



入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術－5

熱間圧延における計測技術

Process Instrumentation Technology for Hot Strip Mill

伊勢居良仁

Yoshito Isei

新日鐵住金（株）プロセス研究所

計測・制御研究部

主幹研究員

1 はじめに

熱間圧延とは1000℃以上の高温に加熱した鋳片を2つあるいは複数のロールを回転させ、その間を通すことによって薄板や厚板、線材・棒鋼、継目無鋼管、形鋼等の形状に加工するプロセスである。加工された鋼材は必要に応じて、冷間圧延や熱処理、表面処理が施され、検査が行われた後に製品として出荷される。このように、熱間圧延は製品の寸法、機械特性を決める重要なプロセスであるが、製鉄所で製造される鉄のほとんどが通るため、同時に高い生産性を要求される。このため、生産性、寸法精度、温度精度を改善するための研究開発が継続して行われてきた。熱間圧延は、塑性加工理論を用いたモデル制御を適用しやすいプロセスであり、電子デバイスや計算機の発達に応じて、各種先進的な計測器、油圧圧下などの高精度・高応答なアクチュエータ、計算機を用いた自動制御が導入された。今日、もっとも多くの鋼片を加工する薄板の熱間圧延においては、200～300mmの厚みの鋳片がわずかに数分で1.2～数mmの厚みに延ばされ、コイルの形に巻き取られる。この際の圧延速度は最大25m/秒、板厚の精度は数十μmに到達し、高温鋼材を加工するプロセスでありながら、高速通板と高い寸法精度を実現している。熱間圧延プロセスにおける計測技術は、このような高生産性と高精度な製品を実現する上で欠かせない要素技術であり、時代のニーズとともに進歩し、適用されてきた。本報告では著者らが取り組んできた薄板の熱間圧延における計測技術を中心に紹介する。熱間圧延プロセス全体を見渡すと、加熱炉内の雰囲気温度計、圧延機の圧下位置測定や圧延荷重計、冷却帯の流量計など設備を設定どおりに動作させる計測器も多数使用されているが、今回は熱間圧延特有の計測技術を解説することが目的であるので、高温の被圧延材を測定対象としたプロセス制御用の計測技術に限定する。

2 薄板の熱間圧延と計測器の配置

図1に薄板を製造する熱間圧延ラインの設備構成を示す。薄板の熱間圧延ラインは、一般的に、加熱炉、粗圧延機、仕上圧延機列、ランナウトテーブル、コイル巻取り機から構成されている。加熱炉で1200℃前後に加熱された鋳片は、サイジングプレスにより幅を調整された後に、粗圧延機で圧延され、粗バーと呼ばれる厚み30～60mmの鋼片に加工される。次いで、その鋼片は、7スタンドからなる仕上圧延機により所望の厚みに圧延される。仕上圧延機を出た鋼板は、圧延直後にランナウトテーブルと呼ばれる搬送テーブルを通りながら冷却水で冷却され、コイル巻取り機によって巻き取られる。

仕上圧延機は鋼板の寸法を高精度に作り込むために、各種の寸法計測器とそれらを用いた制御^{1,2)}が適用されている。図2に仕上圧延機以降の計測配置を示している。仕上圧延機出側には、板上水や水蒸気を排除するなど測定環境を整えた計測器ゾーンが設けられ、X線透過強度から板厚を測定する厚み計や幅方向板厚プロフィール計、光学式板幅計、平坦度計が設置されている。測定対象である鋼板は高温であり、上下のばたつきや蛇行を伴い、高速で通板されるため光学式や放射線を用いた非接触かつ高応答な計測器が用いられる。これらの計測器で測定された測定値は圧延機のセットアップやリアルタイムフィードバックに用いられる。例えば、厚み計の測定値は、圧延機に装備された油圧圧下装置にフィードバックされて、高応答でロールギャップを調整することで板

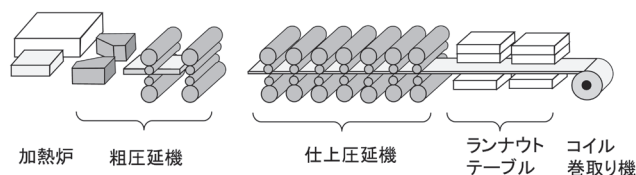


図1 薄板の熱間圧延ラインの構成

厚みを高精度に制御する。さらなる寸法精度向上を目的として、仕上スタンド間における、X線方式の鋼板厚み計³⁾、レーザドップラー速度計方式の鋼板速度計⁴⁾が開発されている。仕上圧延機のスタンド間で被圧延材の寸法を測定し下流の圧延スタンドにフィードフォワードすることで、遅れのない制御を行い、寸法精度を改善できる。これら計測器の測定値はプロコンに収集されて、次材以降の圧延を行う際の圧延機初期設定であるセットアップ制御の精度向上へも活用される。

ランナウトテーブルは100m以上の長さがあり、冷却帯1と冷却帯2の2つの冷却帯に分かれている。水滴、水蒸気等による外乱の少ない冷却帯の入側と出側に、仕上温度計、中間温度計、巻取温度計と呼ばれる、鋼板の温度を非接触で測定する放射温度計が設置されている。ランナウトテーブルにおける冷却過程での温度履歴は、鋼板の機械特性に大きく影響するため、通板速度、鋼板の熱伝達率を考慮した冷却制御モデルにより、これらが指定した温度となるように、各冷却帯の水量及び、水量分布、冷却タイミングが制御される。近年では、冷却帯内に温度計を設置して、下流の冷却条件をダイナミックに制御する方法も報告されている⁵⁾。

3 熱間圧延における計測技術

3.1 幅・蛇行計

鋼板の幅や蛇行の測定には、分解能と応答性の観点から1次元のラインセンサが用いられ、撮像画像から板幅や板中心

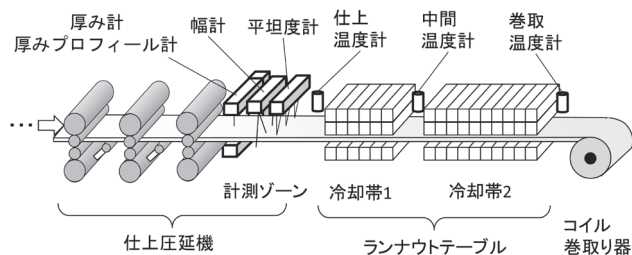


図2 仕上圧延機以降の計測器配置

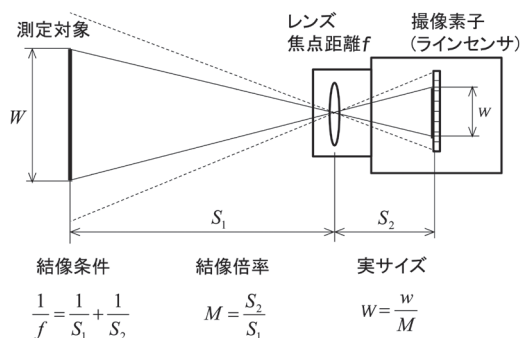


図3 光学式幅計の測定原理

を検出する方法が一般的である。本計測器は測定クロップ形状やキャンパなどの平面形状の測定にも適用できる応用範囲の広い技術である。図3に示すように、結像レンズを用いて測定対象物をラインセンサ面に結像し、ラインセンサ上に結像された部分の画素数を求める。測定対象範囲の画素数を求める際には、測定対象と背景の検出輝度の違いによる2値化と呼ばれる画像処理が用いられる。その対象物範囲の画素数に対して画素分解能をかけてラインセンサ上に結像された測定対象の幅を算出して、結像倍率で除算することで実際の測定対象物の幅を測定することができる。薄板の熱間圧延ラインに使用される幅計には、測定分解能を向上させつつ、板が上下に変動した際の誤差を補正するために、検出エッジごとに2台のラインセンサが設置されている²⁾。

測定対象材の条件や設置環境に応じて、バックライト方式と自発光方式の2種類が使い分けされている。図4(a)に示すバックライト方式は、鋼板の下側に均一な面光源を配置することで、鋼板で覆い隠された部分と背景であるバックライト部分の検出輝度の差を強調させる方式である。熱間においては、鋼板熱放射光とのコントラストを確保するため、光源には青色の高周波蛍光灯やLED光源が用いられる。一方、図4(b)に示す自発光方式は、測定対象の温度が高く自ら熱放射光を放出しており、設置スペース制約などによりバックライト光源を設置し難い場合に使用される。自発光方式は、測定対象の温度変化に追従できるよう、ラインセンサの露光時間の自動調整機構を備え、エッジ検出には、輝度レベル変化の影響を受けにくい、輝度微分値のピーク位置を検出する方式が用いられる。

近年、2次元撮像素子の高速化、計算機能力の向上に伴い、2次元カメラを用いても高速かつ高精度なエッジ検出が可能となった。2次元カメラを用いた仕上スタンド間のステレオカメラ方式蛇行計の構成を図5に示している⁶⁾。この蛇行計は、高フレームレートの高速な2次元カメラで赤熱する高温の鋼板の画像を撮影し、画像処理により鋼板のエッジ位置を

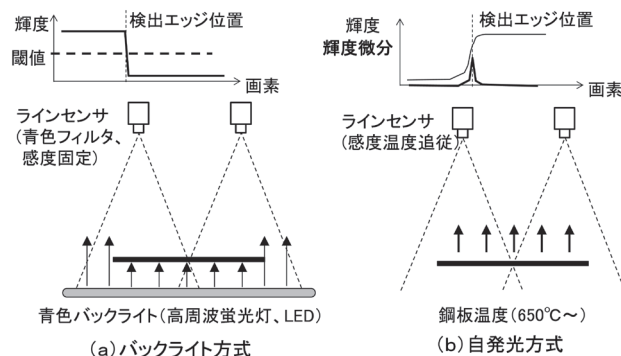


図4 光学式幅計の測定方式

認識して蛇行量を算出することが特徴である。また、2台の2次元カメラを用いて鋼板をステレオ立体視することにより、カメラと鋼板の距離の変化に対応している。熱間圧延仕上スタンド間では、霧状水滴やヒュームにより、鋼板エッジの視野の一部が遮られる場合がある。この対策のため、図6に示すエッジ検出が適用されている。まず、各走査線上のエッジ候補を微分強度が最大となる位置を探索することにより検出し、つぎに、全ての走査線上のエッジ検出位置に関する回帰直線を最小自乗法により求め、鋼板エッジ線とする。この最小自乗法では、微分強度を重率とすることにより、エッジが不鮮明な走査線の影響を低減させている。最後に、画面上にあらかじめ設定した圧延方向位置（蛇行量測定位置）における鋼板エッジ線の座標を蛇行量測定位置のエッジ測定値とする。この方法により、霧状水滴やヒュームによって部分的に視野が欠けているような場合であっても蛇行量を検出することが可能になり、かつ、毎秒80回以上の蛇行測定値を1mm以下の分解能で出力している。この蛇行計はスタンド間の蛇行制御に適用されて、通板安定性の向上に寄与している。

3.2 厚み計

板厚みの測定には図7に示すような放射線透過方式の厚み計が用いられる。検出器と線源は、Cフレームと呼ばれるコの字型台車のアーム部の上と下に隔てて設置されており、C

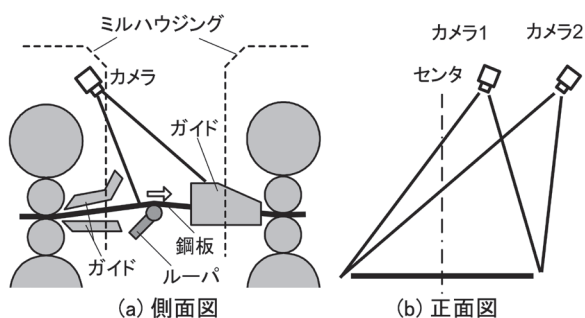


図5 スタンド間蛇行計の構成⁶⁾

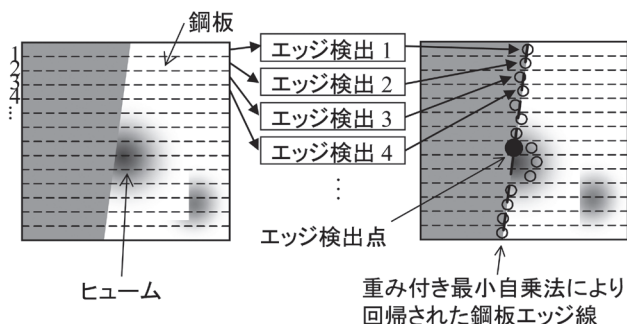


図6 2次元カメラを利用したエッジ検出⁶⁾

フレームが板幅方向に移動することで、ライン横のメンテナンス位置に退避できる構造となっている。両アーム部の間に鋼板を挟んで放射線源と検出器を設置することで、放射線の透過強度を測定し、鋼板透過時の減衰量より厚みを算出する。厚み t は(1)式により算出できる。ここで、 I_0 は入射させた放射線強度、 I は透過後の放射線強度、 μ_m は質量吸収係数、 ρ は密度である。

$$t = \frac{1}{\mu_m \rho} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

放射線源としては、板厚みが厚い粗圧延機には、透過性の強いガンマ線減が用いられるが、板厚が薄く圧延速度が速い仕上圧延機以降は、X線源が用いられる²⁾。減衰係数は、測定対象材の密度 ρ と吸収係数 μ_m の積であるため、成分濃度による吸収係数と密度の補正、温度による熱膨張補正が行われる。また、仕上スタンド間に設置されるX線厚み計には、張力調整アクチュエータであるルーパ角度変動に伴う鋼板角度変動の影響を補正する機能も有している²⁾。

幅方向の板厚プロフィール測定には、上記の放射線厚み計を幅方向に走査する走査方式と、1つの線源から放射線を広角度に放射し鋼板を透過させ、幅方向に並べた複数の検出器で検出するマルチチャンネル方式⁷⁾の2種類がある。マルチチャンネル方式は、近年適用され始めた方式であり、走査型に比べて高応答で板厚プロフィールを測定できる。特に、正確に板のエッジに追従する必要がある場合やエッジ部の厚みプロフィールを高分解能に測定する場合に有用である。

3.3 速度計

近年は、熱間圧延においてもレーザドップラー速度計を用いて、鋼板長さのトラッキングや圧延時の伸び率、先進率の測定が行われている。レーザドップラー速度計はレーザ光を移動物体に照射し、その物体からの散乱光の周波数がドップラー効果によりシフトすることを利用し、移動速度を測定する。図8(a)にレーザドップラー方式の速度計の構成を示している。レーザ光源から出た光は、ビームスプリッターで2つに分けられ、移動する測定対象物表面に2方向から照射される。2

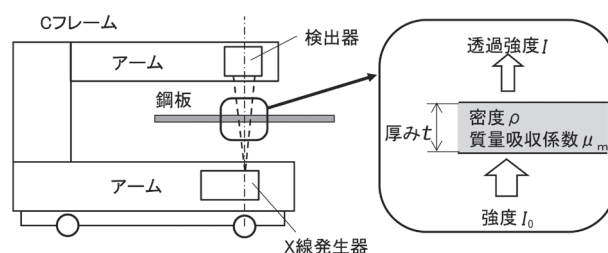
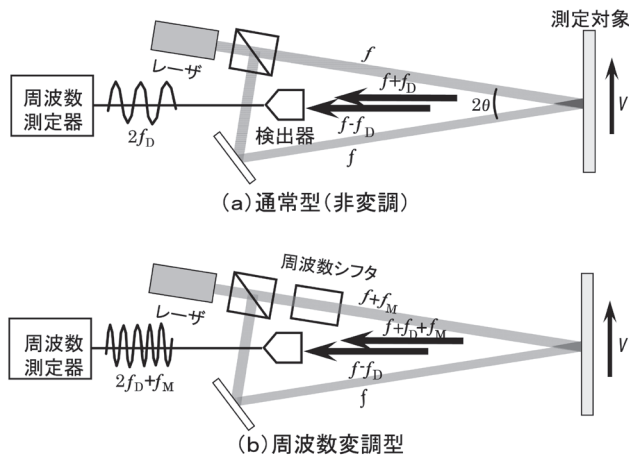


図7 放射線厚み計の構成と測定原理

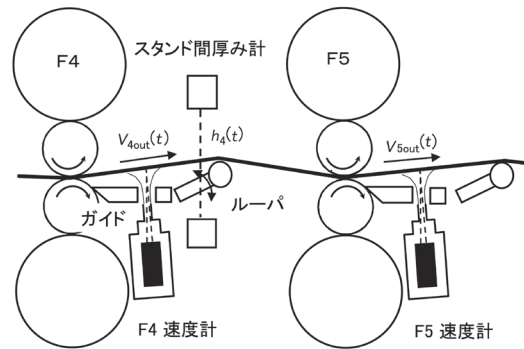
図8 レーザドップラー速度計の測定原理⁴⁾

つのレーザー光が交差する交差領域内の移動物体で散乱された光は、その速度に応じてドップラー効果を受け周波数がそれぞれ $+f_D$ と $-f_D$ だけシフトしている。図8に示すドップラーシフト周波数 f_D は(2)式に従っている。 λ は照射するレーザー光の波長であり、 c/f に等しい(c は光速、 f はレーザー光の周波数)、 V は移動物体の速度、 2θ は2本のレーザー光の交差角度である。

$$f_D = \frac{2V}{\lambda} \sin \theta \quad (2)$$

この2つの光が受光素子上でヘテロダイン検波され、この差成分である周波数 $2f_D$ が電気信号として取り出される。この信号を周波数分析して、(2)式により移動物体の速度を算出できる。レーザドップラー速度計には、停止及び移動方向を判別可能とした、図8(b)に示す周波数変調型レーザドップラー速度計がある。これは、通常型の速度計に対して、片側のレーザー光の周波数が f_M シフトされており、検出器では周波数 $2f_D + f_M$ の電気信号が測定される。このため、検出された信号の周波数が f_M より大きい小さいかで、進行方向を把握することができる。

図9に仕上圧延機スタンド間における鋼板速度計の構成例を示す⁴⁾。レーザドップラー速度計は鋼板との接触を避けるために出口ガイド下に設置されており、パスライン下方より鋼板裏面を測定することで鋼板上水乗りの影響を受けない。また、強力なエアパージにより、大量の冷却水からレーザー光路を確保できる構造としている。さらに、ドップラー周波数の解析に、最新の信号処理技術を適用することにより、鋼板振動及び角度変動により生じる誤差を抑制し、安定測定を実現している。スタンド間厚み計と2台のスタンド間速度計を組み合わせることで、スタンド間のマスフローから圧延機直下の厚みを高精度に測定できることが確認され、新たな板厚制御の可能性が示された。

図9 スタンド間における鋼板速度計の構成例⁴⁾

3.4 平坦度計

平坦度計は圧延時の板幅方向の伸び率分布を測定する計測器である。平坦度の測定としては、幅方向の張力分布を測定する分割ロール式⁸⁾と、顕在化した形状として測定する光学式の平坦度計がある。ここでは、後者について紹介する。光学式の平坦度計では、通板時の上下変動の影響を抑制するため、伸び率の測定は、表面傾きを測定して通板方向に線積分して表面長さを計算し、通板した長さとの比率を計算する方式が用いられる。この場合、伸び率 β は(3)式により算出される。ここで、 S は表面長さ、 L は通板した長さ、 $\theta(x)$ は通板方向の表面角度分布である。

$$\beta = \frac{S-L}{L} = \frac{\int_a^b \frac{dx}{\cos \theta(x)}}{\int_a^b dx} - 1 \quad (3)$$

表面角度の測定には、圧延方向2か所の高さをレーザ三角測量法により測定するツインビーム距離計方式^{9,10)}が一般的に用いられている。圧延機の制御には幅方向の伸び率分布を測定する必要があるため、ツインビーム方式では、幅方向に複数の測定ヘッドを並べて板幅に応じて走査する方式、板全幅にわたり2本の平行なレーザースリット光を照射してレーザ光切断法により測定する方式がある。これらの方法においては、形状不良により生じた板波が定在した場合に測定精度が劣化する問題があった。この対策として、鋼板の広い範囲に多数のレーザースリット光を投影して、時に投影範囲の形状を測定する方法が考えられる。本方式は過去に試験された¹¹⁾が、当時の技術レベルでは高温の熱延鋼板からの放射光に負けない強力なレーザースリット光を鋼板表面に多数投影することは難しく、レーザ発振器の寿命や光学系の耐久性にも課題があった。

近年、照明分野での省エネ推進の手段として、LED光源の高出力化と高効率化が急速に進み、投入電力1Wあたりの発光強度が100lmを越えるパワーLEDチップが登場してきた。

この様なパワーLEDチップを2次元に配列することで周期的なパターンを構成し、これを鋼板表面に結像投影するLEDドットパターン投影方式平坦度計が開発された^{12,13)}。図10に装置構成、図11に表面角度の測定原理を示す。LEDプロジェクタにより2次元の格子状パターンを鋼板表面の広い範囲へ投影し、異なる方向から2次元カメラにて鋼板表面に投影された格子パターンを撮像すると、パターンピッチは表面角度に応じて変化する。カメラとプロジェクタの光軸角度をそれぞれ α 、 β とし、平面板の基準ピッチ P_r 、鋼板傾斜時のピッチ P_s とすると、表面角度 θ は(4)式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(P_s / P_r) - 1}{\tan \alpha + (P_s / P_r) \tan \beta} \right) \quad (4)$$

このため、画像中のパターン投影範囲内のパターンピッチ分布を測定して、鋼板表面の角度分布を導出し、この角度分布を圧延方向に所定区間の線積分を行うことで、鋼板の表面長さを計算し、伸び率を求めることができる。この平坦度計は、瞬間的に一定範囲の形状を測定して伸び率を計算するため定在波発生時の精度劣化を抑制でき、また、高輝度なLEDドットパターン投影のため、測定成功率98.5%以上の安定した平坦度測定、光源の長寿命を実現している。

3.5 温度計

被圧延材の温度測定には、測定対象が高温の移動物体であることから、放射温度計が使用されている。放射温度計は、高温物体からの熱放射光強度を光検出器で検出して温度に換算する。理想的な黒体において、熱放射光の輝度は(5)式に示すプランクの放射則に従っている。 E_b は温度 T [K] 黒体が放射する波長 λ での放射輝度であり、 c_{1L} 、 c_2 は放射定数である。

$$E_b = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1} \quad (5)$$

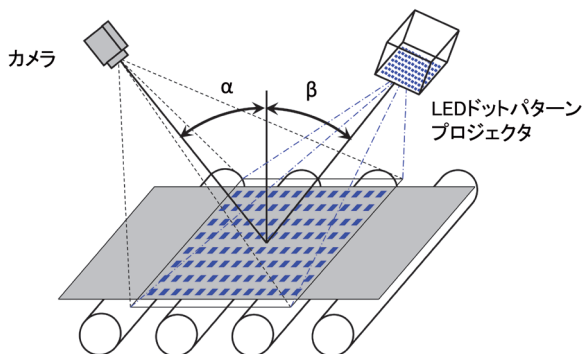


図10 LEDドットパターン投影方式平坦度計の構成¹²⁾

(5) 式は次の(6)式で近似できる。 n は放射温度計の感度特性を示すパラメータであり、 n 値と呼ばれる。 n 値は測定波長と測定温度で大きく変化する。

$$E_b \cong k \cdot T^n \quad n \cong \frac{c_2}{\lambda T} \quad (6)$$

放射温度計が実際に検出する放射強度は(6)式に、補正係数 α (面積、立体角、測定対象の放射率、光路の透過率等)がかかっており、このうち放射率や光路中の透過率が测温誤差の原因になる。(6)式より、 α の変動量 $\Delta\alpha$ による誤差 ΔT として(7)式が得られ、 n 値が大きければ放射率変動などによる测温誤差は小さくなる。

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{n} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \quad (7)$$

対象材の温度が700~1000℃である仕上圧延機出側の仕上温度計においては、Si検出器を用いた放射温度計が一般的に用いられる。Si検出器の放射温度計が用いられるのは、常温動作可能で比較的安価であることと、検出波長が約0.9 μ mであるため、 n 値は12~16と比較的大きく、放射率変動などによる影響を受けにくく、水蒸気や水膜の吸収も他の検出器より少ないためである。低温となるランナウトテーブルの中間温度計、巻取温度計では、長波長の光を検出できるPbS検出器やInGaAs検出器などが使用される。温度管理の強化のために、制御用の板幅中央部の温度測定に加えて、幅方向の温度分布を測定する幅方向温度計も用いられる¹⁴⁾。幅方向の温度分布測定には、上記検出器をアレイ状に並べた方式と、1つの検出器の光軸をポリゴンミラーにより幅方向に走査する方式がある。

ランナウトテーブルでの冷却過程の温度履歴制御には、冷却帯内での温度測定が有効である。冷却帯内において、鋼板上面には水乗り、鋼板下面の空間には大量の水滴状の冷却水が存在しており、この状況は冷却条件によって刻々と変化する。従来の放射温度計では、測定対象との間に水蒸気や水滴が存在すると、熱放射光が吸収され生じる吸収誤差や、散乱されて生じる散乱誤差を生じ、測定が困難である。また、強力なエアバージでこれら水滴を光路から取り除く方法も考え

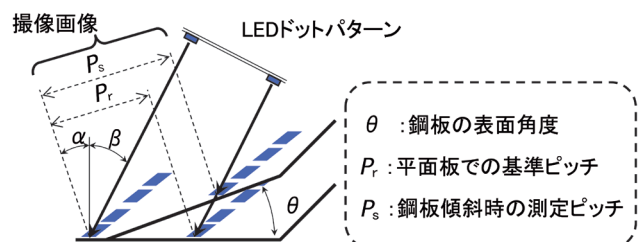
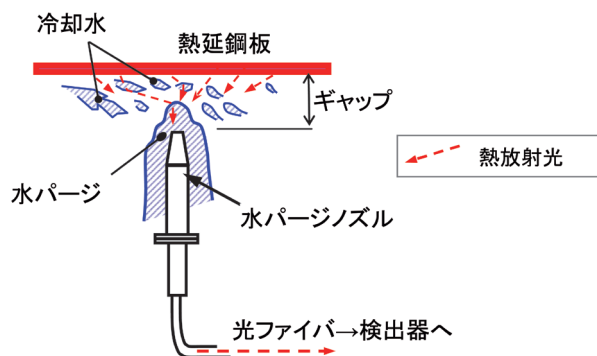


図11 パターン投影方式平坦度計の角度測定原理¹²⁾

図12 ファウンテン・パイロメータ⁵⁾

られるが、強力なエアパージが周囲の冷却状況に影響するなど、測定値の代表性を失う可能性がでてくる。図12に冷却帯内鋼板温度計ファウンテン・パイロメータの構成を示す⁵⁾。この温度計は独自の噴水状水パージを用いることで、熱放射検出のための光路を安定化して、水による散乱誤差と吸収誤差の抑制等を図っている。また、検出波長は水の透過波長域を積極的に利用しており、透過率の高い $0.83\mu\text{m}$ より短い波長帯の熱放射を検出するFP1と、 $1.1\mu\text{m}$ 近傍の熱放射を検出するFP2の2種類が開発された。それぞれの測定範囲は、 $500\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 、 $360\sim 800^{\circ}\text{C}$ であり、測定対象の温度レンジに対応して、それぞれ冷却帯1、冷却帯2に設置されている。

4 おわりに

熱間圧延は 1000°C に及ぶ高温の加工プロセスであるため、高温・粉塵や水滴・水蒸気といった外乱、振動の多い過酷な環境である。そのため、そこに設置されるプロセス計測器は、素材には非接触状態でありながら高応答な測定を実現し、加えて、この過酷な環境において、耐久性と長期間にわたる測定の安定性が要求される。今回紹介した計測器は、鉄鋼業における永年のトライアルによる経験を活かしつつ、物理的な計測の原理を考慮したうえで最新の技術を適用しながら、鉄鋼業特有の製造プロセスとその環境に順応し、進歩してきた。

今後の鉄鋼業が直面する課題として、よりいっそうの温室効果ガス排出抑制による環境負荷低減、少子化による労働者

人口の減少への対応があげられる。設備老朽化への対策も行いながらの対応であり、困難が予想されるが、日本の鉄鋼業が生まれ変わる好機でもある。その過程においても、熱間圧延における計測技術が、生産性を確保して高品質な製品を生産するうえで重要な要素技術であり続け、今後も進歩し続けることを期待する。

参考文献

- 1) 高橋亮一：鉄鋼業における制御，コロナ社，東京，(2002)，62.
- 2) 安部可治，深沢千秋：鉄と鋼，79 (1993) 3，294.
- 3) 木村和喜，布川剛，本城基，高橋亮一：鉄と鋼，77 (1991) 4，528.
- 4) 伊勢居良仁，本田達朗，木村和喜，焼田幸彦，武衛康彦：鉄と鋼，90 (2004) 11，902.
- 5) 本田達朗，植松千尋，橘久好，中川繁政，武衛康彦，阪上浩一，木村和喜，高橋秀之：鉄と鋼，96 (2010) 10，592.
- 6) 鷺北芳郎，伊勢居良仁，武衛康彦，斉藤憲幸：鉄と鋼，95 (2009) 1，43.
- 7) 森岡義久：日本塑性加工学会第248回塑性加工シンポジウム，(2006)，51.
- 8) 金森信弥，末田茂樹，古元秀昭，林寛治，木ノ瀬亮平，馬庭修二，大和田隆夫：CAMP-ISIJ，27 (2014)，576，CD-ROM.
- 9) 山根孝夫，斉藤森生，菊池隆也，清水録司，植木勝也，杉山昌之：CAMP-ISIJ，2 (1989)，1540.
- 10) 豊田利夫，小笠原昭宣，松原俊郎，中村覚：鉄と鋼，70 (1984) 9，1071.
- 11) 松井健一，山本章生，橘秀文：鉄と鋼，74 (1988) 9，1817.
- 12) 加藤朋也，中田武男，大杉正洋，伊勢居良仁：CAMP-ISIJ，24 (2011)，888，CD-ROM.
- 13) 太田武，加藤朋也，中田武男，大杉正洋，渡部敦，伊勢居良仁：CAMP-ISIJ，25 (2012)，352，CD-ROM.
- 14) 野田一生：計測技術，(1998) 11，17.

(2018年4月24日受付)