

電磁超音波による熱間継目無鋼管肉厚計の開発

論文

山口久雄*・藤沢和夫*・村山理一*・橋本晃一*²・中西廉平*²
加藤晃男*²・石川博章*³・門脇孝志*⁴・佐藤式也*⁵

Development of the Wall Thickness Measuring System Using the Electromagnetic Acoustic Technique for Hot Seamless Steel Tubes and Pipes

Hisao YAMAGUCHI, Kazuo FUJISAWA, Riichi MURAYAMA,
Koichi HASHIMOTO, Renpei NAKANISHI, Akio KATO,
Hiroaki ISHIKAWA, Takashi KADOWAKI and Ichiya SATO

Synopsis:

The electromagnetic acoustic transducer system has been developed for the measurement of hot seamless steel tubes and pipes. The system consists of tunnel type electromagnet which generates the strong axial magnetic field around the pipe, and six sensors including transmitting and receiving coils which are arranged between poles and around the pipe. The system can measure 6 circumferential points wall thickness of the pipe at the rate of 250 Hz.

The ultrasonic properties in hot steel such as velocity and sensitivity have basically been investigated. The measuring accuracy of the system has also been investigated in the laboratory and at No. 1 tube making plant in Kainan Steel Tube Works of Sumitomo Metal Industries, Ltd. The basic experiments showed that ultrasonic velocity can be calculated by measuring the surface temperature, and that the sensitivity changes due to the changes of air-gap and surface temperature can be compensated by AGC (automatic gain control) circuit. The system was positioned at the outlet of the finishing stand of the stretch reducer mill, and pipes of various sizes (42.7 mm–177.8 mm dia. × 3.2–25 mm thickness) were produced to measure the wall thickness. The results showed that the measuring accuracy was less than ± 0.1 mm.

1. 緒 言

継目無鋼管はケーシング、ドリルパイプ、チュービング等の油井管、ボイラチューブ、特殊ラインパイプ、機械構造用鋼管等に数多く用いられている。しかし近年、これら鋼管の使用環境はますますきびしいものとなり高付加価値化あるいは寸法の高精度化が要求されている。以上の観点から新材料の開発、あるいは製造工程の改良等による寸法精度改善が実施されてきた¹⁾²⁾。

しかし、従来の寸法精度改善は冷間での寸法測定結果あるいは熱間製造工程での試験的抜き取り品の寸法測定結果等からのデータによる間接的なものであった。

そこで、我々は寸法測定の一つとしてオンライン（熱間）での継目無鋼管の肉厚測定法の開発につき検討し

た。冷間での継目無鋼管の肉厚測定法は、従来より水浸法での超音波パルス反射方式により行われている³⁾が、熱間では、このような方式は使用できない。非接触な測定法等、何らかの有効な測定法が必要となる。非接触な測定方式としては、電磁超音波等を利用する超音波方式、あるいはX線、 γ 線を利用する放射線方式が考えられる。後者による熱間継目無鋼管の肉厚測定方式については既に実用化され報告されている⁴⁾が、この方式では原理的に工具等が内部にある場合には適用できず電磁超音波方式では、これが可能であるという長所を有している。そこで電磁超音波法による高速の肉厚測定方式について検討し、貫通型電磁石を有する熱間肉厚計測システムを開発した。このシステムを用い、電磁超音波の基礎特性及び肉厚計測精度について検討したので報告する。

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 住友金属工業(株)制御技術センター (Instrumentation and Control Technology Center, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)海南鋼管製造所 (Kainan Steel Tube Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ (株)日立製作所システム事業部 工博 (Systems Engineering Division, Hitachi, Ltd.)

*⁴ (株)日立製作所国分工場 (Kokubu Works, Hitachi, Ltd.)

*⁵ (株)日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

2. 開 発 目 標

2.1 適用場所

住友金属工業(株)の継目無鋼管の主要工場である海南鋼管製造所を対象として開発を進めた。Fig. 1 は海南鋼管第一製管工場の製造工程の段取例を概略フローにて示している。まず素材の丸ビレットをロータリーファネスで約 1250°C まで均熱後、ピアサで外径 $\phi 187$ mm, 肉厚 14.9~37.5 mm に回転穿孔する。その後マンドレルバーを通して、直交2ロール群で所定の外径肉厚まで圧延する。マンドレルミル圧延後、素管の後端を切り捨て、再加熱炉に挿入し最高約 1000°C まで均熱する。この均熱素管をストレッチレデューサにて絞り圧延し、所要の外径、肉厚に仕上げる。

Table 1 に代表的仕上げ寸法の鋼管についての圧延スケジュールを示す。

開発にあたっては、上記工程中のどこに適用すべきかを検討し、次の観点からストレッチレデューサ最終圧延スタンド出側での適用を第1目標とした。

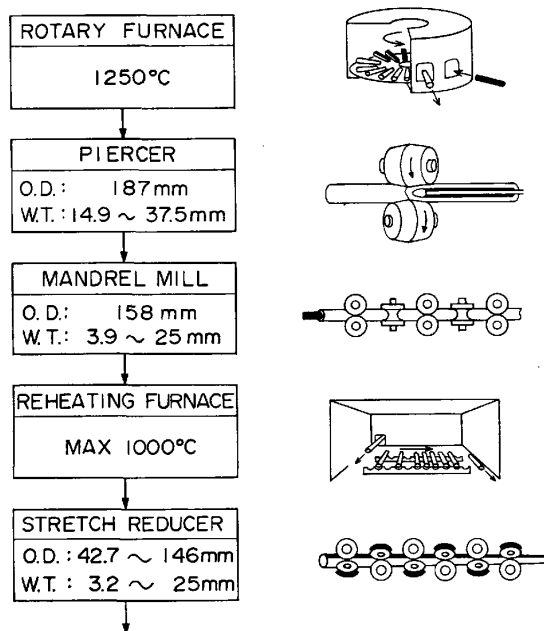


Fig. 1. Seamless pipe manufacturing process.

Table 1. Examples of rolling schedules (produced sizes at each mill : unit mm).

Billet	Piercer	Mandrel	Stretch reducer
187 ϕ .D.	187 ϕ .D. \times 20.5 ϕ	158 ϕ .D. \times 8.0 ϕ	42.7 ϕ .D. \times 7.0 ϕ
	\times 15.0 ϕ \times 18.5 ϕ \times 21.5 ϕ	\times 4.0 ϕ \times 6.0 ϕ \times 9.0 ϕ	60.3 ϕ .D. \times 3.5 ϕ \times 5.0 ϕ \times 8.0 ϕ
	\times 17.5 ϕ \times 37.5 ϕ	\times 5.0 ϕ \times 25.0 ϕ	114.3 ϕ .D. \times 5.0 ϕ \times 25.0 ϕ

(1) 各スタンドの3ロールによる圧延が交互に 60° ずつ円周方向にずれて行われており、比較的安定した状態でパイプが走行し測定装置の設計製作が容易である。

(2) ここでの肉厚測定は製品の肉厚保証に結びつく。

(3) 管端部では引張り力がかからないために増肉現象が生じるが、肉厚測定により適正な管端部切り捨て長さの決定ができ、歩留り向上に寄与できる。

(4) 各工程で生ずる肉厚変動(偏肉)の解析にも利用でき、圧延制御等に役立つ。

2.2 開発の際の考慮すべき要因

2.1 で述べた観点より、システムの開発に際しては次の点を特に考慮した。

(1) 非接触で連続高速の自動肉厚計測ができること。

(2) 円周方向複数点の計測ができること。

(3) ストレッチレデューサでの種々の製管サイズに適應でき、ストレッチレデューサに組み込める構造とすること。

以上述べた開発理念のもとに、Table 2 に示す開発仕様を決定した。

3. 電磁超音波法の原理と開発した方式

電磁超音波の発生は磁場と材料(導電体)表面に発生した渦電流との相互作用(ローレンツ力)により行われる。渦電流は材料上に配置したコイルに高周波パルス電流を流すことにより発生できる。磁場には渦電流自身による磁場、あるいは外部磁場が使用される。受信は、発生逆過程すなわち伝播してきた超音波による材料表面の振動と磁場との相互作用により生じた渦電流を材料上のコイルで検出して行われる。電磁超音波では、コイルの巻き方あるいは磁場の方向を変えることにより、たて波、よこ波、表面波等種々の波動様式(モード)が送受信できる^{5)~9)}。

肉厚計測の目的では、厚さ方向に伝播するたて波あるいは横波モードの利用が考えられる。しかしながら適用

Table 2. Specifications of developed wall thickness measuring system.

Item		Specification
Pipe size	Outer dia.	42.7-177.8 mm
	Wall thickness Length	3.2-25 mm max. 100 m
Producing condition at S/R mill	Temperature	700-900°C
	Line speed	3-10 m/s
	Cycle time	15 s/pipe
No. of measured points	Circum. direction	6
	Axial direction	10-35 mm pitch

温度 700~900°C では、横波は減衰が大きいことから、たて波モードの使用が適当である⁹⁾¹⁰⁾。たて波の発生については外部磁場の有無による 2 方式が報告されている⁹⁾が、本目的では 2 で述べた開発目標より次の制約条件を考えねばならない。

(1) 比較的薄肉の肉厚計測を精度良く行うためには、不感帯を小さくし、かつ分解能を上げる必要がある。

(2) 高速の計測を行うためには、超音波パルス繰り返し数を高くする必要がある。

これら制約条件を満足するには送信コイルに流す電流は余り大きく取らないことが得策であり、外部磁場をかけて送受信する方式が有効である。

外部磁場をかけての送受信では受信電圧 V_R は次式で表される。

$$V_R \propto B^2 I_T \dots \dots \dots (1)$$

ここで B は送受信コイル直下の材料表面での磁束密度、 I_T は送信コイルに流れる電流である。

(1) 式より感度を向上させるためには、静磁場の磁束密度をできるだけ大きくすることが必要である。そこ

で、ストレッチリデューサスタンド内に組み込み、かつ強力な静磁場が発生できる方式として、Fig. 2 に示す貫通型電磁石方式を検討した。この方式ではパイプを取り囲むように励磁コイルを巻いて起磁力を大きくし、かつその励磁コイルを磁極が取り囲む構造として磁極の先端に磁束を集中させるため鋼管表面での平行磁場を大きくできる。計算機シミュレーションによれば、送受信部直下で 1 テスラ以上の平行磁場が得られることがわかった。

以上の基礎検討をもとに Fig. 3 に示す熱間肉厚計測システムを製作した。図中の温度計は後述する表面温度変化に伴う音速変化を補正するためのものである。送受信コイルは周方向に 6 ケ所配置した。また種々のパイプサイズに適応できるように磁極部とセンサ部とは取り替え可能な構造とした。励磁コイル部は銅損による内部発熱を冷却するために水冷却し、磁極部及びセンサ部も材料からの輻射熱防護のために水冷却した。信号処理部は、超音波往復伝播時間及び表面温度を 250 Hz の高速で取り込み、音速の温度補正を行い肉厚を計算する。

4. 性能確認実験

3 で述べた貫通型電磁石方式は予想どおり磁極下 10 mm で 1 テスラ以上の磁束密度が得られた。そこで本装置を用いた場合の電磁超音波の送受信特性及び本装置の熱間肉厚計としての基本性能につき、冷間、熱間での基礎実験を行った。性能確認項目は次のとおりである。

- (1) 超音波送受信性能へのコイル-材料表面間距離(エアギャップ)及び表面温度の影響
- (2) 肉厚測定精度への温度の影響—すなわち超音波音速への温度の影響
- (3) 静止及び走行状態での肉厚計測精度の確認

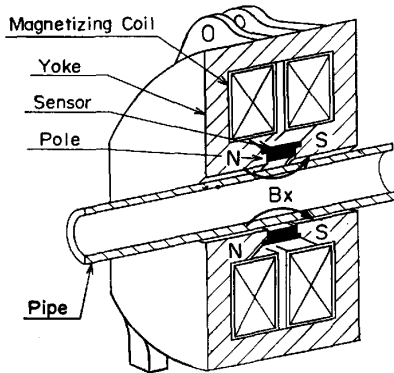


Fig. 2. Tunnel type electromagnetic acoustic transducer system.

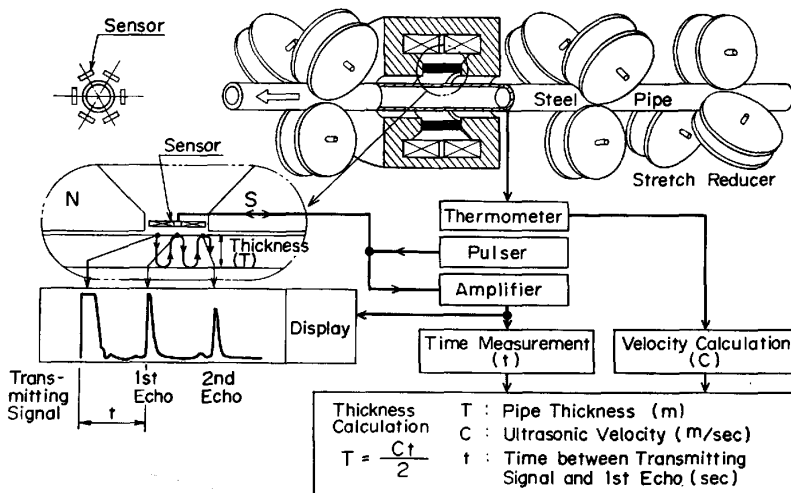


Fig. 3. The outline of wall thickness measuring system.

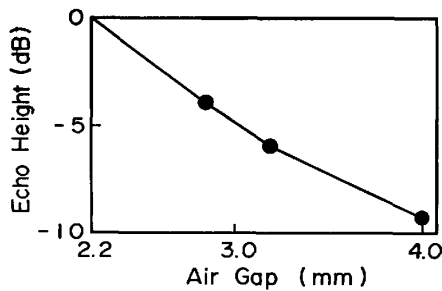


Fig. 4. The relation between air-gap and echo height.

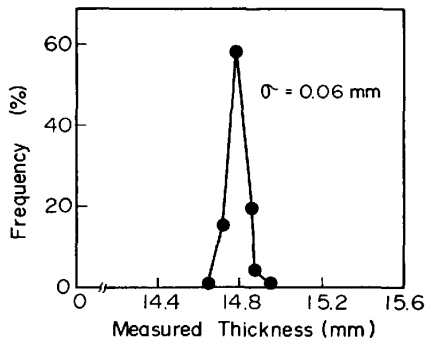


Fig. 5. The variation of measured thickness value at stationary state.

(4) 材料に最も接近する磁極部及びセンサ部の耐熱性の確認

4.1 静的実験

エアギャップによる感度変化を調査するため、SUS 304 鋼管 ($\phi 114.3 \text{ mm} \times 15 \text{ mm t}$) を円周方向で4分割した試験片を使用し、送受信コイルと試験片表面の距離を変化させてエコー高さの変動を調査した。結果をFig. 4 に示す。エアギャップ変動 1 mm あたりの感度低下は約 6 dB であり AGC (自動感度補正) により十分対処できる変動であることを確認した。

次に、Fig. 4 と同サイズの SUS 304 鋼管を静止状態としてデータを 1000 個連続して取り込み、肉厚測定値の変動状況を調査した。結果を Fig. 5 に示す。約 14.8 mm を中心に若干の変動が認められるが、 1σ で $\pm 0.06 \text{ mm}$ の精度は十分得られることがわかった。

超音波音速と温度との関係は次の2つの実験方法により調査した。

第一の実験では、継目無鋼管の素材である丸ビレットより切り出した Fig. 6 に示す形状の試験片を使用した。この試験片を赤外線加熱炉内に挿入し、アルゴン雰囲気中で加熱し、図の A-B 間を均熱状態とした。そして均熱部の超音波伝播時間 τ (すなわち肩部 A からのエコーと頂部 B からのエコーの時間差) を測定し、冷間での AB 間の距離 T とからその温度における音速 $v = T/\tau$

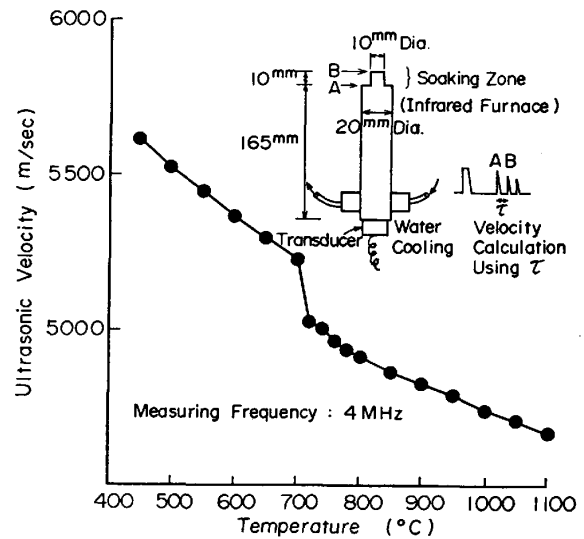


Fig. 6. The relation between ultrasonic velocity and temperature.

を求めた。超音波の送受は、試験片底部にとりつけた超音波探触子により行い、探触子近傍の試験片周囲を水冷した。実験は均熱部の温度を 1100°C まで上昇後、均熱になるのを確認しながら温度を徐々に低下して行つた。結果の1例を Fig. 6 に示す。

720°C 近傍でオーステナイト (γ)-フェライト (α) 変態に相当するとみられる音速の不連続的变化が観察されたがそれ以上の温度では音速の変化は直線的であり¹⁰⁾、 100°C の温度上昇につき約 -85 m/s の音速変化であった。

第二の実験では、炉で $1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ に均熱した継目無管 (1.2m 長さ) を使用した。この鋼管を熱間肉厚計に挿入静止させ、超音波の往復伝播時間を連続測定した。同時に放射温度計により肉厚測定位置近傍の鋼管表面温度を測定した。音速は前述の実験と同様に実験後冷間で確認した測定部位の厚さを使用し求めた。なおこの実験では、送受信コイルは前面にセラミック板を有するケース内に納め水冷した。

結果の1例を Fig. 7 に示す。この例では、 630°C 付近で音速の不連続的变化がみられ、それ以上の温度では音速の変化は直線的であった。この音速変化は、 100°C で約 -90 m/s と Fig. 6 の結果とほぼ同じであった。

これら2つの実験結果より、 γ - α 変態点以上では温度と音速の関係は直線的であり、また考察のところで詳述するが、この関係は表面温度と音速についても成立することがわかった。つまり表面温度測定により簡単な式を用いて音速補正が行えることがわかった。

Fig. 8 は、Fig. 7 と同様の方法で測定した鋼管表面温度とエコー高さとの関係である。高温域では感度の変

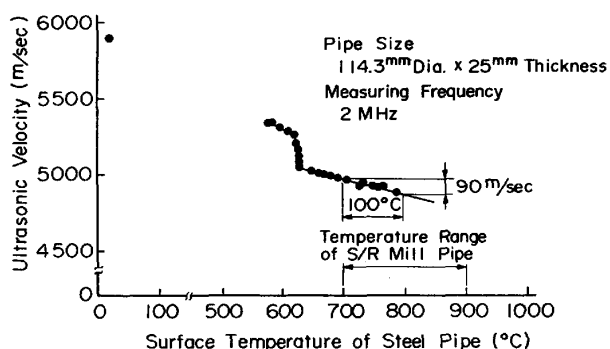


Fig. 7. The relation between ultrasonic velocity and surface temperature.

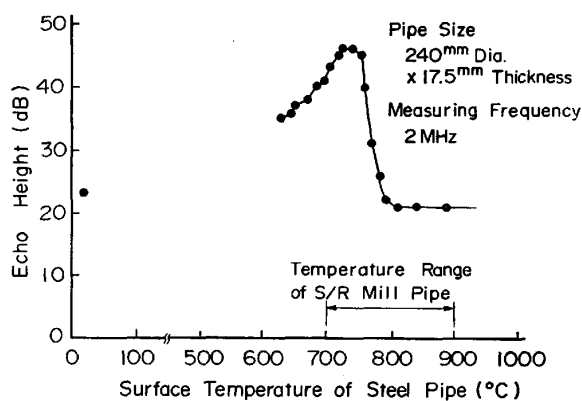


Fig. 8. The relation between ultrasonic echo height and surface temperature of pipe.

化は小さく、温度が低下するに従い感度が増加し、720°C付近で感度ピークが認められる。この感度ピークの出現については既にいくつかの文献⁸⁾⁹⁾で指摘されているように表面近傍のみが磁気変態点を越えそこに磁束が集中するためと思われる。この温度低下による感度増加はAGC機能により対処することとした。

4.2 走行実験

走行時の肉厚測定精度の確認は、炉より搬出した熱間継目無鋼管試験片を熱間肉厚計の前後に設けた搬送ローラにより前後に搬送させて行つた。熱間肉厚計の直前直後にはピンチローラを設けた。データ採取範囲は1200

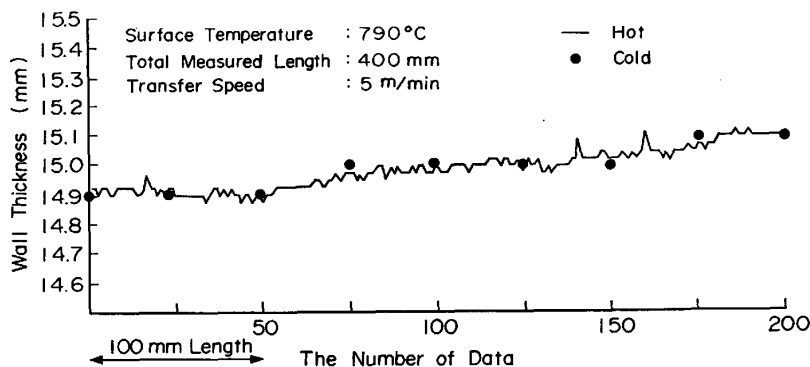


Fig. 9. An example of wall thickness measurements of hot steel pipe samples.

mm長さの鋼管の中央部400mmとし、搬送速度は5m/minとした。超音波往復伝播時間及び温度は250Hzで測定し、うち40Hz分を肉厚計測値として処理した。(2mm間隔に相当)。鋼管には材質として普通鋼及び低合金鋼、寸法として、 $\phi 114.3\text{ mm} \times 10 \sim 25\text{ mm t}$ のもの各種を用いた。

結果の1例をFig. 9に示す。実線は熱間での肉厚測定結果を、黒丸は実験後、冷間で熱間肉厚測定部位について超音波厚さ計を用いて確認した結果を示す。両者はよく一致しており $\pm 0.1\text{ mm}$ の測定精度を得た。

また数回の熱間実験で磁極部及びセンサ部の耐熱性にも全く問題のないことを確認した。

5. オンライン実験

性能確認実験結果より、表面温度で補正した音速を使用すれば $\pm 0.1\text{ mm}$ の精度で熱間肉厚計測が可能であるとの目途が得られたので海南鋼管製造所第一製管工場ストレッチレデューサに組み込みオンライン実験を行つた。

Table 3にオンライン実験条件を示す。鋼管寸法は製造可能範囲(Table 2参照)を代表するよう考慮した。

Fig. 10に代表的実験結果を示す。図中実線は熱間肉厚計によるオンラインでの肉厚計測結果を示し、白丸は製管後オンライン測定点と同一円周位置を超音波厚さ計によつて計測した冷間肉厚値を示す。データは250Hzで取り込み、表面温度計測値によつて補正した音速値を用いて、肉厚を算出した。

Table 3. Experimental condition of wall thickness measurement at S/R mill.

Setting position of wall thickness measurement	Outlet side of stretch reducer as described in Fig. 3
Seamless pipe	Size : 42.7, 60.3, 114.3 mm ^{O.D.} × 3.2-25 mm ^t Material : Low carbon steel and SCM 430 Temperature : 700-900°C
Rolling speed	3.3-8.2 m/s

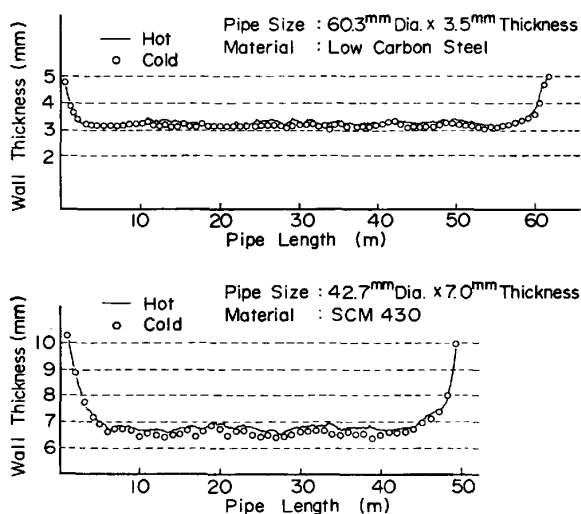


Fig. 10. Examples of wall thickness measurements of hot steel pipes at S/R mill outlet.

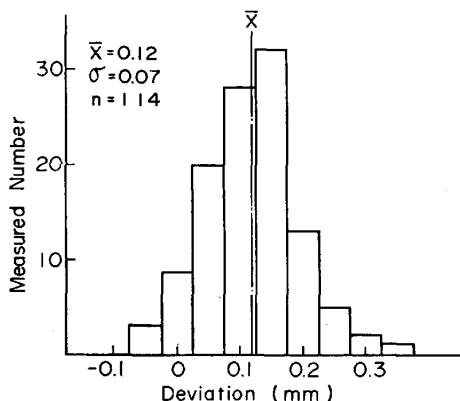


Fig. 11. Deviation of measured wall thickness values between hot and cold states.

この例で示すように、熱間と冷間の肉厚計測値とはよく一致しており、また同様の肉厚変動パターンを示していた。すなわちストレッチレデュースで発生する鋼管端部の増肉現象あるいはピアサ工程で発生するスパイラル状偏肉による長手方向の周期的肉厚変動を、熱間肉厚測定はよくとらえている。

Fig. 11 には計測精度を調査した結果の一例を示す。ここでは1本の継目無鋼管(公称肉厚 10 mm t)の熱間オンライン肉厚測定値と冷間肉厚測定値との差を横軸にとり、その頻度を縦軸にとつてある。なお冷間肉厚測定は切断してマイクロメータにより行つた。Fig. 11 の結果は、誤差の平均値が、0.12 であり、その標準偏差(1σ)は 0.07 であることを示している。誤差の平均値が0でないのは主として熱間肉厚計測時の時間軸の零点補正の不備にもとづくと考えられる。しかしこれはオンライン実験のデータの積み重ねとその解析により十分修正可能である。すなわち誤差の平均値は0とでき、誤差

としては 1σ で ±0.07 mm 程度は十分確保できることがわかつた。

なお、本熱間肉厚測定装置は、耐久性にも問題のないことを連続運転試験により確認した。

6. 考 察

以下、熱間肉厚計の測定精度に及ぼす要因につき考察する。ただし超音波伝播時間計測時の時間分解能の影響は除いた。

6.1 肉厚方向の温度分布の影響

Fig. 7 に示すように約 720°C 以上の温度では、音速と温度との関係は直線的である。これは文献の結果とも一致する¹⁰⁾。そこで相対温度 T を(2)式のように定義すれば、 $T > 0$ なる領域では相対温度 T での音速 v は(3)式で表される。

$$T = T_0 - T_B \dots\dots\dots (2)$$

ここで T_0 は温度、 T_B は温度-音速の直線的関係が成立する最低温度である。

$$v = v_B - CT \dots\dots\dots (3)$$

ここで v_B は基準温度 T_B における音速、 C は温度-音速曲線の傾きである。

今厚さ A なる材料を考え、肉厚方向 x の相対温度分布が $T(x)$ であつたとする。この時各点 x での音速 dx/dt は(4)式で表される。

$$dx/dt = v_B - CT(x) \dots\dots\dots (4)$$

(4)式を変形して、厚さ $A(x=0 \sim A)$ について積分すると次式が得られる。

$$t = \int_0^A \frac{dx}{v_B - CT(x)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで t は厚さ A を伝播するのに要する時間である。 $T(x)$ は実際のパイプでは 300°C 以下と考えられ、 $v_B \gg CT(x)$ であるから(5)式は次式で近似できる。

$$t = \int_0^A \frac{1}{v_B} \left(1 + \frac{C}{v_B} T(x) \right) dx \\ = \frac{A}{v_B} \left(1 + \frac{C}{v_B} \cdot \frac{1}{A} \int_0^A T(x) dx \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\frac{1}{A} \int_0^A T(x) dx$ は肉厚方向における平均温度と定義できる。これを T_{AVE} とおくと

$$t = \frac{A}{v_B} \left(1 + \frac{C}{v_B} T_{AVE} \right) \dots\dots\dots (7)$$

一方肉厚方向の平均音速 v_{AVE} は A/t であるから次式が成立する。

$$v_{AVE} = v_B \frac{1}{1 + \frac{C}{v_B} T_{AVE}} \dots\dots\dots (8)$$

1) $\frac{C}{v_B} T_{AVE}$ と考えられるから(8)式は

$$v_{AVE} = v_B - CT_{AVE} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式は平均音速と平均温度との関係は、第一近似として材料の音速と温度との関係と同じになることを示している。

ここで熱間肉厚測定の場合を考えると $T(x)$ は個々の鋼管及び1本の鋼管の個々の場所ではほぼ同様の関数形となり、表面温度を T_{sf} とすると次式で近似できる。

$$T_{AVE} = kT_{sf} + T_k \dots\dots\dots (10)$$

ここで k, T_k は定数である。

(10)式の近似の妥当性については無限長の鋼管を均熱した後空冷した場合の温度分布の計算より確認した。計算では鋼管外面は輻射で熱が放散し、鋼管内面は断熱状態と仮定した。鋼管外径 50~150 mm 肉厚 5~25 mm につき計算したが外径による差異は無視でき、Fig. 12には外径 150 mm の各種肉厚における表面温度と平均温度との関係を示した。

この図よりわかるように表面温度が均熱温度より 50°C も低下すれば表面温度と平均温度の関係は非常によく直線にのっている。なお実際の肉厚測定時には表面温度は 50°C 以上低下しており、直線域になつていると考えられる。

そこで(10)式を(9)式に代入して次式を得る。

$$v_{AVE} = v_B - C(kT_{sf} + T_k) \dots\dots\dots (11)$$

上式は平均音速 v_{AVE} と表面温度 T_{sf} がそれぞれの肉厚で直線関係で近似できることを示している。

Fig. 12 の結果より肉厚 0~25 mm について k 及び

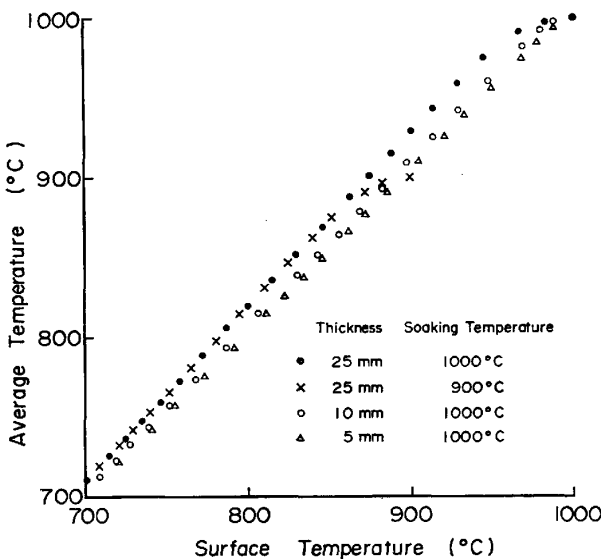


Fig. 12. The relation between calculated surface and average temperatures of infinitely long pipes (150 mm O.D.).

Table 4. The changes of measured time (Δt) and thickness (ΔT) due to the change of echo height (δ)
Frequency: 3MHz Threshold level: 0.5 Velocity 5 000m/s

δ (dB)	Δt (ns)	ΔT (mm)
± 3	22	0.055
± 5	43	0.108

T_k を求め $C=0.85$ として(11)式に代入し、 v_{AVE} がどのように変化するかを確認した。その結果 T_{sf} が 200°C の範囲では v_{AVE} の最大変化は 25 m/s 程度であり、それにもとづく誤差は 0.5% 程度となる。しかしこの誤差はすべての肉厚範囲について1本の音速-温度直線で近似した場合に発生する誤差であり、肉厚範囲を3分割し(たとえば 8 mm 以下, 8~16 mm, 16~25 mm) 3本の直線で近似した場合には 0.2% 以下となる。

6.2 エコー高さ変動の影響

一定しきい値でエコーの立ち上がり位置を検出し、超音波伝播時間を計測した場合、エコー高さの変動により計測値は変化する。エコー波形の第一振動波が $\sin 2\pi f$ (f は測定周波数) で表されると仮定し、エコー高さが $\pm \delta$ dB 変化した時の伝播時間計測値及び肉厚測定値の変化の例を Table 4 に示した。±5 dB の変化でも、肉厚測定値の変化 ΔT は 0.11 mm 程度である。

7. 結 言

継目無鋼管の熱間肉厚計測法について検討し次の結果を得た。

- (1) 1テスラ以上の平行磁場が発生可能な貫通型電磁石方式の電磁超音波法による熱間肉厚計測システムを開発した。
- (2) 本装置は、ストレッチレデューサに組み込み、各種仕上げ寸法の鋼管の肉厚を周方向6ヶ所で高速(250 Hz) オンライン計測が可能である。
- (3) 熱間鋼材の超音波音速は γ - α 変態点以上では、表面温度の上昇により直線的に低下する。つまり簡単な式を使用して表面温度計測による平均音速計算が可能である。
- (4) 開発装置のエアギャップによる感度変動は約-6 dB/mm であつた。
- (5) 表面温度による音速補正及び AGC (自動感度補正) によるエコー高さの安定化により、オンラインで ± 0.1 mm の測定精度の得られることがわかつた。

文 献

1) 柳本左門, 中島浩衛, 合田照夫, 吉田征四郎, 直井久: 塑性と加工, 22 (1981), p. 1002

- 2) 山本栄次, 大橋保威, 木瀬一孝, 松下直行: 住友金属, 30 (1978), p. 462
- 3) 白岩俊男: 第 46・47 回西山記念技術講座(1977), p. 101 [日本鉄鋼協会]
- 4) 船生 豊, 奥村 精, 松岡逸雄, 村上昭一, 清水雅美, 門野浅雄: 鉄と鋼, 68 (1982), S1224
- 5) K. O. LEGG and D. J. MEREDITH: J. Phys. D: Appl. Phys., 3 (1970), p. L61
- 6) R. B. THOMPSON: IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, SU20 (1973), p. 340
- 7) W. MOHR and W. REPLINGER: Ultrasonics Symposium Proceeding (1978), p. 126 [Institute of Electrical and Electronics Engineers]
- 8) K. R. WHITTINGTON: The British Journal of NDT, 20 (1978), p. 242
- 9) 川島捷宏: 第 76・77 回西山記念技術講座(1981), p. 227 [日本鉄鋼協会]
- 10) E. P. PAPADAKIS, L. C. LYNNWORTH, K. A. FOWLER and E. H. CARNEVALE: J. A. S. A., 52 (1972), p. 850

コ ラ ム

エレクトロニクスの進歩

戦後の日本の鉄鋼業の進歩は著しいものであるが、設備の近代化、合理化に果たした計測・制御分野の寄与は大きい。これはこれらの分野の目覚ましい技術進歩を、いち早く取り込んできたものと言える。この技術進歩を時に先端技術の代表とも言える超 LSI の例で振り返ってみる。超 LSI は真空管、トランジスタ、IC、LSI を経て集積度を上げてきた産物である。米国インテル社が 1 K ビットダイナミック RAM を世に出したのがわずか 14 年前であつたが、今や 256 K ダイナミック RAM が市場に出始めているほどで集積度の進歩はほぼ 3 年を周期に 4 倍増すという速度で向上している。さらに 1 M ビットの RAM の試作品の発表、その先の 4 M ビットの RAM の見通しも聞かれるほどになつている。4 M ビットの集積度は 1000 万くらいで、小指の先のようなシリコンチップにアルファベットや数字のようなものであれば 50 万字も記録できるものがあと 10 年以内に出現するといふたいへんなものである。この集積度のイメージを野村総研の森谷氏は「最先端技術とニュービジネス」の

中で次のように表現している。「5 ミリ角に 1000 万といつてもピンと来ないので、これを逆に非常に大きく拡大してみるわけである。超 LSI というのは非常に細い線で回路を描いて、その回路にトランジスタや抵抗とかいった素子が載っているものだが、それが 1000 万の集積になると 1 ミクロンとか 0.5 ミクロンといった細さになる。ところでその 5 ミリ角のチップを 100 メートル×100 メートルくらいに拡大したと仮定すると、ちょうど後樂園球場くらいの広さになるが、こうすると 1 ミクロンは 2 センチに相当する。ということは野球場に 2 センチの幅で回路を描くわけだが、そこにトランジスタが載っているのである。周知のようにトランジスタはそれ以前の真空等の役割をするもので、真空管はその昔、大体直径が 2 センチだから、これにピタリと合う。野球場いづばいに真空管を 1000 万個並べて回路をつないだものが集積度 1000 万、4 M ビットのメモリの規模である。この大がかりなものが何と 5 ミリ角のシリコンチップに収まっている時代が来るわけだ。」

(新日本製鉄(株)電気計装技術部 福田武幸)