

熱間圧延用平坦度計の実用化

松井 健一*・山本 章生*²・橘 秀文*²

Shape Meter for Hot Strip Mill

Kenichi MATSUI, Akio YAMAMOTO and Hidefumi TACHIBANA

Synopsis :

Sumitomo Metal Ind. Ltd. has succeeded in developing a new type of shape meter to measure the flatness of hot strips at the exit of a hot finishing mill.

The meter consists of an Ar-ion laser, three optical scanning mirrors, a high speed TV camera, and an image processor. It is based on the light section method. Three laser beams scan the width of the strips. The TV camera takes the projected laser beam image on the strip. The image processor calculates the height and the elongation index (flatness) of the strip. Because the elongation indexes are calculated using three projected beams, the measuring error caused by the strip's flutter is canceled.

The accuracy of height measurement was confirmed to be ± 1 mm. The flatness measured by the shape meter agreed with the results of visual observation by mill operators. It can be used even in hot, steamy and dusty atmospheres. These meters have been in practical use at Kashima Steel Works and Wakayama Steel Works since January 1986. They have been contributing to the improvement in the quality of hot strip coils.

Key words : hot rolled product ; hot strip mill ; sensor ; shape meter ; flatness ; light section method ; laser ; TV camera ; image processing.

1. 緒 言

近年、需要家から熱延鋼板に要求される寸法精度は非常に厳しくなつてきており、対象項目は、幅、板厚のみならず、断面形状（クラウン）、平坦性形状（平坦度）にまで及んできている。

各鉄鋼メーカーは、形状制御を行える圧延機を設置し、これらの要求に答えるよう努力を続けている。住友金属工業株式会社でも鹿島、和歌山両製鉄所の熱延仕上ミルを可変クラウン（VC）バックアップロール及びワークロールシフトを備えた形状制御ミルに改造し¹⁾²⁾、クラウン、平坦度を含めた寸法精度の良好な熱延鋼板製造に努めている。

鋼板のクラウン制御と平坦度制御は、相反する面がある。このためクラウンと平坦度の両方を測定して最適な制御を行う必要があり、ミル本体の形状制御能力に加え、計測器の測定性能も重要な要因である。

クラウン測定用にはトラバース型X線厚み計が多くのラインで稼動しており、実用域に達している。しかし、

平坦度測定装置に関しては、種々の方式が提案され一部オンライン設置されているが、熱延ライン特有の悪条件下で安定して、精度良く測定できると思われる装置は少ない。

著者らは以前和歌山製鉄所厚板工場に設置した厚板用平坦度計³⁾をベースに、種々の改良を加え、熱延工程でのオンライン測定装置として実用に供しうる性能の装置開発⁴⁾に取り組んできた結果、今回報告する装置の実用化に成功した。この装置は、鹿島製鉄所における約3年に及ぶ開発試験後、鹿島、和歌山両製鉄所の熱延工場に設置され、1986年1月より実使用されている。現在では、形状制御システムの中核をなすセンサーとして不可欠な存在となつており、熱延鋼板の形状向上に多大の貢献をしている。

2. 熱延鋼板平坦度測定の種類方式

仕上圧延機を出た熱延鋼板は、ホットランテーブルで水冷された後ダウンコイラーで巻き取られる。鋼板先端がダウンコイラーに巻き取られ始めるまでの間は、鋼板

昭和61年4月本会講演大会にて発表 昭和62年11月16日受付 (Received Nov. 16, 1987)

* 住友金属工業(株)システムエンジニアリング本部 (System Engineering Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

に張力がかからないので平坦度不良は顕在化している。これまでに報告されているミル出側での平坦度測定装置は、すべて顕在化している平坦度不良を測定する方式である。

ホットランテーブルでの水冷⁵⁾や、ダウンコイラーで巻き取られることにより平坦度が変わるので、仕上ミル出側でのオンライン平坦度測定精度を検証することは難しい。このことが、各種測定方式のオンラインでの性能比較が難しく、さまざまな方式の装置が開発される一因となっている。

顕在化した平坦度の測定方式として、これまでに報告されている主なものには下記の方式がある。

(1) 鋼板傾きや、高さの幅方向分布の時間的変化を測定

棒状光源法⁶⁾、水柱抵抗距離計法⁷⁾、レーザー距離計法⁸⁾⁹⁾、渦電流距離計法¹⁰⁾、レーザースキャニング法¹¹⁾

(2) 鋼板のある面内のある瞬間の高さ分布を測定
レーザーモアレ法¹²⁾

第1の方式は、ホットランテーブルを走行する鋼板の上下動(ばたつき)の影響が大きく、高精度のオンライン測定は難しい。

ホットランテーブル上での鋼板の走行ばたつきは、単純な上下動だけではなく、波打ちや、揺れ等の複合された複雑な現象と考えられる。さらに、このばたつき量の方が平坦度不良による鋼板高さ変動より大きいので、精度良く平坦度を測定するためには、ばたつきの影響を除去することが不可欠である。

例えば、Fig. 1 (a)のごとく幅方向に水平を保ちつつ、上下動をしながら走行する平坦な鋼板の、幅方向高さ分布の時間変化を測定した場合、上下動の影響は幅方向各点で同一である。従って、第1の方式でも、幅方向各点での高さ変動振幅の大小関係で平坦度を判定すれば、上下動の影響を軽減できる。しかし、Fig. 1(b)のごとく、

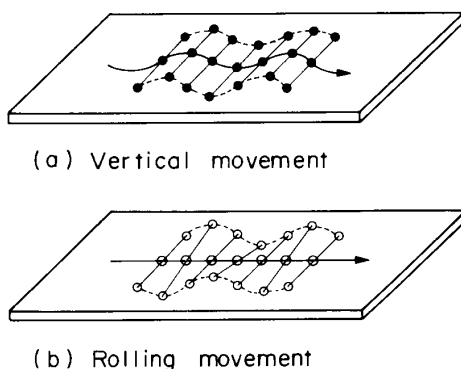


Fig. 1. Example of strip's flutter.

平坦な鋼板が揺れ運動をしながら走行する場合には、鋼板中心での高さ変動はなく、両端の高さだけが変動するので、第1の方式では耳波状の平坦度不良として測定されてしまい、ばたつき影響の補正はできない。

一方、第2の方式は、瞬時測定であるので、ばたつきの影響を受けないという利点があるが、モアレ法は現場環境下での実用化は難しい。また、距離計を2次元的に多数個並べる方式が考えられるが、測定点が多くなるため、多数のセンサーの校正、保守、価格、設置スペース等、実用上の問題点が多いとされていた。

今回実用化した装置は、第2の方式であり、鋼板の走行ばたつきの影響を受けずに測定できる。またセンサーが多くなると生ずる問題点を、多数の測定点を1個のTVカメラで測定することにより克服している。

また、熱間圧延ライン特有の粉塵、蒸気、飛散水滴、振動、熱輻射等、光学計測器にとって過酷な条件下で安定的に測定できるよう、種々の工夫を行い、実用化に成功した。

3. 光切断法の測定原理

Fig. 2 に光切断法の測定原理を示す。スリット光または走査レーザー光を斜め方向から鋼板上に照射し、鋼板上にできる輝線を、上方に設置したTVカメラで撮像する。平坦な鋼板がパスライン上であれば、モニター上の破線の位置に、まつすぐのレーザー輝線が写るが、パスラインから浮いていると、モニター上の実線の位置に写る。平坦度不良により鋼板表面に高さ分布があると、鋼板各点の高さ分布に応じて歪んだ輝線像が Fig. 3 のごとく得られる。

Fig. 2 中の光束照射角度 θ 、撮像倍率 α はあらかじめ測定可能である。またパスライン上に鋼板があるときの輝線像も事前に撮像可能である。従って、モニター上での輝線像移動量 ΔY を測定すれば鋼板のパスライン

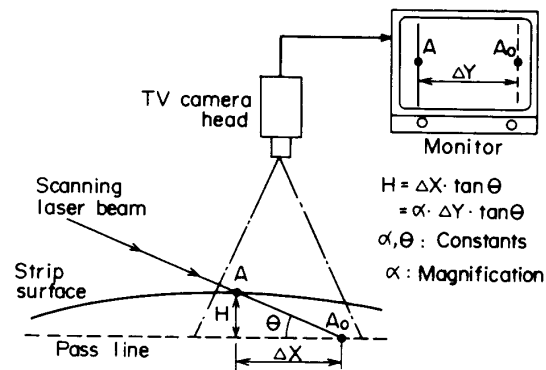


Fig. 2. Principle of light section method.

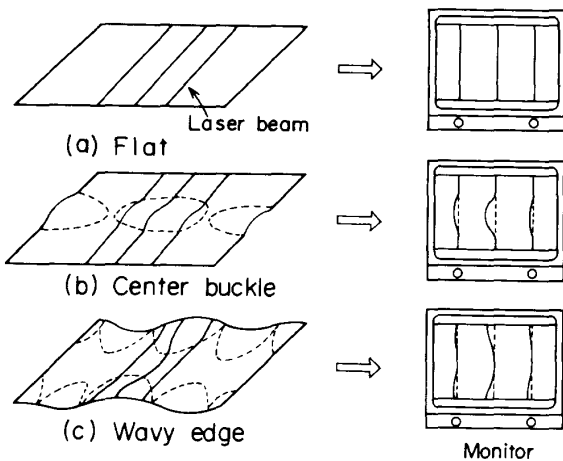


Fig. 3. Example of monitor image.

からの高さ H を(1)式より求めることができる。実際には、 ΔY を画像処理技術により自動的に求める。

$$H = \Delta X \cdot \tan \theta = a \cdot \Delta Y \cdot \tan \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

撮像装置として、TV カメラを使用しているの、鋼板幅方向の多数の位置で H を瞬時に求めることができる。

しかし、1本の光束による光切断法では、前述の第1の方式と同じく鋼板の走行ばたつきの影響を除去することは難しい。

3.1 3本の光束を用いた光切断法

走行ばたつきがあつても平坦度を測定できる方式として Fig. 4 に示す3本の光束を用いた光切断法を開発した。

鋼板走行方向に約 400 mm 離れた、ほぼ平行な3本の走査レーザー光束を鋼板表面に照射し、走行方向3位置で幅方向高さ分布を測定する。幅方向各点での高さ測定は3本同時に行われる。この同時に測定された値を用いて、その位置の伸び率を(3)式に示す方法で算出するので、時間経過の要素が入らない。従つて、たとえ揺れ運動を含むような複雑な走行ばたつきがあつても、影響を受けることなく平坦度を測定できる。

3.2 伸び率指標測定方法

通常伸び率 $\epsilon_0(\%)$ は、Fig. 4 に示す直線 OP の長さを L_1 、曲線 OABCP の長さを L_2 としたとき、(2)式で定義される。

$$\epsilon_0 = (L_2 - L_1) / L_1 \cdot 100[\%] \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式に従つて厳密に伸び率を算出するには、走行方向に非常に細かいピッチで測定しなければならない。

圧延機を制御して平坦度の良い鋼板を製造する目的には、幅方向のどの位置で、どの程度平坦度が悪いのかを定量的に測定できれば十分であり、伸び率の絶対値が必

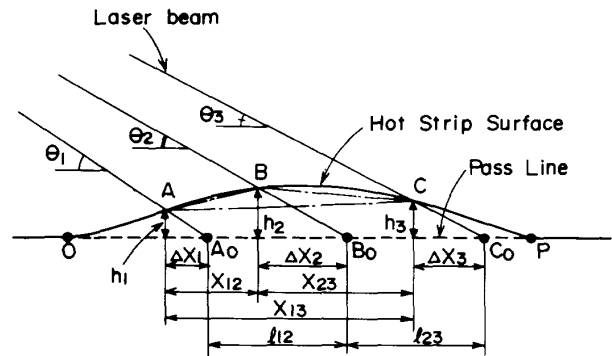


Fig. 4. Principle of elongation index measurement.

須というわけではない。

以上の点を考慮して本方式では ϵ_0 の近似値として(3)式で定義した値 ϵ を伸び率を評価する指標として用いている。

$$\epsilon = \frac{(\overline{AB} + \overline{BC} - \overline{AC})}{\overline{AC}} \cdot 100[\%] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{AC} は事前に測定可能な定数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, l_{12}, l_{23}$ とオンラインで計測されるレーザー基準位置 A_0, B_0, C_0 からの変位量 $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3$ を用いて次式で計算される。

$$\begin{aligned} h_1 &= \Delta X_1 \cdot \tan \theta_1 \\ h_2 &= \Delta X_2 \cdot \tan \theta_2 \\ h_3 &= \Delta X_3 \cdot \tan \theta_3 \\ X_{12} &= l_{12} + \Delta X_1 - \Delta X_2 \\ X_{23} &= l_{23} + \Delta X_2 - \Delta X_3 \\ X_{13} &= X_{12} + X_{23} \\ \overline{AB} &= (X_{12}^2 + (h_2 - h_1)^2)^{1/2} \\ \overline{BC} &= (X_{23}^2 + (h_3 - h_2)^2)^{1/2} \\ \overline{AC} &= (X_{13}^2 + (h_3 - h_1)^2)^{1/2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

幅方向の5点で(3)式の伸び率指標を求め鋼板平坦度の定量化を行っている。

4. 装置構成

装置全体の概要を Fig. 5 に、信号処理系のブロック図を Fig. 6 に示す。センサー部は仕上圧延機後方約 5 m に設置されている。主な仕様を Table 1 に示す。

4.1 投光装置

投光装置には、約 1000°C の赤熱鋼板の熱輻射光と識別できるよう、最大出力 4 W のアルゴンイオンレーザーを使用している。振動等でレーザー発振管の共振ミラー調整が狂い、発光出力が低下することのないよう、レーザーは圧延ラインから離れた位置に設置されてい

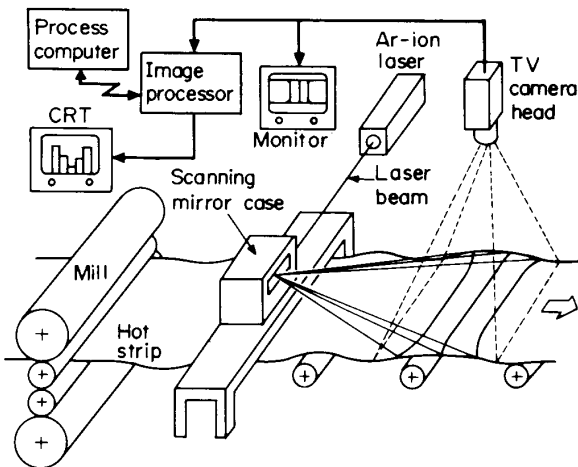


Fig. 5. Layout of shape meter.

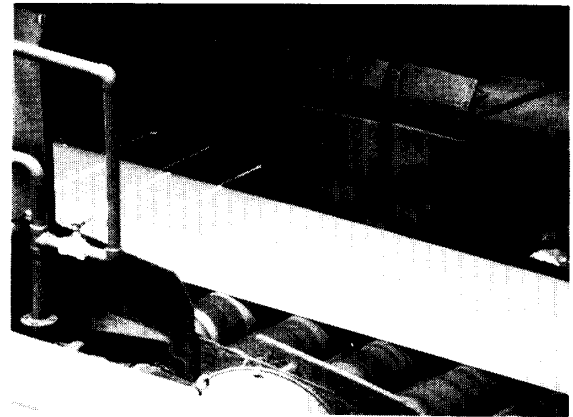


Photo. 1. Laser beams on hot strip.

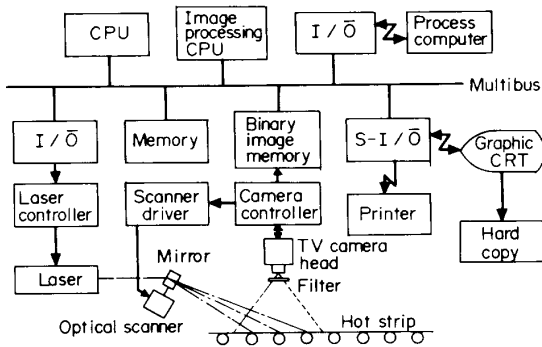


Fig. 6. Block diagram of shape meter.

Table 1. Specification of shape meter.

Laser	Ar-ion Multiline Max. power : 4W
TV camera	V. scanning freq. : 180 Hz Effective lines : 80
Binary image memory	1 024×80 pixels
CPU	Main : 8086 Sub : 80286 Bus : Multibus
Height sensing range	0~200 mm
Accuracy	Displacement ±1 mm

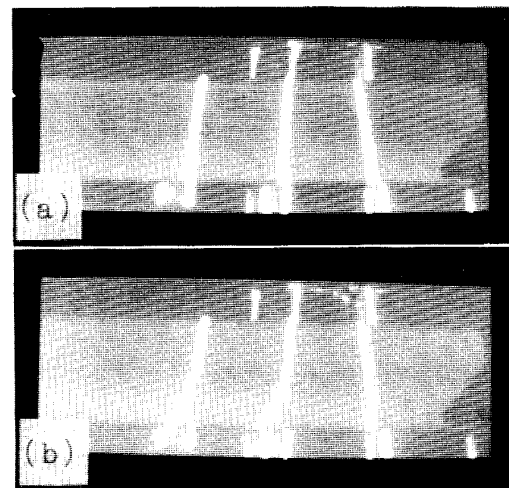
る。またミラーの厳密な調整が要求されるシングルライン発光を避け、マルチライン発光で使用している。

レーザー光はスキャナーケース内でハーフミラーにより3分割され、TVカメラの垂直同期信号に同期して往復運動する3台の走査ミラーで鋼板幅方向に走査照射される。

Photo. 1 にレーザー光が赤熱鋼板上に照射されている状況を示す。

4.2 撮像装置

Photo. 2(a) (b) に平坦な鋼板と耳波の発生している



(a) Flat (b) Wavy edge
Photo. 2. Examples of monitor display.

鋼板の TV モニター画面例を示す。このようにモニター画面の目視観察で直観的に平坦度を判定できることも本装置の特徴である。

高速現象を撮像するため、標準 TV カメラの3倍の垂直走査周波数 (180 Hz) の特殊カメラを用いている。

撮像管として残像の少ないプランピコン相当品を使用している。プランピコンは低残像であるが、蓄積形の撮像管なので被写体が高速移動体である場合、撮像時に 1/180 s 相当分のぶれを生ずる。しかし、レーザー光の走査はカメラの垂直走査と同期しており、幅方向の各点は瞬間的なレーザー光照射を受けるだけなのでレーザー輝線像は、ぶれを生じない。

画像信号の有効走査線数は 80 本、鋼板の最大製造幅は約 2 000 mm である。このことは約 25 mm 間隔で 80 台のセンサーを幅方向に並べたことに相当する。従って、

鋼板幅変更に対しては、圧延目標幅情報により、どの走査線で得られた信号を使用するかを純電子的に選択するだけであり、センサーを移動させるなどの機械的な部分がなく信頼性が向上した。

TV カメラを計測目的に使用する場合には、撮像管や、レンズの取差による画像歪みが問題となるが、今回の使用法は基準画像からの水平方向変位量測定なので、水平方向の非一様性歪みだけが問題となる。実際に使用しているカメラで測定した結果、測定分解能以下の影響であることを確認した。

4.3 信号処理装置

TV カメラから得られた画像信号は、アナログ処理で2値化され、1024×80画素の2値化ビデオメモリーに記憶される。

2値化像は、画像処理CPUで連続性判定による孤立点ノイズ除去、レーザー輝線抽出、細線化等の画像処理を施される。この処理によって、レーザー光が飛散水滴や水蒸気に当たって光るノイズ像を除去できる。

一方、レーザー光が途中の飛散水滴や水蒸気に当たって鋼板上に到達しないことがある。このような場合レーザー輝線像の一部が欠けるが、設定値以下の欠けであれば近傍のデータで補間することにより欠測増大を防いでいる。

TV カメラは常に製造可能最大幅の鋼板を測定できる視野で撮影しており、レーザー光も同じ幅の走査をしている。従って、狭幅材の圧延時には、搬送ロールやローラーエプロンにレーザー光が当たってできる輝線像も写るが、この部分の画像は上位計算機から得られる目標幅情報で鋼板の存在しない場所を算出し、画像処理対象から除外している。

4.4 データ処理装置

鋼板の幅に応じて設定された幅方向5点の測定点に対して(3)式に示す方法で伸び率を計算する。装置性能上は鋼板全幅に対して約25mm間隔で伸び率を測定可能であるが、平坦度制御手段を考慮し、幅方向5点で十分と判断している。

画像処理等を含む1画面の測定に要する時間は約0.1sである。計算結果は0.5sごとにCRTにPhoto. 3のごとく棒グラフ表示されるとともに、上位計算機に出力され平坦度制御に使用される。

CRTにはコイル先端からの平坦度不良位置、及び程度が順次展開図としても表示される。また1本のコイルの圧延が終わるとコイル先端部、中央部、尾端部での幅方向5点の伸び率指標平均値が折れ線表示され、必要に応じてハードコピーとして残せる。

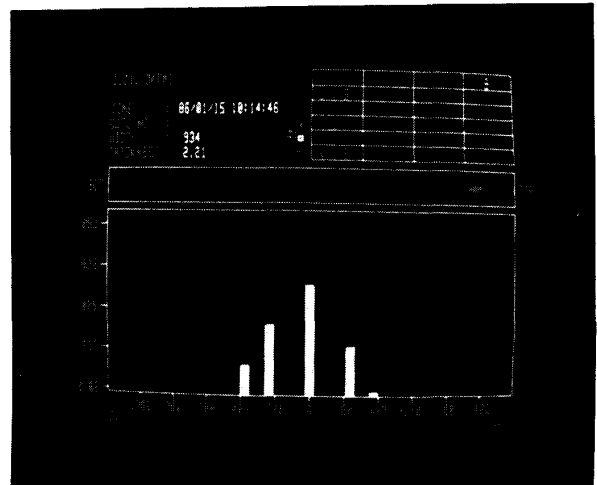


Photo. 3. Example of graphic CRT display.

5. 校正方法

この種のオンライン装置では、校正の容易さが実用性を大きく左右する。本装置は極めて簡単な校正方法を採用している。

5.1 オフライン校正

撮像倍率 α 、レーザー光の照射角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 、およびカメラ視野とレーザー走査ミラーとの位置関係を平坦な校正板を搬送ロール上に置いて測定する。これらの値の変化が精度に与える影響は小さく、かつ幅方向各点に対して同等なので頻繁に測定する必要はない。

5.2 オンライン校正

レーザー光基準位置 (Fig. 4 中の A_0, B_0, C_0) のずれは影響が大きく、ときどき校正が必要である。

鋼板がダウンコイラーに巻き取られ始め、鋼板に張力がかかった状態では鋼板を平坦とみなせるので、この状態でのレーザー輝線の平均位置を鋼板厚みの影響を補正して、基準位置として記憶する。この作業はモニター上のレーザー輝線を観察しながら行えるので、張力がかかった状態でも輝線が動くような平坦度の悪い鋼板で校正することはない。

また、校正時の鋼板が狭幅材でも、輝線像を多次数近似して外挿することにより、ライン全幅分の校正を可能にしている。

このように操業中でもきわめて簡単に校正を行える工夫を加えることにより、実用性の高い装置となった。

6. 試験結果

オンライン使用時の測定精度を検証する有効な手段がないので、オフラインで高さ測定精度を確認した。オン

ラインでは目視観察との対応, および, 形状制御操作との対応を調査した.

6.1 オフライン高さ測定精度

Fig. 7 に搬送ロールからの高さ測定精度を示す. 搬送ロール上の各レーザー照射位置に種々の厚みの平坦な板を置き, 板の厚みと測定結果を対比した結果 $\pm 1\text{ mm}$ の高さ測定精度を確認した.

6.2 オンライン形状対応テスト結果

Fig. 8(a) にオンラインでの, ある1本のレーザー光を用いた幅方向5点での高さ分布測定値の時間変化例を示す. この同じ測定での3本のレーザー光束を用いた伸び率指標測定値の時間変化を Fig. 8(b) に示す. Fig. 8

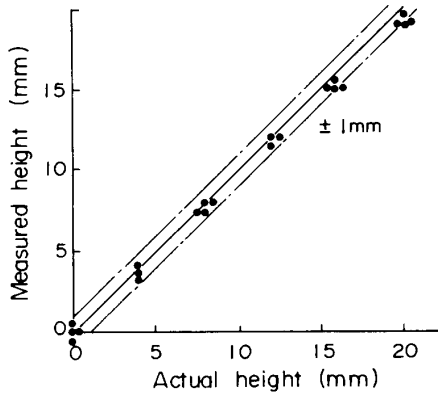


Fig. 7. Comparison between measured height and actual height.

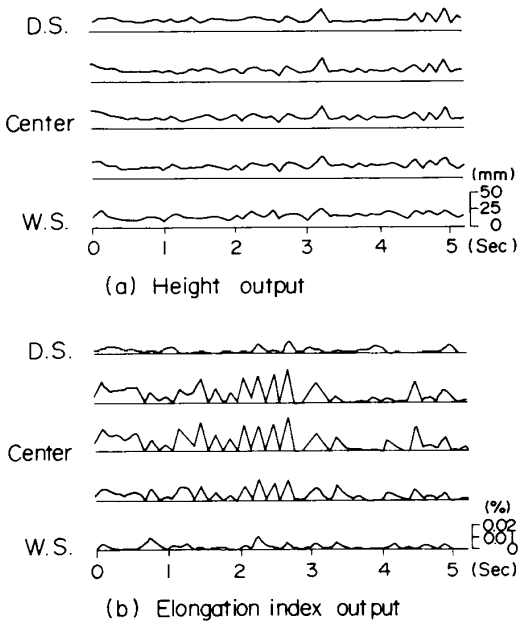


Fig. 8. Example of height output and elongation index output.

(a) は走行ばたつきの影響が大きく平坦度不良部位が分かりにくい, Fig. 8(b) では中伸びであることが明瞭に分かる.

筆者らのテストによれば, 幅方向高さ分布の時間変化だけで平坦度不良部位がわかる場合も多いが, 平坦度が悪い鋼板ほど, 走行ばたつきが大きい傾向にある. 従つて, ばたつきが大きく, 幅方向高さ分布の時間変化だけでは平坦度を測定できないような時こそ, 平坦度を測定して制御する必要性が高く, このような状況下で本方式が有効である.

Fig. 9 にミルオペレーターが目視観察により平坦度不良を大(L), 中(M), 小(S)に分類した結果と平坦度計出力との対応を示す. 平坦度不良程度, 部位ともに, 目視観察とほぼ対応している.

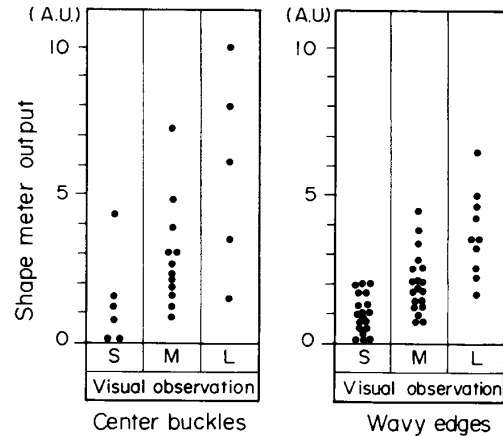


Fig. 9. Comparison of visual observation and shape meter output.

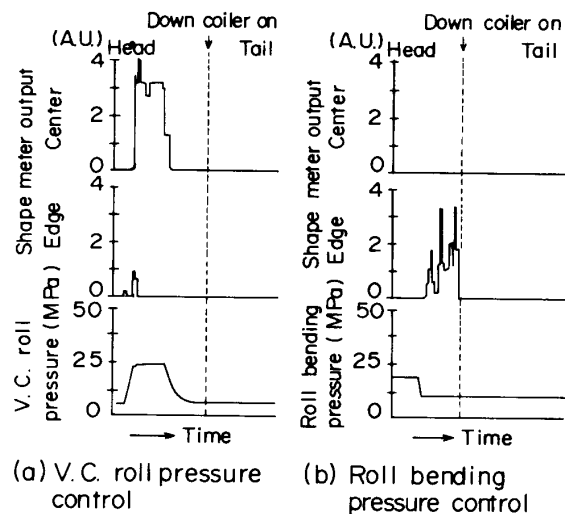


Fig. 10. Example of shape control.

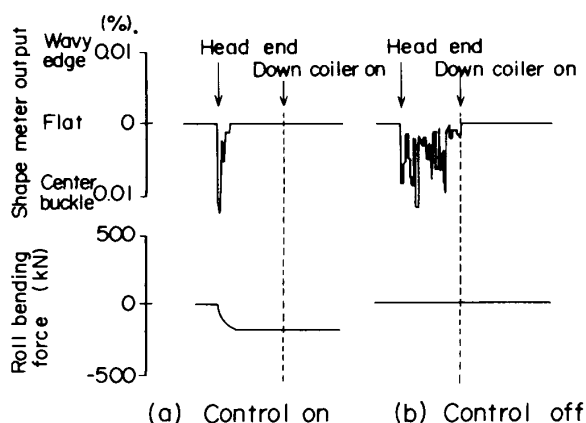


Fig. 11. Example of automatic shape control.

6.3 形状制御との対応

Fig. 10 に VC バックアップロールの VC 圧力またはワークロールベンダー圧を変更したときの平坦度計出力結果を示す。VC 圧力を上げると中伸びが測定され、下げると平坦となつている。またベンダー圧を下げるとエッジの平坦度不良発生が測定されており、それぞれの操作から予想される結果と良好に対応している。

7. 平坦度自動制御圧延結果

Fig. 11 に本平坦度計の測定結果を用いて自動で平坦度制御圧延を実施した例を示す。平坦度計の出力結果に基づき VC 圧が変更され鋼板がダウンコイラーに巻き取られ、張力がかかり始める以前に平坦な形状になっていることが分かる。

このように本平坦度計は平坦度の良好な鋼板製造に極めて有効であることを確認した。

平坦度の良い鋼板が常に次工程での圧延等で好都合とは限らないので、所定の平坦度不良を有した鋼板の製造が望まれることがある。このような目的にも、本装置が有効であることも確認済みである。

8. 結 言

熱延仕上圧延機出側で鋼板の平坦度を安定的に高精度で測定できる 3 光束光切断方式平坦度計の実用化に成功した。

本装置は下記の特徴を有する実用性の高い装置である。

(1) 3 光束を用いた光切断法により鋼板走行ばたつきの影響を受けることなく測定可能

(2) センサーとして TV カメラが使用されているので、鋼板幅変化に応じて機械的な動作を伴うことなく、柔軟に幅方向測定位置を変更できる。

(3) 操業中でも校正を簡単におこなえる。

(4) TV カメラ撮像方式であり、モニター画面の目視でも直感的に平坦度不良を判断可能

本装置は形状制御システムに不可欠なセンサーとして住友金属工業株式会社鹿島、和歌山両製鉄所の熱延工場 で 1986 年 1 月より実使用されている。

文 献

- 1) 布川 剛, 八木沢繁, 波床尚規, 山本章生, 山口耕毅, 高橋亮一, 江袋忠男: 鉄と鋼, 73 (1987), S373
- 2) 武田 英, 尾崎順三, 庄司和正, 三浦寛昭, 高橋亮一: 鉄と鋼, 72 (1986), S1223
- 3) 川口清彦, 稲田清崇, 川畑友明: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1078
- 4) K. MATSUI and H. TACHIBANA: Trans. Inst. Steel Ind. Jpn., 26 (1986), B-366
- 5) 吉田 博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 965
- 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) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 川崎製鉄技報, 10 (1978), p. 370
- 8) 杉山昌之, 高嶋和夫, 稲荷隆彦, 白石 彊, 植木勝也: 鉄と鋼, 70 (1984), S1105
- 9) R. PIRLET, J. MULDER, D. ADRIAENSEN and J. BOELENS: Iron and Steel Eng. (1983) July, p. 45
- 10) 河島貞夫, 鶴谷三郎, 平田 清, 田中英輔, 堀内健文, 辻 邦夫: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2239
- 11) 豊田利夫, 小笠原昭宣, 松原俊郎, 中村 覚: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 1071
- 12) 北村公一, 川島捷宏, 曾我 弘: 計測自動制御学会論文集, 19 (1983), p. 970