

形鋼の熱間寸法形状計の開発

川口 清彦*・井上 忠世*²・井上 健*²・的場 弘行*²

Development of Dimension and Shape Measurement of Hot Steel Sections

Kiyohiko KAWAGUCHI, Tadayo INOUE, Kenn INOUE and Hiroyuki MATOBA

Synopsis : There has been a demand for the development of a device to quickly measure the dimensions of products on hot rolling production lines in large shape mills.

A hot rolling dimension measurement device incorporating six laser displacement meters which has been introduced at the Kashima Steel Works of Sumitomo Metal Industries enables noncontact, high-speed, high-precision measurements of hot-rolled products to be taken, thus solving the problems associated with the reduction in efficiency caused by the need to measure the dimensions of products by taking a sample and making manual measurements.

This paper reports on the development, measurement principles, equipment summary and measurement results for this device.

Key words : measurement ; sensor ; displacement ; laser ; automation ; shapes.

1. 緒言

大形工場の熱間圧延工程において成品寸法をオンラインで迅速に測定する装置の開発が要望されていた。これは従来圧延ラインでのサイズ替え時、型決めのためにサンプルを採取し、手動測定により成品寸法の確認作業を行っており、操業能率低下の要因となっていたため、この問題を解決すべく今回、非接触・高速・高精度測定可能なレーザー変位計を6台用いた熱間寸法測定装置を開発し、住友金属工業(株)鹿島製鉄所に設置したので、測定原理、装置の概要、測定結果について報告する。

2. 開発目標

従来、圧延機の型決め時および途中での寸法確認のため熱間鋸断機でサンプルを切断、採取、冷却した後、手動測定している。このため、悪環境での作業(いわゆる3K職場)を強いられる要員確保、また結果のフィードバックの遅れの問題があり、これを解決するため測定の自動化が要望されていた。そこで省力1名/シフトおよび測定所要時間を従来の1/10とする自動測定装置の開発に取り組んだ。

3. 測定原理と装置構成

3・1 レーザー変位計の選定

鉄鋼の生産ラインには非接触測定可能な光学式、超音波

式、電磁式、静電容量式、放射線式等を原理とした寸法測定センサーが良く使われ、数多くのものが実用化されている。精度が満足し信頼性高い装置を完成するには測定要求仕様を充分吟味した上で最適なセンサーを選定することが重要である。本装置では局部プロファイル測定が必要で、測定ポイントを小さくすることが不可欠であり、Table 1の中から光学式を選定した。光学式には光切断法、位相差法などがあるが、精度、コストの点より受光素子としてPSD (Position sensitive device) を用いた三角測量方式のレーザー変位計を採用した。熱間材料の寸法測定にレーザー変位計を用いる例は種々ある。形鋼のウェブ厚、フランジ幅、中心偏りを測定する報告¹⁾シートバーの幅方向3箇所の厚みを測定する報告²⁾などがあるが、測定項目は上下方向での測定に限定されている。H形鋼でのフランジ厚みのようにいわゆ

Table 1. Comparison of sensor for dimension and shape measurement of hot steel sections.

	Optical	Ultra-sonic	Magnetic	Capacity	Radio-graph
Distance between sensor and target [mm]	○ 10~10000	○ 100~2000	△ 1~50	△ 0.1~2	○ 50~2000
Sensing diameter [mm]	◎0.1~1.0	△10~50	△2~100	○5~10	△10~30
Accuracy [ratio]	◎1/1000	△1/100	○1/500	○1/500	△1/100
Safety for human	○	◎	◎	◎	△
Cost of sensor	○	○	◎	◎	△
Total	◎	△	△	○	△

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992; Accepted on Apr. 9, 1993)

* 住金制御エンジニアリング(株)計測システム開発部(Sumitomo Metal Industries Control Engineering Corporation, 1 Nishinomachi Higashimukojima Amagasaki 660)

* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

る水平方向の測定も同時に可能とし、全測定項目を一度に計測するため今回フレンジ厚み計を開発し目的を実現した。

3・2 測定原理

三角測量方式の変位計の検出原理をFig. 1 (A)に示す。半導体レーザー (LD; λ=780nm, P=10mW) から放出された光束は光スポットとして被測定物体表面に照射される。この照射点P₀からの反射光をPSD上に光点P₀'として結像させる。投光軸方向位置(距離)の変化による照射点をP_iとするとPSD上の結像点は点P_i'に移動する。この移動量P₀'P_i'をPSDにて検出し、投光軸方向位置(距離)変化として信号出力する。測定距離方向(x)とPSD素子方向(y)の変位は直線的に変化せず近似的には(1)式の関係となる。

$$y = \frac{f \cdot \sin \alpha}{[1 - (x/a) \cdot \cos \alpha]} \cdot x \dots\dots\dots (1)$$

ここで f : 焦点距離
 a : 対物距離
 α : 投受光角

今回使用のセンサー諸元より計算した直線とのずれ量をFig. 1 (B)に示す。この非直線性は個々に異なり、較正データを採取しこれを基にROMに記憶させたテーブルにより補正を行う³⁾。

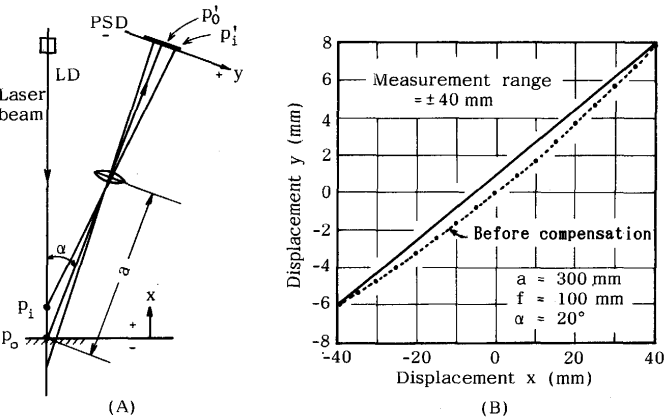


Fig. 1. Schematic diagram of optical geometry for measuring displacement (A), and calculation of geometrical non-linearity (B).

3・3 装置構成と機能

(1) 全体機器構成と機能

本装置はFig. 2に示すように、大きくは測定機構部(Cフレーム)、サーボ制御部、シーケンス制御部、パソコン部、自動較正装置、冷却水制御部、材料温度計等より構成されている。その他材料情報をもらう上位プロコン、テーブルとインターロックを行うシーケンサーとの接続も行っている。設置場所は熱間鋸断機の上流側である。測定ヘッドは成品寸法情報に基づき微い制御を行っている。

測定データは1ms毎を基本とし、プロフィール測定はヘッド移動量0.1mmピッチでの測定値をパソコンに取り込む。材料温度より熱膨張補正、被測定材の姿勢を検出し、傾き補正を行い測定値を出力する。

(2) 測定部

測定部はレーザー距離計1台内蔵した距離計ヘッドと2台内蔵した厚み計ヘッドおよび各ヘッド位置検出エンコーダーよりなり基準点からの各ヘッド位置とレーザー距離計データより測定値を演算する。用いたレーザー距離計は被測定材のサイズと測定ポイントの関係で、市販標準品を長範囲の光路長(作動距離)が得られる様改造した。標準品と特注品の仕様をTable 2に示す。

距離計ヘッドは空冷、厚み計ヘッドは水冷としておりFig. 3にその構造を示す。

(3) 機構部

機構部はCフレーム構造の自走式台車でオンラインオフライン出来る。重量約300kgの測定ヘッドがCフレーム上を1500mm移動するが、この自重によるたわみを0.1mm以下に抑える必要があり、下部フレームにたわみ調整機能を持たせた。一方熱対策はCフレームを水冷構造、外部を断熱材

Table 2. Specifications of standard and special displacement meter.

Items	Standard	Special
Measuring range [mm]	±40	±40
Standard distance [mm]	202	300
Linearity [%]	0.325	1.0
Sampling time [ms]	0.1	0.1

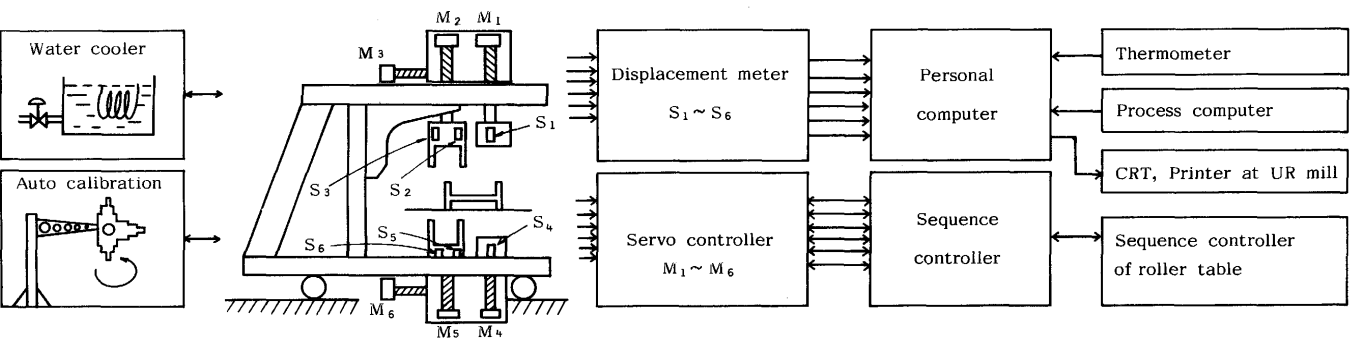


Fig. 2. Schematic diagram of dimension and shape measurement system.

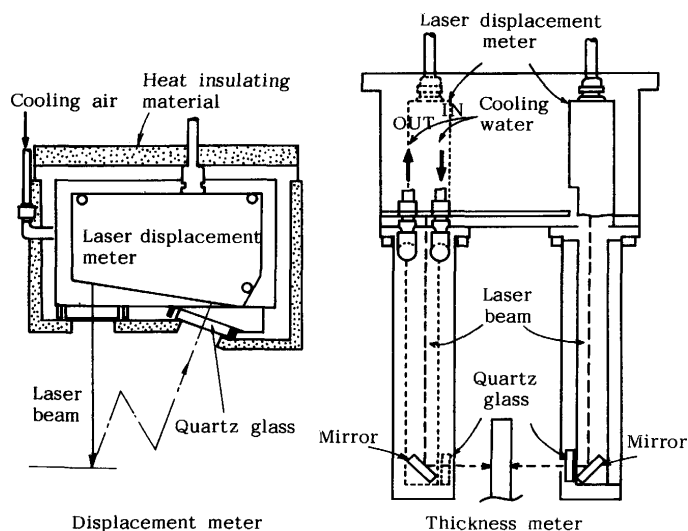


Fig. 3. Configuration of fireproof box of displacement meter and thickness meter.

施工とし、1000°C程度の材料が常時ライン内にあっても熱歪みを0.1mm以内とするよう設計した。Fig. 4にCフレーム全体構造を示す。

(4) 制御部

制御部は被測定材の寸法毎の測定ヘッド微い制御、測定時間短縮と位置決め精度向上のための測定ヘッド速度制御、運転モード制御、およびラインとのインターロック、異常監視などを統括している。測定ヘッドはデータ採取時100 mm/s、移動時500mm/sの速度で駆動され、始端・終端での速度制御による停止時の衝撃防止と停止位置精度の向上を図っている。

(5) パソコン部

CPUはパソコン（インテル製80286、80386を保有し並列処理可能）を採用、計測データ採取、シーケンサーとのI/Fなど高速処理を必要とするところは80286のiRMXで、各部寸法の演算処理、画面表示は80386のMS-DOSで分担処理し

ている。H/Dは20Mバイト、F/Dは1 Mバイト、3.5インチを2ドライブ内蔵している。その他数値演算プロセッサ(i80387)、カラーCRT、モノクロプリンターを装備している。ソフトウェアはPL/MとC言語を使用している。

(6) 自動校正装置

自動校正装置はCフレーム本体の機側に設置し概ね1回/シフト作動させ、装置の精度管理を行っている。Cフレーム台車がオフライン位置に退避し、Fig. 5に示すテストピース(TP)を所定位置にセットし、測定ヘッドがTPを走査することにより一連の動作が10~20秒で終了する。これにより距離計単体6台と厚み計としての3セットのオフセット(基準距離)を自動修正する。この校正は長期(数日以上)のドリフト、例えば光学系の汚れなどでのドリフト調整に有効である。

校正方法はまず6台の距離計単体の感度を1次式で補正する。距離計の測定レンジは±40mmであり上距離計の場合テストピースに35mmの段差を2箇所(d_{u1} , d_{u3})設けている。距離計を水平に移動させその時の測定値 x_{u1} , x_{u2} , x_{u3} を得る。 $y_{u1}=35\text{mm}$, $y_{u3}=-35\text{mm}$ となる様、式(2), (3)より補正式(4)を求める。

$$y_{u1} = ax_{u1} + b \quad (2)$$

$$y_{u3} = ax_{u3} + b \quad (3)$$

$$y_u = \frac{d_{u1} - d_{u3}}{x_{u1} - x_{u3}} x_u + \frac{d_{u3} \cdot x_{u1} - d_{u1} \cdot x_{u3}}{x_{u1} - x_{u3}} \quad (4)$$

同様に下距離計の補正式(5)を得る。

$$y_D = \frac{d_{D1} - d_{D3}}{x_{D1} - x_{D3}} x_D + \frac{d_{D3} \cdot x_{D1} - d_{D1} \cdot x_{D3}}{x_{D1} - x_{D3}} \quad (5)$$

次に上下距離計での基準距離補正(オフセット)をテストピースの中央部段差(厚み $t_2=80\text{mm}$)を用いて行う。感度補

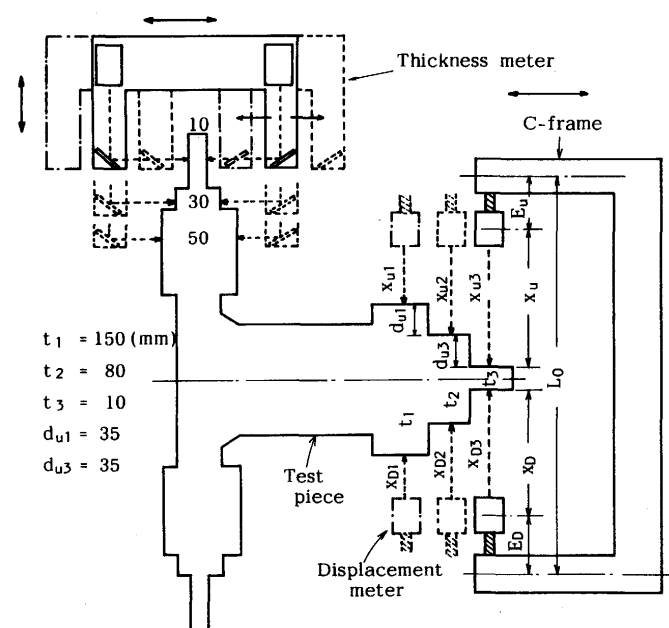


Fig. 5. Calibration method of displacement meter and thickness meter.

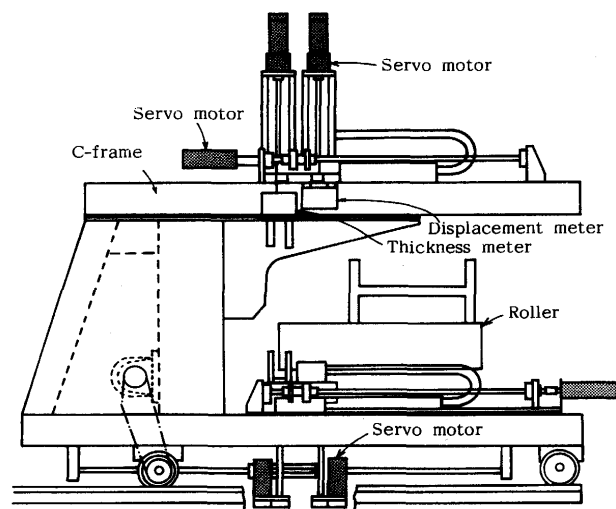


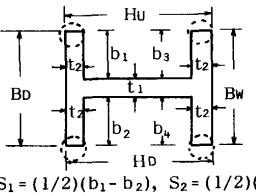
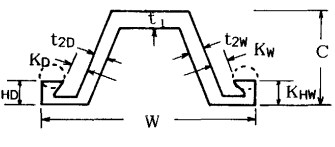
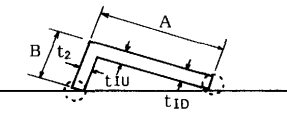
Fig. 4. Mechanical configuration of C-frame and arrangement of sensors.

正後の(4)，(5)式より基準距離補正式(6)を得る。

$$L_0 = E_{U2} + y_{U2} + E_{D2} + y_{D2} + t_2 \dots\dots\dots (6)$$

ここで $t_2=80\text{mm}$ となるよう L_0 を補正する。これにより距離計単体としての感度および厚み計のオフセット補正を行っている。同様に上下厚み計についても自動補正を行う。
(7)冷却水制御

厚み計の左右レーザー距離計からの投光レーザービームは各々90°折り曲げミラーを介して被測定材表面に誘導されるが左右ビームのズレは材料が斜めの場合厚み測定誤差となる。このミラーは250mmのフレームに支えられており、機械的精度が高く要求され熱などによる歪みを無くする必要がある。このため温度を一定とした循環水を厚み計ヘッ

Measuring items		Measuring points
H steel	Web height H	
	Flange width B	
	Web thickness t1	
	Flange thickness t2	
	Web off center S1	
	Web off center S2	
Steel sheet piles	Height C	
	Width W	
	Web thickness t1	
	Flange thickness t2	
	Height K	
Unequal angles	Web A	
	Flange B	
	Web thickness t1	
	Flange thickness t2	

○; Profile measurement

Fig. 6. Measuring items and points of 3 shapes.

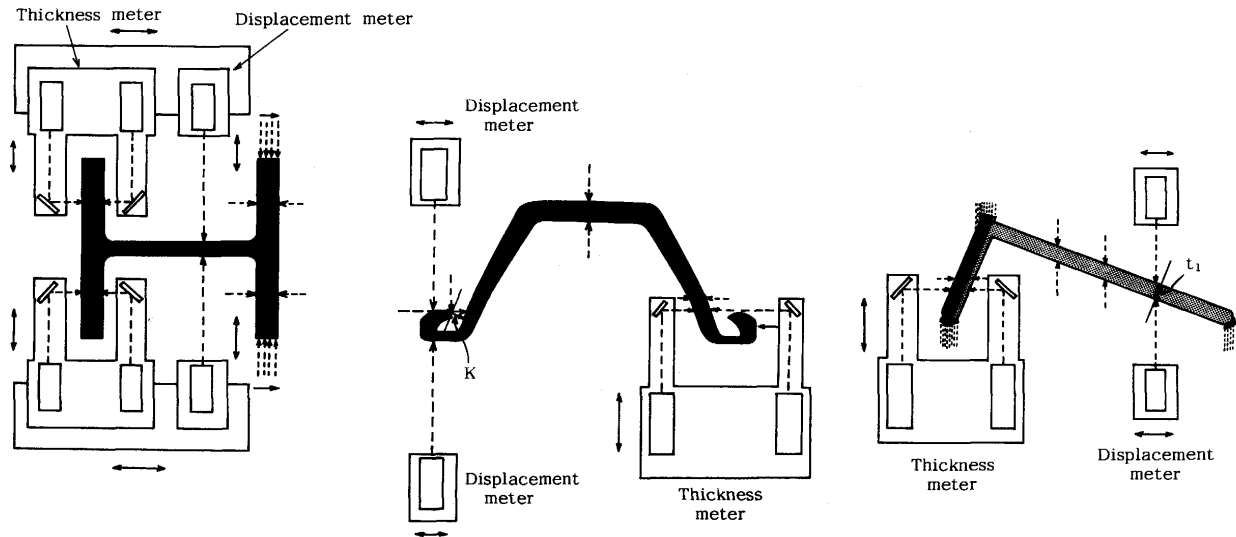


Fig. 7. Principle of dimension and shape measurement for hot steel sections.

ドに供給し外部温度の変化に対してもヘッド内は常に一定温度(現状; 20°C)に保つ様にした。

3・4 測定項目と性能(仕様)

3・4・1 測定項目と算出方法

鋼種としてはH形鋼, 鋼矢板, 不等辺山形鋼の3種を対象としており, Fig. 6に各測定項目を示す。各寸法値以外にH形鋼のフランジ先端部と付け根部, 鋼矢板の爪部, 不等辺山形鋼の長短辺先端部のプロフィールも測定できる。Fig. 7に各鋼種における測定方法について示す。

3・4・2 H形鋼

プロコンよりの材料情報に基づき上下距離計を前進させながら被測定材のフランジ先端部を検出, これをスタート点とし測定ヘッドの微い制御を行い各データを演算し測定値を得る。フランジ幅B, ウェブ厚 t_1 , 中心偏り S_1, S_2 は上下距離計での上下方向の測定データより得る。ウェブ高さ H_0 は左右フランジのエッジを上下距離計で検出しそのときの距離計ヘッドの水平方向位置より得る。フランジ厚 t_2 は上下厚み計をフランジを挟み込むように挿入し, 直接厚みを測定する。ここでフランジ先端部は不定形の丸味をしており, 距離計ヘッドを水平方向に走査したプロフィールデータの中で最大値(ヘッドに最も近い位置)を代表測定値としている。

3・4・3 鋼矢板

爪高さ K_H , ウェブ厚 t_1 , 全高さCは上下距離計での上下方向の測定データより得る。全幅Wは下厚み計で左右の爪部を挟み込み, その測定データと厚み計ヘッド移動量より得る。フランジ厚 t_2 は同様に下厚み計を更に深く挿入しフランジ部を挟み込み, 5 mmずらして2箇所測定し, 傾きを演算し厚みの斜め補正を行い測定値を得る。爪開度Kは爪内側先端部水平方向位置を上距離計で検出, フランジ部側の位置は下厚み計を挿入し爪部を通過直後のフランジまでの水平方向距離で検出し, 前述の斜め補正を行いフランジ面に垂

Table 3. General specifications of the system.

Items	Specification
Kind of shapes	H steel Steel sheet piles Unequal angles
Measured items	ref. Fig.6
Accuracy	$\pm 0.3\text{mm}$ (2σ , standard T.P) $\pm 0.5\text{mm}$ (on-line)
Sampling time	1ms (average 8~16 times) 0.1ms (basic)
Measuring cycle time	8~20 sec./cycle
Material temperature	450~1000°C
Laser displacement meter	Semi-conductor laser ($\lambda=780\text{nm}$, $P=10\text{mw}$)

直方向の開度を測定する。

3・4・4 不等辺山形鋼

長辺厚み t_1 は上下距離計で、短辺厚み t_2 は下厚み計で挟み込む様挿入し直接レーザー投光方向の厚みを各2箇所測定し斜め補正を行い所定の厚みを得る。各辺の長さは上下距離計により各辺の先端部と頂点部のプロフィールを測定し、0.1mmピッチずつずらして先端部と頂点部を結ぶ長さを演算しその最大長さを測定値としている。

3・4・5 装置仕様

Table 3 に装置仕様を示す。測定精度は測定項目により異なるが、冷間サンプルで厚みは $\pm 0.3\text{mm}$ (2σ)である。熱間では冷間より若干大きくなり $\pm 0.5\text{mm}$ 以内を確認した。

3・5 傾き補正

距離計、厚み計の測定方位はCフレーム台車上の走行ガイドと平行または垂直方向であるので、得られるデータは被測定材の姿勢が傾いたり、斜め形状（例：鋼矢板のフランジ）の場合は測定面に垂直方向に換算する必要がある。本装置では一定距離はなれた2点間の変位を測定し、被測定材の傾きを検出しながら測定値の補正を行っている。

H形鋼の中心偏りを測定する場合傾きにより誤差が発生し易く専用の補正式(7)(8)(9)を考えた。

$$b_1 = [(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1) \tan \theta] \cos \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$b_2 = [(y_4 - y_3) + (x_4 - x_3) \tan \theta] \cos \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$S_1 = (1/2) (b_1 - b_2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで θ : ウェブ面水平傾き角

y_1 : 上フランジ垂直距離

y_2 : 上ウェブ垂直距離

y_3 : 下フランジ垂直距離

y_4 : 下ウェブ垂直距離

x_1 : 上フランジ水平距離

x_2 : 上ウェブ水平距離

x_3 : 下フランジ水平距離

x_4 : 下ウェブ水平距離

4. 測定結果

4・1 レーザー変位計単体精度

三角測量方法のレーザー距離計では被測定物体の表面反射率の変化により測定誤差が生じる。精度トレース用標準サンプルの適正な表面反射率を決める上で3種のサンプル(圧延黒皮肌、艶消し黒色、アイボリー色)を用いて距離特性を評価した。その結果をFig. 8に示す。いずれも $\pm 0.2\text{mm}$ 以内であり、トレースに使える。また表面反射率の違いをレーザー距離計の受光量モニターで測定した結果をFig. 9に示す。モニターのアナログ出力で0.2~1.4Vを示し、この時の変位出力のS/N、距離特性共に問題ない事が判明した。なお熱間材料での受光量は0.6~0.7VでありS/Nからは問題ない。

4・2 冷間加工サンプル測定結果

本装置の性能を確認する上でH形鋼、鋼矢板、不等辺山形鋼の3種につき、機械加工し寸法を正確に出した標準サン

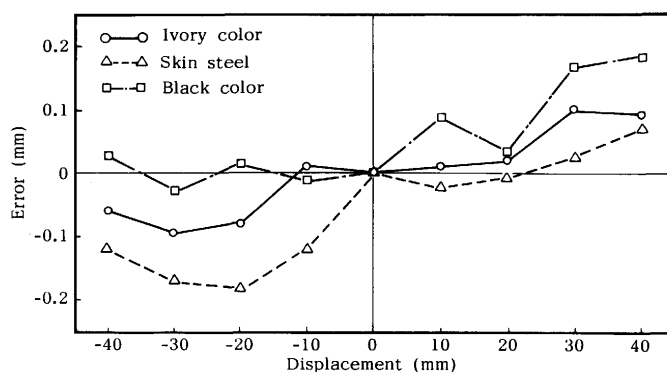


Fig. 8. Calibration results of the laser displacement meter by using test piece with 3 kinds of surface conditions.

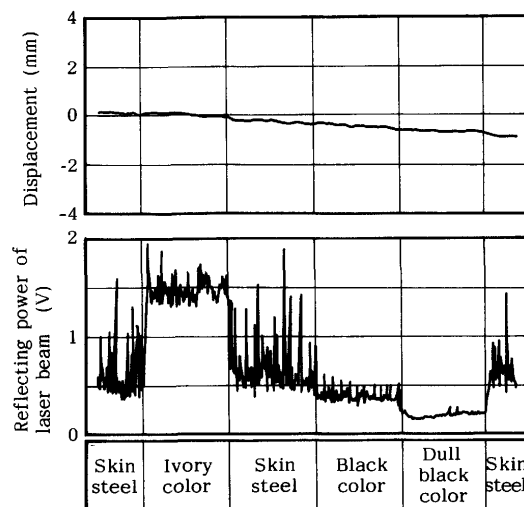


Fig. 9. Examples of measured displacement and output of reflecting power of laser beam by using test piece with 4 kinds of surface conditions.

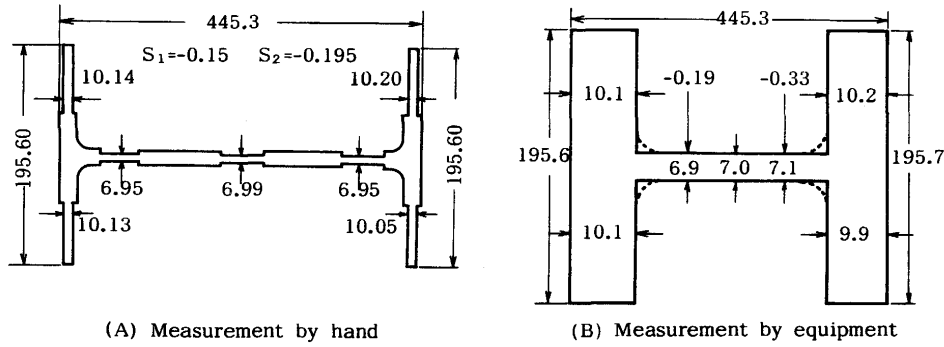


Fig. 10. Configuration of standard test piece of H-steel and example of results of dimension measurement.

Table 4. Accuracy of each measuring item by using standard test pieces.

H steel		Steel sheet piles		Unequal angles	
Items	Error [mm]	Items	Error [mm]	Items	Error [mm]
Web height H	-0.1 ~0.3	Height C	-0.3 ~0.1	Web A	-0.35 ~0.05
Flange width B	0~0.2	Width W	-0.15 ~0.25	Flange B	-1.3 ~0.4
Web thickness t_1	-0.15 ~0.15	Web thickness t_1	-0.2 ~0.1	Web thickness t_1	0.03 ~0.41
Flange thickness t_2	-0.15 ~0.2	Flange thickness t_2	-0.21 ~0.08	Flange thickness t_2	-0.26 ~0.04
Web off center S_1, S_2	-0.02 ~0.13	Height K_H	0~0.4		
		Width K	-0.2 ~0.4		

プルを用意した。Fig.10(A)にH形鋼の寸法例を示す。機械加工表面の反射率は複雑であり、評価を容易とする様、前述のアイボリー色を塗装して使用した。各々50回測定した結果をTable 4に示すがほぼ仕様を満足している。またH形鋼のプリンターによる出力例をFig.10(B)に示す。

4・3 熱間および冷間圧延サンプル測定結果

3種のH形鋼を用い、オンライン熱間測定した後熱間鋸断機にて切断しサンプル採取、水冷却してマイクロメータおよびノギスにより手動測定、さらにこのサンプルを測定架

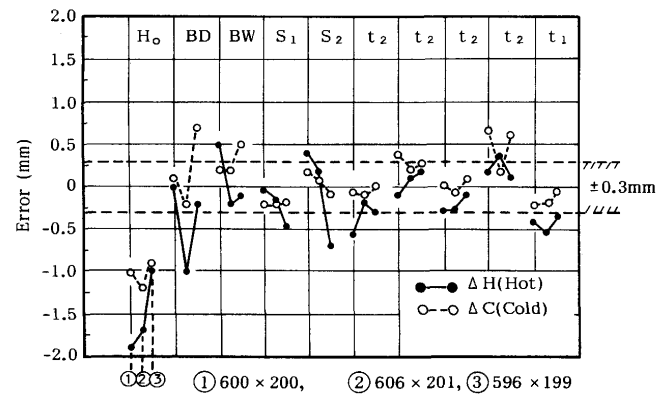
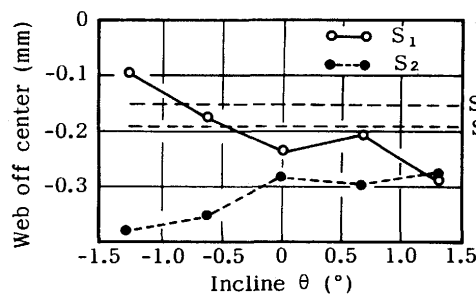


Fig. 11. Comparison between hot, cold measured values by the equipment and cold measured values by hand.

台にセットし冷間圧延サンプルとして自動測定を行い、測定精度の評価を行った。その結果をFig.11に示す。熱間測定値を X_H 、手動測定値を X_M 、冷間測定値を X_C とし、冷間、熱間での誤差 $\Delta_C = X_C - X_M$ 、 $\Delta_H = X_H - X_M$ をみると、冷間での誤差 Δ_C は大部分は $\pm 0.3\text{mm}$ 以内であるが 0.5mm を越える場合がある。三角測量式レーザー距離計では時々性能の数倍の誤差がでる場合があり原因は表面反射率とPSDのダイナミックレンジの問題と捉えており、現状技術では未解決である。熱間での誤差 Δ_H はやや大きくなっているが、熱膨張補正誤差(ロジック、測温誤差)、熱歪みなどを考慮すれば、妥当な精度である。



	S_1	S_2
Incline (θ)	+0.64	+0.64
Manual (S_{1m}, S_{2m})	-0.15	-0.195
Before compensation	+0.41	-0.83
After compensation	-0.21	-0.30

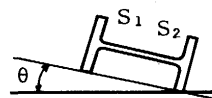


Fig. 12. Influence of inclination on web off center measurement and effect of compensation.

4・4 傾き補正(中心偏り)

標準サンプルを用いて傾き補正式(7)(8)(9)の効果を確認した。フランジの左右高さを $\pm 5\text{ mm}$, $\pm 10\text{ mm}$ ($\theta = 0.64^\circ$, 1.29°) と変えた時および $\theta = 0.64^\circ$ として補正前後での効果についてFig.12に示す。その結果 $\theta = 0.64^\circ$ の時 $0.6 \sim 0.7\text{ mm}$ の誤差が 0.1 mm となり、効果が確認できた。

5. 考察

5・1 レーザー距離計の誤差要因

三角測量を原理とするレーザー距離計の誤差要因として距離計本体に起因するものと測定面の性状に起因するものがある。前者は投受光角と受光素子の配置角により生じる非直線性の補正および光学素子や回路素子の温度ドリフトなどである。これらについてはすでに対策が取られており通常の使用環境条件下では測定範囲の $0.05 \sim 0.1\%$ が得られ、実用としての問題はほとんどない。しかし測定面の性状による影響があり、カタログ精度からは推測出来ないほどの実用精度の幅を持っている。これは受光素子に入射する光量変動即ち測定面の反射率に依存すると考える。特に信号となる光量が少なくなるとバックグラウンド光や回路雑音によるノイズ成分が相対的に大きくなり、S/Nが小さくなることから距離測定値のバラツキが大きくなる。これは標準TPの黒皮面を測定していた時に生じた現象だが黒皮面に当て疵、グラインダー手入れ部があると大きな誤差が生じる事が判明した。これら表面性状の影響のあることはすでに報告されており、著者らもグラインダー研削面の如く不規則な鏡面が並んでいるような場合、PSDへの入射光量が大きく変動するため測定変位値が不安定になる、またレーザー距離計の投受光面と研削方向との間に測定し易い方向とし難い方向が存在することも経験した。

以上より較正用に用いる標準サンプルは方向性がなく反

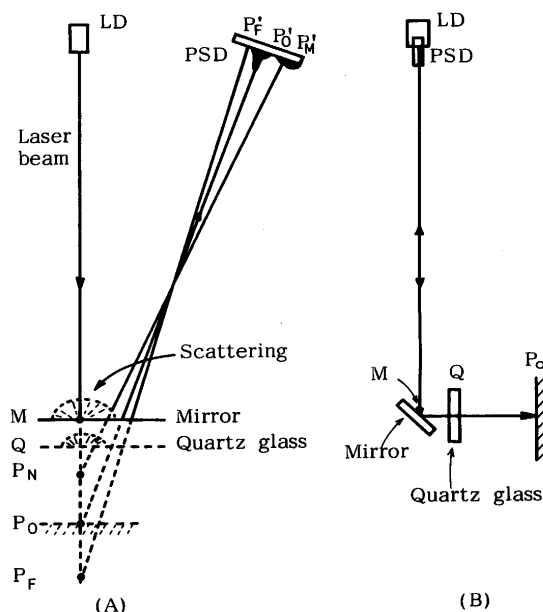


Fig. 13. Explanation of thickness measurement error due to dust on mirror and quartz glass.

射率が実測定材に近いものを選ぶことが大事である。

5・2 厚み計の誤差

厚み計の誤差は厚目にでる傾向があった。厚み計の構造をFig. 3に示すが、この片側の光学系はFig.13(B)となる。ミラーと石英窓ガラスに塵埃が付着した場合を考える。(A)でレーザービームが汚れたミラーに照射されるとその位置で散乱光が発生し、その一部がPSD素子上の P_M' 付近に結像する。同様に石英窓ガラスの汚れも P_M' 付近に結像する。即ち、PSD上では本来の信号位置 P_O' より右側に認識し、距離計に近い位置からの光となる。測定値としては、本来の信号と誤差となるミラー、石英窓ガラスからの散乱光との強度分布の重心として検出するので距離計ヘッドに近い方に認識する誤差となる。もう片側も同様となり厚み計として

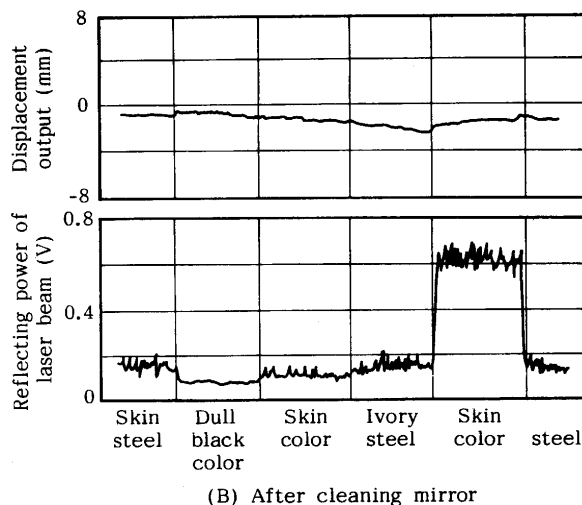
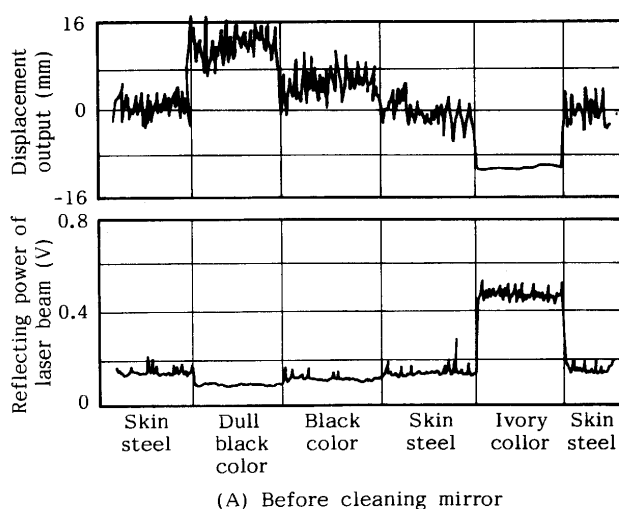


Fig. 14. Comparison between output of displacement obtained before cleaning and that obtained after cleaning.

は厚目の方に誤差が生じることになる。本来の信号の大きさは測定面の反射率に依存するので表面を黒皮、黒色、艶消し黒色、アイボリー色としたテストサンプルを作成、ミラーの汚れのひどい時と洗淨した後での受光レベルと距離出力変化を調査した。その結果をFig.14に示す。汚れのある(A)では反射率(受光量)の少ない所で変位が+側、即ちヘッドに近い方に誤認している。汚れのない(B)ではサンプルは同じであり受光量はほぼ変わらないがノイズとなるミラーからの散乱光が少ないため変位信号は安定したものとなっている。これよりミラー、石英窓ガラスの汚れにより厚目の誤差を生じることが立証され、厚み計の密閉度向上で汚れ防止、石英窓ガラスの取り外しを容易とし洗淨し易くするなどの改良を行った。

6. 結言

複雑な形状をした高温物体の各部寸法を生産ラインの中で自動測定するため6台のレーザー変位計を用いる方式を開発し、標準サンプルで $\pm 0.3\text{mm}$ 、熱間オンライン測定で $\pm 0.5\text{mm}$ の精度を得た。また測定時間も従来のサンプル採取、手動測定に比べ1/10以下を実現した。また、作動距離を標準品の1.5倍としたレーザー変位計を製作し受光量低下の問題はあるが標準TPと自動較正装置の工夫で実用化できた。

文 献

- 1) 藤本洋二, 福高善己, 長谷旅思: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 580
- 2) 頭山 奨, 福高善己, 菊川裕幸, 藤津 武, 上村正樹, 黒田康徳: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1541
- 3) 市川敏夫, 松丸憲司, 近藤秀人, 大森 博, 佐藤正信: アンリツテクニカル, (1984) 49, p.132
- 4) 金田 一: 計測自動制御学会論文集, 27 (1991), p.853