

UDC 669.162.263.42

論 文

レースウェイ形成に関する冷間模型実験*

羽田野道春**・福田充一郎**・竹内 正幸***

An Experimental Study of the Formation of Raceway Using a Cold Model

Michiharu HATANO, Mitsuichiro FUKUDA, and Masayuki TAKEUCHI

Synopsis:

The raceway formed in front of a tuyere is one of decisive factors to operate a blast furnace stably and efficiently, because the gas distributions from the raceway and the descent of the burden are greatly affected by the characteristics of the raceway.

There are, however, many unknown facts about the formation of the raceway and incidental phenomena. This study has been carried out for the purpose of solving some of them using a cold model and an experimental blast furnace.

In this paper, some results obtained through cold model experiments are presented.

The summary of the results is as follows:

- 1) Particles in the raceway rotate around at high speed, colliding with rotating particles or the raceway wall and some of them are reduced in size.
- 2) A lot of fine particles formed in the raceway accumulates on the surface of the raceway in front of the tuyere.
- 3) Under a condition of reduced particle size in front of tuyere, the raceway is enlarged, especially upwards along the furnace wall.
- 4) The depth of the raceway can be expressed by the relationship between the raceway factor ($P \cdot V^2 \cdot \rho_{g0} / g \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot S^2$) and the penetration factor (D_R / D_T).

1. 結 言

高炉の羽口前には、羽口からの送風によつて、いわゆるレースウェイと呼ばれるコークスおよびガスの循環流から成る空間が形成されるが、レースウェイとその周辺の状態は、炉下部におけるガス流れ、装入物の荷下り、附着物の生成などと密接な関係があり、これが高炉の生産性および炉況に対して大きな影響を及ぼすと考えられる。

レースウェイ形成に影響を及ぼす要因は数多いが、特に、装入コークスの性状、送風条件、羽口径、羽口角度などの影響が大きい。

レースウェイに関する研究は古くから行なわれており、これまでに数多くのモデル実験結果が報告^{1)~5)}されているが、単にレースウェイの大きさを規定する要因の解析に止まつている。そこで、著者らは、二次元冷間模型と実物大の高炉下部実験炉を作製し、レースウェイ形

成に影響を及ぼす諸要因の影響を総合的に把握するとともにレースウェイからのガス流れ、炉況などの現場的な現象の解明を目的に実験を進めて来たが、本報告では二次元冷間模型で得られたレースウェイ形成に対する2, 3の知見について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に、外観写真を Photo. 1 に示す。模型は幅 45 mm, 長さ 920 mm, 高さ 1 000 mm の高炉下部コークベッドに関する二次元模型で、模型の両面に透明アクリル板を張り、レースウェイ形状の測定および写真撮影が可能である。模型の下端より約 200 mm の位置に径および角度可変の円型羽口が 1 本挿入されているが、通常、羽口角度は水平、径 18 mm, 突出長さ 60 mm である。

模型裏面には 115 カ所に静圧測定孔を設け模型内の圧力分布を測定する。また、層頂に設置した風速計により、

* 昭和 47 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 50 年 4 月 21 日受付 (Received April 21, 1975)

** 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd. 1-3 Nishinagasu Hondōri Amagasaki 660)

*** 住友金属工業(株)小倉製鉄所 (Kokura Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

層頂での流速分布を実測する。羽口風量はバルブおよび流量計によつて制御する。

実験に用いた充填物は、Table 1 に示すように大豆、小麦、粟、砂Ⅰ、砂Ⅱ、砂Ⅲの6種類である。なお、本

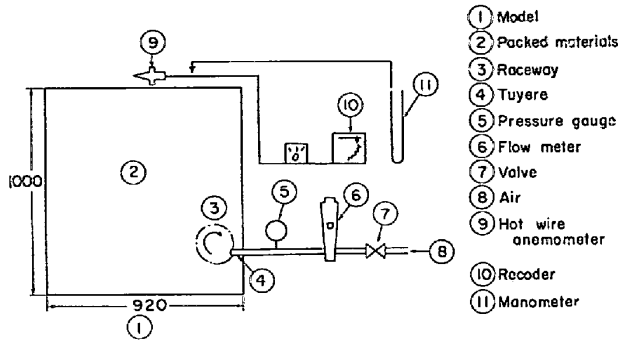


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

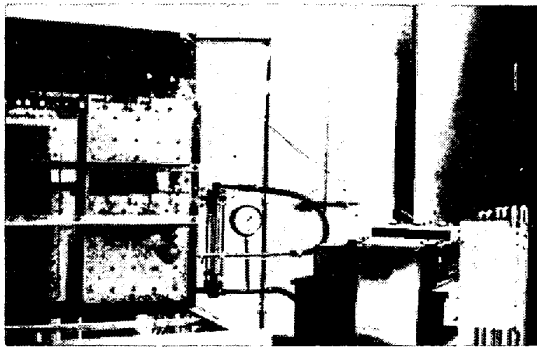


Photo. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Properties of charged materials.

	Particle size d_s (mm)	Density ρ_s (g/cm^3)	$\rho_s \cdot d_s$ (g/cm^2)	Symbols
Soya bean	7.5	1.22	0.915	Δ
Wheat	3.8	1.36	0.513	\square
Millet	1.5	1.30	0.195	\times
Sand I	0.5~1.0	2.59	0.194	\bullet
Sand II	1.0~2.0	//	0.389	\odot
Sand III	2.0~3.0	//	0.640	\circ

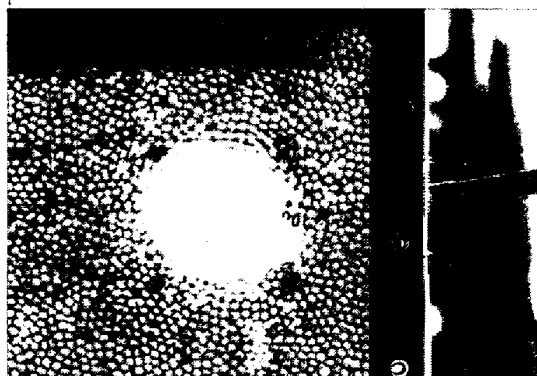


Photo. 2. The raceway in front of a tuyere.

装置は前述のように幅 45 mm の平板模型であるために、壁面効果によつてガスおよび粒子の三次元的な動きが抑制されるため、実際のレースウェイを完全に再現できているとは思われないが、レースウェイ形成に及ぼす諸要因の影響を定性的に把握するために二次元模型による実験を行なつた。

3. 実験結果

装置内に固体粒子を充填し、送風を開始するとやがて羽口前粒子が動き始め、さらに送風量を増すと Photo. 2 に示すようなレースウェイが形成される。

内部では粒子が高速度で旋回しているが、レースウェイの形状、大きさ、および粒子の挙動は送風量、充填物の性状によつて異なる。

3-1 レースウェイ内粒子の挙動

Fig. 2 は、送風量が 23.5 l/sec の時のレースウェイ内部を運動する粒子の定性的な速度分布を、大豆 (7.5 mm) と砂 (1~2 mm) とで比較したものである。図の等速度線は種々のシャッター速度で写真撮影を行ない、その画面で運動粒子が見掛上静止している境界線を示すものである。粒子の移動層を図の様に 5 分割して考えると、大部分の粒子は A→B→C→D の経路で上向き旋回流を形成するが、球状に近いレースウェイを形成した大豆の場合、E の領域の粒子が図の分岐点を境にしてゆつくりと羽口側へ移行する現象が見られた。

一方、レースウェイ底面がフラットに前方へ発達した砂の場合、下向旋回流は全く無く、上向旋回のみであつた。A および B 領域において等速度線が接近しているが、この領域では移動層の層厚が薄く、移動層表面の高速で移動する粒子によつて他の粒子が、レースウェイ外周部に押しつけられ密充填となつているのがわかる。C, D に行くに従つて粒子の移動速度は全般に遅くなり移動層の層厚が厚くなる。D 領域の粒子の一部は羽口上部に衝突した後羽口前に供給される。大豆と砂の運動状態の比較では、大豆の方が円形に近い循環流を形成するのに對して、砂の場合三角形の軌跡を描く。また、砂の方が同一風量に対する粒子の移動速度が速い。

このように、レースウェイ内で粒子の旋回流が形成されると、移動粒子間およびレースウェイ壁との衝突によつて粒子の破碎と蓄積とが繰り返し進行すると考えられる。特に、B 領域は高速で移動して来た粒子が壁に衝突する位置であるので粒子の破碎が起りやすい。Fig. 3 は、23.5 l/sec の送風を約 10 min 間行なつた後に、各領域に存在している粒子を一定量採取しその中に含まれている微粒子の割合を示したものである。大豆、砂の両

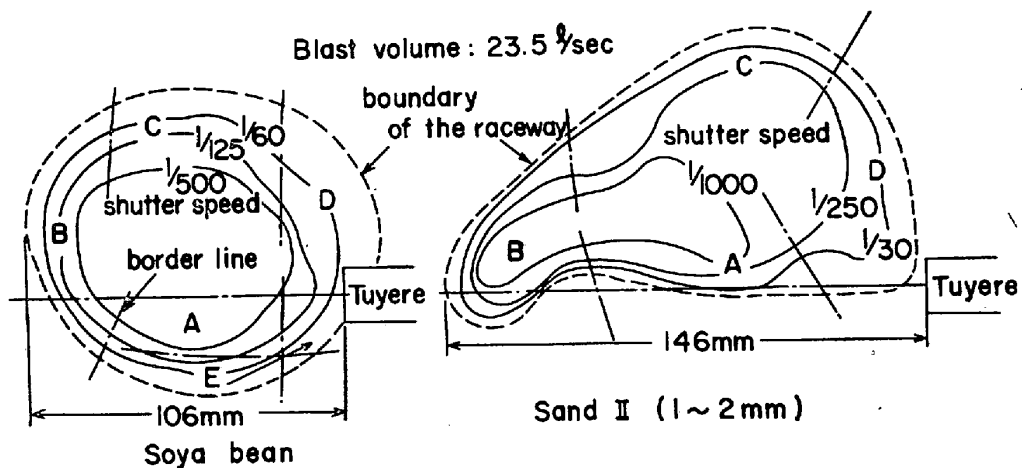


Fig. 2. Velocity distributions of the particles rotating in the raceway.

者とも羽口対面Bの領域に微粒子が蓄積されやすい傾向にあるが、粒子径が小さくて回転速度が大きい砂の場合、B領域における微粒子の集積が特に著しく、0.25 mm以下の粒子が54%を占めていた。

一方、粒子径が大で粒子の回転速度の小さな場合、破碎も少ないが、破碎された微粒子はレースウェイ外周部に

に比較的均一に分布している。

3.2 レースウェイ近傍の圧力分布

レースウェイ近傍の圧力分布は、レースウェイ境界粒子層の粒度構成と充填状態に依存している。

Fig. 4は、送風量が23.5 l/sec時のレースウェイ近傍の静圧分布を砂と大豆とで比較したものである。図中にレースウェイ境界線を破線で示したが、図から明らかにレースウェイ境界はある一定の圧力で支えられている事がわかる。この圧力は、送風条件および充填物の性状によつて異なる。また、羽口対面のB領域では等圧線が接近しており、他の領域に比して圧力勾配が大である。特に粒子径の小さい砂を充填した場合、その傾向が強く、大豆と比較するとB領域での圧力損失の増大が顕著である。圧力損失には、通気抵抗と流速の両者が関係するが、前述のように粒子径の小さい砂を充填した場合、羽口対面のレースウェイ境界層(B領域)付近に特に微粒子が集まりやすい傾向にあり、他の領域に比較して通気抵抗の増大が大きいと考えられる。したがって、砂

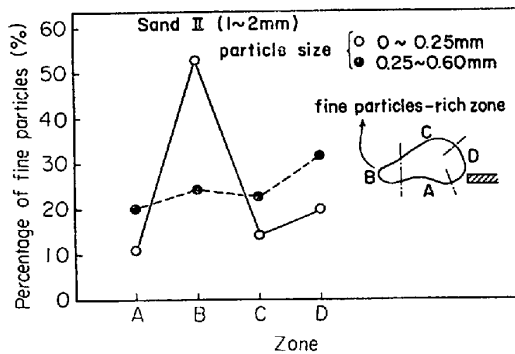


Fig. 3. Distribution of the fine particles around the raceway.

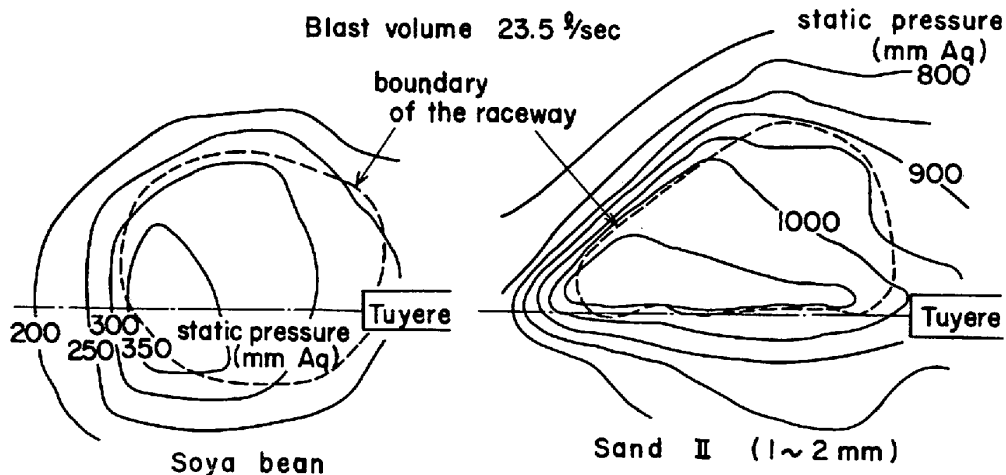


Fig. 4. Static pressure distributions around the raceway.

の場合に見られたB領域における著しい圧力損失は、羽口からの衝風がB領域に衝突した際にB領域より比較的通気性の良い炉壁側へ主流の方向が変化したために生じたと定性的に考えられる。現象としては、B領域からC、D方向への粒子の動きが活発化し、レースウェイは全体に大きくなるとともに炉壁に沿って発達する傾向が観察された。

一方、大豆の場合、レースウェイ境界付近の通気性が良好でかつ比較的均一であるために、ガスの偏流が少なく、球状に近いレースウェイが形成されたと考えられる。

3.3 レースウェイ形成に及ぼす諸要因

レースウェイ形成の力学的な考察は多くの研究者によってなされているが、ELLIOT¹⁾、WAGSTAFF²⁾などによれば、レースウェイは衝風による揚力とレースウェイ天井壁の重力との釣合いであるとしている。一定の性状を有する粒子を充填し、送風量を増加するとレースウェイ深さ(D_R)とレースウェイ高さ(H_R)は増加の傾向を示す。

そこで、第一に、性状の異なる種々の充填物に対して、レースウェイ深さを羽口1本あたりの衝風運動量との関係でまとめると Fig. 5 のようになる。図に示されるように、銘柄ごとのレースウェイ深さと衝風運動量との間にはほぼ直線的な関係が成立し、衝風運動量がレースウェイ深さを規定する一要因であることは明らかである。

一方、銘柄ごとの直線の勾配はすべて異なるが、これは充填物の性状の差が関係していると考えられる。充填物の性状としては、特に粒子径、密度の影響が大きい。その他、羽口径および角度の影響も考慮する必要があるのでこれらの影響について検討した。

3.3.1 粒子径の影響

Fig. 6 の a), b) は密度が等しくて、粒子径の異なる砂 I (0.5~1 mm) と砂 III (2~3 mm) のレースウェイ形状を

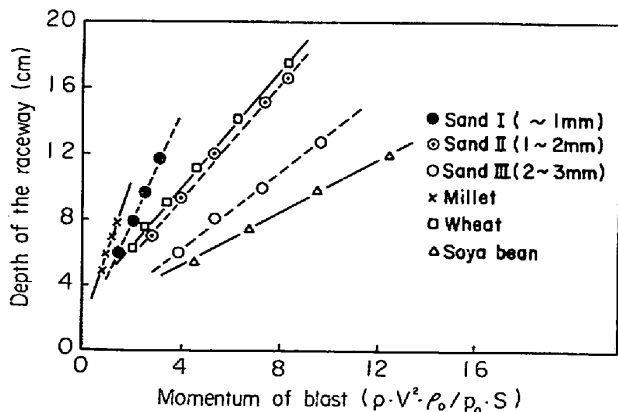


Fig. 5. Relationship between the momentum of blast and the depth of the raceway with various charged materials.

比較したものである。両者ともに、送風量を増すに従いレースウェイは拡大する。しかし、粒子径の大きい砂 III の場合、レースウェイは羽口前方に発達するのに対して、粒子径の小さい砂 I の場合、レースウェイは前方へ拡大するとともに上方への発達が著しくなり、18 l/sec の送風量ではレースウェイ天井部の粒子が炉壁に沿って、間欠的に上方へ吹き上げられる、いわゆる吹き抜け現象を呈する。また、砂 I (1~2 mm) の場合でも、砂 I に近いレースウェイ形状を呈し、送風量 29 l/sec で吹き抜けを起こした。

以上、砂 3 種類のレースウェイ深さを衝風運動量との関係でまとめると Fig. 7 のようになる。また、図中に吹き抜け限界曲線を示した。

図から、粒子径が小さいほど同一の衝風運動量に対するレースウェイ深さは大となり、かつ、少ない送風量で吹き抜けを起こすことがわかる。

3.3.2 粒子密度の影響

Fig. 8 は、粒子径が 1~2 mm とほぼ等しく、密度の異なる砂 I (密度: 2.59 g/cm³) と粟 (密度: 1.30 g/cm³) のレースウェイ深さを衝風運動量との関係でまとめたものである。粒子径が等しくても、密度の小さいものほど、同一の衝風運動量に対するレースウェイ深さは大

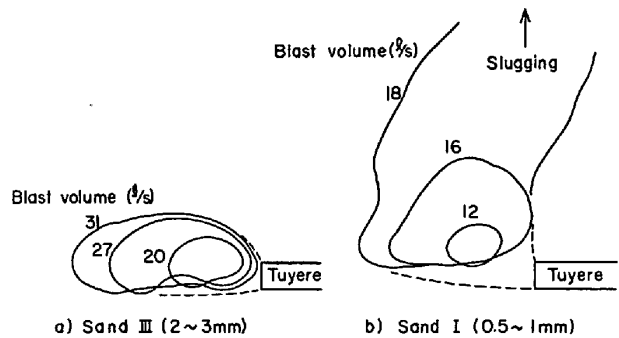


Fig. 6. Effect of the particle size of charged materials on the shape of the raceway.

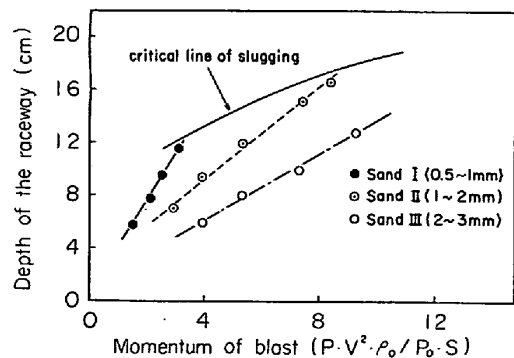


Fig. 7. Effect of the particle size of charged materials on the depth of the raceway.

となり、小さい衝風運動量で吹き抜けを起こす。

3.3.3 羽口径の影響

レースウェイ形状に対しては、送風量、充填物の性状以外に羽口径も重要な要因である。

Fig. 9 は、大豆を充填物とし羽口径を変更した時の影響を示す。図のように、送風量および充填物の性状が一定でも羽口径によつてレースウェイ深さは異なり、羽口径の小さいほどレースウェイ深さは大となる。

羽口角度については、一般に実炉においては、下向き 0~10° の範囲で操業されているが、羽口角度がレースウェイ形状およびレースウェイからのガス流れに及ぼす影響は必ずしも明らかでない。そこで、極端な場合として羽口角度が上向き 10° と下向き 10° の場合を比較検討し

た。充填物は大豆で羽口径 18 mm、羽口突出長さ 6 cm である。レースウェイ形状の比較を Fig. 10 に示す。図に見られるように、レースウェイは羽口の中心線を軸に発達する性質があるので、水平軸を基準に考えるならば羽口角度が上向きの場合レースウェイは上方に発達し、羽口角度が下向きの場合には下方への発達が大きくなる。しかし、羽口中心軸を基準に考えると、レースウェイ形状およびレースウェイ深さとも、両者の間には差が認められない。次に、レースウェイからのガス流れについて、Fig. 11 に示す様な装置の垂直断面における等圧線図から推定した。流体は等圧線に対して垂直方向に流れていると考えられる。今、レースウェイ境界を示す等圧線を等間隔で数分割し、それからの流線を図の様に描いた。

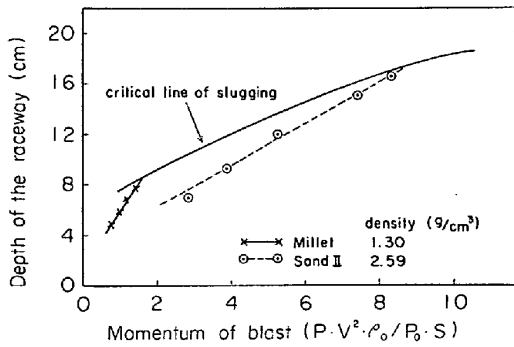


Fig. 8. Effect of the density of charged materials on the depth of the raceway.

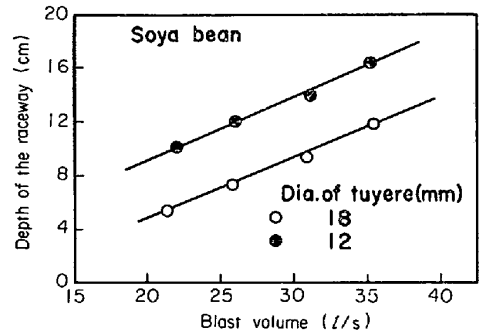


Fig. 9. Effect of the tuyere diameter on the depth of the raceway.

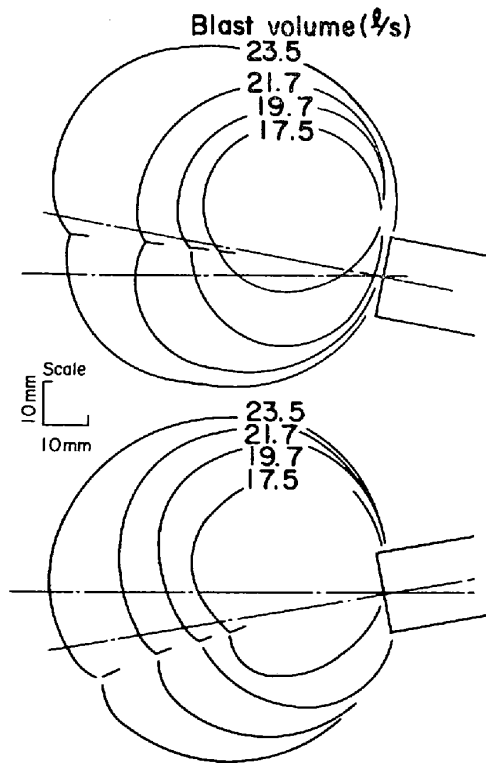
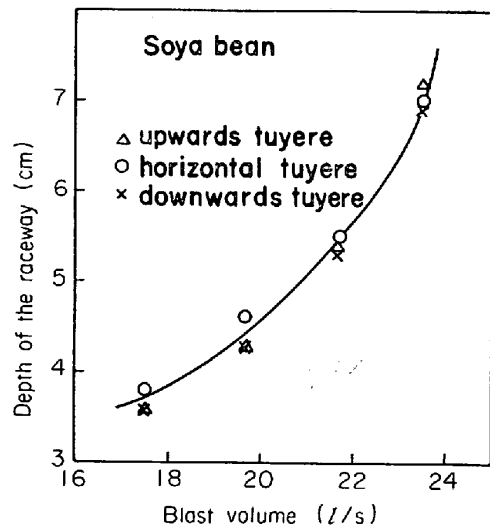


Fig. 10. Effect of the tuyere angle on the shape and depth of the raceway.



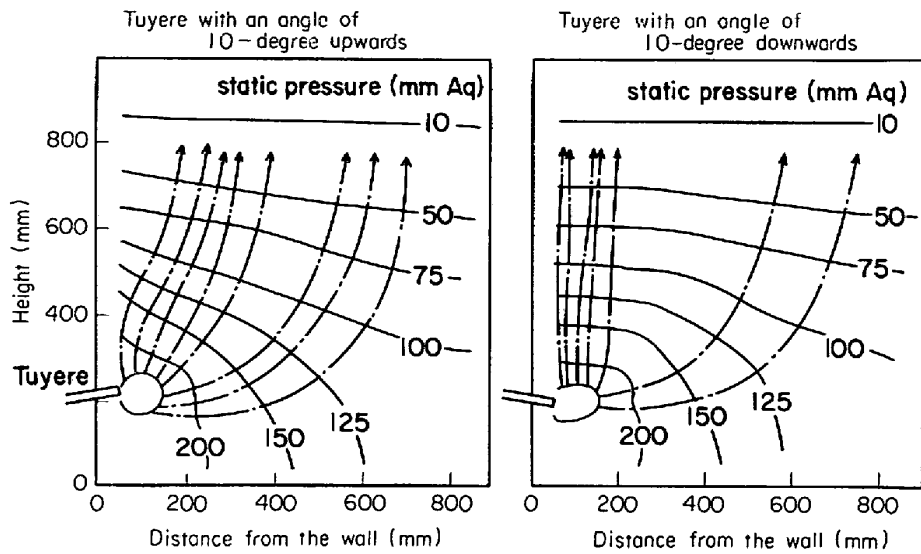


Fig. 11. Effect of the tuyere angle on distributions of static pressure and flow patterns of air.

羽口角度上向きの場合、炉芯方向での流線密度が大となっているのに対し、羽口角度下向きの場合、炉壁での流線密度が大である。流線密度の分布から考えて定性的には羽口の下向き角度が大きいほど、レースウェイ直上で炉壁流が発達しやすいといえる。

上述のように、レースウェイ形状に影響を及ぼす要因として、衝風運動量、粒子径、粒子密度、羽口径が上げられるが、レースウェイ深さを定量的に評価するために、レースウェイ深さに関して、下記の無次元量を導入して検討した。レースウェイ深さ D_R が羽口径 D_T と相関をもつことから、 D_R を D_T で割って無次元化しこれを Penetration Factor と定義する。

$$\text{Penetration Factor} = (D_R/D_T)$$

また、レースウェイ深さは、粒子1個が衝風から受ける運動量に比例し、粒子の重力に逆比例すると仮定して、両者の比を Raceway Factor と定義する。

すなわち、直径 d_s 、密度 ρ_s の粒子1個が衝風から受ける運動量は、粒子の断面積に比例するとすると

$$\frac{\rho_g \cdot V \cdot v}{S} \times \pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 = \frac{P}{P_0} \cdot \rho_{g0} \cdot \frac{V^2}{S^2} \times \pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。また、粒子1個の重力は

$$\rho_s \cdot \frac{3}{4} \pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^3 \cdot g \quad \dots\dots\dots (2)$$

であるから、(1)、(2)式より

$$\text{Raceway Factor} = (P \cdot \rho_{g0} \cdot V^2) / (P_0 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot S^2 \cdot g)$$

と定義される。

なお、両 Factor は WAGSTAFF らの式と本質的には変わらない。この2つの無次元量を用いて、前述のデータ

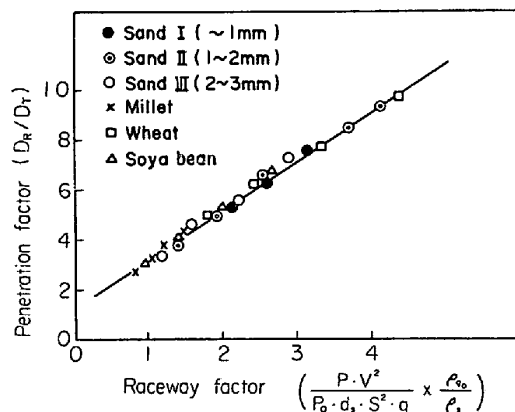


Fig. 12. Relationship between the raceway factor and the penetration factor.

を整理し直すと Fig. 12 の関係が得られる。図のように、両者の関係を近似的に1つの直線で表現することができる。しかし、英国の実炉データ³⁾から、両無次元量を計算してプロットすると、冷間模型で得られた両者の関係を示す直線からずれる。その理由としては、

- a. 実炉では、羽口前でガスの体積変化が起こるが、冷間模型ではこの点が考慮されていない。
- b. また、羽口前のコークスの粒子径を装入時の粒子径に比例するとして、その6割の値で代表させている。
- c. 装置上、ガスおよび粒子の3次元的な拡がりや抑制される。などがあげられる。

したがって、実炉でのレースウェイ深さを定量的に把握するには、コークスの燃焼を伴い、かつ、壁の影響のない熱間モデルによる検討が必要であることを示唆しているが、この点については実物大の高炉下部実験炉によ

る検討結果で報告する。

以上のように、コークスの燃焼が伴った場合の問題点はあるが、レースウェイ深さを前記無次元量の関係で一応表現し得ることが判明した。しかし、レースウェイの高さについての報告は、解析の困難なこともあつて、現在の所ほとんど見られない。

Fig. 13 は、レースウェイ高さ (H_R) とレースウェイ深さ (D_R) との関係を示すものである。レースウェイ深さが大になればレースウェイ高さも大になるという一般的な傾向は見られるが、必ずしも 1:1 の対応関係にはない。

また、全ケースを通じての特徴的な傾向として、レースウェイ深さがある程度まで大きくなると、レースウェイの上方への発達 (H_R) が著しくなり、やがて天井部の粒子を吹き上げる現象を呈する点 (D_R) があげられる。今、この傾向を一般化するために、レースウェイ深さ (D_R) とレースウェイ高さ (H_R) に各々 $(\rho_w/\rho_s \cdot d_s)$ をかけて無次元化し、これらを Depth Factor と Height Factor と定義して、両者の関係を求めると Fig. 14 のようになる。全データが、かなりよく 1 つの曲線上にのり、レースウェイの上方への発達および吹き抜け傾向がわかる。

Depth Factor が 20 付近で上部への発達が著しくなり、50 前後で吹き抜けを起こす。このように、レースウェイ深さと高さの関係は、レースウェイからのガスの吹き出し状態を示す一指標であり、炉況と密接な関係を持つと思われるので、検討不十分であるが今後の検討課題としてその一例を示した。

4. ま と め

高炉操業上極めて重要な意味を持つが、現在の所不明確な点の多い高炉下部現象の解明の一端として、二次元冷間模型により、レースウェイ形成に関する検討を行なった結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) レースウェイ内では粒子が高速で旋回しており、旋回粒子間およびレースウェイ壁との衝突により粒子の破碎が起こるが、破碎された微粒子は羽口対面のレースウェイ先端付近に集積し、この部分の通気性を阻害する。
- 2) レースウェイの境界壁は一定の圧力で支えられている。
- 3) レースウェイの大きさは、羽口からの衝風運動量に比例し、充填物の粒子径、密度、羽口径に逆比例するが、充填物の粒子径が小さい場合、レースウェイは羽口上方への発達が著しく炉壁に沿って吹き抜けを起こしやすくなる。
- 4) レースウェイ深さを Raceway Factor と Penetra-

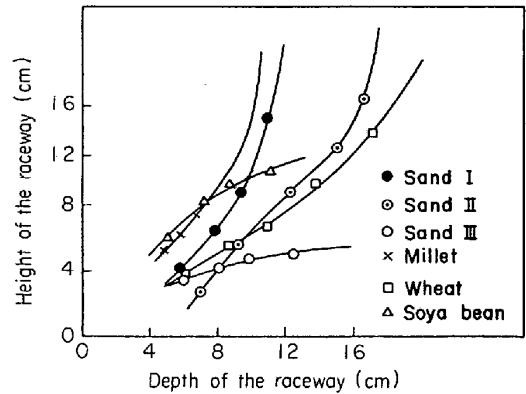


Fig. 13. Relationship between the depth and the height of the raceway with various charged materials.

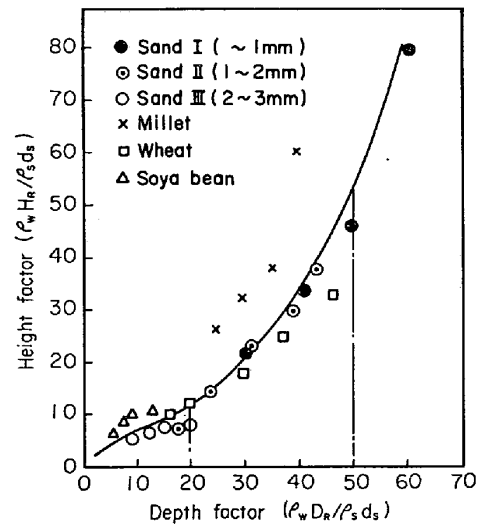


Fig. 14. Relationship between the depth factor and the height factor.

tion Factor の関係から求めることができるが、実炉への適用に対しては、現在の所若干問題があり、熱間モデルによる解析および実炉データの蓄積が必要である。

記 号

- P : 送風圧力 (g/cm^2)
- V : 送風量 (l/sec)
- S : 羽口断面積 (cm^2)
- ρ_{g_0} : 20°C , 1 atm での空気密度 (g/cm^3)
- ρ_s : 粒子密度 (g/cm^3)
- g : 重力加速度 (cm/sec^2)
- D_T : 羽口径 (cm)
- D_R : レースウェイ深さ (cm)
- H_R : レースウェイ高さ (cm)
- ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)

文 献

- 1) *J. F. ELLIOT*, et al. : *J. Metals*, (1952) July, p. 709
 - 2) *J. B. WAGSTAFF*, et al. : *Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Proceedings*, 15 (1956), p. 95
 - 3) *J. TAYLOR*, et al. : *JISI*, 187(1957), p. 330
 - 4) *V. G. MANCHINSKI*, et al. : *Stal in English*, (1960) Sept., p. 629
 - 5) *C. C. GARDNER* : *Trans. AIME*, 218(1960), p. 423
-