

論 文

高炉の炉内圧力損失に及ぼす高圧操業の影響*

福 武 剛**・岡 部 俠 児**

An Influence of High Top-Pressure Operation on Pressure Drop in a Blast Furnace

Tsuayoshi FUKUTAKE and Kyoji OKABE

Synopsis:

On the basis of laboratory experiments, a series of formulas is derived to estimate a gas flow resistance of the blast furnace burdens. By applying these formulas, the total pressure drop of the blast furnace can be divided into two parts, i. e., for the upper zone where the melts do not exist and for the lower zone where the solids and the melts coexist.

The calculated results of the pressure drops of the upper and the lower zones of No 1 blast furnace at Mizushima Works of Kawasaki Steel Corporation showed the following observations;

(1) When the blowing rate increases with increasing the top pressure, the pressure drop of the upper zone decreases and the pressure drop of the lower zone increases.

(2) With increasing the top pressure, loading or flooding at the lower zone plays an important role for hanging.

(3) With increasing the pressure drop of the lower zone, the scattering range of sulphur content in pig iron within a day increases.

(Received Dec. 7, 1970)

1. 結 言

近年わが国で新設された大型高炉は、すべて高圧操業設備を備えていて、高圧操業は高炉の生産性の向上に大きく寄与している。銑鉄生産量は送風量にほぼ比例するので、高圧操業の利点は、おもに可能送風量の増加にある。

米沢ら¹⁾は、高圧操業により増加しうる送風量を、炉内の圧力損失一定という条件で推定したが、深川ら²⁾は実操業データから、炉頂圧力の増加とともに炉内の圧力損失は低下するような条件で、増風が行なわれていることを示した。これらの報告では、炉全体の圧力損失について考察しているが、F. HIMBERら³⁾は、送風量一定の条件で、炉頂圧力の変化による炉内の圧力分布の変化を求め、シャフト部、およびそれ以下の炉下部に炉を2分して、それぞれの圧力損失が炉の全圧力損失に占める割合の炉頂圧力による変化を求めた。この結果から、彼らは、高圧操業ではポッシュ部で棚吊りが起こり、これが送風量を制限する因子になる可能性を指摘した。

充填層として考える場合、高炉内には、大きく分けて特性の異なる2つの領域、すなわち、ガス相と固相が存在する炉上部領域(以下「炉上部」と呼ぶ)と、ガス相、固相、液相が共存する炉下部領域(以下「炉下部」と呼ぶ)が存在する。降下する液体と上昇するガス体が共存する。炉下部では、ガスの流速、物性値以外に、液の流速と物性値が、ガスの圧力損失に大きな影響を及ぼす。したがって、炉頂圧力の効果は、炉全体ではなく、炉上部と炉下部に分けて評価するのが妥当である。しかし、高圧操業では、生産性を高めるため炉頂圧力の上昇と合わせて送風量を増すのが普通なので、HIMBERらの結果はそのままでは適用できない。

川崎製鉄(株)水島製鉄所第1高炉は、火入れ以後普通圧で立ち上がり操業を行ない、普通圧操業で最大出鉄量に達した後、炉頂圧力を徐々に高め高圧操業に移行した。このため、立ちあがり操業の影響のない普通圧から

* 昭和44年3月本会講演大会にて発表
昭和45年2月7日受付

** 川崎製鉄(株)技術研究所

高圧までの操業データを連続して得ることができたのでこのデータを用いて、高圧操業の解析を行なった。

高炉内の圧力損失を示す式として、**ERGUN⁴⁾**、**CARMAN⁵⁾**らの充填層の圧力損失式が用いられている。児玉ら⁶⁾は、通気抵抗指数を用いた高炉の圧力損失式を誘導し、安藤ら⁷⁾は、通気抵抗指数を高炉装入物の粒度構成から計算する方法について報告している。しかし、この方法は、粒度範囲のせまい装入物および単一粒径装入物には適用できないという欠点があった。

本報告では、まず高炉装入物の圧力損失を実験室で測定し、単一粒径粒子の充填層から粒度分布のある混合粒子充填層までに適用できる圧力損失式を誘導した。この圧力損失式を用いて、水島第1高炉の操業データから、炉上部と炉下部の圧力損失を分離して求め、炉頂圧力による圧力損失の変化および炉内の圧力が棚吊り、銑鉄中S含有量に及ぼす影響について検討した。

2. 充填層の圧力損失式

充填層の圧力損失式は、**ERGUN⁴⁾**、**CAEMAN⁵⁾**らによって示されている。これらの式を用いて圧力損失を計算するためには、充填層の空間率の値が必要である。充填層の空間率は、装入粒子の種類、粒度構成などにより異なるため、高炉装入物のような広い粒度範囲の装入物では空間率を実測しなければならず、式を適用するうえで不便である。

安藤ら⁷⁾は、児玉ら⁶⁾の示した通気抵抗指数を装入物の粒度構成から求める式を示した。この式は、流れの様式(転移域のみに適用)および装入物の粒度構成(単一粒径粒子と粒度範囲の狭い粒子には適用できない)に対して、適用範囲の制限があった。

本報告では、充填物の種類と粒度構成を変えて圧力損失の測定を行ない、測定結果を整理して、同一種類の装入物について、単一粒径から広範囲な粒度分布の装入物までに適用できる通気抵抗指数を、装入物の粒度分布から求める式を作成した。

2.1 圧力損失の測定

Fig. 1 に、圧力損失測定装置の系統図を示す。圧力損失測定容器④は、150 mm φ の円筒で、透明塩化ビニール製である。半径方向の空気の流速分布を均一にするために、空気吹込口は円錐形とし、分散板⑥を設置した。流体には圧縮空気(7 kg/cm²)を用い、バルブ⑧で流量を調節しながら装置に供給した。流量は、オリフィス③の差圧を水柱マンノメーター②で読みとり、水銀マンノメーター①で測定した圧力により補正して計算した。充填層の圧力損失は、水柱マンノメーター⑦で測定し、目皿⑤に

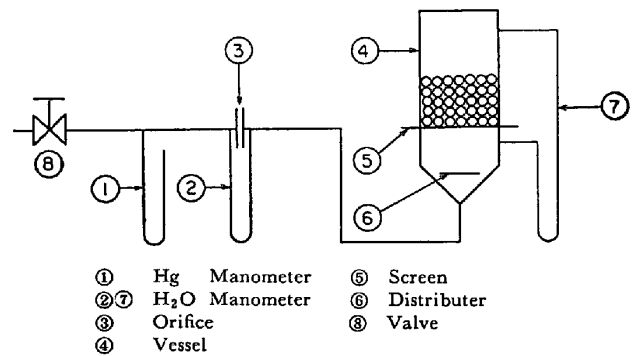


Fig. 1. Schematic drawing of the apparatus for measurement of pressure drop in packed column.

よる圧力損失の補正を行なった。

圧力損失の測定は、ガラス玉、コークス、鉍石、焼結鉍について行なった。ガラス玉はそのまま、コークス、鉍石、焼結鉍は、破碎したのちに、篩い分けて粒度別の試料とした。粒度別の試料は、そのまま単一粒子の圧力損失の測定に供し、これら粒度別の試料を所定の粒度分布に調整、混合して混合粒子の圧力損失の測定に供した。

ガラス玉は形状が球形であり、標準サンプルと考へて使用した。ガラス玉の粒度範囲は、0.71 mm~5.66 mm であつた。コークス、鉍石、焼結鉍の最大粒子径は 10 mm、最小粒子径は 0.5 mm とした。最大粒子径と最小粒子径の比は 20 であり、高炉装入物の粒度範囲とほぼ同じであつた。

混合粒子の粒度分布は、分布の形と平均粒径ができるだけ広範囲になるように決定した。Table 1 に測定した装入物の粒度分布の例として、コークスの粒度分析の一部を示した。焼結鉍、鉍石の場合も、ほぼ同様な粒度分布の試料で、圧力損失の測定を行なった。

粒度調整を行なった装入物を、圧力損失測定容器にじょうごを用いて装入し⁹⁾ 充填状態の再現性の向上を計つた。充填高さは約 100 mm とした。空気流量を段階的に変化させながら、マンノメーター①、②、⑦の差圧を読みとつた。流量は、オリフィスで測定しうる最小流量(空塔基準の流速でほぼ 20 cm/sec) から、装入物が流動を始める最大流速の間で、5~8 段階に変化させた。

測定は、同一サンプルについて 3 回行ない、測定値から圧力損失と流速を計算して、両対数グラフ上にプロットして再現性を確認したのち、以後の解析に用いた。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 粒度分布のない場合

ERGUN⁴⁾は、充填層の摩擦係数 f とレイノルズ数 N_{Re} とを次式で求め、

Table 1. Examples of size analysis of coke samples for permeability measurement (%).

Sample	0.5~0.71	0.71~1.00	1.00~1.41	1.41~2.00	2.00~2.83	2.83~4.00	4.00~5.76	5.76~8.00	8.00~10.0
A	10	15	20	20	15	10	10		
B			5	10	15	15	20		
C			20	20	20	15	10	20	
D	2.5	2.5	14.0	19.0	19.0	14.0	14.0	9.5	5.5
E	5	5	13.5	18.0	18.0	13.5	13.5	9.0	4.5
F			25	50	25				
G				30	40	30			

$$f = \frac{g_c \cdot \Delta P \cdot D_p \cdot \epsilon^3}{L \cdot \rho_G \cdot U_G^2 \cdot (1 - \epsilon)} \quad (1)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho_G \cdot U_G \cdot D_p}{\mu_G \cdot (1 - \epsilon)} \quad (2)$$

両者の関係を両対数グラフ上に、曲線で示している。粒子の種類が同じで、粒度分布のない単一粒径粒子の場合は、(1)、(2)式の空間率 ϵ は一定になるので、

$$R' = \frac{g_c \cdot \Delta P \cdot D_p}{L \cdot \rho_G \cdot U_G^2} \quad (3)$$

$$R_{ep} = \frac{\rho_G \cdot U_G \cdot D_p}{\mu_G} \quad (4)$$

で示される抵抗係数 R' と粒子レイノルズ数 R_{ep} の間にも一定の関係が成り立つ。

Fig. 2 に単一粒子のコークスとガラス玉の実験結果を R' と R_{ep} の関係として示す。 R' と R_{ep} は各粒子の種類ごとに一定の関係にあり、この関係を示す曲線は、粒子の種類が異なると、 R' 軸にそつて平行移動していると思なせる。

ガラス玉の場合、Fig. 2 から適用するレイノルズ数の範囲で直線近似すれば、

$$R' = c \cdot (R_{ep})^{-\beta} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。 c と β は、適用する R_{ep} の範囲により Fig. 2 から求められる。種類の異なる粒子の場合は、上述の対数軸での平行移動の関係により

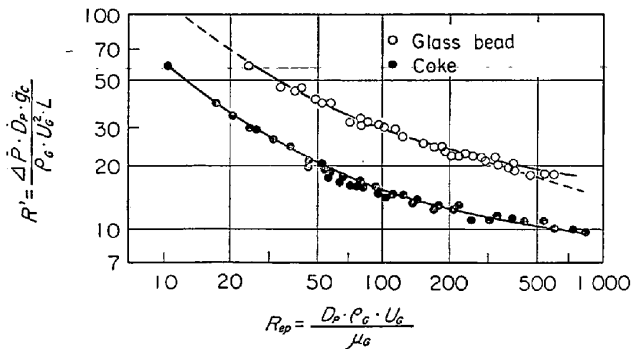


Fig. 2. Correlation between R' and R_{ep} (The dotted line represents the simulated line under the assumption of $75 < R_{ep} < 800$.)

Table 2. Values of C_0 and n for glass bead, coke, ore and sinter.

	Glass bead	Coke	Ore	Sinter
C_0	1.0	0.50	0.77	0.55
n	0.65	0.55	0.50	0.47

$$R' = c_0 \cdot c \cdot (R_{ep})^{-\beta} \quad (6)$$

とおくことができる。ここで c_0 は、装入物の種類により決まる定数で、各粒子の c_0 の値を Table 2 に示す。

2.2.2 粒度分布のある場合

装入物の平均粒径が同じでも、粒度分布が異なると空間率は変化する。Fig. 2 に示したガラス玉とコークス粒子の曲線の平行移動が、両者の形状係数、空間率の差異によるものであると仮定すれば、粒度分布の変化により空間率が変化したとき、同様な平行移動の関係が成立する。したがつて(6)式を補正して、

$$R' = \Phi_0 \cdot C_0 \cdot c \cdot (R_{ep})^{-\beta} \quad (7)$$

が成り立つ。 Φ_0 は装入物の種類と粒度分布により定まる係数で、実験データからは、 R' と R_{ep} を両軸とする両対数グラフ上で、基準となる単一粒子により得られた曲線から R' の軸にそつた平行移動量として求めることができる。

Φ_0 と粒度分布の関係を定量化するために、装入物の粒度分布の広がりを示す指標として、次式で示される粒度構成指数 I_s および I_p を導入した。

$$I_s = D_p^2 \cdot \sum w_i \cdot (1/d_i - 1/D_p)^2 \quad (8)$$

$$I_p = (1/D_p)^2 \cdot \sum w_i \cdot (d_i - D_p)^2 \quad (9)$$

$$D_p = 1 / (\sum w_i / d_i) \quad (10)$$

I_s は粒子の比面積のバラツキに関係し、 I_p は粒径のバラツキに関係している。両者は互に相関があるが、 I_p は粒径の大きい部分の分布状態により、 I_s は粒径の小さい部分の分布状態により大きく影響を受ける。ここでは、粒度分布を示す指標として、両者の幾何平均値 I_{sp} を用いた。

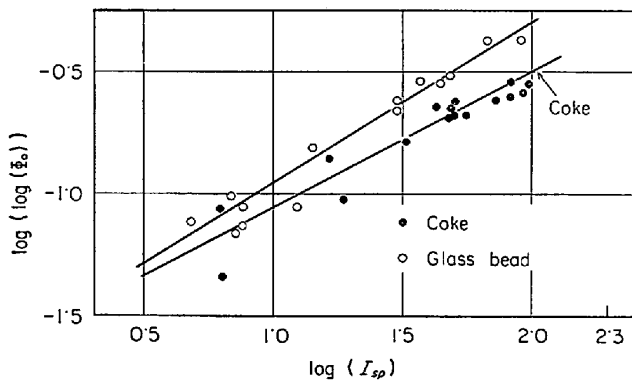


Fig. 3. Correlation between $\log(\log(\phi_0))$ and $\log(I_{sp})$.

$$I_{sp} = 100 \cdot \sqrt{I_s \cdot I_p} \dots \dots \dots (11)$$

Fig. 3 に示すように、 $\log(\log(\phi_0))$ と $\log(I_{sp})$ は直線関係を示すので、 ϕ_0 と I_{sp} の関係は、(12)式のようなになる。

$$\phi_0 = A k_i \dots \dots \dots (12)$$

$$k_i = I_{sp}^n$$

指数 n と定数 A は、Fig. 3 の回帰直線の傾きと $\log(I_{sp}) = 0$ のときの ϕ_0 の値から求められる。定数 A は装入物の種類によらず一定で、

$$A = 1.06 \dots \dots \dots (13)$$

であるが、指数 n は Table 2 に示すように、装入物の種類によつて異なる。

ガラス玉について、Fig. 2 に示す曲線を

$$75 < R_{ep} < 800 \dots \dots \dots (14)$$

の範囲で直線に近似して(5)式中の定数 C と β の値を求めると、それぞれ 110 と 0.3 になる。これから、高炉内に適用する圧力損失式として(15)式が得られる。

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{110 \cdot C_0 \cdot \phi_0 \cdot \rho_G^{0.7} \cdot \mu_G^{0.3} \cdot U_G^{1.7}}{g_c \cdot D_p^{1.3}} \dots \dots \dots (15)$$

(15)式により計算した圧力損失の値を実測値と比較すると、Fig. 4 に示すようによく一致する。

3. 高圧操業による炉内圧力損失の変化

3.1 炉上部および炉下部の圧力損失と炉頂圧力の関係

炉内は、液体の存否により2つの領域に大別され、炉下部でのガスの圧力損失は、液相が存在するために、炉上部と同様には取り扱えない。そこで、炉上部と炉下部の圧力損失を、次のような方法により分離して求めた。

炉上部では、圧力損失式(15)が適用できるので、この式を用いて炉上部の長さ L_{up} を適当に与えて炉上部と炉下部の境界の圧力 P_L を求めた。一方、送風圧力から羽

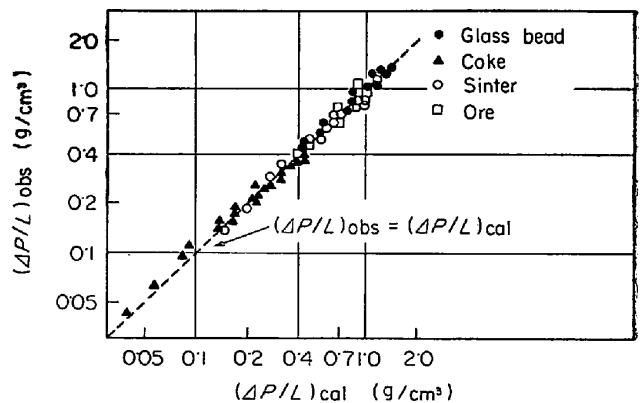


Fig. 4. Comparison between the observed and the calculated pressure drops.

口およびレースウェイでの圧力損失を除いた炉内圧力(以下羽口前圧力と呼ぶ)を計算し、炉上部の圧力損失を P_L と炉頂圧力の差から、炉下部の圧力損失を羽口前圧力と P_L の差から求めた。

児玉ら⁶⁾の定義した通気抵抗指数 ϕ を用いて、(15)式を書きかえると、(16)式が得られる。

$$\Delta P/L = \phi \cdot \rho_G^{0.7} \cdot \mu_G^{0.3} \cdot U_G^{1.7} \dots \dots \dots (16)$$

$$\text{ただし } \phi = 110 \cdot C_0 \cdot \phi_0 / (g_c \cdot D_p^{1.3}) \dots \dots \dots (17)$$

ERGUN⁹⁾も示しているように、高炉内では、高さ方向に大きな圧力と温度の変化があるので、 ρ_G と U_G が変化する。標準状態(圧力 P_0 、温度 T_0)における ρ_G と U_G をそれぞれ ρ_{G0} 、 U_{G0} とすると、(16)式は、(18)式のように書きかえられる。

$$\Delta P/L = \phi \cdot \rho_{G0}^{0.7} \cdot \mu_{G0}^{0.3} \cdot U_{G0}^{1.7} \cdot (P_0/P) \cdot (T/T_0) \dots \dots \dots (18)$$

これから、炉頂圧力 P_T と炉頂から L (cm) だけ下った場所の圧力 P_L の関係は(19)式で示される。

$$P_L^2 - P_T^2 = 2 \cdot \phi \cdot L \cdot \rho_{G0}^{0.7} \cdot \mu_{G0}^{0.3} \cdot U_{G0}^{1.7} \cdot P_0 \cdot (T/T_0) \dots \dots \dots (19)$$

高炉のレースウェイの測定によると、レースウェイ内では圧力はほとんど変化していない¹⁰⁾ので、羽口およびレースウェイでの圧力損失は、羽口でガスが持つ運動エネルギーにほぼ等しいと考えられる。したがって羽口前の圧力 P_B^0 は(20)式で求められる。

$$P_B^0 = P_B - \rho_{GT} \cdot U_T^2 / (2 \cdot g_c) \dots \dots \dots (20)$$

これから、炉上部と炉下部の単位長さあたりの圧力損失は、それぞれ(21)、(22)式で示される。

$$(\Delta P/L)_{up} = (P_L - P_T) / L_{up} \dots \dots \dots (21)$$

$$(\Delta P/L)_{low} = (P_B^0 - P_L) / L_{low} \dots \dots \dots (22)$$

解析は、水島第1高炉(炉床径 10m、内容積 2156 m³)の、昭和42年11月から昭和43年6月までの、旬間平均操業データを用いて行なつた。この期間は、立

Table 3. Data for calculation of pressure drop in the upper and lower zones of the blast furnace.

Symbol	Value	Dimension
ρ_{G0}	0.0013	g/cm ³
μ_G	5×10^{-4}	g/cm ² ·sec
P_0	1 033	g/cm ²
T_0	0	°C
T_{av}	750	°C
S_{av}	56.7	m ²
L_{up}	1 500	cm
L_{Low}	910	cm

ち上がり操業が終わったあとであり、炉頂圧力が普通圧から 1.3 kg/cm² の高圧操業に移行した期間を含んでいるので、高圧操業の解析に適している。

水島第1高炉の場合、装入物中の生鉱石、石灰石の割合は少なく、コークスと焼結鉱は層状に装入されているので装入物の平均通気抵抗指数をコークスと焼結鉱のみの容積による加重平均で求めた¹¹⁾。計算に必要な物性値などは Table 3 に示したものをを用いた。平均温度は、炉頂温度を 200°C、炉上部と炉下部の境界の温度を 1 300°C と考えて、両者の算術平均値を用いた。炉上部と炉下部の境界の位置を正確に決定することは困難であるので、炉上部と炉下部の長さは、推定値として、それぞれ 1 500 cm, 910 cm とした。これらの値を (19) 式に代入して P_L を求めると (23) 式が得られる。

$$P_L = \sqrt{\phi \cdot (V_i/1\,000)^{1.7} \cdot 3 \cdot 43 \cdot 10^6 + P_T^2} \dots (23)$$

Fig. 5 に算出した炉上部と炉下部の圧力損失の炉頂圧力による変化を示す。これから水島第1高炉の操業条件では、炉頂圧力の増加とともに、炉上部の圧力損失は低下し、炉下部の圧力は増加していることがわかる。

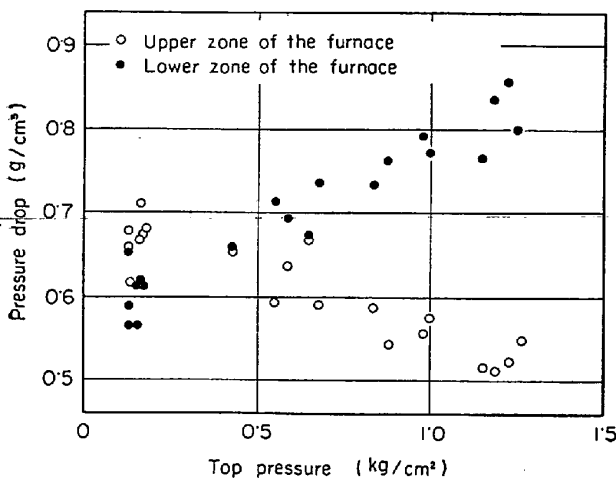


Fig. 5. Correlation between the pressure drops at the upper and lower zones and the top pressure.

解析期間のデータでは、炉頂圧力の上昇と対応して装入物の通気抵抗指数が低下しているのので、炉頂圧力による炉内圧力損失の変化を考察するときには、炉上部の圧力損失を通気抵抗指数一定の条件で補正する必要がある。

通気抵抗指数を一定 (ϕ^*) としたとき、炉上部と炉下部の境界の圧力 P_L^* は、(23) 式の ϕ に ϕ^* を代入して (23)' 式により求めることができ、

$$P_L^* = \sqrt{\phi^* \cdot (V_i/1\,000)^{1.7} \cdot 3 \cdot 43 \cdot 10^6 + P_T^2} \dots (23)'$$

これから、炉内の全圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合 R_L^* は、(24) 式により求められる。

$$R_L^* = (P_B^0 - P_L) / (P_B^0 - P_L + P_L^* - P_T) \dots (24)$$

(19) 式から、他の条件が変わらず炉頂圧力のみが変化したとき、式の右辺は一定となるので右辺を Q_1 とおいて

$$P_L^2 - P_T^2 = Q_1 \dots (25)$$

が成り立つ。(25) 式は炉上部で成り立つ式であるけれども炉下部においても、ガス圧力の変化により空間率が変わらなければ、(25) 式と同様な (25)' 式が成り立つ。

$$(P_B^0)^2 - P_L^2 = Q_2 \dots (25)'$$

(25), (25)' 式から、普通圧操業時を基準に Q_1, Q_2 を定めて、 P_T を変えながら P_L, P_B^0 を求めることにより HIMBER⁹⁾ が示したように、送風量が一定のときの炉頂圧力による炉上部と炉下部の圧力損失の変化が計算できる。

Fig. 6 に、炉内の全圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合 (R_L^*) と炉頂圧力の関係を示す。図中に示した実線は、(25), (25)' 式から、送風量一定の場合について計算した結果を示す。破線で示した実績値と計算値 (実線) の差は、実操業では、炉頂圧力の上昇と並行して送風量の増力を行なったために生じたと考えられる。

以下に、炉頂圧力と送風量を増したときの炉下部の圧

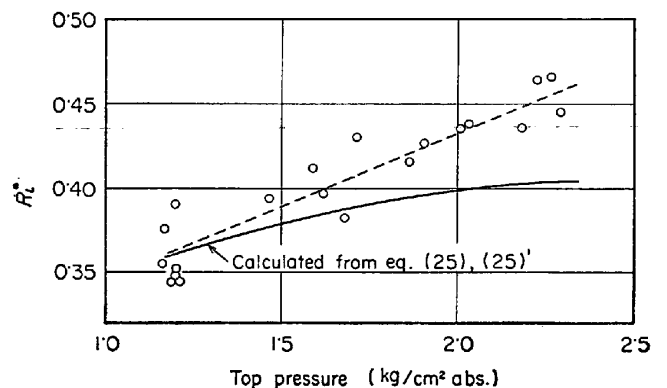


Fig. 6. Correlation between the ratio of the pressure drop at the lower zone to the total pressure drop (R_L^*) and the top pressure.

力損失の変化を定性的に検討することにより、計算値と実績値の差の原因を考察する。

3.2 炉下部の圧力損失に関する理論的考察

炉下部では、上昇するガスと向流に液体が下方へ流れるので、化学工業の分野で研究されている気液向流充填層として取り扱うことにより、炉下部の圧力損失の挙動を知ることができる。

SHERWOOD¹²⁾は、(26)、(27)式によつて Flooding Factor (F.F) と Fluid Ratio (F.R) を定義し、気液向流充填層でフラッシング (Flooding) の起こる条件をグラフで示した。

$$F.F = (U_G^2 \cdot a_t \cdot \rho_G \cdot n^{0.2}) / (g \cdot \epsilon^3 \cdot \rho_L) \dots\dots\dots (26)$$

$$F.R = (U_L / U_G) / \sqrt{\rho_L / \rho_G} \dots\dots\dots (27)$$

LEVA¹³⁾は、この F.F に液体の密度の補正を行ない、

$$F.F' = F.F \cdot (\rho_{H_2O} / \rho_L)^2 \dots\dots\dots (28)$$

により求めた F.F' と F.R の関係を、気液向流充填層の圧力損失をパラメーターとしてグラフ上で求め、フラッシング限界線とともに示した。高炉炉内の物性値が正確に求められないので、これから圧力損失を定量的に求めることはできないが、以下にこの式を用いて炉下部の圧力損失に及ぼすガス流速 U_{G0} と炉下部の平均圧力 P_A の影響について定性的な検討を行なう。

F.F' と F.R は、標準状態のガス流速 (U_{G0})、ガス密度 (ρ_{G0}) を用いると、(29)、(30)式で示される。

$$F.F' = K_F \cdot U_{G0}^2 / P_A \dots\dots\dots (29)$$

$$F.R = K_R \cdot \sqrt{P_A} \dots\dots\dots (30)$$

ただし

$$K_F = \frac{P_0 \cdot T \cdot \rho_{G0} \cdot a_t \cdot \eta^{0.2} \cdot \rho_{H_2O}^2}{T_0 \cdot g \cdot \epsilon^3 \cdot \rho_L^3} \dots\dots\dots (31)$$

$$K_R = \frac{U_L}{U_{G0}} \sqrt{\frac{\rho_L \cdot T_0}{\rho_{G0} \cdot P_0 \cdot T}} \dots\dots\dots (32)$$

高炉の操業条件から、銑鉄 t あたりの生成ガス量とスラグ量は一定とみなせるので、U_L/U_{G0} は一定と考えてよい。さらに、炉下部で充填層を形成しているコークスは、操業条件によつてはほとんど変化していないのでε、a_t も一定と考えられる。したがつて、圧力とガス流速の影響を考察するうえで、K_F と K_R は定数とみなしうる。

炉上部の平均圧力と炉下部の平均圧力の関係を理論的に簡単な形で与えることは困難であるが、ここで解析したデータの範囲では両者の比は 0.72~0.81 の範囲にありほぼ一定と考えられる。そこで、炉上部の平均圧力 P_U を次式のように仮定する。

$$P_U = \alpha \cdot P_A \dots\dots\dots (33)$$

ここでαは比例定数である。

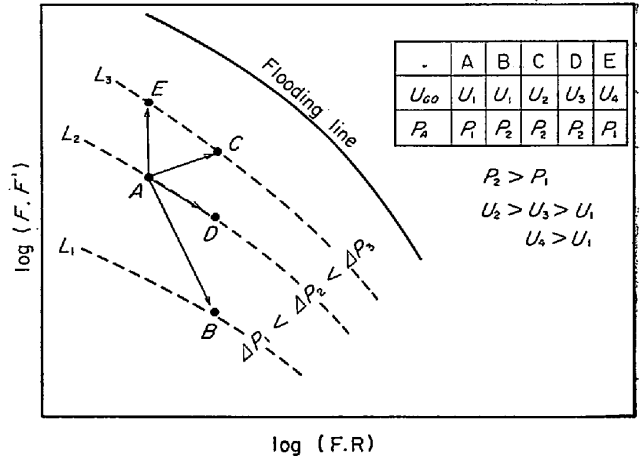


Fig. 7. Schematic drawing of effect of gas pressure (P_A) and gas velocity (U_{G0}) on the pressure drop at the lower zone of the blast furnace (L₁, L₂, L₃ are isobars for pressure drop ΔP₁, ΔP₂, ΔP₃).

これから、炉上部で圧力損失が一定のとき、U_{G0} と P_A の関係は(18)式を変形して(34)式で示される。

$$U_{G0} = K_p \cdot P_A^{0.588} \dots\dots\dots (34)$$

ただし

$$K_p = \left(\frac{\alpha \cdot \Delta P \cdot T_0}{L \cdot T \cdot P_0 \cdot \rho_{G0}^{0.7} \cdot \Phi \cdot \mu_G^{0.3}} \right)^{0.588} \dots\dots\dots (35)$$

圧力とガス流速のみが変わるときには、K_p は一定と考えてよい。(34)式を(29)式に代入すると(36)式が得られる。

$$F.F' = K_F \cdot K_p^2 \cdot P_A^{0.176} \dots\dots\dots (36)$$

(29)、(30)、(36)式から、Levaの示したF.F'とF.Rの関係を示すグラフ上で、炉下部の平均ガス圧力P_Aとガス流速U_{G0}が増加したときの点の変化は、模式的にFig.7のように示すことができ、炉下部の圧力損失の変化を次のように要約できる。

(1) U_{G0}を一定にしてP_AをP₁からP₂に増すと、点は傾き-2の線上を動いてAからBへ移り、圧力損失は低下する((29)、(30)式により)。

(2) P_Aを一定にしてU_{G0}を増すと、F.F'は増し、F.Rは変わらず、点はF.F'軸に平行にAからEへ動き、圧力損失は増す((29)、(30)式により)。

(3) P_AをP₁からP₂に増加するとともに、(18)式で示される炉上部の圧力損失が一定となるようにU_{G0}を増すと、点は傾き0.353(=0.176/0.5)の直線上をAからCへ動き、圧力損失は増す((30)、(36)式により)。

(4) P_AをP₁からP₂に増して、炉下部の圧力損失が一定となるようにU_{G0}を増すと、点はAからDへ

動き、このときの U_{G0} は(3)のときより低い(29)式により).

したがって、点がAからCD間に移るような条件で炉下部の平均ガス圧力と流速の増加が行なわれると、Fig. 5に示すように、炉下部の圧力損失は低下し、炉下部の圧力損失は増加する。

以上の検討から、送風量を増加または減少したとき、炉上部の圧力損失より炉下部の圧力損失のほうがより大きく増加または減少することがわかる。しかし、通常の操業では、棚落しや体風前後の一時的な減風を除くと、送風量の変化は著しく小さいので、このような現象はほとんど観察されない。

炉頂圧力の増加と並行して行なわれる増風は、相当大幅であり、炉内の圧力勾配が大幅には変化しないような条件で行なわれるので、炉下部の圧力損失の増加が顕著に現われ、そのため炉頂圧力と送風量を同時に増すと、Fig. 6に示すように、炉全体の圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合が炉頂圧力を単独で増したときより大きくなつたと考えられる。

4. 炉上部および炉下部の圧力損失が棚吊りおよび銑鉄中S含有量に及ぼす影響

炉内の圧力損失が増せば、装入物の円滑な降下が妨げられるので、炉内の圧力損失は、炉内反応、棚吊り、スリップなどの化学的、物理的現象と密接な関係があると考えられる。ここでは、炉上部と炉下部の圧力損失と棚吊りの関係および炉下部の圧力損失と銑鉄中S含有量の1日の変動範囲の関係について検討した。

Fig. 8に、炉上部と炉下部の圧力損失と棚吊り回数の関係を示す。この図は、Fig. 5に示したデータのほかに炉況の安定していたときの旬間平均データ点を含んでい

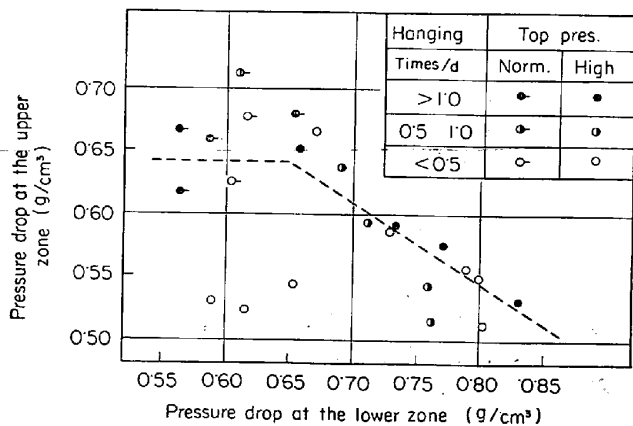


Fig. 8. Correlation between the pressure drops at the lower zone and at the upper zone of the furnace.

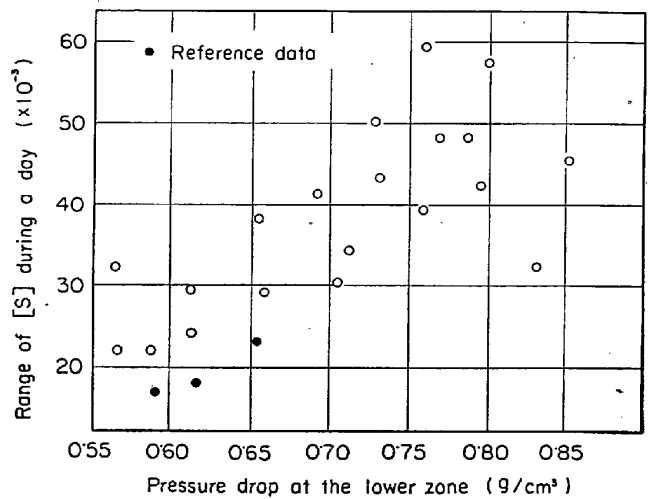


Fig. 9. Correlation between the scattering range of [S] content in pig iron during a day and the pressure drop at the lower zone of the furnace.

る。Fig. 8に示した破線の右上方では棚吊りが多く、左下方では棚吊りが少ない。これから棚吊りは、炉上部の圧力損失の増加のみによつて起こる場合と、炉上部と炉下部の両方の圧力損失によつて決まる一定の条件をこえて起こる場合がある。したがって、炉頂圧力を増加させながら送風量を増す場合、3章の考察から炉内の全圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合が増加するので、棚吊りの発生原因として、フラッキングなどの炉下部の現象が重要になる。

1日の銑鉄中S含有量[S]の変動範囲(最大値-最小値)はFig. 9に示すように、炉下部の圧力損失の増加により増加する。

図中に示した参考データ(●)は、解析期間後のデータで、装入物性状の改善などにより炉況が著しく改善されたときのデータである。参考データ期間の出銑量は、解析期間の最大出銑量とほぼ等しかった。したがって、この参考データから、銑中[S]の変動範囲の増加は、出銑量の増加によるものではないことがわかる。

圧力損失が増すとFig. 8に示すように棚吊りが増加する。棚吊りを起こすほどの増加はなくても、圧力損失の増加は、装入物の円滑な降下を妨げ、不均一降下を助長すると考えられる。銑中[S]の変動は、脱硫反応の不均一性により起こると考えられるので、炉下部の圧力損失の増加により炉下部で装入物の不均一な降下が多くなり、そのため、Fig. 9に示すような銑中[S]の変動範囲の増加が起きたと推定される。

5. 総 括

(1) 実験室的に、装入物の種類と粒度分布を変えて

圧力損失の測定を行ない、高炉装入物の通気抵抗をその粒度分析値から求める式(8)~(12)および(15)を導いた。

(2) この式を水島第1高炉の操業データに適用して装入物が固相で存在する炉上部と溶融帯以下の炉下部の圧力損失を分離して算出した。

(3) 炉頂圧力と風量を同時に増すとき、炉全体の圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合は増加する。この増加量は、同じ炉頂圧力増加のとき、HIMBER^らが送風量一定の条件で算出した値より大きい。

(4) HIMBER らの結果と実績値の差は、高炉の炉上部と炉下部の状態が異なるため、送風量を増したとき炉上部の圧力損失より炉下部の圧力損失の方がより大きく増加することによる。

(5) 炉下部の圧力損失の増加により、鉄中[S]の1日の変動範囲は大きくなる。

(6) 炉頂圧力の増加により送風量を増して出鉄量の増加を図る場合、炉下部の圧力損失が増す傾向にあるので、高圧操業では、コークス性状の改善、スラグ量の低下、スラグ性状の改善など炉下部の圧力損失を低下させる対策が有効であると考えられる。

最後に研究の遂行にあたり有益な助言をいただいた川崎製鉄水島製鉄所安藤博文氏と本論文をまとめるにあたり有益な助言をいただいた東京工業大学白井隆教授に感謝する。

記 号

a_t : 炉下部のコークスの比表面積	[1/cm]
C : レイノルズ数によつて決まる定数	[-]
C_0 : 装入物の種類によつて決まる定数	[-]
d_i : 粒度分析の篩目間の代表径	[cm]
D_p : 装入物の調和平均径	[cm]
f : 摩擦係数	[-]
g : 重力の加速度	[cm/sec ²]
g_c : 重力換算係数	[(g·cm)/(G·sec ²)]
I_{sp}, I_p, I_s : 装入物の粒度構成指数	[-]
L, L_{up}, L_{low} : 充填層, 炉上部, 炉下部の長さ	[cm]
n : 装入物の種類によつて決まる定数	[-]
N_{Re} : 粒子レイノルズ数 ((2)式)	[-]
$P(P_0, P_T, P_L, P_B, P_B^0)$: ガス圧力 (標準状態, 炉頂, 炉上下部の境界, 送風, 羽口前)	[G/cm ²]
P_U, P_A : 炉上部, 炉下部の平均圧力	[G/cm ²]
ΔP = 圧力損失	[G/cm ²]
$(\Delta P/L)_{up}, (\Delta P/L)_{low}$: 炉上部, 炉下部の圧力損失	[G/cm ³]

Q_1, Q_2 : (25), (25)'式により示される定数

R' : 抵抗係数 [-]

Re_p : 粒子レイノルズ数 ((4)式) [-]

R_L^* : 炉全体の圧力損失に占める炉下部の圧力損失の割合

S_{av} : 炉上部の平均断面積 [m²]

$T(T_0)$: ガス温度 (標準状態) [°K]

T_{av} : 炉上部の平均温度 [°C]

$U_G(U_{G0}, U_{GT})$: ガス流速 (標準状態の, 羽口の) [cm/sec]

U_L : 炉下部のスラグ流速 [cm/sec]

V_t : 炉頂ガス流量 [Nm³/min]

W_i : 粒度分析で d_i の粒子の占める重量分率 [-]

α : 炉上部と炉下部の平均圧力の比 [-]

β : レイノルズ数によつて決まる定数 [-]

ε : 充填層の空間率 [-]

η : 炉下部のスラグ粘度 [cp]

μ_G : ガス粘度 [g/cm·sec]

$\rho_G(\rho_{G0}, \rho_{GT})$: ガス密度 (標準状態, 羽口) [g/cm³]

ρ_L, ρ_{H_2O} : スラグ, 水の密度 [g/cm³]

Φ : 通気抵抗指数 [β の値により次元が異なる]

Φ_0 : 装入物の通気抵抗の粒度構成による補正係数 [-]

添字 * は、標準の装入物 (通気抵抗指数 Φ^*) の場合を示す。g は質量単位, G は重力単位を示す。

文 献

- 1) 米沢, ほか: 鉄と鋼, 52(1966) 10, p. 1666
- 2) 深川, ほか: 鉄と鋼, 52(1966) 10, p. 1663
- 3) F. HIMBER and D. DUTILLOY: Journées Int. de Sidérurgie. Luxembourg 1-4 Octobre (1962), p. 202
- 4) S. ERGUN: Chem. Eng. Progress, 48 (1952), p. 89
- 5) P. C. CARMAN: Trans. Inst. Chem. Eng., 15 (1937), p. 150
- 6) 児玉, ほか: 鉄と鋼, 52(1966) 3, p. 295, 298
- 7) 安藤, 浜田: 鉄と鋼, 52(1966) 9, p. 1415
- 8) C. E. SCHWARTZ and J. M. SMITH: Indust. Eng. Chem., 45 (1953), 6, p. 1209
- 9) S. ERGUN: Indust. Eng. Chem., 45 (1953), 2, p. 477
- 10) 学振製鉄第 54 委報告, (1970), No 1146
- 11) 児玉, ほか: 鉄と鋼, 52(1966) 3, p. 295
- 12) T. K. SHERWOOD, et al.: Indust. Eng. Chem., 30 (1936), p. 765
- 13) M. LEVA: Chem. Eng. Progress Symp. Ser., 10 (1954), p. 51

討 論

【質問】 日本鋼管福山製鉄所 鈴木 駿一

高圧操作において炉上部と下部に分けて考えた場合、それぞれの圧力損失の限界はどの辺とお考えか。Fig. 8の点線は右下がりになっているが、上部圧損と下部圧損の間で何か相互関係が考えられるか（上部圧損に対して水平線、下部圧損に対して垂直線のみではないか）。

【回答】 炉上部と炉下部の圧力損失の限界は、各高炉によつて装入物、炉内温度分布、断面方向のガス流通分布などの操作条件が異なるため一定ではなく、同一の高炉でも、たとえば装入物分布が著しく変化するなどの場合には、限界圧力損失は変化する。

Fig. 8は現場の操作データのため、点がグラフ上の全領域に分布していないという難点がある。しかし、図中の各点の散布状態から最適と思われる形に点線を引くとFig. 8に示したようになる。点線が右下がりになった理由は、炉上部のガス流通分布と炉下部のガス流通分布が相互に影響を及ぼしているので圧力損失の限界についても相互作用が起きたためと推定される。

しかし Fig. 8の斜線は、そのまま延長されるのではなく、データの範囲がさらに炉下部の圧力損失が高い方へ広がれば、垂直の線になると考えられる。

【質問】 住友金属工業 和歌山製鉄所 清水英男
炉頂圧を上昇させると炉体下部の圧力損失が上昇するのはなぜか、同一操作レベルでも同様のことがいえるか。

【回答】
炉頂圧の上昇による炉下部の圧力損失の増加の原因は、

(1) (25), (25)'式からわかるように、炉頂圧力の効果は炉上部より炉下部のほうが小さい。

(2) 炉頂圧の上昇と送風量の増加が、炉下部の状態を Fig. 7に示しているA点からCD間に動かすように行なわれた。

の2点にある。

また、同一操作レベル（同一送風量）で炉頂圧を増してゆけば、炉上部、炉下部ともに圧力損失は低下する。しかし低下の程度は、炉下部より炉上部のほうが大きい。