高速熱間線材プロフィールメータの開発

藪見崇生^{*1}，遠藤敏夫^{*2}，水野正志^{*2}，森 達也^{*3}

Development of High-speed Profile Meter for Hot Wire Rod

Takao Yabumi, Toshio Endo, Masashi Mizuno and Tatuya Mori

Synopsis

To control the preciseness of steel wire rods, the frequency of size measurement in hot rolling is important. In the ordinary detecting equipment, the distance between measurements is 27.5M for the wire rod of rolling speed 110 MPS because of the limit of rotation speed 120 RPM. To solve the above subjects, a detecting system was developed with improvements of:

- (1)Change of light source
- (2)Signal transfer method
- (3)Electric source supply

This system has made the measurement distance of 2.75 M possible with the rotation speed of 600 RPM and double sets of sensors and carried into

【 1 . 緒 言 】

大同特殊鋼(株)以下、当社という)では、需要家の用途に最適な任意寸法を有し、かつ、公差が精密な線材の供給を目的として、線材圧延ラインのBM(Block Mill)後に、CSM(Compact Sizing Mill)を導入している¹⁾。同時に、CSM出口には市販の光学式寸法測定装置²⁾を設置し、線材の仕上がり寸法を管理している。

この寸法測定装置はFig.1に示すように、平行光線を被測定物である線材に照射し、その影をCCDリニアイメージセンサ(以下、CCDという)で検出して、線材径を測定する原理を採用している。そして、光源、CCDなどが組み込まれた検出部を回転することによって、断面形状

1997年5月28日受付

* 1 大同特殊鋼(株) 技術開発研究所(Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.), * 2 大同特殊鋼(株) 技術開発研究所, 工博(Dr., Eng., Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.), * 3 大同特殊鋼(株) 知多工場(Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

を測定するものである。市販されている多くの寸法測定装置は、光源としてハロゲンランプを用いている。また、回転する検出部へスリッピングを接触させて信号伝送、電源供給を行っているので、回転速度は120rpm程度が限界である。一方で、CSM圧延後の線材の通過速度は、当社を例に挙げると最大110m/秒である。市販測定器によってこの速度で通過する線材の1断面を測定すると、長手方向へ線材が27.5m移動していることになる。よって、27.5mより短い間隔で発生している寸法変化の検出は困難という問題があった。

筆者らは、この問題を解決するため、長手方向空間分解能を向上させたWRプロファイルメータを開発した。開発装置は検出部の回転数を600rpmと市販測定装置の5倍、センサ数を2組の合計10倍、すなわち、長手方向分解能1/10を達成させた。検出部の高速回転化を実現するには(1)光源、(2)信号伝送方法、(3)電源供給方法などに関して新しい技術開発を必要とした。

まず、(1)の光源については市販測定装置で採用されているフィラメント方式のハロゲンランプで高速回転した場合、回転遠心力によりフィラメントが振動し、誤差を生ずる。また、フィラメント自身の耐久性が問題となる。本装置ではこの問題を解決するため発光ダイオードを採用した。

次に、信号伝送と電源供給について述べると、スリッピング方式で高速回転させた場合、信号伝送、電源供給の安定度、さらには、スリッピング自身の耐久性が問題となる。本装置では回転トランス(磁気カップリング)で信号を伝送する方式を採用した。これにより、高速回転時における信号伝送の安定性、ならびに、耐久性の問題を解決した。また、電源供給については回転する検出部へ発電機を組み込み、安定供給を実現した。

ここで開発したWRプロファイルメータは、1996年5月に当社知多工場の線材圧延ラインへ設置され、現在も順調に稼働を続けており、品質向上に大いに貢献している。

以下、2節では測定原理、3節では装置構成について述べる。4節では線材圧延ラインの環境に対応した耐環境性能について、5節では測定精度について、さらに、6節では実作業における測定例について述べる。

2. 測定原理

光学式の線材寸法測定では、光源から平行光を線材に照射し、線材で遮られる部分を電気信号に変換し、線材径(幅)を測定する方式がよく用いられている²⁾。本装置も平行光が線材に遮られる部分を電的に検出する光学方式を採用している。

本装置における測定原理の概念図をFig.2、装置側面図をFig.3、さらに、信号フローをFig.4に示す。光源として用いた発光ダイオードからの光を集光レンズで平行

Fig. 2. Measurement principle of profile meter for hot wire

光とする．その平行光を耐熱ガラスに取り付けたスリットによって，線材進行方向に対し，垂直に長辺をもつ長方形の光として，線材に照射させている．さらに，カメラレンズにより，バンドパスフィルタを通した像をCCD上へ結像させる構造とした．本稿において，この光源からCCDまでを1組の線材径検出器とし，1組目をXch，2組目をYchとする．

線材径検出器を組み込んだ検出部を線材の周りで回転させ，全周にわたって線材径を測定する．さらに，本装置では長手方向の空間分解能を向上させるため，検出部を高速回転化するとともに，互いに直行する線材径検出器2組を検出部へ組み込んだ．検出部の測定点をFig.5に示す．2組の線材径検出器を用いているため，検出部が90°回転した時点で，線材の1断面を測定することができる．

線材径検出器を2組にしたことで発生する光源の線材による反射光は，測定に大きな影響を及ぼす．本装置では，Xch，Ychそれぞれの光源とCCDを結ぶ線材径検出器の軸が，交差ししない位置とした．これにより，互いに干渉しないようにした．

検出部を回転させる駆動モータにはエンコーダが組み込まれており，検出部の回転角度をパソコンに出力している．また，パソコンは線材径測定データを常に取り込んでおり，検出部が6°回転するつどモニタに線材径を出力表示するようにしている．パソコンは，負荷軽減のため演算用と表示用の2台を設置した．

3. 装置構成

以下では，(1)検出部，(2)信号伝送を行う回転トランス，さらに(3)電源供給のため検出部に組み込んだ発電機について述べる．

3.1 検出部

Fig.6に回転テーブル上の検出部構成を示す．光源と

しての発光ダイオードの光を集光レンズにより平行光として，線材に照射させている．その後，バンドパスフィルタを通してカメラレンズにより，CCD上へ結像させる．CCDの出力は，回転トランスの駆動回路を介して，回転トランスへ出力される．

本装置は，光源光が線材に遮られる部分をCCDで線材径として検出している．そのため，線材からの放射光は測定誤差となる．そこで，まずFig.7に示す光源，CCD，線材(1050℃)の分光感度特性³⁾から，光源光の波長帯域のみを透過するバンドパスフィルタとして650nmから670nmの光を透過するものを受光部へ組み込んだ．これにより，線材の放射光による影響を抑えた．

Fig. 7. Spectral Characteristics.

以下に検出部での高速回転化に対応した光源，CCDについて述べる．

(1) 光源

光源には主波長660nmの赤色発光ダイオード⁴⁾を採用した．発光ダイオードの発光部は樹脂モールドされ，2000Gまで耐量が保証されている⁵⁾．よって，光源に加わる遠心力に対する耐量は十分である．光源の波長は，Fig.7に示すCCDの相対感度⁶⁾が0.8以上である400～700nmの帯域内で，発光強度の大きいものとして，GaAlAsを用いている660nmとした．

(2) CCD

CCDは，550nmのとき最大として400～1100nmに感光帯域がある一般的な特性のものを用いた．このCCDを検出部へ組み込まれた電子回路によって駆動させる．有効素子数は2048素子で5MHzの周波数で動作し，1データの出力時間は0.42msecとなる．また，円周方向に6°ごとの線材径データを出力するためには，検出部を600rpmで回転した場合，6°回転する経過時間 約1.67msec 以下で，1データを出力する必要がある，このCCDの動作速度は十分である．

3.2 信号伝送

本装置は，回転している検出部から固定部への信号伝送を磁気カップリングにより非接触で行うため，回転トランスを組み込んでいる(Fig.3)．回転トランスは，線材通過部を中空とした回転側送信コイルと固定側受信コイルで1組を構成し，伝送する信号であるXchとYchそれぞれのCCD出力，及び，タイミング信号に3組を用いた．

各回転トランス間には，測定誤差となる互いの信号干渉を防ぐため，シールド円板を組み込んだ．伝送効率は，インピーダンスの低い送信部を駆動できる出力素子を用い，受信部で電気的な特性の整合をとることで70%を確保した．

このように，非接触の磁気カップリングで信号伝送することにより，高速回転させても十分な安定性と耐久性を確保した．

3.3 回転部への電源供給

本装置は検出部に発電機を組み込み，回転テーブルの回転を利用した電源供給方式を採用した．発電機は回転テーブルの回転により，発電機ギアが固定側取り付けギアに回され発電する．発電機の構造図をFig.8に示す．磁石には8極のMQ3磁石，ステータコアには12極のものを用い，ステータコアから4極を加算した3相交流で出力さ

せている．この発電機で電力14Wを発生させ，発生した3相交流を平滑し直流に変換，その後，DC-DCコンバータにて電子回路の供給電源として電子回路へ供給した．発電機のベアリング耐久性能は，発電機の組み込み位置に加わる公転遠心力を考慮に入れて計算した結果，寿命が2万時間以上となり，十分である．

4. 耐環境性能

本装置は測定原理で述べたように，光学式の線材寸法測定器であるので，検出部に組み込まれている線材径検出器への光学的外乱は，測定誤差となり，装置性能を著しく低下させる．また，検出部に組み込まれている部品は，室温レベルで温度が一定であるとき安定した性能を保証しており，とくに，50 以上の高温は，測定に与える影響が大きい．さらに，電子回路は水分に弱く，水分が故障の原因となる．

本装置が設置されている線材圧延ラインで，設置環境から検出部に与える影響要因を考えると，装置内を700～1050 の圧延材が通過することによる線材の放射熱，線材から発生するスケールや線材とともに運ばれる水などが考えられる．そこで，線材径検出器を含む検出部を保護するため実施した(1)熱対策(2)スケール対策，(3)防水対策，について述べる．

4.1 熱対策

本装置では線材の放射熱を遮蔽するため，耐熱ガラス⁷⁾と熱線吸収フィルタを用いた．受光部，投光部それぞれの線材に面する側に耐熱ガラスを組み込み，耐熱ガラス直後に熱線吸収フィルタを配置した．また，耐熱ガラスのホルダ部は熱伝導を考慮し，回転テーブルのカバーを

放熱板として利用した。圧延ガイドについても水冷を施し、検出部への熱遮蔽とした。さらに、温度を室温レベルで一定とするため、装置全体をカバーで覆い空調を施した。以上の対策効果を確認するため、圧延材通材部に1100 のSiC加熱棒を線材と仮定して置き、10時間測定し、検出部内における温度が、25～28 で安定していることを確認している。

4.2 スケール対策

線材の放射熱対策で用いている耐熱ガラス面には、線材から発生するスケールが付着し、光源からの平行光を減光、もしくは遮断する。スケール付着は、線材に遮られる部分を検出している本装置において測定誤差を起こす大きな原因となる。対策として、耐熱ガラス表面へのスケール、水の付着を防止するため、耐熱ガラス表面上へパージ用のクリーンエアを流す方法を採用した。

以上の対策効果を確認するため、10時間のオンライン測定を実施した。測定後、耐熱ガラス表面を確認したところ、スケール付着はなく、測定への影響がないことを確認している。

4.3 防水対策

線材とともに運ばれる水が耐熱ガラス面へ付着した場合、スケールと同様に発光ダイオードを減光、もしくは遮断し、測定誤差の要因となる。検出部へ付着した水が浸入した場合には、電子回路の故障原因となる。そこで、本装置の前段に設置されている3つの圧延ガイドにパージエア機構を組み込んだ。これにより装置への水浸入を防止した。

5. 測定精度

本装置は誤差の補正、フィルタなど、種々な工夫により静的な状態において、 $\pm 42 \mu\text{m}$ 以下を達成している。このことは精度良く加工したテストピースの測定で確認している。

測定誤差には光学系の誤差、回路・伝送誤差などがあるが、とくに、誤差要因として大きいのは、光学系の誤差である。

以下、本節では光学系の誤差について述べ、さらに、オンラインにおける精度校正のために実施した実ラインでの測定精度確認テストについても述べる。

5.1 光学系の誤差

光学系の誤差要因にはレンズ収差⁸⁾、光源の平行度などがある。レンズ収差、光源の平行度の誤差を無視して測定した場合、最大500 μm の誤差を生じていた。そこで、これらの誤差をなくし測定精度を高めるため、光学系の誤差を補正する方法を検討した。

Fig.9にレンズ収差、光源の平行度の補正方法を示す。

Fig. 9. Method of optical correction.

線材は圧延ガイド内を通過するため、通過範囲は限定されている。あらかじめ、通過範囲におけるすべての位置で、精度良く加工した円柱テストピースの位置と径を測定しておく。本装置では線材径検出器が2組あるため、測定対象物の位置を2次的に検出可能である。さらに、測定した位置と径から、各位置に対応するセルへCCDの分解能を位置補正係数として、メモリ上に保管しておく。実際の測定時には線材位置に対応した位置補正係数で径データを補正し、線材径データとしている。このような補正により、レンズ収差、光源の平行度による誤差 $\pm 14 \mu\text{m}$ を実現させている。

5.2 オンライン精度確認テスト

オンラインでの測定値と製品実測値との比較をFig.10に示す。横軸は線材先端からの長手方向位置、縦軸は線材径を示す。製品径は19 で、オンライン測定後、圧延せずにそのままにして、冷却後にマイクロメータで実測した。熱間の測定値と冷間の実測値との差は、測定値に熱膨張⁹⁾を考慮した補正を行った。

測定部位を正確に一致させることは困難なため、一定の線材長間隔で測定値と実測値の最大値比較を行い、その差のばらつきを調査した。ばらつき は、20 μm で静的な測定精度以内である。

Fig. 10. Comparison measured value of profile meter with

6. 実操業における測定例

ここで開発したWRプロファイルメータは、実ラインのBM-CSM間に設置され、測定結果がリアルタイムにモニタ上へ表示され、操業に活用されている。Fig.11は製品径12（BM-CSM間では、12.8）の測定表示例である。横軸に線材先端を基準とした長手方向位置、縦軸に断面プロファイルの最大値、最小値を表示する。この測定結果を確認することにより、線材径変動の把握が可能である。

7. 結 言

検出部の回転数を600rpm、センサ数を2組とする、従来装置より大幅に長手方向の空間分解能を向上させたWRプロファイルメータを開発した。これにより、線材通過速度が110m/秒の高速圧延ラインにおいても、2.75m間隔で線材の1断面プロファイルを測定することを可能にした。

ここで開発したWRプロファイルメータは、1996年5月に当社知多工場の線材圧延ラインBM-CSM間に設置され、現在も順調に稼働を続けており、品質向上に大いに貢献している。今後、さらに空間分解能、測定精度の向上を図りたいと考える。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力していただいた当社知多工場、同星崎工場、ならびに、同技術開発研究所諸氏に謝意を表する。

(文 献)

- 1) 森 達也：電気製鋼，67(1996)，68
- 2) 田中淑夫，田中 勇，小柳英夫：島津評論，43(1986)，67
- 3) 温度計測部会編：温度計測(1981)，179
- 4) 東芝(株)：可視LEDデータブック(1995)，301
- 5) 東芝(株)：LEDランプ プロダクトガイド(1996)，76
- 6) 東芝(株)：CCDリニアイメージセンサTCDシリーズデータブック(1995)，28
- 7) 泉谷徹郎：新しいガラスとその物性(1984)，68，[経営システム研究所]
- 8) 山田英明：レーザー & オプティクスガイド -1，(1993)，1，[キノ・メレスグリオ(株)]
- 9) 岡本正三：鉄鋼材料(1963)，20，[コロナ社]