

高炉レースウェイの空間構造

野沢 健太郎*・上條 綱雄*・清水 正賢*

A Quantitative Description of Void Distributions in Blast Furnace Raceway

Kentaro NOZAWA, Tsunao KAMIJO and Masakata SHIMIZU

Synopsis : A void distribution in a blast furnace raceway significantly affects the results of numerical simulations for the raceway combustion zone. Despite its importance, technical difficulty in measuring this physical property had left a quantitative description out of reach.

In the present paper, the direct measurement of raceway void distributions was attained in a three-dimensional cold model with the aid of laser sensors. Measured void fractions clarified the typical distribution pattern in a raceway, showing the inlet region with relatively high and constant void fractions (the gas core region) from the tuyere tip to the middle part of the raceway, followed by the linear decrease of voidage toward the raceway boundary. The extent of the gas core region was used to achieve the non-dimensional representation for the axial void distribution, and was successfully estimated by the newly established correlation between a gas core length (D_M), a tuyere diameter (D_T) and a raceway factor (R_f), expressed by $D_M/D_T = 0.0963R_f^{0.546}$.

Key words : blast furnace raceway ; void distribution ; gas core ; raceway factor.

1. 緒言

高炉羽口前に形成されるレースウェイは、炉への熱および還元ガスの供給源であり、近年、主流となりつつある微粉炭多量吹込み時には微粉炭燃焼の大部分を担う、高炉安定操業の鍵となる重要な反応場である。とりわけレースウェイ形状(レースウェイ深度、幅、高さ)については、炉下部ガス流れ、炉芯活性度および装入物降下に大きな影響を及ぼすと考えられるため、従来より、冷間模型において、あるいは実炉を含む熱間条件でプローブを用い、レースウェイの直接観察^{1)~13)}、それら実測値から導いた無次元相関式によるレースウェイ形状の記述^{1)~3)6)~9)11)~13)}、さらにはレースウェイ内の力学的バランスを考慮する数値シミュレーションによるレースウェイ境界の記述^{14)~16)}等、数多くの研究報告が成されてきた。しかしながら、レースウェイ空間内の粒子充填構造については、実測の難しさもあり、これまで精緻に検討された例は少ない¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁷⁾。Apteら¹⁷⁾は二次元冷間模型と数値シミュレーションの結果から、レースウェイの空間構造が、レースウェイ内ガス流れおよびレースウェイからのガス分配に大きく影響する事を指摘している。また、微粉炭多量吹込み時に重要な因子となるレースウェイ内のコークス粉化挙動は、レースウェイ内のコークス層充填構造と関連している可能性があり¹⁸⁾、さらに、微粉炭燃焼率等を数学モデルを用いて精度よく推算する場合には、レースウェイ内を高速で飛翔するコークス粒子層の空間構造

を把握し、微粉炭と競合反応するコークス粒子の反応界面積を定量化することが不可欠である¹⁹⁾。

そこで、本研究では、レーザー光の透過率からレースウェイ内の局所空間率を推定する方法を新たに開発し、三次元冷間模型による測定を実施することにより、レースウェイ高速燃焼場を形成するコークス充填層の空間構造、および、空間率分布の定量化法について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究に用いたアクリル模型をFig. 1に示す。幅0.15m、奥行き0.50mおよび高さ0.75mであり、底部より0.20mの位置に円形羽口を設置した。装置側壁部にはプローブ(外径0.005mのレーザーガイド)挿入孔を設け、ここから投光用ガイドおよび受光用ガイドをレースウェイ側面へ挿入する。レーザーガイド両先端間には外径0.001mのレーザービームが走査しており、このビームの透過率を測定することで、その位置での空間率を推定した。レーザー出力の原信号は電圧で与えられ、レーザービームが全透過時に最高出力、完全遮へい時に0となる。本研究では測定時間(3秒間)内に得られた出力値を全て積分し平均出力を求め、これを透過率Aと定義した。また、アナログ信号のエイリアシングの影響を避けるために、敷居値(最高出力値の50%と仮定)を設け、出力がこの敷居値以上を示す時間の測定時間に占め

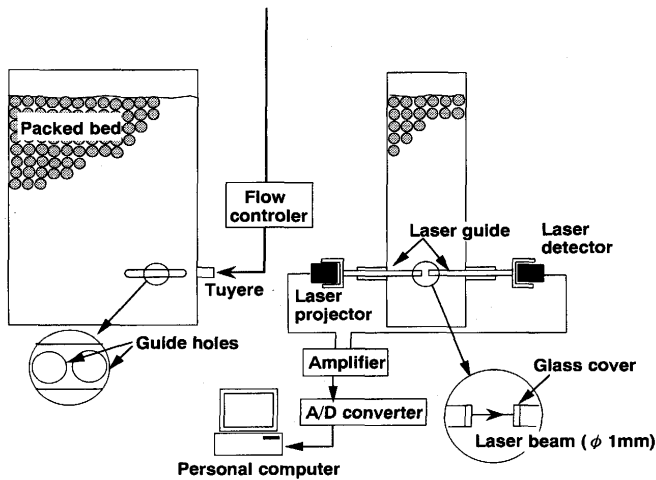


Fig. 1. Experimental apparatus.

る割合を求め、これを透過率Bと定義した。透過率A, Bについてそれぞれ校正表を作成し、一回の測定で、透過率A, Bからそれぞれ空間平均および時間平均空間率を同時に推算した。本研究の条件では、両空間率の差は±1%以下であり、両者の平均を出力結果とした。レースウェイ内のレーザー透過率は、投光用、受光用両ガイドの先端間距離、充填粒子径および形状により影響される。したがって、それぞれの充填粒子について空間率が既知の状態を再現し、レーザービームの透過率と空間率の校正表を作成してビーム透過率から局所空間率を推定した。ここで、校正表の作成に際しては、Fig. 2に示すように、本研究に用いた充填粒子と形状が同じで密度が 1000kg/m^3 に近いポリスチレン粒子を内径 0.1m の円筒容器内に充填し、所定量の水を加え、スターラーを用いて均一に分散させることで所定の空間率(水の占有率)を再現した。この円筒容器の側壁からは模型装置と同じ状態にガイドを設置し透過率を測定した。空間率(充填粒子量と水量)を変化させ、この操作を繰り返すことで各充填粒子についての校正式を導いた。この校正式を測定プログラム中に組み込むことで、ほぼリアルタイムで空間率の出力を得ることができた。

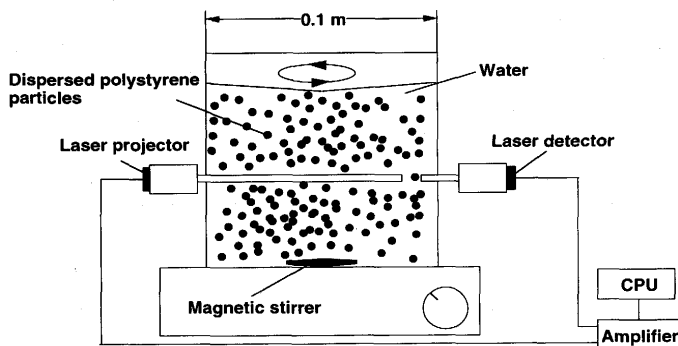


Fig. 2. Schematic representation of calibration of void fraction measurement by the laser sensor system.

Table 1. Experimental conditions.

Case	Q_g [m ³ /s]	P_B [kPa]	H_B [m]	D_T [m]	d_p [m]	ϕ_p [-]	ρ_p [kg/m ³]	Particle type
1	0.00588	116.5	0.25	0.008	0.0030	1.0	270	Styrene foam sphere
2	0.00700	121.5	0.25	0.008				
3	0.00812	128.0	0.25	0.008				
4	0.00700	198.0	0.25	0.006				Polystyrene bead
5	0.00700	116.0	0.25	0.010				
6	0.00700	121.6	0.45	0.008				
7	0.00700	121.1	0.20	0.008	0.0035	0.86	960	Polystyrene pellet
8	0.00812	127.0	0.20	0.008				
9	0.00588	174.0	0.20	0.006				
10	0.00700	198.0	0.20	0.006				Coke particle
11	0.00812	223.4	0.20	0.006				
12	0.00700	121.0	0.20	0.008	0.0026			
13	0.00700	200.0	0.20	0.006				
14	0.20000	110.0	2.50	0.080	0.0140	0.65	900	

2・2 実験条件

実験条件をTable 1に示す。Case1~13は冷間模型の結果であり、ガス流量 Q_g は $0.0058\sim 0.00812\text{ [m}^3/\text{s]}$ 、羽口径は $0.006\sim 0.01\text{ [m]}$ に変化させた。充填粒子には発泡スチレン球、ポリスチレンビーズおよびポリスチレンペレットを使用し、密度、形状、大きさの影響を評価できるようにした。また、先に報告した熱間試験¹⁹⁾²⁰⁾において、オールコークス燃焼時のレースウェイ内羽口軸上空間率を実測しており、Case14にその条件を示す。

2・3 測定方法

本研究における冷間模型実験では、まず最初に静止充填層を形成しておき、送風開始と同時に空間率測定を開始した。測定周期は 5 kHz に設定し、連続した3秒間の測定値の平均値を記録するとともに、最長30分間の時系列データを取得した。Fig. 3は羽口軸上で測定した空間率の時系列変化を示す一例である。一般に羽口近傍から空間が形成され、羽口軸方向における羽口先端からの距離(x)が大きくなるほど、安定した空間を形成するまでの時間が長くなる。また、充填層の高さにより、空間の形成パターンは異なるものの、安定時の空間率の値はほぼ同じであった。本研究においては空間率の時系列データに着目し、その値が安定した時点での出力を空間率の局所値として、その分布を求めた。

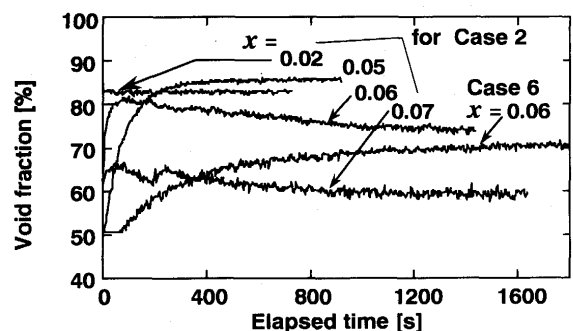


Fig. 3. Relationship between void fraction and elapsed time after blow-in on the tuyere axis.

3. 実験結果と考察

3.1 レースウェイ空間構造

Fig. 4 (a), (b)は2.1.実験装置の項で述べたレーザーガイドをレースウェイ内羽口近傍から境界部にかけて5 mmピッチで移動させ、羽口レベルにおける水平方向の二次元空間分布を求めた結果である。Fig. 4 (a), (b)は、それぞれ充填粒子として低密度の発泡スチレン粒子およびポリスチレンビーズを用いた場合である。(a), (b)とも羽口先からレースウェイ中間部にかけてはガスの慣性力主体で形成されると思われるガスのコア(空間率85%以上)が存在しており、このガスコア境界からレースウェイ境界にかけては空間率が徐々に減少することが明らかとなった。

3.2 羽口軸上空間率分布

レースウェイ燃焼場を対象にした一次元数学モデルを構築する際、レースウェイ内羽口軸上におけるコークス層の空間率分布が、モデル計算精度を左右する重要なパラメーターとなる¹⁹⁾。ここでは、各実験条件について羽口軸上空間率分布を整理し、無次元相関式を用いて定量化した。

3.2.1 ガス流量の影響

Fig. 5はガス流量を0.0058~0.00812 [m³/s]まで変化させたときの羽口軸上の空間率分布を示すものである。先述したガスコア内ではほぼ一定の空間率を有しており、局所空間率はガス流量の増大にあまり影響されない。しかしながら、ガスコアの長さは、ガス流量と明確に相関しており、羽口部でのガスの線速が羽口軸位置でのガスのペネトレーションに密接に関係していることが予想される。一方、ガスコア境界からレースウェイ端にかけては、コークス粒子

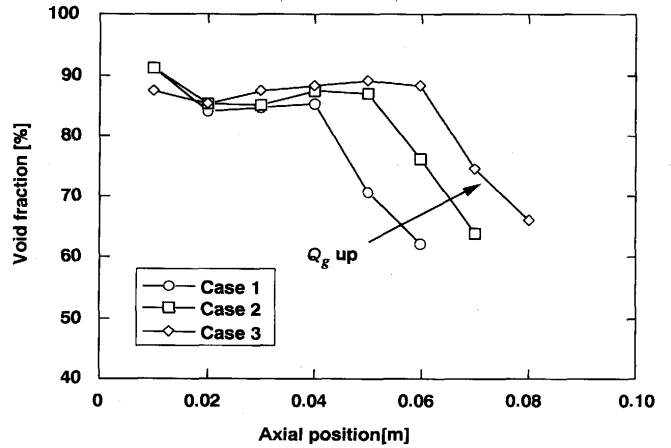


Fig. 5. Effects of gas flow rate on axial profiles of void fraction.

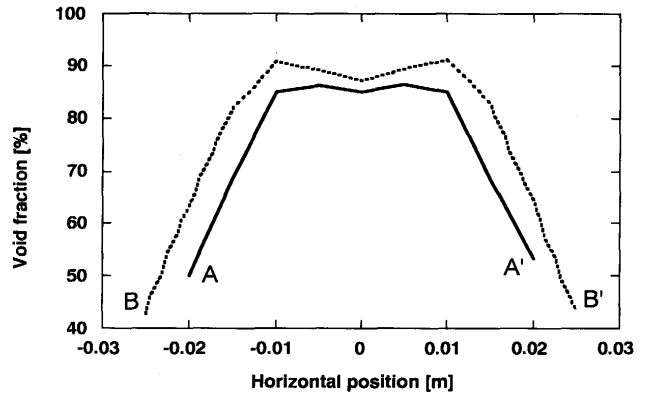


Fig. 6. Radial distributions of void fraction for cross-sections A-A' and B-B' indicated in fig.4(a).

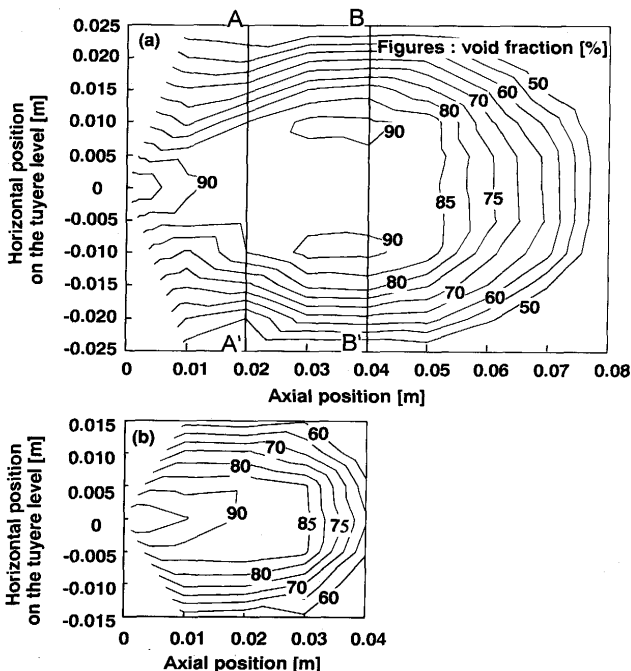


Fig. 4. Examples of two-dimensional distribution of void fraction on the tuyere level.

の存在確率が徐々に増大するため空間率が減少する。また、特徴として、この領域では空間率が直線的に減少しており、その減少の傾きはガス流量によらずほぼ一定であった。

またFig. 4 (a)中のA-A', B-B'上の空間率分布をFig. 6に示す。レースウェイ側面においてもガスコア内は、ほぼ一定の空間率を示し、空間率の値はレースウェイ側面端に向けて直線的に減少しており、羽口軸上における分布と基本的には同様の挙動を示すことが判明した。

3.2.2 羽口径の影響

Fig. 7は羽口軸上空間率分布におよぼす羽口径の影響を示した例である。羽口直近部では羽口径増大により空間率が若干高くなる傾向を示すものの、ガスコア全体としてはほぼ一定の空間率を維持することがわかる。一方、ガスコアの長さは、羽口径縮小により増大しており、ガス流量増大時と同様の結果を示した。また、ガスコア境界からレースウェイ端にかけて、空間率は直線的に減少しており、その減少の傾きについても羽口径によらずほぼ一定値を示した。

3.2.3 充填粒子の影響

羽口径、ガス流量その他の衝風条件がほぼ一定の状態、充填粒子の影響を検討した結果をFig. 8に示す。比較的高密

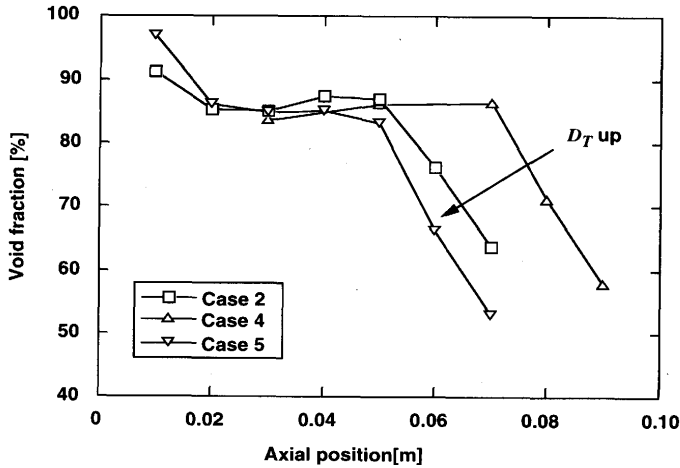


Fig. 7. Axial profiles of void fraction for different diameters of tuyere exit.

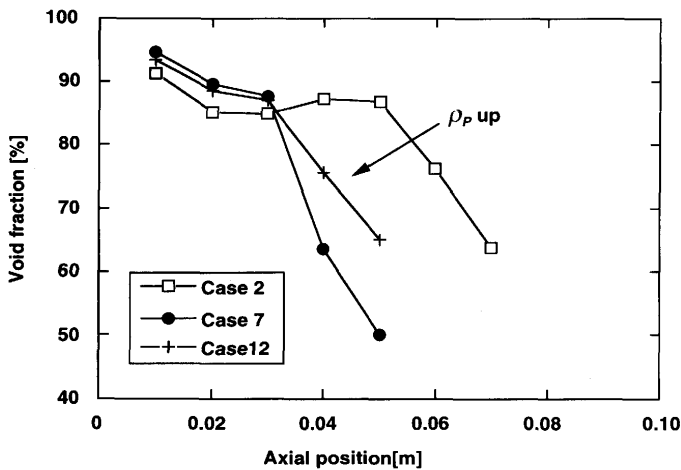


Fig. 8. Axial profiles of void fraction for different types of packing materials.

度粒子を用いたCase7, 12の場合、ガスコアは大きく縮小しており、レースウェイ自体も縮小していることが推察される。ガスコアの空間率は、真球状の充填粒子を用いたCase2に対し、ビーズ、ペレット型のCase7, 12の方が若干高く、

ガスコア部の空間形成に粒子形状が影響している可能性が示唆された。また、熱間試験¹⁹⁾²⁰⁾においても、レースウェイ燃焼帯に水冷プローブを挿入し、プローブ先端に存在するコークス粒子の存在確率を画像解析により求め(Fig. 9 (a)), レースウェイ内の空間率を推定した。この結果をFig. 9 (b)に示す。Fig. 9 (b)においても、羽口近傍には、ほぼ一定の高空間率を示すガスコアが存在し、さらに、ガスコア境界からレースウェイ端に向けて空間率が直線的に減少していることから、冷間模型での実測結果と基本的に同一の分布パターンを有しているものと考えられる。ただし、熱間試験時にはコークス粒子の燃焼、粒子形状および充填層降下²⁰⁾があるため、ガスコアの空間率は、冷間模型の結果よりも高くなる傾向を示すものと推察された。

3.2.4 羽口軸上空間率分布の定量化

3.2.1から3.2.3の結果から、羽口軸上空間分布は種々の衝風条件や充填条件によらず、ガスの慣性力主動域である高空間率のガスコア(空間率ほぼ一定)と、ガスコア境界からレースウェイ境界に存在する粒子の旋回域(空間率が直線的に減少)の二つの領域により特徴づけられることが明らかとなった。したがって、空隙率分布を表現するためには、ガスコアの長さを定量化する必要がある。

従来、レースウェイ深度を推算する手段として、冷間試験、熱間試験の実測の深度をレースウェイファクター^{2)3)6)~9)11)13)}を用いて整理した経験式が、広く使われてきた。ガスコアの長さについても、レースウェイ深度と同様、衝風エネルギーと充填粒子に作用する重力のバランスにより記述可能と考えられる。本報では、Nomura¹³⁾が提唱したレースウェイファクターに対し、新たに粒子形状の影響を考慮した(1)式の無次元数を採用し、ガスコア長の整理を試みた。

$$R_f = \rho_g (Q_g/A_t)^2 (P_o/P_B) (T_f/298) (1/gd_p \rho_p \phi_p) \dots (1)$$

Fig.10の縦軸は、今回の実験条件において、実測されたガスコアの長さ(D_M)を羽口径(D_T)で除して無次元化した値を示

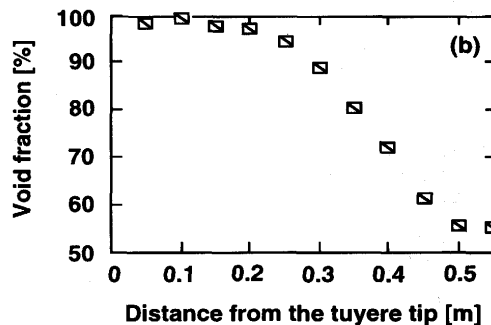
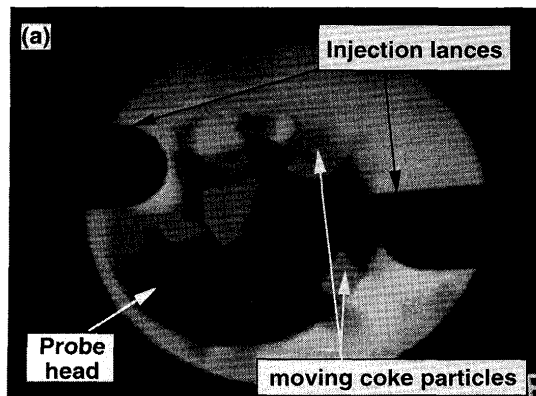


Fig. 9. Measurement of void fraction in the raceway. (a) obtained image from the end of the blowpipe. (b) distribution of void fraction.

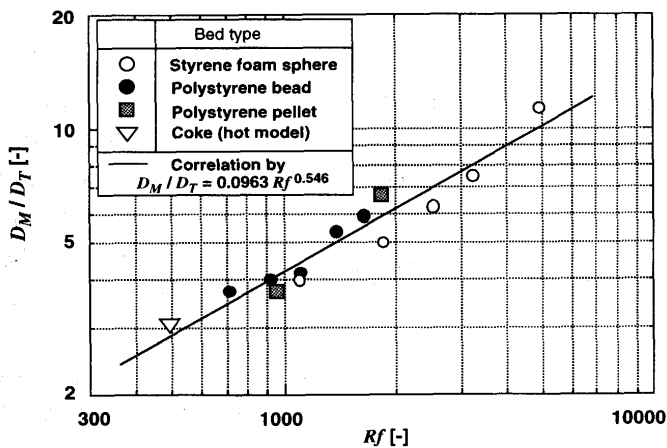


Fig. 10. Non-dimensional expression of D_M as a function of raceway factor R_f .

し、横軸はその条件におけるレースウェイファクターを(1)式で計算したものである。なお、中村ら⁸⁾の検討結果から、熱間試験の条件ではコークスの粒径を初期粒子径の60%と仮定した。Fig.10から、種々の衝風条件、充填条件について、ガスコアの長さは(1)式のレースウェイファクターで整理可能であり、図中実線で示される次式により与えることができた。

$$D_M/D_T = 0.0963 R_f^{0.546} \dots\dots\dots (2)$$

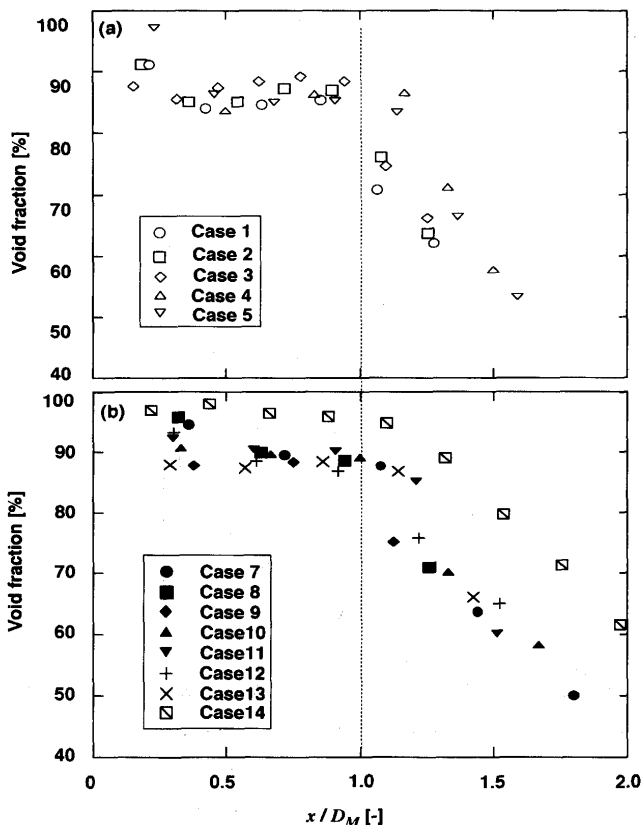


Fig. 11. Void fraction distribution for non-dimensional axial position defined by x/D_M .

今回の実験条件に対して、(1)、(2)式を用いてガスコアの長さを計算し、この計算結果により無次元化した軸位置(x/D_M)で、軸方向の空間率分布を整理した。結果をFig. 11に示す。Fig.11(a)は充填粒子としてCase1~5の低密度の発泡スチレン粒子($\rho_p=270\text{kg/m}^3$)を用いた場合、Fig.11(b)はCase7~13のポリスチレン粒子($\rho_p=960\text{kg/m}^3$)および熱間試験の結果(Case14)を示すものである。多少のパラッキはあるものの、軸方向空間率分布は、種々の衝風条件、充填条件に関わらず、ガスコアの長さを規定することで、一様に整理可能であることが判明した。Case14の熱間試験の場合、粒子形状、燃焼、充填層の降下等の影響で空間率が高くなっているが、ガスコア長さで整理した分布パターンは、冷間模型の結果とほぼ同じである。

以上の結果から、羽口軸上空間率分布は概ね次式で近似可能となる。

$$\epsilon = \epsilon_0 : 0 < x < D_M \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 - (\epsilon_0 - \epsilon_B)(x - D_M)/(D_R - D_M) : D_M < x < D_R \quad (4)$$

(3)、(4)式において、レースウェイ深度(D_R)については従来から多くの推定式が報告されており¹²⁾、冷間、熱間試験ともに推算可能である。また、今回の実験条件では、ガスコアの空間率(ϵ_0)は、充填粒子形状による影響が認められた。Fig.12に結果を示す。充填粒子形状係数(ϕ_p)が0.65~1.0の範囲で、ガスコア内空間率は次式で近似できた。粒子形状が真球に近くなるほどガスコア内の空間率が低くなる傾向を示した。

$$\epsilon_0 = 115.3 - 28.7\phi_p \dots\dots\dots (5)$$

しかしながら、ガスコアの空間率は、充填粒子の形状以外にも、レースウェイ内での粒子燃焼の有無、充填層降下の有無、羽口径、粒子径等により影響されると考えられ、その定量化手法はガスコアの形成メカニズムの解明を含め今後の課題といえる。

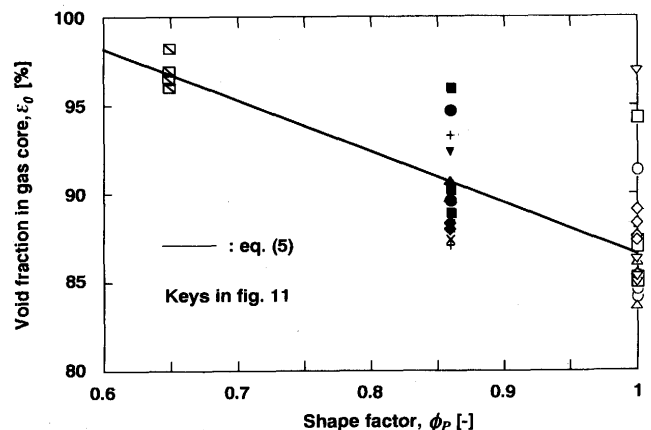


Fig. 12. Relationship between ϵ_0 and ϕ_p .

4. 結言

レースウェイ内での反応挙動を正確に記述するうえで不可欠なレースウェイ内の空間分布を、新たに開発したレーザー測定システムで実測し、空間構造および空間率分布の定量化法について検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

(1) 静止充填層にレースウェイを形成させる場合、空間は羽口近傍より発達し、レースウェイ境界に近い位置ほど、安定した空間形成に要する時間が長くなる。

また、充填層の高さにより空間の形成パターンは異なるが、安定時の空間率の値に対する、充填層高さの影響は小さい。

(2) レースウェイの羽口近傍では、ガスの慣性力による高空間率のガスコアが形成され、その後、レースウェイ端に向かって空間率が直線的に減少する粒子の巡回域が形成される。

(3) 羽口軸上の空間率分布を規定するガスコアの長さは、次式で整理することができた。

$$D_M/D_T = 0.0963 R_f^{0.546}$$

ただし、

$$R_f = \rho_g (Q_g/A_t)^2 (P_0/P_B) (T_f/298) (1/gd_p \rho_p \phi_p)$$

記号

A_t	: 羽口断面積 [m ²]
D_M	: ガスコア長 [m]
D_R	: レースウェイ深度 [m]
D_T	: 羽口径 [m]
d_p	: 充填粒子径 [m]
g	: 重力加速度 [m/s ²]
H_b	: 羽口レベルからの充填層高さ [m]
P_0	: 大気圧 [kPa]
P_B	: 送風圧 [kPa]
Q_g	: 298Kにおけるガス流量 [m ³ /s]
R_f	: レースウェイファクター [-]

T_f	: レースウェイ内温度 [K]
x	: 羽口からの距離 [m]
ϵ	: 局所空間率 [%]
ϵ_0	: ガスコア内空間率 [%]
ϵ_B	: ガスコア内空間率 [%]
ϕ_p	: 充填粒子形状係数 [-]
ρ_g	: 充填粒子密度 [kg/m ³]
ρ_p	: 送風ガス密度 [kg/m ³]

文 献

- 1) J.F.Elliott, R.A.Buchanan and J.B.Wagstaff: J.Met.,4 (1952), p.709
- 2) J.B.Wagstaff: J.Met.,5 (1953), p.895
- 3) J.Taylor, G.Lonie and R.Hay: J.Iron Steel Inst.,187 (1957), p.330
- 4) F.W.Hillnutter, H.Kister and B.Kruger: Ironmaking Proc., Iron Steel Soc. AIME,34 (1975), p.368
- 5) M.Tate, Y.Kuwano, K.Suzuki, M.Matsuzaki, E.Tsuji, T.Chan, H.Gou and K.Honda: Trans. ISIJ, 16 (1976), p.447
- 6) 羽田野道春, 福田充一郎, 竹内正幸: 鉄と鋼, 62 (1976), p.25
- 7) 羽田野道春, 平岡文章, 福田充一郎, 増池 保: 鉄と鋼, 62 (1976), p.505
- 8) 中村正和, 杉山 喬, 鶴野建夫, 原 行明, 近藤真一: 鉄と鋼, 63 (1977), p.28
- 9) M.Hatano, B.Hiraoka, M.Fukuda and T.Masuike: Trans. ISIJ, 17 (1977), p.102
- 10) M.Nakamura, Y.Togino and M.Tateoka: Ironmaking and Steelmaking, 5 (1978), p.1
- 11) M.Kase, M.Sugata, K.Yamaguchi and M.Nakagome: Trans. ISIJ, 22 (1982), p.811
- 12) P.J.Flint and J.M.Burgess: Met. Trans. B, 23 B (1992), p.267
- 13) S.Nomura: Trans. ISIJ, 26 (1986), p.107
- 14) M.Hatano, K.Kurita and T.Tanaka: International Blast Furnace Hearth and Raceway Symposium (Newcastle), A.I.M.M. (1981), p.4-1
- 15) M.Hatano, K.Kurita and T.Tanaka: Ironmaking Proc., Iron Steel Soc. AIME, 42 (1983), p.577
- 16) 埜上 洋, 三浦隆利, 古川 武: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1222
- 17) V.B.Apte, T.F.Wall and J.S.Truelove: Chem. Eng. Res. Des., 66(1988), p.357
- 18) 野沢健太郎, 宮川一也, 小野玲児, 上條綱雄, 清水正賢: 材料とプロセス, 7(1994), p.961
- 19) 野沢健太郎, 宮川一也, 小野玲児, 上條綱雄, 清水正賢: 材料とプロセス, 7(1994), p.74
- 20) 宮川一也, 野沢健太郎, 上條綱雄, 佐藤道貴, 山川裕一, 有山達郎: 材料とプロセス, 7(1994), p.128