

論 文

高炉の円周方向不均一条件下における
固体流れ清水 正賢*・木村 吉雄*・磯部 光利*
車 傳仁*²・稲葉 晋一*³Solids Flow in a Blast Furnace under Circumferential Imbalance
ConditionsMasakata SHIMIZU, Yoshi-o KIMURA, Mitsutoshi ISOBE,
Chuanren CHE and Shin-ichi INABA

Synopsis:

Imbalanced descending behavior of solids in a blast furnace was studied using a three dimensional model furnace, considering the circumferential imbalance of the coke consumption at the raceway zone and the inner surface profile of the furnace wall. Results are summarized as follows ;

1) In case that there were some closed tuyeres or the local wall scab at the middle part of the shaft in blast furnace, it was found that the descending velocity above them became larger than that at the other part at the throat.

2) The erosion of the furnace wall only at the upper part of the shaft ($h/D < 0.4$) increased the descending velocity at the throat above the eroded part, where h is the distance from the top of the shaft and D is the diameter of the throat.

3) The peripheral dead zone was formed just above the closed tuyeres, of which geometry was different from that of the central dead zone. Stress analysis made it clear that the stress field in the lower part had the relation of $\sigma_\theta < \sigma_v < \sigma_h$ and the shape of the peripheral dead zone was determined by σ_θ and σ_v , where σ_v is the vertical stress, σ_h is the horizontal stress and σ_θ is the circumferential stress.

Key words : ironmaking ; blast furnace ; solids flow ; scab on the wall ; erosion at the wall ; circumferential imbalance ; dead zone ; stress distribution ; model experiment.

1. 緒 言

高炉操業において、しばしば円周バランスの乱れに起因した炉況変動が認められる。特に、局所的な炉壁熱負荷の上昇や出銑口間での溶銑温度の差は、炉内ガス流分布や装入物降下の不均一性に原因していると考えられる。ガスや固体流れの不均一化の要因として、羽口衝風バランスの偏り、炉壁付着物の形成あるいは炉壁侵食等が指摘され、従来より、特に炉壁プロフィールの影響についての研究^{1)~5)}が数多く実施されてきた。しかしながら多くの研究²⁾³⁾⁵⁾は、その実験手段として二次元模型を用いており、研究の主眼も炉壁混合層の解明に置かれてきた。高炉内における装入物の不均一降下を考える場合、堆積層の動力学的な状態はもはや軸対称性が失われている

と考えられ、固体流れも三次元的挙動を呈しているものと推察される。特に、局所的な炉壁付着物の形成や炉壁侵食に対しては、単に混合層の形成だけでなく、その周囲や上方での固体流れが問題であり、三次元場での現象把握が必要と言える。このような観点から、ここでは高炉の三次元全周模型を用い、炉内装入物の不均一降下挙動に及ぼす羽口衝風バランス、炉壁付着物、炉壁侵食の影響について基礎的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

装置の概略を Fig. 1 に示す。本装置は、炉腹径 440 mm、有効高さ 805 mm の高炉全周模型と炉頂部に設置したトレーサー供給器及び炉底部に設けた炉内試料排出

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 20 日受付 (Received Mar. 20, 1987)

* (株)神戸製鋼所 材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*2 東北工学院 (Northeast University of Technology)

*3 (株)神戸製鋼所 材料研究所 工博 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

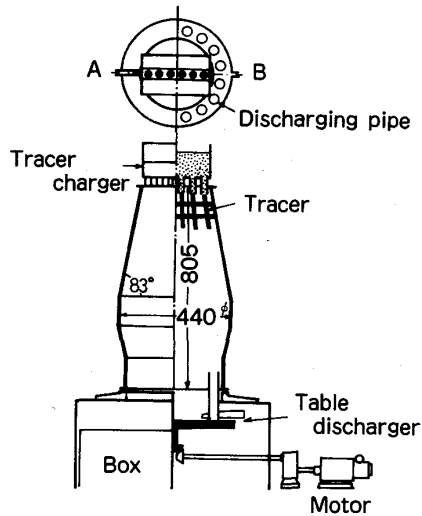


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Physical properties of sand.

Property	Particle size (mm)	Harmonic mean diameter D_p (mm)	Bulk density ρ_B (kg/m ³)	Friction angle (deg.)
Material				ϕ_i ϕ_w
Sand	1.2~2.0	1.46	1400	40.0 23.0

装置から構成されている。炉本体は透明アクリル製の半裁模型をフランジ部A—Bで接合しており、実験終了後には炉体を二分割して、内部の状況を調べることが可能である。炉頂部のトレーサー供給器は、底部に10本のトレーサー排出用パイプを備えた矩形ホッパーで、トレーサーを炉内鉛直方向に連続供給して固体の流れを把握することができる。炉内装入物は、レースウェイ相当位置に設置した16本のパイプを介して、炉底部テーブルフィーダーによって排出降下される。

炉内応力分布の測定には既報⁶⁾に示した流し込み型土圧計を用いた。

2.2 装入試料

装入試料として粒径1.2~2.0 mmの川砂を用いた。その物理性状をTable 1に示す。川砂の高密度、摩擦角特性はコークス(ρ_B : 502 kg/m³, ϕ_i : 43.5°, ϕ_w : 25.9°)と焼結鉱(ρ_B : 1900 kg/m³, ϕ_i : 38.6°, ϕ_w : 18.8°)⁷⁾の平均値にほぼ近く、実炉内での降下挙動を把握するのに十分であると判断した。流れおよびタイムラインを把握するためのトレーサーとして、同じ川砂を黒色インキで着色して用いた。

2.3 実験条件

高炉内装入物の不均一降下の原因として、ここでは次の三者を取り上げ、各要因の影響について調べた。

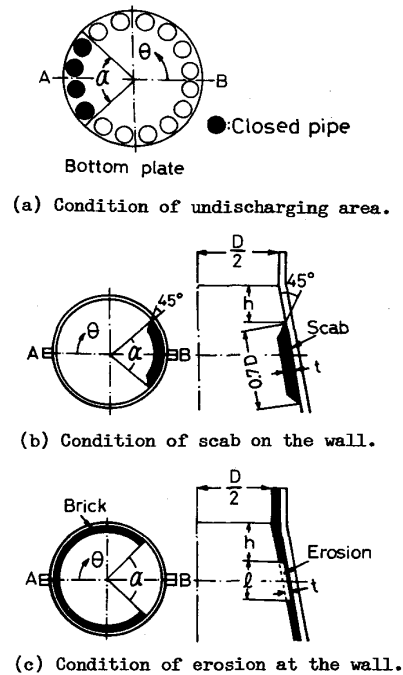


Fig. 2. Schematic drawing of experimental conditions.

(a) 羽口前コークスの消費バランス

(b) 炉壁付着物の形成

(c) 炉壁侵食

Fig. 2に各要因に対する操作因子を示す。

(a) 羽口前コークスの消費バランスの影響調査

炉底周辺部の試料排出パイプを局部的に閉じ、試料排出を停止した。ここでは、排出停止領域 α (中心軸からの仰角)を変化させた。

(b) 炉壁付着物の影響調査

シャフト内面にキャスト製の付着物模型を取り付けた。ここでは、シャフト上端から付着物上端までの距離 h 、付着物の厚さ t 、円周方向範囲 α を変化させた。

(c) 炉壁侵食の影響調査

炉体内壁前面にレンガの代用として10×10×15 mmの木片を貼り付けた後、その一部を取り除き侵食部とした。ここでは、シャフト上端から侵食部上端までの距離 h 、侵食部の高さ方向距離 l 、侵食深さ t 、円周方向範囲 α を変化させた。また、炉壁侵食によつて、ステープや冷却箱が露出した場合についても調べた。

2.4 実験方法

レースウェイ部からの粒子排出バランスあるいは炉体プロフィールを所定の条件に設定した後、炉内に川砂を充填し、炉口平均降下速度を一定に維持しつつ、テーブルフィーダーによつて炉内装入物を降下させた。堆積層

の降下速度は、(1)、(2)式を用いて、実炉（内容積 4500 m^3 、出銑比 2.0）の炉口平均降下速度に相似させた。

$$L_p/L_m = \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$U_m = U_p / \sqrt{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 L : 代表長さ、 U : 速度、添え字 p : 実炉、 m : 模型

堆積層の降下とともに、炉頂部に川砂を供給しつつ、同時にトレーサー供給器より着色した川砂を炉内へ連続的に流し込んだ。また、5 min 間隔で炉頂部堆積層表面に着色トレーサーを約 10 mm の厚さで水平充填した。なお、トレーサー供給器は、10 本のトレーサー流出パイプが炉体のフランジ部 A、B を結ぶ直径上に位置するように設置した。

実験時には、炉口部での径方向および周方向の降下速度分布を測定するとともに、外壁面からトレーサー粒子

の降下挙動を観察した。トレーサー粒子がテーブルフィーダーから排出され始めた時点で実験を終了し、炉体を取り外して横転し、フランジ部から炉体を切り離して A—B 断面上の流線とタイムラインを観察した。炉内応力分布の測定法は既報と同様である。

3. 実験結果

3.1 羽口前コークスの消費バランスの影響

Photo. 1 にレースウェイ部からの試料排出を局所的に停止した場合の装入物降下状況を示す。試料排出を停止した領域では、炉壁部に不動層（死領域）が形成され（ $\alpha=23^\circ$ の場合は破線で示す）、排出停止領域 α の増大とともに著しく上方に発達している。特に、 α が 45° 以上の場合には、炉壁不動層の頂部は炉芯不動層よりも高位置にあり、炉壁不動層の形成条件（応力条件）が炉

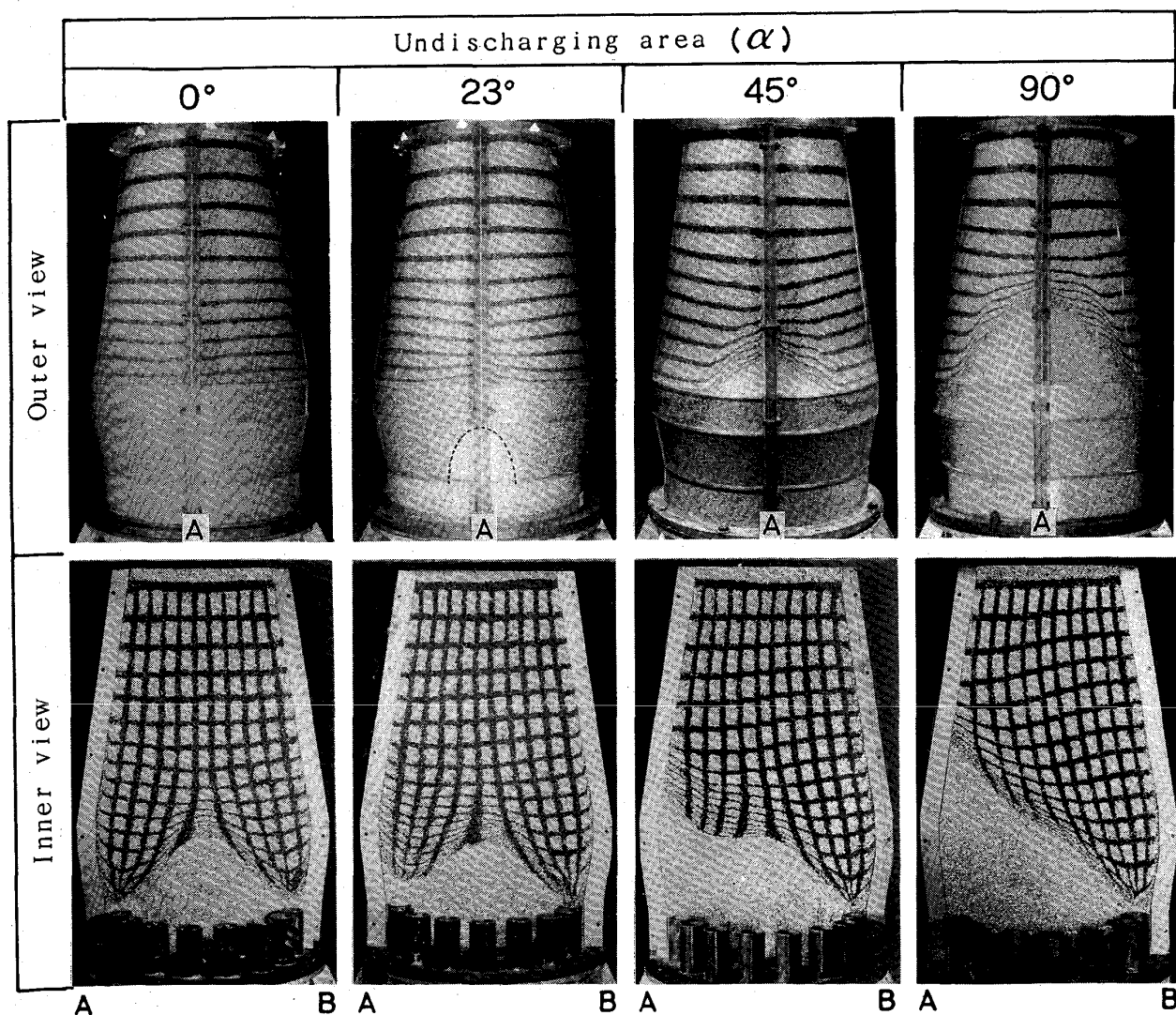


Photo. 1. Effect of undischarging area (α) on time- and stream-lines of solids in the model furnace.

芯部と著しく異なっていることが伺える。

シャフト部での固体の流れは、 $\alpha=0^\circ$ (均一降下) の場合、無次元半径位置を結ぶ曲線群にほぼ一致するが、炉壁不動層が形成されると極めて特異な挙動を示すようになる。

$\alpha=45^\circ, 90^\circ$ の断面写真より、炉壁不動層が形成されると、炉頂から下方に向かう流れは、いったん炉壁不動層側 (写真左側) に向かい、その後、不動層斜面に沿って反対方向へ降下している。このような挙動は、堆積層の径方向における降下速度分布が均一でないことを示しており、タイムラインの傾きから推定される降下速度分布は、炉下部では試料排出側で、炉上部では逆に排出停止側で大きくなっていることがわかる。

Fig. 3, Fig. 4 に炉口部での径方向及び炉壁部円周方向 (炉壁近傍、無次元半径: 0.97~1.0) の相対降下速度分布 ($U^* = U/\bar{U}_t$: 炉口断面平均降下速度 ($\bar{U}_t$) に対する相対降下速度) を示す。 α の増大とともに、排出停止側の炉口降下速度が相対的に増大している。また、

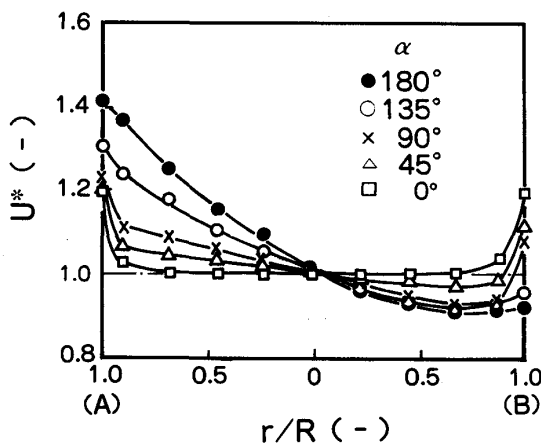


Fig. 3. Effect of undischarging area (α) on radial distribution of descending velocity at the throat.

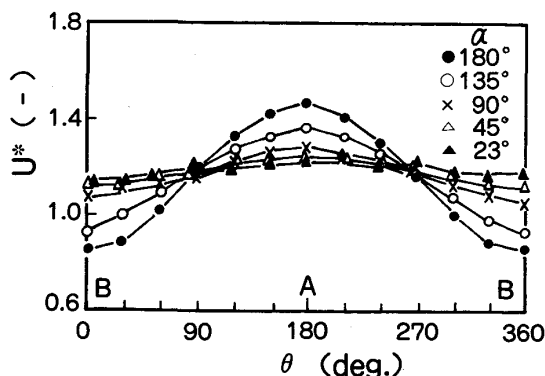


Fig. 4. Effect of undischarging area (α) on circumferential imbalance of descending velocity at the throat.

Fig. 4 より、降下速度の変化は炉口全域に及んでいる。

このように、炉下部で降下速度が不均一な場合、堆積層の降下は、炉下部と炉上部でまったく異なった挙動を示し、炉下部円周方向での降下速度分布の大小関係が、炉口部では逆転して現れることが明らかとなった。

3.2 炉壁付着物の影響

Photo. 2 に固体流れに及ぼす炉壁付着物の影響を示す。付着物が形成されると付着物直上部で荷下がり停滞し、局部的に滞留域が形成される。しかし、滞留域の高さは比較的小さい。付着物の側面に接する領域では、荷下がりに対する付着物の影響はほとんど認められず、堆積層はタイムラインの間隔を維持したまま整然と降下している。一方、付着物の炉内側では、堆積層の降下遅れによつて層状構造が乱れ、炉壁混合層が形成される。固体の流れは、付着物形成位置で炉内方向に湾曲するが、付着物下方では再び周辺方向に向かって降下し、炉腹部からボッシュ部では付着物の存在しない左側とほぼ同じ位置を降下している。降下速度分布に及ぼす付着物の影響として、付着物上方に興味ある現象が見出された。タイムラインの傾きに注目すると、付着物直上部では局部的な滞留域の形成により降下速度は小さくなるが、その上方では逆に降下速度が増大していることがわかる。このような現象は前節で示した炉壁不動層の影響と酷似している。Fig. 5 に付着物直上 ($\theta=180^\circ$) の炉口部炉壁近傍の相対降下速度 ($U_w^* = U_w/\bar{U}_w$: 炉口部炉壁近傍の平均降下速度 ($\bar{U}_w$) に対する相対降下速度) と付着物形成位置 (h/D) との関係を示す。付着物形成位置が炉口に近い場合、直上の炉口降下速度は平均降下速度より小さくなるが、付着物がある一定位置 ($t/D=0.20$ の場合、

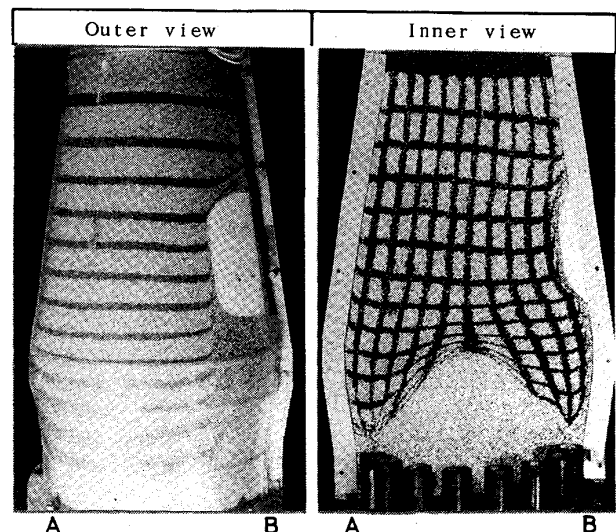


Photo. 2. Time- and stream-lines of solids in the model furnace with the scab.

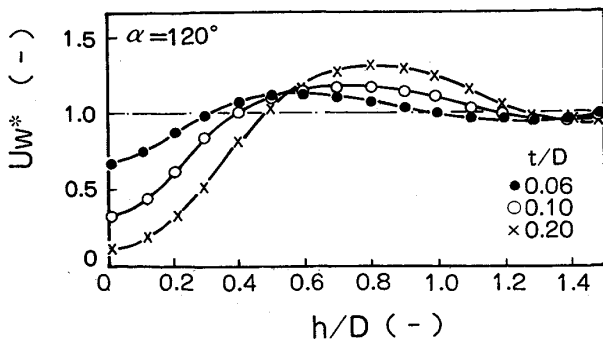


Fig. 5. Effect of the axial position of the scab on the relative descending velocity at the throat above the scab.

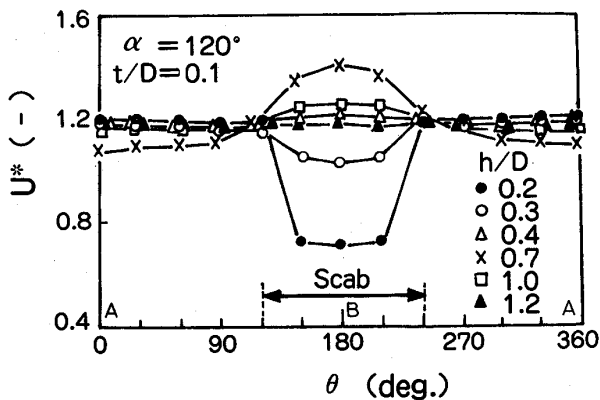


Fig. 6. Effect of the scab on circumferential imbalance of descending velocity at the throat.

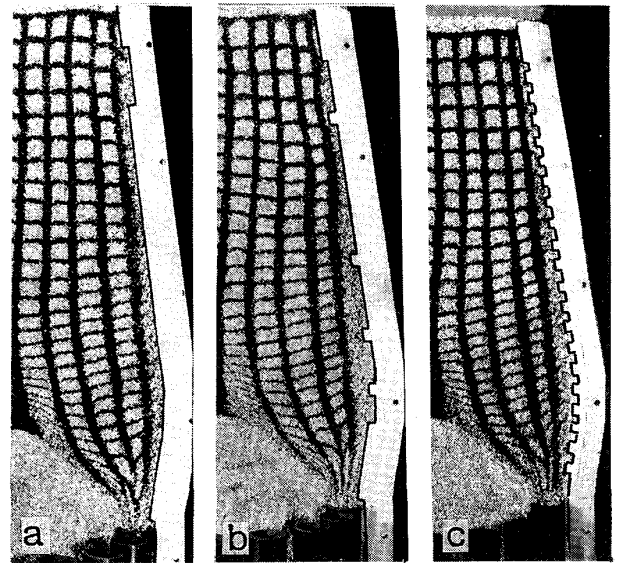
約0.5)より下方に形成された場合には、平均降下速度より大きな値を示すようになる。このような現象は付着物の厚さに関係なく現れ、固体の流れが炉高方向で周期変動していることを示している。一方、付着物の形成位置 (h/D) が約 1.2 より下方の場合には、付着物の影響はほとんど現れなくなる。

Fig. 6 に炉口部円周方向の降下速度分布を示す。付着物の形成にともなう降下速度の変化は、付着物形成領域 α にほぼ対応した領域に現れる。

3.3 炉壁侵食の影響

Photo. 3 に固体流れに及ぼす炉壁侵食の影響を示す。シャフト壁が局部的に侵食されると (Photo. 3 a), 侵食部への装入物の流れ込みにより堆積層の層状構造が乱れ、侵食部下方に炉壁混合層が形成される。混合層の幅は、下方へのシャフト断面積の増大に起因して拡大傾向を示し、炉腹部で最も大きくなる。この現象は従来の結果¹⁾と一致している。

シャフト部での炉壁侵食は、侵食部上方の降下速度に大きな影響を与える。Fig. 7 に侵食部上方の炉口周辺部降下速度と侵食位置 (h/D) の関係を示す。侵食位置



a : Erosion at upper part of the shaft b : Bare Γ -stave coolers c : Bare cooling boxes

Photo. 3. Effect of the surface profile of the wall on solids descent.

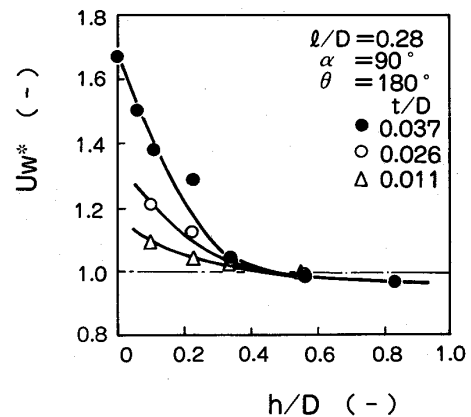


Fig. 7. Effect of the axial position of erosion on the relative descending velocity at the throat above eroded part.

が炉口に近づくにつれ、上方の炉口降下速度が著しく増大する。また、その変化は侵食深さ (t/D) に大きく依存するが、侵食位置 (h/D) が約 0.4 より大きくなると、炉口部へは影響が現れなくなる。

Fig. 8 に炉高方向における侵食領域 (l/D) の影響を示す。 l/D の増大とともに上方の炉口降下速度は増大するが、 l/D が約 0.4 以上ではほぼ一定値を示す。

Fig. 9 に円周方向の降下速度分布に及ぼす侵食領域 α の影響を示す。降下速度が増大する領域は、侵食領域 α にほぼ対応している。

Photo. 3 b, c に炉壁冷却装置の影響を示す。炉壁侵食によつて Γ ステーブやノーズステーブあるいは冷却

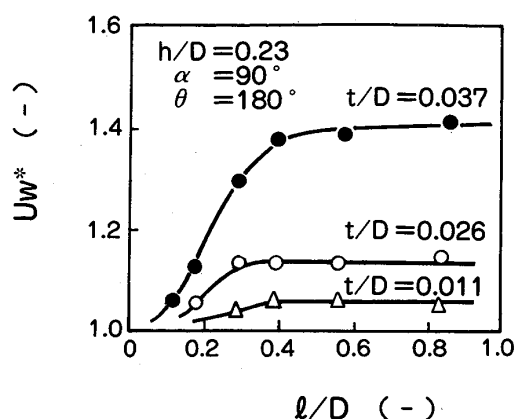


Fig. 8. Effect of the vertical length of erosion on the relative descending velocity at the throat above eroded part.

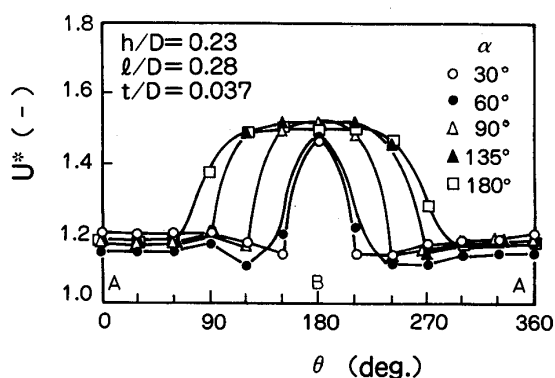


Fig. 9. Effect of the erosion on circumferential imbalance of descending velocity at the throat.

箱等が露出すると、その前面に著しい炉壁混合層が形成される。混合層の幅はステープ高炉で特に大きく、ステープのΓ部やノーズ部が混合層の拡大に強く影響することが判明した。

4. 考 察

4.1 炉壁不動層の形成

レースウェイ部からの粒子排出を局部的に停止すると、その上方に炉壁不動層が形成され、その幾何学的形状が炉芯不動層の形状と異なることが見出された。そこで炉壁不動層の形状について力学的検討を行った。

Fig. 10 に、炉壁不動層の形状と排出停止領域 α との関係を示す。ここで、 h_d は粒子の動きが停止している不動層（死領域）の高さ、 h_s は粒子の降下が緩慢となる滞留域までの高さを示す。炉壁不動層の無次元高さ h_d/l は α が 20° 以上の場合約 1.1~1.3 の範囲にあり、従来得られている炉芯不動層の値（約 0.5）⁽⁶⁾⁽⁸⁾ と大きく異なる。一方、滞留域までの高さ h_s/l は α の増大と

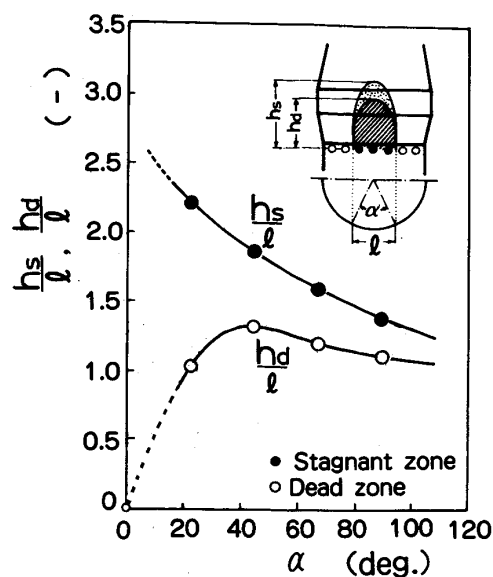


Fig. 10. Relationship between geometry of peripheral dead zone and undischarging area (α).

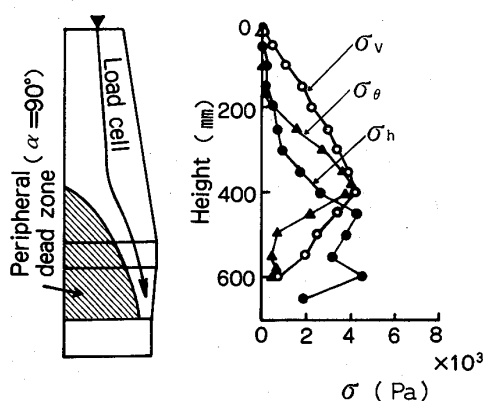
もに双曲線的に低下しており、不動層上に形成される滞留域 ($h_s - h_d$) は α に関係なくほぼ一定の高さを維持していることがわかる。

炉壁不動層の形状が炉芯不動層の形状と異なることについては、炉壁不動層の形状を決定している応力条件が炉芯部と異なっているためと推察される。一般に、3次元場での粒子群には、空間的には、垂直方向、水平方向（径方向）、円周方向に働く三つの応力 σ_v , σ_h , σ_θ が作用し、これら三者の力学的関係によって滑り線が決定される。定常流動時、炉内には応力分布に従って無数の滑り線が形成されるが、炉芯不動層の形状に対しては、 σ_v と σ_h によって決定される滑り線が、また、壁面と接した炉壁不動層の稜線形状に対しては、 σ_v と σ_θ によって決定される滑り線が関与していると考えられる。炉芯不動層の形状については、筆者らが示したように炉芯部の応力場を受働状態として解析することにより推定可能⁽⁶⁾⁽⁸⁾である。一方、炉壁不動層の形状を理論的に解析する場合には、円周方向断面での σ_v と σ_θ の応力関係を知る必要があるが、本実験において h_d/l が 1.1~1.3 の範囲にあることは、応力場を完全受働状態（ σ_v が垂直方向、 σ_θ が水平方向）と見なした場合の滑り線方位（ $\pi/4 + \phi_i/2 = 65^\circ$, $h_d/l = 1.18$ ）にはほぼ一致している。この結果に基づくと、炉下部の応力場は、径方向の垂直断面で受働状態、円周方向の垂直断面で主働状態とみることができ、応力成分 σ_v , σ_h , σ_θ は $\sigma_\theta < \sigma_v < \sigma_h$ の関係にあると予想される。そこで、炉内の応力測定を実施し、炉高方向における応力場の変化と炉壁停滞層の形状について検討した。

4.2 炉壁不動層を有する炉内の応力場と滑り線解析

Fig. 11 に $\alpha=90^\circ$ の領域で試料排出を停止した場合の炉内応力分布を示す。円周方向の応力 σ_θ はシャフト中段から急上昇し、炉壁不動層の頂点位置で最大値を示す。その後、急激に減少し、炉腹から下方では極めて小さな値となる。水平応力 σ_h もシャフト中段から徐々に増大するが、炉下部で二つのピークを持つ。これは、炉壁不動層および炉芯不動層の形成により、径方向での縮流が二段にわたって生じているためと推察される。応力成分 σ_v , σ_h , σ_θ の大小関係は、炉上部と下部で異なり、シャフト部で $\sigma_h < \sigma_\theta < \sigma_v$ 、炉下部で $\sigma_\theta < \sigma_v < \sigma_h$ となっている。シャフト中段で σ_θ が σ_h より大きくなる理由は、炉壁不動層の上部で周方向への固体流れが生じているためと推察される。一方、炉下部においては、 σ_θ に比して σ_h が極めて大きく、径方向での縮流が支配的であると判断される。

Fig. 12(c) に周方向断面の土圧係数分布 σ_θ/σ_v (Fig. 12(b)) を Mohr 円に適用し、図式解析から求めた滑り線の方角線図を示す。滑り線 a~d の傾斜角は、Fig. 12(a) に示した炉壁不動層の a~d 点における接線とほぼ



Measuring position; $\theta=90^\circ$, $r/R=0.8$

Fig. 11. Vertical distributions of σ_v , σ_h and σ_θ in the model furnace with peripheral dead zone.

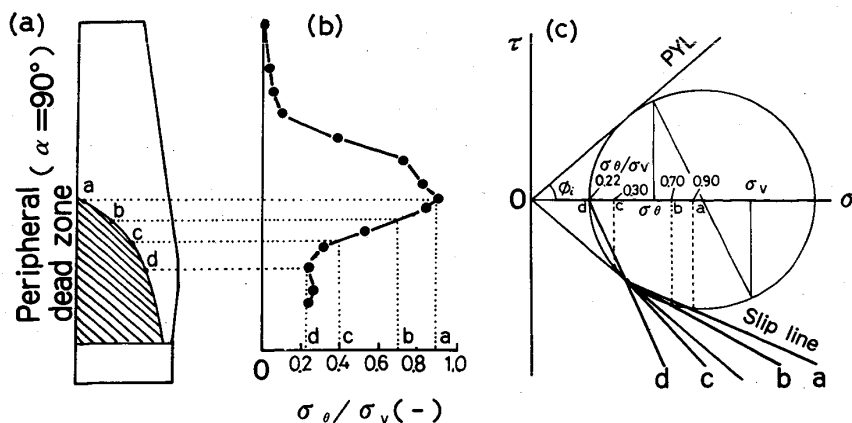


Fig. 12. Mohr's circle analysis of peripheral dead zone shape with the use of measured σ_θ/σ_v .

一致しており、斜面形状が σ_θ と σ_v との関係によって決定されていることが判明した。

4.3 装入物分布に及ぼす不均一降下の影響

羽口衝風バランスの偏りや炉壁プロフィールの局所的变化によって炉口部での降下速度分布が不均一化した場合、装入物分布の円周バランスが大きく崩れることが予想される。そこで装入物分布に及ぼす不均一降下の影響について調べた。

Photo. 4 に炉口降下速度を付着物によって不均一化させた場合の装入物分布と荷下がり状況を示す。前述したように付着物の上方では炉口降下速度が増大するため装入線レベルが次第に降下し、定常時には堆積層表面が円周方向で著しい傾斜を持つようになる。このような状態下では、チャージされた装入物は装入深度の深い付着物側へ流れ込むため、円周方向 (A—B 方向) の層厚分布に大きな差が生じ、付着物側で厚く、反対側で薄い分布形状となる。また、同時に V 底位置 (堆積層表面の最下点) が付着物側に形成され、装入物分布の軸対称性が著しく崩れる。

Fig. 13 に炉口部径方向の l_o/l_c 分布を均一降下の場合と比較して示す。周辺部の降下速度が増大する付着物側で l_o/l_c が上昇し、逆に、反対側の l_o/l_c は減少している。また、V 底位置が付着物側へ移行するため、炉中心部の l_o/l_c は著しく増大する。

このように、高炉内装入物の降下に偏りが生じた場合には、炉口部での装入物分布が著しく不均一化するとともに、降下時における蛇行現象や炉壁混合層の形成等によって高炉の円周バランスが大きく崩れることが予想される。装入物分布やガスおよび固体流れの円周バランスを維持する上において、シャフト部の炉体プロフィール管理が特に重要と言える。

4.4 実炉現象との対応

Fig. 14 に実高炉における羽口衝風バランスと装入物

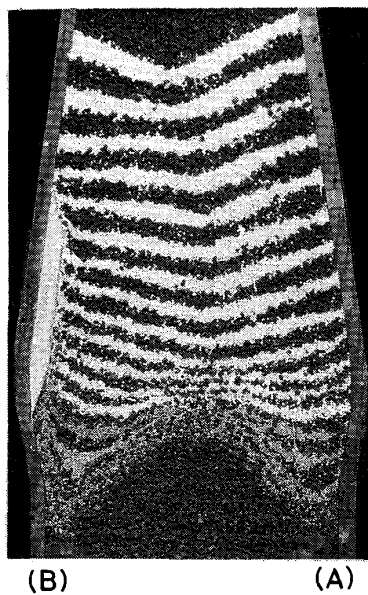


Photo. 4. Appearance of burden distribution in the model furnace with the scab.

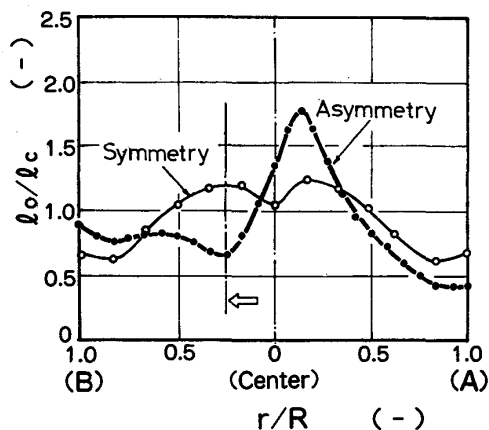


Fig. 13. Effect of circumferential imbalance of burden descent on the radial distribution of l_o/l_c .

分布との関係を示す。これは炉床壁温度の局所的上昇を抑えるために、N方位の羽口4本を閉鎖した際の各羽口風量と炉頂装入深度および l_o/l_c の円周バランスについて解析した結果である。(a)~(c)に示した散布図は、各要因に対する円周バランスの重心位置を平均値で除して規格化表示している。N方向の羽口閉鎖により、羽口風量(BV)バランスはS方向に偏っているが、装入深度及び l_o/l_c 分布は羽口風量とは逆のN方位に偏っている。このような変化は、羽口閉鎖によつてN方位の降下速度が増大したことを示している。実高炉におけるこの結果は、模型実験結果とよく対応しており、羽口閉鎖や風量の不均一性が降下速度の偏りを介して装入物分布に大きく影響することが実炉解析からも明らかとなった。

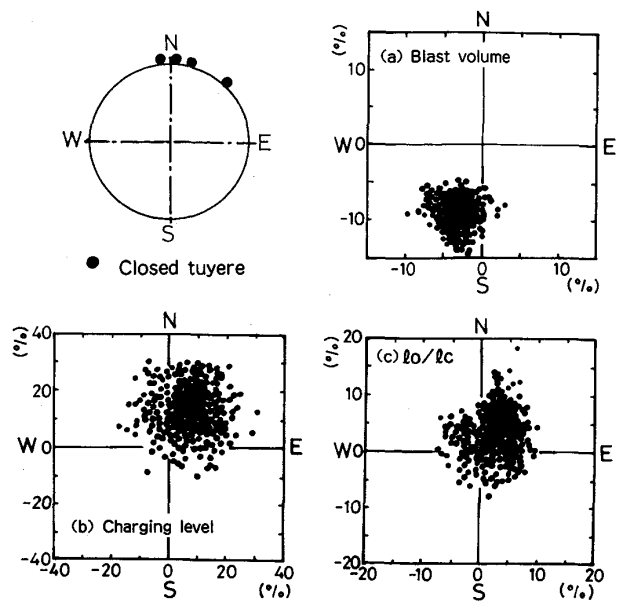


Fig. 14. Circumferential imbalance of blast volume, charging level and l_o/l_c in actual blast furnace with closed tuyeres.

5. 結 言

高炉の三次元全周模型を用いて炉内装入物の不均一降下挙動に及ぼす羽口風量バランス、炉壁付着物、炉壁侵食の影響について検討した。その結果、三次元場における固体の降下挙動は、二次元模型から得られた従来の結果と大きく異なることが判明した。また、羽口衝風バランスの偏りや炉壁付着物の形成に起因する炉上部での挙動が、要因発生場所での挙動と全く逆の関係にあるという興味ある結果が得られた。炉上部と炉下部での挙動が相反するという現象は、高炉の円周バランス管理の上で極めて重要な知見と判断されるが、本研究では定性的な現象把握に留まっており、定量的な関係把握が十分ではない。ここで得られた種々の現象に対し、今後、定量的かつ理論的な検討を加えていく予定である。

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) 一田守政, H. BIAUSSER: 鉄と鋼, 69 (1983), S61
- 4) 一田守政, H. BIAUSSER: 鉄と鋼, 69 (1983), S62
- 5) 大野陽太郎, 近藤国弘: 鉄と鋼, 70 (1984), S62
- 6) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晋一, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 936
- 7) 高炉内反応部会: 高炉内現象とその解析 (日本鉄鋼協会編)(1982), p. 177
- 8) 磯部浩一, 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, 67 (1981), S743