

高炉の非定常現象の可視化方法の開発

松崎 眞六*・伊藤 雅浩*²・内藤 誠章*・磯部 誠*³・柿内 一元*⁴

Development of a Visual Information Technique of Nonstationary Fluctuations in a Blast Furnace Process

Shinroku MATSUZAKI, Masahiro ITOU, Masaaki NAITO, Makoto ISOBE and Kazumoto KAKIUCHI

Synopsis : By turning stove temperature and shaft pressure data, collected by a numbers of sensors spatially located circumferentially and vertically in the blast furnace, into images distributed in two dimensions, we have succeeded in quantitatively and objectively visualizing shaft pressure variations and spatial changes caused by slipping in the blast furnace. In addition, combining the two-dimensional distribution of secondarily processed data of changes in space and time with the progress of operation data enables early detection of shaft pressure fluctuations. The conjecture that the uneven distribution of voids in the blast furnace may be the cause of shaft pressure fluctuations has been confirmed by our model experiments. It has been also found that there exists a relationship between the cohesive zone root position, assumed by the visualized two-dimensional image of the stove temperature change over time, and the origins of shaft pressure fluctuations.

Key words : blast furnace; pressure distribution; stove temperature; unstable operation; cohesive zone.

1. 緒言

高炉での還元材比低減は、CO₂発生による地球温暖化問題、石炭の採取による化石燃料の枯渇など、地球規模的な環境エネルギー問題を解決する上で重要な課題である。また、製鉄工程においても、コークス炉の寿命延長、生産能力の向上等の観点から重要な課題である。還元材比低減の観点から、鉱石層の還元性の向上やコークスの反応性向上など還元ガスの利用率を高める技術、Siの低減など所要熱量を減少させる技術などが開発されている。しかしこれらの技術を用いて実際に還元材比の低減を行うためには、熱的に限界ともいえる状態での安定操業の継続が不可欠である。このためには、まず不安定な操業すなわち非定常操業における現象の解明が必要となる。

高炉での非定常現象は、原燃料成分の変動などに基づく日常的な変動、日オーダーの熱変動や荷下がり変動、あるいは操業不調に至る大規模な変動までさまざまである。これらの現象は時間的にみれば数分から数時間に渡り、原因としては熱移動、反応、ガス流れ、固体流れの異常に基づくものなどがある。具体的に現れる現象として、溶銑温度の急激な低下、炉頂ガス成分値の変動、スリップ、ドロップ、棚つりなどの装入物の降下異常、シャフト圧力変動、

ガス抜け、吹き抜けなどのガス流れの異常などがある (Fig. 1参照)。これらの現象は相互に密接に絡み合っていることが多く、過去にもこれらの現象について多くの解析が行われてきた¹⁻⁶⁾。

一方、これらの非定常的な現象を解明、制御するために、各種物理モデルが開発されており⁷⁻¹⁰⁾、特に近年非定常的

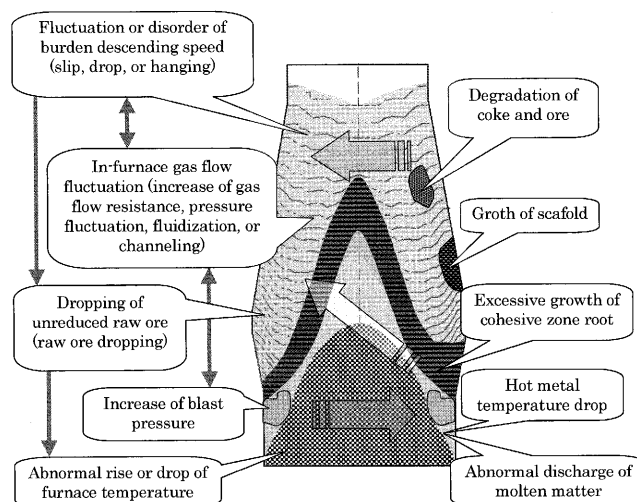


Fig. 1. Relationship between the phenomena and causes of operating condition disorder.

原著論文: ISIJ Int., Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1452-1460

平成18年4月24日受付 平成18年5月17日受理 (Received on Apr. 24, 2006; Accepted on May 17, 2006; originally published in ISIJ Int., Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1452-1460)

- * 新日本製鐵 (株) 技術開発本部環境・プロセス研究開発センター製銑研究開発部 (Ironmaking R & D Div., Environment & Process Technology Center, Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi Futsu 293-8511)
- *² 新日本製鐵 (株) 技術開発本部環境・プロセス研究開発センターシステム制御技術部 (System & Control Engineering Div., Environment & Process Technology Center, Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation)
- *³ 新日本製鐵 (株) 大分製鐵所製銑工場 (Oita Works Ironmaking Div., Nippon Steel Corporation)
- *⁴ 新日本製鐵 (株) 君津製鐵所製銑部 (Kimitsu Works Ironmaking Div., Nippon Steel Corporation)

現象（動的挙動、動特性）を定量的に評価・解析するため、3次元非定常物理モデル¹¹⁾が開発されつつある。

また制御する上でも過去にAIの応用¹²⁻¹⁷⁾等により定量的な炉内解析技術や制御技術が開発されてきた。しかしながら、このような物理モデルやAIの発展、あるいは多数の検出端の開発にもかかわらず、実際の高炉での非定常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。

このように非定常現象の把握や予測制御が必ずしも自動化されていない理由のひとつとして、ハードの未発達があった。高炉の非定常現象は、高炉の炉半径方向、炉高さ方向、円周方向の特定の領域で生じるため、2次元、あるいは3次元的なデータの採取と解析が必要となる。また時間軸の観点からも、先に述べたように数分から数時間、あるいは数日に渡る現象を連続的に追跡してゆく必要がある。しかしながら、従来高炉に設置された各種センサの計測データは、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必ずしも整備されていなかった。また、蓄積された大量の計測データを2次元あるいは3次元的に空間的に効率よく定量的に解析し、評価する手法も充分でなかった、等の理由から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。

しかしながら、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が実現可能となってきた。

本報では、上記技術を活用し、ステープ温度およびシャフト圧力のデータを2次元的に可視化することにより、高炉の非定常現象の解析に活用した結果について報告する。

なお、本可視化画像システムは、現場においては、分以下の時間刻みで時事刻々更新され、操業監視に活用されている。

2. シャフト圧力変動、荷下がり変動の発生例

まず、非定常的な変動すなわちシャフト圧力変動、スリップの発生時の状況について、従来から監視されている差指や、炉頂ガス成分分析値の推移図を用い、炉内の充填状況、還元等の観点から解析した。

Fig. 2に非定常操業時の推移図例を示す。6時頃ボッシュからベリーにかけてのシャフト圧力が急上昇し、圧力が元に戻る過程で7時20分頃に大きなスリップが発生している。炉頂ガスの分析結果から、スリップ発生時の2時間ほど前からCOの上昇、CO₂の低下、結果としてCO+CO₂の上昇、あわせて炉頂温度の上昇が見られる。このことは炉

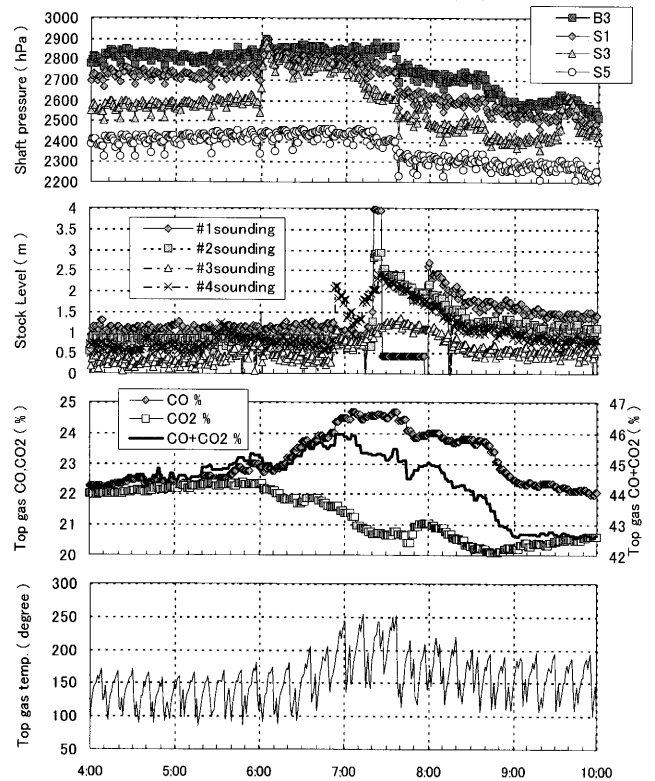


Fig. 2. Example of unstable operation data.

内の特定の部位にバブリング領域が発生し、装入物の充填状態が疎充填となり、還元ガスが高温のまま炉頂から排出されていることを推測させる。また高温かつCO濃度の高いガスが炉内を上昇するため、ソリューションロス反応領域も広がり、CO+CO₂が増加するものと考えられる。スリップが発生した後は、装入物が急落下するため、還元やソリューションロス反応が抑制されCOおよびCO₂が低下し、結果としてCO+CO₂が低下する。

このように、操業推移を分析することにより高炉の炉内で生じた非定常的な変化はある程度推定でき、圧力変動、スリップ等の荷下がり変動の規模と発生タイミングを事前に予知するための知見が得られると考えられる。

しかしながら、これらの情報だけでは、炉高さ方向や円周方向の空間的、あるいは時間的に変化する挙動を推定することは難しい。従って炉体表面情報だけではあるが、空間的に2次元の情報が見られるステープ温度とシャフト圧力について、2次元的な挙動の可視化と指標化を行った。

3. ステープ温度、シャフト圧力データの2次元可視化

3.1 データの可視化方法¹⁸⁻²¹⁾

高炉に設置されているステープ温度計やシャフト圧力計のセンサ位置を炉高方向・炉周方向2次元平面に射影展開し演算処理することにより、センサデータの等値線図、コンタ図、ベクトル線図を表面した。センサが設置されてい

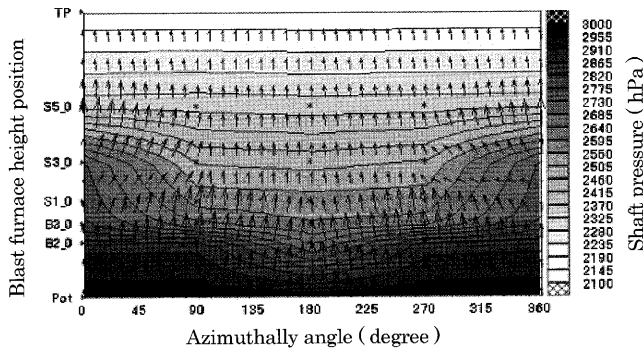


Fig. 3. Two-dimensional image of shaft pressure.

ない領域の値は、既設センサの値を空間的に補間処理することにより算出した。

具体的には次の手順に描画処理を行う。①徳利型をした高炉外形面を炉高方向・炉周方向2次元平面に射影展開する、②各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2次元射影平面上に配置する、③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。④2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、仮想グリッドを設定し、その近傍の実計測データを用いて、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。⑤センサは、2次元射影平面上で必ずしも等間隔配置とはなっていないため、任意のセンサ位置に対応し、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。

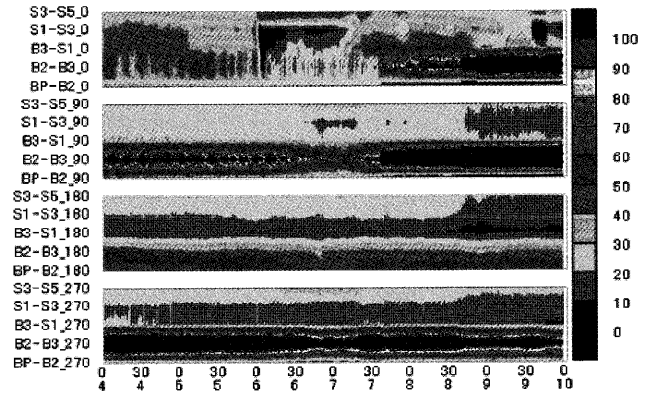
Fig. 3にシャフト圧力の2次元可視化例を示す。図の横軸は炉周角度、縦軸は炉の高さ方向を、(*)は測定センサの位置を示している。また図中の矢印はシャフト圧力の空間変化率ベクトル、いわゆる差圧を示したものである。

Fig. 2で示した推移図に比べ、Fig. 3では圧力変動の発生位置や上昇経路の空間的な変化が視覚的に容易に判断されることがわかる。ステープ温度についても同様の2次元可視化を行った。また、高炉内の種々の現象は時間的、空間的な遅れを伴って変化すると考えられるため、現時点の値に加えて、次節に説明するように、空間変化率だけでなく、過去の履歴を考慮した時間変化率も計算し、2次元可視化した。

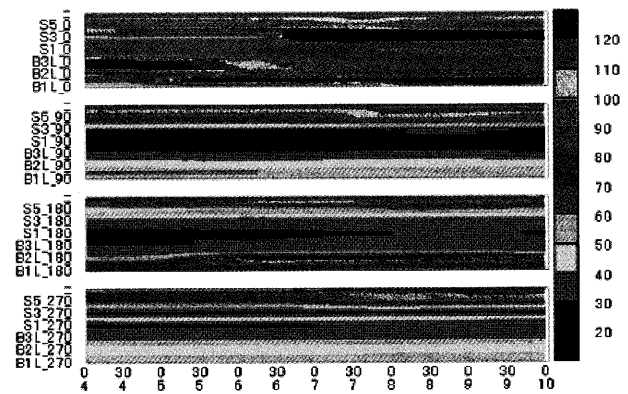
Fig. 4は高炉の円周方向の4方向（上から0度、90度、180度、270度方向）のシャフト差圧及びステープ温度の高さ方向の分布の推移図を示したものである。横軸の時間軸はFig. 2と同様であるが、6時頃に、主として0度方向でシャフト圧変動が生じ、合わせてステープ温度が上昇していることが視覚的に容易に理解可能である。

3.2 2次元可視化画像推移によるシャフト圧力変動の解析

Fig. 2の推移図に対応する時期の90分ごとのシャフト圧力分布、シャフト差圧分布およびシャフト圧力時間変化率、



a) Distribution of shaft pressure drop (hPa/m)



b) Stave temperature (degree)

Fig. 4. Time trends of height direction distribution of stave temperature and shaft pressure.

ステープ温度分布およびステープ温度の時間変化率を、Fig. 3と同様の円周方向と高さ方向の2次元可視化画像として表現したものを、Fig. 5のa)~e)に示す。

Fig. 2から、シャフト圧力の急上昇は6時頃、スリップは7時20分頃発生したことがわかるが、シャフト圧力分布(Fig. 5a)をみると0°方向で5時半と、7時の間に炉の下部の圧力が急上昇したことがわかる。また、スリップ後の8時の時点で炉下部の圧力上昇は収まったものの、円周方向の圧力分布のアンバランスは残っており、圧力変動の原因がまだ完全には解消されていないことを示唆していると考えられる。

ステープ温度(Fig. 5d)は、7時の時点で0°、360°方向で温度が上昇しており、シャフト圧力上昇との関係が見られる。Fig. 5e)の時間変化率では、5時半頃360°方向のポッシュ部、シャフト下部レベルですでに温度上昇に変化が見られ、シャフト圧力変化の兆候が現れている。また、Fig. 5c)は圧力分布の時間変化率を示しており、変化がなければ一面薄いグレーとなる。Fig. 5c)から5時半の前後でシャフト圧力分布が大きく変化したことがわかる。これらの情報をまとめると5時半頃に、炉内の特定の部位にバブリング領域が発生し、装入物の充填状態が大きく変化したものと考えられる。また、そういった観点でガスクロのデータ変化を

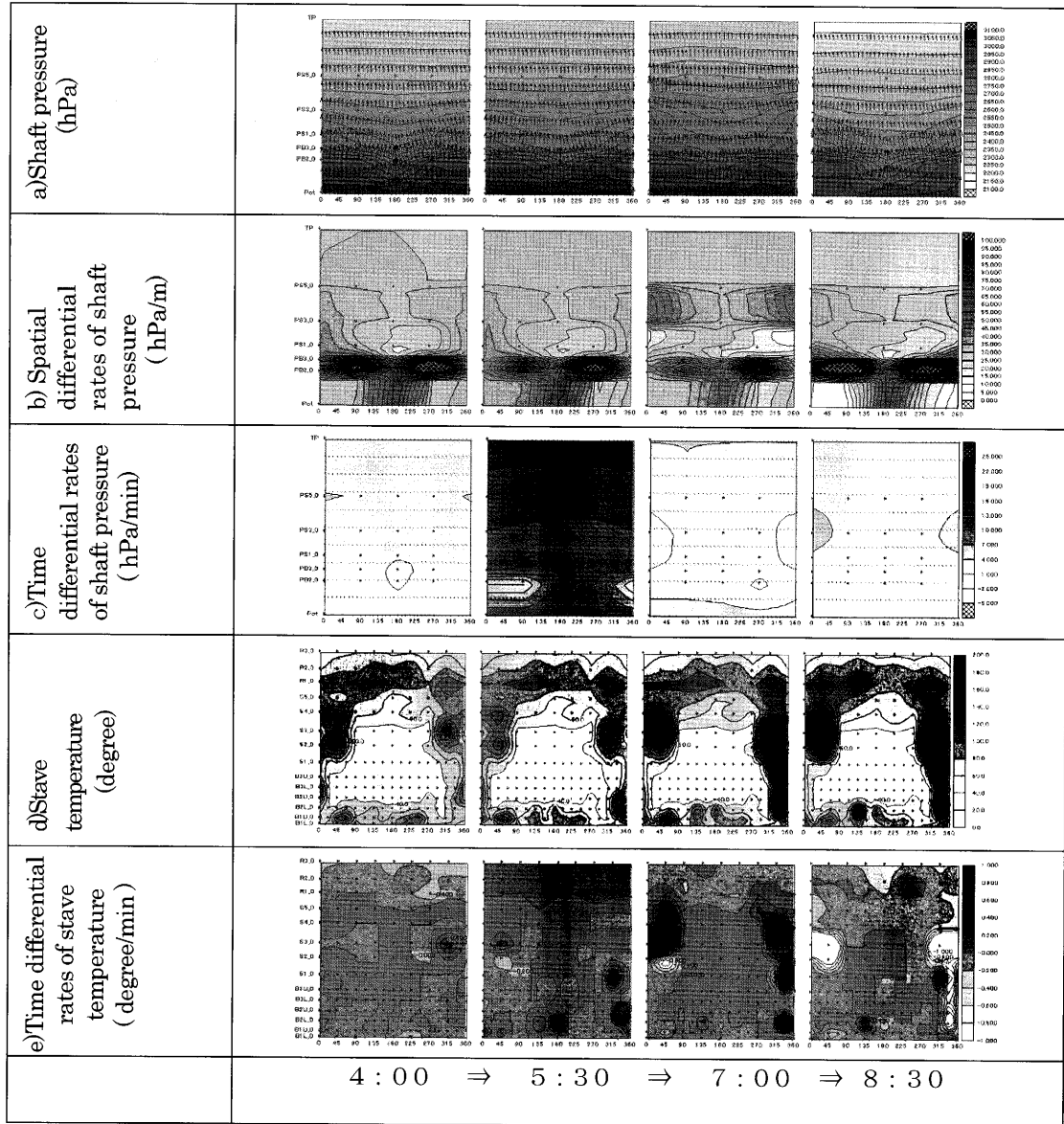


Fig. 5. Time trend of visual image of sensor data.

観察すると、5時過ぎからCOが増加しており、パブリングの兆候が現れている。

また、シャフト圧力ベクトル図の2次元可視化画像 Fig. 5b)の推移を詳細に観察すると、シャフト圧力の変動は、シャフト差圧が異常に上昇した領域（周囲に比べて圧力勾配の大きい場所）と異常に低下した領域（周囲に比べて圧力勾配の小さい場所）が主として高さ方向にペアで発生し、この両者の圧力勾配の異常値が解消するときに生じることがわかる⁴⁾。この時、同時に荷下がり停滞が生じており、荷下がり停滞が解消すること、すなわちスリップドロップが生じることにより、シャフト圧変動が生じ、圧力勾配の異常が解消すると考えられる。

このように、ステーブ温度や圧力分布およびその解析値を2次元的に可視化することにより、炉内の高さ方向、円周方向の空間的な変化および時間的な推移が容易に把握可能となる。また、シャフト圧力変動について、炉頂部の検

出端だけを用いるより、より早くかつ確実な検出が可能となる。

4. 模型実験によるシャフト圧力可視化画像の検証

前節で解析したように、シャフト圧力やステーブ温度の2次元可視化画像の変化から、炉内のガス流れや固体流れの状況を推定することが可能である。しかしながら、2次元可視化画像では奥行きすなわち炉半径方向の情報がわからないため、2次元可視化画像の変化の原因を特定することができない。炉内の3次元的な状況については、模型実験や3次元非定常モデル計算により、間接的に推定することが必要となる。

ここでは、シャフト圧力分布の変動の原因が、高炉炉壁部に付着物、粉等が蓄積したことによるもの、あるいは低

高密度層が発生したことによるもの、を想定して、模型実験を行い、炉壁での圧力分布を測定し、解析した結果を報告する。

4.1 実験装置及び実験方法

実験装置は実高炉の約1-10サイズで、炉本体はアクリル製の矩形である（幅500mm、高さ約2000mm、奥行き100mm）。両側壁の下方からガスが送風可能であり、背面には圧力測定用の孔を複数個開けている。

アクリル製ホッパーの中段に、付着物を模した木製ブロックや空洞を模した鋼製の立方体の金網を設置し、3mmのアルミナ球（嵩密度が約 2190 kg/m^3 、空隙率が0.393）を充填する。なお、木製ブロックも金網も片面はホッパーの背面に密着させるが、奥行きはホッパーの間までで、反対側の壁とは接していない。

炉の下部からアルミナ球を排出しつつ、上部からアルミナ球を補充し、移動層の状態とする。あわせて、炉下部側壁から空気を送風する。同時にアルミナ粒子が炉下部方向に移動する状態で、背面に設置した圧力孔での圧力分布を圧力センサで測定する。センサは、高さ方向には100mmおきに8箇所、半径方向には中心と200mm離れた炉壁部の2箇所の、合計16箇所設置した。送風流量は 1000 L/min で空塔ガス流速は 0.333 m/s となり、平均の圧力損失は 1.65 kPa/m となる。

4.2 実験結果

実験は次の3つのケースで行った。1)中央部に金網で空洞を形成した場合。2)中央部に木製ブロックを設置した場合。3)中央上部に木製ブロックを、中央下部に金網で空洞を形成した場合。

Fig. 7に実験結果を示す。図は、上段にシャフト圧力分布、下段にシャフト圧力分布から計算したシャフト圧力勾

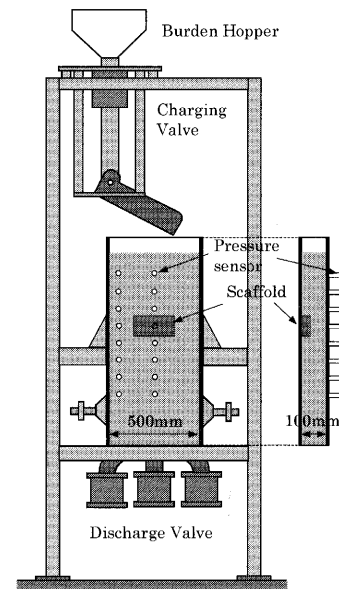


Fig. 6. Schematic of the experimental apparatus.

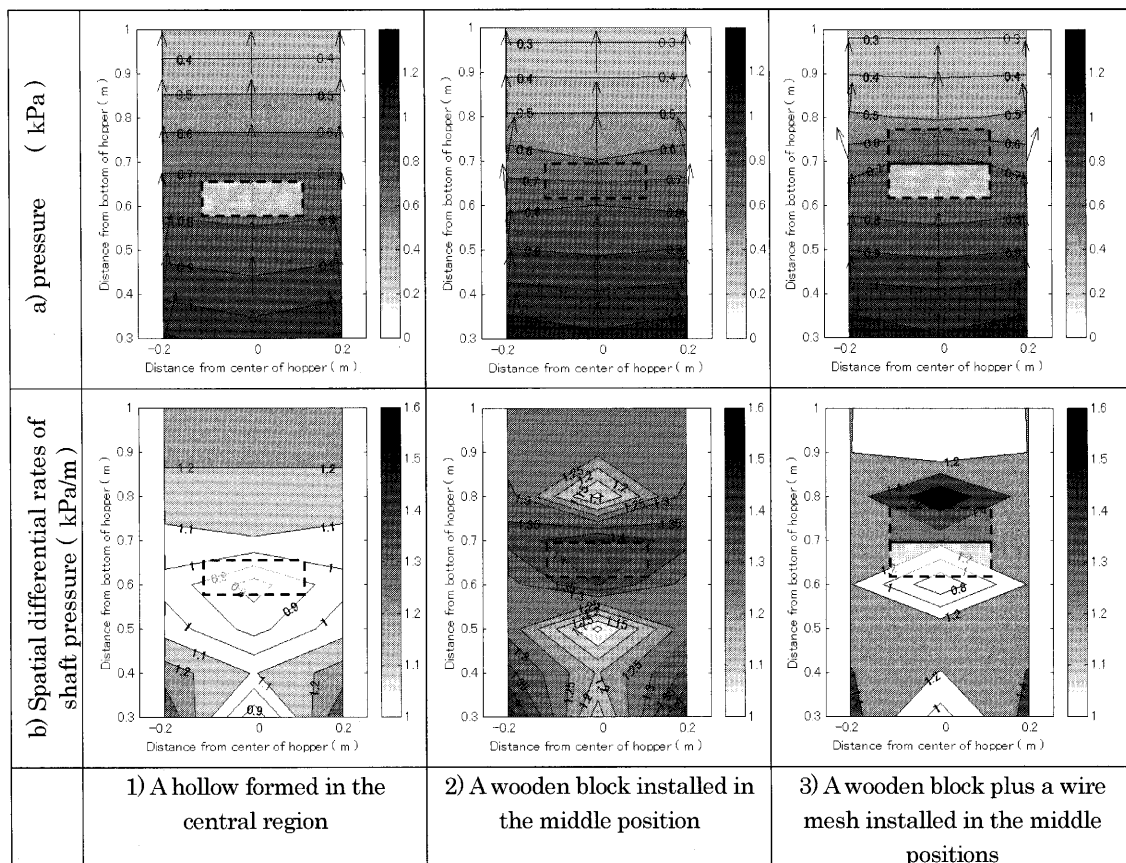


Fig. 7. Experimental results.

配分布（いわゆる圧力損失）を示している。シャフト圧力の横方向の測定位置は炉中心と炉の左側だけであるが（Fig. 6参照）、左右対称であると仮定して右側の圧力分布や圧力勾配分布も計算した。図中、金網の設置位置を白色矩形で、木製ブロックを灰色矩形で表示した。これから、空洞の位置では圧力勾配が小さく、付着物等を想定した木製ブロックの存在する部分の圧力勾配は高いことがわかる。また木製ブロックと空洞が上下に存在する場合にも、木製ブロックの近傍に圧力勾配の高い領域が、空洞の近傍に圧力勾配の小さい領域が出現することがわかる。

4.3 Discussion

実験結果から、実炉で観察されるような圧力勾配の高い領域と、圧力勾配の小さい領域領域がペアで生じるのは、b)のように低空隙率領域が存在しその下部が相対的に空隙率が高い場合か、c)のように、低空隙率領域と高空隙率領域がペアで生じる場合と想定される。

実炉を想定した場合、前者は、何らかの要因で荷下がり停滞し（いわゆる棚つり）その部分には粉などが蓄積し、下部は装入物が降下することにより空洞が生じる場合、後者は、付着物や粉の蓄積領域などで低空隙率領域が形成され、この低空隙率領域近傍で荷下がりの乱れや停滞などから結果的に高空隙率が生じた場合、などが例として考えられる。

このように、模型実験の結果と、実炉のシャフト圧力の2次元可視化画像を対比させることにより、実炉の炉内の炉壁部近傍での充填層の状態が推定できる可能性を示している。

5. シャフト圧力変動と融着帯根位置の関係

実験結果から、シャフト圧力分布が不均一になる原因として、部分的に空隙率が高いあるいは低い領域の存在が考えられる。具体的には、付着物や微粉の蓄積、融着帯の根部の円周バランス悪化など、さまざまな原因が考えられる。ここでは、原因を融着帯根部に特定して検討を行った。すなわち、ステーブ温度の2次元可視化画像を用いて推定した融着帯の根位置と、シャフト圧力変動の発生位置との関係を調べた。

5.1 融着帯根位置の推定

融着帯の推定方法は過去、さまざまに報告されている²²⁻³²⁾。いずれも、シャフト圧力や炉体温度を用いたものである。本2次元可視化画像を用いた推定方法にも、ステーブ温度分布を用いる方法と、シャフト圧力分布を用いる方法が考えられる。

ステーブ温度を用いる方法としては、その時間変化率から推定する方法が考えられる。融着帯ではガスの通気抵抗が大きいため、融着帯を通過するガスは必ずしもプラグフローにならず部分的なガス抜けが頻繁に生じる。この結果、

融着帯の根部に相当する位置ではステーブ温度が局所的に変化すると考えられる。したがって、ステーブ温度の単位時間あたりの温度変化量が大きい領域が融着帯の根位置を表していると仮定できる。

一方、シャフト圧力分布を用いる方法としては、その空間変化率から推定する方法が考えられる。通常融着帯の圧力損失は、シャフト部の倍程度であり、例えば中心流の抑制、粉の蓄積等により通気悪化が生じた際、シャフト部であれば比較的ガス流れが分散し均一化するが、融着帯の根においては通気抵抗が大きいため、横方向にガスが分散しにくく、炉の上部方向へのガス抜けとなり、異常に高い圧力損失を示すと考えられる。すなわち、ガス抜けによる圧力上昇は融着帯を顕在化させるセンサの役割を果たしており、圧力の異常上昇位置からも融着帯根位置が検知できる可能性がある。

しかしながら、シャフト圧力計は融着帯が存在すると想定されるボッシュ部では詰まり等の問題で設置点数が少ないため、本論文ではステーブ温度の時間変化率から融着帯根位置を推定した。

(1) ステーブ温度を用いた融着帯根レベル推定方法

ステーブ温度分布から時間変化率の等値線図を作成し、時間変化率が大きい、あるいは小さい閾値を設定し、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た³³⁾。

本推定方法では、融着帯周辺での小規模な吹き抜けを仮定して検知手段として用いている。従って、このような現象が生じない時や、融着帯起因以外の大規模な吹き抜けが生じた場合には、融着帯根部位置を推定することはできない。従って一定時間、例えば8時間の間で検知される根部領域を、重ね合わせるにより、平均的な融着帯領域を推定する。また、このような処理にて、付着物等による検地能力の低下も緩和可能であると考えられる。

(2) 融着帯根レベル推定例

実高炉で融着帯の根領域を推定した例を Fig. 8中の太実線で示す。融着帯を判定する時のステーブ温度の時間変化

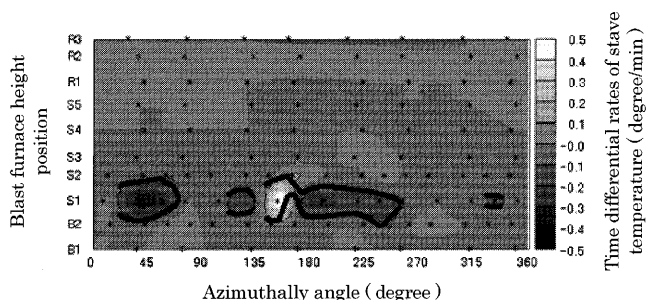


Fig. 8. Estimation result of root of cohesive zone by time differential rates of stave temperature.

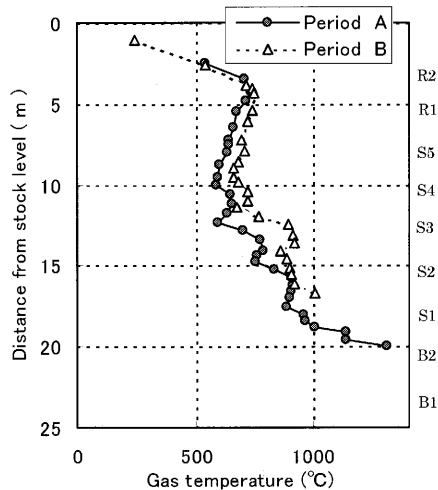


Fig. 9. Measurement result of gas temperature at Peripheral zone by vertical probe.

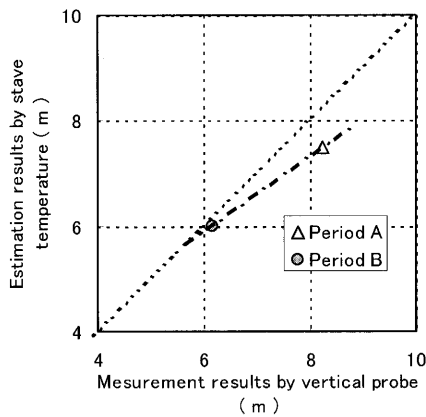


Fig. 10. Position of upper root of cohesive zone from tuyere level.

率の上下限値は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。この判定基準は高炉の操業状態や稼働年数を考慮して決める必要がある。Fig. 8から、部分的ではあるが融着帯の根レベルと想定される領域が判定できることがわかる。これらの領域を時間を追って追跡することにより炉半径方向の融着帯根位置の分布と時間変動が定量化可能である。

(3) 垂直ゾンデによる実測値との比較

実高炉での垂直ゾンデの測定結果と計算結果の比較例を示す。Fig. 9から期間A, Bで融着帯上面のレベルが2m程度変化しており、Fig.10から、融着帯上面レベルは、ステープ温度時間変化率から求めた融着帯根レベルとほぼ対応している事がわかる。

5.2 炉況不調時の融着帯根位置の変化

シャフト圧力変動はシャフト差圧の異常上昇と異常低下がペアで発生する領域を起点とし、この差圧異常が解消することによって発生することは、先に述べた。このシャフト差圧が異常に上昇する点をシャフト圧力分布から求めた。その推移をFig.11に示す。

また、ステープ温度の時間変化率から推定した融着帯根

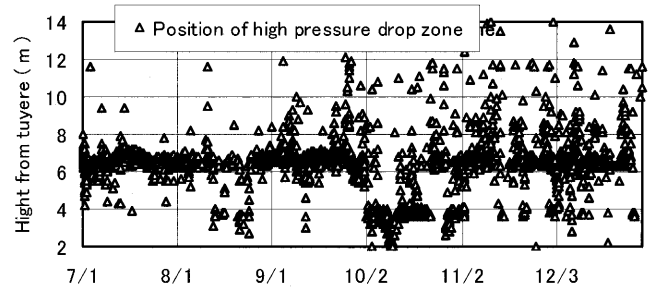


Fig. 11. Time trend of position of high pressure drop zone.

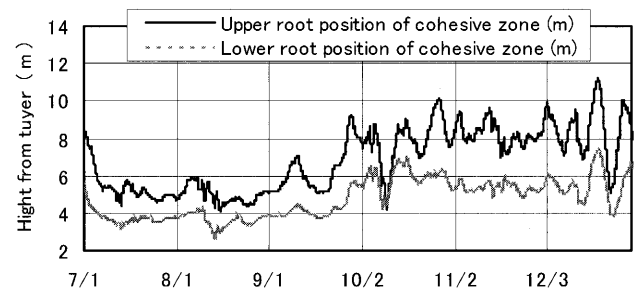


Fig. 12. Time trend of root of cohesive zone by time differential rates of stove temperature.

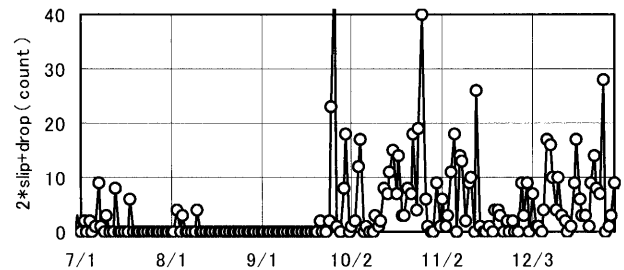


Fig. 13. Burden descent fluctuation indices in the time sequence.

部上下面位置の推移をFig.12に示す。

Fig.12から、9月の中旬までは融着帯の根上面位置はほぼ羽口上5mのレベルであるが、それ以降は8mのレベルまで上昇していることがわかる。

一方、Fig.11からシャフト差圧の高い点すなわちシャフト圧変動の起点位置は、ほぼ融着根レベルの上面に対応しており、シャフト圧変動の上昇時には起点位置も上昇していることがわかる。このように、シャフト圧力変動の起点位置は、大局的にはステープ温度から推定した融着根レベルの動きに対応しており、シャフト圧力変動の起点が融着帯根レベルの影響を受けていることがわかる。また、融着帯根レベルが上昇した時期は、スリップも増加しており(Fig.13参照)、シャフト圧変動の起点位置の上昇により炉内で止まっていたバブリングが層表面まで到達し、荷下がりにも影響を及ぼしたものと推定される。ただ、シャフト圧力変動の起点はボッシュ部に集中しており、融着帯根部レベル以外の要因も大きく作用していることを示唆している。

以上のように、融着帯根レベルの変動やシャフト圧力変動の発生状況を2次元可視化画像をもちいた二次加工データ化から定量化し、解析することが可能となる。

6. 結言

高炉円周方向、高さ方向に空間的に多数設置されたステープ温度やシャフト圧力のデータを2次元的な分布として画像化することにより、シャフト圧力変動やスリップ発生にともなう炉内の空間的な変動を定量的かつ客観的に可視化することが可能になった。さらに、データの空間変化率、時間変化率など二次加工したデータの2次元分布と操業データの推移を組み合わせることで、シャフト圧力変動等の早期検出が可能となる。

シャフト圧力の変動原因として、従来からも想定されていたが、炉内の空隙率分布が偏在することによることを模型実験から明らかにした。

さらに、ステープ温度の時間変化率の2次元可視化画像から推定した融着帯根位置とシャフト圧力変動の発生起点は関係のあることがわかった。

文 献

- 1) N.Miyasaka, M.Sugata, Y.Hara and S.Kondo: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 18.
- 2) Y.Kuwano, S.Yamamoto, K.Ohtani, K.Honda, T.Chan and C.Nakane: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 1203.
- 3) M.Shimizu, A.Yamaguchi, S.Inaba and K.Narita: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 936.
- 4) H.Kawata, S.Kishimoto, A.Maki, Y.Saijyo, H.Wakai and K.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), T5.
- 5) J.Chen, T.Kamijo and M.Shimizu: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 135.
- 6) T.Sato, K.Takeda and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 750.
- 7) J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1242.
- 8) K.Takatani: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 1031.
- 9) H.Nogami: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 211.
- 10) T.Sugiyama and M.Sugata: *Seitetsu Kenkyu*, **325** (1987), 34.
- 11) K.Takatani, T.Inada and Y.Ujisawa: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 15.
- 12) J.Yagi and T.Akiyama: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 2.
- 13) M.Yamazaki, M.Sato, M.Kiguchi, O.Iida and S.Fukumura: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 6.
- 14) N.Nagai, A.Arai, K.Matsuda, T.Kadoguchi and T.Yabata: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 10.
- 15) K.Otsuka, S.Matsuoka, Y.Aminaga, M.Yoshida, T.Yokoi and T.Inada: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 14.
- 16) T.Takarabe, T.Nakamori, H.Oda, M.Taira, S.Watanabe and O.Seki: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 18.
- 17) Y.Niwa, T.Sumikago, M.Sakurai and T.Aoki: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 22.
- 18) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 927.
- 19) S.Matsuzaki and M.Ito: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 928.
- 20) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 300.
- 21) M.Ito, S.Matsuzaki, K.Kakiuchi and M.Isobe: *Shinnittetsu Giho*, **379** (2003), 33.
- 22) M.Hatano, K.Oki, H.Yamaoka, C.Yamagata and Y.Murakami: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), S52.
- 23) T.Irita, M.Isoyama, T.Abe, J.Hasegawa and Y.Okuno: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S107.
- 24) M.Kase, M.Sugata and K.Yamaguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1928.
- 25) T.Fukuda, K.Nishikawa, K.Ishiguro and M.Hamada: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), S799.
- 26) T.Ashimura, N.Morishita, Y.Inouc, M.Higuchi, M.Baba, K.Kanamori and S.Wakuri: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 457.
- 27) S.Sasahara, A.Yamaguchi, M.Shimizu, T.Sugiyama, S.Inaba, R.Ono and S.Hachiya: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), A5.
- 28) S.Inaba, I.Kobayashi, M.Isobe and S.Takano: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **34** (1984), 59.
- 29) S.Hachiya, R.Ono, K.Fuse, T.Sugiyama, M.Shimizu and S.Sasahara: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **36** (1986), 77.
- 30) Y.Yoshida, S.Kitayama, S.Ishiwaki, N.Nagai and A.Arai: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 49.
- 31) T.Sato, Y.Yamaoka, T.Takebe, R.Kimura, Y.Yamada, Y.Ohno and T.Miyazaki: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), A1.
- 32) T.Hukushima, Y.Ohno, Y.Yamada, K.Kondo, T.Sumigame and S.Kishimoto: *Nippon Koukan Tech. Rep.*, **99** (1983), 1.
- 33) M.Ito and S.Matsuzaki: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1109.