

模型実験による高炉の充填層の解析

Study of the Blast Furnace Shaft as a Packed Bed Using Experimental Model

岡 部 俠 児*

Kyoji Okabe

浜 田 尚 夫**

Takao Hamada

米 谷 稔**

Minoru Yoneya

Synopsis:

Some characteristics in the blast furnace shaft, i.e. permeability of gas, layer thickness of charge and channeling condition are investigated using the furnace model. As the experimental parameters, charging sequence, coke weight of each charge and stock level are selected. The critical channeling velocity at furnace model is measured and compared with the experimental value at the packed bed. The ratio of both values can be applied to operational data of real furnaces. The most suitable coke weight and stock level for operating furnaces can be calculated by the following equations obtained from experimental results.

coke weight of each charge (ton) = $0.0306 D_T^3$

stock level (m) = $0.40 D_T - S - G$

Here, D_T : diameter of blast furnace top (m)

S : stroke of large bell (m)

G : constant value of distance (m)

1. 緒 言

高炉における固体原料すなわち鉱石、コークス、石灰石などは炉頂から装入され炉内で充填層を形成するが、その際これら装入物の分布状態はその種類、粒度および炉内への装入方法などによって変化する。他方、炉内を流れるガスはこの装入物の分布によって影響を受ける。このガスの流れに

よって起こる諸現象、すなわちガス-固体間の反応および伝熱、圧力損失、吹き抜け (channeling) などの物理現象は高炉の操業を支配する要因として重要である。高炉を単純な均一充填層として化学工学的に解析することはすでに行なわれている¹⁾。しかし、高炉では装入物の種類が多く粒度範囲も広い。また半径方向にも高さ方向にも装入物が不均一に分布している。この研究では模型を用いて充填層をつくり、装入物の粒度構成お

* 技術研究所製鉄研究室長

** 技術研究所製鉄研究室

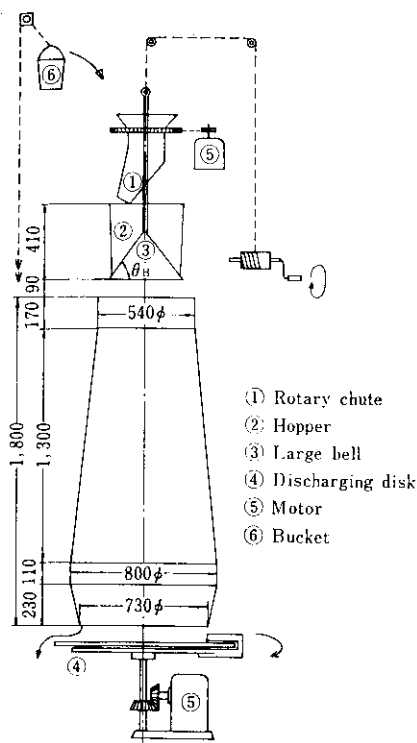


Fig. 1 The experimental apparatus (apparatus A)

および装置の寸法などを相似にして装入物の分布の状態について調査し、装入物の不均一分布が圧力損失、ガス流の分布、吹き抜けにおよぼす影響について考察した。これらの結果の一部についてはすでに報告している^{5)~8)}。

2. 炉頂における装入物分布

高炉の炉頂における装入物の運動は粒子群の摩擦、衝突、ころがり、充填層の移動など不明な点が多いため、計算によって装入線の形状、通気抵抗の分布などを求めることは困難である。それゆえ炉頂装入装置の模型を用いて炉頂における装入物の分布状態をおもに通気抵抗の分布に注目して調査した。

2.1 実験装置および方法

炉頂分布実験装置（装置A）の略図を Fig. 1 に示す。装置は高炉の朝顔部までの半裁縦断模型で、大ベル上に一様に装入物が分布するように旋

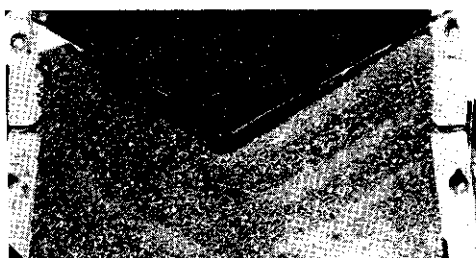


Photo. 1 An example of top distribution of the charge at the model

回シュートを上部に設け、下部には旋回排出機構を設けた。実験条件はできるだけ実際の装入条件と相似にした。炉頂の装入物の分布状態に影響をあたえる要因として、装入装置については大ベルおよびホッパーと炉口との相対位置、大ベル径と炉口径の比、大ベルの角度、ベルストローク、ベル降下速度などがあり、また操業条件については鉱石およびコークスの装入順序（たとえば CC↓ OO↓ は、C はコークス、O は鉱石、↓ は大ベル装入を表わし、充填層上面が所定の位置まで降下したときにコークスを装入することを表わす）、装入物面の位置（装入の一定基準位置から装入物面までの距離、以下 SL と略す）、コークスペース（装入1回あたりのコークス量、以下 CB と略す）、ore/coke（装入1回あたりの鉱石とコークスの重量比）、装入物の種類・粒度構成・配合・送风量などが考えられる。

実験試料の粒度構成、CB、ore/coke は千葉 No. 2, 4 および 5 BF の実績値をもとにして定めた。所定の条件により装入物を炉頂に分布させてから次のようなデータを採取した。炉頂部に 1 cm 区切に線を描いた透明板を張り、その目盛板によって装入物線の形を記録し、装入物面と水平面との角度 θ_0 と θ_c を測定し同時に写真撮影も行なった。例を Photo. 1 に示す。炉頂での横断面における分布を調べるために断面を 3 等面積の環状帯に分割する枠をつくり、周辺部、中間部、中心部に分けて鉱石とコークスを採取した。採取試料を鉱石とコークスに分けて、各部分に分布した鉱石およびコークスの重量を測定した。この試料の一部については、Fig. 2 に示すような通気度測定装置で圧力損失を測定すると同時に各部分に

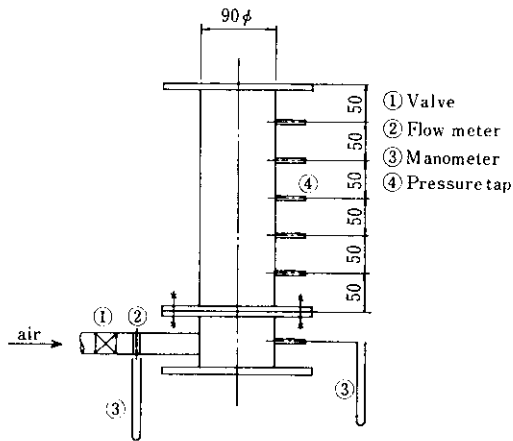


Fig. 2 Experimental apparatus for gas permeability

分布した鉱石とコークスの粒径分布をも調べた。

2.2 通気抵抗の計算

炉頂での通気抵抗の分布を求めるために次のような方法によってその指数を定めた。

充填層の圧力損失は一般に次式で表わされる。

$$\Delta P = f(L/\phi_s D_P)(\rho u^2/2g_c)\{(1-\epsilon)/\epsilon^3\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

充填層の摩擦係数 f は充填層のレイノルズ数 Re の関数である。従来 f や Re の定義が研究者に

よってまちまちであり、また実験範囲も異なるためにみかけ上かなり異なった圧力損失の式が提案されているが本質的にはどれも同じである。 Re の比較的狭い範囲については、 $\log f$ と $\log Re$ の間に近似的に直線関係が成立することが知られている。 f が Re の β 乗に逆比例する場合には(1)式は次のようになる。

$$\Delta P = [C/g_c(\phi_s D_P)^{1+\beta}] \{(1-\epsilon)^{1+\beta}/\epsilon^3\} \cdot L \mu^\beta \rho^{1-\beta} u^{2-\beta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

高炉内における装入物の粒径、空間率、形状係数などの値を正しく求めることは不可能である。それゆえ粒子の種類、粒度構成、充填状態などに関する項を一括して通気抵抗指数²⁾ Φ を

$$\Phi = [C/g_c(\phi_s D_P)^{1+\beta}] \{(1+\epsilon)^{1+\beta}/\epsilon^3\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

で定義することにより(2)式は次のようになる。

$$\Delta P = \Phi L \mu^\beta \rho^{1-\beta} u^{2-\beta} \quad \dots\dots\dots(4)$$

高炉シャフト部については転移域から混流域にわたっており従来の研究から $\beta=0.3$ が適用できる³⁾。したがって高炉シャフト部のガスの流れと相似の条件、すなわち $\beta=0.3$ の範囲で圧力損失を測定することにより通気抵抗指数 Φ は次式から計算される。

$$\Phi = (\Delta P/L)/\mu^{0.3}\rho^{0.7}u^{1.7} \quad \dots\dots\dots(5)$$

前述の各試料についての圧力損失のデータから

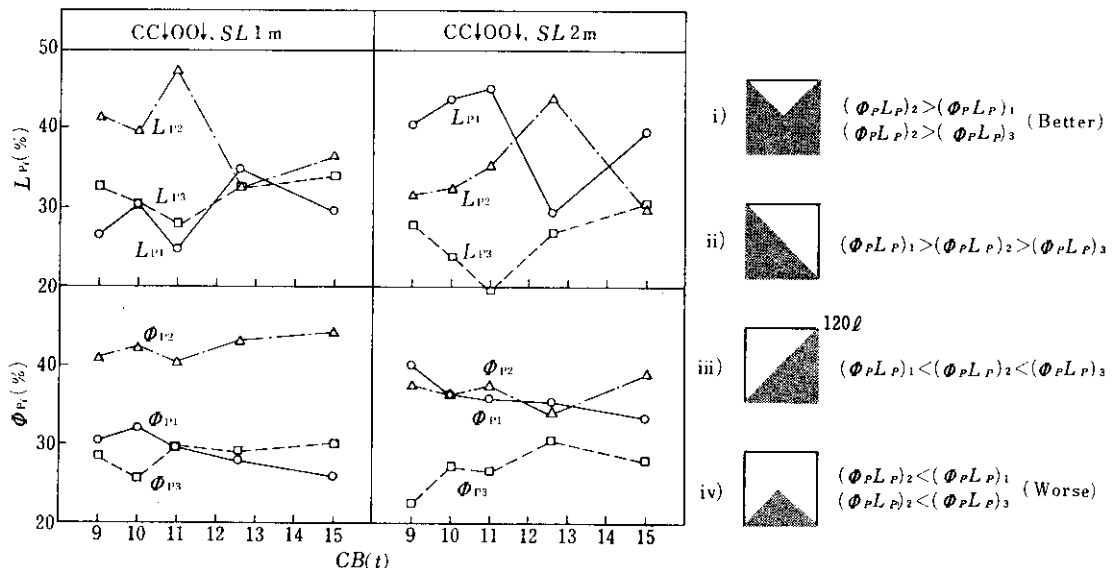


Fig. 3 Examples of the distribution of thickness of layer and permeability index at Chiba No. 5 BF

Fig. 4 Classification of distribution pattern of permeability $\Phi_P L_P$

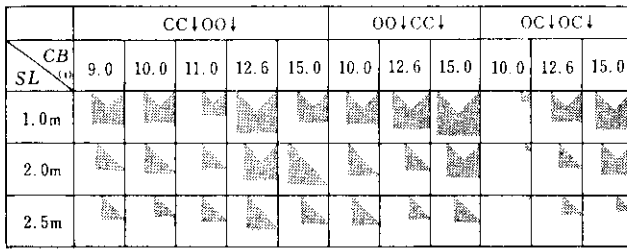


Fig. 5 Shape and uniformity of permeability distribution obtained from experiments of Chiba No. 5 BF

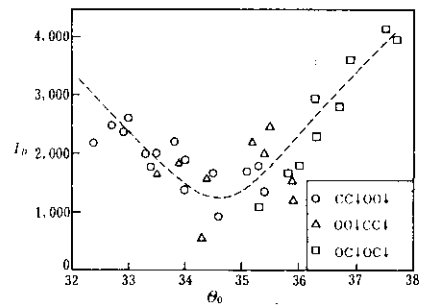


Fig. 6 Relation between θ_0 and I_D

この Φ を計算した。通気抵抗は通気抵抗指数 Φ と層厚 L の積で表わされるが、高炉では鉱石の通気抵抗指数がコークスより10倍以上大きいので、鉱石層の通気抵抗を用いた。異なる実験条件での通気抵抗の分布を比較するためには各部分の相対値を用いた方が便利である。それゆえ鉱石の層厚の分布割合 $L_{pi}(\%)$ ($i=1, 2, 3$, ここで1は周辺部, 2は中間部, 3は中心部を表わす。以下同じ) を鉱石の重量比で表示し、通気抵抗指数の分布割合 $\Phi_{pi}(\%)$ を同じく各部分におけるそれらの大きさの比で表示した。したがって通気抵抗は $(\Phi_P L_P)_i$ なる相対値で評価される。

2.3 実験結果および考察

鉱石の層厚 L_P と通気抵抗指数 Φ_P の分布の一例を Fig. 3 に示す。通気抵抗の分布の均一性を比較するため次式で定義される指数 I_D を用いた。

$$I_D = (\Phi_P L_P)_{\max} - (\Phi_P L_P)_{\min} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ガスの流れの分布に強く影響をおよぼすものは通気抵抗の分布であるので、 I_D が小さいほどガス流の分布は均一になる。通気抵抗の分布の形を各部分の通気抵抗 $(\Phi_P L_P)_i$ の大小によって Fig. 4 に示すように4種類の形に分類した。分布の形の良否は、(1)後述する吹き抜け現象の実験からは中間部の通気抵抗が周辺部および中心部より大きくしかも分布が均一なほど安定であること、(2)羽口先レースウェイの位置は中間部に相当し、そこでの燃焼ガス流はもっとも強く、かつ装入物はレースウェイの方向へ降下するので中間部に鉱石が多く分布し通気抵抗が大きい方がよいこと、(3)ガス流の分布についての Gotlib の考察⁴⁾、などから判

定した。この図ではマス目の形で通気抵抗の分布形を、マス目の大きさと均一性（マス目の大きいほど分布は均一）を表わしている。

千葉 No. 5 BF についての装入条件と通気抵抗の分布の形および均一性との関係を Fig. 5 に示した。前述の判定基準からは装入条件の基準として装入順序 CC↓OO↓, SL 1m, CB 12.6ton 付近が良い。No. 2 および 4BF については装入順序 CC↓OO↓の場合、SL 1m(2BF), 0.5m (4BF), CB 7ton (2BF), 9.25ton (4BF) を得た。どの実験でも実験範囲内で SL が浅いほど装入物の分布

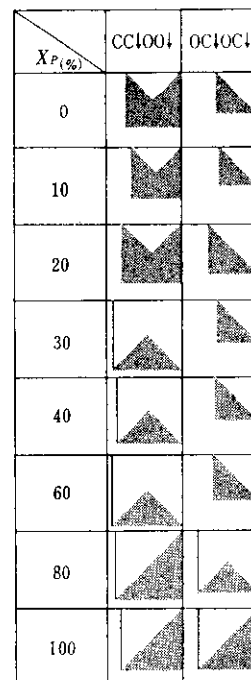


Fig. 7 Distribution of permeability according to pellet mix rate

は均一であり、分布の形も良かった。*CB*の影響は*SL*に比べて小さく、装入順序では*CC↓OO↓*が比較的均一であり *OO↓CC↓*, *OC↓OC↓*の順に悪かった。炉頂の装入物分布における各データ間に密接な関係が見出された。⁵⁾ たとえば鉱石層の角度 θ_0 と通気抵抗の分布の指数 I_D との間にはFig. 6に示すような関係があり、 $\theta_0=34.5^\circ$ 付近で通気抵抗の均一性は最も良くなった。

ペレット配合時の装入物の分布はその配合割合によって著しく変化した。ペレットの配合割合 X_P と通気抵抗の分布の形と均一性との関係をFig. 7に示した。通気抵抗の分布は*CC↓OO↓*では X_P が10%を除いて比較的均一である。*OC↓OC↓*では配合割合が多いほど均一になる傾向があり、配合割合が増すほど周辺部の通気抵抗は減少し中心部は増加したが、 X_P 90%までは周辺部がもっとも大きかった。*CC↓OO↓*では X_P 70%以上で周辺部より中心部の方が通気抵抗は大きかった。*CC↓OO↓*は X_P 30~60%, *OC↓OC↓*は X_P 80%で中間部の通気抵抗が最小となっているが、このような分布形はペレットを配合しない場合には現われなかった。これはペレット配合時には、ペレットは中心部に多く分布するのに対して、通気抵抗指数に大きな影響をあたえる鉱石中の細粒は周辺部に多く分布する傾向があるためである。

3. 装入物分布と吹き抜け現象

充填層の吹き抜け現象は装入物の部分的流動化に起因するので、流動化現象と充填層の圧力損失とを結びつけて吹き抜け現象をあつかう。高炉装入物のように流動層に用いる粒子径に比べて非常に大きい場合には、実験式のもとになる実測データが少なく従来の流動化開始速度の計算法の適用が困難である。そこで高炉シャフト部での吹き抜け限界速度を求めるために、流速分布の均一な充填層を用いて実験を行ない次の結果を得た⁶⁾。

常温空気について

$$U_{CH}=55\rho_s^{0.47}\Phi^{-0.55} \quad \dots\dots(7)$$

その他のガスについて

$$U_{CH}=0.74\rho_s^{0.47}\Phi^{-0.55}\mu^{-0.18}\rho^{-0.41} \quad \dots\dots(8)$$

そこで高炉の充填層について、次の実験を行なった。

3.1 実験装置および方法

実験装置 B (装置 A と相似形、炉口径300、送風可能)を用いて、装入条件を変えて、圧力損失、流速分布、吹き抜け現象について実験した。装入物の炉内への装入方法は装置 A と同様である。

圧力損失はシャフト部について測定した。次に炉頂部における流速分布を熱線風速計で測定し、これを面積換算して周辺部、中間部、中心部の各部分を流れる流量割合 q_i ($i=1, 2, 3$) を求めた。流量分布の均一性を比較するために次のような指数 I_s を用いた。

$$I_s = \Sigma(q_i - 33.3)^2/3 \quad \dots\dots(9)$$

吹き抜けについての実験は吹き抜けの判定を容易にするために、送風流量と炉内圧力損失とを記録することにより測定精度をあげた。測定例をFig. 8に示す。⁸⁾ 送風流量を徐々に増加してゆくと炉内圧力損失は増加してゆくが、あるガス量に達すると炉頂炉壁付近で流動化が起こり (Fig. 8中A), 局部的な吹き抜けが起こるが、圧力損失はあまり変わらない。さらに送風流量を増してゆくと、このような局部的な小さい吹き抜けは、炉内の所々で続くが細かい粒子の動きが活発になると、部分的に目づまりを起こして、炉内圧は一時的に急上昇す

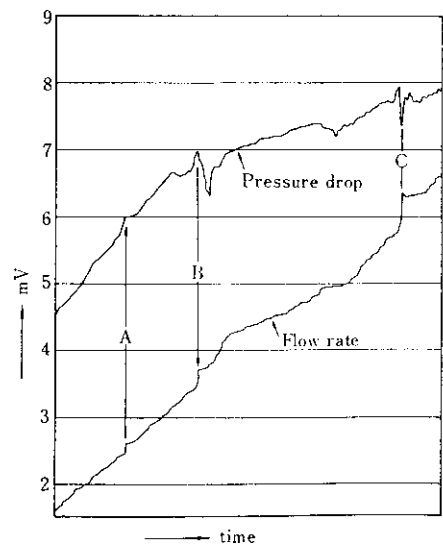


Fig. 8 Example of the relation between pressure drop and flow rate

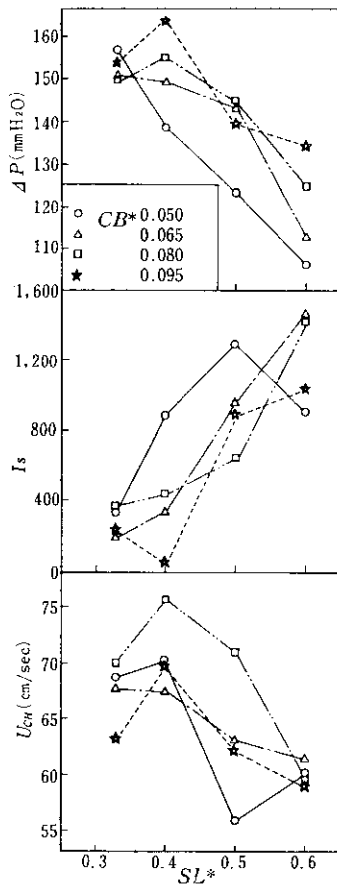


Fig. 9 Experimental results of model B about ΔP , I_s and U_{ch}

る。次に力の均衡が破れると、シャフト中下段より、大きな吹き抜けが起こり圧力損失は急に下がり、送風流量が増加する (Fig. 8 中B)。本実験では、この流量をもって、吹き抜け限界送風量 V_{ch} とした。さらに風量を増してゆくと、炉上部で全体的な流動化が起こるようになり、風量が増しても圧力損失はあまり増えず、圧力損失の変動が大きくなる。

炉内吹き抜け現象の起こる直前には細かい粒子の動きが目立つようになり、部分的に目づまり状態となって、圧力損失が急上昇する。この場合に粒子に粘性性がある単純に力の均衡が破れないときには高炉での棚吊り、あるいはスリップに相当する現象が現われると考えられるので吹き抜け現象は、棚吊り、スリップなどの高炉の荷下りの異常現象と関係がある。

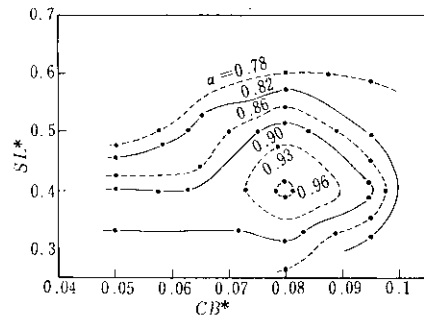


Fig. 10 Experimental values of α

3.2 実験結果および考察

装入条件と ΔP , I_s および U_{ch} との関係を Fig. 9 に示す。 CB と SL は次章で述べる方法によって無次元量として表わしている。装入条件別に比較すると U_{ch} が大きくなるのは $SL^*0.40$, $CB^*0.080$ の場合である。 I_s が大きいほど U_{ch} が小さくなっており、炉内のガスの流れの分布が不均一なほど、少ないガス流量で吹き抜けが起こる。圧力損失が少ないほどガスの流れの分布は不均一になっていて、圧力損失の少ない装入方法は吹き抜け現象の面からは良くない。充填層のガスの流れの分布は、主として通気抵抗の分布に影響されるので、本実験 (装置B) でのガスの流れの分布と前述の装置Aでの装入物の通気抵抗の分布の間に良好な相関関係があった。

この実験で得た吹き抜け限界速度 $(U_{ch})_{exp}$ と (7) 式で計算した吹き抜け限界速度 $(U_{ch})_{cal}$ との差異を装入物およびガスの流れの不均一分布に起因するものと考え、各装入条件毎にこの不均一性の係数 α を求めた。

$$(U_{ch})_{exp} = \alpha (U_{ch})_{cal} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$(U_{ch})_{cal}$ を計算する場合、通気抵抗指数、粒子の密度は鉱石とコークスの体積平均の値を用いた。係数 α と装入条件の関係を Fig. 10 に示した。この図で等高線の広がっている部分は、装入条件が変化しても α の変化は少ないことを示す。したがって CB の変化の方が SL 変化よりも吹き抜けへの影響が少ない。

この係数 α を用いて、高炉での吹き抜け限界送風量 $V_{ch}(\text{Nm}^3/\text{min})$ を次のように計算することができる。

$$V_{CH} = (60\alpha U_{CH} A_s / 100\gamma) (T_o / T_s) (P_s / P_o) \quad \dots\dots\dots(11)$$

たとえば、千葉 No. 5 BF については(8)および(11)式に、断面積、ガスの密度、粘度、温度および圧力としてシャフト部の平均値を代入すると次のようになる。⁸⁾

$$V_{CH} = 1,410\alpha\phi^{-0.55} \quad \dots\dots\dots(12)$$

高炉装入物の通気抵抗指数は No. 5 BF の場合、炉前の状態で鉱石(焼結鉱を含む) 0.12~0.18, コークス 0.01~0.015 で、体積割合で (ore/coke = 3として) 平均すると 0.06~0.08 になるが、炉内では鉱石の崩壊その他による粒度構成および空間率の変化によって、これよりも大きな値になっている。そこで No. 5 BF のシャフト圧の実測値より、(5)式によってシャフト部での通気抵抗指数を求めたところ ϕ は約 0.12 になった。No. 5 BF の吹き抜けの起こる限界送風量を計算して Fig. 11 に示した。

高炉装入物の通気抵抗指数は、粒度構成のうちで、粉率(-5mm%)の影響をもっとも強くうけ、粉率が1%増加すると圧力損失は数%も大きくなるので高炉の吹き抜け現象も当然、粉率に大きく影響され、粉率が1%増すと吹き抜け限界送風量はおおよそ 3~4% 小さくなる。したがって通常は

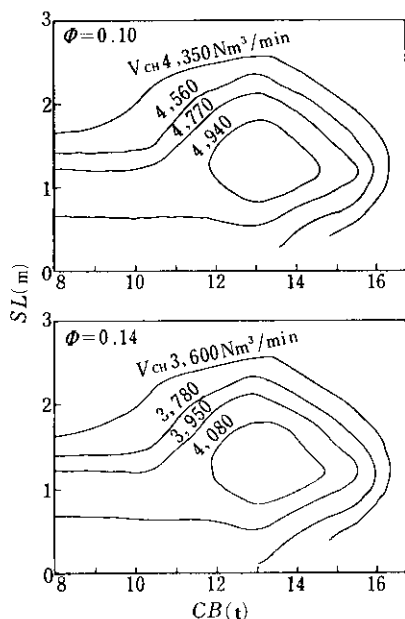


Fig. 11 Critical flow rate of channeling at Chiba No. 5 BF related to ϕ , SL and CB

吹き抜け現象の起こらない送風量で操作している高炉でも、装入物炉前粒度の変化、あるいは炉内での装入物の崩壊、その他による粒径の変化、分布の変化によっては、吹き抜け限界送風量が小さくなって吹き抜けが起こる。

4. 高炉最適装入条件の考察⁷⁾

わが国の主要高炉は、そのプロフィールがほぼ相似とみなせるので、実験条件および結果をどの高炉にも適用できる形にすることが可能である。そのため、次のように装入条件の無次元化を行なった。(以下無次元量に*をつけた)、装入に関係ある炉頂プロフィールを Fig. 12 に示した。

(1) コークスペース……CB の単位は重量であり、このままでは炉頂の寸法と関係づけることができないので、コークスあるいは鉱石が高炉に均一に装入されたとした場合の仮想的な層厚 l_c' 、あるいは l_o' を考えた。

$$l_c' = 10^3 CB / (\rho_B)_{\phi} (\pi / 4 D_T^2) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$l_o' = 10^3 MCB / (\rho_B)_o (\pi / 4 D_T^2) \\ = M l_c' (\rho_B)_{\phi} / (\rho_B)_o \quad \dots\dots\dots(14)$$

この量を炉口径 D_T で割って、CB の無次元量 CB^* とした。

$$CB^* = l_c' / D_T \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$= l_o' / D_T \quad \dots\dots\dots(16)$$

(2) ストックライン……開ベル下端から 1 m 下の位置を装入の基準線として、そこから装入物を

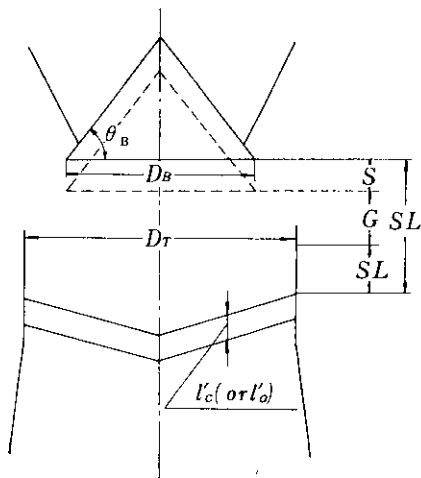


Fig. 12 Dimensions related to charging conditions

装入する位置までの距離を SL とする。しかし高炉によって SL を測る基準位置が異なることがあるので、装入物の分布にもっとも関係がある閉ベル下端から装入線までの距離を SL' として、これを炉口径 D_T で割って SL の無次元量 SL^* とした。

$$SL^* = SL'/D_T = (S + G + SL)/D_T \quad \cdots(17)$$

いままでに述べた実験で得られた最適な装入条件を、この方法で無次元化して **Table 1** に示した。

Table 1 The most suitable CB and SL

[CC↓OO↓]

Apparatus	BF.No	CB (t)	SL (m)	lc' (m)	CB*		SL*
					lc'/D _T	lo'/D _T	
A	2	7.00	(1.0)	0.47	0.076	0.052	(0.42)
	4	9.25	(0.5)	0.51	0.075	0.051	(0.36)
	5	12.60	(1.0)	0.58	0.073	0.053	(0.40)
B	—	—	—	—	0.080	0.053	0.40
Average					0.052		0.40

この表から最適 CB および SL は次のようになる。

(1)最適 CB …… CB^* で比べると、どの実験についてもほぼ等しい値になっている。 lc'/D_T と lo'/D_T とでは lo'/D_T の方が一定性が良い。 lo'/D_T の値から高炉の最適 CB の計算は、次のように行なうことができる。

$$CB^* = lo'/D_T = 0.052 \quad \cdots(18)$$

$$\therefore CB = 4.08 \times 10^{-5} (\rho_B) o D_T^3 / M \approx 0.0306 D_T^3 \quad \cdots(19)$$

「羽口破損について」(第29回製鉄部会、昭和42年)の資料中の装入関係実績値と(19)式による計算値を比較して **Fig. 13** に示した。模型実験から得た(19)式による計算値と高炉の実績値とは良く一致している。

(2)最適 SL ……装置 A での実験範囲が多少狭かったために、実験範囲内で SL は浅い方が良いという結果になっていて最適値がはっきりしないが装置 B の結果では、 SL^* の最適値は0.40であるのでこの値を用いる。高炉での最適 SL は次のようになる。

$$SL^* = SL'/D_T = 0.40 \quad \cdots(20)$$

$$\therefore SL = 0.4 D_T - S - G \quad \cdots(21)$$

$$\approx 0.4 D_T - 1.75 \quad \cdots(22)$$

(普通 $S=0.75\text{m}$ $G=1.0\text{m}$)

SL については高炉各社の実績が不明なので、(21)式による計算値と実績値を比較することができない。

5. 結 論

高炉の装入物分布と装入条件との関係について高炉模型を用いて検討した結果、次のことが明らかとなった。

(1)千葉No. 2, 4, 5BF について、装入条件を変えて実験を行ない、各高炉の最適なコークスペースとストックラインを求めることができた。ペレット配合時の装入物の分布は、ペレットの配合率によって通気抵抗の分布の形が大きく変化した。炉頂装入物における層厚、粒度、通気抵抗などの間には相互に密接な関係があった。

(2)高炉模型での吹き抜け実験より、装入物および流れの分布の不均一性に関する係数 α を求めた。これを用いて炉内通気抵抗と分布の不均一性を考慮した高炉の吹き抜け限界送風量を計算することができた。

(3)高炉の装入条件を一般化することにより、

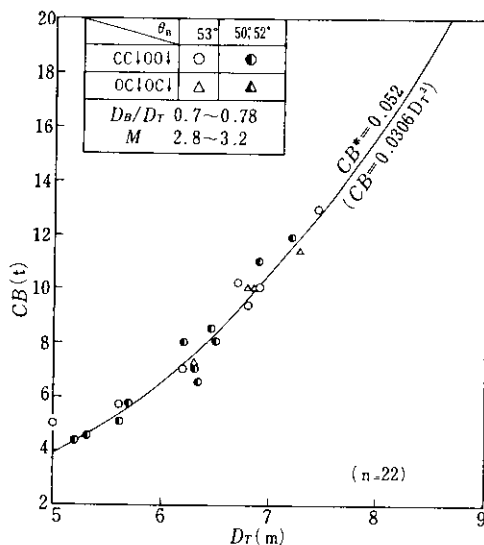


Fig. 13 Comparison between actual CB and estimated values from Eq.(19)

コークスペースとストックラインの最適条件を得ることができた。

最適コークスペース $CB=0.036 D_T^3$

最適ストックライン $SL=0.4D_T-S-G$

使用記号

A_s	シャフト部断面積	(m^2)	Re	粒子径基準のレイノルズ数	(—)
C	係数	(—)	S	ベルストローク	(m)
CB	コークスペース	(t)	SL	装入物線の位置	(m)
CB^*	CB の無次元数	(—)	SL^*	SL の無次元数	(—)
D_B	大ベル径	(m)	T_o, T_s	標準温度とシャフト部のガス温度($^{\circ}K$)	
D_P	粒子径	(cm)	u	空塔基準のガスの線速度	(cm/sec)
D_T	炉口径	(m)	U_{CH}	吹き抜け限界速度	(cm/sec)
f	充填層の摩擦係数	(—)	V_{CH}	吹き抜け限界送風量	(Nm^3/min)
G	開ベル下端から基準線までの距離(m)		X_P	鉱石装入物中のペレット配合割合(%)	()
gc	重力換算係数 ($g \cdot cm/(g \cdot wt)sec^2$)		α, β	係数	(—)
I_D	通気抵抗の分布を表わす指数		γ	反応によるガスの体積変化の係数(—)	
I_s	ガス流の分布を表わす指数		ϵ	充填層の空間率	(—)
L, L_P	層高と層厚分布割合	($cm, \%$)	θ_n	大ベル角度	($^{\circ}$)
l_c, l'_c	コークスの層厚	(m)	θ_o, θ_c	鉱石とコークスの装入物面の角度($^{\circ}$)	
l_o, l'_o	鉱石の層厚	(m)	μ	ガスの粘度	($g/cm \cdot sec$)
M	ore/coke	(—)	ρ, ρ_s	ガスと固体の密度	(g/cm^3)
ΔP	充填層の圧力損失	($cmAq$)	$(\rho_B)_o, (\rho_B)_c$	鉱石とコークスの嵩密度	(kg/m^3)
P_o, P_T	標準圧力とシャフト部のガス圧力		Φ, Φ_P	通気抵抗指数とその分布割合	
		(atm)			(CGS, %)
q_i	ガスの流量割合	(%)	ϕ_s	粒子の形状係数	(—)

参 考 文 献

- 1) 瀬川, 石川: 鉄と鋼, 52, (1966) 9, 1404
- 2) 児玉, 堀尾, 肥田: 鉄と鋼, 52, (1966) 3, 295
- 3) W. O. Philbrook: J. Metals, 6 (1954) 12, 1396
- 4) A. D. Gotlib (館訳): 高炉製鉄法の理論, (1966) [日本鉄鋼協会]
- 5) 岡部, 安藤, 浜田, 米谷: 鉄と鋼, 53 (1967) 10, S.195
- 6) 安藤, 浜田: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, 1415
- 7) 岡部, 浜田, 米谷: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S.55
- 8) 川崎製鉄: 学振製鉄第54委資料-1100, (化工小委13), (1968)