



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

Development of the Surface Inspection System Using Three-channel Polarized Light for Steel Sheets

JFE技研(株) 企画部

風間 彰 Akira Kazama

JFEスチール(株)
西日本製鉄所 制御部

櫛田靖夫 Yasuo Kushida

JFE技研(株) 計測制御研究部

大重貴彦 Takahiko Oshige

JFEスチール(株)
西日本製鉄所 制御部

杉浦寛幸 Hiroyuki Sugiura

1 緒言

日本鉄鋼業の鋼材品質は、国内の顧客からの高度な要望に応えながら世界最高レベルを維持してきた。近年はアジア諸国の攻勢にさらされ、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いる。特に、ごく近年の逼迫した鉄鋼需給状況においては、量の確保と品質の維持とを高度に両立させる必要があり、鉄鋼メーカは造り込み技術の向上と共に、品質管理の徹底的な対策に努めている。

こうしたなか、顧客への品質保証のみならず、製造における品質管理と製品造り込みのための品質情報を的確に把握するための機器として、表面検査装置の重要性が益々高まってきた。筆者らも薄板の製造・営業・技術サービス部門、設備制御部門、及び研究所が連携して、品質基準の最も厳しい自動車用鋼板に照準を合わせた表面検査装置を独自に開発し、実用化してきた^{1,2)}。

これらはCCDカメラを用いた光学検査装置であるが、偏光を利用したことで、過剰な検出を抑制して確度の高い検査を実現し、旧来、目視検査のガイドとしての域を出られなかった重要鋼種への適用においても検査の自動化を達成することができた。初号機稼働よりすでに6年間、順調に稼働しており、本稿ではこの技術開発の概要を解説する。

2 検査水準の厳格化と表面検査装置

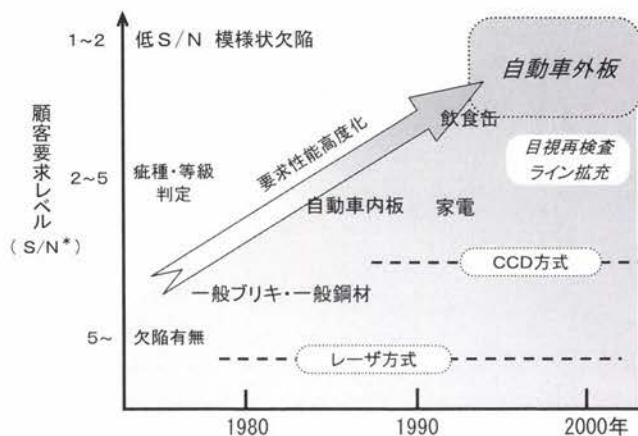
鋼板表面検査装置の歴史は既に約30年に及ぶ。筆者らも、年代を経るごとに厳格化する検査水準に副うよう、ときには装置メーカと共同で、より高感度な検査を指向し、また運用方法も工夫しながら装置を導入してきた。図1にその流れの概略を示す。

検査装置には、主にカメラを用いたものと、レーザを用いたものがある。鋭いレーザ光の回折を利用したレーザ式は、

原理的に凹凸のある欠陥の検出に強く、また高速性に優れるため、ごく初期から鉄鋼製品の表面検査を担ってきた。今現在も錫めっき鋼板などを中心に更新が続く、優れた装置である。また、カメラ式はCCD素子や光源、及びパソコンを利用した画像処理の技術進歩と連動して安価な機器も開発され、1980年代後半以降、急速に導入が進んできている。

一方、表面欠陥に対する顧客の要求も年々厳格化し、凹凸の明瞭な欠陥は当然ながら、一見単なる模様のように見える、ごく薄い欠陥も検出必須対象となってきた。筆者らも既に1990年代前半には、主に自動車向けの合金化溶融亜鉛めっき鋼板においてこうした欠陥の検査に課題を抱えていた。

図1は横軸に年代、縦軸に欠陥信号(S)と、それ以外のノイズ信号(N)との比(S/N比)を模式的に表したものであるが、右上方、自動車外板用鋼板に対する表面検査の領域においては、S/Nの小さな僅かな欠陥を検出しなければならない。この領域では、既存装置の高感度化のみでは、薄くても有害な欠陥と、欠陥以外の油跡などの無害な模様との識別が



* S/N = 欠陥信号レベル (Signal) / ノイズ信号レベル (Noise)

図1 鋼板表面検査水準の高度化概念図

困難になっていた。そのため、検査装置の出力をガイドとして用いていたが、最終的には多くの製品を精整・検査工程に送り、熟練検査員による低速での目視検査を行っていた。そこで、品質保証レベルの更なる高度化と、生産性の向上を目指し、確度の高い検査装置の開発に着手した。

3 ごく薄い欠陥の自動検出における課題

開発における技術的課題は「確実な検出」と「過剰検出の抑制」の両立である。図2 (a) ~ (c) は、図1の検査水準に対応した欠陥の様子を模擬的に描いたものである。検出目標は、図2 (a) のようなS/Nの低い欠陥の確実な検出である。

こうした薄い欠陥は、表面的には軽度に見えても、その本体がメッキの表層下に及んでいる場合がある。実際にこのような欠陥の板断面を観察した例が図3である。これは、介在物や酸化物に起因するといわれる「ヘゲ」、あるいは表層が2重になって圧延された「ラミネーション」などと呼ばれる欠陥群のひとつであると考えられ、顧客のプレス工程などで著しく顕在化する場合があるので、検出は必須である。

一方で、薄い欠陥を捕らえるために、光学的、電気的方法で高感度化を図ると、「過剰検出」が問題になってくる。

例えば図2 (b) は、不可避免的に鋼板表面に付着することのある、ごく少量の油跡であるが、高感度の検出装置においては欠陥として誤検出されやすい。真に有害な欠陥は、例えば鋼板1kmにゼロか、ごく少数しか発生しないのに対して、これらの過剰検出要因は、様々な形態をもって、時にその数十倍から無数と言えるほど現れることがある。装置がこれらを過剰に検出しているのは真の検査自動化は達成できないため、原理原則に基づいた、欠陥と模様との識別方法の開発が基本課題となった。

4 偏光特性を利用した欠陥と無害部との識別技術

多くの切り出しサンプルについて様々な方法を探ったが、欠陥と模様、あるいは鋼板地肌のノイズとを、広く一般性をもって識別することは困難であった。こうしたなかで筆者らが得た解は、偏光の利用である。偏光解析法³⁾によれば、物質表面の屈折率と反射率(光学定数)の相違を検出できる。鋼板表面の欠陥部、正常部、無害な模様部は、その見かけの光学定数がそれぞれ異なっているはずだ、というのが発想の原点であった。そこで、それぞれの部分の物理的性状を調査して、光学モデルの考察を行い、図4のようなモデルを得た²⁾。

正常部のモデルとしては、図4 (a) のように、入射した光が概ね拡散反射するモデル、一方、欠陥部はロールで押しつぶされたと思われるミクロな鏡面部分を含む、図4 (b) のモデル、そして無害な模様部は、油、あるいはメッキ処理液といった誘電体主体の物質がストラクチャをある程度埋めて、正常部と比べてやはり鏡面反射の要素が強くなっている、図4 (c) のモデルで表現できると考えた。

これらモデルと実際の欠陥サンプル等の観察結果とを照合して、欠陥部と模様部との識別が困難な理由は、どちらも鏡面反射の要素を含んでいることが主要因であること、及び偏光の利用が効果的であることに確信を得た。すなわち、金属鏡面の要素を含む欠陥部と、油あるいは処理液などの誘電体主体の鏡面要素が支配的な模様部とでは、偏光反射特性が異なるはずであり、それを利用すれば、欠陥と模様とが識別できるはずであると考えた。

こうした知見を踏まえ、開発初期のラボ実験において、投

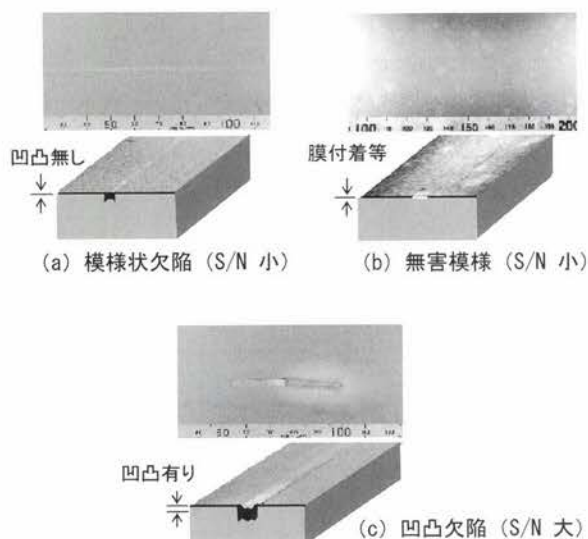


図2 欠陥と無害模様概念図



図3 表面欠陥断面の電子顕微鏡写真例



図4 鋼板表面各部の光学モデル

光側から45°直線偏光を入射し、受光側ではラインセンサカメラの前に回転可能な偏光フィルタを置いてサンプルを観察できる装置(図5a)を用意し、欠陥部などの偏光特性を計測した。これは回転検光子法³⁾と呼ばれる偏光解析手法を簡略化、画像化したものである。

ここで鋼板正常部の反射輝度を基準にとり、欠陥部と模様部の相対的な輝度をプロットすると、図5bのグラフに示される結果が得られた。まとめると、

- (1) 欠陥部はどの検光角(受光側の偏光フィルタの回転角度)においても、正常部に対して明るく見える。
- (2) 模様部は検光角に依存して、正常部に対する明暗が変化する。

という現象が、多くのサンプルについて観察されたのである。この結果を代表する画像が図5bのグラフの上段及び下段に示されており、模様部が明暗反転する様子が判る。

模様部の輝度が明暗変化する特徴的な現象は、鋼板からの反射光の偏光が、正常部及び欠陥部と比較して、より直線偏光に近い状態となっていることが原因である。これは2枚の偏光フィルタを重ねてどちらかを回転させると、透過光の明暗が変化することと同様の現象である。

一方、欠陥部が検光角に依存せず、常に正常部より明るく見えるのは、フラットな鏡面反射領域が多いことにより、反射輝度そのものが拡散反射主体の正常部より大きいこと、加えてそこでの反射が金属鏡面反射なので、模様部に比べて円偏光に近くなり、検光角に依存した光量変化が少なくなっているからであると考えられる。

5 オンライン高速検査のためのエンジニアリング

以上のように、偏光を用いることで、欠陥と模様とを識別できることが判ったが、実際の製造ラインでは鋼板は移動体であるため、偏光フィルタを回転させる方法は適用できない。一方、図5(b)の画像に見られるように、いくつかの代表的な偏光角度で観察すれば識別できそうである。

偏光角度の選定にあたり原理的側面から参考にしたのは、それ以前に筆者らが開発していた「3チャンネル高速エリプソメータ^{4,5)}」である。これは受光側に45°、-45°、0°の3つの偏光角度を設ければ、動く対象の偏光特性をリアルタイムに計測できる技術である。すなわちこの3つの角度で観察すれば、偏光特性の変化の特徴を必要十分に捉えられる、ということである。実際に図5cのような光学系にて多くのサンプルを観察し、最終的にこれらの角度付近の固定偏光角をもって、3つのチャンネル(カメラ)にて鋼板を同時に観察することで、鋼板正常部とのS/Nが2程度の薄い欠陥と無害な模様とを検出の上、相互に識別できることを確認した。

実際の装置の検査部(ヘッド)の構成は、図6に示すようなものである。高輝度のシート状の光を、方位角45°の偏光フィルタを通して鋼板表面に投光し、受光側では3つの異なる偏光フィルタを備えた3台のラインセンサカメラを1組として同一視野を撮像する。

分解能と高速性を確保するため、3台1組のセットを複数並べて配置し、標準的な構成では2000画素のカメラを用いて4セット12台を並べ、幅方向の分解能を0.25 mm程度と

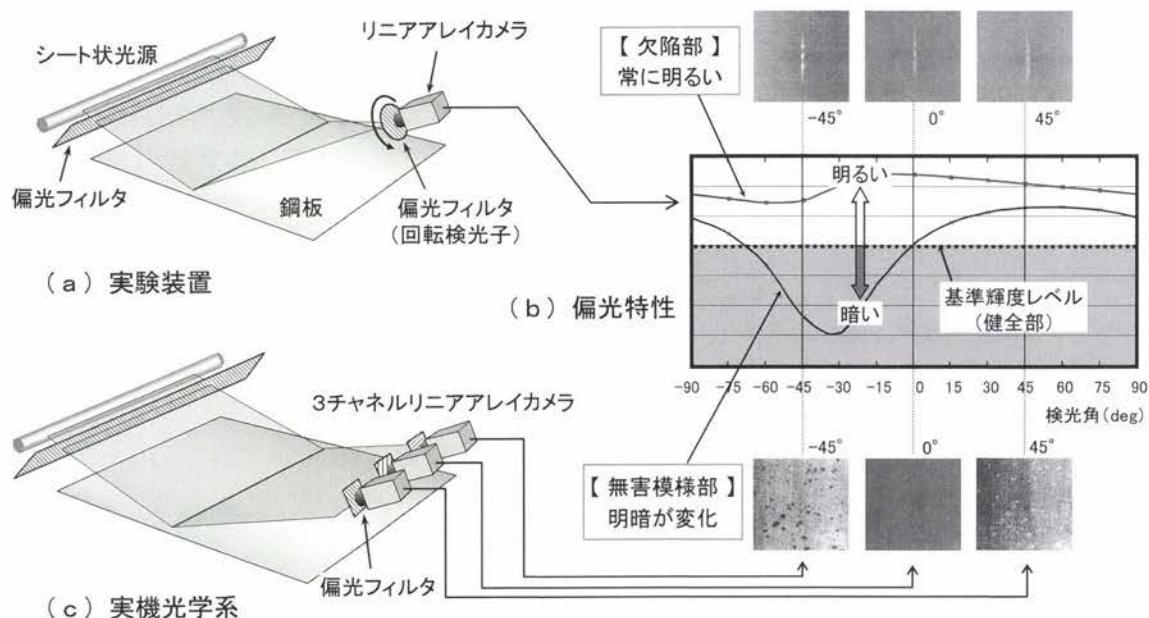


図5 偏光特性測定実験と3チャンネル偏光を用いた欠陥と模様の識別

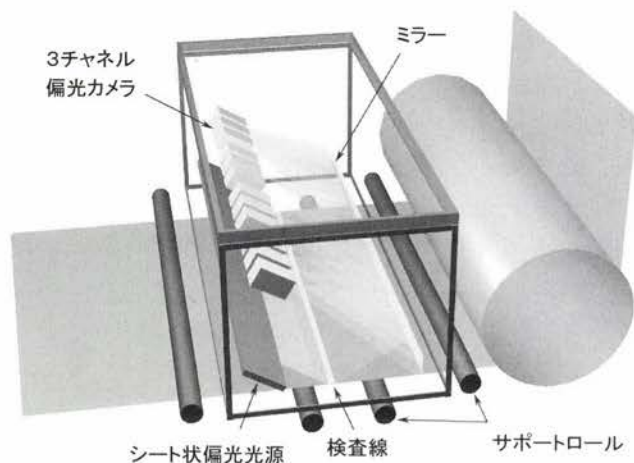


図6 検出ヘッド部概念図

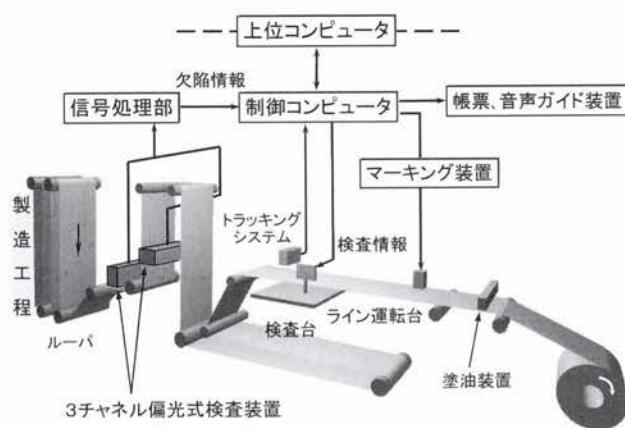


図7 表面検査システム（デルタアイ）全体概念図

している。画像処理量が通常の検査装置の3倍以上になるので、画像信号の正規化、幅方向視野の連結など、一般的な画像処理に入る前段の処理装置も専用に開発して、多量の画像信号処理に対応した。

欠陥候補には多くの無害な模様、あるいは単なる鋼板表面のランダムなムラ等も含まれており、鋼板1m当たり数百個以上に及ぶ欠陥候補がある場合もある。しかし、各々のチャンネル内で捕捉される欠陥候補の特徴を分類する段階で、偏光の明暗極性を主軸として、長さ、幅、形状、輝度など、一般的な画像処理の特徴量も踏まえて、複合的に判定処理を行うことで、欠陥のみを過不足無く抽出することが可能となった。

ここで重要なことは、欠陥であるのか模様であるのか、という判定は無論のこと、検出された欠陥の種類と程度を詳細に判定することである。本装置では、3つのチャンネルより得られる情報間の論理積、論理和など、ユニークな判定ゲートを設けることで、欠陥の種別・程度の判定精度をも向上させている。

6 実用化

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。このシステムの概略を図7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通信網へ上げられ、コイルごとの品質情報が管理される。

また本装置は、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、鋼板の溶接ポイントごとに疑似欠陥信号

によって自己診断を行う機能、光源ランプの劣化をモニタする機能、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。

稼働開始後は、検査した製品を定期的に目視検査工程へ送って、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て運用している。稼働後の性能試験において、目標とした欠陥の検出率はほぼ100%、一方で過剰検出は1%以内を維持し、品質保証と高効率な製造に不可欠な装置となった。

7 偏光の特徴を活かした応用例

こうして実用化が成されたが、当然、製品側も新しい鋼種が開発され、検査装置の開発時には想定されていなかった鋼種も検査対象に加わってくる。これらに対応して本装置もいくつか改良を加えているが、ここでは偏光光学系としてのユニークな応用例を紹介する。

図8(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模様（無害）である。通常の光学系及び本装置の直線偏光フィルタによる構成のみでは、欠陥信号が模様ノイズに埋もれ、検出が困難になる場合があった。ところが本装置の特定のチャンネルに1/4波長板と呼ばれるフィルタを装着すると、図8(b)のように、模様のノイズのみが抑制されて欠陥のS/Nが著しく向上し、検出性能を維持できた。これは、1/4波長板が直線偏光特性の強い模様部分の反射光を、円偏光と呼ばれる状態に変換することで、明暗変化を緩和させるからである。

偏光光学系のこうした応用は、今後益々厳格化されるであろう鋼板の検査水準に対応する答えのひとつになり得ると考えている。

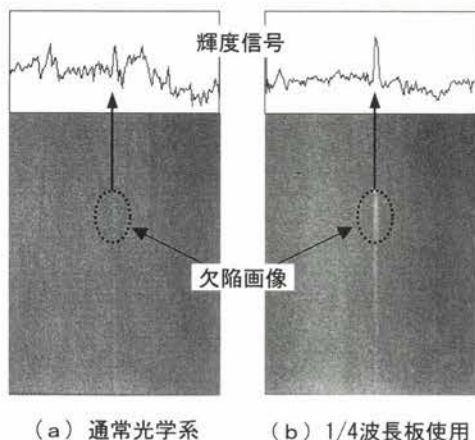


図8 偏光光学系における1/4波長板によるノイズ低減効果

8 結言

本技術開発による表面検査装置は、JFE スチール (株) 西日本製鉄所福山地区において、合金化溶融亜鉛めっきラインに2セット、連続焼鈍ラインに1セットを実用化し、旧来の目視検査の自動化を達成した。

過不足無い自動検査を目指して、偏光特性を面でセンシングし、リアルタイム化することを発案してから最初の実用化までに6年を要し、さらに7年が経過したが、この間に、1/4波長板適用等の改良ほか、多くのノウハウを加えつつ進化させ、品質保証・管理機器として完全に定着した。

一方、今後のさらに高度な品質保証を見据えると、より薄

くて見え難い欠陥、あるいは、0.1 mm 以下というような超微細欠陥の検出など、今現在の技術をしてはすぐには実現困難な課題も多い。

これらに対しては、光以外の手法を交えた複合センシングも視野に入れ、コストと性能、及び顧客との情報交換を含めた運用方法を熟慮しつつ開発していかねばならないだろう。

筆者らも自身、ひいては日本鉄鋼業の優位性を堅持しつつ、顧客へのサービスをよりいっそう向上させるため、こうした開発にチャレンジしていく所存である。

参考文献

- 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: 材料とプロセス, 15 (2002) 2, 251.
- 2) 風間彰, 杉浦寛幸, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 田口昇: 鉄と鋼, 90 (2004), 870.
- 3) R.M.A. Azzam and Bashara: Ellipsometry and Polarized Light, North-Holland, Amsterdam, (1977)
- 4) T. Miyazaki, Y. Yamada and I. Komine: Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 24 (1988) 7, 670-677.
- 5) A. Kazama and Y. Yamada et al.: SPIE Vol. 1681 Optically Base Methods for Process Analysis, (1992), 183-188.

(2006年2月23日受付)