



入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術－3

製鉄における過酷な環境下での計測技術

—コークス炉炭化室診断の事例—

Instrumentation Technology in Harsh Environment of Iron-making Process

— A Case of Diagnosis of Coking Chambers —

杉浦雅人

Masato Sugiura

新日鐵住金(株) 技術開発本部
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員

1 はじめに

鉄は世の中で広く使われている比較的安価な素材であり、その生産はおのずとマスマスプロダクションとなる。鉄鋼プロセスは、鉄鉱石を高炉で還元して銑鉄を取り出す製銑工程、溶融した銑鉄を製錬して鋼に変える製鋼工程、各種の鋼板や形鋼の形を作る圧延工程、めっきなどの表面処理を行う工程などの多岐にわたる。多くの生産設備では材料の加熱・冷却が繰り返され、そこには物理的・化学的な現象が混在するため、計測は欠くことができない要素技術である。

鉄鋼業の計測技術は、1980年代頃から本格化した半導体技術の急速な発展を享受して、小型化・高精度化された撮像装置、レーザ計測器、放射温度計などが生産現場に次々と導入された。ところが、センシング情報と計算機を統合したプロセス制御が有効に機能したのは、鉄鋼プロセスの中でも現象のモデリングが比較的容易な圧延工程や表面処理工程が主体であった。一方、製銑工程の高炉、焼結あるいはコークス炉は、いずれも赤熱温度の高温の固体粒子・流体を扱う巨大な設備であり、プロセス内部に検出端を挿入して処理中の材料を直接観察することが難しい。生産設備の周囲であっても、高温雰囲気や粉塵などにより電子回路を備えた測定器には極めて条件が悪い環境である。

このような理由から、製鉄分野の計測には未開拓の領域が多く残されている。今回の入門講座は、鉄鋼業の計測技術を製造工程ごとに解説するシリーズであるが、体系化されているとはいえない製鉄分野の計測の概要を語ろうとすると、特殊な計測手法をいくつか羅列するだけになり、読者に有益な内容にならないことを危惧する。そこで本稿では、筆者らが取り組んだコークス炉診断技術の研究開発事例に的を絞り、悪環境下で光学計測を実現する上での具体的な技術課題

とそれらを解決する着想や工夫、さらには得られた計測情報が設備診断や操業にどのように活用されるのかを紹介する。

2 コークス炉の構造と計測対象

コークスは炭素を主成分とした多孔質の固体であり、高炉で鉄鉱石を溶融させて還元する際の熱源および還元材として使われる。今日の日本国内の製鉄技術では、銑鉄1tを高炉で製造する際に約350 kgのコークスを消費する。このため一貫製鉄所にはコークス炉が併設されていて、日々大量のコークスが生産されて高炉に供給されている。

コークス炉の外観の写真を図1に示す。燃料ガスを供給する設備の上に高さ約6 mの炭化室が多数並べて配置された巨大な煉瓦造りの工業炉である。炉の内部は、図2にあるように、石炭を入れる炭化室とガスを焚く燃焼室が交互に配置さ

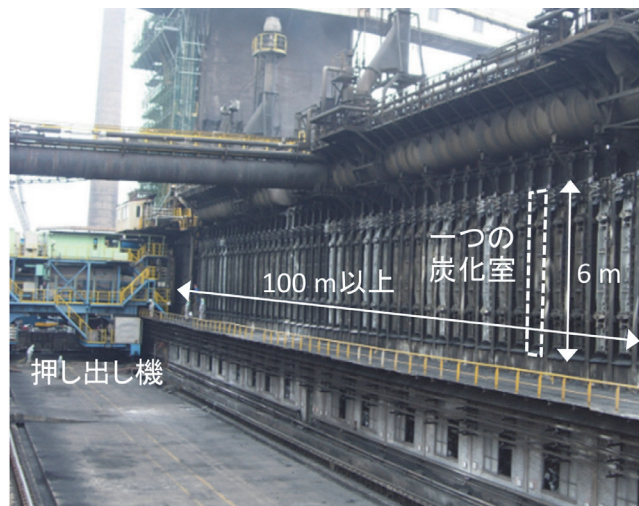


図1 コークス炉の外観

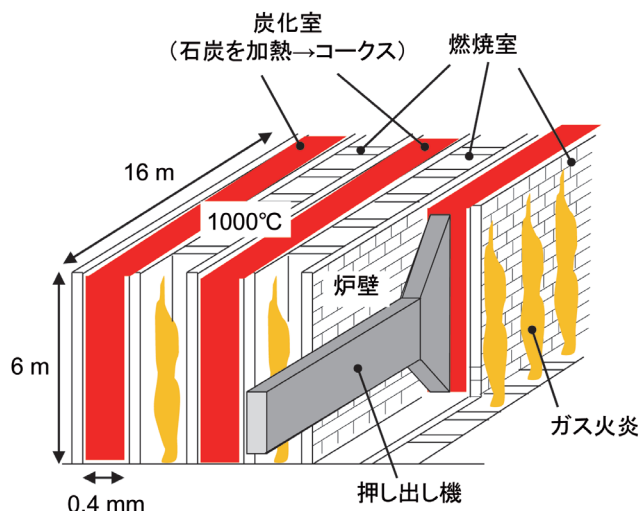


図2 コークス炉の構造の模式図

れた構造になっている。一つの炭化室は炉長が16 mあるのに対して幅は0.4 mしかない。炭化室の石炭は両側の燃焼室から煉瓦の炉壁を介して加熱されるため、このような幅が狭い構造をしている。1000℃に維持された炭化室の上部の装入口から石炭を入れ、無酸素状態でおおよそ20時間加熱するとコークスができる。製造したコークスは、炭化室の両端にある炉蓋を開けて、押し出し機で水平方向に取り出される。

長年稼働しているコークス炉では、炭化室の煉瓦壁面が部分的に減肉した炉壁陥没や、加熱中に揮発したガスに含まれる炭素が壁の一部に固着して張り出すカーボン付着が生じる。これらによる炉壁の凹凸はコークスの押し出し負荷(押し出しに必要な力)を上昇させる。コークス炉は30年以上使われる設備であるが、長年稼働しているコークス炉の多くでは、押し出しができなくなる操業トラブルが起こる。炭化室の壁面状態を把握して補修する必要があるが、コークス炉の保守の本質的な難しさは、炉体を構成する珪石煉瓦が熱衝撃に弱いため、炉内を常時1000℃に維持しておかなければならないことである。熱延ラインのスラブ加熱炉のように、バーナを止めて炉内を常温まで下げて内部に作業者が入って補修することができない。コークス炉では、熟練した作業者が炉内を覗いて煉瓦壁面の凹凸損傷部位を見つけ、炉外からパイプを伸ばして損傷部位に溶射材を吹き付ける人手作業の保守が行われてきた。しかし目視による診断には限界があり、炉前の作業は危険な重筋労働である。炉内の診断に関しては、断熱構造の容器に撮像装置を搭載した炉壁観察装置¹⁾や、炉壁の特定高さの炉幅を測定する装置²⁾を炉内に挿入する方法が開発されているが、これらは炉内を部分的に観察することしかできず、炉壁の全体的な損傷状況を正確に把握することはできなかった。

このような背景から、高温炉内の診断を機械化し、大面積の炉壁の損傷を詳細に観察することができる計測装置を開発した。

3 炭化室炉壁の撮像と凹凸計測

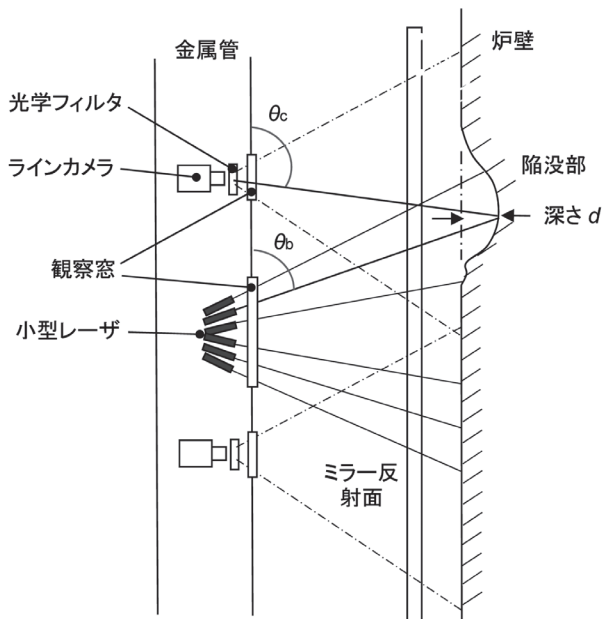
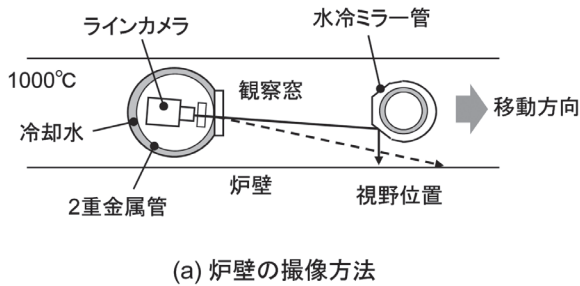
3.1 耐熱診断プローブの自社開発

「1000℃を超える炭化室内で煉瓦壁面の損傷を直接計測したい」という製鉄分野の強い要望に対して技術調査が開始されると、新日鐵住金の計測技術者からラインカメラ(光学素子を一行に配置して移動物体を撮像する特殊なカメラ)を用いて炉壁を撮像する方法が提案された。そして、このアイデアを基本構造とした装置を自社開発する方針が決まった。大面積の壁面がわずか40 cmの幅で向かい合う炉内では、通常のエリアカメラ(2次元の画像を得る一般的なカメラ)では壁までの距離がとれず、炉壁全体を高精細に撮像することが困難である。ラインカメラを使う撮像方法は、カメラを炉壁に沿って移動させて、いわば巨大なスキャナのような原理で炉壁を撮像する。当初は本当に撮像することが可能なのか誰もが半信半疑だったので、カメラに簡易的な防熱対策を施して炉に少しだけ入れる試験を実施した。この結果、炉壁の熱画像が鮮明に得られることが確かめられた。

その後数年かけて撮像システムの試作や評価試験を繰り返して、大がかりな水冷式の診断プローブ³⁾が完成した。診断プローブは専用に製作された台車に乗せられていて、コークス炉前のレールを走行して診断対象の炭化室に移動する。診断プローブの先端にはラインカメラと凹凸測定用のレーザ光源が搭載されている。プローブには冷却水が巡らされていて、なおかつ内部空間にはパージエアが供給されている。断熱構造の主要部分は機械エンジニアリング会社で設計されたが、冷却水と冷却エアのみでは不十分であった。すなわち、観察窓から入射する強烈な放射熱でカメラやレーザが加熱されると、これらの温度が耐用上限を超える問題があった。本を探しても書いていないことなので困ったが、赤外線反射膜を加工した耐熱ガラスを複数枚組み合わせた熱線遮蔽構造を考案して解決した。トースタの窓ガラス(中でパンを焼いても意外と熱線は出ていない)がヒントになった。製鉄工程の現場に電子機器を持ち込むことは、熱から保護する機構を作るだけでもひと苦労であった。

3.2 光学システム

高温の炉壁は赤熱して発光しているので、可視光に感度があるカメラで熱画像を撮像することができる。図3(a)は診断プローブの水平断面を模式的に示している。診断プローブ内部に搭載したラインカメラの線状の視野を炉壁縦方向に

図3 診断プローブに搭載される光学システム³⁾

向け、診断プローブを1 mm前進させるごとに撮影したライン映像信号を計算機のメモリに入力して2次元画像を生成する。1台のラインカメラが1.5 mの高さを撮像して、6 mの炉高を4台のカメラでカバーする。カメラと炉壁との撮像距離を得るためには、図3 (a) 中の破線矢印のように、炉壁を鋭角に見ることになる。すると、診断プローブが炉幅方向に揺れたり蛇行した際、炉壁上の撮像位置はより増大されて変位するため、正確に1 mmピッチで撮像できず画像が歪む。これを避けるため、ミラーをカメラの視野前方に配置して、ミラーで撮像方向を折り曲げて炉壁を垂直に観察することを考えた。1000℃の雰囲気暴露しても鏡面性を損なわないミラーが必要になるこの方法は、一見突飛な発想であったが、内部を水冷して表面の高温酸化を防止した金属管のミラーを試したところ上手くいった。診断プローブの内部では、カメラが左右に旋回するモータ機構に取り付けられていて、往路と復路でそれぞれ左壁、右壁を切り換えて撮像する。画像の解像度は、水平方向1 mm、高さ方向約0.7 mmであり、炉壁片側の画像データが100 Mbyte程度のファイルサイ

ズになる。

診断プローブは炉壁の撮像と同時に炉壁の凹凸測定を行う。煉瓦壁面の凹凸損傷を把握するためには、高さ方向に煉瓦間隔（約130 mm）、炉長方向に40 mm間隔で面的に炉壁の凹凸を計測することが要求された。容易に考えられる炉壁凹凸の測定方法としては、炉壁までの距離を測る非接触距離計を診断プローブの高さ方向に並べて搭載する方法であろうが、診断プローブ内部にそのためのスペースはなかった。そこで、図3 (b) に示すように、ラインカメラの線状視野に斜め下もしくは斜め上から小型のレーザポインタの光線を等間隔で投射して、炉壁画像にレーザ投射像を映し出して凹凸計測を行う方式を考案した。小型の半導体レーザであれば多数を狭いスペースに設置できる。診断プローブが進行しながらレーザ光が投射された炉壁を撮像すると、画像上のレーザ投射像は水平方向の線となって現れる。光切断法と呼ばれる凹凸計測方法であるが、ラインカメラで光切断像を生成する方法は独自のアイデアであり、幅が狭い空間ゆえにラインカメラを使わざるを得ない状況によって誕生した。炉壁が平坦であれば画像上のレーザ線は直線であるが、炉壁に凹凸が存在するとその部位でレーザ線は上下に変位する。凹凸量とレーザ投射像の上下変位量との関係は撮像系の幾何学的条件から定まる。図3 (b) の陥没部では、レーザ光の出射角度を θ_b 、そのレーザ光と炉壁との交点を望むカメラの観察角度を θ_c 、とすると、炉壁陥没部の深さ d と画像上でレーザ投射像が変位する画素数 n との関係は (1) 式で表される。

$$d = \frac{n \times R}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_b\right) - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)} \quad \text{..... (1)}$$

ここで、 R は画像の高さ方向の画素サイズである。レーザごとに角度 θ_b 、 θ_c が異なるので、画像上でレーザ線の上下変位量を検出する画像処理と合わせて、専用のソフトウェアを製作した。

炉壁の熱画像（煉瓦の損傷状態を視覚的に把握）にレーザ光を重畳させて映し出すことで凹凸プロフィールを同時に得る方法は、操業の合間の短時間での炉内診断を可能にする。その反面、炉壁自発光とレーザ反射光の輝度をバランスさせることが課題となる。レーザ光が熱放射輝度より著しく弱ければ画像上のレーザ線は不鮮明になる。逆にレーザ光が明るすぎると、それに合わせてカメラの露光を調節して撮像された熱画像が暗くなり損傷部が明瞭に見えなくなる。そこで、ラインカメラが熱放射の受光量を抑制できるように、カメラのレンズにレーザの発信波長付近の光のみを透過する光学フィルタ（バンドパスフィルタ）を取り付けた。ラインカメラが観測する炉壁の放射輝度 L_w は、Planckの黒体放射則⁴⁾

に基づき次のように表される。

$$L_w = \varepsilon \cdot \Delta\lambda \cdot c_{1L} \cdot \lambda_c^{-5} \div \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_c T}\right) - 1 \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ε は壁面の放射率、 $\Delta\lambda$ は光学フィルタの透過幅、 λ_c は光学フィルタの中心透過波長、 c_{1L} は黒体放射の第1定数 ($c_{1L} = 1.191 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$)、 c_2 は黒体放射の第2定数 ($c_2 = 1.439 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{K}$) である。一方、炉壁に照射されたレーザー光は、その反射成分の一部がカメラに捉えられる。煉瓦表面は粗面なので完全拡散面であると仮定すると、レーザー反射光輝度 L_r は、

$$L_r = \frac{1-\varepsilon}{\pi} \cdot E \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 E は炉壁上のレーザー照度である。このようにして二つの輝度を見積もり、光学フィルタの透過幅、レーザーの波長や出力を適切に設計することで、炉壁自発光に対してレーザー反射光が同等かやや強い輝度になるようにした。

余談になるが、筆者はもともと放射测温法の専門家である。熱放射理論の知識は前述の熱線遮蔽窓の設計などを含めてこの研究開発で何度も役立った。

以上のように設計して製作した診断装置で撮像したコークス炉の炉壁の熱画像の一例を図4に示す。煉瓦のサイズは高さ125 mm、長さ約300 mmである。煉瓦の間の目地部分（築炉時の幅は5 mm）にはカーボンが付着して煉瓦表面より明るく発光している。複数の煉瓦を覆うカーボンが成長している領域があり、ここでも煉瓦が露出している箇所より輝度が高い。

3.3 ソフトウェア

光学システムに付随するいくつかの信号処理や画像処理のソフトウェアも重要な研究開発項目であった。ここでは、炉

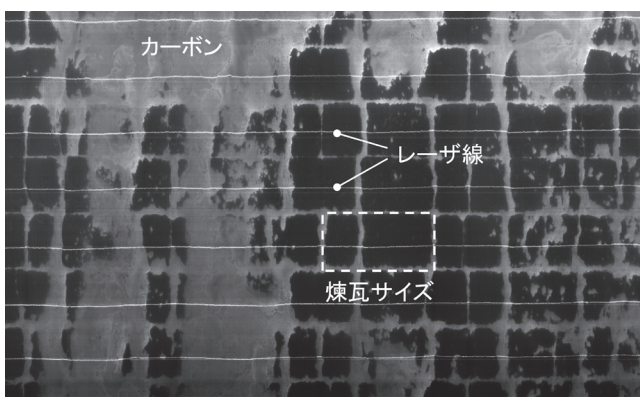


図4 炉壁の熱画像の例（炉壁一部）

壁の凹凸形状を正しく求める際に鍵となった、診断プローブの蛇行と傾きによる外乱を補正する信号処理⁵⁾について述べる。

診断プローブは炭化室内部を移動するときに必ずしも炉の中心を通るわけではなく、炉幅方向に蛇行したり傾いたりする。炭化室の片側からプローブ先端のシューを滑らせながら送り込む構造であるため、蛇行・傾きを機械的に抑制することが困難であった。

図5 (a) はレーザー線の変位から計算した直後の炉壁の3次元プロフィールデータの一例である。一見すると炉長方向の位置Aの下部には凸部、位置Bの高さ1 m～2 m付近には凹部が存在する。ところがよく調べると、位置Aでは高さ方向に直線的に凸量が増加している。これは図中の左側の模式図に示すように、診断プローブが蛇行して炉壁に近づき、なおかつ診断プローブ上部が炉壁から遠ざかる方向に傾斜しているだけであり、実際には炉壁に凹凸はない。レーザー光切断法は診断プローブから炉壁までの距離を多点で測定しているので、プローブの蛇行や傾斜によって擬似的な凹凸が現れる。位置Bの凹部は真の炉壁の陥没である。信号（炉壁凹凸）と外乱（診断プローブの蛇行・傾き）の空間周波数の違いを

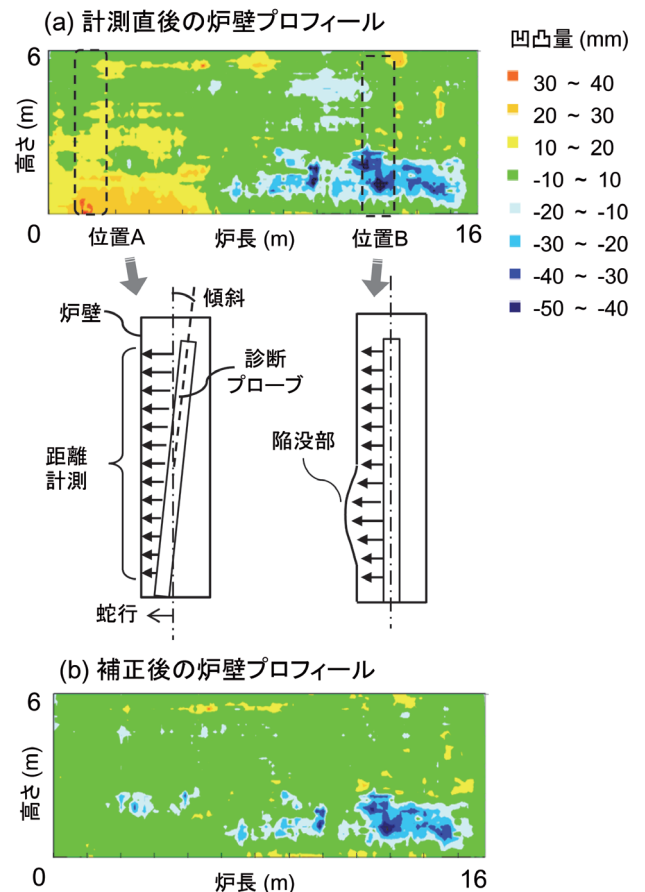


図5 診断プローブの蛇行、傾斜の補正処理

利用して外乱成分を除去することを考えたが、両者には明確な空間周波数の差異がない。測定対象を注意深く考察すると、診断プローブの金属管は剛性があり常に直線を保っていて、揺れによる疑似的な凹凸は壁に対して全体的に生じることに気付いた。一方、炉壁煉瓦の上下部は拘束されているので、煉瓦面が変形するのは壁の一部だけであることも分かった。そこで炉長方向の炉壁の各位置で高さ方向にHough変換処理⁶⁾で求めた直線を当てはめ、この直線から乖離した箇所を炉壁の変形箇所として抽出する。このような信号処理により、生データから蛇行・傾斜成分を差し引いた真の凹凸分布が図5 (b) のように求まる。答えが見つかれば簡単に思えるが、問題を認識してからこの補正手法を考案してソフトウェアを完成させるまで数年を要した。言うまでもなくこの間は炉壁凹凸データが実質的に使いものにならなかった。

4 炉壁観察データの活用

4.1 熱画像から分かる煉瓦壁面の状態

装置全体がようやく完成して製鉄所で運用が開始されると、長期間稼働している炭化室の炉壁損傷に関して多くのことが分かった。例えば、いずれの炭化室の炉壁においても炉長方向にほぼ等間隔に多段の煉瓦を貫いた縦亀裂が観察された。調査の結果、常温の石炭を装入して加熱する際の煉瓦の膨張・収縮が原因で縦亀裂が発生し、長年の操業で徐々に縦亀裂の本数や幅が増加することが明らかになった。縦亀裂の進展はコークス炉の寿命を決定づける一つの要因と考えられる。図6は、異なるコークス炉の炭化室であるが、稼働年数に応じた炉壁の変化を示している。最近ではスマートフォンで撮った人の顔の画像から肌の状態(肌年齢?)が解析できる⁷⁾と聞くと、炉壁の見かけの年齢も評価できないかと考えてしまうのは筆者だけであろうか。

炉壁の熱画像で明確に分かるカーボン付着の様子は、従来の窯口からの目視観察に比べると格段に有用な情報である。

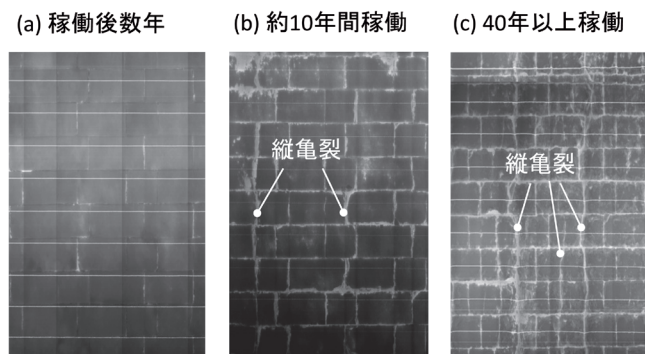


図6 稼働年数による炉壁表面の変化

炭化室の炉壁には部分的にカーボンが付着していて、付着量や分布は炭化室ごとに異なる。カーボンは壁の凹部を平滑化する一方、過剰に成長すると出っ張りになるので監視したい。そこで、炉壁の熱画像からカーボン付着領域を自動で検出する画像処理手法^{8,9)}を開発した。

カーボンの判定には輝度の分布や模様に基づいて対象物を認識するテクスチャー解析の手法を用いた。炉壁画像を小領域(煉瓦が2、3個含まれるサイズ)に分割して、小領域内の輝度ヒストグラムの形状から計算する特徴量や、濃度共起行列(gray-level co-occurrence matrix) 特徴量と呼ばれる模様の一様性やパターンなどを数値化した特徴量¹⁰⁾に基づいて、煉瓦が露出した状態、カーボンが煉瓦を覆い隠している状態、カーボンが斑状に成長している状態とを分別する。炉壁画像に本手法を適用した結果の一例を図7に示す。サポートベクタマシンに教師データを与えて学習させると、カーボン付着状態をほぼ正しく判定できることが確認された。人の目はカーボンと煉瓦の境界を両者の輝度差で認識するが、炉壁画像は温度に応じて輝度に変化する熱画像であり、カーボンの自動抽出は2値化などの単純な画像処理では難しい。

診断装置を実用化して以降、炭化室炉壁のさまざまな劣化や損傷状態の画像データが蓄積された。これらを分析して得られた知見は枚挙にいとまがない。

4.2 炉壁凹凸が押し出し負荷に及ぼす影響の定量化

長期稼働コークス炉の炭化室で特に問題となる損傷として、煉瓦壁面の損耗(減肉)や、カーボン成長を助長する煉瓦表面の荒れが挙げられる。これらの損傷の結果として生じる炉壁の凹凸は、コークスの押し出し負荷を上昇させることが経験的に知られている^{11,12)}。コークス炉の操業では、押し出し負荷が一定以上高くなると炉壁損壊の危険があるため、押し出し機が自動的に停止する。これは押し詰まりと呼ばれ、

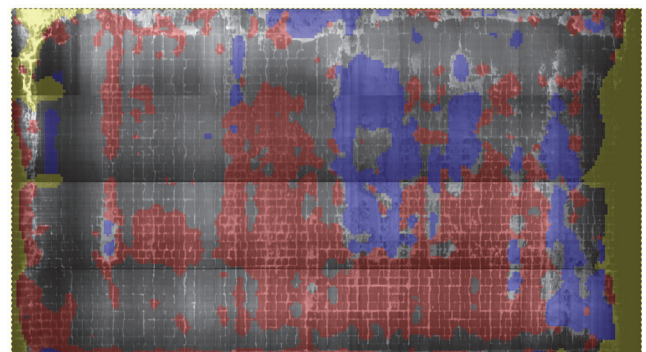


図7 炉壁のカーボン付着分布の一例⁸⁾

老齢化したコークス炉では、押し詰まりによる生産阻害が年々増加する傾向がある。コークス炉診断装置の開発により初めて測定できるようになった炉壁の凹凸情報は、凹凸損傷と押し出し負荷との関係の研究に発展した。

診断装置を導入した製鉄所で操業中のコークス炉の炉壁凹凸の状態を調査したところ、コークス炉によっては、多くの炭化室の炉壁に凹凸損傷が発生していた。そして、凹凸にはさまざまな形状が存在することが分かった。同じく自社開発した、炉壁の陥没箇所を溶射して平滑面を回復する装置¹³⁾で炉壁を補修することになるが、一箇所の陥没を埋めるのに数時間を要し、その間コークスの生産は中断せざるを得ない。面積が大きいならかな凹部、面積は小さいが急峻で深い凹部、あるいはサイズの小さい凹部が複数ある場合があるので、その補修の優先順位、言い換えるとさまざまな形状の凹凸損傷の有害度の指標化が課題となった。

今日では粉体の運動を扱う計算機シミュレーションが進歩しているが、移動するコークスが炉壁の突起に接触して抵抗力を発生する力学的現象は複雑であり、計算機シミュレーションが適用できなかった。コークス炉内のコークスは塊の集合体であり、塊同士と塊と炉壁の間には加熱中の収縮による隙間がある。炉壁の突起をコークスが通り抜けるためには、まず隙間の空間を使って塊の移動や回転が起こり、それでは不十分であれば塊の破壊が起こる。そこで、炉壁の凹凸形状と移動するコークスが受ける抵抗との関係を実験式で表現することを試みた¹⁴⁾。この目的のために、実験室で炭化室の一部を模した押し出し負荷測定装置を作り、側壁に加工した凹凸形状に応じて押し出し負荷が変化する様子を定式化した。実験的な研究アプローチは時間と労力を要するが、押し出し負荷測定装置でコークスが壁の凹凸部で音をたてて破壊しながら押されていく様子を見ると、炭化室内で起こっている現象がよく理解できた。

5 おわりに

本稿では製鉄工程のコークス炉を対象とした炉壁診断を例にとり、専用の光学計測装置から診断データの活用までの研究開発を概説した。炭化室は1000℃の高温でかつ狭小幅である。この状況で大面積の炉壁の熱画像を撮像し、同時にレーザ光切断法で炉壁の3次元プロフィールを計測する方法を構築した。10年以上の歳月を要した一連の研究開発は、筆者がこれまでに携わった中で最も過酷な環境下での計測技術である。

この事例のように、多くの製鉄工程の計測では、一つの難しい理論を追及するのではなく、悪環境ゆえに生じるさまざ

まな技術課題に対して、広い知識を活用した創意工夫が求められる。伝熱シミュレーションを利用した耐熱設計は進歩しているが、計測器の保護ボックスの窓ガラスの粉塵付着防止などは経験や場あたりの対策に頼ることも少なくない。センサの環境対策、耐久性、メンテナンス性に関する知識を蓄積して体系化する努力は鉄鋼業の技術者自身が担う必要があろう。高炉や焼結機に関しても、他の製造プロセスと比べると検出端が不足しているのが実状である。逆に考えると、日進月歩の電子機器をうまく持ち込むことができれば、新しい計測技術を創出する余地が多く残されている。生産の最適化や製品品質の向上に資する、製鉄プロセスをより科学的に捉えるための計測技術の研究開発が続けられている。

参考文献

- 1) 浜木誠, 笠岡玄樹, 月原裕二: 材料とプロセス, 5 (1992), 1122.
- 2) M.Grosse-Wilde and F.Huhn: Cokemaking Int., 8 (1996), 42.
- 3) 杉浦雅人, 境田道隆, 藤懸洋一, 入江敬介: 計測自動制御学会論文集, 47 (2011), 435.
- 4) 計測自動制御学会編: 温度計測—基礎と応用—, コロナ社, (2018), 260.
- 5) M.Sugiura and M.Sakaida: Asia Steel 2015 Proceedings, (2015), 662.
- 6) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, (1991), 572.
- 7) 大澤達也, 新地夏代, 岩田恭子: 映像情報メディア学会誌, 69 (2015), 263.
- 8) 杉浦雅人, 阿部快洋: 材料とプロセス, 30 (2017), 292.
- 9) M.Sugiura and Y.Abe: Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, (2017), 429.
- 10) R.M.Haralick, K.Shanmugam and I.Dinstein: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3, (1973), 610.
- 11) 中川朝之, 有馬孝, 加藤健次, 安藤真: 材料とプロセス, 15 (2002), 766.
- 12) 愛澤禎典, 上坊和弥, 吉田周平: 材料とプロセス, 20 (2007), 877.
- 13) 小林信太郎, 中嶋淳: 新日鉄住金技報, (2015) 402, 45.
- 14) M.Sugiura, T.Nakagawa, T.Arima, K.Kato, M.Sakaida, Y.Morizane, A.Sano and K.Irie: ISIJ Int., 53 (2013), 583.

(2018年2月21日受付)