

ホットストリップミル用形状計の実用化

技術報告

河島 貞夫*・鶴谷 三郎*・平田 清*
 田中 英輔*²・堀内 健文*³・辻 邦夫*⁴

Practical Shape Meter for Hot Strip Mill

Sadao KAWASHIMA, Saburo TSURUTANI, Kiyoshi HIRATA,
 Eisuke TANAKA, Takefumi HORIUCHI and Kunio TSUJI

Synopsis:

A practical shape meter to measure the manifest shape of running strip on a hot strip mill line with high accuracy has been developed. Structures and operating results of the meter are reported.

The points of designing were getting good stability of an eddy current type displacement meter, protecting sensor heads and sensor positioning mechanism, and so on. Moreover the following functions were given; automatic sensor positioning, remote calibration of the displacement meter, statistical data processing of steepness data, and communication to a process computer.

From the results of performance in Kakogawa Works, measuring accuracy of ±0.16% in steepness and time between failures more than 10 000 h have been obtained.

1. 緒 言

薄板圧延における最大の課題は、所定の厚さ・幅で平坦な板を製造することにある。これらの課題のうち、板厚の計測制御技術に関しては、既に高い技術水準に達しており、板幅については、高精度な制御技術が開発されている。

冷間圧延板の形状については、多くの計測手段、例えば、多分割ロール方式¹⁾ や鋼板たわみ方式²⁾ 等が実用的に使われている。冷間圧延では、大きな張力が印加されるので、形状不良が張力分布の不均一という形で潜在化するので、張力分布を測定するこれらの計測手段が有効である。

熱間圧延においては、鋼板張力が小さいため、形状不良が顕在化している。従つて、可視形状を測定することになるが、開発されている方式は、形状不良による鋼板変位を検出し、その信号から平坦度を求めるものが多い。鋼板変位検出方法としては、光学的な方法³⁾⁴⁾ や噴水柱による方法⁵⁾ 等がある。また、形状不良による鋼板傾斜角の変化を光学的に検出する方法⁶⁾⁷⁾ もある。これらは、熱間圧延特有の悪環境(熱輻射、瀑布状冷却水、スケール等)下では、外乱の影響を受けやすく、また、保全上の問題も多い。

筆者らは、このような悪環境にも耐え得る鋼板変位セ

ンサとして渦電流式変位計を用い、その出力から、鋼板の波高さと板波ピッチの比で定義される急峻度を精度よく演算する形状計を試作した。この試作機は、2年間のフィールド・テストを通じて、検出精度 ±0.18%(急峻度値)と高精度であることを確認した⁸⁾。今回、この形状計を基本として、実用時の有用性をさらに高める観点から、測定自動化、高信頼化、高安定化を中心に改良を施し、10 000 h 以上の無故障運転を行つたので報告する。

2. 測定原理

鋼板の板波は、通常、正弦波で近似できる。したがつて、走行する熱鋼板の板波は、鋼板表面とセンサ間の距離変化として、渦電流式変位計で検出される。その出力 $V_i(V)$ は、板波高さを $h(mm)$ 、板波ピッチを $l(mm)$ 、鋼板速度を $v(m/s)$ とすると、

$$V_i = A_1 \cdot \frac{h}{2} \sin\left(2\pi \cdot \frac{1000 \cdot v}{l} \cdot t\right) \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに A_1 は変位変換係数 (V/mm)、 t は時間 (s) である。この信号 V_i を時定数 $\tau(s)$ の微分器で時間微分すると、その出力 $V_d(V)$ は、

$$V_d = 1000 \cdot \pi \cdot \tau \cdot A_1 \cdot \frac{h}{l} \cdot v \cdot \cos\left(2000 \pi \cdot \frac{v}{l} \cdot t\right) \dots\dots\dots (2)$$

と表される。

昭和 59 年 2 月 22 日受付 (Received Feb. 22, 1984)

* (株)神戸製鋼所浅田研究所 (現: (株)神戸製鋼所電子技術センター) (Asada Research Laboratories, Now Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd., 53-3 Aza-Maruyama Gomo Nada-ku Kobe 657)
 *² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)
 *³ (株)神戸製鋼所浅田研究所 (Asada Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)
 *⁴ (株)神戸製鋼所技術開発本部 (Technical Development Group, Kobe Steel, Ltd.)

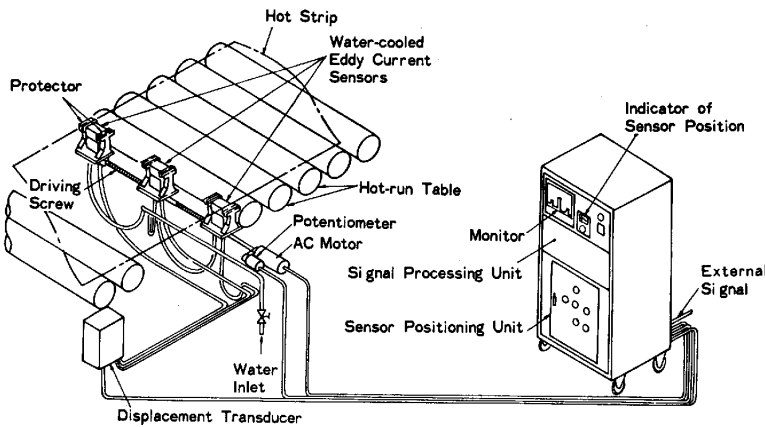


Fig. 1. Construction of trial shape meter.

ここで、急峻度を λ (%) とすると、急峻度の定義から、

$$\lambda = 100 \cdot h/l \dots \dots \dots (3)$$

となるので、(2)式は次のように書き直される。

$$V_d = 10 \cdot \pi \cdot \tau \cdot A_1 \cdot \lambda \cdot v \cdot \cos\left(2000\pi \cdot \frac{v}{l} \cdot t\right) \dots (4)$$

この信号を RMS コンバータによつて、実効値変換すれば、

$$V_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_d)^2 dt} = \frac{10}{\sqrt{2}} \pi \cdot \tau \cdot A_1 \cdot \lambda \cdot v \dots \dots \dots (5)$$

なる電圧が得られる。ここに、 V_r は RMS コンバータの出力 (V)、 T は積分時定数 (s) である。

一方、鋼板速度の信号は、圧延機から得られ、その信号電圧 V_v (V) は、

$$V_v = A_2 \cdot v \dots \dots \dots (6)$$

で与えられる。ただし、 A_2 は、速度-電圧変換係数 (V/m/s) である。

割算器によつて、(5)、(6)両式の比をとれば以下のようなになる。

$$V_0 = \frac{10 \cdot V_r}{V_v} = \frac{100}{\sqrt{2}} \pi \cdot \tau \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \lambda \dots \dots \dots (7)$$

すなわち、割算器の出力 V_0 (V) は、急峻度 λ のみの関数となり、かつ比例関係にある。

3. 形状計の改善点とその結果

既に報告⁸⁾した試作機は、Fig. 1 に示すように、

- イ) 溢水形センサ水冷容器 3 台
- ロ) 渦電流式変位センサ・ヘッド 3 台
- ハ) 変位変換器 1 式
- ニ) センサ駆動機構 1 式

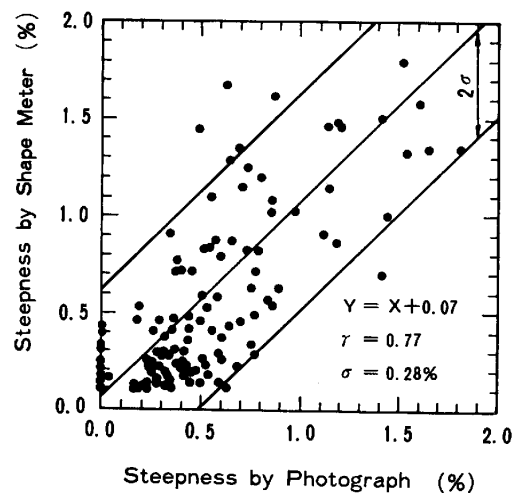


Fig. 2. Accuracy analysis of trial shape meter.

- ホ) センサ位置制御回路 1 式
- ヘ) 信号処理/表示回路 1 式

から構成されている。この試作機の出力と走行熱鋼板の実形状との対応関係は、Fig. 2 に示すとおりで、標準偏差 σ_T で 0.28% (急峻度値) であつた。ただし、横軸の写真撮影による急峻度解析には、標準偏差 σ_P にして 0.21% (急峻度値) の誤差が見込まれる。したがつて、この試作機の出力に見込まれる誤差は、誤差の伝播則から、急峻度値で、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_T^2 - \sigma_P^2} = \sqrt{(0.28\%)^2 - (0.21\%)^2} = 0.18\% \dots \dots \dots (8)$$

という値になり、性能的には、満足できる値である。

Fig. 3 は、改善を施した実用機の構造を示したもので、試作機で良好に動作した信号処理回路とセンサ位置制御回路はそのままである。以下に詳細を説明する。

3.1 検出端構造

試作機では、渦電流式変位センサ・ヘッドを溢水形センサ水冷容器に収納して、センサ駆動機構で、水冷容器を駆動していた。この方法では、駆動用ネジ部や摺動部

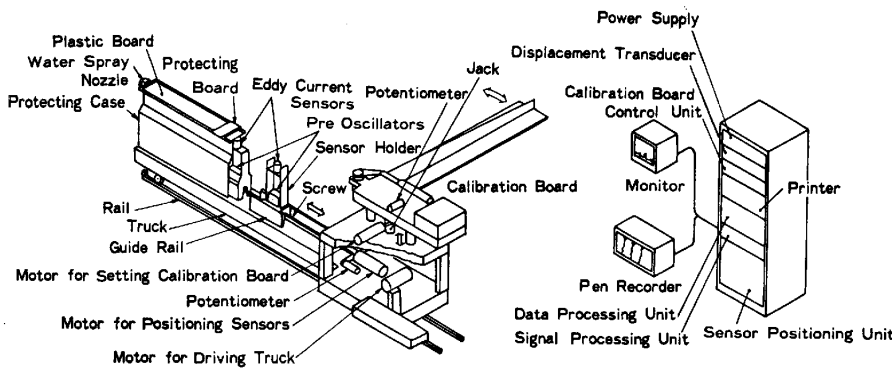


Fig. 3. Construction of improved shape meter.

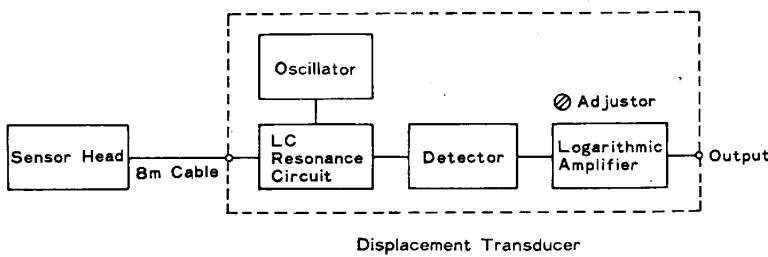


Fig. 4. Block diagram of eddy current type displacement sensor for trial shape meter.

に冷却水がかかり、スケールが付着するという問題点があつた。

実用機では、Fig. 3 に示すように、ケース内にセンサ駆動機構をも収納して、上記問題点を解決している。さらに、ケースを台車上に設け、ライン外に引き出し可能に構成し、安全性も改善している。

この台車には、校正板とその駆動系が設けられている。これらは、渦電流式変位計の校正を遠隔で行うためのもので、通常は、図示のようにケースに対し、直交する方向に置かれ、圧延鋼板の通板に支障のないようになっている。校正時には、校正板は、エアシリンダでケース上に旋回駆動され、校正板昇降モータで上下高さを設定される。これらの設定操作は中央制御盤で可能であり、校正板高さの設定値に対して、変位変換器の出力が適正になるよう、校正することが可能である。

Photo. 1 に検出端の外観写真を示す。

3.2 渦電流式変位計

試作機に使用した渦電流式変位計の構成図を Fig. 4 に示す。この変位計では、ドリフトが大きく、特に耳波用センサのドリフトは、中央部センサに比べて 10 倍であつた。これは、センサ・ヘッドが板幅に応じて移動するため、センサ・ヘッドと変位変換器とを結ぶケーブル・インピーダンスが変化し、LC 共振回路の共振特性に影響を及ぼすためである。Fig. 5 (a) に、最大のドリフトを生じた際のデータを示す。10 日間で、0.23V (変位換算 11.5 mm) のドリフトを生じている。このた

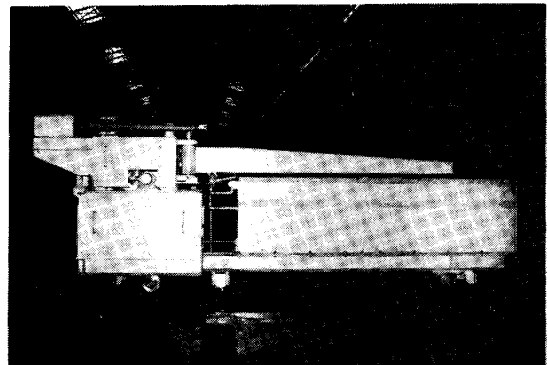


Photo. 1. Photograph of protecting case assembly.

め、頻繁な校正を行い、精度維持をはかる必要があつた。

実用機では、Fig. 6 に示すように、共振回路部をセンサ・ヘッドから 50 cm 以内に設け、センサ・ヘッドと同じ架台上に取り付けることにより、板幅に対するセンサ・ヘッドの移動によつて生じるケーブル・インピーダンスの変化を除去した。更に、センサ・ヘッドの構成材質の見直しを行い、温度ドリフトの低減を計つた。その結果、Fig. 5 (b) に示すような、ドリフト・データを得た。これは、15000 h に及ぶランニング・テストで得られた最大のドリフトである。本回路のドリフト量は 0.02V (変位換算 1 mm) と、改善前の 1/10 に減少している。Table 1 に主要仕様の比較を示す。

渦電流式変位計の校正は、3.1 項で述べた校正板とその駆動系を用いて、容易にかつ精度良く行える。試作機

Table 1. Specification of eddy current type displacement sensor.

Items	Before Improvement	After Improvement	Note
Number of Channel	3 ch		Distance from Surface of Sensor For Displacement Range
Displacement Range	30 to 80mm		
Output Voltage	0 to 1 V		Smaller than 0.5 dB
Transfer Coefficient	0.02V/mm		
Frequency Response	0 to 100Hz		Non-storageable
Linearity	±0.4% of F.S.	±0.8% of F.S.	
Resolution	±0.2mm	±0.5mm	
Drift vs Temperature	±1.0% of F.S./°C	±0.3% of F.S./°C	
Drift vs Time	±0.3% of F.S./day	±0.5% of F.S./day	
Size of Sensor	89mm ^W ×70mm ^H	89mm ^W ×70mm ^H	
Cable Length	8 m	0.5 m	
Size of Pre-oscillator	—	125mm ^W ×117mm ^H ×59mm ^D	
Display of Output	—	Digital Panel Meter	
Accuracy of Calibration*1	±1.5mm	±0.5mm	
Error of Transfer Coefficient*1	±4%	±0.5%	
Drift	23.5%/10days	2.2%/11days	

*1 By improvement in accuracy of calibration.

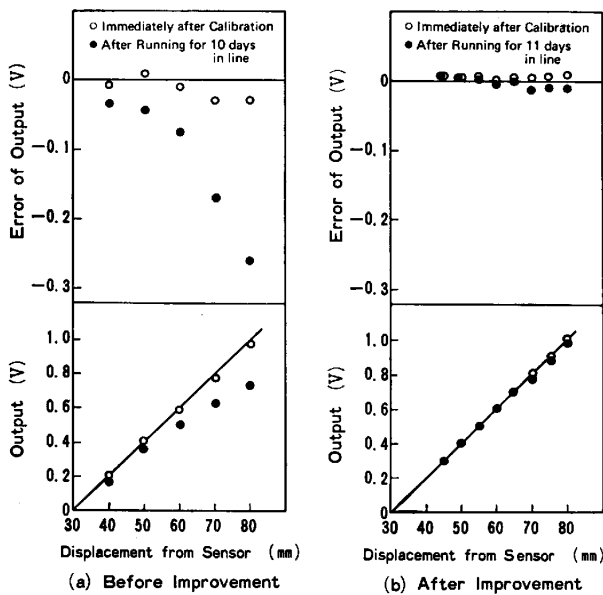


Fig. 5. Drift data of eddy current type displacement sensor.

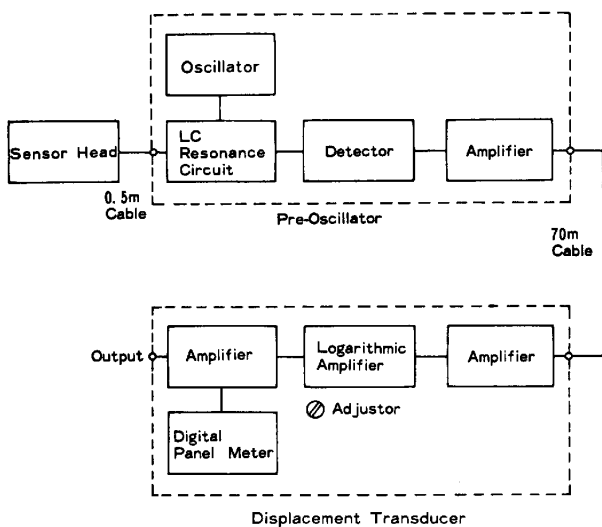


Fig. 6. Block diagram of eddy current type displacement sensor for improved shape meter.

では、校正用の鋼板をホットランテーブル上にスペーサを介して置き、近接点 (30 mm)、中点 (55 mm)、最遠点 (80 mm) の 3 点校正を行っていたため、良好な再現性が得られなかつた。実用機では、遠隔で校正板を近接点 (40 mm)、中点 (60 mm)、最遠点 (80 mm) の 3 点に精度 ±0.2 mm で自動設定できるため、校正後の理論値からのずれも、Fig. 5 に示すように、最大 0.01 V (変位換算 0.5 mm) に抑制されている。

なお、急峻度測定に際しては、渦電流式変位計の絶対誤差は効かない。すなわち、急峻度演算では、(2)式に示すように時間微分を行うので、変位変化に対する出力電圧変化が影響する。これは、変位変換係数 A_1 の誤差で評価できる。試作機に用いた渦電流式変位計では、この誤差は、最大 4% であつたが、実用機では 0.5% に改善されている。これも、校正精度の改善によるものである。

ここで、急峻度測定での誤差要因に対する変位計の誤差の影響度について検討する。要因として、(7)式に示すように微分時定数、変位変換係数、速度変換係数がある。(7)式から

$$\Delta V_0^2 = \left(\frac{100}{\sqrt{2}} \pi \lambda\right)^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \Delta \tau\right)^2 + \left(\frac{\tau}{A_2} \Delta A_1\right)^2 + \left(\tau \cdot \frac{A_1}{A_2^2} \cdot \Delta A_2\right)^2 \right] \dots \dots \dots (9)$$

誤差を均等配分すると、変位変換係数による項は以下になる。

$$\frac{100}{\sqrt{2}} \pi \lambda \cdot \frac{\tau}{A_2} \cdot \Delta A_1 = \frac{V_0}{\sqrt{3}} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、全体の測定精度を急峻度にして 0.1% におさえるためには、急峻度 5% で出力 10V が得られるから、 $\Delta V_0 < 0.2V$ でなければならない。

一方、 $\tau = 0.06 \text{ s}$
 $A_2 = 0.5 \text{ V/m/s}$

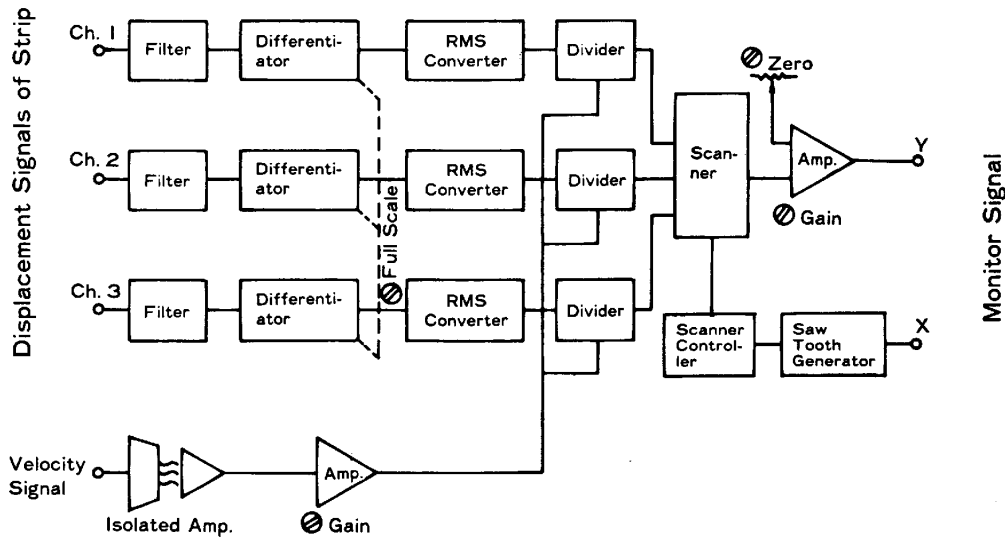


Fig. 7. Block diagram of signal processing unit.

であるから、

$$\Delta A_1 < 0.004/\lambda$$

を得る。ここで λ は急峻度の真値で、板材により変化するが、5% レンジでの測定範囲の最大値を用いると

$$\Delta A_1 < 0.0009 \text{ V/mm}$$

となる。 A_1 の値は 0.02 V/mm であるが、実用機ではこの変化が上述のように 0.5% に改善されているので

$$\Delta A_1 = 0.0001 \text{ V/mm}$$

となっている。従つて、変位計の誤差による急峻度測定への影響は十分小さくおさえられている。

3.3 信号処理回路

本回路は、試作機で使用した回路が十分な性能を有していたので、改善を行わなかつた。本回路は、両端部と中央部の渦電流式変位計出力を、2項の原理式どおりに演算するもので、Fig. 7 に示す構成になっている。

本回路の演算精度は、フルスケールの $\pm 1.5\%$ 以内であり、分解能は急峻度値に換算して $\pm 0.1\%$ 以内であった⁸⁾。

3.4 データ処理回路

本回路は、

- (1) 耳波検出用センサの位置の自動設定
- (2) 急峻度データの一定鋼板長ごとのサンプリングと演算値のプリント出力
- (3) コイル全長にわたる急峻度データの統計処理とプリント出力およびプロセスコンピュータへの出力などを行うため、マイクロコンピュータを内蔵している。

センサ位置の自動設定は、プロセスコンピュータからの指令で板幅値を読み込み、設定目標値を演算後 D-A

変換してセンサ位置制御回路に出力される。

信号処理回路から出力される急峻度データは、一定鋼板長ごとにサンプリングされる。このサンプリングパルスは、速度信号を V-f 変換し、その出力を計数した値が 5m 相当の値になった時点で出力される。5m ごとのサンプリングデータは、20m, 50m, 100m の選択された鋼板長ごとに $\lambda_D - \lambda_C$, $\lambda_W - \lambda_C$ の値を演算し、サンプリングデータとともにプリンタに出力される。これは、板の形状が板の長手方向に急に変化することがなく、数十m~100m でゆつくり変化することに対応したものである。ここに、 λ_D はドライブ・サイド、 λ_C は中央部、 λ_W はワーク・サイドの各急峻度値である。この演算は、各チャンネルに共通に含まれる鋼板の上下振動による誤差成分を相殺するためのものである。

さらに、5m ごとのサンプリングデータは、鋼板の先端から 180m (遠方コイラ噛み込み) まで、仕上げ圧延機第3スタンド尻抜けまで、鋼板尾端までの3ブロックごとに積算および最大値演算が行われ、プロセスコンピュータに各ブロックごとの平均値、最大値が出力されるとともに、プリンタにも出力される。

本回路の追加により、急峻度計測の自動化が可能になると同時に、従来のモニタ出力、レコーダ出力以外に、プロセスコンピュータによる形状の品質管理が可能となった。

4. 走行熱鋼板形状との対応性評価

走行熱鋼板形状と形状計出力との対応付けは、同期写真法によつた⁸⁾。これは、形状計検出端位置での走行熱鋼板のストロボ写真と、形状計モニタ写真を同期して撮

影するもので、鋼板写真から、板波高さと板波ピッチを読み取って、急峻度値を得た。鋼板写真の例を Photo.

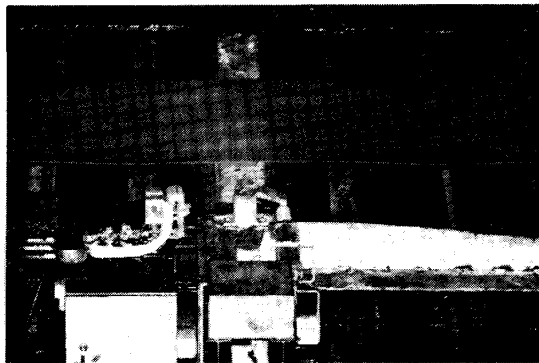


Photo. 2. Example of photograph used to analysis of inflatness.

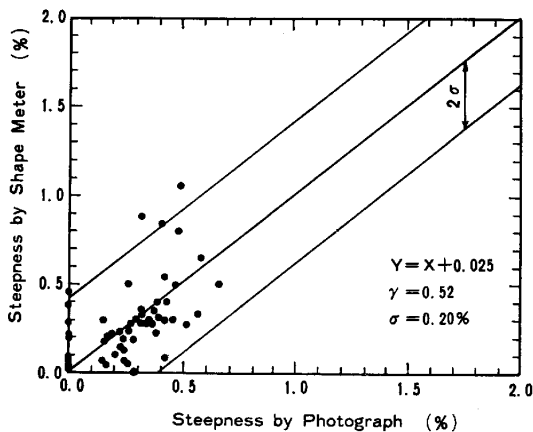


Fig. 8. Accuracy analysis of improved shape meter.

2 に示す。

両者の対応関係を Fig. 8 に示す。写真解析急峻度 λ_P と形状計出力 λ_M との関係は、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_M &= \lambda_P + 0.025 \\ \gamma &= 0.52 \\ \sigma_T &= 0.20\% \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

である。試作機の対応関係 (Fig. 2 参照) に比べ、相関係数 γ は小さくなっているが、右辺の定数項および標準偏差 σ_T は改善されている。

相関係数 γ が小さくなっているのは、データ点が原点付近に集中しているためで、試作機の運転実績から圧延技術が向上し、著しい形状不良材が発生しなくなったことによると考えられる。また、(11)式右辺第2項は鋼板のばたつきによると考えられるが、これも、圧延技術の向上によつて、小さく抑制されていると言えよう。

標準偏差 σ_T は、試作機における値 (0.28%) に比べ、約 2/3 に改善されている。この標準偏差には、写真解析における読み取り誤差が含まれており、試作機では、(8)式に示すように、急峻度値にして 0.21% 相当であった⁹⁾。今回の対応試験では、鋼板写真の拡大率をあげ、板波高さの読み取り誤差を 0.25 mm から 0.15 mm に改善し、写真解析急峻度の誤差成分を標準偏差 σ_P にして、0.13% に抑制している。その結果、形状計測誤差を表す標準偏差値 σ_M は、誤差の伝播則から、

$$\begin{aligned} \sigma_M &= \sqrt{\sigma_T^2 - \sigma_P^2} = \sqrt{(0.21\%)^2 - (0.13\%)^2} \\ &= 0.16\% \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

となる。この値は、信号処理回路の演算精度 ($\pm 1.5\%$)

Table 2. Specification of improved shape meter.

Items	Specification	Note	
General	Number of Channel	3 ch	} In Steepness
	Full Scale	5%, 10%, 20% changeable	
	Measurement Error (Dispersion)	$\pm 0.16\%$	
	Height of Inflatness	0 to 50mm	
	Pitch of Inflatness	More than 200mm	
	Velocity of Strip	Smaller than 20m/sec	
	Width of Strip	900 to 2,000mm	
	Temperature of Strip	0 to 1,000°C	
Operating Temperature	0 to 45°C		
Protecting Case Assembly	Dimensions	3,823mm ^L × 747mm ^W × 1,364mm ^H	
	Weight	1,377kg	
	Installation to Line Cooling Method	Moter Drive Water Cooling	
Sensor Positioning Unit	Accuracy of Positioning	± 10 mm	
	Velocity of Positioning	36mm/sec	
Eddy Current Type Displacement Sensor		cf. Table 1	
Signal Processing Unit	Output Voltage	0 to 10V	For Full Scale
	Accuracy of Output	$\pm 1.5\%$ of F.S.	In Steepness
	Resolution	$\pm 0.1\%$	
	Magnification of Display Accuracy of Display	×1, ×2, ×5 changeable $\pm 4\%$ of F.S.	For Magnified Full Scale
Data Processing Unit	Functions	Calculation of Sensor Position Sampling of Steepness Statistical Analysis of Sampled Data Communication to Process Computer	
Others	Time between Failure	More than 10,000 hr.	

of F.S.) とモニタ表示精度 ($\pm 4\%$ of F.S.) から求めた理論誤差 0.13% (急峻度値)⁸⁾ とよく一致している。

標準偏差 σ_T の低減は、渦電流式変位計の校正精度の向上および高安定化によるものと考えられる。

5. 運 転 状 況

本形状計を構成する機器のうち、信号処理回路とセンサ位置制御回路は試作機に使用したものを使用している。この両回路は、試作機段階で3年間、実用機として2年間以上の運転実績を有している。故障の頻度および内容としては、試作機段階後半で、信号処理回路のフィルタ用 IC 故障と、センサ位置制御回路のサーマルリレー動作不良の2件が生じた。実用機段階では故障が発生していない。

その他の機器は、実用機用に製作し直したものであり初期故障期間を脱した後、信号処理回路とセンサ位置制御回路をも含めて、11000 h の間、無故障で動作した。

定期的な保守は、月1回、渦電流式変位計の校正を行う他、年1回、可動部の潤滑、回路調整等を行つている。

6. 結 言

以上の改善結果と主要設計仕様をまとめて Table 2 に示す。

渦電流式変位計の高安定化と校正の高精度化、セン

サ・ヘッドとセンサ駆動機構の保護方法の改善等によつて、測定精度 $\pm 0.16\%$ (急峻度値)、無故障時間 10000 h を達成した。また、データ処理回路によるセンサ位置の自動設定、急峻度データの統計処理、プロセスコンピュータとの通信等を可能としたことによつて、無人計測、各コイルごとの急峻度データの管理を可能にした。

実用機は、1980年に加古川製鉄所熱延工場に設置され、フィールドテスト終了後オペレータの操業モニタとして、また、形状の品質管理用として、活用されている。

文 献

- 1) O. G. SIVILOTTI, W. E. DAVIES, M. HENZA and O. DAHLE: *Iron & Steel Eng.*, 50 (1973) 6, p. 83
- 2) 松谷勝己: 第 61 回塑性加工シンポジウム (1977), p. 23 [日本塑性加工学会]
- 3) M. CHABOUD, P. PETIT and P. RATTE: *Proc. Int. Conf. Steel Rolling* (1980), p. 344
- 4) R. PIRLET, J. LUCKERS, J. BOELENS, S. WILMOTTE, J. MULDER and P. VERSPEELT: *Proc. Int. Conf. Steel Rolling* (1980), p. 391
- 5) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: *川崎製鉄技報*, 10 (1978), p. 370
- 6) 江森 隆: 第 61 回塑性加工シンポジウム (1977), p. 14 [日本塑性加工学会]
- 7) 藤井国一, 厚見 直: 第 61 回塑性加工シンポジウム (1977), p. 61 [日本塑性加工学会]
- 8) 堀内健文, 鶴谷三郎, 河島貞夫, 瀧澤謙三郎, 児山佑二, 上田長正: *神戸製鋼技報*, 30 (1980) 4, p. 75