

© 1984 ISIJ

レーザスキャニング法による熱延鋼板の  
形状測定

技術報告

豊田 利夫\*・小笠原昭宣\*<sup>2</sup>・松原 俊郎\*<sup>2</sup>・中村 覚\*<sup>2</sup>

## Flatness Measurement of Hot Strip by Laser Scanning Method

Toshio TOYOTA, Akinobu OGASAWARA,  
Toshiro MATSUBARA and Satoru NAKAMURA

## Synopsis:

A new type of hot strip shape meter is developed to measure the flatness shape of hot strip at the exit of hot finishing mill with high accuracy and fast response time. This shape meter detects the strip vertical displacement distribution along transversal direction using laser beam, and measures the flatness shape from the variance of displacement. Laser beam from Ar laser is parallel scanned by high speed polygonal mirror and parabolic mirror, and irradiates the strip surface aslant. The strip displacement is measured by detecting the reflected light timing, with photo sensor arranged upper part of the strip. By sample test, it was confirmed that the accuracy of displacement sensing is within  $\pm 1$  mm. This shape meter was installed on the hot strip mill of Yawata Works in 1982 for practical use, and has been playing an important part in mill operation and in automatic shape control system.

## 1. 緒 言

熱延鋼板の形状（平担度）は、板厚・クラウンと共に極めて重要な品質項目であるが、さらに、安定な熱延操業を確保するためにも重要な管理項目となつている。形状不良が発生すると、ホットラン・テーブル上での通板性を著しく阻害したり、コイルの捲形状に悪影響を与えると共に、後工程での通板性、板形状を悪化させることとなる。また当然ながら形状不良は熱延コイルのユーザにとつても重大な問題である。

形状不良は、鋼板の幅方向における圧下率の不均一によつて発生するため、幅方向圧下率不均一が発生しやすい操業、例えば高圧下圧延、板クラウン制御圧延、大幅なサイズ変更、薄手材圧延、等の場合には本質的に形状不良が発生しやすいことになる。一方、最近の熱間圧延機は、幅方向の圧下率を自由に制御可能な機構を取り入れ形状及びクラウンを同時に操作可能とするようになってきた。このような背景のもとで、近年熱間圧延における形状・クラウン同時制御が重大関心事になつてきた<sup>1)2)</sup>。

形状測定装置として、これまでに ITV 法<sup>3)</sup> や水柱法<sup>4)</sup> が提案されているが、筆者らはより高性能な形状測定装置を目指して開発に取り組んできた結果、このたびレーザを使つた光学式の新しい形状測定装置の実用化に成功した。この新しい形状測定装置は、新日本製鉄八幡製鉄所の新熱延工場に実機として導入され、安定に稼動

中であり、形状不良の監視のみならず、形状・クラウンの同時制御用検出端として活用されている。

## 2. 熱延形状測定の各種方式

ホットランテーブル上の熱延鋼板は、先端がコイラに到達するまでは張力がほとんどないため、形状不良が顕在化している。巻き取り開始後は、張力によつて顕在化形状不良は小さくなり、板厚がごく薄い場合には完全に潜在化してしまう場合もある。潜在状態の形状不良を測定する方法はまだ考案されていない。今回筆者らが開発した方法も含めていずれも顕在状態にある形状不良を測定するものであり、張力の影響はゲインの補正で対応している。

顕在化している形状不良を測定する方法は、大きく3種の方式に分けられる。鋼板の傾きの幅方向分布を時系列的に測定する方式、鋼板の高さの幅方向分布を時系列的に測定する方式、ある面内の高さ分布を瞬時に測定する方式の3種である。

Fig. 1 は、第1の方式の1例である<sup>3)</sup>。鋼板を鏡と見なし棒状光源の虚像をテレビカメラで写し信号処理を行う。鋼板の傾きに比例して虚像の位置は鋼板長さ方向に移動する。このような原理に基づくため、傾きに影響のない板の上下動は測定誤差にならないという特徴があるが、正反射方式であるため鋼板表面性状の影響を受けやすい欠点があり、信号処理で像の最明点を検出するなど

昭和 58 年 12 月 1 日受付 (Received Dec. 1, 1983)

\* 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 工博 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

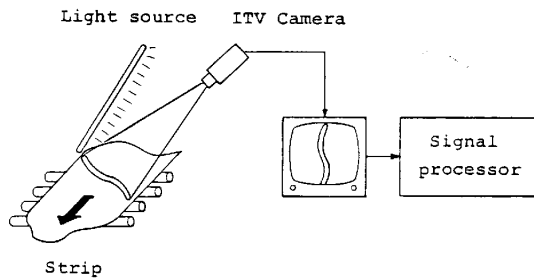


Fig. 1. Flatness measuring system with ITV camera.

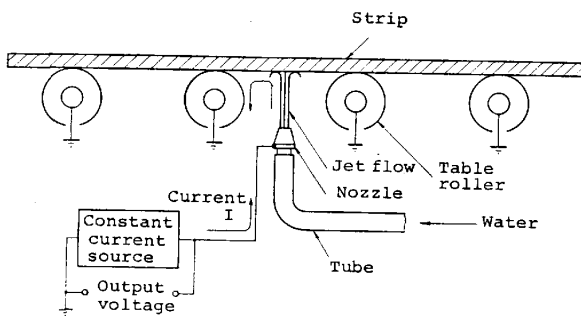


Fig. 2. Flatness measuring system with water jet flow.

のくふうを行つている。この方式ではまず急峻度が求まり、その積分として波高さが求まる。幅方向5チャンネルのものがある。

鋼板高さの幅方向分布を時系列的に求める第2の方式では、まず波高さを求めその微分の形で急峻度を求めることになるが、板の上下動の影響を完全に除去することは困難である。Fig. 2はこの方式の1例<sup>4)</sup>であり、水柱の電気抵抗により鋼板までの距離を求めている。幅方向3チャンネルのものができている。

ある面内の高さ分布を瞬時に求める第3の方式としては、モアレ縞を用いる方法<sup>5)</sup>や、それ以外にも変位計を2次元的に多数並べる方法が考えられる。この方式は、ばたつきのような時刻で変化する要因を含まない測定が可能であるという利点をもつが、測定面積・価格面・技術面で実用化に難点がある。

今回筆者らが開発したレーザスキャニング法は第2の方式の一種であるが、レーザビームを2分割することによりばたつきの影響除去と急峻度測定を同時に可能にした。さらに、乱反射受光方式であるため鋼板表面性状の影響を受けにくい、多チャンネル化が容易という特徴も有している。

### 3. 測定原理と装置構成

#### 3.1 変位測定原理

変位測定原理を Fig. 3 に示す。鋼板面に一定角度

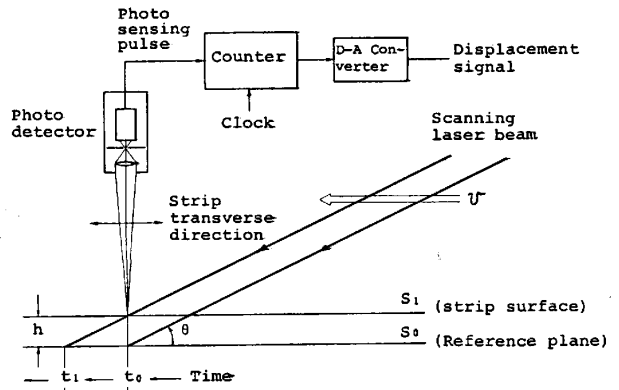


Fig. 3. Principle of displacement measurement by scanning laser beam.

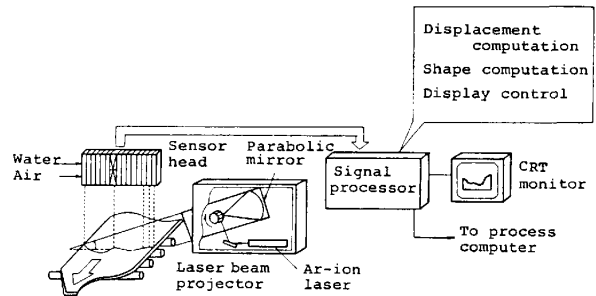


Fig. 4. Basic configuration of shape meter system.

( $\theta$ )、一定速度 ( $v$ ) で平行に走査するレーザビームと、板幅方向 (ビーム移動方向) に狭い視野を有する光検出器を図のごとく配置すると、光検出器の受光タイミングは鋼板の高さによって定まる。ある高さの鋼板面を基準面  $S_0$  とし、 $S_0$  より  $h$  だけ高い位置にある鋼板面を  $S_1$  とする時、 $S_1$  による反射光の受光タイミングと、 $S_0$  による反射光の受光タイミングとの時間差  $T$  を使って  $h$  は次式で表される。

$$h = T \cdot v \cdot \tan \theta$$

したがって、較正時に基準面による反射光の受光タイミングを記憶 (設定) しておくことにより、実際の鋼板面での受光タイミングを基準面からの鋼板変位に換算することが可能である。

#### 3.2 鋼板形状測定装置の構成

この変位測定原理を用いた熱延鋼板形状測定装置の基本構成を Fig. 4 に示す。投光器はアルゴンレーザを内蔵しており、回転多面鏡と放物面鏡の組み合わせにより平行走査レーザビームを作り出す。測定ヘッドは板幅方向に複数個並べた光検出器により構成されており、板幅方向の鋼板高さ分布を測定可能にしている。信号処理装置の機能は、変位変換処理と形状演算処理が主であるが、他に表示制御、プロセスコンピュータとのインター

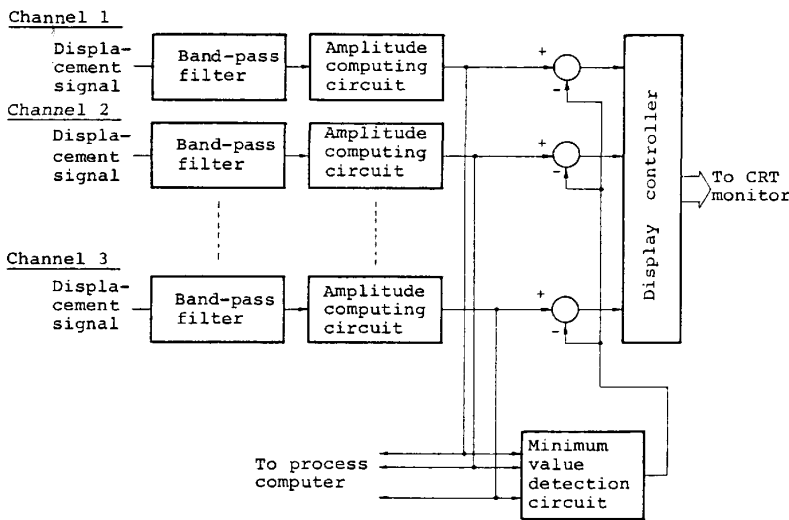


Fig. 5. Block diagram of strip shape computation processing and display control.

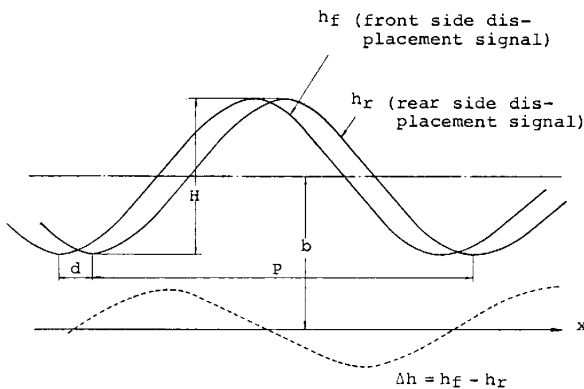


Fig. 6. Principle of steepness measurement.

フェース等が含まれる。変位変換処理は、前述のごとく受光タイミングから鋼板高さを求める処理であり、各光検出器ごとに行われる。形状演算処理は変位データをもとに鋼板の形状（波高値）を求める処理であり、具体的には各チャンネルごとに変位信号の中から形状ピッチに対応する周波数領域だけを取り出し、その振幅を求める処理である。このようにして求めた板幅方向振幅分布は鋼板の耳波、中のび等の平坦度形状をあらわすことになる。操業者用のモニタに表示する場合は、形状をわかりやすく強調するために、最低値が零になるようにして表示を行う。Fig. 5 に形状演算処理部及び表示制御部のブロック図を示す。

### 3.3 急峻度測定

前述の装置構成で得られる鋼板の幅方向変位振幅分布（波高値分布）により鋼板形状が表されるのであるが、この方法では次の2点が問題である。

- 1) 変位はばたつきを含んでいるため、形状だけを定量的に正しく表現していないおそれがある。
- 2) 形状の管理手段としてしばしば必要となる急峻度が得られない。

上記問題を解決するための1つの有効な手法として、コイル長さ方向に異なる2点で変位測定を行い、差を求める方法がある。ばたつきによる鋼板の動きは、平行な上下動に近いと考えられ、2点に共通の値となる。したがって、2点の変位の差信号は形状の成分のみを含むことになる。Fig. 6 は急峻度測定の原理を示している。板の形状を正弦波で近似して考えると以下の式が成り立つ。

$$h_f = \frac{H}{2} \sin \frac{2\pi x}{P} + b$$

$$h_r = \frac{H}{2} \sin \frac{2\pi(x-d)}{P} + b$$

$$\Delta h = h_f - h_r = H \sin \frac{\pi d}{P} \cos \frac{\pi(2x-d)}{P}$$

ここで式中の文字の意味は以下のとおりである。

$h_f$  : 前方の点で測定した板の変位

$h_r$  : 後方の点で測定した板の変位

$H$  : 板形状の全振幅

$P$  : 板形状のくり返し周期長さ

$x$  : 板長さ方向にとつた座標

$b$  : 板の上下動による変位

$d$  : 前方測定点と後方測定点との距離

以上の式からわかるように  $\Delta h$  の振幅  $|\Delta h|$  は  $H \sin \pi d/P$  であり、 $d \ll P$  であれば  $|\Delta h|$  と急峻度  $\lambda$  は次式で結びつけられる。

$$|\Delta h| = H\pi d/P = \lambda \cdot \pi d \quad (\lambda = H/P)$$

すなわち、2点の変位信号の差の振幅を演算することにより急峻度  $\lambda$  が求められる。

Fig. 7 は今回筆者らが製作した装置の構成図である。幅方向 15 チャンネルについて波高値を求めているが、そのうち 5 チャンネルについては急峻度も得られるようになっていいる。この装置は、当社八幡製鉄所の新熱延工

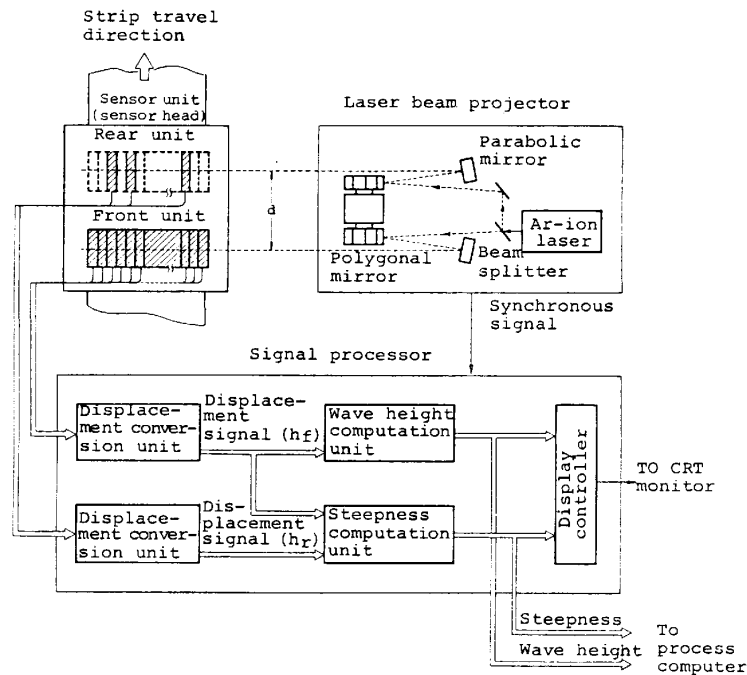


Fig. 7. Configuration of hot rolled strip shape meter.

Table 1. Specification of the shape meter.

Width of hot strips	550~1 550 mm
Line speed	10~20 m/s
Distance between sensor head and strips	1 600 mm
Displacement sensing range	0~200 mm
Output	Wave height (15 channels) Steepness (5 channels)
Number of sensor channels	Front 15 Rear 5
Sensor interval	110 mm (Front)
Laser	Ar-ion Laser ( $\lambda=4880 \text{ \AA}$ )
Beam diameter	about 1 mm
Scanning time	1.4 ms
Polygonal mirror	12 planes 3 600 rpm
Photo detector	Photomultiplier Tube

場に仕上げ圧延機の後方約 10メートルの位置に設置された。Table 1 に本装置の主要諸元を、Photo. 1 に本装置の投受光部の外観を示す。

#### 4. 試験結果

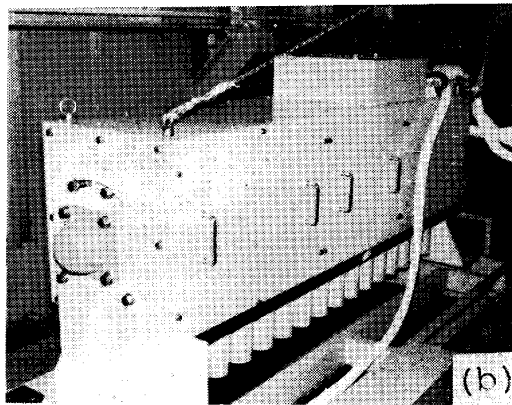
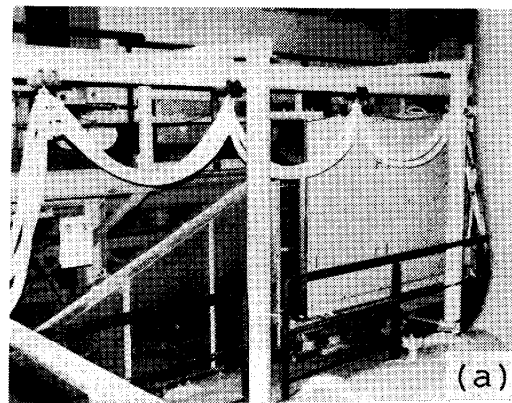
##### 4.1 変位測定精度試験

変位測定性能は、ライン休止時に全チャンネルにまたがる基準平板を上下に精密に移動させて確認した。本装置ではスキャニング速度の非線形性の補正も行っており、全チャンネルとも全測定範囲にわたって  $\pm 1 \text{ mm}$  以内の変位測定精度が確認された。Fig. 8 に測定誤差をプロットした例を示す。

##### 4.2 形状対応試験結果

Fig. 9 は操業で故意に形状不良を発生させた時の測定チャートの例である。横軸は時間であり、縦軸は波高値データである。この例では、4, 6, 8, 10, 12 の計 5チャンネルの波高値データを記録しているが、4チャンネル

がワークサイド (WS) に、12チャンネルがドライブサイド (DS) に対応しており、8チャンネルはほぼ幅方向中央部 (C) に対応している。形状不良の内容に応じて波高値の幅方向分布が変化していることがわかる。こ



(a) Laser beam projector (b) Sensor head  
Photo. 1. Photograph of shape meter head.

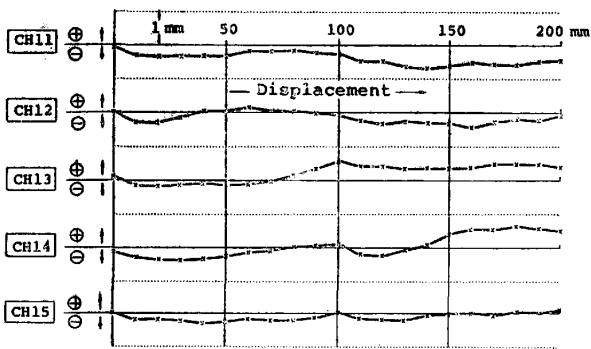
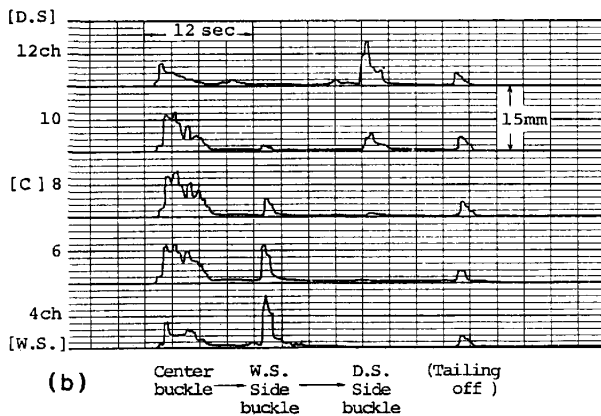
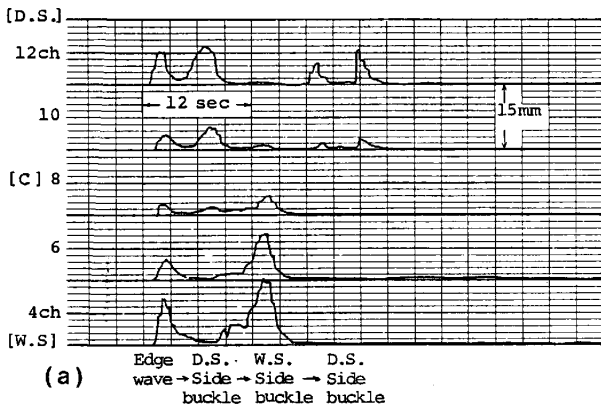


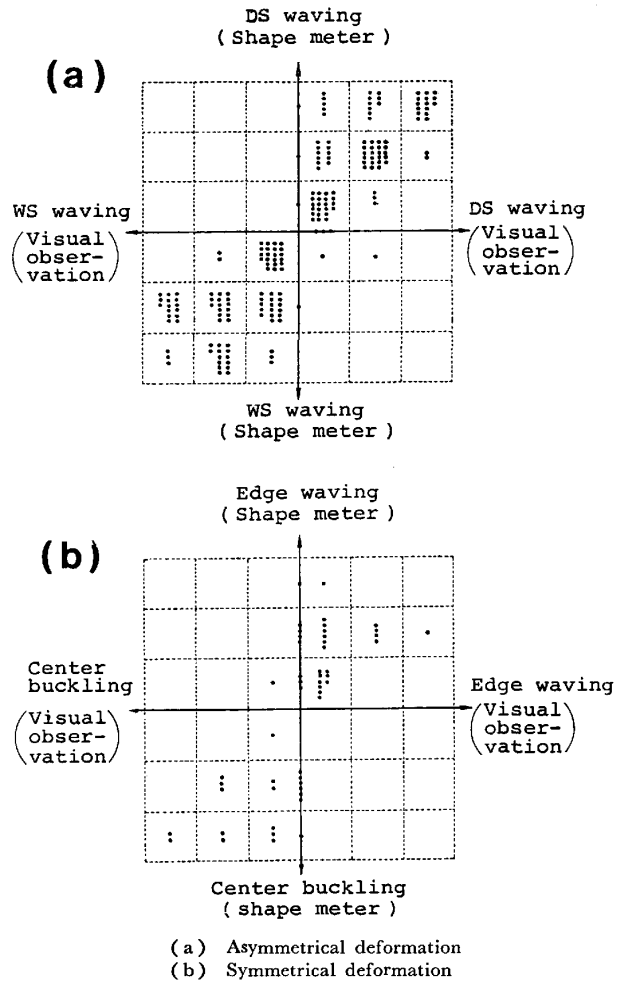
Fig. 8. Examples of linearity and error.



Strip size (thickness×width)  
 (a) 2.7mm×1061mm (b) 2.5mm×1012mm  
 Fig. 9. Examples of recording chart (wave height).

の例では、コイラに巻きついた後(先頭より約5s以降)も形状不良が顕在化している。

Fig. 10 は本装置による波高値の測定結果と、操業者による熱間目視判定結果との対応をプロットしたものである。横軸は目視判定結果、縦軸は本装置の測定結果であり、それぞれ大、中、小の3ランクに分類している。図中の各点が1つの対応を表しており、1コイル中で数点、合計81コイルについて対応を調査したものである。(a)は非対称な形状不良(片のび)についてを、



(a) Asymmetrical deformation  
 (b) Symmetrical deformation  
 Fig. 10. Comparison of visual observation and shape meter output.

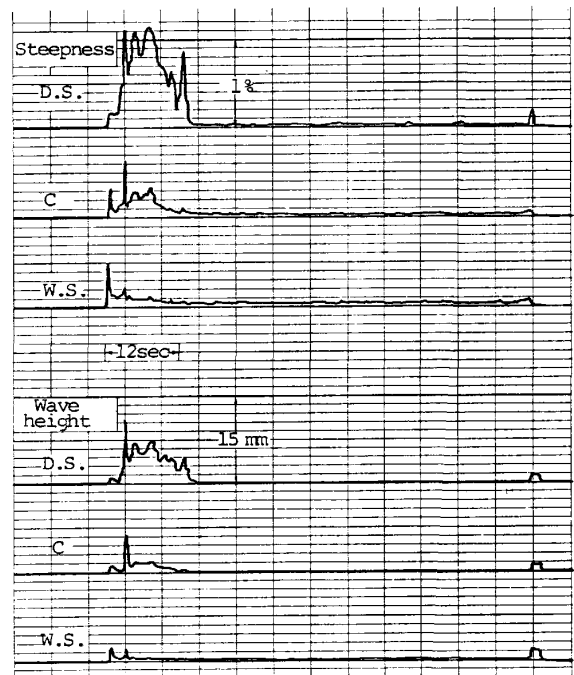


Fig. 11. Comparison of wave height output and steepness output.

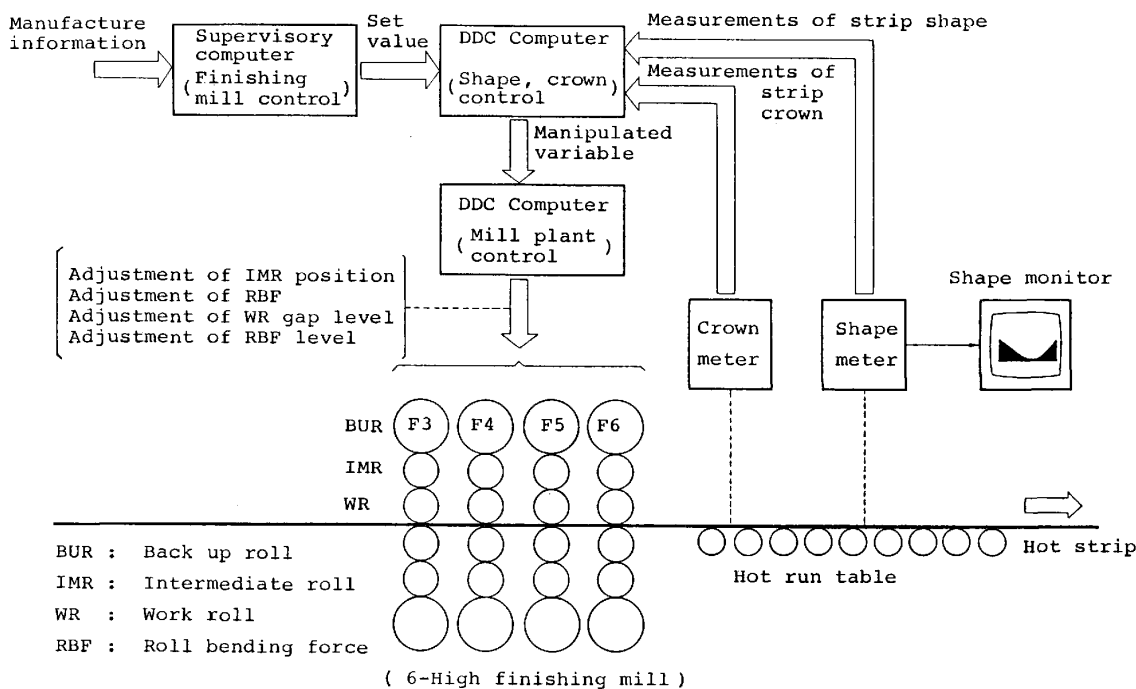
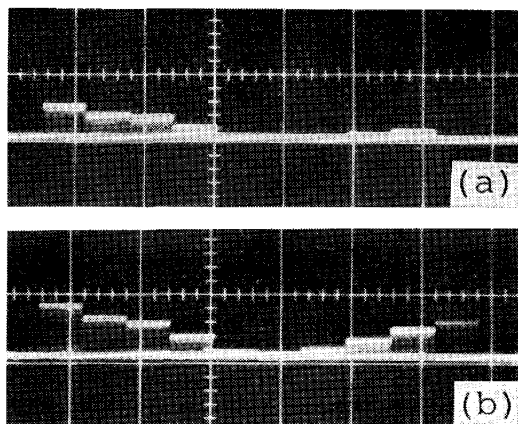


Fig. 12. Block diagram of shape, crown control system.



(a) Side buckle (b) Edge waves  
Photo. 2. CRT monitor display examples.

(b)は対称な形状不良(中のび, 両耳波)についてを整理したものである。本図からわかるように, 操業者の熱問目視判定と本装置の測定結果とは良く対応がとれている。

4.3 急峻度測定結果

Fig. 11 は, 急峻度と波高値を同時に測定したデータである。ドライブサイド, 中央部, ワークサイドの3カ所について記録したものであるが, この例でもわかるように急峻度と波高値は非常に似た挙動を示しており, したがって急峻度測定結果も操業者の目視判定結果と良く対応がとれている。定量的な正しさという面では, 前に述べたように板のばたつきの影響を除去できるという点から急峻度の方がすぐれているはずであるが, オンライン

ンでの検証は非常に困難であり, 現在のところでは急峻度の方がすぐれているという明確なデータはまだ得られていない。

5. 使用状況

本装置は, 新熱延工場に設置して以来各種のテストを繰り返した後, 1982年8月より操業への使用を開始した。最大の心配であった鋼板上の水及び上空の水滴の悪影響は, 水ジェット及びエアページにより完全に解決できた。また, 鋼板表面の反射率, 粗度等により変化する受光信号の大きさは, レーザパワーを0.3W~1.0Wの範囲でコントロールすることにより全く問題のない変動幅内におさめることができた。

その他, 鋼板の表面温度に関しては, 通常の操業条件である800~1000°Cの範囲では全く問題なく測定可能であること, 張力の影響については極薄物以外は鋼板がコイラに巻きついた後でも通常は形状が顕在化しているので適正なゲイン補正を行えば測定可能であることが確認された。

本装置からの出力は, 操業者に対してCRTモニタに表示されると同時に上位計算機による形状制御<sup>6)</sup>に使用される。Photo. 2はCRTモニタの表示例である。Fig. 12に形状制御システムの全体図を示す。形状制御はクラウン制御と同時に行う必要があり, DDCコンピュータがその役割を果たしている。このコンピュータは, 形状制御に関して以下の機能を有している。

1) 形状測定装置各チャンネルからの波高値及び急峻度のデータを2sごとに読み込む。

2) 形状測定装置から別途出力される板の有無信号を取り込み、板幅を外れているチャンネルのデータを除く。

3) 鋼板がコイラに到達する前であるか、到達後であるかを判断して形状測定装置からの出力に対するゲインを変え、張力の影響を補正する。

4) 制御モデルにもとづいた制御演算を行い、仕上げ圧延機のベンディングコントロール等について、下位のDDCコンピュータに対して指令を出す。

この形状制御システムは、現在操業上非常に重要な役割を果たしている。

熱延鋼板の形状は、仕上げ圧延機直後の熱間状態と巻き取り冷却後の冷間状態とで必ずしも一致しない面があり<sup>7)</sup>、本形状制御システムも単独で十分な効果を果たすことはむずかしく、他の要因まで含めた操業管理が必要である。

## 6. 結 言

熱間仕上げ圧延機出側における鋼板の平坦度形状を高精度、高速かつ安定的に測定可能なレーザ・スキャニング方式形状検出装置を開発し、実用化に成功した。本装置について以下のような性能・特徴が明らかとなった。

1) 鋼板の表面性状、水滴、水蒸気の影響はレーザパワーコントロール、水ジェット、エアページにより除去でき、安定的に測定可能となる。

2) 変位測定精度は基準平板テストの結果、 $\pm 1\text{ mm}$

以内である。

3) 幅方向15チャンネルの波高値、5チャンネルの急峻度が同時に2sごとに得られる。

4) 測定データと目視による形状判定結果は良く対応している。

以上のように、本開発による形状測定装置は目的とした優れた特性を有していることが確認された。現在、世界初の形状制御システムの一部として重要な役割を果たしている。今後の熱延操業にとつては不可欠の計測機器になるものと確信している。最後に、本開発にあたって御協力いただいた関係諸氏に対し厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 田中 晃, 小川 茂, 米田 年, 田中正二, 藪田俊樹, 浜渦修一, 菊間敏夫: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1125
- 2) 川並高雄, 松本絃美: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 348
- 3) 岩脇 章, 柴田秀夫, 江森 隆, 有水満郎, 武田忠男, 田藤誠則, 寺川雅智, 福島賢也, 米本哲之助: 金属, 43 (1973) 12, p. 38
- 4) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 川崎製鉄技報, 10 (1978), p. 370
- 5) 北村公一, 浜田直也, 川島捷宏, 曾我 弘, 上野学, 大坪 誠: 第22回SICE学術講演会予稿集 (1983), p. 213
- 6) 小笠原昭宣, 大島有三, 米田 年, 福重義和, 久保利吉, 藪田俊樹, 田中正二, 藤田紀久, 菊間敏夫, 三原 誠, 高橋英雄: 鉄と鋼, 69 (1983), S 1087
- 7) 吉田 博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 965