

© 1986 ISIJ

# 高炉内層頂部におけるコークス層崩れ現象の 装入物分布に及ぼす影響

.....  
論 文  
.....

奥野嘉雄\*・国友和也\*<sup>2</sup>・入田俊幸\*・松崎真六\*

## Influence of Coke Layer Collapse Phenomenon on Burden Distribution at the Top of Blast Furnace

Yoshio OKUNO, Kazuya KUNITOMO, Toshiyuki IRITA and Shinroku MATSUZAKI

### Synopsis :

The phenomenon of coke layer-collapse occurs when ore is dumped onto the inclined coke bed. The coke layer-collapse causes to change the distribution of ore and coke layer thickness in the radial direction. Therefore, the effects of charging condition and distribution of gas flow and burden descending velocity on the coke layer-collapse have been studied by using a reduced-size experimental apparatus in which the conditions of gas flow and burden descent have been simulated to those of actual furnace top.

The experimental results show that the magnitude of coke layer-collapse is mainly dominated by the charging mode, and the state of coke stacking in the central region after the collapse is also influenced by gas flow and descending velocity distribution. The changes in inclination angle of coke layer and coke movement accompanied by the collapse have been investigated. It is confirmed from these investigations, that the scale of coke layer-collapse depends on the stability of inclined coke layer. On the base of these findings, a mathematical model for quantitative evaluation of coke layer-collapse is developed by introducing the theory of soil mechanics. The calculated results by the model consist with experimental results for coke layer-collapse.

## 1. 結 言

最近の高炉は、後工程との直結化が進んでいるため、溶銑成分や生産速度を厳しく律する操業が要請されている。このような操業では、装入物降下やガス流れの安定を得ることが不可欠であるため、従来以上に装入物分布調整法が重要な炉内状況の制御手段となつてきている。

装入物の高炉内での堆積形態は、装入装置のみでは決らず、ガス流分布状況や鉱石装入時に生ずるコークス層崩れ現象によつても変化する。コークス層崩れが炉内においてかなりの規模で現れることは、既に模型実験や炉内調査によつても確かめられている<sup>1)2)</sup>。したがつて、堆積形態を精度よく把握するには、これらの因子による影響が明らかにされねばならない。堆積形態に及ぼすガス流の影響については既に研究報告もあるが<sup>3)</sup>、コークス層の崩れに伴う堆積形態の変化はいまだ定量的に検討されていない。そこで、炉上部条件に相似させた模型実験装置を用いて崩れの規模や崩れ後の堆積状況に及ぼす装入条件、ガス流分布および装入物降下速度分布の影響を調べた。その結果、コークス層崩れの発生状況は、鉱

石投入位置におけるコークス層傾斜面の安定性と密接に関係していることが確かめられた。さらに、この知見をもとに、コークス層の崩れ現象が土質力学の斜面安定理論によつて定量的に取扱いうることも明らかにされた。

## 2. 実 験 方 法

実験装置は、Fig. 1 に示すように、室蘭第1高炉の炉上部を縮尺 1/3 とした円筒形模型である。装入装置はベルレス式（旋回シュート型）であるが、組替えによりベル式に置きかえられる。実験装置にはガス流と装入物降下の条件を任意に与えることができる。装入物は4組のホッパー状排出口よりテーブルフィーダにて連続的に切り出される。実験用装入物の粒度は、コークス 5~30 mm、鉱石（焼結鉱）1~18 mm で、算術平均粒径はそれぞれ 18 mm, 6.7 mm である。ガス（空気）の流量は、高炉炉頂部ガスの温度と成分から求まるガス流量と装入物の平均供給粒径を用いて FROUDE 数を計算し、この値が実験装置においても同一になるように与えた。また、REYNOLDS 数は 660~1050 の範囲にあるので高炉と実験装置間のガス流れに関する相似条件を満足して

昭和 57 年 9 月・59 年 4 月大会講演大会にて発表 昭和 60 年 5 月 17 日受付 (Received May 17, 1985)

\* 新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 (Muroran R & D Lab., Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)製銑研究センター (Ironmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

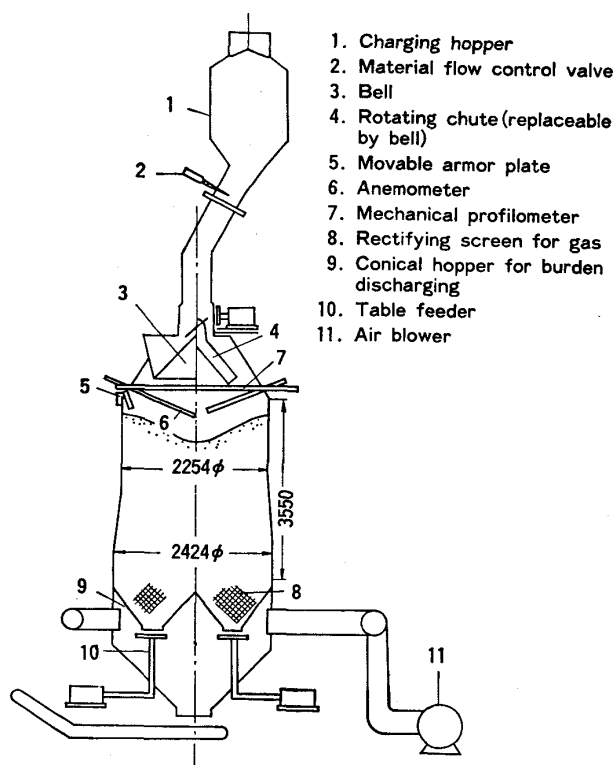


Fig. 1. Experimental apparatus.

いる。標準の装入条件は、コークス 345 kg/ch, Ore/Coke (鉱石とコークスの装入量比率, 以後 O/C と記す) 3.5, 装入レベル 870 mm (ベル閉位置より), 装入物降下速度 25 mm/min である。送風量 200 Nm<sup>3</sup>/min (空塔速度 0.84 Nm/s) である。装入物堆積面の形状は多点式検尺計により求め、鉱石装入後の鉱石とコークスの層境界面形状は両装入物の電気抵抗差を検知する層厚計により求めた<sup>4)</sup>。測定は炉径方向に 100 mm 間隔で行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 コークス層の崩れ状況

ここでいうコークス層崩れは、コークス層傾斜面上に鉱石が局所的に積載される過程で、鉱石堆積層下のコークス層が一部崩れて炉芯側に流れ込む現象をさす。したがって、可児ら<sup>5)</sup>のいう“流れ込み”現象とは異なる。崩れ現象によつて生ずる炉径方向のコークス層厚分布の変化を知るために、鉱石装入前後のコークスの分布を多点式検尺計と電気抵抗式層厚計によつて測定した。測定例を Fig. 2 a) に示す。崩れによつて混合層を含むコークス層は炉芯部で厚くなるので、鉱石の炉芯部への流入が抑えられている。この結果、鉱石とコークスの層厚比は大きな変化となつて現れる。なお、コークスが鉱石層表面上に装入された場合の鉱石層厚変化も測定した

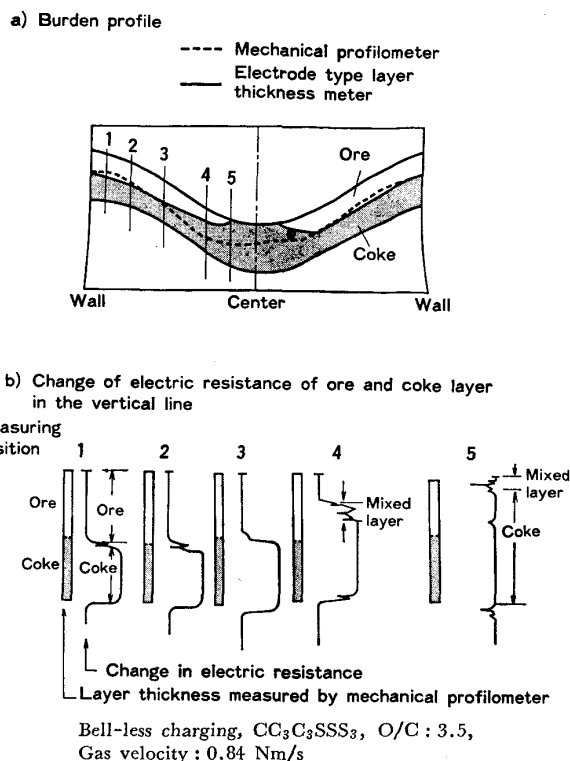


Fig. 2. Change in burden profile before and after the collapse of coke layer.

が、鉱石層の崩れは認められなかった。一方、層厚計で測定した装入物堆積層の高さ方向の電気抵抗値変化を Fig. 2 b) に示す。コークス層上に鉱石がくる境界面では電気抵抗値に変動が現れ、混合層の存在がコークス層内で認められた。混合層の厚さは、炉壁部と中間部で小さく、炉芯部近傍で局所的に大きくなっている。混合層に含まれる鉱石量は、堆積層をパラフィンで固める方法で調べた結果、約 15 vol% (混合層全体の平均値) であった。

つぎに、崩れの前後におけるコークス層傾斜面の変化を知るために、炉径方向 100 mm 間隔ごとに傾斜角を測定した。炉壁部のコークス装入領域や炉芯部のガス流の強い領域以外では傾斜角の変動は少ないので<sup>6)</sup>、Fig. 2 a) の測定点 2 と 4 の間で崩れ前後における傾斜角の平均値を求めた。その結果 Fig. 3 に示す。崩れ後の傾斜角は、崩れ前の値が装入条件によつて異なるにもかかわらず、28~32° を示した。なお、ガス流の有無による差異も調べたが、ガス流がある場合は若干低い値を示した。この変化は粒子間の摩擦力がガス流の力学的作用<sup>7)</sup>で軽減されるためと考えられる。

#### 3.2 装入条件のコークス層崩れへの影響

装入条件の影響をみるために、検尺計と層厚計で求めた堆積層厚から炉径方向の鉱石の層厚比分布 ( $L_o/(L_o + L_c)$ ),  $L_o$ ,  $L_c$ : 鉱石とコークスの層厚) を算出した。

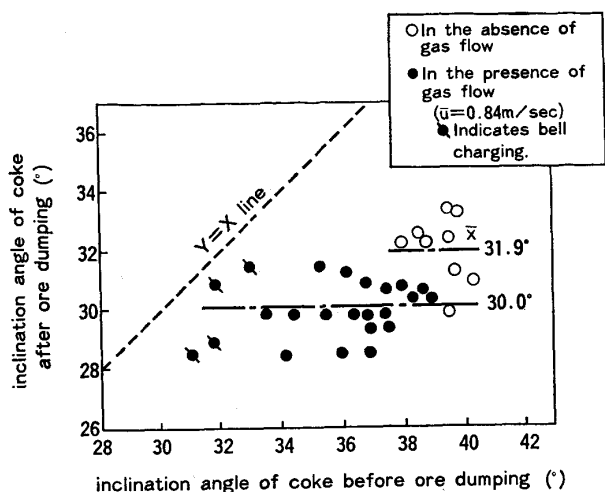


Fig. 3. Comparison of the mean inclination angle of coke layer in the intermediate region before and after ore dumping.

装入モードを変えた場合の層厚比分布を Fig. 4 に示す。両測定計で得た層厚比分布には差がみられるが、この差が大きいほど崩れの規模は大きいことを意味する。なお、層厚比分布を求める場合、混合層は単味のコークス崩れ層の一部と仮定したが、これは混合層中の鉄石量あまり多くなく、かつ、空隙率などの変化も小さいと考えたことによる。本図より明らかなように、崩れは鉄石とコークスをともに炉壁部に装入するモード† (CC<sub>3</sub>C<sub>3</sub>SSS<sub>3</sub>) で多く、炉壁部で平坦な形状をつくる装入モード (CC<sub>23</sub>C<sub>456</sub>SSS<sub>345678</sub>) で少なくなっている。これは崩れの規模が鉄石の着地領域下のコークス層傾斜面角度によつて異なることを示唆している。なお、O/C を変えた場合の崩れ状況も調べたが、O/C が 2 のような低い値の場合でもみられた。これは、鉄石の全装入量が小さい場合でも、ある鉄石積載量に達すると崩れ始めるためであると推測される。

崩れによるコークスの移動量は崩れを生ずる前後のコークス層厚差から求められる。Fig. 5 に炉半径方向の移動量分布を示す。崩れが生ずる領域は鉄石の装入位置によつて異なるが、移動量が中間部付近を境に炉壁側で減少して炉芯側で増加する状況は装入モードや装入位置が異なつても同じである。コークス移動量を炉半径方向で積算して求まる崩れ量は主に装入モードに依存しており、コークス全装入量の 4~16 wt% の範囲で変化した。装入モードによる崩れ量の変化を Fig. 6 に示す。崩れ量は V 形状のコークス傾斜面をつくる装入モードの

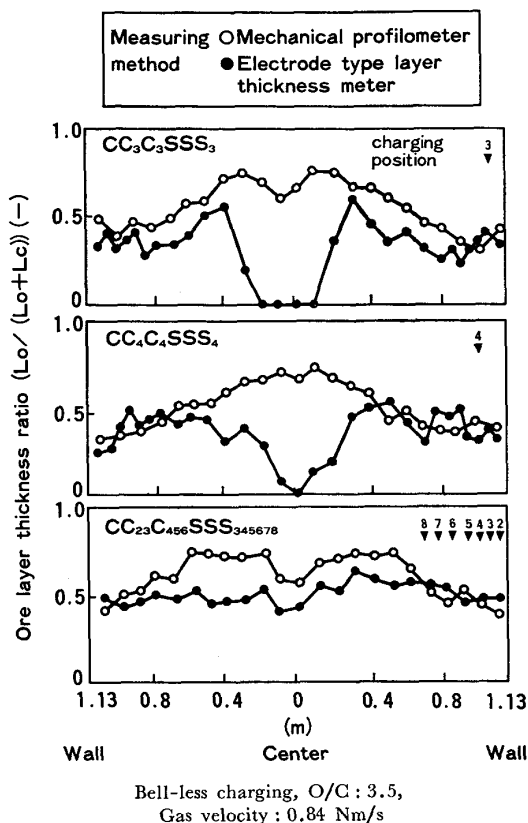
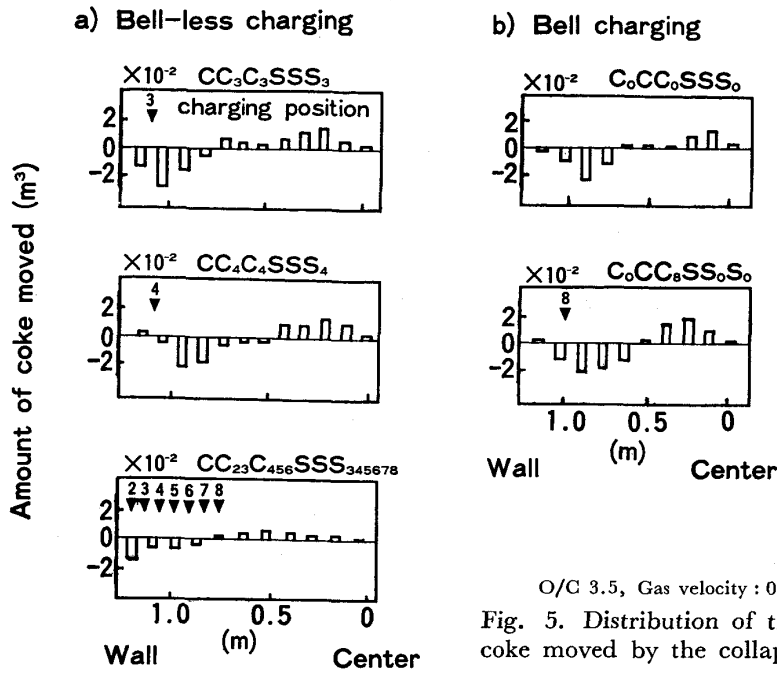


Fig. 4. Influence of charging mode on distribution of ore layer thickness ratio.

場合に大きくなる。図中、CC<sub>2</sub>SS<sub>2</sub> にくらべ CC<sub>1</sub>C<sub>1</sub>SS<sub>1</sub> の崩れ量が小さいが、これは装入物の炉壁面への衝突位置が高いことにより炉壁側近で緩やかな傾斜面をつくるためと考えられる。また、O/C が高い場合には崩れ量は増加するが、O/C が 3.5 から 4.0 になると増加がみられなくなった。これは、崩れによつてコークス層傾斜面が安定な状態になるのでこの傾斜面上に多くの鉄石をさらに装入して積載荷重力を増しても崩れがあまり進まないためと考えられる。一方、崩れ量をベルレス式とベル式の装入法について比較したが、両者には明確な差が認められなかつた。これは梶原ら<sup>2)</sup>が報告するようにコークス層表面が受ける鉄石の装入エネルギーに大きな差がないためであろう。

崩れの発生過程を知るために、ビデオカメラで鉄石の堆積状況を観察した。ベル式、ベルレス式の装入法ともに鉄石の着地領域のコークス層表面は崩れる前に鉄石によつて被われてしまい、装入鉄石の直撃を受けて崩れる状況はみられなかつた。崩れに対する衝撃力の影響を知るために、ベル式装入について鉄石の装入レベルと供給速度を変えて崩れ量を調べた。得られた衝撃力(坂根ら<sup>3)</sup>の式による表示値)と崩れ量との関係を Fig. 7 に示す。崩れ量が衝撃力によつて大きく変化する状況はみ

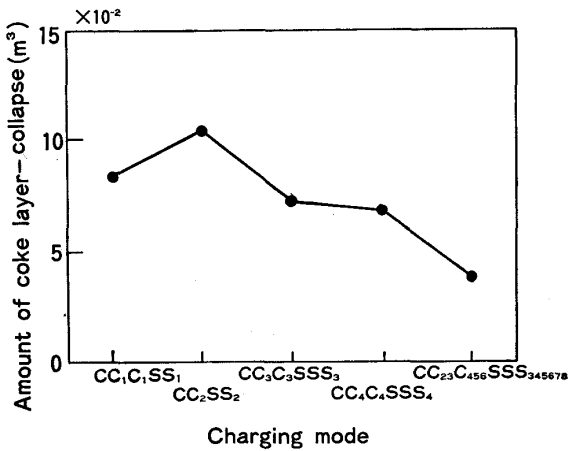
† 装入モード内の数字は分布調整装置の設定位置を示す番号で、値が小さいほど原料は炉壁近傍に装入される。C、S はコークスと鉄石の炉頂ホッパーへの装入単位量を現わす。例えば CC<sub>3</sub> は 2 単位のコークス量が同じホッパーに供給され、3 番目のシュート傾動位置で炉内に装入されることを示す。



O/C 3.5, Gas velocity : 0.84 Nm/s  
 Fig. 5. Distribution of the amount of coke moved by the collapse.

られない。したがって、崩れ現象は衝撃力そのものよりもコークス層表面上に積載される鉱石の荷重力とコーク

ス層がもつ抵抗力（粒子間の摩擦力など）との間の静的な力関係にほぼ依存すると判断される。

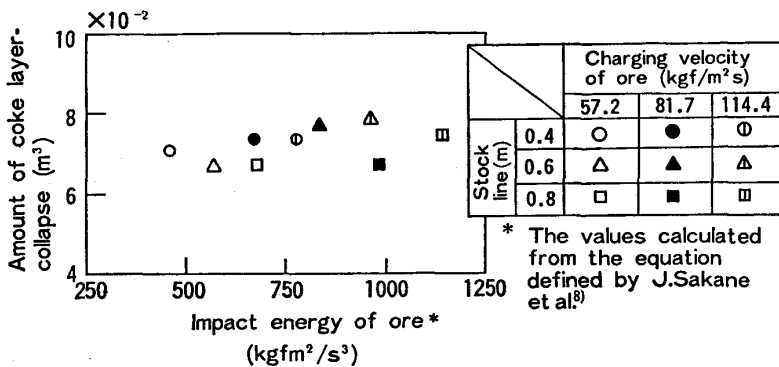


Bell-less charging, O/C : 3.5,  
 Gas velocity : 0.84 Nm/s

Fig. 6. Relation between charging mode and amount of coke layer-collapse.

3.3 ガス流のコークス層崩れへの影響

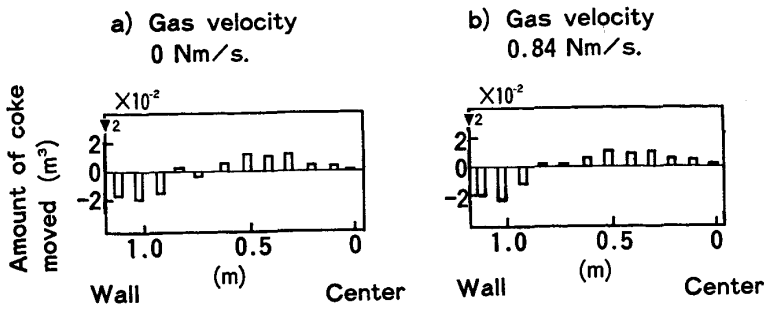
ガス流の有無およびガス流量を変えて崩れ状況の差異を調べた。崩れは、Fig. 8 に示すように、ガス流の有無によらず認められる。しかし、ガス流下のコークス移動量分布の変化は装入モードの場合ほど大きくみられない。したがって、ガス流量が異なっても崩れ量自体の変化も少ない。なお、ガス流量が増すと炉芯部の鉱石層厚比の低下範囲が大きくなるが、これは炉芯部に流れ込んだコークスが強い中心ガス流によつて平坦な堆積物をつくるとともに層膨脹を起して鉱石の流入を妨げるためであろう<sup>9)</sup>。そこで、強い中心ガス流が広い範囲で生ずる装入条件（例えば、低い O/C など）を選べば、崩れ量が増加しない状態でもコークスのみで占められる領域が炉芯部で広く現れることになる。



\* The values calculated from the equation defined by J.Sakane et al.<sup>9)</sup>

Bell charging, CC₀SS₀, O/C : 3.5,  
 Gas velocity : 0.84 Nm/s

Fig. 7. Relation between impact energy of ore and amount of coke layer-collapse.



Bell-less charging, CC<sub>2</sub>S<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, O/C: 3.5

Fig. 8. Influence of gas flow on distribution of the amount of coke moved.

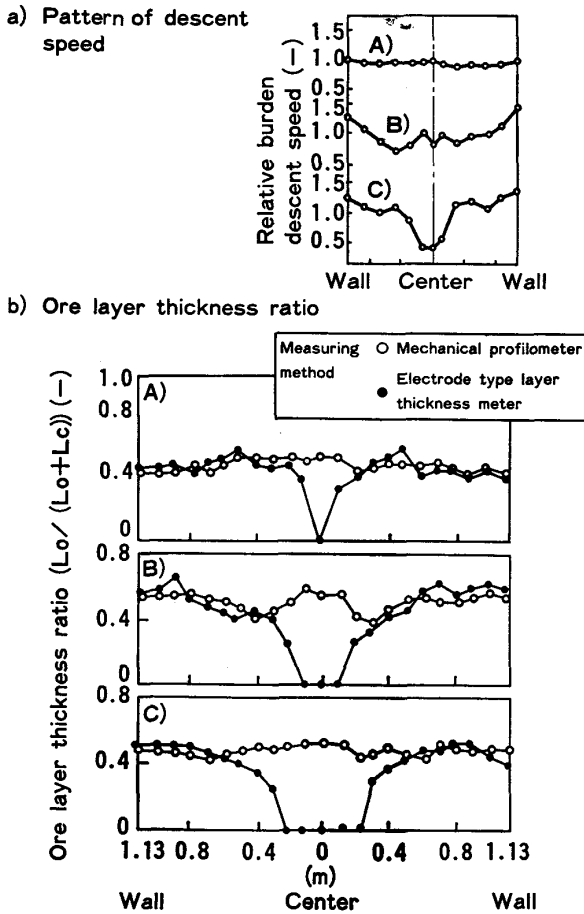


Fig. 9. Influence of distribution of burden descent speed on distribution of ore layer thickness ratio.

3.4 装入物降下速度分布とコークス層崩れ

炉頂部の装入物層表面が降下する速度は一般に炉壁部で大きく、炉芯部で小さい値を示すが、両位置の速度差は操業条件（送風量や装入 O/C など）が異なると変化することがプロフィルメータの測定により確かめられている<sup>9)10)</sup>。そこで、降下速度分布の影響を Fig. 1 の実験装置により調べた。すなわち、本装置において、炉径方向の降下速度分布を意図的に 3 種類与えてコークス層の崩れ状況を調べた。与えた速度分布と、その分布下で

得られる鉱石層厚比分布を Fig. 9 に示す。炉芯部の降下速度が小さくなるとコークスのみで占められる領域（すなわち、鉱石層厚比が 0 となる領域）が炉芯部で広がってくる。コークスのみの領域が現われるのは、1 チャージの装入物降下距離が小さい炉芯部ではこの降下距離によつて決まる堆積層高さの範囲を崩れたコークスですべてうめられてしまうためである。したがつて、鉱石の炉芯部への流入はさらに妨げられることになる。このことは、同じ装入条件でも降下速度分布が異なると鉱石層厚比分布も変化することを意味している。なお、崩れ量は、Fig. 9 a) の C) のように、炉壁部と中間部の速度差が小さい場合にはこの領域のコークス層傾斜面角度の低下があまりないので、本図 A) の場合とほぼ同じ値を示した。しかし、本図 B) の場合にはコークス層傾斜面角度の低下があるので、崩れ量は本図 A) の場合より約 13% 低い値を示した。

4. 考 察

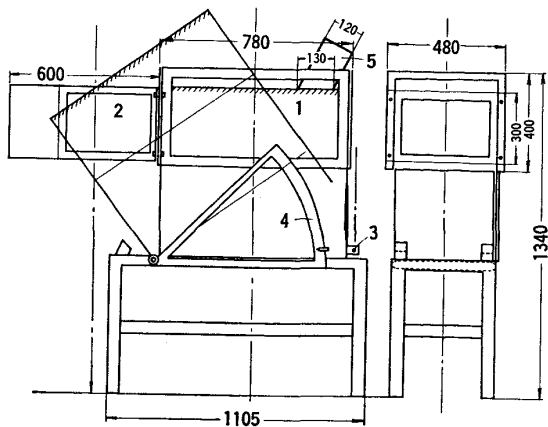
4.1 コークス層の崩れと傾斜面角度

角度  $\theta$  を示すコークス層傾斜面が安定を保つためには、コークスの内部摩擦角  $\phi$  と  $\theta$  との間で次の関係が満足されねばならない<sup>11)</sup>。この関係は、また、コークス層の傾斜面角度が内部摩擦角に相当する値にまで減少すれば、崩れがとまる応力状態にあることを意味している。

$$\tan \theta \leq \tan \phi \dots \dots \dots (1)$$

したがつて、崩れ後の炉中間部の傾斜角が装入条件とは無関係に 28~32° の範囲の値を示したことは、この値がほぼ内部摩擦角に相当する角度であると考えられる。なお、稲葉ら<sup>9)</sup>も装入条件によらずコークス傾斜角安定時の傾斜角が 31.7° の値を示すと報告しており、上記の値の妥当性が伺える。

一方、模型実験では、崩れの規模が鉱石の着地領域下のコークス層傾斜面形状によつて変化することが観測された。そこで、崩れに対する傾斜面角度の影響を考察するために Fig. 10 に示す実験装置を作成した。本装置はコークス（粒径 5~15 mm）を充填した容器からな



1. Vessel filled with coke particles
2. Vessel for recovering the coke which has collapsed
3. Hanger for vessel hoisting
4. Scale for measuring the angle of inclination
5. External load

Fig. 10. Apparatus for measuring the angle at which the coke bed starts to collapse.

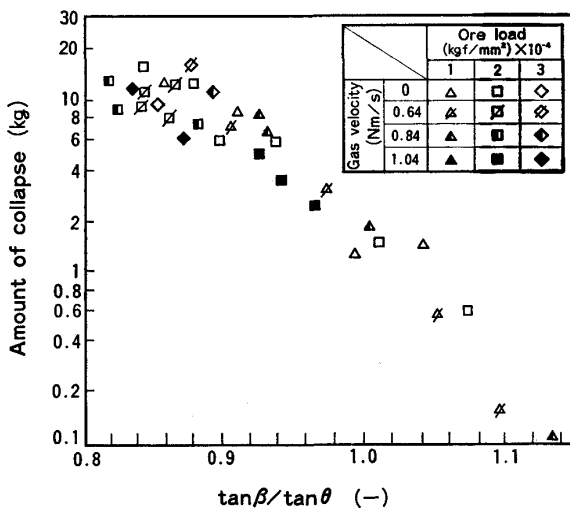


Fig. 11. Relation between  $\tan \beta / \tan \theta$  and the amount of collapse of coke bed.

り、容器の右端を吊り上げることにより容器内のコークス層傾斜角度を任意に設定できる。容器底面からは均一に整流した空気を流す。本装置により崩れ開始時の角度と崩れ量を測定した。崩れ開始角度は荷重物（コークス粒を床敷として金属球をつめたもの）をコークス層表面の右端に置いたのち容器を傾動させて測定した。また、崩れ量は任意に設定したコークス層傾斜面上に焼結鉱（粒径 1~18 mm）を装入シュート（傾斜面とシュート先端間隔 100 mm）より上記の荷重物の場合と同じ領域に静かに流入させることにより求めた。崩れ量は回収用容器に流れ込むコークス量を秤量して得た。

崩れ開始角度は荷重量、ガス流速の増加とともに低下した。この測定値から推定した焼結鉱積載時の崩れ開

始角度 ( $\beta$ ) と同積載時に設定したコークス層傾斜角度 ( $\theta$ ) について正接比 ( $\tan \beta / \tan \theta$ , すなわち、斜面の安定性を示す指標<sup>11)</sup>) を求め、崩れ量との関係を調べた。

結果を Fig. 11 に示すが、崩れ量はコークス層傾斜面の安定性にはほぼ依存する関係にあることがわかる。本図で正接比が 1 以上でも崩れが少量みられるが、これは焼結鉱のコークス層表面への均等装入が不十分なために生じた誤差と考えられる。なお、3.3 の検討でガス流の崩れ量への影響があまりみられなかつたが、これはガス流量の増加に伴い炉内ではコークス層の傾斜角も低下するので上記の正接比に大きな変化が生じないことによるものと考えられる。

#### 4.2 崩れの形態と傾斜面の安定性

4.1 の検討から、コークス層の崩れは、同層の傾斜面上に積載された鉱石の荷重によりコークス層内に剪断破壊を起すすべり面が生じ、これが炉芯部に向かって内部摩擦角に相当する角度で移動する現象であると考えられる。Fig. 12 にその概要を模式的に示す。この現象には土質力学の斜面安定理論が応用できるとして、その理論をもとに定量的な取扱いを試みた。すべり面の形状は厳密には円弧ではないが、計算を容易にするために円弧や円弧と平面の複合したものとして取り扱う。

Fig. 12 に示すような円弧状のすべり面を決定するには、円弧の中心と半径があらかじめ与えられねばならない。円弧は幾通りにも描けるが、崩れを生ずる場合の円弧はある積載荷重下でのコークス層傾斜面の安全率が最小となる条件を満足する必要がある。安全率は、コークス層を炉半径方向で同心円状に  $n$  個のスライスに分割して、 $i$  番目のスライスについて崩れを起す滑動モーメントとそれに抵抗するモーメントを計算することによって得られる<sup>12)</sup>。安全率  $F$  は(2)式で示される。

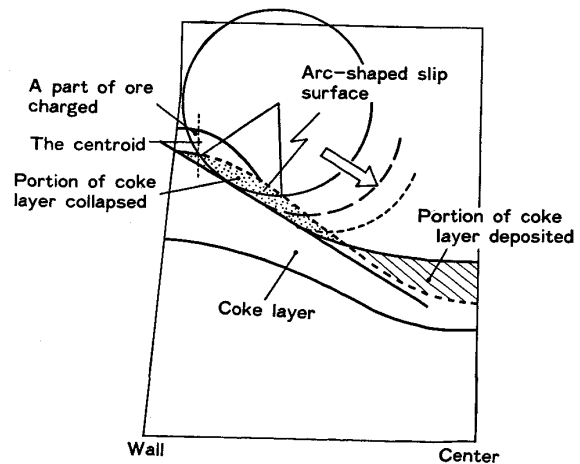


Fig. 12. Schematic diagram for the collapse of coke bed.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n R \{W_i \cdot \cos \alpha_i - \Delta P_i \cdot \cos (\alpha_i - \phi_i)\} \tan \phi}{\sum_{i=1}^n R \{W_i \cdot \sin \alpha_i - \Delta P_i \cdot \sin (\alpha_i - \phi_i)\}} \dots\dots\dots (2)$$

R: 円弧の半径 (mm), W: 鉛直方向の荷重力 (kgf/mm<sup>2</sup>), ΔP: ガス抗力 (kgf/mm<sup>2</sup>), α: コークス層内のすべり面角度 (°), φ: ガス流線と鉛直線のなす角度 (°), φ: コークスの内部摩擦角 (°)

安全率が最小となる円弧を得る方法として, コークス層傾斜面上の領域に格子状に交わる直線を引き, その線の各交点を原点とする多くの円弧について安全率を計算し, そのなかより安全率が最小となる円弧をみいだす手法を用いた. なお, 円弧は積載荷重物の重心を通る鉛直線とコークス層表面との交点を必ず横切るものとして計算した. 計算例を Fig. 13 に示す. 本図では等安全率分布を示すが, 荷重物を局所的にコークス層表面上に置いた場合には最小安全率を示す円弧の中心が存在する. これは最も崩れやすい円弧が存在することを意味している. なお, 荷重物がない場合は, コークス層表面に平行な等安全率ラインが現れ, 最小安全率を示す原点は得られない. これは局所的な崩れが起きないことを意味している.

最小安全率はいずれの大きさの荷重物を積載しても求められる. しかし, 荷重量を増す途上で実際に崩れが起る時の最小安全率 (限界安全率と呼ぶ) は不明である. この安全率は理論的には1であるが, 実際に崩れが観測される時の値は必ずしも1とはならない<sup>13)</sup>. Fig.

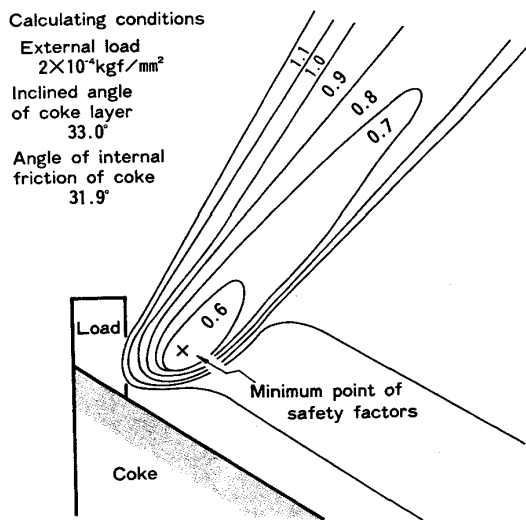


Fig. 13. Distribution of safety factors for the slope of coke bed.

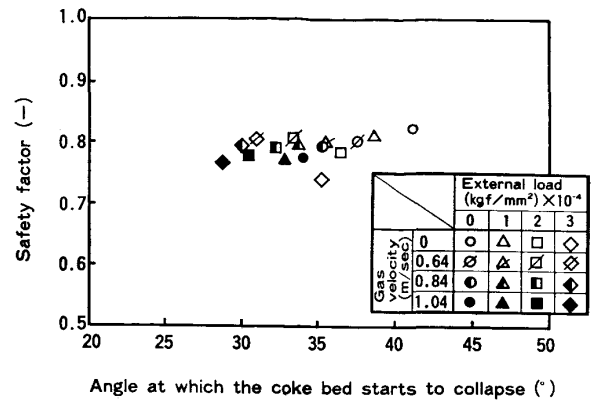


Fig. 14. Relation between critical safety factor and the angle at which the coke bed starts to collapse.

10 の実験装置で測定した各荷重量下の崩れ開始角度を用いて安全率を(2)式により計算した. なお, 計算に必要な内部摩擦角は Fig. 10 の装置による実験値から推算した値を用いた<sup>14)</sup>. 計算結果を Fig. 14 に示す. 得られた安全率は, 崩れが始まる時の値であるため, 限界安全率とみなすことができる. 本図より, この安全率は荷重量やガス流速が変化してもほぼ一定の値となることが確かめられた. このことは, コークス層崩れ現象が土質力学の斜面安定理論により取扱いうることを示すものである.

4.3 崩れ現象のモデリング

Fig. 12 に示す考え方により崩れ現象を数学的に取り扱うモデルを作成した. モデルの構成を Fig. 15 に示す. 本モデルでは, 一回の鉱石装入量を小分割して得ら

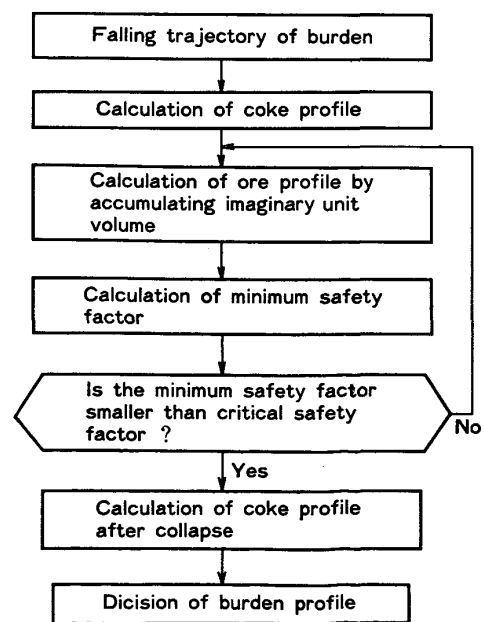


Fig. 15. Calculation procedure of burden profile after the collapse of coke layer.

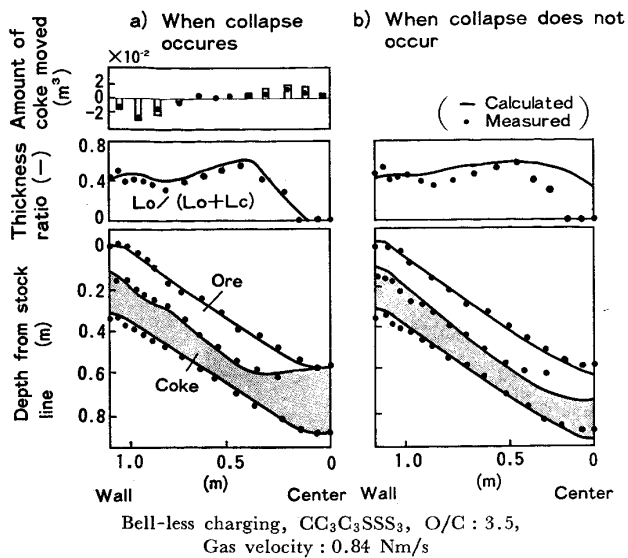


Fig. 16. Burden distribution predicted by the mathematical model.

れる仮定の単位量をコークス層傾斜面上に積みあげるとともに、積みあがる過程でその都度最小安全率を計算し、その値が限界安全率より小さくなる時に崩れが生ずるものとした。計算結果を Fig. 16 に示す。本図 a) は崩れを考慮した場合、b) は考慮しない場合である。a) の計算で崩れはコークスのみで混合層形成はないものとした。a) の場合には、コークスの移動量分布も示すが、その分布状況は Fig. 4 の同一装入条件の実験値と類似している。また、この分布から求まる崩れ量は実験値で  $7.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 、計算値で  $6.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  となり、計算誤差は 5.6% にとどまった。したがって、本モデルは崩れ現象をかなりの精度で説明できるものであることが確かめられた。

## 5. 結 言

炉頂部の装入物堆積形態に影響するコークス層の崩れ現象について、模型実験装置を用いて調査するとともに土質力学の面から考察を試み、以下の知見を得た。

(1) 鉱石装入により、炉内に堆積しているコークスの表層部に崩れが生ずる。崩れにより、コークス層の傾

斜面はほぼ内部摩擦角に相当する角度まで低下し、土質力学的に安定な応力状態に達するものと考えられる。

(2) 崩れの規模は主にコークス層傾斜面の形状を左右する装入モードにより異なり、その量はコークス全装入量の 4~16 wt% の範囲で変化する。崩れの発生は装入鉱石の衝撃力よりもコークス層表面での鉱石の積載荷重力によるものと判断される。

(3) 崩れ後のコークス層の積載状況はガス流速や装入物降下速度の炉径方向での分布によつて変化する。

(4) 崩れは、コークス層傾斜面上に積載された鉱石の荷重によつてコークス層内部にすべり面が生じ、これがコークスの内部摩擦角に従つて低い位置に移動する現象であると考え、これを数式モデルとして組み立てた。この数式モデルにより、実験における崩れ現象の特徴をよく説明しうる計算結果が得られた。

## 文 献

- 1) 研野雄二, 楯岡正毅, 安倍 勲, 久米正一, 天野繁: 製鉄研究 (1976) 288, p. 54
- 2) 梶原義雅, 神保高生, 上申忠嗣, 網永洋一, 稲田隆信: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 175
- 3) 稲葉晋一, 西尾浩明: 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会中間報告) (1979), p. 44 [日本鉄鋼協会]
- 4) 日本特許, No. 1152592 (1983)
- 5) 可児 明, 西村博文, 瀬川佑二郎, 小播吳志, 才野光男, 山田孝雄: 鉄と鋼, 67 (1981), S 710
- 6) 磯山 正, 入田俊幸, 奥野嘉雄, 松岡 宏: 鉄と鋼, 67 (1981), S 700
- 7) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼: 66 (1980), p. 1878
- 8) 坂根淳一, 仁木隆司, 国友和也, 松井正昭: 鉄と鋼, 70 (1984), S 44
- 9) 神坂栄治, 奥野嘉雄, 入田俊幸, 松崎真六, 磯山正, 南外 孝: 鉄と鋼, 69 (1983), S 728
- 10) 小菅暲一, 三沢順治, 原藤正一, 内田雅敏, 竹下博喜: 鉄と鋼, 67 (1981), S 711
- 11) 土質工学会: 土質工学ハンドブック (1975), p. 214 [技報堂]
- 12) 河上房義: 土質力学演習 (基礎編) (1980), p. 163 [森北出版]
- 13) 土木学会: 土木工学ハンドブック (1975), p. 332 [技報堂]
- 14) 神坂栄治, 奥野嘉雄, 入田俊幸, 松崎真六: 学振 54委-No. 1668 (昭和 58 年 11 月)