

熱延仕上げミルにおける ワークロールプロファイルのオンライン測定

市川 文彦*・奥野 眞*・石川 孝*²・武智 敏貞*²

On-line Measurement of Work Roll Profile in a Hot Strip Finishing Mill

Fumihiko ICHIKAWA, Makoto OKUNO, Takashi ISHIKAWA and Toshisada TAKECHI

Synopsis : An on-line roll profile meter has been developed to measure the surface contour of the work roll in a hot strip finishing mill. The system consists of a sensor head with twenty ultrasonic distance meters, a sensor head scanner, a signal processing unit and a computer. The ultrasonic distance meter uses a water column as sound propagation medium. Ten distance meters measure the distribution of distance between the roll surface and the reference surface of the sensor head. Other ten distance meters monitor the straightness of the reference surface. A tensioned wire is used as the reference of the straightness. Each distance meter can measure the sound velocity directly in the water column to compensate for the error due to the sound velocity variation. The off-line and on-line measurements were carried out at the No.2 hot strip mill in Chiba Works of Kawasaki Steel. The results showed that the measuring accuracy was less than $\pm 10\mu\text{m}$.

Key words : measurement ; sensor ; ultrasonic ; distance meter ; profile ; work roll ; hot strip mill.

1. 緒言

薄鋼板の二次加工や最終製品の製造工程において、設備の自動化や使用材料の歩留まり向上のニーズが高まっている。このニーズの高まりにより、素材である薄鋼板の板厚品質に対する要求は年々厳しさを増しており、従来の長手方向の板厚精度だけでなく、幅方向の板厚分布（以下、板プロフィールと呼ぶ）に対しても高精度化が強く要望されてきている。この要望に応えるべく板プロフィールの改善に関する種々の研究がなされている¹⁾²⁾。板プロフィールの変動起因としては、①圧延ワークロールの撓み変形、②熱膨張により生じるロールのサーマルクラウン、③摩耗（局部的な異常摩耗も含む）によって生じるロールの摩耗クラウン、が大きなものとして挙げられている。板プロフィールの制御での問題点の一つは、上述②、③で挙げたワークロールのプロフィールを、オンラインで実測できる装置がないことにある。このためロールのサーマルクラウンと摩耗クラウンを物理モデルにより推定し、アクチュエータであるロールベンダーなどの設定を変えて板プロフィールを制御しているのが現状である。しかしロールプロフィール変化に影響を与える因子として、ロールの材質、ロールの表面状態（粗度、酸化膜など）、鋼板の材質、鋼板表面の状態（粗度、酸化膜など）などモデルでは組み込むことが困

難なものが多々有るため、物理モデルによる推定には限界がある。このため、板プロフィールをより高精度に制御するには、オンラインでワークロールのプロフィールを測定できるセンサの開発が切望されている。

圧延中のワークロールのプロフィールの変化挙動の測定に関しては、従来はコイルを数本から十数本圧延する毎に圧延機を止め、ワークロールを接触式の測定器で測定するか³⁾、鉛板をワークロールに挟んで圧下し、その形状から推定していた⁴⁾。エアマイクロメータを用いたインライン測定器の開発事例も見られるが⁵⁾、原理から考えると、ロール空転時に冷却水を止めた状態での測定であると思われる。また最近、本論文と同じ超音波センサを利用したオンライン測定器開発の試み⁶⁾も見られるが、オンライン測定データが公表されておらず、問題となるセンサの音速補正やセンサ架台の反り変化の影響にも言及されていない。これらロールプロフィールのオンライン測定装置の開発上の問題は、測定環境が苛酷であることに起因する。すなわち、①熱などによる測定架台の反り変化、②ロール冷却水の飛散、③ロールが高速に回転することによる影響、④測定環境温度の変化、⑤圧延ミル内の振動、に起因する測定誤差が問題となる。本論文で述べる測定システムはこれらの問題を解決し、熱延仕上げミルワークロールのプロフィールのオンライン測定を実現したものである。

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993)

* 川崎製鉄(株)加工・制御研究センター (Mechanical Processing, Instrumentation and Control Research Center, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

2. 測定原理および装置

2・1 測定原理の概要

測定の基本原理の概要をFig. 1に示す。測定架台をロール軸と平行に配置し、架台上に n 個の主距離センサIを等間隔にロール軸芯方向に向けて設置し、各距離センサでロール表面までの距離 X_i (i は1～ n の整数)を測定することにより n 点の距離分布を求める。このときに熱などにより測定架台に反りが生じて、距離分布測定の誤差になる。この誤差の対策として、測定架台内部に真直度基準のワイヤーを張り、各主距離センサIと背中合わせに n 個の副距離センサIIをワイヤーに向けて設置しワイヤーまでの距離 X'_i を測定し、反り変化による誤差を補正する。すなわち、ロール表面までの距離測定値 Y_i として、 X_i ではなく $X_i + X'_i + D_i$ をとることにより、架台の反り変化に影響されない正確な測定を行うとするものである。

$$Y_i = X_i + X'_i + D_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで D_i は距離センサI, II間の距離を表す定数である。

2・2 ロールプロファイル演算方法

実際のプロフィール測定においては、Fig. 1に示した測定架台を同図X方向にセンサ間隔 Q だけ走査しながら各センサの測定値を刻々記録し、次に述べる演算を行うことにより、精度の高い $n+1$ 離散点プロフィールおよびロール軸方向について連続的なプロフィールを求める。センサ架台の走査に際しては、一般に走査に起因するガタが存在し、架台のロール軸に対する微小な平行および回転移動が生じ、測定の誤差になる。この誤差を補正するのが本演算の目的である。このような問題に対しての補正方法としては逐次多点法^{7)~9)}などがあるが、逆フーリエ変換など多少複雑な演算を必要とする。本研究では、測定点の数(25000点)やプロセスの演算速度を考慮し以下の方法を案出した。

2・2・1 $n+1$ 離散点プロフィールの算出

ここではセンサ移動前後で $n-1$ 点の測定点の重なりがで

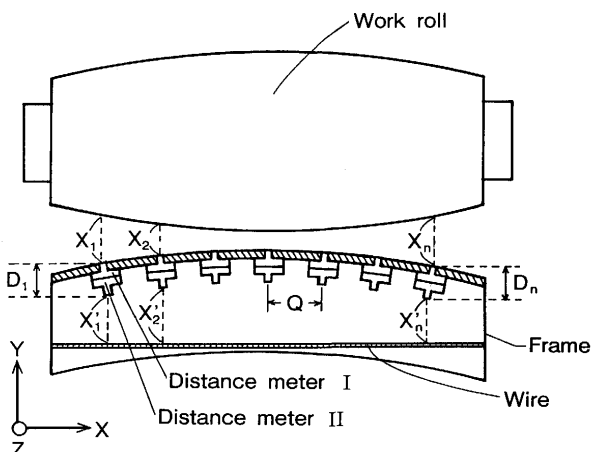


Fig.1. Principle of roll profile measurement.

きることを利用して、センサ架台の移動前後でのロール軸芯方向の平行および回転移動の差を補正し、 $n+1$ 点の離散点プロフィールを求める。Fig. 1で示したように真直度基準のワイヤーとロール軸芯で決定されるX-Y平面を考え、ロール軸長手方向にX座標、これと垂直方向にY座標をとる。測定架台を原点から q だけ移動した時点での第 i 番目 (i は1～ n の整数) のセンサの(1)式で示される測定値を $Y_i(q)$ とする。まずセンサ移動後の測定離散点プロフィール $\{Y_i(q)\}$ が移動前離散点プロフィール $\{Y_i(0)\}$ に $n-1$ 個の点で重ね合うように(2)式で平行移動と傾き変換をし、その結果を $\{\xi_i(q)\}$ とする。

$$\xi_i(q) = Y_i(q) + a \cdot i + b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、変換の1, 0次の係数 a, b は(3)式の Δ を最小にするように最小自乗法で求める。

$$\Delta = \sum_{j=1}^{n-1} (\xi_j(q) - Y_{j+1}(0))^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

次に端部以外の重なる $n-1$ 点については、移動前後の離散点プロフィールの平均値となるよう(4)式で $\{\eta_i\}$ を求め、さらに端部が0となるよう(5)式で $\{\xi_i\}$ を求める。

$$\left. \begin{aligned} \eta_i &= Y_i(0) & (i=1) \\ \eta_i &= (\xi_{i-1}(q) + Y_i(0))/2 & (i=2 \sim n) \\ \eta_i &= \xi_n(q) & (i=n+1) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\xi_i = \eta_i - ((\eta_{n+1} - \eta_1)(i-1)/n + \eta_1) \quad (i=1 \sim n+1) \quad \dots (5)$$

この座標 $((i-1)Q, \xi_i)$, ($i=1 \sim n+1$)が求める $n+1$ 点からなる離散点ロールプロフィールとなり、センサ誤差範囲内で真のロールプロフィールを表すことになる。

2・2・2 ロール軸方向連続プロフィールの算出

次に連続プロフィールは、①前述2・2・1の $n+1$ 個の点を通り、②ロール端部近傍では、高次多項式曲線近似する、という条件で求める。②の根拠は、ロール端部近傍ではロールの摩耗や急峻な温度分布は存在しないから滑らかな曲線と近似しても、誤差は大きくならないと考えて良いからである。そこで、連続プロフィールのうちX座標の区間 $[0, Q]$ および $[(n-1)Q, nQ]$ の2区間については、それぞれ次式(6), (7)すなわちそれぞれ点 $(0, \xi_1)$, (Q, ξ_2) , $(2Q, \xi_3)$ および $((n-2)Q, \xi_{n-1})$, $((n-1)Q, \xi_n)$, (nQ, ξ_{n+1}) の各3点を通る2次曲線で補間してプロフィールとする。

$$y = \xi_3 x(x-Q)/2Q^2 - \xi_2 x(x-2Q)/Q^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} y &= \xi_{n-1} (x - (n-1)Q)(x - nQ)/2Q^2 \\ &\quad - \xi_n (x - (n-2)Q)(x - nQ)/Q^2 \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

端部以外の区間の連続プロフィールは、センサ架台の任意の移動量 q において測定した離散点プロフィール $\{Y_i(q)\}$ について端部の2点が前述2次曲線(6), (7)式上に乗るように次式(8)によって変換し、 $\omega_i(q)$, $i=1 \sim n$ を得る。

$$\omega_1(q) = Y_1(q) + a' \cdot i + b' \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 a' 、 b' は曲線(6)、(7)式に端部2点がかかる条件から次式(9)、(10)によって求まる。

$$\begin{aligned} a' = & (Y_1(q) - Y_n(q) + \xi_{n-1}q(q-Q)/2Q^2 \\ & - \xi_n(q+Q)(q-Q)/Q^2 - \xi_3q(q-Q)/2Q^2 \\ & + \xi_2q(q-2Q)/Q^2)/(n-1) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b' = & (Y_n(q) - nY_1(q) + n\xi_3q(q-Q)/Q^2 \\ & - n\xi_2q(q-2Q)/Q^2 - \xi_{n-1}q(q-Q)/2Q^2 \\ & + \xi_n(q+Q)(q-Q)/Q^2)/(n-1) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

これらの点($q + (j-1)Q$, $\omega_j(q)$) (j は1~ n の整数)は架台の移動量 q での架台の平行および回転移動の影響を受けない n 点からなる離散点プロフィールになる。従って、 $0 \leq q \leq Q$ なる全ての q について $\omega_j(q)$ を求めれば、ロール長手方向の連続プロフィールを得ることができる。ここで求めた連続プロフィールの演算誤差は、 $2 \cdot 2 \cdot 1$ で求めた $n-1$ 離散点を通るから、 $n-1$ 点に関してはセンサ誤差、その他の点に関しては端部の2次曲線近似の誤差程度と考えられる。

2・3 超音波距離計および音速変化補正方法

本研究では距離測定法として、Fig. 2に示す水柱を利用した音速補正型超音波距離測定法を開発した。超音波距離計の最大の問題点である、水温による音速変化に起因する測定誤差の補正方法の原理をFig. 2に従って説明する。水柱ノズルの中間に超音波の一部を反射する反射板を超音波振動子から d_r の距離に設置する。振動子からロール表面までの距離を d 、振動子・反射板間および振動子・ロール表面間を超音波パルスが往復する時間をそれぞれ t_r 、 t とし、(11)式により d を計算し、音速変化を補正した距離測定値を得る。

$$d = td_r / t_r \dots\dots\dots (11)$$

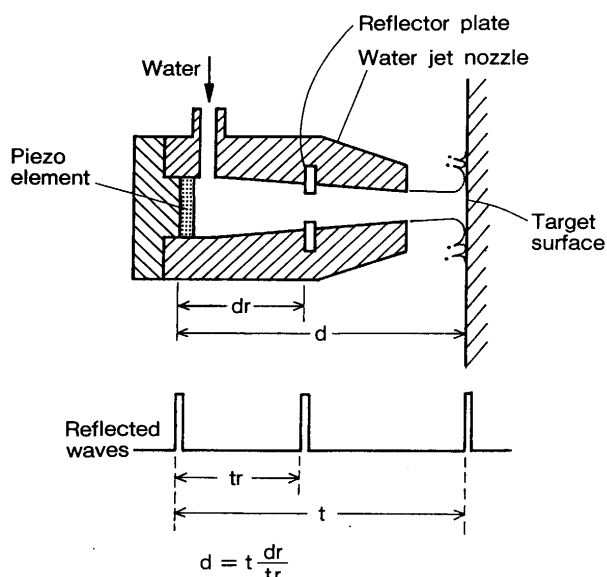


Fig. 2. Ultrasonic distance meter and compensation for sound velocity variation.

今回の実験では、 $d_r = 15\text{mm}$ 、 $d = 30 \sim 40\text{mm}$ としている。

2・4 測定装置

千葉工場第2熱延仕上げミル第4スタンド上ワークロールを対象として計測装置を試作した。計測装置はFig. 3に示すように、センサヘッド部、信号処理部、演算・制御部、架台走査駆動部、給水部からなる。センサヘッド部は、センサなどを収納する架台と、10個の水柱式超音波距離計の検出端と、ほぼ同じ機能を有する10個の水浸型超音波距離計の検出端および真直度基準となるワイヤーとからなる。ワイヤー周辺部は水充填構造になっており、超音波距離計で非接触で架台の反りの変化を測定できるようになっている。このセンサヘッド部はワークロールを保持するチョックに取り付けられるとともに、油圧シリンダにより、ガイドに沿ってセンサ間隔分だけ走査できるようになっている。Fig. 4にロールチョックに取り付けた状態のセンサヘッド部の実物写真を示す。センサヘッドはミル内のスペースの制約から、俯角40度でロール軸芯を向く位置に取り付けられている。信号処理部は、20個の超音波距離計の超音波振動子を励振し、反射波を受信する20組のパルサー・レシーバと、受信した並列信号を時系列信号に変換するマルチプレクサーと、送信および受信パルス間の時間間隔を測定するタイムインターバルカウンターと、測定開始のトリガーや種々のゲート信号を生成し、高速測定を制御するタイミン

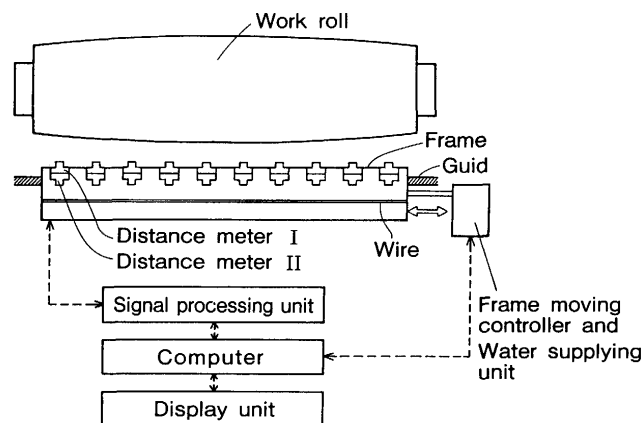


Fig. 3. Schematic diagram of the developed system.

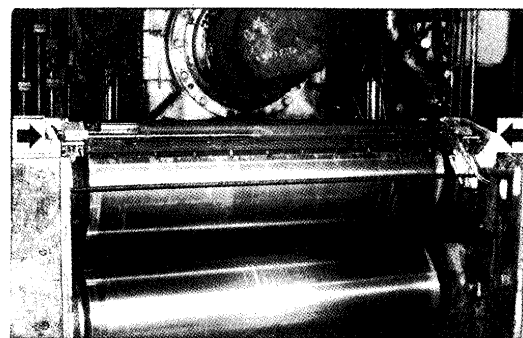


Fig. 4. The sensor head attached to the work roll chock.

Table 1. Specifications of the developed system.

Article	Specification
1) Sensor head	
Size	2100mmL×150mmH×150mmW
Weight	40kg
Number of sensors	10 pairs
Interval of sensors	190mm
Wire	1.0mm dia. Tension 343N
Scanning velocity	40mm/sec
2) Distance meter	
Method	Ultrasonic distance meter with water column
Ultrasonic frequency	10MHz
Resolution	0.1 μ m
Measurement range	30~40mm
Water flow velocity	10m/sec
3) Signal processing	
Sampling frequency	5kHz
Resolution of time-interval counter	20psec
4) Data processing	
Computer	HP320
Data averaging	125 data (250 msec) moving averaging
Total processing time	About 2min.

グ制御回路からなる。演算・制御部はマイクロプロセッサとその周辺装置であり、一連の測定シーケンスを実行するとともに、入力データから測定原理のところで述べた演算を実施し、ロールプロフィールを算出し出力する。計測装置の主な仕様をTable 1に示す。

3. 基礎実験結果

3・1 音速補正の効果

今回開発した音速補正型超音波距離計の基本性能を確認するため、センサ単体を用いてFig. 5に示すような実験装置を組み、基礎実験を実施した。Fig. 5で水の温度を8℃から46℃まで変化させたときの、音速補正の効果をFig. 6に示した。測定距離が30mmの場合、補正前では ± 1 mmの誤差が生じてしまうのに対して、本方法では40℃温度が変化しても、測定誤差は5 μ m以内であることが分かる。

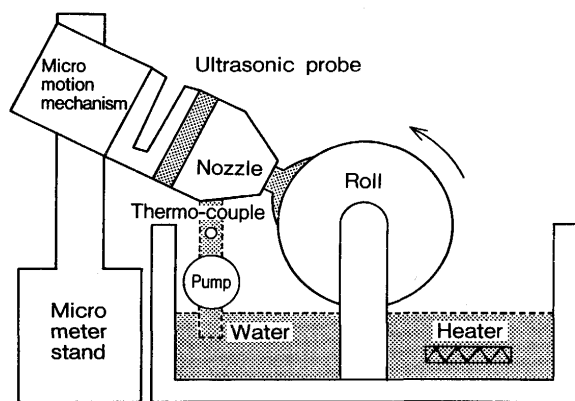


Fig. 5. Experimental apparatus for basic measurement.

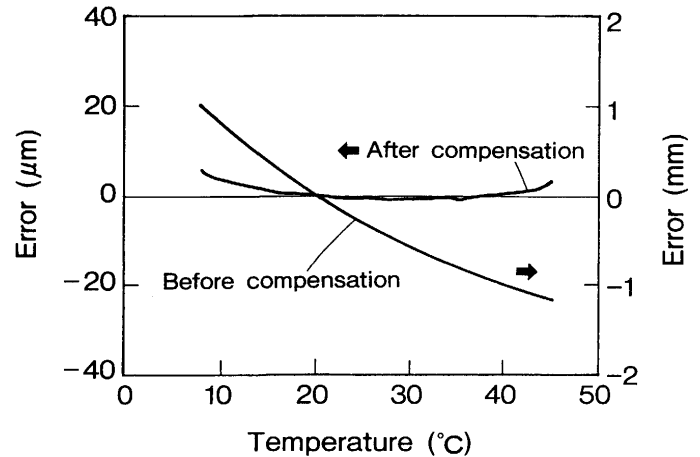


Fig. 6. Effect of temperature compensation by the developed sensor.

3・2 高速移動体に対する測定の安定性

Fig. 5で模擬ロールを周速20m/sで回転させたときの距離測定出力結果をFig. 7に示す。ここでは、測定中にセンサを微小移動機構を用いて、20 μ mずつ変位させているが、模擬ロールの200 μ m前後の偏芯状況とともに、20 μ mの変位も安

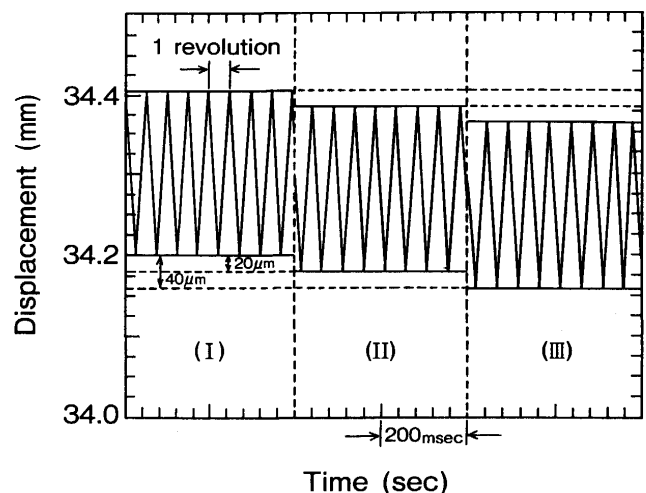


Fig. 7. Displacement measurement of a rotating roll by the developed sensor.

rotating speed = 20m/s

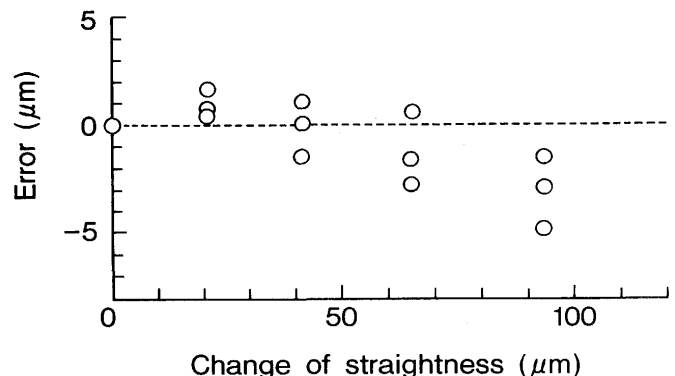


Fig. 8. Accuracy of compensation for change of straightness of reference surface.

定して計測できているのが分かる。

3・3 架台反り変化補正精度

2・4の項で述べたオンライン測定架台をチョックに取り付け、架台中央に錘りを乗せて架台の反りを変化させながら、プロフィールの既知なロールを測定し、反りの変化による測定の誤差を調査した。Fig. 8に、その結果を示す。図で縦軸は架台中央部の測定値 $X_i + X_i'$ の変化を、横軸の真直度は、本距離センサでワイヤーまでの距離を測定し、架台の反りの変化を求めたものである。この図から $100\mu\text{m}$ 程度の反り変化があっても、測定誤差は $5\mu\text{m}$ 以内であることが分かる。

4. オンライン実験結果

4・1 ロールプロフィールのオフライン測定結果

本測定装置をチョックに取り付け、まずプロフィールの既知なロールを測定して、本測定装置を校正した後、圧延に使用されて摩耗したロールをオフラインで測定した。その結果をFig. 9に示す。図で、実線は本測定結果、破線で示したのがロール研削台上で接触式の変位計で測定した結果であり、両者とも $10\mu\text{m}$ 以内で良く一致しているのが分かる。なおロールプロフィールを示す図においては、以下ロールの径が大きくなる方向を正にとって表すことにする。

4・2 ロールプロフィールのオンライン測定結果

本測定装置を千葉工場第2熱延工場仕上げ第4スタンド上ワークロールを対象に、オンライン測定を実施した。測定はロール替えから次のロール替えの1サイクルにわたって行い、測定のタイミングは、圧延材料である鋼帯が当該スタンドを抜けた5秒後から7秒間である。なお $n+1$ 離散点プロフィールを得るため架台移動前後各1秒間架台静止状態での測定を行っている。今回測定の1サイクルの間に圧延した鋼帯は135本であり、前後の測定を含めて合計137個の測定データを得た。Fig. 10に架台中央部に設置したセンサによる測定原データと移動平均処理(時定数250ms)したデータの例を示す。ロール冷却水等の影響を受けず、安定して架台の振動やロールの偏芯等の情報を含めた変位を測

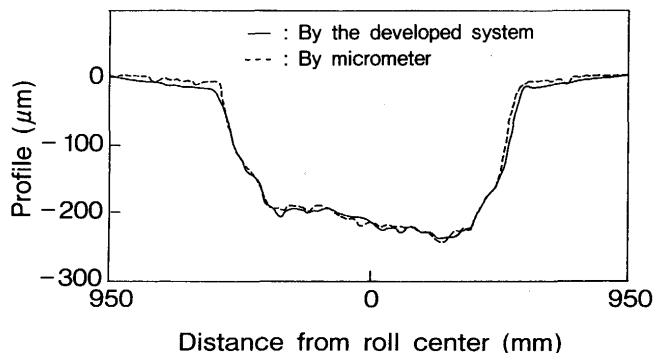


Fig. 9. The roll profile obtained by off-line measurement.

定できているのが分かる。本測定では10組の距離測定をほぼ同時に測定しているため、ロール偏芯の影響はセンサ架台の平行移動と同じ効果になり2・2項の演算処理により取り除かれる。なお、ロールの周速度は第4スタンドでの通常圧延速度である 2.3m/s 程度である。ここではプロフィール測定結果の例として、サイクル前期、中期、後期、圧延終了後3分および40分の5例についてFig. 11に示す。熱によるサーマルクラウン、板道に沿った摩耗の進展、摩耗によると思われる微妙なプロフィールの変化が観測されている。

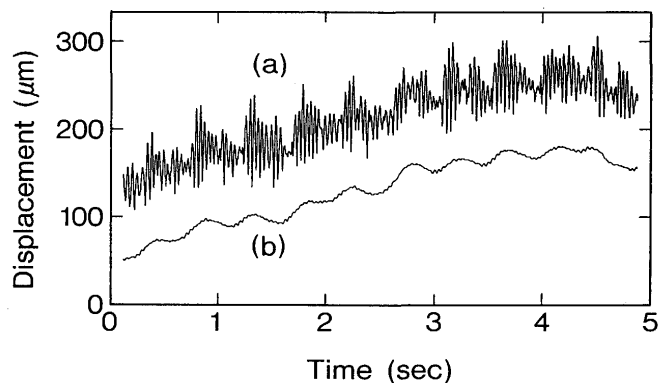


Fig. 10. Example of output of central sensor on on-line experiment.
(a) raw data (b) 250msec moving averaged data

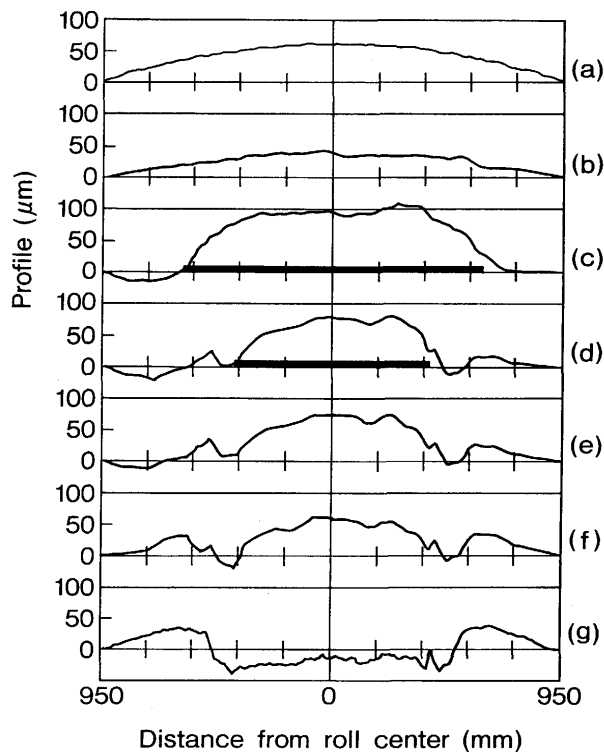


Fig. 11. Typical roll profiles obtained by on-line measurement.

(a) initial roll profile* (b) before rolling (c) after rolling of 62 coils (d) after rolling of 135 coils (e) 3min. later from end of rolling (f) 40min. later from end of rolling (g) 35Hr. later from end of rolling*

*): measured by contact type distance meter

—: steel sheet width

Table 2. Parameters measured in the on-line test.

Article	Data
Straightness variation of sensor head	$\pm 100\mu\text{m}$
Temperature variation of water	3deg.
Amplitude of vibration of sensor head	50 μm (at bar to bar) 2mm (at impact of plate entrance)
Vibration frequency of sensor head	40Hz
Amplitude of vibration of wire	10 μm (at bar to bar) 400 μm (at impact of plate entrance)
Vibration frequency of wire	65Hz
Variation of ultrasonic echo height	less than 20%

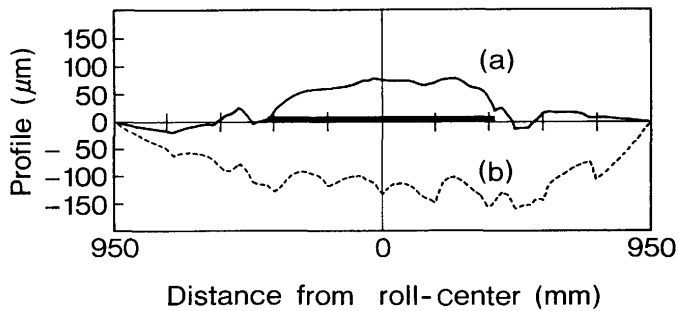


Fig.12. Effect of straightness compensation on on-line measurement of roll profile.
(a) compensated profile (b) no compensated profile

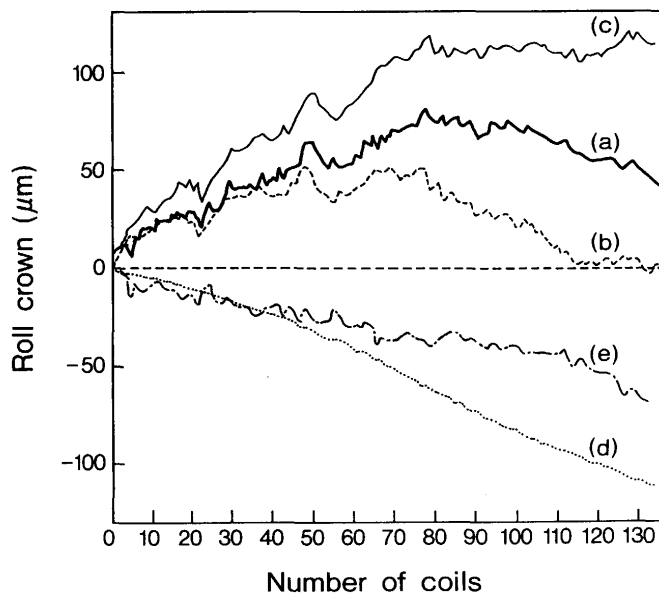


Fig.13. Center roll crown change during one roll cycle (total 135 coils were rolled).
(a) total roll crown (measured by the developed system)
(b) total roll crown (calculated by model⁽⁴⁾)
(c) thermal roll crown (calculated by model⁽⁴⁾)
(d) wear roll crown (calculated by model⁽⁴⁾)
(e) estimated wear roll crown ((a)-(c))

また、研削直後と圧延開始直前でのロール温度の差、すなわち前者は研削熱などで温度がやや高いのに対し、後者は空冷放置およびインラインでの冷却水による冷却により温度が低下するため、ロールクラウンが変化する。このような僅かな差を検出していることも同図(a), (b)から分かる。なおTable 2に本オンライン実験で得られた、振動や水温変

化などについての各パラメータの値を示す。なおTable 2に示される測定架台の反り変化は、鋼帯がスタンドを出入りする温度変化の激しい時に対応して起こっている。このことは、これまで述べてきた反り変化補正が必要であることを示している。Fig.12に反り変化補正の効果を示した。

4・3 ロールクラウンの経時変化

ロールクラウンが1サイクル間にどのように変化するかについて、オンライン測定から求めた結果をFig.13に示す。ここでロール中央クラウンの値 C_r は、(5)式から得られる ε_0 の値で定義したものである。実験ではベンダー力を一定で行っているが、ベンダーの影響を除くため図では圧延直前のロールクラウンを基準としてその差を求めて図示している。同図には、物理モデル⁽⁴⁾から推定したサーマルクラウン、摩耗クラウンおよび、この二つを合成したロールクラウンの各圧延時の予測値を示してある。サーマルクラウンの予測値の各圧延ごとの変化量と本測定値のそれとは良く対応した関係となっているが、合成クラウン予測値と本測定値は圧延が進むにつれてズレが大きくなっていることが分かった。

5. 考察

5・1 測定誤差要因の検討

オンラインでの測定の総合精度を実験的に検証するのは、現時点ではオンラインで真のプロフィールを得ることが不可能なので困難である。ここでは、今回開発したオンラインロールプロフィール計により離散点プロフィールを得る場合の測定精度に及ぼす個々の要因について考察する。

5・1・1 超音波反射波振幅変動の影響

本測定では、超音波による距離測定において、超音波の伝搬時間を一定しきい値で反射波の立ち上がり位置を検出することで行っている。この場合反射波の振幅変動により測定値が変化する。いま時間 t_0 で反射波が到達したとすると、 t_0 近傍では、その反射波は次式(12)で表せる。

$$E(t) = E_0 \sin(2\pi f(t - t_0)) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで E , E_0 , f はそれぞれ反射波の時刻 t における振幅、反射波の最大振幅、および超音波の周波数である。本測定装置では $f=10\text{MHz}$ を使用しており、水の音速を 1500m/s 、 $E_0=2\text{V}$ 、しきい値を 0.5V としたときの E_0 の変化量と距離測定値変化量との関係は簡単に計算できる。結果をTable 3に示す。振幅が20%変動しても距離測定誤差は $0.8\mu\text{m}$ 程度である。なお、しきい値の設定精度は、 0.01V 以下であり、これによる誤差は無視できる。

5・1・2 ワイヤー真直度変化の影響

本測定はワイヤーを張って真直度基準にしているが、ワイヤーの真直度は張力によって変化する。その関係式は良く知られた懸垂曲線であり(13)式で示される。

Table 3. The change of the measured time interval (Δt) and the distance (Δd) due to the change of echo height (ΔE_0).

ΔE_0 (%)	Δt (ns)	Δd (μm)
10	0.46	0.34
20	1.04	0.78

Table 4. The change of straightness (Δd_s) of the tensioned wire due to the temperature difference (ΔT) between the wire and the sensor head frame ($\Delta l/l_0$: elongation ratio, $\Delta \sigma/\sigma_0$: change of tension ratio).

ΔT (°C)	$\Delta l/l_0$	$\Delta \sigma/\sigma_0$	Δd_s (μm)
1	1.2×10^{-5}	6.7×10^{-3}	1.4

$$y = (T/2\sigma) \cosh(\sigma x/T) \dots\dots\dots (13)$$

ここで T , σ はそれぞれワイヤーの張力および線密度である。一方、張力変動の要因としては、架台の熱等による伸び縮みが考えられる。すなわち、架台とワイヤーの温度差や熱膨張係数の違いによってワイヤーの張力が変動する。ワイヤーとして1mm ϕ のピアノ線、張力として343N、ワイヤー長さを2m、架台の材質を鋼としたとき、架台とワイヤーの温度差とワイヤーの真直度変化の関係を計算した結果をTable 4に示す。温度差1°Cに対して1.35 μm の真直度変化である。真直度の変化方向は重力方向であり、測定方向と重力方向とのなす角を θ とすれば真直度変化の影響は $\cos\theta$ を乗じたものに軽減される。本実験では $\theta=50^\circ$ であるから、誤差は0.9 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ となる。

5.1.3 センサ架台の回転、平行移動、変形の影響

Fig. 1に示したように座標系 (Z軸はX, Y軸に垂直) を取ると、センサ架台の動きは、①X, Y, Z軸方向の平行移動、②X, Y, Z軸回りの回転、③Z軸方向の曲がり、④Y軸方向の曲がり、⑤X軸回りの捻れ、が考えられる。ロール径が約700mmであり、センサ架台の動き (ここでは1mm以下を考える) に比して大きいことを考慮すれば、上述①、②、③の動きのプロフィール測定精度への影響は小さいことが分かる。④の影響は非常に大きい、これに対しては、ワイヤー基準で補正している。ここでは残された⑤の影響について考察する。今X軸回りの捻れによりFig.14のようにセンサの向きがロール軸芯に対して ϕ 傾いたとする。このとき幾何学的な測定誤差 Δd は(14)式で表せる。

$$\Delta d = R \sin \phi / \sin \phi - d \dots\dots\dots (14)$$

ここで R , d , ϕ はそれぞれロールの半径およびセンサ・ロール間距離およびFig.14で示される角AOBである。 $R=350\text{mm}$, $d=30\text{mm}$, $\phi=1^\circ$ とすると、 $\phi=0.086^\circ$, $\Delta d=3.6\mu\text{m}$ を得る。プロフィール算出においては、X軸回りの捻れの場合10個のセンサの中央のセンサに対する相対誤差となるから、捻れによるプロフィール測定誤差としては、1.8 $\mu\text{m}/$

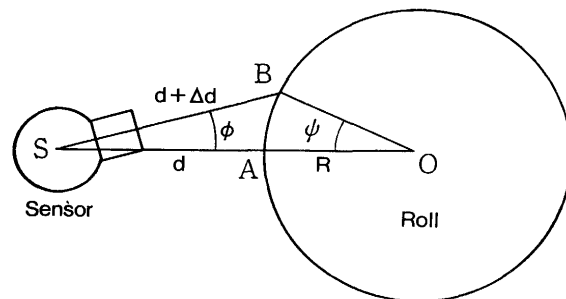


Fig.14. Geometrical error due to twist of the sensor head.

degとなる。

5.1.4 水柱流速および音速変化の影響

本方式は水柱を利用するので、水柱の流速の測定精度への影響を考察する。測定距離 d 、静水の音速 c 、水柱内の平均流速 v 、超音波の飛行時間 t とすると、これらのパラメータの関係式は(15)式となる。

$$t = d/(c+v) + d/(c-v) \dots\dots\dots (15)$$

同様に、音速測定用反射板までの距離、平均流速、飛行時間をそれぞれ d_r , v_r , t_r とすれば

$$t_r = d_r/(c+v_r) + d_r/(c-v_r) \dots\dots\dots (16)$$

従って本測定の原理から測定誤差 Δd は(17)式で表せる。

$$\Delta d = t d_r / t_r - d \approx d((v/c)^2 - (v_r/c)^2) \dots\dots\dots (17)$$

(15)~(17)式から $v=v_r$ であれば、全く誤差を生じない。また本測定では $d=30\text{mm}$, $v=10\text{m/s}$, $c=1500\text{m/s}$ 程度であるから $v_r=0$ としても、 Δd は1.3 μm である。実際の測定では校正時に流速の補正もなされ、水の流速の変動が10%程度に抑えられるとすれば、その影響はさらに十分の一に小さくなる。

音速変化補正による誤差については、3.1項で検討しており、その大きさは0.4 $\mu\text{m}/3^\circ\text{C}$ である。

5.1.5 架台およびワイヤー振動の影響

架台およびワイヤーの振動は、40Hz以上になるよう設計されている。一方ロール空転時の架台およびワイヤーの振動の最大振幅はオンライン実験の結果からそれぞれ50 μm , 10 μm である。従って、振動に対しては例えば1秒間の測定の平均をとれば、振動の影響は四十分の一以下に抑えられる。

5.1.6 総合精度の検討

以上の個々の測定誤差要因検討結果をまとめるとTable 5のようになる。オンライン実験から得られた、各パラメータの大きさを考慮して、総合誤差を見積もってみる。総合誤差を Δ , Table 5で示される個々の誤差を Δ_i とすれば、(18)式が得られる。

Table 5. The error factor and the estimated value.

Factors	Data
Change of echo height	0.8 μ m/20%
Change of wire straightness	0.9 μ m/°C
Twist of sensor head	1.8 μ m/deg.
Velocity of water jet	0.1 μ m/10%
Compensation for sound velocity (experiment)	0.4 μ m/3°C
Vibration	1.0 μ m/50 μ m
Compensation error of straightness (experiment)	5.0 μ m/100 μ m

$$\Delta \leq \sum |\Delta_i| = 0.8 + 0.9 + 1.8 + 0.1 + 0.4 + 1.0 + 5.0 = 10.0 \mu\text{m} \dots\dots\dots (18)$$

これらの誤差は、Table 2 の実績値を参考に見積もった値であり、今回試作した測定装置は、離散点プロファイル測定に関しては、10 μ mの測定精度はほぼ達成していると考えられる。以上の解析により、測定精度を更に向上させるには架台の反りや捻れを小さくすることが、重要であるのが分かる。

5・2 ロールクラウン予測モデルの誤差検討

オンライン測定結果のFig.13に示したことを整理すると以下のことが言える。

①ロールクラウンの不規則な増減は測定値と計算値で良い相関がとれている。

②圧延コイル数の増加に伴って測定値と計算値との差が大きくなっている。

③圧延後の冷却したロールのプロファイルがFig.11(g)に示されているが、これから分かるように中央部の摩耗量は、80 μ mである。一方モデル計算による摩耗クラウン推定値は113 μ mとなっており、実際の値よりかなり大きい。

④圧延終了時のモデル計算によるサーマルクラウン推定値と本測定値との差は、冷却後のロール摩耗実測値にほぼ一致する。

以上からロールクラウン予測モデルについて、サーマルクラウンについては、ほぼ実際を予測できており、摩耗クラウンについては誤差が生じていると言える。本装置による測定が妥当であるとする、実際の摩耗クラウンは本装置による測定値とサーマルクラウン予測値の差で表される。この結果をFig.13の(e)で示すが、ロール1サイクルの摩耗状況を良く表していると推察する。これらの結果は、ロールの摩耗については摩耗機構にいろいろな要因が含まれるため、摩耗クラウンの予測は非常に難しいことを示して

いる。

6. 結言

熱延工程仕上げミルにおけるワークロールのプロファイルのオンライン測定法について検討し、以下の結果を得た。

(1)ミル内環境下での変位センサとして水柱方式の超音波距離計が有効である。

(2)超音波距離計の問題として水の音速変化があり、水柱ノズル内で音速を直接測定し補正する方法を開発した。

(3)複数の超音波距離計を用いワイヤーを真直度基準にしたオンラインロールプロファイル計測システムを試作し、ロール1サイクルのオンライン測定を実現した。

(4)開発した測定装置の測定精度は10 μ m以内であることをオフライン実験で示した。

(5)ロールプロファイルの予測モデルと本測定結果および圧延前後の実測値を比較し、本測定結果が妥当であること、予測モデルのうち摩耗予測モデルに誤差が大きいことを示した。

本測定装置は千葉第2熱延工場にてバッチ的に使用し、ロールプロファイルのオンライン測定が可能であることを示し、鋼板のクラウン制御モデルの精度向上に役立ててきた。しかしロールチョック取付型であるためロール替え毎に取り外す必要があるなどの不便がある。今後、ミルスタンド内取付型の開発を行い、常時ロールプロファイルを測定できるようにし、熱延鋼板の形状・クラウン制御精度のさらなる向上に役立てていく予定である。

文 献

- 1) 鎌田征雄, 北村邦雄, 片岡健二, 中川吉左衛門: 川崎製鉄技報, 11 (1979), p.78
- 2) I. Yarita, K. Kitamura, K. Nakagawa, T. Tamai, H. Kimishima and K. Hamada: Proceedings of Int. Conf. on Steel Rolling, (1980), p.473
- 3) N. G. Jonsson and P. Mantyla: Proceedings of Int. Conf. on Modernization of Steel Rolling, (1988), p.73
- 4) 北浜正法, 鎌田征雄, 佐々木徹, 成田健次郎, 鴨志田隆, 粟津原博: 第35回塑性加工連合講演会, (1984), p.243
- 5) T. J. Knox and J. M. Moore: Proceedings of Int. Conf. on Steel Rolling, Vol.1, (1987), p.A.23.1
- 6) 山根孝夫, 浜田幸雄, 大平和由, 林 寛治, 島筒博章, 増田堅司: 材料とプロセス, 3 (1990), p.1449
- 7) 大園成夫: 機械の研究, 33 (1981), p.193
- 8) 垣野義昭, 谷口博之, 安井 誠, 上杉憲一: 精密機械, 48(1982), p.239
- 9) 田村洋一, 平卯太郎, 阪本善保: 計測自動制御学会論文集, 25 (1989), p.509