

## 炭化室炉壁の画像診断技術

## Imaging Diagnosis Technology for Coking Chamber Walls

杉浦 雅人\*  
Masato SUGIURA阿部 快洋  
Yoshihiro ABE境田 道隆  
Michitaka SAKAIDA

## 抄 録

コークス炉炭化室の煉瓦壁面を画像診断する装置を開発し実用化した。大型の耐熱プローブに複数のラインカメラとレーザを搭載して、1000℃を超える高温でかつ大面積の壁面を観察する。炉壁の熱画像を撮像すると同時に炉壁の凹凸形状を測定する。数十年稼働しているコークス炉ではこの装置で得られる診断データが極めて有益である。画像上の特定の対象物を認識するテクスチャー解析を応用すると炉壁のカーボン付着が定量化できる。長期稼働コークス炉の代表的な問題である押出負荷の上昇は、壁面損傷部の凹凸形状をモデル化することで解明された。

## Abstract

An imaging diagnosis apparatus for brick walls inside coking chambers of coke-oven batteries was developed and was put into practical use. The huge wall with a high temperature exceeding 1000°C is observed by a large-sized heat-resistant probe equipped with multiple line cameras and laser projectors. Irregularity measurement is performed in conjunction with thermal imaging. The data obtained by the apparatus is extremely useful for the coke-oven batteries in operation for many decades. Texture analysis, which recognizes a specific object on a given image, can be applied to quantification of carbon adhesion on the wall. The increase of pushing load, which is a major problem for aging coking chambers, was clarified by modeling the irregularity shape of the damaged portion on the wall.

## 1. 緒 言

コークス炉の稼働年数が30年を超えると、炉体劣化による生産能力の低下やエネルギー効率の悪化が徐々に顕在化する。このようなコークス炉の炭化室では、耐火煉瓦の炉壁に様々な形態の損傷が生じている。特に煉瓦の減肉や欠損による炉壁の凹凸が顕著になると、コークス排出時の押出負荷が増加して押出機が停止する生産障害が起こる。日本製鉄(株)では、炉体損傷が進行したコークス炉の建て替えを進める一方、長期稼働コークス炉の操業を維持するために必要な保守技術の開発に積極的に取り組んでいる。コークス炉の診断技術で重要な役割を果たしているのは、高温で狭隘な炭化室の炉壁全面を撮像するとともに炉壁の3次元プロフィールを測定する自社開発の炭化室診断装置<sup>1,2)</sup>である。本稿では、炭化室診断装置を概説した後、診断により得られる炉壁の画像データと凹凸データの活用事例を紹介する。

## 2. 炭化室診断装置

硅石煉瓦で造られているコークス炉は、一旦温度を下げると熱衝撃による煉瓦の破損で炉体強度が低下してしまうため、炉内が常時1000℃程度の高温に維持されている。加えて、両隣の燃焼室から煉瓦壁を介して石炭を加熱する構造から、炭化室は長さが16m、高さが6mあるのに対して幅はわずか0.4mしかない。このため、窯口からの観察では奥の炉壁の凹凸損傷を知ることは困難である。断熱構造の小型の撮像装置<sup>3,4)</sup>や、特定高さの炉幅を測定する装置<sup>5,6)</sup>を押出機に搭載して炭化室に挿入する診断方法が使われているものの、これらは炉壁の一部を観察することしかできない。そこで我々は、炭化室の炉壁全面を高精度に計測する診断装置を開発した。その概要を以下に述べる。

## 2.1 耐熱診断プローブ

炭化室診断装置は、押出機の軌条を走行する台車と炉内

\* プロセス研究所 計測・制御研究部 主幹研究員 博士(理工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

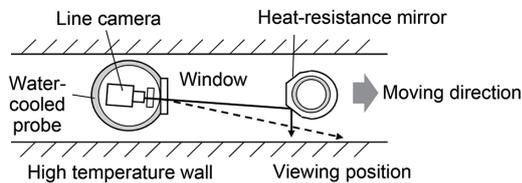
に挿入される診断プローブから構成される。診断プローブは押出機側（以下、PS という）の窯口から炉内に挿入される。診断プローブ先端には計測に用いるカメラやレーザなどの電子機器が搭載されている。炭化室内部は高温のため、診断プローブの外側は水冷され、さらに内部には冷却エアが供給されている。これらの冷却機構によってプローブ内は40℃以下に保たれている。カメラとレーザの観察窓には、放射熱の進入による温度上昇を防止するため、赤外線を遮蔽するガラスが使われている。炉壁診断は、押出機でコークスを排出して空窯にして実施する。生産への影響が極力少なくなるように、診断プローブは約4分と迅速に炭化室を往復する。

図1(a)は診断プローブの水平断面を示している。リニアイメージセンサを検出器としたラインカメラを使用して高温炉壁の熱放射を撮像する。カメラのライン視野を炉壁の上下方向に向けて、診断プローブが1mm進むごとにライン輝度信号を取得して画像を生成する。2048画素のラインカメラ4台を縦に並べて6mの炉高を撮像すると、水平方向1mm、高さ方向約0.75mmの分解能の画像が得られる。狭小幅の炉内でカメラが炉壁を直視すると、図1(a)中の破線のように、炉壁を鋭角に見ることになる。すると、診断プローブの避けられない炉幅方向の揺れによって、撮像位置が大きく変化して画像がひずむ問題がある。そこで、ステンレス鋼管の表面を研磨して製作した高さ6mのミ

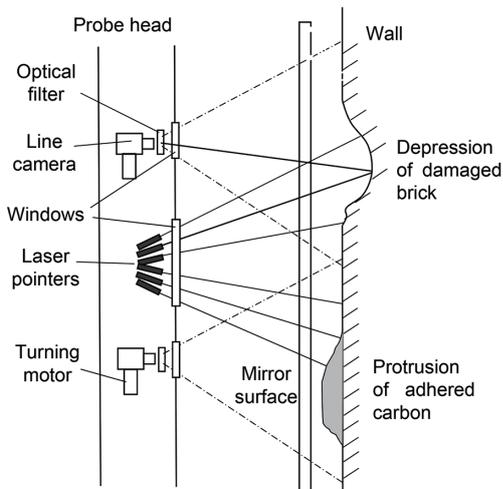
ラーがカメラの視野前方に配置される。ミラーで撮像方向を折り曲げて炉壁を垂直に観察すれば、プローブの炉幅方向の変位の影響は小さくできる。ミラー表面の高温酸化を防止するために銅管の内部は水冷される。ラインカメラはモータで左右に旋回し、往路と復路でそれぞれ左壁、右壁を撮像する。

診断装置の最大の特徴は、1回の炉内観察で炉壁の熱画像を撮像すると同時にレーザ光切断法により炉壁の凹凸を計測することである。図1(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複数のレーザポイントの光線を投射する。レーザ投光間隔は煉瓦1段の高さに相当する約130mmである。44個の小型半導体レーザがプローブ内の上下2箇所に分かれて搭載される。診断プローブが炉壁に沿って進みながらレーザのスポット光が映る炉壁を撮像すると、画像上でレーザ光の像は水平方向の線となる。光切断法の原理で、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レーザ線が上下に変位する。炉壁の熱放射輝度に対するレーザ反射光輝度のコントラストが適切にバランスするように、レーザの波長、強度、およびラインカメラの波長選択フィルタなどの仕様を設計した。

得られる画像の一例として、炉壁一部を切り出した画像を図2に示す。炭化室の炉壁には通常部分的にカーボンが付着している。煉瓦が露出している領域では、目地と縦方向の亀裂にカーボンが入り込んでいる。煉瓦表面よりカーボン付着部が明るく見えるのは、診断中に窯口から炭化室内に侵入する空気によりカーボンが燃焼しているためと推測される。カーボン上のレーザ線の一部がゆがんでいる箇所には凹凸がある。



(a) Wall surface imaging



(b) Irregularity measurement based on multi-laser light-section method

## 2.2 計測ソフトウェア

炉壁の凹凸計測では、信号処理ソフトウェアが重要な開発項目であった。画像上の複数のレーザ線の上下変位量から炉壁の3次元プロフィールを求めるため、はじめにレーザ線を水平方向に追跡する。画像輝度に明確な差がない横

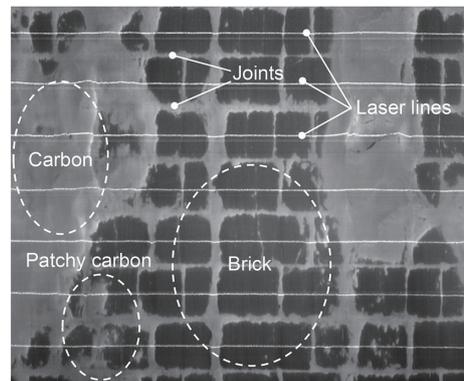


図2 炉壁画像の一例  
Example of wall image

図1 耐熱診断プローブの光学計測システム<sup>1)</sup>  
Optical measurement system of heat-resistance diagnosis probe<sup>1)</sup>

目地とレーザ線を精度よく分別することが課題になるが、これには両者の線の太さの違いに着目してレーザ線を検出する画像処理を考案した<sup>7)</sup>。画像上のレーザ線変位量と壁の凹凸量との関係は、レーザ出射角度や画像解像度といった撮像系の幾何学的条件から定まる。水平方向の測定ピッチが40mmと4mmの2種類の3次元プロフィールが生成される。

ここで、正確な3次元凹凸情報を得るために必要となった診断プローブの傾きと蛇行の補正について説明する。図3(a)は、40mmピッチの3次元プロフィールの生データの一例である。一見すると長手方向の位置Aの下部には凸部、位置B付近には凹部が存在する。ところが注意深く見ると、位置Aでは高さ方向に直線的に凸量が減少している。これは炉壁に凹凸があるのではなく、診断プローブの下部が炉壁に近づく方向に傾斜しているだけである。すなわち、真の凹凸ではなく、プローブの傾斜によって現れる疑似的な凹凸である。プローブが蛇行した場合にも同様の凹凸計測の外乱が生じる。そこで、診断プローブの傾斜や蛇行成分が混在した凹凸データから真の炉壁凹凸量を抽出する信号処理が検討された<sup>7,8)</sup>。ラインカメラを搭載したプローブには剛性があり直線を保っているため、傾きによる疑似的な凹凸は壁に対して全体的に生じる特徴がある。一方、炉壁煉瓦の最上部と最下部は拘束されているので、煉瓦面の変形は壁の一部のみで生じる。そこで炉壁の長手方向の各位置で凹凸データの高さ方向に直線を当てはめ、この直線からずれる箇所を炉壁の変形箇所とした。このような信号

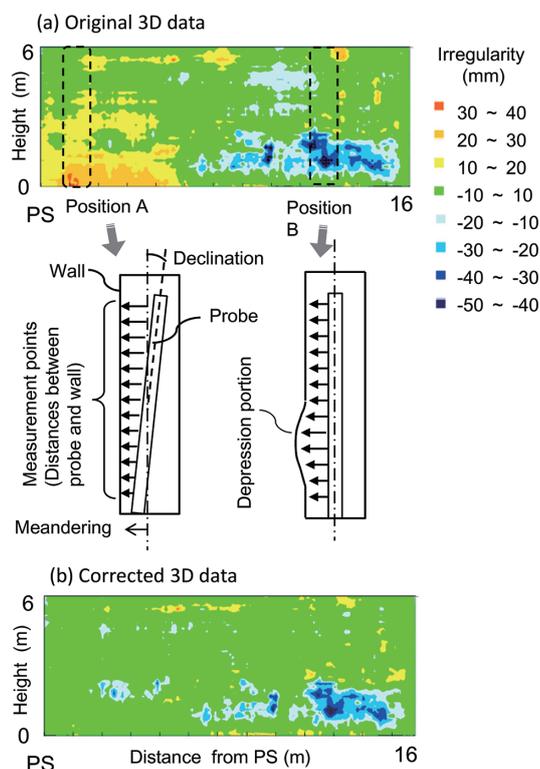


図3 炉壁3Dプロフィールの疑似凹凸の補正<sup>8)</sup>  
Correction of pseudo irregularity on wall 3D profile data<sup>8)</sup>

処理により、生データからプローブの傾斜・蛇行量を取り除くことができ、真の凹凸分布が図3(b)のように求められる。

### 3. 画像に基づく炉壁診断

稼働年数が異なる炭化室の炉壁画像を図4に示す。炉壁の経年変化が見た目によく分かる。炭化室診断装置がいくつかの кокс 工場で実機運用されるようになると、蓄積された画像データから炉壁損傷に関する多くの知見が得られた。例えば、長期間稼働している кокс 炉では、どの炭化室にも炉壁にほぼ等間隔に多段の煉瓦を貫く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、収縮が原因でこのような縦亀裂が発生し、亀裂の本数や亀裂の幅が徐々に拡大することが明らかになった。炉壁の構造強度に影響する亀裂の進行は、 кокс 炉の寿命を決定付ける要因と考えられる。

次に、炉壁画像データの活用事例の1つとして、カーボン付着状況を定量化する画像処理<sup>9)</sup>について述べる。カーボンが付着している面積や分布は、 кокс 炉に約100窯ある炭化室ごとに異なる。カーボンは壁の凹部を埋めて平滑化する一方、過剰に成長すると出っ張りになることから、老朽炉ではカーボンの付着を適切に管理することが求められる。

我々はカーボン成長の状態を図2の破線楕円で示した3種類に分類する。“煉瓦”とは、目地と亀裂部以外にはカーボンが付着していない状態を指す。煉瓦をカーボンが覆い隠している状態を“カーボン”とする。“斑状カーボン”とは、目地や亀裂にそれらの幅以上のカーボンが成長している“煉瓦”と“カーボン”の中間的な状態である。

カーボンは周辺の煉瓦面より輝度がやや高い(明るい)特徴がある。ところが、単純な2値化処理では炉壁全体のカーボンを精度よく識別することができない。なぜならば、炉壁画像は高温発光を撮像した熱画像であり、炉壁の温度分布によっても画像の輝度が変化する。そこで、カーボンの判定には画像上の輝度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を応用した<sup>9)</sup>。

テクスチャー解析では目地と縦亀裂の筋状の模様に着目することとし、これらの縦横の筋を強調する前処理を施す。

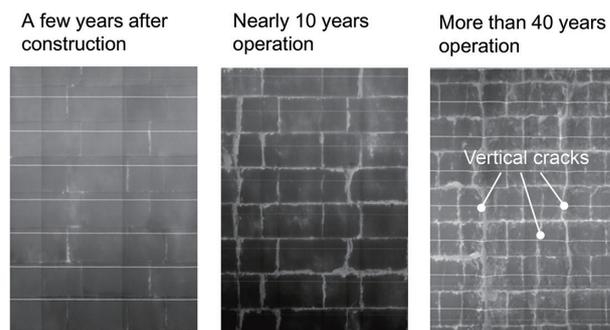


図4 長期的な炭化室壁面の変化<sup>8)</sup>  
Long-term changes of chamber-wall surfaces<sup>8)</sup>

そして、目地か亀裂が必ず含まれるサイズの小領域のブロックに画像を分割して、以下に述べる特徴量を計算する。

- (1) ヒストグラム特徴量：カーボンであればブロック内の輝度差が小さく、輝度のヒストグラムが左右対称に近い特徴がある。この様子をヒストグラムの歪度と変動係数で数値化する。
- (2) 濃度共起行列特徴量：ブロック内の特定の相対的な位置関係にある2つの画素の輝度に関する統計量を求める方法であり、模様の一様性やパターンなどを特徴として捉える。ここでは、角2次モーメント、コントラスト、エントロピーおよび相関の4つの濃度共起行列の特徴量を用いた。
- (3) 2値画像に基づく特徴量：目地や亀裂に沿った筋状カーボンのみを抽出した2値画像を生成し、ブロック内の縦方向の明部の間隔と、距離画像（注目する画素から最も近くにある明部までの距離を輝度とした画像）の平均輝度を特徴量とした。

これらの特徴量に基づく炉壁状態の判定には、機械学習の技法として普及しているサポートベクターマシンを利用した。教師データは、実炉画像の“煉瓦”、“カーボン”、“斑状カーボン”を目視で選び与えた。

画像処理の過程とカーボン付着部の判定結果の一例を図5に示す。入力画像(a)に対して、前処理として筋状のカーボンを強調すると画像(b)が得られる。これからヒストグラム特徴量と濃度共起行列特徴量を計算する。煉瓦が露出している領域の縦横の筋状のカーボンを抽出した2値画像(c)と、画像(c)をさらに加工した距離画像(d)から、2値画像に基づく特徴量を求める。最終的に得られた判定結果の画像(e)では、画像が暗すぎるか飽和している炉壁の左右端部を除き、3種の炉壁状態をほぼ正しく判定することができている。

1つのコークス炉において数多くの炭化室のカーボン付着パターンを求め、炉壁上のどの位置にカーボンが付着しやすいかを調べた例を図6に示す。炭化室は、コークスを押し出しやすくするため、PSから押出方向に向かって炉幅が数十mm広がるテーパがある。炭化時間を均一にするため温度をPSより高くしている排出側の炉壁はカーボンの成長が速い。また5箇所ある石炭装入口直下の煉瓦表面が粗面化している領域にカーボンが多い傾向が確認できる。この他にカーボン焼却ランスのエアの流れ方などがカーボンの分布に影響する。このような解析は、例えば、押出負荷が上昇しないために望ましいカーボン付着分布の探索などに利用される。

#### 4. 炉壁凹凸が押出負荷に及ぼす影響

コークスの押出負荷は、石炭装入量、石炭の配合や含有水分に応じた乾留後の収縮量、加熱時間などの様々な要因によって変化するが、炉壁の凹凸は押出負荷への寄与が直

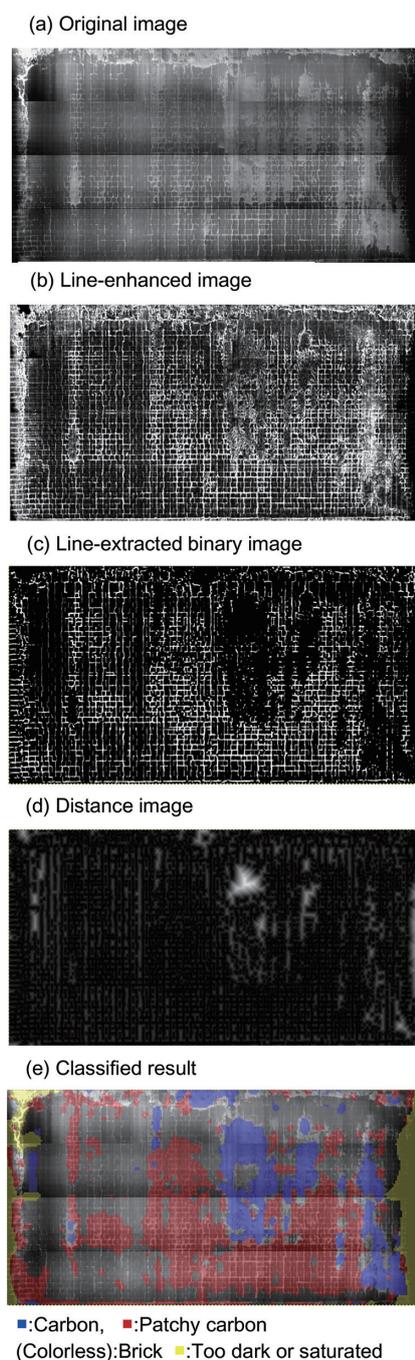


図5 カーボン状態を判定する画像処理<sup>9)</sup>  
Image processing for classification of wall carbon states<sup>9)</sup>

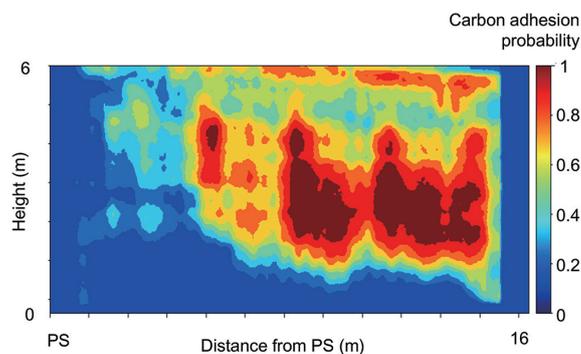


図6 カーボン付着確率の空間分布の解析  
Analysis of spatial distribution of carbon adhesion probability

接的で大きい。炉壁の3次元プロフィールが得られるようになると、様々な凹凸形状が存在することが明らかになった。面積が大きいが比較的なだらかな凹部があれば、急峻で深い凹部もある。炉壁に複数の凹部が生じていることもある。炉壁の陥没箇所を溶射して平滑面を回復させる補修が行われるが、この作業は1箇所の陥没を埋めるのに数時間を要し、その間コークスの製造は中断せざるを得ない。コークスの生産量を確保するため、限られた補修時間内で効率的に押出負荷を下げる事が望まれるが、当初はどのような凹凸を優先して補修すべきかの客観的な判断ができなかった。そこで我々は、炉壁凹凸形状から押出負荷の増加を推定する技術の開発に取り組んだ<sup>1,2,10)</sup>。

#### 4.1 巨視的な炉壁凹凸

押出時に炉壁に突起があれば移動するコークスがそこに接触して抵抗となる。コークスケーキは連続した1つの固体ではなく、乾留時に発生する亀裂で分割された塊の集合体である。塊同士と塊と炉壁の間には焼減りと呼ばれる隙間がある。コークスが炉壁の突起を通過するためには、まず隙間の空間を使って塊の移動や回転が起こり、それで不十分であれば塊の破壊が起こると推測される。このような現象を物理モデルで表現することは難しいことから、炉壁凹凸形状と移動するコークスケーキに作用する抵抗との関係を実験式で表現することを試みた。

図7は片側の炉壁に凹部がある炭化室内部の水平断面を模式的に示している。炉壁プロフィールは40mmピッチの離散的な凹凸量 $z$ として与えられる。隣り合う凹凸量の差分を $\Delta z$ とする。押出方向に炉幅が狭まるとき $\Delta z$ を正とする。コークスケーキが右方向に押されると、区間 $n$ と $(n+1)$ のコークスが壁に接触する。この時発生する抵抗は炉壁スロープの勾配や長さに依存すると考えられる。

ここで、“局所抵抗指数”と名付けた値を定義する。局所抵抗指数 $k$ は押出時の抵抗力を表現することを意図して、 $\Delta z$ に基づいて次のように求める。すなわち、図7において、区間 $(n-1)$ と区間 $(n+2)$ ではコークスが炉壁に接触しない

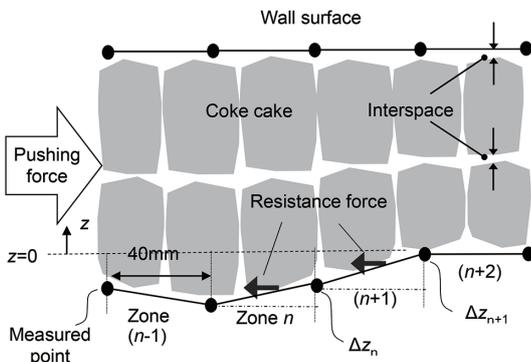


図7 陥没部がある炭化室炉壁の模式図<sup>1)</sup>  
Schematic depiction of chamber walls with a depressed portion<sup>1)</sup>

ので局所抵抗指数 $k$ はゼロとする。 $\Delta z$ がコークスと炉壁の隙間量に相当する微小段差 $\delta$ 以下の場合も $k=0$ とする。 $\delta$ はコークスケーキと炉壁の間の焼減り量に相当する数値として2mmとした。区間 $n$ では、コークスが壁のスロープに当たり、スロープの勾配に相当する $\Delta z_n$ のべき乗に比例した抵抗が生じると仮定して、局所抵抗指数 $k_n$ を式(1)で与える。

$$k_n = (\Delta z_n - \delta)^a \tag{1}$$

ここで $a$ は定数である。区間 $(n+1)$ は手前の隣接区間 $n$ から続くスロープである。 $\delta$ 以上の段差が連続する場合、それらが単独で離れて存在するより抵抗が高いと推測される。このような区間では、手前の区間の局所抵抗指数に定数 $\beta$ を乗じた値を対象区間の式(1)に加える。すなわち、区間 $(n+1)$ の局所抵抗指数 $k_{n+1}$ は以下の式で与える。

$$k_{n+1} = (\Delta z_{n+1} - \delta)^a + \beta \times k_n \tag{2}$$

図7では片側の炉壁のみに凹部があるが、コークスケーキが受ける抵抗は炉幅変位によると考えるべきなので、両側の炉壁に凹凸が存在する場合は、向かい合う位置の $\Delta z$ を合計した値から局所抵抗指数を算出する。

次に、局所抵抗指数に炉壁の高さに応じた重み付けを加える。この理由は、同じ凹凸形状であっても炭化室の下部にあるほどコークスケーキは自重の拘束で変形しにくくなり、炉幅狭窄部を通り抜けるために大きな力が必要になるからである。炉底からの高さ $h$ における局所抵抗指数 $k'_n$ は式(3)のように定義する。

$$k'_n = \left\{ 1 + \frac{\gamma(H_0 - h)}{H_0} \right\} \times k_n \tag{3}$$

ここで、 $H_0$ は炉底から炉頂までの高さ、 $\gamma$ は高さ位置に応じた重み付けの定数である。

レーザー線を投射した約40箇所の高さ位置において水平方向に40mm間隔で求めた局所抵抗指数を炉壁全体で集計した値を“抵抗指数”と呼ぶ。そして、炭化室の凹凸状態を表す抵抗指数と押出負荷が直線関係で対応するように、式(1)～式(3)中のパラメータである定数 $a$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を実験的に求めた。炭化室の一部を模擬した冷間の押出負荷測定装置を製作してこれらの定数を測定したところ、 $a=1.45$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=1$ であった。

図8は、比較的大きな凹部を含む炉壁の一部を切り出した3次元プロフィールの一例である。横軸はPSからの距離で、縦軸は炉底からの高さである。煉瓦の部分減肉により発生している陥没は深さが最大50mmある。凸部はカーボンが付着している箇所である。図9は、図8の炉壁形状に対して計算した局所抵抗指数の空間分布である。大きな陥没部の底から押出方向に向かうスロープで集中的に局所抵抗指数が発生している。

凹凸損傷やカーボン付着が異なる炭化室について、抵抗指数と押出負荷との関係をグラフ化した結果を図10に示す。比較のため、これらの炭化室について、 $\pm 20\text{mm}$ 以上

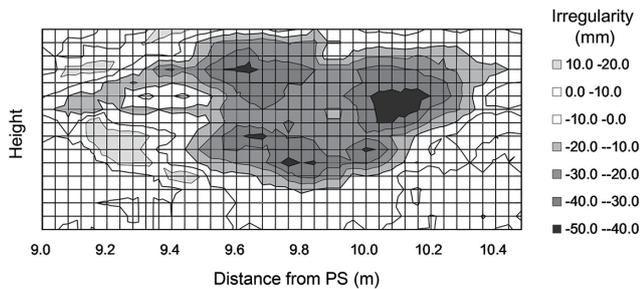


図8 炭化室炉壁の凹凸形状の一例<sup>2)</sup>  
Example of chamber-wall terrain<sup>2)</sup>

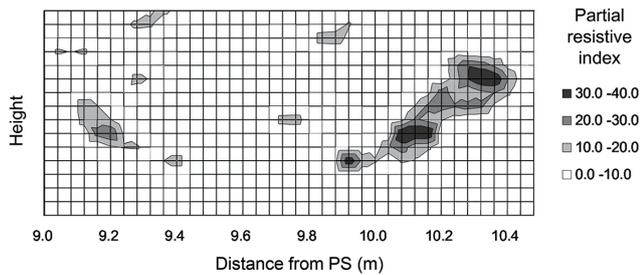


図9 局所抵抗指数の分布<sup>2)</sup>  
Spatial distribution of partial resistive indices<sup>2)</sup>

の凹凸が発生している領域が炉壁全体に占める割合と押出負荷との関係を図11に示す。図10では抵抗指数と押出負荷との間に明瞭な相関が確認できるのに対して、図11の凹凸損傷面積と押出負荷との関係では相関が劣る。単に面積に着目したのでは凹凸損傷の有害性を正しく評価できないことを示している。図10中の直線は抵抗指数と押出負荷との関係の近似式であり、縦軸切片が111、傾きが0.107であった。近似式の縦軸切片がゼロにならないのは、炉壁が完全に平滑であっても炉壁と炉底の摩擦によって一定の押出負荷が発生することと合致する。コークスが接触する炉壁凹凸箇所形状や位置に注目する抵抗指数は、押出負荷の発生メカニズムをよりの確に捉えていると言える。

図8の炉壁陥没部で発生している抵抗指数は940であり、図10の関係式に照らすと約100kNの押出抵抗に相当する。このように抵抗指数を使って凹凸損傷を評価することで、それがどの程度の押出負荷増加をもたらしているかが分かる。炉壁に凹凸損傷がいくつもある場合に、炉壁を平滑化する溶射補修の効果あるいは優先順位を定量的に判断することができる。

#### 4.2 縦亀裂による微小な炉壁凹凸

抵抗指数は、炉壁のすり鉢状の陥没部や、過剰に成長したカーボンの凸部にコークスケーキが接触して押出性を悪化させる現象が対象である。老朽コークス炉の別の炉壁損傷形態として、縦亀裂に沿った煉瓦の角欠けがある。縦亀裂は炉壁全体に発生しているので、我々はこれを炉壁の肌荒れと呼ぶ。炉壁の肌荒れによる押出負荷の増加は、炉壁とコークスケーキとの摩擦のような現象と考えられる。炉

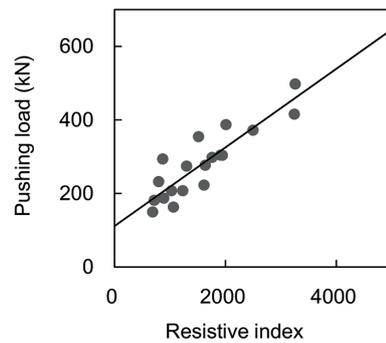


図10 抵抗指数と押出負荷の関係<sup>2)</sup>  
Relationship between resistive index and pushing load<sup>2)</sup>

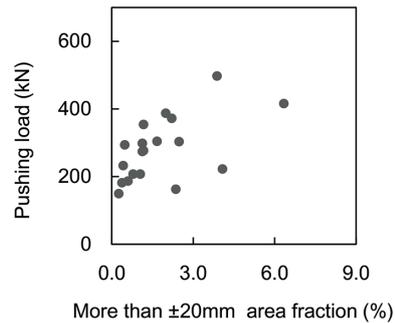


図11 凹凸領域の面積と押出負荷の関係<sup>2)</sup>  
Relationship between uneven area and pushing load<sup>2)</sup>

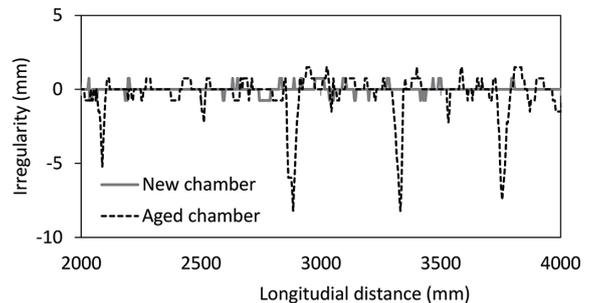


図12 新炉と老朽炉の炉壁の水平方向プロフィール  
Comparison of horizontal profiles between new and aged chamber walls

壁に成長するカーボンが都合良く微小凹部を埋めていればこの摩擦抵抗は低減される。3章で述べた斑状カーボンは炉壁肌荒れの平滑化に有効と考えられる。

肌荒れ部の形状を観測するには、長手方向の測定ピッチを4mmとした炉壁のプロフィールデータを用いる。図12に炉長方向の炉壁プロフィールの例を示す。老朽炉では深さ数mmのV字状の溝が縦亀裂の位置に形成されている。このような肌荒れ損傷の度合いを定量化するため、4mmピッチプロフィールに対して、100mm区間ごとに壁面の最大深さを抽出して炉壁全体で平均化した数値を“肌荒れ指数”として定義する。抵抗指数が低い炭化室について、肌荒れ指数と押出負荷との関係をグラフ化すると図13のようになる。抵抗指数と肌荒れ指数はそれぞれ独立した押出負荷要因として管理する必要がある。

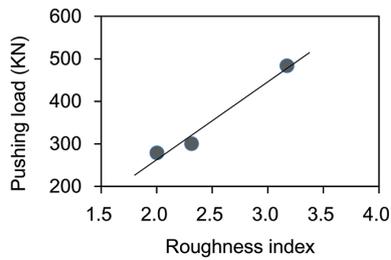


図 13 肌荒れ指数と押出負荷の関係<sup>10)</sup>

Relationship between roughness index and pushing load<sup>10)</sup>

## 5. 結 言

本稿では、コークス炉炭化室の炉壁診断技術として、専用に開発した光学計測装置から診断データの活用までを説明した。炭化室内が1000℃の高温でかつ狭小幅である課題を克服して、大面積の炉壁の熱画像を撮像しつつレーザー光切断法で炉壁の3次元プロフィールを計測する装置を実用化した。製鉄所で診断装置の運用がはじまると、長年稼働している炭化室の炉壁損傷に関して多くの知見が得られ、炉壁状態を数値化して診断する技術の研究が進展した。

カーボン付着分布の自動認識や、炉壁の凹凸形状が押出負荷に及ぼす影響の解明は、製造現場の技術者の経験に頼ることが多かったコークス製造プロセスを科学的に捉える

一助となり、生産の安定化と炉体の長寿命化に貢献している。さらに、診断結果を分析することで見出したコークス炉が寿命に至るまでの炉壁劣化メカニズムと、診断結果から得られる炉壁劣化の支配因子の定量データを用いることにより、正確な寿命予測が可能となった。日本製鉄では、寿命予測に基づいた計画的なコークス炉のリプレースを進めている。

## 参照文献

- 1) 杉浦雅人 ほか：計測自動制御学会論文集. 47 (10), 435 (2011)
- 2) Sugiura, M. et al.: ISIJ International. 53 (4), 583 (2013)
- 3) 浜木誠 ほか：材料とプロセス. 5, 1122 (1992)
- 4) 杉浦雅人 ほか：材料とプロセス. 17, 179 (2004)
- 5) Grosse-Wilde, M. et al.: Cokemaking Int. 8 (2), 42 (1996)
- 6) 杉浦雅人 ほか：材料とプロセス. 16, 296 (2003)
- 7) Sugiura, M. et al.: Proceedings of Asian Steel Conference 2015. 2015, p.662
- 8) 杉浦雅人：ふえらむ. 23 (6), 257 (2018)
- 9) Sugiura, M. et al.: Proceedings of the SICE Annual Conference 2017. 2017, p.429
- 10) 杉浦雅人 ほか：材料とプロセス. 27, 796 (2014)



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)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



境田道隆 Michitaka SAKAIDA  
設備・保全技術センター  
プラントエンジニアリング部 上席主幹



阿部快洋 Yoshihiro ABE  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
主幹研究員 博士(工学)