
鋼板表面品質のオンライン計測および検査技術

On-Line Measurement and Inspection Technologies of Surface Properties of Steel Sheets

虎尾 彰(Akira Torao) 福高 善己(Yoshimi Fukutaka) 戸村 寧男(Yasuo Tomura)

要旨：

鋼板製造工程における酸洗や冷延鋼板の圧延・精整プロセスでは、品質管理、設備の高速化、自動化などの観点から、製造、処理される鋼板の表面品質、欠陥の有無などをオンラインで計測、検査したいとの要求が高まっている。表面品質に関しては、次工程やユーザーへの品質保証の意味から鋼板の全長にわたる測定を行い、従来からのオフライン、バッチ測定の問題点を改善してより高度な管理体制を構築する必要性が生じている。また、表面欠陥については、これまでにさまざまな手法による自動検出の試みがなされてきたが、検出すべき欠陥の寸法が微小化していること、欠陥の種類に加えて欠陥の重度をも自動判定する必要があること、さらには製造ラインがますます高速化する中で自動検出しなければならないことなど、検出性能は十分ではないのが実状である。以上に述べた問題点を克服する目的から、鋼板表面品質を鋼板全長にわたり計測、検査することにより品質管理の高度化に結び付ける試みが当社では多くなされてきた。本論文では、鋼板表面品質の計測技術としてレーザ光を利用した表面粗さと塗油量のオンライン計測技術を、表面欠陥の検出技術としてレーザ回折パターン、画像、渦電流などを利用した技術に関する具体的開発事例を中心にして、最近の技術開発の流れを概括した。

Synopsis：

In steel production lines such as pickling lines, cold rolling mills and coil processing lines, the needs for on-line continuous measurement of surface quality and property of products and on-line inspection of surface defects have become strong. This is because user requirements for the surface quality of various products have become siverer than before and besides, expectations are running high on the side of manufacturers for higher speeds of production lines and higher quality by the adoption of automatic inspection. As for the measurement of surface quality, continuous measurements along the full length of a steel strip are required in order to overcome problems derived from off-line, batch measurements that cannot satisfy user's demands for quality assurance. As for surface defects detection, various kinds of methods have been practically applied to production lines. However, it is the matter of fact that performances of these methods are not satisfactory under the present situation. This is because the following high

performances of inspections are required; (1) a small defect has to be detected (minimum size: 0.2 mm in diameter), (2) automatic classification of the detected defects into several defect types and severities, (3) few over detections at a high speed of production lines (maximum speed: 1 000 m/min). Against the above background, on-line continuous measurements and inspection technologies have been put to practical use by developing various kinds of quality measuring instruments. This paper describes recent technologies on surface quality measurements utilizing laser beams for measuring roughness and oil film thickness and on surface defect detection utilizing laser diffraction, image processing and an eddy current distancemeter.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

On-Line Measurement and Inspection Technologies of Surface Properties of Steel Sheets



虎尾 彰
Akira Torao

技術研究所 加工・制御研究部門 主任研究員(課長)・工博



福高 善己
Yoshimi Fukutaka

水島製鉄所 制御技術部制御技術室 主査(課長補)



戸村 寧男
Yasuo Tomura

千葉製鉄所 制御技術部制御技術室 主査(課長補)

要旨

鋼板製造工程における酸洗や冷延鋼板の圧延・精整プロセスでは、品質管理、設備の高速化、自動化などの観点から、製造、処理される鋼板の表面品質、欠陥の有無などをオンラインで計測、検査したいとの要求が高まっている。表面品質に関しては、次工程やユーザーへの品質保証の意味から鋼板の全長にわたる測定を行い、従来からのオフライン、バッチ測定の問題点を改善してより高度な管理体制を構築する必要性が生じている。また、表面欠陥については、これまでにさまざまな手法による自動検出の試みがなされてきたが、検出すべき欠陥の寸法が微小化していること、欠陥の種類に加えて欠陥の重度をも自動判定する必要があること、さらには製造ラインがますます高速化する中で自動検出しなければならないことなど、検出性能は十分ではないのが実状である。以上に述べた問題点を克服する目的から、鋼板表面品質を鋼板全長にわたり計測、検査することにより品質管理の高度化に結び付ける試みが当社では多くなされてきた。本論文では、鋼板表面品質の計測技術としてレーザー光を利用した表面粗さと塗油量のオンライン計測技術を、表面欠陥の検出技術としてレーザー回折パターン、画像、渦電流などを利用した技術に関する具体的開発事例を中心にして、最近の技術開発の流れを概括した。

Synopsis:

In steel production lines such as pickling lines, cold rolling mills and coil processing lines, the needs for on-line continuous measurement of surface quality and property of products and on-line inspection of surface defects have become strong. This is because user requirements for the surface quality of various products have become siverer than before and besides, expectations are running high on the side of manufacturers for higher speeds of production lines and higher quality by the adoption of automatic inspection. As for the measurement of surface quality, continuous measurements along the full length of a steel strip are required in order to overcome problems derived from off-line, batch measurements that cannot satisfy users' demands for quality assurance. As for surface defects detection, various kinds of methods have been practically applied to production lines. However, it is the matter of fact that performances of these methods are not satisfactory under the present situation. This is because the following high performances of inspections are required; (1) a small defect has to be detected (minimum size: 0.2 mm in diameter), (2) automatic classification of the detected defects into several defect types and severities, (3) few over detections at a high speed of production lines (maximum speed: 1 000 m/min). Against the above background, on-line continuous measurements and inspection technologies have been put to practical use by developing various kinds of quality measuring instruments. This paper describes recent technologies on surface quality measurements utilizing laser beams for measuring roughness and oil film thickness and on surface defect detection utilizing laser diffraction, image processing and an eddy current distancemeter.

1 緒 言

鋼板の表面品質や表面欠陥をオンラインで計測あるいは検査したいとの要求が高まっている。この要求は鋼板製造プロセスの中で、特に酸洗ラインや冷間圧延鋼板の圧延・精整ラインにおける品質管理、設備の高速化および自動化などの観点から発している。

表面品質に関しては、次工程や需要家への品質保証の意味から鋼板の全長にわたる測定を行い、従来からのオフライン、パッチ測定の問題点を改善して、より高度な管理体制を構築する必要性が生じている。その理由は、パッチ測定では通板速度を下げてサンプルを採取するので、高速通板時と製造条件が異なるために測定値の代表性が得られないこと、全長にわたる変動が把握できないこと、さらには作業負担を低減させること、歩留まりを向上させることなどの観点からも問題が多いためである。

表面欠陥の検出については、これまでにさまざまな手法による自動検出の試みがなされてきたが、検出性能は十分ではないのが実状である。その主な理由は、検出すべき欠陥の寸法が微小化していること、多数の欠陥の種類を自動判別し、かつ欠陥の重度をも自動判定する必要があること、さらには製造ラインがますます高速化の中で自動検出しなければならないことなどである。現在、目視による官能検査が行われている多くのラインでは、ラインの高速化にともない目視検査が追従できず作業負担も大きいこと、および検査作業者間で検出能力に個人差があるうえに定量評価ができないことなど解決すべき課題が多い。

以上に述べた課題を克服して、鋼板表面品質を鋼板全長にわたり計測、検査することによって品質管理の高度化に結び付ける多くの試みが当社でなされてきた。本論文では、これらの試みの中からレーザ光を利用した鋼板表面品質の計測技術、光学式や渦電流検出方式を利用した表面欠陥検出技術などの具体的な開発事例を述べるとともに最近の技術開発の流れを概括する。

2 表面品質の計測および検査技術の分類

鋼板表面品質の計測には、非接触、高応答性の利点を有する光を応用した計測手法が有効である。この方法を用いると、鋼板の微細凹凸形状（幾何学的情報）や物性（物理的情報）などの被計測情報をさまざまな形で反映させることができる。光の基本特性は多様であるため、表面品質や性状を計測する際には、散乱、回折、蛍光、偏光など種々の性質を利用することができる。その手法は計測対象に応じて3つに分類される。

- (1) 空間的分布を計測する手法：反射、散乱、回折などの空間的な分布情報を利用
- (2) 分光的手法：吸収、蛍光、放射などの波長情報を利用
- (3) 画像を計測する手法：表面を撮像してその陰影情報を利用

これらの手法によって測定される代表的な表面品質および性状の被計測量を Table 1 に示す。オンライン計測に際しては、鋼板固有の背景ノイズ（反射率変動など）や設置環境からのノイズ（鋼板のばたつき、周囲温度変動、水蒸気やオイルミストなどの飛散）に影響を受けにくいロバスト性が要求されるので、照射・受光系に用いる波長や角度などを複数の条件で測定し、測定される複数情報を複合化することにより測定性能の向上対策も施されている²⁾。

表面欠陥検査においては、欠陥による回折パターンの変化や欠陥画像を直接撮像する光学的手法に加えて、検出する材料や欠陥の特徴によっては、大きな欠陥の凹凸形状を距離測定の手法で検出する

Table 1 Category of measuring methods for surface properties

Measuring method	Measured items
Spatial distribution	Surface texture
	Roughness
	Glossiness
	Whiteness
Spectrum	Oxide film thickness
	Oil film thickness
	Color
	Cleanliness
Image	Image clarity
	Surface pattern
	Defect

渦電流検出方式や漏洩磁束を検出する方式などの電磁気的な手法、超音波表面波を利用する手法なども有効である。

3 表面品質の計測技術

Table 1 に示した被計測対象の中から、代表的な開発事例として、鋼板表面の粗さと塗油量の測定にレーザ光を応用したオンライン測定技術について、その測定原理の概要と測定性能を述べる。

3.1 鋼板表面粗さ計測技術

3.1.1 開発の背景と目的

缶用鋼板として用いられるぶりき原板には、材料特性としての良好な深絞り性や内部欠陥がないこと、高寸法精度（板厚、板幅、プロフィールなど）を有することなどの品質特性に加えて、次工程でのめっき性や塗装性を確保するための適度な粗さが表面品質として必要とされている。そこで、低速部から採取されるサンプルによる従来のオフライン測定に代わって、オンラインで全コイル、全長にわたる粗さ測定を行い、表面品質の保証レベルを一層向上させることを目的としてオンライン粗さ計を開発した³⁾。

3.1.2 測定原理と装置構成

測定原理はレーザ光の回折現象を応用したものであり、不規則面における光反射を論じた Beckmann の理論⁴⁾に基づいている。2 章に記述した分類では (1) に示した空間的分布を計測する手法を採用している。今、微細凹凸形状の高さ分布が標準偏差 σ 、自己相関長 T で表される Gauss 分布に従う鋼板表面に、波長 λ のレーザ光が入射角度 θ で照射された場合、Fig. 1 に示すレーザ光の正反射強度 I_s は、

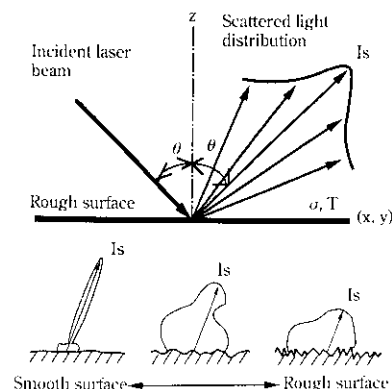


Fig. 1 Reflected light distribution from a steel surface

$$I_s = f(\lambda, \theta, \sigma, T) \dots \dots \dots (1)$$

として表される。Beckmann の理論をぶき基板表面のような不規則凹凸表面に適用して理論的解析を行った結果、正反射強度 I_s から T によらず σ を $\pm 3\%$ 以内の精度で求めるには、次の条件が必要であることが明らかになった

$$g = (4\pi\sigma \cos \theta / \lambda)^2 \dots \dots \dots (2)$$

$$g < 4 \dots \dots \dots (3)$$

このパラメータ g は、表面粗さと光学的測定条件とを関係付けるものである。この条件が満たされると、ぶき基板では、表面粗さ R_a と σ の間に

$$\sigma \cong 1.25 R_a \dots \dots \dots (4)$$

の関係が成立するので、(2) および (4) 式を用いることで I_s の測定値から R_a が算出可能となる³⁾。

使用するレーザの選定に当たっては、測定対象としている鋼板表面の粗さ R_a が $0.2 \sim 1.2 \mu\text{m}$ であること、可視波長域から赤外波長域において工業的に使用可能であり、発信器の大きさ、装置寿命、価格などを総合的に考慮した。(2) から (4) 式の関係と制約条件を種々のレーザ波長で適用した結果、平均粗さが $0.4 \mu\text{m}$ 以下の範囲では波長 $0.78 \mu\text{m}$ の半導体レーザを、また平均粗さが $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ の範囲では波長が $3.39 \mu\text{m}$ の赤外 He-Ne レーザを切り換えて使用することとした。また、現場への装置設置条件や検出ヘッド部の大きさを考慮して、入射角度 θ は 70° とした。実験室内でのサンプル測定にて、これらのレーザによる平均粗さと正反射光強度との対応が良好であることを確認した。

一方、オンライン測定では、鋼板走行時に板面のばたつきや測定面の傾斜が生じて精度良く正反射光強度を受光できない恐れがある。このため、それぞれのレーザ光の反射を受光する素子として 32 チャンネルのアレイ型検出素子を用い、電子走査することで、反射光強度のピーク値を確実に検出し、かつ高い応答性を実現している。Fig. 2 は開発したオンライン粗さ計の構造を示すものであり、半導体レーザと赤外 He-Ne レーザを 1 つの検出ヘッド内に内蔵させた構造としている。

3.1.3 測定結果と制御への適用

本装置は千葉製鉄所 No. 4 連続焼鈍ラインにおける調質圧延機の出側に設置されている。調質圧延後の連続測定では、粗さの測定範囲 $R_a = 0.2 \sim 1.2 \mu\text{m}$ に対して、触針式粗さ計によるサンプル測定値と比較して $\pm 10\%$ の測定精度が得られている。また、粗さ計による実測値を用いたフィードバック制御と、圧下力調整式フィードフォワード制御との組合せからなる粗さ制御システムを構築した。前

者によりロール摩耗に起因する粗さの経時変化を補正し、後者にて圧延速度の加減速変動に起因する急激な粗さ変化を補正する。この制御システムにより、圧延可能なロール寿命が延長され、加減速時の粗さ変動の抑制が可能となり、全コイル、全長にわたる粗さ管理を実現した⁴⁾。

3.2 塗油量計測技術

3.2.1 開発の背景と目的

鋼板の製品出荷時に塗布される防錆油は、需要家との契約において製品の用途に応じた油種、油量が規定されている。この過不足は錆の発生、需要家加工工程でのプレス割れ、脱脂不良などの重大欠陥が発生する原因となることがある。そのため、重量測定法によるオフラインでの製品抜き取り測定が行われていた。本方法では、測定精度が十分でなく、測定に長時間を要するため測定頻度が限られる上に、ライン停止時にしかサンプル採取ができないため、高速通板部での塗油量情報が得られないという問題が生じていた。これらの問題を解決するために、レーザ誘起蛍光法の基礎的検討を行い、新たなオンライン塗油量計を開発した。

3.2.2 測定原理と装置構成

レーザ光を物質に照射したときに物質から発する蛍光を検出するレーザ誘起蛍光法を適用したものであり、2 章に記述した分類によると (2) に示した分光的手法を用いている。

有機物の蛍光はスピン多重度が同じ電子状態間の遷移である。油の場合、中に含まれる脂肪酸の二重結合が蛍光を発するものと考えられている。レーザにより高次の状態へ励起された物質は、一部を熱エネルギーとして放出しながら最低次の励起状態へ落ちる。さらに基底状態に落ちる遷移過程で生じる発光が蛍光であり、励起光の波長よりも長い波長の光が放出される。このときの発光強度は、油中の内容物の種類やその量、濃度に依存するため、蛍光スペクトル強度、あるいは特定波長の蛍光強度を測定することにより油の量が測定できる。

Fig. 3 に開発装置・検出ヘッド部の構成を示す。励起用レーザ光源として波長が 473 nm の半導体励起 YAG レーザを使用し、受光する蛍光波長は 525 nm としている。測定対象としている約 $0.1 \sim 3 \text{ mg/m}^2$ (塗油量換算で $100 \text{ mg/m}^2 \sim 3 \text{ g/m}^2$ 程度、通常塗油量は単位面積当たりの質量で表される) 程度の油膜が非常に薄い領域においては、受光蛍光強度と塗油量に一次の相関関係が確認できている。しかし、下地鋼板の表面状態により蛍光の散乱状態、反射状態が変化し、蛍光を誘起する光路内での励起光強度が変化するため、同一塗油量であっても受光蛍光強度が異なる場合がある。このため、励起波長での下地からの反射光強度を同時に受光して蛍光強度を補正し

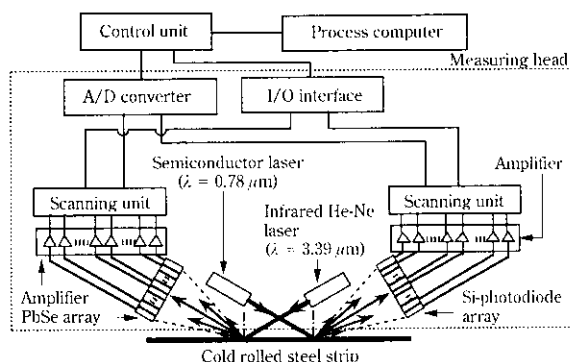


Fig. 2 Schematic diagram of an on-line surface roughness meter

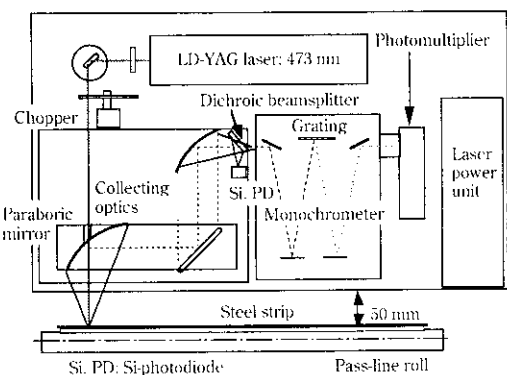


Fig. 3 Schematic diagram of a detecting head

た⁷⁾。また、下地鋼板の種類ごとに、蛍光強度と塗油量の一次の相関関係の検量線をあらかじめ作成しておき、塗油量を求める検量線演算方式も使用することができる。

これらの2つの方式を式で表すと、それぞれ、

$$d = C_1 \cdot I_f / (1 + C_2 \cdot I_f) \dots \dots \dots (5)$$

$$d = C_3 \cdot I_f \dots \dots \dots (6)$$

となる。ここで C_1 、 C_2 、 C_3 はそれぞれ鋼板の種類（粗さや被膜の有無など）や油の種類であらかじめ決まる定数、 I_f は受光される蛍光強度、 I_r は励起波長での反射光強度である。

3.2.3 測定結果

開発した装置は千葉製鉄所 No. 3 連続焼鈍ラインの静電塗油装置の出側に設置されている。検出ヘッド部は幅方向に移動することができ、幅方向での塗油量分布も測定可能である。装置全体はシーケンサ、パソコンにより制御されており、測定結果は上位計算機に伝送される。

Fig. 4 にコイル全長でのオンライン測定結果の一例を示す。オンライン測定結果は重量法による測定結果と比較して約 $\pm 10\%$ 以内の精度で一致する。オンライン測定によって、高速通板部の塗油量実績、ライン速度変更時の塗油量変化、板幅方向での分布などが把握でき、塗油機の性能調整や診断、製品の塗油量管理の厳密化が可能となった⁸⁾。

また、同じ原理を使用して、塗油量が 100 mg/m^2 以下のより低い塗油量域での測定を可能としたオフライン用卓上型塗油量計も開発されている⁹⁾。この装置では小型化のためにパルス発信 N_2 レーザが用られ、可搬使用もでき、現場で打ち抜かれたサンプル片での測定が可能である。

3.3 その他の表面品質計測技術

その他に光応用の表面品質計測装置として、次の3種の装置が開発されている。

- (1) カラー鋼板の色差測定用オンライン分光測色計¹⁰⁾
- (2) ステンレス鋼板用オンライン光沢・白色度計¹¹⁾
- (3) ステンレス鋼板用インライン輝度計¹²⁾

(1) は、回折格子とフォトダイオードアレイとを組み合わせで分光解析することで、カラー鋼板の色差を連続測定するものである。また (2) は、ステンレス鋼板からの反射光の空間的な分布（正反射光強度と拡散反射光強度）をフォトダイオードアレイで測定し、同時にレーザ光の反射光強度を測定して、3つの測定量から、光沢度、白色度、等級判別値を求める装置である。さらに (3) は、建材用ダルスステンレス鋼板の色調等級（明暗輝度値）を落射照明光の拡散反射光強度から推定する装置である。これらの測定装置は、鋼板表面固有の特性を特定の光学条件で測定する一種の知能化を指向したセンサであると言える。

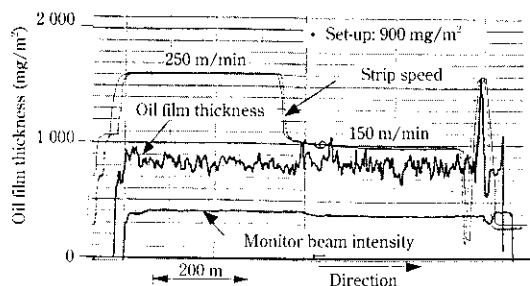


Fig. 4 Example of on-line measurement

4 表面欠陥の検査技術

高速化が進む生産ラインにおいては、表面欠陥を確実に検出し適切に品質管理することにより、次工程や需要家に欠陥の無い鋼板を供給することが重要である。このため、表面欠陥検査装置にはますます高い検出性能が要求されている。当社においてもこの要求に対応して装置の導入、開発が進められてきた。以下にその導入、開発状況を紹介する。

4.1 表面欠陥検査装置の導入および開発状況

当社では 1970 年代、千葉製鉄所における缶用鋼板の検査ラインに目視検査の補助として検査装置が導入されたのが最初である。1980 年代には信号処理技術が進み、欠陥の種類の判定が可能となり、検査レベルの向上が図られてプロセスラインへの適用が可能になった。1980 年代後半から現在に至るまでは、無欠陥鋼板の製造と確実な品質保証を目的として、自動車用鋼板、電磁鋼板、ステンレス鋼板、溶融亜鉛めっき鋼板、熱間圧延鋼板（酸洗ライン）などのプロセスラインに欠陥種類判定機能を持つ検査システムの導入を進めてきた。

これらの導入では、主としてフライングスポットタイプに属するレーザ回折パターンマスク方式を採用してきた。しかし、最近のデータ処理技術、画像素子技術の進歩によって、一次元 CCD カメラを用いたラベリング方式の実用性が大きく向上し、一部導入を進めている。

これらの導入の過程において、当社では、実用性のより高い表面欠陥検査装置への改善、およびその周辺技術の開発を機器メーカーの協力を得て進めてきた。以下に、個別の開発状況をまとめて記述し、次節にて具体的な開発内容の詳細を説明する。

4.1.1 検出性能に関する技術

(1) 高精度度カメラを用いた冷延鋼板表面欠陥検査技術¹³⁾

従来のレーザ式欠陥検査装置が検出した欠陥部位を高精度度カメラで撮像し、その静止画像を検査員が目視判定することで、欠陥判定精度の向上を図った。

(2) 周期性欠陥検出の検出性能向上¹⁴⁾

長さ方向に2値化されたデータ数の発生率が一定になるように判別レベルを制御することで、自己相関式の周期性欠陥検出器の性能向上を図った。

(3) フラクタル解析手法の適用¹⁵⁾

走査信号の波形解析にフラクタルの考えを適用した結果、S/N の低い欠陥を検出できる可能性があるという知見を得た。

(4) 微分波形のうねり補正による検出性能の高精度化¹⁶⁾

走査信号の微分波形を長さ方向に加算平均して微分波形のうねりを検出し、これを補正することで検査性能の高精度化を図った。

(5) 一次元 CCD カメラ方式の欠陥判定ロジック¹⁷⁾

一次元 CCD カメラを用いた高速画像処理機能を有する欠陥検査装置を酸洗ラインに設置し、検出して欠陥候補をその特徴量に基づいた有害欠陥とノイズ（無害欠陥）に分離するロジックを開発することにより、有害欠陥の未検出率と過検出率を低減させた。

4.1.2 確性方法の改善技術

従来から欠陥検出性能の確性には、多くの労力と時間を必要としていた。この問題を改善するため以下に示す方法を考案し、当社の新設検査装置に対して運用している。

- (1) ライトマーカを用いたオンライン確性システム¹⁸⁾
- (2) 疵画像を用いた方式¹⁷⁾

次元 CCD カメラを用いた装置では、目視感に近い画像が撮像できる。この画像をオンラインで保存し、検出画像により直接判定する方法も採用している。この方法ではラインを減速、停止することなく疵サンプル（画像）を容易に得ることができる。

4.2 ライトマーカを用いたオンライン確性システム

4.2.1 開発の背景と目的

連続焼鈍ラインなどの連続ラインに設置される自動表面欠陥検査装置 (ASI) の確性テストは、従来「精整ラインでの目視検査結果と比較する方法」で行われてきた。この方法には下記の問題があり、効率的な確性技術の開発が望まれていた。

すなわち、多くの労力 (12~14 人/月程度) が必要で、また検査速度を 30~40 m/min に抑える必要があるため精整ラインの生産性が非常に低くなる。さらに、欠陥の数が多い場合や目視検査で欠陥を見逃した場合には、評価精度が低下する。

4.2.2 開発技術

ASI が検出した欠陥の目視検証を同時に行うことができれば、目視検証された欠陥データの採集作業を大幅に効率化できる。このような観点から、ライトマーカを用いたオンライン確性システムの開発を行った。Fig. 5 にシステムの概要を示す。

開発したシステムは主として次の 2 つから構成される。

- (1) 評価対象欠陥を下流の目視検査位置に停止させた後に、レーザビームを応用した欠陥位置表示装置 (ライトマーカ) にて検査員に欠陥位置を教える欠陥位置教示システム
- (2) 目視検証された欠陥データの採集と、そのデータに基づいて欠陥種類の判定ロジック、欠陥等級判定ロジックのチューニングアップが可能な欠陥データ採集・解析システム

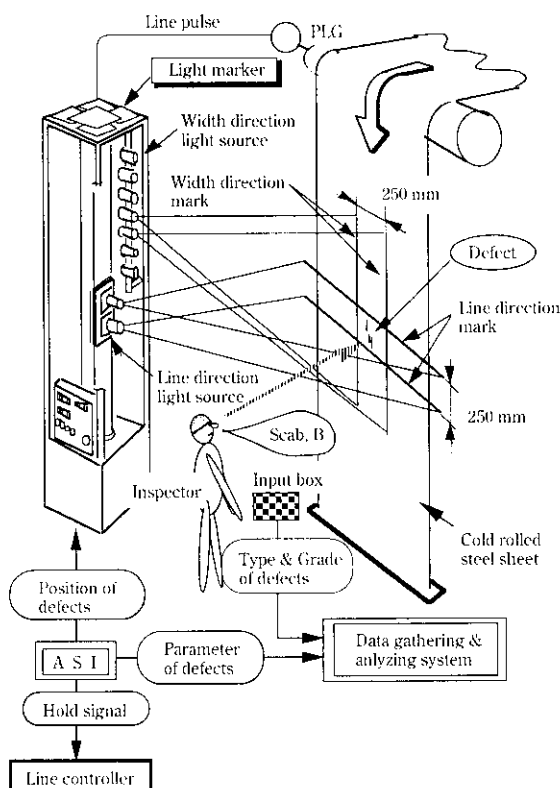


Fig. 5 On-line ASI evaluation system

4.2.3 適用結果

本システムを水島製鉄所 No. 2 連続焼鈍ラインの ASI に適用し、17 日間で 569 の確性データを採取した。確性に要した労力は従来法の 1/4~1/5 と非常に効率的であった。

その後、本システムは、溶融亜鉛めっきラインや酸洗ラインの ASI に適用され、早期工程化に大きく貢献した。

4.3 渦流式距離計を用いた重大欠陥検出装置¹⁹⁾

4.3.1 開発の背景と目的

従来、冷間圧延工程において、母板の重大欠陥による板破断を防止する目的で目視検査を実施していた。この検査を自動化するために、渦流式距離計を用いた安価な重大欠陥検出装置を開発した。

4.3.2 検出原理と装置構成

渦流式距離計で移動する薄鋼帯までの距離を連続測定し、その移動方向の距離変化から欠陥を検出する。また、検出した欠陥部分の距離情報から 3 次元形状に換算し、欠陥の程度判定を行う方式である。この基本原理を Fig. 6 に示す。渦流式距離計は測定距離、相互干渉距離などの実用性の観点から、測定距離が 10 mm のシールドタイプ (直径: 30 mm) とした。

この距離計の欠陥検出性能は、直径 12 mm、深さ 0.5 mm の人工欠陥 (円筒平底欠陥) に対し S/N = 3 であり、欠陥の径および深さに比例して S/N は大きくなった。また距離計 1 個当たりの S/N が 3 以上となる検出範囲 (距離計と欠陥中心との相対的位置) は直径 15 mm、深さ 0.5 mm の欠陥では 14 mm である。

開発装置のシステム構成を Fig. 7 に示す。渦流式距離計は幅方向に 10 mm ピッチの千鳥状配置とし、測定値のサンプリングピッチは長手方向 5 mm とした。サンプリングデータをコンピュータで処理し欠陥検出および欠陥情報編集を行い、結果をプリントアウトする。

4.3.3 検査結果

欠陥検出率は、板破断になる可能性の大きい重大欠陥では 100% で、破断には至らない欠陥では 80% であり、良好な結果を得た。Fig. 8 にオンラインでの検出欠陥を、レプリカ法で測定した欠陥の大きさと深さで示す。目標とする直径 15 mm、深さ 0.5 mm より小さい欠陥も検出可能である。

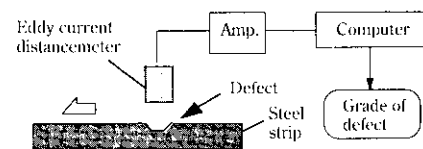


Fig. 6 Schematic diagram of the defect detection system utilizing eddy current distancemeter

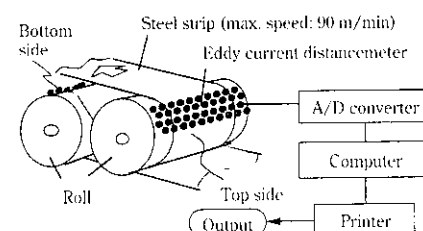


Fig. 7 Schematic diagram of the developed system to detect surface defects

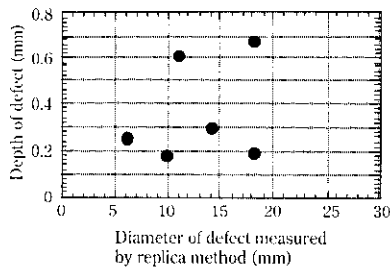


Fig. 8 Example of detected defects

5 結 言

鋼板表面品質や欠陥をオンラインで計測・検査することにより、品質管理が高度化され、品質保証がより一層強化される。そのために測定手法、装置開発および新たな装置の導入を進めてきた。本論文ではその活動の中で開発してきた技術の例として、レーザ光を応用した鋼板表面粗さおよび塗油量計測技術、光および渦電流を利用した表面欠陥検出技術の概要を紹介した。良質な鋼板を効率良く安定的に、かつ安価に製造する上で、オンライン表面品質計測および検査技術の果たす役割は今後もますます重要になるため、さらに性能が高い新技術の開発や導入を積極的に進めていきたい。

参 考 文 献

- 1) 奥野 眞, 虎尾 彰:「鉄鋼業における目視検査の自動化」, 計測と制御, **37**(1998)7, 516-520
- 2) 虎尾 彰, 浅野 一哉, 高田 一: 川崎製鉄技報, **21**(1999)1, 79
- 3) 内田洋之, 守屋 進, 市川文彦, 三宅秀和, 八角忠明:「冷延鋼板用オンライン粗さ計の開発」, 第 32 回計測自動制御学会学術講演会, 104A-5(1993), 167
- 4) P. Beckmann and R. Spizzichino: "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Pergamonn Press, (1963)
- 5) 浅野有一郎, 塩住基仁, 栗田邦夫, 矢部 直, 守屋 進:「冷延鋼板の光反射特性とそのオンライン表面粗度測定への応用」, 鉄と鋼, **70**(1984)9, 1095-1102
- 6) 川口吉郎, 武藤振一郎, 岸生浩之, 虎尾 彰, 内田洋之:「ぶりき原板用ドライスキムハスミルにおけるオンライン粗度制御技術」, 材料とプロセス, **9**(1996), 1341
- 7) 虎尾 彰, 柳本隆之, 鎌田征雄:「レーザ励起蛍光法による鋼板表面のオンライン塗油量計測技術の開発」, 計測自動制御学会論文集, (投稿予定)
- 8) 柳本隆之, 虎尾 彰, 鎌田征雄, 伊理正人, 高崎順介, 佐々木洋明, 牧勇之輔:「レーザ誘起蛍光法による冷延鋼板用オンライン塗油量計の実用化」, 計測自動制御学会第 13 回センシングフォーラム, 4(1996)5, 97
- 9) 虎尾 彰, 川嶋祥生, 鎌田征雄, 山下陽俊, 八角忠明, 池田忠彦:「オフライン測定用卓上型鋼板塗油量計の開発」, 計測自動制御学会第 14 回センシングフォーラム, 4(1997)3, 113
- 10) 虎尾 彰, 北川 一, 善本 毅, 中村賢市郎, 杉田七三郎:「オンライン望遠測色計の開発」, 鉄と鋼, **70**(1984)9, 1277-1284
- 11) 守屋 進, 館野純一, 虎尾 彰, 市川文彦:「オンラインステンレス鋼板光沢測定装置の開発」, 第 32 回計測自動制御学会学術講演会, 104A-4(1993), 165
- 12) 虎尾 彰, 市川文彦, 栗山則行, 守屋 進:「ステンレス鋼板表面性状の光学的測定装置の開発」, 第 35 回計測自動制御学会学術講演会, 112C-1(1996), 359
- 13) 三宅秀和, 増野豊彦, 女鹿節男, 貝原利一, 古川九州男, 銭場 敬, 吉田 守:「高精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, **3**(1990), 1266
- 14) 福高善己, 望月 栄, 西邑誠吉, 深沢千秋:「自己相関式周期性欠陥検出器における検出性能の安定化」, 材料とプロセス, **3**(1990), 1268
- 15) 相澤 均, 柏田浩貴, 佐藤正義, 堀畑 聡, 北川 一, 田宮稔上:「時系列データへのフラクタル解析法の適用—基礎検討と探傷波形の解析」, 材料とプロセス, **5**(1992), 1377-1380
- 16) 福高善己, 児玉吉寿, 飯田永久, 太田範男:「高性能表面疵検査装置の開発」, 材料とプロセス, **8**(1995), 1157
- 17) 奥野 眞, 虎尾 彰, 戸村寧男, 辻本雅巳, 大井啓二:「酸洗鋼板表面疵検査装置の開発」, 材料とプロセス, **12**(1999), 286
- 18) 福高善己, 望月 栄:「冷延鋼板表面疵検査装置のオンライン確性システム」, 材料とプロセス, **5**(1992), 1416
- 19) 福高善己, 田中 薫, 穴吹淳範, 上村敦朗:「薄鋼帯重大欠陥検出装置の開発」, 材料とプロセス, **10**(1997), 1035