

高炉の装入物分布形成過程に関する解析

西尾 浩明*・有山 達郎*

Analysis on Formation Processes of Burden Distribution in Blast Furnace

Hiroaki NISHIO and Tatsuro ARIYAMA

Synopsis :

Burden distribution in blast furnace is formed through the following four processes :

(1) Burden descends by the gravitational force in the large bell hopper, (2) is discharged from this hopper followed by falling onto the burden bed, (3) moves toward the furnace center to form the slope, and (4) changes the angle of the slope with its descent, becoming a base for next charge.

The processes (1), (2), and (4) have been studied by experiments and theoretical calculations. The main results obtained are as follows :

(1) Burden descent in the large bell hopper is characterized by such a flow pattern that burden descends predominantly in the wall side region of hopper, resulting in the burden mixing and therefore affecting the burden distribution.

(2) The flow rate of burden from the large bell hopper is proportional to time to the 1.5th power after the discharge begun.

(3) The surface angle of burden charged decreases with the burden descent. This behaviour will be explained by such a theory that the burden has a uniform descending velocity over the horizontal section of shaft.

1. 結 言

高炉の装入物分布は操業成績を支配するもつとも重要な因子の一つである。このため、高炉技術者は操業経験と高炉の解体調査結果等から得られた炉内現象に関する知見を組み合わせるることによつて、より良い装入物分布を模索する一方、模型による装入物分布形成実験を実施して、装入物分布と各種因子の関係の把握に努めてきた^{1)~10)}。

装入物分布形成過程を追うと、(1)大ベル上に堆積した装入物が大ベルの降下によつてホッパー内を重力降下する過程、(2)大ベルホッパーからの流出と、それに続く装入物の炉壁近傍表面へ直接あるいはムーバブルアーマーとの衝突を経て落下する過程、(3)炉周辺より炉中心へ向かつて移動して傾斜面を形成する過程、および(4)装入物の降下運動によつて表面形状が変化して次の装入のベースとなる過程に分けられる。この4つの過程の特性が、鉱石とコークスの層厚分布、粒径分布、混合層の分布によつて特徴づけられる装入物分布を決定する。

上に述べた第1の過程は、基本的にはホッパー内の重力流動である。通常のホッパー型式、例えばコーン型ホ

ッパー内の粒子のフローパターンおよびかかるホッパーからの流出特性に関する研究は数多くあるが¹¹⁾、高炉で使用されるベル型ホッパーに関する同種の研究はほとんどない。

第2の過程は質点の自由落下として解析されている。この理論式の精度は初速度すなわち大ベル端を離れるときの粒子の速度の推定方法によつて異なる。G. HEYNERT²⁾らは、重心位置よりベル面上を粒子が滑走するとして初速度を求めた。この方法は現実との対応が明確でないため大ベル降下に伴う落下軌跡の変化を与えることができないばかりでなく、実測値を説明できない⁹⁾。G. S. ZOZULYA¹²⁾は、ホッパーからの粒子の流出量に関する半経験式を組み入れて初速度を推定した。このモデルはホッパーとしてのベルの特性を取り込んでいるので説得力があるが、半経験式によつているため、条件によつては不合理な結果を与える。

第3の過程には多数の模型実験により検討が加えられ、現象はかなり明確になつている^{1)~10)}。著者らも先に、実炉との相似性に留意した実物大模型により実験し装入物分布制御の方法を提案した¹⁰⁾。

第4の過程に関しては、実炉において表面形状の経時変化を求めた結果は必ずしも一致していない¹³⁾¹⁴⁾。また、

昭和54年10月本会講演大会にて発表 昭和57年3月15日受付 (Received Mar. 15, 1982)

* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

解体調査結果^{15)~20)}は装入物の降下に伴って傾斜角が低下する点ではほぼ一致している。一方、この過程の理論的説明は全く手がつけられていない。

そこでこの研究では、上記の装入物分布形成過程を支配する4つの過程のうち、説明の不十分な第1、第2、第4の各過程に検討を加えモデル化を行い、実物大模型実験の結果との比較を併用して有用な知見を見出したので報告する。

2. 大ベルホッパーの装入物の降下挙動と混合特性

2.1 大ベルホッパー内の装入物のフローパターン

2次元の縮尺1/10の小型模型を使用し、大ベルと固定壁から構成されている大ベルホッパー内の装入物のフローパターンの観察を35mmカメラによる連続撮影により行つた。このフローパターンの観察結果をPhoto. 1に示す。

その結果によると、大ベル降下による粒子流出の開始によつて、まず大ベル下部上に固定壁に沿つて粒子の移動帯が形成され、その部分の粒子が優先的に降下する。そして表面に窪みを生じ、その表面の傾斜が安息角以上になると大ベル側より表層粒子が崩れ、この窪みに供給され、大ベル上での装入物の降下が進行する。流出末期に近づいて初めて大ベルに接している粒子全体にすべりが生じ、大ベルから流出していく。すなわち、大ベルホッパー内における装入物の降下は固定壁側、大ベル側上部、大ベル側下部の順に起こる。

2.2 流出に伴う装入物混合割合変化と装入物分布

上述のような大ベルホッパー内の降下挙動により、大ベル上での装入物は単純に下層から流出せず、上層と下層の粒子の混合を引き起こし、例えば焼結鉱とペレットのように炉内傾斜角、通気性の異なる装入物を併用して



Photo. 1. Flow pattern of burden on large bell in 1/10 scale model.

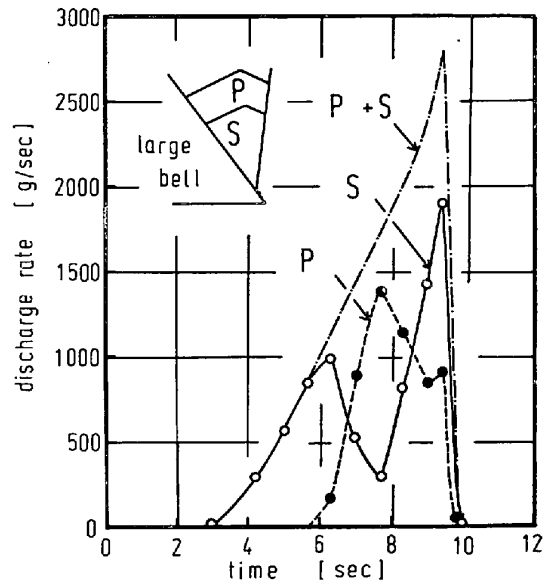


Fig. 1. Change of discharge rate of burden during large bell descending, resulting from 1/10 scale model experiments.

用いる場合、その流出時の混合割合変化は装入物分布制御上、重要となる。

この現象を明確にするため、まず大ベル上で異なる装入物を上層、下層に配置した場合、大ベルから流出時の装入物混合割合変化を上記の小型模型で実測した。粒子として1~5mmの焼結鉱、1~3mmのミニペレットを用い、大ベルから流出した粒子を小型ベルトコンベアに連続的に受け、流出終了後ベルト上の粒子を各粒子ごとに選り分けることにより混合割合を測定した。Fig. 1にSP↓、すなわち大ベル下層に焼結鉱S、上層にミニペレットPを配置して大ベルより流出させた場合の実験結果を示す。下層の焼結鉱の流出量は流出開始直後に一度ピークを示し、減少後再び増加する。そして装入物中に焼結鉱の占める割合も流出開始直後の100%から、一度減少し再び増加する。これは大ベルホッパー内のフローパターンの観察結果からわかるように、大ベルに接している焼結鉱が最後に流出するためである。したがって炉内の装入物分布はこのような装入物の混合割合の経時変化に当然影響され、大ベル上での装入物の配合順によつて変化することが予想される。

そこで次に実際に福山5BFの実物大模型¹⁰⁾を使用して、CC↓SP↓、CC↓PS↓の二つの装入方法を実施し形成された装入物分布を比較した。Sは焼結鉱100%、Pはペレット60%、塊鉱40%の混合である。得られた装入物分布をFig. 2に示す。まずCC↓SP↓の場合、鉱石層下部層と上層にSが多く分布し、中層にはペレットと塊鉱の混合物からなるPが多く存在する。この

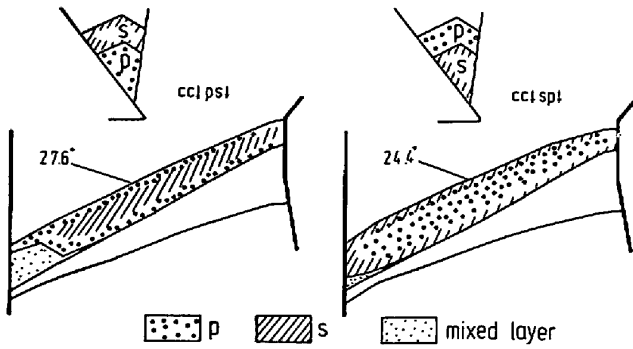


Fig. 2. Burden distribution for different charging methods in full scale model.

鉱石層内の分布状況は Fig. 1 の小型模型による粒子流出量の経時変化に対応する。すなわち流出初期と末期に多い S が下層，上層に配置される。また特徴的なこととして傾斜角は 24.4 度と二分されて装入される S よりも，大ベル開後中期にまとまって流出し，鉱石層中層に厚く存在する P の影響を強く受ける。逆に CC↓PS↓の装入の場合には，これと対照的な鉱石層内の分布となり，P は鉱石層下層と上層に分散し，その性質は薄められ傾斜角には中層に厚く存在する S の性質が支配的となる。

以上のように大ベル上での鉱石の配合順はペレットを用いる場合など炉内の装入物分布を制御する手段ともなり，この特性を十分に知っておくことで分布制御を効果的に行える。

3. 大ベルからの流出量と落下軌跡

上記の小型模型で大ベルホッパー開口部付近の粒子の運動を 16 mm 高速度カメラで観察したところ，大ベル降下後，ある一定時間は粒子はほとんど流出せず，流出が開始すると固定壁下端付近に固定壁と大ベルとをほぼ水平方向に結ぶ動的アーチが形成される。この動的アーチより上方の層内では粒子は互いに拘束された動きを示し，アーチを通過すると粒子は拘束から解放され急速に加速されて自由落下していく。その後，大ベルに衝突し滑走し落下していく。また大ベルの降下に伴い，流出する装入物は急増し，落下軌跡も大ベルの降下位置に対応した変化を見せ，飛距離も増加していく。

以上の観察結果より，精度の高い分布制御の観点から，粒子の落下軌跡は大ベルの降下を考慮して表現し，同時に各瞬間の軌跡に対応して大ベルからの流出量を把握する必要がある。

3.1 装入物の流出量

観察結果より，大ベル降下開始直後は装入物はほとんど流出しない。大ベルと固定壁間の水平方向距離が平均

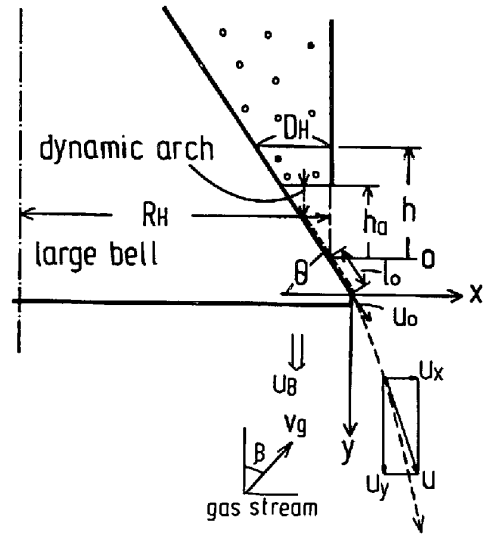


Fig. 3. Sketch including parameters used for analysis.

粒子径のはぼ 4 倍になつて流出が本格化する。すなわち，大ベル降下開始後，流出開始時間を τ_1 とすると

$$kD_p = u_B \tau_1 / \tan \theta \dots\dots\dots (1)$$

の関係が得られ， k は実験的にはぼ 4 となる。

次に流出量変化を解析するために，Fig. 3 のように座標を取ると，粒子の存在する任意の高さ h で単位体積当たりの粒子層の持つ全エネルギー T は次式で表される。

$$T = \frac{1}{2} \rho_b v_p^2 + \rho_b g h \dots\dots\dots (2)$$

ここで ρ_b は一定とし，高さ h における粒子の質量流量を F ，その位置での粒子の有効通過面積を S_0 とする。この S_0 は壁の影響を考慮し，(1) 式で示される距離 kD_p の 1/2 相当分両側の壁より通過部分は縮小されるとし，また垂直に近いホッパー壁の傾斜は無視し，固定されたホッパー壁を基準に開口部近傍において次式で近似する。

$$S_0 = 2\pi R_H (D_H - kD_p) \dots\dots\dots (3)$$

粒子の降下速度 $v_p = F/S_0 \cdot \rho_b$ で， $D_H = h/\tan \theta$ となるから (2) (3) 式より高さ h における T は

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{F^2}{4\pi^2 R_H^2 \rho_b (h/\tan \theta - kD_p)^2} + \rho_b g h \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここでベルの降下速度は粒子の移動速度に比較して小さいため逐次定常の扱いをし，粒子の運動について Brown の最小エネルギー理論を適用し，粒子の持つエネルギーは粒子間の衝突，回転，摩擦によつて失われ，動的アーチの形成されている位置 $h = h_a$ にて最小，すなわち

$$(dT/dh)_{h=h_a} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

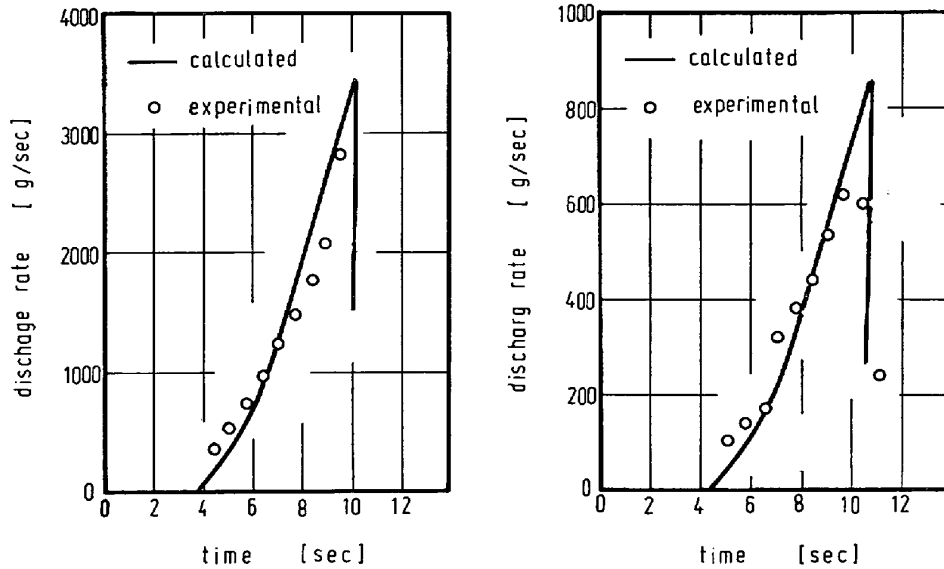


Fig. 4. Comparison between calculated curves from eq. (6) and measured values in 1/10 scale model.

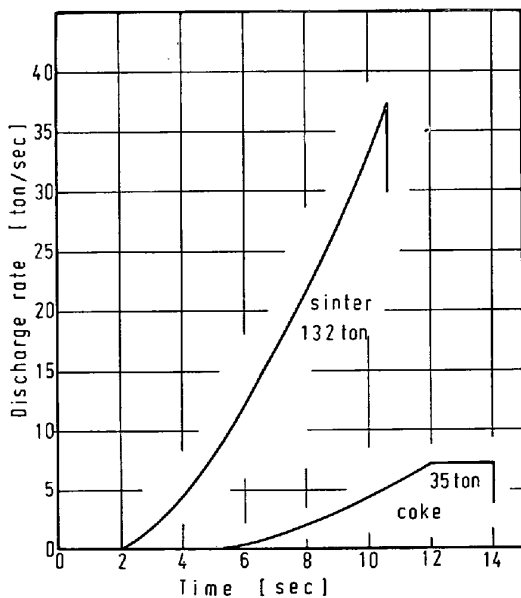


Fig. 5. Calculated discharge rate during large bell descending under conditions of Fukuyama No. 5 BF. (bell stroke : 0.7 m, bell angle : 53°, descending time : 12 s)

になるものとする²⁾。以上の(4)(5)式より大ベルからの流出量 F は、大ベル降下開始 τ 秒後、 $h_a = u_B \tau$ であるから

$$F = 2\pi R_H \rho_b g^{1/2} \tan^{1/2} \theta (u_B \tau / \tan \theta - k D_p)^{3/2} \dots (6)$$

ただし $\tau \geq \tau_i$

と表される。

この(6)式の有効性を確認するため、前述の小型模型で 1~5 mm の焼結鉄、3~10 mm のコークスを用い、流出する粒子をやはり小型ベルトコンベアに受け流出量変化を実測した。この測定結果を Fig. 4 に示すが、

(6)式を用いて計算した結果と良く合う。

次に福山 5 BF の条件で大ベル降下に伴う流出量の変化を計算した結果を Fig. 5 に示すが、装入物が流出を開始すると(6)式からわかるように流出開始後の経過時間の 1.5 乗に比例して急激に流出量は増加する。コークスでは大ベル降下終了後も流出が完了しないので、最後の数秒間は流出量一定となる。

3.2 装入物の落下軌跡

緒言で述べたように、大ベルを離れる時の粒子速度の推定が重要である。本研究では小型模型での観察結果に基づき、自由落下運動の起点を動的アーチの位置にあるとし、この落下運動の初速度となる動的アーチ通過時の速度を(6)式の流出量より求めた粒子移動速度として与えた。そして粒子の流れの主流線を動的アーチの中心に取り、Fig. 3 に示したように、ここから落下しベル面を滑走した後、さらに自由落下するとした。したがって大ベル降下開始 τ 秒後の大ベル先端を離れる時の代表速度 v_0 は、

$$v_0 = \sqrt{g \{ 2u_B \tau - k D_p \tan \theta \} \sin^2 \theta + (2l_0 + u_B \tau / \sin \theta) (\sin \theta - \mu \cos \theta)} \dots (7)$$

ただし $\tau \geq \tau_i$

と表される。大ベルを離れた後の軌跡の主流の運動方程式は、座標の原点を大ベル先端に取りガス流の影響を考慮すると、次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -c(3\rho_g/4\rho_p D_p) u (u_x - v_g \sin \beta) \dots (8) \\ \frac{d^2y}{dt^2} = g(1 - \rho_g/\rho_p) - c(3\rho_g/4\rho_p D_p) \\ \quad \times u (u_y + v_g \cos \beta) \dots (9) \end{cases}$$

実物大模型で炉壁側より布を巻いたパイプを挿入し粒子の衝突した跡から測定した落下軌跡と、(7)~(9)式

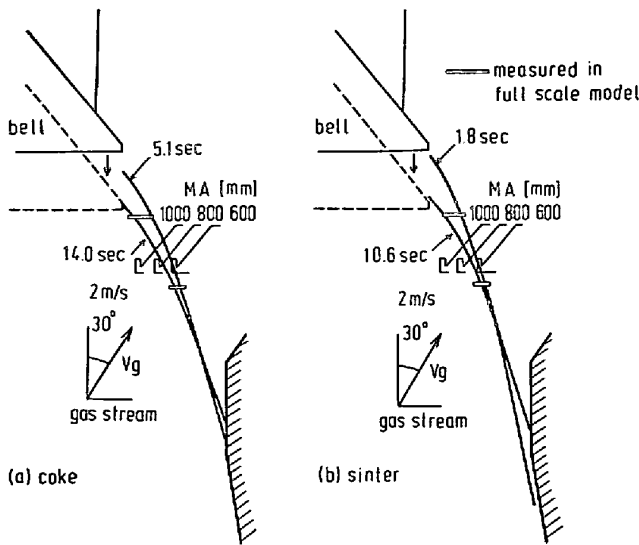


Fig. 6. Falling trajectories calculated from eqs. (7)~(9) and measured results in full scale model.

を用いて計算した結果の比較を Fig. 6 に示す。ここで摩擦係数 μ は 焼結鉱で 0.43, コークスで 0.31 としたが⁹⁾, 両者は良く一致する。焼結鉱よりコークスの方が飛距離は大となる。次に (8) (9) 式でガス流速 v_g を 1 ~ 5 m/s と与えてガス流の影響を検討したが, コークスでガス流の影響が少しあらわれる程度で, その度合は小さい。また実物大模型でも送風, 無風と二つの条件下で落下軌跡を測定したが, 両者に有意な差はみられなかつた。よつて落下軌跡へのガス流の影響は無視できる。したがつて (8) (9) 式は実用的には,

$$y = x \tan \theta + gx^2 / 2u_0^2 \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。

この解析の結果より (7) 式と (10) 式を用い大ベル降下に伴う落下軌跡の推移が予測できる。Fig. 6 には同時にムーバブルアーマの各押し出し位置を記したが, 押し出し量 600 mm では, コークス, 焼結鉱ともに落下開始直後はアーマに衝突するが, さらに大ベルが降下するとアーマ下方を通過して衝突しない。しかし大ベルを離れる時の初速度 u_0 は大になり, 炉壁に衝突する位置は上昇する。

4. シャフト部における装入物の降下

4.1 高炉の解体およびモデル実験からの知見

本研究ではまず高炉の解体結果, 移動層に関するモデル実験をもとに粒子の降下運動についての現象の整理を行った。

解体結果^{15)~20)}によれば, 鉱石層とコークス層の層状分布はシャフトに限らず溶け落ちまで明確に保たれ, 降下に伴つて層厚は薄くなり, 傾斜角は小さくなつてい

る。また WAGSTAFF は高炉の半裁模型により, シャフト部では装入物は半径方向に均一に降下することを確認している²²⁾。次に外山らはテーパ付きの移動層で, 壁摩擦が小さい場合, 層内部の粒子は各断面でおおよそ等速度を保つて降下し, 壁の傾斜を上方に延長して得られる交点を原点として, 放射状に引かれた直線に沿つて移動すると結論している²³⁾。このような模型実験の結果より装入物の降下挙動に関する共通の結論として, 同一レベルをとると装入物の降下速度の垂直方向成分は横断面にわたつて等しく均一に降下するという点があげられる。

4.2 粒子の降下運動モデル

主に外山らの結果を参考に, Fig. 7 のような装入物の降下モデルを想定し降下挙動を定量化する。すなわち炉口部では垂直に均一降下し, シャフト部では傾斜壁によつて構成される円錐の頂点を通る線に沿つて均一降下とする。炉軸およびストックラインに沿つて座標軸 l, r を定め, 炉口径を D_0 , 炉口高さを L_0 , シャフト傾斜角が垂直線となす角を α とする。ここで Fig. 7 において, 流線 d 上の点 (l_1, r_1) の粒子が点 (l, r) まで移動したとし, その間の装入物降下量を体積で V_t とすると, 次のように移動を定式化できる。

(1) l 方向

① $l_1 \leq L_0$ のとき

• $V_t \leq (\pi/4) D_0^2 (L_0 - l_1)$ ならば

$$l = V_t / (\pi/4) D_0^2 + l_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

• $V_t > (\pi/4) D_0^2 (L_0 - l_1)$ ならば

$$l = \{ (1/8) (D_0 / \tan \alpha)^2 + 3 (V_t - (\pi/4) D_0^2) \}$$

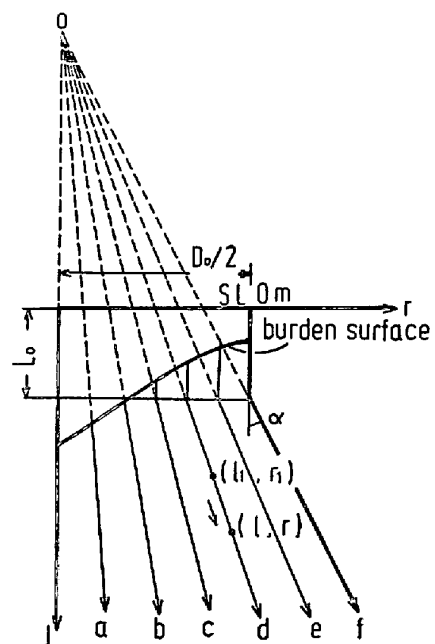


Fig. 7. Burden descending model in shaft.

$$\times (L_0 - l_1) / \pi \tan^2 \alpha \}^{1/3} - D_0 / 2 \tan \alpha + L_0 \dots\dots\dots (12)$$

② $l_1 > L_0$ のとき

$$l = \{ (D_0 / 2 \tan \alpha - L_0 + l_1)^3 + 3V_t / \pi \tan^2 \alpha \}^{1/3} - D_0 / 2 \tan \alpha + L_0 \dots\dots\dots (13)$$

(2) r 方向

① $l_1 \leq L_0$ のとき

$$r = r_1 \dots\dots\dots (14)$$

② $l > L_0$ のとき

$$r = r_1 (l + D_0 / 2 \tan \alpha - L_0) / (D_0 / 2 \tan \alpha) \dots\dots (15)$$

③ $l_1 > L_0$ ならば

$$r = r_1 (l + D_0 / 2 \tan \alpha - L_0) / (l_1 + D_0 / 2 \tan \alpha - L_0) \dots\dots\dots (16)$$

ここで例えば V_t に 1 チャージ分の装入物の体積を与えれば、1 チャージ分の装入物降下による層内の粒子の移動距離を(11)~(16)式によつて計算できる。

4.3 降下に伴う傾斜角の変化

Fig. 8 に示すように、層表面または層内に炉中心から炉壁に向かつて上り勾配の傾斜面を考える。すでに述べたように同一レベルをとると装入物は均一降下している。しかしシャフト部では高さ方向で断面積が異なるので、レベルが異なれば降下速度を異なる。したがつて Fig. 8 のように傾斜面上の炉中心近傍の点と炉壁近傍の点では両者の降下速度に差が生じ、断面積の大小関係から、当然炉壁近傍の降下速度の方が大きくなる。すなわち降下に伴つて傾斜角は低下せざるを得ないことになる。

この考え方に基ついて傾斜角の低下がどの程度になるか(11)~(16)式を用いて計算した。Fig. 9 に福山 5 BF の装入物分布表面形状の実測値 5 点を出発点として

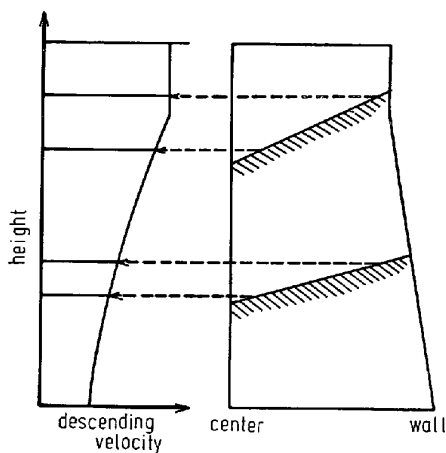


Fig. 8. Schematic representation of burden angle decrease with burden descent in shaft.

同高炉の条件を与え、5 チャージ分の降下による各点の移動位置を計算してプロットした。各点間は直線で結んであるが、解体調査結果と同様に、降下に伴つて層厚は薄くなり、傾斜角の低下することがわかる。得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 傾斜角低下の割合は降下に伴つて小さくなる。

(2) 傾斜角が大きいほど、低下する角度は大きい。シャフト上部で 30 度ならば、1 チャージ分の降下により約 2 度低下する。

また福山 5 BF で実測した表面の傾斜角の時間的変化を Fig. 10 に示すが¹⁰⁾、1 チャージ分の降下によつて 2~2.5 度の低下が認められ上記の計算結果に近い。

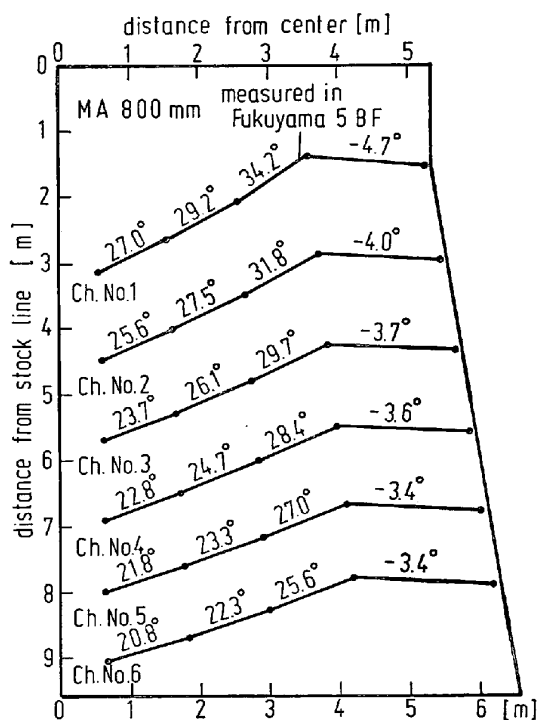


Fig. 9. Burden angle change calculated from eqs. (11)~(16) based on the surface profile measured in Fukuyama No. 5 BF.

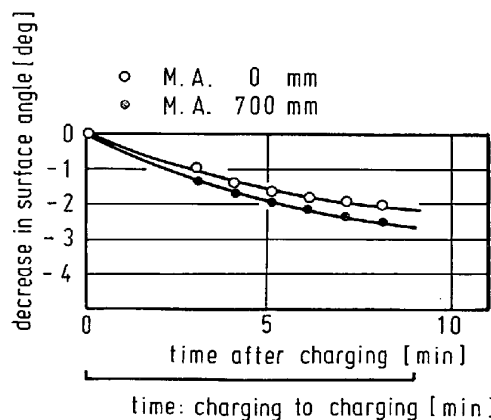


Fig. 10. Surface angle decrease during burden descending measured in Fukuyama No. 5 BF¹⁰⁾.

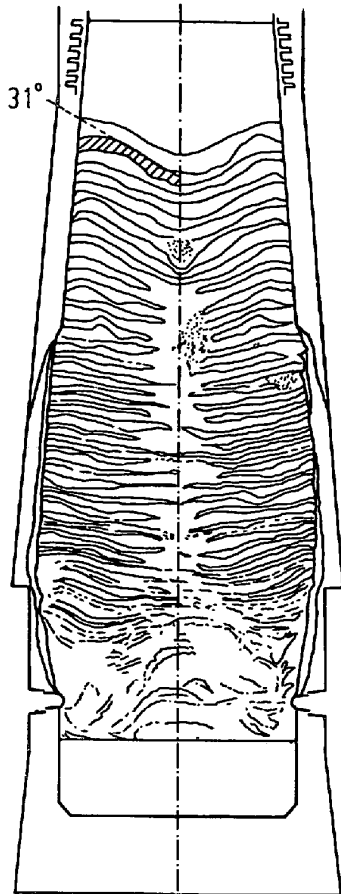


Fig. 11. Burden distribution resulting from the dissection of Tsurumi No. 1 BF¹⁵⁾.

次に上記の考え方の妥当性を高炉の解体結果により検討した。まず Fig. 11 のような炉内状況が得られた日本鋼管鶴見 1 BF の条件に基づき、ストックライン 4 m の位置にある 31 度のコークスの傾斜面を出発点として、降下に伴う傾斜角の変化を(11)~(16)式を用いて計算した。結果を Fig. 12 (a) に示すが、(b) にはこれより求めた傾斜角の変化を示す。(b) には同時に、解体結果よりシャフトの高さ方向の各点での傾斜角を求めてプロットした。実測値はばらつくが、ストックライン 4 m から 10 m 付近まで、計算値と実測値は傾向的によくあう。しかし 10 m から 12 m にかけて実測値は急減し、計算値から外れる。この要因の検討のために Fig. 11 をみると、ストックライン 10 m までは炉壁は健全であるが、10~12 m の間で炉壁浸食による炉壁の急拡大が認められ、この影響が考えられる。

そこで神原らによる新日鉄洞岡 4 BF の縮尺 1/20 の 2次元模型による装入物降下実験¹⁷⁾を参考にした。この模型はシャフトの炉壁の損耗を考慮してシャフト中段で炉径を急拡大させた形状となつている。彼らの得た結果から上から下に各チャージの傾斜角を求め、チャージ

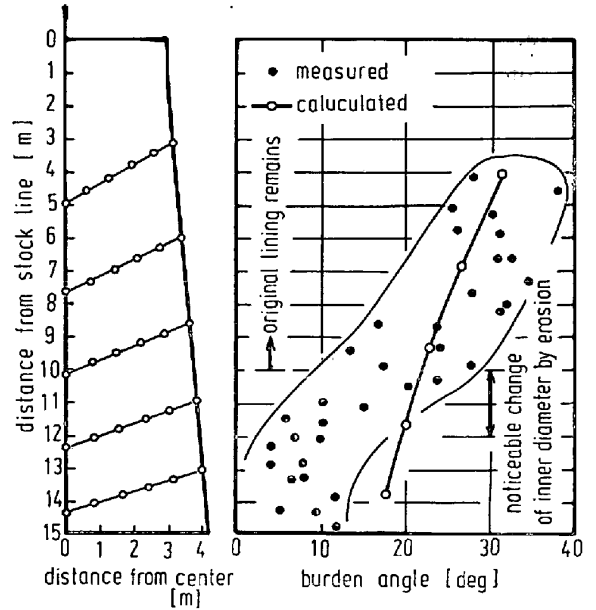


Fig. 12. Comparison between burden angles measured in Tsurumi No. 1 BF dissected and calculated values from eqs.(11)~(16).

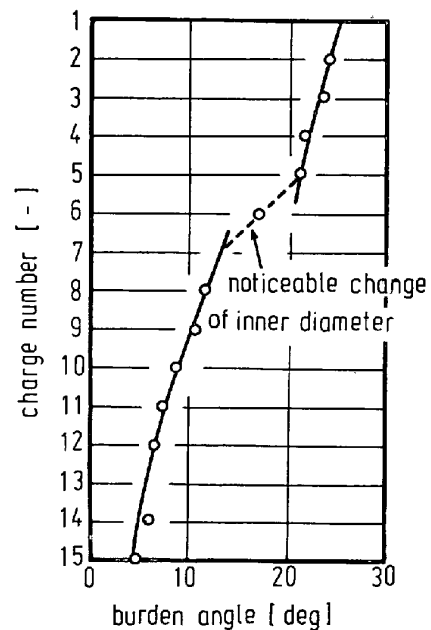


Fig. 13. Burden angle transition in model with noticeable change of inner diameter.

番号に対してプロットすると Fig. 13 のようになる。この Fig. 13 から、炉径急大部分で傾斜角の低下は著しいことがわかる。また炉壁浸食のない条件下で行われた模型実験では傾斜角の低下は一様であり、急変は認められない。

以上のような模型実験の結果より、鶴見 1 BF のストックライン 10 m から 12 m にかけての傾斜角の急変は、炉壁浸食による炉径急拡大の影響によるものと考えられる。このように考えれば、計算値と実測値の食い違

いは説明でき、逆に炉壁の浸食がなければ計算値と実測値はよく合うことが予想される。

以上よりこの粒子の均一降下運動モデルにより、高炉の解体結果で得られた炉内状況を説明でき、シャフト部における装入物の傾斜角低下の主因は、高さ方向の断面積変化すなわちシャフト壁の傾斜にあることがわかる。次にこのモデルの活用として、装入物表面形状の降下に伴う変化を計算でき、その変化を予測することによって分布制御に利用できる。例えば、コークス装入後、次の鉱石装入までの時間を取るることによって鉱石のベースとなるコークスの傾斜角を調整でき、装入物分布変更が可能であり、実際に実施され効果が確認されている¹⁰⁾。

5. 結 言

高炉の装入物分布形成過程のうち、大ベルホッパー内における装入物の降下の過程、大ベルホッパーからの流出と落下の過程、および炉内の装入物分布堆積層が降下して次の装入のベースを形成する過程を明らかにするために、小型模型実験を実施し、得られた結果に理論解析を加え、その妥当性を確認するため実物大模型実験の結果を併用して次のような結論を得た。

(1) 大ベル上の装入物は、大ベル降下操作により固定壁近傍の粒子が優先的に降下し、その表面に生じた窪みを埋めるようにして大ベル側の粒子の流れ込み降下が進行する。この降下特性のために大ベル上に異なる装入物を上層、下層にと配置した場合、大ベル降下とともに粒子混合が生じ装入物分布に影響を与える。

(2) 大ベルからの装入物の流出が開始すると、大ベルと固定壁下端の間に動的アーチが形成され、粒子はこの動的アーチを通過すると大ベル面へ向かつて自由落下することがわかった。この観察結果に基づき、最小エネルギー理論を適用し大ベルからの流出量を定式化し、実験により確認した。また大ベルからの落下軌跡は①動的アーチから大ベル面へ衝突するまでの自由落下、②大ベル面に沿う滑走、③大ベル端からの自由落下の3つの過程の結果として定まることが実験的に観察され、これをモデル化したところ実験値を良く説明できた。

(3) 高炉の解体調査によればシャフト部では装入物の降下に伴って傾斜角は低下する。この現象は、同一レベルをとれば装入物の降下速度の垂直方向成分は横断面にわたって等しく、その値は横断面積の増加に逆比例するという考え方により説明できる。

上記の考え方に基づき、福山5 BF の条件で装入物

の降下に伴う表面の傾斜角の低下を計算したところ、実炉の測定結果と比較的よくあつた。そして1チャージ分の装入物降下による傾斜角低下は2~3度に達し、装入物分布に及ぼす影響は無視しえないことがわかつた。

文 献

- 1) 前田一徳, 佐藤武夫, 中島龍一: 鉄と鋼, 54 (1968), S 364
- 2) G. HEYNERT, F. TOUSSAINT, J. WILLEMS, and G. QUADE: Stahl u. Eisen, 80 (1960), p. 473
- 3) E. PEETZ and G. WINZER: Stahl u. Eisen, 81 (1961), p. 1101
- 4) 古賀 強, 綿井義雄, 矢部茂慶: 住友金属, 14 (1962), p. 1
- 5) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971) 新日本製鉄(株) (私信)
- 6) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971) 住友金属工業(株) (私信)
- 7) K. KOEN, G. A. FRIERMAN, and C. H. van TOOR: B.F.A. Symposium Wollongong, (1975), p. 122
- 8) 研野雄二, 久米正一, 楯岡正毅, 天野 繁, 安倍 勲: 製鉄研究 (1976) 288, p. 54
- 9) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲一, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 358
- 10) 西尾浩明, 有山達郎, 脇元一政, 山口 篤: 鉄と鋼, 投稿中
- 11) 三輪茂雄: 粉粒体工学 (1972), p. 204 [朝倉書店]
- 12) G. S. ZOZULYA and D. A. STOROZHNIK: Stal in Eng. (1969), p. 15
- 13) F. A. YUSHIN and N. N. BABARYKIN: Stal in Eng. (1964), p. 850
- 14) 城本義光, 金山有治, 奥野嘉雄, 磯山 正: 製鉄研究 (1971) 272, p. 23
- 15) 伊沢哲夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斎藤正紀, 宮本健彦, 福島 勤, 古川 武: 鉄と鋼, 63 (1977), S 446
- 16) 吉村研二, 佐藤 忠, 富貴原璋, 嶋崎重信, 成田貴一, 前川昌大, 金山宏志: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, p. 551
- 17) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬二, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976) 5, p. 535
- 18) 梶川脩二, 隈田 昇, 吉越英二, 福島 勤, 鴨志田友男, 福山辰夫: 鉄と鋼, 59 (1973) 9, A 81
- 19) 伊沢哲夫, 隈田 昇, 梶川脩二, 福島 勤, 古川武: 鉄と鋼, 62 (1976) 4, S 64
- 20) 橋爪繁幸, 高橋洋光, 中川敏彦, 富田貞雄, 佐藤政明, 森岡恭昭, 小坂橋寿光: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 108
- 21) R. L. BROWN: Nature, 191 (1961), p. 458
- 22) J. B. WAGSTAFF: Proc. Blast. Furn. Coke Oven Raw Mater. Conf., AIME, 14 (1955), p. 298
- 23) 外山茂樹, 広末英晴, 内田邦夫: 粉体工学研究会誌, 10 (1973) 3, p. 146