

技術報告

水柱距離計による寸法形状測定装置

宇野 義雄*・北尾 斉治*²・福高 善己*川村 紘一*³・船生 豊*⁴

Dimension and Shape Measurement Using Water Column Distance Meter

Yoshio UNO, Nariharu KITAO, Yoshimi FUKUTAKA,
Koichi KAWAMURA and Yutaka FUNYU

Synopsis:

The technology of the dimension and shape measurement of steel products is one of the most important bases on the quality control of steel production process.

Kawasaki Steel Corporation has developed an excellent measurement technique which employs "water column method" to meet with strict requirements such as inconvenient environment, on-line continuous measurement and others.

The water column method is based on two kinds of principles. One is the ultrasonic measurement. Ultrasonic pulses are transmitted and received via water column to and from the object. The distance to the object and its thickness can be obtained from time intervals between echo pulses. The other is the electric resistance measurement. A constant electric current is fed to a water column which connects an electrically insulated fixed nozzle with an earthed object. By measuring the electric potential of the nozzle, the length of the water column, which shows one of the factors of the object's shape, can be known.

Five of on-line applications are as follows:

- 1) Thickness and outer/inner diameters measuring system for medium seamless pipes.
- 2) The same system for small seamless pipes as mentioned above.
- 3) Width gauge for hot sheet bar at hot strip mill.
- 4) Edger roll position sensor at heavy plate mill.
- 5) Flatness measuring system for hot strip.

1. 結 言

鉄鋼プロセスの計測課題の中で、鋼材の寸法形状の測定は古くからの課題であるが、この課題は生産性の向上や製品品質の向上の要請から常に新しい測定テーマを生んでいる。新テーマは、測定精度をより高くしたいもの、複雑な形状を測定したいものなどさまざまであり、一般的に雰囲気の良いところ、設置環境の厳しいところでの測定が多い。安価に設置できることも重要な条件である。ここではこれらの要求に合致した寸法形状測定の例として、主として圧延ラインでの寸法形状測定に効果を上げている水柱距離計について記述する。

本報で述べる水柱距離計は、原理的には二種類である。一つは超音波水柱距離計であり、他は電気抵抗式水

柱距離計である。前者は測定器から測定対象へ、水柱を介して超音波パルスを送り、対象物からのエコーの時間関係から距離を測定する。レーザ式の距離計に比して、水蒸気や粉じんなどの悪条件でも正常に作動可能であること、装置が小型にできること、対象の表面状態に左右されないこと、安価なことなどの特長を有している。用途は拡大しつつあるが、使用例として中・小径管用自動寸法測定・ホットストリップの板幅計・圧延機縦ロール開度計について記述する。後者の電気抵抗式水柱距離計は、対象物までの距離を水柱の電気抵抗として測定する。この距離計は、超音波水柱距離計ほど多量の水をかけられない所でも測定可能なよう開発されたもので、他に測定レンジが大きいことも特長である。使用例としてホットストリップミル出側の平坦度検出器について述べる。

昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-dori Mizushima Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (現: 川崎製鉄(株)千葉製鉄所) (Mizushima Works, Now Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)計量器技術センター (Measurement & Instrumentation Center, Kawasaki Steel Corp.)

*⁴ 川崎製鉄(株)知多製造所 (Chita Works, Kawasaki Steel Corp.)

2. 測定原理と方式

2.1 超音波水柱距離計

工業計測の分野において超音波は、レベルメータ・圧力計・温度計・流量計などに応用されている。また深傷装置にも使用される。当超音波水柱距離計は、超音波探傷の技術を長さ測定に応用したものである¹⁾。被測定物と測定ヘッドは、探傷装置と同様に接触媒質（通常水）を通して接続される。Fig. 1 は、測定原理図である。図において、探傷子から発信された超音波パルスは、接触媒質（水）を伝播して被測定物の内部へ入射される。このとき、一部の超音波が被測定物の表面から表面エコー“S”として反射してくる。一方、被測定物内部に入った超音波は底面で底面エコー“B”として反射してくる。これらエコーの時間間隔 T_0 および T_1 から、水距離 l 、または被測定物の肉厚 t を演算することができる。

$$l = T_0 \times C_0 \times 1/2$$

$$t = T_1 \times C_1 \times 1/2$$

ただし、 C_0 ：接触媒質の音速

C_1 ：被測定物の音速

実際の水距離は、例えば次の方法で得ることができる²⁾。受信された表面エコー“S”は増幅、波形整形され、この信号で、送信であらかじめ開いた時間ゲートを閉じる。ここでできた時間ゲートから時間—電圧変換回路でアナログ電圧に変換する。時間ゲートの開時間を直接測定してもよい。

また被測定物の肉厚 t も次のようにして得られる²⁾。エコー信号を増幅し、その中の底面多重反射 ($B_1, B_2, B_3 \dots$) のエコー間の時間ゲート信号を作り、肉厚に比例したこの時間ゲートを DC 電圧のアナログ信号に変換

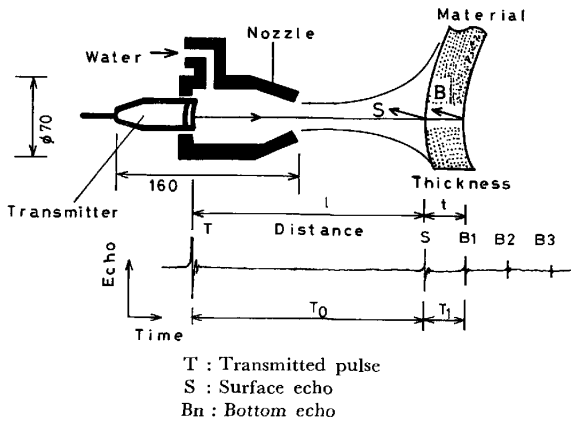


Fig. 1. Measuring principle of ultrasonic water column distance meter: The distance to the object and its thickness can be obtained from time intervals between echo pulses.

して厚さを求める。アナログ信号に変換された厚さ電圧は、信号判別回路に入力され、前回値と比較判別して信号値の適否判定を行う。判定が否であれば前回値をそのままホールドし、ノイズによる誤測定を防止する。

使用上の留意点としては、被測定物表面に対する水柱の投入角度変化に対して、その反射信号レベルが大きく変化することがある。Fig. 2 に水柱の投入角度の影響

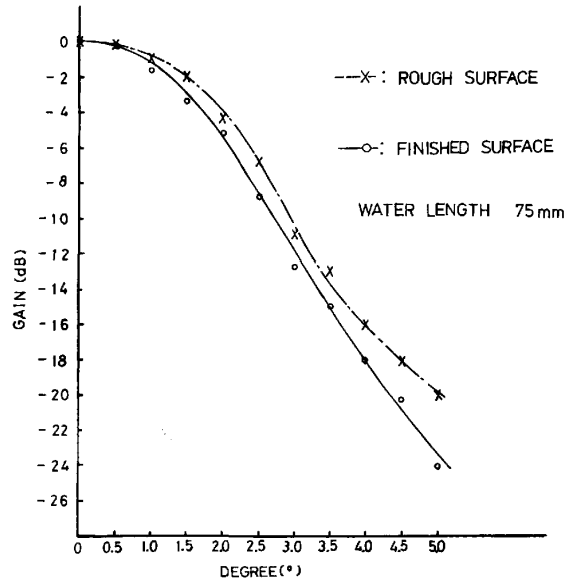


Fig. 2. The effect of inclination of water column: Water column is rectangular to the object's surface at 0 degree.

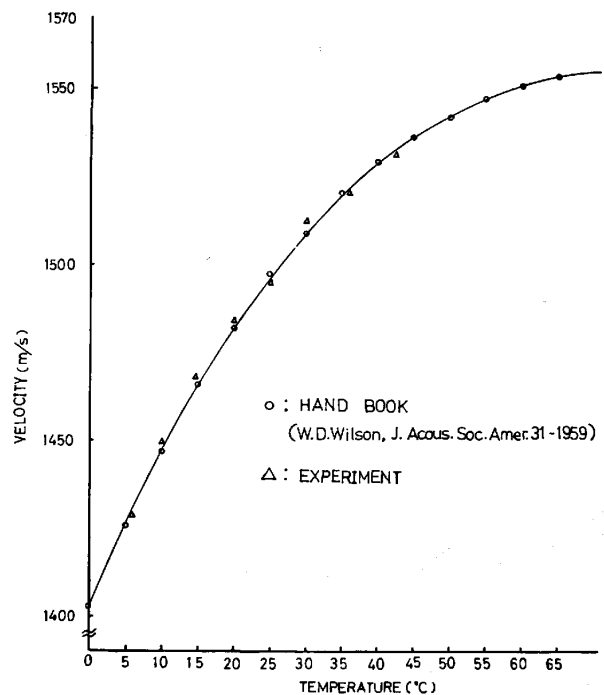


Fig. 3. The relation between water temperature and sound velocity: The coefficient of velocity change at Room Temperature is $K=0.16\%/^{\circ}\text{C}$.

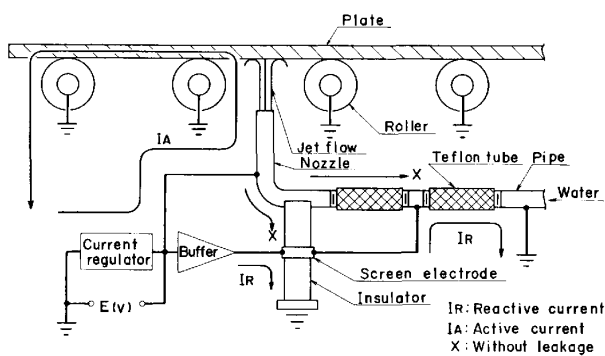
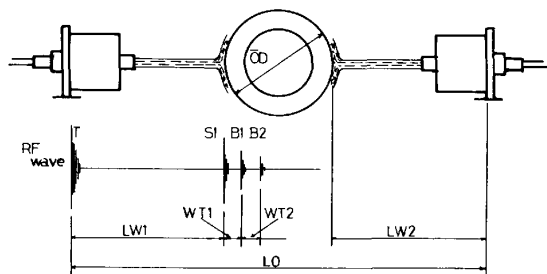


Fig. 4. Measuring principle of electric resistance type water column distance meter: A constant electric current is fed to a water column. The electric potential of the nozzle corresponds to the distance between the nozzle and the object.



L0: DISTANCE PROBE to PROBE
KW: REFERENCE LENGTH
LW1-8: WATER LENGTH
K: 15.00/KW (VELOCITY CORRECTION)

Outside diameter $OD = L_0 - (L_{W1} - L_{W2})K$
Wall thickness $T_1 = W_{T1}, T_2 = W_{T2}$
Inside diameter $ID = OD - (T_1 + T_2)$

Fig. 5. Principle of thickness and outer/inner diameter measuring system for seamless pipes: Two ultrasonic probes mounted in nozzles are used in one set at both sides of a pipe.

を示すが、3dBの信号変化幅に収めるには、垂直入射から $\pm 1.5 \sim 1.8^\circ$ 以内にする必要がある。もしくは、適切な補助手段を設けて、ノズルの姿勢制御をおこなう必要がある。また、もう1つの留意点は、水中での音速の温度依存性である。常温におけるその温度係数 K は、 $K = 0.16\%/^\circ\text{C}$ とされるが、 $0 \sim 65^\circ\text{C}$ における変化はFig. 3のごとくである。筆者らの実験データも従来の試験データとよく一致していた。水温の変化による測定誤差 Δl は、例えば水柱距離を100mm、温度変化を 10°C とすれば、常温範囲において、

$$\Delta l = 100 \times 10 \times 0.16 \times 10^{-2} = 1.6 \text{ mm}$$

となる。従つて、必要精度に応じて適切な水温補正手段を講ずる必要がある。

2.2 電気抵抗式水柱距離計

Fig. 4に電気抵抗式水柱距離計の原理を示す。水柱が測定子となつており、その長さによつて水柱の電気抵抗値が異なることを利用している。水を噴出するための

ノズルには、定電流源によつて電圧が印加され、またチューブを通じて水源より水が供給されている。このチューブは、ノズルから水源に向かつて流れる電流を事実上無視し得るほどの微小にするために、十分な長さが確保されている。定電流源の出力電流は、ノズル、水柱、対象物を通して接地される。この回路における抵抗はほとんどが水流によるので、定電流源の出力端子間に生ずる電圧は水柱の高さに比例する。ノズルチップは安定した水流を噴出する構造になつており、また上方からノズル内部へ水滴、ミルスケールなどが侵入しないくふうと、エアバージが施されている。この距離計の精度は、 $2\sigma = 1.02\%$ が得られた。

3. 応 用

3.1 パイプ材の寸法測定装置

パイプ材の外径・内径寸法や肉厚は、重要な管理項目でありながら、オフラインの手作業で測定が行われてきた。このため圧延の自動化がはかれず歩留りや生産性向上の障害になつていた。ここで紹介する超音波水柱距離計の応用例は、中径および小径シームレスパイプの冷間寸法測定装置である。当装置は現在別に開発したシームレスパイプの熱間肉厚計とともに、パイプ製造の自動化に大きく貢献している。

Fig. 5は、パイプ材の寸法測定の原理図である。図のごとく、2つの超音波測定ヘッドを、被測定対象パイプの軸芯を通るように、対向して配置すれば、この測定ヘッドとパイプ外面までの水距離、 L_{W1} 、 L_{W2} を得ることができる。したがつて、図のようにこの2つの測定ヘッドの間隔 L_0 をあらかじめ定めておけば、外径寸法 OD を求めることができる。

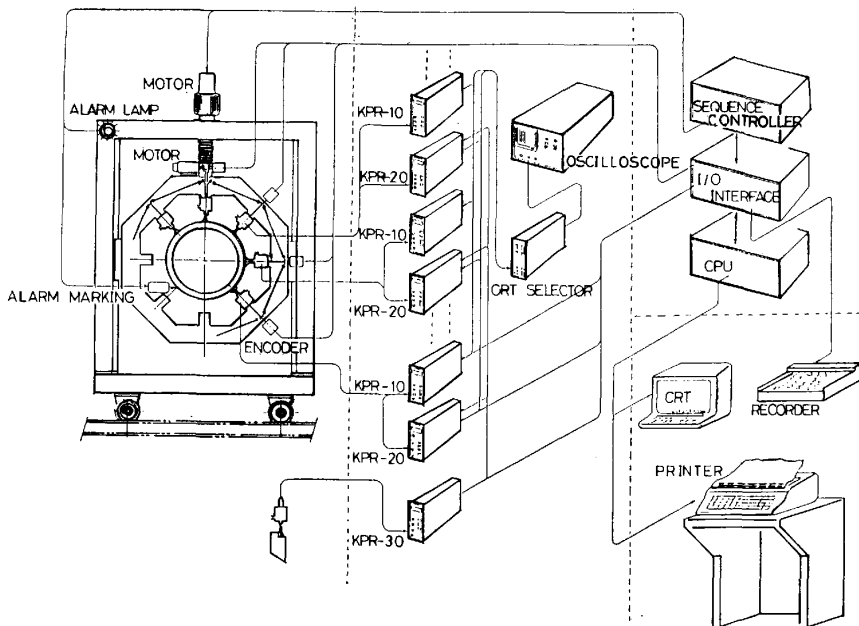
$$OD = L_0 - (L_{W1} + L_{W2})$$

この時、パイプの管壁における超音波の多重反射の間隔を測定することによつて、肉厚情報 T_1 、 T_2 を知ることができる。また外径値とこの肉厚値より、内径 ID を求めることができる。

筆者らは、このような方法により、直径20mm~175mmのいわゆる小径シームレスパイプと、直径177.8mm~431.8mmの中径シームレスパイプの肉厚・外径等の寸法をオンラインで自動測定する装置を開発・製作した⁴⁾。

3.1.1 中径鋼管用自動寸法測定装置

実施例では、中径シームレスパイプはVローラコンベア上を最大90m/minで送られる。Fig. 6に当測定装置の構成ブロック図を示す。パイプの外周近傍の同一断面上に、 45° ピッチで超音波水柱距離計が配置されてい



KPR-10 : Thickness measurement module
 KPR-20 : Water path measurement module
 KPR-30 : Standard water path measurement module
 Fig. 6. Basic construction of dimensional measuring system for pipe.

る。8ヶの測定ヘッドの各々の探触子とパイプ表面の間は、水柱でカップリングされており、その間隔は約 100 mm である。水柱ノズル先端との間隔は約 30 mm である。探触子を含む測定ヘッドは、八角形のフレーム上に配置され、各々中心方向へ移動できるようになっている。またフレーム自身も、Vローコンベア上を流れる被測定パイプの軸心位置と、8ヶの測定ヘッドの中心が合致するように、上下移動できるようになっている。この測定装置の上流には、異径検出器が設置されており、測定装置の設定と異なったパイプの侵入を防止している。これらの各機器は、被測定パイプの外径サイズを設定することによって遠隔自動で位置決めされる。

8ヶの測定ヘッドには、肉厚測定のための変換器ユニットと、水距離を測定するためのユニットが、各々接続されている。肉厚および水距離は、各ユニット表面にデジタル表示されるとともに、アナログ信号を後段のデータ処理装置へ出力する。データ処理装置では、測定値の連続性などの合理性チェックを行った後、各測定項目の最大値・最小値の検出、偏径差・偏肉率・平均肉厚などを算出する計算処理、およびあらかじめ設定されている規格管理値との比較判別を行う。比較判別で規格外れがあつた時は、現物パイプの該当部分の表面にマーキングして手入ヤードに搬送するようにしている。測定結果は、不良品除去のためのマーキング装置への出力、モニタ用としてのアナログ記録、ロットデータの集計のためのプリンタにより出力される。Fig. 7 にアナログ記録の例を示す。また、規格値のインプットやデータ処理の

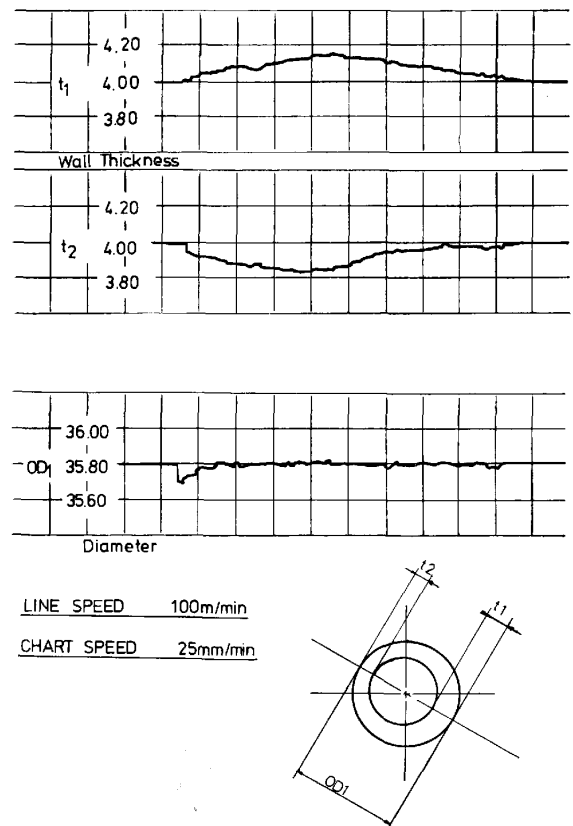


Fig. 7. Analog chart record of wall thicknesses t_1 , t_2 and outer diameter OD_1 .

ために、対話用のキーボード付き CRT も装備されている。

以上の構成により、当装置は最大速度 90 m/min で流れる被測定パイプを、長さ方向 20 mm ピッチで、外径 4 点、肉厚 8 点の測定を行うことに成功している。稼

動後約 1 か年間、各班の始業点検時にテストパイプを流して総合チェックを行っているが、繰り返し測定精度は N 数 769 において外径 0.09 mm、肉厚 0.04 mm (3σ) 以内に入っていることが確認された。

3.1.2 小径鋼管用自動寸法測定装置

構成は前項の中径鋼管用の装置とほぼ同じだが、被測定物が小径であるために次の 3 点だけが異なっている。

(1) 小径、特に直径 20 mm 前後のパイプには、周辺に多数の測定ヘッドを配置することが困難である。パイプの外径 4 点、肉厚 8 点の測定を行うために、鉛直・ $+45^\circ$ ・ -45° ・水平の 4 断面に分け、各断面にそれぞれ一定間隔を置いて、相対向する 2 つの測定ヘッドを設置した。

(2) 4 断面に分離したため、測定ヘッド群の芯と被測定パイプの軸芯のずれが、特に外径測定において大きな誤差要因となる。そこで上記測定ヘッド群の前後に求心ピンチローラを設けた。このローラによつて軸芯のずれは、 ± 0.5 mm 以下にすることができた。

(3) データ処理装置では、4 箇所からの情報を 1 断面上の情報に置きかえて、以後の処理を行った。

Photo. 1 は、小径鋼管用自動寸法測定装置の測定中の状況である。

3.2 熱延幅計

ホットストリップミルの粗圧延あるいはアタッチドエッジ付き厚板圧延材の圧延では、通常縦ロール・水平ロールの組み合わせで圧延され、所定の板厚と板幅を得る。圧延特性の解析や板幅制御システムの開発さらには閉ループ制御用に、各ミルの入・出側で板幅を測定することが必要となる。一般にエッジは、ミル定数が小さいこと、構造上機械間のガタが多く存在することのために、ゲージメータ式では実際のロール開度あるいはエッジ出側板幅を正確に把握することができない。したがつてこれらを正確に測定できれば、板幅精度を大幅に向上させることができる。特にトリミングフリー・プレー

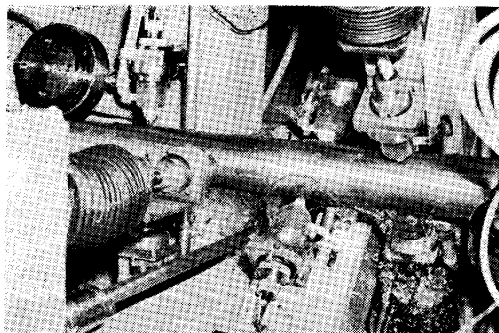


Photo. 1. Ultrasonic dimension measuring system for small seamless pipes.

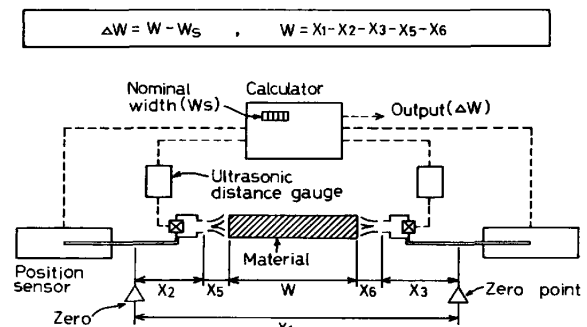


Fig. 8. Measuring principle of width gauge using ultrasonic distance meter.

トを製造する上ではきわめて重要な課題となる。

しかしながらミルの近傍は、デスクレーンやロールクーラントなどの飛散水が存在し、きわめて悪い環境にある。特にエッジミルと水平ミルの間は環境条件が劣悪で、設置スペースも狭い。当節ではこれらの困難を克服し測定を可能とした例として、ホットストリップミルエッジ出側幅計と、厚板エッジロール開度計について述べる。

3.2.1 ホットストリップミルエッジ出側幅計

ホットストリップミルのエッジミルと水平ミル間での板幅測定では測定環境がきわめて悪くまた設置スペースも 200 mm 程度と狭い。このため従来の幅計、特に光学式幅計はその空間条件から使用不可能と判断した。そこでこのような悪条件下でも使用可能と考えられる超音波水柱距離計を応用した幅計を試作した⁴⁾。

Fig. 8 に測定原理図を示す。超音波水柱距離計を、エッジミルのヨーク部に取り付け、エッジガイドに設けた穴を通して、圧延材の側端部までの距離 (X_5 , X_6) を測定する。一方超音波水柱距離計の、原点からの距離 (X_2 , X_3) を位置発信器で測定する。この位置発信器には、直線型変位計を用いている。2 つの原点間の距離を X_1 とすると、圧延材の板幅は次式によつて得られる。

$$W = X_1 - X_2 - X_3 - X_5 - X_6$$

演算器では、 X_2 , X_3 , X_5 , X_6 から板幅を計算し、別に設定された公称板幅との偏差を求めている。

以下に当出側幅計の仕様を示す。

- (1) 超音波水柱距離計
 - a. 測定範囲：2.0~90.0 mm
 - b. 精度： ± 0.2 mm 以内
 - c. 測定サイクル：300~1 000 Hz (可変)
- (2) 位置発信器
 - a. 測定範囲：0~1 000 mm
 - b. 精度： ± 0.2 mm 以内
- (3) 演算器

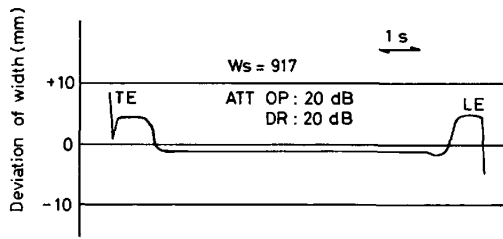


Fig. 9. An example of measurement results of width gauge using ultrasonic distance meter.

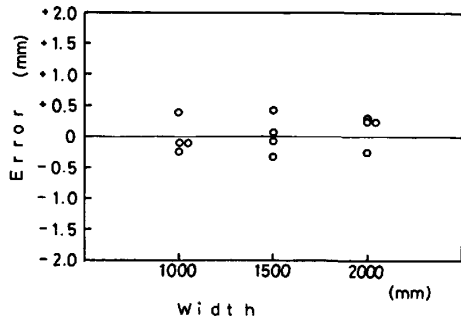


Fig. 10. Calibration results of ultrasonic water column distance meter.

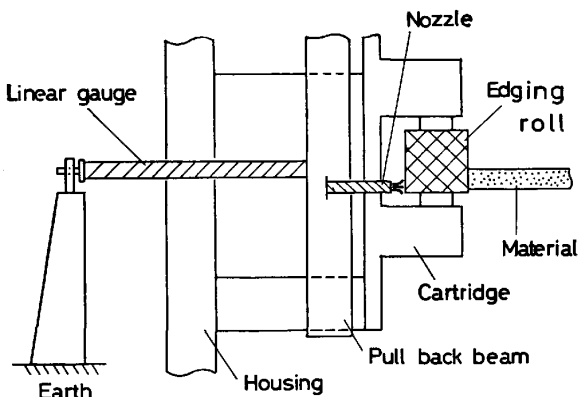


Fig. 11. Roll position sensor installed in the heavy plate mill: The nozzle of the ultrasonic distance meter is installed at the roll pull back beam.

- a. 演算精度: ± 0.5 mm 以内
- b. 演算サイクル: 5ms

オンライン測定の結果、今回試作した幅計は前述した悪条件下での測定が可能であることがわかった。Fig. 9 に測定結果の一例を示す。また、Fig. 10 に示すごとく、校正片による再現性は、 ± 0.5 mm 以内であつた。

3.2.2 エッジロール開度計

このエッジロール開度計は、アタッチドエッジ付き厚板圧延機に設置予定のものである。Fig. 11 にロール開度計の設置状況図を示す。図において、エッジミルの縦ロールを支えるロールプルバックビームに、超音波水柱距離計のノズルを支持させる。ノズルは水平固定・垂直可動方式である。ロールの通常圧延される部分まで

の距離だけでなく、ロールのプロフィールも測定することが可能である。ロールプルバックビームの原点からの距離は、エッジ出側幅計と同様に、直線型変位計によって測定する。以下に当開度計の仕様を示す。

- (1) 超音波水柱距離計
 - a. 測定範囲: 60~135 mm
 - b. 精度: ± 0.1 mm 以内 (再現性)
 - c. 測定サイクル: 250~2 000 Hz (可変)
- (2) 位置発信器
 - a. 測定範囲: 0~2 000 mm
 - b. 精度: ± 0.15 mm 以内
- (3) 演算器
 - a. 演算精度: 0.1 mm 以内
 - b. 演算サイクル: 5 ms

3.3 熱間圧延の平坦度計

熱延鋼板の平坦度は、板厚、板幅、クラウンなどと共に重要な管理指標である。圧延機出側の鋼板のオンライン測定は、冷延鋼板では板幅方向の張力分布を測定する必要があるのに比べ、鋼板の上下変動すなわち鋼板までの距離を測定すればよい。しかしながら検出器が常時高温にさらされること、水蒸気が多く、水滴やスケールが飛散する雰囲気にあることなどの悪条件下がある。

Fig. 12 は、ホットストリップミル出側での熱延鋼板平坦度計の構成図である。圧延機出側のテーブルローラの中に、3ヶの電気抵抗式水柱距離計を配置している。両側の距離計には位置設定器が付いており、圧延材の板幅に応じて圧延材ごとに設定される。ノズルから鋼板に噴出させる水は、アキュムレータ、流量調節弁を介して供給される。アキュムレータには、導電率計が取り付け

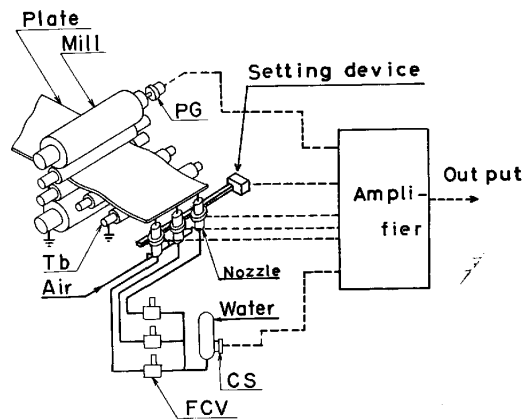


Fig. 12. System configuration of flatness measuring system for hot strip: Three electric resistance measurement type distance meters are installed at delivery side of finishing mill. The crosswise positions of them are set according to the width of the strip.

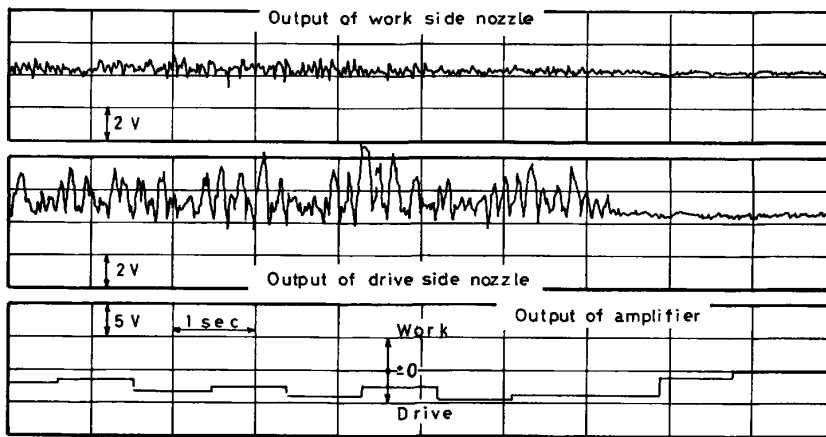


Fig. 13. An example of the output of flatness sensor using water column distance meter.

れられており、水柱の電気抵抗値の補正に使用される。ノズルに印加された電流は、ノズル・水柱・鋼板・ローラを通して接地される。

当平坦度計の装置仕様を以下に示す。

- (1) ノズル本数 : 3
- (2) ノズル寸法 : $\phi 92 \text{ mm} \times 157 \text{ mm}$
- (3) 供給水水量 : 250 l/h
- (4) 水柱直径 : $\phi 5 \text{ mm}$
- (5) 供給水導電率計レンジ : 30~200 $\mu\text{S/cm}$
- (6) 信号処理サンプリング周期 : 3.3 ms

Fig. 13 はオンライン測定結果の一例である。下段の端のび量と共にワークサイド、ドライブサイドの距離計の出力も記録している。各距離計の信号は、板速度によつて急峻度（板波のピッチに対する高さ％）に変換される。中のびは両端の急峻度の平均値と中央の急峻度との差で、端のびは両端の急峻度の差で表される。このため、鋼板に上下方向のばたつきがあつてもそれが幅方向に一樣であればこの影響はうけない。鋼板の先端がコイラに巻き取られ始めると張力が発生し、見かけの板波が減少し、当平坦度計の信号も減衰する。回転軸に円板を傾斜させて取り付けた模擬板波を当平坦度計で測定したところ、急峻度で $2\sigma=0.22\%$ の精度が確められた。この値は熱延鋼板の平坦度が急峻度で通常5%程度であるので、十分な測定精度である。

4. 結 言

以上5つの応用例を紹介したが、なぜその場面で他の方式ではなく、水柱距離計が使われたかを再考してみる

と、悪（特殊）環境と非接触測定との2つが大きな理由であつた。狭隙、振動、粉塵、水蒸気、水滴などの環境条件に、小型で堅牢なプローブをもつて対処した。また、オンラインかつ連続測定のために、保全性の面から対象への非接触性が要求されるが、これに水柱というすぐれた媒体をもつて対処した。水柱は対象との衝突によつても破壊されず、可変長で、自身が常に新しい状態に再生されているというもので、非接触性を持つに準ずると言える。その他に、超音波距離計の方は、対象材が冷間であればその肉厚測定も可能という長所も有する。

寸法形状測定の新しいテーマが、生産性および製品々質向上のためのより高度なプロセス制御システム用に次々と要求されている。それらは、従来は測定が不可能であつたより困難な個所と条件下での測定であつて、とりも直さず上記の2つの水柱式の選定理由がますます強調される方向にあると言える。このような状況下で水柱距離計は、一方で種々の長所を持つ光学式の距離・寸法測定機と相互補完しつつ、今後1つの重要な技術としての発展が期待される。

文 献

- 1) 川村紘一: センサー技術, 3 (1983) 4, p. 82
- 2) 川鉄計量器(株)カタログ「超音波連続寸法測定装置」(1983年5月)
- 3) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 川崎製鉄技報, 10 (1978), p. 370
- 4) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第70回計測部会 (1978年11月) 川崎製鉄(株) (私信)
- 5) 福高善己, 植木 茂, 川村紘一: 鉄と鋼, 68 (1982), S 404