

熱間継目無鋼管の肉厚測定装置

技術報告

船生 豊*・奥村 精*・富樫 房夫*²清水 雅美*³・門野 浅雄*³

Hot On-line Wall Thickness Gage System for Seamless Tubes

Yutaka FUNYU, Tadashi OKUMURA, Fusao TOGASHI,
Masami SHIMIZU and Asao MONNO

Synopsis:

Kawasaki Steel Corporation has developed an on-line wall thickness gage with joint efforts of Fuji Electric Co., Ltd.. The development took four calendar years. This gage was developed for the first time in the world, and started on-line use in October, 1981.

This gage utilizes γ -rays and is possible to measure continuously the wall thickness along the longitudinal direction of pipe to an accuracy of 0.1 mm and a response speed of 0.1 second with no physical touch. Principle of measurement of this gage is named multi-beam method which is based on a premise that three γ -ray beams forming triangular shape cross each other within the pipe wall thickness. The wall thickness gage utilizes micro computer systems effectively. Particularly analyzing the twist angle of the wall thickness deviation, FFT (Fast Fourier Transformer) was used at first time for on-line analysis.

With the running of this gage system, the suitable action on the wall thickness control has been established in seamless tube production line. As a result, this gage system has advanced the new tube production technology and improved the dimensional quality of seamless tube.

1. 緒 言

知多製造所において、1978年より稼働を開始した中径継目無管工場は、プロセスコンピュータシステムを中心に、オンラインゲージ、オンラインセンサを効果的に導入することにより、全自動圧延制御システムを完成し、その結果、品質、歩留りおよび生産性等で大きな成果をあげてきた。

継目無管は周知のとおり、ピース長手方向に発生要因別に、個有なねじれ角度を有する螺旋状の肉厚不均一、すなわち偏肉が存在する。しかし肉厚および肉厚パターンだけは、熱間での測定が不可能ゆえ、ビレット重量値と各圧延機での鋼管伸ばし長さおよび外径より、マス・フロー一定則から間接的に計算される、ピース平均肉厚を制御する域を出なかつた。もちろん平均肉厚は重要な管理ポイントではあるが¹⁾、ピース内の肉厚分布はこの方法では管理できない。従来は、検査ラインに設置されている超音波肉厚計か、手動厚さ計で測定して、過去の圧延条件と対応する方法で偏肉発生要因を解析していた。この方法は、解析に時間的な遅れが大きく、またピ

ース対応が困難である欠点があつた。

熱間オンラインでの肉厚測定は、その重要性は認識されているにもかかわらず、世界的にみて実施例もなく、測定原理さえも確立されてない状況であつた。その理由は次のとおりである。

(1) 鋼管の断面は閉じた形状をしているため、従来の放射線透過型厚さ計では、ダブルウォール肉厚しか測定できない。

(2) 鋼管は圧延中、搬送中とも揺動が大きく、完全な非接触測定が要求される。

(3) 鋼管は圧延中、搬送中を問わず、最高7m/sの高速で移動し、また場所によつては回転している。

本稿では、世界で初めて開発に成功した熱間オンラインでの肉厚測定装置の測定原理と、実用化に際し採用した新技術、および操業へ適用した結果について述べる。

2. 開発目標と経緯

肉厚測定装置の開発にあたり、従来技術を調査した。冷間での肉厚測定は、超音波の反射を利用して²⁾、既にオンライン化されていた。放射線を用いた肉厚測定³⁾は、

昭和58年11月10日受付 (Received Nov. 10, 1983)

* 川崎製鉄(株)知多製造所 (Chita Works, Kawasaki Steel Corp., 1-1 Kawasaki-cho Handa 475)

*² 川崎製鉄(株)技術研究所知多研究室 工博 (Chita Research Laboratories, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 富士電機製造(株)東京工場 (Tokyo Works, Fuji Electric Co., Ltd.)

Table 1. Target specification of the wall thickness gage.

Item	Specification
Range wall thickness outside diameter	4.0 mm- 40.5 mm 177.8 mm-426.0 mm
Radiation Source Nuclide Strength	¹³⁷ Cs 3 Ci×3
Response time	0.1 s
Accuracy	±0.1 mm-±0.2 mm at available range
Man-machine interface	CRT monitor Recorder Analogue indicator

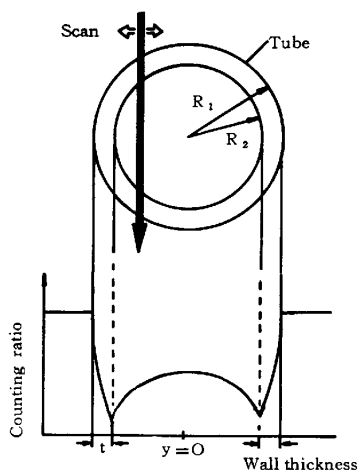


Fig. 1. Single beam scanning method.

前述の方法と反射の利用があるが、精度、応答性とも発展性に乏しい。渦流は温度等の環境に左右されやすい。電磁超音波の利用も検討したが⁴⁾、検出器と鋼管表面との距離を数 mm 以下に保持しなければならないので、オンラインへの適用は制約がある。

以上の調査より熱間オンラインの肉厚測定に耐える測定原理、方法は開発されていないことが判明した。Table 1 に示す性能を目標に開発に着手し、その結果、1981 年肉厚測定装置が世界で初めて中径継目無鋼管工場にオンライン化された。

3. 測定原理の開発

3.1 シングルビームスキャン方式

放射線が物質を透過する際、放射線は物質により吸収されその強度、計数値を減ずる。鋼板の厚さ計は、この原理を直接応用するが、鋼管の肉厚測定としてまず従来と異なる測定原理であるシングルビームスキャン方式を検討した。放射線を Fig. 1 のように、鋼管の断面方向にスキャンすれば、検出器には透過距離に応じた断面パターンが得られる。このパターンは、外径、内径に対応した位置で変曲点を持つた曲線であるから、この点を精

度よく検出すれば、非接触でかつ鋼管へ測定装置を挿入せずに肉厚の測定が可能である。この原理の基礎的研究を行つた。

放射線の計数値は周知のとおり (1) 式で表される。

$$N = N_0 \exp(-\mu \cdot X) \dots\dots\dots (1)$$

ここで N は放射線計数値、 N_0 は放射線源と検出器間に物質がない時の計数値、 μ は再生係数を含む物質の吸収係数、 X は物質の厚さを各々示す。

外径 R_1 、内径 R_2 を持つ理想的鋼管では、放射線が鋼管の断面を透過する距離を X 、放射線が鋼管断面をスキャンする方向を y 、鋼管の中心位置を $y=0$ とすれば、放射線計数値は (2) 式で表される。

$$\begin{aligned} |y| \geq R_1 : N &= N_0 \\ R_1 \leq |y| \leq R_2 : N &= N_0 \exp\{-2\mu\sqrt{R_1^2 - y^2}\} \\ R_2 \leq |y| \leq 0 : N &= N_0 \exp\{-2\mu(\sqrt{R_1^2 - y^2} \\ &\quad - \sqrt{R_2^2 - y^2})\} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

Fig. 1 において、計数率 N の曲線の変曲点の分解能を高めるには、放射線ビーム幅を無限に狭くしなければならない。ビーム幅は、コリメータにより絞ることは可能ではあるが、検出器へ到達する放射線量も減少するので計数値が小さくなる。X線を除く放射線の計数値の統計誤差は、 $1/\sqrt{N}$ であるから測定値として測定精度を高めるには、計数値をある程度大きくしなければならない。

X線を用いた場合、統計誤差の問題は生じないが、検出効率が低いので測定精度向上は期待できない。この原理により実現できる測定の性能を予測するためシミュレーションを行つた。

鋼管断面に対し、一定速度でスキャンする γ 線をコリメータで幅 Δy に絞り、サンプリング周期 $\Delta\tau$ ごとに得られる計数値を時系列的にシミュレートした。シミュレーションに用いたモデル式は (3) 式である。

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= \frac{1}{\Delta\tau} \cdot \frac{1}{\Delta y} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \Delta\tau} \int_{y_1 - \Delta y/2}^{y_1 + \Delta y/2} \\ &\quad \exp\{-\mu \cdot X(y)\} dy \cdot d\tau \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

初期値 $y_1(\tau)$ 、サンプリング周期 $\Delta\tau$ 、実効吸収係数 μ ($=0.06 \text{ mm}^{-1}$) を与えて計算した結果の一例を Fig. 2 に示す。有限の幅を持つた放射線ビームによる相対計数値パターンは、理想ビームにより得られるパターンで観測されるような鮮明な変曲点は得られない。

以上述べたように、シングルビームスキャン方式を、そのままの形でオンライン測定装置化することは、精度、応答時間で問題があり適当でないが、放射線を利用した測定に関し、多くの知見が得られた。

3.2 マルチビーム方式

シングルビームスキャン方式を発展させ、Fig. 3 に

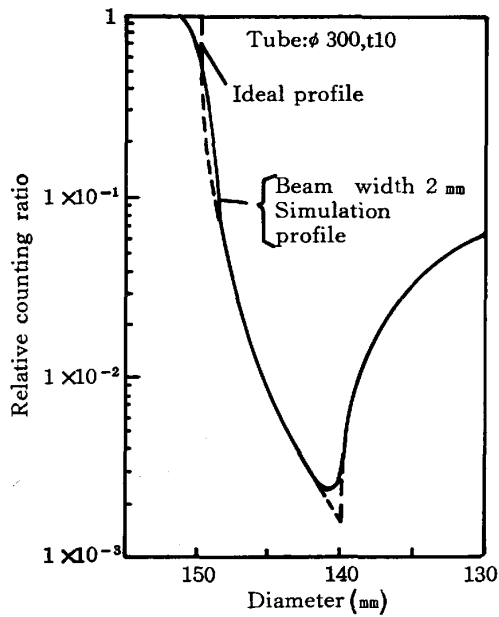


Fig. 2. An example of profile by computer simulation.

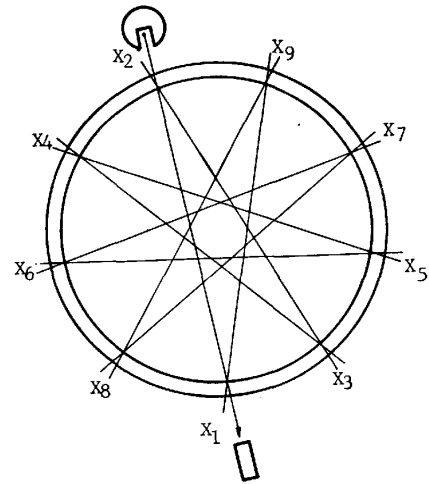


Fig. 4. Principle of multi(n)-beam method.

$$X_2 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_{20}}{N_2} \cdot \frac{N_3}{N_{30}} \cdot \frac{N_{10}}{N_1} \right)$$

$$X_3 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_{30}}{N_3} \cdot \frac{N_1}{N_{10}} \cdot \frac{N_{20}}{N_2} \right) \dots \dots (5)$$

マルチビーム方式は、Fig. 4 に示すように測定点数は3点に留まらない。測定点数がn点における肉厚 X_n と計数値との間には(6)式で表される行列を得る。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

$$b_n = \frac{1}{\mu K} \cdot \ln \frac{N_{no}}{N_n} \dots \dots \dots (6)$$

(6)式はnが奇数の場合のみ、肉厚 X_i に関して解を持つ。すなわち、nが偶数の場合行列は正則でない。偶数点の肉厚測定が必要な場合は、奇数点を組み合わせなければならない。

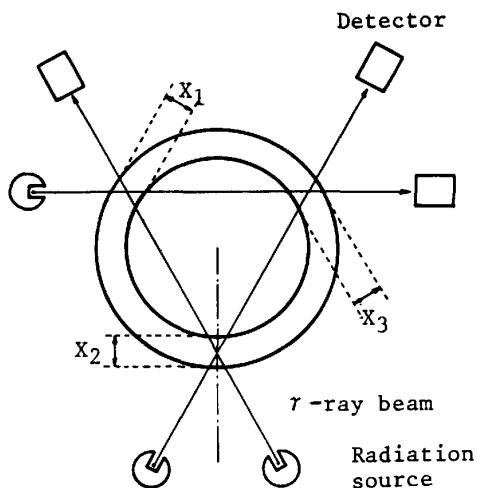


Fig. 3. Principle of multi-beam method.

示すオンライン化が可能な測定原理であるマルチビーム方式を開発するに到った。3対の放射線源と検出器を鋼管の円周方向に120°の間隔で、Fig. 3 に示すように配置する。鋼管肉厚 X_i と計数値 N_i との間には(4)式の関係を得る。ここでiは測定点を表す整数である。

$$N_1 = N_{10} \exp \{-\mu K(X_1 + X_2)\}$$

$$N_2 = N_{20} \exp \{-\mu K(X_2 + X_3)\}$$

$$N_3 = N_{30} \exp \{-\mu K(X_3 + X_1)\} \dots \dots \dots (4)$$

Kは測定点での放射線透過長さで肉厚との比である。

(4)式を肉厚 X_1 について解くと(5)式が得られる。

$$X_1 = \frac{1}{\mu K} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_{10}}{N_1} \cdot \frac{N_2}{N_{20}} \cdot \frac{N_{30}}{N_3} \right)$$

4. 実用化技術の開発

4.1 コンプトン散乱の影響の除去

マルチビーム方式による測定原理の実用化に伴う技術開発が必要である。線源としては、半減期の点より137Csを選択した。マルチビーム方式では、 γ 線は必ず2回、しかも曲率を持った肉厚を傾斜して透過する。また鋼管寸法に応じて、各 γ 線ビームは位置を変更しなければならない。前者の場合は、鋼板2枚に相当する肉厚を γ 線は透過するので、コンプトン散乱の影響は顕著である。後者に関しては、鋼板の厚さ計ではパスライン変動効果と称されている現象であり、線源と検出器間の位置の変化により計数値が異なる現象をいう。コンプトン散乱は、 γ 線エネルギーにより、ある決まった方向へ

確率的に分布し、かつ1次散乱だけでなく2次散乱も伴う。シミュレーションに使用するモデル式も膨大となり、またそれだけでは十分でない。目標精度を得るには、次に述べる手段が有効であることを実験装置で確認した。

(1) 検出器のシンチレーションカウンタの波高弁別電圧を上昇させて行き、計数値が急激に減少を開始する点に設定する。

(2) Fig. 5 に示すように、線源側および検出器側の両方に、散乱による γ 線の巡り込みを遮蔽するコリ

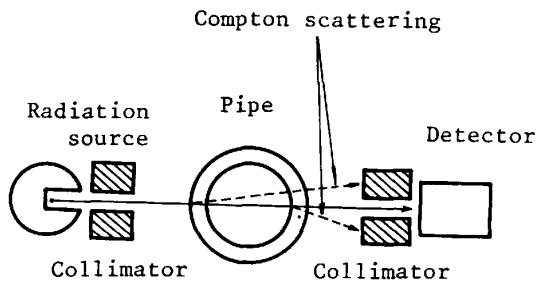


Fig. 5. Schematic diagram of Compton scattering.

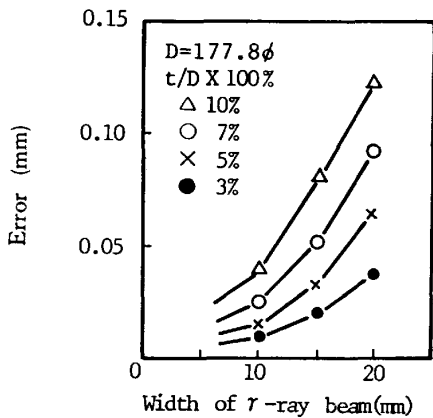


Fig. 6. Comparison of γ -ray beam width.

メータを設ける。

4.2 放射線ビーム幅の最適化

シングルビームスキャン方式でも検討したように、マルチビーム方式においても線源容量と測定精度の両面より最適放射線ビーム幅が存在することを、シミュレーションで確認した。その結果は、外径および肉厚は小さいほど、またビーム幅は大きいほど測定精度が悪いことが判明した。Fig. 6 に外径が 177.8mm の場合のシミュレーションによる誤差曲線を示す。線源容量は小さい方が安全上、経済設計上有利であるから、中径継目無管に適用する場合は測定精度と製造可能な寸法条件より放射線照射方向ビーム幅は 20 mm, 長手方向は 50 mm に決定した。

4.3 鋼管揺動の抑制

マルチビーム方式は、異なる2本の放射線ビームが、

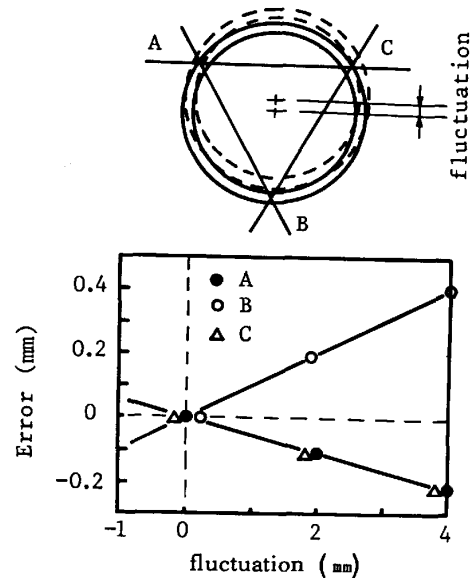


Fig. 7. Error caused by pipe fluctuation.

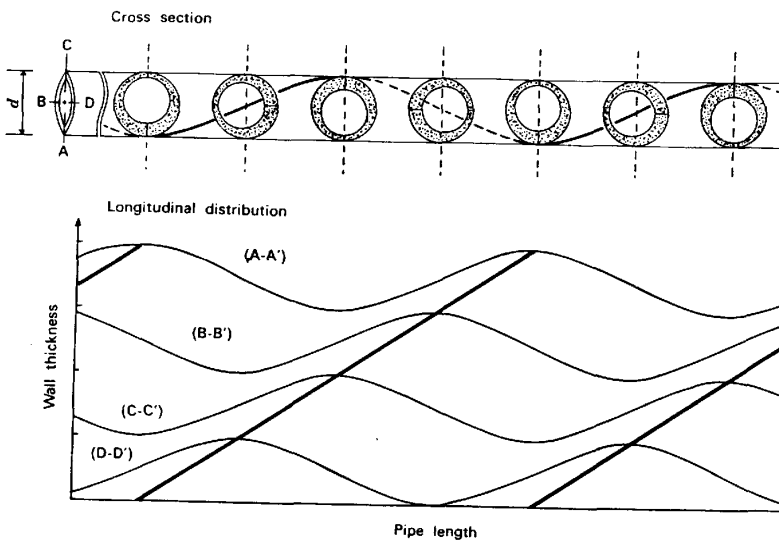


Fig. 8. Schematic illustration of wall thickness profile.

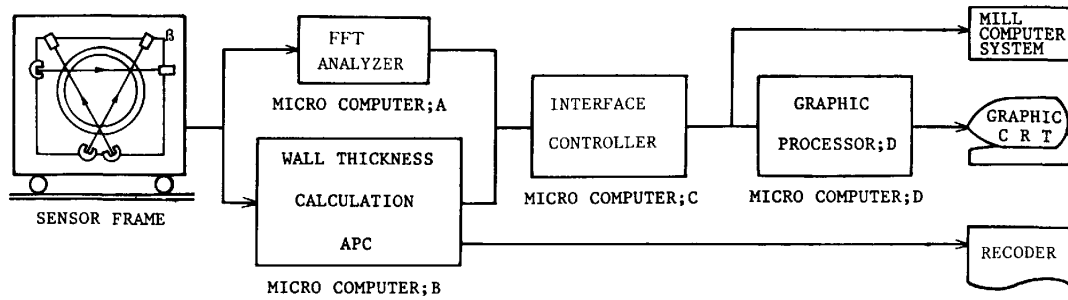


Fig. 9. Hardware configuration of wall thickness gage.

肉厚の中央で交鎖することが必要である。しかし現実の圧延ラインでは、鋼管の曲がり、搬送テーブルの構造等により鋼管が揺動のない理想状態で搬送されることはない。鋼管の揺動により発生する測定誤差を(2)式と(5)式との組み合わせでシミュレーションにより算出した。前項と同様、外径が小さく、肉厚が薄いほど鋼管揺動による誤差が大きいことが判明した。また放射線ビームと鋼管揺動との相対的位置は、Fig. 7に示す方向へ揺動した時最大の誤差を発生する。Fig. 7は外径 177.8mm、肉厚 9.82 mm の場合の測定誤差の発生状況を示す。鋼管揺動の抑制方法あるいは補正方法を検討したが、結局機械的に鋼管揺動を抑制するピンチロールを採用した。

5. 偏肉解析システム

マンネスマン製管法では、素材が螺旋状の回転を伴う圧延であるから、肉厚分布もまた螺旋状である。これを模式的に示したのが Fig. 8 である。鋼管断面偏肉の肉厚分布は、あるねじれ角度(偏肉角度)をもつて鋼管長手方向へ回転している。この偏肉分布は、特定の周期を有する正弦波と見なすことができる。現実の圧延は、複

数の圧延機で順次圧延していくので、Fig. 8 に示したほど単純な偏肉分布ではなく、各要因の重なり合った複雑な波形となる。偏肉分布は、特定の周期を有する正弦波の重合であるから、FFT(Fast Fourier Transformer)で周波数解析を行えば⁹⁾、(7)式により偏肉角度は求められる。

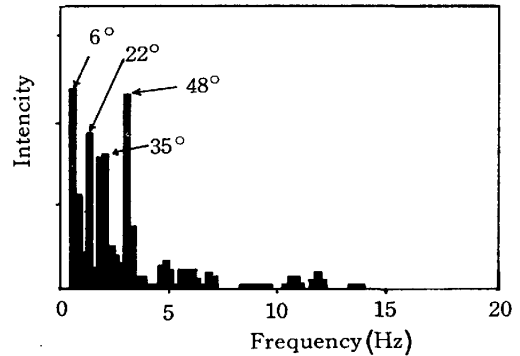


Fig. 11. On-line data by FFT (256φ×11.9 t).

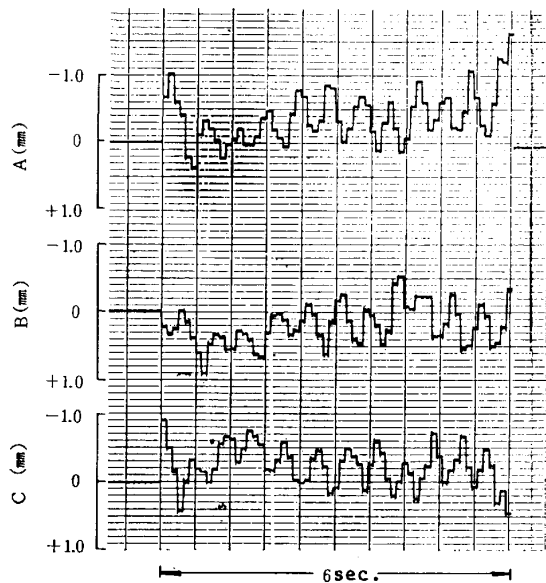


Fig. 10. On-line data (351φ×9.6 t).

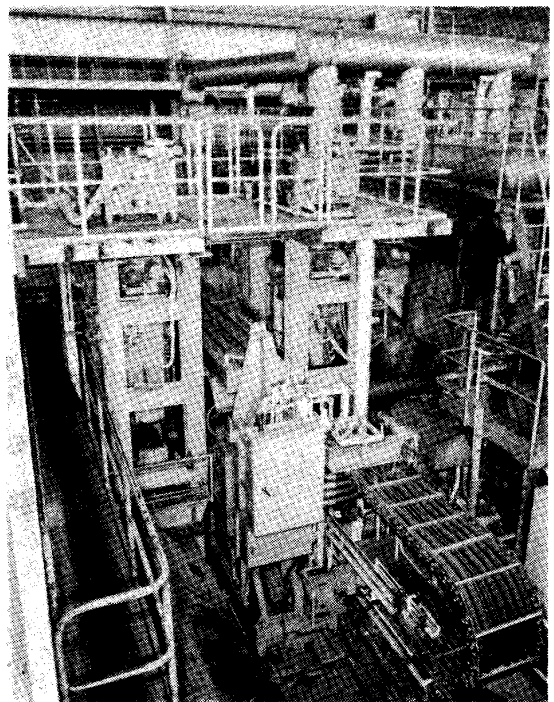


Photo. 1. Wall thickness gage in operation with one pair of pinch rollers.

$$\theta = \tan^{-1}(\pi Df/V) \dots\dots\dots (7)$$

ここで θ は偏肉角度 (°), D は外径 (mm), V は搬送速度 (mm/s), f は FFT で解析した偏肉周波数 (Hz) である。

以上述べた原理により, 肉厚測定装置として肉厚の絶対値を測定するだけでなく, 偏肉の状態をリアルタイムで定量化できる FFT を導入した。

6. 肉厚測定装置の構成

オンライン肉厚測定装置のハードウェア構成を Fig.

9 に示す。大別すると, 放射線機器を組み込みライン上に設置されるセンサフレーム部分, 信号処理, データハンドリングを行うマイクロコンピュータ群で構成された制御部分, およびマンマシンインタフェース部分で構成される。3本の放射線ビームは, 鋼管寸法を入力することにより自動的に 0.01 mm の精度で位置決めが行われる。また肉厚測定装置が測定したすべてのデータは, 1ピースごとに圧延ラインのプロセスコンピュータへ伝送される。Photo. 1 に圧延ラインへ設置された肉厚測定装置を示す。

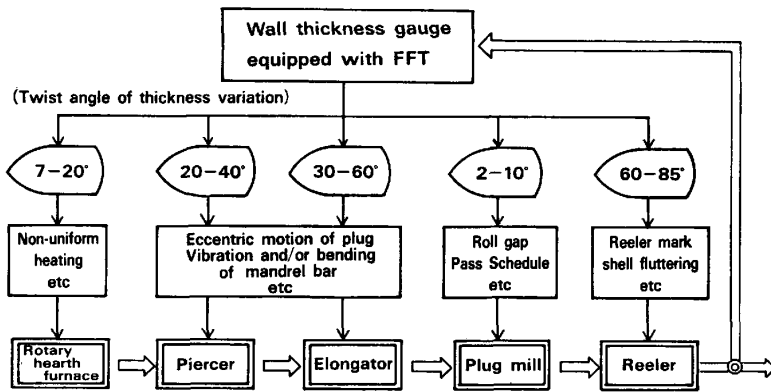


Fig. 12. Flow diagram of mill control system with the aid of pipe wall thickness gauge.

Mill	Piercer		Elongator		Plug mill
Action	Roll distance Plug advance		Plug advance	Roll speed	Roll gap
Pipe size	10 3/4" x 9.27t		9 5/8" x 10.03t	9 5/8" x 10.03t	10 3/4" x 8.89t
FFT data					
Improvement of wall thickness deviation					

Fig. 13. Improvement of wall thickness deviation by on-line mill action.

7. 圧延ラインへの適用と偏肉改善

肉厚測定装置を導入する際、最も効果的な場所を検討した。その結果、下記理由によりリーラーの後面に決定した。

(1) ミル制御に対して時間遅れなく、実用上リアルタイム測定であること。

(2) 肉厚測定値は、圧延最終製品の品質保証情報として利用できること。

(3) 鋼管の真円度が平均外径に対して2%以下であり極端な異形でないこと。

Fig. 10 に外径が 351 mm、肉厚が 9.6 mm の鋼管が 2 m/s で搬送された時の測定結果の一例を示す。推測どおり約 1 m の周期を持つた正弦波に近い偏肉分布が観測された。Fig. 11 に外径が 273 mm、肉厚が 10.1 mm の鋼管の FFT による偏肉周波数の解析結果の一例を示す。偏肉角度に換算して 6° と 48° に偏肉発生の主要因があることがわかる。

肉厚測定装置による偏肉の改善は、オペレータガイドンスによる圧延工具管理と、圧延ラインプロセスコンピュータによるミル制御の両者で実行される。偏肉角度に関しては、Fig. 12 に示す偏肉発生要因解析フローに従って、圧延機の設定および圧延工具の状態を最適に管理する。その結果、ピース長手方向肉厚分布の改善による

肉厚不良率の減少はもちろん、Fig. 13 に示すように、平均偏肉率で 1% の肉厚寸法精度の改善が図られた。

8. 結 言

知多製造所において、富士電機製造(株)と共同で放射線を利用したオンライン肉厚測定装置を開発し、世界で初めて 1981 年に実用化に成功した。

この肉厚測定装置は、肉厚の測定はもとより、偏肉の発生要因を解析する FFT、マイクロコンピュータを利用したグラフィックディスプレイ等最新技術を大幅に採用した、オンラインゲージシステムである。

この肉厚測定装置の稼動により、リアルタイムにミル制御が可能となり、その結果、肉厚精度および偏肉率の改善等寸法精度向上に大きく寄与している。

文 献

- 1) 日本鉄鋼協会共同研究会: わが国における最近の鋼管製造技術の進歩 (特別報告書 No. 18) (1974) [日本鉄鋼協会]
- 2) 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)
- 3) ラジオアイソトープ 基礎から取扱まで (1980) [丸善]
- 4) 川島捷宏: 製鉄研究 (1979) 299, p. 71
- 5) 吉沢 正: 数値解析 II, 基礎工学 (1968) [岩波書店]