

高炉内における装入物の降下と溶融の挙動に
及ぼす炉体内壁面形状の影響一田守政*・西原一浩*²・田村健二*³・須賀田正泰*⁴Influence of Inner Wall Profile on Descending and Melting
Behavior of Burden in the Blast Furnace

Morimasa ICHIDA, Kazuhiro NISHIHARA, Kenji TAMURA and Masayasu SUGATA

Synopsis:

The influence of the inner wall profile on the descending and melting behaviors of burden were analyzed by using a three-dimensional semicircular warm model of the blast furnace under conditions set as similar as possible to the physical phenomena in the furnace. In the case of a profile with blocks installed on the belly where the horizontal stress acting to the wall is at its maximum, a sluggishly descending zone of a thickness 2~5 times of the projecting length of the blocks is formed near the wall just above the blocks. The thickness of the sluggishly descending zone near the wall increases with increasing projecting length of the blocks on the wall and with decreasing installation interval of distance between the blocks and it decreases with increasing ore/coke near the wall. The height of the dead man decreases with the formation of the wall sluggishly descending zone due to the blocks on the wall and dead man temperature decreases. For decreasing the thickness of the sluggishly descending zone near the wall, the ore/coke near the wall should be preferably increased as far as the heat-flow ratio is permitted. Such a burden distribution is effective for high-rate pulverized coal injection operation in which the melting capacity near the wall is large.

Key words: ironmaking; warm model; inner wall profile; ore/coke; sluggishly descending zone; dead-man; all coke operation; pulverized coal injection operation.

1. 緒 言

高出銑比あるいは低燃料比を指向する高炉操業において、炉況を安定に維持するためには、応力状態が受動状態である高炉下部での装入物の降下領域を拡げて装入物の降下速度を低下させ、銑石の還元と溶融に必要な時間を確保すると共に、装入物の降下を円滑にすることが重要と推定される。

従来、炉壁近傍の降下挙動に及ぼす炉体内壁面形状の影響を冷間模型実験に基づいて解析した研究^{1)~6)}が報告されているが、炉下部での装入物の降下挙動と溶融挙動に及ぼす炉体内壁面形状の影響を論じた研究⁷⁾は少ない。そこで、筆者らは高炉内の物理現象とできるだけ相似となるように条件を設定した高炉三次元半裁模

型^{8)~10)}を用いて、装入物の降下挙動（降下速度分布、炉壁停滞層および炉芯の形状）と溶融挙動に及ぼす炉体内壁面形状の影響を解析した¹¹⁾。さらに、降下挙動・溶融挙動と Ore/Coke 分布との関係を解析することにより、炉壁面が損傷した場合の適正な装入物分布について考察した。

2. 実験方法および実験条件

実験には既報^{8)~10)}と同じ高炉三次元半裁模型を用いた。実験上の主な操作因子となる炉体プロフィールとして、Fig. 1 に示す 5 種類の条件を設定した。(1)は火入れ直後を想定したもの（シャフト角 81°04′，朝顔角 81°07′，炉腹高さ 150 mm，朝顔高さ 200 mm：以下，正常プロフィールと呼ぶ），(2)，(3)は炉壁付着物を想定

平成元年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 10 月 5 日受付 (Received Oct. 5, 1990)

* 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 Futtsu 299-12)

*² 新日本製鉄(株)八幡技術研究所 (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (現：新日鉄化学(株)) (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., Now Nippon Steel Chemical Co., Ltd.)

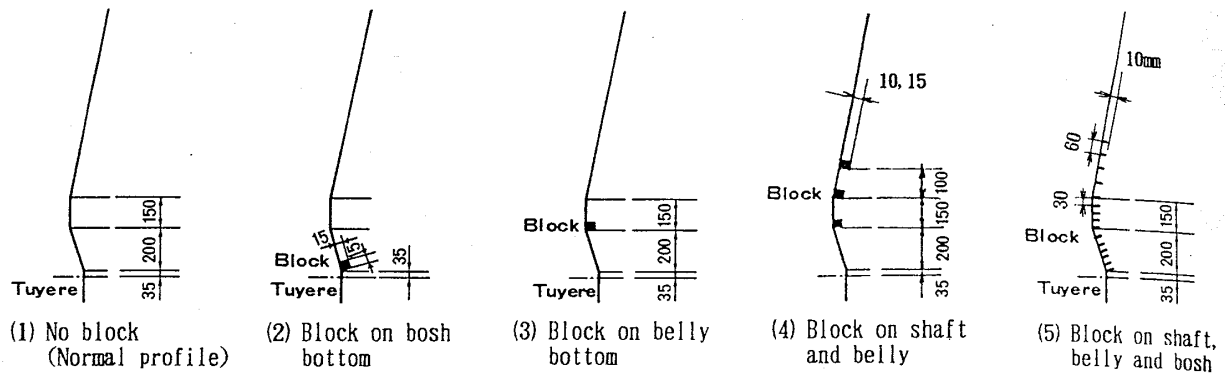
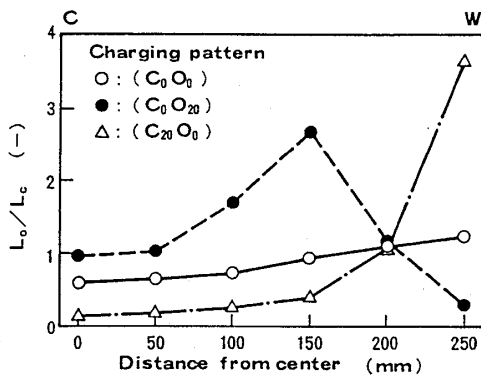


Fig. 1. Inner wall conditions.

して突出し長さ 15 mm の突起物をそれぞれ朝顔下端および炉腹下端に設置したもの、(4)は Γ 型ステーブを想定して突出し長さ 10 mm あるいは 15 mm の突起物をシャフト下部・炉腹上端・炉腹下端の 3 か所に設置したもの、(5)は冷却盤の露出を想定して突出し長さ 10 mm の突起物をシャフト下部から朝顔部の範囲に設置

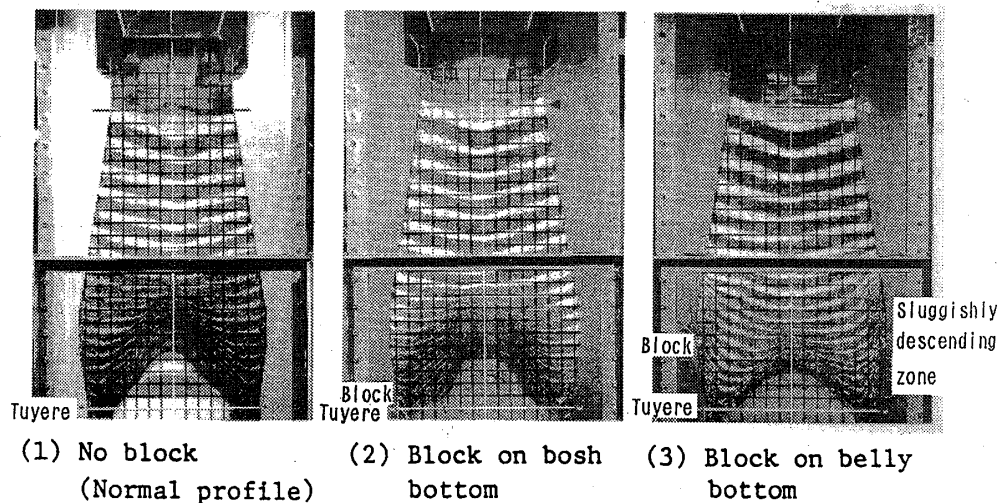
(設置間隔: 炉腹部, 朝顔部 30 mm, シャフト下部 60 mm) したものである。また, 装入物および装入条件は既報^{8)~10)}と同じであり, コークスと擬似鉬石を, MA 未使用 (C_0O_0), 鉬石内振り (C_0O_{20}), コークス内振り ($C_{20}O_0$) (以下, 鉬石外振りと呼ぶ) の 3 種類の装入パターンで装入した。ここで, 添え字は, ムーバブル・アーマーのプレートと鉛直面のなす角度である。Fig. 2 に示すように, MA 未使用の場合には, 半径方向における擬似鉬石とコークスの層厚比 (L_O/L_C : 以下, Ore/Coke と呼ぶ) がほぼ均一な分布, 鉬石内振りの場合には, 中間部の Ore/Coke が最大となる分布, 鉬石外振りの場合には, 周辺部の Ore/Coke が最大となる分布である。

Fig. 2. Radial distribution of layer thickness ratio (L_O/L_C) of ore to coke.

3. 実験結果

3.1 装入物の降下挙動と熔融挙動に及ぼす炉下部の炉壁突起物の影響

MA 未使用の装入条件の場合の高炉内における装入物

Photo. 1. Influence of block position on cohesive zone profile and dead-man profile in case of (C_0O_0) charging pattern.

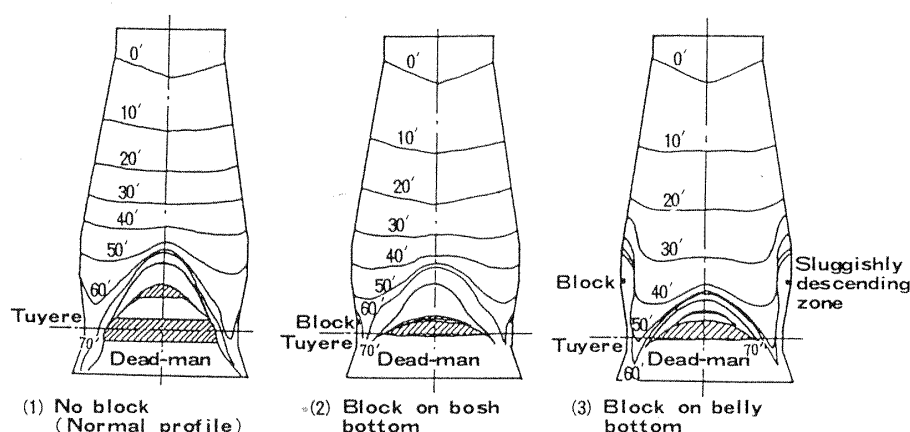


Fig. 3. Influence of block position on burden descent in case of (C_0O_0) charging pattern.

の充填状態、および、滞留時間（タイムライン）に及ぼす炉壁突起物の影響を Photo. 1 および Fig. 3 に示す。正常プロファイルの場合には、シャフト部の装入物の降下速度は半径方向ではほぼ均一であるが、炉腹上端より中心部の降下速度が小さくなり、炉芯の頂層は炉腹まで上昇し、逆 V 型の融着帯が形成された。朝顔下端に突起物を設置した場合には、突起物直上の炉壁近傍に突起物の突出し長さの 1～2 倍の厚みの停滞層が形成され、炉芯が縮小し逆 V 型の融着帯が形成された。炉腹下端に突起物を設置した場合には、突起物の直上の炉壁近傍に突起物の突出し長さの 2～5 倍の厚みの停滞層が形成され、炉芯が縮小し W 型の融着帯が形成された。

3.2 装入物の降下速度分布に及ぼす炉壁突起物の影響

既報⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾と同様な固体流れの仮定に基づき計算した半径方向における装入物の相対降下速度 (V/V_{ave}) 分布に及ぼす炉壁突起物の設置位置の影響を Fig. 4 に示す。なお、突起物により炉壁に形成される停滞層内でも装入物はわずかに降下しているが、流線は炉壁停滞層内を迂回しながら羽口先端に向かうと仮定した。ここで、シャフト部の降下速度 $V(0-30)$ は時刻が 0' と 30' におけるタイムラインから計算した降下速度であり、炉下部の降下速度 $V(30-60)$ は時刻が 30' と 60' におけるタイムラインから計算した降下速度である。装入条件は MA 未使用の条件である。

朝顔下端に突起物を設置した場合の半径方向における降下速度分布は、正常プロファイルの場合の降下速度分布とはほぼ同じである。一方、炉腹下端に突起物を設置した場合の降下速度分布は、正常プロファイルの場合の降下速度分布と大幅に異なり、周辺部の降下速度が減少し中心部の降下速度が増大した。

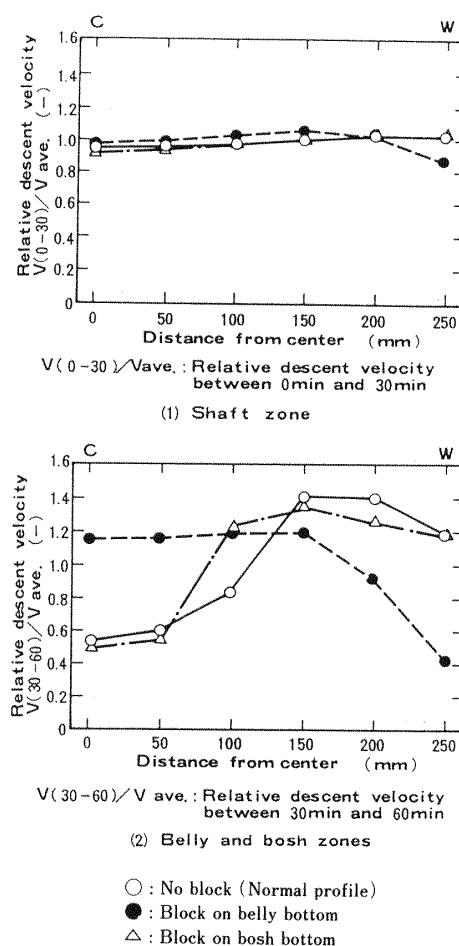


Fig. 4. Influence of block position on radial distribution of burden descent velocity (V/V_{ave}) in case of (C_0O_0) charging pattern.

3.3 炉内の温度分布に及ぼす炉壁突起物の影響

MA 未使用の装入条件の場合に赤外線放射温度計により測定した炉下部の温度パターンに及ぼす炉壁突起物の影響を Photo. 2 に示す。正常プロファイルの場合には、

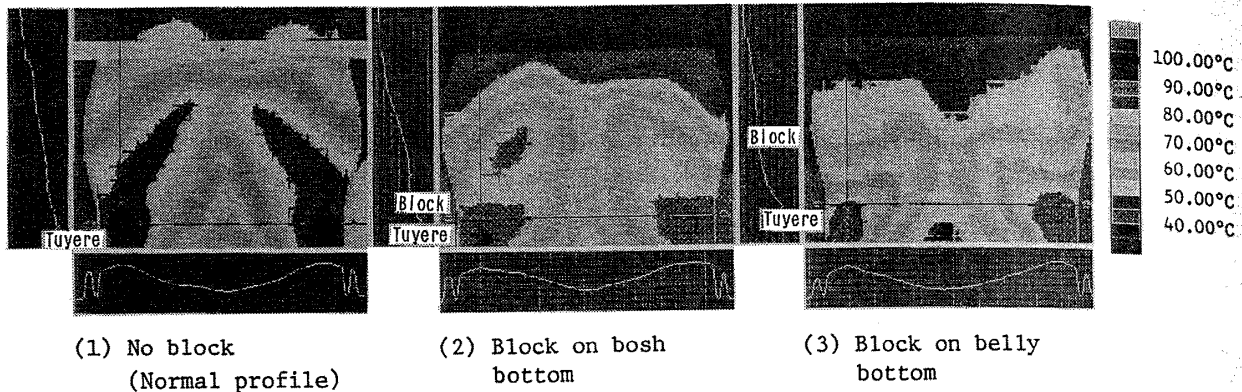


Photo. 2. Influence of block position on temperature distribution in the lower part of blast furnace model in case of (C₀O₀) charging pattern.

高温の領域は羽口を中心とした逆 V 型の融着帯と炉芯に囲まれた領域であり、羽口から遠ざかるにつれて温度が低下している。朝顔下端に突起物を設置した場合には、正常プロファイルの場合とほぼ同じ温度分布であった。炉腹下端に突起物を設置した場合には、中心部の温度が大幅に低下した。

4. 考 察

4.1 固体流れモデル¹³⁾¹⁴⁾による降下挙動の推定

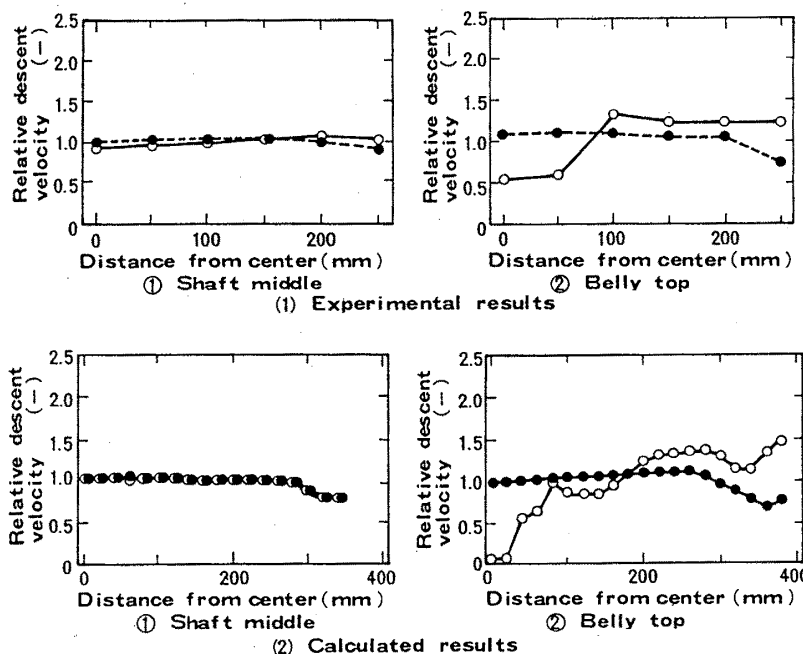
高炉内における装入物の運動をシミュレートする数学モデルとして、TANAKA¹⁵⁾は離散ボールモデルの適用を試みているが、現状ではホッパー内あるいは炉頂での装入時の粒子の運動に限定されている。そこで、(1)式

に示す連続の式と(2)式に示す連続体を仮定したポテンシャルフローの運動方程式を連立して求めた杉山らのモデル¹³⁾¹⁴⁾に基づき、流れ関数に関する二階の偏微分方程式を差分法して数値計算し、固体の流れ線を求めた。ここで、 ϕ_s は速度ポテンシャルであり K は流通抵抗である。

$$\frac{\partial(rU_{sz} + F_s)}{\partial z} + \frac{\partial(rU_{sr})}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\text{grad} \phi_s = KU_s \quad (2)$$

Fig. 5 に、正常プロファイルと炉腹下端に突起物を設置した場合における降下速度分布の実験値と計算値を比較して示す。図中の上段に示した実験値は既報⁹⁾¹⁰⁾¹²⁾と同様な固体流れの仮定に基づき求めた値である。また、



○ : No block (Normal profile)
● : Block on belly bottom
Fig. 5. Comparison between calculated results and experimental results on radial distribution of burden descent.

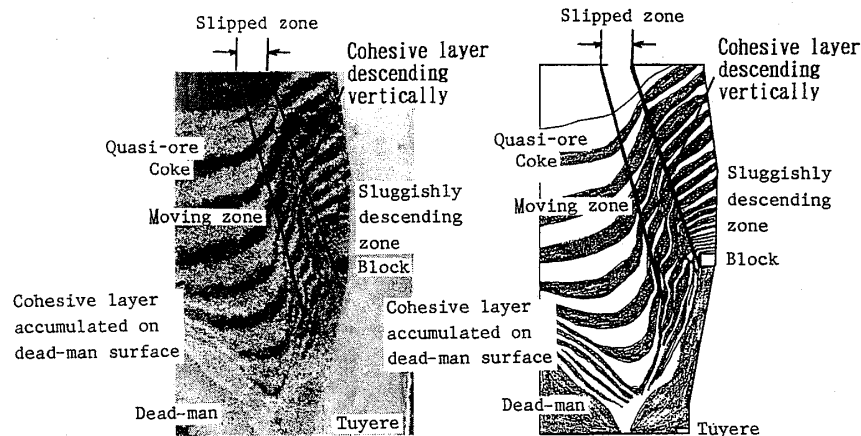


Fig. 6. Layer structure of sluggishly descending zone near wall.

下段の計算値は、上記の杉山らのモデル¹³⁾¹⁴⁾に実験から得られたコークス層、鉱石層、融着帯、炉壁停滞層および炉芯の形状を適用し、炉芯および炉壁停滞層は十分に大きな流通抵抗 K を持つ充填層と仮定した。すなわち、炉芯内のコークス更新速度は、中心部・中間部で小さく周辺部で大きいこと¹⁶⁾から、出鉄口位置 +0.5 m と仮定したスラグ面と接する炉中心部で $K=1000$ 、炉芯表層で $K=5$ とし、その間では炉中心部と炉芯表層との間の距離に応じて按分した値とした。炉壁停滞層では装入物は非常にゆっくり降下しほぼ停滞していることから $K=1000$ とし、その他の領域では $K=1$ とした。

降下速度分布の実験値と計算値は比較的良く一致しており、ポテンシャルフローを仮定した運動方程式の流通抵抗 K を 1~1000 の範囲で設定することにより、炉壁停滞層が形成されるような場合の降下速度分布も近似的に推算できると考えられるが、その妥当性については今後さらに検討が必要である。

4.2 炉壁停滞層の層構造と形成メカニズム

突起物を炉腹下端に設置した場合に形成される炉壁停滞層の層構造を Fig. 6 に示す。炉壁停滞層は擬似鉱石の融着層（擬似鉱石が軟化融着して層厚が薄くなっている層）とコークス層の積層構造となっている。これは、突起物の存在により炉壁近傍の装入物の降下速度が遅くなり、積層したものと考えられる。

この炉壁停滞層と移動層の境界には、Fig. 6 に示すように、クーロンの降伏限界値と等しい剪断応力の条件で装入物が降下する変形層が存在する。この変形層では、水平であった融着層が縦長状態に変形しながら降下し、その降下も断続的であることから、変形層内の空間率は移動層内の空間率より大きいと推定される。

つぎに、壁面応力分布に及ぼす突起物の設置位置の影響

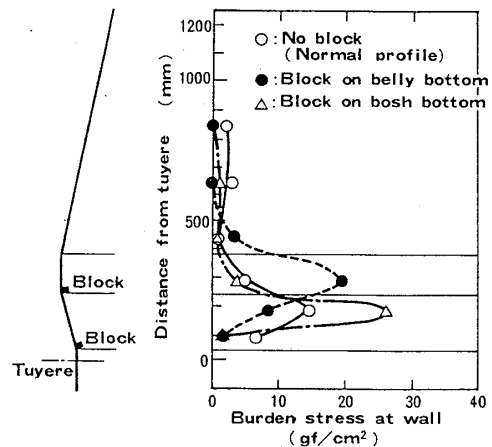


Fig. 7. Influence of block position on burden stress at wall.

響を Fig. 7 に示す。朝顔下端に突起物を設置した場合には、朝顔中部で壁面応力が最大となるが、突起物直上の朝顔下部の壁面応力は小さい。このように、突起物直上の朝顔下部の壁面摩擦力が小さいために、炉壁停滞層が小さいと推定される。炉腹下端に突起物を設置した場合には、壁面応力の増加の範囲が広く、とくに突起物直上の炉腹部の壁面応力が最大となる。このように、突起物直上の炉腹部の壁面摩擦力が大きいために、炉壁停滞層が大きいと推定される。

Table 1. Assumption for calculation.

Void fraction;	
Quasi-ore layer	=0.45
Coke layer	=0.51
Cohesive zone	= $0.7 * \epsilon_{ore}^{17)}$
Dead-man	= $0.9 * \epsilon_{coke}^{9)10)}$
Raceway	= $1.4 * \epsilon_{coke}^{18)}$
Sluggishly descending zone	= $\epsilon_{cohesive zone}$
Slipped zone	= ϵ_{coke}

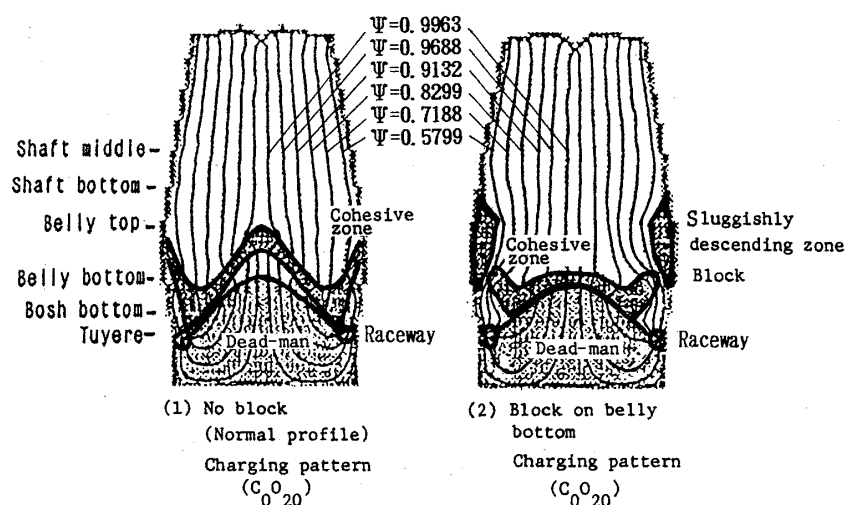


Fig. 8. Comparison of gas stream lines in case with no block and with block on belly bottom.

4.3 ガス流れに及ぼす炉壁突起物の影響

炉内の空間率の仮定を Table 1 に示す。擬似鉱石層およびコークス層の空間率は実験値を用い、融着層¹⁷⁾、炉芯⁹⁾¹⁰⁾およびレースウェイ¹⁸⁾の空間率は従来の知見に基づき仮定した。さらに、4.2 節の知見より、炉壁停滞層の空間率は融着帯の空間率に等しく、変形層の空間率はコークス層の空間率に等しいと仮定し、杉山らのガス流れの数学モデル¹³⁾¹⁴⁾に基づいてガスの流れを計算した。計算に際して、コークス層、鉱石層、融着帯、炉壁停滞層、および、炉芯の形状は実験値を用いた。

正常プロファイルの場合および炉腹下端に突起物を設置した場合に、鉱石内振りの装入条件で装入物を装入した場合のガスの流れの計算結果を Fig. 8 に示す。W 型の融着帯が形成された正常プロファイルの場合には、羽口から吹き込まれたガスの一部は炉壁に沿って塊状帯へ流出している。一方、U 型の融着帯が形成された炉腹下端に突起物を設置した場合には、炉壁停滞層と移動層の間の変形層でのガスの流れの間隔が狭く、炉芯部でのガスの流れの間隔が広がっている。これからわかるように、炉壁停滞層と移動層の間の変形層でのガス流量が多く、炉芯部でのガス流量が少ない。

4.4 炉下部の温度分布に及ぼす炉壁突起物の影響

炉腹下端に突起物を設置した場合には、正常プロファイルの場合に比べて、炉下部の温度分布が大幅に異なり、中心部の温度が大幅に低下した。これは、3.2 節および 4.3 節で説明したように、炉腹下端に突起物を設置した場合には、炉腹部以下の中心部の降下速度が増加しガス流速が低下したために中心部の熱流比が増加し、中心部の温度が低下したと推定される。

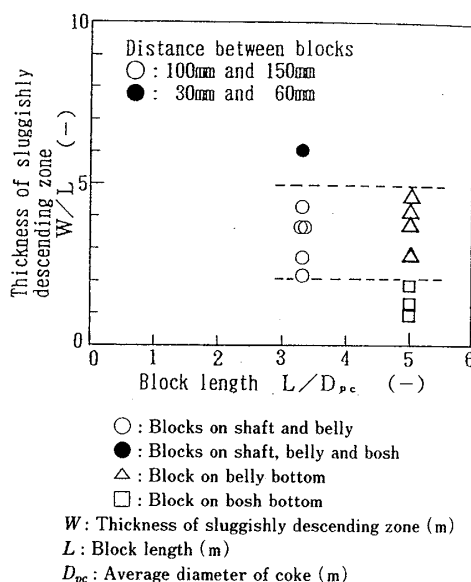


Fig. 9. Influences of block length, distance between blocks and block position on thickness of sluggishly descending zone.

4.5 炉壁停滞層の形成挙動に及ぼす炉壁突起物および Ore/Coke 分布の影響

炉壁停滞層の厚みに及ぼす炉壁突起物の突出し長さの影響を Fig. 9 に示す。ここで、炉壁停滞層の厚みについては、実験開始後にトレーサーとして装入した着色コークスの 70 min 時点での等時間線より決定した。朝顔下端に突起物を設置した場合の炉壁停滞層の厚みは、突起物の突出し長さの 1~2 倍であるが、炉腹部およびシャフト下部に突起物を設置した場合の炉壁停滞層の厚みは、突起物の突出し長さの 2~5 倍である。このことより、火入れ当初の炉体内壁面プロファイルが損傷し、ステープの T 部や冷却盤が炉内に突き出しはじめると、炉壁停滞層の厚みが経時的に増加すると推定される。炉

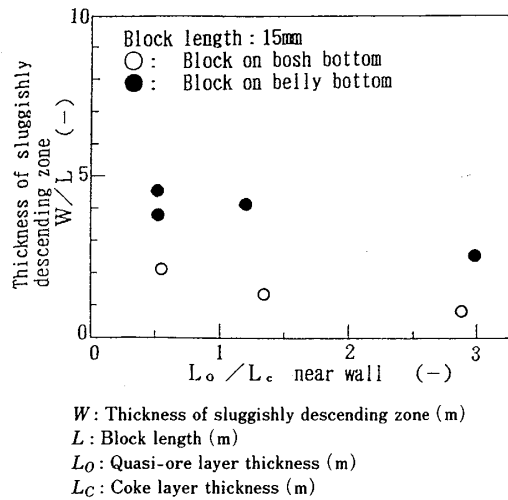


Fig. 10. Influences of layer thickness ratio of quasi-ore to coke near wall (within 22.5 mm from wall) and block position on thickness of sluggishly descending zone.

壁停滞層の厚みは突起物の設置間隔によっても変化する。冷却盤高炉のように、上下の突起物の間隔が 30 mm~60 mm と短い場合に形成される炉壁停滞層の厚みは、 Γ ステップ高炉のように、突起物の間隔を 100 mm~150 mm にした場合に比べて約 2 倍である。このことより、冷却盤高炉では、 Γ ステップ高炉に比べて炉壁停滞層が形成されやすくしかも脱落しにくいと推定される。

つぎに、炉壁停滞層の厚みに及ぼす炉壁近傍（炉壁から 22.5 mm（実炉換算値 450 mm）の範囲）の Ore/Coke の影響を Fig. 10 に示す。炉壁近傍の Ore/Coke（擬似鉬石層とコークス層の層厚比）の増加にともない、炉壁停滞層の厚みは減少している。このことより、炉壁近傍の Ore/Coke は炉壁停滞層の厚みの有効な制御因子であることが判明した。炉壁近傍の Ore/Coke の増加にともない、炉壁停滞層の厚みが減少するメカニズムは明確ではないが、炉壁近傍の Ore/Coke の増加にともなう突起物直上の垂直荷重応力の増大により炉壁停滞層の厚みが減少したと推定される。

4.6 炉芯の形成挙動に及ぼす炉壁突起物および Ore/Coke 分布の影響

炉芯の高さに及ぼす炉壁突起物の設置位置および中心部（炉中心から半径 50 mm（実炉換算値 1000 mm）の範囲）の Ore/Coke の影響を Fig. 11 に示す。ここで、炉芯の高さについては、炉壁停滞層の厚みと同様に、実験開始後にトレーサーとして装入した着色コークスの 70 min 時点での等時間線より決定した。炉芯の高さは突起物の設置により大幅に低下し、突起物を炉腹下端に

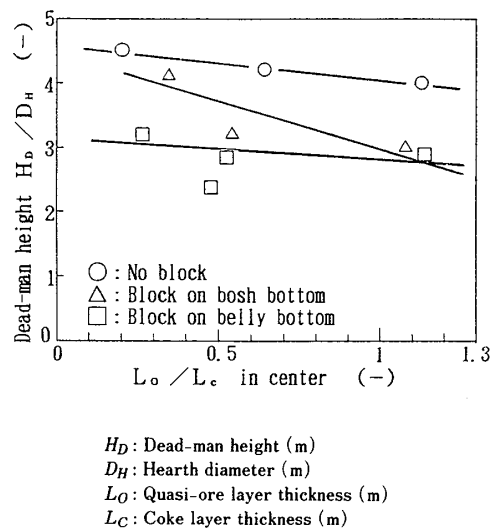


Fig. 11. Influence of layer thickness ratio of quasi-ore to coke in center (within 50 mm from center) and block position on dead-man height.

設置した場合に最も低い。そして、炉芯の高さは中心部の Ore/Coke の増加にともない低下する。

上記の炉芯の高さの変化は、炉壁停滞層の形成挙動と密接に関連している。突起物を炉腹下端に設置した場合には、4.5 節で述べたように、突起物直上の炉壁近傍に突出し長さの 2~5 倍の炉壁停滞層が形成される。そして、この炉壁停滞層により上方の装入物の荷重が保持されるため、炉下部の垂直応力が著しく減少し、Fig. 7 に示すように炉下部の受動応力領域が上方に拡大した結果、炉芯が縮小したものと推定される。また、本実験で中心部の Ore/Coke を増加した場合には、炉壁近傍の Ore/Coke が減少するため、Fig. 10 に示したように炉壁停滞層が拡大し、炉芯が縮小したものと推察される。

5. 炉体損傷時の適正な装入物分布

第 3 章および第 4 章の知見から、炉体内壁面が損傷した場合の適正な装入物分布は以下のように考えられる。

炉下部の炉体損傷時には、炉壁停滞層が形成されやすく、また、これによって炉芯が縮小するため、中心部の降下速度（熱流比）が増加し、炉芯温度が低下する可能性がある。したがって、炉芯温度を低下させないためには、炉体損傷時に形成される炉壁停滞層をできるだけ縮小させることが必要である。

一方、4.5 節で説明したように、炉壁近傍の Ore/Coke は炉壁停滞層の厚みの有効な制御因子であり、鉬石外振りにより炉壁近傍の Ore/Coke を増加させると、炉壁停滞層の厚みが減少する。しかし、その場合には炉

壁近傍の熱流比の増加により炉下部の温度が低下しやすい⁹⁾¹⁰⁾。したがって、鉬石外振りにより炉壁近傍の Ore/Coke を増加した分布の適用は、補助燃料吹込み時に比べて炉壁温度が低下しやすいオールコークス操業時¹⁹⁾には難しいが、降下速度（熱流比）の低下による温度上昇と羽口先端近傍の温度上昇により炉壁近傍の溶融能力が大きい微粉炭多量吹込み操業時には有効であると推察される。

6. 結 言

高炉内の物理現象とできるだけ相似となるように条件を設定した高炉三次元半裁模型を用いて、装入物の降下挙動と溶融挙動に及ぼす炉体内壁面形状の影響を解析し、以下の知見を得た。

(1) 炉腹部に突起物を設置した場合には、突起物直上の壁面応力および壁面摩擦力が最大となるため、炉壁停滯層が形成されやすく、突起物の直上の炉壁近傍に突起物の突出し長さの 2~5 倍の厚みの停滯層が形成される。また、これと同時に中心部の温度が低下する。

(2) 炉壁停滯層と移動層の境界では、クーロンの降伏限界値と等しい剪断応力の条件で装入物が降下する変形層が存在し、この変形層では水平であった融着層は縦長の状態に変形しながら降下する。

(3) 炉壁停滯層の厚みは、炉壁突起物の突出し長さの増加および上下の突起物の設置間隔の短縮にともない増加し、炉壁近傍の Ore/Coke の増加にともない減少する。

(4) 炉芯の高さは、炉壁突起物による炉壁停滯層の形成および中心部の Ore/Coke の増加にともない低下する。

(5) 炉下部の炉体損傷時には、炉芯温度を低下させないために、炉壁近傍の停滯層をできるだけ縮小させることが必要であり、炉壁近傍の Ore/Coke を高めた装入物分布が望ましい。このような装入物分布は、炉壁近傍での溶融能力が大きい微粉炭多量吹込み操業時に有効であると推察される。

記 号

- F_s : コークスの排出および擬似鉬石の軟化収縮による消滅項 (m^2/s)
 K : 系の流通抵抗 (—)
 r : 半径方向の位置 (m)
 U_s : 固体の流速の絶対値 (m/s)
 U_{sr} : r 方向の固体の流速 (m/s)
 U_{sz} : z 方向の固体の流速 (m/s)
 z : 高さ方向の位置 (m)
 ϕ_s : 速度ポテンシャル (m^2/s)
 Ψ : 流れ関数 (kg/s)

文 献

- 1) 稲垣憲利, 徳永正昭, 野宮好亮, 松田正義: 鉄と鋼, 67 (1981), S23
- 2) 一田守政, H. BLAUSSE: 鉄と鋼, 69 (1983), S61
- 3) 大野陽太郎, 近藤国弘: 鉄と鋼, 70 (1984), S62
- 4) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晉一, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 936
- 5) 佐藤裕二, 杉山 喬, 中村正和, 原 行明: 鉄と鋼, 66 (1980), S634
- 6) 清水正賢, 木村吉雄, 磯部光利, 車 傳仁, 稲葉晉一: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1996
- 7) M. ICHIDA, K. TAMURA, Y. HAYASHI and M. SUGATA: Ironmaking Proceedings of AIME, 47 (1988), p. 555
- 8) 一田守政, 田村健二, 林 洋一: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 1071
- 9) 一田守政, 西原一浩, 田村健二, 須賀田正泰, 小野 創: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 1617
- 10) M. ICHIDA, K. NISHIHARA, K. TAMURA, M. SUGATA and H. ONO: ISIJ Int., 31 (1991), p. 505
- 11) 一田守政, 田村健二, 林 洋一: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 1018
- 12) 一田守政, 田村健二, 林 洋一, 西原一浩: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 70
- 13) 杉山 喬, 須賀田正泰: 製鉄研究 (1987) 325, p. 34
- 14) 杉山 喬, 林 洋一, 須賀田正泰, 芝池秀治, 鈴木信邦: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 23
- 15) T. TANAKA, Y. KAJIWARA, T. INADA and C. YAMAGATA: Ironmaking Proceedings of AIME, 47 (1988), p. 237
- 16) 下村泰人, 九島行正, 有野俊介: 学振 54 委-No. 1484 (昭和 54 年 2 月)
- 17) 郷農雅之, 野田多美夫, 下村泰人, 杉山 喬, 佐藤裕二: 学振 54 委-No. 1484 (昭和 58 年 11 月)
- 18) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 28
- 19) 高橋洋光, 国分春生, 久保秀穂: 鉄と鋼, 68 (1982), A1