

(技術資料)

汎用画像処理装置による熱鋼形状計測 熱延工場での測定事例

Measuring Method of Hot Metal Shapes by Using General-purpose Image Processor - Application to Hot Strip Mill -



小林正宜*

Masanori KOBAYASHI



森本禎夫*

Yoshio MORIMOTO



西川恒明*

Tsuneaki NISHIKAWA

Various kinds of sensors have been developed for steel rolling plants to measure the shape of rolled materials. But in many cases, they are too expensive to be used for carrying out measurement when necessary. Along with the recent progress of digital technology, general-purpose image processors with CCD cameras have come to be used in various kinds of industries. We tried to use such sensors to measure sheet-bar shape in our hot strip mill, and succeeded in getting some useful information.

まえがき = 当社加古川製鉄所では、厚板、線材、熱延および冷延の各圧延工場においてユーザーズにマッチした鋼材を製造している。これらの工場の圧延ラインにおいては、鋼材の材質や品質のみならず、歩留、生産性および直行率の維持向上を図るために、鋼材の温度、板厚、板幅、平坦度および板速度などをオンラインで計測する各種センサを適所に配置し、圧延作業のリピータ性や正確性を確保している。これらのオンライン型センサは、高温、水蒸気、圧延油飛散といった過酷な環境下で連続測定に供されることから、環境対策や信頼性確保の面で設置費用が高額となり、設置箇所の十分な検討も必要になる。

一方、圧延技術者が必要な時期に必要な場所で容易に圧延プロセスデータを収集し、このデータを徹底的に解析することで、圧延方法の適正化を検討できるようにすることが圧延プロセスの改善にとって重要である。これを実現するには、ユビキタ的な計測環境の下で多量の圧延プロセスデータを収集できるようにする必要がある。

近年のデジタル技術の進歩により、汎用で高速かつ高精度の計測ができる種々の画像処理装置が安価に入手できるようになってきている。これらの画像処理装置は、

圧延ラインの悪環境下での耐久性を犠牲にすれば、任意の位置とタイミングで鋼材の形状測定に適用できると考えられる。

本報では、熱延工場において、市販の画像処理装置を利用して熱鋼形状を計測した事例について述べる。

1. 熱延工場における熱鋼形状計測のコンセプト

当社加古川製鉄所の熱延工場（以下熱延工場）の概要は図1に示すとおりであり、加熱炉4基、サイジングプレス設備1基、エッジャ設備1基、粗圧延機4基、仕上圧延機7基、巻取機5基を有している。粗圧延機の配列は、スリークウォータ式¹⁾で、近接エッジャ付2段圧延機R2と近接エッジャ付4段圧延機R3,R4,R5からなり、その内、可逆式のR3で3パスのリバース圧延を行っている。

加熱炉から抽出されたスラブは、サイジングプレスあるいはエッジャで幅圧下された後、粗圧延機群により所定の厚みまで圧延される。このときの熱鋼のことを粗バーと呼んでいるが、この粗バーには、スラブの形状や加熱状態、さらに、サイジングプレスや粗圧延機のセッティング状態など、種々の要因により、図2に示すような先後端の幅不足（幅引け）、長手方向の曲がり（キャン

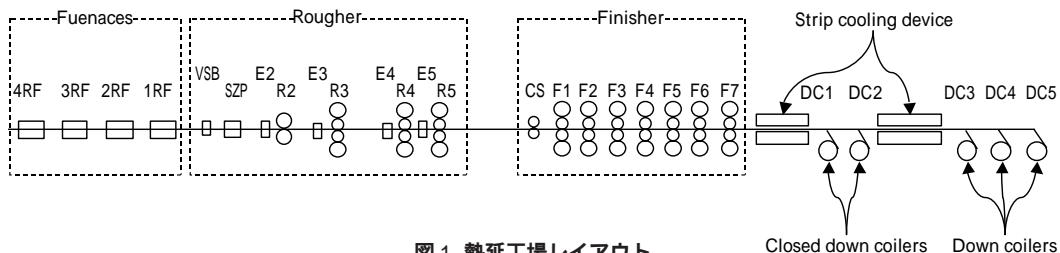


図1 熱延工場レイアウト
Fig. 1 Layout of hot strip mill at Kakogawa Works

* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

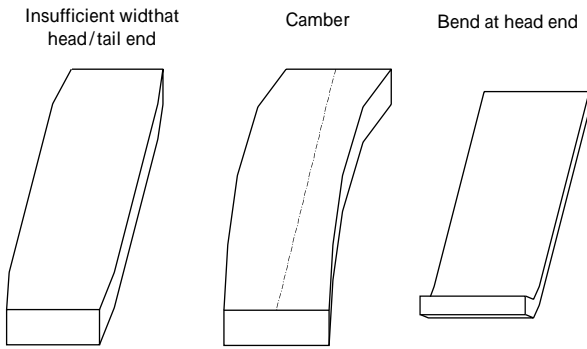


図2 不均一な粗バー形状の例
Fig. 2 Example of asymmetric sheet bar shapes

バ), 先端部の反りといった形状の不均一が発生する。特に、幅引けやキャンバは、粗圧延後のF1～F7スタンドでの仕上タンデム圧延において修正することが困難であり、仕上圧延後のホットコイルの幅不良や仕上圧延中のミスロールの原因となることがある。

粗バー幅に関しては、R2, R3 および R5 スタンド出側に設置された板幅計によるエッジヤ（近接含む）のセッティングについて学習²⁾を行うことで、先後端を除く長手方向での幅精度の確保を図っている。しかしながら粗バーごとでの制御であり、スラブと粗バーのサイズや圧延条件が変動する場合には十分な制御精度が得られないことがある。一方、粗バーのキャンバについては、センサが設置されておらず、圧延オペレータの目視判断によってキャンバ修正のための粗圧延機の左右ロール間隙調整（レベリング調整）がなされているのが現状である。

著者らは、従来のような高額かつ時間のかかる熱間圧延用幅計やキャンバ計等の設備投資というリスクを回避しつつこうした現状を打破するため、サイジングプレス、エッジヤ（近接含む）および粗圧延機による圧延作業をより高いレベルに引上げ、粗バー形状の改善を図れるように、加熱炉抽出から粗圧延までの圧延プロセスにおける粗バーの形状変化を把握、定量化できる安価で精度の高い手段を実用化することにした。

2. 熱延工場における熱鋼形状の計測事例

2.1 使用機材

粗バーの温度は1,000 以上と高温である³⁾。一方ガイドやローラ、ローラ間下反り防止ガイドといった圧延機付帯設備は、高々600 程度であるため自発光しない。この温度差にともなう輝度や色調の差を検出することで粗バーのエッジ位置を決めることができる。このため、CCDカメラによる画像処理装置を粗バー形状の測定に用いることにした。

用いた画像処理システムは、デジタル方式で最大4台のCCDカメラを用いて画像を撮影し、撮影対象のエッジ位置などの特徴データについて連続的な演算処理が可能である。また、演算処理速度は、例えば板幅計測の場合、30回/秒と十分なものである。

カメラの光学系は汎用のCCTV用レンズが使用できる。必要な計測精度とカメラの設置距離から適正な焦点距離のレンズを選定した。

2.2 画像処理装置による熱鋼エッジ検出方法

画像処理装置による粗バーのエッジ検出においては、粗バーの幅側面がカメラ視野に含まれることがある。この場合、幅側面の輝度状態によっては、エッジ検出の安定性が損なわれることが危惧される。

そこで、ラボ試験により、カメラと熱鋼の位置関係を変化させ、画像処理装置によるエッジ検出がどのような影響を受けるか確認した。

結果は図3に示すとおりであり、サンプルのエッジ側面が視野に入る場合（ $\theta = -15^\circ$ ）はエッジが検出できず、エッジ側面が視野に入らないようにした場合には（ $\theta = 0^\circ, 7.5^\circ, 15^\circ$ ）、サンプルの温度によらず1画素以内のレンジでエッジの検出ができていた。1画素以下の解像度は内挿ソフトの計算によるものであるため無視すると、温度の影響はほとんどないと考えてよい。側面が写らないようにカメラを設置すれば、画像処理装置は測定対象物のエッジを安定して検出できることが確認できた。

2.3 実機における粗バー幅計測

画像処理装置による粗バー幅の計測は、板幅計が設置されていないサイジングプレス入出側において実施した。

本計測に際しては、測定対象であるスラブ厚が160～250mmと変化することや、サイジングプレスの幅調整量によってスラブ厚が変化するため、これらの影響を排除する必要がある。そのため、図4に示すステレオ計測法（4眼式⁴⁾）を採用した。さらに、カメラの取付け位

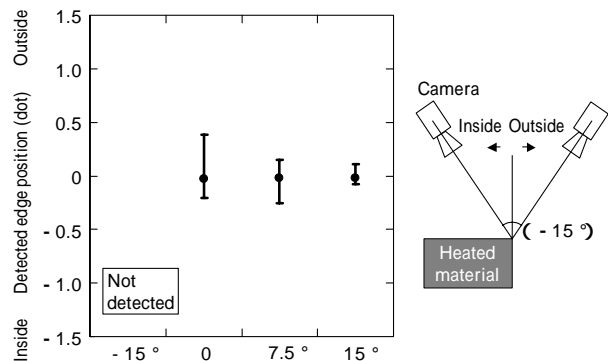


図3 画像処理装置による熱鋼エッジ検出精度
Fig. 3 Accuracy of image sensor to detect edge of heated material

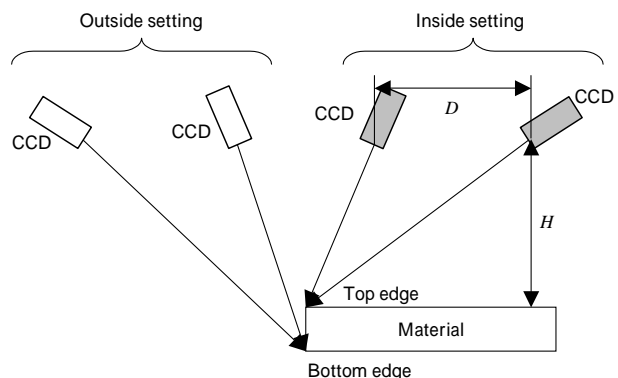


図4 ステレオ計測法
Fig. 4 Stereo measurement method

置は、図4に示すように、スラブ幅中央側からスラブ上面エッジを検出する方法、あるいは、スラブ幅外側からスラブ下面エッジを検出する方法の2つが考えられるが、設置のしやすさから前者とした。

ステレオ計測では、カメラの間隔が計測幅の分解能と粗バーの浮き上がり検出能力に影響を与える。適正なカメラ間隔を決めるために、下記に示すカメラ設置高さ H (mm)、カメラ間隔 D (mm)、計測幅の分解能 a (mm)の関係式(1)(2)を用いた数値シミュレーションを行った。ここで、式(1)は、図5に示すCamera 2の視野範囲の最遠点Bにおける、Camera 1の解像度が a (mm)であるための条件を表す。また、式(2)は、同様に点Bにおける材浮上がりによるエッジ検出誤差を、幅解像度である a (mm)以内に抑えるための条件を表わす。

$$a \geq \frac{w_{\text{CCD}}}{n} \cdot \frac{A_1 \cdot B_1}{fH(\sqrt{D^2+H^2})(4f^2+w_{\text{CCD}}^2)} \dots\dots\dots(1)$$

$$A_1 = \{2(\sqrt{D^2+H^2}W + D) + w_{\text{CCD}}HW + 2fH^2\}$$

$$B_1 = \{2(\sqrt{D^2+H^2}W + D - a) + w_{\text{CCD}}H(W - a) + 2fH^2\}$$

$$a \geq \frac{2w_{\text{CCD}}}{n(4f^2+w_{\text{CCD}}^2)} \cdot \frac{\sqrt{(W+a)^2+H^2}}{HD\sqrt{D^2+H^2}} \cdot \left[\frac{2fA_2}{\sqrt{D^2+H^2}} + w_{\text{CCD}}HB_2 \right] \dots\dots\dots(2)$$

$$A_2 = \{(\sqrt{D^2+H^2}W + D - a) + H(\sqrt{D^2+H^2}W + D - a)\}$$

$$B_2 = \{(\sqrt{D^2+H^2}W + D - a) - (W + D - a)\}$$

f : レンズ焦点距離 (mm)

w_{CCD} : CCD幅 (mm)

n : CCD幅方向画素数 (dot)

W : カメラ位置の視野端に対するオフセット量 (mm)

$$W = \frac{2w_{\text{CCD}}(H^2 + a^2)}{H(2f - w_{\text{CCD}}) - 2w_{\text{CCD}}}$$

結果を図6に示す。カメラ設置高さ H 、カメラ間隔 D は、図中の、幅計測の分解能が1mm以下となるカメラ間隔の上限値を示す点線と、粗バーの浮上がり検出できるカメラ間隔の下限値を示す実線で囲まれた領域に入るように設定した。サイジングプレス入側でのスラブ幅の計測状況を図7に示す。CCDカメラは、サイジングプレス入側のスラブ幅を撮影できるようにエッジ設備の上部タラップに取付け、画像処理装置本体はエッジ設備の機側フロア上に設置した。なお、カメラと処理装置の設置・調整に要した時間は、約3時間であった。

図8にスラブ幅を連続して測定した例を示す。実測ス

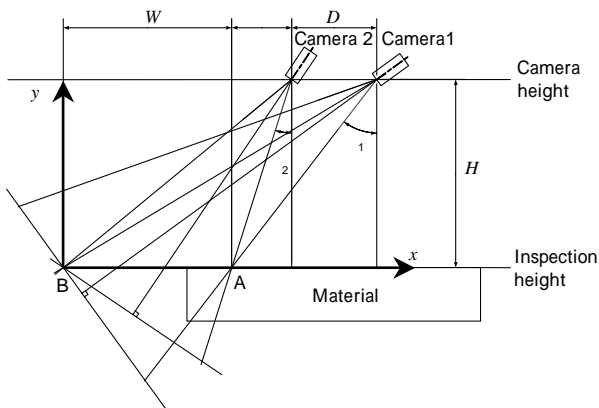


図5 式(1)(2)の座標系

Fig. 5 Coordinate system for deriving formula (1) (2)

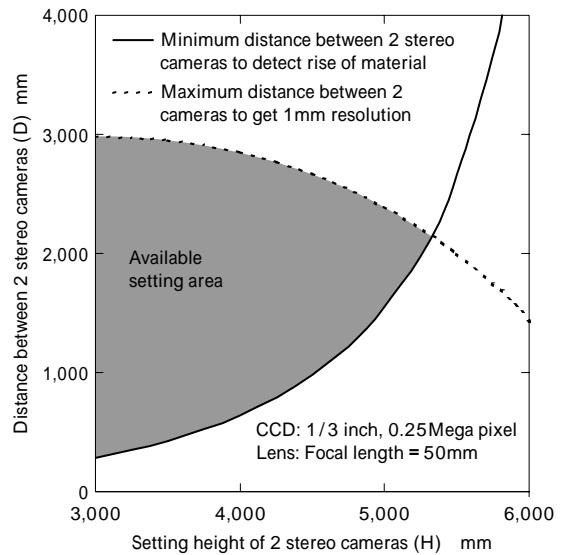


図6 式(1)(2)に示されたステレオカメラの配置条件の例

Fig. 6 Available area of stereo camera setting calculated by formula (1) and (2)

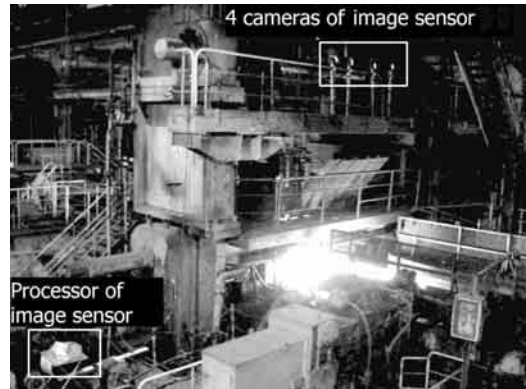


図7 サイジングプレス入側(VSB出側)でのスラブ幅の計測状況
Fig. 7 Method of measuring slab width at entry side of sizing press

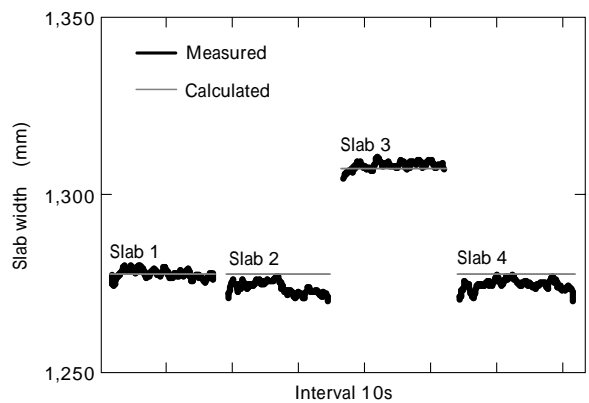


図8 スラブ幅の計測例

Fig. 8 Example of measured slab width

ラブ幅は、連続鋳造時の鋳型設定幅を熱寸補正した値との比較から、ほぼ妥当なものと考えられ、今回の画像処理装置による幅計測は、コストパフォーマンスと機動性の面から、圧延操業改善のためのデータ採取に適した手段であると言える。

2.4 実機におけるキャンパ計測

画像処理装置による粗バーキャンパの計測は、粗圧延最終スタンドであるR5出側と、粗圧延工程でのキャンパの生成過程を調査するためR3入出側において実施し

た。

一般に、板圧延ライン用のキャンバ計測装置としては、板幅計を3台組合せて幅中央の曲率を求める方式や⁵⁾⁶⁾、長手方向の複数の画像を採取して合成する方式が実用化されている⁷⁾。

今回、安価でかつ機動的なキャンバ計測を実現するため、画像処理装置を用いた方法を採用した。本方法では、粗バー長手方向3箇所の板幅中央の軸線を同時に計測するというキャンバ測定の基本原理に従い、図9に示すように粗バーを撮影した1つの画像から3箇所(前、中央、後)のオフセンタを検出するようにしている。検出された前と後の板幅中央位置を直線で結び、中央の板幅中央位置とのずれから粗バーの曲率を求める。画像処理装置の特徴である連続画像処理により、粗バー長手方向の曲率分布が求まり、得られた曲率分布からキャンバ形状を演算することができる。

本測定では、圧延機上部のデッキ上にカメラと画像処理装置を設置しており、カメラと処理装置の設置・調整に要した時間は幅計測の場合よりも短く、約2時間であった。



図9 キャンバの計測方法
Fig. 9 Method to measure sheet-bar camber

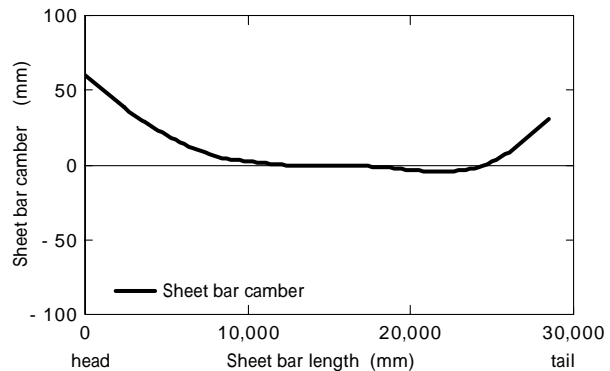


図10 キャンバの計測例
Fig.10 Example of measured camber

この方法を用いて計測した粗バーのキャンバ計測結果の例を図10に示す。先端の急峻な曲がりや粗バー全体のキャンバ量が計測できており、粗圧延機ごとのレベリング量やサイドガイド開度の設定を適正に調整していくうえで十分な性能を有していると考えられる。

むすび=市販の汎用画像処理装置を用いて、低コストかつ機動性に富んだ熱延粗バーの形状計測を実用化した。本センサは、熱や水蒸気・粉塵などに対する環境対策を施すことなく圧延ラインに設置しているが、カメラレンズの清掃の必要はあるものの、幅とキャンバの計測などで延べ1年以上故障もなく測定できており、ある程度の耐久性を有することが確認できている。

本報では、熱延工場における熱鋼形状計測の事例について述べたが、厚板工場や線材工場においても熱鋼の形状測定ニーズがあり、これらの工場への展開を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会熱延鋼板部会編：熱延鋼板マニュアル(2000)，日本鉄鋼協会，p.11.
- 2) 西野都ほか：材料とプロセス Vol.10 (1997) p.1011.
- 3) 日本鉄鋼協会熱延鋼板部会編：熱延鋼板マニュアル(2000)，日本鉄鋼協会，p.14.
- 4) 後藤桂三：塑性と加工 26-295 (1985) p.795.
- 5) 西崎克己ほか：鐵と鋼 Vol.71, No.12 (1985) p.1176.
- 6) 段儀治ほか：材料とプロセス Vol.12 (1999) p.1089.
- 7) 本城基ほか：鐵と鋼 Vol.70, No.5 (1984) p.S411.