

焼結鉱およびコークスの層空間率と
形状係数の推定

一田 守政*・磯崎 洋一*2・田村 健二*3

Estimation of Void Fraction and Shape Factor in Moving Bed
of Sinter and Coke

Morimasa ICHIDA, Youichi ISOZAKI and Kenji TAMURA

Synopsis:

The influence of size distribution of charged materials in blast furnace on void fraction and shape factor was analyzed by using a experimental apparatus in which void fraction and pressure drop under the counter-current moving bed can be measured. The relation between the void fraction and the particle diameter in uniform-sized coke and sinter is not simple, but the minimum values of the void fraction exist at a certain particle diameter. The minimum values of the void fraction in coke and sinter composed of two component particles are obtained at the range of 0.3 to 0.5 in fractional volume of fine particle. The estimation equations of the shape factor of coke and sinter are obtained so that the measured values of the pressure drop can agree with the calculated value of the pressure drop by Ergun equation. According to these equations, the shape factors of coke and sinter increase from 0.4 to 1.0 with increasing the particle diameters of coke and sinter. The estimation equation of the void fraction of sinter applicable in the actual blast furnace operation was proposed by correcting the estimation equation of the void fraction in randomly packed bed of multi-component particles, proposed by Suzuki, based on the measured values of the void fraction in the moving bed of sinter.

Key words : ironmaking; blast furnace; cold model; void fraction; shape factor; moving bed; coke; sinter.

1. 緒 言

高炉塊状帯でのガス流れや還元挙動を解明するためには、塊状帯での層空間率の定量化が必要である。しかし、高炉内充填層とくに移動層の状態での層空間率の推定に関する知見は少ない。田口ら¹⁾は、固定層での実験により、調和平均径と粒度分布の拡がりの大きさを示す粒度構成指数 I_{SP} より近似的に求めた高炉装入物の層空間率推定式を提案しているが、粒径 D_p の適用範囲が限定されている（コークス： $0.024\text{ m} < D_p < 0.063\text{ m}$ ，焼結鉱： $0.006\text{ m} < D_p < 0.030\text{ m}$ ）ため、小塊コークス、細粒焼結鉱使用時の層空間率の推定には適用できない。

一方、化学工学、粉体工学の分野では、多成分粒子充填層の空間率の推定式が、FURNAS ら²⁾、大内山ら³⁾により提案されている。FURNAS らの推定式では、層を連続体として取り扱っているため配位数との関係が検討され

ていない。また大内山らの推定式では、各粒径の粒子を単独に充填した際の空間率がすべて等しいと仮定しているため、粒径により空間率が異なる粉粒体の場合には、適用上の問題がある。最近、鈴木ら⁴⁾⁵⁾により、配位数推定モデル⁶⁾⁷⁾に基づいた多成分粒子のランダム充填層を対象とした層空間率の推定式が提案された。

そこで、ガスと装入物の向流移動層の層空間率および圧力損失を直接測定できる実験装置を製作し、向流移動層の層空間率および形状係数に及ぼす高炉装入物の粒度構成の影響を解析した。そして、層空間率の測定値に基づいて鈴木らの層空間率推定式を修正し、高炉用焼結鉱に適用できる新しい層空間率の推定式を導出した。

2. 実験方法

2.1 層空間率の測定

層空間率 ϵ は、(1)式に基づいて、装入物の嵩密度

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 11 月 9 日受付 (Received Nov. 9, 1990)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*2 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (現:新日鉄情報通信システム(株)) (Sakai Works, Nippon Steel Corp., Now ENICOM)

*3 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 工博 (Process Technology Research Laboratories Nippon Steel Corp.)

ρ_b と装入物粒子の見掛け密度 ρ_p より求められる。

$$\varepsilon = 1 - \rho_b / \rho_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.1.1 嵩密度の測定

装入物の嵩密度の測定に用いた移動層実験装置の概要を Fig. 1 に示す。本装置は、アクリル製でパイプの内径は 0.6 m である。このパイプの下端より常温の空気が吹き込まれ、上端より装入された装入物はパイプの内部にある昇降式のガイドパイプにより下方に降下する。

本装置の特徴は、向流移動層の条件下で装入物の嵩密度の測定が可能なことであり、実験ではガス流速を空塔速度で約 1 m/s、降下速度を $1.1 \sim 1.7 \times 10^{-3}$ m/s とし、高炉塊状帯の条件に近い実験条件を設定した。ただし、円筒型の本実験装置では、高炉塊状帯で降下時に生じる粒子の水平方向への配列変化は再現していない。実験時に装入物を約 1.1 m 降下させ、降下停止後に装入物の層高 L を測定し、この装入物の層高 L とアクリルパイプの内径 D より、(2)式に基づいて装入物の体積 V を求め、この体積と事前に測定した装入物の質量 M から、(3)式に基づいて装入物の嵩密度 ρ_b を求める。

$$V = L \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_b = M / V \quad \dots\dots\dots (3)$$

2.1.2 見掛け密度の測定

装入物粒子の見掛け密度 ρ_p は、(4)式に基づいて、装入物粒子 1 個あたりの質量 m と装入物粒子 1 個あた

りの体積 v より求められる。

$$\rho_p = m / v \quad \dots\dots\dots (4)$$

焼結鉱の見掛け密度は、ガス流れに影響を及ぼす凹面部を空間として考慮できるパラフィン法により測定した。本研究で用いたパラフィン法では、60°C 前後の温度に調整したパラフィンの中に焼結鉱粒子を浸漬し、焼結鉱粒子の周囲にパラフィンのフィルムを形成させた。コークスの見掛け密度は、JIS K2151 に準拠した水法により測定した。

2.1.3 粒子の平均投影面積の測定

粒子形状を調べるため、画像解析装置 (TOSPIX-II: 東芝製) により、各均一粒径の試料よりそれぞれ 5~100 個選んだ粒子の投影面積を測定した。

2.2 圧力損失の測定

装入物の層高を測定後に、層高 0.6 m の装入物の圧力損失を測定した。ガス流速 (空塔速度) は、0.2~1.1 m/s の範囲で変化させた。

3. 実験結果

3.1 均一粒子移動層の層空間率

供試試料として、高炉装入用のコークスおよび焼結鉱を使用した。コークスおよび焼結鉱の粒度範囲については、Table 1 および Table 2 に示すようにそれぞれ 7 段階に分割し、各粒度範囲の試料を均一粒径試料とみなした。これら均一粒径試料の最大粒径と最小粒径の比は 1.5 前後ではほぼ同じである。

Table 1. Bulk density, apparent density and void fraction in moving bed of uniform-sized coke.

Average diameter D_p (mm)	Particle diameter (mm)	Bulk density ρ_b (g/cm ³)	Apparent density ρ_p (g/cm ³)	Void fraction ε (-)
5.0	4~6	0.525	1.075	0.511
8.5	7~10	0.505	1.039	0.514
12.5	10~15	0.521	1.015	0.487
20.0	15~25	0.532	1.016	0.477
30.0	25~35	0.538	0.992	0.458
42.5	35~50	0.517	1.002	0.485
62.5	50~75	0.495	1.042	0.525

Table 2. Bulk density, apparent density and void fraction in moving bed of uniform-sized sinter.

Average diameter D_p (mm)	Particle diameter (mm)	Bulk density ρ_b (g/cm ³)	Apparent density ρ_p (g/cm ³)	Void fraction ε (-)
4.0	3~5	1.884	3.921	0.520
6.0	5~7	1.895	3.843	0.507
8.5	7~10	1.860	3.559	0.477
12.5	10~15	1.746	3.401	0.487
20.0	15~25	1.668	3.293	0.493
30.0	25~35	1.598	3.190	0.499
42.5	35~50	1.562	3.212	0.514

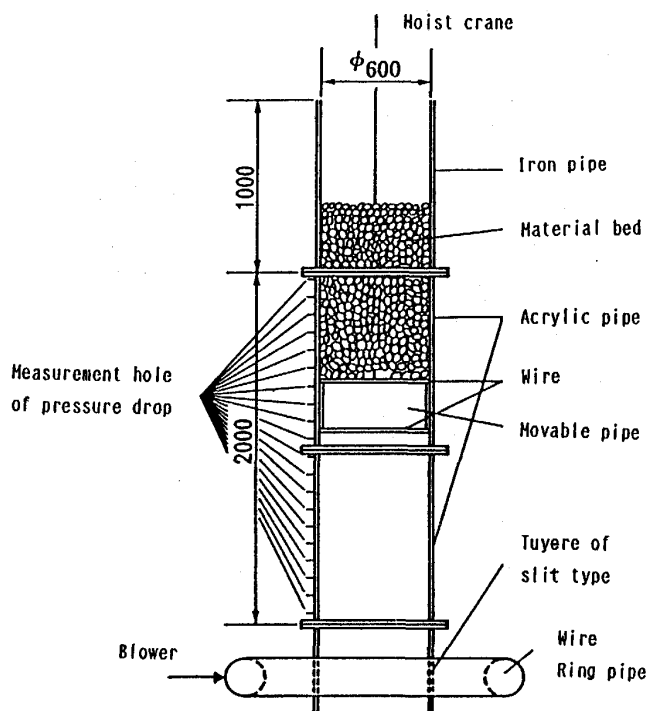
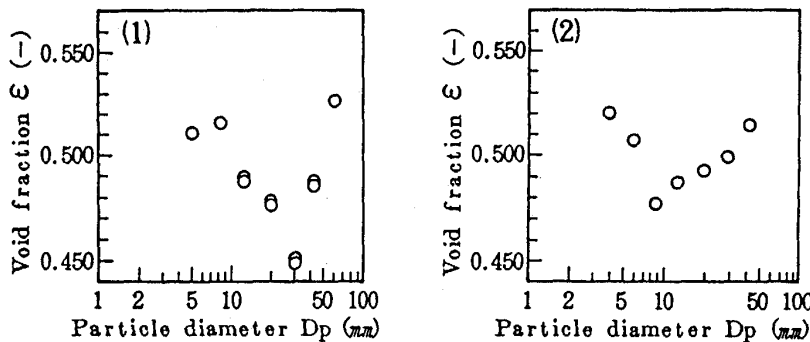
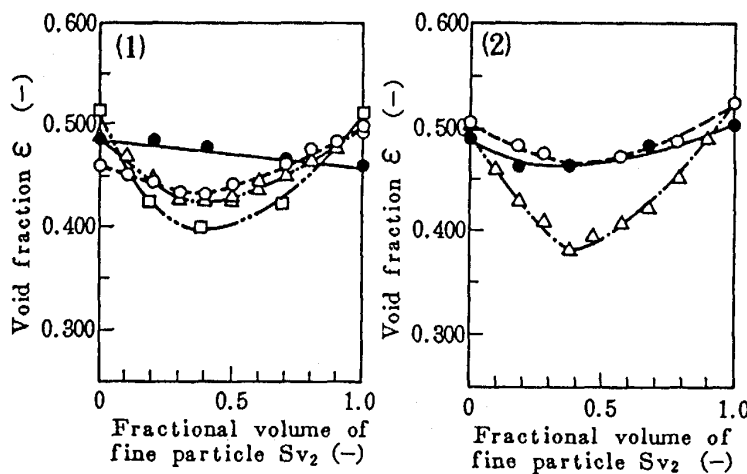


Fig. 1. Experimental apparatus.



(1) Coke (2) Sinter

Fig. 2. Relation between particle diameter and void fraction in moving bed of uniform-sized coke and sinter.



(1) Coke

$D_{p1}(\text{mm})$	$D_{p2}(\text{mm})$	D_{p1}/D_{p2}
● 42.5	30.0	1.4
○ 30.0	12.5	2.4
△ 42.5	12.5	3.4
□ 30.0	5.0	6.0

(2) Sinter

$D_{p1}(\text{mm})$	$D_{p2}(\text{mm})$	D_{p1}/D_{p2}
● 30.0	12.5	2.4
○ 12.5	4.0	3.1
△ 30.0	4.0	7.5

Fig. 3. Relation between fractional volume of fine particle and void fraction in moving bed of coke and sinter composed of two component particles.

均一粒径のコークスおよび焼結鉱の層空間率の測定値を Fig. 2 に示す。層空間率は粒径との単純な直線関係がなく粒径の減少に伴い減少した。そして、ある粒径で最小値をとり、その粒径はコークスの場合には 25~35 mm、焼結鉱の場合には 7~10 mm の粒径である。さらに粒径が減少すると、層空間率は増加した。

3.2 2成分粒子移動層の層空間率

2成分粒子移動層の層空間率の測定値を Fig. 3 に示す。粒径の異なる2成分粒子からなるコークスおよび焼結鉱の層空間率は、細粒の体積混合比率の増加に伴い減少し、細粒の体積混合比率が 0.3 から 0.5 の範囲で最小値を示す。その最小値は、粗粒と細粒の粒径比 D_{p1}/D_{p2} が大きい場合に小さい。細粒の体積混合比率が 0.3 から 0.5 の範囲で最小値を示すという知見は、他の粉粒体を用いた WESTMAN の研究⁸⁾、McGEARY の研究⁹⁾、および、FURNAS の研究¹⁾の結果とほぼ一致している。

4. 考 察

4.1 Ergun 式に基づく形状係数の推定

高炉内でのガスの圧力損失の推定には、(5)式の Ergun 式がよく用いられる。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \left(\frac{\mu(1-\varepsilon)^2}{(\phi D_p)^2 \varepsilon^3} \right) u + 1.75 \left(\frac{\rho(1-\varepsilon)}{(\phi D_p) \varepsilon^3} \right) u^2 \quad (5)$$

そこで、本実験で求めた均一粒子移動層における層空間率と圧力損失の測定値を(5)式に代入し、(5)式を満足するような形状係数 ϕ を求め、Fig. 4 に示す粒子径 D_p との関係より、コークスの場合には(6)式、焼結鉱の場合には(7)式に示すような均一粒子移動層における形状係数の推定式を得た。

コークスの場合

$$\phi = 0.390 \cdot \log_{10}(D_p) + 1.331 \quad (6)$$

焼結鉱の場合

$$\phi = 0.338 \cdot \log_{10}(D_p) + 1.268 \quad (7)$$

焼結鉱、コークスのいずれの場合にも、形状係数は粒径の増加に伴い増加し、0.4~1.0 の範囲にある。なお、図中の●印は、多成分粒子移動層の形状係数の測定値であり、ばらつきはあるものの、(6)式および(7)式が適用できると考えられる。この形状係数 ϕ は、いわゆる形状係数を含む補正係数と考えられる。この補正係数が粒径の増加に伴い大きくなる理由としては、粒径の増加に伴いコークスおよび焼結鉱の形状が球形に近くなるこ

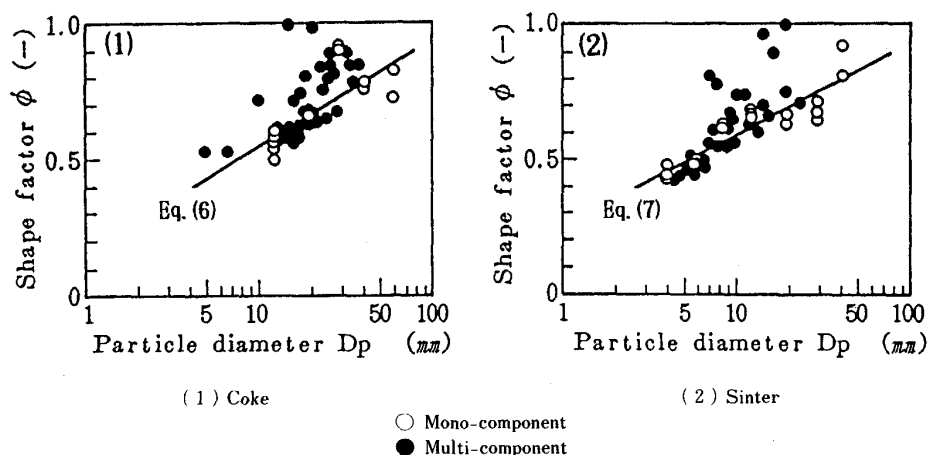


Fig. 4. Relation between particle diameter and shape factor in moving bed of coke and sinter.

とあるいは抵抗係数が小さくなることが考えられる。さらに壁効果の影響が考えられるが、空間率に及ぼす壁効果がほとんど無視できると考えられる D/D_p が 30 以上 (D_p 20 mm 以下) の範囲でも、粒径の増加に伴い補正係数が増加している。したがって、この補正係数の増加を、壁効果によるガスの不均一流れの影響により圧力損失が低下した結果として説明することはできないと考えられる。

4.2 層空間率に及ぼす形状係数の影響

Fig. 2 に示したように、均一粒径のコークスおよび焼結鉱の層空間率と粒径との関係は単純な直線関係になく、層空間率はある粒径で最小値をとり、その粒径はコークスでは 25~35 mm、焼結鉱では 7~10 mm である。

層空間率が大粒径の範囲で粒径の増加に伴い増加する理由については、安息角が増加するため¹⁾と考えられる。内径が最大粒子径の 11 倍以上の円筒容器を用いたコークスと焼結鉱の層空間率に関する田口らの測定値¹⁾も同様な傾向を示しており、壁効果の影響は小さいと考えられる。

つぎに、層空間率が小粒径の範囲で粒径の減少に伴い増加する理由を検討するため、コークスと焼結鉱の球形度を測定した。そして、(8)式に基づき、粒子の平均投影面積 A と等体積球相当径 d_v より粒子の球形度をあらわす指標のひとつである Carman の形状係数を求め、層空間率との関係を解析した。

$$\phi_c = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4A} \dots \dots \dots (8)$$

均一粒径のコークスおよび焼結鉱における Carman の形状係数と層空間率の関係を Fig. 5 に示す。コークスの場合には、層空間率と形状係数の間に負の関係があり、層空間率は形状係数の増大に伴い減少する。なお図中の実線は、粒径が 50~75 mm の範囲のコークスを除いて、コークスの層空間率を形状係数に対して直線近似したものである。一方、焼結鉱の場合には、Carman の形状係数と層空間率の間には、コークスの場合のような負の相関がなく、層空間率は形状係数の変化に対してほぼ一定値である。これは、焼結鉱の場合には、形状係数よりも、ミクロな表面形状が層空間率に大きい影響を及

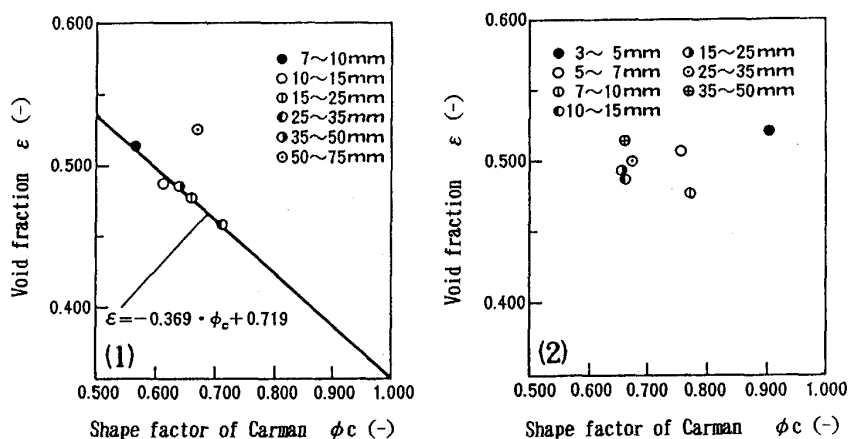


Fig. 5. Relation between shape factor of Carman and void fraction in moving bed of uniform-sized coke and sinter.

ばすためと考えられる。

4.3 粒度偏析を考慮した新しい層空間率推定式の導出

4.3.1 層空間率の測定値と従来の層空間率推定式に基づく計算値の比較

鈴木ら⁴⁾⁵⁾は、均一粒子充填層の空間率、各粒子の体積基準の混合分率および粒径から3成分粒子充填層の空間率を推定するモデルを作成し、そのモデルを多成分粒子系に拡張している。そして、多成分粒子充填層内の粒子 j に着目した場合の層空間率 ε_j は、(9)式に示すように接触粒子 k の面積基準の混合分率 S_{ak} と部分的な層空間率 $\varepsilon(j, k)$ の積算値に比例し、全体の層空間率 ε は、(10)式に示すように ε_j と粒子 j の体積基準の混合分率 S_{vj} の積算値で表されると仮定している。

$$\varepsilon_j = \beta_j \cdot \sum_{k=1}^m S_{ak} \cdot \varepsilon(j, k) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^m S_{vj} \cdot \varepsilon_j \quad (10)$$

ここで β_j は比例定数であり、粒子 j を単独で充填した場合の層空間率の実測値 ε_j より、(11)式で求められる。

$$\beta_j = \varepsilon_j / \varepsilon(j, j) \quad (11)$$

一方、田口ら¹⁾は、コークスおよび焼結鉱の層空間率の推定式として、それぞれ(12)式、(14)式に示すように、調和平均径 $(D_p)_H$ と粒度分布の拡がりの大きさを示す粒度構成指数 I_{SP} の近似式を導出している。

コークスの場合

$$\varepsilon = (0.153 \log (D_p)_H + 0.418)(1 - \Delta\varepsilon) \quad (12)$$

$$\Delta\varepsilon = 1.225 \times 10^{-2} I_{SP}^{0.416} \quad (13)$$

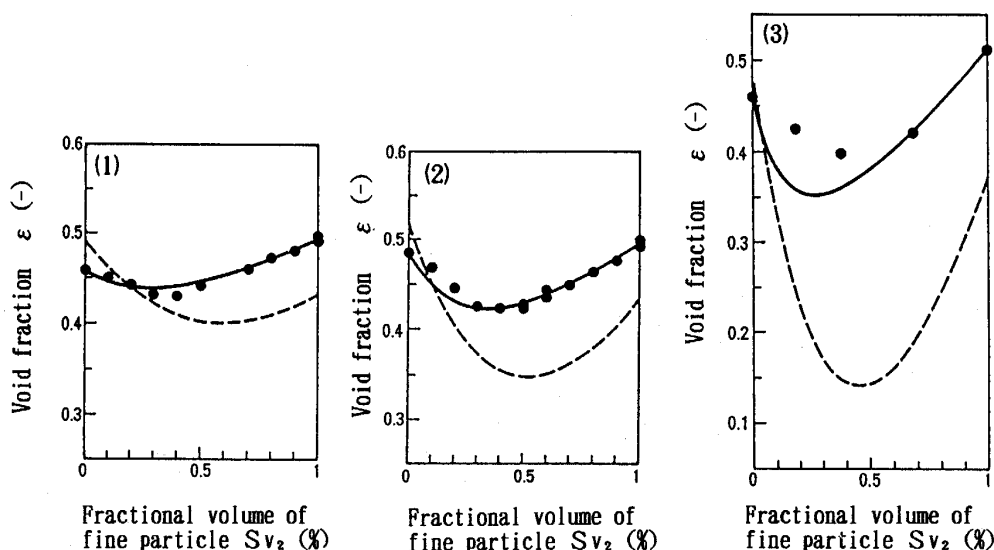
焼結鉱の場合

$$\varepsilon = 0.403(D_p)_H^{0.14}(1 - \Delta\varepsilon) \quad (14)$$

$$\Delta\varepsilon = 1.64 \times 10^{-3} I_{SP}^{1.006} \quad (15)$$

3.2 節で得られたコークス、焼結鉱の2成分粒子移動層における層空間率の測定値と鈴木らのモデル⁴⁾⁵⁾ および田口らのモデル¹⁾ による層空間率の計算値の比較を Fig. 6, Fig. 7 に示す。コークス、焼結鉱とともに、粗粒と細粒の粒径比 D_{p1}/D_{p2} が3以下と小さい範囲では、鈴木らのモデルによる計算値は測定値とよく一致するが、粒径比が3以上の範囲では、細粒の体積混合比率が0.5以下の範囲で、鈴木らのモデルによる計算値は測定値より小さくなる。一方、同一粒径比では、コークスのモデル計算値が、焼結鉱に比べて測定値と良く一致している。粒径比が3以上の場合に、細粒の体積混合比率が0.5以下の範囲で層空間率の測定値がモデル計算値より大きくなる理由は、細粒の比率の小さい場合には、細粒の粒度偏析により細粒と粗粒が均一な混合状態になりにくいためと考えられる。

田口らのモデルによる計算値によると、コークスの場合には、粒径比が6.0の場合に層空間率が0.15以下と推定される場合があり、焼結鉱の場合にも、粒径比が7.5の場合に層空間率が0.30以下となっている。田口らのモデルにおいて、層空間率の計算値が測定値に比較して小さく推定される主な理由は、(12)式、(14)式からわかるように、粒径の減少に伴い層空間率が減少すると



(1) $D_{p1} = 30.0$ (mm) $D_{p2} = 12.5$ (mm) $D_{p1}/D_{p2} = 2.4$ (2) $D_{p1} = 42.5$ (mm) $D_{p2} = 12.5$ (mm) $D_{p1}/D_{p2} = 3.4$ (3) $D_{p1} = 30.0$ (mm) $D_{p2} = 5.0$ (mm) $D_{p1}/D_{p2} = 6.0$
 ● : Measured — : Calculated by SUZUKI model - - : Calculated by TAGUCHI model

Fig. 6. Comparison between void fraction calculated by SUZUKI model and void fraction measured in moving bed of coke composed of two component particles.

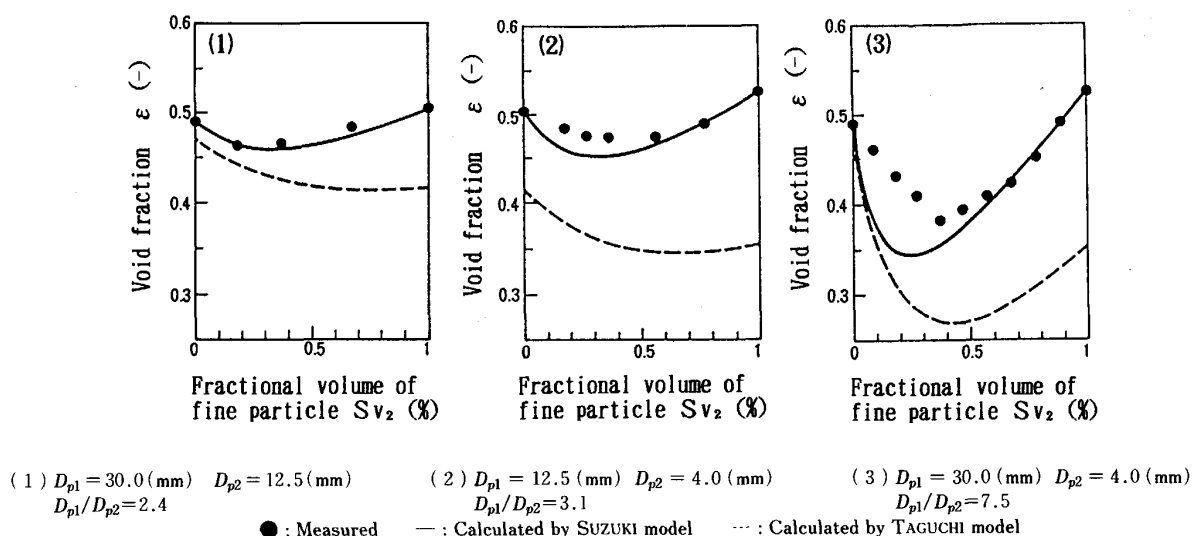


Fig. 7. Comparison between void fraction calculated by SUZUKI model and void fraction measured in moving bed of sinter composed of two component particles.

Table 3. Size distribution of coke and sinter used in actual blast furnace.

	3~5 mm (%)	5~7 mm (%)	7~10 mm (%)	10~15 mm (%)	15~25 mm (%)	25~35 mm (%)	35~50 mm (%)	Harmonic mean diameter (mm)
Coke			1.8	12.8	42.0	38.9	4.5	21.2
Sinter	2.4	9.7	14.8	18.7	28.1	19.4	6.9	13.5

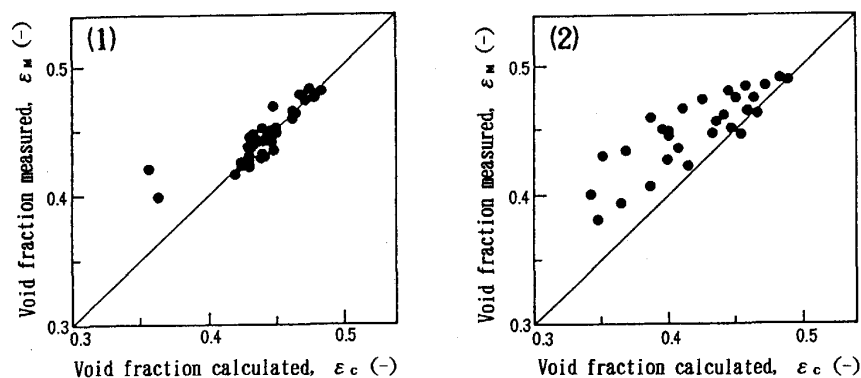


Fig. 8. Comparison between void fraction calculated by SUZUKI model and void fraction measured in moving bed of coke and sinter particles.

仮定しており、細粒の層空間率の計算値が小さく推定されるためと考えられる。

2成分、3成分および Table 3 に示す高炉装入物の粒度分布に近い焼結鉱、コークスをベースにして細粒の比率（細粒焼結鉱の粒径：3~5 mm、細粒コークスの粒径：7~10 mm）を変更した多成分粒子移動層の層空間率の測定値と鈴木らのモデルの計算値の比較を Fig. 8 に示す。コークスの場合には、層空間率の測定値は鈴木らのモデルの計算値とよく一致するが、焼結鉱の場合には、層空間率の測定値は鈴木らのモデルの計算値より大きい。上記の主な理由は、焼結鉱の場合には、コークスに比較して表面形状が複雑なこと、および、細粒の形状

が球形に近く見掛け密度が大きいために粒度偏析が促進されやすく、粗粒と細粒が均一な混合状態になりにくいことに起因すると考えられる。

4.3.2 粒度偏析を考慮した新しい層空間率推定式の導出

鈴木らの層空間率推定モデル⁴⁾⁵⁾を、細粒の偏析現象を考慮したモデルに修正する。鈴木らのモデルでは、(9)式に示すように、各粒子基準の層空間率 ϵ_j は、ランダムに存在する接触粒子 k の面積基準の混合分率 S_{ak} と部分的な空間率 $\epsilon(j, k)$ の積算値に比例すると仮定している。しかし、通常は細粒の偏析現象が発生するため、粗粒の周囲に細粒が存在する確率はランダム充填の場合

よりも小さく、各粒子基準の層空間率の計算には、面積基準の混合分率 S_{ak} よりも小さい値の指数を用いる必要がある。そこで、各粒子基準の層空間率 ε_j は、体積基準の混合分率 S_{vk} を考慮した(16)式で表される指数 S_k と部分的な空間率 $\varepsilon(j, k)$ の積算値に比例すると仮定すると(17)式で表される。ここで、 γ は体積基準の混合分率 S_{vk} にかかる係数である。

$$S_k = (S_{ak} + \gamma \cdot S_{vk}) / \sum_{k=1}^m (S_{ak} + \gamma \cdot S_{vk})$$

$$= (S_{ak} + \gamma \cdot S_{vk}) / (1 + \gamma) \quad \cdots (16)$$

$$\varepsilon_j = \beta_j \cdot \sum_{k=1}^m S_k \cdot \varepsilon(j, k) \quad \cdots (17)$$

(17)式において、従来の接触粒子 k の混合分率 S_{ak} でなく体積基準の混合分率 S_{vk} を考慮した指数 S_k を用いることの物理的意味を明確にするために、Fig. 9 に

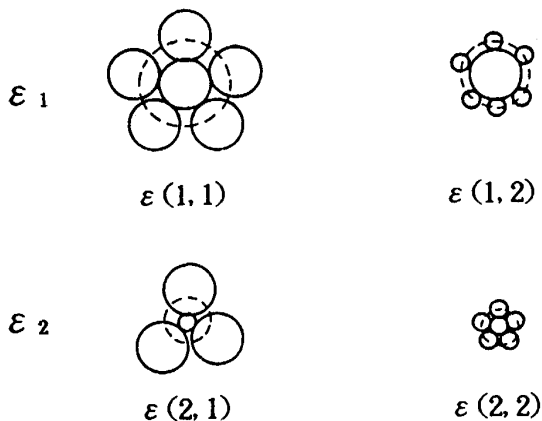


Fig. 9. Type of two component random mixture of spheres.

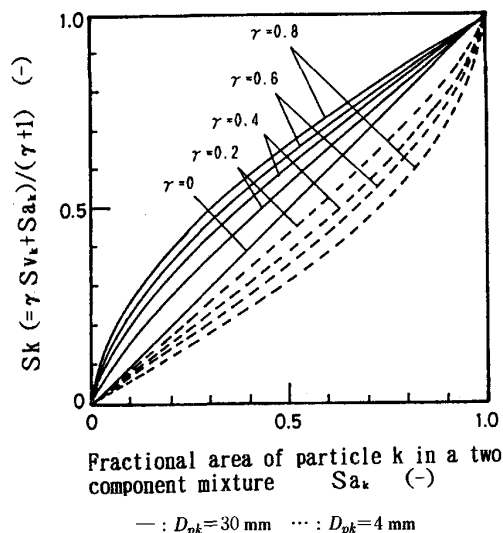


Fig. 10. Relation between fractional area of particle and new index in a two component mixture.

示すような粒径が 30 mm と 4 mm の 2 成分の球形粒子充填層を考え、(16)式で表される新しい指数 S_k と面積基準の混合分率 S_{ak} との関係を Fig. 10 に示す。図より、接触粒子の粒径が 30 mm の場合の S_k は S_{ak} に比較して大きく、接触粒子の粒径が 4 mm の場合の S_k は S_{ak} に比較して小さいことがわかる。したがって、粗粒子のまわりに細粒子が接触した場合の相対的に小さい層空間率 (Fig. 9 の $\varepsilon(1, 2)$) にかかる係数 S_k は S_{ak} より小さくなり、細粒子のまわりに粗粒子が接触した場合の相対的に大きい層空間率 (Fig. 9 の $\varepsilon(2, 1)$) にかかる指数 S_k は S_{ak} より大きくなるため、全体の層空間率 ε の推定値は(10)式から得られる値より大きくなる。このように、(16)式で表される新しい指数 S_k を鈴木らの層空間率推定モデルに導入することにより、粗粒子と細粒子が分離する偏析現象が生ずる場合にも、層空間率を精度良く推定できる。

本来、この係数 γ は、細粒の偏析の程度によって変化するため、偏析に大きい影響を及ぼすと考えられる細粒焼結鉱の比率によっても大きく変化する。そこで、Table 3 に示した高炉装入物の粒度分布に近い焼結鉱をベースにして、粒径が 3~5 mm の細粒焼結鉱の比率を 20, 40, 60% とした場合の層空間率の測定値と計算値との差異を係数 γ に対して求めた。その結果を Fig. 11 に示す。図から、粒径が 3~5 mm の細粒焼結鉱の比率の増加に伴い、層空間率の計算値と測定値が一致するための係数 γ が小さくなることがわかる。上記の粒度分布の焼結鉱に、Fig. 11 の知見に基づいて係数 γ を適切に設定した新しい層空間率推定式による層空間率の計算値と測定値の比較を Fig. 12 に示す。図から、鈴木らの

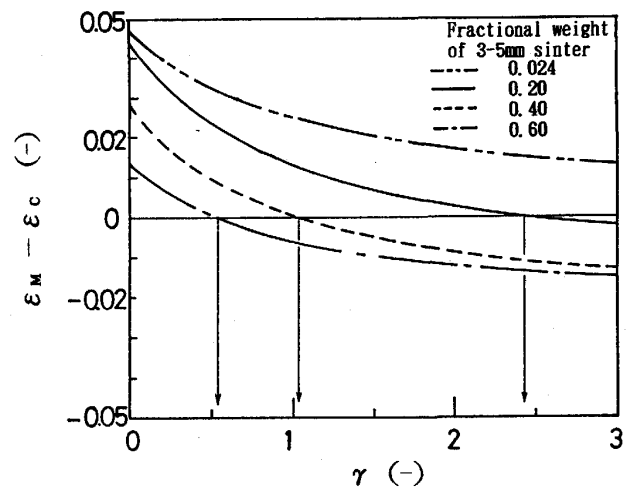


Fig. 11. Relation between coefficient γ and difference of void fraction measured from void fraction calculated $\varepsilon_M - \varepsilon_C$.

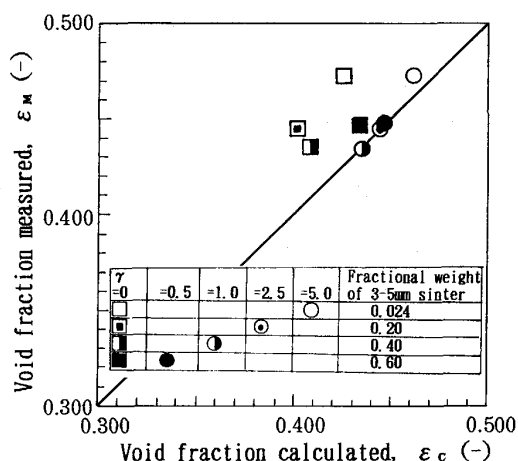


Fig. 12. Comparison between void fraction calculated by this model and void fraction measured in moving bed of sinter used in actual blast furnace.

層空間率推定式を修正した新しい層空間率推定式による層空間率の計算値と測定値がよく一致しており、高炉装入物の粒度分布に近い焼結鉱を用いた向流移動層の層空間率は、この新しい層空間率推定式によって精度良く推定できることが判明した。

5. 結 言

ガスと装入物の向流移動層の層空間率および圧力損失を直接測定できる実験装置を用いて、向流移動層の層空間率および形状係数に及ぼす高炉装入物の粒度構成の影響を解析し、以下の知見を得た。

(1) 均一粒径のコークスおよび焼結鉱の層空間率は、粒径との単純な関係になく、ある粒径で最小値を示す。

(2) 粒径の異なる2成分のコークスおよび焼結鉱の層空間率は、細粒の体積混合比率が0.3から0.5の範囲で最小値を示す。

(3) 圧力損失の測定値と Ergun 式に基づく圧力損失の計算値が一致するように、コークスと焼結鉱の形状係数の推定式を得た。その推定式によると、コークス、焼結鉱の形状係数は粒径の増加に伴い0.4から1.0の範囲を増加する。

(4) 多成分粒子のランダム充填層を対象とした鈴木らの層空間率の推定式により、高炉用コークスの層空間率を精度良く推定することができる。

(5) 多成分粒子のランダム充填層を対象とした鈴木ら

の層空間率の推定式を、移動層の層空間率の測定結果に基づいて修正し、高炉用焼結鉱に適用できる新しい層空間率の推定式を導出した。

記 号

- A : 平均投影面積 (m^2)
- D : パイプの内径 (m)
- D_p : 粒径 (m)
- $(D_p)_H$: 調和平均径 (m)
- d_v : 等体積球相当径 (m)
- I_{SP} : 粒度分布の拡がりの大きさを示す粒度構成指数 (—)
- L : 装入物の層高 (m)
- M : 装入物の質量 (kg)
- m : 装入物粒子1個あたりの質量 (kg)
- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- S_{ak} : 接触粒子 k の面積基準の混合分率 (—)
- S_{vk} : 接触粒子 k の体積基準の混合分率 (—)
- u : 空塔ガス流速 (m/s)
- V : 装入物の体積 (m^3)
- v : 装入物粒子1個あたりの体積 (m^3)
- γ : 体積基準の混合分率 S_{vk} にかかる係数 (—)
- ε : 層空間率 (—)
- ε_j : 多成分粒子充填層の粒子 j に着目した場合の層空間率 (—)
- $\varepsilon(j, k)$: 多成分粒子充填層内の着目粒子周囲の部分的な層空間率 (—)
- $\Delta \varepsilon$: 粒度分布の拡がりによる層空間率の減少率 (—)
- μ : ガス粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- ρ : ガス密度 (kg/m^3)
- ρ_b : 装入物の嵩密度 (kg/m^3)
- ρ_p : 装入物粒子の見掛け密度 (kg/m^3)
- ϕ : 形状係数 (—)
- ϕ_C : Carman の形状係数 (—)

文 献

- 1) 田口整司, 宮崎伸吉, 岡部俠児: 学振 54 委-No. 1315 (昭和 49 年 2 月)
- 2) C. C. FURNAS: Ind. Eng. Chem., **23** (1931), p. 1052
- 3) N. OUCHIYAMA and T. TANAKA: Ind. Eng. Chem., Fundam., **20** (1981), p. 66
- 4) 鈴木道隆, 八木 章, 渡辺球夫, 大島敏男: 化学工学論文集, **10** (1984), p. 721
- 5) 鈴木道隆, 市場久貴, 長谷川勇, 大島敏男: 化学工学論文集, **11** (1985), p. 438
- 6) M. SUZUKI and T. OSHIMA: Pow. Tech., **35** (1983), p. 159
- 7) 鈴木道隆, 牧野和孝, 山田昌治, 井伊谷鋼一: 化学工学論文集, **6** (1980), p. 59
- 8) A. E. R. WESTMAN and H. R. HUGILL: J. Am. Ceram. Soc., **13** (1930), p. 767
- 9) R. K. MCGEARY: J. Am. Ceram. Soc., **44** (1961), p. 513