

討 2

高炉シャフト部の装入物およびガス流分布

日本鋼管(株)技術研究所 ○西尾浩明 有山達郎

1. 緒 言

高炉内ガス流分布を、拡張した Ergun式に基づいて差分法により数値計算で検討する手法は、J. Radestockら¹⁾と V. Stanekら²⁾により開発され、その後数多くの研究者によって、いくつかの問題に適用されてきている。最近、大野らにより有限要素法による検討もなされている³⁾。このような理論的手法の発展によって高炉内ガス流れの基本的なパターンは、ほぼ明らかとなってきた。しかしながら、これを確認するための実験的研究は十分なされていない。本発表ではまず、2次元モデルによるシャフト部の流線の観察結果を報告したい。

炉口における装入物分布形成に及ぼす大ベル角度、大ベルクリアランス、炉口径等の装置条件およびストックライン、コークベース、装入物の種類、ムーブルアーマーの設定等の操作条件の影響は、ガス流れのない条件のもとで、古くより多数報告されている。F. A. Yushinらは、ガス流れの装入物分布への影響が著るしい例を報告しており、高炉の解体調査でも日本鋼管鶴見1BF⁴⁾では確認されている。本発表では、装入物分布に及ぼすガス流れの影響について報告したい。

2. 高炉シャフト部のガス流れ

2.1 実験装置 250 W×450 H×50 Tの片面透明アクリル板の容器で下部に風箱を有する。風箱を介して送風すると同時に容器下方の2点より水蒸気添加空気を圧入する構造となっている。

2.2 実験方法 まず、3 mmの球型シリカゲル単味またはコークス粒子とシリカゲルを層状装入する。空気流量設定後、充填層下部より水蒸気添加空気をトレーサーとして送る。そして水蒸気吸着によるシリカゲルの変色によって流線を観察した。

2.3 実験結果 写真1はシリカゲルを単味で22°の傾斜をつけて装入した例である。白色部分が変色したシリカゲルである。炉口径の60~70%に相当する深さから炉口の傾斜の影響を受けて炉中心へ集中する傾向がみられる。シリカゲルとコークス(5~10 mm)を層状装入した場合を写真2に示す。撮影直前にコークス層部分を外部より水冷しアクリル板に水蒸気を凝縮させたので、層状装入による流線の蛇行がはっきり捕えられている。炉中心への集中化の影響で、炉口に近い層では蛇行の程度は弱くなっている。以上の炉中心への集中化と層状装入による蛇行は既に理論計算に



写真1. シャフト上部における流線 (空気流速 0.18 m/s)



写真2. 層状装入時の流線の蛇行 (空気流速 0.36 m/s)

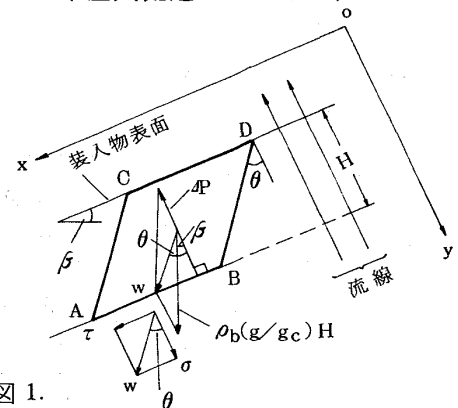


図1. 装入物表面近傍の力の釣合モデル

3. 高炉シャフト部の装入物分布

3.1 装入物の傾斜角に及ぼすガス流れの影響

1) 理論 装入物表面の傾斜角は装入物が大ベルから落下して中心部へと流れ込む過程で決定されると考えられるが、その流れ込み時の粒子層表面近傍の微少部分に注目して力学的解析を行なう。すなわち図1のように表面近傍にとった微少な平行四辺形ABDCには、それ自身の重力と、装入物表面が等圧面とみなせることから下部から表面直角方向に流れるガスの抗力が働く。この結果、重力とガスの抗力の合力wが斜面の下方へ向って働く。この力により面ABにかかる圧縮応力σは、

$$\sigma = \rho_b (g/g_c) H \cos \beta - \Delta p \quad (1)$$

面ABにかかる剪断応力では、

$$\tau = \rho_b (g/g_c) H \sin \beta \quad (2)$$

面ABの剪断強度τ_cはCoulomb式より、

$$\tau_c = \sigma \tan \phi_i \quad (3)$$

面ABにすべりを生じないためには、τ ≤ τ_c (4)

(1)~(4)より、層が静止し安定な条件は、

$$\tan \beta / \tan \phi_i \leq 1 - (\Delta P / H) / \rho_b (g/g_c) \cos \beta \quad (5)$$

高炉の装入条件で層が限界応力状態に達しているとすれば、図2. 装入物の傾斜角と空気流速との関係の理論値と実験値の比較

$$\tan \beta / \tan \phi_i = 1 - (\Delta P / H) / \rho_b (g/g_c) \cos \beta \quad (6)$$

(6)式においてΔP/H = 0、すなわちガス流速零とするとβ =

φ_iとなって傾斜角は内部摩擦角(安息角)に一致し、一方(ΔP/H)/ρ_b(g/g_c) = 1、すなわちガス流速を最小流動化速度に等しくするとβ = 0となる。

2) 実験装置 500W×200H×200Tの充填層、下部の風箱、上部の一方の壁近傍にとりつけたスーダーからなる。層厚を一定にするため装置の傾斜は可変となっている。

3) 実験方法 表1に示す小径粒子について通気実験を行ない、圧損と空気流速の関係を求めた。この粒子を実験装置に充填し、空気流量設定後、表面粒子を連続的に供給、排出しながら装置の傾斜を変え層厚が均一になる

ところをさがす。ほぼ均一になったら粒子の供給を止め、形成される静止層で確認をし均一ならば傾斜角を測定する。

4) 実験結果 図

装入物	嵩密度 [kg/m ³]	圧損の実験式 ΔP/H [Kg/m ³]	最小流動化速度 [m/s]	安息角 [deg]
a コークス (3~10mm)	611	362 u ^{1.79}	1.34	37.5
b コークス (5~10mm)	535	288 u ^{1.75}	1.42	37.7
c 焼結 鉄 (1~3mm)	1934	1320 u ^{1.64}	1.26	36.5
d 焼結 鉄 (1~5mm)	2330	680 u ^{1.67}	2.09	36.7
e ペレット (2~4mm)	1853	585 u ^{1.62}	2.04	32.9

表1. 実験に使用した装入物に関するデータ

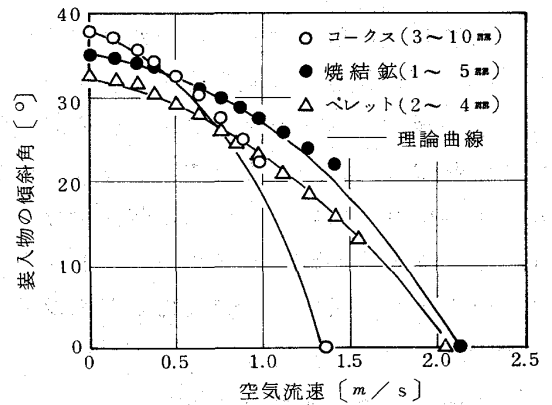


表2. 実炉の装入物に関するデータ

装入物	嵩密度 [kg/m ³]	空隙率 [-]	平均粒径 [mm]	形状係数 [-]	摩擦係数 F ^{*1} [1/m]	最小流動化速度 ^{*2} [m/s]	安息角 [deg]
コークス	525	0.51	50	0.63	205	2.9	35
焼結 鉄	1660	0.45	18	0.67	876	2.5	33
ペレット	2150	0.41	12	0.85	1469	2.2	26

*1) F = (ΔP/H) g_c / ρ u² = 1.75(1-ε) / (φ D_p ε³)

*2) 計算条件: ガス温度 120°C, ガス圧力 2atg

2に小径のコークス、焼結鉱、ペレットの実験結果と表1のデータを使った(6)式による計算値を示す。両者は良く一致し、本理論の妥当性を示している。

5) 実炉への拡張 以上の計算では圧損に実験式を用いたが、これにErgunの式をあてはめれば(6)式は次のように変形できる。

$$\frac{\tan \beta}{\tan \phi_i} = 1 - \left\{ \frac{150(1-\epsilon)}{Re_p} + 1.75 \right\} \left(\frac{1-\epsilon}{\phi D_p \epsilon^3} \right) \left(\frac{\rho u^2}{\rho_b g} \right) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right) \quad (7)$$

表2に示すデータにより炉頂圧2 atg、炉頂ガス温度120°Cの条件で、実炉の装入物の傾斜角とガス流速の関係を計算した結果を図3に示す。この条件では0.3 m/s以下で傾斜角の変化は無視できる。1 m/sの傾斜角は無風時に対して約3°低下する。1 m/sを過ぎると傾斜角の低下は顕著になる。図3から粘性項の支配する低流速域では傾斜角はガス流れの影響を受けないので、(7)式で粘性項を無視すると、

$$\frac{\tan \beta}{\tan \phi_i} = 1 - 1.75 \left(\frac{1-\epsilon}{\phi D_p \epsilon^3} \right) \left(\frac{\rho u^2}{\rho_b g} \right) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right) \quad (8)$$

(8)式のようにガス流の影響は ρu^2 で整理される。計算結果を図4に示すが、傾斜角は ρu^2 に対してほぼ直線的に減少する。

3.2 炉中心部における過渡的流動化

日本鋼管鶴見1BFの解体調査では炉中心部に鉱石(ペレット主体)の到達しない領域の存在が確認された。

このような現象は従来のガス流れのない実験では確認されていない。この現象について仮説を立てこれを実験により検証することを試みる。

1) 仮説 表2に示すように見掛けの摩擦係数で比較すると、焼結鉱はコークスの4倍、ペレットは7倍の圧損を有する。このように鉱石とコークスの圧損は大きく異なることから、大ベルから鉱石が落下し炉中心へ向って流れ込んでいく過程を捕えると、ガスは圧損の大きい鉱石を避けて過渡的に炉中心へ集

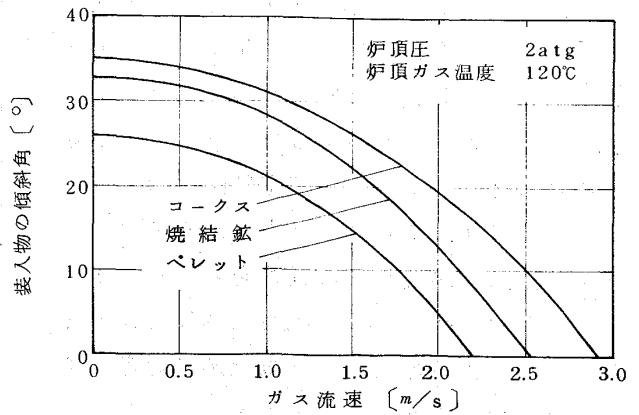


図3. 実高炉の装入物の傾斜角とガスの空塔速度との関係

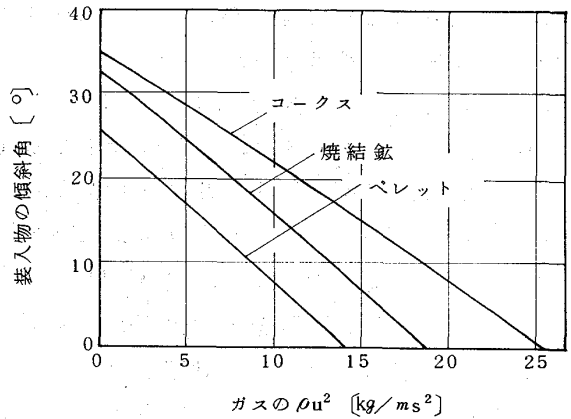


図4. 実高炉の装入物の傾斜角とガスの ρU^2 との関係

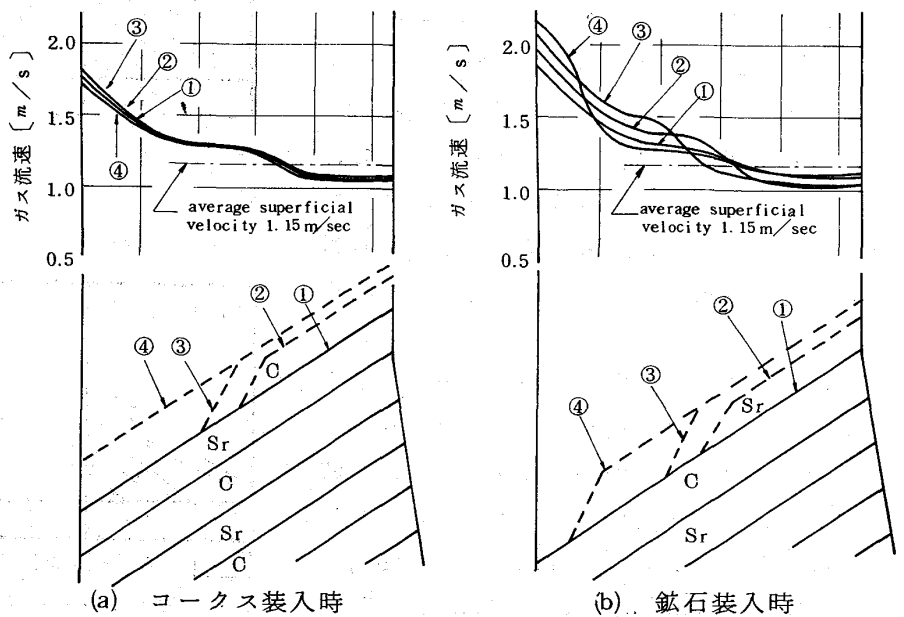


図5. 装入時の炉口ガス流速分布の変化の計算値

中し、場合によってはコークス層を流動化させるかもしれない。この流動化によって鉱石の炉中心への到達が阻害されると考える。

2) 理論計算 表1のコークスaと焼結鉱dの組合せで1/10の模型に図5のような層を形成させ破線のような段階を経てコークスまたは鉱石が流れ込む過程を考える。平均層頂から炉口径の1/2の深さに等圧面があると仮定して各半径位置の通気抵抗に対応してガス流れが決まるとすると、図5のように、鉱石装入時に炉中心部で流速がかなり増加するがコークス装入時には変化が少ない。したがって図6のような過程を経て装入物分布が形成されることが考えられる。

3) 実験装置 福山5BFの1/10、36°の扇型、ストックライン以下780mmまでの模型で上部に大ベル、下部に風箱を有する。

4) 実験方法 図5のように装入物を充填し、空気流量を設定する。O↓C↓O↓の順に装入し分布形成過程を1秒毎に撮影する一方、炉中心部のガス流速を測定した。

5) 実験結果 図7に炉中心部のガス流速の経時変化を示す。流れがかなり乱れているので一点の測定値では絶対値に問題は残るが、鉱石落下後の流速の上昇の大きいことがわかる。図8は、コークスaと焼結鉱dのときのガス流れの有無の影響を比較したものであり、仮説とよく一致する。図8では鉱石の最小流動化速度がコークスより大きいので、鉱石装入直前のコークスの傾斜角は図2から予想されるように、無風時にはコークスの傾斜角の方が鉱石より大きいのに対して送風時には逆転している。図9では、コークスbと焼結鉱cの組合せとなっており、表1のように鉱石の最小流動化速度はコークスより小さいので、送風による傾斜角の逆転はないが鉱石の装入により中心部はコークスのみとなる。

- 1) Stahlu.Eisen, 90(1970)p.1249 2) Canad.J.Chem. Eng., 50(1972)p.9, 3)鉄と鋼, 64(1978)S31, 4)同, 63(1977)S446

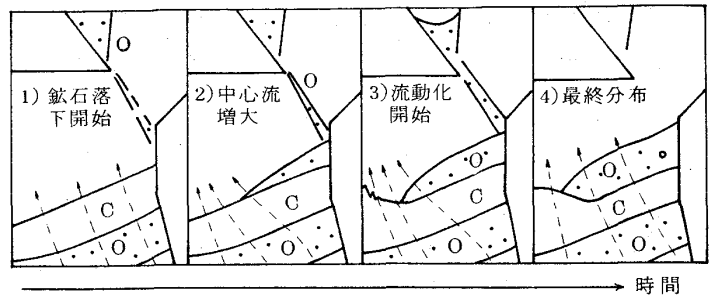


図6. 装入物分布形成過程の模式図

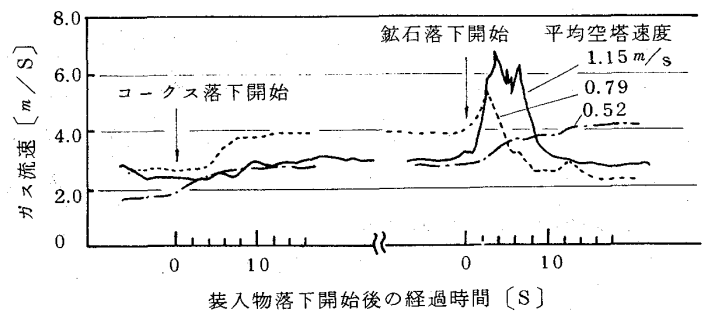


図7. 装入時の炉中心部ガス流速の変化

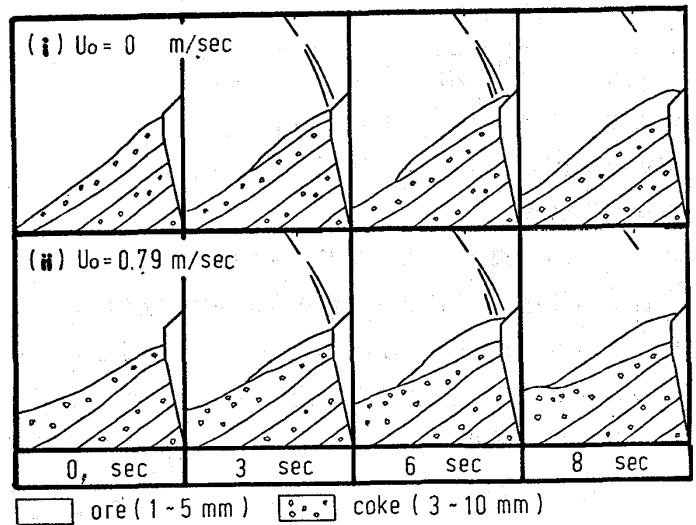


図8. 装入物分布形成に及ぼすガス流速の影響(鉱石の最小流動化速度がコークスより大きいとき)

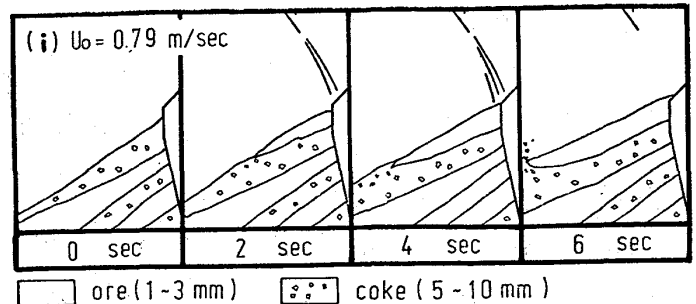


図9. 装入物分布形成に及ぼすガス流速の影響(鉱石の最小流動化速度がコークスより小さいとき)