

# 厚板せん断ライン用レーザ方式板厚計の開発

## Development of Laser Thickness Gauge in Steel Plates Shearing Line

手塚 浩一 TEZUKA koichi JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区） 制御部制御技術室 主任部員（課長）

### 要旨

JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）では、厚板の全長板厚保証を目的としてレーザ方式板厚計を開発、厚板工場せん断ラインにて実運用を行なっている。レーザ方式板厚計では、従来の $\gamma$ 線方式板厚計に対して、高応答性および高計測分解能を有し、搬送中の鋼板の先端部を含む全長の板厚計測、保証を行なうことが可能である。レーザ方式板厚計では、従来の $\gamma$ 線方式板厚計に対して温度変化などによる機械的な変形、振動の影響を受けやすく、必要な性能を確保するため、オンライン校正方法を考案、適用することにより、実運用可能な板厚計を実現している。

### Abstract:

JFE Steel has developed a laser thickness gauge for the purpose of guaranteeing the full-length thickness of steel plates, at the plate mill shearing line in East Japan Works (Keihin). The laser thickness gauge with high response and high measurement resolution provides thickness measurement of the overall length, including the tip of the steel plate being conveyed. The laser thickness gauge is susceptible to the effect of mechanical deformation due to temperature changes, and vibration. In order to ensure the necessary performances, an on-line calibration method was proposed and applied, and a real operational plate thickness gauge was successfully developed.

## 1. はじめに

JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）厚板工場せん断ラインへの導入を目的として、レーザ方式板厚計を開発、運用を行なっている。本装置により、既存の $\gamma$ 線方式板厚計に対し、応答性および計測分解能を向上させ、搬送中の鋼板最先端部を含む全長の板厚を高精度で計測することが可能となり、品質保証レベルの向上に貢献している。

本報告では、開発に当たって実施した応答性、計測精度の確保および耐久性、信頼性確保方法の検討結果と実際の装置でのオフライン、オンライン評価結果について述べる。

## 2. レーザ方式板厚計

### 2.1 原理

厚板向け板厚計として要求される主な仕様を示す。

- (1) 測定対象:
  - ①板厚: 5~50 mm
  - ②板幅: 1 500~5 250 mm
  - ③板長: 6~27 m
  - ④鋼板搬送速度: ~90 m/min
- (2) 計測位置: 板幅方向 3 点（両エッジ、センタ）  
板長方向連続（プロファイル）
- (3) 計測精度（オフライン、 $\pm 2\sigma$ ):  $\pm 30 \mu\text{m}$

（精度は既設 $\gamma$ 線方式板厚計仕様に準ずる）

(4) 不感帯（先端部）: <30 mm

鋼板搬送速度: 90 m/min

厚板を含む鋼板のオンライン板厚計としては、従来、主に $\gamma$ 線あるいはX線方式板厚計が使用されている。これらの板厚計は、線源から $\gamma$ 線（X線）を対象鋼板に対して投射し、鋼板を透過した $\gamma$ 線（X線）を検出器で検出、鋼板を透過する際の $\gamma$ 線（X線）の透過減衰量から板厚を算出・計測するものであり、パスラインおよびセンサ（線源、検出器）の位置変動や、ダスト、水蒸気などの外乱要因の影響を受けにくく、安定した板厚計測が可能である。

しかし、**図 1** に示すように、 $\gamma$ 線方式では照射ビーム径が大きく（ $\sim\phi 40$  mm 程度）、検出器の応答性が低い（ $\sim 50$  ms）ことから、搬送中の鋼板先端部に関しては、計測精度が劣

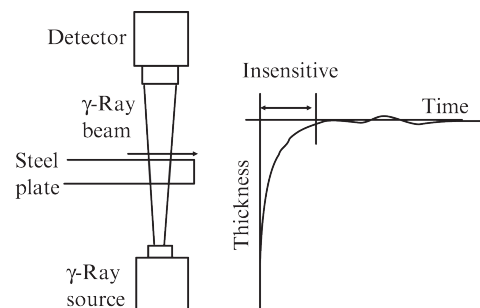


図 1  $\gamma$ 線方式板厚計

Fig. 1 Response of  $\gamma$ -ray thickness gauge

2014 年 9 月 2 日受付

化するという欠点があり、先端部の正確な板厚測定を行なうためには、鋼板の低速搬送又は、停止が必要となっている。また、計測原理的に、鋼板板厚が増加すると $\gamma$ 線減衰量が増加し、計測精度が悪化する。

レーザ方式板厚計<sup>1)</sup>は、**図2**に示すように単体計測精度の高い(～数マイクロメートル)三角測量方式のレーザ方式距離計を使用し、鋼板上下面の鉛直軸上に2つの距離計を対向して配置、固定し、鋼板面までの距離(L1, L2)と、距離計の設置位置間隔(L0)から板厚 $d$ を算出する(板厚 $d=L0-L1-L2$ )。

レーザ方式板厚計では、計測点となるレーザスポット径が小さく(～ $\phi 1$  mm)、高応答(数マイクロ秒)計測も可能であり搬送中の鋼板に対しても鋼板最先端部を含む全長の高精度板厚プロファイルの計測が可能である。

レーザ距離計を使用するため、粉塵、水蒸気などの影響を受けやすく、高温鋼板などを対象とした熱間計測などの環境の厳しいラインへの適用は困難であるが、厚板せん断ラインなどの冷間(～300℃)対象の環境の良い条件であれば、適用可能である。

また、**図3**に示すように $\gamma$ 線板厚計とは異なり、計測対象の板厚に精度が影響されることはないので、安定した板厚計測の実現が可能である。

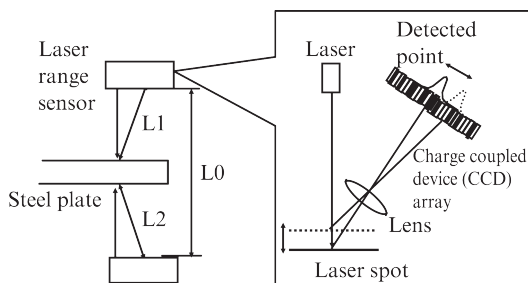


図2 レーザ方式板厚計

Fig. 2 Thickness gauge with laser range sensor

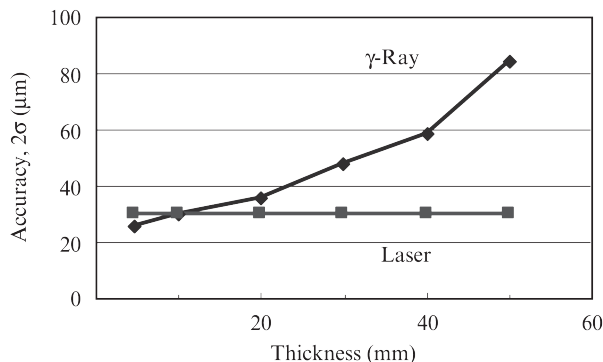


図3 板厚計精度(オンライン静止精度)

Fig. 3 Accuracy of thickness gauge (Online)

## 2.2 レーザ方式板厚計の精度

レーザ方式板厚計では先に述べたように、計測対象に対向設置されるレーザ距離計により対象表面までの距離を計測するため、計測中のレーザ距離計と対象との相対位置・角度の変動などが計測精度に大きな影響を与える。

計測精度に影響を与える主要因を下記に示す。

- (1) レーザ距離計誤差(オフライン精度)
  - ① 特性, バラツキ(直線性, ノイズ)
  - ② 温度ドリフト(オフセット/直線性変動)
- (2) 板厚計誤差(オンライン誤差)
  - ① 距離計位置, 角度変動  
距離計を保持するためのフレーム(構造物)の熱膨張などによる位置, 角度の変動
  - ② 鋼板の角度変動  
鋼板自体のひずみ, 振動などによる鋼板と距離計との相対位置, 角度の変動
  - ③ 鋼板表面性状  
鋼板表面のレーザ光の反射, 拡散状態の変化による距離計の検出値変動
  - ④ 鋼板～距離計間の空間影響  
鋼板温度が環境温度以上の場合の熱揺らぎによるレーザ光の変動

## 2.3 レーザ方式板厚計の機器構成

レーザ方式板厚計では、鋼板上下面に対して鉛直な一直線上に2つのレーザ距離計を正確に配置し、さらに各距離計の計測方向を一致させることが精度確保のために必要であるとともに、鋼板板幅方向の計測指定位置へ移動する機構が必要となり、レーザ距離計を保持、移動する機能、構造を有する装置の検討が必要となる。

距離計を配置、保持するフレーム形状の主な例を**表1**に示す。

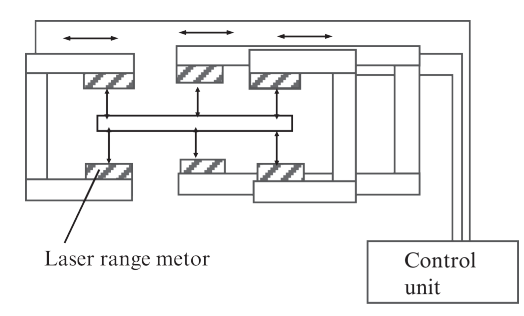
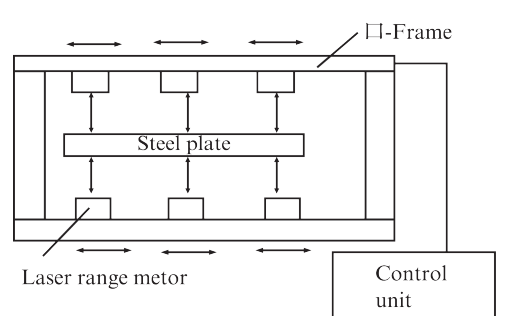
口型(門型)フレーム方式では、口型(門型)の固定フレームを設置し、フレーム上下に対向設置したレーザ距離計のみを移動させる機構を有するもので、フレームの強度を確保し変形を抑制することが容易であり、複数点計測の場合でも機器設置スペースを小さくすることが可能であるが、上下距離計を移動させる場合、上下のレーザ距離計を連動して正確に移動させる必要があり、上下距離計の光軸ズレによる計測誤差が発生しやすい。

Cフレーム方式は、C型フレーム先端部上下に対向してレーザ距離計を固定設置し、上下距離計の位置関係保持したままCフレーム自体を移動させるものであり、光軸ズレが発生しにくく、精度保持が容易であるが、片持ち支持となり、変形を抑制するためにはCフレーム自体が大型化する必要がある。

また、複数点の同時計測のためには複数のCフレームを

表 1 レーザ方式板厚計の機器構成

Table 1 Comparative table of laser thickness gauge

	C-Frame	□-Frame
Configuration	<p>Laser range meter is fixed on C-frame.</p>  <p>Laser range meter</p> <p>Control unit</p>	<p>Laser range sensor is moved on □-Frame.</p>  <p>□-Frame</p> <p>Steel plate</p> <p>Laser range meter</p> <p>Control unit</p>
Merit	High accuracy	Small space
Demerit	Large space required Large frame required	Low accuracy Measurement error caused with individual move of laser unit

支持，移動する必要がある，装置，機構が大型化し，設置スペースが必要となる。

いずれの形態においても，機械的な変形や熱膨張によるフレームの伸縮に伴うレーザ距離計の位置，角度（光軸）ズレが発生するため，誤差抑制のための対策が必要となる。

誤差影響低減の方法としては，フレーム自体の剛性を高くし，機械的な変形を抑制するとともに，フレーム構造全体の冷却（水冷）などにより温度管理を行ない，温度変化による変形を抑制することが考えられるが，フレーム構造の大型，複雑化とともに，必要とされる温度管理（制御）の困難から実用的ではない。

本設備では基本的な精度確保の観点から C フレーム方式を採用し，熱膨張などによるフレームの緩やかな変形は発生するという前提で，フレーム構造の振動などに起因する短時間の変動はフレーム剛性確保で抑制し，温度変化に起因する長時間の緩やかな変動・変形は，定期的に校正を行なうことにより抑制するものとし，オンライン校正機構の考案と適用を行なうものとした。

厚板せん断ラインでは搬送される鋼板と鋼板とが間隔において搬送されるため，鋼板搬送間に校正を実施することにより，搬送，操業の効率への影響を抑制した上で，校正を行なうことは可能と判断した。

オンライン校正の実施を前提としたので，C フレーム自体は短時間の振動，変形の抑制に必要な剛性を確保と，計測対象からの輻射熱などの温度影響を抑制するための簡易の防熱構造を有すればよく，C フレームの小型化と製作に要求される仕様の緩和が可能となっている。

実際の設計にあたっては，厚板搬送ラインのテーブルなどの既設設備の改造を最小とするように C フレームを含む機構部の設計を行なっている。

### 3. 厚板せん断ライン用レーザ方式板厚計

#### 3.1 機器構成・配置

厚板せん断ラインの板厚計では，搬送される厚板鋼板の幅方向 3 点（鋼板両エッジ部，および鋼板中央部）の板厚計測を行ない幅方向のク라운形状などを算出し，板厚保証を行なっており，3 対のレーザ距離計（C フレーム）を設置し，搬送される鋼板幅に合わせて，距離計（C フレーム）の計測点を移動させる必要がある。

東日本製鉄所（京浜地区）厚板せん断ラインでは，鋼板はライン片側（DS，ドライブ側）基準で搬送される。幅方向 3 点の計測を行なうためには，3 つの C フレームを鋼板搬送（長手）方向 3 列に配置し，各計測位置範囲に対応したストロークの移動機構を設ければよいが，ライン片側から C フレームを装入する配置とした場合，ライン全幅以上のストロークを有する C フレームが必要となり，C フレームおよび付帯設備の大型化とそれに伴う機械誤差の増加が発生することになる。

このため，**図 4** に示すようにエッジ計測用の小型 C フレーム 2 基を対向配置することにより，鋼板両エッジを測定し，ライン幅 1/2 のストロークを有する C フレームにより鋼板中央部の計測を行なうものとした。鋼板中央計測用の C フレームはエッジ計測用 C フレームの直近下流側に配置することにより，全体配置を含めた小型化を図っている。

また，C フレームは 2.2 節で述べたようにオンライン校正を前提に，極力小型化した上で，門型フレームから懸架する方式とすることで，自重での安定化を図り，地表面側のガイドレールなどの設置は不要な構造としている。

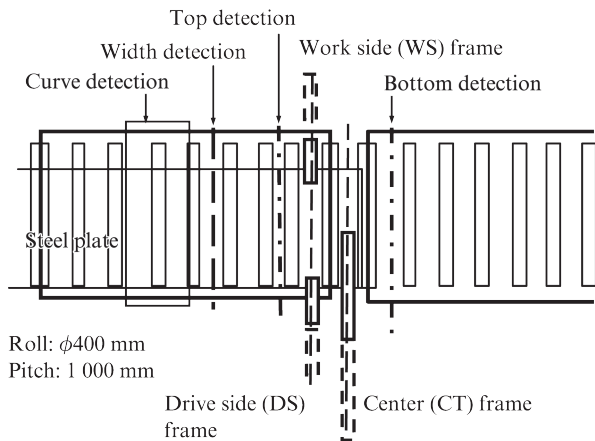


図4 厚板せん断ラインレーザ方式板厚計  
Fig. 4 Structural drawing of facilities

### 3.2 適用技術, 機構

#### (1) オンライン校正機構

本装置では、厚板鋼板の搬送間の空き時間を利用し、距離計の位置、角度の校正を行なうためのオンライン校正機構を考案し、適用している。

オンライン校正機構は、鋼板の計測（搬送）間に鋼板位置に既知の校正片を装入する機構と、装入された校正片の計測結果から、熱膨張などによる距離計の位置、角度の変動を算出、補正する処理から構成される。

オンライン校正では、厚さあるいは計測対象面の角度が異なる複数の校正片を計測することにより、精度良く校正を行なうことが可能となるが、複数の校正片を短時間で差し替えることが必要となり、オンライン校正機構部の大型化、複雑化により、実際の設備への組

込みは困難であった。

距離計間に設置した校正片の位置あるいは角度を連続的に変化させれば、各距離計の校正を行なうこと可能であるが、この場合は、校正片の位置、角度の変更設定を正確に行なう必要があり、機構部と管理の複雑化を招くことになる。本板厚計では、厚さの等しい校正片を円筒側面の異なる位置、角度に取付け、円筒を固定軸周りに回転させることにより校正片（計測位置）を連続的に切替え、短時間で効率よく大量のデータを取得する機構を考案、適用した。

実際のオンライン校正機構部は、鋼板計測時には退避する機構とし、計測終了後に次材が進入するまでの間に、校正片（円筒部）の移動、回転（計測）、退避を行なうことにより、鋼板の搬送に大きな影響を与えることなく、校正を行なうことを可能としている。

#### (2) 高速, 同時計測

本設備を設置した京浜地区せん断ラインにおいては、1 m ピッチのロール上を鋼板が搬送されるため、鋼板の先端部および尾端部は搬送に伴い大きく振動（ロールとの接触による跳ね上がり、振動）するため、対向するレーザ距離計の計測タイミングにズレが発生し、誤差要因となる可能性がある。

搬送中の鋼板振動発生時の対向する距離計の計測タイミングのズレによる誤差を抑制するため、高速(10 kHz)/同期計測が可能な距離計を適用し、振動（変位）の影響を抑制している。

図5に各距離計の計測データおよび板厚算出結果例を示す。距離計計測結果に示すように、高速での鋼板振動（変位）が発生しているが、距離変位を相互に補完し、板厚を計測可能であることが確認されている。

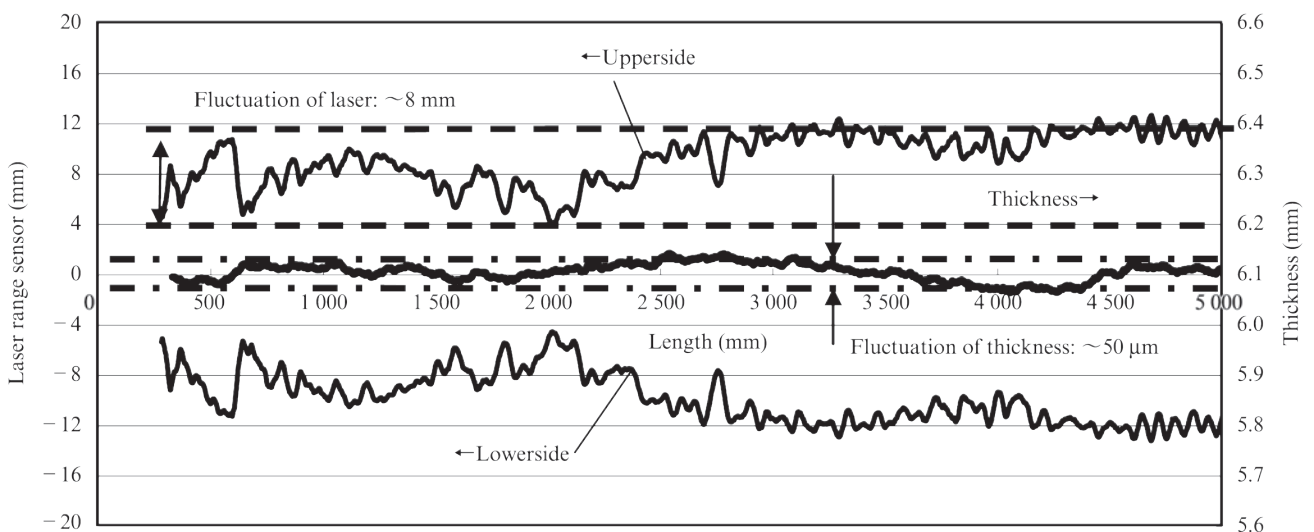


図5 高速同時計測による鋼板振動影響の抑制  
Fig. 5 Reduction of influence of steel plate vibration



## 4. レーザ方式板厚計の精度, 性能

### 4.1 オフライン計測精度

常温, 静止状態の試験片, サンプルを計測した際の計測精度評価結果を下記に示す。

(1) 精度検定用試験片

計測板厚: 10/22/34/46 mm

表面性状: 拡散面 (均一加工面)

計測精度 (バラツキ)  $2\sigma = 18 \mu\text{m}$

(2) 厚板鋼板サンプル計測

計測板厚: 10/12/22/30 mm

表面性状: 拡散面および光沢面 (サンプルによる)

計測精度 (バラツキ)  $2\sigma = 23 \mu\text{m}$

各サンプルに関して, 表面の異なる (板厚は同一で計測表面が異なる) 位置での複数回の計測結果の平均を示しており, オフライン精度は問題なく確保できている。

精度検定用試験片に対して実鋼板サンプルでは, サンプ

ルにより精度のバラツキが発生している。これはサンプル鋼板の表面性状の差異によるレーザ光の拡散状態の変動によるものである。

### 4.2 オンライン測定結果

東日本製鉄所 (京浜地区) 厚板工場せん断ラインに設置したレーザ方式板厚計によりオンラインでの測定, 性能評価を行なった。

(1) 計測精度

①計測対象

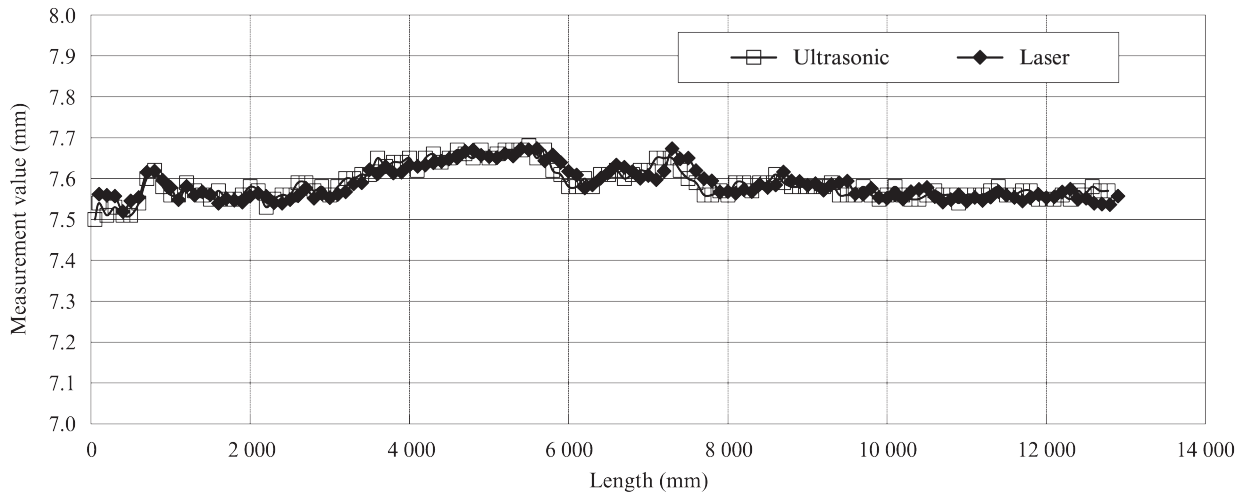
- ・試験材: 冷間測定
- ・操業 (圧延) 材: 熱間 (~300°C) 測定

②計測結果

計測板厚の評価は, 鋼板中の比較点を決めて, 手測定 (超音波厚み計によるオフライン冷間計測) 結果との比較により行なった。

図6に試験材での精度評価試験結果として, レーザ

(a) Measured plate thickness



(b) Deviation of measured value (Laser - Ultrasonic)

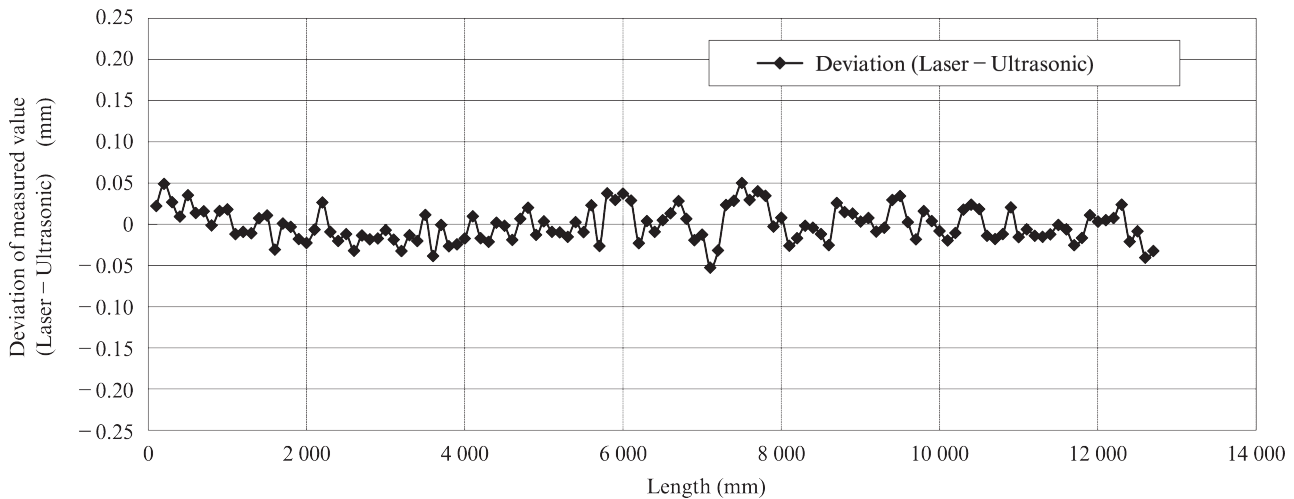


図6 試験材計測結果例 (板厚偏差)

Fig. 6 Measurement result of test plate

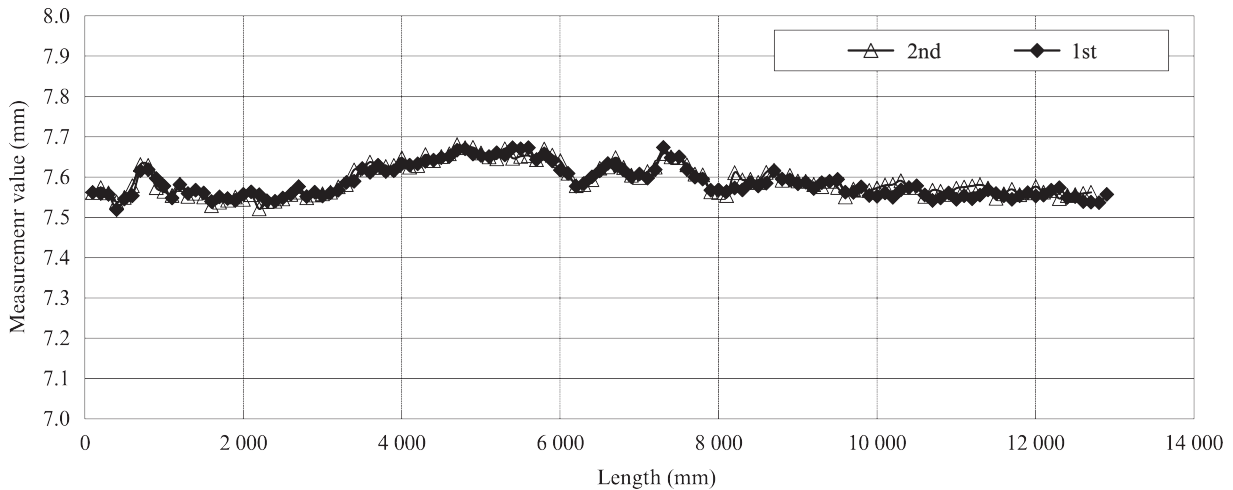


図7 計測再現性

Fig. 7 Test result of repeatability

方式板厚計と手測定(超音波板厚計)との比較を示す(図中の (a) は各計測結果を, (b) は計測結果間の偏差を示す)。

図6に示すようにレーザ方式板厚計と手測定の計測結果は偏差はあるものの, 板厚プロファイルとしては良く一致していることが確認できた。

偏差の原因はレーザ方式板厚計では搬送中に計測し, 手測定ではオフラインで計測しているため, 比較測定位置にズレが発生しているためと考えられる。

また, 操業材に関しても同等の測定結果が得られている。

### (2) 計測応答性

レーザ距離計の計測点(レーザスポット)が搬送される鋼板先端部に掛かった時点より板厚計測を開始している。先端部(端部から50mm位置)のレーザ板厚計計測値と手測定計測結果も一致しており, 鋼板最先端部から正確に板厚を計測できており, 従来のγ線板厚計に対して高い応答性を確保できていることを確認している。

### (3) 計測再現性

図7に同一鋼板を複数回計測した結果を示す。

1回目の計測終了後, 搬送ライン上の鋼板を逆搬送し, 再計測を行なっている。また, グラフはオンライン計測後に実施した手測定結果との偏差を示している。

複数回計測時の計測結果はよく一致しており(各計測点の計測値の偏差<10μm), 計測再現性があることを確認している。

## 5. おわりに

JFE スチール 東日本製鉄所(京浜地区)厚板工場せん断ラインを対象にレーザ方式板厚計の開発, 設備化を実施した(実際の装置の設計, 製作, および設置後の調整は, JFE 電制で実施している)。開発においては, レーザ方式の課題である精度確保のためのオンライン校正方法を実用化し, 既設のγ線方式板厚計と同等以上の性能を確保することができた。また, レーザ方式板厚計により従来のγ線板厚計では計測が困難であった鋼板先端部を含む鋼板全長の板厚計測が可能となり, 品質保証レベルの向上に寄与することができた。

今後, レーザ距離計を利用した寸法計測, 形状計測への展開も可能である。

### 参考文献

- 1) 厚板レーザ方式冷間板厚計の開発. 電気学会金属産業研究会. 2010-12-17, MID-10-026.



手塚 浩一