

## Development of Interstand Thickness Gage for Hot-Strip-Finisher Mill



新田 純三  
Junzo Nitta  
千葉製鉄所 設備技術  
部電気計装技術室 主  
査(部長)



御厨 尚  
Takashi Mikuriya  
千葉製鉄所 設備技術  
部電気計装技術室 主  
査(課長)



前田 一郎  
Ichiro Maeda  
千葉製鉄所 設備技術  
部電気計装技術室



武智 敏貞  
Toshisada Takechi  
千葉製鉄所 企画部企  
画室 主査(課長補)

### 1 緒 言

従来より、ホットストリップミルにおいて、板厚制御は最も重要な制御項目の1つであり、油圧圧下 AGC (Automatic gage control) の導入や、仕上ミル通板時の板厚制御モデルの向上により板厚精度向上を図ってきた。

仕上スタンド間の板厚を精度良く測定し、その測定値に基づいて制御すれば、最終スタンド出側の板厚精度を大幅に向上させることが可能である。しかし、これまでは、仕上スタンド間の板厚を直接測定する板厚計が無く、板厚演算モデル式により算出していた。具体的には、ロールギャップと圧延荷重実測値により算出するゲージメータ式や、仕上ミル内でのマスバランスが一定であると、ロール回転数バランスにより求めるマスフロー式などがある。いずれも、モデル入力値の計測誤差や、モデル式のパラメータのチューニングに限界があり、板厚演算モデル式の精度向上には限界がある。

したがって、なお一層の向上を図るためには、仕上スタンド間の板厚を精度良く測定できる厚さ計を開発することが非常に有効な手

### 要旨

ホットストリップミルの仕上スタンド間に設置可能な X 線厚さ計を開発し、千葉製鉄所第2熱間圧延工場に実装しオンライン使用可能であるとの結論を得た。この厚さ計は、仕上ミルのスタンド間の狭いスペースに設置できるように C フレーム下部を小型軽量化しており、またスタンド間ルーバーの上下動により発生する板厚測定上の外乱を補正する機能を持っている。また、仕上ミルのどのスタンド間にも設置可能なように、1.00~35.00 mm の板厚まで測定が可能である。板厚の測定精度は、仕上ミル出側に設置している従来の X 線厚さ計と同等レベルである。

### Synopsis:

An X-ray thickness gage, which can be installed between the stands of the hot strip finishing mill, has been developed, and is now working at No. 2 hot strip mill of Chiba Works.

The bottom side of its gage head is made smaller and lighter so that it can be installed between stands.

The correcting function of the strip pass line is additionally provided, to eliminate the measurement error caused by the vertical movement of the loop. The thickness range, which can be measured, is designed to be very wide, to allow its installation between any two stands. The accuracy of the newly developed gage is almost the same as that of the conventional X-ray thickness gage which was installed at the delivery side of the finishing mill.

段となる。

今回、上仕ミルのスタンド間での板厚が測定可能で、かつ測定板厚範囲の広い X 線厚さ計を開発し、千葉製鉄所第2熱間圧延工場に設置した。

本報では、試験機における基礎特性調査結果と、実ラインへ取り付けテスト結果について報告する。

### 2 スタンド間厚さ計に要求される技術

ホットストリップミルの仕上スタンド間に放射線厚さ計を設置する場合、まず第1に問題となるのは、ルーバー、ガイドなどの機械品との干渉であり、とくにパスライン下部のスペースは極端に狭く、Fig. 1 に示すように下部の高さ方向の許容寸法はわずか 400 mm 強である。従来の厚さ計(仕上ミル出側に設置のもの)は、この高さが 800 mm 以上有り、これを仕上ミルのスタンド間に入れることは、寸法的に不可能であった。

さらに、寸法的な問題を克服しても、Fig. 2 に示すように、ルーバーの上下動により鋼板が上下に動くとともに傾きを持つために、散乱線量の影響やみかけ上の鋼板の厚さが変動し測定誤差が生

\* 昭和61年2月18日原稿受付

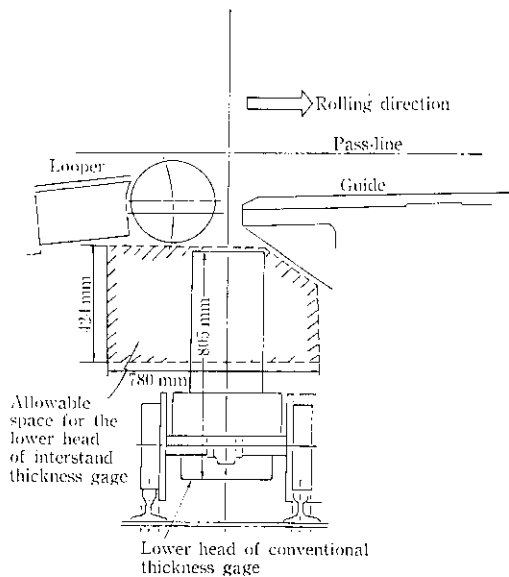


Fig. 1 Comparison of allowable space for the lower head of interstand thickness gage with necessary space for the lower head of conventional thickness gage

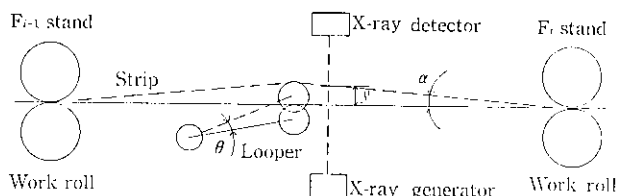


Fig. 2 Layout of hot strip mill finishing stands

ずる。

ホットストリップミルの仕上スタンドは一般に6ないしは7スタンドあり、4~50 mm の鋼板を 1~20 mm 程度に圧延する。そのため、任意のスタンド間に設置できる装置とするためには、測定板厚範囲を従来の 1~25 mm より、1~35 mm 程度まで拡大する必要がある。

以上により、スタンド間厚さ計の開発ポイントは次の4点に要約できる。

- (1) パスライン下部の寸法を極力小さくし、スタンド間に設置可能とする。
- (2) スタンド間ルーバーで鋼板が上下動することにより生ずる測定誤差を解消する。
- (3) どのスタンド間でも使用可能なように、測定板厚範囲を広くする。
- (4) 従来の仕上ミル出側厚さ計と同等の精度を保证する。

### 3 X線管の仕様

#### 3.1 放射線源の選択

パスライン下部の寸法を小さくするためには、放射線源を $\gamma$ 線方式でなく、X線方式にすることが必要である。この理由は以下のとおりである。

- (1)  $\gamma$ 線厚さ計の場合、 $\gamma$ 線発生器を鉛で遮へいする必要があるため、線源Cs、強度10 Ciの $\gamma$ 線発生器でも、高さが900 mm

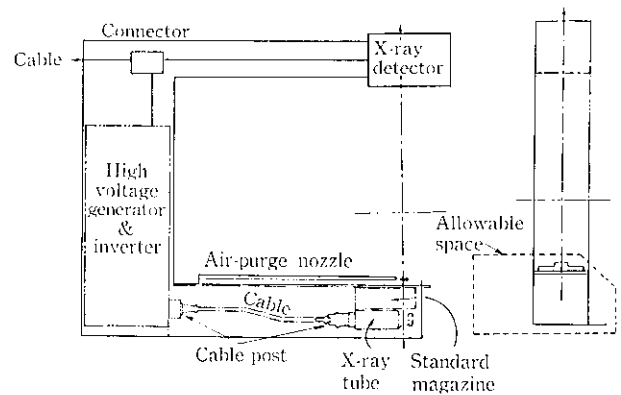


Fig. 3 Improvement of X-ray generator

程度となり、制限スペース内に入らない。

- (2)  $\gamma$ 線で、X線よりも統計雑音誤差を小さくするためには、 $\gamma$ 線の強度を30 Ci以上にしなければならず、とうてい制限スペース内に入らない。

このために、放射線源としてはX線方式を採用した。

#### 3.2 X線発生装置の改造

従来型X線厚さ計がスタンド間に設置できなかった理由は、X線管と高圧トランスが一体構造のため、X線発生器が大きくなっており、制限スペースに入りきらなかったためである。

そこで、Fig. 3に示すように、X線管と高圧トランスを分離して収納することにより、制限スペース内に設置することをねらった。

#### 3.3 X線管の仕様

X線管の出力は、最大板厚と板厚精度(統計雑音誤差量に依存する)を決定する重要なポイントである。板厚を厚いものまで精度良く測定するために、最大定格を管電圧160 kV、管電流10 mAとした。この理由は以下のとおりである。

- (1) X線管と高圧トランスを分離した形で工業的環境に耐えうるX線管は、管電圧160 kV、管電流10 mAが最大である。
- (2) これ以上の定格では、高圧トランスが非常に大きくなり、小型軽量化できない。

## 4 試験機での基礎特性調査

#### 4.1 実験装置仕様

前章で示したX線発生装置を試作し、以下の項目について基礎特性調査を行った。

- (1) X線発生装置が安定動作するか
  - (2) 統計雑音誤差が十分小さくおさまるか
  - (3) ルーバーの上下動により発生する測定誤差の把握とその対策
- 基礎特性調査を実施するために、Fig. 4に示すX線発生機構とその特性を調査するために、Fig. 5に示す実験装置を製作した。

この実験装置は、実ライン状況を想定して、次の操作を可能とした。

- (1) サンプル板の高さ方向の調整
- (2) サンプル板の角度調整
- (3) 測定空間(X線発生器とX線検出器の間隔)の調整

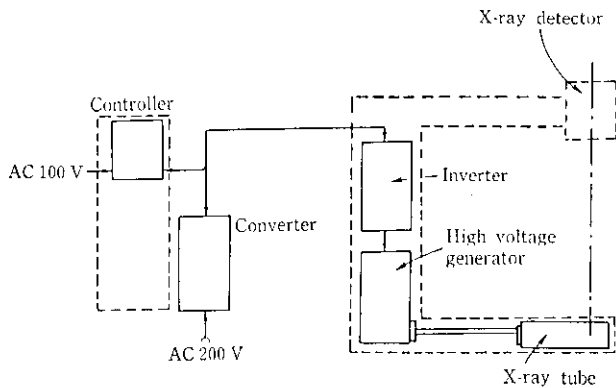


Fig. 4 X-ray generator system for investigation

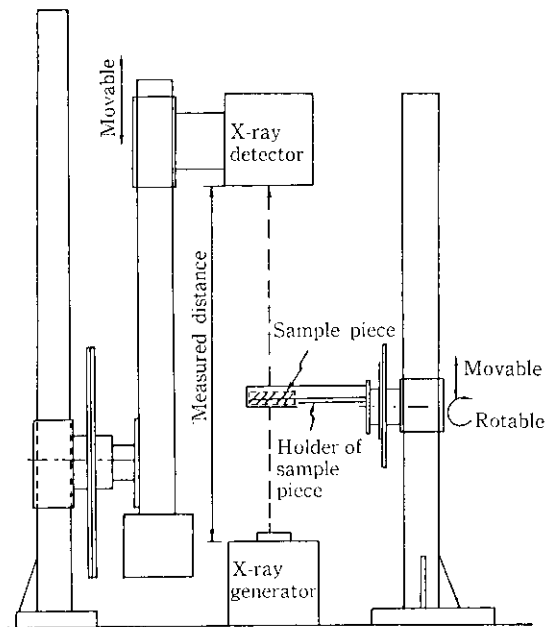


Fig. 5 Installation for testing X-ray generator and fundamental characteristic investigation

#### 4.2 X線発生装置の安定性

X線発生装置の管電圧および管電流の安定性と、サンプル板に対するドリフトの量を調査した。

管電圧および管電流はそれぞれ、150 kV、5 mA に設定し調査を行い、その結果を **Table 1** に示す。ドリフト調査においては、実機を想定して、Fig. 5 に示す測定空間距離を 1420 mm、パスラインをX線発生装置の上 360 mm として測定した。

目標性能として従来のX線厚さ計のものと同一レベルとしたが、いずれも目標性能を十分満足する結果が得られた。

以上により、X線発生装置を、X線管と高圧トランスとに分離したことによる影響がないことが確認された。

#### 4.3 統計雑音誤差

統計雑音誤差は、検出器到達位置で、X線ビーム径の大きさを、120 mmφ および 70 mmφ で調査した。

**Fig. 6** にその結果を示す。統計雑音誤差も従来のX線厚さ計と同程度に納まることがわかった。

しかし、ビーム径 70 mmφ がほぼ限界であり、これ以上ビーム

Table 1 Stability of X-ray generator

| Item                     | Target of stability            | Result of stability             |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Voltage of X-ray tube    | $\pm 0.1\%/8 \text{ h}$        | $\pm 0.0035\%/8 \text{ h}$      |
| Current of X-ray tube    | $\pm 0.2\%/8 \text{ h}$        | $\pm 0.02\%/8 \text{ h}$        |
| Drift at thickness 10 mm | 20.5 $\mu\text{m}/8 \text{ h}$ | 7.5 $\mu\text{m}/14 \text{ h}$  |
| Drift at thickness 20 mm | 40.5 $\mu\text{m}/8 \text{ h}$ | 7.5 $\mu\text{m}/14 \text{ h}$  |
| Drift at thickness 30 mm | 60.5 $\mu\text{m}/8 \text{ h}$ | 11.2 $\mu\text{m}/13 \text{ h}$ |

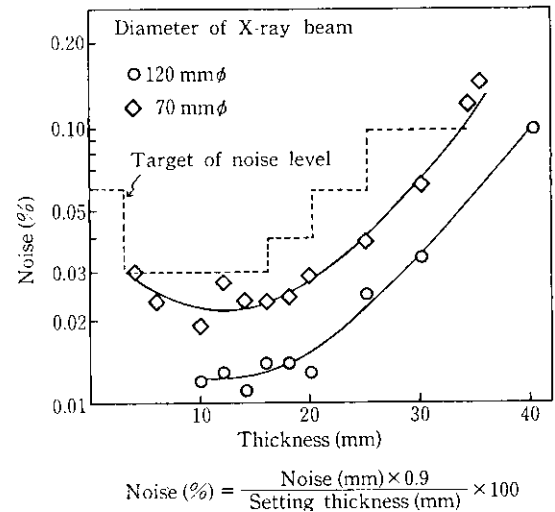


Fig. 6 Relation between strip thickness and noise

を絞ると精度上問題となる。

#### 4.4 パスライン高さ変動誤差

スタンド間ルーバーにより、鋼板のパスライン高さが変動する。パスラインが高くなると鋼板が検出器に近づくために、散乱X線が検出器に達する量が多くなり、真の板厚に対して薄く検出してしまふ。

X線の散乱線に関しては、鋼板の厚さおよびX線ビームの照射角度などにより、その分布が変化する。しかし、この散乱線の特性に関しては、明確に数式化されていない。

したがって、パスライン高さ変動に対する誤差を実験により求め、それにより補正する方法を考えることとした。

基本的には、検出器の径 120 mmφ に対して、X線ビーム径を絞った場合、パスライン高さ変動に対する散乱線の影響がどう変化するかを調査することとした。

そこで、検出器径 120 mmφ に対して、ビーム径を検出器位置で 120 mmφ とした場合と 70 mmφ とした場合のパスライン高さ変動誤差を調べた。**Fig. 7** にその結果を示す。これから、次のことが言える。

- (1) ビーム径を 70 mmφ にしても 120 mmφ に比して、パスライン高さ変動誤差は小さくならない。
- (2) パスライン高さ変動誤差は  $-0.25\%/100 \text{ mm}$  程度あり、変動が大きい。

X線ビーム径は、Fig. 6 により 70 mmφ 以下に絞れないため、散乱線の影響をおさえるために、散乱線遮へいスリットを考えた。

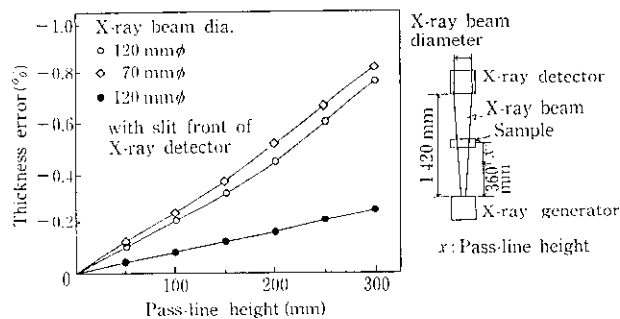


Fig. 7 Relation between pass-line height and thickness error

これは検出器の前にタングステン製のすの子状のスリットをつけたものである。これにより、検出器へ直進するX線は通すが、散乱線の非直進成分のX線が検出器に入るのを防いでいる。

X線ビーム径 120 mmφ、散乱線遮へいスリットのスリット間隔が 1 mm のときのパスライン高さ変動誤差量を Fig. 7 に示す。これからわかるように本スリットをつけると、パスライン高さ変動誤差は小さくなる。したがって、パスライン高さがわかれば、この影響を補正することにより ±0.05% 以下の誤差におさえることができる<sup>1)</sup>。

#### 4.5 パスライン角度変動誤差

スタンド間ルーバーが上下動することにより、被測定材の角度が変動する。Fig. 8 に示すように、鋼板が角度  $\alpha$  だけ傾けば、X線ビームの透過距離が長くなり、真の板厚よりも厚く検出する。

その補正式は、幾何学的関係により (1) 式で表わされる。

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha} \quad (1)$$

$\Delta h$ : 厚さの誤差

$h$ : 真の板厚

$\alpha$ : 鋼板の角度

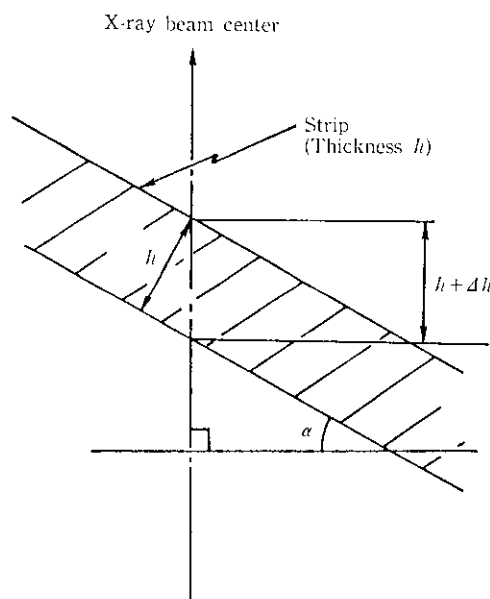
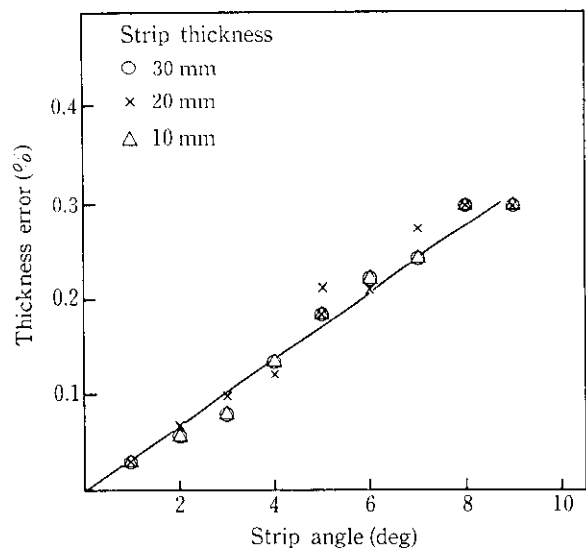
Fig. 8 Geometrical thickness error when strip inclines at an angle of  $\alpha$ 

Fig. 9 Result of remainder error after compensation

10, 20, 30 mm の厚さの鋼板を傾けて、傾斜角により (1) 式の補正式を使って板厚測定した後に残る誤差の実測結果を Fig. 9 に示す。測定条件はビーム径 120 mmφ、散乱防止スリット間隔 1 mm である。幾何学的補正後に残る誤差は散乱の影響と考えられる。この誤差は測定板厚に無関係であり、また鋼板の角度と比例関係にある。したがって、鋼板の傾斜角により (1) 式の幾何学的補正量と Fig. 9 の誤差量をたし込めば、十分な測定精度が得られる。

## 5 オンライン設備の仕様

基礎特性調査をもとにして、実機設備用スタンド間厚さ計を製作し、千葉製鉄所第2熱間圧延工場の仕上ミルの F3, F4 スタンド間に実装し、特性を確認した。本章では、オンライン設備の仕様を示し、次章に特性確認結果を示す。

### 5.1 スタンド間厚さ計の仕様

#### 5.1.1 機械構造

X線厚さ計の検出部は Fig. 10<sup>2)</sup> に示す C フレーム構造とした。X線管と高圧発生器を分離することにより、C フレーム下部を小型

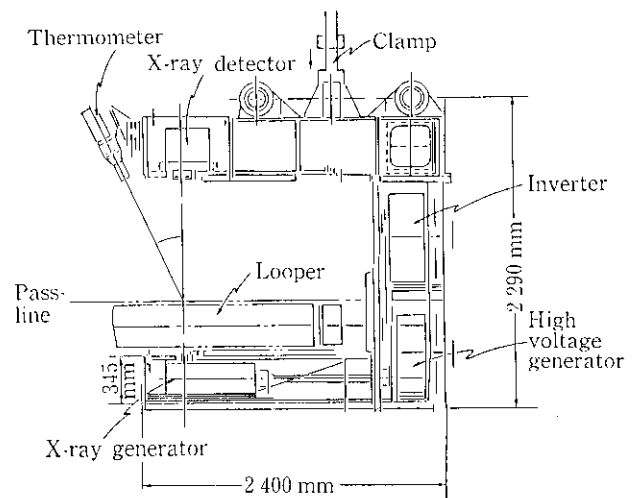


Fig. 10 Schematic of the thickness gage device

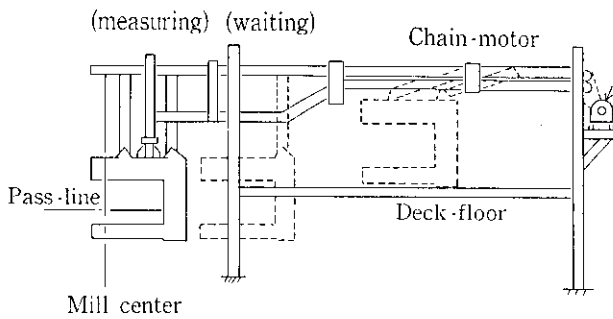


Fig. 11 Setting the interstand thickness gage device between mill-stands

Table 2 Specifications of interstand thickness gage

| Item               | Specification        |
|--------------------|----------------------|
| X-ray tube voltage | 150 kV (160 kV max.) |
| X-ray tube current | 5 mA (10 mA max.)    |
| Setting accuracy   |                      |
| 1.00~10.00 mm/t    | ±0.1%                |
| 10.01~15.99 mm/t   | ±10 μm               |
| 16.00~35.00 mm/t   | ±0.1%                |
| Noise              |                      |
| 1.00~ 9.99 mm/t    | ±0.05%               |
| 10.00~19.99 mm/t   | ±0.08%               |
| 20.00~24.99 mm/t   | ±0.10%               |
| 25.00~29.99 mm/t   | ±0.20%               |
| 30.00~35.00 mm/t   | ±0.30%               |

軽量化した。またレール布設が、スタンド間では困難なために、Fig. 11<sup>2)</sup> に示すような懸下型とし、ロール替などでは、ミル外へ引き出せるような構造としている。

### 5.1.2 厚さ計仕様

Table 2 に厚さ計の仕様を示す。

スタンド間厚さ計の精度は、従来の仕上ミル出側厚さ計と同等レベルである。板厚測定範囲は、どのスタンド間でも板厚測定が可能のように、1.00~35.00 mm とした。

### 5.2 スタンド間厚さ計の板厚演算法

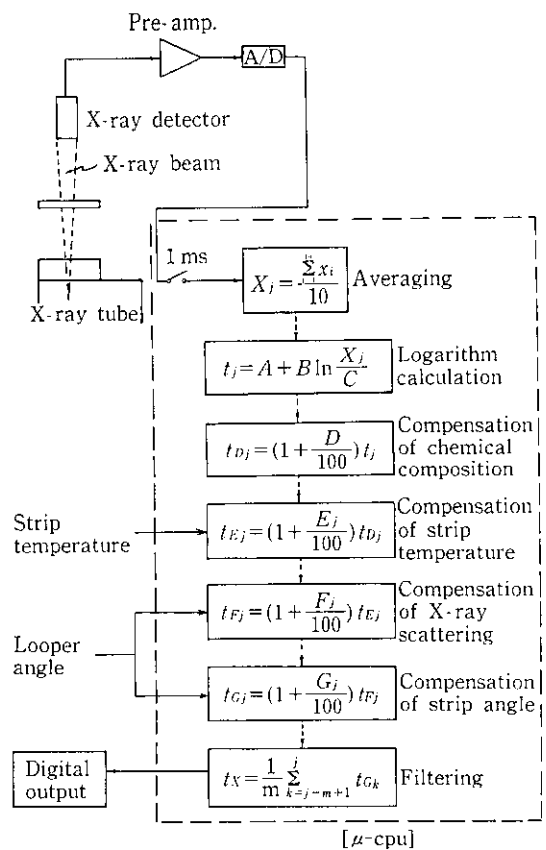
Fig. 12 に、板厚演算法を示す。従来の合金成分補正および温度補正に加えて、パスライン高さ補正とアングル補正を付加していることが特徴である。

Fig. 2 に示したように、スタンド間ルーバーが角度  $\theta$  を持つことにより、鋼板がパスラインに対して  $y$  だけ上昇して検出器に近づき、かつ、鋼板が角度  $\alpha$  で傾くために、4 章で述べたパスライン高さ変動誤差とパスライン角度変動誤差が生ずる。この  $y$  と  $\alpha$  を、ルーバーの角度  $\theta$  をもとにして幾何学的関係により求め<sup>3)</sup>、4 章で述べた補正データをもとに修正していく。 $y$  によりパスライン高さ変動誤差を修正するものをパスライン高さ補正とし、 $\alpha$  によりパスライン角度変動誤差を修正するものをアングル補正としている。

## 6 オンライン設備としての特性

### 6.1 板厚設定精度

Fig. 13<sup>2)</sup> は、スタンド間厚さ計で、板厚が既知のサンプル板を



$A, B, C$ : Constant  
 $x_i$ : Sampling signal  
 $D, E_j, F_j, G_j$ : Compensational parameter  
 $m$ : Number of averaging filter

Fig. 12 Method of thickness calculation

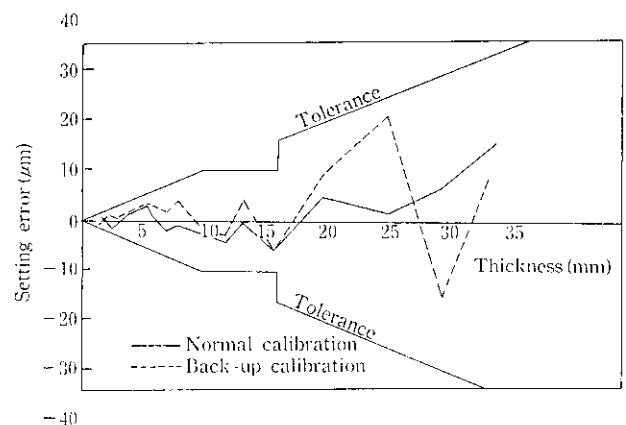


Fig. 13 Results of setting accuracy with method of normal calibration and back-up calibration

測定したデータである。ノーマル校正(内蔵サンプルを使った校正)とバックアップ校正(内蔵サンプル不使用時の校正)とも、0.1%の測定精度におさまっており、従来の厚さ計と同等の精度が得られている。

### 6.2 ルーバー補正機能

実正延状態では検証が不可能なため、スタンド間に、板厚 2.56 mm の鋼板を入れ、下流スタンドで板を挟み、ルーバーを上下動させて、実正延条件と同等の条件をつくり、ルーバー補正機能の検証

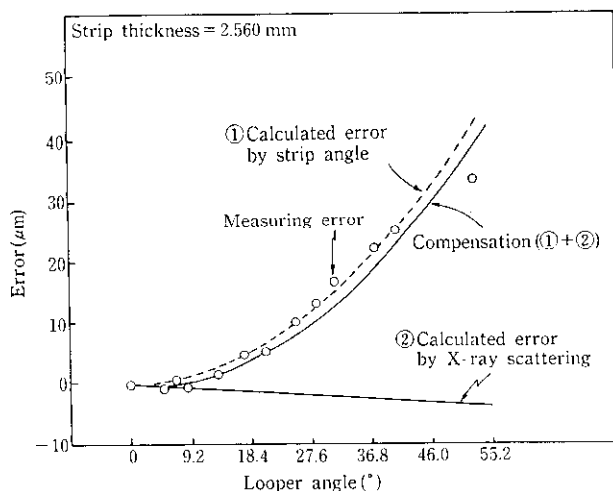


Fig. 14 Result of compensation for the errors caused by strip angle and X-ray scattering

を行った。

Fig. 14<sup>2)</sup> にその結果を示す。ルーバー角度により、鋼板の傾きとパスライン高さが変動し、それらはほぼ比例関係にあり、ルーバー角度 20 度で、鋼板の傾きは約 4 度、パスライン高さは約 250 mm となる。Fig. 14 の ① が角度補正值、② がパスライン高さ補正值カーブであり、その和が最終補正值となる。実測値と最終補正值は良く合っていることがわかる。このことよりルーバー角度をもとにした補正方法は妥当であると言える。

### 6.3 統計雑音誤差

Fig. 15 に、測定板厚 10 mm の場合の雑音実測例を示す。そのときのライン操業状態における 90% 統計雑音レベルを Table 3 に示す。統計雑音レベルは、スタンド間という振動や誘導ノイズの大きい悪環境下でも十分小さく、精度的にも十分満足できるものとなっている。

### 6.4 従来の厚さ計との比較

圧延中の鋼板を、スタンド間厚さ計と最終スタンド出側に設置し

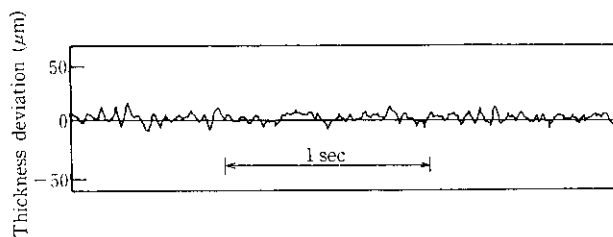


Fig. 15 Noise of X-ray detector signal (strip thickness=10 mm)

Table 3 Noise level at thickness 10 mm  
(Tolerance =  $\pm 8.0 \mu\text{m}$ )

| Condition              | Noise level ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------|-------------------------------|
| During maintenance day | $\pm 3.0$                     |
| During rolling         | $\pm 4.5$                     |

Noise level = Noise ( $\mu\text{m}$ )  $\times 0.9$

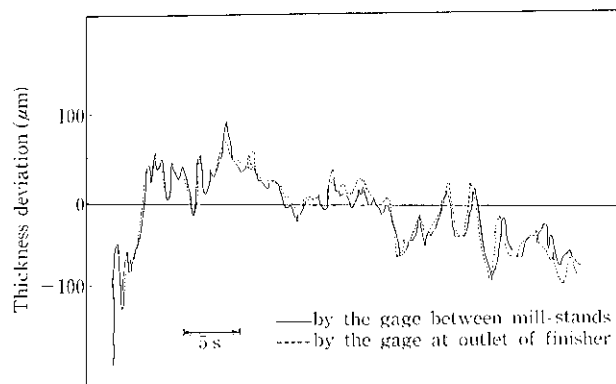


Fig. 16 Comparison of the thickness value measured by the interstand thickness gage with that measured by the thickness gage set at outlet of finisher

ている従来の X 線厚さ計とで測定した比較データを Fig. 16<sup>2)</sup> に示す。

被測定鋼板は、スタンド間厚さ計より上流のスタンドで圧延して下流側のスタンドは、圧下を開放して通板したものである。

この 2 つのデータは互いによく一致しており、スタンド間厚さ計は、従来の X 線厚さ計と同等であることがわかる。

### 6.5 スタンド間厚さ計の利用技術

従来正確に計測できなかったスタンド間の板厚を、スタンド間厚さ計を使って実測できるため、従来の板厚制御のレベルアップを図ることができる。

以下にその応用例を示す。

#### (1) モニター AGC

従来のモニター AGC は最終スタンド出側に X 線厚さ計を使って制御するのに対し、スタンド間に設置したスタンド間厚さ計を使ってモニター AGC を行えば、むだ時間を短縮でき板厚精度が向上する。とくに途中スタンド仕上材に対して効果がある。

#### (2) フィードフォワード AGC

従来のモデル板厚値のかわりに、スタンド間厚さ計の出力値を使うことにより、測定制度が向上し、制御性が向上する。

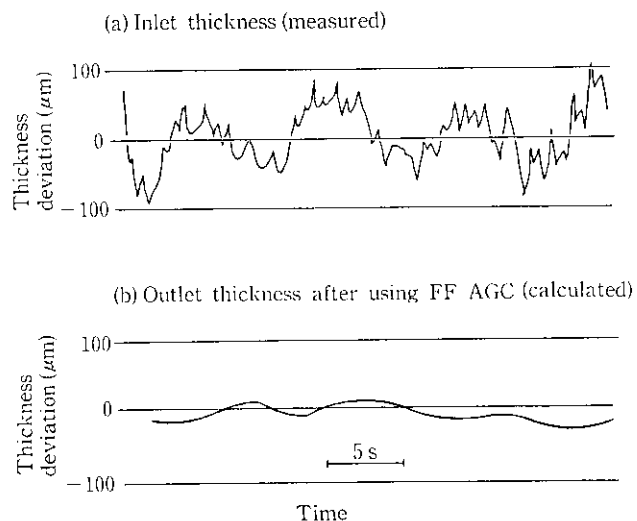


Fig. 17 Example of thickness control by using Feed Forward AGC with interstand thickness gage F4 stand

### (3) ダイナミックセットアップ

通板予測モデルで設定した、途中スタンドの板厚予測値の誤差を、スタンド間厚さ計で検出する。この検出誤差をもとに下流スタンドの通板設定値を正確に修正することで、鋼板の先端板厚精度を向上させることができる。

Fig. 17 は、F3 スタンド出側のスタンド間厚さ計の出力をもとに、F4 スタンドに対して、フィードフォワード AGC を実施した例である。F4 スタンドの板厚は、ゲージメータ式で演算した結果であり、ロール偏芯等の外乱を平滑して出力している。F3 出側で  $\pm 100 \mu\text{m}$  程度の偏差があったものを、フィードフォワード制御により  $\pm 20 \mu\text{m}$  程度に制御していることがわかる。本例でもわかるように、スタンド間厚さ計は実制御に十分活用できる。

## 7 結 言

ホットストリップミルの仕上スタンド間に設置可能な仕上スタンド間厚さ計を開発し、千葉製鉄所第2熱間圧延工場の仕上スタンド

間に設置した。測定精度は、従来の仕上ミル出側に設置しているX線厚さ計と同等である。

スタンド間厚さ計としては、以下の特徴がある。

- (1) 厚さ計検出部は、Cフレーム構造であり、Cフレーム下部寸法は高さ 370 mm、幅 380 mm であり、スタンド間に十分に入る寸法である。
- (2) スタンド間ルーバーの上下動による厚さ測定誤差を解消するために、ルーバーの角度を取り込み補正する方式をとっている。
- (3) どのスタンド間にも設置可能なように、測定板厚範囲は 1.00~35.00 mm である。
- (4) 板厚測定精度は、設定板厚精度、統計雑音誤差とも、従来の仕上ミル出側のものと同等レベルである。

今回開発したスタンド間厚さ計を利用することにより、ホットストリップミルの板厚制御のより一層の精度向上が可能となった。

おわりに、本装置開発にあたり、多大の御協力をいただいた理学電機株式会社に対して深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 新田純三, 御厨 尚, 武智敏貞, 森山暢孝: 鉄と鋼, **70** (1984) 13, S378
- 2) 前田一郎, 御厨 尚, 新田純三, 北尾斉治, 吉村宏之, 吉田邦雄: 鉄と鋼, **70** (1984) 13, S379