

## 技術報告

## 熱間水流超音波距離計

松村 勝己\*・寺尾 精太\*・国田 建司\*  
岡 良徳\*・坪井 勇\*<sup>2</sup>

## Ultrasonic Displacement Meter with Water Column for Hot Steel Product

Katsumi MATSUMURA, Seita TERA0, Kenji KUNITA,  
Yoshinori OKA and Isamu Tsuboi

## Synopsis:

We adapted an available displacement meter for measuring the shape of the hot steel product in the continuous casting machine and the rolling mill. The meter is an ultrasonic level one, but it uses a water column instead of atmosphere as the propagation medium.

The characteristics of the meter are summarized as follows:

- (1) Its effective range is about 100 mm, and the resolution is 0.05 mm.
- (2) It is strong and reliable with usage of water column, therefore useful for in-line measurement.
- (3) It is useful for the hot steel product as a target.

### 1. 緒 言

近年、多様化し高級化する製品ニーズに対応する手段として、製品の寸法形状を計測する技術開発が重要視されている。特に铸造機や圧延機内で製品の加工を直接制御するためのセンサの早期完成が待たれている。その課題は、冷却水や粉塵が大量に飛散し、かつ高温にさらされる苛酷な動作環境下で、高い信頼性を維持することと製品々質に影響を与えないために非接触で、対象物の位置を高精度に連続測定できることの2つである。

筆者らは、このような悪環境下で観測可能な種々の信号と、それに潜在する情報やパラメータを検討した結果、ノズルからの噴流水を対象材に衝突させ、その水流柱の長さから対象材の表面位置を求める方法に着目した。

従来、電気抵抗式水柱距離計の実用化<sup>1)</sup>の例もあるが、筆者らは超音波を利用する方式の研究を行った。

本論文ではこの水流を利用する超音波距離計の①ノズル噴流水中の超音波伝播特性と②熱間鋼材表面での沸騰反射特性に関する実験結果と考察及び③2件の実用化例を報告する。

### 2. 原 理

#### 2.1 背景となる超音波の特徴

水流柱の長さ計測に超音波を利用する方法について、

特徴的な超音波の性質はつぎのとおりである。

##### 2.1.1 波長が短い

超音波パルスの反射で時間計測をする場合、あるしきい値を越える音圧を有するエコーを検出する。この検出時刻のばらつきは、エコーの急しゆん度によつて決まり、波長  $\lambda$  と速度  $c$  に対し、最大  $\lambda/4c$  以内である。一般の金属用超音波探傷センサの周波数 (2~10 MHz) に限定すると、水中での波長  $\lambda$  は 0.15~0.75 mm であり、0.1 mm 程度の分解能が得られる。

また音源となるセンサの径  $D$  (約 10 mm) に対し、波長が短いので、指向性が鋭く (5 MHz で約 0.9 度)、大部分の超音波は水流中の中心部を伝播する。

##### 2.1.2 境界での反射率が高い

気体、液体及び固体の性質が音響的にいちじるしく異なるため境界面での反射率が高い。したがつて水流の外に漏れる超音波は少なく、対象物表面で反射したエコーをよくとらえることができる。

#### 2.2 測定原理

Fig. 1 に水流を利用した超音波距離計の信号処理の概要を示す。水はノズルを有する容器内に連続的に供給され、整流機構で渦流成分を抑制した後、ノズルから噴出し、対象物との間に水流柱を形成する。超音波センサはノズルの中心軸上の水中に置かれ、噴流中心軸方向に超音波パルス  $T$  を発振し、対象物表面で反射した超音波

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 9 日受付 (Received Nov. 9, 1983)

\* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

\*<sup>2</sup> 日本鋼管(株)福山製鉄所 (現: 日本鋼管(株)鉄鋼技術部) (Fukuyama Works, Now Iron and Steel Technology Department, Nippon Kokan K. K.)

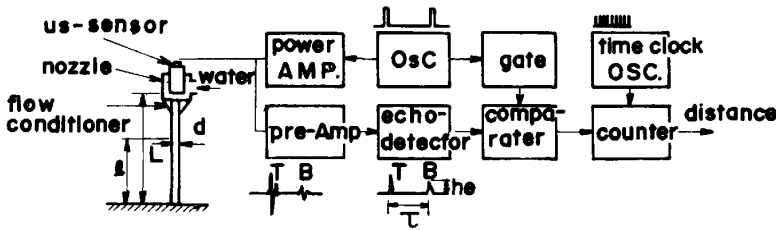


Fig. 1. Schematic diagram of signal processing of the displacement meter by ultrasonic reflection in water column.

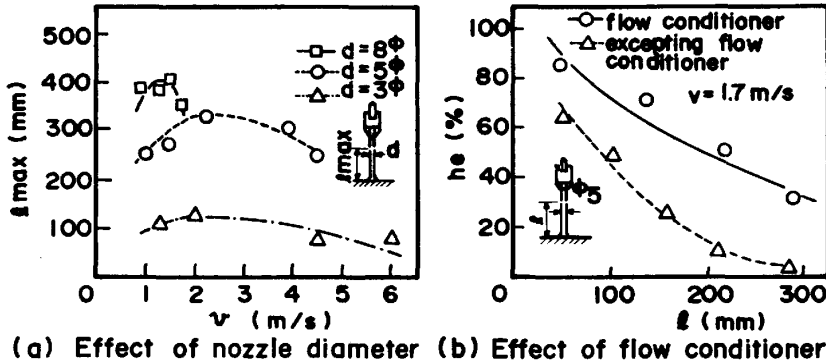


Fig. 2. Influence of the nozzle parameters.

エコー B を検出する。超音波パルス T の発振から、エコー B の受信までの時間  $\tau$  は図に示すような市販の超音波探傷装置の標準的な回路構成で計測され、その値は次式のとおり、超音波センサと対象物表面との間の距離  $L$  に比例する。

$$\tau = (\text{対象物までの到達時間}) + (\text{エコーが戻る時間}) \\ = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2cL}{c^2-v^2} = \frac{2L}{c} \dots\dots(1)$$

ここで  $c$  は水中における音速 (約 1500 m/s)  
 $v$  は噴流水の流速 (約 2~3 m/s)

### 3. 基礎実験

#### 3.1 超音波周波数の選択

周波数を選定するにあたって、距離測定の分解能を 0.1 mm 以下、測定レンジを 100 mm、水流柱の中心 4 mm $\phi$  を測定領域と決めた。水流柱の長さ測定における各種計測パラメータと周波数の関係はつぎのように整理できる。

(1) 距離分解能  $r = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \dots\dots(2)$

(2) 指向角  $\theta_w = 29 \frac{\lambda}{D} = 29 \frac{c}{Df}$  (度)<sup>2)</sup>  $\dots\dots(3)$

ここで  $\theta_w$  は 80% のエネルギーが集中する片側の角度、 $D$  は振動子の直径

(3) 減衰  $\alpha = 2.3 \times 10^{-3} f^2 \text{MHz}$   
 (dB/cm)  $\dots\dots(4)$

$P_x = P_0 e^{-0.115 \alpha x} \dots\dots(5)$

ここで  $P_0$  は  $x=0$  における音圧、 $x$  は音波の伝播

距離、 $P_x$  は距離  $x$  だけ伝播後の音圧、 $\alpha$  は 10mm $\phi$  ノズルでの水の減衰定数実験値<sup>3)</sup> である。

(2) 及び (3) 式より当初定めた分解能と測定範囲を得るためには  $f$  は 4 MHz 以上必要である。

またエコーの発振パルスに対する減衰率を 10 dB 以上確保し、100 mm の距離計測を可能とするには (4)、(5) 式で  $-10 = 20 \log_{10} (P_x/P_0)$ 、 $x = 20 \text{ cm}$  とおき  $f \leq 6.7 \text{ MHz}$  を得る。これらの条件から、超音波周波数は市販の 5 MHz を選んだ。

#### 3.2 ノズル構造

Fig. 2 はノズル構造を決定するための実験結果で、(a) はノズル径  $d$  とノズルの出口流速  $v$  を変えて、測定可能距離  $l_{\text{max}}$  を求めたものである。この結果  $l_{\text{max}}$  が比較的大きく、水流速変化に対する安定性も良い点を考慮しノズル口径を 5 mm、水流速を 2~3 m/s と決定した。(b) は水流の渦成分が超音波エコー高さ  $h_e$  に与える影響を整流板の有無によつて比較したものである。整流板はノズル絞り部に薄鋼板で井げたを形成した簡単なものであるが、水流中の減衰を低減する効果が認められた。

#### 3.3 水流柱の方向

Fig. 3 はノズルの姿勢によつて水流柱の方向を変え、測定距離  $l$  とエコー高さ  $h_e$  の関係を、流速  $v$  をパラメータに測定したものである。いずれの方向に対しても 100 mm までの距離計測が S-N 比 5 以上で可能である。

#### 3.4 測定精度

##### 3.4.1 水温変動による理論誤差

水中での音速  $c$  は、水温  $t$  によつて変化する。設計基

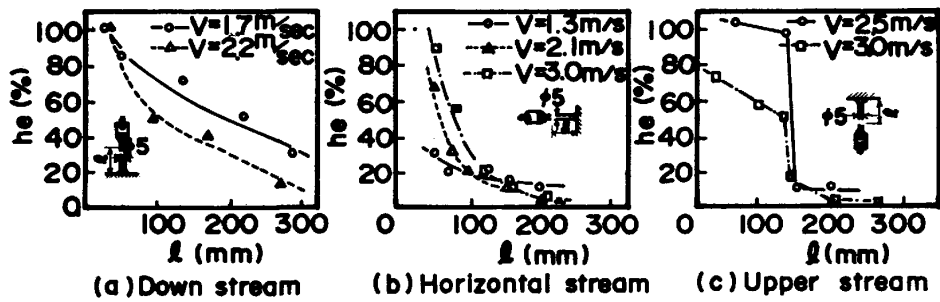


Fig. 3. Influence of the stream direction.

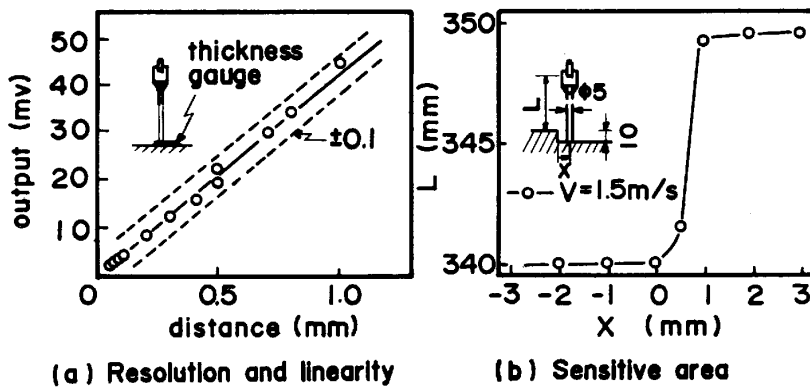


Fig. 4. Sensitivity of displacement.

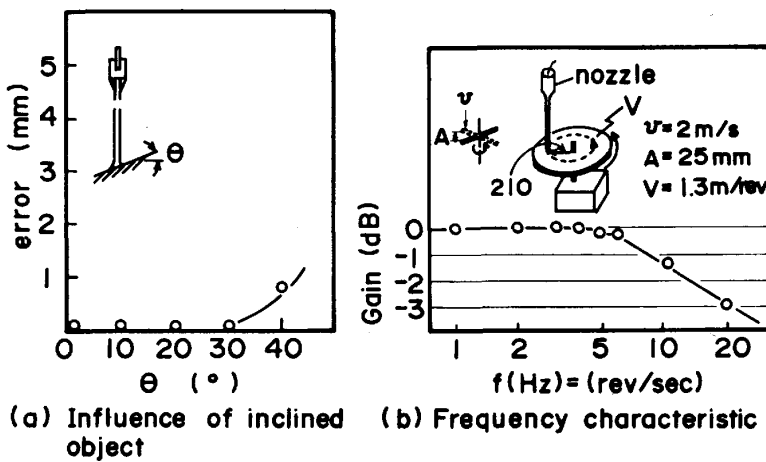


Fig. 5. Influence of inclined object and dynamic characteristic.

準温度  $t_0$  に対し、実際の水温  $t$  の時の距離測定理論誤差  $e(t)$  は

$$e(t) = \left\{ 1 - \frac{c(t_0)}{c(t)} \right\} \times 100 [\%] \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $c(t)$  は  $t^\circ\text{C}$  の水中での音速 (m/s)

ちなみに  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  に対し、100mm の距離を 0.5mm の精度で測定するには、水温変動を 2deg 以内に押さえる必要がある。

3.4.2 距離計測の分解能

Fig. 4 (a) はすきまゲージを用いて、距離変化に対する距離計の出力の直線性、分解能を測定した結果で、 $\pm 0.1$  mm の直線性と、0.05 mm の分解能があることが

わかった。この値は(2)式において  $f = 5$  MHz とした時の  $r$  にほぼ一致する。

Fig. 4 (b) は水流の太さ方向の位置  $x$  に対する距離出力  $L$  の変化を測定したもので、水流の中心部の約 1 mm  $\phi$  の部分の形状変化を検出する能力があることがわかった。この値は(3)式の指向角  $\theta_w$  の約 10 分の 1 に相当する。

3.4.3 対象面の傾斜の影響

Fig. 5 (a) は下向き水流に対する対象面の水平面からの傾斜角  $\theta$  に対する距離測定誤差を測定した結果で、30 度までは誤差が出ないことがわかった。

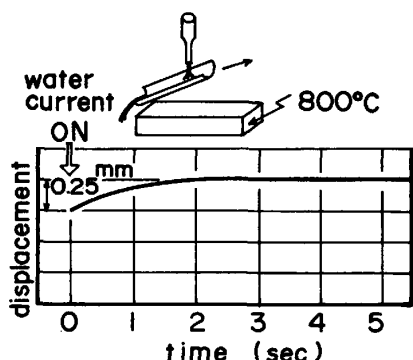


Fig. 6. Measurement of vapor thickness on the hot steel surface.

3.4.4 周波数応答

Fig. 5 (b) は上の結果を利用して、傾斜回転円板により振幅 25 mm の正弦波周波数応答試験を行つた結果であり、そのしや断周波数 (-3 dB) は 20 Hz であつた。この値は水流の流速  $v$  よりも、距離の平均変化速度の方が大きくなる点と一致する。この周波数を  $f_c$ 、振幅を  $A$  とすれば、

$$v = (2/\pi) \times 2\pi f_c A = 4f_c A \quad \dots\dots\dots (7)$$

3.5 熱間対象材表面での沸騰反射特性

熱間対象材に噴流水が衝突する部分では、膜沸騰現象により水蒸気膜が形成され、反射エコーは水と蒸気の境界面で発生すると考えられる。Fig. 6 は 800°C の鋼材に水流を当てた瞬間から、水流によつて鋼材が冷却され、水蒸気膜が無くなるまでの約 5s 間の距離出力の変化を示す。この実験では 800°C の鋼材に対する膜沸騰厚みは 0.25 mm であつた。

4. 考 察

4.1 ノズル噴流水中の超音波の伝播

ノズルからの噴流水中では、流れの変化にとまらう三次元の密度、流速変化があり、これと超音波の伝播特性の関係を明らかにしておく必要がある。筆者らは次の2つのモデルで、実験結果を考察した。

4.1.1 伝播経路の定性モデル

Fig. 7 (a) は下向きノズルの噴流水の流れをモデル化したもので、水流はノズル出口部で管壁の拘束が無くなり、自由な表面を持つ自由噴流になる。表面の粒子には表面張力が働き、周囲の空気を巻き込みながら微粒化し液滴となる。この変化は周囲から内側に進み、噴流の中心部に元の流速分布をもつた領域がくさび状に残る。この部分はポテンシャルコア (Potential core) と呼ばれ、超音波はこの内部を伝播する。

また重力の影響によつて距離  $l_1$  では速度が  $\sqrt{v^2 + 2gl_1}$  となるため、水の粘性が重力に勝つ範囲内で、水流の大

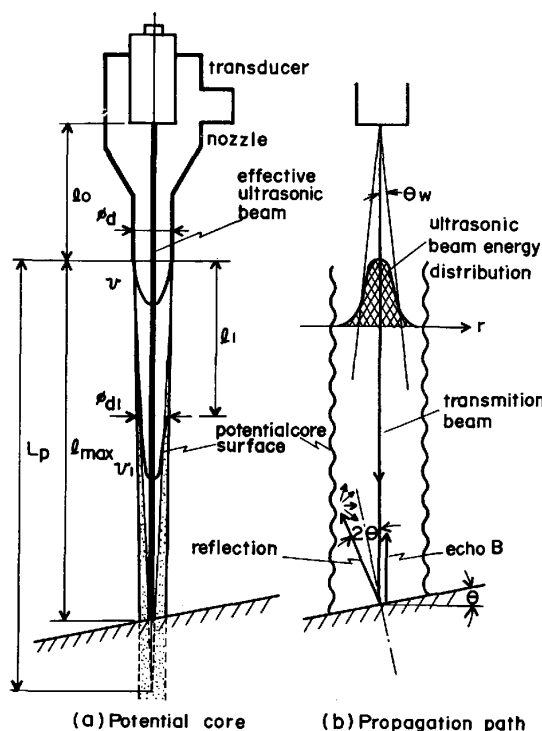


Fig. 7. Model of the ultrasonic propagation path in water column.

さ  $d_1$  は減少する。

Fig. 7 (b) は対象物面での反射波の伝播経路をモデル化したもので、中心軸の方向に戻るエコー B と、 $2\theta$  の角度で反射するエコーがあり、後者はポテンシャルコアの表面で散乱反射し、検出されない。実験 3.4.3 の結果は、このモデルが 30 度の傾きまでに適用できることを示す。

4.1.2 測定可能距離の定量モデル

4.1.1 のモデルから水流を利用した超音波距離計の測定可能距離  $l_{max}$  は、超音波の距離測定有効指向角  $\theta_e$  がつくる直円錐と、これと同軸上に存在するポテンシャルコア (底の直径が  $d$  で高さ  $L_p$  の逆直円錐) が交わる面のノズル先端からの距離に等しくなるはずである。すなわち、

$$(l_{max} + l_0) \tan \theta_e = (L_p - l_{max}) (d/2L_p) \dots\dots\dots (8)$$

ここで  $l_0$ ; センサからノズル先端までの距離

$L_p$ ; 噴流のポテンシャルコアの長さ

で、水の密度  $\rho$ 、粘度を  $\mu$ 、表面張力を  $\sigma$ 、重力の加速度を  $g$  とし、 $L_p = f(\rho, \mu, \sigma, g, v, d)$  と仮定すれば、

$$r = \frac{L_p}{d} = f\left(\frac{\rho v d}{\mu}, \frac{\rho v^2 d}{\sigma}, \frac{v^2}{g \cdot d}\right) = f(Re, We, Fr) \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $Re$  はレイノルズ数 (Reinolds number),  $We$  はウェーバー数 (Weber number),  $Fr$  はフルード数

(Froude number) である. この無次元数  $\gamma$  を用い, 更に  $\theta_e$  を (3) 式の  $\theta_w$  に対し,  $\theta_e = k\theta_w$  と置くことで (8) 式を  $l_{max}$  について整理すると

$$l_{max} = \frac{\gamma(d-l_0 \cdot k\theta_w)}{1+2\gamma \cdot k\theta_w} \quad \text{ただし } \tan(k \cdot \theta_w) = k\theta_w \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式を Fig. 2 (a) の  $d=5\phi$  と  $8\phi$  の 2 つのケースについて適用すると,  $l_{max}$  とそれに対応する  $v$  がそれぞれ 330 mm ( $v=2.5$  m/s), 400 mm ( $v=1.5$  m/s) であり,  $L_p$  の値はノズルからの噴流が全量液滴化する長さとして, それぞれ 700 及び 900 mm と観測されたので, 共通の条件  $\theta_w=0.87^\circ$  ( $D=10\phi$ ,  $f=5$  MHz) と  $l_0=100$  mm を代入し,  $k$  を逆算した結果,  $k=0.23$  及び  $k=0.32$  が得られ, かつ  $l_{max}$  を与えるレイノルズ数は両方共  $Re=12 \times 10^3$  で一致した.

4.2 熱間鋼材表面での沸騰反射特性

Fig. 8 (a) は層流に近い水の鋼材表面での沸騰曲線を示し, 約  $700^\circ\text{C}$  といわれる C 点から右の領域では連続的に蒸気膜が形成され膜沸騰領域と呼ばれる<sup>4)</sup>. Fig. 8 (b) はこれをモデル化した図で,  $V_s$  は蒸気膜部の体積,  $r$  はその半径,  $V_w$  はその上部を流れる水の体積である. 筆者らはこの蒸気膜が高速で走行または大きな熱容量をもつた鋼材表面では定常状態にあるものと想定

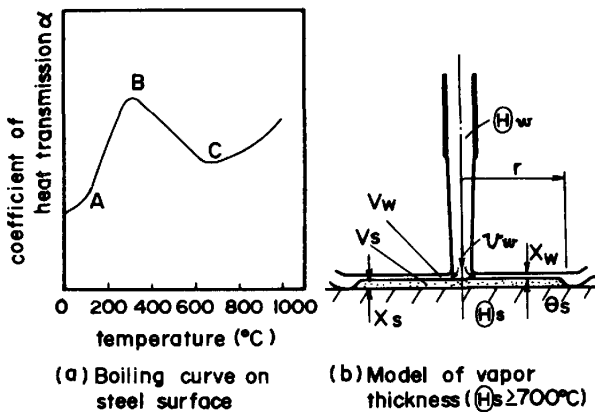


Fig. 8. Heat balance of the hot steel surface.

し, 物質バランスと熱バランスから(11)式を導出した.

$$X_s = 2.35 \times 10^{-6} \times \frac{\alpha(\theta_s - \theta_w)}{v_w(639 - \theta_w)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで  $\alpha$  は水流の衝突点における熱伝達係数<sup>5)</sup>,  $\theta_s$  は熱間鋼材の表面温度,  $\theta_w$  は水温,  $v_w$  は水流の衝突点流速.

Fig. 6 の実験条件  $\theta_s=800^\circ\text{C}$ ,  $\theta_w=20^\circ\text{C}$  などからの計算結果は 0.4 mm であり, 実験結果の 0.25 mm に近い値で一致したことから, (11) 式は水蒸気膜厚の補正に使える.

5. 実 用 化

Fig. 1 の構造の実用上の利点は, ①センサが水流によって冷却されること. ②噴流水を用いるため蒸気ミストや粉じんの影響を受けない. また高温環境下でも安定である. ③超音波パルス反射法を用いるため, 電磁気的環境にも影響されない. 等々である.

5.1 連続製造鑄型直下における鑄片形状計測<sup>6)7)</sup>

連続鑄造プロセスではその安定操業と品質管理上, 鑄片の形状計測が重要である. スラブの短辺形状計測のオンライン設備化の例を Fig. 9 に示す. ノズルは 3 個 1 体化し, 厚み 50 mm と小形であり, Photo. 1 に鑄型直下への取り付け例を示す. モールド直下では, 冷却水の飛沫が水流柱に衝突し, これがノイズになるが, マイコンの統計処理でこれを除去した. Fig. 10 は鑄込み速度を下げたバルジングを抑制した状況を示している.

5.2 H形鋼ウェブの中心偏り計測

圧延中に鋼の寸法形状を計測できれば, 圧延歩留りが飛躍的に向上する. この目的のために約 800 m/min で圧延中の  $700 \sim 1000^\circ\text{C}$  の H 形鋼のウェブ高さをオンラインで計測した. Fig. 11 はその測定位置と, 測定結果の一例である.

図 (a) においてカメラはフランジ足先の位置を光学的に測定し, ウェブ高さとの相対位置からウェブの中心からの偏りを計算するためのものである. 図 (b) は圧

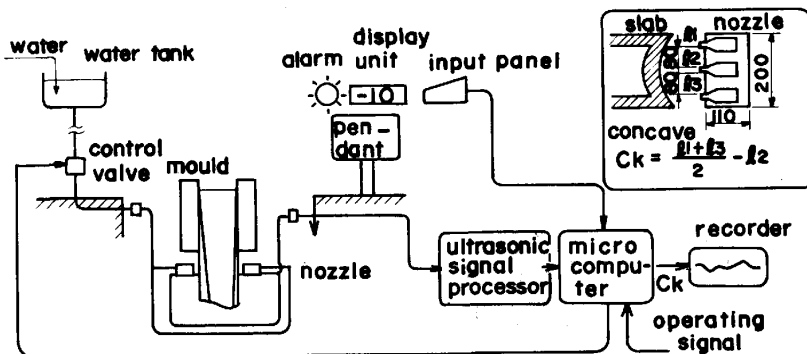


Fig. 9. Schematic diagram of the concave meter.

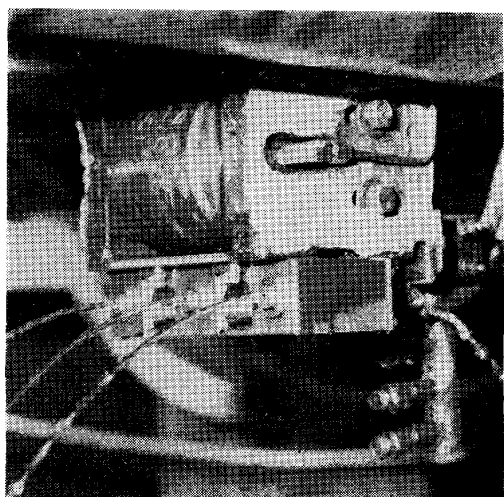


Photo. 1. Set up nozzle of the concave meter.

延先端と後端が通過する際に材料が圧下張力を受けず上にそつている状態と、張力がかかる中央部では形状変化をとらえていることを示している。

### 6. 結 言

連铸機や圧延機内部の悪環境下で実用化できる高精度距離センサとして熱間水流超音波距離計を開発、実用化した。その特徴は次のとおりである。

(1) 超音波はノズル噴流水の中心を伝播し、100mm程度の非接触計測が可能でその分解能は 0.05 mm である。

(2) 測定可能距離は主として噴流のポテンシャルコアの形状によつて決まり、その推定式を開発した。

(3) 700°C 以上の熱間鋼材に対しては、膜沸騰厚みを補正する必要がある、その補正式を明らかにした。

今後は、熱間プロセスのインライン計測に積極的に活用していく。

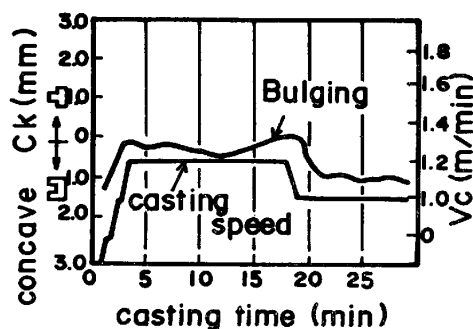


Fig. 10. Example of the prediction for breakout.

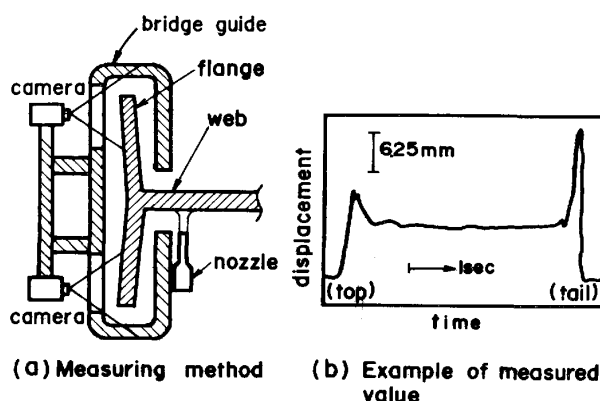


Fig. 11. Measurement of displacement of the wideflange beam in the Shape Mill.

### 文 献

- 1) 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 4, p. 370
- 2) 丹羽 登: 非破壊検査便覧 (日本非破壊検査協会編) (1978) p. 372-3 [日刊工業新聞社]
- 3) 学振製鋼第 19 委員会: 厚板の自動超音波探傷法第 2 次研究報告書 (昭和 43 年 10 月)
- 4) 一色尚次: 熱伝達特論 (1966), p. 92 [裳華堂]
- 5) 国岡計夫, 杉山峻一, 神尾 寛: 鉄と鋼, 62 (1976), S 618
- 6) 松村勝己, 寺尾精太, 石坂陽一, 瀬良泰三: 鉄と鋼, 68 (1982), S 849
- 7) 納 雅夫, 宮脇芳治, 石田寿秋, 寺田 修, 瀬良泰三, 岡良 徳: 鉄と鋼, 69 (1983), S 160