

高炉操業解析総合支援システムVenusの開発

高炉操業データの画像情報化技術の開発

Development of Visual Evaluation and Numerical Analysis System of Blast Furnace —Development of the Visualizing Information Technique of Blast Furnace Process Data—

伊藤 雅 浩^{*(1)} 松崎 眞 六^{*(2)} 柿内 一 元^{*(3)} 磯部 誠^{*(4)}
Masahiro ITO Shinroku MATSUZAKI Kazumoto KAKIUCHI Makoto ISOBE

抄 録

高炉に空間的分布をもって多数地点に設置されている計測センサの計測データをプロセスコンピュータからオンラインで逐次長期間蓄積し、各センサの設置位置と正確に関連づけて計測データを画像情報化するシステムを開発し、従来、経験によって各自の頭脳中で想像していた高炉の全体的な操業状態を、客観的な画像情報として可視化した。さらに、画像情報の2次加工処理として、ステープ温度の忘却型時間変化率及びシャフト圧力の空間変化率ベクトルを新たに定義し、計測データに潜在化していた融着帯根部等の情報を顕在化する従来ない高炉の操業監視方法を考案した。

Abstract

The data of the measurement sensor installed with the spatial distribution on the blast furnace were successively accumulated on line from process computer to data base system for a long period of time, the new system which considers the relation with the installation position of each sensor correctly, and carries out picture computerization of the measurement data was developed, and the overall operation state of a blast furnace which the skilled operator could be imagining in each one of heads by experience was visualized as the picture information objectively. Furthermore, as secondary processing of picture information, the forgotten type time rate of change of stove temperature and the spatial rate of change vector of shaft pressure were newly defined, and the operation surveillance method of the blast furnace which is not before and which visualizes objectively the potential information to measurement data, such as the root of the cohesive zone, was devised.

1. 緒 言

高炉の操業技術において、これまでに各種物理モデルの開発¹⁻⁴⁾やAIの応用⁵⁻¹⁰⁾等により定量的な炉内解析技術や制御技術が確立されてきた。しかしながら、今後、更なる高炉の操業安定を図るためには、高炉の非定常的現象(動的挙動、動特性)を定量的に評価・解析する必要があり、例えば、近年、3次元非定常物理モデル¹¹⁾が開発されつつある。

一方、高炉には温度、圧力をはじめ各種の検出端が設置されている。このうち、炉内を直接計測するセンサはこれまでに多数開発され、炉内現象の解明に寄与してきた。また炉体には温度センサをはじめ数多くのセンサが設置されており長期間の連続計測も可能であるが、あくまで炉壁を介した間接的な炉内計測である。

現場オペレータは経験に基づき、炉内計測データと多数の間接的な炉体計測データを総合的に評価し、高炉の操業状態を判断している。特に、高炉の非定常的現象の把握や予測は、現場オペレータの

経験と技量に負うところが大きい。従って、現場オペレータの経験と技量に多くを委ねてきた高炉の非定常的現象を定量的に評価する技術、更に、柔軟かつ適切に操業ガイダンスを提示する新しいモデリング技術及びシステムの開発が、更なる高炉操業の安定や還元材比の低減に寄与すると考え、その第1ステップとして、炉体に多数設置されている温度センサや圧力センサの計測データを統合し、定量的に評価する技術として、高炉操業解析総合支援システムVenusを開発した。

本システムの視点は、高炉を空間的分布特性を有する分布定数系のプロセスとしてあらためて捉え直し、その非定常的現象を定量化する点にある。

従来、高炉に設置された各種センサの計測データは、プロセスコンピュータ(以後プロコン)へ取り込んでいたものの、
1)計測データを短いサンプリング時間で長期間大量に蓄積するハードウェアやデータベースシステムがなかったこと、
2)蓄積した大量の計測データを効率よく解析し、高炉の操業状態

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-3038

*⁽²⁾ 環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部 主任研究員 工博

*⁽³⁾ 君津製鐵所 製鉄部 グループリーダー

*⁽⁴⁾ 大分製鐵所 製鉄工場 マネジャー

(空間的分布特性や非定常的現象)を定量的に評価する手法がなかったこと、

等の理由から、プロコンに収集された計測データは一定期間経過すると破棄され、上記の視点に基づく高炉操業データの取り扱い及び定量的解析が必ずしも十分に行われていなかった。

高炉操業解析総合支援システムVenusは、近年の計算機能力の大幅な向上、大量のデジタルデータを蓄積する安価なハードウェアやデータベースシステムの普及、デジタル画像処理技術の高度化と汎用化を背景に、極力短いサンプリング時間で高炉操業データを長期間大量に蓄積し、高炉操業データを画像情報化する技術を基盤とする。

本報は、本システムにおける高炉操業データの画像情報化技術、画像情報化データの2次加工処理として新しく定義したステープ温度の忘却型時間変化率とシャフト圧力の空間変化率ベクトル、さらに、これらの画像情報を組み合わせることによる融着帯根部位置の推定・可視化方法について抄述する。

2. 高炉プロセスの概要と従来の解析手法の限界

高炉は、鉄鉱石とコークスを炉頂から互いに層状に装入し、炉下部の熱風吹き込み口(羽口)から熱風を送風してコークスを燃焼させ、燃焼で発生する高温の還元ガスによって鉄鉱石中の酸化鉄を還元・溶解し、銑鉄を製造するための移動層型向流反応器である。この反応器は徳利型の圧力容器で、炉口部、炉胸(シャフト)部、炉腹(ベリー)部、朝顔(ボッシュ)部、炉床部で構成され、シャフト角度、ボッシュ角度を有する円錐が部分的に組み合わされた縦型円筒形である(図1⁴⁾)。

羽口は炉周方向に数十本配置されており、羽口の奥のコークス充填層が高圧、高速で吹き込まれた熱風によって旋回しながら燃焼するレースウェイという空間が形成される。

高炉上部の塊状帯では、炉内における原燃料の消費に伴って炉頂から装入された鉱石とコークスが降下し、その間に鉱石の昇温及び

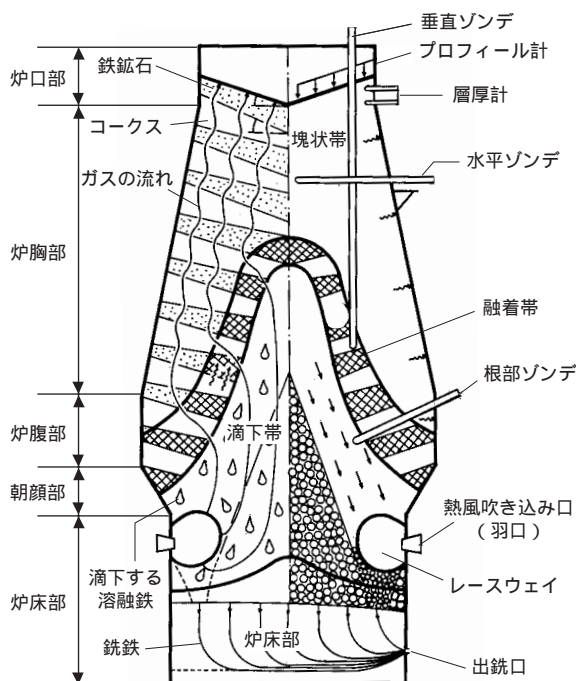


図1 高炉プロセスの概要⁴⁾

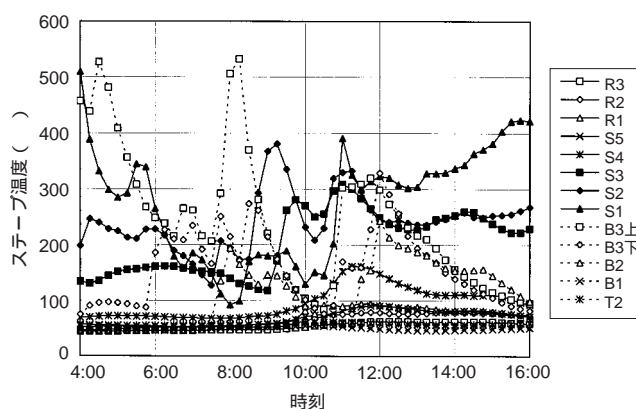


図2 ステープ温度の炉高方向分布の時系列推移(炉周角度180°)

還元ガスによる還元が進行する。

炉腹部で昇温され還元の進んだ鉱石粒子は、粘性が低下することにより軟化が開始する。軟化した鉱石粒子は相互に融着し、いわゆる融着帯を形成する。この融着した鉱石粒子層は、空隙率が低下するために通気性が悪化する。従って融着帯はこの通気性の悪い鉱石層とコークス層(コークススリット)が交互に並んだ構造となる。この構造は、過去の炉体解体調査¹²⁻¹⁶⁾や炉腹ソルデ¹⁷⁾、炉芯ソルデ¹⁸⁾による観察結果等から確認されている^{19, 20)}。

融着帯より下部の滴下帯では、融着帯下面で生成した溶鉄及び溶融スラグがコークス充填層及び炉芯を滴下し、滴下した溶鉄及び溶融スラグは炉下部の炉床部に溜まり、出鉄口から銑鉄及びスラグとして排出される。

高炉操業にとって重要な要素である高炉内のガス流れや融着帯の形成を左右するのは、鉱石とコークスの分配比の炉半径方向分布(Ore/Coke分布)である。Ore/Coke分布を装入物分布制御技術によって適正化することにより、炉内のガス流速分布、融着帯の形状、炉壁近傍の熱負荷等を制御する。これらが狙いどおり制御されているか否かを監視するには、例えば、炉体に設置された温度センサや圧力センサのデータを評価・解析する。

しかしながら、高炉は巨大な設備であり炉半径方向のみならず炉高方向及び炉周方向にも空間的分布特性を持つ。炉体に設置されたセンサは多数あり、各センサの計測データを互いに独立した項目として、例えば図2に示すように高炉の一断面を切り取り、時系列チャートとして解析しただけでは、高炉の空間的分布特性とその非定常的現象を正確に把握するには限界があった。

3. 高炉操業解析操業支援システムVenus

本システムは、1)プロコンに逐次収集される計測データを長期間デジタルデータとして蓄積するデータベースシステムと、2)パーソナルコンピュータ(PC)上で計測データの画像情報化と2次加工処理を実行するソフトウェアで構成される。プロコンとデータベースシステム及びPCはネットワークで接続され、オンライン解析が可能である。また、蓄積したデジタルデータを必要に応じて任意にデータベースシステムから抽出し、オフラインでの解析も可能である。

3.1 高炉操業データの画像情報化技術^{21, 22)}

本技術は、高炉設備上の計測データの空間的分布特性を、計測データの等値線が形成する図形情報として画像情報化し、その時系列推移を動画情報として解析することに特徴を有する。

具体的には、徳利型の高炉外形面を炉高方向・炉周方向2次元平面上に射影展開し、各計測センサの計測データの値を、各センサの3次元設置位置情報と正確に対応させて該2次元射影平面上に配置し、計測データの等値線図、コンタ図、ベクトル線図を形成する。該2次元射影平面上で計測センサが設置されていない領域に対しては、必要な空間分解能に応じた仮想グリッドを設定し、その近傍の実計測データを仮想グリッドと近傍計測センサ間の実際の3次元ユークリッド距離を用いた空間的補間処理によって仮想グリッド上の値を算出する。

計測センサは、該2次元射影平面上で必ずしも等間隔配置とはならないため、任意の計測センサ位置に対応可能で、かつオンライン解析を実現する高速な空間的補間処理及び等値線探索アルゴリズムを開発した。

炉体を形成するステープの温度、シャフト部の炉内圧力及び炉床壁の温度の画像情報化例を図3に示す。これらの画像情報を時間推移に伴い逐次更新することにより、高炉の空間的分布特性の非定常的現象を動画情報として定量化、可視化できる。

また、図2で例示した時系列チャートに対応する画像情報化の例として、ステープ温度とシャフト圧力の炉高方向分布の時系列推移図を図4に示す。

3.2 融着帯形状とガス流れ

第2章で述べたように、高炉内のガス流れを制御するには融着帯の形状が重要な因子となる。図5に炉下部の融着帯形状とガス流れの概念図の一例¹⁹⁾を示す。

図5のa)の融着帯形状は逆V字型と呼ばれる。滴下帯が長く、炉壁近傍の融着帯根元がレースウェイから十分に離れているため、羽口から導入される熱風の炉内透過は、中心ガス流れ①が支配的となる。このとき、中心ガス流れ①の一部は融着帯内コークススリットガス流れ②となり、滴下帯炉壁近傍ガス流れ③と合流して塊状帯炉壁近傍ガス流れ④を形成する。

一方、図5のb)の融着帯形状はW字型と呼ばれる。例えば、炉半径中間部のOre/Cokeが高く還元遅れの生じた融着帯の垂れ下がり部がレースウェイの奥に近づいた状態である。その結果、羽口から導入される熱風の炉内透過性が悪化し、熱風の一部が炉壁方向に分流した滴下帯炉壁近傍ガス流れ③が発達し、炉壁近傍の融着帯根元が高炉上部へ上昇したと推定される。

高炉操業中の融着帯は、操業条件や装入物分布状態により図5の

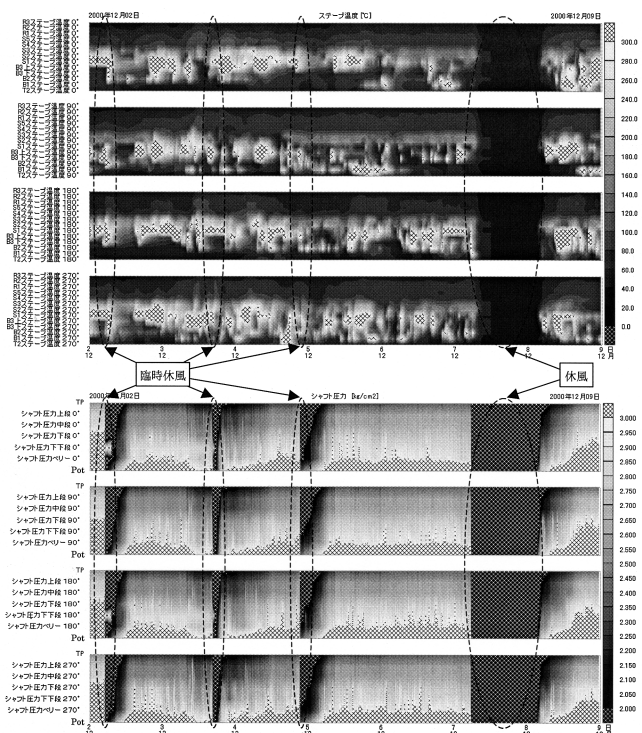


図4 ステープ温度、シャフト圧力の炉高方向分布の時系列推移図

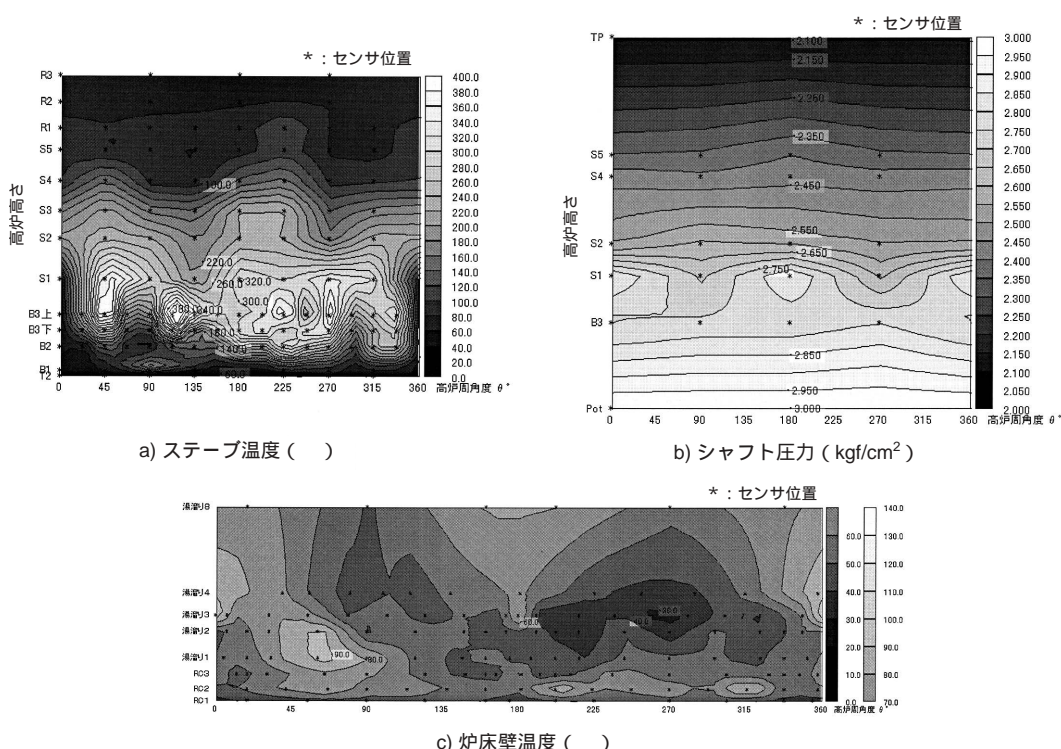


図3 ステープ温度、シャフト圧力、炉床壁温度の画像情報化例

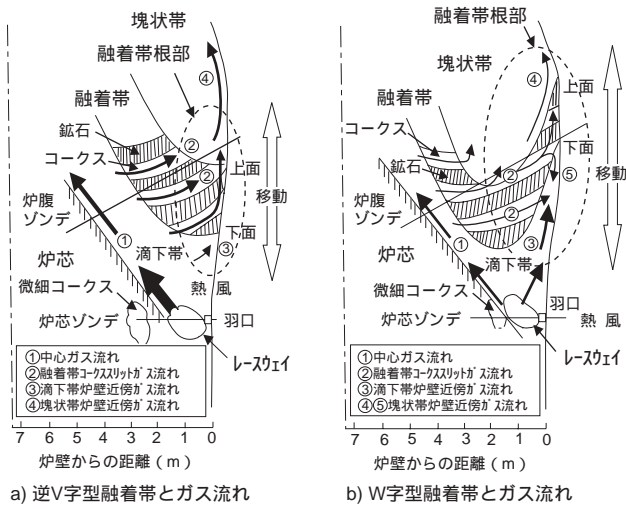


図5 融着帯形状とガス流れ

白抜き矢印で示したように全体のレベルが上下に変化するだけでなく、様々な要因により、炉周方向にも変化する。このような状況下での融着帯のレベル、厚み及び形状、特にこれらの炉周方向分布を推定することが操業管理上重要である。

このとき、図3や図4で示したステープ温度やシャフト圧力の空間的分布の画像情報化データは、炉壁近傍における融着帯形状、すなわち融着帯根部のレベル、厚み及び形状を反映していると考えられる。そこで、炉内現象に関する上記知見からこれらの画像情報を2次加工処理することにより、融着帯根部を推定し、可視化する方法を検討した。

3.3 ステープ温度の忘却型時間変化率²³⁾

融着帯ではガスの通気が悪いため、炉周方向で融着帯の厚みや形状が異なるとガスが一樣に通過せず、局部的に通気抵抗の小さい領域を通過することがたびたび生じると考えられる。このとき、ガスが選択的に通過した領域では他の領域よりステープ温度の時間的変化が著しいと推定される。そこで画像情報化データの2次加工処理として、ステープ温度の時間変化率を定義して炉高方向・炉周方向2次元射影平面上に画像情報化した(図6)。その結果、従来直感的に融着帯根部と捉えられていた領域を該時間変化率の大きい領域として顕在化することができた(図6のハッチング領域)。

このとき、ステープ温度計は炉内温度を直接計測しているのではなく、ステープ温度の計測である。ステープを含めた炉壁の熱容量

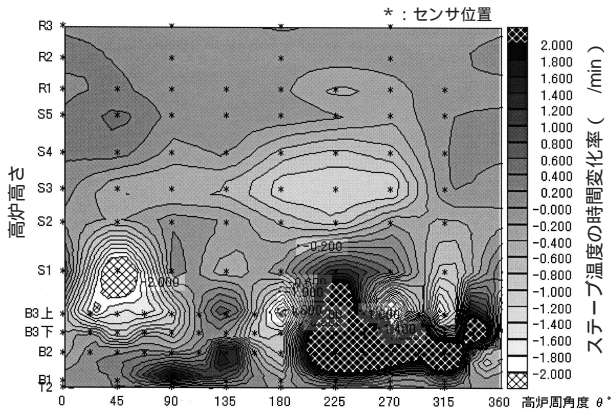


図6 ステープ温度の忘却型時間変化率の空間分布

の影響を考慮し、高炉上の地点(炉高 h , 炉半径 r , 炉周角度 θ)の時刻 t におけるステープ温度の時間変化率 $\Delta T_{(h,r,\theta,t)}$ には、式(1)の如く重み係数に指数関数を用いた忘却型移動平均基準の時間変化率を採用した。

$$\Delta T_{(h,r,\theta,t)} = \left[T_{(h,r,\theta,t)} \frac{\sum_{k=1}^n \rho^{(-m \cdot k \cdot \Delta t)} \cdot T_{(h,r,\theta,t-m \cdot k \cdot \Delta t)}}{\sum_{k=1}^n \rho^{(-m \cdot k \cdot \Delta t)}} \right] \div (m \cdot \Delta t) \text{ (}^\circ\text{C/min)}$$

式(1)

ρ : 忘却係数 (-) ($\rho > 1$)

t : サンプリング時間 (min)

n : 評価データ数 (-)

m : 基準時間数 (-)

k : 過去に遡る離散化時間カウンタ (-) ($k=1, 2, \dots, n$)

なお、図6は図3と同一時刻である(以後の図も同一時刻である)。

3.4 シャフト圧力の空間変化率ベクトル²³⁾

融着帯は通気抵抗が大きいいため、従来、シャフト圧力分布から融着帯を推定することは行われていた²⁴⁾。ここでは、シャフト圧力の空間的分布から定義する空間変化率ベクトルを用いて融着帯根部の上下位置を推定することを試みた。

図5の融着帯根部の上面では、融着帯コークススリットガス流れ②が合流することから、炉高方向のガス流れ、すなわち塊状帯炉壁近傍ガス流れ④は大きいと考えられる。一方、融着帯根部の下面は、炉壁に沿ってガスが透過上昇するときに通気抵抗が大きく、図5のb)のW字型の場合では、炉壁に沿って透過下降ガス流れ⑤の合流も予想されることから、炉高方向へのガス流れは小さいと予想される。

そこで画像情報化データの2次加工処理として、ガス流れと対応のあるシャフト圧力の空間変化率ベクトルを定義して炉高方向・炉周方向2次元射影平面上に画像情報化した(図7)。その結果、従来、融着帯根部と考えられていた領域の上面は、該ベクトルの大きさが大きく(図7の黒地白ハッチング部)、偏角が小さい領域として、下面は、該ベクトルの大きさが小さく、偏角が大きい領域として顕在化することができた。

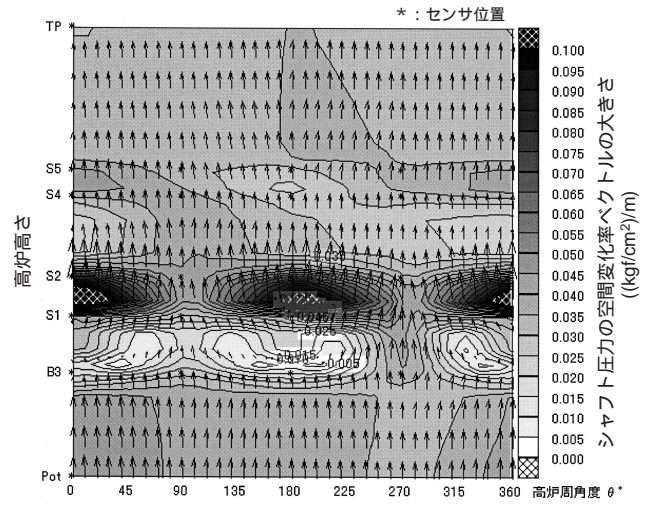


図7 シャフト圧力の空間変化率ベクトルの空間分布

このとき、シャフト圧力の空間変化率ベクトル $\vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t)$ は、徳利型の炉体形状を考慮して定義した。すなわち、シャフト上の地点a(炉高 h 、炉半径 r 、炉周角度 θ 、時刻 t)におけるシャフト圧力 $P_{(h,r,\theta,t)}$ (Pa)と、地点aにおける炉高接線 y 方向、炉周接線 l 方向の接平面Aを用いて式(2)~式(4)の如く定義し(図8)、画像情報化及びベクトル線図化した。

$$\vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t) = \left\{ \frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial l}, \frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial y} \right\} \quad \text{式(2)}$$

1) シャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさ

$$|\vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t)| = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Pa/m}) \quad \text{式(3)}$$

2) シャフト圧力の空間変化率ベクトルの偏角

$$\angle \vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t) = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial l}}{\frac{\partial P_{(h,r,\theta,t)}}{\partial y}} \right) \quad (\text{rad}) \quad \text{式(4)}$$

ただし、炉高接線 y 方向を基準軸に右回りを正とする。

$$-\pi \text{ (rad)} < \angle \vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t) \leq +\pi \text{ (rad)}$$

なお、本ベクトルの大きさ $|\vec{P}_{spv}(h,r,\theta,t)|$ は、従来の通気性指標 $\frac{\Delta P}{L}$ (Pa/m)を空間的に拡張したものに对应する。

3.5 重心位置同定法による融着帯根部の推定・可視化方法

図6で示したように、融着帯根部ではステープ温度の時間変化率が大きいと考えられる。また、図7で示したように融着帯根部の上面位置は、シャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさが大で偏角が小、下面位置は該ベクトルの大きさが小で偏角が大と考えられる。

そこで、これらの等値線に閾値を設定し、閾値の等値線が形成する図形を切り出し、これらの図形の外形線を上側曲線と下側曲線に分割して、各曲線を平均化することにより、融着帯根部の上面位置及び下面位置の炉周方向分布を推定し、可視化する方法を考案した。

鉄鋼ステープ高炉の閾値の例を表1に、閾値の等値線が形成する

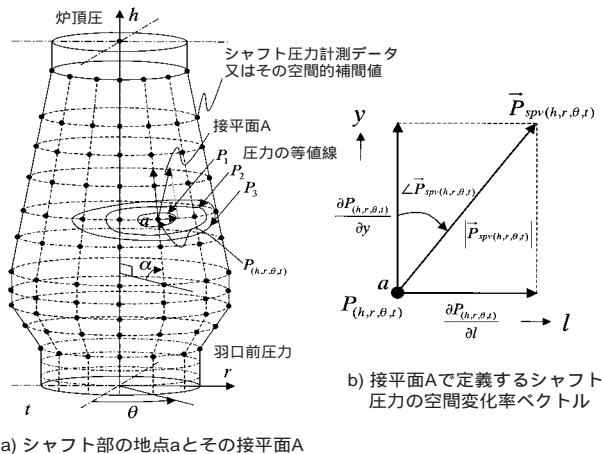


図8 シャフト圧力の空間変化率ベクトルの定義

表1 閾値の例

シャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさ	上閾値	$P_{spv} _{UTH}$	0.08(kgf/cm ²)/m
	下閾値	$P_{spv} _{LTH}$	0.01(kgf/cm ²)/m
シャフト圧力の空間変化率ベクトルの偏角	閾値	$\angle \vec{P}_{spv} _{TH}$	90°
ステープ温度の忘却型時間変化率	上閾値	\dot{T}_{UTH}	+0.8 /min
	下閾値	\dot{T}_{LTH}	-0.8 /min
ステープ温度	上閾値	T_{UTH}	320
	下閾値	T_{LTH}	180

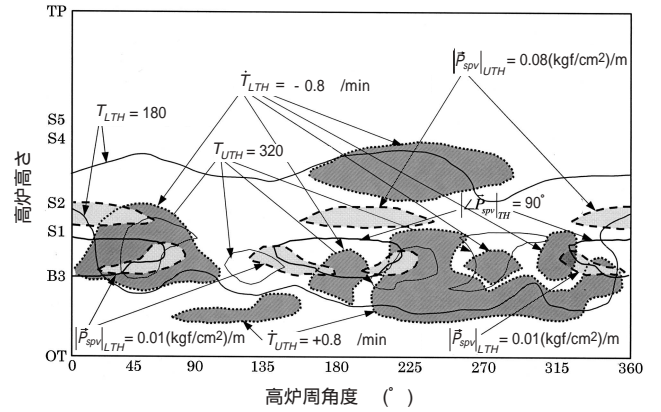


図9 閾値が形成する図形領域の例

図形の例を図9に示す。

ここで、炉周角度 $(^\circ)$ において、融着帯根部上面高さ U_j (m)、融着帯根部下面高さ L_j (m)で挟まれる領域として融着帯根部が存在し、その炉高方向重心位置 G_j (m)がこれらの図形の平均重心位置 $\bar{G}_{(j)}$ (m)と一致して存在すると仮定する。すなわち、重心位置同定法は、 U_j 及び L_j を、式(5)及び式(6)を用いて重み付き平均化処理で算出する。

$$U_{(\theta)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{1(\theta)}} w_1 \cdot (h_{1i(\theta)}^U + h_{1i(\theta)}^L)}{\sum_{i=1}^{N_{1(\theta)}} w_1} + \frac{\sum_{j=4}^7 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} (w_j \cdot h_{ji(\theta)}^U)}{\sum_{j=4}^7 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} w_j} \quad \text{式(5)}$$

$$L_{(\theta)} = \frac{\sum_{j=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} w_j \cdot (h_{ji(\theta)}^U + h_{ji(\theta)}^L)}{\sum_{j=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} w_j} + \frac{\sum_{j=4}^7 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} (w_j \cdot h_{ji(\theta)}^L)}{\sum_{j=4}^7 \sum_{i=1}^{N_{j(\theta)}} w_j} \quad \text{式(6)}$$

ただし、 $L_{(\theta)} < U_{(\theta)} \leq h_{7i(\theta)}^U$ 式(7)

ここで、 $h_{ji(\theta)}^U$: 図形領域種類 j の上側曲線 (m)

$h_{ji(\theta)}^L$: 図形領域種類 j の下側曲線 (m)

$N_{j(\theta)}$: 炉周角度 θ に存在する図形種類 j の個数 (-)

i : 炉周角度 θ に存在する図形種類 j のカウント (-)

w_i : 図形領域種類 j に対する重み係数 (-)

式(5)及び式(6)の第1項はシャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさと偏角に関する項であり、第2項はステープ温度及びステープ温度の時間変化率に関する項である。

式(5)及び式(6)の両辺を足して2で割れば式(8)を得る。

$$G_{(\theta)} = \bar{G}(\theta) \quad \text{式(8)}$$

閾値と図形領域種類 ($j=1, 2, \dots, 7$) 及び上側・下側曲線の関係を表2に、図形領域の上側・下側曲線の例を図10に、融着帯根部の推定・

表2 閾値と図形領域種類及び上側・下側曲線の関係

図形領域分割曲線の炉高座標 $h_{(j)}$ (m)	上側曲線	下側曲線
シャフト圧力の空間変化率ベクトルの大きさ	上閾値 $h_{1i}^U = P_{spv} _{UTH(i)}^U$	$h_{1i}^L = P_{spv} _{UTH(i)}^L$
	下閾値 $h_{2i}^U = P_{spv} _{LTH(i)}^U$	$h_{2i}^L = P_{spv} _{LTH(i)}^L$
シャフト圧力の空間変化率ベクトルの偏角	閾値 $h_{3i}^U = P_{spv} _{TH(i)}^U$	$h_{3i}^L = P_{spv} _{TH(i)}^L$
ステープ温度の忘却型時間変化率	上閾値 $h_{4i}^U = \dot{T}_{UTH(i)}^U$	$h_{4i}^L = \dot{T}_{UTH(i)}^L$
	下閾値 $h_{5i}^U = \dot{T}_{LTH(i)}^U$	$h_{5i}^L = \dot{T}_{LTH(i)}^L$
ステープ温度	上閾値 $h_{6i}^U = T_{UTH(i)}^U$	$h_{6i}^L = T_{UTH(i)}^L$
	下閾値 $h_{7i}^U = T_{UTH(i)}^U$	$h_{7i}^L = T_{LTH(i)}^L$

可視化実施例を図11に示す。図11で計測データの時系列推移に伴う非定常的現象を操業条件と対応づけて解析すると高炉操業状態の全体的な挙動がよく把握できる。

今後、実操業知見や物理モデルシミュレータ²⁵⁾による計算結果との相互評価を通じ、各閾値や重み係数を更に検証していく予定である。

4. 結 言

高炉操業解析総合支援システムVenusの開発により、従来、計測データの瞬時値や時系列チャートから経験によって各自の頭脳中で想像してきた高炉の全体的な操業状態イメージを客観的な画像情報として可視化できた。また、高炉の空間的分布特性の非定常的現象を定量的に評価することが可能となり、実炉における操業監視に活用している。

さらに計測データの画像情報に対し、時間的及び空間的な2次加工処理を実施することにより、計測データが潜在的に持っていた融着帯根部の炉周方向分布といった高炉操業上重要な管理情報を顕在化し得る知見を得た。

今後、本システムの操業管理への有効性を検証することにより、空間的分布特性を有する高炉の非定常的現象の定量的な評価技術、更に、柔軟かつ適切に操業ガイダンスを提示する新しいモデリング技術及びシステムの開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 八木順一郎:鉄と鋼 69(10),1242(1983)
- 2) 高谷幸司:鉄と鋼 81(11),1031(1995)
- 3) 埜上洋:鉄と鋼 89(2),211(2003)
- 4) 杉山喬,須賀田正泰:製鉄研究 (325),34(1987)
- 5) 八木順一郎,秋山友宏:CAMP-ISIJ 2,2(1989)
- 6) 山崎,佐藤,木口,飯田,福村:CAMP-ISIJ 2,6(1989)
- 7) 永井,新井,松田,門口,矢場田:CAMP-ISIJ 2,10(1989)
- 8) 大塚,松岡,網永,吉田,横井,稲田:CAMP-ISIJ 2,14(1989)
- 9) 財部,中森,織田,平,渡辺,関:CAMP-ISIJ 2,18(1989)
- 10) 丹羽,炭竈,櫻井,青木:CAMP-ISIJ 2,22(1989)
- 11) Takatani, K., Inada, T., Ujisawa, Y.: ISIJ Int 39(1),15(1999)
- 12) 神原,萩原,重見,近藤,金山,若林,平本:鉄と鋼 62(5),535(1976)
- 13) 下村,西川,有野,片山,肥田,磯山:鉄と鋼 62(5),547(1976)
- 14) 佐々木,斧,鈴木,奥野,吉沢,中村:鉄と鋼 62(5),559(1976)
- 15) 小嶋,西,山口,仲摩,井田:鉄と鋼 62(5),570(1976)
- 16) 日本鉄鋼協会製鉄部会コークス部会共同研究会編:わが国における製鉄技術の進歩(特別報告書No.24).日本鉄鋼協会,1977-5 p.49-52
- 17) 和栗,金森,樋口,土井,宮辺:鉄と鋼 69,883(1983)
- 18) 和栗,望月,井上,平田,樋口,田村:鉄と鋼 71,862(1985)
- 19) 和栗,森下,芦村,井上,平田,杉山:鉄と鋼 72, A9(1986)
- 20) 芦村,森下,井上,樋口,馬場,金森,和栗:鉄と鋼 80(6),457(1994)
- 21) 伊藤雅浩,松崎真六:CAMP-ISIJ .15,927(2002)
- 22) 松崎真六,伊藤雅浩:CAMP-ISIJ .15,928(2002)
- 23) 伊藤雅浩,松崎真六:CAMP-ISIJ .16,300(2003)
- 24) 加瀬正司,須賀田正泰,山口一良:鉄と鋼 66(13),1928(1980)
- 25) Naito, M., Nishimura, T.: Asia Steel International Conference 2000. Vol.B(Ironmaking), 2000, p.268

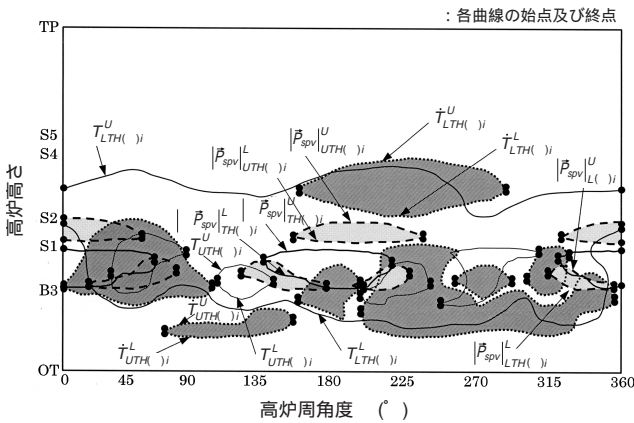


図10 図形領域の上側・下側曲線の例

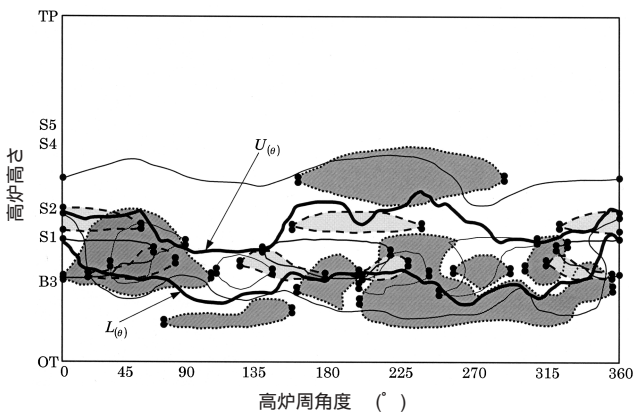


図11 融着帯根部の推定・可視化例