

高炉羽口から入射したマイクロ波反射強度による レースウェイ形成挙動の解析

松井 良行*・山口 泰弘*²・澤山 宗義*・北野 新治*²
永井 信幸*³・今井 孝*³

Analyses on Blast Furnace Raceway Formation by Micro Wave Reflection Gunned through Tuyere

Yoshiyuki MATSUI, Yasuhiro YAMAGUCHI, Muneyoshi SAWAYAMA, Shinji KITANO,
Nobuyuki NAGAI and Takashi IMAI

Synopsis : The blast furnace raceway formation under the intensive coal injection by measurement of micro wave reflection gunned through a tuyere is discussed. As the flow rate of coke as the momentum of coke into raceway decreases by combustion of coal injected into tuyeres, the depth of raceway defined as the maximum position of micro wave reflection is easy to contract. It is expected that this new technology could detect the raceway collapse phenomena in short time and that the stability of raceway in coal injection is different from that in all coke operation. Finally the paper ends by summarizing the effect of raceway formation on unsteady phenomena forcing functional disorder on blast furnace performance of burden distribution for high productivity performance.

Key words : blast furnace; raceway; micro wave; coal injection; coke; unsteady phenomena.

1. 緒言

国内において粗鋼生産の伸びが、飽和し、鉄源の確保として大型高炉への集約が進むなかで、高出鉄操業における操業安定性が注視されている。大型高炉の炉芯の役割については、無用の長物論からその熱量保持機能を評価し、炉芯を不活性なものと思わず、活性であるべきとの考えから、その活性維持の方法論に議論が展開され、コークス品質の重要性が再認識されてきている。その一方で、炉芯の粉コークスの排出は、それ自身の溶銑・溶滓の通過能力によることから炉床径を拡大する弊害に注意が払われ、羽口径と燃料燃焼能力を確保するため最小の炉床径とすべきだとの意見もある¹⁾。

高炉の安定操業が生命線であるなかで、高炉集約が進む現在においては、高炉異常炉況は、従来にもまして下工程への悪影響は甚大となる。とくに、微粉炭（以下PC）吹き込み操業の方が、操業トラブルが多い傾向にあること、また、オールコークスからPC吹き込みへの移行時期においてトラブルが、多く発生していること、さらには、近年のトラブル増加の一要因として高炉の大型化と高出鉄比操業が指摘されており、とくに注目される。

このため高炉の大型化、高出鉄操業における装入物分布

および荷下がり状況あるいは溶解帯、レースウェイの形態とその分布状況などの管理が、極めて重要視されてきている。そこで、本報告では、羽口から入射したマイクロ波（以下 μ 波）の反射強度からレースウェイ深度を解析し、PC吹き込みと高炉レースウェイ形状との関連性について報告し、高炉操業技術の更なる向上の一助としたい。

2. 炉下部でのレースウェイ制御に向けた課題

炉内ガス流れの始点となるレースウェイは、非ポテンシャル流れ場であり、操業中の測定も限定されているため炉下部における液分配はもとよりガス分配の観点で未解明の点が多い²⁾。

Fig. 1にPC比180 kg/thmレベルでの休風時での羽口コークスサンプリングによる炉芯コークスの径方向での履歴温度分布を示す。羽口風速230 m/s時には、高温領域が羽口先2.2 mまで達しているが、減産下で羽口風速が、210 m/sまで低下した場合には、高温領域が羽口先1.0 mまで縮小し、炉況は悪化した。とくに、PC吹き込み時には、レースウェイへのコークス流入量が減少するためレースウェイ形成の不安定化が懸念される。

従来、低出鉄移行過程においては、西ら³⁾は、コークス

原著論文：ISIJ Int. Vol. 45 (2005), No. 10, pp. 1432-1439

平成18年4月28日受付 平成18年7月3日受理 (Received on Apr. 28, 2006; Accepted on July 3, 2006; originally published in ISIJ Int. Vol. 45, 2005, No. 10, pp. 1432-1439)

* (株)神戸製鋼所技術研究センター (R & D Lab., Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675-0023)

* 2 (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

* 3 神鋼EN&M (株) EIC本部 (EIC Div., Shinko EN&M CO., Ltd.)

の高炉内での滞留時間が長くなり、コークスが脆弱化してくるため、レースウェイ深度を確保する目的で羽口径を絞り、羽口送風エネルギーを増加させるとコークスの破碎にともなう粉発生によってレースウェイは縮小することを報告している。その一方で、高出銃移行過程においては、田村ら⁴⁾は、レースウェイ深度が、1.3m 以上になるとレースウェイでのコークスの粉化量と炉芯表層部の微粉コークスの堆積量が増加することを報告している。これらに対して、埜上ら⁵⁾は、固体と気体の両者を連続体として扱い、レースウェイの境界を気体速度が流動開始速度に達した部分からという扱いでレースウェイ解析を進めている。しかしながら、三浦⁶⁾は、「コークス研究の欠陥と期待」のなかで磨耗よりも表面破壊や堆積破壊という機構による粉生成に対して、高速での粒子の衝突・破壊に関して利用できる破壊理論は知見がないことが、レースウェイ領域の研究課題であると言及している。

実炉におけるレースウェイ深度の測定に関しては、清水ら⁷⁾による直径19mmφの金棒の挿入による測定あるいは、田村ら⁴⁾によるロードセルを装備したレースウェイ深度計による測定が報告されているが、送風断面の縮小による外乱およびPC吹き込み下では、測定精度の問題がある。また、羽田野ら⁸⁾は、羽口前コークスを採取し、Raceway Factor と Penetration Factor との実験炉での関係式を適用し、

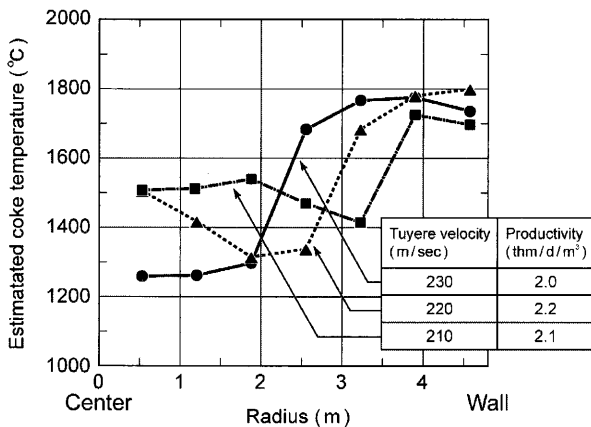


Fig. 1. Effect of tuyere velocity on deadman coke activation.

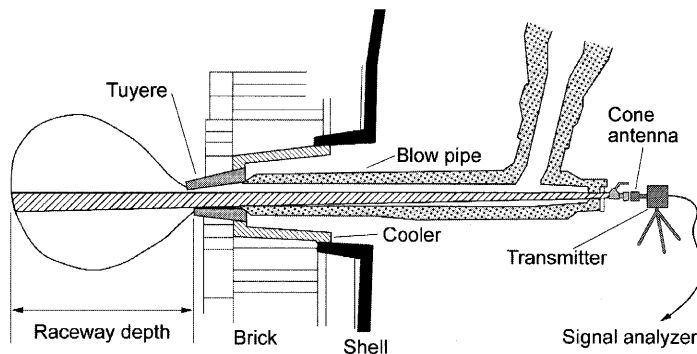


Fig. 2. Micro wave technique to determine the raceway depth.

レースウェイ深度を推定しているが、レースウェイの動的な挙動を追跡するには不向きである。非接触測定としては、Duvalら⁹⁾あるいはFormosoら¹⁰⁾によるレーザー出力の反射波検知が、報告されているが、高出力レーザーを必要とするため汎用性の観点で課題が残る。

本報告では、透過性に優れたμ波を用い、高微粉炭吹き込み下における精度の高いレースウェイ深度測定技術を開発し、PC吹き込みと高炉レースウェイ形状との関連性について検討した。

3. 測定方法および原理

3.1 レースウェイ深度測定方法および原理

Fig. 2に、高炉羽口部からのμ波¹¹⁾入射方法を示す。μ波は、導波管から送信され、導波管の先端に設けられた円柱状のアンテナから羽口覗き窓を通して入射される。アンテナは、マイクロ波である送信波を効率よく前方に発射するために、その内部には円錐状の凹部が形成されており、ブローパイプの基端側の羽口覗き窓に隣接するようにアンテナは配置される。

Fig. 3に、測定原理を示す。発生されたμ波の送信波①の一部は、分岐②され、ミキサー④に伝送され、レースウェイからの受信波④と合成されビート波を発生させる。ビート波の周波数は、対象物までの距離に相当する周波数

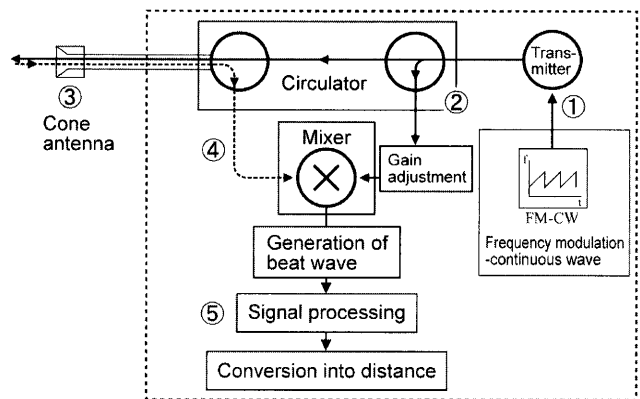


Fig. 3. Principle to determine distance by micro wave reflection.

成分を持っており、周波数解析⑤によって空間距離が測定できる。

ここで、送信部①においては、発生させたマイクロ波に周波数変調をかけて送信波とし、この送信波をアンテナ③からブローパイプおよび羽口を介して、レースウェイ最深部に発射する。ガンダイオード等の半導体素子から構成されるマイクロ波発生部においてマイクロ波を発生させる際に、このマイクロ波に周波数変調によって、のこぎり波となるように周波数変調をかける。周波数変調とは、時間に比例して周波数が一定の変化をする制御を行うことである。周波数変調をかけられたマイクロ波は周波数変調連続波 (FM-CW: Frequency modulation continuous wave) となる。この周波数変調連続波は送信波として、導波管を介してアンテナに導かれ、そこからレースウェイ最深部に発射される。送信波の一部は、ビート波を生成するために、サーキュレータ (方向性結合器) によってビート波発生部④に伝送される。発射された送信波は、レースウェイ最深部で反射することで生じる最深部反射波と、最深部以外で反射することで生じる非最深部反射波となり、受信部、すなわちアンテナ③で受信され、導波管によりサーキュレータ②に伝送される。サーキュレータを通った各反射波 (受信波) は、ビート波発生部④に導入され、送信波と受信波とが重ね合わせられ、ビート波が生成されることになる。ビート波とは、わずかに周波数が異なる2つの波が重なった時に、干渉の結果発生するもので、音波の世界でいう「うなり波」のことであり、その周波数は、受信波と送信波との周波数の差である。このビート波の周波数が明らかになると、それをを用いて、アンテナから発射された送信波を反射させた対象物までの距離を算出することができる。ビート波は後述の帯域除去を経て、フーリエ変換処理部において、FFT等のアルゴリズムを用いてフーリエ変換され、周波数スペクトルが求められる。

次に、この周波数スペクトルの分布の、例えばピーク値をもとに次式によってレースウェイ最深部までの距離を求める。

$$l = c \times t / 2$$

$$= c \times T \times f_b / (2 \times F)$$

ここで、 l : レースウェイ深度 (羽口～レースウェイ最深部間距離)

t : マイクロ波の往復時間

T : 周期 (周波数掃引時間)

f_b : ビート波周波数

F : 周波数変調幅

c : 光速

である。

ビート波の周波数スペクトルは、上式から周波数-距離変換を施され、周波数スペクトルは、反射対象物までの距

Table 1. Application of micro wave on detection of race-way boundary in blast furnace.

Problems	Countermeasures
1. Efficiency of micro wave reflection	1. Gunned from cone antenna directly
2. S / N ratio under fume from coal combustion	2. Band eliminator
3. Multi reflections between blow pipe and tuyere nose	3. Selection of reflection wave based on circling direction in spiral vector composed by electro-magnetic field
4. Accuracy of intensity distribution	4. Fast Fourier Transform instead of zero-cross point
5. Heat resistance	5. Conducting calbe from signal analyzer

離を横軸とした距離スペクトルへと変換される。この距離スペクトルに平滑化処理を施すことで、データ上にあるノイズを除去する。その上で、距離スペクトル分布からスペクトルのピーク値を算出する。

3.2 高微粉炭吹き込み下におけるレースウェイ深度測定技術

レースウェイ最深部以外での送信波の反射としては、ブローパイプの内壁面、下部バンドのブローパイプ側開口部、PCランスのブローパイプ側開口部などからの反射が挙げられる。したがって周波数スペクトルをそのまま利用し、そのピーク値から距離を求めてもレースウェイ深度とはならない。

Table 1に、高PC吹き込み下におけるレースウェイ深度測定の開発項目を示す。本測定方法では、あらかじめその位置 (距離) がわかっている非最深部反射波の周波数成分を推定しておき、この周波数成分のみを除去する帯域除去フィルタ (バンド・エリミネイト・フィルタ又はノッチ・フィルタ) により、ビート波から前記周波数成分を除去する。この帯域除去工程を通過した出力波を、フーリエ変換処理に入力することによって周波数スペクトルのピーク値は、大きく際立たせることができる。

さらに、本測定方法では、二重反射を起こした反射波を受信しないことを目標として、円偏向波選択を採用している。すなわち、送信波を、電界と磁界の合成ベクトルが右回りに螺旋状に進行していく波 (右旋円偏向波) とし、送信波と同相の右旋円偏向波の反射波を除去し、送信波と逆送の円偏向波のみを取り出すようにしている。これは、送信波が右旋円偏向波である場合、レースウェイ最深部で反射した反射波は、前記合成ベクトルが左回りとなる左旋円偏向波になるからである。これは電磁波が一度反射すると、その偏向方向が反転する性質にもとづく。これによって、レースウェイ最深部で反射した送信波が、さらに別の面、例えば、ブローパイプの内側面で反射した場合には、送信波と同相になってしまい、前記円偏向波選択によって確実に除去できる。なお、送信波の偏向方向を右旋回としたが、左旋回としても何ら問題はない。その際、除去すべき二重反射波の偏向方向も左旋回となる。

以上のように、高微粉炭吹き込み下において周波数スペクトルのピーク値を、大きく際立たせ、二重反射を起こした反射波を受信しないことで精度の高いレースウェイ深度測定が可能となった。

Fig. 4 に、炉外実験における相対反射強度とコークス層測定距離との関係を示す。ここで、相対反射強度は、ブローパイプ先端からの反射強度に対する相対値として定義した。電波吸収帯で作成したブローパイプを通して、その先端部に配置したコークス層からの相対反射強度をコークス層の空隙率および層数を変えて測定した。コークス層の配置位置は、アンテナから4300mmの位置であり、空隙率が0.8であるコークス単層においても位置標定は可能であるが、相対反射強度は低い。レースウェイ表層部に相当する空隙率が0.5であるコークス単層においては、標定位置は4330mmであり、コークス層表面から30mm内部の位置を標定するが、その相対反射強度は、極めて高い。一方で、空隙率が0.8であるコークス層を三層に重ねた場合においては、標定位置は4300~4380mmと広がる一方で、その相対反射強度は、空隙率が0.5であるコークス単層に比べて低い。実炉レースウェイからの受信波と合成され発生したビート波の周波数は、対象物までの距離に相当する周波数成分を持っている。このビート波をフーリエ変換し、求められる周波数スペクトルの分布のピーク値をもとにレースウェイ深度を求めるため旋回しているレースウェイ内を通じて静止しているレースウェイ境界位置をレースウェイ深度として精度よく標定できる。

Fig. 5 に、炉外実験における相対反射強度とコークス層測定距離との関係を示す。電波吸収帯で作成したブローパイプを通して、その先端部に配置した空隙率が0.5であるコークス単層の位置を変えて測定した。コークス層の配置位置によらず、コークス層表面から概ね30mm内部の位置を検出し、追従できていることが確認できた。

4. 測定結果および考察

4.1 レースウェイ深度に及ぼす羽口径および送風量の影響

Fig. 6 に、定常操作における μ 波反射強度のピーク検出位置（以下レースウェイ深度実測値）に及ぼす羽口径の影響を示す。図中には、羽田野らの推定式⁸⁾を用いた計算値を白丸にて併記した。羽田野らの推定式からレースウェイ深度実測値から推定されるコークス粒径は、羽口径によらず一致した。羽口径が狭いほど羽口風速は速いが、全数羽口において一部の羽口径を絞ると、各送風羽口の差圧によって分配されるため支管風量が少ないためレースウェイ深度は浅い。佐々木ら¹²⁾は、小倉2高炉の解体調査において細粒コークスと溶銹滓で固着した緻密な層であるレースウェイ殻から測定したレースウェイ深度と羽口径との関係

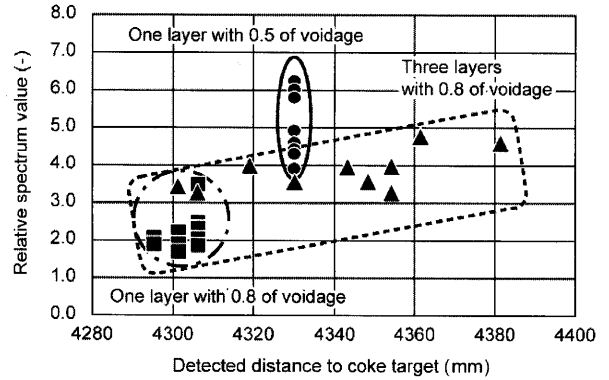


Fig. 4. Effect of coke layer voidage on spectrum intensity.

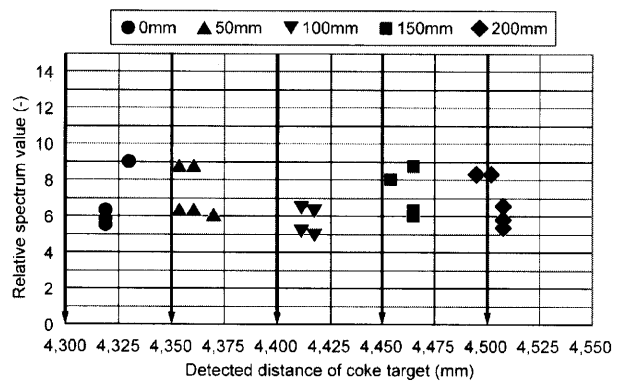


Fig. 5. Accuracy on detection of coke layer location.

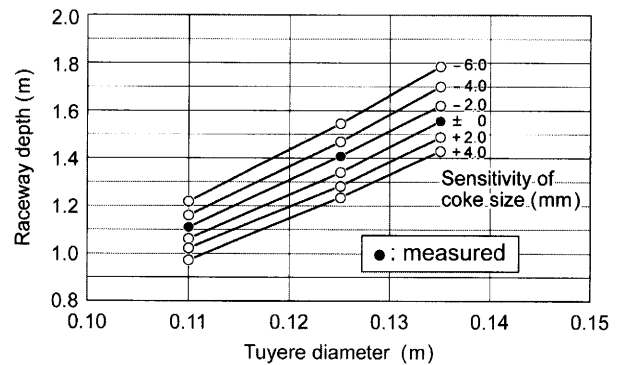


Fig. 6. Raceway depth corresponding to tuyere diameter.

が、正相関の関係であることを実証している。

4.2 レースウェイ深度に及ぼすPC吹き込みの影響

佐々木ら¹²⁾は、上述の小倉2高炉の解体調査において吹出し前の減風時に、送風量に応じて形成される二重ないし三重のレースウェイ殻が形骸として確認できることを挙げている。

Fig. 7 に、高炉減風過程において羽口部から μ 波を入射し、レースウェイ深度実測値および羽田野らの推定式⁸⁾を用いたレースウェイ深度計算値の送風量に対する変化を示す。減風にともないレースウェイ深度実測値は、推定値と同様に減少し、本測定方法が、減風によるレースウェイ深度の変化に追従できることを確認した。減風過程において

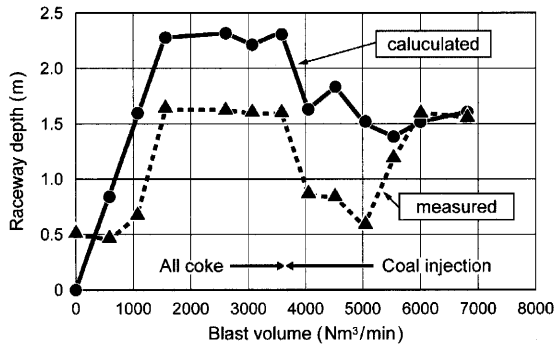


Fig. 7. Dynamic changes of raceway depth by decreasing blast volume.

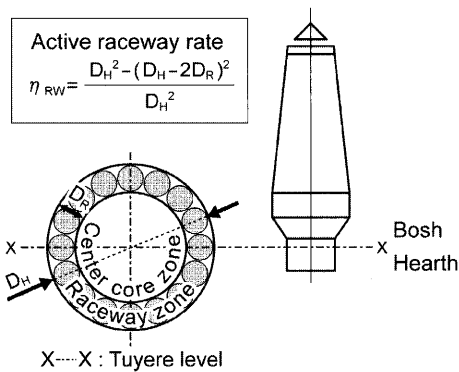


Fig. 8. Schematic figure for η -value of blast furnace at tuyere level defined after Sugisaki *et al.*

推定値が一定値を示す期間は、炉頂圧力の減圧にともなう送風圧力の減圧によって羽口風速が増大するためであり、これについても本測定は追従できている。さらに、PC遮断直後においてレースウェイ深度が、一気に伸長していることが注目される。これは、PC遮断による羽口前温度の上昇による衝風エネルギーの急激な回復と考えられる。

Fig. 8に示す羽口レベルにおける炉床断面積に対するレースウェイ面積の比を、杉崎ら¹³⁾は、レースウェイ面積比 η として定義し、重油吹き込み操業時には $\eta=0.47$ あるいは 0.48 のときに還元材比が低いことを見出している。

高炉減風過程において羽口部から μ 波を入射し、羽田野らの推定式⁸⁾を用いたレースウェイ深度計算値に対するレースウェイ深度実測値の比 ξ （以下レースウェイ深度比）と炉床断面積に対するレースウェイ面積比 η （以下レースウェイ面積比）との関係をFig. 9に示す。レースウェイ面積比 η は、杉崎ら¹³⁾と同様に、羽口レベルにおける炉床断面積に対するレースウェイ面積の比を用いた。減風によるレースウェイ面積比 η の低下にともないレースウェイ深度比 ξ は低下するが、オールコークスに較べてPC吹き込み時のほうが、 ξ の低下の度合いは大きい。このことは、PC吹き込みによるレースウェイの三次元的な形状変化、さらには、流入コークス粒径に対する不安定性を示唆している。

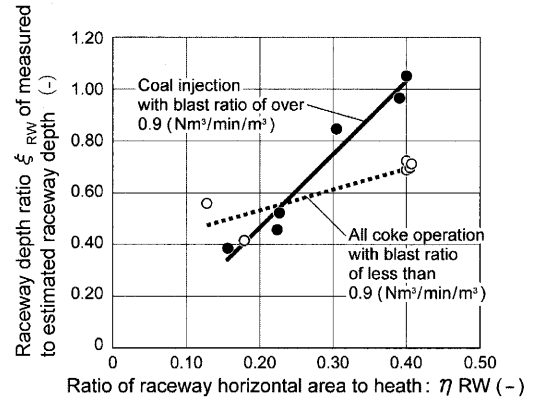


Fig. 9. Dynamic changes of raceway depth by decreasing blast volume.

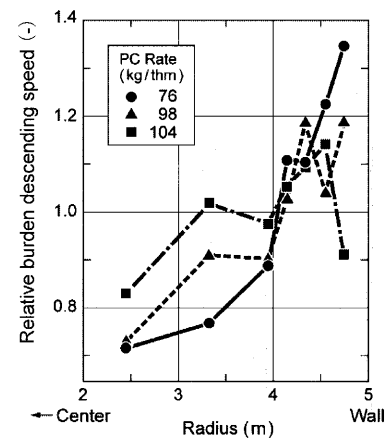


Fig. 10. Changes of relative descending speed of burden in radius of furnace top by increasing coal injection into tuyere.

5. 炉内固体流れに及ぼすレースウェイ形成の影響

加古川2高炉においては、コークス中心装入による装入物分布制御とダブルランスによる燃焼技術を活用して1990年4月にPCと重油の混合吹き込みによって初めて300 kg/thmを切る月間コークス比298 kg/thm（PC比123 kg/thm、重油比62 kg/thm）が達成されている¹⁴⁾。Fig.10に、この低コークス比操業への移行過程における重錘式プロフィールメーターによる炉口部における径方向降下速度分布の変化を示す。PC吹き込み量の増大にともない、レースウェイ部への流入コークス量が減少するため炉口周辺部の降下速度が低下する。

湯ら¹⁵⁾は、離散要素法を用いたレースウェイ内の固体運動シミュレーションにおいて模擬融着帯の設定によって炉下部への流入コークスの流路の周辺部を遮蔽した場合にはレースウェイは縮小することを報告している。この計算条件は、PC吹き込み量の増大にともない、レースウェイ部への流入コークス量が減少するため炉口周辺部の降下速度が低下するという上記の実炉現象を反映させていると考え

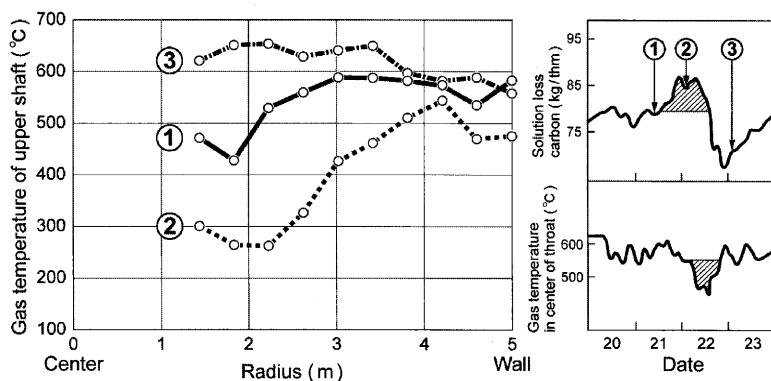


Fig. 11. Losing central gas flow before changing solution loss reaction.

ると、湯ら¹⁵⁾の結果は、逆説的ではあるものの節 4.2 でのオールコークスに較べて PC 吹き込み時のレースウェイ深度が浅いという実炉現象が、レースウェイへの固体流れに起因していることを示唆するものであると考えられる。

PC 比の増大に際して、径方向降下速度分布の変化に対応する炉口部での現象としては、シャフト上部において炉中心から中間部におけるガス温度が低下し、ソリューションロス・カーボン量が急増する現象¹⁶⁾が見られた。Fig.11 に、この中心流抑制現象を示す。炉口ガス温度分布は、炉熱の変化に6~10時間前に先行して現われることが特徴である。これは、PC 比の増大に対応して炉壁部での降下速度分布が低下し、ペレット配合下において高 O/C 化にともない炉中心部への鉱石の流れ込みが助長されるためである。したがって、高 PC 吹き込み操業下においては、レースウェイ形成とその安定性は、装入物分布の制御性にまで影響すると考えられる。

高橋ら¹⁷⁾は、冷間実験によってレースウェイへの流入粒子の通気抵抗が上昇した場合には、炉口部においてスリップ降下が発生することを見出している。これは、レースウェイ部でのコークス粉化などによるレースウェイの変化が、高炉全系の固体流れの変化させること示唆するものと考えられる。

以上のことから、炉下部において唯一の充填構造体をコークスに委ねる高炉法においては、コークスは、炉内ガス流れの始点となるレースウェイの形成の基軸であり、そのレースウェイの不安定性は、とくに高PC吹き込み操業においては、通気性低下および荷下がり不順を誘発し、高炉全系での炉況不調へとつながりやすいと推定される。

6. 結言

高炉の大型化、高出銑操業において装入物分布および荷下がり状況あるいは軟化融着帯、レースウェイの形態とその分布状況などの管理が、極めて重要視されてきている。本報告では、羽口から入射したμ波の反射強度からレースウェイ深度の測定方法を開発し、その測定結果を解析し、

PC 吹き込み操業と高炉レースウェイ形状との関連性についての検討から以下の結論を得た。

(1) 本測定方法によって高微粉炭吹き込み下において周波数スペクトルのピーク値を、大きく際立たせ、二重反射を起こした反射波を受信しないことで精度の高いレースウェイ深度測定が可能となった。

(2) 本測定方法は、炉外実験においてコークス層の配置位置によらず、コークス層表面から概ね 30mm 内部の位置を検出し、追従できていることが確認できた。

(3) 定常操業において羽口径が狭いほど羽口風速は速いが、各送風羽口の差圧によって分配されるため支管風量が少ない結果としてレースウェイ深度は浅い。

(4) 減風過程においてオールコークスに較べて PC 吹き込み時のほうが、レースウェイ深度の低下の度合いは大きい。このことは、PC 吹き込みによるレースウェイの三次元的な形状変化、さらには、流入コークス粒径に対する不安定性を示唆している。

(5) 高PC吹き込み操業下においては、レースウェイ形成とその安定性は、装入物分布の制御性にまで影響する。

今後、さらに低還元材比操業を指向した場合には、炉芯粉率の増加に対する炉芯通気・通液性の確保がより一層重要となる。炉下部充填構造体であるコークスの炉下部への流下・粒度分級およびレースウェイへの流入挙動の動的理解の深化とその制御が必要である。

文 献

- 1) M.Tateoka: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 957.
- 2) K.Nozaawa, T.Kamijo and M.Shimizu: *Tetsu-to-Hagané*, **81** (1995), 882.
- 3) T.Nishi, H.Harada, Y.Miura, S.Sakurai, K.Ono and H.Kanoshima: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1820.
- 4) K.Tamura, M.Ichida, H.Wakimoto, K.Ono and Y.Hayashi: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1980.
- 5) H.Nogami, T.Miura and T.Furukawa: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1222.
- 6) 三浦隆利: 私信 (2000年2月1日).
- 7) M.Shimizu, T.Nagai, K.Okabe, M.Kondo and T.Inetani: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 589.
- 8) M.Hatano, B. Hiraoka, M.Fukuda and T.Masuike: *Tetsu-to-Hagané*,

- 62 (1976), 505.
- 9) A.B.Duval, J.C.Scott, P.C.Wall, J.M.Burgess: 6th IISC, Nagoya (1990), 405.
- 10) A.Formoso, A.Babich, H.W.Gudenau, L.Garcia,A.Cores: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 1134.
- 11) C.Shibata and R.Horie: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1096.
- 12) K.Sasaki, M.Hatano, M.Watanabe, T.Shimoda, K.Yokotani, T.Ito and T.Yokoi: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 580.
- 13) T.Sugisaki, S.Ohta, T.Kitagawa and S.Shimada: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 2005.
- 14) Y.Matsui, K.Kuwano, R.Hori, H.Miyatani, S.Tada, K.Matsunaga: 6th IISC, Nagoya (1990), 468.
- 15) 湯晋一：私信（2003年12月4日）。
- 16) M.Takeda, Y.Konishi, S.Taguchi and T.Fukutake: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 2084.
- 17) H.Takahashi, H.Kawai and S.Kasahara: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 768.