

© 1992 ISIJ

論 文

炉壁混合層の形成とガス流れに及ぼすシャフト上部プロフィール，装入物性状の影響

一田 守政*・田村 健二*²・奥野 嘉雄*²
山口 一成*³・中山 正章*⁴・中村 展*⁴

Influence of Upper Shaft Profile and Burden Properties on Formation of Mixed Zone Near Wall and Gas Flow

Morimasa ICHIDA, Kenji TAMURA, Yoshio OKUNO,
Kazushige YAMAGUCHI, Masaaki NAKAYAMA and Makoto NAKAMURA

Synopsis:

The influence of upper shaft profile and burden properties on gas velocity distribution and formation of mixed zone near wall was analyzed by using both a sector and a half section three-dimensional cold models of blast furnace. In the case of upper shaft profile with damage, the mixed zone near wall is formed, the gas velocity near wall increases 1.5~2.5 times and the high gas velocity region expands 1.5~2.0 times as compared with these in the case of normal upper shaft profile. This phenomenon is developed as the small ore ratio in the burden increases. The mixed zone near wall in upper shaft is formed by delaying of coke descent and percolation of small ore due to the drastic change of cross section area or the increase of friction angle between wall and burden. At Kimitsu No. 2 BF, the deviation of CO gas utilization η_{co} near wall decreased and the average of CO gas utilization η_{co} increased after the repair of upper shaft profile.

Key words: ironmaking; blast furnace; cold model; upper shaft profile; burden properties; mixed zone near wall; percolation; gas flow.

1. 緒 言

高炉の安定操業のためには、周辺流および炉体熱負荷を増加し荷下がり悪化させると推察される炉壁混合層をできるだけ形成させないことが重要である。従来報告されている炉壁混合層に関する多くの研究^{1)~9)}は、炉壁混合層の形成挙動に及ぼす内壁面形状（例えば、シャフト角、付着物、レンガ浸食、凹凸形状、等）の影響に関するものであり、炉壁混合層とガス流れあるいは装入物性状の関係に着目した研究^{10)~12)}は少ない。そして、そのいずれの研究も二次元模型を用いており、実炉のガス流れ・炉壁混合層の形成挙動と異なる可能性がある。

そこで、高炉三次元半裁の冷間模型を用いて、ガス流れと炉壁混合層の形成挙動に及ぼす炉口部直下のシャフト上部プロフィールの影響を解析し、高炉シャフト部の扇

形冷間模型を用いて、炉壁混合層の形成挙動に及ぼす装入物の物理性状の影響を解析した。さらに、炉壁混合層の形成メカニズムおよび空間率について考察した。

2. 実験方法

2.1 高炉三次元半裁の冷間模型を用いた実験（実験 I）

実験に用いた高炉三次元半裁の冷間模型を Fig. 1 に示す。本装置は、高炉の 1/10 縮尺の模型であり、装置上部より装入された装入物は、羽口直下に設置された 6 本の排出用パイプおよびターンテーブルにより排出される。

実験条件として、コークス排出量を 50 kg/h とし、送風量を 200 Nm³/h とした。ここで、送風量は、(1)式に示すシャフト部での修正 Fr 数が模型と実炉とで一致するように求めたシャフト部のガス流速より決定した。

平成 3 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 2 月 25 日受付 (Received Feb. 25, 1991)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtu 299-12)

*² 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (現:黒崎窯業(株)) (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., Now Krosaki Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

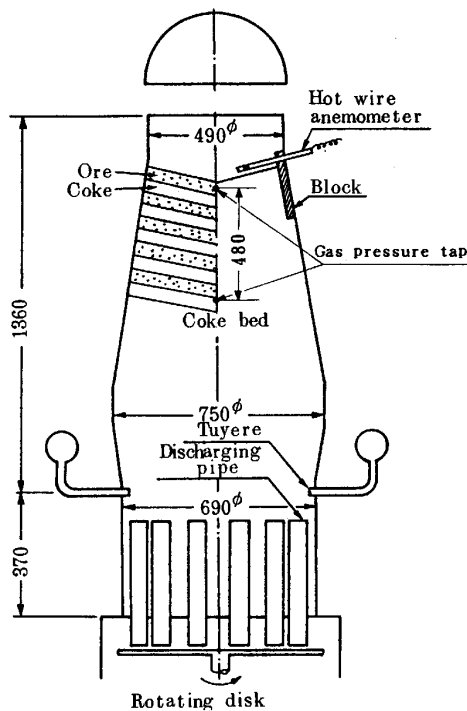


Fig. 1. A half section three-dimensional cold model of blast furnace.

コークス排出量は，(2)式に示すシャフト部での装入物の慣性力と重力の比である Fr 数が模型と実炉で一致するように求めたシャフト部の降下速度に基づいて決定した。

$$Fr_1 = \frac{\rho_f \cdot u_f^2}{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot Dp} \dots\dots\dots (1)$$

$$Fr_2 = \frac{u_s^2}{g \cdot Dp} \dots\dots\dots (2)$$

装入物として，1/10 に縮尺した焼結鉱（粒径が 1~3 mm と 0.5~1 mm の混合物）とコークス（粒径：5~7 mm）を用いた。この粒径の範囲では，焼結鉱，コークスの内部摩擦係数 μ_c は実炉のものと同様と推定さ

れる¹³⁾。

シャフト上部のプロフィールとして，Fig. 2 に示すように，付着物を想定してシャフト上端部に幅 10 mm・長さ 140 mm の突起物を設置したプロフィール（以下，付着物プロフィールと呼ぶ），炉壁面での凹凸形状を想定して間隔 20 mm ごとに厚み 2 mm の突起物を 10 段設置したプロフィール（以下，凹凸プロフィールと呼ぶ），および，炉壁レンガ浸食を想定したプロフィール（以下，浸食プロフィールと呼ぶ）の 3 種類を設定した。

シャフト中部までコークスを充填した後に，層厚 40 mm の鉱石層とコークス層を 20 deg の傾斜角で交互に層状に 5 層ずつ装入し，所定の送風量（200 Nm³/h）を吹き込みながら装入物を降下させ，装入物の降下状況およびガスの吹抜け状況を観察した。さらに，装入物を一定の距離（80 mm）降下させた後に，シャフト上部での圧力損失（層高 480 mm）を測定し，熱線風速計を用いて装入物表面直上のガス流速を測定した。

2.2 高炉シャフト部の扇形冷間模型を用いた実験（実験 II）

実験に用いた高炉シャフト部の冷間模型を Fig. 3 に示す。本装置は，大型高炉の 1/10 縮尺の角度が 30 deg の扇形模型であり，装置上部より層状に装入された装入物は，装置下部の 4 か所に設置されたスクリー・フィーダーにより排出される。

実験条件として，コークス排出量を 100 kg/h とし，無送風とした。シャフト上部のプロフィールとして，付着物を想定し，突出し長さが 60 mm の突起物を設置した。

装入物として，コークス，アルミナ球，焼結鉱，および，擬似鉱石を用いた（以下，コークス以外の装入物を鉱石と呼ぶ）。注入法¹⁴⁾により求めた上記装入物の安息角および嵩密度を Table 1 に示す。

実験開始より 15 min 後に装入物の降下を停止し，実験装置の背面より吸引法により装入物のサンプリングを

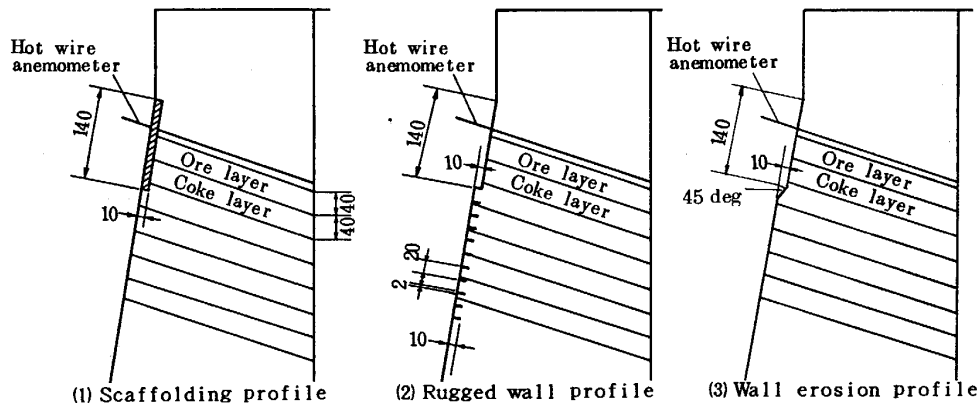


Fig. 2. Upper shaft profile conditions.

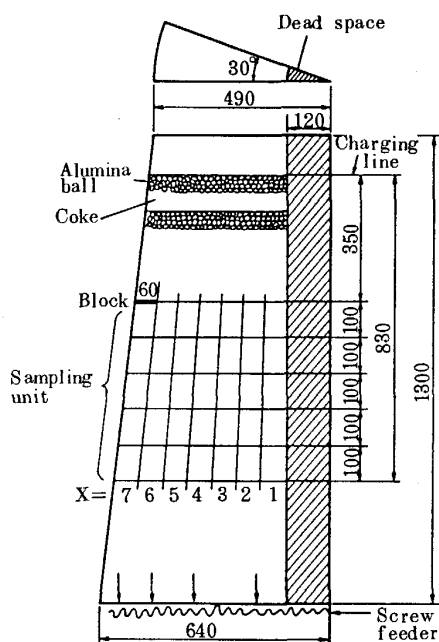


Fig. 3. A sector cold model of blast furnace shaft.

行い、サンプリング箇所ごとに装入物中の鉱石比率を求めた。なおサンプリング箇所は Fig. 3 に示すように、高さ方向に5段、径方向に7列の計35か所である。

3. 実験結果

3.1 炉壁混合層の形成挙動に及ぼすシャフト上部プロフィールの影響 (実験 I)

シャフト部が健全なプロフィール (以下、正常プロフィールと呼ぶ) の場合および付着物プロフィールの場合の装入物の降下状態を Photo. 1 に示す。正常プロフィールの場合には、鉱石層とコークス層は層状態を維持しながら降下するが、付着物プロフィールの場合には、約 30 mm (実

Table 1. Physical properties of charged materials.

	Diameter (mm)	Angle of repose (deg)	Bulk density (g/cm ³)
Alumina ball	2φ	21.2	2.144
Alumina ball	4φ	23.4	2.144
Alumina ball	8φ	26.3	2.160
Quaisi-ore	4~6	33.9	2.083
Sinter	1~3	33.1	1.947
Coke	4~6	37.1	0.506

炉換算値: 300 mm) の幅の炉壁混合層が形成される。

3.2 炉壁混合層の形成挙動に及ぼす鉱石性状の影響 (実験 II)

突起物直下の炉壁混合層 (サンプリング番号 X=7) および炉壁混合層に隣接した炉内側の領域 (サンプリング番号 X=6) の鉱石の存在比率に及ぼす鉱石の粒径および安息角の影響を Fig. 4 に示す。鉱石の粒径の増加にともない、鉱石の存在比率は炉壁混合層で増加し、炉壁混合層に隣接した炉内側で減少する。そして、鉱石の安息角が大きい場合には、鉱石の存在比率は炉壁混合層内で大きく、炉壁混合層に隣接した炉内側の領域で小さい。したがって、粒径と安息角がコークスよりも小さい細粒鉱石の場合には、炉壁混合層内での存在比率は小さい。

3.3 炉壁近傍のガス流速分布に及ぼすシャフト上部プロフィールおよび細粒鉱石の比率の影響 (実験 I)

装入物表面直上のガス流速分布に及ぼすシャフト上部プロフィールの影響を Fig. 5 に示す。正常プロフィールの場合には、中心部から中間部のガス流速はほぼ均一であるが、炉壁近傍のガス流速は最大で 0.20 m/s と中間部のガス流速に比べて約 2 倍大きく、その高ガス流速の範囲は炉壁から 20 mm (実炉換算値: 200 mm) である。付着物プロフィールの場合には、炉壁近傍のガス流速は最大

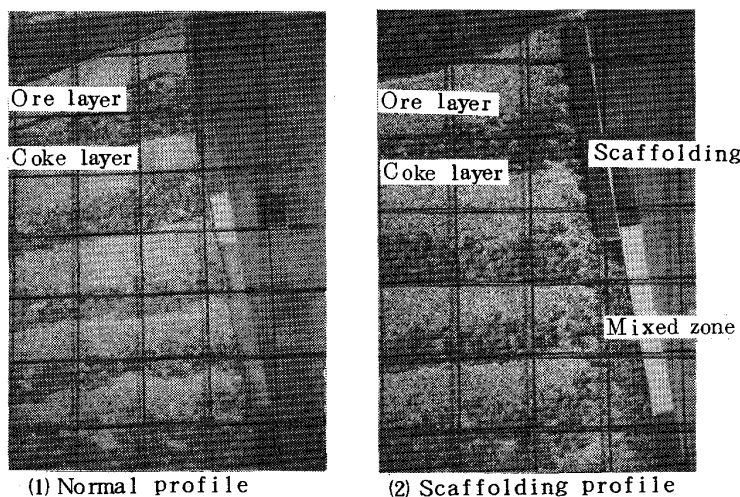


Photo. 1. Influence of upper shaft profile on layer structure of burdens near wall.

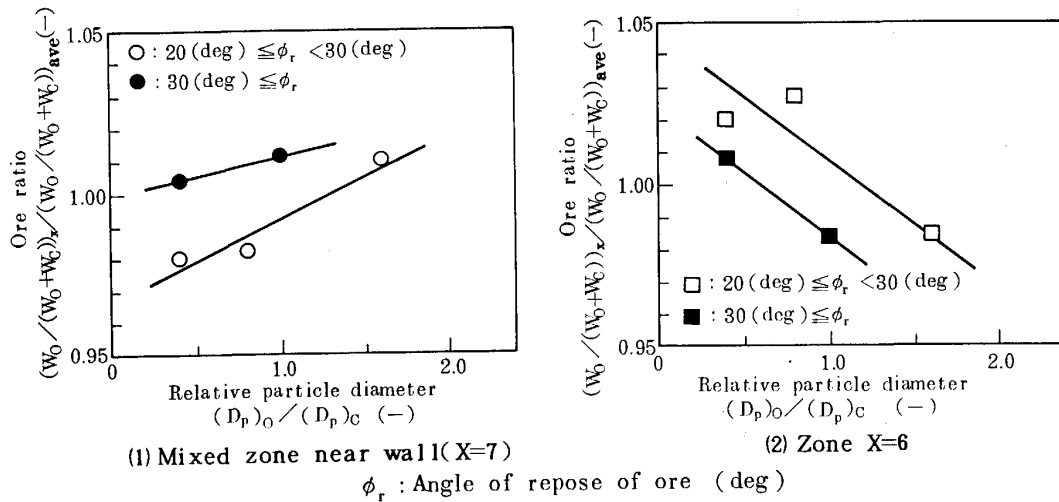


Fig. 4. Influence of particle diameter on ore ratio of mixed zone near wall (X = 7) and zone X = 6.

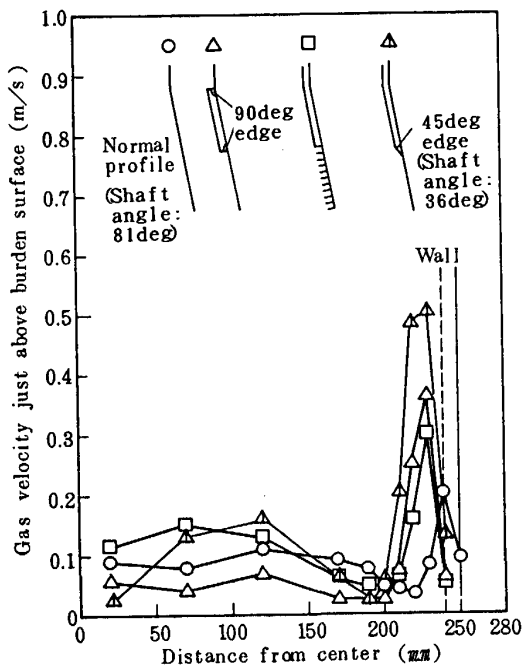


Fig. 5. Influence of upper shaft profile on gas velocity distribution just above burden surface in case of small ore (D_p : 0.5~1.0 mm) ratio = 20%.

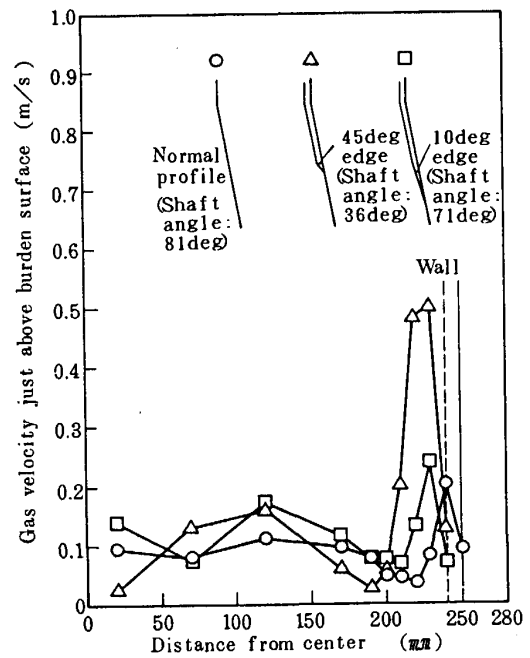


Fig. 6. Influence of wall erosion condition on gas velocity distribution just above burden surface in case of small ore (D_p : 0.5~1.0 mm) ratio = 20%.

で 0.36 m/s と、正常プロフィールの場合に比べて約 2 倍に増加すると同時に、高ガス流速の範囲が炉壁から 30 mm (実炉換算値: 300 mm) と 1.5 倍に拡大し、中心部から中間部のガス流速が減少する。凹凸プロフィールの場合には、炉壁近傍のガス流速が最大で 0.30 m/s と、正常プロフィールの場合に比べて 1.5 倍に増加すると同時に、高ガス流速の範囲が炉壁から 30 mm (実炉換算値: 300 mm) と 1.5 倍に拡大する。

Fig. 5 に定義した段差角度が 45 deg と断面積の拡大

が急激な浸食プロフィール (シャフト角度: 36 deg) の場合には、炉壁近傍のガス流速が最大で 0.50 m/s と、正常プロフィールの場合に比べて 2.5 倍に増加すると同時に、高ガス流速の範囲が炉壁から 40 mm (実炉換算値: 400 mm) と 2 倍強に拡大する。ただし、Fig. 6 に示すように、浸食プロフィールの場合の炉壁近傍のガス流速は、浸食による断面積の変化率により異なり、段差角度が 10 deg と断面積の拡大が緩やかな場合 (シャフト角度: 71 deg) には、炉壁近傍のガス流速は最大で 0.23 m/s

と正常プロファイルの場合のガス流速とほぼ同じである。

また、Fig. 7の付着物プロファイルの場合に示すように、炉壁近傍のガス流速は細粒鉱石の比率の増加にともない大幅に増加する。

3.4 シャフト上部の圧力損失に及ぼすシャフト上部プロファイルおよび細粒鉱石の比率の影響(実験 I)

シャフト上部の圧力損失に及ぼすシャフト上部プロ

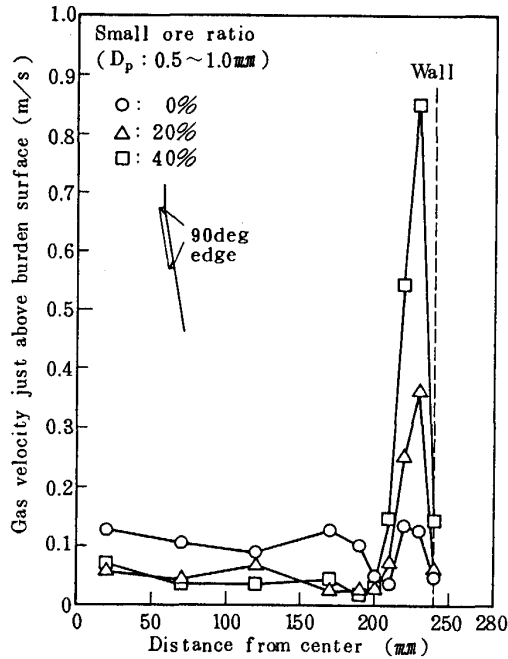


Fig. 7. Influence of small ore ($D_p: 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$) ratio on gas velocity distribution just above burden surface in case of scaffolding profile.

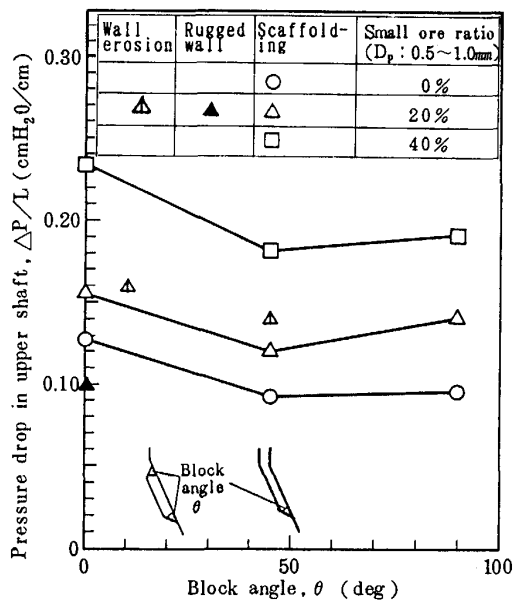


Fig. 8. Influence of upper shaft profile and small ore ($D_p: 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$) ratio on pressure drop in upper shaft.

フィルおよび細粒鉱石の比率の影響を Fig. 8 に示す。付着物プロファイルのシャフト上部の圧力損失は、正常プロファイル(段差角度 $\theta = 0 \text{ deg}$)に比べて 70~90% に減少し、段差角度が 45 deg 以上ではほぼ一定である。凹凸プロファイルの場合のシャフト上部の圧力損失は、正常プロファイルに比べて 65% に減少する。浸食プロファイルのシャフト上部の圧力損失は、段差角度が 10 deg の場合には、正常プロファイルとほぼ同じであるが、段差角度が 45 deg の場合には、正常プロファイルに比べて 90% に減少する。一方、細粒鉱石の比率が 40% の場合の付着物プロファイルでは、シャフト上部の圧力損失は、いずれの段差角度においても、細粒鉱石の比率が 0% に比べて約 2 倍に増加する。

4. 考 察

4.1 炉壁混合層の形成メカニズム

シャフト上部プロファイル損傷時の炉壁混合層の形成メカニズムを Fig. 9 に示す。付着物プロファイルの場合の炉壁混合層の形成要因は、付着物の上部段差および下部段差である。付着物の上部段差では、炉内の断面積が急激に縮小するため、粒径と安息角の大きいコークスの降下が遅れやすい。そして、そのコークス層の間を粒径と安息角の小さい鉱石とくに細粒鉱石が浸透しながら下方へ降下するため、付着物の炉壁近傍にコークスと鉱石の混合層が形成される。付着物の下部段差では、炉内の断面積が急激に拡大するため、付着物の下面の空洞に向かってコークス層と鉱石層が流れ込む。そして、その流れ込みの過程で、粒径と安息角の小さい細粒鉱石が、空間率が大きくなったコークス層内を下方に浸透するため、付着物の下部段差の直下の炉壁近傍に、コークス主体の混合層が形成されると推察される。この細粒鉱石の浸透現象により、炉壁混合層内の鉱石の存在比率が鉱石の粒径と安息角の減少にともない小さくなるという Fig. 4 の知見も説明することができる。

浸食プロファイルの場合の炉壁混合層の形成要因は、上記の付着物の下部段差と同様に、浸食による断面積の急激な拡大である。とくに、炉内の断面積の変化率が大きい段差角度が 45 deg (シャフト角度: 36 deg) の場合には、炉壁混合層が形成されるため、炉壁近傍のガス流速が増加する。しかし、炉内の断面積の拡大の変化率が小さい段差角度が 10 deg (シャフト角度: 71 deg) の場合には、装入物の降下挙動が炉内プロファイルの変化に追従できるため混合層はほとんど形成されず、炉壁近傍のガス流速は正常プロファイルの場合と同じである。

凹凸プロファイルの場合の炉壁混合層の形成要因は、凹

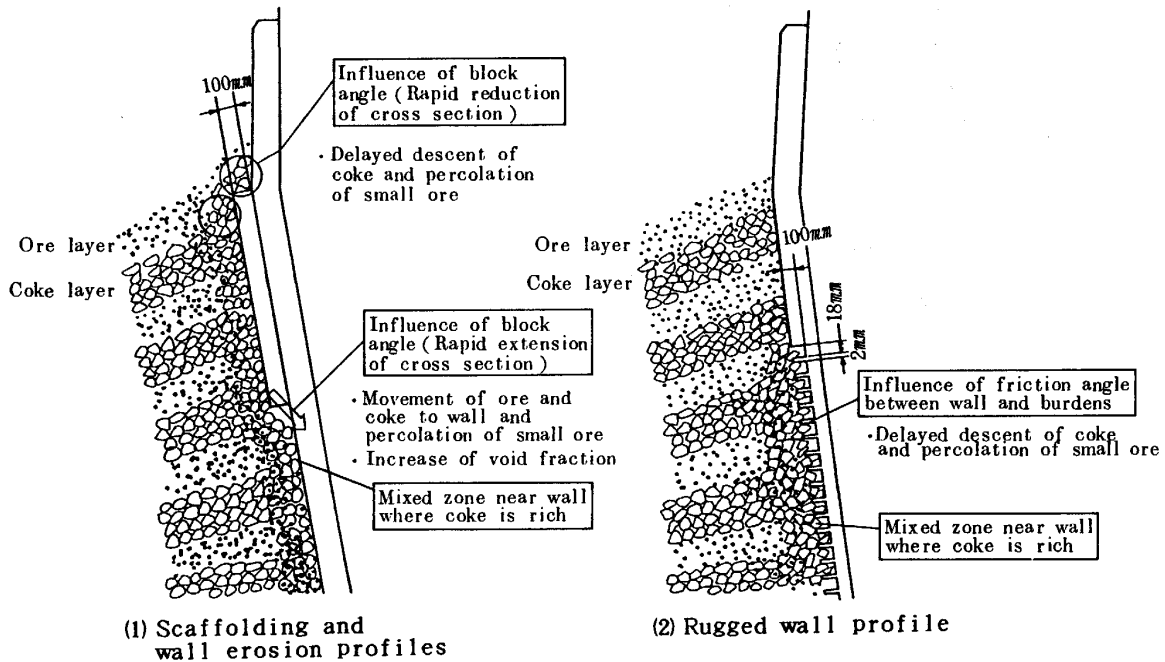


Fig. 9. Formation mechanism of mixed zone near wall in case of scaffolding, wall erosion and rugged wall profiles.

凸面とコークスとの摩擦角が大きいことである。凹凸面の近傍で粒径と安息角が大きいコークスの降下遅れと粒径と安息角の小さい細粒鉱石の下方への浸透現象が進行し、コークス主体の混合層が形成されると推察される。

4.2 炉壁混合層の空間率とガス流の周辺流化の関係

3.1 節および 3.3 節より、シャフト上部プロフィールの損傷時には、炉壁混合層が形成されると同時に炉壁近傍のガス流速が増加することが判明した。そこで、シャフト上部のガスの圧力損失の測定値を (3) 式に示す圧力損失に関する Ergun 式に代入することにより、ガス流の周辺流化に密接に関連していると考えられる炉壁混合層の空間率 ϵ_2 を推定した。

なお、空間率の計算にあたっては、以下の仮定に基づいた。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \left(\frac{\mu(1-\epsilon)^2}{(\phi \cdot Dp)^2 \epsilon^3} \right) u + 1.75 \left(\frac{\rho(1-\epsilon)}{(\phi \cdot Dp) \epsilon^3} \right) u^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$u_1 S_1 + u_2 S_2 = u (S_1 + S_2) \dots\dots\dots (4)$$

① 炉内の充填層は、Fig. 10 に示すように、層構造の乱れない移動層（以下、層状移動層と呼ぶ）と炉壁混合層に分割でき、炉壁混合層の幅は平均で 30 mm である。

② ガス流れはピストン流であり、層状移動層と炉壁混合層のシャフト上部での圧力損失は等しい。

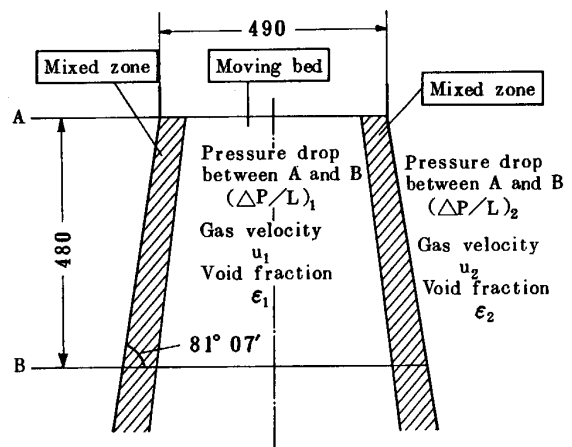


Fig. 10. Assumption of laye structure of burdens in upper shaft.

③ 層状移動層内の空間率 ϵ_1 は、正常プロフィールの場合の空間率に等しく、同じ粒度分布条件では一定である。

④ コークス層（粒径：5~7 mm）の空間率は 0.511¹⁵⁾ とし、鉱石層（粒径：1~3 mm）の空間率は 0.520¹⁵⁾ とする。そして、細粒鉱石（粒径：0.5~1 mm）と粗粒鉱石（粒径：1~3 mm）の混合物の空間率は、著者らの多成分系粒体の空間率推定式¹⁶⁾に基づき推定する。

上記の仮定の基に計算された炉壁混合層の空間率と層状移動層の空間率の比に及ぼすシャフト上部プロフィールの影響を Fig. 11 に示す。付着物プロフィール（段差角度：45 deg, 90 deg）の炉壁混合層の空間率は、正常プロフイ

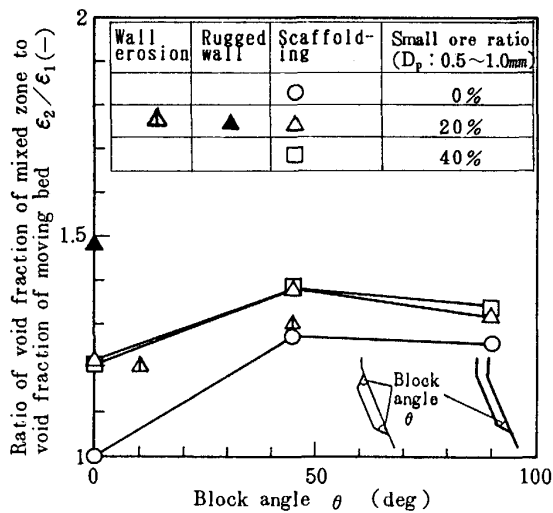


Fig. 11. Influence of upper shaft profile and small ore ($D_p: 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$) ratio on void fraction of mixed zone near wall.

ル (突起物の段差角度: 0 deg) に比べて 7~27% 大きく、段差角度が 45 deg 以上では炉壁混合層の空間率に及ぼす段差角度の影響は一定である。本知見、および、炉壁近傍のガス流れに及ぼす段差角度の影響は断面積の急激な拡大時に大きいという仮定に基づけば、Fig. 6 での付着物プロフィールの場合の炉壁近傍のガス流速が浸食プロフィールの場合とほぼ同じあるいは少し小さくなる可能性もあると考えられる。凹凸プロフィールの炉壁混合層の空間率は、正常プロフィールに比べて 20% 大きい。浸食プロフィールの炉壁混合層の空間率は、段差角度が 10 deg の場合には、正常プロフィールとほぼ同じであるが、段差角度が 45 deg の場合には、正常プロフィールに比べて 7% 大きい。

本知見より、シャフト上部プロフィールの損傷時には、コークス主体の炉壁混合層の形成に起因する空間率の増加のため炉壁近傍のガス流速が増加したものと推察される。また、細粒鉱石の比率が 20%、40% の場合の炉壁混合層の空間率は、細粒鉱石の比率が 0% の場合に比べて 7~20% 大きい。これは、細粒鉱石の中心方向への流れ込み起因する炉壁近傍のガス流速の増加¹⁷⁾によるものと推察される。

5. 実炉でのシャフト上部炉壁面の補修前後のガス流分布の比較

稼動 9 年目にはいった君津 2 高炉 (1982 年 2 月に火入れ) は、1990 年 5 月 28 日から 6 月 4 日の長時間休風 (休風時間: 184 h) 時に、250~500 mm とレンガの浸食が激しかった鉱石受け金物直下 7 m の範囲の非冷却部

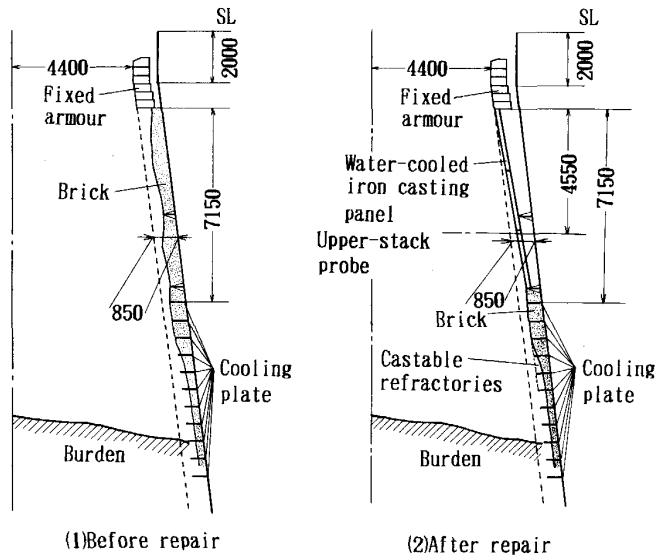


Fig. 12. Comparison of upper shaft profile between before and after repair of upper shaft in Kimitsu No. 2 BF.

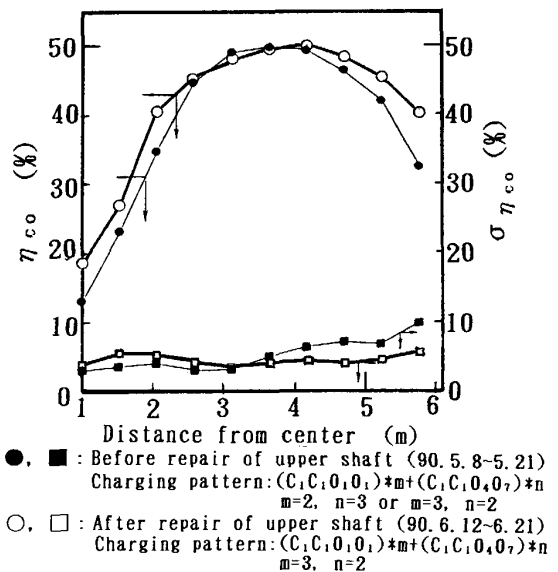


Fig. 13. Comparison of η_{CO} and its deviation of upper-stack probe between before and after repair of upper shaft in Kimitsu No. 2 BF.

(Fig. 12 (1)) に水冷金物を取り付け、シャフト上部の冷却盤にキャスト物を吹き付けた (Fig. 12 (2)). 水冷金物取り付けおよび冷却盤へのキャスト物吹付けによるシャフト上部炉壁面の補修前後のシャフト上部ゾンの η_{CO} 分布の比較を Fig. 13 に示す。ここで、データを比較した期間は、装入パターンがほぼ同じである 2 週間前後の期間とした (補修前: 5 月 8 日~5 月 21 日, 補修後: 6 月 12 日~6 月 21 日)。シャフト上部炉壁面の補修により、シャフト上部ゾンの炉壁近傍 (炉壁か

Table 2. Change in production, fuel rate and CO gas utilization between before and after repair of upper shaft in Kimitsu No. 2 BF.

	Before repair		After repair			
	1990.4	5	6	7	8	9
Production (t/d)	6 432	5 840	5 509	6 537	6 981	6 915
Fuel rate (CR)(kg/t)	513	503	507	493	490	488
CO gas utilization (%)	47.8	47.6	47.8	49.2	49.2	49.1

ら 1.5 m の範囲の 3 点) の CO ガスの利用率 η_{CO} の変動が 2.4~4.4% 減少し, η_{CO} の平均値が 2.0~7.6% 増加した。これは, シャフト上部炉壁面の補修により, 炉壁浸食あるいは炉壁面の凹凸形状に起因する炉壁混合層の形成が抑制され, 炉壁近傍のガス流が安定化したためと考えられる。この炉壁近傍のガス流の安定化により, 君津 2 高炉は長時間休風後も順調に立ち上がり, Table 2 に示すように, 1 か月後の 7 月以降 η_{CO} が 1.5% 上昇し, 燃料比を 10~15 kg/t 低下することができた。

6. 結 言

高炉シャフト部の扇形冷間模型および高炉三次元半裁の冷間模型を用いて, ガス流れおよび炉壁混合層の形成挙動に及ぼすシャフト上部プロフィールおよび装入物の物理性状の影響を解析し, 以下の知見を得た。

(1) シャフト上部プロフィールの損傷時には, コークス主体の空間率の大きい炉壁混合層が形成され, 正常プロフィールに比べて, 炉壁近傍のガス流速が 1.5~2.5 倍に増加し, 高ガス流速の範囲が 1.5~2.0 倍に拡大する。このガス流の周辺流化現象は, 細粒鉱石の比率の増加にともないさらに助長される。

(2) シャフト上部での炉壁混合層は, 炉内断面積の急激な変化あるいは炉壁面での摩擦角の増大に起因するコークスの降下遅れと粒径と安息角の小さい細粒鉱石の浸透現象により形成される。

(3) 君津 2 高炉では, シャフト上部炉壁面の補修により, シャフト上部ゾンデの炉壁近傍の CO ガス利用率 η_{CO} の変動が減少し, η_{CO} の平均値が増加した。これは, 炉壁浸食あるいは炉壁面の凹凸形状に起因する炉壁混合層の形成が抑制され, 炉壁近傍のガス流が安定化したためと考えられる。

記 号

- D_p : 装入物の平均粒径 (m)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- L : 充填層の層高 (m)
- ΔP : 充填層の圧力損失 (Pa)
- S : シャフト上部での平均断面積 (m^2)
- S_1, S_2 : シャフト上部での層状移動層, 炉壁混合層の平均断面積 (m^2)
- u, u_f : 空塔ガス流速 (m/s)
- u_s : 装入物の降下速度 (m/s)
- u_1, u_2 : 層状移動層, 炉壁混合層の空塔ガス流速 (m/s)
- ε : 空間率 (-)
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 層状移動層, 炉壁混合層の空間率 (-)
- θ : 段差角度 (deg)
- μ : ガスの粘度 ($Pa \cdot s$)
- μ_c : 装入物の内部摩擦係数 (-)
- ρ, ρ_f : ガスの密度 (kg/m^3)
- ρ_p : 装入物の見掛け密度 (kg/m^3)
- ϕ : 形状係数 (-)

文 献

- 1) 佐藤裕二, 杉山 喬, 中村正和, 原 行明: 鉄と鋼, **66** (1980), S634
- 2) 稲垣憲利, 徳永正昭, 野宮好堯, 松田正義: 鉄と鋼, **67** (1981), S23
- 3) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晉一, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 936
- 4) 一田守政, H. BIAUSSER: 鉄と鋼, **69** (1983), S61
- 5) 佐藤武夫, 炭竈隆志, 山口 篤, 木村康一, 下村昭夫, 古屋茂樹: 鉄と鋼, **71** (1985), S821
- 6) 原 三郎, 山西逸生, 高達 洋, 小池厚則, 梶原義雅, 的場 毅: 鉄と鋼, **71** (1985), S54
- 7) 磯部光利, 木村吉雄, 清水正賢, 稲葉晉一: 鉄と鋼, **73** (1987), S9
- 8) 和栗真一郎, 馬場昌喜, 藤田勝人, 藤原 稔, 井手英治, 小松康孝: 鉄と鋼, **70** (1984), S738
- 9) 大橋隆夫, 筒井直樹, 長田 晃, 藤井健朗, 庄司信之: 鉄と鋼, **72** (1986), S107
- 10) 一田守政, H. BIAUSSER: 鉄と鋼, **69** (1983), S62
- 11) 古川高司, 森井和之, 井上 強, 井内和義, 辻 雅芳, 新沼伸一: 鉄と鋼, **71** (1985), S820
- 12) 大野陽太郎, 近藤國弘: 鉄と鋼, **70** (1984), S51
- 13) 桑野芳一: 高炉内現象とその解析 (鉄鋼基礎共同研究会高炉内反応部会編) (1982), p. 177
- 14) 横山藤平: 粉体工学便覧 (粉体工学会編) (1986), p. 144 [日刊工業新聞社]
- 15) 一田守政, 田村健二, 磯崎洋一, 林 洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), S748
- 16) 一田守政, 田村健二, 磯崎洋一, 林 洋一: 鉄と鋼, **73** (1987), S749
- 17) 一田守政, 田村健二: 材料とプロセス, **3** (1990), p. 1011