
小径シームレス熱間肉厚計の開発

Development of On-line Wall Thickness Gauge for Small Size Seamless Tube

奥村 精(Tadashi Okumura) 紺屋 範雄(Norio Konya) 岡 弘(Hiromu Oka) 粕谷
利昭(Toshiaki Kasuya)

要旨：

最近シームレス鋼管の用途が著しく多様化しており、鋼管の寸法精度も高い精度が要求されている。小径シームレス管の肉厚の精度をさらに向上させるため、仕上げ圧延機であるストレッチレデュースの直後に熱間肉厚計を開発し、オンライン化した。この肉厚計は、全サイズに対しサイズ替えを必要としない完全自動化された測定装置である。また、3次元の鋼材である鋼管に対して、 γ 線を用いて肉厚を測定するための測定原理を確立した。さらに、 γ 線を用いて寸法を測定する場合の最適信号処理方法を解明した。現在、小径シームレス管工場のストレッチレデュース出側に設置され、圧延の操業管理に積極的に使用されている。

Synopsis：

Recently, seamless tube has been expanding its application fields. Accordingly customers want further improvement in accuracy of tube dimensions. In order to improve the wall thickness accuracy of small-sized seamless tube, an on-line wall thickness gauge has been developed right after the stretch reducing mill as a finishing rolling mill. This wall thickness gauge is a full-automatic measuring system requiring no size change. A measuring principle has been established for tube as three dimensional material using γ -rays. This development has also made clear an optimal signal processing method on the statistical noise of γ -rays. Now, the wall thickness gauge is in smooth operation and is useful to rolling control by operators.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of On-line Wall Thickness Gauge for Small Size Seamless Tube



奥村 精
Tadashi Okumura
知多製造所 設備部設
備技術室 主査(課長)



紺屋 範雄
Norio Konya
知多製造所 設備部設
備技術室



岡 弘
Hiromu Oka
知多製造所 製造部小
径シームレス管課 主
任部員(掛長)



粕谷 利昭
Toshiaki Kasuya
知多製造所 製造部鋼
管技術室 主査(掛長)

1 緒 言

近年、シームレス鋼管の用途が著しく多様化してきている。これに伴い、鋼管の寸法精度も従来に比べてより高い精度が要求されている。知多製造所では、寸法の高精度化に対応するため、1981年に中径シームレス管(16" プラグミル)へ γ 線透過によるマルチビーム方式¹⁾の熱間肉厚計を開発した。

一方、小径シームレス管(7" マンドレルミル)においても、肉厚寸法の高精度化をさらに推進するため、圧延直後に肉厚が測定できる熱間肉厚計の開発が強く望まれていた。そこで、マルチビーム方式熱間肉厚計の技術を展開し、小径シームレス管の仕上圧延機であるストレッチレデュースの直後に、 γ 線透過による「パラレルビーム方式」の熱間肉厚計を開発し、オンライン化に成功した。

このパラレルビーム方式熱間肉厚計の測定方法は、鋼板用の γ 線透過方式板厚計とは異なり、 γ 線透過による寸法測定技術の基本に立ち帰った研究開発を必要とした。現在、小径シームレス管のスト

要旨

最近シームレス鋼管の用途が著しく多様化しており、鋼管の寸法精度も高い精度が要求されている。小径シームレス管の肉厚の精度をさらに向上させるため、仕上げ圧延機であるストレッチレデュースの直後に熱間肉厚計を開発し、オンライン化した。この肉厚計は、全サイズに対しサイズ替えを必要としない完全自動化された測定装置である。また、3次元の鋼材である鋼管に対して、 γ 線を用いて肉厚を測定するための測定原理を確立した。さらに、 γ 線を用いて寸法を測定する場合の最適信号処理方法を解明した。現在、小径シームレス管工場のストレッチレデュース出側に設置され、圧延の操業管理に積極的に使用されている。

Synopsis:

Recently, seamless tube has been expanding its application fields. Accordingly customers want further improvement in accuracy of tube dimensions. In order to improve the wall thickness accuracy of small-sized seamless tube, an on-line wall thickness gauge has been developed right after the stretch reducing mill as a finishing rolling mill. This wall thickness gauge is a full-automatic measuring system requiring no size change. A measuring principle has been established for tube as three dimensional material using γ -rays. This development has also made clear an optimal signal processing method on the statistical noise of γ -rays. Now, the wall thickness gauge is in smooth operation and is useful to rolling control by operators.

レッチレデュースで順調に測定している。

本報では、3次元異形の鋼材に対する一般的な測定原理を開発した経緯と、高速で自由に移動する鋼管の肉厚を高精度で測定するための機構および信号処理方法について報告する。

2 開発の目的と仕様

Fig. 1 に示すように、小径シームレス管の仕上圧延機であるストレッチレデュースは、素管外径を順次絞りながら所定の寸法に仕上げるミルである。しかし、外径を絞ると、メタルフローは管の「肉厚方向」と「長手方向」へ流れるので、肉厚は増肉する。これを解消するため、管長手方向へストレッチ：張力をかけて、肉厚を減少させながら圧延する。

ところが、素管の先端部および後端部は、定常圧延状態よりも少ないスタンドでしか張力を加えることができない。それゆえ、Fig. 2 に示す肉厚プロファイルとなり、先後端増肉部は寸法精度も悪化する。安定した製品とするには、この先後端増肉部が鋼管のどの位置から発生しているかを圧延中に知ることがきわめて重要である。

* 平成2年7月5日原稿受付

そこで、素管の先端部および後端部へ、定常部よりもより大きなストレッチをかけ、この増肉現象を抑制するロール回転数のプログラム制御を実施し、オフゲージを減少させてきた。しかし、圧延直後の肉厚プロフィールを熱間でリアルタイムに測定することができないので、操業の変化に対応した最適なロール回転数を設定することができないこともある。また、圧延された鋼管を一定の長さに切断するコールドソーでは、先端および後端のオフゲージ部をクロップとして切断する。このクロップ切断長さは、操業上あるいは実験

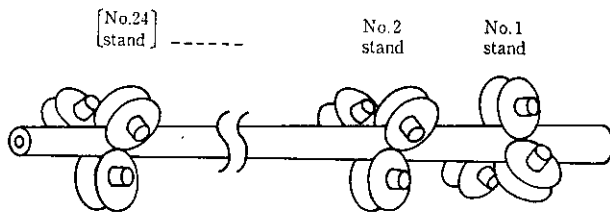


Fig. 1 Schematic illustration of rolling process of stretch reducing mill

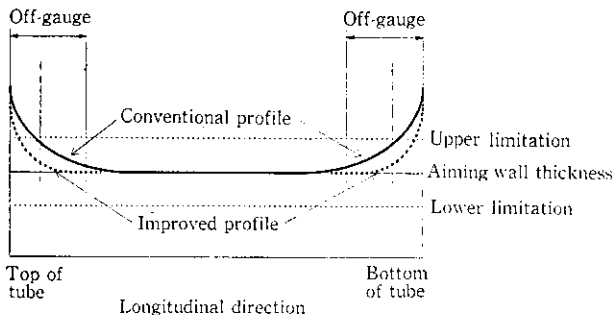


Fig. 2 Longitudinal wall thickness profile of tube after stretch reducing mill

Table 1 Specifications of on-line wall thickness gauge

Items	Specifications
Diameter (mm)	21.0~177.8
Wall thickness (mm)	2.0~35.0
Length (m)	6~67
Tube speed (m/s)	2~8
Tube temperature (°C)	600~950
Tact time (s)	Min. 15
Response	0.01 s or 100 mm
Accuracy	$\pm 0.1 \text{ mm}$ 100 mm $\phi \times 10 \text{ mm}$ t
Allowance of swing (mm)	± 10

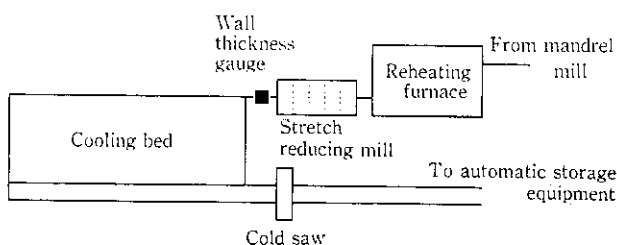


Fig. 3 Location of on-line wall thickness gauge after stretch reducing mill

的に得られたオフゲージ長さを基準にしているの、製品へオフゲージ部が混在する危険性もないわけではない。もしも、熱間肉厚計の肉厚情報によりオフゲージ長さが設定できれば、このような問題は発生しない。

以上述べた問題点を解消するために、小径シームレス管の熱間肉厚計の開発に着手した。熱間肉厚計の開発仕様を Table 1 に示す。また、Fig. 3 に熱間肉厚計の導入場所を示す。

3 測定方式の開発

現在実用化されているオンラインでの熱間肉厚測定方式は、放射線透過方式および電磁超音波方式の両者である。当社のストレッチレデュースの圧延サイズは、他社と比較して広範囲である。また、鋼種が多く、Table 1 に示すように圧延温度も広範囲である。さらに、ストレッチレデュース出側での圧延した鋼管の微小な揺動が、測定にとって障害となることが考えられる。このような測定環境で開発目標の測定仕様を満足するには、中径シームレス管で技術的に経験のある γ 線透過方式を展開することが最適であるとの結論を得た。

次に、 γ 線透過方式を小径シームレス管へ適用する方法として、Table 2 に示すような測定方式を比較検討した。マルチビーム方式は鋼管断面方向の複数の場所の肉厚が測定可能である。そこで、マルチビーム方式¹⁾で検討した γ 線ビーム幅と測定精度の関係を小径シームレス管へ適用したところ、幅 2 mm 以下の γ 線ビームが必要であることが判明した。また、このように細い γ 線ビームの照射量は低く、中径シームレスと同等の肉厚を持つ厚肉サイズでは十分な γ 線透過量が得られない。透過量は精度に反比例するので、マルチビーム方式を小径シームレス管へ適用した場合、所定の測定精度が得られない。ファンビーム方式は、構造的に単純であり、鋼板の板厚計の技術が応用できる。しかし、鋼管の一部分の平均肉厚を測定するだけであり、鋼管が揺動した場合は、必ずしも鋼管中心の平均肉厚を測定するとは限らない。しかし、 γ 線を限りなく平行ビームに近似し鋼管に照射すれば、鋼管が揺動した場合でも、鋼管の全断面平均肉厚の測定を可能にする。そこで、小径シームレス管の熱間肉厚計は、 γ 線の平行ビーム透過による肉厚測定方式を採用した。

また、この熱間肉厚計の開発に当たり、肉厚計そのものが FMS

Table 2 Comparison and selection on measuring methods using γ -rays

	Multi-beam method	Fan-beam method	Parallel-beam method
Methods	For 16" seamless tube Detector Radiation source	For plate Radiation source Detector	Detector Radiation source
Points of measurement	3 points	Partial section mean wall thickness	Cross section mean wall thickness
Allowance of swing	$\pm 1.0 \text{ mm}$	Not permissible	Up to $\pm 10 \text{ mm}$
Selection	Rejection	Rejection	Adoption

(flexible manufacturing system) を指向するよう配慮した。すなわち、精度の校正やサイズ替え等を完全に自動化あるいは不必要となる設計とした。

4 測定原理

中径シームレス管用のマルチビーム方式は、鋼板用厚さ計と同様に、 γ 線透過による厚さ測定の基本である(1)式を適用することが可能であった。

$$I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (1)$$

ここで、 I は γ 線透過量、 I_0 は γ 線照射量、 μ は線吸収係数、 t は板厚である。

しかし、小径シームレス管用のパラレルビーム方式は、Fig. 4に示すように γ 線は集中系ではなく分布系である。それゆえ、減衰特性はFig. 5に示すように、外径 D と肉厚 t をパラメータとした関数となる。この特性関数は(2)式で表現されるが、鋼管断面を透過する γ 線の位置による幾何学的な透過量を、(3)式および(4)式によりそれぞれ計算する必要がある。

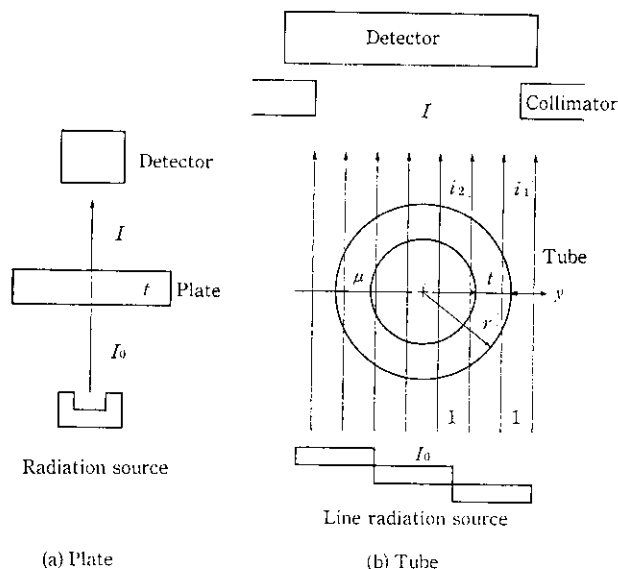


Fig. 4 Measuring principle of thickness

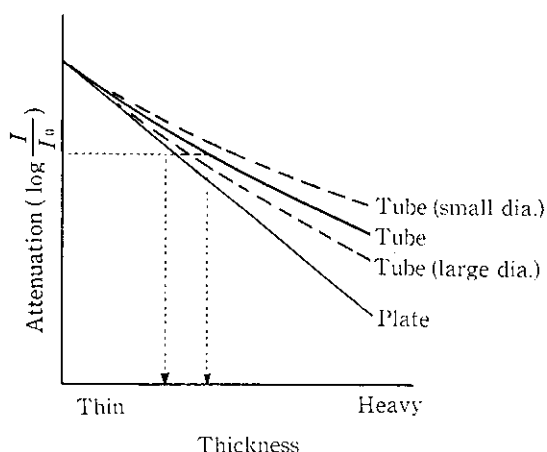


Fig. 5 Characteristic function between thickness and γ -ray transmissivity

$$I = \frac{1}{r} \left[\int_{r-t}^r i_1 dy + \int_0^{r-t} i_2 dy \right] \times I_0 \quad (2)$$

$$i_1 = \exp(-2\mu \sqrt{r^2 - y^2}) \quad (3)$$

$$i_2 = \exp(-2\mu(\sqrt{r^2 - y^2} - \sqrt{(r-t)^2 - y^2})) \quad (4)$$

ここで、 i_1 および i_2 は鋼管断面方向の相対 γ 線透過量、 r は鋼管の半径である。

(2)式により明らかなように、鋼管の外径、肉厚および鋼種は極めて多数存在するので、あらかじめ計算してテーブル等に登録する方法は採用できない。したがって、外径、肉厚および鋼種のいずれかが変化した場合、そのつど計算するシステムを採用した。

以上述べたように、鋼管用の肉厚計は3次元の鋼材を透過する γ 線透過量を測定するので、鋼板の厚さ計に比べて複雑な演算が必要である。

5 γ 線測定部の機構

パラレルビーム方式の γ 線測定部の開発のポイントは、パラレルビームをいかに作るかにある。測定原理より鋼管を γ 線が透過している場所では、 γ 線の空間分布は均一で並行でなければならない。しかし、 γ 線はすべての立体角方向へ放射するので、これを均一で並行に近似する必要がある。また、鋼管の微小な揺動および測定装置側から見た測定範囲に余裕を見込むため、最大測定外径に対し、Fig. 4に示すように ± 10 mmの測定範囲余裕を持たせている。それゆえ、直接測定に寄与しない γ 線も測定しなければならない。

ストレッチリデューサ出側では、Table 1に示したように鋼管の圧延速度は8 m/sに達する。開発の目的で述べたように、鋼管の先端および後端のオフゲージ長さを正確に測定するには、鋼管の先端から少なくとも100 mm間隔で測定しなければならない。したがって、 γ 線の透過量をほぼ10 msの間隔で測定する高速の γ 線検出器の開発が必要となる。

一般的に言って、 γ 線を用いる測定器の線源の容量は、安全性を考慮して少量が好ましい。しかし、シームレス管の場合、管断面を透過させるので厚板用と同等の照射量となり、かなり大きな線源容量を要求する。そこで、線源を有効に利用する手段として、線源を鋼管外径に対応して拡大および縮小する構造を採用した。

以上述べた条件あるいは要求を、Fig. 6に示すセンサ機構にま

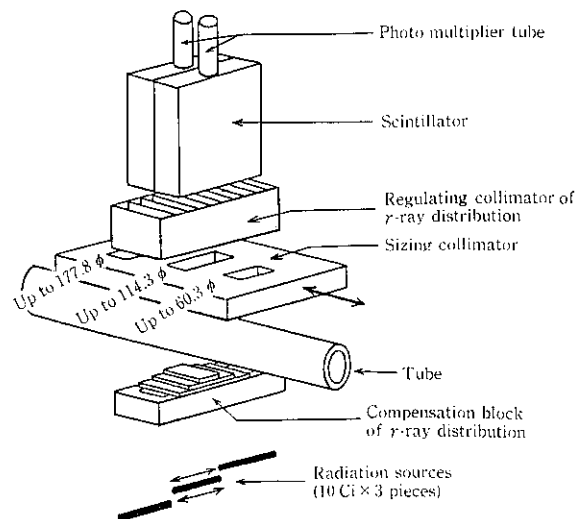


Fig. 6 Schematic structure of sensor by parallel-beam method

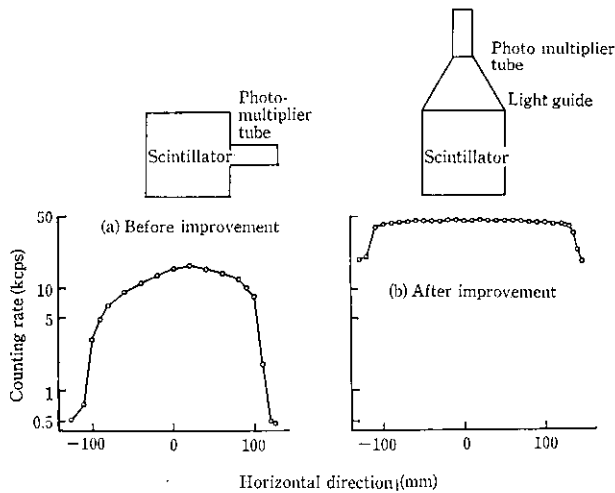


Fig. 7 Improvement of measurement accuracy by scintillator direction

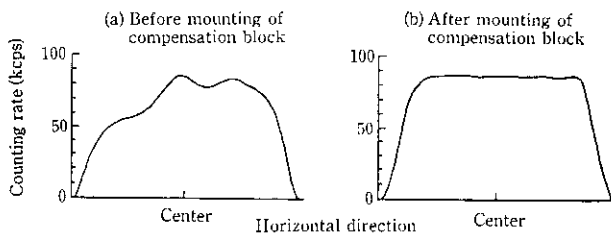


Fig. 8 Improvement of γ -ray distribution in measuring space by compensation block

とめた。

γ 線検出器は従来はシンチレータと光電子倍增管の関係が水平であったが、Fig. 7 に示すように垂直の配置に変更し、 γ 線の検出特性を均一化した。

γ 線の空間分布を均一にするために、Fig. 6 に示す線量分布補正板を用いた。その結果、Fig. 8 に示す均一な空間分布が得られた。均一であることの検証は、26 mm $\phi \times 7.5$ mm t の鋼管を水平方向に移動させ、検出器の出力信号で行った。

6 測定精度の向上

6.1 相対 γ 線透過量計算の精度向上

相対 γ 線透過量の計算は、(2)式、(3)式および(4)式により実行される。当初、Fig. 4 に示すように、鋼管の断面方向へ等間隔に分割し、各々の γ 線が透過する距離を計算していた。しかし、鋼管の断面形状より明らかなように、管両端の近傍を透過する γ 線は、水平方向の位置がわずかに異なっても γ 線透過量は急激に変化する。これに対して、管中央部を透過する γ 線は、水平方向の位置がある程度異なっても γ 線透過量は緩慢にしか変化しない。それゆえ、相対 γ 線透過量計算の精度を向上させるには、Fig. 9 に示すように、鋼管の断面方向の分割を、等間隔から管端部は密に、管中央部は疎に分割するよう変更した。もちろん、鋼管の外径および肉厚を考慮し、分割点を最適化することも実施している。この改善により、肉厚サイズの計算精度が数%から、0.1% 以下に向上した。

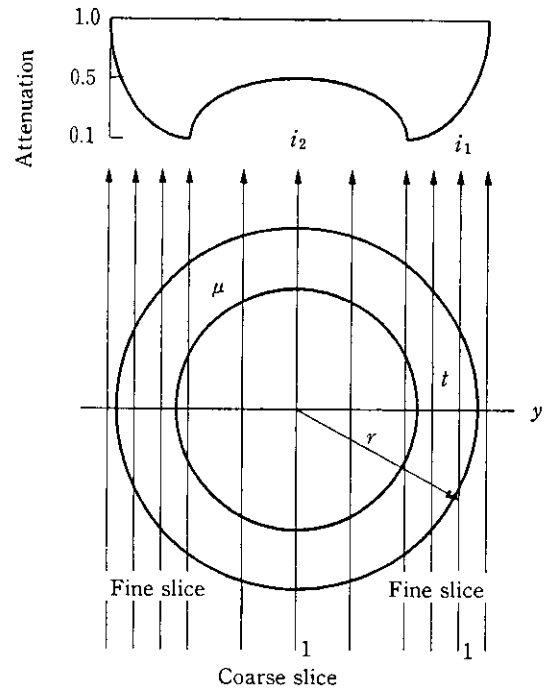


Fig. 9 Improvement of accuracy by relative γ -ray transmissivity calculation technique

6.2 統計ノイズの圧縮

γ 線の測定には統計ノイズを避けて通れない。統計ノイズは γ 線が粒子の性質を持ち、 γ 線検出器はこの粒子の数を計数することにより発生する。鋼材を透過してくる粒子の数は、(1)式より明らかなように、鋼材を透過する距離が長いほど減衰が激しく、検出器に到達する粒子の数は減少する。単位時間当たりの γ 線計数値が小さくなると、計数値の平方に反比例して統計ノイズが増加することが知られている。統計ノイズが増加すれば、測定精度が劣化する。したがって、 γ 線を使用した測定器では、この統計ノイズを何らかの手段を用いて圧縮することを行っている。

Fig. 2 に示したように、ストレッチレギュレーサで圧延された鋼管の肉厚プロフィールは、単位時間当たりきわめて急峻に γ 線計数値は変化する。従来は γ 線計数値が急激に変化する場合は信号処理方法は考慮されていない。そこで、 γ 線計数値の時間的変化とともに信号処理のゲインを可変することのできる最適デジタルフィルタである kalman filter²⁾を適用した。

6.3 総合精度の検証

Fig. 10 に測定精度の検証のため実験的に圧延した鋼管を、ハンディタイプの超音波厚さ計で測定した値と、熱間肉厚計で測定した値の相関図を示す。当初の目標である測定精度が実現し、管先端部の肉厚プロフィールが完全に再現されていることがわかる。

Fig. 11 にオペレータガイダンスに使用している CRT 画面の一例を示す。鋼管の先端部および後端部は、管端からの位置が判別できるよう詳細に表示している。また、ロット内の肉厚プロフィールの傾向が容易に識別できるよう計 6 ピース、重ね表示を行っている。

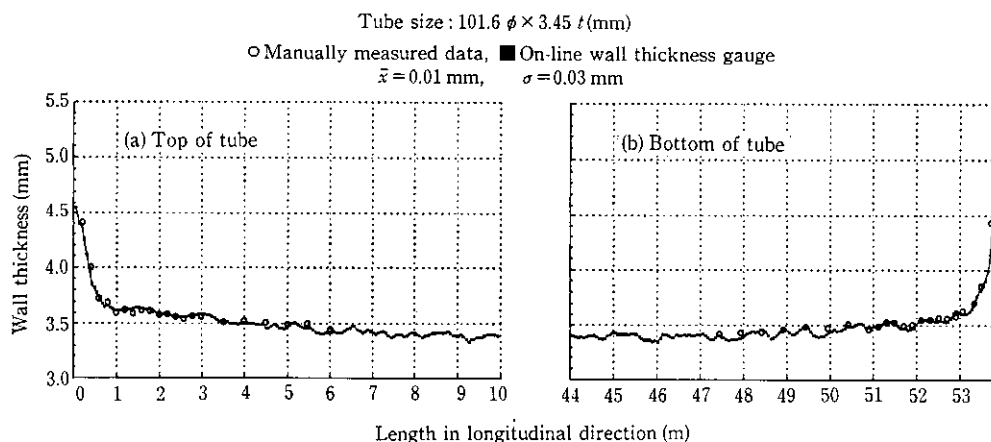


Fig. 10 Comparison of data measured by on-line wall thickness gauge with manually measured data

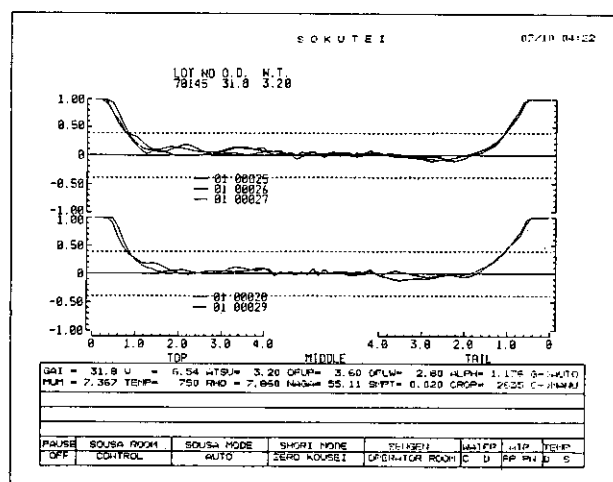


Fig. 11 Operator guidance of wall thickness information by VDT

7 結 言

知多製造所では中径シームレス管工場に続き、小径シームレス管工場でも熱間肉厚計を開発し、オンライン化することに成功した。

この熱間肉厚計の開発で次の成果が得られた。

- (1) 小径シームレス管の全圧延サイズに対して、FMS化されたサイズ替えのない熱間肉厚計が開発できた。
- (2) 3次元異形の鋼材である鋼管に対して、 γ 線を用いて肉厚を測定するための一般的な測定原理を確立した。
- (3) γ 線あるいは放射線を用いて鋼材寸法を測定する場合の最適信号処理方法が解明できた。

現在、小径シームレス管工場のストレッチレデューサ出側に設置され、圧延の操業管理に積極的に使用されている。

おわりに、この熱間肉厚計のハードウェア等の開発に協力いただいた富士電機株式会社の各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 船生 豊, 奥村 精, 松岡逸雄, 村上昭一: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 2, 23
- 2) 計測自動制御学会編: 「自動制御ハンドブック, 基礎編」, (1983), 209-211