

論 文

UDC 669.162.262.3 : 669.162.263.43

実物大模型による高炉炉口部の Ore/Coke 分布の検討*

成田 貴一**・稲葉 晋一***・小林 勲***
 沖本 憲市***・清水 正賢***・矢場田 武****
 玉田 慎一****

Study of Ore and Coke Distribution in Blast Furnace Carried out on a Full Size Model

Kiichi NARITA, Shin-ichi INABA, Isao KOBAYASHI,
 Ken-ichi OKIMOTO, Masakata SHIMIZU, Takeshi YABATA,
 and Shin-ichi TAMADA

Synopsis:

The distribution of ore and coke burden composed of pellet and sinter has been investigated by a full size model. Falling trajectory of materials was measured in both the model and a blast furnace, and the equation of the trajectory to be applied to the design of charging equipment was led theoretically. It was found that the inclination of ore and coke layers varied with charging sequence and dumping volume. It was clearly shown that the radial distribution of ore and coke depended on coke volume, ore to coke ratio in charging burdens, charging sequences and pellet content in burdens.

Results of the model investigations were applied to commercial blast furnaces. The distribution of ore to coke ratio with gas flow was calculated with the results of full size model and the ore to coke ratio was shown to be reduced at central part with high gas flow velocity in blast furnace.

By comparing the results of full size model with those of a onetenth reduced model, it was found that the mixed layer of ore and coke was formed and the ore to coke ratio was decreased in the central part of the reduced model. It was reasoned that the ratio of particle weight of ore and coke should be taken as one of the scaling factors in the reduced model.

1. 緒 言

最近の大型高炉では炉口径が拡大したため半径方向の装入物分布 (ore/coke 分布) が不均一となり、炉内ガスは中心部あるいは周辺部を局部的に流れやすくなっている。従つて、大型高炉では炉況の安定化と炉体保護に加え、燃料比の低下を図るために半径方向の ore/coke 分布を制御して適正なガス流分布を得ることが重要な課題となつてきた。この目的を達成するために数多くの装入物分布実験が行なわれ^{1)~4)}、数々の知見が得られている。しかし、これらの結果はほとんど定性的理解にとどまつており、特に炉内堆積傾斜角、ore/coke 分布、あるいはコークスとペレットの混合状況等については実験結果を

そのまま実炉にスケールアップすることは困難である。

そこで、各種要因をいっそう実炉に近い状態で把握し、ペレットを多量に使用する場合の装入物堆積層の特性を明らかにするために、高炉炉頂部の実物大模型によつて堆積傾角や ore/coke 分布を測定した。その結果、装入条件の選定に対する数々の知見を得るとともに、種々の現象を見出した。

2. 実 験 方 法

2.1 実物大模型と実験方法

Fig. 1 に装置の概要を示す。本実物大模型は半径 5.05m の 40° 扇形で、堆積層を降下させて指定装入線を調節することができる。実験に使用した装入物はいず

* 昭和 52 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 5 月 8 日受付 (Received May 8, 1978)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 工博・理博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd. 1-3-18 Wakino-hama-cho Fukiai-ku Kobe 651)

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

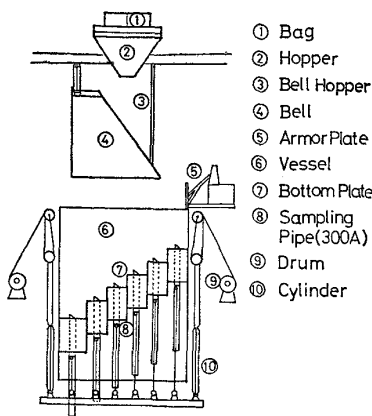


Fig. 1. Apparatus of the full size model.

れも高炉へ装入される直前で採取したもので、各装入物の粒径はペレット 5~20 mm (平均径 11.5 mm), 焼結鉱 5~50 mm (平均径 17.0 mm), コークス 25~100 mm (平均径 50.0 mm) である。

原料バッグ①で所定量を秤量された装入物は大ベルホッパー③に貯鉱された後落下させられる。装入物の分布状況を極力高炉に近づけるために、大ベルホッパー内の装入物堆積状況を実炉で測定した堆積プロファイルに近似させた。装入後、堆積層は所定装入深さまで底板⑦の駆動によって降下させられる。側壁⑥の一方は金網と透明アクリル板を用いて堆積層断面を観察できるようにした。

実験は床敷コークス (約 6 t) の上に O↓C↓O↓ の 1.5 チャージを装入し、各装入ごとに堆積層の表面形状と堆積層厚を測定した。装入完了後 6 本のサンプリングパイプ⑧にて堆積物を採取して分別し、半径方向の鉱石とコークスの重量分布、粒度分布を測定した。-5 mm 粒は肉眼分別が困難なため、あらかじめ測定した各装入物の -5 mm 粒の重量割合に従って比例配分した。

2.2 実験条件の決定

2.2.1 装入深さの決定

高炉の装入物堆積表面形状は一般に M 型分布と V 型分布が考えられているが、本実験では単純な型で整理しようということから、装入物の堆積形状は V 型とした。

装入深さ (指定装入線) をムーバブルアーマの作動に支障のない深さで、しかも装入物を V 型に堆積させるという条件からストックライン 1.8m を基準とした。

2.2.2 コークススペースの決定

コークススペースは装入物分布を変えうる非常に重要な因子で、経済的で安定な高炉操業を維持するためには適正なコークススペースが存在することが指摘されている^{5,6)}。

そこで、岡部ら⁷⁾の提出した無次元コークスペース C_B^* ((1)式)から、各種操業条件に対するコークスペース C_B を求めると焼結鉱とペレットの配合割合によつて異なるが 29~32t/ch となる。

$$C_B^* = (\text{ore/coke}) \cdot C_B \left/ \left(\frac{1}{4} \rho_o \cdot \pi D_T^3 \right) \right. \dots \dots \dots (1)$$

ここで ρ_o は鉱石のかさ密度 (t/m³), D_T は炉口径 (m)。

また実際高炉のコークスペース C_B と炉口径の関係は (2) 式で近似できることから、本模型実験 (炉口半径 5.05m) では 31/t/ch を基準とした。

$$C_B = 3.0 \times 10^{-2} \cdot D_T^3 \dots \dots \dots (2)$$

2.2.3 その他

ペレット配合量は当社の大型高炉の使用実績と今後の使用計画にもとづき、40% を基準として変化させた。

装入時の ore/coke はペレット配合率と同様、高炉実績にもとづいて 3.0, 3.5, 4.0 の 3 水準とした。

また、大ベル開閉速度は予備実験によつて装入物堆積状況におよぼす影響がきわめて小さいことを確認し、全開に要する時間を 8 sec と決定した。

3. 実験結果

3.1 装入物の落下軌跡

3.1.1 落下軌跡に関する実験結果

大ベルからの装入物の落下軌跡はムーバブルアーマの制御性や炉内の装入物堆積分布を左右する重要な要因である。そこで、この落下軌跡に影響を及ぼす因子を検討した。その結果、コークスの落下軌跡は従来より言われているように鉱石より炉壁寄りに形成される。落下量の影響は実験範囲内ではきわめて小さいが、落下量を 2 倍にした場合には軌跡の幅がやや炉内側に拡がる傾向が認められた。しかし、大ベルホッパー位置の影響は大きく、落下軌跡を決定する重要な因子であることが判明した。すなわち、Fig. 2 に示すように大ベルホッパーの下端位置をストックライン基準の高さで -2.05m から -2.43m まで 0.38m 上昇させることによつて炉壁衝突点の位置が約 0.9m 上昇し、落下軌跡の主流の幅も狭くなった。

3.1.2 落下軌跡の推定式

従来落下軌跡の推定式は G. HEYNERT ら⁸⁾, P. BROCHENIN⁹⁾ および城本ら^{10,11)} によつて確認された (3) 式が用いられている。

$$y = x \cdot \tan \alpha + \frac{x^2}{4l \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)} \dots \dots \dots (3)$$

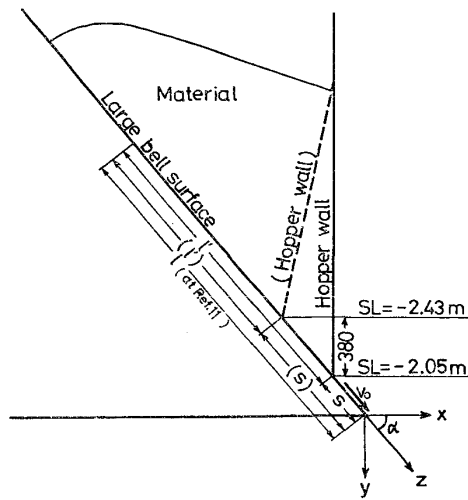


Fig. 2. Relation between the position of bell hopper and gliding distance of material.

ただし x, y は粒子の水平および垂直方向の距離(m), α は大ベル角度 ($^\circ$), μ は装入物の大ベル表面における滑り摩擦係数 (-), l は装入物の大ベル面上の助走距離 (m).

コークスの落下軌跡について(3)式と本実験結果とを比較した結果が Fig. 3 である。図から明らかなように(3)式から求めた落下軌跡は本実験結果と異なり、炉壁衝突点の位置にも大きな差のあることがわかる。この理由は(3)式では装入物が落下するにつれて軌跡の幅が拡大する現象、すなわち、ベルが降下するにつれて軌跡の主流が変化する現象を全く予知できないことにある。こ

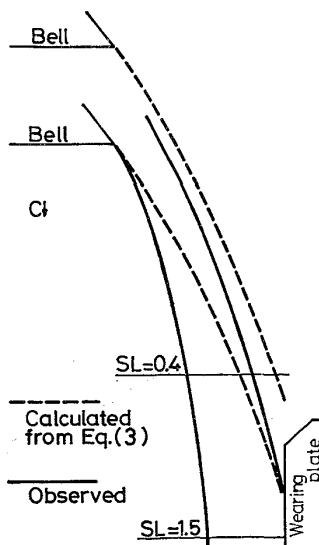


Fig. 3. Comparison of falling trajectory calculated from Eq. (3) and observed in a full size model.

の現象を表わすために城本ら¹⁰⁾は(3)式にベルの降下とともに装入物の落下起点を変化させる項を追加している。また文献 11) では(3)式をそのまま用いて l をベルホッパー内の装入物の重心までの距離(Fig. 2 参照)としている。しかし、装入物の重心までの距離は装入量によつて変化する。このため落下軌跡が変化することになるが、すでに述べたように今回の落下量を 2 倍にした実験では軌跡に何らの差も認められていない。

そこで、本実験結果に合致する落下軌跡の推定式を次のような考え方にもとづいて導出した。

ホッパー理論によればホッパーからの原料の排出速度はホッパー内の原料容積には依存しない¹²⁾。従つて、大ベルホッパーと大ベルの間から排出される装入物の速度 V_0 はベル開作動直後はゼロでベルが開くにつれてある一定の排出速度 V_c になるものと仮定する。大ベルホッパー下端から初速度 V_0 で排出された装入物粒子はホッパー下端から大ベル先端までのベル面に沿う距離 S を助走した後大ベル先端から落下するとみなす。

Fig. 2 に従えば、ベル面上の粒子(質量 m)の運動方程式は(4)式で与えられる。

$$m \cdot \frac{d^2Z}{dt^2} = m \cdot g \cdot (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \dots\dots\dots (4)$$

また、ベル先端から初速度 V_1 で角度 α 方向に放出される粒子の運動方程式は(5)、(6)式となる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0 \dots\dots\dots (5), \quad m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = mg \dots\dots\dots (6)$$

(4)~(6)式から大ベル先端から落下する装入物の軌跡は次のように求められる。

$$y = x \cdot \tan \alpha + \frac{g \cdot x^2}{2\{V_0^2 + 2 \cdot S \cdot g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)\} \cos^2 \alpha} \dots\dots\dots (7)$$

なお、(7)式を用いて落下軌跡を描く場合には原点を常に大ベル先端にとる必要がある。式中の V_0 は種々報告されている高炉における落下軌跡の実測値から 0~3m/sec と求められた。また、滑り摩擦係数 μ は実験により求めた。これらの結果から(7)式を適用するに当り、コークスの場合には次の条件を与えた。

- $\mu = 0.31, \quad \alpha = 53^\circ$
- 大ベル開作動直後 $V_0 = 0 \text{m/sec}$
- 大ベル開状態 $V_0 = 3 \text{m/sec}$
- 大ベル開作動中 $V_0 = \text{大ベルの降下距離に比例}$

この落下軌跡の推定結果と加古川 No. 3 高炉における実測結果とを比較して Fig. 4 に示すが、(7)式は実際高炉の落下軌跡を十分表現しうるものであることがわかる。Fig. 5 は(7)式を用いて装入物助走距離 S が落

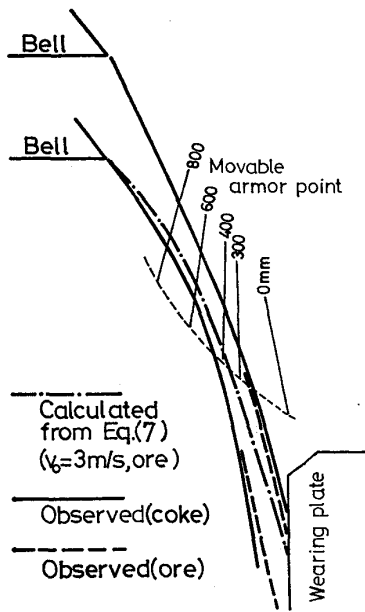


Fig. 4. Comparison of falling trajectory calculated from theoretical Eq. (7) and observed in Kakogawa No. 3 BF.

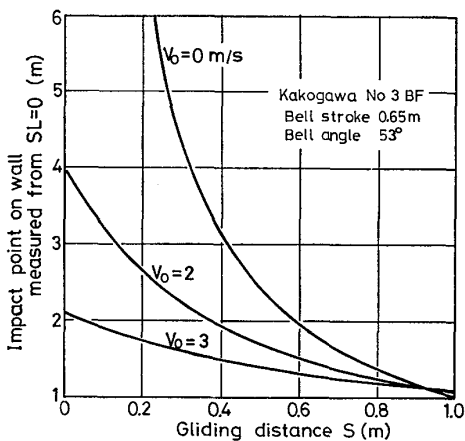


Fig. 5. Relation between the gliding distance and impact point of material on the wall.

下軌跡に及ぼす効果を推察した結果である。助走距離が大きくなるほど炉壁衝突点の位置は上部(SLの値は下方へ大きくなる)へ移行し、しかもその範囲は狭くなることを示している。

3.2 装入物の堆積傾斜角

模型炉内に装入された装入物は半径方向でほぼ直線的に堆積するので、半径方向 10 点で測定したストックライン深さを最小 2 乗法によつて直線近似し、その傾きを堆積傾斜角とした。

Fig. 6 はコークス堆積層上に O↓(↓は大ベルからの落下を示す)あるいは O↓O↓(等量の鉱石を 2 回に分けて連続装入する)した場合の鉱石の堆積傾斜角を示したもの

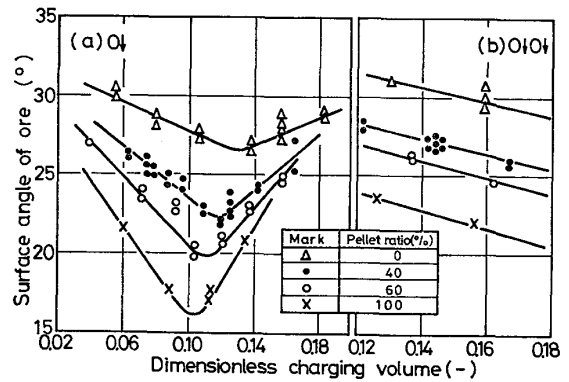


Fig. 6. Effect of charging volume and pellet ratio in burden on the surface angle of ore layer.

である。横軸は炉口半径に対する鉱石の平均堆積層厚の比で無次元装入量と呼ぶ。Fig. 6(a)によれば、コークス層上に O↓した場合には鉱石自身の装入量を増加するにつれて傾斜角は低下するが、ある装入量において最小値を示す。この傾斜角の最小となる装入量はペレット配合率が高いほど小さい。また、コークス層上に O↓O↓した場合(Fig. 6(b))には O↓の場合と同じ装入量であるにもかかわらず著しく大きな傾斜角が観察された。しかしこの傾斜角は実験範囲内では装入量の増加とともに減少し、ペレット配合率 60% の無次元装入量約 0.16 で O↓装入とほぼ同じ角度となる。

実験時の観察によれば、装入物は大ベルの降下とともに一気に落下し、この落下速度が鉱石の中心方向への移動速度よりはるかに大きいためヒズミ速度効果*³⁾によつて周辺部に鉱石の山を形成する。この山はある臨界堆積量を越えた時点(山の剪断力が剪断強さを越えた時点)で上方より落下する鉱石のエネルギーとあいまつて一気に中心部へ流れこむ。この場合、装入物は中心に向かう水平方向の大きな速度をもっており、その慣性力のために中心部に多く堆積し、堆積表面は若干凹面状となつて低い傾斜角を示す。しかし、装入量が多い場合にはこの凹面上になお装入が継続され、堆積傾斜角は再び増大する。従つて、山の堆積量が臨界に達し、中心方向への速度が最大となる状態が Fig. 6(a)の傾斜角を最小にする無次元装入量に相当するものと考えられる。

また、Fig. 6 から明らかなように鉱石層の傾斜角はペレット配合率によつても変化する。装入方式や ore/coke によつて異なるが、鉱石層の傾斜角はペレット配合率の増加とともに減少し O↓O↓装入ではペレット 10% 当り

* ヒズミ速度効果¹³⁾(strain-rate effect) : 土質構造物に応力が増えらるる割合(載荷速度)が大きくなることによつて、土の変形に対する抵抗や剪断強さが静的試験の場合よりも増大する現象。

1° の低下となつている。

一方、コークスの堆積傾斜角は鉱石層上に装入した場合とコークス層上に装入した場合で異なつている。鉱石層上に装入した場合には Fig. 7(a) に示すようにコークス自身の装入量および下層鉱石層の傾斜角には関係なく約 31.7° を示す。コークス層上にさらにコークスを装入した場合(C↓C↓に相当)の傾斜角は Fig. 7(b) にみるように本実験範囲内ではコークス自身の装入量が増加するにつれて減少する。

また、鉱石とコークスの平均かさ密度を算出した結果、コークス層では 0.48t/m³ である。一方、ペレットを含む鉱石層のかさ密度は Fig. 8 に示すようにペレ

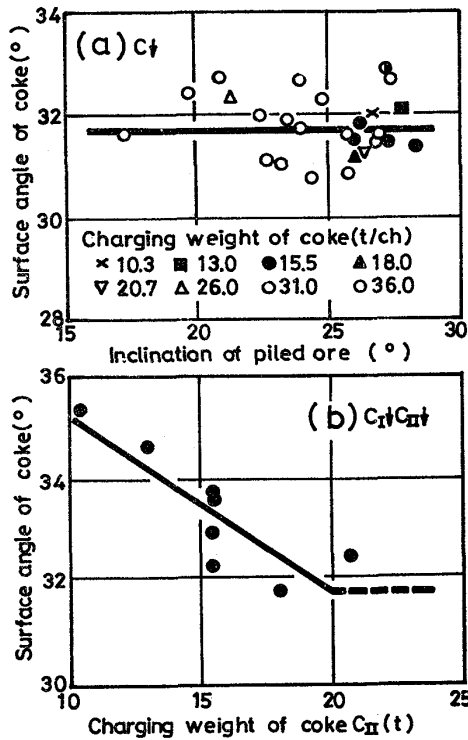


Fig. 7. Effect of inclination of piled ore and charging weight of coke on the surface angle of coke layer.

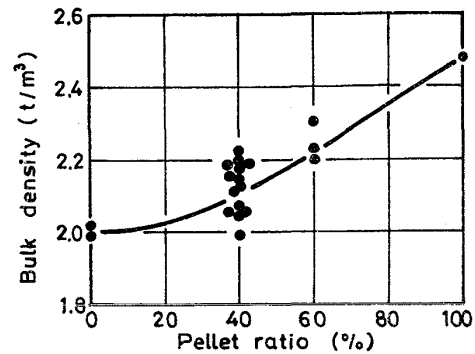


Fig. 8. Variation of bulk density of ore with pellet ratio.

ト配合率とともに変化し、ペレット 40% の鉱石層では約 2.1t/m³ となる。

3.3 半径方向の ore/coke 分布

堆積深さから求めた鉱石層厚 l_o とコークス層厚 l_c の比 (l_o/l_c) とサンプリングの結果から求めた鉱石とコークスの重量比 (W_o/W_c) とは中心部を除き極めて高い相関を示しており、層厚分布の測定値を用いて鉱石とコークスの重量比 (ore/coke) 分布を推定することができる。混合層の形成される中心部の鉱石とコークスの重量比は堆積層厚の比からは求められないので、断面積比を考慮して堆積層厚比 (l_o/l_c) から求めた ore/coke と全装入量の ore/coke が収支するように決定した。この方法に実験時の装入条件(コークスペース, 装入時の ore/coke, 装入方式) を適用して算出した半径方向の ore/coke 分布を Fig. 9 に示す。図から明らかなように計算値は実測値とよい一致を示しており、実験範囲内のあらゆる装入条件に対しても十分適用しうるものと判断した。

3.3.1 コークスペースと装入時の ore/coke の影響

Fig. 6~8 を用いることによつて任意の装入条件に対する ore/coke 分布を求めることができる。また, Fig. 9 からわかるように、同一装入条件における ore/coke 分布はほぼ直線で近似できるので、中心部と周辺部の ore/coke の差 ($\Delta(O/C)$) で定量した。

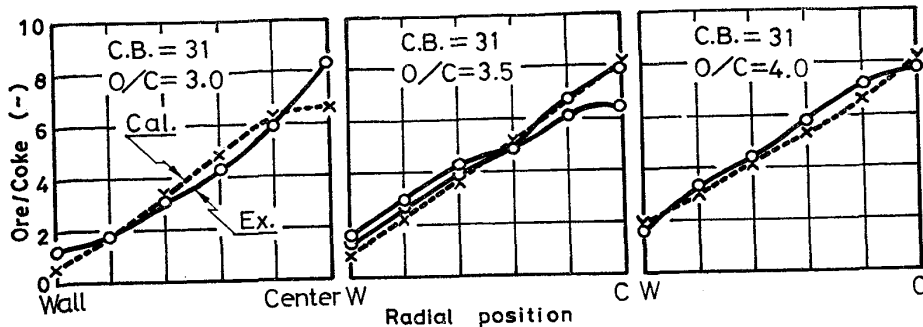


Fig. 9. Comparison of ore to coke ratio in calculation and experiment.

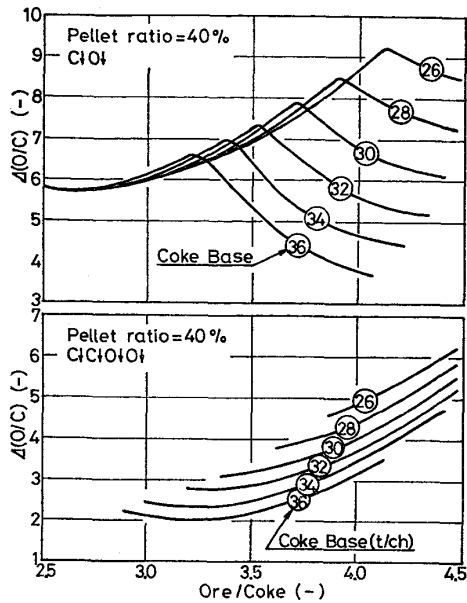


Fig. 10. Effect of coke base and ore to coke ratio in charge on the ore/coke distribution.

Fig. 10 に大型高炉(炉口径 10.1m)でペレット 40%を使用した場合の ore/coke 分布におよぼす装入時の ore/coke とコークスペースの影響を示す。図から明らかかなようにこれらの影響は装入方式によつて著しく異なる。C↓O↓ 装入ではコークスペース一定で装入時の ore/coke を増加させると $\Delta(O/C)$ に極大値の存在することがわかる。また、装入時の ore/coke を一定にしてコークスペースを上昇させると $\Delta(O/C)$ はコークスペースの小さいところで極大値を示し、その後大きく減少する。

一方、C↓C↓O↓O↓ 装入では C↓O↓ 装入と同様にコークスペースの減少とともに $\Delta(O/C)$ が増大する。コークスペース一定で考えると $\Delta(O/C)$ は装入時の ore/coke の比較的低いところで極小を示すが、ore/coke の増加とともに増大する。また、装入時の ore/coke の低い場合には ore/coke の変動に対する $\Delta(O/C)$ の変化は極めて小さいことがわかる。

3.3.2 装入方式の影響

Fig. 11 は鉄石の装入方式(O↓とO↓O↓)によつて ore/coke 分布が変化する様子を示したもので、装入方式を右方向へ変更するにつれて $\Delta(O/C)$ の減少することがわかる(図中の 1/3C↓2/3C↓は1チャージのコークスを1:2の比に分割して装入することを示す)。すなわち、図中に示した条件下では C↓O↓O↓ 装入が中心部の ore/coke を最も小さくできる。

3.3.3 ペレット配合率の影響

Fig. 12 に実測したペレット配合率と ore/coke 分布

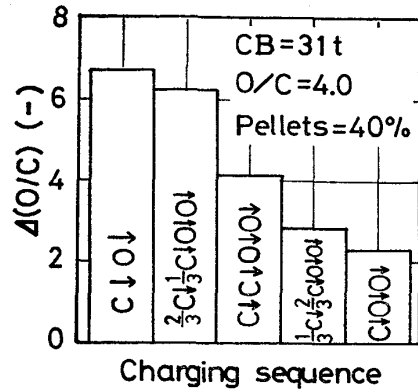


Fig. 11. Relationship between charging sequence and $\Delta(O/C)$.

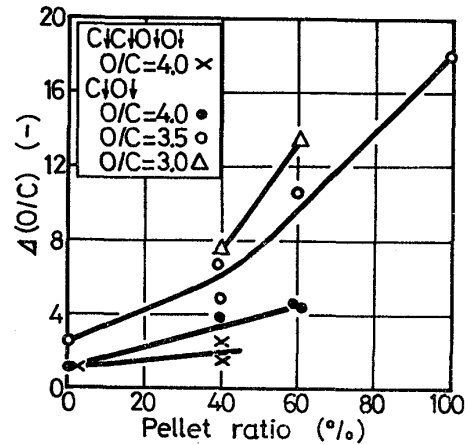


Fig. 12. Effect of pellet ratio in burden on $\Delta(O/C)$.

の関係を示す。いずれの装入条件においてもペレット配合率を増加するにつれて $\Delta(O/C)$ が増大し、中心部に多量の鉄石が装入されることを示している。同一装入方式についてみると装入時の ore/coke の増加にともなつて $\Delta(O/C)$ が減少し、ore/coke 分布が均一化することがわかる。

4. 模型実験結果の実炉への適用

4.1 均一ガス流分布操作時における層厚の変化

模型実験結果の実炉への適用性を検討するために加古川 No. 1 高炉で装入方式の変更試験操作を実施した。加古川 No. 1 高炉を採用した理由は炉口温度分布が均一分布に近いことから推定して、ガス流速分布も均一で装入物分布に局所的な変化を与えにくいと考えたことによる。

試験は C↓O↓ 装入を C↓C↓O↓O↓ の分割装入に変更し、さらに 1/3C↓2/3C↓O↓O↓ に移行した後再び C↓O↓ 装入にもどした。前述のように鉄石とコークスの層厚比が ore/coke 分布とよく対応することから、この試験で

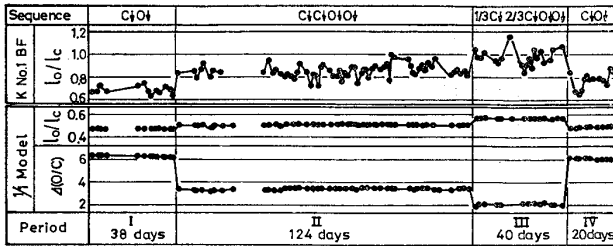


Fig. 13. Comparison of results in experiment and blast furnace practice with variation of charging sequence.

は主として層厚比に着目して検討した。

試験結果の経時変化を減風および休風時を除外して Fig. 13 に示す。図中 Model の Δ (O/C) と l_0/l_c は実際操業における鉱石とコークスの装入量およびペレット配合率を模型実験結果に適用して求めた値であり、実際高炉の l_0/l_c は検尺による結果である。図から明らかのように、 l_0/l_c は定性的には模型と実測の結果がよく一致している。この絶対値の違いは主として模型実験が静的状態であるのに対して、実測値がガス流下でえられた結果であることによるものと考えられる。

この結果から、極端なガス流速分布の存在しない高炉操業に対しては、定性的ではあるが静的な模型実験結果も十分適用しうるものと判断した。

4.2 中心ガス流操業時の ore/coke 分布とガス温度分布

中心ガス流操業を行う大型高炉の炉口中心部のガス流速は著しく大きく¹⁴⁾、特に中心部の装入物分布は模型実験結果と著しく異なるものと考えられる。また、このような中心ガス流操業を行う大型高炉炉頂部堆積層では降下速度分布が存在する¹⁵⁾。しかし、高炉解体調査結果などからは炉内堆積層の傾斜角に著しい乱れは認められていない。

そこで、この降下速度分布は装入物堆積層の最上層でのみ起こり、第2層以降においては等速降下すると仮定し、典型的な中心ガス流操業の加古川 No. 2 高炉を対象として層厚比の変化とガス温度分布の関係を検討した。

第2層の層厚は Fig. 14 に従って(8)~(11)式で与えられる。

$$\text{炉壁部} : l_{ow} = \left(\frac{O_F}{\rho_o} - A \cdot \frac{R}{3} \cdot \Delta\theta_1 \right) / A \dots\dots\dots (8)$$

$$l_{cw} = \left(\frac{C_B}{\rho_c} - A \cdot \frac{R}{3} \cdot \Delta\theta_2 \right) / A \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{中心部} : l_{oc} = l_{ow} - R(\tan \theta_{os} - \tan \theta_{cs}) \dots\dots\dots (10)$$

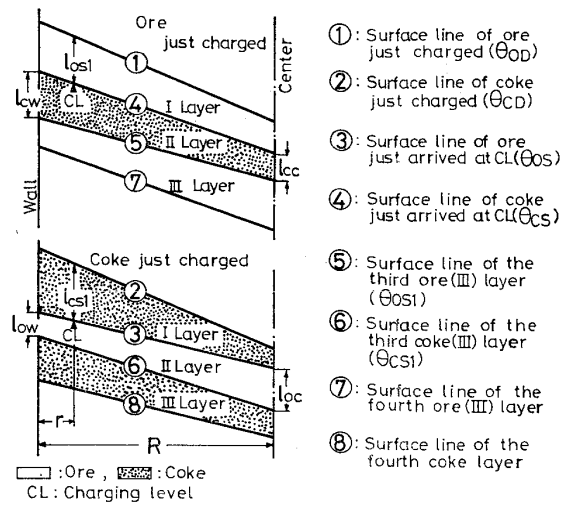


Fig. 14. Schematic model for calculating the layer thickness.

$$l_{cc} = l_{cw} - R(\tan \theta_{cs} - \tan \theta_{os}) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $A = \pi R^2$ 、 O_F は装入鉱石量、 C_B は装入コークス量、 ρ_o と ρ_c はそれぞれ鉱石とコークスのかさ密度である。添字2字目の c と w は中心部と周辺部を表わす。 $\Delta\theta$ は傾斜角 θ_{ij} ($i=c, o, j=s, d$) によつて異なり、周辺部の降下速度が大きい場合には(12)、(13)式で与えられる。

$$\Delta\theta_1 = \tan \theta_{cs} - \tan \theta_{os} \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta\theta_2 = \tan \theta_{os} - \tan \theta_{cs} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、添字2次目の d と s はそれぞれ装入時と堆積表面が指定装入線に到達した時を表わす。

また、中心部降下速度が大きい場合の $\Delta\theta$ は(14)、(15)式で与えられる。

$$\Delta\theta_1 = \tan \theta_{cs} - \tan \theta_{od} \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta\theta_2 = \tan \theta_{os} - \tan \theta_{cd} \dots\dots\dots (15)$$

炉壁部と中心部の第2層層厚を(16)式のように層厚比

$$L^* \equiv \left(\frac{l_{oc}}{l_{cc}} \right) / \left(\frac{l_{ow}}{l_{cw}} \right) \dots\dots\dots (16)$$

で定義すると、 L^* は第2層以降を等速降下と仮定したことからシャフト上部塊状域の鉱石層厚とコークス層厚の比の分布を示すこととなる。この L^* と炉口部の温度分布パターン ($T^* \equiv$ 中心温度/周辺温度) との関係を Fig. 15 に示す。ここで、炉口温度分布が典型的な中心ガス流分布で周辺部温度の変動が中心部温度に比して著しく小さいことを考えると、 T^* の変化は中心部温度の変化とみなすことができる。図から明らかのように T^* の値の大きな時には L^* の値が小さくなっている。すなわち、 T^* の大きな場合には中心部の鉱石層厚が小さくなり、コークス層厚が大きくなっているものと推察される。

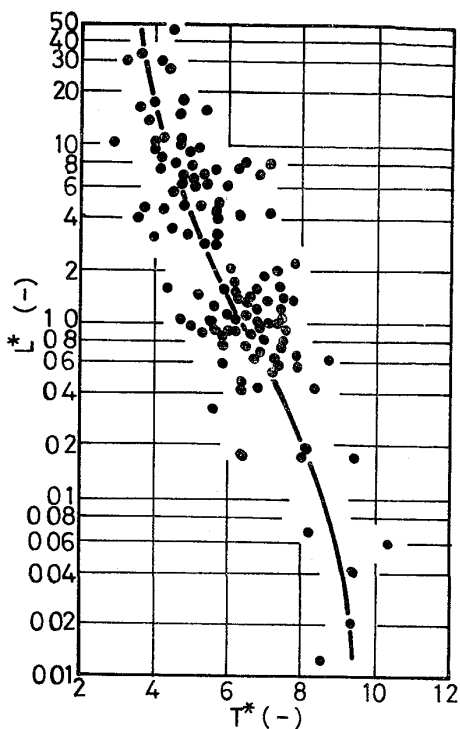


Fig. 15. Relationship between distribution index of gas temperature T^* and layer thickness index L^* in blast furnace.

従つて、高炉炉口部のガス温度がガス流速の増大とともに上昇する¹⁶⁾と考えれば、模型実験で得られた層厚分布は装入され降下する過程で変化を受けてガス流速分布に見合った層厚分布になるものと推定される。

5. 考 察

5.1 実物大模型と縮小模型の比較

従来、縮小模型による装入物分布実験を実施してきた¹⁷⁾。その結果は他のペレットを使用した模型実験結果¹⁸⁾とよく類似してはいたが、必ずしも実際高炉の現象をすべて完全に説明しうるものではなかつた。Table 1 に両模型実験の概要と実験条件を示す。

Table 1. Comparison of dimensions and experimental conditions in the model investigation.

		1/10 Model		Full Size Model	
BF		Kakogawa 1 BF (1)		Kakogawa 3 BF	
Dimension (mm)					
o: sampling point					
ore/coke (-)		3.4 - 3.9		3.0 - 4.0	
C_B (T/Ch)		13 - 23		26 - 36	
Materials	Diameter	Range (mm)	Mean (mm)	Range (mm)	Mean (mm)
	Pellet	1 - 5	3.6	5 - 20	11.5
	Sinter	3 - 10	4.6	5 - 50	17.0
	Coke	5 - 15	7.2	25 - 100	50.0
m_c/m_p		2.2		22.8	

Fig. 16 に縮小模型と実物大模型の ore/coke 分布を示す。実物大模型の ore/coke 分布がほぼ直線変化であるのに対し、縮小模型では中心部の ore/coke が低下して中間部に極大値がみられる。

また、縮小模型にてコークス層上にペレットが装入される状況を観察した結果¹⁷⁾、ペレットは中心方向へ流れこむ際に中間部の堆積層表面のコークスを中心部へ流れこませ、中心部に混合層を形成する。この状況は焼結鉱や鉄鉱石についても認められている¹⁰⁾が、本実物大模型実験の混合コークス量は縮小模型に比して少量であった。そこで、混合層生成の難易はコークス粒子に働く力の大小であると考え、縮小模型を用いる場合の装入物粒子の相似条件を検討した。

簡単のためにコークス層表面の静止したコークス粒子にペレット粒子が衝突してコークスを中心方向へ移動させるとし、堆積層表面に添った方向のみを考える。ペレットとコークスの粒子の質量をそれぞれ m_p , m_c 、衝突前の粒子のもつ速度を v_{p1} , v_{c1} ($=0$)、衝突後の速度を v_{p2} ,

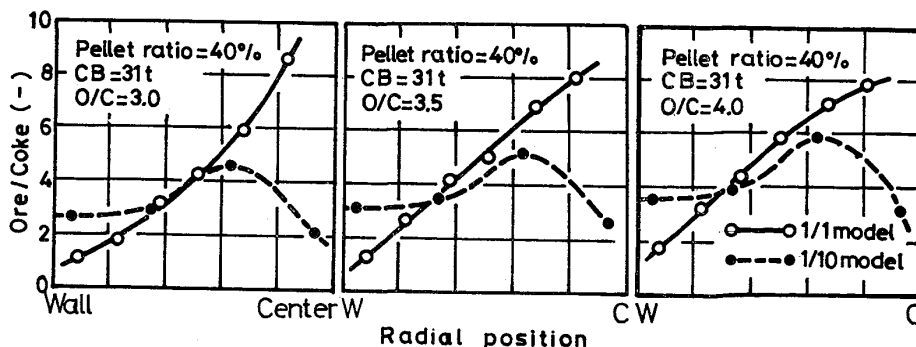


Fig. 16. Comparison of experimental results on 1/10 and full size model.

v_{c2} として運動量保存法則を考えると (17) 式が成り立つ.

$$m_p \cdot v_{p1} = m_c \cdot v_{c2} + m_p \cdot v_{p2} \dots\dots\dots (17)$$

衝突後のコークスの速度は衝突後のペレットの速度に等しいと仮定すれば (17) 式は (18) 式のように変形される.

$$v_{c2} = v_{p1} / \{ (m_c/m_p) + 1 \} \dots\dots\dots (18)$$

従つて、ペレットの装入速度を一定と仮定すると m_c/m_p の値が小さい程 (Table 1 参照), 衝突後のコークスの速度は大きくなり中心方向へ移動しやすくなる. しかし, 衝突後のコークスの速度はペレットの速度に等しいはずであり, この速度の増大分に相当したコークスの流れこみ量が増加するものと考えられる.

この現象をより明確にするために実物大模型において小塊コークス (粒径 15~25 mm, $m_c/m_p=1.5$) を用いて m_c/m_p を変化させて ore/coke 分布を調査した. その結果を Fig. 17 に示すが, 予想通り m_c/m_p の小さい小塊コークスでは中心部の ore/coke が減少している. これらの事実と観察結果から高炉用コークスを用いた実物大模型の混合層形成量は高炉充填時の測定結果¹⁹⁾と同様に, 縮小模型に比して著しく少なくなることが理解される.

このことから, 縮小模型と実物大模型の混合層形成量を等しくするためには, 少なくとも m_c/m_p の値を等しくとることが必要であると考えられる.

5.2 中心ガス流操作時の ore/coke 分布

模型実験で得られた装入物の堆積プロファイルは高炉の休風時や減風時とともに比較的ガス流速が小さく, 均一分布の場合の堆積層の状況を説明することはできる. しかし, 中心ガス流操作の高炉では前述のように堆積プロファイルは降下の過程でガス流速分布に従つて変化することが推測される. また, 堆積層は装入時にもガス流速の影響を受けて堆積する²⁰⁾. そこで, 高炉装入物大粒子の

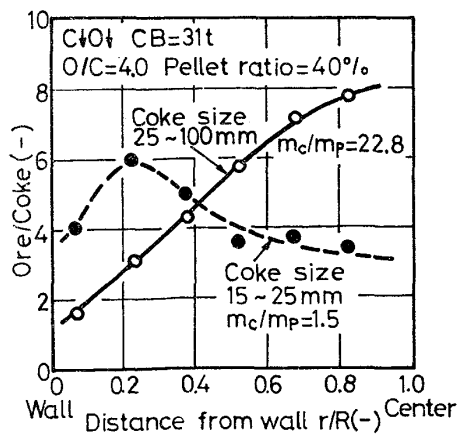


Fig. 17. Effect of particle size of coke on the distribution of ore to coke ratio in model.

流動化に関する実験データは著しく不足しており, しかも細粒に対する結果を直ちに外挿して利用しうるか否かは疑問であるが, 一つの試みとして次の手順に従つて模型実験によつて得た ore/coke 分布がどのように変化するかを検討してみた.

1) ガス流速分布は炉口部ガス温度がガス流速と直線関係にある¹⁶⁾²¹⁾と仮定して熱収支と物質収支から算出する.

2) ガス流中における堆積傾斜角はガス流速と傾斜角を無次元化して整理した杉山ら²²⁾の結果に本実験結果の傾斜角と装入物の粒度分布を適用して求める.

3) 堆積層を気体が行ける時のガス流速と空隙率との関係を求める. しかし他に適当な実験値が見当たらないので C. E. CAPES & A. E. McILHINNEY²³⁾の細粒に対する結果 ((19) 式) をそのまま利用する.

$$1.38 U_i/U_t = \epsilon_i^{3/2} \dots\dots\dots (19)$$

4) 半径方向各位置の鉱石およびコークスの堆積層は 2) で求めた傾斜角と 3) で求めた空隙率を有するものとし, 半径方向各位置の装入物重量の和と全装入量を収支させることによつて, 半径方向の ore/coke 分布を算出する.

このようにして求めた計算結果の一例を Fig. 18 に示す. 図には通常コークス (粒径 25~100 mm) と小塊コークス (粒径 15~25 mm) を用いた場合の ore/coke 分布を実物大模型による実験結果と比較してあるが, いずれの場合においても計算結果はガス温度の高い (ガス流速の大きい) 中心部で小さな ore/coke となつている. また, 小塊コークスを使用した場合には中心部の広い範囲にわたつて ore/coke の低下することがわかる.

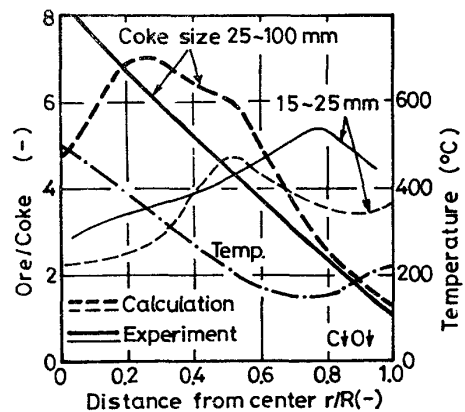


Fig. 18. Comparison of calculating ore/coke distribution in gas flow and measuring ore/coke in static model.

6. 結 言

高炉炉頂部の実物大模型を用いて装入時における装入物の挙動を明らかにするとともに、高炉操業上の装入条件の選定に関する多くの知見を得た。また、実験結果を実際高炉に適用して静的模型実験結果の有用性を確認した。さらに、装入物の分布と炉内ガス流分布が密接に関連していることを高炉のデータ解析と計算によつて示した。

装入物分布は高炉の制御因子として古くから重視されているにもかかわらず、気流中における高炉装入物大粒子の挙動に関するデータはいまだほとんどない。しかし、最近装入物分布に関する力学的現象が解明されはじめ²⁰⁾²⁴⁾ており、今後、装入物分布とガス流分布の制御に関する理論的、定量的な解明がなされるものと期待される。

文 献

- 1) 本会共同研究会製鉄部会：鉄 40-6-共 1 (1972)
- 2) 小林 正, 里見弘次, 斎藤 汎：鉄と鋼, 51 (1965)10, p. 1797
- 3) D. BÜLTER, K. BERNER, and U. LAUBIS: Stahl u. Eisen, 91(1971)22, p. 1223
- 4) D. BÜLTER and K. FABIAN: Stahl u. Eisen, 95(1975)26, p. 1272
- 5) 若林敬一, 嶋田駿作, 江崎 澁, 高城俊介：鉄と鋼, 53(1967)3, p. 267
- 6) 橋本 信, 稲垣憲利, 湯村篤信：鉄と鋼, 58

- (1972), S 25
- 7) 岡部 俠児, 浜田尚夫, 米谷 稔：鉄と鋼, 54 (1968), S 55
- 8) G. HEYNERT, F. TOUSSAINT, Jr., J. WILLEMS, and G. QUADE: Stahl u. Eisen, 80(1960)8, p. 473
- 9) P. BROCHENIN: C.D.S. Circ., (1968), p. 1699 (BISI No. 7139)
- 10) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正：製鉄研究, 272(1971), p. 23
- 11) 本会共同研究会製鉄部会：鉄 39-10-自 1 (1971)
- 12) 三輪茂雄：粉体工学, (1972), p. 210 [朝倉書店]
- 13) 河上房義：土質力学, (1976), p. 107 [森北出版]
- 14) 本会共同研究会製鉄部会：鉄 49-6, 19-共 (1976)
- 15) 小林 勲, 沖本憲市, 清水正賢, 稲葉晋一, 成田 貴一：鉄と鋼, 61(1975), S 379
- 16) 本会共同研究会計測部会：計 58-1-1 (1974)
- 17) 西田礼次郎, 稲葉晋一, 沖本憲市, 清水正賢, 田村節夫, 上仲俊行, 前井安春：鉄と鋼, 58 (1972), S 21
- 18) 小菅 高, 児玉惟孝, 斧 勝也, 彼島秀雄, 肥田行博：鉄と鋼, 51(1965)10, p. 1794
- 19) 山田孝雄, 佐藤政明, 宮崎伸吉, 嶋村鎮郎, 田口整司：川崎製鉄技報, 6(1974)1, p. 16
- 20) 西尾浩明, 有山達郎：鉄と鋼, 63(1977), S 440
- 21) K. ENGEL, S. MAYER and K. POLTHIER: Stahl u. Eisen, 93(1973), p. 1
- 22) 杉山 喬, 中村正和, 鶴野建夫, 原 行明：鉄と鋼, 62(1976), S 39
- 22) C. E. CAPES and A. E. MCILHINNEY: AIChE J., 14(1968), p. 917
- 24) 西尾浩明, 有山達郎：鉄と鋼, 64(1978)4, S 29