

# 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

風間 彰\*・杉浦 寛幸\*<sup>2</sup>・大重 貴彦\*<sup>3</sup>・猪股 雅一\*<sup>4</sup>・上杉 満昭\*<sup>4</sup>・田口 昇\*<sup>5</sup>

Analysis of Polarized Light Reflection from Surface Defects on Steel Sheets  
and Its Application to a High-speed Inspection Technique

Akira KAZAMA, Hiroyuki SUGIURA, Takahiko OSHIGE, Masaichi INOMATA, Mitsuaki UESUGI and Noboru TAGUCHI

**Synopsis :** It is necessary to detect certain types of "shallow defects", which can be harmful in the press processes of steel sheets customers. Since it is difficult to detect them, the thresholds of automatic inspection systems should be lowered, which may cause enormous excessive detection of harmless patterns, such as "shallow" oil patterns.

In this paper, an automatic inspection technique to discriminate harmful defects from harmless patterns clearly in steel strips is studied.

By investigating the microscopic surface structure of defects and harmless patterns, we have found that micro flat elements of metal are dominant in the defect surface, while the harmless patterns have coatings of dielectric materials in the surface layer. Both surfaces show similar mirror reflection characteristic due to their surface structures. This fact accounts for the difficulty of the discrimination between defects and harmless patterns.

Considering above facts, we have adopted ellipsometry to obtain polarized images of steel sheet samples for quantitative analysis. By utilizing linearly polarized light with an azimuth angle of 45 degrees as the incident light, the following results are obtained.

(1) Alternation to elliptical polarization of reflected light occurs to more degree in the case of the defect than in that of the harmless pattern.

(2) Reflected light from the harmless pattern keeps linearity of the polarized incident light.

(3) Defects and harmless patterns can be discriminated by ellipsometric parameters  $\Delta$  and  $\Psi$ .

Based on these results, we have designed a practical instrument for in-line automatic inspection with three polarization cameras for three different azimuth angles. This inspection system is successfully under operation in West Japan Works of JFE Steel Corporation.

**Key words:** surface inspection; shallow defect; excessive detection; polarized light; ellipsometry.

## 1. 緒言

近年、鉄鋼製品への品質要求はますます厳しくなり、製品の品質管理、品質保証は極めて重要な技術的、営業的課題となっている。鉄鋼メーカーでは、造り込み技術はもとより検査において徹底的な品質管理を行っており、旧来、レーザ式、CCDカメラ式といった光学的手法が広く用いられてきた。これらは永い歴史の中で改良が進み、様々な製造ラインで活用されている。

一方で最近では、特に自動車外板用鋼板に代表される高級品種において、表面のごく僅かな光反射の異常（以下「薄い欠陥」と呼ぶ）の一部も品質保証の対象となっており、それ以外の過剰検出要因との識別が困難なため、熟練検査員がラインを低速運転しながら目視検査を行っている。

本研究ではまず、こうした極めて薄い欠陥部と過剰検出

部の光学反射特性について検討し、次に、偏光特性に注目した識別方法の有効性を、溶融亜鉛メッキ鋼板（以下GA）での例を挙げて検証する。最後に、3つの偏光角度を用いた工業的実用機の概要について報告する。

## 2. ごく薄い欠陥の自動検出における課題

### 2.1 検査対象となる欠陥

鋼板表面の光学式検査では、ヘゲ、スケール、異物、スリキズ、メッキ不良などの欠陥を対象としている。本研究では特に、表層の介在物や酸化物に起因するといわれる「ヘゲ」、あるいは上流工程において表層が薄く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うち、欠陥本体の多くの部分または全てが、メッキ表層に隠れているものを主な対象とする。例えばFig. 1(a)に示す

平成16年3月2日受付 平成16年8月5日受理 (Received on Mar. 2, 2004; Accepted on Aug. 5, 2004)

\* JFE技研(株)企画部 (Research Planning and Administration Dept., JFE R&D Corp., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

\* 2 JFE技研(株)計測制御研究部 (Instrument and Control Engineering Dept., JFE R&D Corp.)

\* 3 JFEスチール(株)西日本製鉄所 (West Japan Works, JFE Steel Corp.)

\* 4 鋼管計測(株)応用技術センター (KOKAN-KEISOKU Corp.)

\* 5 JFEスチール(株)薄板セクター部 (Sheet Business Planning Dept., JFE Steel Corp.)

ように、目視で観察すると、軽度な薄い模様のように見え、正常部とのコントラストが低い上、欠陥ではない他の模様との識別が困難な欠陥である。

こうした欠陥は、Fig. 1(b)のように、ユーザのプレス工程、または塗装工程後に極めて有害な欠陥として顕在化する場合がある。製造時には軽度に見えても、本体が表層下にある可能性が高いため、検査で確実に捕らえなければならぬ有害な欠陥である。

## 2.2 技術的課題

このような薄い欠陥の検査の自動化を阻む技術的要因は「過剰検出」である。正常部とのコントラストを高めるために、光学的、電気的方法で高感度化を図ると、それに連れて様々なノイズも見えてくることになる、このような例をFig. 2に示す。

Fig. 2(b)は、製造工程において時折不可避免的に付着する、ごく少量の油跡の群である。またFig. 2(c)は処理液の付着

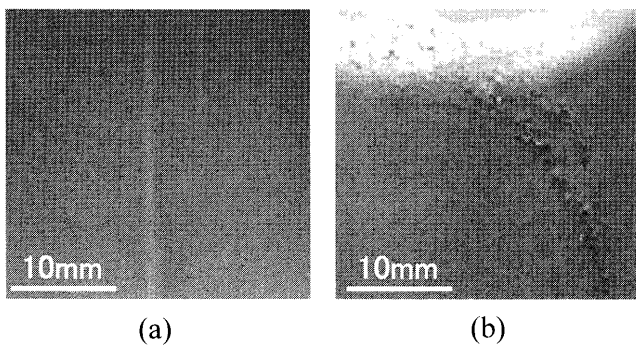


Fig. 1. (a) Sample with a shallow defect on a steel strip (GA). (b) Appearance of a serious defect in the pressing process.

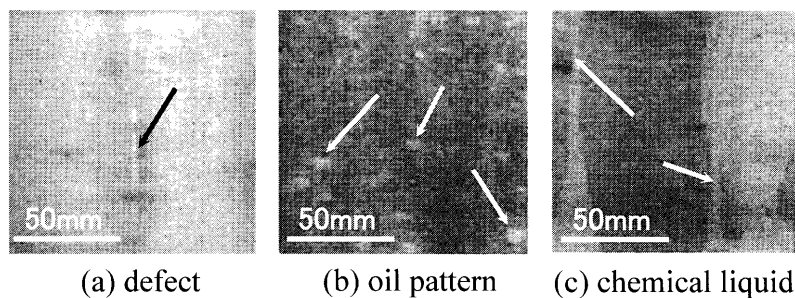


Fig. 2. Enhanced images of the defect and other harmless patterns.

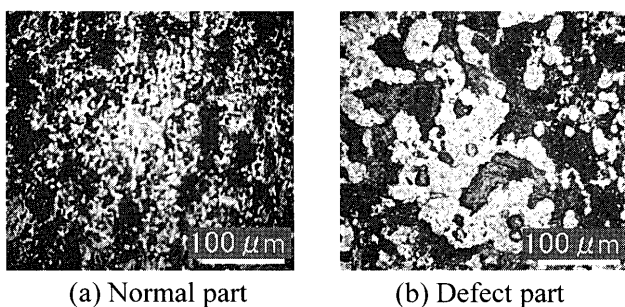


Fig. 3. Structures of GA surfaces.

ムラであるが、いずれもFig. 2(a)の欠陥と同レベルのコントラストである場合が多く、欠陥として誤判定されやすい。有害な欠陥は、例えば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、様々な形状をもって、時にその数十倍～千倍程度現れることがある。

このような無害な模様と、模様のようにみえる有害な欠陥とを、物理的に明確に識別する技術の探索が本研究の主題である。

## 3. 対象欠陥の解析と定量的把握

### 3.1 欠陥のマイクロ構造観察と光学モデル

高感度化された光学式検査装置において、抽出すべき欠陥と、それ以外の模様とをどのような方法で識別するのかを検討するためまずは、薄い欠陥の物理的性状を調査して、光学モデルを考察した。

Fig. 3(a)は、GA鋼板表面の正常な部分を顕微鏡にて観察した写真である。ここには細かい針状結晶が複雑に成長した、GAの表面構造が見える。従って正常な部分では、入射した光は概ね拡散反射をされると考えられ、Fig. 4(a)のようなランダムな粗面からの表面反射モデルで代表されると思われる。

一方、欠陥部には、Fig. 3(b)に見えるように、ロールで押しつぶされてきたと思われるフラットな部分が支配的に存在することが判る。より高倍率で観察すると、正常部においても個々の結晶の頂上部は各々数 $\mu\text{m}$ 径程度フラットになっているが、欠陥部においては100 $\mu\text{m}$ 径程度となっており、その面積比率は非常に大きい。

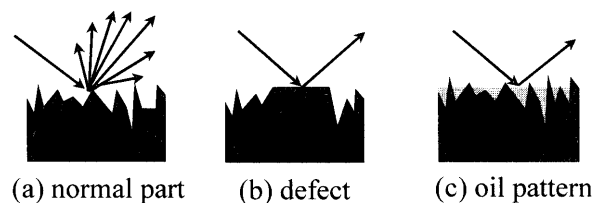


Fig. 4. Optical reflection models of GA surfaces.

欠陥部における、広いフラットな部分の詳細な成因は不明だが、例えば元々表層ないし表層下にある欠陥によって僅かに盛り上がっていたか、合金化溶融亜鉛メッキの際に、欠陥のある部分がやや厚メッキになって、ロールでつぶされることが原因と推察される。

以上のように、欠陥部分にはミクロな鏡面部分が多いことから、光学モデルとしては、Fig. 4(b)のように、粗面領域とフラットな領域とが混合した構造で考えられる。

### 3.2 模様部の光学モデル

表面に生じる模様は、鋼板の製造ラインで用いられる油、あるいはメッキ処理液といった誘電体主体の液体またはその痕跡である。レーザ蛍光式卓上型鋼板塗油量計<sup>2)</sup>による測定では、Fig. 2(b)の油模様は膜厚換算で数十～数百nmという少量の付着であることが判っている。一方、正常部の表面はFig. 3(a)で観られるように、ミクロンオーダーの複雑な構造をしているので、模様部の光学モデルとしては、Fig. 4(c)のように、油や処理液が複雑な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というモデルでおおよそ表現できると思われる。実際にGA鋼板に少量の油を塗布すると、その部分の鏡面性が増し、正反射光学系で観察した場合、油部分が正常な地肌部分に対して明るく観察されることが確認されている。

### 3.3 欠陥部と模様部の偏光特性の相違

Fig. 4の各モデルにより、通常の光学系で欠陥部と模様部相互の識別が困難な理由は、どちらも鏡面反射の要素が入り込んだ部位であるからであると推察される。ただし、欠陥部は金属の鏡面であり、一方で模様部は油あるいは処理液などの、誘電体主体の鏡面であることが大きな違いである。

従ってそれらの光学定数（屈折率，吸収率）が大きく異なることを利用した方法を検討した。ごく薄い膜厚や物質表面の光学定数を測定する方法としては偏光解析法<sup>1)</sup>が一般的であるが、この方法を応用することで、欠陥部と模様部の偏光反射特性の相違を検出できる可能性があると考えた。

### 3.4 画像信号による偏光解析

Fig. 5に、市販の偏光解析装置（エリプソメータ）にて実測したGA鋼板の複素屈折率( $n=2.2-1.2i$ )と、一般的な防錆油の複素屈折率( $n=1.46-0.03i$ )を例とした、波長550nmにおける偏光パラメータ「 $\Delta$ 」について、投受光角度を振った場合の理論値を示す。ここで、偏光パラメータ $\Delta$ とは、測定対象面に垂直方向の光の電界成分（P偏光：方位角 $0^\circ$ ）と、測定対象面に平行な成分（S偏光：方位角 $90^\circ$ ）との位相差である。また偏光パラメータにはもうひとつ、P偏光とS偏光の電界強度の比である「 $\Psi$ 」がある。 $\Delta$ と $\Psi$ は、P、S偏光の合成ベクトルの軌跡のリサージュ図形（一般に楕円）の太さと傾きを表しており、特に $\Delta=0^\circ$

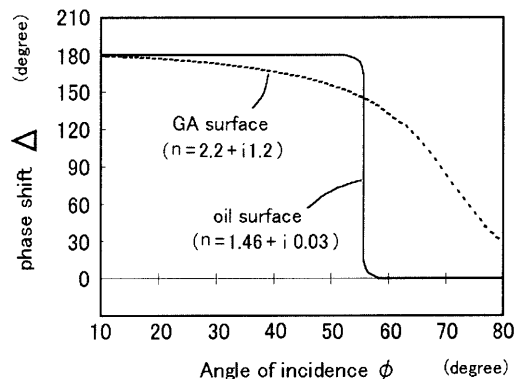


Fig. 5. Phase shift “ $\Delta$ ” as a function of the angle of incidence  $\phi$  (Refractive index of GA surface  $N_{GA}=2.2-1.2i$ , oily surface  $N_{oil}=1.46-0.03i$ ).

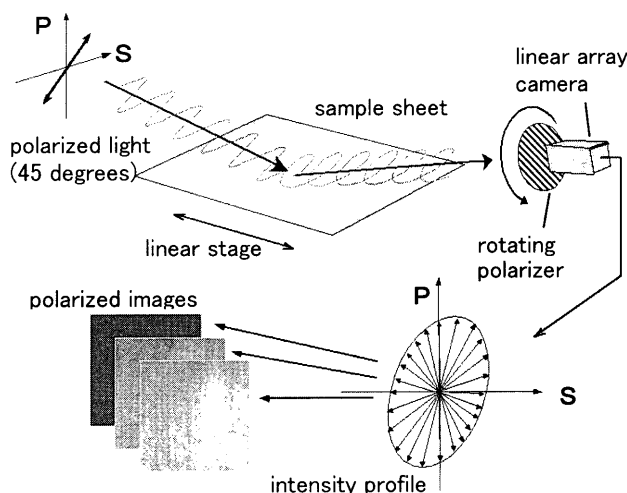


Fig. 6. Schematic view of the “Rotating Analyzer Ellipsometer” for grabbing images of steel surfaces.

の場合を直線偏光、 $90^\circ$ の場合を円偏光と言う。

Fig. 5によると、GA表面と油表面とでは、 $\Delta$ の挙動が大きく異なっている。これによれば、入射光に例えば方位角 $45^\circ$ の直線偏光を用いた場合、GA表面からの反射光ではP偏光とS偏光に位相差 $\Delta$ が生じて楕円偏光になるが、油の場合は $\Delta$ がゼロか $180^\circ$ のままなので、直線偏光のまま反射されることが予想される。これは、光の反射において、金属表面と誘電体表面では、主にP偏光に位相のズレが生じるか生じないかの違いとみることができる。

Fig. 5の計算値は鏡面を仮定した場合であるが、GA鋼板表面のように複雑なストラクチャを有する面においては、光の拡散による無偏光化の度合いが強くなる。こうした粗面における偏光の振舞いについても検討が行われている<sup>1,5)</sup>が、筆者らは、欠陥部と模様部について、それらが完全な鏡面でなくとも、金属鏡面反射と、誘電体鏡面反射との著しい偏光特性の相違が、ある程度保存されているのではないかと考えた。

そこでFig. 6のような光学系を用いて、欠陥部と模様部を含む鋼板サンプル表面の偏光解析を試みた。これは回転検光子法<sup>3,4)</sup>と呼ばれる $\Delta\Psi$ の測定手法を簡略化したもので

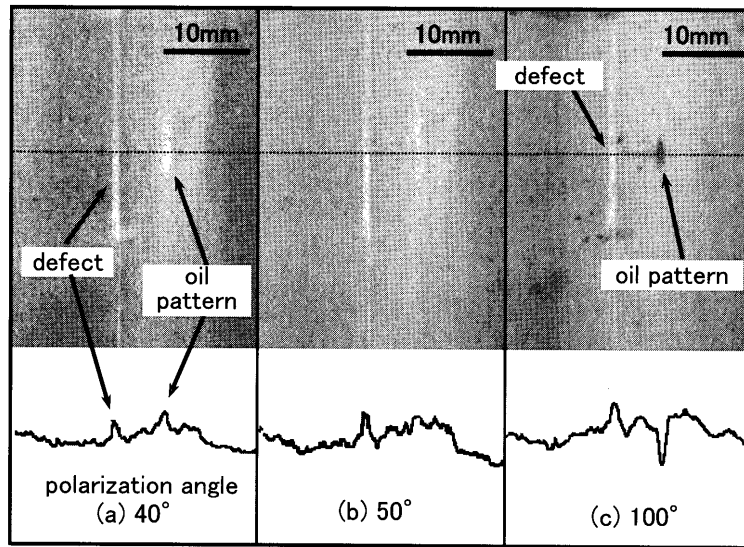


Fig. 7. Images of a defect and oil patterns obtained at three azimuth angles.

ある。入射光には45°の方位角の直線偏光をシート状に照射する光源を用い、受光部には、レンズの前に、方位角を自由に設定できる偏光フィルタ（以下「検光子」）を備えたリニアアレイカメラを用意する。そして検光子を回転させ、受光方位角（以下「検光角」）を様々に変えて鋼板サンプルの偏光画像を採取した。投受光角度は60度に固定した。

ここで、検光子の一回転を  $N$  等分し、 $i$  番目の角度における輝度を  $I_i$ 、その  $\Sigma$  を  $I_0$  として、

$$I_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \dots\dots\dots (1)$$

を求め、 $i$  番目の角度を  $\theta_i$  として、

$$a = \frac{2}{N I_0} \sum_{i=1}^N I_i \cos(2\theta_i) \dots\dots\dots (2)$$

$$b = \frac{2}{N I_0} \sum_{i=1}^N I_i \sin(2\theta_i) \dots\dots\dots (3)$$

とすると、偏光パラメータ ( $\Delta, \Psi$ ) は次の式で求められる。

$$\Delta = \cos^{-1} \left( \frac{b}{\sqrt{1-a^2}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \cos^{-1}(-a) \dots\dots\dots (5)$$

こうして各検光角の画像より、欠陥部、模様部、正常部の輝度を採取し、上記(1)~(5)式より、欠陥部と模様部における反射光の偏光特性を比較した。

#### 4. 解析結果と考察

##### 4.1 欠陥部と模様部の偏光画像の相違

Fig. 7(a)~(c)に、実験で得られた受光側の検光角度に依

存した画像の代表例を示す。画像は同一のサンプルを、検光角度を変えて採取したものであるが、鋼板全体の輝度が検光角度に依存して変動するため、画像全体の平均輝度を正規化して、欠陥部と模様のコントラストを見やすくしてある。各画像の下部のチャートは、画像の波線位置の輝度プロファイルであり、また Fig. 8は、欠陥部と油模様部および正常部の代表的な個所の輝度を検光角ごとにプロットしたグラフである。

Fig. 7において明らかなのは、単に信号の輝度プロファイルだけで見ると、欠陥部と油模様は同様なコントラストか、あるいは検光角100°の画像のように、模様の方がコントラストが高い。結果の要点を以下にまとめた。

(1) 欠陥部はどの検光角においても、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。

これらの2点が特徴的に言え、画像観察でも明らかに両者の偏光特性は異なっていることが判る。

油模様の輝度が検光角に依存して明暗変化する特徴的な現象は、Fig. 5を元にした予想通り、反射光の偏光パラメータ  $\Delta$  が、欠陥部や正常部に比較して小さく、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と推察される。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広いために反射輝度が大きいことに加え、そこでの反射光が模様部に比べて円偏光に近いために、検光角に依存した光量変化が少なくなっているからではないかと考えられる。

##### 4.2 相対的偏光解析による欠陥と模様の識別

こうした反射光の偏光特性の相違を検証するため、Fig. 8のデータを元に式(4)、(5)を用いてそれぞれの部位の

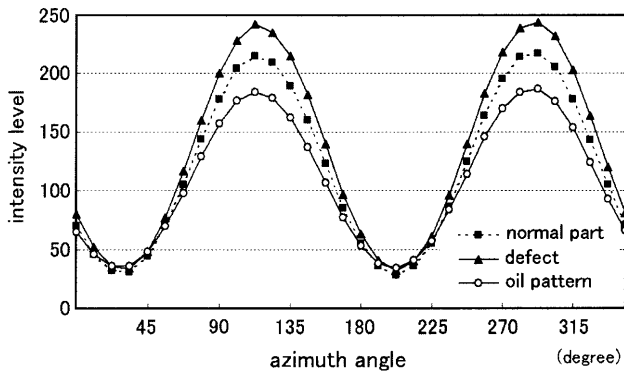


Fig. 8. Relationship between azimuth angle and intensity of reflected light.

Table 1. Comparison of  $\Delta$  and  $\Psi$  obtained by absolute calculation with those by relative calculation.

	absolute value (Fig.8)			relative value (Fig.9)		
	normal part	defect	oil pattern	normal part	defect	oil pattern
$\Delta$	131.3	131.9	142.1	90.0	98.6	66.8
$\Psi$	28.5	28.8	29.7	45.0	42.0	53.0

( degree )

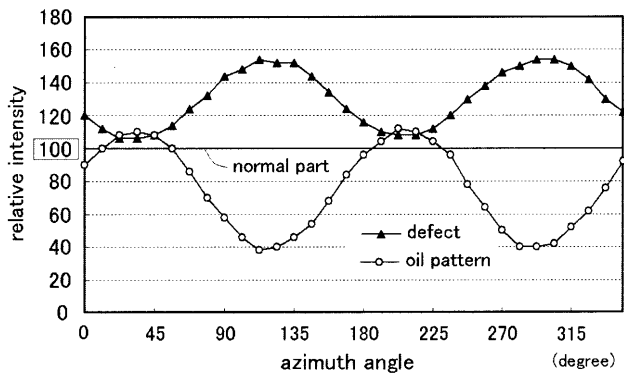


Fig. 9. Relationship between azimuth angle and normalized intensity of reflected light (scale factor  $f=2.0$ , bias  $b=100$ =normalized level).

$\Delta\Psi$ の絶対値を求めた結果を Table 1 の“absolute value”に示す。これによると、模様部の  $\Delta$  は正常部または欠陥部に比べて直線偏光寄り、すなわち  $90^\circ$  から離れる方向の値であるが、自動検査を考慮した場合、画像全体の輝度変化が大きいため、この相違を捕らえにくい。

そこで、Fig. 7 のように輝度を正規化した画像における欠陥部と油模様部について、正常部との輝度の差を求めてみた。変換された輝度レベルを  $I_i$ 、正規化レベル（画像の移動平均輝度）を  $I_n$ 、個々の画素の絶対輝度レベルを  $I_r$ 、係数  $f$  とバイアス  $b$  を用いて、各画素の輝度を (6) 式で変換した。この結果が Fig. 9 である。

$$I_i = (I_i - I_n) \times f + b \dots \dots \dots (6)$$

Fig. 9 をみると、正規化の基準レベル 100 を鋼板の正常部として、欠陥部はどの検光角でも明るいこと、及び油模

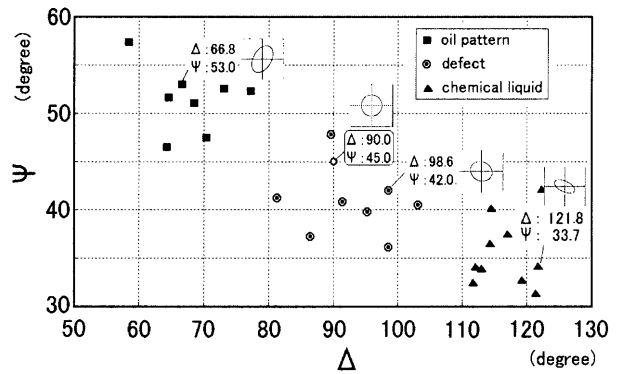


Fig. 10. Normalized  $\Delta$  and  $\Psi$  for different surface conditions (defect, oil pattern, and chemical liquid).

様部の明暗が反転する様子が良く判る。

ここで、Fig. 9 のデータを基に (4)、(5) 式を用いて、相対的な  $\Delta\Psi$  を求めてみた結果が Table 1 の“relative value”の値である。

相対的な  $\Delta\Psi$  計算では正常部は  $\Delta=90^\circ$ ,  $\Psi=45^\circ$  の円偏光として算出される。すなわち正常部の P, S 偏光の描くりサーージュ（合成ベクトルの軌跡）は円である。これを  $\Delta\Psi$  平面でみると Fig. 10 のようになる。Fig. 10 には他のサンプルの欠陥部及び模様部についても、以上と同様の方法で相対的な  $\Delta\Psi$  を計算した結果をプロットした。本研究における最も重要な結果がここに示されている。

Fig. 10 の  $\Delta$  の値において、 $\Delta=90^\circ$  の正常部から離れるほど、相対的に直線偏光の度合いが強くなり、リサーージュは扁平な楕円となる。左上側のプロット（油模様）はその領域にある。一方、右下側のプロット群（処理液）もリサーージュが扁平して直線偏光の度合いが強い領域である。

欠陥部についてみると、正常部（円偏光）の付近  $15^\circ$  程度の範囲内に集中してプロットされることが判る。すなわち、Fig. 5 を元に推測した、欠陥部（金属表面反射）と模様部（誘電体表面反射）の偏光特性の相違は、完全ではないものの保存されており、 $\Delta\Psi$  平面上でそれぞれ別な領域に分布する。

結論として、正規化した輝度から求めた相対的な  $\Delta\Psi$  平面において、検出対象とする欠陥と無害な模様とを、主に  $\Delta$  値の領域で区別できることが判った。

## 5. 工業的実用化

### 5.1 偏光パラメータ $\Delta\Psi$ のリアルタイム計測

これまでの実験では、 $\Delta\Psi$  を求めるために受光側で偏光フィルタを回転させており、この方法では検査対象が停止していなければならないので、オンラインの検査装置として実用化できない。

そこで、既に開発済みの 3 チャンネル式の偏光解析装置<sup>6,7)</sup> を応用する方法を検討した。

この方法は  $\Delta\Psi$  を  $0^\circ$  (P 偏光)、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$  の 3 つ検光角度

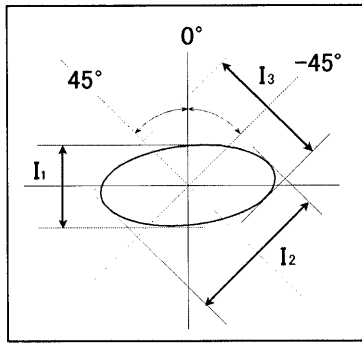


Fig. 11. Definition of intensities  $I_1$ ,  $I_2$  and  $I_3$  obtained by the three azimuth angles.

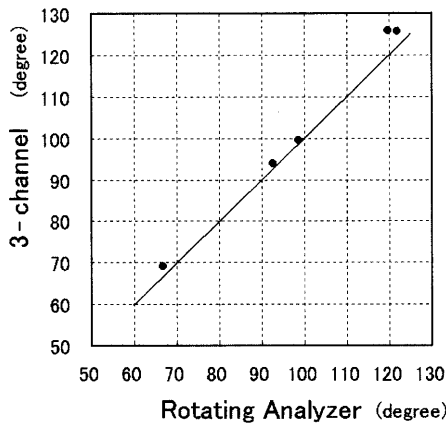


Fig. 12. Comparison of  $\Delta$  measured by the 3-channelled ellipsometer with those by the Rotating Analyzer Ellipsometer.

(チャンネル)のみから算出する方法である。3つの検光角度の輝度を  $I_1, I_2, I_3$  とすると、

$$\Psi = \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{I_1}{I_2 + I_3 - I_1}} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta = \cos^{-1} \left( \frac{I_2 + I_3 - I_1}{2I_1} \tan(\Psi) \right) \dots\dots\dots (8)$$

として  $\Delta\Psi$  が求められる。幾何学的には、Fig.11に示すように、楕円の3方向の寸法量から偏光状態を決定する方法であり、検光子を回転させる必要がないので、オンライン計測に適している。ただし  $\Delta\Psi$  を正確に求めるためには、3方向の光強度を高精度に測定する必要がある。輝度階調が250レベル程度のカメラ出力では厳密な測定には向かないが、本研究での用途と精度としては、回転検光子法と大きな差異なく測定できることを確認している。(Fig.12)

5.2 偏光情報処理の緩和

3チャンネル方式によれば、検光角度の異なる3台のカメラを用意し、3台同時に撮像して  $I_1, I_2, I_3$  を得て、製造下の鋼板表面の  $\Delta\Psi$  をリアルタイムで計測できる。コストを度外視した高性能なハードウェアを用意すれば、全欠陥候補を  $\Delta\Psi$  平面に写像しながら、リアルタイム検査を行うことは不可能ではない。

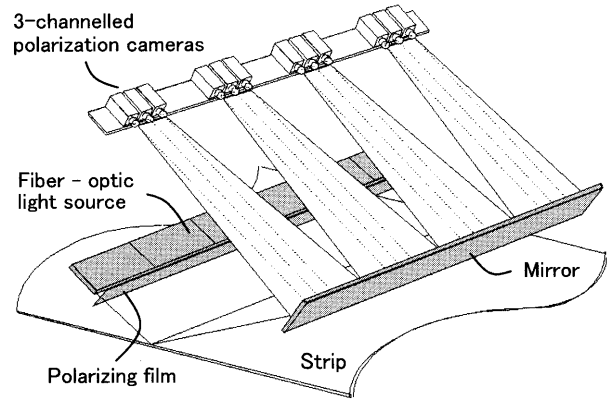


Fig. 13. A practical system for the surface inspection.

しかしながら、より高速な製造ラインで、より小さい欠陥を検出しようとした場合、光学系の分解能と信号処理系の対応速度についての現実的な問題が生じる。GAの製造ラインは最大300mpm程度だが、連続焼鈍ラインにも適用しようとする1000mpm程度の速さに対応しなければならず、かつ検査装置を通過した後、1秒間以内の距離に検査装置からの情報を元に欠陥部にマークを施す装置が付いている場合があり、コストとの兼ね合いも含めて処理速度の達成が困難であった。

そこで、偏光情報の処理方法をさらに緩和するため、 $\Delta\Psi$ まで求めずに、その算出の元となる3つの検光角における画像内において1次の欠陥候補抽出を行い、候補部分の正常部に対する明暗の度合いそのものを使う方法を探った。

5.3 実用機

以上に述べた方法を基礎として、GA製造ラインにおける表面検査の自動検査を実現した。装置構成の概略をFig.13に示す。

高輝度の直流点灯ランプの光をファイバーで導いてシート状に形成し、方位角45°の偏光フィルタを通して鋼板表面に投光する。受光側では5.1で述べた3つの異なる検光角をもった3台の偏光ラインセンサカメラで同一の視野を捕らえ、それぞれの画像を正規化した上で欠陥候補を抽出する。この段階で、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、実際に1m当たり数十~数千個に及ぶ欠陥候補が挙がる場合もある。しかし、各々の偏光画像内での明暗の極性を主軸として、長さ、幅、形状、輝度のピーク値など、一般的な画像処理の特徴量をも踏まえて、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。

6. 結言

GA鋼板の表面欠陥と無害な模様との偏光反射特性を解

析し、欠陥部と無害な模様部からの反射光では、偏光パラメータ $\Delta$ の変化に相違があることを見いだした。すなわち、

(1) 欠陥部からの反射光は、ミクロな金属表面反射に起因して $\Delta$ の変化が大きく、入射光に直線偏光を用いた場合に円偏光側へのシフトがより多く生じる。

(2) 無害な模様部からの反射光では、誘電体表面反射に起因して、 $\Delta$ の変化が小さく、直線偏光の状態がより強く保存される。

これは、自動車用高級鋼板の表面検査の自動化の課題であった「過剰な検出を抑えての欠陥の抽出」のひとつの手法として応用でき、この知見に基づいて、3つの異なる偏光角度で同時撮像する方式によるオンライン自動検査装置を実用化した。

本研究を応用した表面検査装置は、JFEスチール(株)西日本製鉄所福山地区において既に3機が順調に稼働しており、旧来の目視検査の自動化を達成した。内1機は連続焼鈍ラインにて稼働しており、本研究の方法は、表面性状

の異なる冷延鋼板にも適用可能であることが立証されている。

偏光を利用した検査方法は様々な分野で多くの応用が成されているが、本方法も $\Delta\Psi$ を算出する方法、3偏光画像をそのまま処理する方法にかかわらず、他の鉄鋼製品、シート状製品の表面検査に広く適用できる可能性があると考えている。

## 文 献

- 1) R.M.A. Azzam and N.M. Bashara: *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, (1977), 153.
- 2) A. Torao, I. Yarita, Y. Yamashita and T. Yasumi: XVth World Congress, Vol. 9, IMEKO, Budapest, (1999), 159.
- 3) R. Greef: *Rev. Sci. Instrum.*, **41** (1970), 532.
- 4) P.S. Hauge and F.H. Dill: *IBM J. Res. Dev.*, **11** (1973), 472.
- 5) C.A. Fenstermaker and F.L. McCrackin: *Surf. Sci.*, **16** (1965), 85.
- 6) T. Miyazaki, Y. Yamada and I. Komine: *Trans. Soc. Instrum. Control Engineers*, **24**, (1988), 670.
- 7) A. Kazama, Y. Yamada, T. Yamada, T. Oshige, T. Kaneko and A. Nagamune: SPIE Vol. 1681, *Optically Based Methods for Process Analysis*, SPIE, Washington, (1992), 183.