

© 1984 ISIJ

鉄鋼ラインセンサの現状と展望



井上雄一郎*

A Review of New Measuring Instruments Technologies in Steel

Yuichiro INOUE

1. はじめに

この項では、圧延制御用の厚み計、幅計などの鋼材寸法計測装置、鋼板の品質管理を行う表面きず検査装置などを中心に解説する。これらの装置は鉄鋼製造ライン専用の計測装置として開発され発展してきたため、温度計、圧力計など一般自動制御用のセンサと区別して特殊センサと呼ばれることが多いが、鉄鋼業関係者から考えれば、特殊なセンサではなく、身近なライン制御用センサである。その意味で鉄鋼業関係者が多い場ではラインセンサの名称を用いるよう努めている。また、鉄鋼ラインセンサと呼ばば一般的な場でも十分理解される名称と言える。

本文では代表的なラインセンサを取り上げ、その特長と技術動向にふれ、また、最近開発された新センサ、新技術についても解説してみる。そして、特にラインセンサ製造メーカーの立場から、装置技術を中心に話題を展開することにした。

ここ数年来のラインセンサの技術動向を振り返ってみると、マイクロコンピュータを中心にした電子回路技術のインパクトが大きいことに驚かされる。昭和50年代に初めてX線厚み計にマイクロコンピュータを採用して計測精度を向上させた頃を第一世代とすると、マイコン利用は最近では第二世代に入った観がある。半導体メモリを中心にした電子回路素子の発達と、マイコンの飛躍的な機能アップのおかげで、自動診断機能、画像処理技術を活用したCRT操作機能の充実などで使いやすさが向上したことはもちろんであるが、第二世代を特長づけるものは、何と言つても多次元計測である。センサは計測対象を「点」または「線」でとらえるが、上に述べたデータ処理技術の向上で「点」のデータはメモリーに蓄積されて「面」のデータに加工され、二次元・三次元計測が可能になった。さらに、こうしたデータ処理技術の向上は、センサそのものの改良、新手法の開発を刺激して線状センサ、面状センサが使用されるようになってきた。

2. 寸法計測

鋼材の寸法計測は鉄鋼ラインセンサの開発当初からの重要テーマであり、現在もこの重要性は変わらない。特に厚さ・幅・長さは鋼材商取引上最重要項目であるためこれら諸元の管理、制御には細心の注意が払われている。ここでは、この重要諸元を計測する代表的なラインセンサに関して、その特長、将来の課題などにふれてみる。

2.1 厚さの計測

走行中の鋼板の厚みを計測する、いわゆるオンライン用厚み計は、接触式と非接触式に分けられる。接触式の代表的な装置はフライングマイクロメータである¹⁾。この装置は2個のローラで鋼板をはさみ、そのローラ間の偏移量から厚みを検出する装置である。もちろん、計測結果は電気信号で取り出すことが可能である。ロールを使用しないでダイヤモンド針を接触させる方式もある。しかし、ラインセンサの主流は非接触式で、それも放射線を使用した厚さ計が一般的である。以下に、特に非接触式厚さ計について解説する。

2.1.1 放射線厚さ計

鋼板を通過した放射線の量を検出して、鋼板の厚さを算出するのがこの厚さ計の原理である。(1)式にこの関係を示す。

$$I = I_0 \exp(-\mu h) \dots \dots \dots (1)$$

ここで h : 鋼板の板厚

μ : 鋼板の質によって決まる吸収係数

I, I_0 : 検出器の出力. (I_0 は $h=0$ の時)

μ と I_0 が一定とすると、 I を計測して h を知ることができる。

現在、鋼板製造ラインに使用されている厚さ計は、表1に示すように Am- γ 線厚さ計、X線厚さ計、Cs- γ 線厚さ計の3種類がある。

昭和40年代前半までは、 β 線厚さ計 (0.7 mm 程度まで測定)、X線厚さ計 (15 mm 程度まで測定)、Cs- γ 線厚さ計 (70 mm 程度まで測定) が実用化されていた。

昭和58年12月19日受付 (Received Dec. 19, 1983) (依頼解説)

* (株)東芝計測事業部 (Instrument & Automation Division, TOSHIBA CORPORATION, Toshiba Building 1-1-1 Shibaura-cho Minato-ku 105)

表 1 鋼板測定用厚さ計

機 種	放射線源	測定範囲	精 度
Am- γ 線厚さ計	RI (^{241}Am)	0~8mm	設定板厚の $\pm(0.05\% + 1\mu\text{m})$
X 線厚さ計	X 線発生器 (60 kV~140 kV)	0.1~30mm	設定板厚の $\pm 0.1\%$
Cs- γ 線厚さ計	RI (^{137}Cs)	4.5~100mm	設定板厚の $\pm 0.05\%$ または $\pm 10\mu\text{m}$

注 1 上表の他、 β 線厚み計があるが、現在はほとんど使用されていないので省略した。

注 2 RI: 放射性同位元素。

昭和 40 年代後半になると、Am- γ 線厚さ計 (5 mm 程度まで測定) が開発された。X 線厚さ計においても、X 線発生器の直流化、安定化によりシングルビーム方式への移行等の改良が行われた²⁾。

そして、昭和 50 年代に入るとマイクロコンピュータが導入され、自動校正機能、自己診断機能の装備等により、性能、信頼性、保守性が一段と向上した。

現在では、厚板製造ラインから薄板製造ラインに至る各所に装備され、板厚の制御および管理用センサとして、他方式の厚さ計の追随を許さない重要計器の 1 つとなつている。

今後の課題、展望としては次のような点がある。

- (1) 小形化 ミルマウント、スタンド間厚さ計への対応
- (2) 性能向上 X 線厚さ計の能力拡大 (50 mm 程度まで測定)、 γ 線厚さ計の高速応答、低雑音化
- (3) 保守性向上 自己診断機能、テスト機能の拡充による予防保全化。X 線発生器の長寿命化。
- (4) 計測ポイントの拡大 点計測から全幅計測へ。

ここまで説明した厚さ計は、鋼板を通過させた放射線の線量変化を検知する方式であるが、めつき鋼板に使用されるめつき厚さ計³⁾は反射量を検出する方式である。この場合、めつき層を通過して下地鋼板で反射された線量 I と、下地から直接反射した場合の線量 I_0 との比較になる。

2.1.2 その他の厚さ測定方法

放射線式以外の非接触式厚み計としては、レーザ式、超音波式、静電式、赤外線式等がある。この中で鋼板用として有望なものにレーザ式、超音波式がある。

2.2 幅の計測

鋼板の板幅を連続して測定する幅計は、ほとんどが非接触式であり、現在オンライン機器として多く用いられているものは、光電式である。これらの幅計をその用途別に分類してみる。例えば、冷延工場での冷延サーボ式幅計、CCD 幅計、熱延工場での光電幅計である。

2.2.1 熱延鋼板用幅計

図 1 に光電幅計の原理を示す。鋼板の上方に 2 組の走査器を内蔵した検出部を設置し、走査器の間隔はあらかじめ鋼板幅に応じて設定され、鋼板の左右のエッジ位置を連続的に走査し測定を行う。鋼板のエッジ部のコン

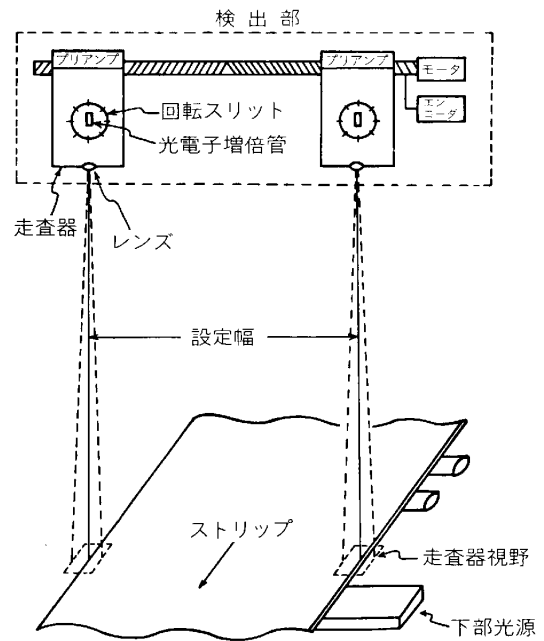


図 1 光電幅計の原理

ラストをよくするため、下方に光源を設けてバックライト方式としている。ここで走査器は 400 mm の幅を精度良く計測するカメラである。この計測原理は、光学的寸法計測システムの原形である。

鋼板の姿勢変化が少ない粗圧延機出側では、図 1 に示す 2 走査器方式幅計が採用され、鋼板の上下動も計測できる 4 走査器方式の幅計⁴⁾は巻き取り前に使用される。ここで使用した 4 走査器方式は、いわゆる二次元センサと呼べる。

2.2.2 冷延鋼板用幅計

計測原理は先に述べた熱延鋼板用幅計と同じ方式が採用される。ただここでは走査器に代わり、CCD イメージセンサを内蔵した CCD カメラを使用することが多い。これは、冷延鋼板の計測だから、幅計の検出部を小形にすることが可能になり、カメラの光学距離を短くでき、それにより、走査器に比較して感度の低い CCD カメラの使用が可能になつた。このカメラに採用した CCD イメージセンサは、いわゆる半導体イメージセンサで、LSI の一種である。今後、こうした半導体イメージセンサは、さらに進歩して、寸法計測、形状計測、表面きず検査などのラインセンサに盛んに採用されることになるものと考えている。

以上、幅計の種類とその特長を紹介したが、幅計の課題は次のとおりである。

- (1) 高速応答 鋼板幅制御用センサとして、高速応答の幅計ニーズは高まってきた。
- (2) 小形化 熱延工場のスタンド間幅計用として小形、経済的幅計が望まれている。

- (3) 高信頼性 水蒸気などに影響されない幅計・計測精度アップも重要。

- (4) 多次元計測 二次元、三次元センサへの発展。

2.3 長さ（速度）の計測

鋼材の長さを計測する計測方法は、鋼板のスピードに同期すると考えられている圧延機のロール回転数を計測する方式、鋼材に直接センシングロールを押し付けて、鋼材の移動量を取り出す方法が古くから使用され、現在もこれに代わる決定的な方式がない。ここでは、この古典的方式の解説は割愛して、最近注目されている非接触な速度計に触れてみる。

レーザ光線を移動する鋼材に照射して、その反射光を受光すると、その入射光・反射光の間にドップラ効果により、速度に比例した周波数変化 fd が表れる。この fd を求め速度を算出する。この時、 fd は式(2)(3)で表される。

$$fd = 2V \cdot \lambda^{-1} \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$fd = 2V \cdot \lambda^{-1} \cdot \sin \frac{1}{2} \phi \cdot \cos \Delta \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 λ : レーザ光の波長 (m)

V : ライン・スピード (m/s)

$\theta, \Delta \theta, \phi$: 幾可学的定数 (rad)

また(2)式はシングルビーム、(3)式は差動方式の関係を示す。

この他鋼材に直接着磁によりマーク付けを行い、これを検出する方式も発表されている。ただしいずれの方式も先に述べたセンシングロール式と比較して、実用性に乏しいため、これに完全に取って代わるまでにはなっていないと言われている。

2.4 断面形状の計測

形鋼や、鋼管などはその断面形状の管理が重要である。さらに、鋼板にしても最終製品を正確な寸法公差内に入れるためには、圧延中で鋼板断面のクラウン量や、エッジドロップの管理が重要と考えられている。ここではこうした要求に対応した断面形状の計測成功例を紹介する。

2.4.1 鋼板のプロフィールメータ⁵⁾

鋼板プロフィールメータは、2台のX線厚み計を熱間仕上げ圧延機後面に配置し鋼板のクラウン量、ウェッジ量、ハイスポット量などを求めるシステムである。図2に2台の厚み計のレイアウトを示す。一方の厚み計は固定形と呼ばれ、ライン中央の板厚を測定する。他方は走査形と呼ばれ、板の幅方向に走査しながら各位置の板厚を測定する。データの収集、処理にはミニコンピュータが用いられ、次のような処理が行われる。

- (1) 厚み計間距離補正
- (2) 2台の厚み計の機差補正
- (3) 鋼板横振れ補正
- (4) プロフィールデータ計算
- (5) 走査形厚み計台車制御

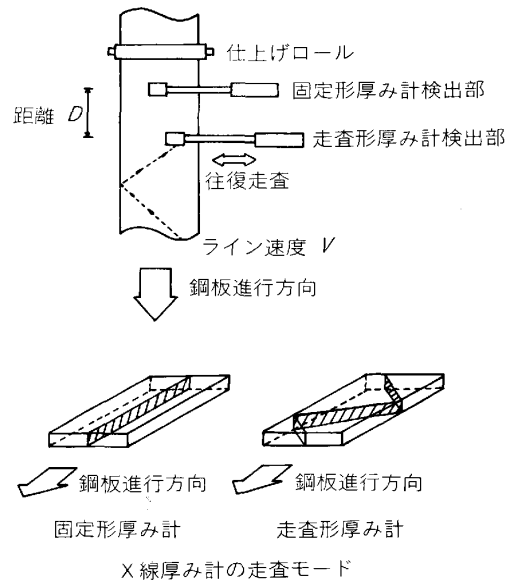


図2 プロフィールメータのレイアウト

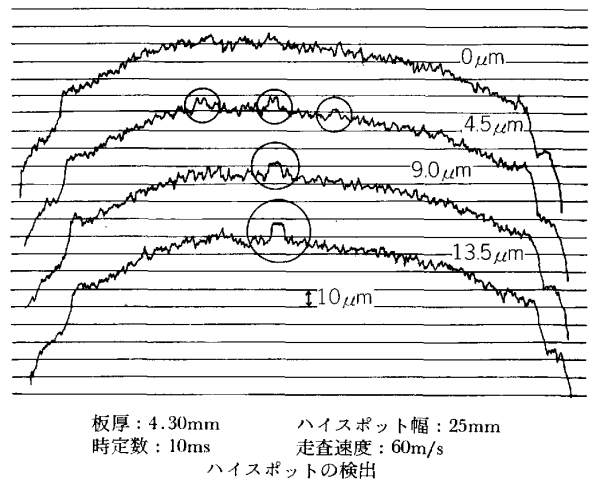


図3 プロフィールデータ (オンライン)

走査形厚み計は、プロフィールメータ用の厚み計として開発された厚み計であり、固定形厚み計の代用ができる他、次のような特徴がある。

- (1) 板幅方向の厚み分解能力を上げるためのX線ビーム絞り機構を装備している。
- (2) 高精度台車位置検出機構 (台車位置再現性 ± 0.5 mm)
- (3) 板エッジ検出回路 (再現性 ± 1 mm)

図3にデータの一例を示す。ハイスポットの検出能力は高さ $10 \mu\text{m}$ 、幅 10 mm 程度を達成している。

最近では、図4に示すように直接X線を全幅に照射して、全幅の厚さを計測する方式が考えられている⁶⁾。この方式での開発ポイントは全幅の厚みを計測できるセンサの開発である。

2.4.2 H形鋼厚み計⁷⁾

粗または、仕上げミル出側で高温・高速で走行中のH

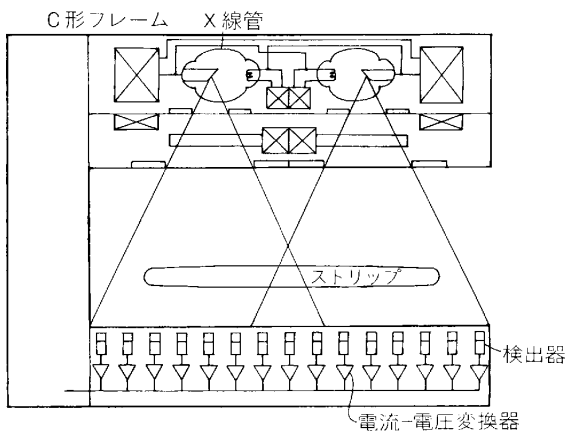


図 4 オールプロファイルメータ

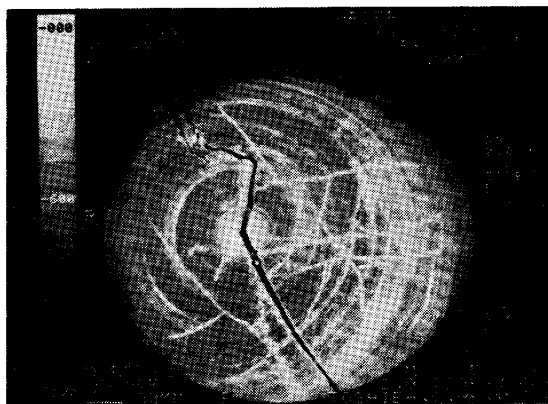


写真 1 産業用 CT (TOSCANER-3000) で撮影した木材の断層写真。虫食部の白線、割れ、年輪が明瞭にわかる。

形鋼のフランジ (両側) とウェブの厚さを放射性同位元素を利用して測定する。線源・Cs-137 (20~30 Ci) 1個をバスライン下部に収納し、両フランジとウェブの3方向へガンマ線ビームを放射し、各3個の検出器で厚さを同時に測定する方式である。

2.4.3 棒鋼太さ計

被測定物を中心に、検出器と光源を対向して配置し、光学的に外径を測定する幅の計測と同じ方法が、太さ計としても採用されている。従来は、2台の検出器を90°ずらして配置し、天地径と、左右径を測定しているが、最近、棒鋼ライン等では、1台の検出器を被測定物の周囲に回転させて、連続的に断面形状を測定する方式も開発されている。

2.4.4 CT の利用⁹⁾

医療診断で画期的な効果を上げたCT (コンピュータ、トモグラフィ) を鋼材の断面計測に利用することが検討されている。ここでは、CTの詳細説明は割愛するが、この装置を使用すると、写真1に示すように実に鮮明な断層図が得られる。このCT原理を活用すれば、鋼材の断面形状はもちろん、硬度分布や材質分析まで可能になると考えられているし、原理的には連続製造中のスラ

ブの内部診断や、はては高炉の内部診断まで可能になると、夢は広がる一方である。

2.5 形状の計測

鋼材の圧延方向をx軸、幅方向をy軸、厚み方向をz軸と考えると、yz面の計測が断面形状計測で、xy面の計測が「形状の計測」と呼ばれる。この場合、鋼板の表面の比較的ゆるやかな曲面計測は正確には断面形状の分野に入るが、ここでは形状計測として取り上げることにする。

鋼板の形状測定は熱間、冷間を問わず材質、寸法測定とやらんで重要な品質管理の一つとなつてきている。現状のプロセスニーズとしては、熱延鋼板および冷延鋼板の表面形状測定、熱延鋼板のクランプ形状測定および、熱延、厚板のキャンバー測定に代表される。

これらの計測技術は実用化になつてから、まだ日は浅いが、計測器の高精度化、高速応答により、ミルと直結した自動形状制御が実現しつつある。

以下にこれらの非接触形状計測の概要を述べる。

2.5.1 鋼板の形状計測

熱延鋼板の形状測定は走行中の被測定鋼板の上面に、板幅方向に棒状光源を照射して、ITVで鋼板上の光の像を撮影する。鋼板の歪みに応じた像の歪みを電気信号に変換して平坦度を測定する。高精度を維持するため、テンションによる補正が行われている⁹⁾。

冷延鋼板の形状測定は電磁力を加えて変位を求める方法、透磁率変化を測定する方法あるいは、既に変形している面にレーザを照射して変位を求める方法等、多くの方法が実用化されつつある。しかし、一方では、幅方向に分割したロールを直接鋼板に押し付けて張力を計測する方式¹⁰⁾に代表される接触方式がより実用的だとの意見もある。

2.5.2 クランプ形状計測

熱延工場の粗圧延後の鋼板の先、後端の形状を測定し、不良部分を正確にキャッチして最適なカット位置を決めるものである。検出器はCCDカメラを用い、出力信号は先、後端の切断位置としてクランプシャーに送られると同時に、端部の形状とカットラインがモニタ上に表示される。

2.5.3 キャンバー計測

鋼板のキャンバー測定の一般的な方法は鋼板のエッジを3台の幅計で同時にキャッチして、3点の座標 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$ を求める。通常 $|x_2 - x_1| = |x_3 - x_2|$ としている。ここで、キャンバー量 C は、(4)式で求めている。

$$C = y_2 - \frac{y_1 + y_3}{2} \dots \dots \dots (4)$$

2.6 三次元計測

先に述べた鋼板表面形状計測も正確には、三次元計測の対象となるべきであるが、ここでは、数少ない三次元

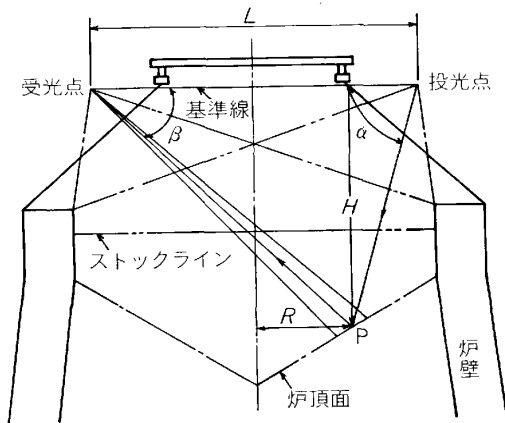


図 5 高炉におけるレーザー三角測量法
計測事例として高炉内のストックレベル計測方式を紹介する。

高炉炉頂プロフィール測定には、重錘式、光学式、マイクロ波式、放射線式および超音波式などがある。ここでは、レーザー方式とマイクロ波方式について述べる。

2.6.1 レーザ方式¹¹⁾

この方式はパルスレーザーを瞬間的な照光源として用いた三角測量装置である。

装置の構成を図 5 に示す。細いビーム径のレーザー光を長さ L の基線の片端から炉内に入射させ、小さなスポットで炉頂を照明して、そのスポットを見込む方向を基線の反対端から観測する方式である。この場合照明された P 点位置は、(5)式で求められる。

$$H=L \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \dots \dots \dots (5)$$

$$R=\frac{1}{2} L \cdot \frac{\sin (\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$$

- ここで α: 投光角、基線とレーザー光線との角度。
- β: 受光角、基線とスポットを見込む方向とのなす角度。
- L: 基線の長さ。
- H: P 点の基線からの垂直距離。
- R: 炉の中心から測つた P 点の半径方向位置

2.6.2 マイクロ波方式

この方式は電磁波の一種であるマイクロ波をプローブ先端から発信し、被測定物にあたって反射した電磁波をアンテナで受信した時、その伝播時間が距離によって変化することを利用した方法である。高炉内のプロフィールを測定するには、プローブに直進と回転を与えて三次元計測を実現している。

3. 鋼材表面のきず検査

鉄鋼プロセスにおいて、表面欠陥検査機は、冷延鋼板、めつき鋼板、電磁鋼板、カラー鋼板、ステンレス鋼板鋼管など冷間での適用側は既に多数あり実用のレベル

に達している。熱間での検査としては、ホットストリップへの適用に引き続き、熱間スラブの検査も実用段階にきている。

検出方式は、レーザー光スキャン方式や、リニアアレイを利用した CCD カメラ方式などの光学方式が主流である。計測技術的には、対象面の反射光強度の変化から欠陥を検知する第一段階¹²⁾、反射パターンの違いから欠陥を分離する能力を持った例えばレーザー回折パターン方式¹³⁾などの第 2 段階を経て、各点からの反射光変化を積み重ねて疵映像を形成し、この画像を処理することにより疵の評価をする第 3 段階¹⁴⁾に入っている。ここでは、最近進歩の著しい画像処理技術、パターン認識技術が応用されている。

しかし、現在のレベルでは、検出の安定性、高速性では目視を凌駕するも、疵の識別能力、判定能力では人間にとつて代わるところまでに至っていない。今後、疵の深さ、色、表面粗度、ゆるやかな曲がりなどを検出できるセンサの開発、センサからの情報を高速に処理し疵認識するプロセッサの開発により、目視検査ロボットの域に達することが期待されている。ここでは最新の技術例として、ホットストリップミル用のロールきず検査装置とスラブ表面きず検査装置の事例を紹介する。

3.1 ホットストリップミル用ロールきず検査装置

この装置はホットストリップミルの最終段圧延機の直後に設置されるもので、主として最終段の圧延ロールで転写されたロールマークを検知するシステムである。センサは幅計の項で紹介した CCD カメラである。一般にロールマークは鋼板表面のきずの中では検出の難しいもので、検出信号レベルも低い。そのため CCD カメラで検出した信号を特殊な画像処理をして、写真 2 に示すような映像をブラウン管上に造り出す方式を開発した。ロールマークが発生するとモニタ画面上に連続した輝線が出現する。これを 1 コイル圧延ごとに肉眼チェックする。この方式では、モニタ上の輝線を無理に自動判定す

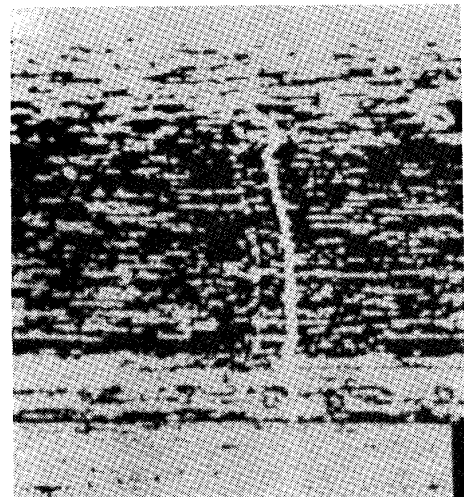


写真 2 ロールきずモニタ画面例

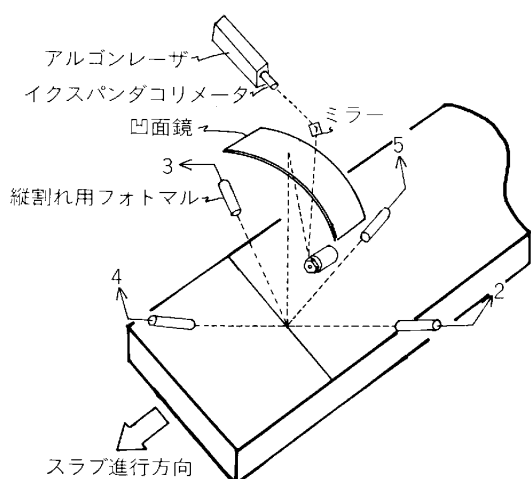


図 6 スラブ表面検査装置光学図¹⁸⁾

ることを避けて、肉眼の画像認識機能を活用する方式を採用したことが特長である。見えない対象を見やすくする技術も大切な画像処理技術の目的であることを示す好事例である。

3.2 スラブの表面きず検査装置

熱延鋼板用ロールマーク検査装置に採用した CCD カメラ方式¹⁶⁾もスラブ表面のきず検査装置として実用化されている。その他、渦流探傷、電磁超音波探傷¹⁷⁾、放射温度計による表面温度の計測方式などがスラブ表面のきずを検出する手段として実用化に向けて開発されつつあると言われている。ここでは、最近発表されたアルゴレーザを使用した事例¹⁸⁾を取り上げてみる。

図 6 に示すように、強力なレーザ光線をスラブ表面に投射して、その反射光を投光器周辺に配置した受光器で集光する方式である。レーザ光は十分に絞られてスラブ表面では小さな光点に成っている。この光点が「割れ」「穴」などの欠陥をキャッチすると、レーザ光線は、欠陥の中に吸い込まれ反射光が存在しなくなり、これを受光器で認知してきずを検知する。単純明解な光学システムが好結果を産み、既に実用の域に達したと報告されている。

4. む す び

紙面の都合で、十分に深くふれることができなかつたが、代表的なラインセンサを一覧できたと思う。こうした形で改めてラインセンサを見直してみると、ラインセンサ製造に関係する者として、その力不足を痛感する次第である。厚さ、幅の計測に関しては、やつと要求を満

たしている状態であり、それ以外の寸法計測分野では、ニーズに程遠い有様である。表面きず検査などの官能検査の自動化も評価を得られる段階まで来たが、いまだ監視用センサの域を出ない。制御用センサとして認知されるまでには、検出器の性能アップと同時に、きず発生の原因追求の努力も必要であろう。さらに、鋼材硬度、内部歪みなど鋼材品質に直接迫る計測は積み残したままである。

良く知られていることだが、センサ技術は、あらゆる技術、知識の集約した結果である。広く視野を広げてすばらしいラインセンサの芽を大きく育てたいと願っている。

文 献

- 1) 工業技術大系編集委員会: 変位・厚さ測定 (1965), p. 245 [日刊工業新聞社]
- 2) 沖野孝昭, 庄司孝雄, 小菅英男: 東芝レビュー, 38 (1983), p. 465
- 3) 山崎文雄: 放射線 (1973), p. 535 [共立出版社(株)]
- 4) Y. NAGAO, A. SAKAI and N. CHIBA: A High Precision Width Gage For Hot Strip Mill: IMECO VII
- 5) T. HIRAGA and J. MURAKAMI: Toshiba Review No. 135 (1981) Sep. Oct., p. 31
- 6) ディストロム・リミテッド: 特許公報・特公報 58-16445
- 7) 清水雅美: 富士時報, 54 (1984) 4, p. 75
- 8) 中村磁男, 谷本慶哲, 藤井正司: 東芝レビュー, 38 (1983), p. 1073
- 9) 柴田秀夫: 塑性と加工, 12 (1971), p. 353
- 10) M. HENAG: ALCAN-ASEA Automatic Flatness Control System, ICSTIS Tokyo Part 2 ('71)
- 11) 稲崎宏治, 南外 孝, 藤森康朝, 木村博一: 東芝レビュー, 38 (1983), p. 721
- 12) 河原 考, 益子羊了, 片野征夫, 平野真之助, 大村保弘, 小崎義忠: 鉄と鋼, 68 (1982), S 407
- 13) 深沢千秋, 島田雅良: 計測技術, 3 (1975) 9 p. 63
- 14) 長尾幸男: テレビジョン学会・画像処理, 画像応用研究会, 資料番号 IPA 58-4 (昭和 57 年 8 月 27 日) (私信)
- 15) 長尾幸男, 西呂誠吉: 東芝レビュー, 36 (1981), p. 1022
- 16) 上杉満昭, 山田健夫, 小森重喜, 宮野治夫, 山下元: 第 20 回 SICE 学術講演会 (昭和 56 年 7 月) 1610, 計測自動制御学会 (私信)
- 17) 岩井邦夫, 小島良郎, 中村良昭, 中島勝之, 川島捷宏, 曾我 弘: 鉄と鋼, 67 (1981), S 948
- 18) 平川紀夫, 儀間真一, 豊田利夫, 松原俊郎: 鉄と鋼, 67 (1981), S 137