

高温対象物の画像計測

Image Measurement of High Temperature Objects

今野 雄介*
Yusuke KONNO

伊勢居 良仁
Yoshito ISEI

杉浦 雅人
Masato SUGIURA

抄 録

画像計測は非接触測定であることから、製鉄プロセスの特徴である高温かつ高速で移動する対象に適した計測手段である。対象自体が熱放射を発している高温物体の画像計測は、熱画像を撮像するパッシブ計測と、熱放射を照明に対する外乱光と見なすアクティブ計測の二つに大別される。これらの画像計測の事例として、高炉レースウェイ内部の燃焼場の定量化手法、高炉出銑流の複合計測、および熱間圧延プロセスの蛇行計測、形状計測を紹介した。

Abstract

Image measurement is suitable for high-temperature objects moving at high speed in steel-making processes because it enables non-contact measurement. The image measurement of the heated objects is classified into two types. One is passive measurement which takes a thermal image. The other is active measurement in which thermal radiation behaves as disturbance light. As the example cases of these measurement technologies, a quantification method of a combustion field inside a blast furnace raceway, multiple sensing of molten iron stream tapped from a blast furnace, and meandering detection and shape measurement implemented at a hot rolling process are described in this paper.

1. 緒 言

一貫製鉄所では、はじめに高炉で鉄鉱石が2000℃を上回る温度で還元され、1500℃の溶融した銑鉄が製造される。次の製鋼工程では、転炉に装入された溶銑に酸素を吹き込み精錬処理が行われ、溶鉄の温度は短時間で1500℃から1700℃に上昇する。精錬された溶鋼は、連続铸造により凝固され、鋼材スラブが製造される。熱間圧延工程では、1200℃に加熱された厚み200mm～300mmの鋼材スラブが搬送ラインを走行しながら圧延ロールで数mmの薄い鋼帯に延伸される。最後の圧延ロールを抜けた鋼帯の速度は最大25m/sに達していて、この速度で急冷して金属組織を作り込む。このようなダイナミックな製造プロセスにおいて計測はきわめて重要な要素技術であるが、設備が巨大でなおかつ処理される材料の多くが高温という測定状況は、他産業にはない鉄鋼業の特徴であろう。

本稿では、鉄鋼プロセスの高温物体を対象とした計測に焦点を絞り、新日鉄住金(株)が社内の製造プロセス向けに研究開発した画像計測の事例として、高炉レースウェイ内

部の2000℃の燃焼場の状態の定量化¹⁾、高炉から流出する1500℃の溶銑・スラグ混合流体の温度や流量などの複合的な計測^{2,4)}、熱間圧延ラインの1000℃の鋼材の蛇行計測と形状計測^{5,6)}を解説する。

2. 赤熱している高温対象の光学計測

熱放射をとまなう対象を光学的に計測するためのアプローチについて、黒体放射理論を参照しながら整理する。プランクの黒体放射則によれば、物体はその温度に応じた熱放射を発している。黒体分光放射輝度を波長の関数として、温度をパラメータとしてプロットすると図1のようになる。物体を700℃程度まで加熱すると赤色の放射光が人の目に明確に見えるようになるが、この温度域では放射輝度の主成分は赤外線である。熱放射は温度に応じて放射輝度が増加するとともに、放射のピークを示す波長が短波長側にシフトする。1000℃になると可視光の放射は700℃に比較して10倍以上に急増するので、照明を投射するアクティブな画像計測では放射光が外乱となる。このため照明に用いる光源の種類やカメラが観測する波長を適切に設計

* プロセス研究所 計測・制御研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

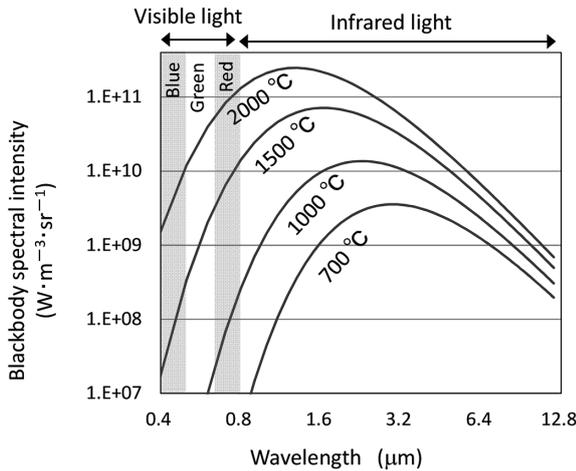


図1 黒体放射の分光放射輝度
Spectral intensity of blackbody radiation

することが求められる。1000℃付近であれば可視域の放射成分はほぼ赤色と見なせるので、カメラに赤色から近赤外の光線を遮蔽する光学フィルタを配置して、青色光の照明を使うのが画像計測の一般的なアプローチである。

また、熱放射は観測光の外乱になるのみではなく、鉄鋼業のように大量の材料を扱う高温プロセスでは、放射熱に曝される設備周辺の温度も高くなるので、現場に設置する計測機器の防熱対策も重要になる。さらに高温の1500℃以上の温度になると可視域の放射は強烈になり、その光量に負けない輝度の照明の選択肢は少なくなる。一方、赤熱している高温物体であれば、可視域に分光感度を有するCCDカメラやCMOSカメラを使って熱画像を得ることができる。常温から中温域の対象を赤外カメラで撮像する熱画像観察と比較すると、可視光のカメラは高速露光、高フレームレートといった撮像制御が容易に行え、解像度も高い。したがって、高温物体の輝度分布(温度などに応じて生じる輝度差)に得たい情報があれば、可視光カメラを用いたパッシブな画像計測が有用である。

3. 高炉を対象とした熱画像計測

一貫製鉄所のシンボリックな存在である高炉は、炉頂から鉄鉱石を焼き固めた焼結鉱と石炭を乾留したコークスを装入し、炉体下部の羽口から熱風を吹き込み燃焼させ、鉄鉱石中の酸化鉄を還元させて溶融した溶銑を製造するプロセスである。内容積が5000m³を超える大型高炉では1日に10000t以上の溶銑が生産され製鋼過程を経て、薄板、厚板、形鋼、鋼管といった様々な製品の加工工程に供給される。高炉の内部は高温、高压であり、特に、鉄の融点を上回る高温場になる高炉下部は、炉内に検出端を持ち込むことが極めて困難である。直接計測することができない高炉内部の状態をより詳しく知ることは、高炉を安定して操業するための普遍的なニーズと言える。新日鐵住金では、これまで計測情報が乏しかった高炉下部の羽口から湯溜まり

の状態を検知するための新たな計測技術の創出に取り組んできた。

3.1 高炉羽口内燃焼場の定量化技術

高炉羽口の先端部には、熱風吹き込みにより生じたレースウェイと呼ばれる空間があり、反応性向上のため羽口内のPC(微粉炭)ランスから微粉炭吹き込みが行われる。これらは高炉操業の安定性に影響するため、高炉羽口には覗き穴が設けられており、オペレータの目視による経験的な炉況の判定が行われてきた。近年、目視の代わりにカメラを各羽口に設置することで運転室にて炉況を遠隔把握できるシステムが鉄鋼各社に導入されている¹⁷⁾。羽口は一つの高炉に40本程度あるため、カメラ画像の目視観察では時間的な変化や炉周方向の空間的な変化を記録し定量化することが困難である。そこで空間方向に2次元、時間方向に1次元の情報量がある羽口カメラの動画データの特徴を抽出する画像処理方法の開発に取り組んだり。これにより、過去の操業との比較や類似事例の検索が容易となる。

3.1.1 羽口画像とその特徴的状態

図2に代表的な羽口カメラ画像のパターンを示す。a)に示す正常状態では、PCランスから噴出する微粉炭の流れは安定しており、炉内の2000℃に達する高温場からの放射輝度が一様に観察されている。b)では微粉炭の流れが不安定になり、時間的にも空間的にも流れの方向が変動する。これは、レースウェイ形状に何らかの変化が生じてガス流れに乱れが発生していると推測される。c)では画面上部より暗い、すなわち温度の低い未溶融の鉱石、コークスが多数落下している。この状態は、安定したレースウェイが形成されていないことを意味する。

3.1.2 特徴量化的方法

画像データが(横W×縦H)画素である場合、信号処理上はW×H次元の高次元ベクトルデータとして扱われる。画像データのような高次元データを低次元化する一般的な方法としては、主成分分析や独立成分分析、スパースモデリングなどが用いられているが、ここでは羽口画像の特徴に着目した段階的な低次元化を試みた。全体フローを図3に示す。

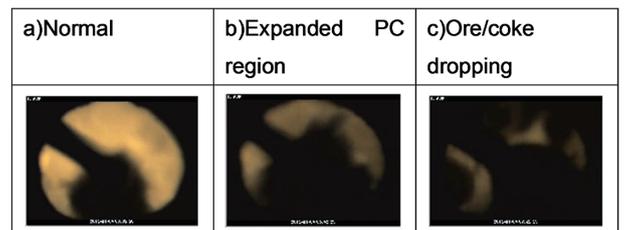


図2 代表的な羽口カメラ画像
Examples of tuyere images

最初に羽口ノズル先端形状の楕円フィッティングを行う。羽口カメラ画像 $I(x,y,t)$ は熱風の温度揺らぎのために絶えずその輪郭が動いているため、外周部の輝度を正確に捉えるためには毎フレーム単位で輪郭のトラッキングが必要となる。毎フレーム輪郭の楕円近似を行い、得られた中心位置、長径、短径の楕円パラメータから、中心と半径が一定の正規化円に羽口画像が収まるように affine 変換を行い正

規化画像 $I_n(x,y,t)$ を得る。

PC ランスの挿入位置が羽口により異なること、また燃焼異常状態は中心から外側に広がるため、半径方向の輝度変化に関する情報のみを抽出し、情報を圧縮することとした。具体的には正規化画像 I_n に極座標変換を施し、 $I_p(r,\theta,t)$ を得る。 I_p について 2 値化処理を行い、2 値画像 $I_{bin}(r,\theta,t)$ の θ 方向投影 $P(r,t) = \sum_{\theta} I_{bin}(r,\theta,t)$ を求める。

図 2 に対応する投影値 $P(r,t)$ を図 4 に示す。もともとの動画 $I(x,y,t)$ では時間的変化を俯瞰することは難しいが、次元を一つ圧縮することで 2 次元マップとして時間的変化を容易に追えるようになる。正常状態 a) では、半径方向、時間方向に一樣な状態が続いているが、PC 燃焼異常 b) では中心部の輝度が低下した後、徐々に回復する様子が捉えられており、鉍石落下 c) では画面が一様に暗くなる様子が把握できる。

$P(r,t)$ から抽出する 3 状態を区別する特徴量として $P(r,t)$ の r に関する平均値 $H_1(t)$ とピーク位置 $H_2(t)$ を最終的な特徴量として採用した。

$$H_1(t) = \frac{1}{b-a} \sum_{r=a}^b P(r,t) \quad (1)$$

$$H_2(t) = \arg \max_r P(r,t) \quad (2)$$

3.1.3 提案特徴量と羽口カメラ画像の比較

図 4 に示した $P(r,t)$ から特徴量 $H_1(t)$, $H_2(t)$ を計算した結果を図 5 に示す。正常状態 a) ではどちらの特徴量も高い値を示すが、PC 燃焼異常 b) では $H_1(t)$ のみ大きく低下する。また鉍石落下 c) では $H_1(t)$, $H_2(t)$ の両者が大きく低下する。この様子を H_1 - H_2 平面にプロットすると、図 6 に示すように、正常領域、PC 燃焼異常、鉍石落下がそれぞれ

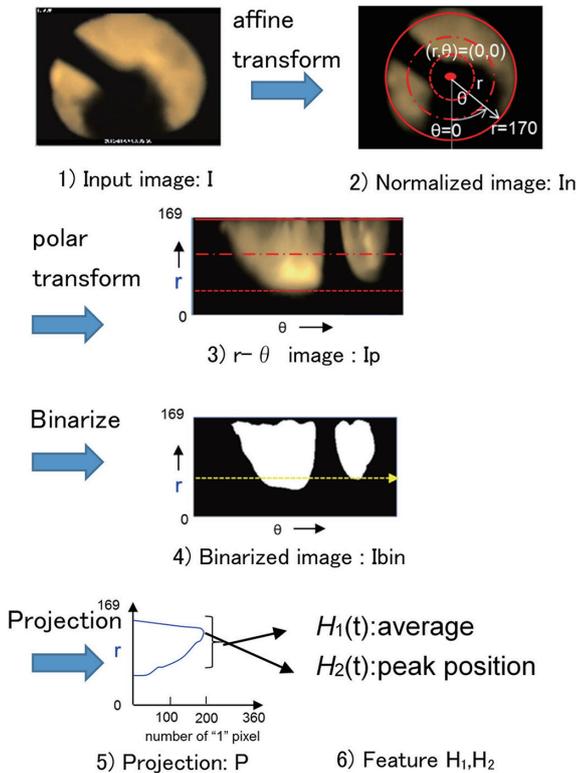


図 3 特徴量抽出フロー
Feature extraction diagram

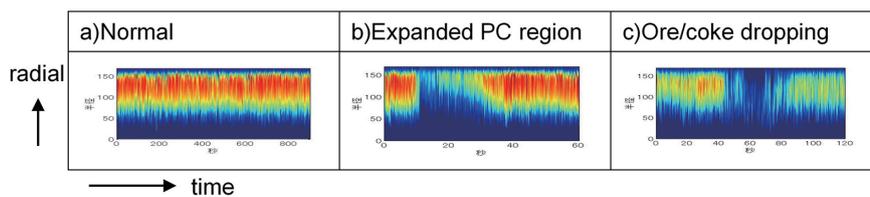


図 4 θ 方向投影値 $P(r,t)$ の時間変化
Time series of projection $P(r,t)$

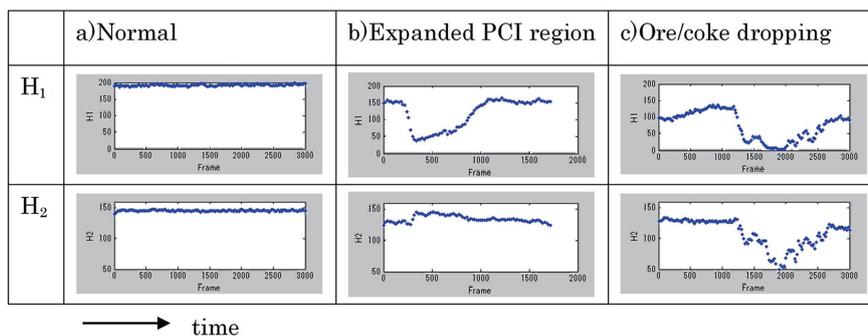


図 5 抽出した特徴量 $H_1(t)$, $H_2(t)$ の時間変化
Time series of extracted feature $H_1(t)$, $H_2(t)$

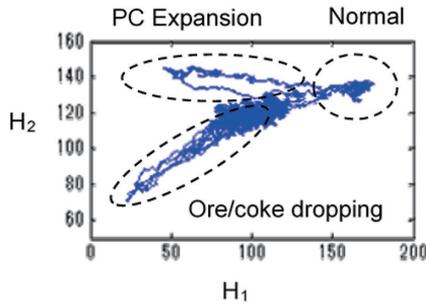


図6 H_1 - H_2 平面での各状態の軌跡
Trace of feature H_1 - H_2 plane

れ別の領域に対応することが分かる。

このように羽口カメラ画像の特徴に着目した低次元化を行うことで、高次元データである動画データをわずか2次元に縮約することができた。特徴量平面での距離を尺度として用いることで過去の操業との比較や履歴の検索が容易に行えるようになる。今後は、単一の羽口の時系列変化のみでなく、提案特徴量の羽口炉周方向の分布を調査し、マクロな高炉状態との関係を明らかにしていく。

3.2 高炉出鉄流モニタリング

高炉の炉床には溶鉄と副生成物の溶融スラグが滴下した湯溜まりがある。スラグは鉄鉱石に含まれる酸化物 (CaO, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO など) の混合物である。出鉄口の耐火物をドリルで開孔するとスラグを含む溶鉄が流出する。この高温液体を出鉄流と呼ぶ。出鉄作業は通常1回3時間程度であり、複数ある出鉄口を切り替えながら溶鉄を排出する。出鉄は直接観察することができない湯溜まりの高温場の状態を反映していると考えられるので、出鉄流の温度、スラグ混合比率、流出速度などを熱画像から求める画像計測技術を開発した。

3.2.1 出鉄流の熱画像

出鉄口から流出して樋に落下するまでの出鉄流を像流れが生じない短時間露光で撮像すると、図7のような熱画像が得られる。出鉄流の温度は1400℃から1600℃であり、高輝度で発光している。出鉄流上では溶鉄とスラグが斑状に分離している。やや暗い領域が溶鉄であり、それに比べて明るい領域がスラグである。出鉄流は乱流であり、スラグの斑模様は移動中に時々刻々と変化する。

同じ炉内に滞留している溶鉄とスラグは類似の温度であるが、放射率が異なるため放射輝度に違いが生じる。出鉄流の熱放射の光学モデルを図8に示す。金属である溶鉄は不透明であり、その放射輝度 L_M は表面温度と放射率の関数である。すなわち、

$$L_M = \epsilon_M L_b(T) \quad (3)$$

ここで、 $L_b(T)$ は温度 T における黒体放射輝度、また ϵ_M は溶鉄の放射率である。

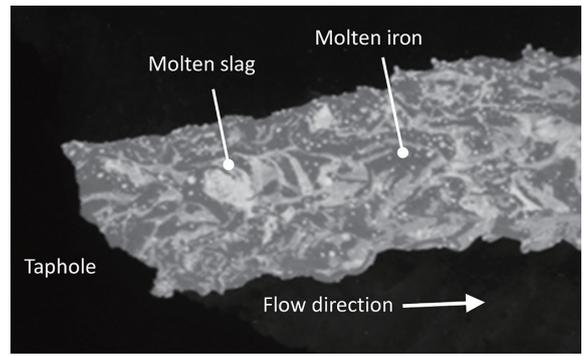


図7 出鉄流の熱画像の一例
Example of thermal image of molten iron stream

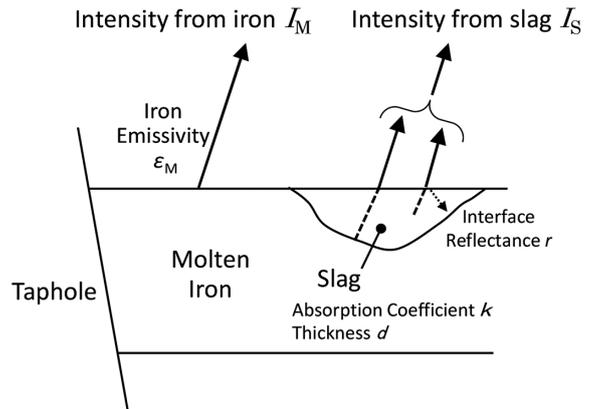


図8 溶鉄、スラグの熱放射モデル
Thermal radiation model of molten slag/iron

図7を注意深く見ると、溶鉄領域の輝度がほぼ一定値であるのに対して、スラグは場所によって輝度が異なる。これはスラグが光学的に半透明であるため、厚みに応じて放射率が変化することによる。スラグの放射輝度 L_S は(4)式のような²⁾。(4)式の右辺第1項は溶鉄の放射輝度がスラグを透過してくる成分であり、第2項はスラグ自体からの放射輝度である。これらの放射輝度はいずれもスラグの厚み d の関数である。溶鉄とスラグの放射をまとめると(5)式になる。

$$L_S = (1-r)e^{-kd} \cdot \epsilon_M + (1-r) \cdot (1-e^{-kd}) \cdot L_b(T) \quad (4)$$

$$= (1-r) \cdot (e^{-kd} \cdot \epsilon_M + 1 - e^{-kd}) \cdot L_b(T) \quad (5)$$

ここで、 r はスラグと大気との境界での界面反射率である。

3.2.2 溶鉄とスラグの温度測定

溶鉄、スラグの温度は、画像のヒストグラム処理で代表輝度を求め、放射测温法の原理で測定する。図9に出鉄流の熱画像の輝度ヒストグラムの例を示す。ヒストグラム形状は温度とスラグ比率により変化する。溶鉄の輝度分布には常に明確なピーク(図中のP)が存在するので、これを溶鉄の代表輝度として、予め測定した画像輝度と温度との校正データを参照して溶鉄温度を計算する。このような画像処理を繰り返すことで連続测温が実現される。

スラグは厚みに応じて放射輝度が増えるため、ヒスト

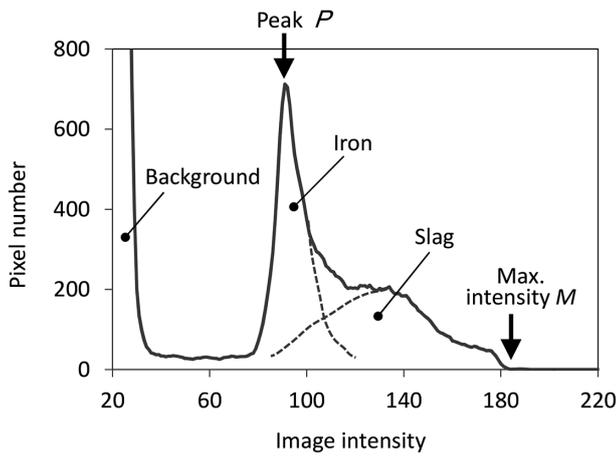


図9 熱画像の輝度ヒストグラム
Histogram of thermal image

グラム上の輝度分布がブロードでピークが不明瞭である。このため溶銑と同じ方法が使えない。そこで、熱画像上の最高輝度(図中のM)に着目する。比較的大きなスラグ模様が最高輝度Mを発している部位であり、ここではスラグ層が厚く放射率が高位で安定していると推測される。スラグの光学定数から計算すると、溶銑が透けなくなる厚みのスラグは放射率が0.9以上である。

3.2.3 スラグ比率, 流出速度, 出銑流径の測定

図9中に破線で示すように、溶銑とスラグの輝度分布は常に一部が重なっている。したがって、単純な2値化処理で両者を分離することができない。ヒストグラム上で溶銑とスラグの輝度分布を分離するには、例えば、溶銑とスラグそれぞれの分布にガウス関数をフィッティングして、両者のガウス分布の面積比を溶銑・スラグ比率とする³⁾。

出銑流は5m/s前後のスピードで流出する乱流であるが、毎秒200フレーム程度で撮像すると、溶銑とスラグの様子が徐々に変形しながら移動していく様子が観察できる。このような連写画像を撮像して、出銑流像の移動距離を相関演算処理で追跡して出銑流速を求めることができる⁴⁾。

出銑流は常に変形する表面波をともなっている。図10に示すように、短時間内に撮像した複数の熱画像を用意して、まず2値化処理で出銑流の像を取り出し、次に、隣り合う2値化画像の差分処理により波の形状に変化があった部分のみを抽出する。さらに差分画像を重ね合わせた合成画像を得る。合成画像で波が生じる領域の内側を内径、外側を外径として求める。出銑量を計算する際に必要になる見かけの出銑流径は、内径と外径の間にあるので、その位置は溶銑の秤量値と一致するように実験的に定める。スラグ比率、流速そして見かけの出銑流径の測定値から溶銑、スラグそれぞれの流出速度を連続的に知ることができる。

3.2.4 オンライン試験結果

図11は1回の出銑を観測した結果の例である。現場操

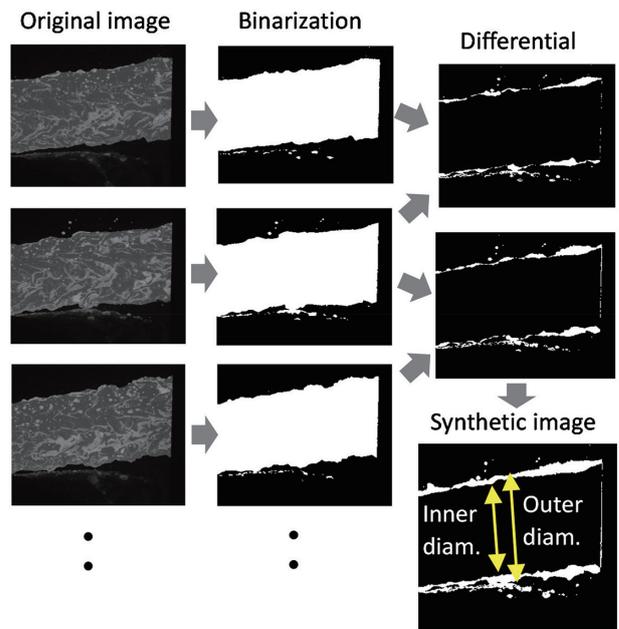


図10 出銑流径を測定する画像処理
Image processing of diameter measurement

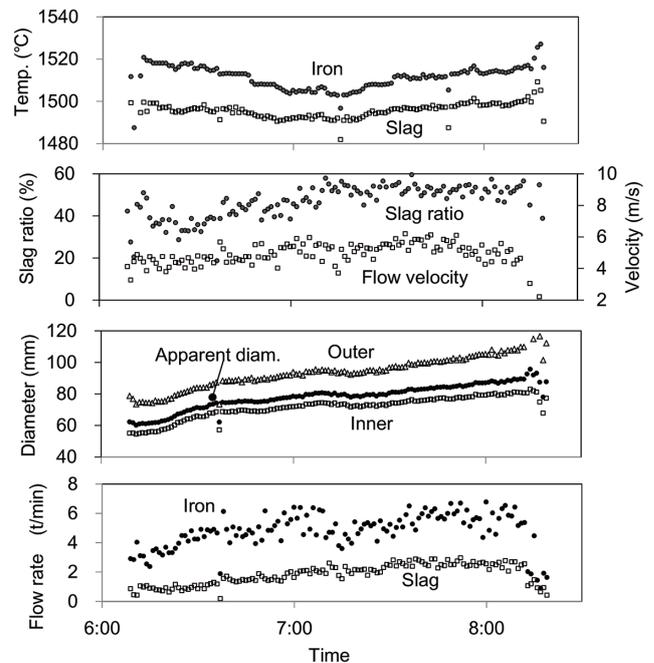


図11 オンライン試験のデータ例
Examples of field experiment data

業では1時間に1回の使い捨て熱電対による溶銑温度測定と溶銑流出量の秤量しか行われていない。本画像計測手法では、溶銑とスラグそれぞれの温度や流出量を連続的に知ることができる。これまでの試験では、従来明らかでなかった不規則な温度変動、溶銑温度とスラグ温度の差異、出銑口間でのスラグ比率の偏りなどが観察されている。高炉内の湯溜まりに何らかの非定常性があると推測されるので、現象解明が期待される。

4. 薄板熱間圧延を対象とした画像計測

薄板の熱間圧延プロセスは、熱延鋼板を製造するための設備であり、加熱炉、粗圧延機、仕上圧延機、冷却帯、コイラーから構成されている。加熱炉で 1200℃ に加熱した鋼材スラブを粗圧延機により粗バーに圧延したのち、6~7 台の圧延機にて構成された仕上圧延機により目標とする厚みに圧延し、冷却した後コイラーにより巻き取る。今日の薄板の熱間圧延においては、200mm~300mm の厚みの鋼材がわずかに数分で 1.2mm~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/s、板厚の精度は数十 μm であり、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。熱間圧延の温度は 800℃~1000℃ であり、溶鉄を扱う高炉に比べると低いが、製品に近く、寸法と金属組織を作り込むために、使用する計測器には高精度と高応答性が要求される。

図 1 の黒体分光放射輝度を見ると、800℃~1000℃ の温度域における物体からの放射光は、主に赤色 (0.6 μm) から赤外にわたって放出されている。一方、画像計測に汎用的に利用される CCD や CMOS カメラの感度波長は 0.4 μm ~1.1 μm である。そのため、熱間圧延における画像計測としては、高温の放射光 (0.6 μm ~1.1 μm) を直接撮像により検出する方法、放射光の弱い赤色より短波長 (0.4 μm ~0.6 μm) の照明を投射してその反射光を撮像する方法がある。

近年、2次元撮像素子の高速化と高分解能化が進展し、画像処理に使用するコンピュータの処理速度も年々向上しており、熱間圧延においても画像処理の適用範囲が広がっている。2次元画像を用いることは、測定安定性の向上、測定精度向上に有効である。

4.1 スタンド間蛇行計

仕上圧延において生産性を確保するために、安定した通板を行う必要がある。板厚が薄くなると、圧延機の僅かなレベリング (圧延ロールの平行度) 設定誤差により、圧延される鋼板の最尾端が圧延機間 (スタンド間) で異常蛇行して、サイドガイドに干渉し、折れて重なって圧延される絞り込みと呼ばれるトラブルが発生することがある。この絞り込みが発生すると圧延ロールが傷つくため、圧延ロールの交換が必要となり生産性が低下する。そこで、板尾端の蛇行挙動をスタンド間にて高応答で測定し、圧延機のレベリングをフィードバック制御し、絞り込みを抑制する技術を開発した。

従来、熱間圧延において、圧延される鋼板の幅や蛇行の測定には、高分解能で応答性に優れたラインセンサによる鋼板エッジ位置検出が用いられてきた。しかしながら、ラインセンサでは圧延方向 1 点の観測なので、観測位置が水滴や水蒸気、ヒューム等の外乱により蔽われるとエッジ位

置を測定することができない。特に、間隔の狭い仕上圧延機のスタンド間ではこれらの外乱が発生しやすく、安定して蛇行量を測定することが容易でなかった。2次元カメラにより、板を広範囲に撮像して画像処理によりエッジ位置を測定することはこの対策として効果的である。

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 12 に示す。この蛇行計は、高フレームレートの高速 2次元カメラにより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測定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。仕上圧延機のスタンド間では、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 13 に示すエッジ検出方法を考案した。まず、各走査線上的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、次に、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。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。鋼板に張力が付与されている時

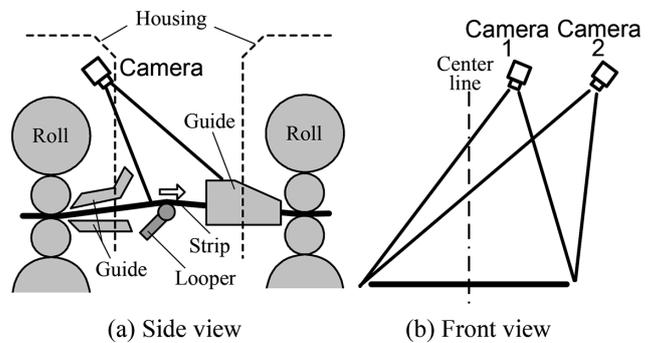


図 12 スタンド間蛇行計の構成
Layout of inter-stand strip position sensor

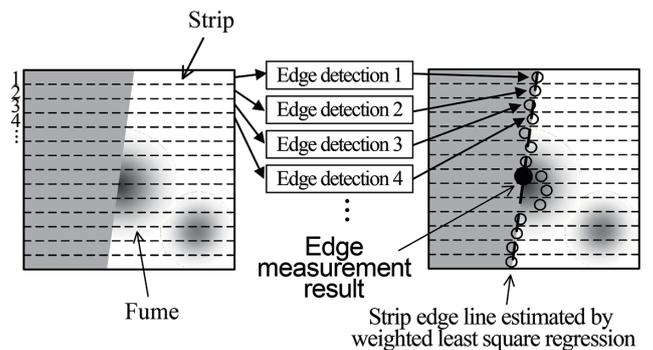


図 13 2次元カメラを用いたエッジ検出方法
Edge measurement method

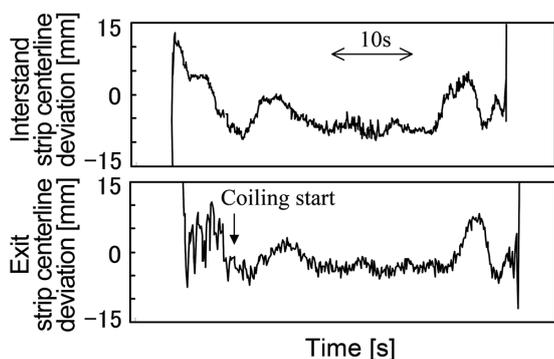


図 14 スタンド間蛇行計の測定例
Example of strip centerline measurement

の蛇行は、鋼板自体の曲りが支配的であるため、スタンド間と仕上出側で同じ挙動を示す。最終スタンド間に設置された蛇行計と既設の仕上出側のラインセンサ方式幅計の測定値を比較した結果を図 14 に示す。ダウンコイラーに鋼板の先端が到達し張力が付与された後は、両測定値はほぼ一致した値を示しており、良好に測定できている。

4.2 仕上出側平坦度計

近年、薄板の熱間圧延においては、高張力鋼板の安定製造と高精度な作り込みが重要な課題である。高張力鋼板の圧延時は圧延荷重が高いため、圧延ロールのたわみが大きくなり、幅方向の伸び率の不均一が生じやすい。板幅中央の伸び率が大きいと中伸び、エッジ部の伸び率が大きいと耳波と呼ばれる形状不良が生じる。これら形状不良は、通板トラブルや冷却帯での冷却温度むらの原因となる。そこで、仕上圧延機出側において鋼板の形状を測定し、幅方向の伸び率分布を算出して、圧延機の形状制御アクチュエータにフィードバックする技術を開発した。

従来、圧延機出側の形状測定には、圧延方向 2 か所に設置したレーザ距離計により表面角度を時々刻々と測定して、表面長さを算出するツインビーム距離計方式^{8,9)}が一般的である。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、圧延機を固定端として定在化し、波が静止して観察される場合に、測定精度が低下する問題があった。

今日では照明分野での省エネルギー推進の手段として、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。このようなパワー 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を開発した^{6,10)}。高輝度な青色 LED を用い、青色のみを

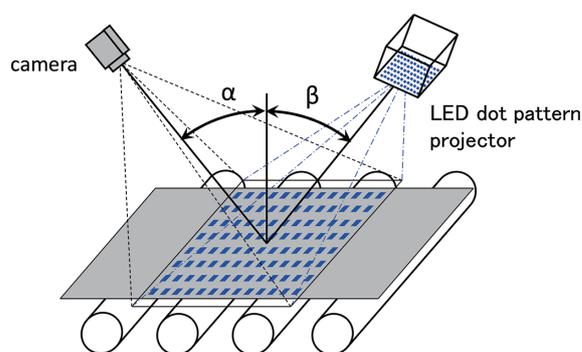


図 15 LED ドットパターン投影方式平坦度計の装置構成
Configuration of shape meter using LED dot pattern projection method

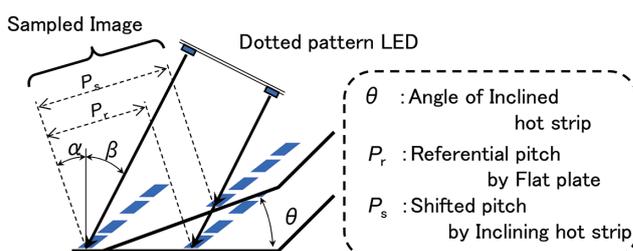


図 16 形状測定原理
Principle of shape measurement method

透過する光学フィルタを通して撮像することで、高温の鋼材表面に投影したパターンを明瞭に観察できる。図 15 に装置構成、図 16 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 、鋼板傾斜部のピッチ P_s とすると、表面角度 θ は (6) 式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(P_s/P_r) - 1}{\tan \alpha + (P_s/P_r) \tan \beta} \right) \quad (6)$$

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。図 17 に測定結果例を示す。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と光源の長寿命化を実現している。

5. 結 言

本稿では高炉プロセスと熱間圧延プロセスにおける画像計測を紹介した。これらの事例は、いずれも高温の発光体が測定対象といういわば特殊な画像計測であるが、熱放射

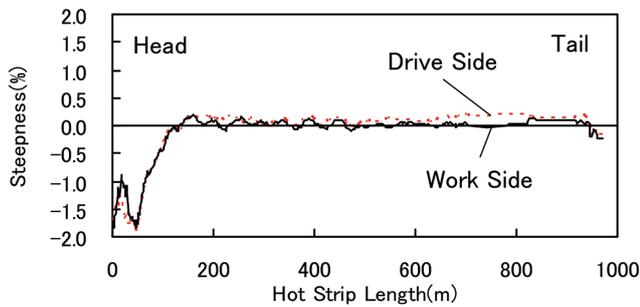


図 17 仕上出側平坦度計の測定例
Example of online steepness measurement

現象を理解して撮像方法を工夫することで高性能なオンライン計測を実現した。計測技術を自社開発することで、現場に設置するセンサの防熱・防塵対策といった環境対策技術についても知見やノウハウを蓄積している。環境が悪い製造ラインほど検出端が不足しており、プロセス現象解明や制御ループの入力として新しい計測技術に対する期待が

高い。グローバルな競争や地球環境負荷への配慮など鉄鋼製造現場を取り巻く環境は厳しさを増していることから、生産と品質の改善に資する鉄鋼プロセス特有の悪環境を克服した計測技術の研究開発を今後も続ける所存である。

参考文献

- 1) 今野雄介 ほか：CAMP-ISIJ. 27, 326 (2014)
- 2) Sugiura, M. et al.: Proceedings of SICE Annual Conference 2011. 472 (2011)
- 3) Sugiura, M. et al.: Int. J. Thermophysics. 35, 1320 (2014)
- 4) 杉浦雅人 ほか：第 57 回自動制御連合講演会. 367 (2014)
- 5) 鷺北芳郎 ほか：鉄と鋼. 95 (1), 43 (2009)
- 6) 加藤朋也 ほか：CAMP-ISIJ. 24, 888 (2011)
- 7) 山平尚史 ほか：CAMP-ISIJ. 28, 203 (2015)
- 8) 山根孝夫 ほか：CAMP-ISIJ. 2, 1540 (1989)
- 9) 豊田利夫 ほか：鉄と鋼. 70 (9), 1071 (1984)
- 10) 太田武 ほか：CAMP-ISIJ. 25, 352 (2012)



今野雄介 Yusuke KONNO
プロセス研究所 計測・制御研究部
上席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



杉浦雅人 Masato SUGIURA
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員 博士(理工学)



伊勢居良仁 Yoshito ISEI
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員