

# レーザーモアレ法による厚板平坦度計の開発

松尾 次郎\*・村松 匠\*・松實 敏幸\*・川上 耕有\*・金山 勇人\*

Development of a Plate Flatness Meter Based on Laser Moiré Method

Jiro MATSUO, Takumi MURAMATSU, Toshiyuki MATSUMI, Takaaki KAWAKAMI and Hayato KANAYAMA

**Synopsis :** A plate flatness meter based on the laser moiré method has been developed. A large grating is installed above a plate transfer line, a laser beam is directed through a concave lens onto the plate on the transfer line. Moiré fringes that conform to the surface profile of the plate are formed on the plate. The flatness of the plate as it is transferred can be measured to a high accuracy of  $\pm 1.0\text{mm}(2\sigma)$ .

**Key words :** laser ; moiré fringes ; image processing ; flatness meter ; moiré topography ; shape memory alloy ; plate.

## 1. はじめに

近年、需要家におけるコスト削減のための矯正作業の中止、自動溶接機の導入等により、厚板に対する平坦度の要求がますます厳格化している。例えば、橋梁材においては、全面1500mmの範囲で波高さすなわち凹凸が2mm以下の要求がでてきている。

これに対して、このクラスの平坦度を測定できる実機化された平坦度計はなく、ストレッチャーと呼ばれる長さ2m程の定規状の基準板とすきまゲージを使った検査員によるストレッチャー作業で行わなければならない。ストレッチャー作業は鋼板を静止させ全面測定するため、多くの時間を必要とする。そのため、生産能力との兼ね合いから検査員のストレッチャー作業による品質保証には限界がある。

したがって、オンライン高精度平坦度計の開発が急務となり、北村<sup>1)</sup>らにより基礎開発のなされたレーザーモアレ法による厚板平坦度計の開発に取り組んだ。

今回ここにその概要を報告する。

## 2. モアレ式厚板平坦度計

### 2.1 モアレ法による形状測定原理

測定原理はモアレトポグラフィである。モアレトポグラフィ計測法を大別すると高崎<sup>2)</sup>による格子照射法と鈴木<sup>3)</sup>らによる格子投影法がある。格子投影法はレンズ系を用いて小型の格子を拡大して投影するため測定物体の大きさや位置に対する制約が小さく適用範囲も広いが、小さな格子の平面度と平行度に高い精度が要求され、振動の大きい工場では維持が難しく、精度の面から格子照射法を採用した。Fig. 1に格子照射型モアレトポグラフィの原理図を示す。

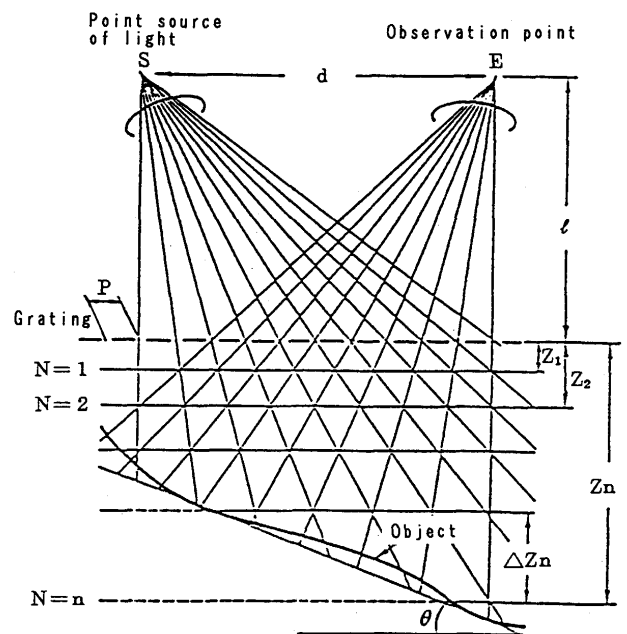


Fig. 1. Principle of moiré topography.

Fig. 1において、観測点Eから測定対象を見るときに測定対象表面が明るく見える場所とは、Sを中心とする放射線群(透過光)とEを中心とする放射線群(反射光)の交点である。Fig. 1よりわかるように、交点は格子面から等距離のところに行ける。実際には格子ピッチPが小さいので交点は横に連続的に見え、測定対象においては $Z=Z_1, Z_2, \dots$ の平面で切り口にあるところが明るくなり、それらの中間のところは暗くなる。すなわち、等高線が得られるわけである。図中Nは縞次数と呼ばれ、格子面からの切断面の順番を示す。縞次数 $N=n$ の深さ $Z_n$ と、その近傍での等高線分解能 $\Delta Z_n$ は次式で得られる。

$$Z_n = n \cdot P \cdot \ell / (d - nP) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta Z_n \cong P \cdot (Z_n + \ell)^2 / d\ell \dots\dots\dots (2)$$

ここでPは格子のピッチ,  $\ell$ は格子面から観察点までの距離, dは点光源と観察点の距離を示す。

モアレトポグラフィでは, 物体表面上に等高線群を現出させるため, 等高線の相対的な高さいわゆる凹凸がわからず, 種々の工夫が考案されている。本装置では搬送ロール平面と光切断面群の相対的な角度を, 厚板形状の最大傾斜角より大きく傾けて設定することにより凹凸判定なく, 一意的に縞次数を指定する方法 (以下単に傾斜モアレ法という) を採用した。

2・2 厚板平坦度計のシステム構成

Fig. 2に本システム構成を示す。衝突防止の点から, 格子面と搬送ロール面の距離 (リフトオフ) を500mmとするため, 光源は直進性の良い, レーザーを採用した (ハロゲンランプ等の通常光源では, リフトオフを200mm以上とすると, コントラストのあるモアレ縞は得られなかった)。このレーザービームを, ビームエキスパンダ, 凹レンズを通して大型格子に照射している。

Fig. 3に投光系構成図を示す。

Table 1に光学系の主仕様を示す。

2・3 大型格子の構造

このモアレ格子は有効面 (2000mm×5000mm) が比較的大型であると同時に, 格子自体の平坦度が測定誤差に与える影響が大きいため, 構造面でいくつかの工夫が必要となる。なかでも, コントラストよく分解能の高いモアレ縞画像を得るためには, 大型格子面の機械精度をできるだけ高める必要がある。それには格子の構造設計と製作加工との

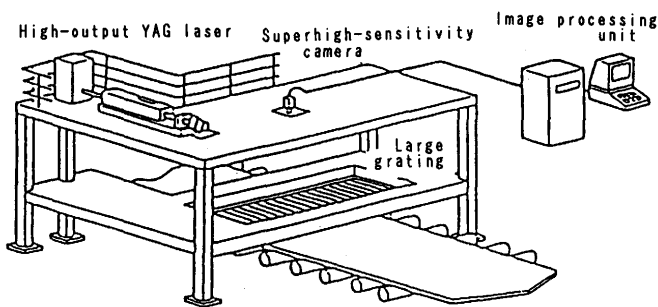


Fig. 2. Configuration of plate flatness meter system.

Table 1. Main specifications of optical system.

Classification	Item	Specification of performance
Large grating	Effective area	5m (transverse direction) × 2m (longitudinal direction)
	Grating pitch	1.5mm
	Tension mechanism	Tension mechanism using Ni-Ti shape memory alloy
Light source	Type	YAG laser (Q-switched)
	Wavelength	532nm
	Output	450 mJ/pulse
Imaging system	Type	Superhigh-sensitivity camera
	Image tube	SIT tube
Optical conditions	resolution	2.5mm ( $\Delta z$ )
	Inclination of sections	1.0°

両面での精度保証が重要となるが, ここでは格子面を形成している鋼線の張力に起因する設計面での諸課題について述べる。

2・3・1 格子用鋼線の張力機構

モアレ格子をFig. 4に示す。四周を取り囲むフレームに格子を支持させる構造となっており, 下方を通過する鋼板に中央の格子を通してレーザー光が照射し平坦度が測定される。

格子面は直径0.5mmのバネ用ステンレス鋼線に黒色塗装したものを1.5mmピッチの等間隔に3334本張り, その自重によるたわみを極力少なくするよう1本あたり130Nの張力が常時かけられている。Fig. 4は全体を下方より見たものであるが, フレームにレベル調整用ブロックで支持されたネジを設置し, その谷に一本一本の鋼線を通してある。その時の鋼線のたわみは懸垂線を描き, 支持スパンが2mで前記の径の線を使用する場合最大たわみ量で60 $\mu$ m程度となる。これは今回設計しようとした精度に対してほぼ望ましいレベルに抑えた値といえることができる。しかし, 多数の線を使用することから, 近接する各々の線の張力発生機構部の互いの干渉が設計上の問題であり, 機器全体を構成するにはコンパクト化の実現が重要な課題となる。

通常, 張力の発生にはバネを採用することが多い。バネは形状がシンプルであり発生する力の設計も易しく, 同時に, 経済性という実用上最も重要な利点を有するので, あらゆる分野で広く用いられる機械要素であり選択の幅も大きい。しかし, 今回の格子にまず必要とされるのは, 張力発生部での体積あたりの出力が高い要素である。例えばコ

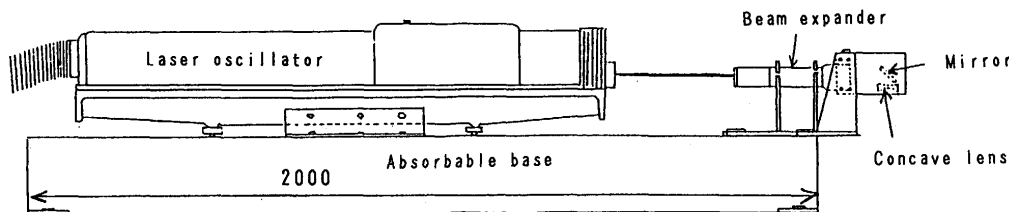


Fig. 3. Configuration of light source system.

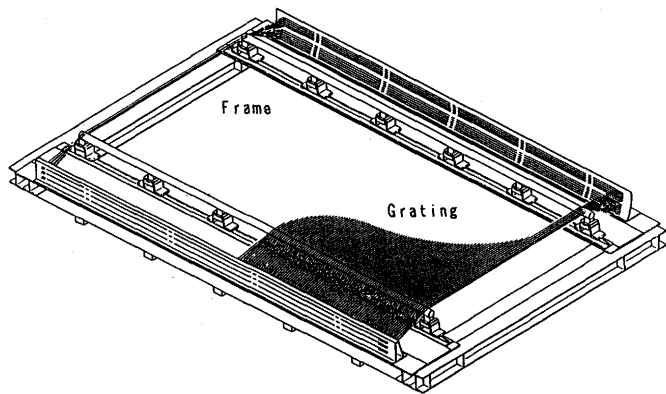


Fig. 4. Moiré grating.

イルバネのように空間占有率の高い要素は配置設計が非常に難しい。この点からわれわれは形状記憶合金に着目して、それを張力機構に取り込む検討を開始した。

一般的に、形状記憶合金は体積効率がよく動作速度の速いアクチュエータとして考えられているが、高荷重下で長時間連続して使用することはMs点のような特性値が時間とともに変化する時効効果についての問題等を生ずる可能性が高い。そこで形状記憶合金はアクチュエータとしての設計に必要な弾性定数、引張強さについての機械的物性がよく測定されているTi-Ni合金を使用した。さらに形状記憶合金の効果による張力の発生は、ステンレス鋼線が所定のたわみ量以下になるためには初期設定時に鋼線1本あたり320Nの張力を発生し、11mmの伸びを吸収する必要があるが、これと使用時の温度変化によるたるみの修正だけに限定して連続的な荷重をかけないようにした。

張力発生部の機構をFig. 5に示す。1本の形状記憶合金は6本のステンレス鋼線を引っ張り、鋼線はそれぞれがネジのピッチの間隔に保たれている。ネジは5mを超える長尺ネジとなるため分割して製作され連結して使用しているが、

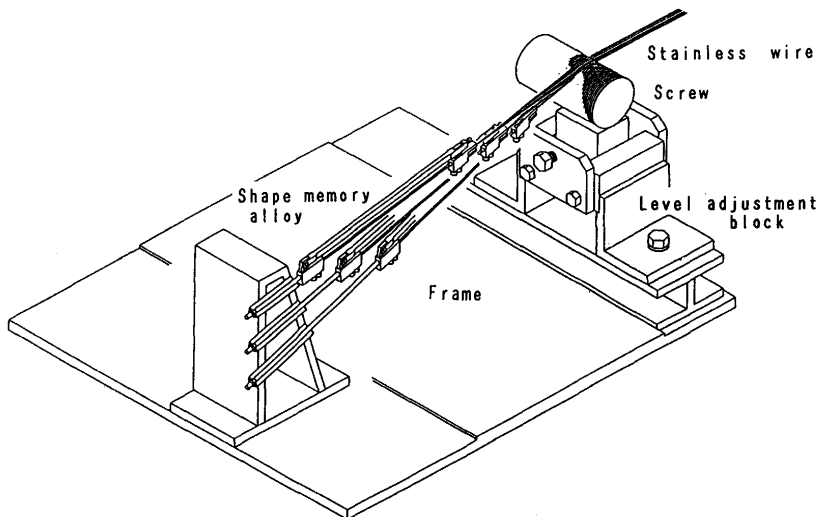


Fig. 5. Tension mechanism.

連結部のレベル調整用ブロックで高さ調整している。

形状記憶合金の直径は2mmであり、作動力で1900Nのものを使用した。それを直線の状態に熱処理し、その後ステンレス鋼線の張力による伸び代分だけを伸線加工して張力発生部に組み込んだ。鋼線の初期張力の設定時には、まず鋼線をほぼ無張力の状態で張力発生機構部につなぎ、その後形状記憶合金の作動温度まで加熱して合金を収縮させることで必要張力の設定をした。通常、設定後は固定レバーで止めておく構造としたが、温度変化の激しい使用環境、例えば熱間用の用途などでは形状記憶合金を拘束しないまま加熱・冷却することで張力の制御を行ってもよい。

今回、以上のような設計で格子を製作したが、全ステンレス鋼線にわたり、ばらつきが少なく安定した張力を持つ格子を完成させることができた。その結果、2000mm×5000mmの画面内に均一で鮮明なモアレ像が得られている。

### 2.3.2 格子の平面度

鋼線の自重たわみ以外に格子の平面度誤差となる要因は次のようなものがあげられる。

- 1) 張力によるフレームおよびネジのたわみ
- 2) 温度変化による伸びおよび変形
- 3) 製作誤差・組立誤差・据え付け誤差

これらに対しては、有限要素法によるフレーム変形の解析、温度均一化のための冷却ノズルの設置等を実施して格子の平面度は200 $\mu$ m以下の値が得られた。

Fig. 6に波高さ4mm程度の厚板鋼板(板幅2400mm)のモアレ縞原画像を示す。

### 2.4 画像処理による自動形状復元技術

モアレ縞から形状を復元する方法は、大きく2つに分けられる。

ひとつは、モアレ縞が等高線であることを利用してモアレ縞の光量の極大点(以下、尾根線と呼ぶ)の形状を求める方法。

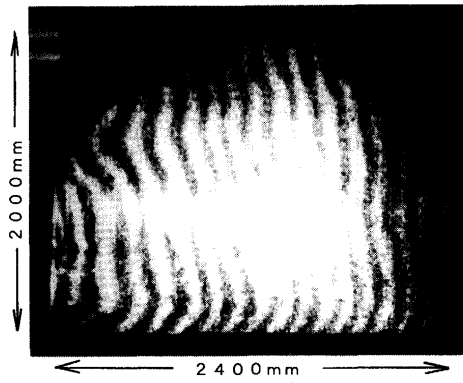


Fig. 6. Original image of moiré fringes.

もうひとつは、モアレ縞光量分布を周波数分析することにより、より高精度に形状を求める方法である。

2.4.1 尾根線追跡法

傾斜モアレ画像から計算機処理により自動的に形状を求めるには、次の2点が重要となる。

- ①モアレ縞の光量分布の極大点を正しく求める。
- ②求めた光量分布の極大点が左から何本目の縞に属するかを決める。

前者については、光学配置からモアレ縞は縦縞となるため、板幅方向に数値的に光量の極大点を求めていけば得られる。Fig. 7 (a)に得られた光量分布の極大点を示す。後者については、単に左から数えるだけではノイズにより誤認識する。モアレ縞のように曲線群の認識は、画像処理技術の中でも、高度な研究分野である。われわれはこの課題に対して、光量分布の極大点の集合（以下、尾根線と呼ぶ）

を追跡することによりノイズに強い曲線群の認識を可能にした。Fig. 7 (b)に尾根線追跡結果、Fig. 7 (c)に等高線(等高線間隔 1 mm)による形状復元結果を示す。

2.4.2 フーリエ変換法

光干渉計測技術の分野で、武田<sup>4)</sup>により高精度が得られる手法としてフーリエ変換法が考案された。ここでは概略を述べる。

傾斜モアレ縞画像の観測面上に現れるモアレ縞の光量分布  $g(x)$  は次式で与えられる。

$$g(x) = a(x) + b(x) \cos(2\pi f_0 \cdot x + 2\pi/\Delta Z \cdot h(x)) \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$a(x), b(x)$  : 光量むら等により生じる未知光量分布  
 $2\pi f_0 \cdot x$  : 傾斜成分 ( $f_0$  は縞の本数に対応するキャリア周波数)

$\Delta Z$  : 等高線分解能

$h(x)$  : 観測面形状

である。便宜上新たに位相  $\phi(x)$  を次式で定義する。

$$\phi(x) \triangleq 2\pi/\Delta Z \cdot h(x) \dots\dots\dots (4)$$

フーリエ変換法は、モアレ縞成分と光量むら成分 ( $a(x)$  と  $b(x)$ ) の周波数域が違うことを利用して、フーリエ変換後直流近辺をカットし、形状に起因するモアレ縞成分のみを抽出し、それから形状を求める方法である。

式(4)を書き直すと次式になる。

$$g(x) = a(x) + b(x) \cos(2\pi f_0 \cdot x + \phi(x)) \dots\dots\dots (5)$$

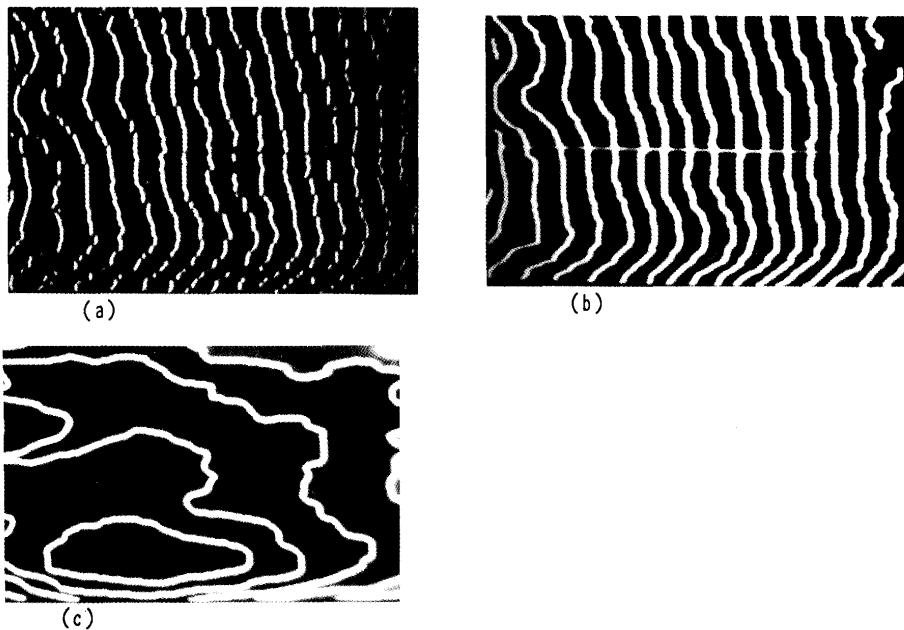


Fig. 7. Ridge line tracing method.  
 (a)Maximum points in light quantity distribution.  
 (b)Results of moiré fringe recognition.  
 (c)Results of shape reconstruction(contour line representation).

以下、式(5)より位相  $\phi(x)$  を求める方法を考える。

$$c(x) \triangleq 1/2b(x) \cdot \exp(j\phi(x)) \dots\dots\dots(6)$$

と置けば、

$$g(x) = a(x) + c(x) \cdot \exp(j2\pi f_0 \cdot x) + c(x)^* \cdot \exp(j2\pi f_0 \cdot x) \dots\dots\dots(7)$$

となる。ここで\*は複素共役を表す。式(7)をフーリエ変換すると次式を得る。

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cdot \exp(-j\omega x) dx = A(\omega) + C(\omega - 2\pi f_0) + C^*(\omega - 2\pi f_0) \dots\dots\dots(8)$$

ここで、大文字は変数  $x$  に関する空間周波数スペクトルを表す。キャリア空間周波数  $f_0$  による変化の速さに比べて、 $a(x)$ ,  $b(x)$  の変化は非常にゆるやかであり、 $\phi(x)$  の変化も同じくゆるやかである。したがって、(8)式の三つのスペクトルはキャリア周波数  $f_0$  により完全に分離される。

そこで、正のキャリア周波数  $f_0$  に乗っている信号のスペクトル  $C(\omega - 2\pi f_0)$  のみを取り出し、それを  $f_0$  だけ原点にむけてシフトして  $C(\omega)$  を得る。

こうして得られた  $C(\omega)$  を  $\omega$  を変数としてフーリエ逆変換することにより(6)式の  $c(x)$  が求まる。

$$\phi(x) = \tan^{-1}(\text{Im}[c(x)]/\text{Re}[c(x)]) \dots\dots\dots(9)$$

より、外乱項  $b(x)$  を分離した位相  $\phi(x)$  を求めることができ



Fig. 8. Results of phase  $\phi(x)$  calculation.

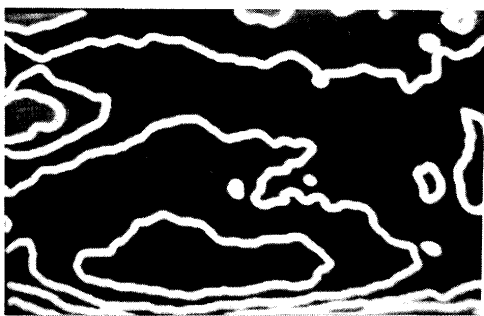


Fig. 9. Results of shape reconstruction(contour line representation).

る。Fig. 6 の原画像をフーリエ変換法にて求めた位相  $\phi(x)$  を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は黒が  $-\pi$  で、白が  $+\pi$  を示す。位相  $\phi(x)$  は式(4)で定義したように形状  $h(x)$  に比例する量であるが、式(9)で計算できる  $\phi(x)$  は  $-\pi$  から  $+\pi$  までの値しか求まらない。すなわち形状  $h(x)$  が小さくなるにつれて位相  $\phi(x)$  も小さくなるが  $-\pi$  を超えた点で  $+\pi$  へ値が飛び現象が生じる。そこでこの  $2\pi$  飛びの補正を行い位相  $\phi(x)$  を連続値に直し、式(4)より形状  $h(x)$  が求まる。Fig. 9 に形状復元結果を等高線表示(等高線間隔 1 mm)で示す。

2.4.3 両者の比較

モアレ縞画像処理の自動化が難しい理由は、縞の認識の曖昧さである。曲線群の認識という曖昧さがある尾根線追跡法にくらべ、フーリエ変換法は曖昧さが少ないため、安定した結果が得られる。さらに、尾根線追跡法は光量の極大点位置のみの高さしか求まらず計測形状が折れ線近似となるのに対して、フーリエ変換法は連続量として形状が求まり高精度が得られる。そこで最終的にフーリエ変換法を採用した。

2.4.4 形状の接続

大型格子は長手方向 2 m なので、一度に鋼板全長のモアレ縞を得ることはできない。そこで長手方向に 0.5 m ずつラップさせ画像を取り込み、各画像で形状復元した後、それらの形状を接続し、一枚の鋼板全長の形状を求めている。

理想的には、ラップ部において前の画面の後端部と後ろの画面の先端部のモアレ縞は一致しなければならない。しかし実際には、搬送による鋼板のわずかな変形等により完全には一致しない。

そこで、Fig. 10 で示すようにラップ部での推定形状は重み関数の導入により次式(10)で接続する。

$$f(x) = f_1(x_0) + \int_{x_0}^x \left[ \frac{df_1}{dx} \cdot \omega_1 + \frac{df_2}{dx} \cdot \omega_2 \right] dx \dots\dots\dots(10)$$

Fig. 11 に幅 2.0 m × 長さ 4.5 m (波高さ 10 mm) の鋼板のモアレ縞推移と、Fig. 12 に形状の接続結果を示す。Fig. 12 は接続結果を分かりやすくするため、縞の位相で表わしている。

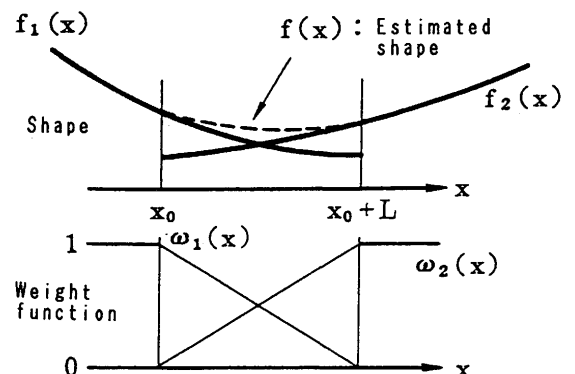


Fig. 10. Shape connection by weight function.

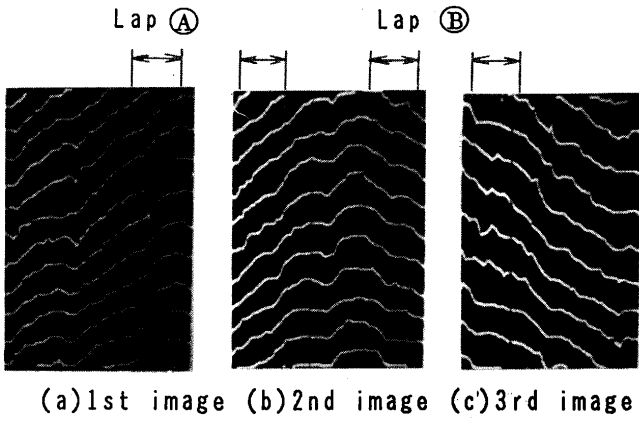


Fig. 11. Example of change in moiré fringes.

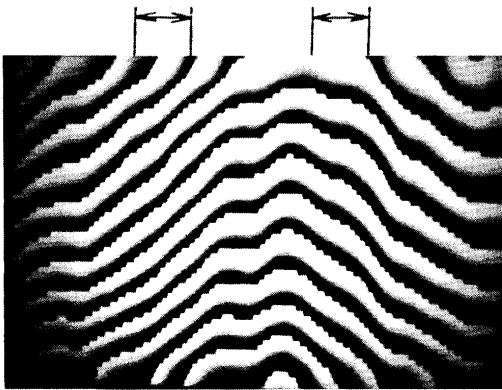


Fig. 12. Results of shape connection.

2・5 総合計測精度

2・5・1 搬送設備の検討

走間における鋼板の形状を求める場合、搬送による鋼板の振動変形がそのまま誤差となる。総合精度 $\pm 1.0\text{mm}$ の目標を達成するために、搬送による振動変化が $\pm 0.5\text{mm}$ 以下となる搬送設備の試験を実施した。搬送設備は処理時間と費用の面からFig.13に示す稠密ロール方式を採用した。稠密ロールの効果を確認するために、A, a=鋼板先端幅エッジ部, B, b=鋼板先端幅中央部, C, c=鋼板中央幅エッジ部,

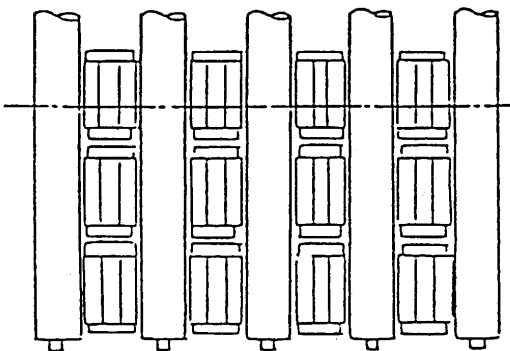


Fig. 13. Transfer equipment.

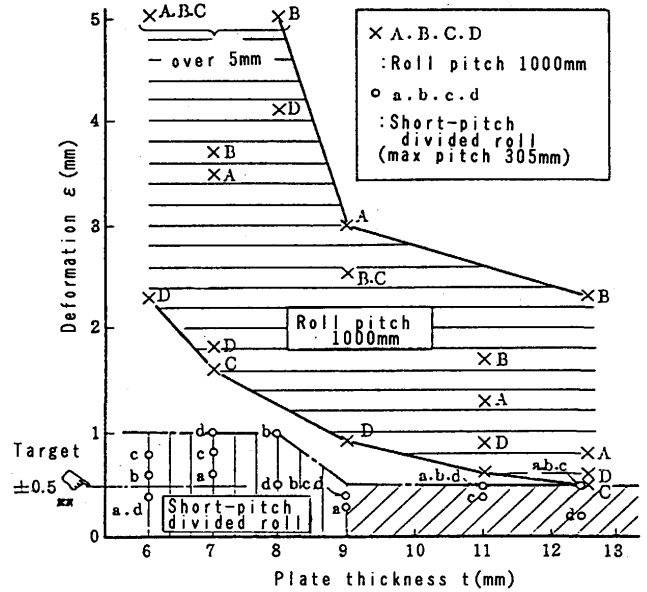


Fig. 14. Relation between plate thickness to plate deformation.

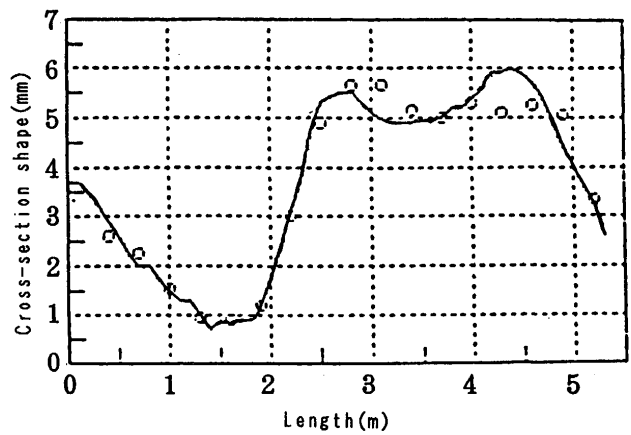


Fig. 15. Comparison of cross-sectional shape.

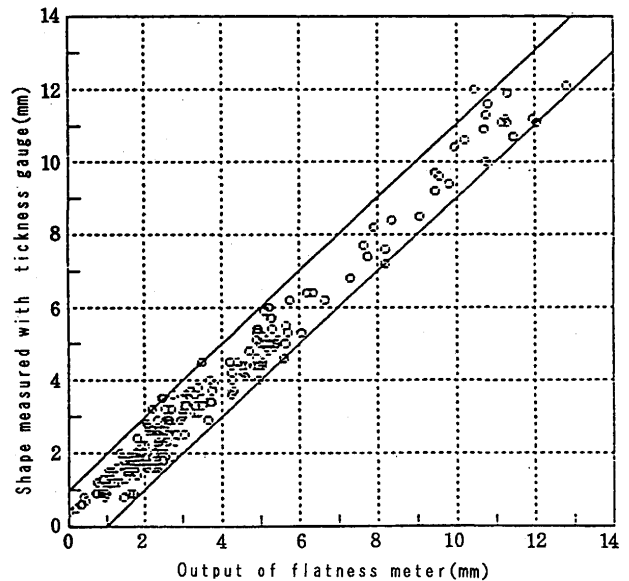


Fig. 16. Measuring accuracy of plate flatness meter.

D, d=鋼板中央幅中央部の4点にギャップセンサーを取り付け搬送速度1 m/秒での鋼板の変形振幅量を測定した, Fig. 14。その結果板厚9 mm以上においては, 変形を0.5mm以下に抑えていることが確認できた。

#### 2・5・2 総合計測精度

長手方向に水糸を張り, スキマゲージにより鋼板長手方向全長の形状を実測し, 平坦度計出力と比較した。Fig.15に断面形状の比較例を示す。

図中○点が実測点であり, 実線が平坦度計出力である。

Fig.16に総合走間精度を示す。測定条件は搬送速度1 m/秒, 板厚9 mm以上であり, 水糸を張って求めた鋼板の波高さと比較した。実測対応点数 $N=204$ 点で, 総合精度 $\epsilon=\pm 0.9\text{mm}(2\sigma)$ を達成している。図中2本の直線は $\pm 1.0\text{mm}$ の範囲を示す。

### 3. まとめ

厚板鋼板の形状計測技術の開発の一例として, レーザーモアレ法による平坦度計を述べた。当所においてもレーザー光線および画像処理技術を用いた各種のセンサーの開発が行われている。特に画像処理においては, 高速化と, 曖昧な部分の知能化処理が実用化へのポイントであると考えて開発を進めている。

#### 文 献

- 1) 北村公一, 川島捷宏: 鉄と鋼, 68 (1982), S1146
- 2) 高崎 宏: APPLIED OPTICS, 19 (1970)6, p.1467
- 3) 鈴木正根, 金谷元徳, 鈴木喜義: 精密機械, 140 (1974)9, p.36
- 4) 武田光夫: 光学, 13 (1984)1, p.55