

討 1

高炉のプロセス解析における装入物分布の役割

東北大学選鉱製錬研究所 八木順一郎

1. はじめに

装入物分布の制御は高炉を安定で高能率に操作するためであるから、第1に炉内状況と装入物分布の関係を明確にする必要があり、第2に装入物を高炉内に投入する時の堆積状況の研究およびその制御方法の開発が重要になる。

第1の目的を達成するためには装入物分布が炉内におけるガス流れや伝熱に及ぼす影響を検討する必要がある。現在の段階では装入物分布は主として層厚分布であるが、粒子径と空間率がガス流れを支配し、主として熱流比が温度分布を支配するので、ここでは、最初に充填構造として粒子径と空間率の関係および、充填層内のガス流れと伝熱についての研究の現状を述べ、つづいて、第2の目的のためガス流れが装入物の堆積に与える影響について簡単に述べる。

2. 充填層内のガスの流れ

充填層内を流れるガスの流速分布の推算には(1)式で示されるベクトル形式で表示されたErgun式¹⁾が運動の方程式として採用されている。

$$-\text{grad } p = (f_1 + f_2 |\vec{G}_g|) \vec{G}_g \quad (1)$$

$$\text{ここで、 } f_1 = 150\mu(1-\epsilon)^2 / \rho \epsilon^3 \phi^2 d_p^2, \quad f_2 = 1.75(1-\epsilon) / \epsilon^3 \phi d_p \rho$$

この式を(2)式の連続の式と組み合わせて解くと圧力と流速の分布が求められる。

$$\text{div } \vec{G}_g = Q \quad (2)$$

高炉内においてはガスの流速が高いので粘性抵抗を示す f_1 の効果は小さい。一方、固体の充填特性である粒子径と空間率はガスの流れに著しく影響する。特に空間率は指数が高次になっているため影響が大きい。(1),(2)式を使ってガスの流速分布、圧力分布を計算した結果²⁾からわかるように充填層内においてはガスは圧力分布がほぼ均一に近くなるように流速分布ができることになるので、充填構造の不均一性の影響は流速分布にあらわれると考えられる。

充填層内に粉体が存在する場合にはガスと充填粒子の相互作用による圧力損失については(1)式でガス流速に粉体の存在による空間率の補正を行ない、さらに、粉体群とガスの相互作用による圧力損失項を加えることによって表現することができる³⁾。この場合粉体とガスの相互作用についてはガスと粉体の相対速度、粉体群の空間率、ホールドアップ量等を知る必要がある。

3. 充填層の空間率と粒子径

粒子を充填すると粒子径、形状、表面粗度などによって、種々の充填率になるが、一定粒度の球形粒子を規則的に充填する場合、充填構造によって空間率は0.476 (立方格子) から0.2595 (菱面格子) まで変化する。

粒子径の異なる2種類の粒子を混合した場合の空間率の変化をFig.1⁴⁾に示した。ある一定の割合に混合した場合、空間率が最小になることがわかる。粒度分布のある高炉装入物の場合はさらに空間率が小さくなる可能性があるが、実際には形状や表面粗度などによって、球形粒子の場合より大きくなっている。空間率を高く保つことは良好な通気性を得るため重要であるが、Fig.1 から

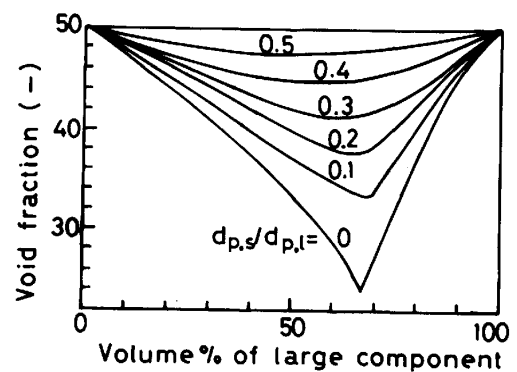


Fig.1 Measured void fraction for two sizes of particles.⁴⁾

わかるようにできるだけ粒度を均一に近く保つことによつて、高い空間率を有する充填層を得ることができる。もし、コークスや焼結鉱など装入物の粒度範囲をせばめ、粒度別に装入すると、粒度範囲の広い装入物を使うより、高い空間率を得ることができ、通気性のよい充填構造が得られるはずである。高炉の装入物であるコークスと鉱石を充填した場合の空間率の粒度依存性をFig.2⁵⁾に示す。均一粒径の球形粒子を充填する場合、粒子径に対して管径の比が十分大きければ空間率は粒度に依存しないはずであるが、実用粒子の場合にはかなり大きい依存性があることがわかる。

粒子径分布を有する粒子を充填した時の空間率は山田ら⁵⁾によるとつぎのように推算することができる。調

和平均径 D_p と粒子径分布の広がりを示す粒径分布指数 I_{sp} をつぎのように定義する。

$$D_p = 1 / \sum (w_i / d_i) \quad (3) \quad I_{sp} = 100 \sqrt{I_s \cdot I_p} \quad (4)$$

$$I_s = D_p^2 \sum w_i (1/d_i - 1/D_p)^2 \quad (5) \quad I_p = (1/D_p)^2 \sum w_i (d_i - D_p)^2 \quad (6)$$

上記の D_p と I_{sp} を使うと粒径分布を有するコークス層および焼結鉱層の空間率は均一粒径の場合を基準としてつぎのように表わされる。

$$\text{コークス層} \quad \varepsilon_c = (0.153 \log D_p + 0.418)(1 - \Delta \varepsilon_c) \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_c = 1.225 \times 10^{-2} I_{sp}^{0.4/6} \quad (2.4 \leq D_p \leq 6.3 \text{ cm}) \quad (8)$$

$$\text{焼結鉱層} \quad \varepsilon_o = 0.403 D_p^{0.1/6} (1 - \Delta \varepsilon_o) \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_o = 1.64 \times 10^{-3} I_{sp}^{1.0/6} \quad (10)$$

ここまでは、固定層の充填特性について説明してきたが、粒子が降下している移動層の空間率は固定層の場合よりさらに大きくなっていることが予想される。清水ら⁶⁾によると、Fig. 3に示すように、移動層の空間率は固定層の場合より約20%大きくなっている。充填構造として、層厚分布は主要な要因であるが、粒子径分布もガス流れに対して同様の重要性があり、粒度別装入による粒子径の分布幅の縮小あるいは粒子径分布による空間率の減少を推定することも重要である。

4. 熱流比と温度分布

熱流比は次式で定義される。

$$\text{熱流比} = c_s G_s / c_g G_g \quad (11)$$

気体、固体が向流接触し熱の授受がある時、この熱流比が1より大きいか、小さいかによって温度分布の傾向が著しく変化する。高炉の場合には炉内で生じる多くの反応の反応熱や炉壁からの熱損失によつても影響されるので、単に(11)式のみで説明できるわけではないが、シャフト部でおきる伝熱現象は概略(11)式で説明できる。この式の中でガスと固体の質量速度が高炉内に不均一に分布している場合、熱流比も半径方向あるいは円周方向で不均一になることがある。ガスの質量速度については前述のごとく固体の充填構造に強く依存するので、充填構造が極端に不均一にならないように注意する必要がある。一方、固体の質量速度 G_s は、炉頂で装入された時の層厚、粒子径、空間率の分布形状が支配因子となるであろう。

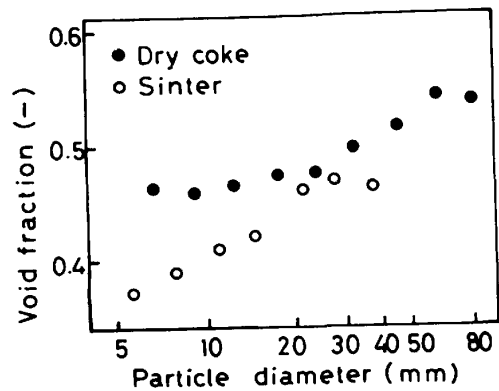


Fig.2 Relation between void fraction and particle diameter for $I_{sp}=0.5$

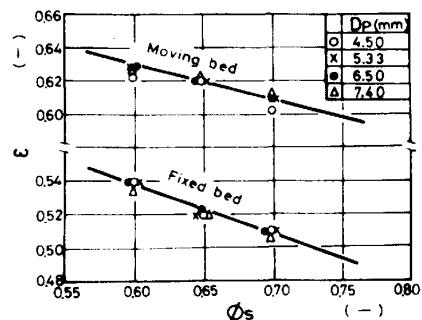


Fig.3 Relation between ε and ϕ_s in fixed and moving beds.⁶⁾

コークスと鉱石の粒子径分布を Fig. 4⁸⁾ のように与え、前述の(3)~(10)式で $I_{sp} = 0$ として空間率の半径方向分布を計算すると Fig. 5⁸⁾ のようにな

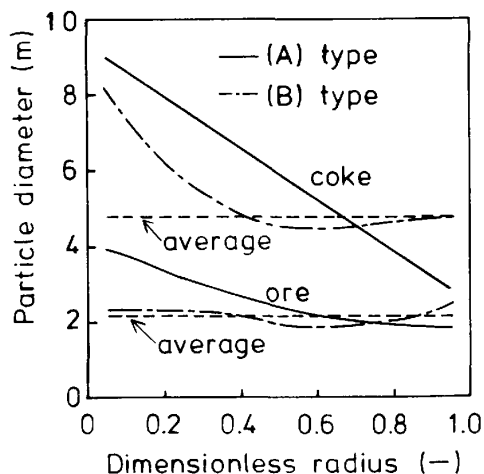


Fig. 4 Radial distribution of particle diameter.⁸⁾

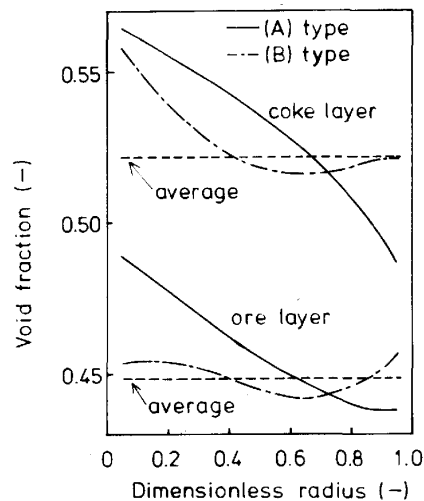


Fig. 5 Radial distribution of voidage.⁸⁾

る。そこで、これらを使ってガス流れと伝熱のモデルからガスの流速分布と温度分布を計算すると Fig. 6⁸⁾ のようになる。すなわち、粒子径が大きいところでは空間率が大きくなり、 G_g は小さくなるが、ガスの通気抵抗は小さくなるため G_g が大きくなり、結果的に熱流比が小さくなり、粒子の降下にとまなう温度の上昇は大きくなる。もちろん、焼結鉱とコークス層では焼結層の通気抵抗の方が大きいので層厚分布も重要であることはいうまでもない。この結果は層頂における装入物の層厚、粒子径および空間率分布はガス流れならびに伝熱に対して重要な要因であることを示している。炉頂で装入された装入物が炉内を降下する過程で焼結鉱は徐々に細粒化していることが報告されている。炉頂で装入される粒子は装入時の衝撃による物理的破壊あるいは炉内でおこる還元反応に伴う破壊等によって細粒化される。これらの変化過程が不均一に生じると粒子径の不均一分布が生じ通気性が不均一化して操業の不安定化を招くことになる。もう一つ粒子径の不均

一分布を生じる主要な原因として、炉頂で装入時に装入面が傾斜しているため、傾斜面に沿って、粒子が移動する過程で、大粒子の方がより遠くにまで移動することができるので炉中心部に大粒子が偏析しやすいこと、あるいは、コークス面上に焼結鉱を装入した時、密度の相違によって焼結鉱がコークス粒子を炉中心部に移動させる効果な

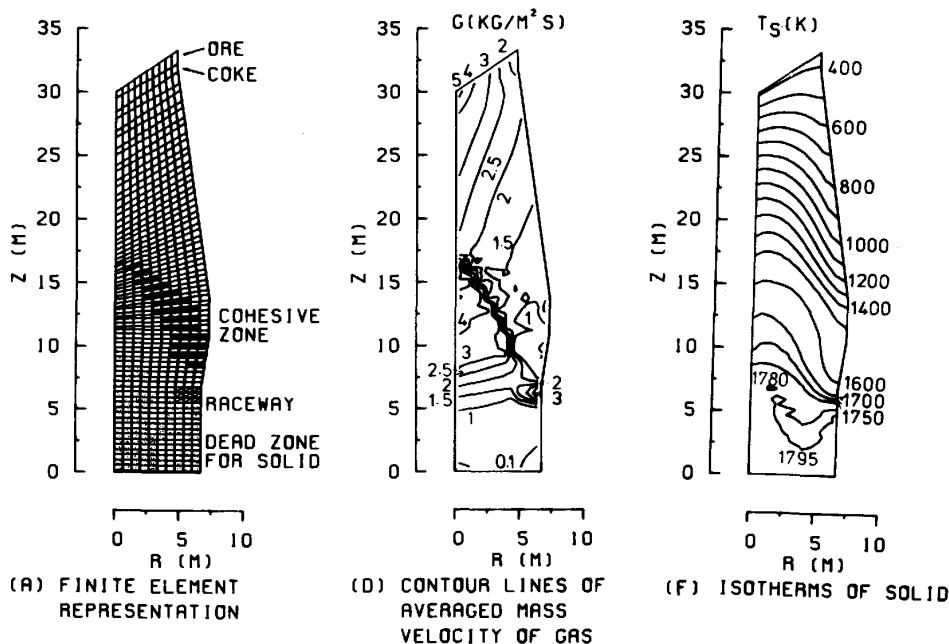


FIG. 6 RESULTS COMPUTED FROM THE SIMULTANEOUS ANALYSIS OF GAS FLOW AND HEAT TRANSFER.⁸⁾

どがある。

伝熱の面からみると、まだあまり研究が進んでいないが、粒子径分布を有する充填層内で生じる気固間の熱交換速度には、大粒子の加熱のおくれが考えられるのでこの面から考えても粒子径はできるかぎり均一に近い方が望ましい。還元反応や熔融の面から考えても同様のことがいえる。

5. 層頂における粒子の充填特性

高炉の層頂で装入された装入物が分布を形成する過程は、

- (1) ベルあるいはベルレス装入装置内部での降下、流出過程
- (2) 装入装置から堆積層にいたる落下過程
- (3) 堆積層表面で傾斜面にそった移動過程

に大別され、種々の研究^{7),10),11)}が進められている。

ガス流れがない場合の鉱石とコークスの堆積角の測定結果によると⁷⁾、1回の装入量やペレットの配合割合によって堆積角が変化している。この堆積角はガス流れの影響を受けるが、ガスが均一に流れる場合にはガス流れのもつ運動のエネルギーに比例して装入物の傾斜角は減少する¹⁰⁾。これは理論的には粒子自身の重力とガスの抗力の合力が作用する方向が内部摩擦角に等しくなった時が斜面の安定限界であると考えれば説明でき、実測値ともよく対応する¹⁰⁾。実炉内においては焼結鉱の通気性が、コークス層より悪いため、コークス層上に焼結鉱を装入する時ガスが炉中心部に集中的に流れるようになり、コークスの流動化現象等によって、堆積角が強く影響を受ける。傾斜面の形成過程において、前述のように、粒度偏析が生じるので、形成された層の通気性のみを考えたとしてもかなり複雑になる。これらの現象は定性的に把握されたばかりであり、定量化は今後の問題であろう。

6. おわりに

高炉内現象の解明には装入物の分布が重要な役割を果たしているが、現在の段階では炉頂での分布形成過程について定性的な現象が理解されるようになったばかりであり、定量的説明は今後の課題である。一方、充填層内の流動、伝熱、反応などについては移動速度論的な基礎に立ったわく組みがつくられており、炉内現象をさらに追求することによって、より実用的なプロセスモデルの作成が可能となるであろう。

参考 文献

- 1) J. Radestock and R. Jeschar : Stahl u. Eisen, 22(1970), p1249.
- 2) J. Kudoh, K. Takeda, J. Yagi and Y. Omori : Ironmaking Proc. 42(1983) p615.
- 3) 栗田興一、下田輝久、米谷章義 : 鉄と鋼 70(1984) ps49.
- 4) C.C. Furnas : Bull. Bur. Mines, No.307,(1929)
- 5) 山田孝雄、佐藤政明、高崎伸吉、嶋村鏡郎、田口整司 : 川鉄技報 6(1974),p16.
- 6) 清水正賢、山口荒太、稲葉晋一、成田貴一 : 鉄と鋼 68(1982),p936.
- 7) 稲葉晋一、西尾浩明 : 高炉内現象とその解析 p44.
- 8) J. Yagi, K. Takeda and Y. Omori : Trans. ISIJ, 22(1982), p884.
- 9) K. Tamura, Y. Okuno, K. Kanamori, K. Yamaguchi and Y. Hayashi : Ironmaking Proc. 43(1984),p407.
- 10) 西尾浩明、有山達郎 : 鉄と鋼 66(1980),p1878.
- 11) Y. Kajiwara, T. Jimbo and T. Sakai : Trans. ISIJ, 23(1983),p1045.