

高炉内壁面形状と装入物の降下挙動

Inner Profile and Burden Descent Behavior in the Blast Furnace

一 田 守 政^{*(1)} 阿 南 邦 義^{*(2)} 高 尾 正 義^{*(3)} 柿 内 一 元^{*(4)}
 Morimasa ICHIDA Kuniyoshi ANAN Masayoshi TAKAO Kazumoto KAKIUCHI
 森 實 好 文^{*(5)} 山 田 育 野^{*(6)} 中 山 岳 志^{*(7)}
 Yoshihumi MORIZANE Ikuno YAMADA Takeshi NAKAYAMA

抄 録

高炉内壁面形状は装入物の降下速度分布だけでなく装入物の層状構造とガス流れに大きな影響を及ぼす。そこで固体流れ、ガス流れの安定化の観点からみた高炉内壁面形状の適正化に関する1/10～1/20縮尺の高炉三次元半裁模型実験の知見に基づき、シャフト上部では炉壁れんが浸食や付着物が固体流れとガス流れを不安定にすること、炉下部では炉壁れんが浸食が融着帯の形状を大きく変化させることを明らかにした。最後に高炉大型化に伴う炉下部内壁面形状の課題を議論した。

Abstract

The blast furnace inner wall profile exerts a large influence on not only the descent speed distribution of the burden but also the layer structure of the burden and the gas flow. Then, it was clarified that the furnace wall brick erosion and the scaffolding made the solid flow and the gas flow unstable in the upper part of the shaft based on the finding of the three-dimensional half-section blast furnace model experiment of 1/10-1/20 reduced scales concerning the optimization of the blast furnace inner wall profile seen from the viewpoint of the stabilization of the solid flow and the gas flow, and the furnace wall erosion changed the shape of cohesive zone greatly in the lower part of the furnace. The problem of the lower part profile of the large-scale actual blast furnace was discussed at the end.

1. 緒 言

高炉は炉床部を除くと基本的にはガスと装入物粒子の向流移動層であり、安定操業の基本は変動の小さい移動層状態を維持することである。具体的には、安定したガス流れと炉壁混合層のない装入物層状構造の形成である。両者は密接に関連しており、ガス流れの安定は装入物の充填構造(粒径、粒径分布、粉率ほか)で規定される通気性と装入物の降下挙動すなわち固体流れによってほとんど決まる。図1に示すように、降下速度分布の生成メカニズムは反応、溶解、燃焼による鉱石、コークスの消滅、層頂および炉壁近傍での粒子移動、細粒原料の粗粒層への浸透等である。そして、降下速度分布を変化させる因子は原燃料条件(粒度、強度、装入物分布(Ore/coke分布)、羽口先条件(補助燃料吹込み)、内壁面形状等)が考えられる。

本論文では、降下速度分布だけでなく装入物層状構造に大きい影響を及ぼす高炉内壁面形状(炉壁浸食、付着物ほか)に着目し、固体

流れ、ガス流れの安定化の観点からみた高炉内壁面形状の適正化に関する1/10～1/20縮尺の高炉三次元半裁模型実験の知見と実炉への適用事例について報告する。

2. シャフト部の粒子降下挙動

2.1 炉頂近傍の粒子降下挙動

シャフト部での装入物の降下は半径方向に装入物の層厚が均一に薄くなるように降下するという西尾等⁹⁾の均一降下モデルで説明されてきた。一方、層頂での装入物堆積面形状を測定するプロフィールメーターが高炉の炉頂に導入され、層頂での装入物の降下速度分布の測定が可能となった。実炉測定結果⁹⁾によると、炉壁の降下速度と中心部の降下速度の比は約1.5倍程度と、上記の均一降下モデルによる計算値(1.1-1.2)に比較して大幅に大きい。これは、層頂での装入物の降下挙動が均一降下モデルでは説明できないことを示唆している。層頂での装入物の降下メカニズムを解明することは、高炉トータルモデルや装入物分布モデルの精度向上に必要である。

*⁽¹⁾ 環境・プロセス研究開発センター
 製鉄研究開発部 研究審議役 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL: (0439)80-2145

*⁽²⁾ 環境・プロセス研究開発センター
 プラントエンジニアリング部 部長(製鉄)

*⁽³⁾ 大分製鐵所 製鉄工場 高炉課長

*⁽⁴⁾ 君津製鐵所 生産技術部 マネジャー

*⁽⁵⁾ 八幡製鐵所 製鉄部 コークス課長

*⁽⁶⁾ 名古屋製鐵所 製鉄工場 マネジャー

*⁽⁷⁾ 北海製鉄(株) 製造部 製鉄課長

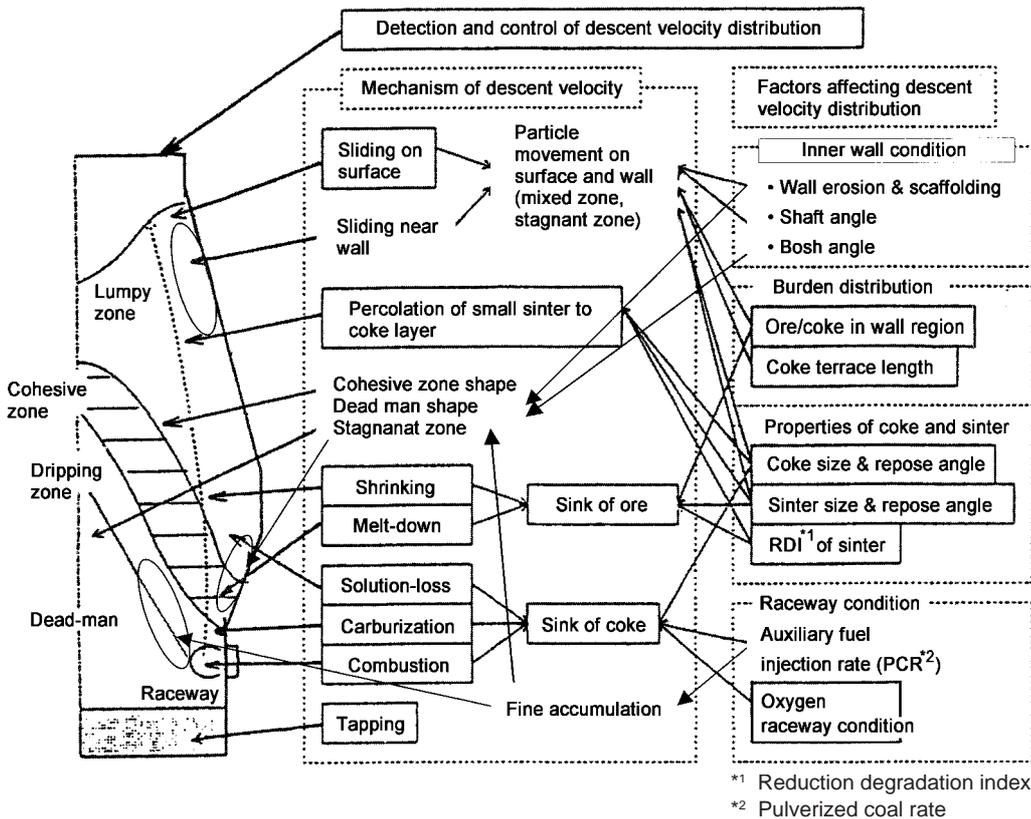


図1 粒子降下メカニズムと影響因子の関係
Mechanism of descent velocity radial distribution and factors affecting its distribution

高炉冷間模型実験結果⁹⁾によると、炉頂層頂部近傍の粒子は半径方向に均一降下しない。炉壁近傍の粒子は、西尾等¹⁰⁾の均一降下モデルの流線に沿って降下するが、中間部から中心部の粒子は垂直降下する(図2)。とくに炉頂層頂部の粒子の挙動を模擬して上部に装入物を続けて装入しない自由表面降下(Free surface descent)の場合(図2のa)に上記現象が顕著である。上記の実験結果に基づいた不均一降下のイメージを図3に示す。この不均一降下では、周辺部装入物の層厚が選択的に薄くなるため、周辺部の降下速度が大きくなると推定される。新日本製鐵八幡製鐵所戸畑第1高炉のプロファイルメーターによる測定結果¹¹⁾によると、1回目測定時の周辺部の相対

降下速度が2回目の測定結果に比べて大きい(図4)。

上記の知見は、炉頂近傍では炉壁近傍の粒子のみがシャフト角の広がりに対応して比較的短時間に再配列されていること、および、炉頂層頂部近傍の粒子の降下挙動はシャフト上部の内壁面プロフィールの影響を受けやすいことを示唆している。シャフト角が

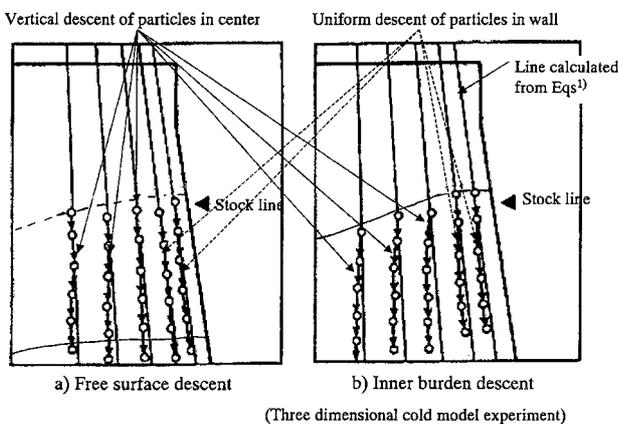


図2 シャフト部上部での粒子降下挙動(焼結鉱1-3mm)
Particle stream line with burden descent in V type burden profile (solid line:calculated from Eqs.1) (sinter 1-3mm)

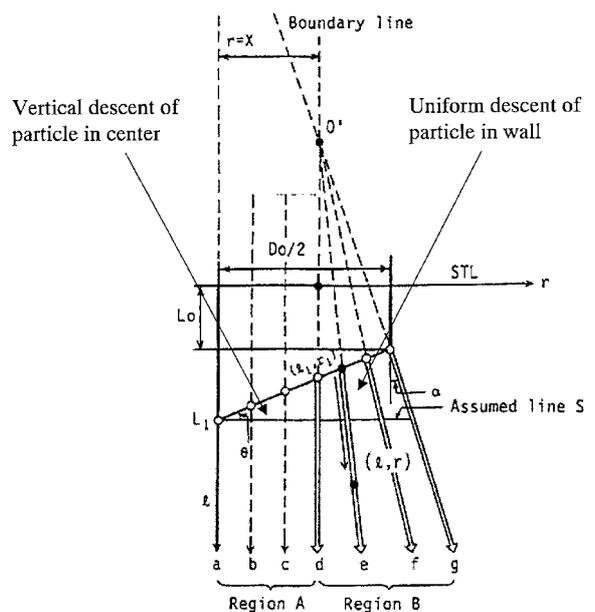


図3 シャフト部上部での粒子不均一降下イメージ
Image of nonuniform descent of particle in upper part of shaft

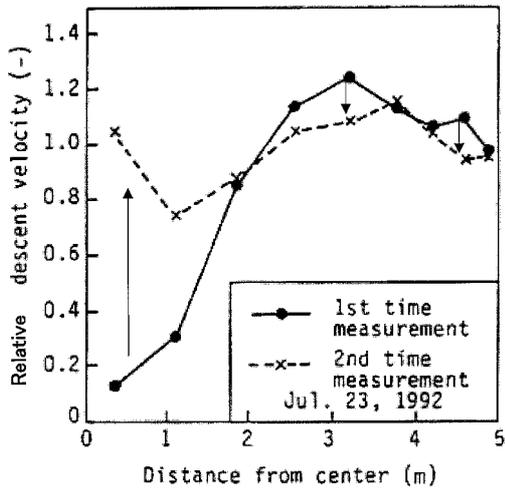


図4 戸畑1高炉でのプロフィールメーター測定値に基づく炉頂での相対降下速度分布
Radial distribution of relative descent velocity at burden surface measured by profile-meter in Tobata No. 1 BF

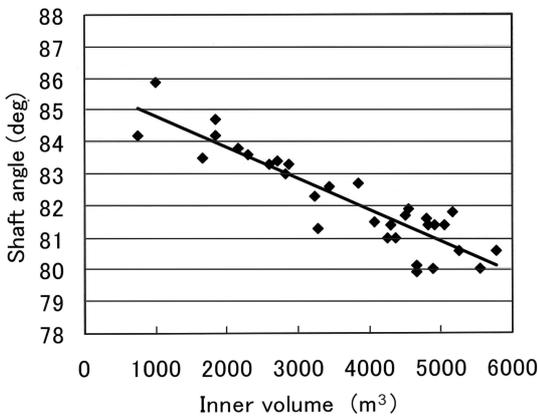


図5 国内高炉における内容積とシャフト角の関係
Relationship between inner volume and shaft angle

小さくシャフト部での単位高さあたりの断面積変化率が大きい内容積が5 000 m³以上の大型高炉(図5)では、炉壁浸食がなくてもシャフト角の拡がりに起因した炉壁近傍粒子による再配列現象が顕著になると予想される。

2.2 炉壁浸食時の粒子降下挙動

高炉冷間模型実験結果⁴⁾によると、シャフト上部に炉壁れんがが浸食がない場合(シャフト角81度)には、粒子は鉾石層やコークス層の層構造を維持しながら降下する(図6のa)。しかし、浸食部位の断面積変化率(単位高さあたりの半径変化率)が1.4(局所シャフト角では36度)と大きい炉壁浸食の場合(図6のc)には、2.1節にて説明したように、炉壁近傍の粒子が局所的に炉壁側に移動して混合層を形成し、炉壁近傍のガス流速は増大する(図7の印)。そして炉壁浸食位置がストックラインに近い場合には、層頂の装入物堆積形状が影響を受けて装入物分布制御精度を著しく低下させると推定される。上記知見に基づき、新日本製鐵君津製鐵所第2高炉⁴⁾では休風時に炉口金物直下の7m範囲のれんがが浸食部位に水冷金物の取付けを行った(図8)。

取付け補修後の送風立ち上げ以降、シャフト上部ソンド周辺部のガス利用率(α)の変動幅が約60%に縮小して(図9)高炉全体のガ

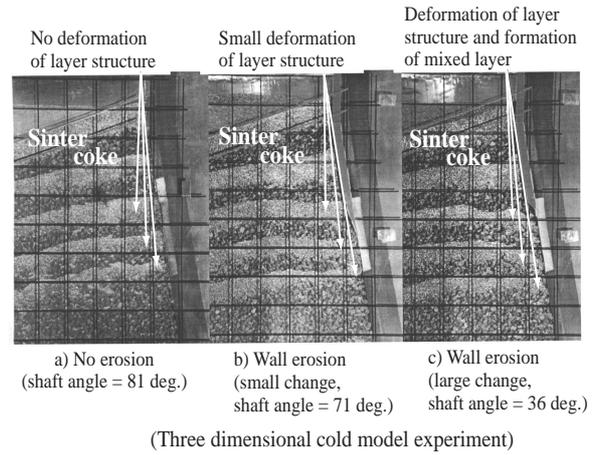


図6 シャフト上部の炉壁浸食状態と粒子降下挙動の関係(焼結鉱1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, コークス4-6mm)
Relationship between wall erosion condition and particle descent behavior at the upper shaft (sinter: 1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, coke: 4-6mm)

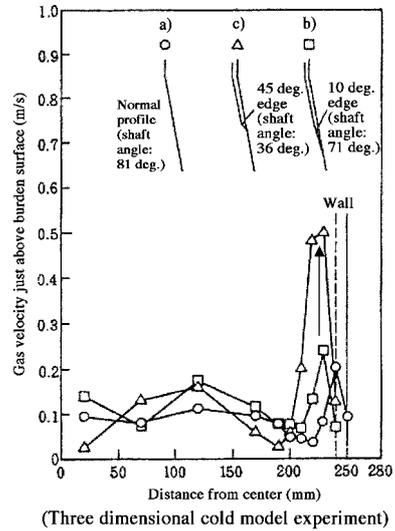


図7 シャフト上部の炉壁浸食状態とガス流分布の関係(焼結鉱1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, コークス4-6mm)
Relationship between wall erosion condition and gas flow distribution at the upper shaft (sinter: 1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, coke: 4-6mm)

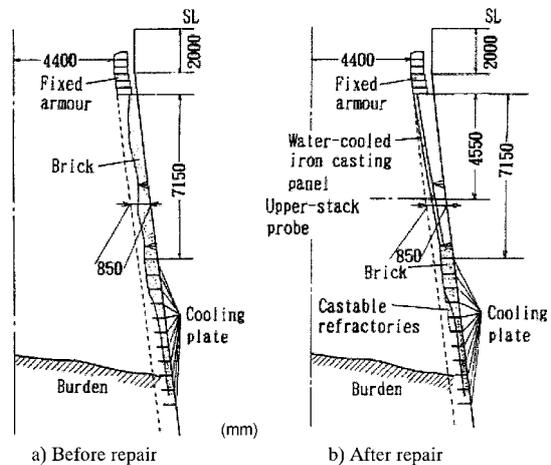


図8 実炉でのシャフト上部の炉壁修理(君津2高炉:1990.5.28-6.4)
Repair of upper shaft wall in actual BF (Kimitsu No. 2 BF: 1990.5.28-6.4)

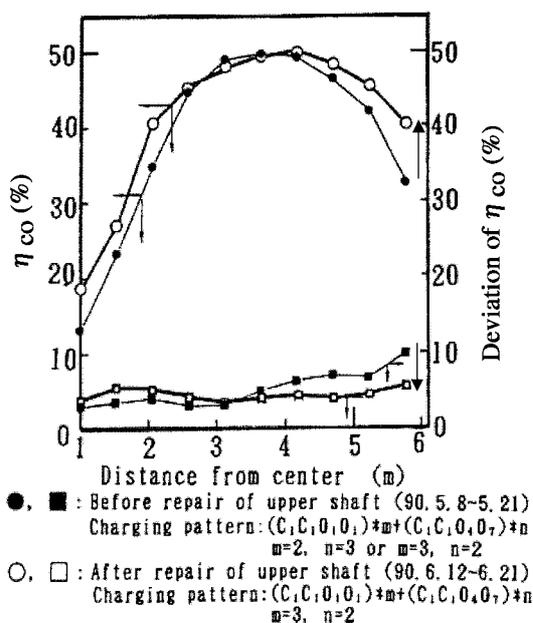


図9 シャフト上部の炉壁修理前後のガス流分布の比較(君津2高炉: 1990.5.28 - 6.4)
 Comparison of η_{co} and its deviation of upper shaft probe between before and after repair of upper shaft (Kimitsu No. 2 BF: 1990.5.28 - 6.4)

ス利用率 η_{co} が1.5%上昇した。そして還元材比が10~15 kg/t 低下して、出銑比が2.23 t/(d·m³)から2.41 t/(d·m³)に増大した。これは、炉壁混合層の形成抑制により周辺部ガス流れが安定化した結果であると推定される。上記の知見等に基づき、新日本製鐵の高炉では炉口金物とシャフトステープ間の水冷金物の装備が標準化されている。

2.3 付着物形成時の粒子降下挙動

高炉冷間模型実験結果⁹⁾によると、シャフト上部に付着物が形成された場合(図10の(2))には、付着物直下では炉壁浸食の場合と同

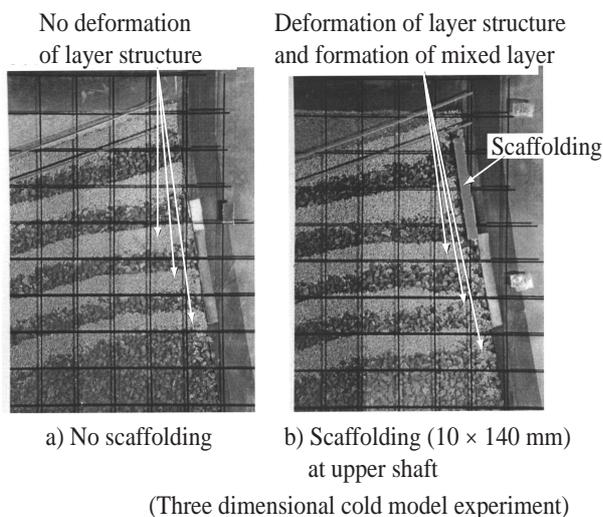


図10 シャフト上部の付着物形成と粒子降下挙動の関係(焼結鉱1-3mm, コークス4-6mm)
 Relationship between formation of scaffolding and particle descent behavior (sinter: 1-3mm, coke: 4-6mm)

じ粒子降下挙動となり、炉壁近傍の粒子は局所的に炉壁側に移動して混合層を形成して炉壁近傍のガス流速は増大する(図11の印)。上記現象は粉混入率が大きい場合に顕著になり(図12の印)、棚吊り現象を誘発する可能性もある。現在では、付着物を生成させない対策として、原燃料からのZn入量の制限や極端な周辺ガス流化現象の回避等が実施されている。

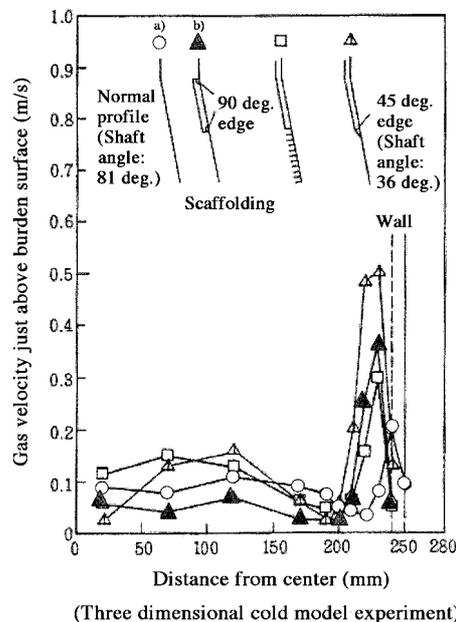


図11 シャフト上部の炉壁状態とガス流分布の関係(焼結鉱1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, コークス4-6mm)
 Relationship between wall condition and gas flow distribution at the upper shaft (sinter: 1-3mm / 0.5-1mm = 80/20, coke: 4-6mm)

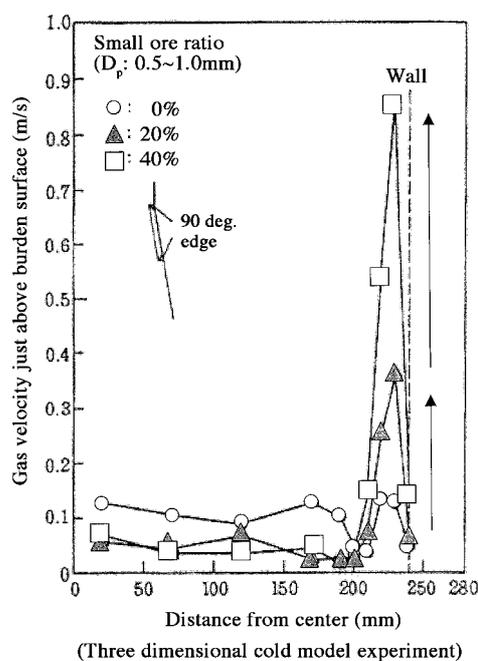


図12 シャフト上部付着物形成時の焼結鉱(0.5-1mm)混入率とガス流分布の関係(焼結鉱1-3mm, コークス4-6mm)
 Relationship between sinter fine (0.5-1mm) ratio and gas flow distribution (sinter: 1-3mm, coke: 4-6mm) in case of scaffolding profile

3. 炉下部の粒子降下挙動

3.1 炉壁浸食による粒子降下挙動の変化

炉下部では、朝顔部のれんがの浸食により、火入れ後1年前後でステープ面が炉内に露出して稼働面になる(図13)。この炉下部の稼働面プロファイル変化は高炉の大型化による朝顔角の変化(図14)より大きく、炉下部の粒子降下挙動に大きい影響を及ぼす。高炉温間模型実験結果によると、朝顔部れんが浸食の場合には朝顔下部の炉壁近傍に停滞層が形成され(図15のb))、火入れプロファイルの場合(図15のa))に比べて炉内側の粒子降下速度が大幅に増大している(図16の印)。そのため融着帯の垂れ下がり現象が発生してレースウェイ直上の温度が低下している(図15のb))。上記知見は、炉壁れんがの浸食等による炉下部内壁面形状の変化が炉下部の融着帯形状の変化を介して高炉の操作方法を複雑にする可能性があることを示唆している。新日本製鐵の高炉では稼働面プロファイル変化の小さい炉下部内壁面構造設計が指向されている。

3.2 付着物ほかを想定した突起物設置時の粒子降下挙動

高炉温間模型実験結果⁹⁾によると、炉下部に設置された突起物 突出し長さ：15 mm(実炉換算値300 mm)、高さ：15 mm(実炉換算値300 mm)により、炉壁停滞層が形成される(図17)。上記停滞層の厚みは突起物の設置位置により異なり、受動応力状態で水平応力の大きい炉腹下端に突起物を設置した場合に形成される炉壁停滞層の厚みは大きい(図18の印)が、水平応力の小さいレースウェイ直上の朝顔下端に突起物を設置した場合に形成される炉壁停滞層の厚みは小さい(図18の印)。

3.3 高炉の大型化に伴う粒子降下挙動の変化

高炉の大型化にともない、羽口中心レベルでのレースウェイ空間が占める面積を示す指標のひとつとして用いられている炉床有効断面面積比率(EHA = $\frac{\pi \times (\text{炉床径} / 2)^2 - \pi \times (\text{炉床径} / 2 - \text{レースウェイ深度} (1.5\text{mと仮定}))^2}{\pi \times (\text{炉床径} / 2)^2}$)が縮小している⁸⁾(図19)。上記の現象が炉下部での装入物降下領域の相対的縮小による溶解能力の低下や伝熱の不足を招いて、炉芯不活性になる可能性がある。

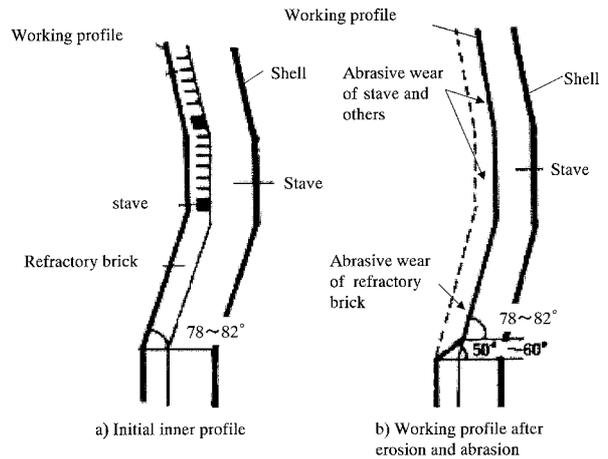


図13 れんがと「ステープほか」の摩耗による高炉内壁面プロファイルの変化
Change of inner profile of blast furnace due to abrasive wear of refractory brick and "stave and others"

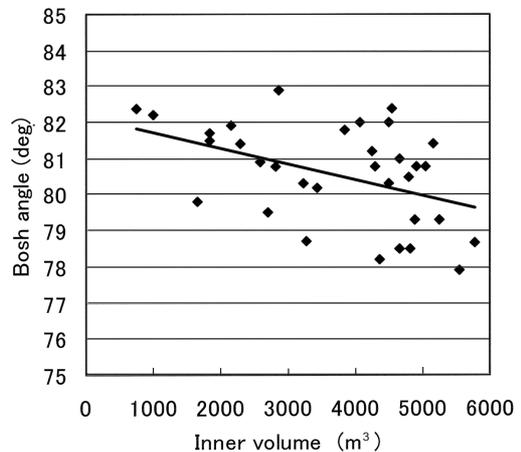
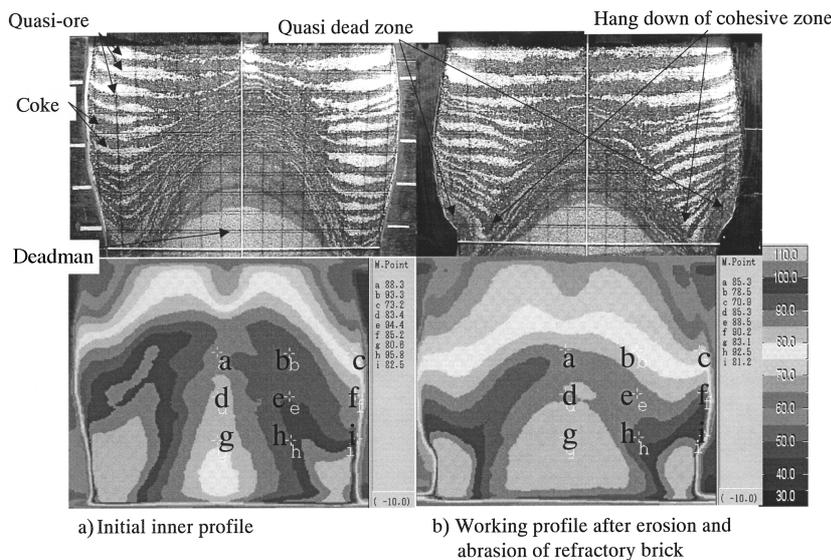


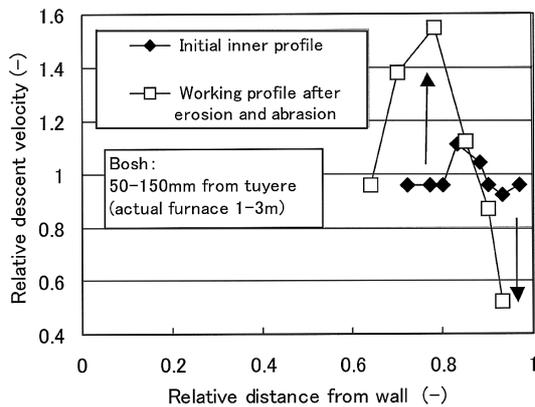
図14 国内高炉における内容積と朝顔角の関係
Relationship between inner volume and bosh angle of BF in Japan



(Three dimensional warm model experiment)

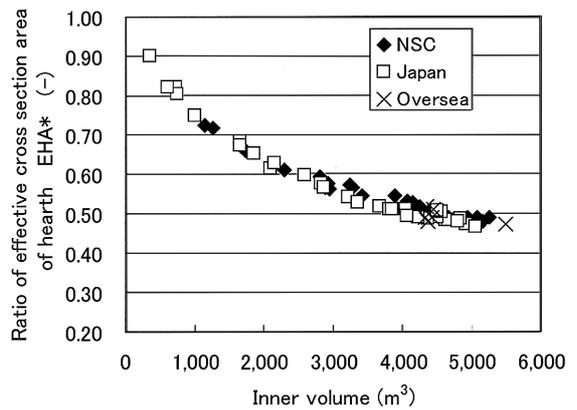
図15 朝顔部れんが浸食時の粒子降下挙動(白色:擬似鉱石 0.5-5mm 黒色:コークス 2-4mm)

Particle descent behavior under working profile after erosion and abrasion of refractory brick (white: quasi-ore (0.5-5mm), black: coke (2-4mm))



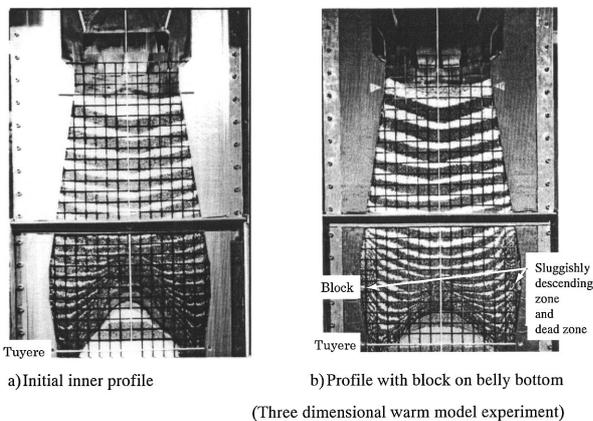
(Three dimensional warm model experiment)

図16 朝顔部れんがが浸食時の炉下部における粒子の相対降下速度分布
Relative descent velocity distribution of particle in the lower part under working profile after erosion and abrasion of refractory brick



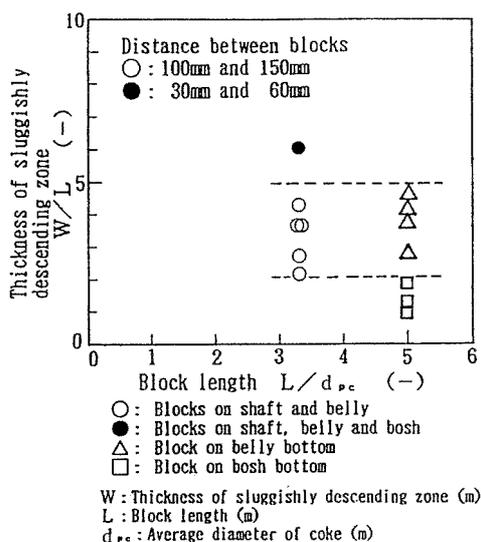
$$* EHA = (\pi \times (\text{Hearth diameter}/2)^2 - \pi \times (\text{Hearth diameter}/2 - \text{Raceway depth} (=1.5))^2) / (\pi \times (\text{Hearth diameter}/2)^2)$$

図19 高炉内容積と炉床有効断面積の関係
Relationship between inner volume and ratio of effective cross section area of hearth



(Three dimensional warm model experiment)

図17 炉下部の突起物と粒子降下挙動の関係(白色:擬似鉱石 0.5-5mm, 黒色:コークス 2-4mm)
Relationship between block and particle descent behavior at the lower part (white: quasi-ore 0.5-5mm, black: coke 2-4mm)



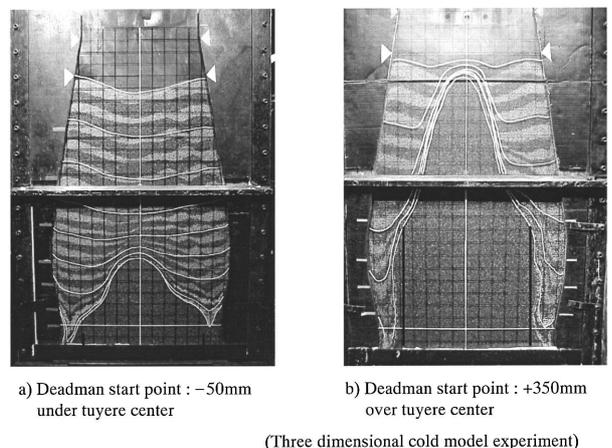
(Three dimensional warm model experiment)

図18 突起物設置条件と炉壁停滞層厚みの関係
Relationship between block setting condition and thickness of sluggishly descending zone

上記現象を抑制するためには、レースウェイ深度の拡大による炉芯の縮小が必要である。レースウェイ深度の拡大の手段として羽口風速の上昇が考えられるが、過大な羽口風速の上昇はレースウェイ内でのコークスの粉化を助長する⁷⁾。発生したコークス粉は、炉芯表層部と炉壁近傍に蓄積し、炉下部での装入物の降下領域を縮小する⁸⁾。

高炉冷間模型実験結果によると、上記コークス粉が炉芯表層部に過大に蓄積した状態を想定して炉芯の立ち上がり位置を羽口レベルから大幅に上昇させた場合(羽口上350mm(実炉換算値7m))には、炉芯の立ち上がり位置を羽口レベルより50mm(実炉換算値1m)下に設定した場合に比べて、炉下部の降下領域が大幅に縮小すると同時に炉頂層頂部の粒子の降下挙動にも大きい影響を及ぼしている(図20)。

上記の炉下部コークス粉の蓄積挙動⁹⁾や図20の知見は、高炉大型化に伴う必然的な炉芯領域の増大を羽口風速上昇によるレースウェイの拡大のみによって対応することに限界があることを示唆している。大型高炉の炉下部降下挙動を改善するためには、コークス品質の改善による粉化の抑制⁹⁾や炉下部内壁面構造の最適化を含めた総



(Three dimensional cold model experiment)

図20 粒子降下挙動に及ぼす炉芯形状の影響
Influence of deadman shape on particle descent behavior

合的な改善が必要である。とくに羽口直上部の稼働面プロフィルの安定化を可能とする炉下部内壁面構造の最適化が今後の課題である。

4. 結 言

降下速度分布だけでなく装入物層状構造に大きい影響を及ぼす高炉内壁面形状に着目し、固体流れ、ガス流れの安定化の観点からみた高炉内壁面形状の適正化に関する1/10～1/20縮尺の高炉三次元半裁模倣実験を行った。上記実験により得られた知見と実炉への適用事例について以下に整理した。

- (1) 炉頂層頂部近傍の粒子は半径方向に均一降下せず、周辺部の粒子の降下速度が大きい。上記の知見は、炉頂近傍では炉壁近傍の粒子のみがシャフト角の広がりに対応して比較的短時間に再配列されていることを示唆している。
- (2) シャフト上部の炉壁浸食や付着物は炉壁近傍粒子の局所的な炉壁側への移動による混合層を形成し、炉壁近傍のガス流速を増大させて操業を不安定化する。上記知見等に基づき、新日本製鐵の高炉では炉口金物とシャフトステーブ間の水冷金物の装備が標準化されている。
- (3) 朝顔部のれんがの浸食による炉下部の稼働面プロフィル変化は炉下部の粒子降下挙動に大きい影響を及ぼす。上記の知見に基づき、新日本製鐵の高炉では稼働面プロフィル変化の小さい炉下部内壁面構造設計が指向されている。

- (4) 炉下部に設置された突起物により炉壁停滞層が形成される。上記停滞層の厚みは突起物の設置位置により異なる。
- (5) 高炉の大型化にともない、炉下部での装入物降下領域の相対的縮小による溶解能力の低下や伝熱の不足を招いて、炉芯不活性になる可能性がある。上記現象を抑制するためにはレースウェイ深度の拡大による炉芯の縮小が必要であるが、過大な羽口風速の上昇はレースウェイ内でのコークスの粉化を助長する。
- (6) 大型高炉の炉下部降下挙動を改善するためには、コークス品質の改善による粉化の抑制や炉下部内壁面構造の最適化を含めた総合的な改善が必要である。とくに羽口直上部の稼働面プロフィルの安定化を可能とする炉下部内壁面構造の最適化が今後の課題である。

参考文献

- 1) 西尾浩明 ほか:鉄と鋼 68(15) 2330(1982)
- 2) 高尾正義 ほか:CAMP-ISIJ. 78(5), 105(1992)
- 3) Ichida, M. et al.: ISIJ Int. 36(5), 493(1996)
- 4) 一田守政 ほか:鉄と鋼 78(1) 58(1992)
- 5) 一田守政 ほか:鉄と鋼 77(12) 2107(1991)
- 6) 緒方勲 ほか:鉄と鋼 90(9) 600(2004)
- 7) 田村健二 ほか:鉄と鋼 73(15) 1980(1987)
- 8) Ichida, M. et al.: ISIJ Int. 32(4), 505(1992)
- 9) Tamura, K. et al.: 19th McMaster Symposium. Hamilton, 19, 303(1991)