

論 文

UDC 669.162.263.44

レースウェイ形状の研究*

中村 正和**・杉山 喬**・鶴野 建夫**

原 行明***・近藤 真一****

Configulation of the Raceway in the Experimental Furnace

Masakazu NAKAMURA, Takashi SUGIYAMA, Takeo UNO,

Yukiaki HARA, and Shinichi KONDO

Synopsis:

The tuyere combustion zone has been studied on an experimental furnace by measuring dimensions and temperature in the raceway.

The effects of variables such as the blast velocity, tuyere diameter, and coke size are studied.

Expressions are derived for estimating the length, width, and height of the raceway in terms of the velocity and density of the blast air, tuyere diameter, and coke properties such as the size, density, and shape factor.

Discussion is carried out according to the idea that the compressive force of blast to the coke bed is balanced with tendency of collapse of the raceway wall, and that coke in the raceway is fluidized by raceway gas.

Measurements of operating blast furnaces by rod test are shown to be generally in good agreement with those on the experimental furnace.

1. 緒 言

高炉という巨大な反応器における熱源であり、また還元ガスの発生源であるレースウェイの重要性は改めて強調するまでもないが¹⁾、その定量的な実態は計測上の困難によつて必ずしもあきらかではない。

高炉の炉内状況は解体調査によつてかなり明確となったが、これとても炉内で最も苛酷な反応が起こっているレースウェイの実態を把握するためには不十分で、高炉下部で起こっている諸現象を理解し制御するためには、やはり稼動中のレースウェイを把握することが必要である。

この目的のためにゾンデによる羽口先の温度やガス濃度分布の測定^{2)~4)}、高速シネマによる観察⁵⁾、最近ではスコープによる炉内の直接観測などが行なわれている⁶⁾。とりわけ炉内温度分布は各種反応を律速するという意味で重要であるが、これを規定する熱媒体としてのガス流れについての規則性はまだ得られていない。

本研究はレースウェイ周辺の通気分布を表現する指標

としてレースウェイ形状を考え、これを決定する要因についての規則性を求めることによつて高炉下部における通気分布の傾向を知ることを目的としている。

レースウェイ形状のうち、奥行に関しては従来から実高炉におけるロッドテストによる測定を含め多くの実験式や理論式が提出されている^{8)~11)}。しかしそのほとんどがコークスの燃焼を伴わないコールドモデルを使つた実験によつており、燃焼を伴つた研究は少なく、特にレースウェイの幅や高さについての研究例は極めて少ない¹²⁾¹³⁾。

本実験ではコークス充填層への送風によつて燃焼形成しているレースウェイを、実験終了後、その形状を保存したまま解体調査し、その体積、形状、空間部旋回コークスの性状などを測定して、実験中(送風中)に計測した炉内の温度分布、ガス濃度分布などとの関係を調査した。なお、送風停止にともなうレースウェイの崩壊は、実験終了直前の送風気流中に、軽量アルミナボールを浮遊させてレースウェイに吹き込み、さらに N₂ ガスに切換えて急冷することによつて防止した。

* 昭和49年4月本会講演大会討論会にて発表 昭和51年4月9日受付 (Received April 9, 1976)

** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

**** 新日本製鉄(株)基礎研究所 理博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

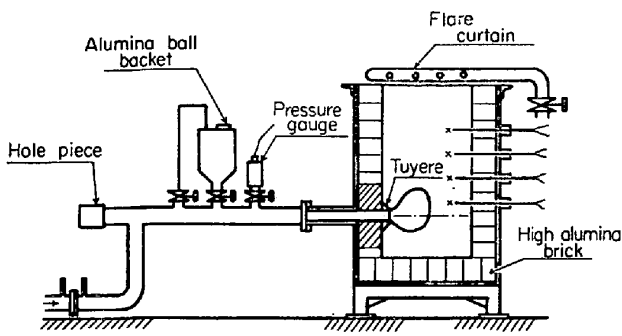


Fig. 1. Experimental apparatus.

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置は Fig. 1 に示したような幅：290 mm，奥行：350 mm，高さ：680 mmの燃焼炉で，高アルミナ質の耐熱磁製送風羽口を有し，羽口先端に黒鉛スリーブを装着してスラグによる侵蝕を防いだ。炉内に充填されているコークスは送風により燃焼してレースウェイを形成する。実験の最終段階で送風とともに炉内へ吹込むアルミナボールの容器が羽口直前に設置されており送風管と均圧をとつている。また実験中の送風圧，レースウェイの安定性を監視するための微圧振動を測定する圧力検出端が設置されている。実験炉の背面には炉内の温度分布，ガス分布測定のための測定孔を4個もっている。燃焼炉本体は SK-37 の高アルミナ質耐火煉瓦を主に使用しており，羽口の周囲のみは耐火キャストブルを用いた。また，鉄皮と煉瓦の間は断熱キャストブルを充填して鉄皮への熱負荷を軽減した。さらに，炉頂部には都市ガスによるフレームカーテンを作り，炉内で発生した CO ガスを完全に燃焼させた。

2.2 実験方法

炉内にコークスを充填し，あらかじめ羽口先に置いた木片に着火した後送風する。送風温度は大気温度であり鉍石は装入されていない。送風量を設定値に合わせ炉中心の最上段温度が定常状態になったところから各段の熱電

対 (Pt-Rh : 20-40) を水平方向に移動させて炉内の温度分布を測定した。また，磁製管を炉内に挿入してガスを吸引し，成分濃度をガスクロマトグラフにより分析した。測温およびガス分析の終了後，バスケットに溜めておいた中空の軽量アルミナボールを送風気流中に落とし，ボールがレースウェイ内に充填したところで送風を N₂ ガスに切換え冷却する。

炉内温度が低下したところで炉内のコークスと分析試料を採取しつつ上部から層状に取除く。この際，上方から写真撮影を行ない炉内状況を記録した。羽口近傍で，実験終了時に羽口から吹込んでおいたアルミナボールが現われたら，アルミナボールの存在領域とコークス充填層の間の境界を測定しながら順次下方へ解体を進める。このようにして得られた測定値にシンプソン法を適用することにより各高さにおける水平断面積を，次いでこれらを高さ方向に積分を行なつてレースウェイ体積を求めた。

後述するように，レースウェイ周辺にはスラグにより固結化したコークスが鳥の巣状に殻をなしており，レースウェイ内容物は他の部分と混合することなく容易に回収できるので，先に述べた計算によるレースウェイ体積の妥当性をチェックするとともに，旋回コークス量，粒径分布などを測定した。なお旋回コークス量はレースウェイ内コークスの総重量を見掛密度で割つたもの，つまり個々のレースウェイ内コークス体積の総和で表わした。使用したコークス性状を Table 1 に示した。

3. 実験結果

3.1 炉内の概況

全実験結果に共通した現象を以下に列記する。

1) 解体したレースウェイの外側には鳥の巣状の外殻があり，これはコークスが燃焼し発生した熔融灰分によつて結合されたものである。当然粒度の小さなコークスが吹き寄せられており操業中の通気性も悪かつたと推定される。

Table 1. Properties of charged coke.

Property	Symbol	Unit	Coke dia. (mm)		
			5~10	10~20	20~30
True specific density	ρ_s	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	1.946	1.946	1.946
Apparent specific density	ρ_p	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	1.022	1.022	1.022
Bulk density	ρ_b	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	0.504	0.496	0.448
Pore	ϵ_p	—	0.475	0.475	0.475
Void	ϵ_b	—	0.507	0.515	0.562
Shape factor	ϕ_c	—	0.32	0.33	0.47
Mean size	D_{pc}	mm	6.77	14.16	23.39

2) 炉の上部に SiO_2 を主成分とする非晶質の白粉が析出しコークスの表面に付着している部分がある. この層は温度分布からは $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ 付近の領域で, これよりレースウェイ寄りのコークス表面は光沢を失い黒色を呈しているところからかなりの反応を受けていると思われる.

3) レースウェイ内温度は常温送風にもかかわらず, 1800°C にも達しており, これは送風中の O_2 がすべて CO になるとして計算したいわゆる理論燃焼温度 (1420°C) に比して 300 deg 以上も高い.

4) レースウェイ内コークスのレースウェイ空間に対する容積比は $25\sim 30\%$ で, 羽口先前面では非常に粗であり, 上部ほど空隙が減少し, 充填密度はほぼ連続的に正常な充填状態の値に近づいていく. 羽口視窓前面に設置したテレビによる観察結果に桑野らの¹⁴⁾試験高炉における炉内の直接観察の知見を総合すると, レースウェイ空間においてコークスは, その名称の由来となつた急速旋回を行なうのではなく, 羽口直上から落下したコークスは衝風により水平方向に加速され, レースウェイ前面のコークス充填層の壁に衝突した後回転しながらコークス壁面を這い上り, レースウェイ上部ではむしろ上下方向の流動化状態となつており, ゆるやかに羽口直上部へ逆行循環しているものと思われる.

3.2 レースウェイ形状について

1) レースウェイ奥行 (D_R)

レースウェイ奥行に及ぼす送風条件の影響を Fig. 2 に示した. 羽口径 (D_T) の増大, 羽口先送風速度 (U_0) の上昇にともなつてレースウェイの奥行は深くなる. また, 装入コークス粒径 (D_{PC}) が小さくなると Fig. 3 に示すようにレースウェイは拡大する.

2) レースウェイ幅 (W_R)

レースウェイ幅は奥行と同様の傾向を示すが, 羽口先

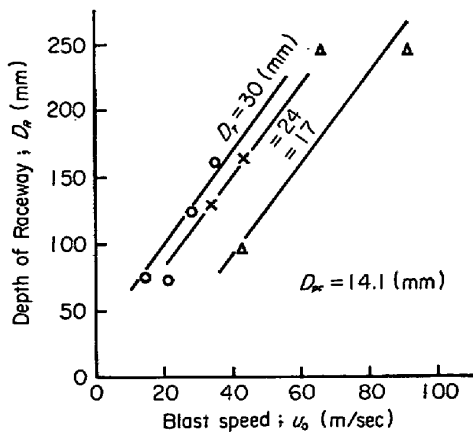


Fig. 2. Effect of blast speed on raceway depth.

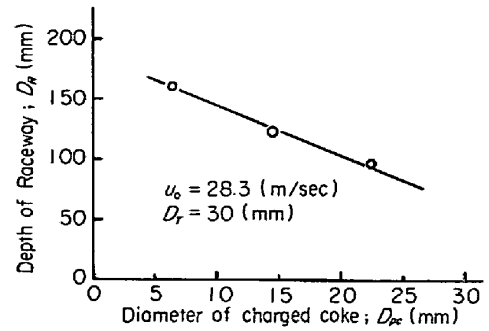


Fig. 3. Effect of diameter of coke on depth of raceway.

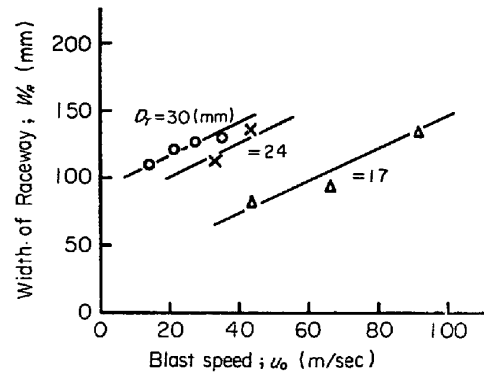


Fig. 4. Effect of blast speed on width of raceway.

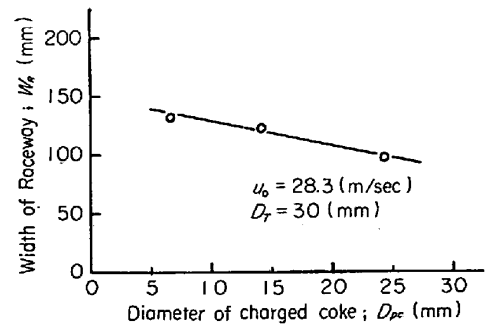


Fig. 5. Effect of coke diameter on width of raceway.

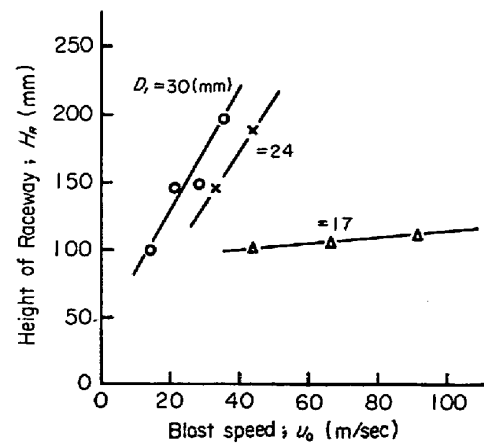


Fig. 6. Effect of blast speed on height of raceway.

風速 (U_0) やコークス粒径 (D_{PC}) の影響は Fig. 4, 5 に示すように前者に比較してやや小さい。

3) レースウェイ高さ (H_R)

レースウェイ高さは Fig. 6 に示すように羽口径一定の条件では羽口先風速 (U_0) の増大にしたがつて増加の傾向を示す。一方、レースウェイ高さを羽口径で割って基準化した値 (H_R/D_T) は羽口風速に対して単一の関係式を満足するが、これによると羽口先風速の増大によるレースウェイ高さの増加は始めは著しいがやがて頭打となる。この際レースウェイの奥行は風速の増加に伴って増大するから全体の形としては横に細長い形となる。またコークス粒子の細粒化に伴ってレースウェイ高さが顕著に増加することを Fig. 7 に示した。Fig. 8 はコークス粒径の変化がレースウェイ周辺の温度分布に及ぼす

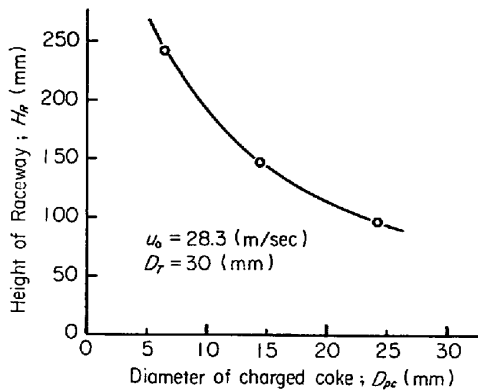


Fig. 7. Effect of coke diameter on height of raceway.

影響を示している。細粒コークスの場合、レースウェイが縦方向に発達し、この時の温度分布から炉内通気分布が炉壁寄りの周辺流になつていることがわかる。

4) レースウェイ容積 (V_R)

レースウェイ容積は Fig. 9 において点線によつて示したように、羽口径 (D_T) 一定のまま送風量 (Q) を増加すると単調に増大するのに対して、実線で示すように送風量一定で羽口径を絞ることによつて風速 (U_0) を上げて、あるところまで増加して、以後はほとんど一定化する傾向がある。

レースウェイ体積は、奥行、幅、高さの積に関係するが、これら個々の要素については前述のように、羽口先風速の増加に対して D_R は単調に増加するのに対し、 W_R, H_R は羽口径、風量との関係が複雑で、風量一定で羽口径を絞る場合には羽口先風速 U_0 の増加にもかかわらず W_R, H_R は減少するケースも生ずる。羽口径一定のまま送風量を増加する時 D_R, W_R, H_R は単調増加するから、これらの積に関係するレースウェイ体積も単調に増大するが、送風量一定で、羽口径の変更によつて U_0 を変える場合には、 U_0 がある限界を越えると H_R が減少しレースウェイは単に形を変えただけで体積は変わらないことになる。

5) レースウェイ内コークス量 (V_C)

レースウェイ内のコークス量は Fig. 10 に示すようにほぼレースウェイ体積 (V_R) と 1 次の比例関係にある。また粒径分布は Table 2 に示したように実験条件にも

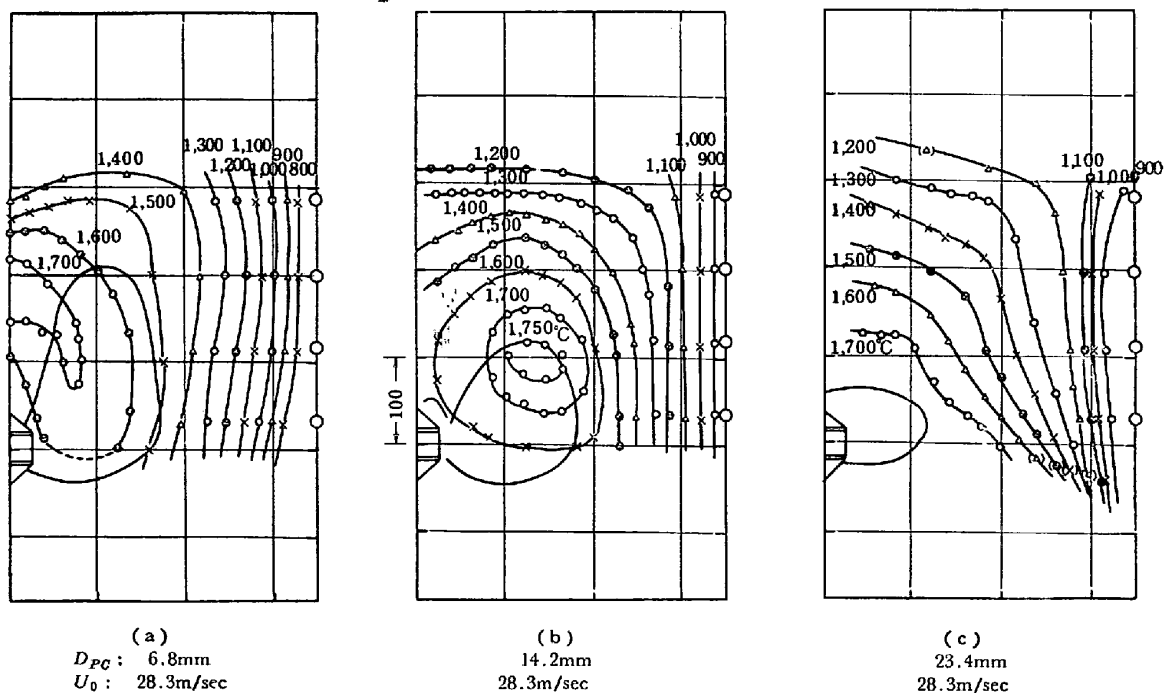


Fig. 8. Effect of coke size on the configuration of raceway and the temperature distribution.

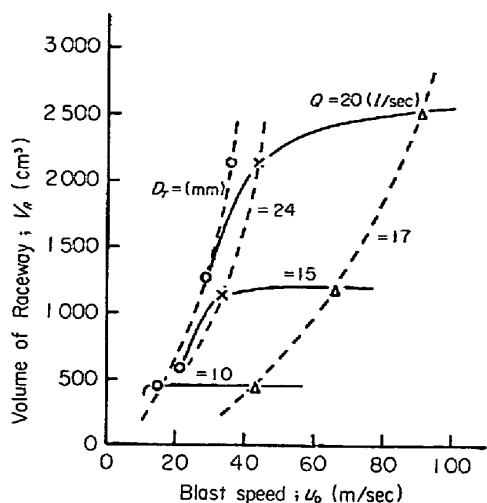


Fig. 9. Effect of blast speed on raceway volume.

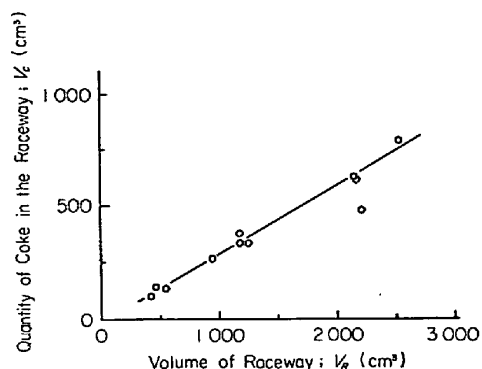


Fig. 10. Correlation of circulating coke quantity to raceway volume.

Table 2. Change of coke diameter in the raceway.

Exp. No.	Mean dia (mm)		Size ratio D_{PR}/D_{PC}
	Charged coke D_{PC}	Raceway coke D_{PR}	
1	14.16	9.34	0.66
2	14.16	—	—
3	14.16	8.13	0.57
4	14.16	9.26	0.65
6	6.77	4.10	0.61
7	23.39	15.87	0.68
8	14.16	9.12	0.64
9	14.16	8.82	0.62
101	14.16	6.83	0.48
102	14.16	7.79	0.55
103	14.16	8.70	0.61

とづく系統的な規則性はなく、装入コークス径 (D_{PC}) に対する比が 0.6 ± 0.1 のほぼ一定値を示した。ただし、ここでコークス粒径は調和平均径で表示した。

4. 考 察

レースウェイの状態を表現するための力学的モデルについては従来いくつかの提案がある^{8)~13)}。これらは若

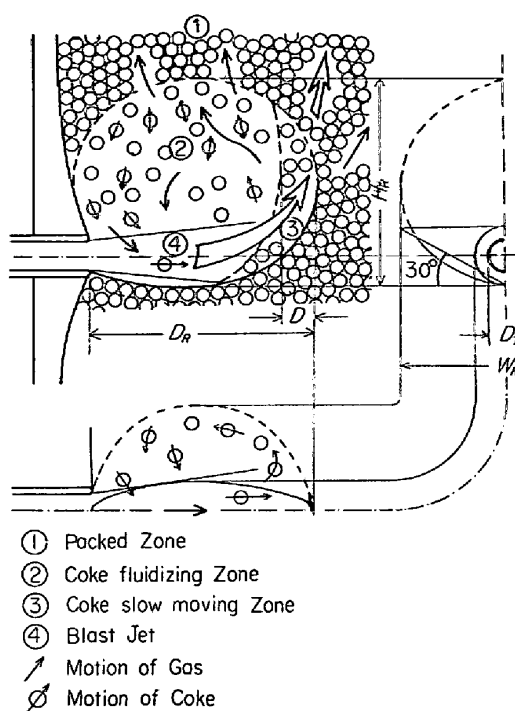


Fig. 11. Schematic configuration of raceway.

干の相違はあるものの、そのいずれもが送風とコークスの力学的バランスにその根拠を置いている。しかし多くは送風エネルギー、または運動量とレースウェイ奥行の関係といったマクロな捉え方をしており、レースウェイを構成している個々のコークス粒子の力学的挙動については明確な説明がなされていない。

著者らは燃焼炉実験および並行して行なつたコールドモデル実験における粒子運動状態の直接観察をもとに、得られたレースウェイ内外のコークス粒子の運動についての力学的イメージにもとづいて前節で述べたレースウェイ形状に関する諸因子の関係を説明することを試みた。

ここで著者らが画いたレースウェイの感覚的なイメージは以下のとおりである。また概念図を Fig. 11 に示した。

(1) 羽口から吹込まれた衝風は反応によつて容積変化などを伴うものの、なかば自由空間への噴射であり、いわゆる噴流理論に従つて拡がりながら減速する。羽口前面の高速ジェットに周囲のガス、特に羽口直近の炉内ガスが吸引され一部のガスは循環するが、大部分のガスは循環することなくレースウェイを離れる。

(2) コークスは羽口先端の上部から主としてレースウェイに落下し衝風によつて加速されながら突当りの部分に衝突し移動と停止を繰返しながら上方へ移動する。この種の現象は高速シネフィルムによるモデル実験観測

によつて確認されているとともに¹⁵⁾、試験高炉におけるレースウェイの直接観察でも報告されている⁷⁾。

このように、レースウェイの突当りに関しては壁に衝突してくるコークスと空間部へ崩れ込もうとする充填層からのコークスが入りまじつて、全体として緩やかな動きしかしておらず、力学的には静止状態として取扱うことが可能と思われる。

(3) レースウェイの上部は、充填粒子がレースウェイ空間に落下しようとして、かなり粗な充填状態となつており、羽口からの衝風ジェットは、上部が半ば開放された充填層へ吹込まれる形となり、結果として突当りの部分で方向を急激に上方へ転換する。したがつてレースウェイ上部はかなり強い上昇流となつており、粒子は旋回というよりむしろ上下方向の流動化状態に近いようである。この際吹き上げられる粒子量は、風量や風速などに影響されると思われるが、近似的には羽口前面に存在していたものが吹飛ばされたと考えることができるであろう。

コールドモデル実験において、上昇気流によつて流動化している運動粒子群の上方に金網を置くと、粒子は簡単に金網に貼り付いてブリッジを形成することがわかつた。これは充填層内部ではガスの線速度が早く、希薄層中ではまだ流動化速度域であつても、上部のブリッジ部分では空間率の減少によつて粒子の終端速度を越えるといった現象が起こつているためと思われる。レースウェイがガス流量に見合う大きさより小さくなると、レースウェイ壁面の総面積は小さくなるから壁面を横切つて流れるガス線速度は早くなり、レースウェイ内コークスは壁に接近すると壁面に押付けられて、レースウェイ空間に戻れず、結果としてレースウェイは縮小することになる。しかし、この状態ではレースウェイにコークスが供給されないから燃焼によつてレースウェイは徐々に拡大し、壁部でのガス速度がコークスのブリッジ形成を支えきれなくなつた時崩壊が起こり、コークスが供給されると同時にレースウェイが縮小して最初に述べた状態に復帰する。実際のレースウェイにおいては上昇ガス速度に空間的な分布があるため安定なブリッジは形成されず、レースウェイのコークス供給は連続的に行なわれると思われ。

4.1 レースウェイ奥行の規則性について

レースウェイ奥行の支配要因に関連し、突当り部分の力学的モデルを次のように設定した。

先にレースウェイのイメージとして与えたように、レースウェイの突当りに厚さ D の空間へ崩れ込もうとしている準静止状態のコークス層があり、この層に突入した

衝風が層中で生ずる圧力損失に等しい力でコークス粒子群を壁の中へ押し込もうとし、コークスが崩壊しようとする力と釣合おうとする。

1) 貯槽内の粉粒体の静圧理論によれば側壁の受ける圧力は充填高さがある値を越えると一定となり、この圧力が充填コークスをレースウェイ空間に押し出す駆動力となる。この力 P_1 は単位面積当り次式で与えられる¹⁶⁾。

$$P_1 = \frac{g}{g_c} \cdot \frac{D(1-\epsilon_b)\rho_p}{4\alpha\mu_w} \text{ [kg/m}^2\text{] } \dots\dots\dots (1)$$

2) 衝風がレースウェイ突当り部分で壁を押しつける圧力 P_2 は、Karmann-Kozeny の式を厚さ D の準静止コークス層に適用すると次式で与えられる。

$$P_2 = \frac{6 \cdot f \cdot D \cdot u^2 \cdot \rho_g \cdot (1-\epsilon_b)}{g_c \cdot \phi_c \cdot D_{PR} \cdot \epsilon_b^3} \text{ [kg/m}^2\text{] } \dots\dots\dots (2)$$

3) レースウェイ内に噴射される衝風には噴流理論¹⁸⁾が適用できるとすると、噴流の幅は距離に比例して拡がり運動量が保存則を適用するとガスの線速度は羽口先端からの距離に反比例して小さくなる。

$$u \cdot y = C \cdot U_0 \cdot D_T \dots\dots\dots (3)$$

ここで C は噴流の拡り角度に関係し、燃焼温度などに依存する定数である。ここでは羽口から噴射される衝風がレースウェイ内で反応する際のモル数変化、温度変化に伴う密度変化などによる線速度への影響はレースウェイ温度一定として定数の中へ含めて考えた。なお、同様の理由によつて ρ_g その他の物性値も、本来レースウェイ内温度における値を採用すべきであるが、ここでは送風条件下の値を用いている。これは、本報告の範囲のようにレースウェイ内温度がほぼ一定で送風条件との関係が固定している限り成立するが、高温送風や複合送風の場合には補正が必要である。

4) 装入コークスとレースウェイ内コークスの平均粒径比は先に Table 2 に示したように一定とみなす。

$$D_{PR}/D_{PC} = 0.6 \dots\dots\dots (4)$$

以上の仮定から $y = D_R$ において力学的バランスが成立し、レースウェイの境界が形成されるとし、また高炉の操業範囲で一定とみなせる定数をまとめて K として (1)~(4) の式を整理すると次式が得られる。

$$\frac{D_R}{D_T} = K \sqrt{\frac{1}{\phi_c \cdot \epsilon_b^3} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot \frac{U_0}{\sqrt{g \cdot D_{PC}}}} \dots\dots\dots (5)$$

本実験結果をこの式にあてはめ、右辺には実験条件、左辺に実験終了後解体して実測したレースウェイ寸法を代入して対数プロットしたのが Fig. 12 である。勾配がほぼ 1 で、直線的であることから (5) 式を導入する前提となつた仮定も一応妥当であつたと判断される。

また実高炉におけるロッドテストによるレースウェイ

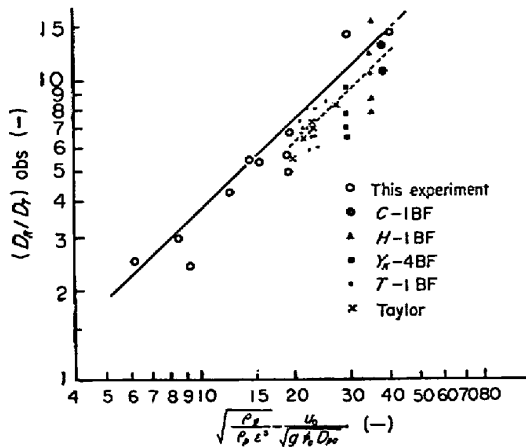


Fig. 12. Relationship between calculated and observed value of raceway depth.

深さの実測値を参考のため併記した。この際、各種特性値は送風条件におけるもの、または高炉解体調査結果などを参考にして定めた。(ε=0.57, D_{PR}/D_{PC}=0.6, φ_c=0.47) 実高炉の場合羽口別の支管風量が不明で平均値を使用しているため、個々のレースウェイ深さと計算値との対応性は必ずしも良好とはいえないが全体としてみれば(5)式を満足しているように見える。

このように、レースウェイ奥行がFroude数(u/√g·D_P)によつて表現されることは、これらの現象が慣性力に支配される力学的相似関係にあることを示している。

4.2 レースウェイ幅の規則性について

モデル燃焼炉実験における羽口前のレースウェイ水平断面形状の観察から、羽口先端および衝風ジェットに内接する楕円を仮定し、Fig. 11 に示したようにその長径をレースウェイ奥行(D_R)に等しくとり、その短径を幅とするとレースウェイ幅(W_R)の理論式として次式が成立する。

$$\frac{W_R}{D_T} = \left(1.0 + k \frac{D_R}{D_T}\right)^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

ここでkは噴流の拡がり角に関する定数であり、非燃焼時における実測値は約0.1であつた。

W_R/D_TとD_R/D_Tの関係を実験結果にもとづいて対数表示するとFig. 13に示すように勾配がほぼ0.5となり、点線で示した(6)式の関係に傾向として合致するが絶対値にはかなりの差がある。先に仮定として噴流に内接する楕円を考えたが、この楕円がジェットによつて吹飛ばされて生じた空孔と考えれば、実際のレースウェイはこの空間に対して一定の傾斜角をもつて流れ込んでくるコークスによつてその幅が拡大することになる。コークスの安息角は約30°であり噴流によつて強制的に空間となる部分の直径が(6)式におけるW_Rであると

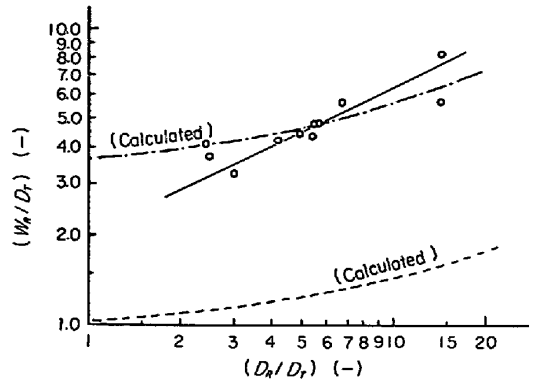


Fig. 13. Relationship between width and depth of raceway.

すると、実際のレースウェイの横の拡がり高さW_Rの空間への流れ込みと近似的に見なされ、Fig. 12に示したように片側でW_Rにcot 30°を掛けたものとなる。これをFig. 13中に鎖線で示した。

福武ら⁴⁵⁾がモデル実験で示したように、羽口先端付近の圧力はむしろ負圧であり、レースウェイ側壁コークスは少なくとも羽口寄りの部分は風圧により押広げられているというより、むしろジェットにより生じた空間への流れ込みと考え方が適切であろう。

4.3 レースウェイ高さの規則性について

レースウェイ高さについては従来あまり検討がなされていないが、本実験において羽口線速度が低い場合や、コークスの粉化にもとづく炉周辺流に際してレースウェイ高さが大きくなることを考慮すると、レースウェイ高さを左右する要因は羽口前面における衝風のベクトルの向きであると思われる。本考察におけるレースウェイのイメージは羽口からのジェットが拡がりながら進行し突当りで上方に曲げられるというものであつた。この考えにもとづき(3)式からy=D_Rにおけるガス速度はu_{y=D_R}=C·u₀·D_T/D_Rとなる。ここでガスの向きが変えられるからガス速度の垂直成分(u_z)はu_{y=D_R}に比例した値をもつと思われる。(k'を定数として)

$$u_z = k' \cdot u_0 \cdot D_T / D_R \dots\dots\dots (7)$$

一方、運動するコークスの側から流動の条件を考察すると、レースウェイ内を平均温度1700°CのN₂+COガスとし、旋回コークスの平均径を8mmとすれば、その終端速度は約30m/secと計算される。しかし、実測したレースウェイ形状から推定した壁面積に充填層の空間率補正を行なつても、壁面をガスが均等に通過するとした平均速度は約5m/secであり両者は一致しない。このことからレースウェイを去るガスはレースウェイ壁面から均等に充填層へ入るのではなく局部に集中している

と思われる。このようにレースウェイ上部では終端速度ぎりぎりの線速度をもつ上昇気流によつてコークスが流動化状態になつていと推定される。

一般に流動化層の高さは次式に従うとされる¹⁹⁾。

$$\frac{\text{流動層高}}{\text{静止層高}} = \left(\frac{H_R}{D_T} \right) = k_1 \frac{u_z}{u_{te}} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$u_{te} (\text{終端速度}) = k_2 \left(g \frac{\rho_p}{\rho_g} \cdot \phi_c \cdot D_{PC} \right)^{1/2} \dots\dots (9)$$

(8)式の第2項は、静止状態において羽口前面にあつたコークスが上昇ガスによつて流動化し H_R の高さにくれたという仮定にもとづいている。

(5), (7), (8), (9)式から ($k_1 k_1 / k_2 K = K'$ として)

$$H_R / D_T = K' \sqrt{\varepsilon_0^3} \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。

(10)式によれば、充填状態一定の条件ではレースウェイ高さが不変ということになる。しかしレースウェイはゴム風船のようなもので、理想的には一様に膨み球形となるが、先に述べたようにレースウェイ壁面でのガス通過量は均一ではなく、どこか一部分を押えたとその部分は凹み他の場所が突出するといった自由度を有すると考えられる。そこで送風条件によつて定まるレースウェイ奥行 (D_R) を独立変数として復活させるため (10) 式を変形して (10)' 式を得る。

$$\frac{H_R}{D_R} \cdot \frac{D_R}{D_T} = K' \cdot \sqrt{\varepsilon_0^3} \dots\dots\dots (10)'$$

Fig. 14 に (10)' 式の妥当性を検討するため (H_R / D_R) と (D_R / D_T) の関係を示した。 (D_R / D_T) の小さい範囲で若干偏差が大きいが、(10)' 式が示すようにほぼ-1の勾配をもつことがわかる。 (D_R / D_T) の小さい条件下では、ガス流れが炉壁寄りとなるため、本実験のように融着帯のない場合には一種の吹抜け状態となり、

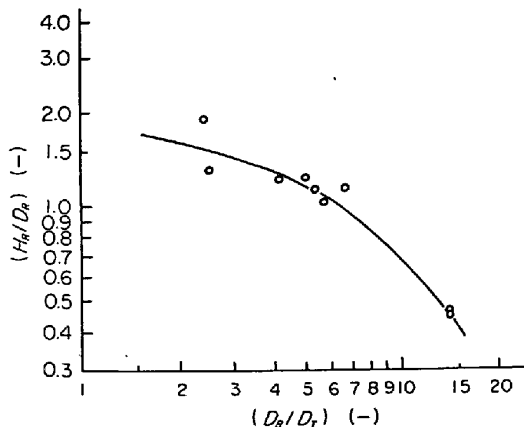


Fig. 14. Relationship between height and depth of raceway.

コークスの下降が盛んになる結果、見掛上 H_R が低くなるのではないと思われる。

なお、本報告に関する実験条件ではコークスの粉化性にあまり差がないため問題はないが (10)' 式が示しているようにレースウェイ形状は充填層の通気性に大きく依存し、たとえば非常に粉化性の大きいコークスを用いた場合にはレースウェイが異常に縦長になつたりする。この点については次報に報告する。

4.4 レースウェイ奥行の規則性に関する従来の提案との比較

レースウェイの奥行を与える (5) 式に対し、従来提案された各種の関係式との比較を試みる。

羽田野の式 (コールドモデル)

$$\frac{D_R}{D_T} = C \cdot \frac{P u^2}{g D_{PC}} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p}$$

GARDNER の式 (WAGSTAFF 式の改良; 3次元コールドモデルおよび高炉データ)⁹⁾

$$\frac{D_R}{D_T} = C \left(\frac{u^2}{g D_{PC}} \frac{\rho_g}{\rho_p - \rho_g} \right)^{0.29}$$

(C : 羽口面積と炉床径に関する項)

TAYLOR の式¹²⁾

(コールドモデル)

$$D_R = B \frac{\rho_g}{D_{PC}} u^{1.55} \quad (B : \text{常数})$$

(ホットモデル)

$$\frac{D_R}{D_T} = B' \sqrt{\frac{\rho_g}{D_{PC}}} \cdot u^{0.7} \quad (B' : \text{常数})$$

WAGSTAFF の式 (コールドモデル)⁹⁾

$$D_R = C \cdot u^2 \quad (C : \text{常数})$$

ここで、奥行 (D_R) と羽口風速の関係に着目すると、コールドモデル、特に2次元モデルによる実験結果では u_0 の指数が2に近く、3次元および燃焼を伴うホットモデル、さらに実高炉のデータでは本研究における値 1.0 から 0.6 の付近に存在することがわかる。

これから、2次元モデルではガスの横方向へ逃げる自由度が失われている結果 u_0 の効果が強調され過ぎている可能性が考えられる。一方 TAYLOR の研究では同一の装置により、燃焼および非燃焼の実験を行なつているが指数が約2倍異なつている。筆者らの考えでは、レースウェイ空間の形成にはコークスの燃焼消失と、それに伴う荷下りによる粗充填状態が本質的な意味を有していると考えており、動的なバランス関係にあると思われる。一般にコールドモデルではレースウェイ空間を形成するために充填物をなんらかの方法で押し除ける必要があり周辺の充填状態が不自然となりやすく、実験の方法によ

つてはレースウェイ生成機構そのものに影響を与える可能性はある。さらに燃焼によるガスの組成変化、容積変化の効果を考慮するとレースウェイに関する実験はやはり燃焼を伴う3次元モデルが必要であると考える。

5. 結 言

モデル燃焼炉を用いてレースウェイ形成の再現実験を行ない送風条件、コークス性状とレースウェイ形状との関係を定式化した。

1) レースウェイ奥行きについて

$$\frac{D_R}{D_T} = C \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\varepsilon_b^2 \rho_p}} \cdot \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_{PC}}}$$

レースウェイ奥行きがFroude数によつて整理されることから、慣性力に支配されていることが考えられる。

2) レースウェイ幅について

$$\frac{W_R}{D_T} = 2 \cot 30^\circ \left(1.0 + k \frac{D_R}{D_T} \right)^{1/2}$$

レースウェイ幅に奥行きの1/2乗に比例するが、衝風ジェットの拡がりより広いことから、衝風によつて形成された空間への流れ込みを考慮した動的なバランスを考える必要がある。

3) レースウェイ高さについて

$$\frac{H_R}{D_R} \cdot \frac{D_R}{D_T} = K' \sqrt{\varepsilon_b^3}$$

レースウェイ高さは奥行きの関係で定まるが、概して D_R が小のとき H_R は高くなる。レースウェイ上部のコークスは従来考えられていたような急速旋回をするのではなく、レースウェイへ向つて流れ込むためにルーズな充填状態になっているコークス粒子が、レースウェイ突当り部で向きを上方に変えた発生ガスによつて吹き上げられて流動化状態になっていると考えると理解できる。

記 号

D : 粉体の貯槽理論における塔径 (ここではコークスの荷下りの著しい部分という意味で炉芯コークス停滞域とレースウェイ空間に挟まれた部分の幅を当てはめる) [m]

D_{PC}, D_{PR}, D_T : 装入コークス径, レースウェイ内コークス径, 羽口径 [m]

D_R : レースウェイ奥行き長さ [m]

H_R : レースウェイ高さ [m]

Q : 送風流量 [l/sec]

u, u_0, u_z : 羽口軸上 y 位置におけるガス線度, 羽口先端ガス線速度, レースウェイ突当りでの速度の高

さ成分 [m/sec]

V_C, V_R : レースウェイ内コークス体積, レースウェイ体積 [m³]

W_R : レースウェイ幅 [m]

y : 羽口軸上, 先端からの距離 [m]

g, g_c : 重力加速度 [m/sec²], 重力換算係数 [kg·m/kg·sec²]

α : 側壁との境界状態, 粒子形状, 充填状態などの差にもとづく, 理論値よりの偏差を補正する係数

β : 貯槽理論における底面圧と側壁圧の換算係数

ε_b : 装入コークス充填時の空間率 (-)

ϕ_c : 装入コークス形状係数

ρ_g, ρ_p : 送風ガス密度, コークス見掛密度 (kg/m³)

μ_w : 粒子と壁との摩擦角 (貯槽理論)

文 献

- 1) 下村: 第87回鉄鋼協会大会討論会 基調講演 (1974)
- 2) 児玉, 重見, 緒方, 堀尾: 鉄と鋼, 48(1962), p. 1551
- 3) G. G. LUKASHOV, N. I. SAVELOV: Stal, (1963), p. 173
- 4) 清水, 長井, 岡部, 近藤, 稲谷: 鉄と鋼, 58(1972), p. 589
- 5) H. WYSOCKI, U. PÜCKOFF: Stahl u. Eisen, 86(1966) 13, p. 761
- 6) M. GREUEL, F. W. HILLNHÜTTER, H. KISTER: Stahl u. Eisen, 94(1974) 12, p. 533
- 7) 館: 第46回製鉄部会講演 (昭50. 6. 19)
- 8) J. F. ELLIOT, R. A. BUCHMAN, and J. B. WAGSTAFF: (Trans. AIME) J. Metals, 4(1952) 7, p. 709
- 9) G. C. GARDNER: Trans. AIME, 218(1969), p. 423
- 10) V. G. MANCHINSKII, A. F. ZAITSEV: Stal, (1960), p. 629
- 11) R. JESCHAR, W. PÖTKE, K. P. EHLERT, C. ZELLERFELD, and M. MAVROUDIS: Stahl u. Eisen, 94(1974) 12, p. 525
- 12) J. TAYLOR, G. LONIE, and R. HAY: JISI, (1957), p. 330
- 13) 赤松, 羽田野, 福田, 竹内: 鉄鋼協会第87回講演大会討論会 (1974)
- 14) 桑野, 辻, 松崎, 館: 鉄と鋼, 61(1975) 12, S382
- 15) 稲谷, 福武, 浜田, 近藤, 岡部: 鉄鋼協会第87回講演大会 討論会 (1974)
- 16) 化学工学協会: 化学工学便覧(改訂三版), (1968) p. 838 [丸善]
- 17) 化学工学協会: 化学工学便覧(改訂三版), (1968) p. 134 [丸善]
- 18) 原田幸夫: 流体の力学(1962), p. 214 [槇書店]
- 19) 化学工学協会: 化学工学便覧(改訂三版), (1968) p. 141 [丸善]