにおいて、相違は鏡面反射部分の材質である。正常部と欠陥部では、表面ストラクチャが異なるものの両者共に Fe-Zn 合金の金属面反射であり、一方で油部は誘電体液体による表面反射であった。両者は通常の光学系では区別が付きにくい、反射に寄与する物質が異なっているため、複素屈折率の相違から偏光の観点からは反射特性が異なると予想される。一般に金属表面における電磁波の反射では、吸収によって p, s 偏光成分の間に位相差が生じ、法線面から傾いた方位角の直線偏光は楕円偏光となって反射される。一方、油等の誘電体表面の反射では位相差が生じないため、直線偏光のまま反射される。金属である GA と、誘電体である油の偏光反射について最も単純な表面反射のモデルで考えてみる。

図 5.1.1 は、横軸に波長 λ をとって、GA と圧延油の表面で光が反射する際の p, s 偏光成分間の位相差の計算値のグラフである。GA の表面反射では位相差が生じ、反射光電界ベクトルの p, s 成分の合成ベクトル(リサーチ)は楕円を描く。油の表面反射光では位相差がなく、入射光が直線偏光であれば直線偏光のまま反射される。これを p, s 成分の合成ベクトルのリサーチとして模式的に描いた図が図 5.1.2 である。圧延油からの反射光は直線偏光に近いための合成電界ベクトル(実線)は偏光方位角に沿って大きく変化するが、GA 表面からの反射光(破線)は楕円偏光であるため、ベクトル軌跡の変化は相対的に緩やかである。

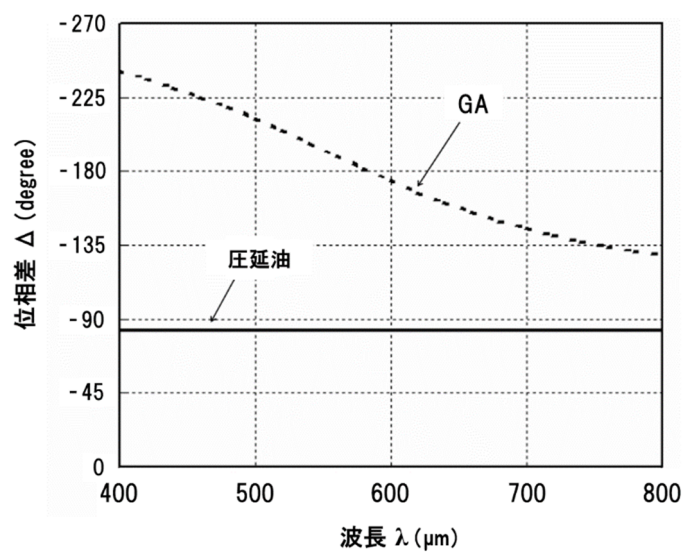


図 5.1.1 GA と圧延油の表面反射における p,s 偏光位相差 (入射角 60° , GA; 2.2-2.2i, 油; 1.46-i0.03)

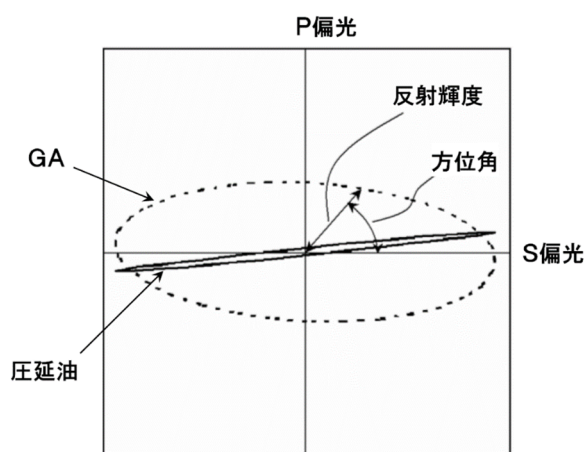


図 5.1.2 GA と圧延油の反射楕円偏光 模式図

以上の予備的考察から、GA と油との偏光反射特性の相違が推定できる。GA 表面自体は拡散面であるが、欠陥部、油痕部共に鏡面性を有しているため偏光反射の特性は金属と誘電体のそれぞれの特徴を保持しているものと予想し、以降さらに詳細な分析を行う。

5-2. 金属面と誘電体面における偏光反射特性の分析

欠陥部における正反射は粗面と微小かつ表面と平行な鏡面ファセットが混合したものであり、粗面における反射光の扱いについては多くの考察^{5-1), 5-2), 5-3), 5-4), 5-5)}があるが、4-2節で明らかになったとおり、鏡面である欠陥部と油分との相対的な反射光強度が同じオーダーであること、及びGA表面正常部とGA鏡面の正反射率とでは10倍程度の差があることを勘案し、本研究の理論解析では欠陥部と油痕部の反射を完全偏光とみなして、Jones'ベクトルと回転検光子法^{5-6), 5-7), 5-8)}に用いられる装置構成による反射光の解析を試みる。

5-2-1. 偏光反射モデルの理論式

まず、表面の反射光強度が方位角に沿ってどのような反射光輝度の軌跡を示すかを考察してみる⁵⁻⁹⁾。GA鏡面の偏光反射を考えると、入射光が表面で偏光の変化を受け、検光子を経て撮像素子に至り、受光される輝度として観測される。このモデルを図5.2.1に示す。

ここで入射光の偏光状態を表すベクトルを E_i 、表面反射による偏光状態の変化を表す行列を S 、偏光状態を調べる検光子の作用を R 、検出される偏光状態を E とする。以降の分析で多用する観測される光の反射強度 I は $|E|^2$ である。

ここで、図5.2.1における反射光ベクトル E は、

$$E = RSE_i \quad \dots (5-1)$$

と表され、これを基に回転検光子法における受光側検光子の方位角 θ_a における反射光強度 I が、どのように表されるかを求めてみる。

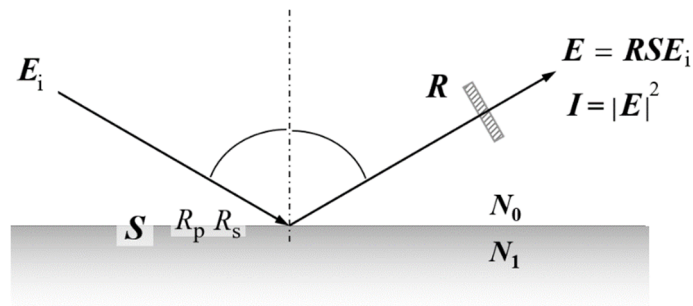


図 5.2.1 GA 鏡面の偏光反射モデル

E_i の p 偏光成分の電界振幅を E_p , s 偏光成分の電界振幅を E_s とすれば,

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \end{bmatrix} \quad \dots (5-2)$$

E_i の p, s 偏光成分の振幅比 $\tan P$ を,

$$\tan P = \left| \frac{E_s}{E_p} \right| \quad \dots (5-3)$$

とし, E_i の p, s 偏光の位相差を φ_i , 虚数単位を i として, χ_i を

$$\chi_i = \left| \frac{E_s}{E_p} \right| e^{i\varphi_i} = \tan P \cdot e^{i\varphi_i} \quad \dots (5-4)$$

とおくと, 入射光 E_i は(5-5)式で表現される.

$$\mathbf{E}_i = E_p \begin{bmatrix} 1 \\ \chi_i \end{bmatrix} \quad \dots (5-5)$$

また, GA 表面における p, s 偏光成分のフレネル反射率を R_p , R_s とおけば, 表面反射における偏光状態の変化を表す行列 \mathbf{S} は,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix} \quad \dots (5-6)$$

と表される. ここで, 反射される楕円偏光の傾きを $\tan \Psi$, 新たに生じる p 偏光と s 偏光との位相差を Δ とすると,

$$\rho = \left| \frac{R_s}{R_p} \right| = \tan \Psi \cdot e^{i\Delta} \quad \dots (5-7)$$

とにおいて, 鋼板表面反射における偏光の状態変化を表す行列 \mathbf{S} は以下の(5-8)式で表せる.

$$\mathbf{S} = R_s \begin{bmatrix} \rho & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (5-8)$$

Jones' ベクトルにおける方位角 θ_a における直線偏光検光子の作用 \mathbf{R} は、方位角 θ_a 方向の回転を表す行列、

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \dots (5-9)$$

を用いて以下のように表される。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(\theta_a) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}(-\theta_a) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_a & \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \sin \theta_a \cos \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \quad \dots (5-10)$$

これより、受光方位角 θ_a における鋼板表面からの反射光ベクトル \mathbf{E} は、

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{R} \mathbf{S} \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_a & \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \sin \theta_a \cos \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} R_s \begin{bmatrix} \rho & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} E_p \begin{bmatrix} 1 \\ \chi_i \end{bmatrix} \\ &= E_p R_s \begin{bmatrix} \rho \cdot \cos^2 \theta_a + \chi_i \cdot \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \rho \cdot \sin \theta_a \cos \theta_a + \chi_i \cdot \sin^2 \theta_a \end{bmatrix} \quad \dots (5-11) \end{aligned}$$

と表され、(5-11)式として方位角 θ_a の検光子を経た正反射光の電界ベクトル \mathbf{E} が得られる。そして、反射光強度 I は、 \mathbf{E} の絶対値を 2 乗することで求められる。(5-11)式の行列要素を、

$$\rho \cdot \cos^2 \theta_a + \chi_i \cdot \sin^2 \theta_a = A, \quad \rho \cdot \sin^2 \theta_a + \chi_i \cdot \cos^2 \theta_a = B$$

と置き、 \mathbf{E} の転置行列を \mathbf{E}^t 、複素共役行列を \mathbf{E}^* とすると、

$$I = |\mathbf{E}|^2 = \mathbf{E}^t \mathbf{E}^* = E_p^2 R_s^2 \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^* \\ B^* \end{bmatrix} = E_p^2 R_s^2 (AA^* + BB^*) \quad \dots (5-12)$$

である。ここで括弧内の複素共役部分は、以下の(5-13)式のようになる。

$$\begin{aligned} AA^* + BB^* &= \rho \rho^* \cos^4 \theta_a + \rho^* \chi_i \sin \theta_a \cos^3 \theta_a \\ &\quad + \rho \chi_i^* \sin \theta_a \cos^3 \theta_a + \chi_i \chi_i^* \sin^2 \theta_a \cos^2 \theta_a \\ &\quad + \rho \rho^* \sin^2 \theta_a \cos^2 \theta_a + \rho^* \chi_i \sin^3 \theta_a \cos \theta_a \\ &\quad + \rho \chi_i^* \sin^3 \theta_a \cos \theta_a + \chi_i \chi_i^* \sin^4 \theta_a \quad \dots (5-13) \end{aligned}$$

$\sin^2\theta_a + \cos^2\theta_a = 1$ を用いて(5-13)式の各項を整理すると,

$$AA^* + BB^* = \rho\rho^* \cos^2\theta_a + \chi_i\chi_i^* \sin\theta_a \cos\theta_a + (\rho\chi_i^* + \rho^*\chi_i) \sin\theta_a \cos\theta_a \quad \dots(5-13')$$

を得る。(5-4), (5-7)式より

$$\rho\rho^* = \tan^2\Psi, \quad \chi_i\chi_i^* = \tan^2P \quad \dots(5-14)$$

また, (5-13')式の第3項括弧内は, (5-4), (5-7)式とオイラーの式 $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ より,

$$\begin{aligned} (\rho\chi_i^* + \rho^*\chi_i) &= \tan\Psi \tan P (e^{i(\Delta-\varphi_i)} + e^{-i(\Delta-\varphi_i)}) \\ &= 2 \tan\Psi \tan P \cos(\Delta - \varphi_i) \end{aligned} \quad \dots(5-15)$$

従って(5-12), (5-13'), (5-15)式より最終的に,

$$\begin{aligned} I &= E_p^2 R_s^2 \{ \tan^2 P \sin^2\theta_a + \tan^2\Psi \cos^2\theta_a \\ &\quad + 2 \tan P \tan\Psi \sin\theta_a \cos\theta_a \cos(\Delta - \varphi_i) \} \end{aligned} \quad \dots(5-16)$$

が得られる。(5-16)式は, 図 5.2.1 の光学系において任意の方位角 θ_a における検光子を通した反射光強度 I を与える一般式と言える。

ここで, 入射光 E_i に, p, s 成分の振幅が等しく, また同位相であるため解析が容易な 45° 直線偏光を用いるとすると, I は(5-16)式に方位 $+45^\circ$, p, s 位相差 0 の直線偏光 $\tan P = 1$, $\varphi_i = 0$ を代入し,

$$\begin{aligned} I &= |E^2| \\ &= E_p^2 R_s^2 (\sin^2\theta_a + \tan^2\Psi \cos^2\theta_a + \tan\Psi \sin\theta_a \cos\theta_a \cos\Delta) \end{aligned} \quad \dots(5-16')$$

と表される。

(5-16')式を用いれば, GA 及び油部の鏡面反射において, 方位角によって反射輝度がどのように変化するのか, すなわち両者の偏光反射特性の基本的な相違が把握できると考えられる。図 5.2.2 は, (5-16')式の3個の項と反射光強度 I の関係を方位角方向に展開したグラフである。式中の Δ, Ψ には典型的な油付着量を想定した値を用いた。(5-2-2 節に詳述)

グラフ中の実線 I' は、(5-16')式より与えられる油部の反射強度 I を、GA の正常な部分の輝度によって方位角毎に正規化した値であり、画像における油部の輝度またはコントラストにあたる。グラフによれば I' は、横軸の受光方位角 0° 付近を挟んでコントラストの極性が逆になることがわかる。このとき I' の変化は太い点線で表した $\tan\Psi$ 、 $\cos\Delta$ 及び $\sin\theta_a \cos\theta_a$ 積の全ての偏光要素を含む第3項とほぼ同相であることから、入射 p, s 偏光との作用を表す第3項が、油部の反射光のコントラスト極性を支配していると解釈できる。

また、(5-16')式は、 $\Delta=0^\circ$ において第3項により I が θ_a に依存して最大の変化を示す。これは、油など誘電体の表面反射のように反射光が直線偏光またはそれに近い場合に偏光状態の変化を最も感度よく捉えられると解釈できる。次節以降、これを詳細に検証する。

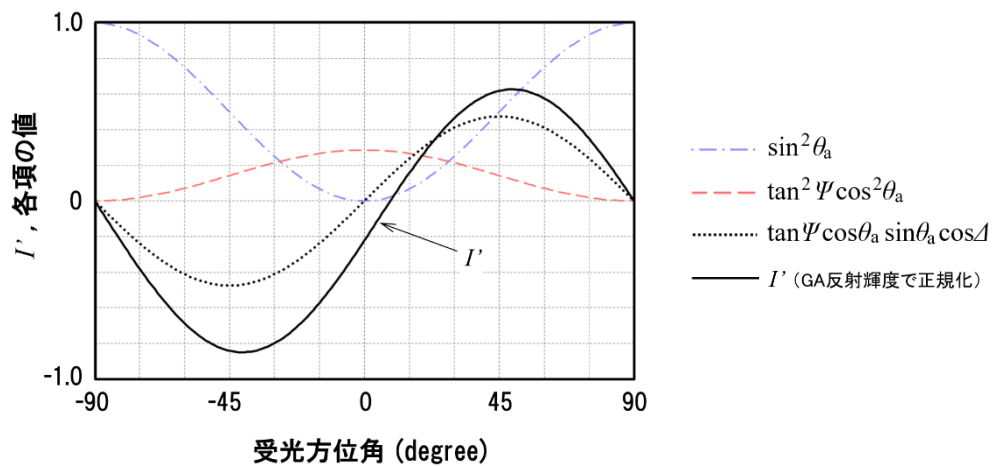


図 5.2.2 受光方位角に依存した反射光強度への(5-13')式各項の寄与

5-2-2. 偏光パラメータ Δ, Ψ の計算

(5-16')式を用いて方位角に依存した光反射強度の挙動を調べるためには、先ず反射光の偏光パラメータ Δ, Ψ を求める必要がある。ここで、GA 及び圧延油の代表的な光学常数を用いて Δ, Ψ を求め、方位角に沿った反射輝度の軌跡を計算してみる。光学常数は、鏡面加工したGA表面を分光エリプソメータ(J. A. Woolan社製)によって実測した複素屈折率 $N_2=2.2-2.2i$ を用いた。油痕部は、GA 表面の油膜による単層膜反射とする。実際の鋼板の油痕の厚さをレーザ蛍光による塗油計⁵⁻¹⁰⁾を用いて測定すると、濃い箇所では150~200nm程度のものである。そこで、鋼板表面に微量(170nm)の油膜がある場合を仮定し、偏光解析の均質単層膜モデル⁵⁻¹¹⁾を用いて Δ, Ψ を求めてみる。図 5.2.3 にモデルを示す。

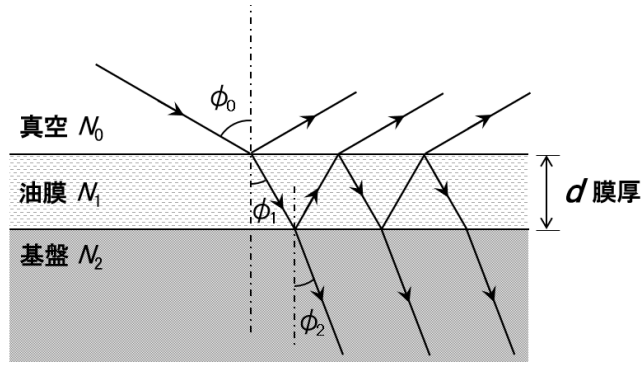


図 5.2.3 透明単層膜の反射率計算モデル

均質単層膜モデルでは、複素屈折率 N_2 の基盤上に複素屈折率 N_1 、厚さ d の均質な油膜があると仮定する。複素屈折率 $N_0 (= 1.0+0i)$ の空気から油膜への入射角度を ϕ_0 、油膜における屈折角度を ϕ_1 、油膜から基盤への屈折角度を ϕ_2 、光の波長を λ とすれば、以下の(5-17)、(5-18)式から、(5-16')式 の Δ, Ψ が計算できる⁵⁻¹⁾。

$$\tan \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{r_{01p} + r_{12p}e^{-2i\beta}}{1 + r_{01p}r_{12p}e^{-2i\beta}} \times \frac{1 + r_{01s}r_{12s}e^{-2i\beta}}{r_{01s} + r_{12s}e^{-2i\beta}} \quad \dots (5-17)$$

$$\beta = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda}\right) \times \sqrt{N_1^2 - N_0^2 \sin^2 \phi_0} = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda}\right) \times \sqrt{N_1^2 - \sin^2 \phi_0} \quad \dots (5-18)$$

こうして求められた Δ, Ψ を用い、(5-16')式より方位角 θ_a に沿った反射光輝度の軌跡を計算する。また、図 5.2.3 のモデルにおいて $d=0$ とし、 N_2, ϕ_2 をそれぞれ N_1, ϕ_1 に置き換えれば GA 鏡面の Δ, Ψ が求められる。

5-2-3. 方位角に沿った油痕部と正常部の光強度軌跡

以上の計算結果を図 5.2.4 に示す。実線が圧延油の反射光強度、破線が GA の反射強度の軌跡である。反射強度軌跡上の 1 点とその原点対象の点とを結んだ直線の長さが、その方位における反射光強度、すなわち偏光子を通した撮像素子で得られる信号の輝度を表している。

図 5.2.4 における正常部と油部との軌跡を比べると、相違は認められるものの、工業的適用の観点からは、両者の輝度差は僅かである。実際の製造工程においては、鋼板正常部の反射率は必ずしも安定ではなく、また多発する油付着において個々の厚みのバラツキも多い。

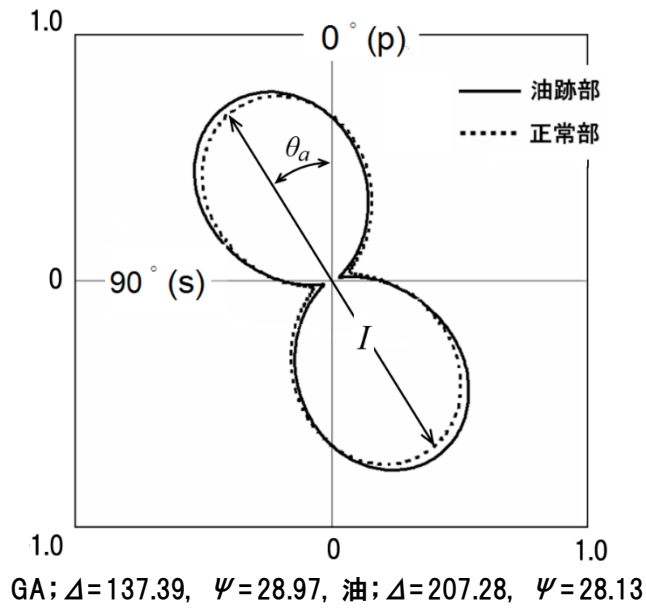


図 5.2.4 GA 鏡面及び油多重反射における 方位角に沿った偏光反射輝度の軌跡

従って、例えば一般的なラインセンサの 8bit グレースケール 256 階調の信号では、両者の
 確実な識別は困難であろうことが容易に推察される。そこで圧延油部の輝度を正常部の輝
 度で正規化してみる。正規化の手順は、2-2-3 節と同様であり、正常部の輝度が円となる。
 この操作の結果を図 5.2.5 に示す。

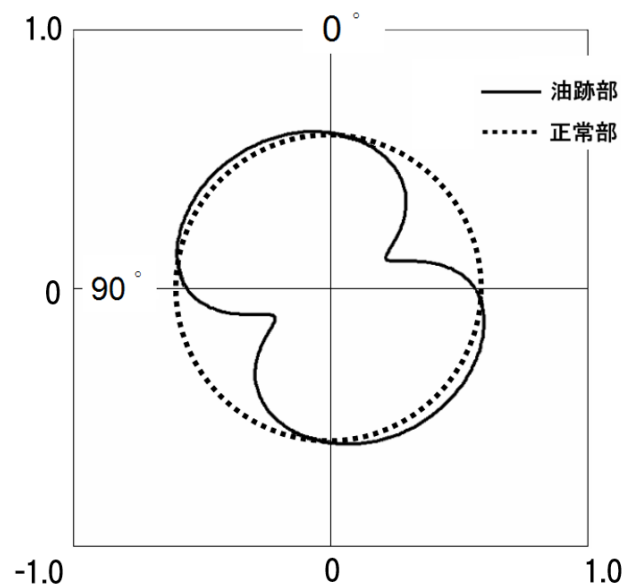


図 5.2.5 正常部の平均輝度で正規化した圧延油反射輝度の軌跡

輝度の正規化によって、正常部に対する油部の輝度の変化が拡大され捕らえやすくなった。これによれば、方位角 $0\sim+90^\circ$ では油部は正常部に対し明るい正極性であり、一方で $0\sim-90^\circ$ では正常部に対し暗い負極性を示すことがわかる。また、正規化した輝度信号であれば、8bit 256 階調の画像においても油部の変化を十分計測可能である。

5-3. 方位角に沿った偏光画像採取実験

ここで、前節において予想した(5-16')式から得られる方位角毎の輝度 I の軌跡を実測し、圧延油部の反射光の挙動がどのように変化するかを実験的に検証する。

実験光学系は、図 3.1.2, 図 3.1.3 と同様であるが、正反射位置のラインセンサーカメラのみを用いる。リニアステージによって光路方向に移動する鋼板サンプル表面からの反射光を、検光子となる偏光フィルタを通してラインセンサーカメラで撮像し、カメラのリニアアレイセンサーからの信号をステージの移動 0.2mm 毎の位置信号に同期させて画像メモリに書き込み、サンプル表面の画像を再構成する。サンプル全体の撮像が終わったところで検光子を 1 度回転させ、同様の撮像を繰り返して方位角毎の画像を撮像する。方位 1 度のステップで自動的に回転させて方位毎の偏光イメージを自動的に採取する機能をもたせた。計測システムの概要を図 5.3.1 に示す。

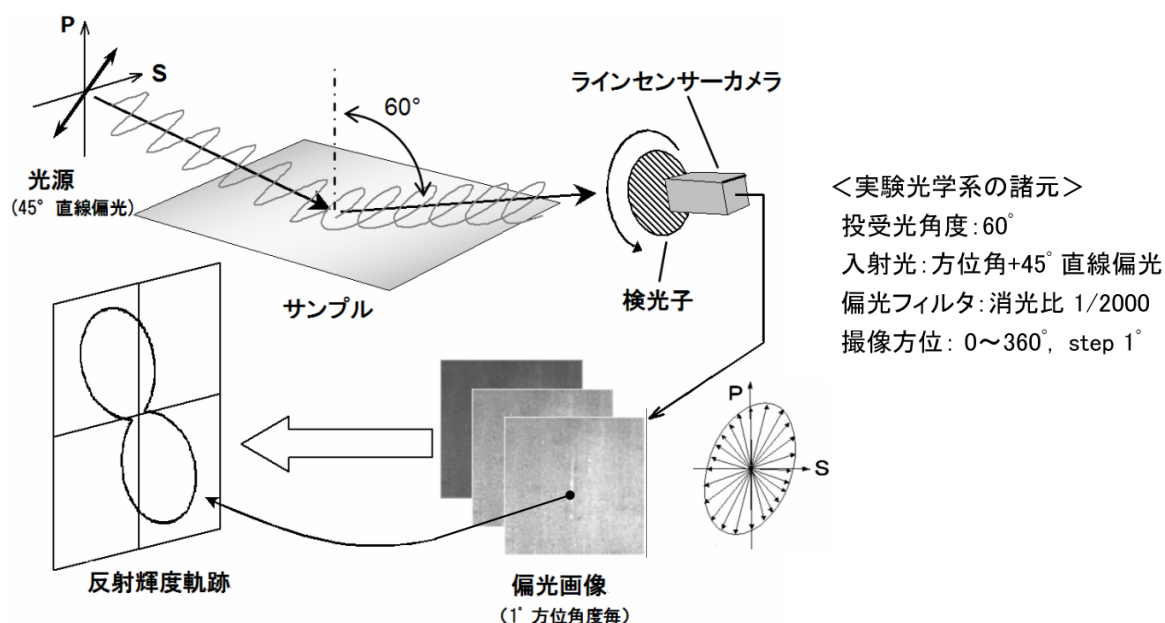


図 5.3.1 方位角毎の偏光画像採取実験系概略

また、以上の方法によって得られた方位角 $-90^{\circ} \sim +115^{\circ}$ 、 5° 毎の偏光イメージを図 5.3.2 に示す。サンプル鋼板上には 2 体のオブジェクトがあり、左は最も厚い箇所約 $2\mu\text{m}$ 相当の圧延油を人工的に付着させた油痕、右は実際の欠陥である。

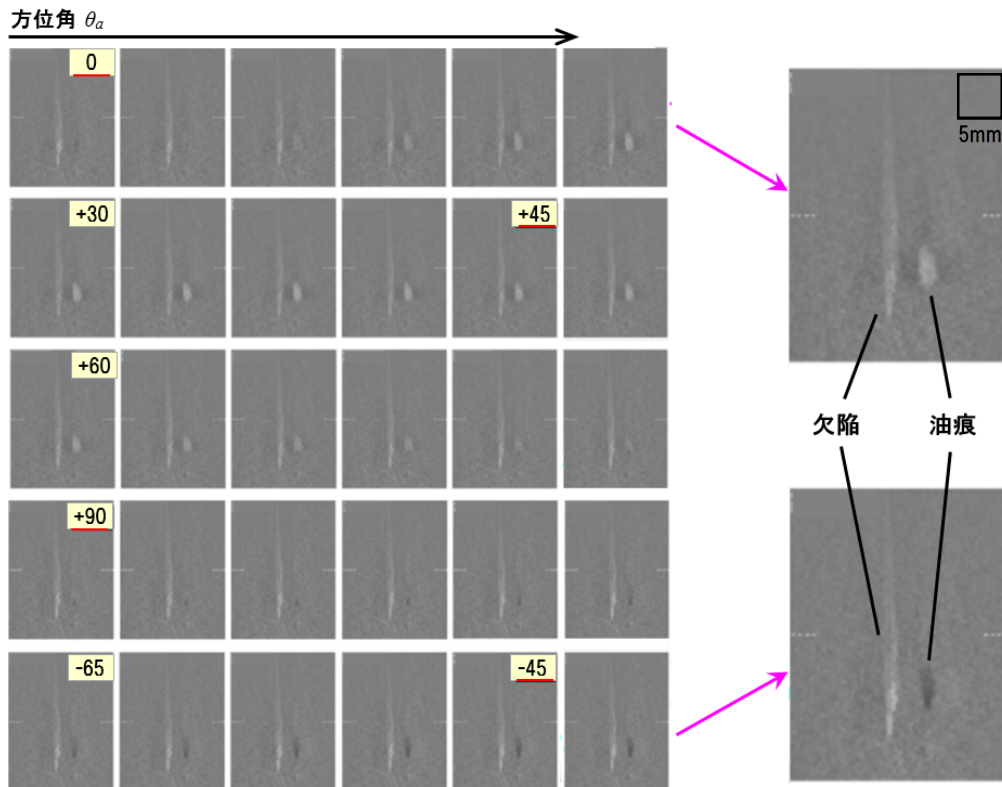


図 5.3.2 欠陥及び油部の方位角毎の偏光画像採取例

5-4. 実験結果の考察

図 5.3.2 を観察すると、方位角に依存した圧延油部分のコントラスト極性の変化は明瞭であり、 $+45^{\circ}$ 付近では正極性、 -45° 付近では負極性、そして 0° 及び 90° 付近ではコントラストを失っている。図 5.3.1 で得られた欠陥部における特定の位置に関し、方位角の極座標に輝度を原点からの距離としてプロットすることで、計算で予測した図 5.1.6 と同様の方位角に沿った輝度の軌跡が得られる。こうして得られた軌跡を図 5.4.1 に示す。

ここで、正常部は点線の円、図 5.4.1(a) のソリッド線が欠陥部、(b) のソリッド線が油部である。図 5.4.1(a) において、欠陥部が正常部に対し常に正極性である理由は 3-1-1 節で考察したように、鏡面ファセット群を有することにより正常部に比べて実効的な反射率が高

くなるためである。従ってこの傾向は方位に依存せず、かつ反射光は楕円偏光であるため、反射輝度の軌跡の形状は円に近い。そのため正常部に対する欠陥の輝度差が小さくなる場合、すなわち鏡面部の面積率が減少して正常部に近づく場合は、どの方位においてもほぼ均等に正常部との輝度差が減少していくものと予想される。

一方、図 5.4.1(b) の圧延油では、図 5.2.4 から予測された通り、方位に依存して正常部と交差し極性(明暗)が変わること、及びその方位も計算とほぼ同一であることが確認できる。

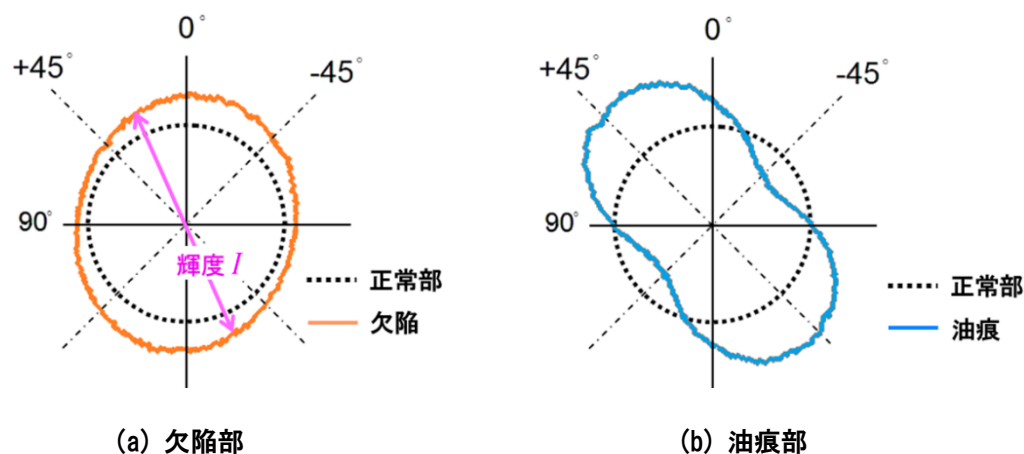


図 5.4.1 各部の方位角に沿った反射輝度 I の軌跡

油部の軌跡は、図 5.4.1(b) にみられるように斜めに長い形状である。すると、油が薄くなって正常部に近づき、輝度差が減少していくとき、 $+45^\circ$ 方向には最後まで輝度差が残るものと考えられる。実際に油の薄い部分について図 5.4.2 のような軌跡が観測された。このような現象は、正常部との輝度差が小さい信号について、それが油であることを識別する上で有効である。

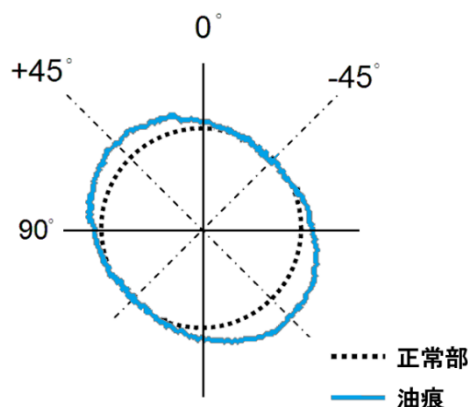
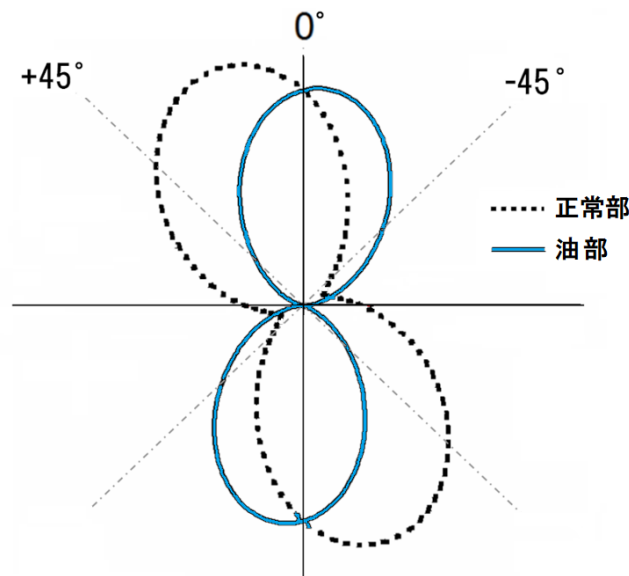


図 5.4.2 油の薄い部分の輝度軌跡例

なお、図 5.4.1(b)の軌跡の形が計算と異なる主な理由は、計算は鏡面のみについての理想状態の計算であるのに対し、実験は表面粗さによる拡散を含んでおり、反射光の偏光度が低くなることで、偏光としての変化が解消されることが主要因と考えられる。また油痕が完全な膜ではないために、完全偏光を想定した(5-16')式等との相違が生じることも原因と推定される。さらに、油部の実態は部分的な油による鏡面要素であることが確認できたが、一方で非常に薄い油が GA の鏡面部にも残存している可能性は高く、従って油部の反射特性は両者の複合的な結果であると考えられる。これに関連する事項として、偏光方位角に対する油痕部の明暗極性については、これまでに 2 種のパターンが見出されている。ひとつは図 5.1.6 にみるように、+45° 方向において正常部より明るくなるもの、もうひとつは逆に +45° 方向において暗くなるものである。図 5.1.4 のような透明単層膜モデルでは、膜の厚さによって反射光の偏光状態が変化するため、特定方位角における反射光の輝度が変化することは当然と考えられるが、一方で、油痕部の光学モデルにおいて、油の表面反射のみを考慮することでも、単層膜とは異なった輝度極性を示すことを説明できる。

(5-16')式の Δ, Ψ に、油部の複素屈折率 $1.46-0.03i$ によって生じる値を代入して図 5.2.3 と同様の軌跡を描いたグラフを図 5.4.3 に示す。



GA; $\Delta=137.39$, $\Psi=27.97$, 油; $\Delta=6.77$, $\Psi=7.85$

図 5.4.3 油部の表面反射のみを考慮した場合の反射輝度の軌跡計算値

図において実線の油部の軌跡をみると、点線 GA 正常部に対し、方位角によって輝度が入れ替わることが判る。すなわち油痕部について入射偏光に $+45^\circ$ 直線偏光を用いる条件においては、薄い膜を想定しても、また単なる油の表面反射を想定しても、方位角に依存して GA 正常部に対する反射輝度の明暗極性が変化することが判る。図 5.4.3 は、油部における油の面積率 $g=1.0$ を仮定した計算結果であるため、正常部との相違が著しいが、油付着が僅かであれば、油痕部の軌跡は正常部から僅かにずれた形態となり、付着量が増大するに従い次第に図 5.4.3 の形に近づくものと推察される。

3 章における油部分のマイクロ性状分析の結果を勘案すると、油の付着量すなわち実効的な油膜厚に依って偏光反射の形態が変わることが事実に近いと推測される。本研究ではここまでの考察で十分な成果を得られたが、油部分の偏光を変化させる要素の詳細な分析は今後の課題である。

5-5. 偏光画像上の輝度極性による部位の識別方法

以上の実験により、GA 表面の 3 種のオブジェクトの方位角に依存した偏光反射輝度の特性を捕らえることができた。ここで、本研究の目的である欠陥部と油痕部との識別方法について論ずる。

先ず図 5.3.2 より、各部の明暗極性がよく出ている $0, +45, -45^\circ$ 方位角の画像を選び出す。欠陥部はどの方位角においても正常部に対し正の輝度極性であるが、図 5.2.4 の計算および図 5.3.2 の実験画像によれば油部は、上記 3 方位で異なった極性を示している。改めてこの 3 方位の偏光イメージと輝度のプロファイルを図 5.5.1 に示す。ここでは、256 階調の輝度において、正常部を 127 輝度へ正規化してある。この後、例えば $127 \text{ 輝度} \pm 8 \text{ 輝度}$ をしきい値としてオブジェクトを抽出する。表面検査における欠陥候補の抽出は一般的に、基準輝度からの差の標準偏差 σ に対し、 $1.5 \sim 3\sigma$ 程度のしきい値が用いられる。

図 5.5.1(a)~(c)の画像と輝度プロファイルに見られる通り、特定の方位角において輝度極性を調べることで、欠陥部と圧延油部とを明確に識別できる可能性がある。方位角毎の画像は、 $-90 \sim +90^\circ$ を採取すればあとは繰り返され、また、極性は 5° 程度の角度変化では急激に変化することはない。したがって、数種類の方位角の画像を代表として抽出すれば、工業的応用に適する識別が行えるものと考えられる。

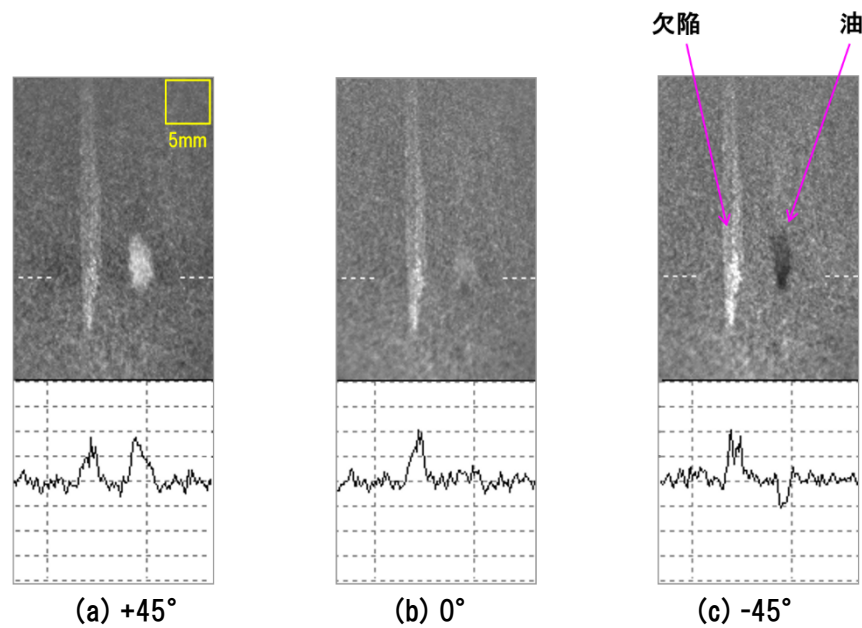


図 5.5.1 3 方位角の偏光イメージとオブジェクト部の輝度プロファイル

ここまでの考察により, GA 表面の正常部, 欠陥部, 油部の 3 種の部位を識別する方法として, 複数方位における偏光イメージを基に, 下記の手順を取ることが有効であると判断される.

- (1) 複数の方位角において対象表面の偏光イメージを採取する.
- (2) 採取した各イメージを正常部の平均輝度で正規化し, 正規化輝度値から一定のしきい値以上の輝度差を持つ箇所を欠陥候補として抽出する.
- (3) 全ての方位角において, 正極性を呈すものは, 欠陥と判断する.
- (4) 候補部位の正常部に対する輝度の極性が, 方位角に依存して変化するものは, 油部と判断する.
- (5) 候補部位の正常部に対する輝度差が小さい箇所については, 1 つないし 2 つの方位に信号が出ているものは, 油部と判断する.

本研究の目的である欠陥識別の確度向上の観点からは上記(3)が重要であり, 例えば 3 方位角(偏光フィルタの検光角)を用いる場合を図示すると図 5.5.2 のようである. 図中の円は, それぞれの方位角の偏光イメージ中で抽出された欠陥候補の集合を表す. 3 個の円の重なる

部分が欠陥であり、それ以外は油痕と判断される。どの円にも属さない外集合が正常な部分である。

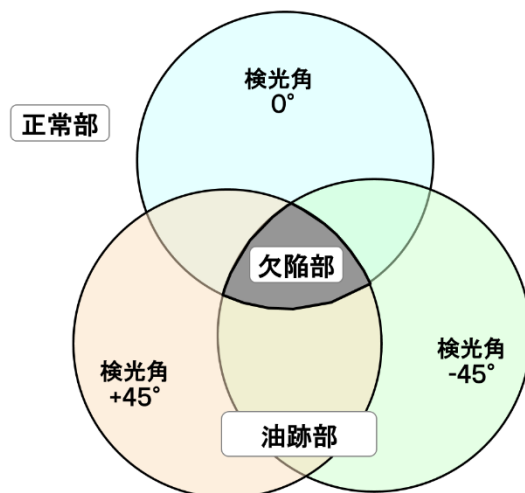


図 5.5.2 異なる 3 種の方位角の偏光イメージによる欠陥判定の考え方

5-6. 光学系の基本設計と感度解析

前節で考案した欠陥と油痕との識別原理を工業的に実用化するためには、最初の適用対象への設置において細かい調整を行い、技術としての完成度を高めると共に、他の工程への展開のための仕様を確立する必要がある。検査装置の場合は、様々な要因への感度分析を実施し、装置としての特性を明確にして設置時の精度などの条件を把握することが求められる。

本節では、3 種の偏光画像を用いる本手法に特有の項目について感度分析を行い、設置条件と運用条件を明確化する。検査に影響を及ぼす要素は、光学的要素以外に、欠陥部の S/N 及び画像上のノイズといった、検査する対象の鋼板材料に依存する項目があるが、本節では光学式検査装置として最も基本的な光学的な要素について考察し、材料などに関する項目に関しては 6 章において考察する。

表 5.6.1 に、本装置における光学的要素の一覧を示す。ここで、本装置に特有の要素は、⑧～⑫である。項目⑨偏光フィルタの材質に関しては、フィルタは樹脂を延伸して製作されているため一般に紫外線に弱く、光源側で紫外線をカットする必要がある。⑩の透過率の課題は前述の通りであり、本装置では 40% のものを使用した。⑪消光比に関しては、直線偏光フィルタを 90° 直交させた最大消光条件において、受光側でゼロレベルとして検出される

かが目安と考えられる。従って、輝度階調(256階調)を上回る性能を要するため本装置では1/2000のものを採用した。

表 5.6.1 本装置における光学要素の項目と装置性能への影響

構成要素	項目	属性	装置性能への影響
光源	① 光源種類	メタルハライド, LEDなど	集光性, 波長特性, 寿命(保守性, ランニングコスト)
	② ファイバー	材質, 束厚み, 照射幅など	光量, 均一性, 撮像可能位置範囲
	③ レンズ	材質, レンズタイプ, 輝度	集光性, 平行性, 均一性, 撮像可能位置範囲
	④ハウジング	材質, 構造,	検査精度, 耐久性, 保守性
カメラ	⑤ レンズ	F値, 焦点距離	対応鋼板速度, 分解能, 画像品質(歪など)
	⑥ 撮像素子	感度, 素子数, 読み出しレート	対応鋼板速度, 分解能, 画像品質(S/N)
	⑦ マウント構造	構造, 調整機能	保守性
光学配置	⑧ 投受光角度	投光角度, 受光角度	識別精度, 設置性
偏光フィルタ	⑨ 材質		耐久性
	⑩ 可視光透過率		受光輝度, 画像品質
	⑪ 消光比		識別精度, 受光輝度
	⑫ 受光方位角設定		識別精度, 適用範囲
全体ハウジング	⑬ 構造	剛性, 清浄機能, 保守機能	耐久性, 保守性, ランニングコスト
	⑭ 架台	サイズ, 保守機能	保守性

偏光を用いることによる本装置に特有の要素は、⑧投受光角度及び⑫受光方位角設定である。投受光角度は偏光の変化に直接影響を及ぼすため、適正な設定を要する。また、受光方位角に関しては5章で述べたように、回転検光子方による基礎実験によって0, +45, -45°の3種の方位角を決めたが、実際の鋼板表面では圧延油、防錆油、水分、化成処理液などの様々な成分の微小なオブジェクトが混在しており、実際のオブジェクトによる感度分析を要する。そこで以降、投受光角度及び受光方位角に関する感度分析を行う。

5-6-1. 投受光角度の設定

以上の偏光に関する要素は、光学ヘッド内の局所的な設定として対応が可能であるが、⑧の投受光角度に関しては、反射光の偏光状態の変化に影響する一方で、装置全体のサイズにも影響する重要な条件である。そこで以下、投受光角度の最適値に関する考察を行う。

偏光による変化を最大限に活かして検出しようとするれば、反射体における偏光の変化が大きいくほど感度が上がる。従って、光学系では反射光が、特に直線偏光に近い油部における明

暗極性の変化を捕らえ易く設計する必要がある。この設計指標は偏光度である。偏光度 d_p には、無偏光までを扱うストークスパラメータで定義されるものなど、いくつかの定義がある⁵⁻¹²⁾が、本論文では完全偏光を仮定している故、反射光に含まれる完全偏光の強度割合として定義することとする。従って、図 5.3.1 の光学系において検光子を回転させて得られる受光強度の最大値 I_{max} 及び最小値 I_{min} を用いて d_p は(5-16)式のように表せる。

$$d_p = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad \dots (5-16)$$

d_p は、受光強度の最小値 I_{min} は検光方位角に依存しない無偏光の反射強度(実数)であるので、総反射光強度 ($I_{max} + I_{min}$) に対する偏光反射強度 ($I_{max} - I_{min}$) の割合として表現される。 I_{max} は全反射強度 s 偏光(検光角 90°) で最大であり、 I_{min} は p 偏光(検光角 0°) で最小となるので、s 偏光の反射率を R_s 、p 偏光の反射率を R_p 、とすれば、 I_{max} 、 I_{min} はそれぞれ以下のように表せる。

$$I_{max} = \frac{R_s}{R_p + R_s} I \quad \dots (5-17)$$

$$I_{min} = \frac{R_p}{R_p + R_s} I \quad \dots (5-18)$$

ここで、(4-7)、(4-8)式

$$R_p = |r_p|^2 = \frac{|N^2 \cos \theta - \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2}{|N^2 \cos \theta + \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2} \quad \dots (4-7)$$

$$R_s = |r_s|^2 = \frac{|\cos \theta - \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2}{|\cos \theta + \sqrt{N^2 - \sin^2 \theta}|^2} \quad \dots (4-8)$$

を (5-17)、(5-18)式に代入すれば、(5-16)式より、入射角を θ 、反射面の複素屈折率の実部 n_r として偏光度 d_p (実数)は以下のように求められる。

$$d_p = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta}}{n_r^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \tan^2 \theta} \quad \dots (5-19)$$

(5-19)式による入射角度(=反射角度)と反射光の偏光度 d_p との関係を図 5.6.1 に示す。実線が $n_r=1.46$ の代表的な防錆油または圧延油であり、p 偏光反射がゼロになるブリュースタ角(約 57°)で d_p は最大値の 1.0 を示す。実際の鋼板は鏡面ではないため、 d_p の最大値は 1 より低いと推定されるが、本技術は鏡面部分の偏光状態に起因した現象を利用するため、最適な投受光角度の検討に影響はないと考えられ、 d_p のピーク値が投受光角度目安となる。油種によっては $n_r=1.53$ などの材料もあり、この場合はピーク位置が若干右にシフトするが、投受光角度の設計上は、ピークがより左にある油種を考慮して決定しておけば両者に対応できる。破線は $n_r=2.2$ とした GA 鏡面のプロットであり、 64° で d_p が最大値となる。GA 表面は金属反射につき、p, s 偏光間で最も位相がシフトし、合成電界ベクトルのリサージュが膨らむ角度と解釈できる。油部の反射光が直線偏光に近く、かつ欠陥部の反射光が円偏光に近いほど両者の識別感度は高くなるため、識別感度の観点からは、想定される複数の反射オブジェクトの偏光度から最も的確な角度を決めることになる。図 5.6.1 によれば、GA の偏光度と防錆油の偏光度の交点は $61\sim 62^\circ$ であり本装置では 60° に設定した。

一方、製造現場においては鋼板の表裏の長い距離に渡ってその近辺の空間に空きがない場合もあり、検査ヘッドの小型化を要する場合がある。投受光角度は 0° に近いほど、すなわち照明とカメラが鋼板の法線上に近く接近しているほどヘッドの鋼板長さ方向に小型になって設置しやすいが、本装置は投受光角度 60° 付近での設置が必須であるため、鋼板長さ方向にセンサヘッドが占有する場所が長くなり工夫を要する。(6-1-2 節に詳述)

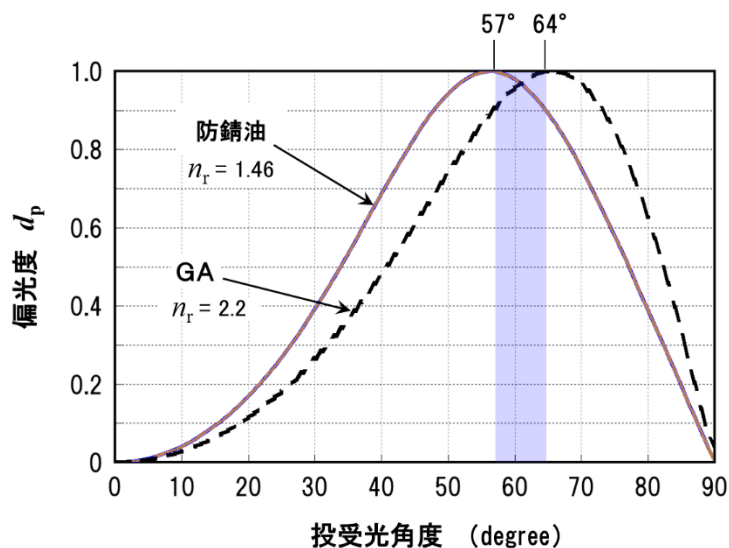


図 5.6.1 GA および防錆油表面における入射角度と反射光の偏光度 d_p の関係

5-6-2. 受光方位角の設定

5-5 節では、油痕識別のため 3 種の受光方位角として 0° , $+45^\circ$, -45° を設定したが、実際の油痕における方位角方向の輝度軌跡は多様であって、個々には必ずしも 0° を挟んで $\pm 45^\circ$ が最適とは限らない。図 5.6.2 にそれらの例を示した。図内の点線の円が I_0 (=127 輝度) へ正規化した正常部の輝度、実線が油痕の反射輝度の軌跡である。図 5.6.2(a), (b) の例では、正常部に対し正極性のコントラスト最大の方位角がそれぞれ $+38^\circ$, $+35^\circ$ 、負極性では -56° , -55° となっている。また、(c) では軌跡の形状が極端に歪んでおり、最大コントラストの正極性方位角は $+11^\circ$ 、負極性では -10° である。これらの例を含む多くの実際の GA 上の油痕について、正常部との最大輝度差となる方位角の分布を図 5.6.3 に示す。サンプル数は約 850 体である。

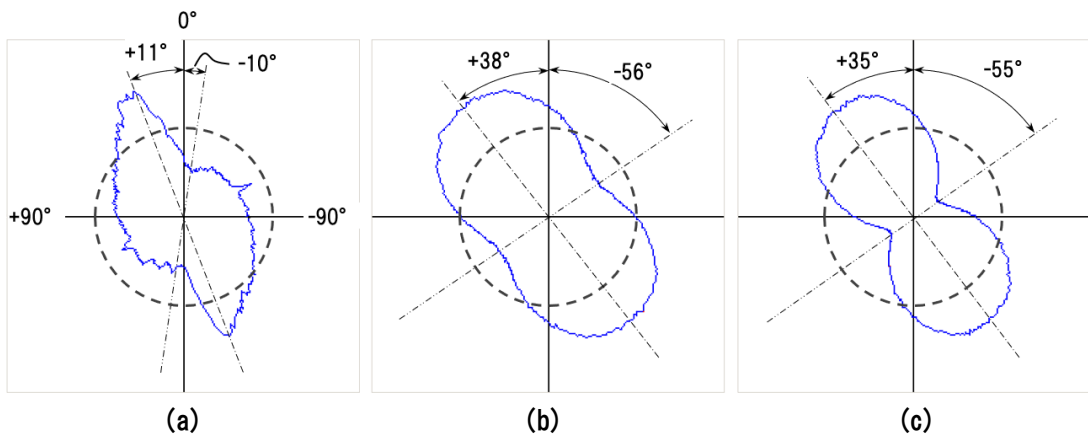


図 5.6.2 油痕における正常部との正負最大輝度差を示す方位角の例

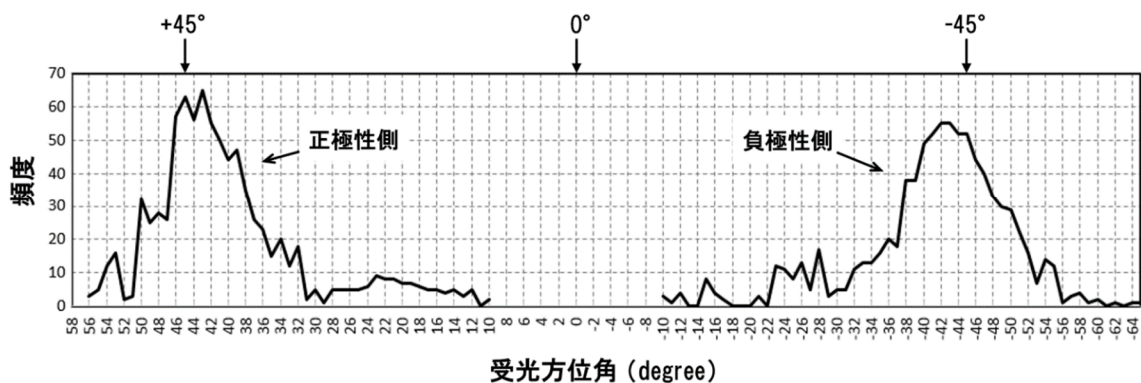


図 5.6.3 正常部に対する油痕部の明暗最大輝度を示す方位角のヒストグラム

図 5.6.3 にみられるように、油痕の正負極性の最大コントラストを示す方位角は、広い角度領域に分布しているが、検査の機能上重要なことは、油痕の極性が輝度軌跡の形状に依らず、設定した方位角において十分識別可能なコントラストをもって反転するかどうかである。図 5.6.2 の全サンプルの個々の軌跡において、正常部との最大輝度差を与える方位角は、 0° を挟んだ正負のグループに分離する。すなわち、正側の方位角と負側の方位角に偏光フィルタをセットすれば、油痕は識別できるはずである。一方、装置の総合的な識別性能は、対象となる油痕の総数の内、どの程度をそれぞれの偏光画像上における明暗極性で識別可能かに依存する。例えば正常部との最大輝度差を示す方位角が $+45^\circ$ から外れていても、コントラスト C の絶対値が抽出限界値である 0.05 を上回っていれば極性判定は可能である。

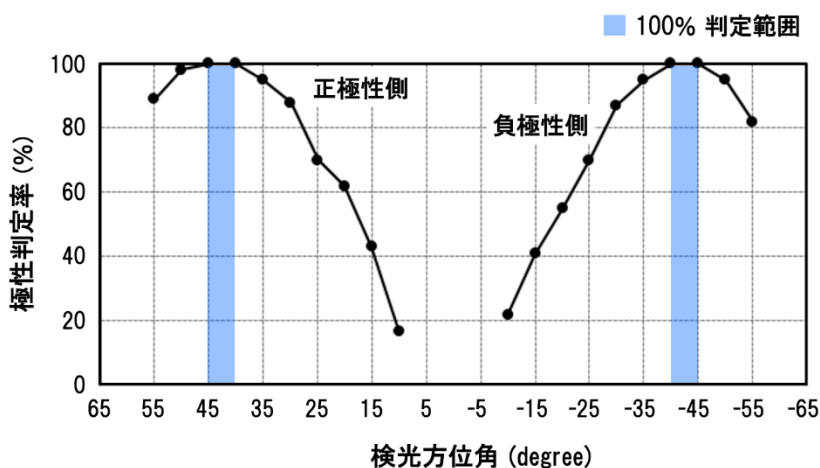


図 5.6.4 受光方位角の感度分析; 検光角 vs 輝度極性判定率

この観点から、受光方位角(検光方位角)を変化させたときの判定可能なサンプルの割合を示したグラフが図 5.6.4 である。横軸の方位角を変化させると、 $\pm 45^\circ$ から離れるに従って次第に油痕部が正常部に対する明暗輝度を失っていくため、極性判定可能なサンプルが減少する様子がわかる。結果として、正極性側では $+40 \sim +45^\circ$ 、負側では $-40 \sim -45^\circ$ の方位角範囲において判定率が 100%を維持することが判明した。グラフではこの角度領域をハッチングしている。すなわち、 0° を挟んで正常部に対して正負の輝度極性変化を有する油痕に関しては、この 2 種の方位角領域内に偏光フィルタを設定すれば、本装置は最大の識別能力を発揮できると言える。

以上の油痕識別のための方位角の感度分析の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 光学条件；入射光 $+45^\circ$ 直線偏光，入射角度 60° の条件において
- (2) 受光方位 0° を挟んで正常部に対し正負輝度極性を有する油痕に関し
- (3) 油痕部からの反射光の方位角方向輝度軌跡は，個々の油痕毎に異なり，プラス側では $+10\sim 56^\circ$ ，マイナス側では $-10\sim -64^\circ$ 領域に分布する。
- (4) 分布ヒストグラムにおける最大値を与える方位角は， $+43^\circ$ ， -42° である。
- (5) 油痕の抽出限界値であるコントラスト $C_d=+0.05$ 以上を保持し，100%の識別を可能とする受光方位角の範囲は， $+40\sim +45^\circ$ ， $-40\sim -45^\circ$ である。

上記(5)より，受光方位角の設定すべき範囲は， $+42.5\pm 2.5^\circ$ 及び $-42.5\pm 2.5^\circ$ であると結論できる。

油痕サンプルデータは，検査装置を設置する製造ラインにおいて，事前に行った試験により採取したものであり，このデータに基づいた受光方位角の最適設計値は，100%識別範囲の中間値を採用すれば， $+42.5$ 及び -42.5 となる。ほかの製造ラインへ本技術を展開する際の設計指針としては，ラインのサンプルデータを上記のように分析して，方位角の最適値と設計余裕値を決めればよい。なお，実際の設置工事における各種角度の再現性は， $\pm 0.1^\circ$ 以内であり，一般的な機械加工及び光学調整機構によって十分な精度を実現できる。

5-7. 第5章まとめ

本章では，欠陥部と油痕部の偏光反射特性の詳細な分析のため，回転検光子光学系を用いた理論的分析と実験的検証を行った。理論分析では先ず，任意の方位角における検光子を通過した反射光の光強度を与える一般式を導出した。これを基に，入射光に 45° 直線偏光を用いた場合の方位角方向の反射光強度の理論計算と，それを検証する実験を行い，欠陥と油痕とを偏光反射特性を基に原理的に識別可能な光学系と判別方法の提案を行った。以下に結果をまとめる。

欠陥と油痕それぞれの鏡面要素の複素屈折率に起因して，以下の事実が判明した。

- (1) 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，受光側の検光子との消光効果が表れ，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) 金属である欠陥部からの反射波は楕円偏光となり，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 $+45^\circ$ 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 5.7.1)

*検査線上の3台のカメラの視野は同一。(6-1-2 節に詳述)

- (4) 3種の方位角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。

また、本技術の特徴である3種の方位角の偏光を最大限利用し、拡大展開するための光学系の要である投受光角度及び受光方位角に関しての設計指針を実際のデータを基に整理した。

結果は以下の通りである。

- (1) 光学条件は、偏光度が最大となる投受光角度 60° が最良である。
- (2) 受光方位角の範囲は、 $+42.5 \pm 2.5^\circ$ 及び $-42.5 \pm 2.5^\circ$ である。

以上の結果をもって、従来、投受光角度や識別方法が経験的に設定されてきた光学式鋼板表面検査において、初めてオブジェクトの偏光反射特性に基づく識別方法を提案した。

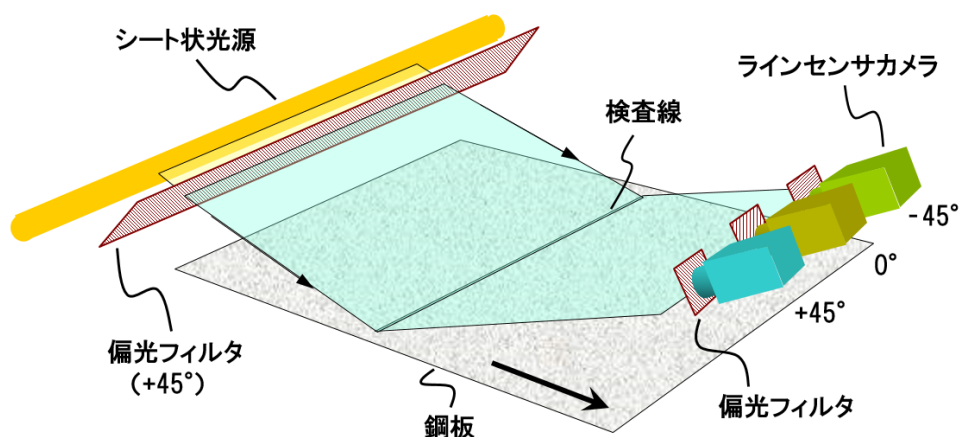


図 5.7.1 3種の偏光方位角を用いた識別原理による表面検査センサの構成概念図

第5章 参考文献

- 5-1) P. Beckmann and A. Spizzochino, The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, New York: Pergamon, (1963).
- 5-2) C.A.Fenstermaker, et al.: Errors Arising from Surface Roughness in Ellipsometric Measurement of the Refractive Index of a Surface, Surf. Sci., 16 (1965), 85-95.
- 5-3) K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory of off-specular reflection from roughened surfaces," Journal of the Optical Society of America, 57 (1967), 1104-1114.
- 5-4) 浅野有一朗, 塩住基仁, 栗太邦夫, 矢部直, 守屋進, 「冷延鋼板の光反射特性解析とそのオンライン表面粗度測定への応用」, 鉄と鋼, Vol.70 (1984), 1095.
- 5-5) 岡和彦, 「鋼板粗面による光散乱特性のモデリング」, 日本鉄鋼協会 鋼板表面の光学的特性のモデリング研究会成果報告, (2000), 13-22.
- 5-6) R.M.A. Azzam, and N.M.Bashara, Ellipsometry and Polarized Light, North Holland Press, Amsterdam, (1977), 257-260.
- 5-7) R.Greef: Rev. Sci. Instrumun, Vol.41 (1970), 532.
- 5-8) P.S.Hauge and F.H.Dill: Design and Operation of ETA, an Automatic Ellipsometer, IBM J.Res. Develop, 11, (1973), 472-489.
- 5-9) 風間彰, 大重貴彦, 「複数方位の偏光イメージにおける相対的輝度特性を利用した鋼板表面検査技術」, 計測自動制御学会論文集, Vol.47, No.12 (2011), 591-596.
- 5-10) A.Torao, I.Yarita, Y.Yamashita, T.Yasumi : Portable Measuring Apparatus of Oil Film Thickness by Using Laser Fluorescence, IMEKO 15th World Congress, (1999,6,Osaka,Japan)
- 5-11) R.M.A. Azzam, and N.M.Bashara, Ellipsometry and Polarized Light, North Holland Press, Amsterdam, (1977), 332-340.
- 5-12) R.M.A. Azzam, and N.M.Bashara, Ellipsometry and Polarized Light, North Holland Press, Amsterdam, (1977), 59, 63, 222.

第5章 以上.

第6章 実用装置の開発

本章では、前章において提案した異なる3種の方位角を用いた欠陥と油痕の識別方法を利用した、新たな表面検査装置(以降「本装置」または「3チャンネル偏光式表面検査装置」と呼ぶ)の工業的実用化について述べる。

実用化においては、多くのエンジニアリング課題の解決を要するが、主に以下の項目の実用化について工学的な検討、考察を行う。

- (1) オンライン検査に必要な仕様と光学検査ヘッド
- (2) 画像処理と欠陥検出・判定処理(特徴量処理)
- (3) 全体システム
- (4) 性能検証
- (5) 材質に依存した実運用課題の考察

6-1. オンライン検査に必要な仕様と光学検査ヘッド

6-1-1. オンライン検査の基本仕様

表面検査装置は、その検査対象に依って要求される仕様が異なる。本装置は、厚さ0.5~3.0mm、幅2000mm程度の自動車用GA鋼板を対象として製造中のオンライン検査を行うものである。検出すべき欠陥の最小サイズは欠陥種に依存するが、介在物起因の欠陥に関しては1mmφ程度が最小目標である。一方で検査装置は可能な限り多種多様な欠陥を検出可能であることが求められるため、投資効果とのバランスなども考慮して分解能を決める。こうした仕様等の主要項目を表6.1.1に示した^{6-1),6-2)}。

表 6.1.1 GA 製造工程における表面検査装置仕様の基本項目

No.	項目	仕様	備考
1	鋼板寸法	幅 500~2000mm, 厚 0.5~3.0mm	
2	鋼板搬送速度	0~10m/s (定常 2m/s)	ルーパ 巻き上げ対応
3	ワーク距離	50mm以上	鋼板跳ね上がり対策 プロテクター
4	鋼板の垂直位置変動	基準位置に対し ±2mm 以内	平行な変動であること
5	最小分解能	幅 0.25mm, 長1.0mm	全幅 8000画素以上
6	設置可能スペース	長 1500, 高 1500mm	オフライン調整のための センサ引き出し機構
7	設置環境	常温屋内工場(0~40°)	周囲に強い光源なきこと

表 6.1.1 に示した鋼板寸法①は、本装置を適用する GA 工程に固有のものではなく、ユーザーである自動車メーカーからの要請による。その他、例えば最小分解能⑤は、品質保証上検出すべき最小の欠陥から決まるものであって、一般的な表面検査装置においても同様の数値を採る。製造下の鋼板には通常張力が掛かっており十分に平らであるが、コイル間の継ぎ目などで稀に波打つ形状になることがあり、ワーク距離③(鋼板と検査ヘッドとのクリアランス)を適正に設けることも重要である。また、製造ラインには様々な装置が設置されているため、検査ヘッドのサイズ⑥も制限を受ける。

装置を組み立てる上では、実験室において使用した光学条件を再現することが実用装置の性能を最大限発揮させることにつながるため、主要な光学要素に関しては十分な吟味が必要である。表 6.1.2(表 5.6.1 に同じ)にこのような光学的要素の項目を再度示し、より一般的な要素について述べる。

表 6.1.2 の①～⑦及び⑬、⑭は、ラインセンサを用いる一般的な画像式検査装置にも共通する項目である。ただし、光源とカメラの両者に直線偏光フィルタを用いるため、⑨の偏光フィルタの透過率は重要な要素である。偏光フィルタの透過率は理想値で最大 50% であるため、先ず光源の光量が通常照明の 50% 以下、かつカメラ側でも 50% 以下になる。従って、最終的に撮像素子が受ける光量は通常光学系の 1/4 以下となり、十分な輝度の画像を得るには露光時間を長くする必要があるのであるため、長さ方向の分解能が達成できない。

表 6.1.2 3 チャネル表面検査装置の光学要素の項目と装置性能への影響

構成要素	項目	属性	装置性能への影響
光源	① 光源種類	メタルハライド, LED など	集光性, 波長特性, 寿命(保守性, ランニングコスト)
	② ファイバー	材質, 束厚み, 照射幅など	光量, 均一性, 撮像可能位置範囲
	③ レンズ	材質, レンズタイプ, 輝度	集光性, 平行性, 均一性, 撮像可能位置範囲
	④ハウジング	材質, 構造,	検査精度, 耐久性, 保守性
カメラ	⑤ レンズ	F 値, 焦点距離	対応鋼板速度, 分解能, 画像品質(歪など)
	⑥ 撮像素子	感度, 素子数, 読み出しレート	対応鋼板速度, 分解能, 画像品質(S/N)
	⑦ マウント構造	構造, 調整機能	保守性
偏光フィルタ	⑧ 材質		耐久性
	⑨ 可視光透過率		受光輝度, 画像品質
	⑩ 消光比		識別精度, 受光輝度
	⑪ 方位角設定		識別精度, 適用範囲
光学配置	⑫ 投受光角度	投光角度, 受光角度	識別精度, 設置性
全体ハウジング	⑬ 構造	剛性, 清浄機能, 保守機能	耐久性, 保守性, ランニングコスト
	⑭ 架台	サイズ, 保守機能	保守性

そこで本装置では、高輝度の放電光源であるメタルハライドランプから光ファイバー束にて導光してシート状光源を構成する一般的な装置に対し、光導量を増やすため 1.5 倍程度ファイバー数を増加させた特殊な仕様とするなどの工夫を施して、撮像素子の受光量を通常光学系装置と同様な水準にまで引き上げた。ここで、⑧～⑫ は偏光を利用する本装置に特有の要素である。項目⑧の偏光フィルタ材質は、延伸された高分子フィルムが使用されるため一般に紫外線に弱く、光源側で紫外線をカットする必要がある。⑨の透過率の課題は前述の通りであり、本装置では 40% のものを使用した。⑩の消光比に関しては、直線偏光フィルタを 90° 直交させた最大消光条件において、受光側でゼロレベルとして検出されるかが目安と考えられる。従って輝度階調(256 階調)を上回る性能を要するが、樹脂を延伸させて製造される偏光フィルタは、分光透過率が様々であるため、本装置では分光透過率がフラットかつ消光比の特に高いフィルタを選定して使用した。⑪の方位角設定に関しては 5 章で述べたように、回転検光子法による実験的考察によって、0, +45, -45° の 3 種の方位角を決めたが、実際の鋼板表面には圧延油、防錆油、水分、化成処理液など様々な成分のオブジェクトが混在しており、設定角度の感度分析を行った(5-6-2 節)。

6-1-2. 光学センサヘッド

センサヘッドは、図 5.7.1 に示したように同一箇所を 3 種の偏光方位角で撮像する構成を要する。主な光学部品は、照明とカメラであるが、ヘッド寸法を可能な限り小型化することは、設置場所における制限のほか、ヘッド全体の剛性を保つためにも必須である。本装置ではヘッド内の受光光路にミラーを設けて小型化を図った。また、カメラ仕様においては、像の歪みを小さくし、かつ視野角度による偏光状態の変化を小さく抑えるために、幅方向にカメラを増やし視野を分割する必要がある。一方で、スペース上の制約とコストの観点からはカメラ台数を減らすべきであり、相反する条件となる。本装置では、必要な 1900mm の検査視野を 4 分割し、1 視野を約 500mm として、数十 mm のオーバーラップを設けた。

諸元は例えば以下のようなものである。検査は鋼板の表裏を独立に行うため、実装における部品点数はこの倍である。

① 光源

- ・メタルハライド光源 250W×8 台、照射幅 2200～2400mm
- ・ファイバー束導光器 1 式；メタルハライドランプの光をシート状に形成し、シリンドリカルレンズにて光束を平行化する。
- ・高消光比の偏光フィルタを用いて +45° 直線偏光の入射光を生成する。

② カメラ

- ・ 512画素ラインセンサカメラ×12台 (3台1セット×4セット)
- ・ 偏光フィルタ 12枚
- ・ 走査レート ; 10kHz, 長さ方向分解能 ; 1.0mm, 幅方向分解能 0.25mm
- ・ 輝度階調 ; 256 (8bit)

③ ミラー

- ・ 継ぎ目のない1枚仕様. 光路を歪めないための堅牢な指示機構を有する.

以上の仕様を基に組み立てた実際のセンサヘッドの光学配置見取図を図 6.1.1 に示す. ヘッド内には, 装置サイズを小型化するためのミラー, 及びカメラ群がセットされる. 本装置では同一視野を3種の方角で検査するため, 1つの視野に3台のカメラを要し, 撮像素子の読み出しレートと鋼板長さ方向及び幅方向分解能の関係(表 6.1.3 参照)から, 約 500mm 視野幅毎に4セット計 12 台を使用する^{6-1), 6-2), 6-3)}. 個々のカメラのマウントには6軸微調整機構を備えた上で, 3台1セット毎にも微調整可能な機構を設けて, 4セット分の視野のオーバーラップ調整や, カメラ故障時の保全がしやすくなるよう工夫した. また光源からの照射幅は, カメラ視野の角度を考慮して鋼板の最大幅 2000mm より数百 mm 大きく取っている.

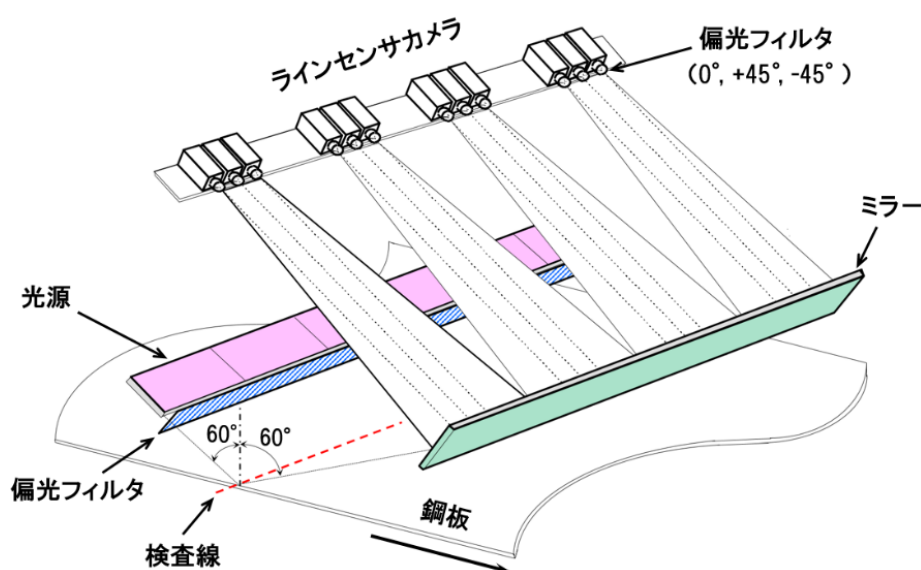


図 6.1.1 光学検査ヘッドの部品配置 見取図

以上の配置による部品群を格納した検査ヘッドの GA 製造工程への設置概念例を図 6.1.2 に示す。検査ヘッドの寸法は長さ(製造方向)と高さ(鋼板からの距離方向)が約 1200mm, 幅約 2400mm, 重量約 1000kg である。鋼板の振動が安定する大型のロールの前後に, 鋼板各面に対しそれぞれ設置し, 検査線における鋼板の振動を抑制するために, 必要に応じて検査線近傍に小型のサポートロールを設けた。この設置例では, 図の左方のヘッドは鋼板の水平パスにおいて検査を行い, もう片方の面は垂直パスにて検査を行うよう設置している。工場内においては, 設置スペースの都合により, こうした柔軟なエンジニアリングを行う必要があり, 光学系が歪みなく精度を保てるような構造設計を行った^{6-1), 6-3), 6-4)}。

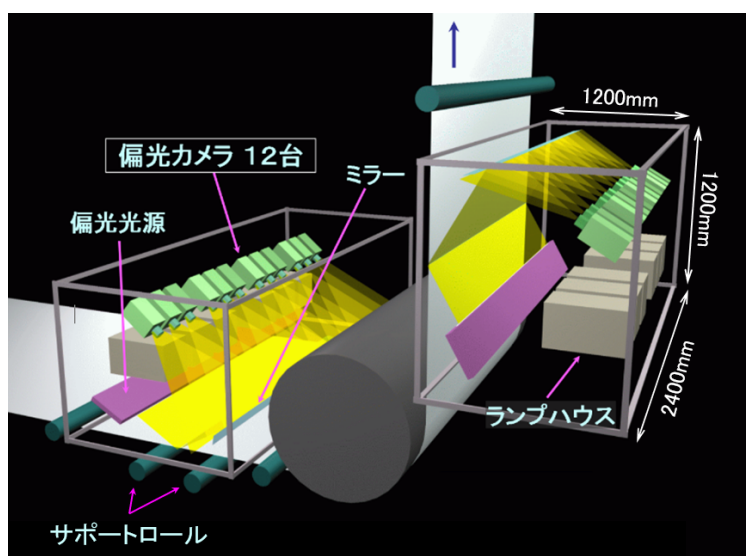


図 6.1.2 GA 製造工程への光学検査ヘッド設置概念図 (鋼板表裏に設置)

検査ヘッドの実装においては, 保守性が重要である。そこで, 電動化された堅牢な懸架フレームにヘッドを吊るし, 保守や故障の際にヘッドを製造ラインの横へ引き出して自由に作業が行えるようにした。実装の様子を図 6.1.3 に示す。3 台 1 セットの 3 偏光ラインセンサが幅方向に並んでいる様子と, 複雑な調整機構が見える。写真では撮影のためにパネルを開けているが, 稼働時は光路以外を閉鎖し, ヘッド内を湿気と粉塵から保護するために乾燥空気で正圧に保つ。写真に見えるパージ配管はそのためのものである。さらに, 光学系を余計な外光から遮蔽するため, ヘッド側壁などは不透明な素材を用い, 内側は艶消しの黒で

塗装した。また、カメラは安定でノイズの少ない電源を要するため、ヘッドには周辺の電源とは別系統の計装電源を引いて電氣的な安定性を確保している。同様に、ヘッド自体若しくは近傍に空調設備を有し、ヘッド内部を清浄に保ち、また温湿度を安定化するためにパージを行う。

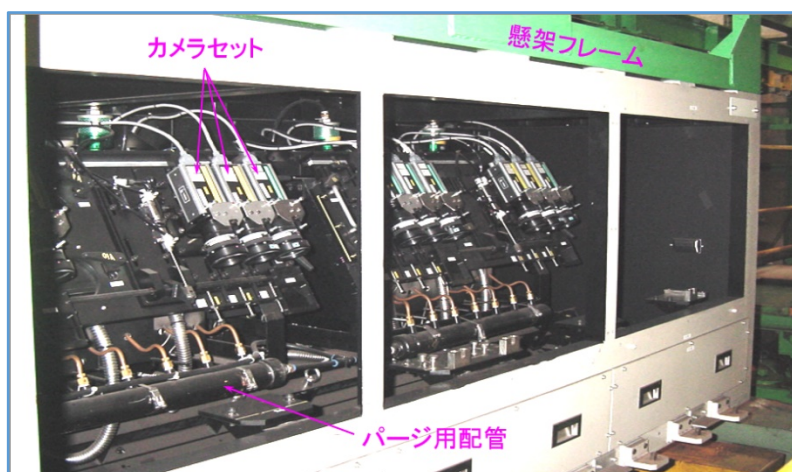


図 6.1.3 実装された 3 チャンネル偏光式表面検査装置の光学検査ヘッド内部

6-2. 画像処理と欠陥検出・判定処理

6-2-1. 画像採取方法

本装置はラインセンサによる撮像を行うため画像信号は 1 次元であって、その信号をメモリ上に展開して画像を得る手法は、鋼板やフィルムなど、切れ目のないウェブ状製品のオンライン検査では一般的である。ただし、長時間の連続運転を行うため、つなぎ目なく処理を行う工夫が施されている。本装置では、バンク切り替え処理によって、検査に抜け時間が生じないようにした。バンク切り替えとは、図 6.2.1 に示すように、カメラ画像を蓄積するメモリ系列を複数備え、画像の蓄積と処理を並行して行う処理である。バンク A にカメラからの画像を蓄積している間に、バンク B の画像に対して欠陥検出処理を行い、さらに後の処理工程へ信号を流す。従ってバンク A の容量は、バンク B における処理時間を上回る時間の画像を蓄積可能な容量に設定する。

バンク A の蓄積量が満杯になったところで、SW(1)、SW(2)の電子スイッチを、点線側に切り替える。これを繰り返すことで連続的に画像を取り込みながら画像処理を行う。

各画像バンクメモリの容量は，ライセンサカメラの画素数，スキャンレート，必要な縦横の画素分解能，バンク内で必要な画像処理の時間を相互に考慮して決定する必要がある。

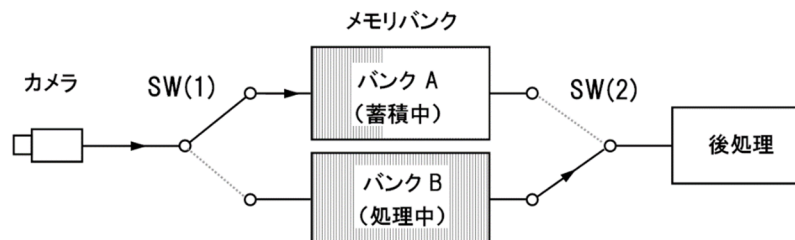


図 6.2.1 メモリバンク切り替えによる連続画像処理方法概略図

本装置における目標分解能は，鋼板の長さ方向 1.0mm，幅方向 250 μ m である．カメラのスキャンレートは 10kHz であり，露光時間は 200 μ s 程度となる．鋼板の検査幅及び必要な分解能は検査の仕様より決定される目的値であるが，カメラ画素数，台数，スキャンレートと直接関係するため，互いに独立に仕様を決定することは困難であって，技術的経済的に成り立つ値への調整が必要である．

これらの設計パラメータの 1 方位角分を表 6.2.1 に示した．本装置では，1 視野について 3 種の偏光方位毎に受光するため，240MB/s の画像情報を採取することになる．表 6.2.1 によれば，鋼板幅方向に 8000 画素を要するが，実際は図 6.1.1 のように 4 分割した．

表 6.2.1 鋼板表面検査における画像情報量の算定例 (1 偏光方位分)

項目	記号, 数値
鋼板諸元	幅 $w = 2000$ mm, 通板速度 $v = 10000$ mm/s (max)
検査分解能	幅 $dw = 0.25$ mm, 長 $dl = 1.00$ mm
カメラ画素数	$N = w / dw = 8000$ (画素)
スキャンレート	$sr = v / dl = 10$ kHz
輝度分解能	$i_{res} = 8$ bit (256階調) = 1 byte
毎秒の情報量	$q = N \times sr \times i_{res} = 80$ MB/s

6-2-2. 画像処理

リ上に鋼板表面の画像が採取された後、各画像上における欠陥候補の抽出を行う。画像は2-2-3 節に述べた方法によって輝度が正規化され、しきい値を超えた信号部分の幾何学的特徴量を抽出する画像処理を行う。しきい値は、例えばノイズレベルの標準偏差 σ の2~3 倍程度を設定し、それ以上の輝度の部分を欠陥候補として抽出する^{6-5), 6-6), 6-7)}。しきい値未満の部分は127 輝度に置き換える。このような処理を行うと、例えば図 6.2.6, 図 6.2.7 に示すように、抽出箇所以外の地肌のノイズを除去した画像が得られる。

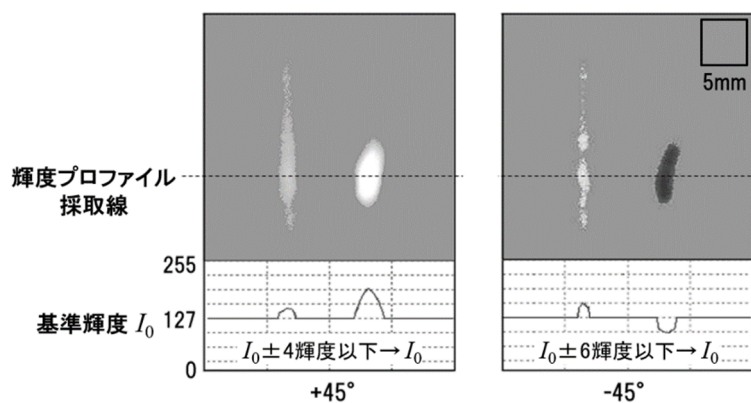


図 6.2.6 しきい値処理による欠陥候補の抽出処理例

こうして抽出された欠陥候補部から幾何学的な特徴量を導出する。特徴量は図 6.2.7 に示すように、一般に長さ、幅、面積、正常部に対する極性(明暗)、輝度信号の最大値、平均値、輝度の積算値など多種に渡り、表面検査技術において広く用いられている⁶⁻⁸⁾。

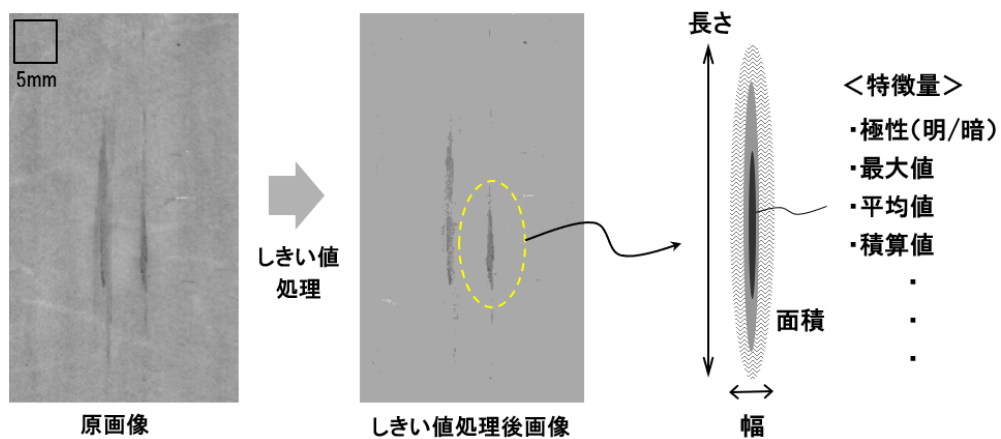


図 6.2.7 欠陥画像の処理と特徴量の例

6-2-3. 欠陥候補の抽出ロジック

抽出された欠陥候補部が欠陥であるのか油痕であるのかを判定する基本的な考え方は、図 5.5.2 に示したように、3 つ全ての偏光方位画像において正常部に対し正極性であれば欠陥、極性が異なれば油痕である。各方位角の画像において抽出されたオブジェクトが示す明暗の極性は、正、負、及びコントラストなし、の3種である。従って、全く何も映っていない場合を除くと図 6.2.8 に示すように 26 通りの極性の組み合わせがある。

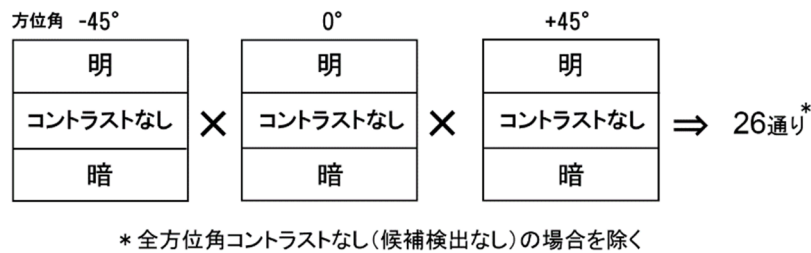


図 6.2.8 偏光方位角画像におけるオブジェクトの明暗極性判定の場合の数

ただし、油の付着量が少なければ偏光画像において明確な極性変化を示すとは限らず、極性だけによる判定が困難なケースも存在する。典型的なケースは、全ての偏光画像において負極性を示すオブジェクトがある。これまでの考察の範疇には無いものであるが、実際は例えば、表 2.2.2 の(1)-1 付着物、(2)-2 ロールキズ、(3)-1 重度欠陥などである。

また、欠陥、油痕に限らず SN 比の低いオブジェクトでは、ある方位角または 2 つの方位角でコントラストゼロの場合も多く、このような場合は予備の極性判定及び特徴量を併用した欠陥判定処理を行う。

図 6.2.9 に欠陥識別処理フローチャートの概略を示す。まず①において、3 方位角全ての偏光画像に当該オブジェクトのコントラストがあるかを判断する。Yes の場合は②へ移り全方位角で正極性であれば、③へ移って欠陥の種別と程度を計算して、そのオブジェクトの判定処理を終了する。また、②が No の場合は欠陥以外と判断して終了する。

一方、①において 3 方位角の一部にコントラストが無い場合は、④の処理へ回り、極性を重要な参考として、他に最大輝度、平均輝度、長さ、幅、面積、形体、分布状況などの特徴量を用い、複合的な判断処理を行って欠陥であるかどうかを判定する。

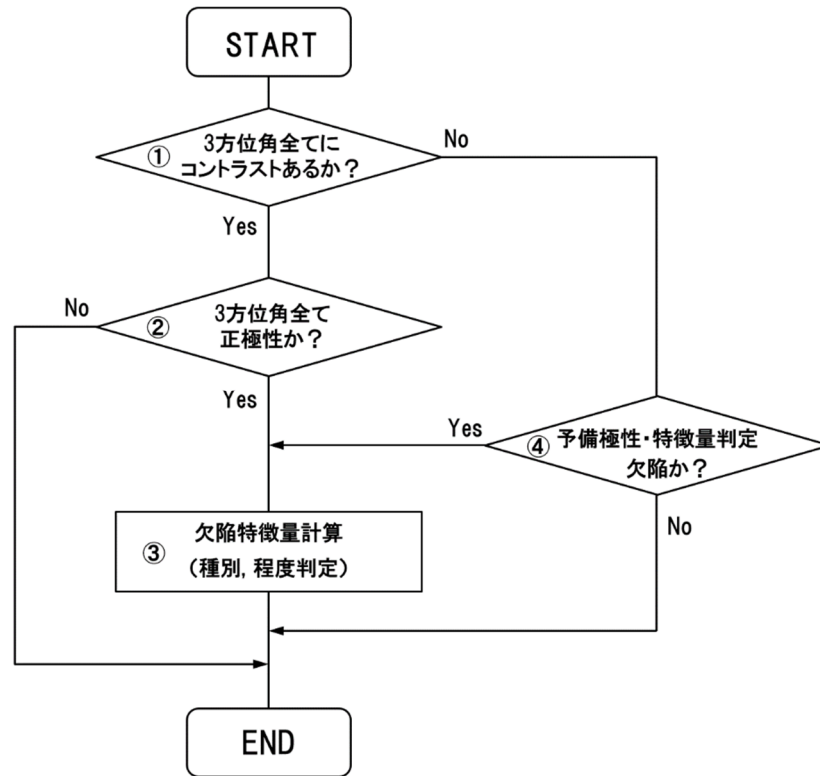


図 6.2.9 抽出されたオブジェクトの欠陥判定の概略フローチャート

6-2-4. 信号処理装置の構成

以上のような画像処理と欠陥候補の判定処理のための信号処理装置を組み立てた。処理装置は、高速で画像を正規化する前処理ハードウェア、製造ラインの速度変化、製品の蛇行、鋼板の表面性状の変化による反射率ムラ、反射率変動などの検査環境や鋼板表面の影響を補償するソフトウェア及びソフトウェアなどで構成される。3 偏光の画像処理には専用のハードウェアを開発し、その他は市販の画像処理装置をベースにカスタマイズしてシステムを構成して、独自の処理を行いながら安定性を図った⁶⁻¹⁾。

また、検査に直接影響するプロセスパラメータとして Fe-Zn 合金の生成度合いを示す合金化度がある。合金化度と鋼板の全体反射率には負の相関があり、合金化が進むほど GA 表面はマットになって全体反射率が下がるため、適正な画像を得るために光源光量を増す必要がある。ただし、受光方位角に依ってその変化の度合いは異なるため、本装置にはチャンネル毎に平均受光輝度を 127 レベルに保つための自動光量制御を組み込み、検査が合金化度の変化の影響を受けないようにする工夫を施した⁶⁻²⁾。

さらに、システムの異常を即時に発見するため、製品コイルの溶接点毎に疑似欠陥信号に

よって検出処理が正常であるかを自己診断する機能を設けた。さらに、光源ランプの光量劣化を連続的にモニタする機能、カメラの画像を連続的に記録して、本体とは別系統の処理装置にて検査をシミュレートできるシステムなどを用意して、常に健全な状態で運用できるよう工夫した⁶⁻³⁾。

表面検査装置の構築には以上に述べた画像処理と欠陥識別処理に加え、鋼板表裏の検査結果を統合し、マップ化するなどの整理をして上位コンピュータやデータベースへ最終的な検査結果を伝送する必要がある。そのための制御コンピュータ等を加えて検査装置のシステムを構成した。図 6.2.10 に信号処理装置の概略ブロックを示す。カメラからの画像信号は、高速のハードウェア構成による専用処理装置にて処理されて欠陥候補を抽出し、判定装置に送られる。判定装置ではソフトウェアにより欠陥判定やマッピング等が行われ、制御コンピュータを経由して上位のプロセスコンピュータへ検査結果が伝送される。

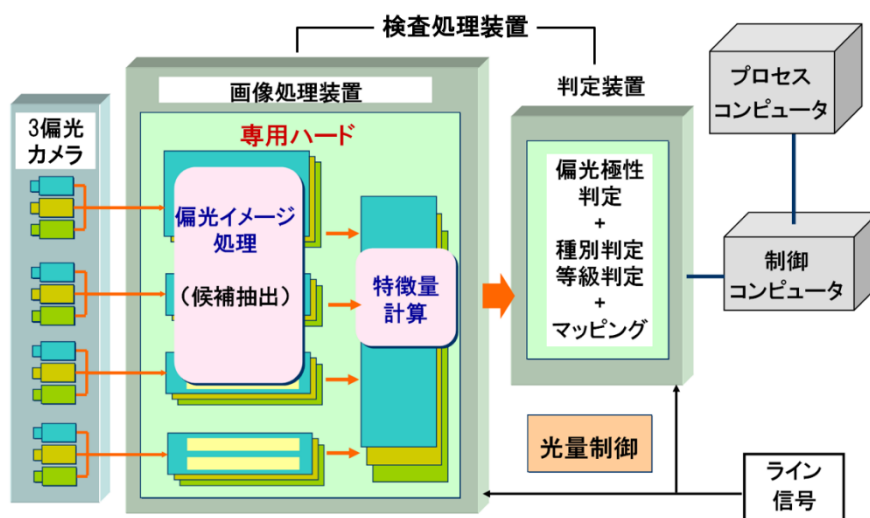


図 6.2.10 信号処理装置の構成図

6-3. 全体システム

以上までの構成により表面検査装置は単体としての機能を装備した。さらに製品コイル上のどの位置にどのような欠陥が検出されたのかなど、検査結果を GA 製品の欠陥情報として出荷システムまで連結するために統合的なシステムを構成した。図 6.3.1 に、溶融亜鉛めっき工程後の GA 鋼板の検査工程の概要を示す。図左方より GA 鋼板が入り検査ヘッドを通過、その後 B 面、A 面の順に作業台を通過して自動マーカへ至る。作業台では検査基準に則り適宜鋼板の走行を停止して厚さや幅の測定、鋼板の色合いなどの品質検査を行うが、場合によっては表面検査装置が出力した欠陥について詳細な確認を行うことがある。その後、品質保証の仕様に依って自動マーカ(図 6.3.2 参照)が欠陥部にマーキングを行う場合がある。

検出された欠陥情報は欠陥位置が作業台へ至るまでに作業者と自動マーカへ伝達されなければならない。鋼板の走行速度は最大 10m/s 程度であり、検査装置から作業台までの鋼板走行距離が 20m 程度の場合、検査処理から伝達終了までの時間は約 2 秒であって、この間に検査装置は撮像した画像から欠陥を抽出しなければならない。画像処理は処理内容と画像容量に依存して負荷すなわち時間が増えるが、本装置ではその特徴である複数の偏光方位画像における欠陥候補の抽出処理と、3 偏光画像における輝度極性の分析等、必要な処理を行えるよう設計する必要がある。240MB/s の画像情報を処理するにはソフトウェア処理では間に合わないため、上述の如く本装置では専用のハードウェアを開発した。なお、画像処理装置の仕様は、カメラの仕様と直接関係し、欠陥検査においてどの程度の空間分解能が必要かは優先事項ではあるが、分解能にほぼ比例してカメラと画像メモリのコストが増大する。

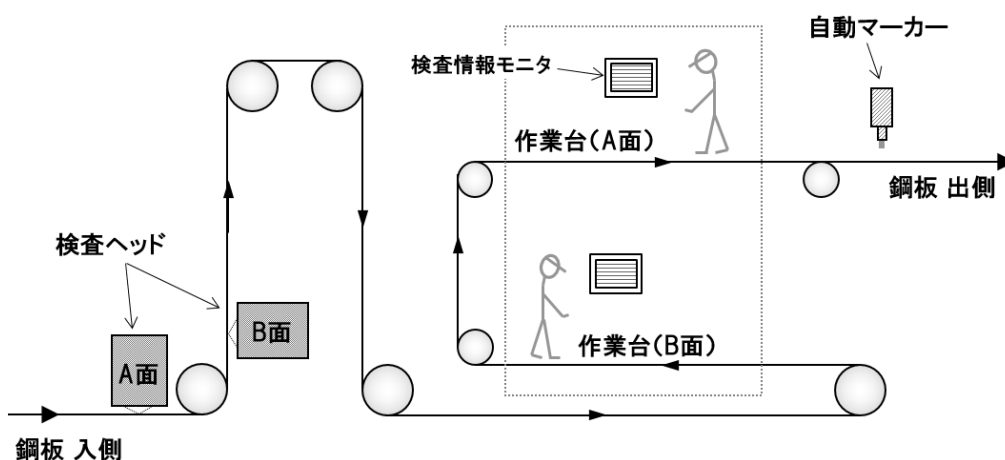


図 6.3.1 表面検査装置周辺の通板概略図

また、長さ方向の分解能を小さくすると露光時間が足りなくなるため、光源の増強も要する。すなわち、工業的実用化のためには、技術及びコストの側面からバランスのとれた実現性を考慮する検討を要する。

以上のような開発を経て、1999年、初号機をJFEスチール(株)西日本製鉄所福山地区の合金化溶融亜鉛めっき工程において実用化した^{6-1), 6-2), 6-3), 6-5)}。このシステムの概略を図6.3.2に示す。本装置は単体での検査運用のみならず、欠陥部への自動マーキングによって顧客へ製品の品質情報を提供するシステムとして運用されている。製品コイルごとの欠陥情報は所内の上位情報網へ上げられ、コイルごとの品質情報が管理される。本装置は品質保証機器として連続運転されるものであり、基本性能はもとより、機器としての信頼性が非常に重要である。そこで上述のごとく自己診断機能、光源ランプ劣化モニタ、連続記録された画像による検査シミュレートなどを用意して、常に健全な状態で運用できるよう工夫した。稼働開始後は、検査した製品を定期的を目視検査工程へ送り、装置の判定結果が適正な状態を維持しているかどうかを常にチェックしながら運用している。

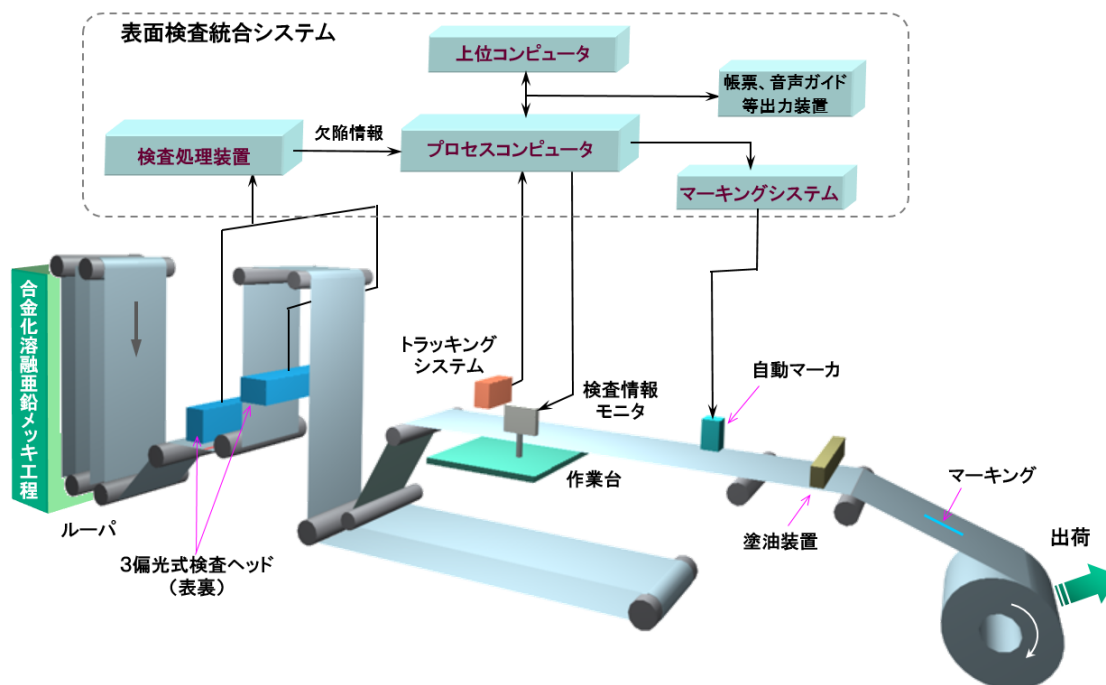


図 6.3.2 3チャンネル偏光式表面検査装置の全体システム 概念図

6-4. 性能の検証

検査ヘッドから全体システムまで完成した段階で、実際の GA 鋼板製造中の検査データを基に本装置の性能の検証を行った。工業的に使用する上での検証項目には、基本的な動作、検出能力から保全性の確認など多くの項目があるが、ここでは本研究に基づいた、欠陥と油痕またはそれに類似の部分との識別能力と総合的な検出能力とを検証する。

6-4-1. 識別能力の検証

まず、欠陥と油痕との識別能力すなわち、油の過剰検出を十分抑制できているかどうかを確認してみる。例として幅 1500mm、長さ 25m の GA 鋼板における 3 方位の偏光画像から抽出されたオブジェクトのマップを図 6.4.1 (a)～(c) に示す。横軸が鋼板の製造流れ方向、縦軸は幅方向である。プロットは、コントラストが 0.05 を超える (± 8 輝度以上) オブジェクトである。ただし、図 6.4.1 (a) (b) は正常部に対し正極性を、(c) は正負両極性を示したオブジェクトであり、従って油痕も含まれる。(a) のみにプロットされたオブジェクトは、さらに薄い油痕であり図 5.4.2 に示したような軌跡を示す部分と考えられる。5-4 節に述べたように、

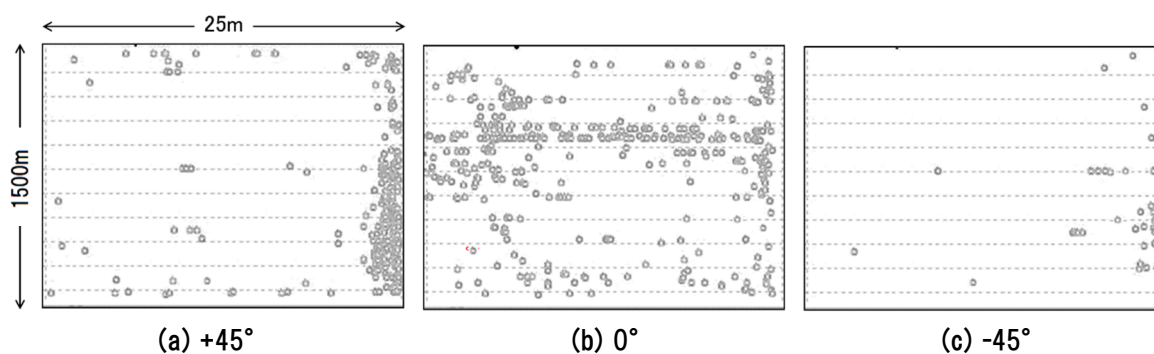


図 6.4.1 GA 表面における 3 種の方角画像上のオブジェクト

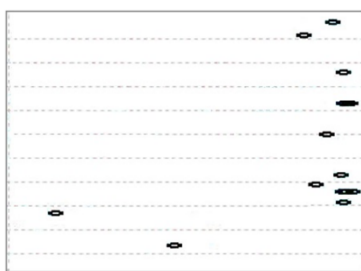


図 6.4.2 3 方位角偏光画像の合成判定後の欠陥プロット

油痕や化成処理液は屈折率と厚さによって様々な形状の軌跡を描くことが予測され、(b)における多数のプロットは、これらの多様な軌跡を持つオブジェクトと推察される。

図 6.4.2 に、図 6.4.1(a)～(c)すなわち 0, +45, -45° の全方位のイメージで正極性を示して欠陥と判定されたオブジェクトを示した。図上では一部重なっているが、装置が欠陥と判定したオブジェクト 13 箇所あった。図 6.4.1 には合計約 1500 箇所のプロットがあるが、これら全てについて、装置による欠陥検査の後、製品を検査専用のラインにて展開して詳細に目視検査を実施した。その結果、欠陥は、図 6.4.2 に示した箇所以外には存在せず、また装置が欠陥以外と判定した箇所は全て油痕、かすかな模様、若しくは確認できないものであった。これにより、本装置が欠陥数の 100 倍以上のオブジェクトから油痕などの過剰な検出分を除外し、欠陥のみを確実に抽出できていることを確認した。

装置の健全性を維持するために性能の確認を日常の運用において定期的実施することとした。図 6.4.3 はその実例である。図は横方向に鋼板長さ約 3000m、縦に鋼板の幅方向約 1m の範囲における欠陥候補が淡い色のプロットで示されており、この例では約 2 万点ある。その内、定期性能確認において約 50 点の欠陥の存在を低速の目視検査と照合し、未検出と過剰な検出がない結果を得た。図において欠陥は濃い色のプロットである。欠陥以外の淡い色のプロットも鋼板表面の何らかの情報を示しているが、これについては、8-2-1 節において考察する。

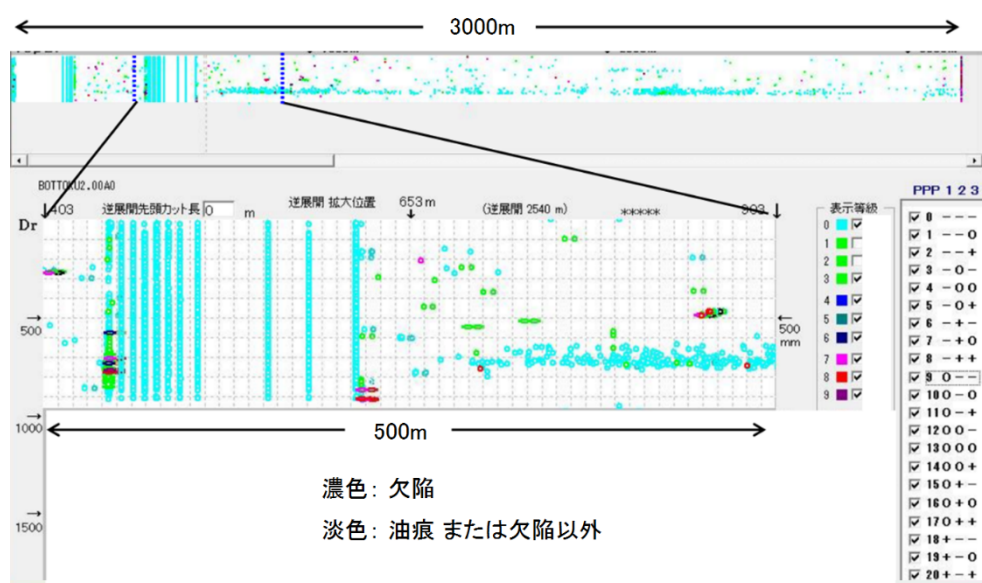


図 6.4.3 検出動作確認画面の例

6-4-2. 検出性能の検証

次に、本装置の実運用における検出性能を検証した。特に重要な定量的指標は 2-4 の最後に示した、目的の欠陥を検出する能力「検出率」及び目的外のオブジェクトの検出を抑制する能力「過剰検出率」である。この 2 項目の検出性能の指標について再度示す。

① 検出率 r ;

検査を行った製品表面に存在する検出対象欠陥の総数 n_T に対し、装置が正しく検出した欠陥数 n の割合。

$$r = \frac{n}{n_T} \times 100[\%] \quad \dots (2-6)$$

② 過剰検出率 r_e ;

欠陥として検出したオブジェクトの総数 N_T の内、油痕など欠陥ではないオブジェクトの数 n_e の割合。

$$r_e = \frac{n_e}{N_T} \times 100[\%] \quad \dots (2-7)$$

検出率 r 及び過剰検出率 r_e の確認試験方法は以下の通りである。

- 1) 目視、従来装置、及び 3 チャネル偏光式検査装置による製造下検査を行う。
(製造速度 50~200mpm)
- 2) 検査専用工程(リコイルライン)において製品コイルを 0(停止)~50mpm の低速で目視確認する。
- 3) 製造下検査とリコイルラインでの確認結果を照合する。
- 4) 照合数 ; 欠陥 1000 体, 他のオブジェクト 20000 体。

2-1-2 節で述べたように検出するべき欠陥には複数の種類があり、また 2-2-4 節で述べた特徴量で分類される「等級」がある。この性能検証では等級には無関係に、表層下に硬い介在物がある可能性が高い介在物性欠陥を対象とした。結果を図 6.4.4 のグラフに示す。

横軸は検査の方法、縦軸上向きは検出率 r 、原点下向きは過剰検出率 r_e である。

グラフ左端のバーは、鋼板を 50m/s にて運転中に目視検査した検出結果であり、検出率 27%、すなわち 73%の欠陥を見逃している。製造中の目視検査では、コントラストが高く大型の欠

陥しか発見できないために、こうした結果となる。通常の製造速度は80~200m/minであるので、目視では低コントラスト欠陥はほとんど見つけれられない。一方、油痕はコントラストが低いためこれらを過剰検出することもない。グラフ中央のバーは、正反射と拡散反射の組み合わせによる従来の市販検査装置の結果である。欠陥自体の検出率はほぼ満足のいく性能であるが、過剰検出が30%を超えており、運用すると確認作業が多数発生して生産効率に多大な影響を及ぼす。右端が本装置による結果であり、検出率100%、過剰検出率0.7%である。

2-4節に掲げた本研究の技術課題(4)に掲げた「欠陥検出率100%、過剰検出1%未満」の性能目標は以上のとおり確認された。また、図6.4.4は、通常の製造速度における既存の検査装置との比較であるが、時折発生するルーパーに蓄積した鋼板をはき出す操作の最大速度600m/min(10m/s)における運転においても、本装置は検出率100%と、過剰検出率1%未満の性能を常に発揮していることを確認している。

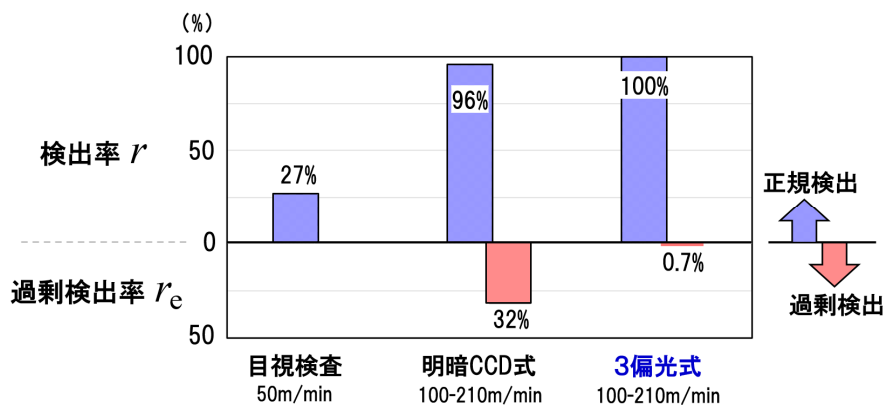


図 6.4.4 3チャンネル偏光式表面検査装置の実働性能検証結果

6-5. 材質に依存した実運用課題の考察

本技術を広く実用化展開していくためには、5-6 節に述べた本手法特有の光学的要素の感度分析と仕様の整理のほか、欠陥の SN 比に関係した鋼板正常部の地肌ノイズなど、鋼板材料に依存する項目について同様の考察を要する。本節ではこれらの項目に関して調査と考察を行い、基本的な運用指標をまとめる。

6-5-1. 鋼板の厚みと画像ノイズ

以降、検査対象である GA 鋼板の材料属性が、検査にどのような影響を及ぼすかを、各方位角画像中から欠陥候補を抽出する“しきい値”の観点から調査し考察する。しきい値は、画像から欠陥候補となるオブジェクトを抽出する際の最も基本的で重要なパラメータである。データは全て、実際の GA 製造における本装置からの出力を基とした。

図 6.5.1 は鋼板厚さと正常部画像ノイズの標準偏差 σ_+ との関係である。(ノイズレベルの定義は 2-2-3 節参照) 画像内における欠陥の抽出は、正常部に対して正極性側で行うため、ノイズは σ_+ にて評価した。図 6.5.1 における 3 種のプロットは受光方位角度毎のプロットを示しており、受光方位角に依らず、2.0mm 程度までは鋼板の厚さが増すとノイズも増える傾向がある。正極性ノイズは主に明るい孤立した点状ノイズであって、光学条件としては正反射成分であるため、原因は欠陥部に多く生成するフラット部であると推察できる。従って、厚い鋼板ほどフラット部が増えてノイズ要因になると言える。ノイズは欠陥候補を検出するためのしきい値に影響するため、鋼板厚さとしきい値の設定に関して以下に考察する。

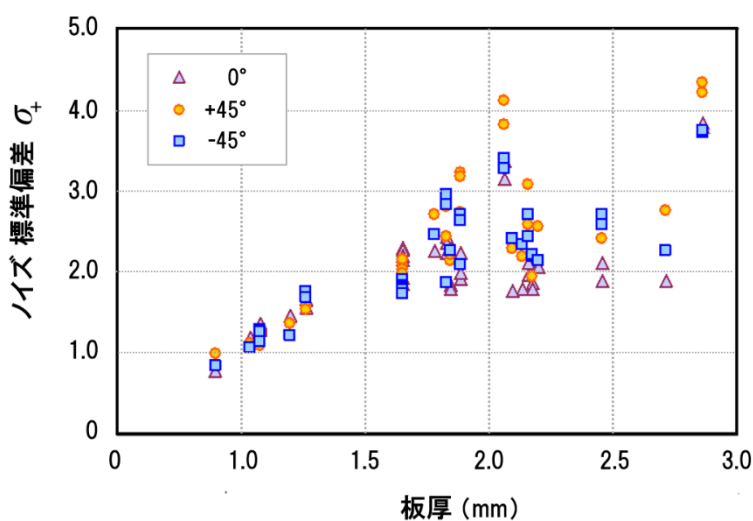


図 6.5.1 鋼板厚み vs ノイズの標準偏差

目視による照合が可能な限界コントラストは $C_d = +0.05$ であるので、正極性側の輝度レベルに換算すると、 $C_d = +0.05$ に相当する限界輝度 I_L は、基準輝度 $I_0 = 127$ として、

$$I_L = I_0 + I_0 \times C_d = 127 + 127 \times 0.05 = 133 \quad \dots (6-3)$$

である。一方、鋼板の表面欠陥検査における欠陥候補抽出では、正常部画像のノイズの標準偏差 σ を求め、経験的にその2~3倍の値を候補抽出のしきい値とする。従って、欠陥候補抽出しきい値の輝度レベル I_D は $\sigma = 2.0$ のとき、

$$I_D = I_0 + 2\sigma = 131 \quad \dots (6-4)$$

である。これら数値の関係を図 6.5.2 に示した。 $I_D < I_L$ すなわち欠陥候補抽出輝度のしきい値を目視限界の輝度値より低く設定して検査すれば目視限界に近い欠陥候補を検出できる。一方で $\sigma = 3.0$ であれば $I_D = 133$ であるため欠陥候補は検出されない。ただし後述の図 6.5.5 によれば、厚さ 1.8mm 程度から一部の鋼板では欠陥候補の抽出が困難になると言える。さらに検査を厳格化して、 $\sigma < 2.0$ の条件とすると、厚さ 1.5mm 以上では欠陥候補の抽出が困難となる。実際の運用においては、鋼板の厚さに応じて欠陥候補の抽出しきい値を段階的に変化させたテーブルをもって装置の設定変更を行った。鋼板の厚さとノイズとの関係として、厚いほど表面合金層の複雑なストラクチャの粗さが大きく、突出した部分が多くロールによって潰されてフラット部となり、結果として画像内のノイズが増えることが考えられる。しかし、プロセス上の原因は明らかになっておらず今後の課題である。

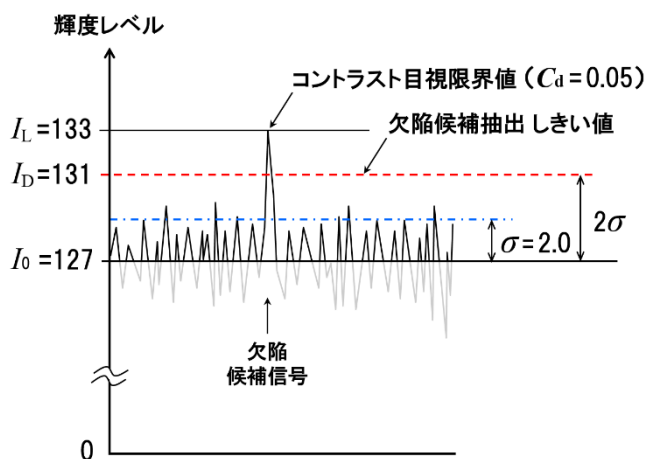
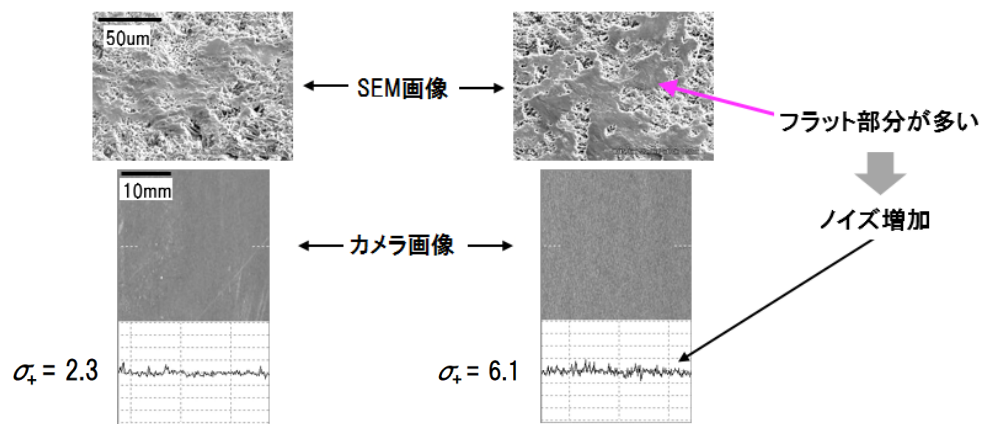


図 6.5.2 ノイズレベルと欠陥候補抽出しきい値との関係

6-5-2. 調質圧延荷重の影響

GA 製造においては、多くの製品に鋼板の平面形状への矯正、表面粗さの調整、降伏点伸びの除去、歪み起因の縞模様の除去などを目的として調質圧延を行う。また、自動車用 GA ではプレス性及び塗装前後の外観の平準化、安定化のために表面テクスチャを整える重要な工程でもある⁶⁻⁹⁾。表面テクスチャは、調質圧延ロール表面に付けられるマイクロ構造であり、指標として表面粗さ Ra が多く用いられる。合金化処理後の GA 表面は艶のないマットな状態であり、調質圧延によって若干の光沢を呈するようになる。GA 表面に付加されるテクスチャは、これまで観察してきたファセットであり、またファセットは Ra=1 μ m 程度の粗さ(触針式粗さ計による)をもつようになる。ただし、これらは圧延荷重によってその程度が変化し、それに伴って全体の反射率やノイズは変化するため、検査への影響を知っておく必要がある。

図 6.5.3 は、調質圧延荷重 1.0 及び 2.0(共に相対値)を通過した GA 鋼板の表面 SEM 像とカメラ画像である。図 6.5.5(a)に対する荷重が 2 倍の(b)では、SEM 像に見られるとおり荷重が増すとロールによるフラット部分すなわち鏡面反射要素が増え、画像においてはその影響により反射輝度の高い部分がノイズとして観察される。従って、欠陥候補抽出のしきい値を同じ場合、調質圧延荷重が高いほど欠陥候補の数は増え、前処理装置の負荷に直結するため、荷重とノイズ値の関係を把握しておくことは重要である。実際の製造においては、材質特性、厚さ、合金化度などの仕様をもって一種の製品諸元とし、その製品種の製造における調圧荷重も一定である。従って検査時のノイズもその製品種に固有の値をとることになり、



(a) 調質荷重 1.0 表面と信号ノイズ (b) 荷重 2.0 における表面と信号ノイズ

図 6.5.3 調質圧延荷重とパラメータとした GA 表面の性状

検査においては製品種毎に欠陥検出のしきい値をセットする必要がある。また、ロール側も使用時間に依存して次第に表面が摩耗し、初期のテクスチャと状態が変わってくるため、検査画像では正反射成分が増加してノイズが増える。こうした変化に対しても、ノイズ値がどの程度の範囲で正常な検査が可能であるかを把握しておく必要がある。

次に、圧延荷重をパラメータとして表面粗さと光沢度の関係を調べてみる。光沢度はユーザーへの品質保証項目のひとつであり、また光沢度が高いほど表面欠陥は目立つため、欠陥見逃しは避けねばならない。図 6.5.4(a)は、表面粗さ Ra を横軸、光沢度(相対値)を縦軸にとって圧延荷重を変えた場合のプロット例である。これによれば、圧延荷重によるプロット分離が明確であるが、光沢度が高いプロット(図中の◆)は圧延荷重が少ないプロットであり、図 6.5.3 にあるとおりの画像ノイズは低い。従って、欠陥候補抽出のためのしきい値をより低く設定できて欠陥を見つけやすくなるため、高い光沢度が要求される GA に関しては、検査装置運用は障害にならない。一方、Ra が 1 μm を超える場合に荷重が 2.0 となり、ノイズが増えることが想定される。

また、図 6.5.4(b)は、横軸に合金化度(Fe-Zn 合金における Fe%)をとって光沢度との相関をみたグラフである。GA は一般に、合金化度が上がると表面がよりマットになって全反射率が低下する。光沢度は特定の入射角の光に対し特定の反射角の光量を測るため、グラフ中の荷重 1.0 に見られるように合金化度とは逆相関の場合が多いが、それ以上に荷重による影響が顕著である。従って、製造パラメータのひとつである調質圧延荷重は、欠陥候補抽出のためのしきい値設定において考慮すべき重要な要素と言えるが、材料の特性とも密接な関係があり、一律の設定は困難である。(次節に詳述)

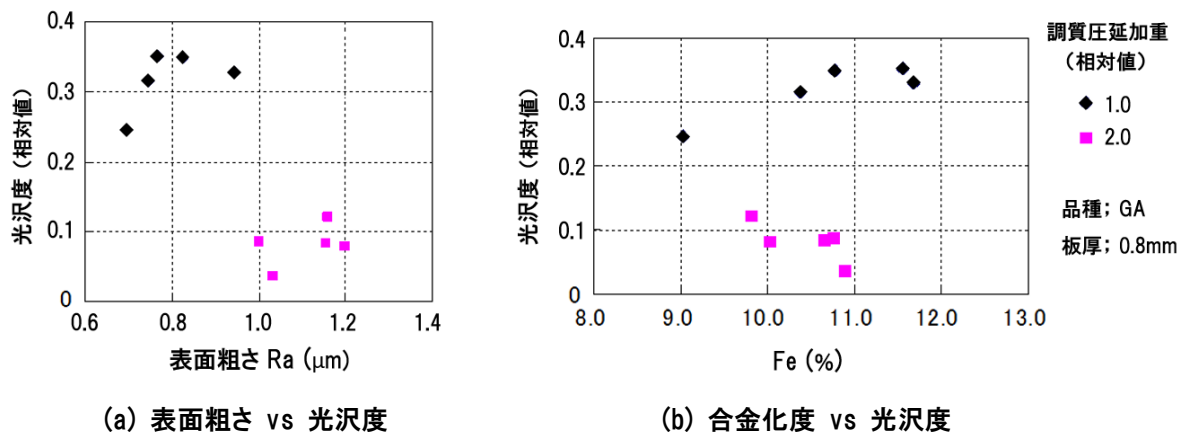


図 6.5.4 調質圧延荷重が光沢度に与える影響 (光沢度は相対値)

6-5-3. 材質特性(TS)の影響

他の鋼種と同様にGA鋼板にも様々な特性があるが、最も代表的な特性は引張強度(Tensile Strength, 以降 TS)である。各方位画像における欠陥候補抽出のしきい値は、画像の平均ノイズの標準偏差から決定されるため、TSとノイズの関係を把握する必要がある。

一般に調質圧延は一定の伸び率を設定して行う。TSに依らず調質圧延の伸び率を一定に保つためには、TSの高い材料ほど調質荷重を高く設定する必要がある。従ってロールがGA表面の結晶構造の先端部を潰す力は強くなる。6-5-4節に述べた通り、画像ノイズの根源は正反射するフラット部であり、圧荷重が強いほどフラット部は大きく、また数多く生成されてノイズの増加を引き起こす。従って、正常部においてもファセットの生成が増加するためノイズも増加すると考えられ、本装置による検査においては、TSが高い材料ほど欠陥候補の抽出しきい値を高く設定する必要があると予想される。

図 6.5.5 に、本装置の実際の運用における検査対象のGA鋼板のTS(横軸;相対値)と、特定の程度の欠陥候補を抽出するしきい値(縦軸)との関係を示す。欠陥候補の抽出は、正常部の画像ノイズの標準偏差の2倍の輝度($2 < S/N$)とした。ここで、しきい値とは、17を例にとると、基準輝度127に17を加えた144輝度を越えた信号を欠陥候補とする設定であり、コントラスト $C_d = 17/127 = 0.13$ 以上の部分を抽出する境界値のことである。

図 6.5.5 によれば、TSが高いほどしきい値を低く設定できており、予想とは逆の相関を示している。これについては次のような理由が考えられる。

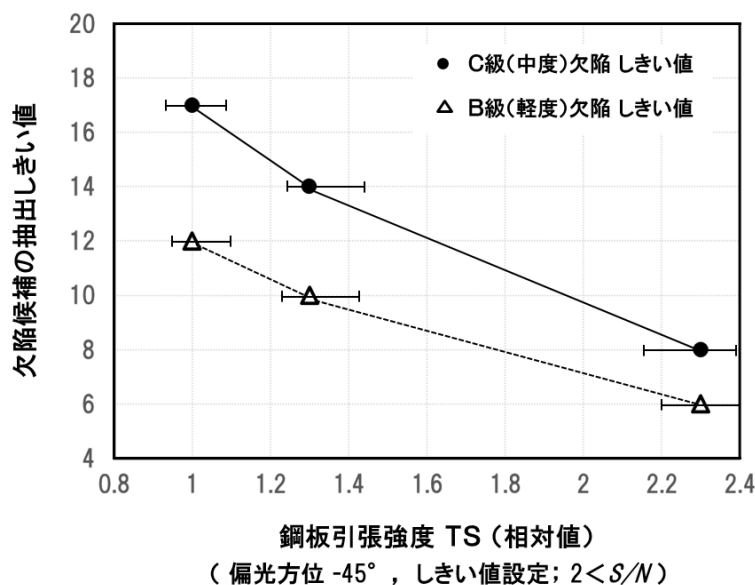


図 6.5.5 GA 母材強度(TS)と欠陥候補抽出しきい値の関係

TS の高い材料では、高荷重で歪を加えるほど延性が低下する。また、降伏強度も高い故に弾性回復も大きくなりエッジ部に波状の変形が生じるなど、高荷重が返って特性と形状の悪化を引き起こす場合もあるため、高張力鋼板において軟質材より調質荷重を低くした製造は度々行われる。さらに、伸び率は張力とのバランスも関係するため、TS と荷重の関係は必ずしも TS と調質荷重とは正の相関ではない。実際の製造における欠陥候補抽出しきい値の設定は、画像のノイズを測定して行われるが、ノイズは 6-5-4 節に述べた調質圧延荷重のほか、GA 鋼板自体の合金化度合いにも依存して変化する。実製造における結果として、TS が高いほど画像のノイズは少なくなっているため、欠陥候補の抽出しきい値を低く設定できた。従って、TS の高い材料ほど高感度な運用ができると言えるが、TS 相対値 1.0 の材料における、しきい値 17(コントラスト $C_d=0.13$)は、中度の欠陥候補を抽出するうえで特に障害にはならない。

一方、TS の相対値 2.3 の高強度材料における軽度欠陥の抽出しきい値 6 とは、コントラストでは $C_d=0.05$ であって目視確認の限界値である。すなわち、仮にこれ以下のしきい値を設定できて感度を上げても、目視による欠陥の照合は困難であって、実運用上は、しきい値 6 が介在物欠陥(正極性)候補の最小設定値となる。

結論として、TS 相対値が 2.3 より小さい材料は、TS の減少に伴って画像ノイズが大きくなるため、欠陥候補抽出のしきい値を大きく取る必要があることが判った。実際の運用では、欠陥の程度と TS とのマトリクスを作成して、しきい値のセットを数多くテーブル化する方法を採った。

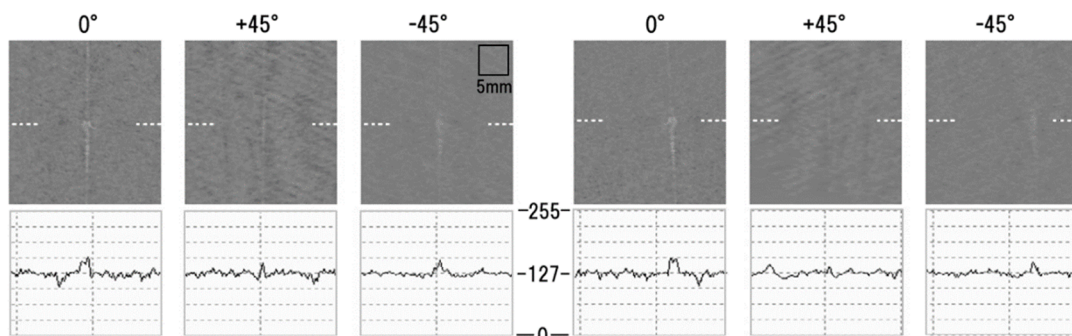
ここで、現状の検査装置の性能確認が目視との照応によって行われる限り、将来、より低コントラストの欠陥を検出する必要が生じた際の性能確認をどのように行うべきかとの課題が残る。実際に、しきい値を 6 未満に設定しても、装置は何らかのオブジェクトを検出し、そのうちの一部は、コントラストは低い鋼板表面にパターンを有しており、マクロな目視観察において確認が可能である。しかし、それ以外のオブジェクトは照合が困難であり、これらは何らかの欠陥である場合には、目視に代わる別な検査手法が必要になる。この対策については、7-3 節において本技術の展開としてその可能性を考察する。

6-5-4. 両面に現れる欠陥

極低炭素鋼のような軟質材においては、同一の欠陥が鋼板の表裏で観察される特異な現象がある。図 6.5.6(a)は、仮にオモテ面とした面に現れた介在物欠陥の例であり、全ての方位角画像に正極性で観察される。一方(b)は、カメラ視野の若干のズレがあるものの、同一箇所のウラ面で観察された画像である。+45° 画像のコントラストは弱く、画像全体でもオモテ面より弱い。同一の欠陥が観測されている。

介在物の主要成分であるアルミナ Al_2O_3 とシリカ SiO_2 のビッカース硬度はそれぞれ 15GPa, 9GPa 前後、一方で鋼板母材は 2-4GPa 程度であって介在物に比べれば柔らかい。従って、鋼板の片面表層に介在物があれば、ロールによって圧下されて鋼板母材を押し、裏面に凸の形状として現れ、その凸形状が裏面のロールで潰されてファセット群が生成される。この様子の推定図を図 6.5.7 に示す。介在物の厚みにも依存すると考えられるが、図 6.5.6 のような貫通欠陥は、こうしたメカニズムによって生成されると推定される。

貫通して検出された欠陥は、相応の大きさをもった介在物によって生成すると考えられ、プレスの際に割れる可能性が高いため、品質保証上の運用として、オモテ側の検査情報とウラ側の検査情報を統合した総合判定において、最も重大な欠陥として判定するよう設定した。



(a) オモテ面の欠陥画像

(b) 同一欠陥のウラ面画像

図 6.5.6 軟 GA 材の表裏同一箇所に出現した介在物欠陥の例

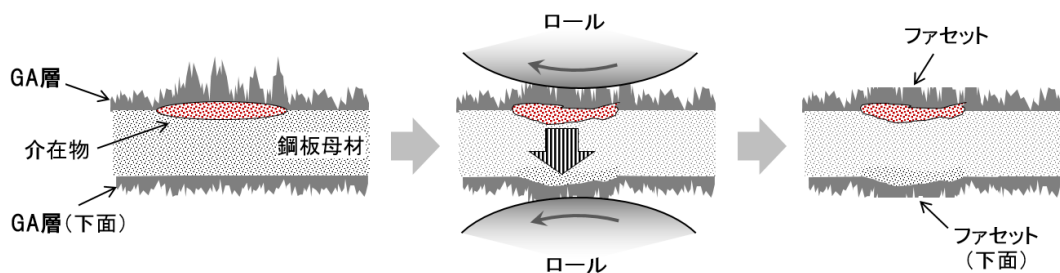


図 6.5.7 介在物がある場合の両面鏡面部の生成過程の推定図

6-6. p, s 偏光位相差制御によるノイズ除去機能

本装置は、入射光と受光に偏光を使用するため、油痕以外にも検査対象の表面に偏光に敏感な物質が存在する場合に、通常の光学装置では実現不可能な特有の機能を有している。本節では、実際に本装置の付加機能として、GA 以外の鋼板製造工程において実用化した機能について述べる。

図 6.6.1(a)は、冷延鋼板表面に、水分に起因した薄い鉄の酸化膜が斑点模様状に無数に観測された例である。このような模様が鋼板全面に現れると目視や通常の光学系ではノイズとなって低コントラスト欠陥の検出を阻害する。一方、図 6.6.1(b)は、本装置の+45° 受光検光子の前に 1/4 波長板を設置した場合の同一箇所の画像である。(a)に観測される模様が抑制され、ノイズ値の標準偏差が 7.1 から 3.9 へと低減されていることがわかる。輝度プロファイル採取線上の画像左端にある黒い付着物の信号強度は、(a)と(b)で大きな差はないことから、模様部分のみの輝度が低減される効果が確認できる。この効果は、以下のように説明できる。

- 1) +45° 直線偏光の入射光は、鋼板表面及び酸化膜の反射を経て楕円偏光となる。
- 2) 反射された楕円偏光が、1/4 波長板により p, s 偏光成分間の 90° 位相シフトを受けて直線偏光に変換される。
- 3) このとき方位角は、受光側(+45°)との消光角度(-45°)となって輝度が低減される。

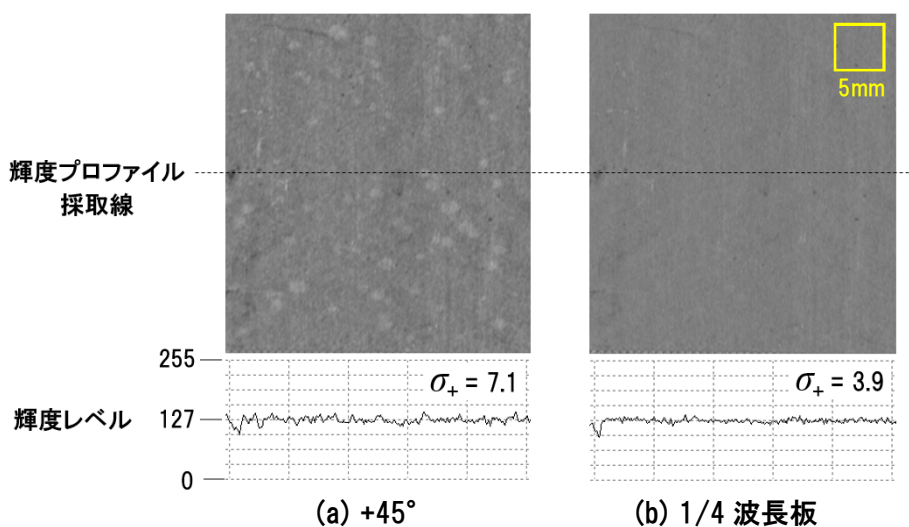


図 6.6.1 1/4 波長板挿入による地肌ノイズの低減効果

この作用は、鋼板の種類により不可避的に表面に付着または生成する油膜痕、化成処理液痕、酸化膜のほか、製品保護のために行うコーティングの表面反射除去にも利用できる。実際の欠陥信号のSN比を向上させた例を、**図 6.6.2**に示す。図 6.6.2 (a)は、特殊な皮膜の表面処理鋼板を製造する際に生じる表面の細かい無害な模様を本装置の直線偏光フィルタによる構成を用いて観察した例である。画像中央部に介在物欠陥が捉えられているが、輝度プロファイルをみる限り、模様によるノイズが多く欠陥信号の判別は困難である。偏光を用いない通常の光学系でも同様の結果である。一方、1/4 波長板を装着すると、図 6.6.2 (b)のように、模様のノイズのみが抑制されてSN比が著しく向上し、欠陥信号を検出できる。この例では、+45° 方位の偏光画像を示したが、対象に依って効果の発現する偏光方位は異なるため、製造ラインの特質を調査した上で最も適切な偏光条件を装備して運用する。

以上のように、本装置においては p, s 偏光成分の位相差を 1/4λ 板を用いて制御することで、鋼板表面の酸化膜や化成処理膜のムラなどに起因する画像上のノイズを効果的に除去し、欠陥検出能力そのものを維持できる機能を副次的に有している⁶⁻¹⁰⁾。この機能は、様々な対象へ展開する際に非常に有効である。

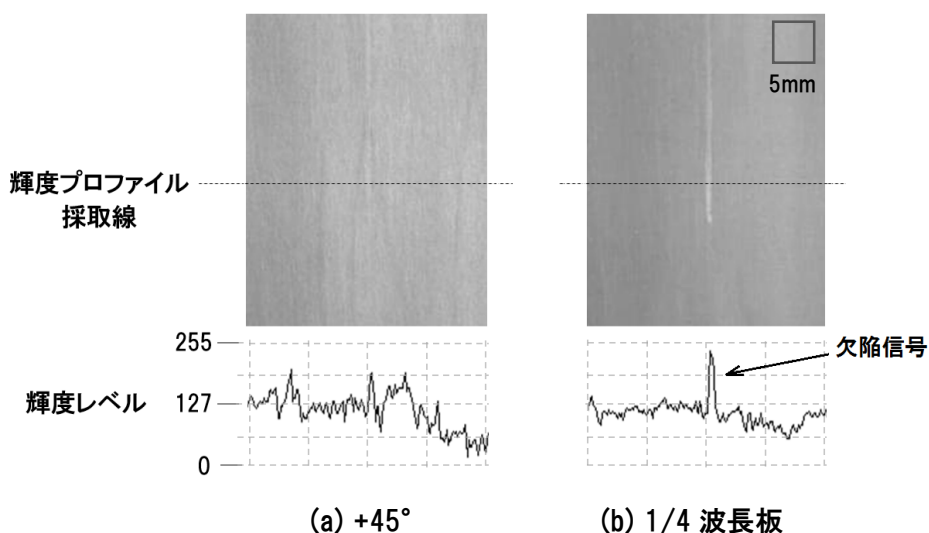


図 6.6.2 1/4 波長板挿入による欠陥信号の SN 比向上効果

6-7. 工業的実用化と商用運用

本研究の工業上の目的は1-3節の最後に述べたように、欠陥のみを高い確度をもって検出可能な装置の実用化によって、鉄鋼メーカーと自動車会社との品質保証形態の変革を図ることである。この商用運用上の目標に対しては以下に述べるとおり、本研究の技術的成果によって従来の方法に比べて格段に確度の高い検査装置を実現したことで達成された。

図 6.7.1 は、従来の GA 鋼板の品質保証方法の概念図である。左端の検査を行い、後に別な再検査・切断工程において欠陥部を切断して出荷するため鉄鋼メーカー側では多くの手間がかかる。また、自動車メーカー側でもコイルに欠陥は無いが細切れのコイルを多数ハンドリングする手間がかかる。一方、図 6.7.2 は本装置によって実現された品質保証方法の略図である。欠陥部切断の代わりに、製造しながら欠陥部へマーキングを施して自動車メーカーへ出荷する。自動車メーカーではマーキング検出を行いながら適宜欠陥部を切断してプレス工程へ鋼板を送る。全体として図 6.7.1 の体制に比べて工程とハンドリングするコイル数が省略された。

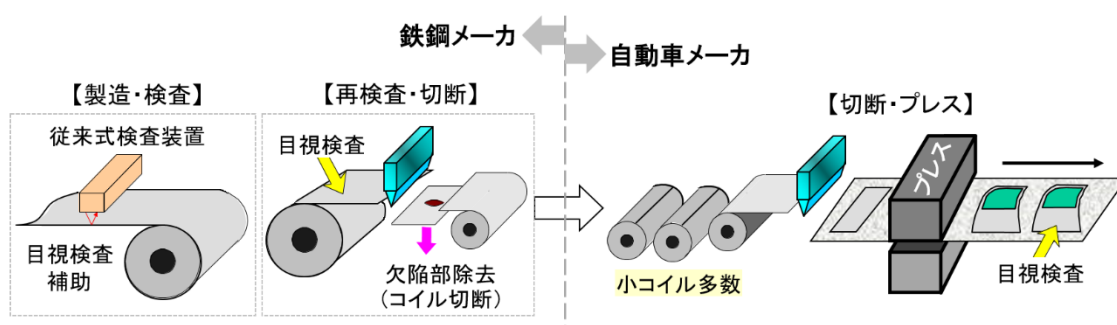


図 6.7.1 欠陥部切断による品質保証

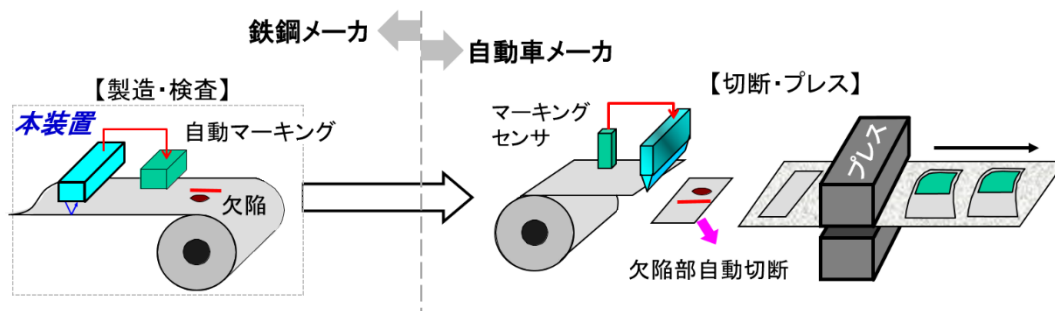


図 6.7.2 欠陥部へ自動マーキングして出荷する品質保証

これにより、鉄鋼業界として初めて自動車用外板を自動車メーカーへ直行出荷する、最も効率的な品質保証を実現⁶⁻¹⁰⁾して商用運用を開始した。これは、本装置の欠陥100%検出、過剰検出1%未満という性能をもって初めて可能なビジネスモデルである。

鉄鋼メーカー側にて欠陥部を除去して出荷するという品質保証の形態は長く続いてきたが、ここでは鋼板製品欠陥部へマーキングを施した「情報付加型鋼板」を介し、「鉄鋼メーカーと自動車メーカーの各々独立の品質管理」から「互いに欠陥情報を共有する一貫品質管理」という、製造・品質保証、販売のビジネスモデルへ変革が成された。表6.7.1に、このようなビジネスモデルの効果を示す。工程とハンドリングの省略による合理化のみにとどまらず、鋼板のカット量の削減も重要な効果である。欠陥部自体は数cm四方程度だが、鉄鋼メーカーにおいては欠陥部を挟んで数mカットされる場合が多く、かつ約2m全幅をカットしなければならないため、欠陥1体に対し数m²がカットされる。この部分はスクラップとなり再使用はされるものの、再溶解にエネルギーを要する。しかし、マーキング出荷においては鉄鋼メーカー側でのカットはなく、自動車メーカー側でマーキング位置を数十cmの単位でカットするため、無駄なカットが大幅に削減されて省資源に貢献できる。

また、本装置の光学的基本構成は従来の画像式検査装置と同様であり、各方位角の画像処理は、輝度極性の判定を別として、従来の装置の機能と性能を包含しており、検出性能に相違はないため、広く展開が可能である。実際に本装置は、通常の亜鉛めっき鋼板、冷延鋼板、特殊な樹脂コーティングを施す鋼板の製造工程へ実用展開され、高い欠陥の識別能力を十分に発揮して、各鋼種の品質保証のレベルを向上させた。

表 6.7.1 鋼板への自動マーキング(欠陥情報付加)によるビジネスモデルの効果

	項目	従来	新	効果
鉄鋼メーカー	再検査工程・要員	必須	なし	能率向上・省力
	コイルハンドリング	小コイル多数	大コイル少数	能率向上
	欠陥部カット	必須・過剰	なし	能率向上・省資源
	欠陥流出	あり	なし	QAレベル向上
鋼板ユーザー	受入れ検査工程・要員	必須	なし	能率向上・省力
	コイルハンドリング	小コイル多数	大コイル少数	能率向上
	欠陥部カット	過剰 受入れ検査で見つけた場合	最小限 マーキング位置のみカット	歩留向上・省資源

6-8. 第 6 章 まとめ

本章では、5 章において提案した原理を基にした 3 チャネル偏光式表面検査装置の実用化と性能の検証について述べた。また、検査対象である GA 鋼板の材料特性に依存する感度解析を行い、本技術を広く展開していくための基礎的な事項について考察した。結果を以下の通りまとめる。

1. 欠陥部と油痕部の偏光反射特性の相違をリアルタイム検出するために、
 - ① 同一の検査線に対し $+45^\circ$ 直線偏光を入射光とし、
 - ② $0, +45, -45^\circ$ の 3 種の固定方位角による反射偏光画像を同時に採取する光学系を考案し、実現した。
2. 各々の偏光画像より欠陥候補を抽出し、提案した原理に基づく信号処理ハードウェア及びソフトウェアをはじめ、オンライン検査システムを実現した。
3. 結果、欠陥検出率 100%、過剰検出率 1%未満 を最大製造速度 10m/s において達成し、技術課題を解決した。
4. 材質特性が検査に与える影響について実データに基づいて調査・考察し、本装置を広く展開するために必要な設計指針を得た。また、これを基に GA の複数のライン及び GA 以外の鋼種へも展開して実用化を成した。
5. 本装置の副次的機能として、 $1/4$ 波長板を受光側チャネルの検光子前に追加装備し、反射光の p, s 偏光成分の位相差を制御することで鋼板表面の無害な模様によるノイズを低減し、欠陥信号の SN 比を向上させる実用上有効な機能を得た。
6. 本研究に基づいて表面検査装置の工業的実用化を図り、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(自動車メーカー)共に合理化効果を楽しむことができるビジネスモデルを初めて実現した。
7. また、従来の検査装置の機能を包含する本装置を、複数の GA 製造工程のみならず、他の鋼種の製造工程へ広く展開し、各鋼種の品質保証レベルの向上を果たした。

以上をもって、欠陥と油痕とを偏光情報を基に識別する技術を、GA 鋼板の表面検査装置として実用化と商用運用を実現した。また GA 以外の複数鋼種へも、広く本研究の成果を展開した。

第6章 参考文献

- 6-1) 杉浦寛幸, 河村努, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 風間彰, 田中一, 「偏光を用いた鋼板模様状欠陥検査装置の開発」, 計測自動制御学会 第19回センシングフォーラム資料, (2002), 3-6.
- 6-2) 風間彰, 杉浦寛幸, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 田口昇, 「鋼板表面欠陥の偏光反射特性の解析とその高速検査技術への応用」, 鉄と鋼, Vol. 90, No. 11 (2004), 870-876.
- 6-3) 杉浦寛幸, 河村努, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 風間彰, 田中一, 「偏光を用いた鋼板模様状欠陥検査装置の開発, 「偏光を用いた薄板模様状欠陥検査装置の開発」, 日本鉄鋼協会 材料とプロセス, Vol. 15, No. 2 (2002), 251.
- 6-4) 風間彰, 大重貴彦, 「鋼板表面欠陥の偏光画像解析」, 材料とプロセス(CD-ROM), Vol. 22, No. 2 (2009), 179.
- 6-5) A. Kazama and T. Oshige, "A defect inspection technique using polarized images for steel strip surface," Proc. of SPIE, 7072 (2008), 70720L1-9.
- 6-6) 風間彰, 大重貴彦, 「複数方位の偏光イメージにおける相対的輝度特性を利用した鋼板表面検査技術」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47. No. 12 (2011), 591-596.
- 6-7) A. Kazama and T. Oshige, "Correlation of Optical Microstructure and Macroscopic Intensity of Defects on Steel Strip Surface," ISIJ International, Vol. 54, No. 8 (2014), 1843-1848.
- 6-8) 「光学式表面欠陥検査」, 鉄鋼便覧, 第5版, 第5巻, 日本鉄鋼協会編, 東京, レタープレス(株) (2014), 83-84.
- 6-9) 木村幸雄, 植野雅康, 三原豊, 「調質圧延における亜鉛めっき鋼板への表面テクスチャの転写挙動」, 鉄と鋼, Vol. 95, No. 5 (2009), 399-405.
- 6-10) 風間彰, 大重貴彦, 「日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-15 3チャンネル偏光式鋼板表面検査装置の開発」, 日本鉄鋼協会 ふえらむ, Vol. 11, No. 5 (2006), 300.

第6章 以上.

第7章 研究の成果と今後の展開

1～6章において論じた本研究の成果をまとめる。

7-1. 技術課題に対する研究の成果

本研究の技術課題(2-4節)は以下の通りである。

課題(1) GA鋼板表面の3種のオブジェクト, ①正常部, ②欠陥部(めっき表層下に金属酸化物の介在物が存在するタイプ), ③油痕部(無害な模様)のマイクロ性状及び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, 製造速度10m/sにおいて欠陥検出率100%, 過剰検出1%未満を実現する。

これらの技術課題に対し, 本研究により以下の成果を得た。

(1) 欠陥, 油痕, 正常部の3部位につき, ミクロ性状と偏光反射特性を, 光学的方法及びミ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, 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) 欠陥と油痕の偏光反射特性について、光学モデルを基に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 5.7.1)
 - 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。
 - 5) 3種の異なる偏光方位角画像($+45, 0, -45^\circ$)における輝度の極性の相違を欠陥と油痕との識別に用いた表面検査の方法「3チャンネル偏光式表面検査」を考案した。
- (3) 以上の研究結果に基づいて3チャンネル偏光式表面検査を実用化するための研究開発を行い、以下の成果を得た。(第6,7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、製造速度最大 10m/s において検出率 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) 本研究によって見いだした原理を基に、3チャンネル偏光式表面検査装置の工業的実用化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。
- (5) 従来の検査装置の機能を包含する本装置を、複数のGA製造工程のみならず、他の鋼種の製造工程へ広く展開し、各鋼種の品質保証レベルの向上を果たした。

7-2. 今後の課題

本研究の過程において、研究の目的と研究の過程に直接影響を及ぼすものではないが、本研究を深化させ得るいくつかの未解明または不明瞭な課題が生じた。以下のとおりである。

1. 表層下介在物に起因する欠陥のサイズ、体積、あるいは形態と、鋼板の材質、調圧、製造速度など、互いに影響し合うパラメータと、表面に現れる鏡面部の面積率との相互の定量的な関係が明らかではない。
2. 正常部、油痕部及び欠陥部の拡散反射を含めた、より厳密な光学モデルによる反射光の分析と、各オブジェクト画像のコントラストとの関係は未解明である。
3. 分光偏光反射特性の解析は未着手である。

今後、以上の課題を解明していくことで、鋼板表面におけるさらに多くのオブジェクトのマイクロ性状と光反射特性が解明できると思われる。それにより、本装置のさらなる性能と機能の向上が成され、より汎用化されて広い展開が期待できる。

7-3. 本研究に基づく技術の展開に関する考察

本節では、本研究を発展させ広く活用していく技術的な可能性に関し、以下の2項目について考察・展望してみる。

- ① 検査対象表面の光学物性値をリアルタイム計測可能な技術。
- ② 本装置のセンシングデータを、データサイエンス、AI等で積極的に活用する技術。

7-3-1. リアルタイム偏光パラメータの面計測への可能性

本研究の成果は、鋼板の製造現場で実現・展開されたが、鋼板製品はGA、連続焼鈍以外にも多くの製品において表面検査の課題を抱えている。GAの表面検査においても、近年はさらなる高感度化を進めており、過剰検出されるオブジェクトの識別技術は、より高度化が求められる。また、識別技術を高度化することで、新たな用途も拓けると考えられる。そこで本章では、本技術の機能をさらに進化させ得る技術検討を行う。

これまで3種の方位角の偏光イメージを用いた表面検査技術に関して述べてきたが、この技術の特徴は、検査対象の偏光反射特性の相違を捉えることである。本技術では、金属表面反射(欠陥部)と誘電体表面反射(油痕部)の、方位角に依存した正常部に対する反射輝度極性の相違を利用して識別を行うが、この方法が成立する根源的な理由は、鋼板表面のオブジェクトにより、入射光の偏光状態が変化することによる。すなわち、偏光パラメータ Δ 、 Ψ が変化することによっており Δ 、 Ψ を計測することは、本技術の上位の技術へ繋がる。

また、本技術のもうひとつの重要な特徴は、移動する対象表面の偏光画像を複数の異なる方位角をもって採取できることである。これを応用すると検査対象の Δ 、 Ψ をリアルタイムで計測できる可能性があり、技術の適用先がさらに広がると思われる。鋼板表面からの反射光の偏光パラメータを測定できれば、そこから光学定数(複素屈折率)を計算して鋼板表面を物性値としてリアルタイムに捉えられるため、本技術が大きく展開する可能性が拓ける。そこで以下、このような技術の可能性を考察する。

対象の反射光を偏光解析し、 Δ 、 Ψ を求める装置としては、例えば図5.3.1に示した回転検光子法がある。通常はレーザー光を用いて、半導体薄膜ほか広く偏光解析に使用されるが、検光子を機械的に回転させる必要があるため移動体のリアルタイム計測は不可能である。その他の偏光解析法も入射側または受光側の検光子を回転させるなど、1点の計測に時間を要する仕組みが多く、一般的に移動体の計測は困難である。偏光を2次元計測する装置としては、マッハツエンダ型またはマイケルソン型偏光干渉装置などが知られている。これらの方

法は複雑な光学系を要する上、計測対象を光学系によって挟み込まなければならず、幅 2000mm を超える走行中の鋼板表面の計測は不可能と言える。一方、3種または4種の方位角の輝度信号から検査対象の Δ, Ψ を測定するレーザー光によるリアルタイム偏光解析装置が提案されている⁷⁻¹⁾。これらの手法では、検査対象からの反射光の Δ, Ψ を厳密に求めることが可能であるが、初期調整において検光子を複数回特定の方位角へ回転させる必要があり、カメラを多数使用する表面検査装置への応用では、調整作業が煩雑であって実用的ではない。

これに対して筆者らは、光学系を固定したまま、 $0^\circ, +45^\circ, -45^\circ$ の3種の方位角の受光部へ直接既知の偏光を入射し、数式の対称性から各部のゲインをキャンセルして Δ, Ψ を求める方法を提案している^{7-2), 7-3), 7-4)}。ここでは、この手法を基に6章にて構築した技術を応用して Δ, Ψ をリアルタイム計測し、画像化可能な方法を提案する。

7-3-1-a. 3方位偏光画像からの偏光パラメータ導出

先ず、本研究で開発した偏光光学系を用いて、検査対象からの反射光の Δ, Ψ を求める手順を導出する。光学モデルとしては、5章にて考察した、鋼板表面における光の反射モデルを用い、5章と同様に完全偏光と仮定して Jones ベクトルを用いて解析を行う。

入射光の偏光状態を表すベクトルを E_i 、表面での反射による偏光状態の変化を表す行列を S 、偏光状態を調べる検光子の作用を R 、検光子を通過した光(偏光)の電界ベクトルを E とする。(図 7.1.1) すると、 E は、5-2-1 節に示した通り以下のように表現できる、

$$E = RSE_i \quad \dots (5-1)$$

光を反射する物質表面の複素屈折率における吸収項(虚数項)が0でなければ、反射光は一般に楕円偏光であり、電界ベクトルの軌跡は図 7.1.2 のようにリサージュを描く。定性的に

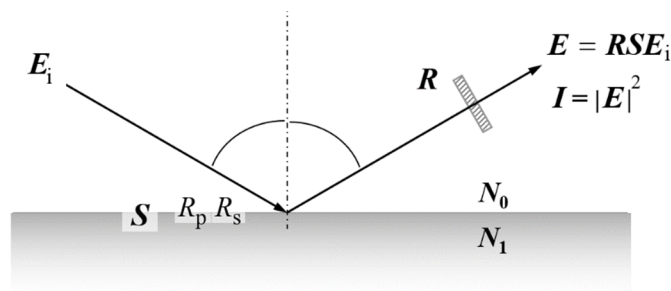


図 7.1.1 GA 鏡面の偏光反射モデル

は、p, s 偏光の位相差 Δ は、楕円の開き具合、p, s 偏光の振幅比すなわち楕円の傾きは Ψ である。本装置は3種の方位角を観測する構成を成しており、それぞれの角度に射影された楕円の大きさ、すなわち光強度を検出していることになる。

以降、図 7.1.2 に示すように、方位角 0° にて捉える楕円偏光の強度成分を I_1 、 $+45^\circ$ を I_2 、 -45° を I_3 とし、(5-1)式を基に偏光パラメータ Δ, Ψ と I_1, I_2, I_3 との関係性を求めてみる。

3つの方位角の射影から楕円を捉えれば、幾何学的に一意に楕円形状を求められるが、工学的には未知要素として撮像系の変換効率、電気回路における増幅率を含めたゲインのバラツキがある。そこで、方位角毎の受光から電気信号までの系統(以降、「チャンネル」)におけるゲインのバラツキを Δ, Ψ の定式から除去する方法を工夫した。手順は以下のようである。

- 1) 反射光の Δ, Ψ に対し、 $0, +45, -45^\circ$ の各方位チャンネルの受光電気系ゲイン(3変数)を含めた信号出力の式を導出する。
- 2) カメラに鋼板の反射を通さず同じ光強度の円偏光または無偏光を直接入射した場合の、光強度と最終的な電気信号強度との関係式を導出する。
- 3) 上記の状態、全チャンネルの電気出力が同じになるよう、電気系のゲインをチャンネル毎に調整した場合の式(3式)を導出する。
- 4) ここで、 Δ, Ψ に対し、チャンネル毎の入射光強度と出力の関係3式があり、未知変数は電気ゲイン3変数のみ、かつ各電気出力が等しいとの条件から、ゲイン3変数を Δ, Ψ と出力値との関係式から消去できる。(導出詳細は Appendix. A-5)

まず、受光系の検光子(偏光フィルタ)を通過した後の電界強度を E_1, E_2, E_3 とし、撮像素子の光-電気変換効率を含めた電気系ゲインを G_1, G_2, G_3 とする。(図 7.1.3)

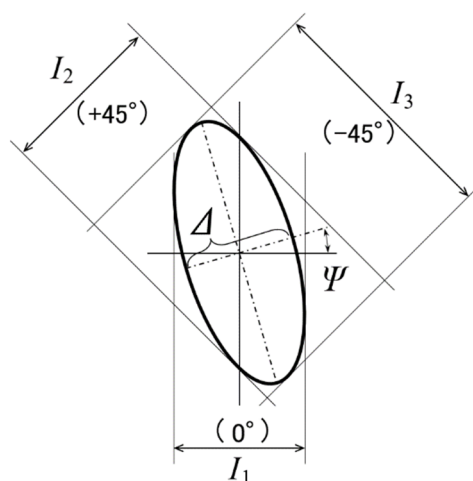


図 7.1.2 楕円偏光のリサーチと 3 種の方位角への射影強度の検出

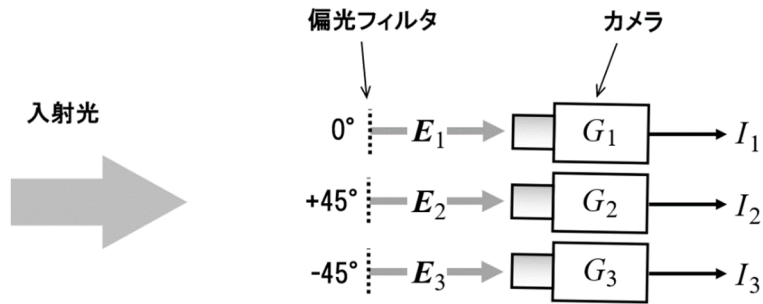


図 7.1.3 3 方位角偏光受光系とパラメータ

偏光状態に関する扱いは、第 5 章と同様に Jones ベクトル(5-1)～(5-10)式を用いる。また、受光系への入射光は十分平行と仮定し、カメラは 3 台共に同一箇所からの光を受光するものとして、3 種のチャンネルは互いに独立に作動するものとする。

次に、各チャンネルに入射する電界強度に対応したカメラからの電気信号強度を求める。 I_1 ほかで代表させているが、実際は各画素の輝度値である。

手順 1) 受光電気系ゲイン(3 変数)を含めた信号出力

検光子 0° チャンネルの反射ベクトル \mathbf{E}_1 は、方位角 0° の検光子の作用を \mathbf{R}_0 として、

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{R}_0 \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (7-1)$$

である。(5-16)式より方位角 0° における反射光強度 I_1 は、

$$I_1 = [\mathbf{E}_1]^2 = E_p^2 R_s^2 \tan^2 \Psi \quad \dots (7-2)$$

と表される。検光子 $+45^\circ$ チャンネルの反射ベクトル \mathbf{E}_2 についても同様に、

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{R}_{+45} \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (7-3)$$

従って(5-16)式より、

$$I_2 = |\mathbf{E}_2|^2 = \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan^2 P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (7-4)$$

となる。

検光子 -45° チャネルの反射ベクトル \mathbf{E}_3 も同じく、

$$\mathbf{E}_3 = \mathbf{R}_{-45} \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (7-5)$$

より (5-16) 式を用いて、

$$I_3 = |\mathbf{E}_3|^2 = \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan^2 P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (7-6)$$

が求められる。

以上で各チャネルの光強度と Δ, Ψ との基本的な関係が得られた。

手順 2) 円偏光をカメラへ直接入射した場合の電界ベクトルと光強度

次に、検査対象の反射を通さず、カメラへ直接、円偏光 $\Delta=90^\circ$, $\Psi=45^\circ$ を入射する。この手順は、本手法の特徴的な手順であって、装置の初期化にあたりどの検光子も回転させる必要がない。各チャネルの出力(光強度)を I_{1D} , I_{2D} , I_{3D} と表すと、

0° チャネルは、

$$I_{1D} = E_p^2 \quad \dots (7-7)$$

$+45^\circ$ チャネルは、

$$I_{2D} = \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P - 2 \tan P \cos \varphi_i) \quad \dots (7-8)$$

-45° チャネルは、

$$I_{3D} = \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P + 2 \tan P \cos \varphi_i) \quad \dots (7-9)$$

となる。

手順 3) 各チャンネルの出力を揃える

各チャンネル固有のゲインを G_1, G_2, G_3 とし、各々調整し、全てのチャンネルの出力光強度、すなわち電気的出力値を I_0 に揃える。

$$I_0 = I_{1D} = I_{2D} = I_{3D} \quad \dots (7-10)$$

$$I_{1D} = I_0 = G_1 E_p^2 \quad \dots (7-11)$$

$$I_{2D} = I_0 = G_2 \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P - 2 \tan P \cos \varphi_i) = G_2 E_p^2 \quad \dots (7-12)$$

$$I_{3D} = I_0 = G_3 \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P + 2 \tan P \cos \varphi_i) = G_3 E_p^2 \quad \dots (7-13)$$

手順 4) ゲイン調整後に測定対象からの反射光をカメラに入射

この際に、電気信号に変換された後の各チャンネルの信号強度式から、(7-11), (7-12), (7-13) を用いることで、個別のゲイン G_1, G_2, G_3 を以下のとおり消去できる。

$$I_1 = G_1 E_p^2 R_s^2 \tan^2 \Psi = I_0 R_s^2 \tan^2 \Psi \quad \dots (7-14)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= G_2 \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \\ &= \frac{I_0 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (7-15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_3 &= G_3 \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \\ &= \frac{I_0 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (7-16) \end{aligned}$$

(7-15), (7-16) を辺々加算し、(7-14)を代入すると

$$I_2 + I_3 = \frac{I_1}{\tan^2 \Psi} (\tan^2 \Psi + \tan P) \quad \dots (7-17)$$

従って、 $\tan \Psi$ は入射光の p, s 偏光振幅比を $\tan P$ として(7-18)式のように導出される。すると(7-14)～(7-16)式より $\cos \Delta$ も入射光の初期位相を φ_i として(7-19)式のように導出される。

$$\tan \Psi = \tan P \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \quad \dots (7-18)$$

$$\cos(\Delta - \varphi_i) = \frac{I_3 - I_2}{2I_1} \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \quad \dots (7-19)$$

として、全体の反射強度に依存しない、無次元数の Δ, Ψ が導出される。

7-3-1-b. 基礎実験装置の構成

以上、本技術の応用として、移動体の偏光パラメータ Δ, Ψ をリアルタイムに計測可能な原理が用意できた。次に、これを実際に作動させる光学系及び信号処理系を考えてみる。

3 種の方位角を同時撮像することは、6 章に述べたとおり、図 7.1.3 のようにカメラを並列に配置して視野のラップ部分のみを検査領域として実現できる。この光学系の場合、十分遠方を観測するのであればチャンネル毎の視野の差異による偏光の差異も小さくできるが、数メートルの範囲で組み立てる必要のある実用装置では、数十ミリメートルのカメラの大きさは、同一視野を観測する上で障害となる。これに対しては、図 7.1.4 のような同軸光学系が考えられる^{7-1), 7-2)}。この系では受光路を 3 枚のオプティカルフラットを用いて 3 台のカメラへ分岐することで、鋼板長さ方向の視野は完全に同一化できる。

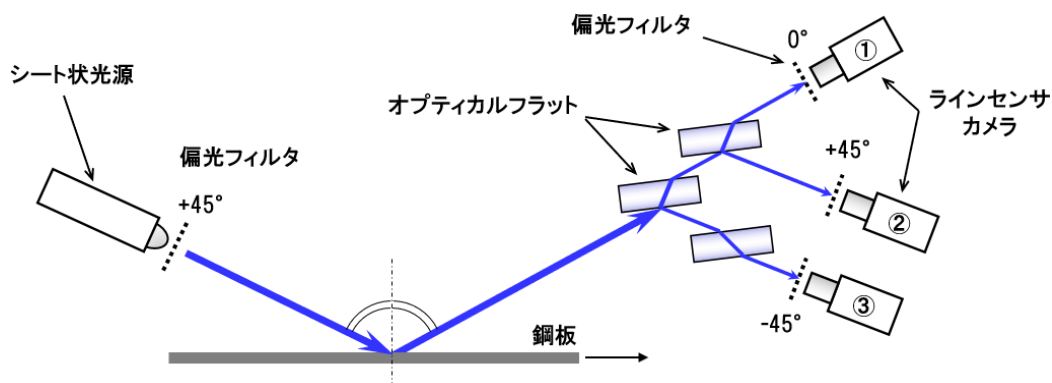


図 7.1.4 同軸光学系によるリアルタイム偏光解析型表面検査装置

オプティカルフラットによる偏光の変化を考慮する必要があるが、 $+45^\circ$, -45° の方位への光路は共に、オプティカルフラットの透過と反射が1回ずつであるため、(7-1)～(7-16)式で展開したように I_2, I_3 に対称性があり、偏光変化が相殺されて(7-18), (7-19)式として Δ, Ψ が求められる。

以上を基に、図 3.1.3 と同様の実験装置において、受光側に厚み 20mm のオプティカルフラットを使用し、図 7.1.4 の光学系を組み立ててサンプル試験を行った⁷⁻⁵⁾。カメラは検査装置と同様 512 画素だが、視野幅方向の偏光状態の変化を小さくするために視野を 50mm とした。また、図 7.1.4 の同軸光学系では、3 台のラインセンサの画素毎に上記計算が必要になる。実験では、方位角毎の画像を一旦メモリに保存し、その後に対応する画素毎の輝度値より画素毎の Δ, Ψ を計算した。カメラ以降の装置構成の概念図を図 7.1.5 に示した。

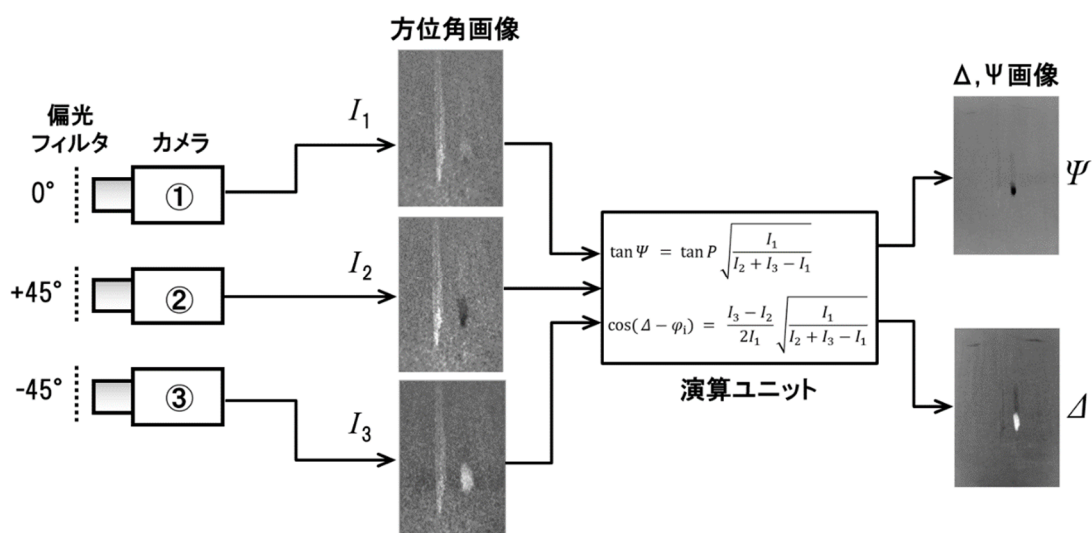


図 7.1.5 偏光パラメータ Δ, Ψ のリアルタイム計測システム概念図

7-3-1-c. 基礎実験の結果と考察

図 7.1.6 に、3 方位角画像のいずれかでコントラスト 0.05 を超えたオブジェクトに関し Δ, Ψ を計算し、横軸を p,s 偏光の位相差 Δ 、縦軸を振幅比 Ψ とした Δ - Ψ 平面にプロットした結果を示す。ここでは円偏光 $\Delta=90^\circ$, $\Psi=45^\circ$ へ正規化された正常部が中心に位置し、従って輝度のみが正常部と異なる欠陥部は中心付近にプロットされる。これに対し、誘電体反射である油痕のプロットは、反射により p,s 偏光の位相差により、中心から離れた Δ の領域に

プロットされる。 Ψ も中心から外れる領域にプロットされるが、反射の際に楕円偏光のリサーチの軸が傾くために、このようになると考えられる。 図 7.1.6 には、油同様に誘電体である化成液の跡もプロットした。 化成液は油に比べて透明度が低く吸収があるためプロット領域が油とは異なる。 Δ, Ψ 平面では、こうした光学定数の相違が明確になる^{7-6), 7-7)}。

図 7.1.6 の結果に依れば、今回提案した方法を用いて Δ - Ψ 平面に各オブジェクトをプロットすることで、オブジェクトの光学定数に基づいた新たな識別指標を得られる可能性がある。

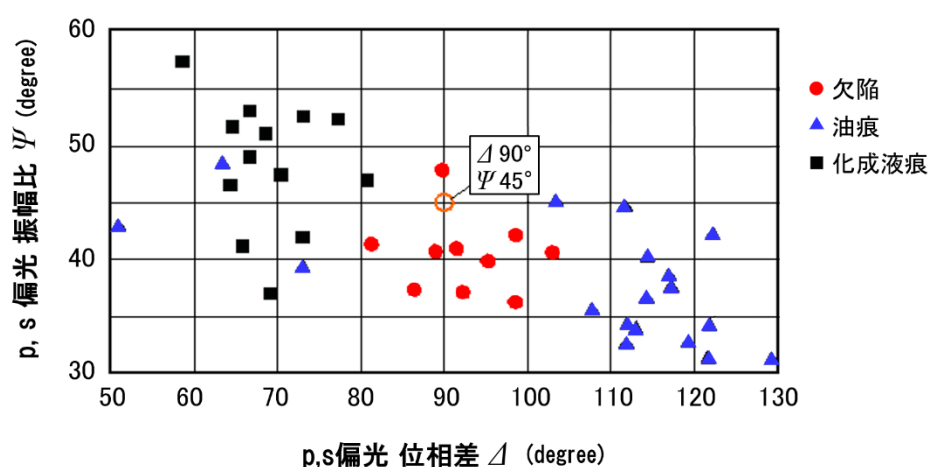


図 7.1.6 Δ - Ψ 平面における鋼板表面オブジェクトの分布

次に、図 7.1.6 の元となる Δ, Ψ 演算画像の例を図 7.1.7 に示す。 図 7.1.7(a) は、方位角 $+45^\circ$ における輝度画像であり、欠陥部が常に正極性に観測される例である。 オブジェクトは図 5.3.2 と同じものであり、画像中の 2 体のオブジェクトの左方が欠陥、右方が油痕である。 そして、図 7.1.7(b) は Δ の画像、(c) は Ψ の画像である。 図 7.1.7(b), (c) を観察すると、以下の非常に特徴的な画像が得られたことがわかる。

- 1) 欠陥部は Δ, Ψ どちらの画像もコントラストをほぼ失っている。
- 2) Δ, Ψ 画像では、油痕のコントラストが方位角画像より明らかに強く、かつ明確である。
- 3) Δ 画像油痕部の上方の模様 B、画像上方にある横向きの模様 A など、方位角画像や通常の光学系では写らないか、微かなオブジェクトがコントラストよく観測できる。

1)は、GA 表面における金属反射の Δ, Ψ 演算結果であるので、正常部と同じ値になるという説明がつく。 2)は、図 7.1.6 において油痕のプロット郡が正常部とは明らかに異なる領域にあることを画像で観察すると、このように可視化されるものと推察される。 3)は、p, s 偏光の位相差である Δ 画像として初めて観測された。例えば B は油痕に関係したオブジェクトと推察されるものの、通常光学系や方位角画像単独では観測されず、これまでに知られていない現象を反映している可能性もある。こうした結果については、今後詳しい調査と研究を要する。

以上は、(7-18), (7-19)式を用いて方位角画像の輝度情報を Δ, Ψ へ変換することによって、新たに得られた情報である。半導体分野の Si ウェーハの酸化膜計測など、数 cm ないし数十 cm 四方位程度の大きさの検査対象における偏光解析では、例えば回転検光子法により 1 点 1 点静止しながら計測を行い、このようなマップを得ることは一般的である。しかし、移動する GA 鋼板表面の偏光パラメータの分布を画像計測し、欠陥とその他のオブジェクトを顕在化させた例は、この観測が初めてである。輝度階調が 8bit (256 階調) であるため正確な Δ, Ψ は計算されていないが、各方位角の偏光画像内における画像情報と、さらに各種の画像において抽出される部分の幾何学的な特徴量も加えて識別を行うことで、識別率のさらなる向上が見込まれる。また、機能は 6-5-3 節の最後に述べたように、目視限界以下の欠陥を検出・識別する際の、目視に代わる検証手段として使用できる可能性もある。検出したオブジェクトについて目視ではなく、光学常数に基づいたマップによって確認し、その部分の詳細な分析を行うことで、どのようなオブジェクトであるのかを確認して検査に活用すれば、検査を高度化できる可能性がある。

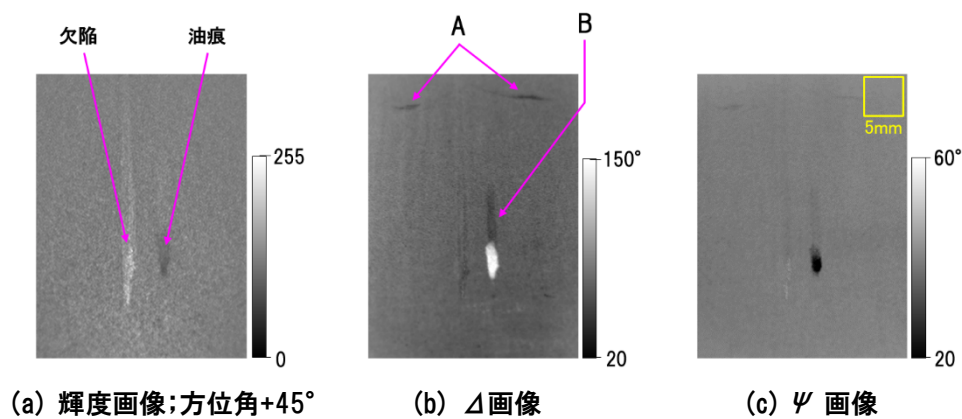


図 7.1.7 Δ - Ψ 画像の出力例

7-3-1-d. 技術課題と展望

以上のように偏光パラメータをリアルタイムで面計測できる可能性を見出したが、工業的実現にはいくつかの課題がある。ここで、それらを整理した上で、本技術の拡張と展開を展望してみる。

本実験装置の課題として先ず、光源が白色光である上、検査線に入射する際に幅方向に拡散している。またカメラレンズには口径分の受光角度の広がりがあるため、画素上に得られる偏光情報は、幅方向及び投受光角度方向にも分布を持っており、そうした要素の補償をする必要がある。そのほか、より厳密な偏光解析に近づけるには、以下の工夫が必要である。

- 1) Δ, Ψ の波長依存性を除去するための光源の単色化
- 2) 幅方向角度依存性を減免するための観察視野の狭小化
- 3) 受光ダイナミックレンジの拡大(現 8bit を 12~16bit 化)

こうした工夫には、それぞれ受光光量の減少への対応、カメラ台数の増加や画像メモリの増強などの付帯的な開発を要するが、現状の技術レベルの範囲で達成可能と考えられる。

一方、6章に述べたように本装置における多数のカメラの光軸調整は非常に煩雑であり、工業的展開へ向けて機能と性能の向上のみならず、組み立て工作の難易度を下げることも必要である。オプティカルフラットによる光学系は非常に精密であって、例えば気温が変わればアラインメントが変わるため、温度管理を徹底した上で補償機構も必要になる。こうした対策にはコストと手間がかかるため、実用は困難である。

そこで、**図 7.1.8** に示すように、撮像素子であるラインセンサの前に偏光フィルタを装備し、カラーカメラの RGB 分岐に用いられる形態のプリズムによって 3 種の光路を分ける方法も考えられる。この方法であればカメラレンズ後方にこの光学系を設けることで、カメラ 1 台で 3 種の方位角の偏光画像を得られるため実用的である。

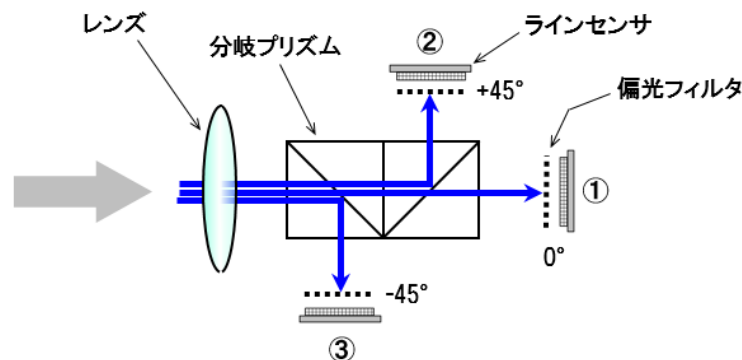


図 7.1.8 同軸観測可能なカメラ組込型光学系

以上のようなデバイス面の課題を解決すれば、鋼板表面の偏光パラメータをリアルタイムに面計測可能な装置を実現できる。(7-18), (7-19)の定式化は絶対値に対して成立する式であるが、一方で実際の装置としては、輝度情報を鋼板の正常部が中心輝度 127 になるように正規化しており、 Δ, Ψ も相対値として出力される。異常部の検出と識別が主目的の工業的利用であれば、これで十分実用化が可能であると思われる。対象表面の複素屈折率 N_1 と、真空の複素屈折率 N_0 との間には投光角度を θ, Δ, Ψ を、

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad \dots (5-7)$$

とおくと、以下の関係がある⁷⁻⁷⁾。

$$\frac{N_1}{N_0} = \sin \theta \left\{ 1 + \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \tan^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots (7-20)$$

N_0 は実用上、実数部(屈折率)1.0、虚数項(吸収率)0 の空気の複素屈折率として扱えるため、絶対値として Δ, Ψ を測定できれば(7-20)式により検査対象の複素屈折率が求められる。(7-18), (7-19)式の方法では楕円偏光の回転方向は決定できないが、事前に複素屈折率の値を別途測定しておけば、 Δ, Ψ のおよそ範囲はわかるため事実上問題はない。別な方法として、もう 1 チャンネル偏光カメラを増設し、1/4 波長板を通した画像信号を加えることで、偏光の回転方向も決定可能である⁷⁻⁸⁾。

こうした工夫の上で、検査システムとしては偏光パラメータ Δ, Ψ 若しくは複素屈折率に換算された値を基に鋼板表面のオブジェクトを識別する仕組みを組み込んで運用することになる。このようなシステムでは、単なる欠陥部の検出だけでなく、表面の光学物性値の分布を計測することになるので、GAに限らず、様々な合金や化成処理を施す表面処理鋼板では、表面の物性値と結びついた光学定数のオンライン全面計測は、品質管理の上で極めて有用な手段になると期待できる。また、偏光解析による樹脂被膜計測⁷⁻⁸⁾のオンライン化ほか、鋼板以外の表面検査への適用も可能と考えられる。

7-3-2. ビッグデータを活用する表面検査技術への展開

近年のセンシング技術は、IoT 化とともに、ビッグデータを活用し、データサイエンスや AI を用いて著しい進歩を遂げている。本装置も大量のデータ処理を行う技術であり、その特徴を活かした展開があり得る。ここでは、そうした今後の展望について述べる。

7-3-2-a. 本装置に特有の検査データ

本装置では、例えば数 km の GA 鋼板上に検出される数万個のオブジェクトを処理している。図 7.2.1 に、その一例を示す。上段の図は、製品コイル 3000m の全長検査データのプロットであり、中段はその一部の 50m 分を拡大したものである。淡い色でプロットされているオブジェクトは、 0° 方位のみに正極性の信号が出現したオブジェクトであり、偏光方位の軌跡で見ると図示された実線の楕円のような形状と考えられる。そして、群発している淡いプロットの中に実欠陥が数個検出されている。また、上段の全長検査データを見ると、中央より下寄りに淡いプロットが連続的に検出されている様子が観察される。これらは、本研究の判定論理では、無欠陥(欠陥以外)と判定され、その後は捨てられるデータであるが、実欠陥の周囲に群発していること、または、鋼板のある幅位置に連続して発生している事実は、何らかの情報とも考えられる。

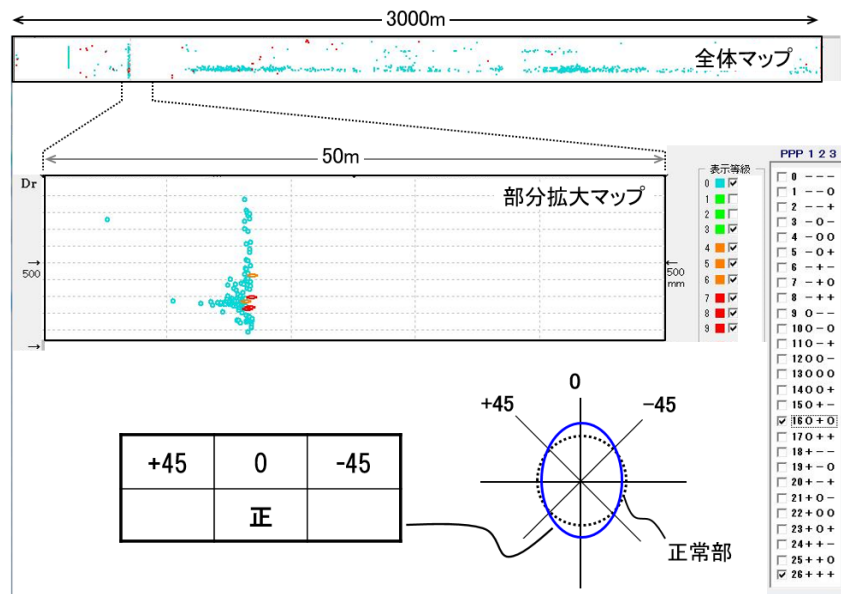


図 7.2.1 オブジェクトが群発する例

同様に、図 7.2.2 は、検査のために一度鋼板を停止させた位置に観察されたプロット群である。この場合、 -45° 方位の画像に集中的に表れることから、図に示すような偏光楕円を観測しているものと考えられる。これは、鋼板の停止によりロールに付着している僅かな油分が鋼板に転写し、正常部に比べて油による反射面積が増えたことに起因すると推察されるが、本装置では、こうした現象も観測可能である。本装置では、6-2-3 節に述べたように、3 種の方位角の偏光画像上のオブジェクトの極性が 26 通りあり、それら全ての単独または組み合わせについて、鋼板表面のオブジェクトの極性情報及び特徴量を得ることが可能である。

これらは、欠陥以外または本研究において対象としている表層下の介在物欠陥以外の情報を持っている可能性がある。実際、全ての方位角において負極性のオブジェクトは、穴、ロールキズ、付着物、または合金化不良の欠陥であること、その他いくつかの極性の組み合わせが、特定の欠陥であることは確認されており、判定ロジックに組み込んでいる。しかし、それらの多くは SN 比が 2 を超える、明確なオブジェクトである。

今後の技術展開としては、SN 比が小さくても群発しているオブジェクト、すなわち、本研究の本論で無視している淡いプロットが、製造条件や製品表面の何らかの情報を表している可能性があり、追求・検証すべきであろう。こうしたデータは抽出された状態でも、ひとつの製品コイルで数万件、画像データのままであれば、コイル 1 本あたり数 TB に及ぶビッグデータである。

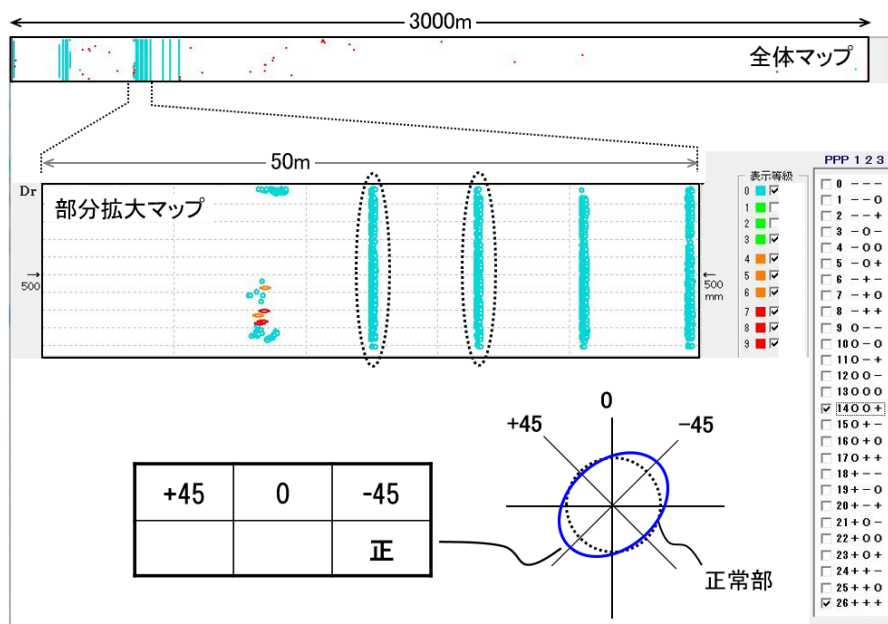


図 7.2.2 鋼板停止位置に検出された欠陥以外のオブジェクト群

7-3-2-b. 表面検査へのビッグデータ活用

ビッグデータの属性は 3V (Volume ; 量, Variety ; 種類, Velocity ; 更新頻度) と言われ、従来のデータ解析との根本的な相違はこの属性の値が圧倒的に大きいことと、それによりデータ分析に代表データ (サンプリングデータ) を扱うのではなく、生データの母集団そのものを直接分析することにある。本装置においても全検査データと各種製造条件などを総合的に分析すれば、製造条件と欠陥発生との未知の因果関係など、新たな発見がもたらされ、さらなる品質や歩留り向上につながる可能性がある⁷⁻⁹⁾。また、リアルタイムのデータ活用では、Cyber Physical System (以降「CPS」) がある^{7-10), 7-11)}。これは、仮想空間内に実プロセスモデルを構築し、モデルと実プロセスとをセンサ情報等で結ぶ、または融合させる技術であり、プロセス最適化、状態監視、異常予測などに有効な手段である。従来の制御モデルとの相違は、3D 機械モデル、物理/化学/熱力学モデル、統計モデル、ビッグデータ解析、人工知能 (Artificial Intelligence; 以降「AI」) などを組み合わせ、より精緻で高度なモデル構築することである。製品検査データのプロセスへフィードバックは従来も成されていたが、7-3-2-a 節のような従来は捨てていたビッグデータを CGL プロセスの CPS 構築に用いることや、本技術のような新たなセンシング情報は、これまでのプロセスモデリングを革新する可能性がある⁷⁻¹²⁾。製造設備に異常が生じれば、製品表面に何らかの痕跡が現れる場合も多いと思われ、本装置から出力されるデータと、以前より提案されていた設備診断のセンサネットワーク⁷⁻¹³⁾ などとを組み合わせた CPS は、QA/QC のみならず、有力なリアルタイムプロセス診断技術になり得ると考えられる。

こうした仕組みの構築による膨大なデータの処理方法として AI は有望である。本研究における欠陥抽出後の種別と程度の判定は、数値としての特徴量に基づいた判定ロジックを用いている。このロジック構築と調整に関しては、これまでも機械学習の手法を試行または実用化してきている^{7-14), 7-15)} が、これらに取り組んだ 1990 年代後半当時は十分な性能を得られず、画像を直接学習させる能力もなかった。しかし、最近の AI は人や動物の顔の認識能力において人間に比肩または上回るなど画像認識の能力にも優れ、機械に任せられるレベルに達しており、本装置の出力として得られる偏光画像データを直接 AI に学習させることで、人手による作業を自動化し、かつ判定の確度を向上させられる可能は十分ある。

今後の展望として、画像を含む検査データ及びその他のセンシング情報と製造条件との関係を AI で解析することにより、欠陥の発生条件・原因を明確化して製造にフィードバックし、欠陥の発生そのものを大幅に抑制できる可能性もある。あるいは欠陥を抑制できるプロセス自体の改善に結びつくことも考えられ⁷⁻¹⁶⁾、今後取り組むべき課題である。

7-3-3. 技術展開まとめ

本章 7-3-1 節では本研究において構築した 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。実験結果を含めて以下のようにまとめられる。

- (1) $0, +45, -45^\circ$ 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った。この際、一般的に検光子を回転させて行う初期設定に関し、固定したままで可能な方法を考案した。
- (2) それにしたがって、サンプル実験を実施した。
- (3) 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。
- (4) 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では不可視だったオブジェクトが新たに見えた。

鋼板の全面全長の複素屈折率をリアルタイムで計測する技術を実現すれば、表面検査の可能性は大きく拡張する。鋼板の種類は多様であり、表面処理や錫、樹脂などのコーティング、飲用缶用などフィルムをラミネートする製品もある。リアルタイム面計測では、こうした製品の表面の状態を、光学定数として測ることで、より高度で厳密な品質管理が実現できると考えられる。また、熱延鋼板、冷延鋼板、ステンレス鋼板では、表面酸化膜のムラや厚さが管理項目に入る製品もある。現状は、サンプル採取によるオフライン検査が行われているが、こうした検査のうちいくつかをオンライン検査で代替できる可能性があり、不適合製品の大量発生防止、省力化といった効果も期待できる。

また、7-3-2 節において、近年のビッグデータ解析、AI 及び CPS に対し本装置の実運用では用いていない判定用の全出力データや画像を用いる今後の可能性を論じた。

以上のような本装置の様々な応用と展開は、鋼板製品の製造条件や設備の最適化、品質向上、生産性向上などに役立つと考えられる。本章に述べたこうした展望は、技術的な見通しが十分立つだけに、近い将来の具体的な課題でもある。

7-4. 本研究の結論

本研究の結論を総括する。

1. GA 鋼板表面検査において課題となっていた介在物起因の低コントラストの欠陥、欠陥と同程度のコントラストの油痕、及び正常部は、それぞれ異なるマイクロ性状を有し光反射特性が異なる。特に欠陥部と油痕部は共にマイクロな鏡面部分を有し、偏光方位角に依存して正常部に対する相対的反射輝度の極性に明確な相違がある。
2. これらの相違は通常の光学系においては原理的に識別不可能である上、油痕は鏡面反射部の面積率が欠陥部より高く、反射率の低さを補って総反射光量が欠陥と同等であるために過剰な検出の原因となっていた。
3. 上記に基づいて、欠陥部と油痕部を、3 種の方位角の偏光画像によって捉え、正常部に対する相対的輝度極性の相違を識別に用いる、3 チャンネル偏光式表面検査技術を考案し、工業的実用化を達成した。
4. この技術的成果により、鋼板の表面検査技術において未解決であった「低コントラストの介在物欠陥を確実に検出し、かつ過剰検出を抑制する技術」を実現して課題を解決した。
5. これにより、鋼板ユーザーへの重大な介在物欠陥の流出を 100%防止すると共に品質保証形態として鋼板製品の欠陥部に自動的にマーキングを施して出荷する、鉄鋼業界初の新しいビジネスモデルを確立した。
6. 従来の表面検査装置の機能を包含する本技術を、GA 鋼板の複数工程への展開のみならず、GI、冷延及び特殊な樹脂コーティングを施した鋼種の複数の工程に実用展開し、多くのユーザーへの品質保証レベルの向上を果たした。
7. 本研究の将来展開として、検査対象の偏光パラメータ及び光学定数のリアルタイム面計測技術について考察し、技術的可能性を見いだした。

第7章 参考文献

- 7-1) 宮崎孝雄, 山田善郎, 小峰進, 「オンライン用高速エリプソメータの開発」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 7 (1988), 670-677.
- 7-2) A. Kazama; Y. Yamada, T. Yamada, T. Oshige, T. Kaneko, "Compact and high-speed ellipsometer", SPIE Optically Base Methods for Process Analysis, Vol.1681 (1992), 183-188.
- 7-3) 風間彰, 山崎剛, 山田善郎, 山田健夫, 「小型高速 3-channel エリプソメータの試作」, 日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集, Vol. B (1991), 264-267.
- 7-4) 風間彰, 山田健夫, 「超小型 3 - channel エリプソメータ」, 応用物理学会学術講演会講演予稿集, Vol. 52, No. 3 (1991), 844.
- 7-5) A. Kazama and T.Oshige, "A defect inspection technique using polarized images for steel strip surface," Proc. of SPIE, 7072 (2008), 70720L1-9.
- 7-6) 風間彰, 大重貴彦, 「日本鉄鋼業における独自技術の開発と現在-15 3 チャンネル偏光式鋼板表面検査装置の開発」, 日本鉄鋼協会 ふえらむ, Vol. 11, No. 5 (2006), 300.
- 7-7) 風間彰, 大重貴彦, 「(白石記念賞講演)鋼板表面検査技術の開発」, 材料とプロセス, Vol. 25, No. 1 (2012).
- 7-8) 風間彰, 大重貴彦, 窪田隆広, 「赤外エリプソメータによる薄膜有機樹脂膜厚の測定」, 材料とプロセス, Vol. 7, No. 2 (1994), 353.
- 7-9) 風間彰, 永田康昭, 森本勉, 腰原敬弘, 「プロセス計測技術 100 年の進展と今後の展望」, 鐵と鋼, Vol. 100, No. 10 (2014), 1228.
- 7-10) E. A. Lee, "Cyber Physical Systems : Design Challeges," Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, Tecnical Report No. UCB/EECS-2008-8 (2008).
- 7-11) J. Lee, B. Bagheri, H. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," Manufacturing Letters, Vol.3, January (2015), 18-23.
- 7-12) 風間彰, 「光応用計測の進展と展望」, 日本鉄鋼協会 第 277, 278 回 西山記念講座テキスト (2016), 72-76.
- 7-13) 榎学, 白岩隆行, 村上岳央 : 疲労・腐食ワイヤレスセンサネットワークの高度化とその設備診断への応用, CAMP-ISIJ, 28 (2015), 17-20.
- 7-14) 梅垣嘉之, 大重貴彦, 風間彰 : 表面欠陥検査装置の欠陥判定ルール自動構築, CAMP-ISIJ, 29 (2016), 230.

- 7-15) 風間彰, 「EM アルゴリズムによる表面欠陥特徴量の非線形分離」, 材料とプロセス, Vol. 20, No. 5 (2007), 952.
- 7-16) 風間彰, 津田和呂, 「鉄鋼業における AI・IoT 技術の最前線-9 鉄鋼プロセスにおけるデジタルデータ活用」, 日本鉄鋼協会 ふえらむ, Vol. 23, No. 12 (2018), 700.

第 7 章 以上.

第 8 章 結言

1990 年代の中ごろ、日本の自動車産業が量でも品質でも欧米に追いつき、その素材を提供する鉄鋼産業も規模、生産性、品質など総合的に世界をリードする水準だった。しかし、新興国は技術力とコストにおいて急速に追い上げており、日本の自動車メーカーでも国外製品への移行が始まりつつあった。そうした中で国内鉄鋼メーカーは、品質のさらなる向上とコストダウンを志向し、QA 機器及び QC システムの性能向上もその一環として取り組まれた。本研究の表面検査技術の開発も、そうしたことがきっかけであったが、中でも GA 鋼板における介在物起因の低コントラスト欠陥の確実な検出は最も重要度が高く、かつ技術的に高度な課題であった。本研究によって、目視限界に近く低コントラストではあるが鋼板表層下の介在物に起因した重大な表面欠陥の検出と、過剰検出要因である微かな油痕との識別という旧来の未解決課題が解決された。また、本研究に基づく 3 チャネル偏光式表面検査装置の実用化により、ビジネス上の目的である鋼板製品ユーザーへの QA レベル向上を果たし、加えて鉄鋼製品の品質保証の仕組みのひとつを変革できた。

本技術の基本は画像による検査であって、従来の画像式表面検査技術を内包しており、広く他の鋼種へ適用が可能である。一方で、鋼板の表面欠陥は極めて多様であるため、単一のセンサで全てを検出することは不可能である。しかし、益々高度化する QA 課題へ向け、他のセンシング技術と併せて本技術も進化させ、より高度な表面検査技術を開発していく所存である。

昨今は、ICT と AI を中心に、特にデータ駆動型技術の進歩が著しい。センシングにおいても、あらゆるセンシングデータを統合的に分析または再構築し、個々に計測している物理量とは別な種類または次元の情報を得る技術が鉄鋼でも実用化されていくと推察される。こうした進展の中において、本研究の技術を発展させ、他のセンサ情報、製造情報等を融合し、データサイエンス、AI 等を活用して、欠陥そのものが発生しない鋼板製造プロセスの革新を志向していきたいと考える。

第 8 章 以上.

Appendix

A-1. 本論文において使用する単位系

表 A.1 本論文内で使用する単位一覧

	単位	名称	記号	使用対象	本論文で使用する倍量,分量
SI単位	長さ	メートル	m	欠陥の長さ, 装置の寸法など	キロメートル(km), ミリメートル(mm), ミクロン(μm)
	体積	立方メートル	m^3	油の体積など	
	質量	キログラム	kg	製品重量など	
	時間	秒	s	鋼板製造速度;m/s	メートル毎分(m/min)
	圧力	パスカル	Pa	鋼板の引張強度など	メガパスカル(Mpa), ギガパスカル(Gpa)
SI 併用単位 (非SI単位)	平面角	度	$^{\circ}$	角度表記; $1^{\circ} = (\pi/180)\text{rad}$	
	質量	トン	t	製品重量, 生産量; $1\text{t} = 1000\text{kg}$	
	体積	リットル	L	油の体積, 自動車の排気量	ミリリットル(mL)
	時間	分	min	鋼板製造速度;m/min (1min=60s)	
非SI単位	情報量	ビット	bit	輝度階調, 画像情報量など	
		バイト	B	画像情報量; $1\text{B} = 8\text{bit}$	メガバイト(MB), ギガバイト(GB)

A-1-1. 物理量の単位

原則として SI 単位及び SI 組立単位を用いる。ただし、平面角「 $^{\circ}$ 」及び重量「t(トン)」のみ、鉄鋼分野において現在一般的に使用されていること、SI 単位との併用が認められている A-1-1) ことから、本論文においても適宜使用する。また、技術的、学術的な検討とは直接関係しない第 1 章における単位の記述において鉄鋼製品の量は業界の慣習として重量で表記されるため、質量と重量を厳密に区別しない。

A-1-2. 情報量の単位

IEC 80000-13: 2008 に定義された単位として、一般的にも広く使用される bit, B(byte)を使用する。

参考文献;

A-1-1) 国際単位系(SI)日本語版, 産業技術総合研究所軽量標準総合センター, SI 国際文書 第 8 版(2006), 36.

A-2. 同軸落射撮像系による鏡面要素の面積率測定の詳細

4-2-1 節に述べた実欠陥からの鏡面要素(ファセット)の抽出は、同軸落射光学系のマイクロSCOPEによる欠陥部画像を元とした。図 A.2.1 に示すように、欠陥部と正常部(図中の健全部)にまたがる約 100 か所の画像を採取し、各々の画像内の輝度ヒストグラムより、最も強い反射光の輝度領域を選定してファセットとみなし、その面積率を調査した。

図の最上段①に示す枠は、本文において欠陥部の鏡面要素の面積率を分析した部分の各画像単位である。ここでは約 19mm の範囲を 38 枚の画像を撮って分析した。②,③は、そのほかの予備分析の箇所を示しており、①と共に本文 4-1-2 節の図 4.1.13 の元データである。①の 38 枚を図 A.2.2 に示した。上段が採取した原画像、下段が卓越した高い反射輝度を示す鏡面部ファセットの抽出処理の例である。

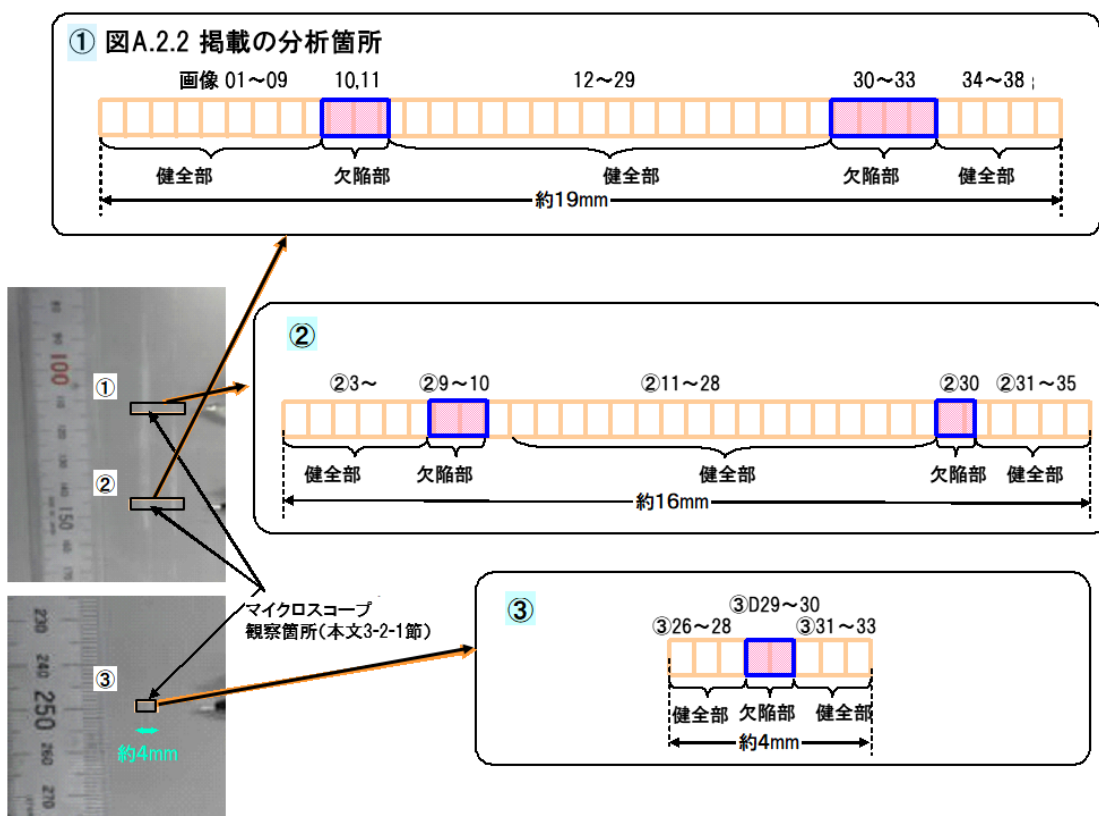


図 A.2.1 欠陥画像からのファセット抽出部位

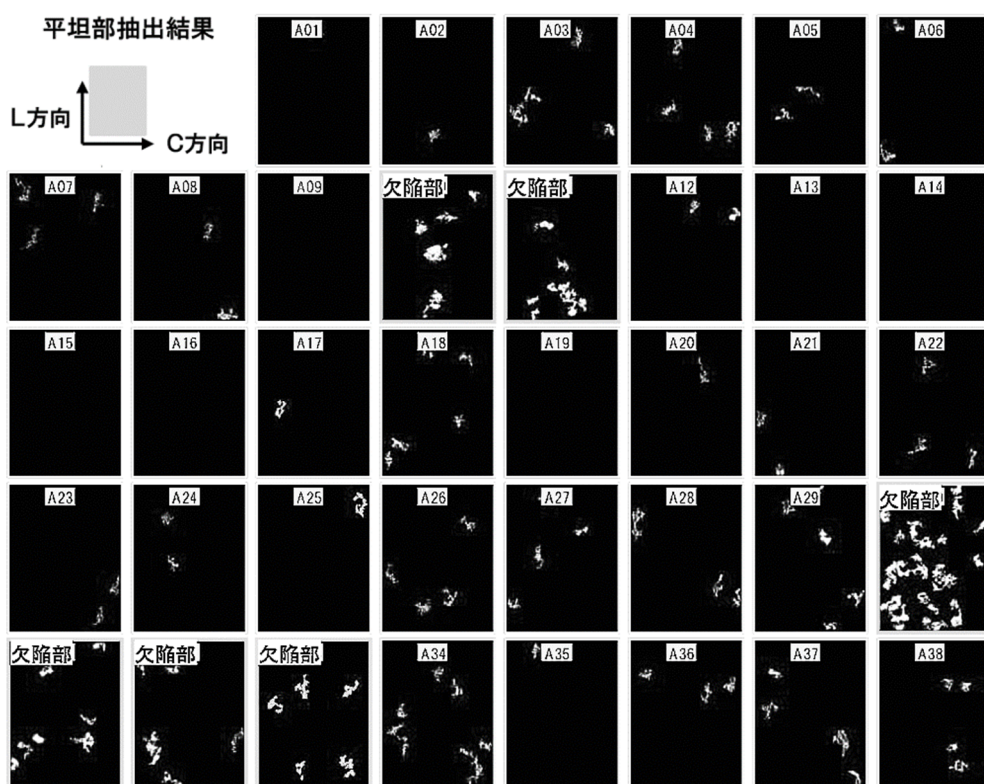
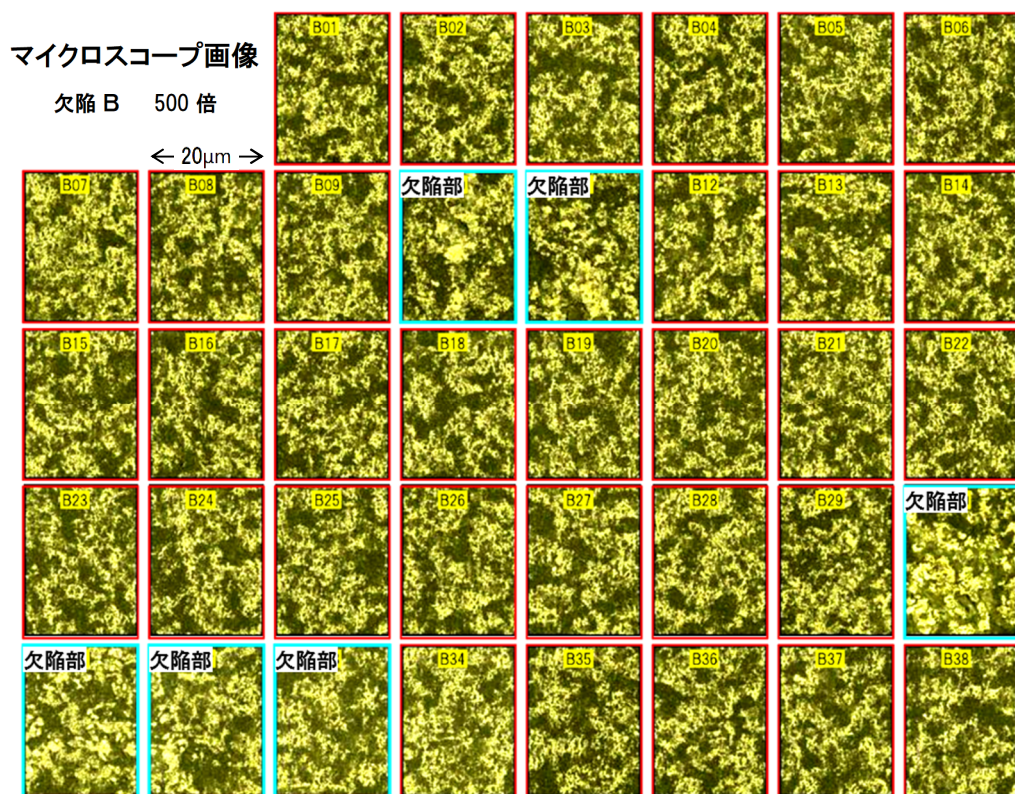


図 A.2.2 欠陥画像からの高反射率部分抽出結果の元データ(例)

A-3. 正四角錐ピットモデル

4-2-2 節の図 4.2.5 におけるモデルにおいて、油が膜厚 170nm で均一に付着し、四角錐構造を均一に埋めると仮定して、油が溜まる平たん部の面積率を求めてみる。

d (m) ; 油の平均厚み

V (m³) ; 1m² 当たりの体積 = $1\text{m} \times 1\text{m} \times d$ (m) = d (m³)

L (m) ; 粗さ Ra(横方向ピッチも L : 荒さパラメータにおける S とする)

簡単化のため 正四角錐 高さ = 底辺長さとする。

N ; 1m² 当たりの pit 数 $N = 1/L^2$... (A-3-1)

V_p (m³) ; pit 1 個の体積 $V_p = \frac{1}{3}L^3$... (A-3-2)

V_o (m³) ; 1 個の pit に入る油(油溜まり)の体積

$$V_o = \frac{V}{N} = \frac{V}{\left(\frac{1}{L^2}\right)} = VL^2 = d \cdot L^2 \quad \dots (A-3-3)$$

h (m) ; pit 内の油溜まり深さ(油部表面四角形)の 1 辺の長さとする、 V_o と h の関係は、

$$V_o = \frac{1}{3}h^3 = d \cdot L^2 \quad \text{従って,} \quad h = \sqrt[3]{3d \cdot L^2} \quad \dots (A-3-4)$$

Ra = $L = 1\mu\text{m}$, 平均厚さ $d = 170\text{nm}$ ($170 \times 10^{-9}\text{m}$) とすれば, $h = 0.8\mu\text{m}$

すると、四角い pit に溜まった油の表面(反射面)の面積率 $r_{\text{oil}} = (0.8 \times 0.8) / 2 = 0.32$ が求められる。

A-4. 欠陥の見え方モデルの光学シミュレーション(3D レンダリング)

4-4 節において、欠陥の見え方を 3D 光学シミュレーションによって再現検証した方法について説明する。

使用したツールは、3D レンダリングソフトウェア “True Space Ver.7.6” (2008 年, Microsoft 社が無償公開) である。各種素材をライブラリに持ち、レンダリング対象の表面テクスチャ、反射率などのプロパティを細かく設定できる。(図 A.4.1 参照) 4-4 節の検証では、図 A.4.2(a)に示すように、反射率 0.04 の鉄の粗面を有する平板内に、反射率 0.4 の鉄の鏡面部分を設定してモデルサンプルとした。光学条件としては図 A.4.2(b)に示すように、照明は通常の室内照明を模して天井に平面拡散光源を設定し、サンプルを水平に対して観察角度 $\theta=60^\circ$ の状態を正面観察(あおり角 0°)すなわちサンプル面の法線方向から観察するシミュレーションを行った。さらに、 $\theta=50^\circ$ (あおり角 10°)、 30° (同 30°) 及び、適当に斜めにして観察した場合に、観察視線にてサンプルがどのように観察されるかを計算した。結果、ほとんどの観察角度において、中央の高反射率の部分が明るく観察されることが示された。

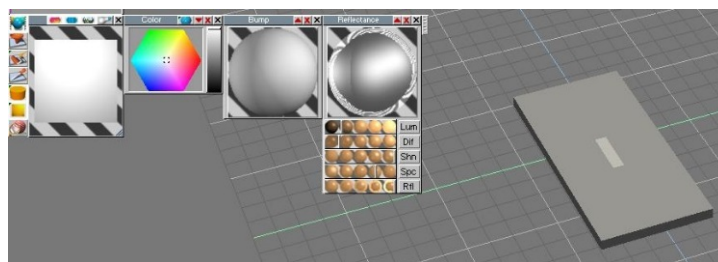


図 A.4.1 3D レンダリングソフトウェア “True Space 7.6” 作業画面例

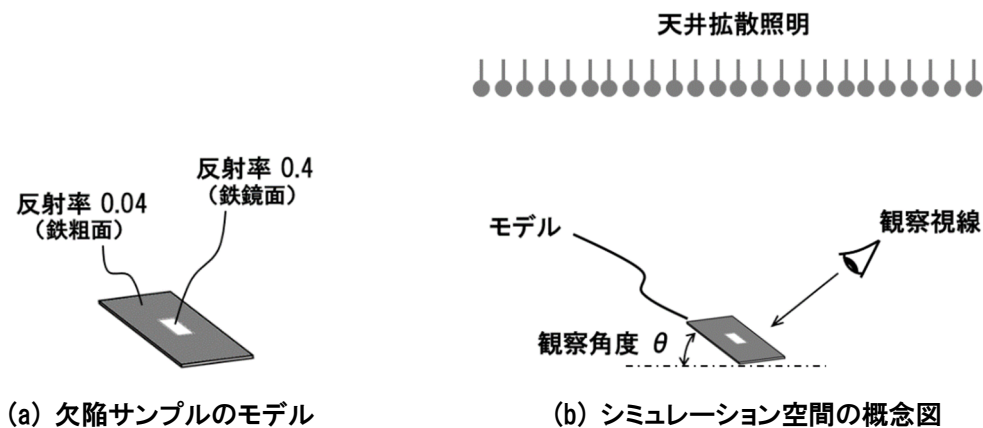


図 A.4.2 GA 欠陥の 3D レンダリングシミュレーションのモデル

A-5. 3種の偏光方位角の光強度からの偏光パラメータ導出 詳細

7-3-1節における、3種の方位角の輝度信号から反射光の偏光パラメータ Δ, Ψ を求めるための式の導出について詳細に述べる。同節に述べた通り、各チャンネルの電気系を含めたゲインのバラツキを、 Δ, Ψ の定式から除去する工夫は、以下のようなものである。

- 1) 反射光の Δ, Ψ に対し、 $0, +45, -45^\circ$ の各方位チャンネルの受光電気系ゲイン(3変数)を含めた信号出力の式を導出する。
- 2) カメラに鋼板の反射を通さず、同じ光強度の円偏光または無偏光を直接入射した場合の、光強度と最終的な電気信号強度との関係式を導出。
- 3) 上記の状態、全チャンネルの電気出力が同じになるよう、電気系のゲインをチャンネル毎に調整した場合の光強度をチャンネル毎に導出する。
- 4) ここで、 Δ, Ψ に対し、チャンネル毎の入射光強度と出力の関係3式があり、未知変数は電気ゲイン3変数のみであり、かつ各電気出力が等しいとの条件から、ゲイン3変数を Δ, Ψ と出力値との関係式から消去できる。

手順1) 受光電気系ゲイン(3変数)を含めた信号出力

先ず、 $0, +45, -45^\circ$ の方位角における光強度を求める。この過程は、(5-2)～(5-16')式と同じである。検光子 0° チャンネルの反射ベクトル \mathbf{E}_1 は、入射光の電界ベクトルを \mathbf{E}_i 、方位角 0° の検光子の作用を \mathbf{R}_0 として、

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{R}_0 \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (A-5-1)$$

である。(5-16)式より方位角 0° における反射光強度 I_1 は、

$$I_1 = |\mathbf{E}_1|^2 = E_p^2 R_s^2 \tan^2 \Psi \quad \dots (A-5-2)$$

と表される。検光子 $+45^\circ$ チャンネルの反射ベクトル \mathbf{E}_2 についても同様に、

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{R}_{+45} \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (A-5-3)$$

従って(5-16)式より、

$$I_2 = |\mathbf{E}_2|^2 = \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{ \tan^2 \Psi + \tan^2 P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i) \} \quad \dots (A-5-4)$$

検光子 -45° チャネルの反射ベクトル \mathbf{E}_3 も同じく,

$$\mathbf{E}_3 = \mathbf{R}_{-45} \mathbf{S} \mathbf{E}_i \quad \dots (A-5-5)$$

より (5-16) 式を用いて,

$$I_3 = |\mathbf{E}_3|^2 = \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{ \tan^2 \Psi + \tan^2 P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i) \} \quad \dots (A-5-6)$$

が求められ, 以上で鋼板表面からの反射光に関しての各チャネルの光強度と Δ, Ψ との基本的な関係が得られた.

手順 2) カメラへ円偏光を直接入射した場合の電界ベクトルと光強度

対象の反射を通さず 3 種の方位角のカメラへ直接, 円偏光を入射した場合のベクトルは, 表面反射の作用 \mathbf{S} の無い形で表される. この場合の 3 方位角の電界ベクトルをそれぞれ $\mathbf{E}_{1D}, \mathbf{E}_{2D}, \mathbf{E}_{3D}$, 0° 検光子の作用を $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_{+45}, \mathbf{R}_{-45}$, 各カメラの出力(光強度)を I_{1D}, I_{2D}, I_{3D} と表し, 円偏光 $\Delta=90^\circ$, $\Psi=45^\circ$ を代入すれば, 方位角 0° については,

$$\mathbf{E}_{1D} = \mathbf{R}_0 \mathbf{E}_i = E_p \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots (A-5-7)$$

従って, 出力 I_{1D} は,

$$I_{1D} = E_p^2 \quad \dots (A-5-8)$$

方位角 $+45^\circ$ のカメラ出力は,

$$\mathbf{E}_{2D} = \mathbf{R}_{+45} \mathbf{E}_i = \frac{E_p}{2} \begin{bmatrix} 1 - \chi_i \\ \chi_i - 1 \end{bmatrix} \quad \dots (A-5-9)$$

$$I_{2D} = |\mathbf{E}_{2D}|^2 = \mathbf{E}_{2D}^t \mathbf{E}_{2D}^* = \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P - 2 \tan P \cos \varphi_i) \quad \dots (A-5-10)$$

方位角 $+45^\circ$ のカメラ出力については以下のように表せる.

$$\mathbf{E}_{3D} = \mathbf{R}_{-45} \mathbf{E}_i = \frac{E_p}{2} \begin{bmatrix} 1 + \chi_i \\ 1 + \chi_i \end{bmatrix} \quad \dots (A-5-11)$$

$$I_{3D} = |\mathbf{E}_{3D}|^2 = \mathbf{E}_{3D}^t \mathbf{E}_{3D}^* = \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P + 2 \tan P \cos \varphi_i) \quad \dots (A-5-12)$$

手順 3) 各チャネルの出力を揃える

各チャネルの個別のゲインを G_1, G_2, G_3 とし, 各々調整して全てのチャネルの出力光量, すなわち電気的出力値 I_{1D}, I_{2D}, I_{3D} を I_0 に揃える.

$$I_0 = I_{1D} = I_{2D} = I_{3D} \quad \dots (A-5-13)$$

$$I_{1D} = I_0 = G_1 E_p^2 \quad \dots (A-5-14)$$

$$I_{2D} = I_0 = G_2 \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P - 2 \tan P \cos \varphi_i) = G_2 E_p^2 \quad \dots (A-5-15)$$

$$I_{3D} = I_0 = G_3 \frac{E_p^2}{2} (1 + \tan^2 P + 2 \tan P \cos \varphi_i) = G_3 E_p^2 \quad \dots (A-5-16)$$

手順 4) ゲイン調整後に測定対象からの反射光をカメラに入射

この際に, 電気信号に変換された後の各チャネルの信号強度式から (A-5-14), (A-5-15), (A-5-16) を用いて個別のゲイン G_1, G_2, G_3 を消去できる.

$$I_1 = G_1 E_p^2 R_s^2 \tan^2 \Psi = I_0 R_s^2 \tan^2 \Psi \quad \dots (A-5-17)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= G_2 \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \\ &= \frac{I_0 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P - 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (A-5-18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_3 &= G_3 \frac{E_p^2 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \\ &= \frac{I_0 R_s^2}{2} \{\tan^2 \Psi + \tan P + 2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (A-5-19) \end{aligned}$$

(A-5-18), (A-5-19) 式を辺々加算し,

$$I_2 + I_3 = I_0 R_s^2 (\tan^2 \Psi + \tan P) \quad \dots (A-5-20)$$

この式に(A-5-17)式にある I_0 と I_1 の関係を代入すると

$$I_2 + I_3 = \frac{I_1}{\tan^2 \Psi} (\tan^2 \Psi + \tan P) \quad \dots (A-5-21)$$

を得て, $\tan \Psi$ が以下のように導出される.

$$\tan \Psi = \tan P \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \quad \dots (A-5-22)$$

また, (A-5-19)式より (A-5-18)式を辺々引き, 上と同様に (A-5-17)式より

$$I_3 - I_2 = \frac{I_1}{\tan^2 \Psi} \{2 \tan P \tan \Psi \cos(\Delta - \varphi_i)\} \quad \dots (A-5-23)$$

を得る. 従って,

$$\cos(\Delta - \varphi_i) = \frac{I_3 - I_2}{2I_1} \frac{\tan \Psi}{\tan P} \quad \dots (A-5-24)$$

入射光を 45° 直線偏光とすれば, $\tan P = 1$, $\varphi_i = 0$ であるので, (A-5-22), (A-5-24)式より最終的に電気信号の強度に変換された後の各チャネルの光強度 I_1, I_2, I_3 を用いて Δ, Ψ を記述する以下の(7-18), (7-19)式を得る.

$$\tan \Psi = \tan P \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \quad \dots (7-18)$$

$$\cos(\Delta - \varphi_i) = \frac{I_3 - I_2}{2I_1} \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \quad \dots (7-19)$$

Appendix 以上.

謝 辞

本学位論文のまとめにあたり先ずは、執筆に関してご多忙のなか、長期に渡り貴重にして多大なご指導を給りました、東京大学工学部マテリアル工学科の榎学教授に心より感謝申し上げます。また、ご多忙の中、本論文を審査くださいました元東京大学、現京都先端科学大学の小関敏彦教授、東京大学の奈良高明教授、井上純哉准教授、南部将一准教授、慶応義塾大学の本多敏名誉教授に深く感謝申し上げます。

さらに、四半世紀以上も以前、本課題に対して当時の筆者らが示した技術の方向性を信じて支援下さった J F E スチール株式会社元代表取締役社長の半明正之様(故人)、筆者の旧日本鋼管時代の上司 西藤勝之様(故人)、また、本研究とその実用化の道を常に共に歩んでくれた大重貴彦様に特別な謝意を表します。

本技術の研究開発と実用化には無数ともいえる方々が関わられました。その成果として生まれた技術は“デルタアイ”なる名称をもって 1998 年の暮れに初号機が稼働を開始しました。その後、改良型と派生型が展開され、順次デジタル化されつつ 2020 年現在も J F E スチール(株)において全て重要な QA 装置として稼働を続けています。本研究がデルタアイを通じ出荷する製品の品質を保証することにより、世の中に貢献できていると確信しております。本技術に関し多くの権威ある公的な賞をいただいたことは、何よりもその証左であると信じ、ここに改めまして、本技術の研究開発と実用化に関わられた全ての方々の労をねぎらい、深く感謝申し上げます。

最後に、本技術にはまだまだ進化の余地がある故、さらなる発展を遂げていくことを期待いたします。

以上.

令和 2 年 3 月