

焼結ベッド下部での通気スリットの形成とその焼結への影響

主代 晃一*・小西 行雄*・井川 勝利*・滝平 憲治*²・藤井 紀文*²

Formation of the Vertical Slits in the Lower Part of a Sintering Bed and Their Effect on Sintering
Kouichi NUSHIRO, Yukio KONISHI, Katsutoshi IGAWA, Kenji TAKIHIRA and Norifumi FUJII

Synopsis : The conditions for stable formation of vertical slits in the lower part of the sintering bed and their effect on the sintering were investigated. The effect of the slits was evaluated experimentally with a test pot, feeding simulator and commercial plant. The total pressure drop was decreased and the permeability in the bed was improved by the formation of vertical slits. The gas flow rate in the slits was calculated at 1.8 times as large as that of a conventional bed. Moisture condensation, which decreases the void fraction in the sintering bed, is reduced by this increased gas flow rate. To form slits, plates were inserted vertically in the lower part of the raw material on the pallet of sintering machine. The ratio of the height of the plates to the distance between plates should be under 0.5 for stable feeding without stagnation of the raw material.

Key words : sintering ; vertical slits ; gas flow ; feeding simulator ; pressure drop ; productivity.

1. 緒言

焼結プロセスにおける通気性に関し、その重要性から多くの報告がなされており¹⁻⁴⁾、通気性改善技術の開発も盛んに行われている。

通気性に関する焼結特性として、点火後に形成される原料湿潤帯の通気抵抗が初期原料のそれより著しく大きく、通気を阻害する大きな要因となることが指摘されている^{1,3)}。そこで通気性を改善する手段として、たとえば焼結ベッドに機械的な空隙(以後、通気スリットと称する)を設ける研究が行われている⁵⁻⁹⁾。この通気スリットの導入によりベッド内ガス流れが変化し、原料湿潤状態が変化すると考えられるが、これらの関係については従来の報告では明確になっておらず、通気改善機構が十分理解されているとは言えない。

そこでこの湿潤帯に注目し、通気スリットを形成した場合の湿潤状態を調べるとともに、ベッド内ガス流れの解析を行い、両者の関係を明確化し、通気スリットを使用した場合の通気改善機構を検討した。

また通気スリットの形成方法についても、従来詳しい報告がなされていないので、装入実験装置を用いてこの検討を行い、通気スリットの安定形成条件を考察し、実機において通気スリット形成実験を行った結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

通気スリット形成時の焼結特性の測定は主に小型鍋実験により行った。 $\phi 0.15 \times 0.4$ m高さの鍋に熱電対および差圧測定用パイプを鍋中心まで挿入し、焼結中の層内温度、差圧を測定した。この焼結鍋は縦断面で2分割することにより、焼結中断時の原料の迅速なサンプリングが可能である。原料層内への通気スリットの形成は、鍋中央に長さ0.075m、厚さ0.02mの板を立て、グレート面からの高さ0.15mまで板の回りに原料を装入し、板を引き抜いた後、上面にガーゼを敷き、その上にさらに原料を装入して行った。焼結は風量一定(0.3Nm³/min)および吸引圧一定(5.9 kPa)の条件で行った。

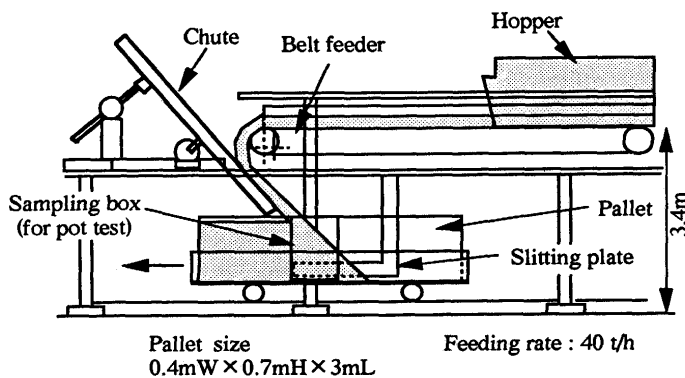


Fig. 1. Schematic diagram of feeding simulator.

平成9年1月21日受付 平成9年4月11日受理 (Received on Jan. 21, 1997; Accepted on Apr. 11, 1997)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

* 2川製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition of raw materials (mass%).

Material	C.W.	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Bedding fine	3.62	61.03	2.26	4.13	1.45	1.78	0.35

Table 2. Mixing condition of raw materials (mass%).

Bedding fine	67.8
Lime stone	10.9
Siliceous stone	1.3
Return fine	20.0
Coke	4.3

また実機を想定した通気スリットの安定形成条件の検討は装入シミュレーターを用いて行った。Fig. 1に装入シミュレーターの概略図を示す。ここでは図中に示すように、通気スリット形成のため原料斜面下部に板厚0.02m、高さ0.25mのL字型の鉄板を挿入した。装入後、パレットの中央部を抜き取った、幅0.4m、長さ0.4m、層厚0.6mのベッドで焼結実験を行った。焼結実験に際しFFSを先の小型鍋実験でのFFSと同程度とするため、吸引圧は11.8 kPaで一定とした。

上記の実験に使用した主原料の化学組成をTable 1に、原料配合比率をTable 2に示す。原料の水分量は7%となるように混合造粒時に水を添加した。

さらに当社水島製鉄所第2焼結機においても、通気スリット形成のために原料装入斜面下部に鉄板を挿入する実験を実施した。焼結機パレット幅は4mであり、挿入する板の間隔を0.4m、板の高さを0.2m、板厚0.02mとして9枚の板を挿入した。挿入する板は焼結機長手方向での移動を可能として挿入有無での操業データの比較を行った。操業条件はBTP(Burn Through Point)および層厚が一定となるように調整した。

3. 実験結果

3.1 小型鍋実験結果

Fig. 2に風量一定条件で焼結した場合のベッド内の圧力損失と温度分布の測定結果を示す。なお測定結果はグレート面より0.25mの高さの熱電対が最高温度に達した時点のものである。通気スリットを形成した場合、通気性が改善し圧力損失が低下しているが、特に下層の圧力損失の低下が大きかった。

次に吸引圧5.9 kPa一定条件下での点火開始からの風量変化をFig. 3に示す。通常のベッドに比較し、通気スリットを形成したベッドの通過風量は点火前から大きく、そのまま推移した。いずれの場合も点火直後から通過風量が急速に減少し、焼結後半に再び増加した。

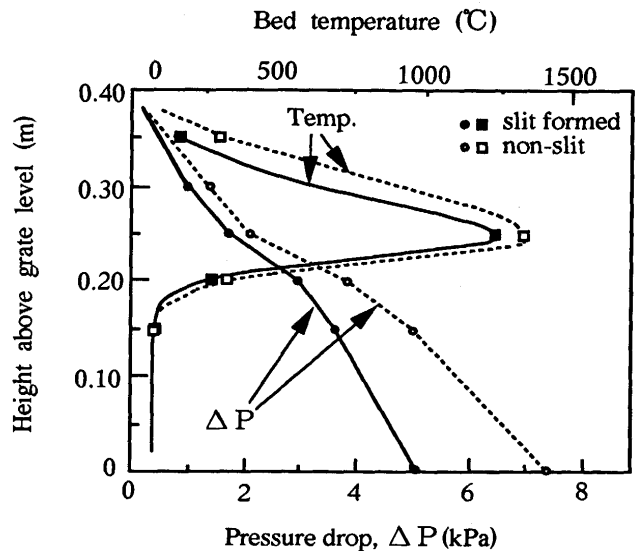


Fig. 2. Pressure drop and temperature in sintering bed under the condition of a constant gas volume.

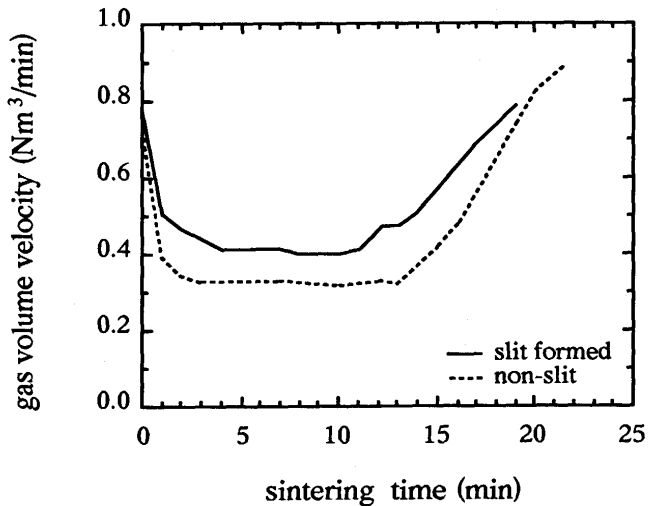


Fig. 3. Change of gas volume velocity during sintering.

吸引圧5.9 kPa一定条件下でグレート面より0.25mの高さの熱電対が最高温度に達した時点で焼結を中断した場合の原料水分の測定結果をFig. 4に示す。通気スリットを形成しない場合には全域で水分の凝縮がみられ湿潤帯の形成が確認された。通気スリットを形成した場合は、通気スリット付近(Aの領域)では水分が低下したが、鍋周辺部(Bの領域)では水分の凝縮が生じた。

焼結終了後のシンターケーキの断面の観察によると、通気スリットを形成した場合には、そこに相当する部分の気

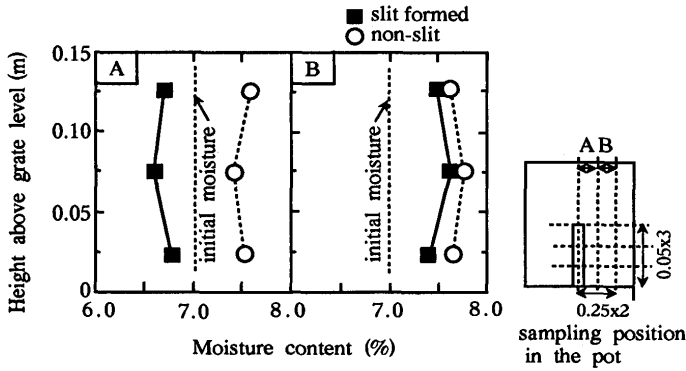


Fig. 4. Distribution of moisture in sintering bed.

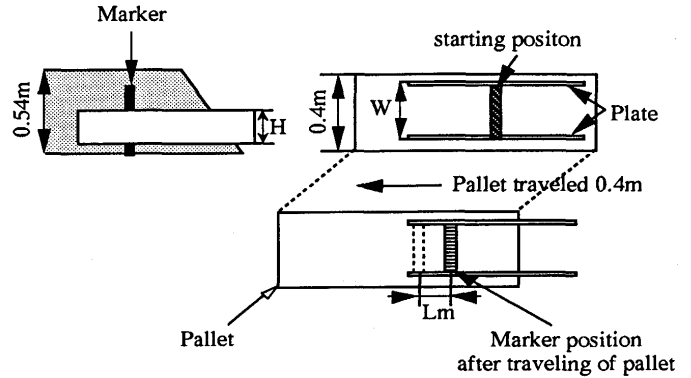


Fig. 6. Schematic diagram of experiment on stagnation.

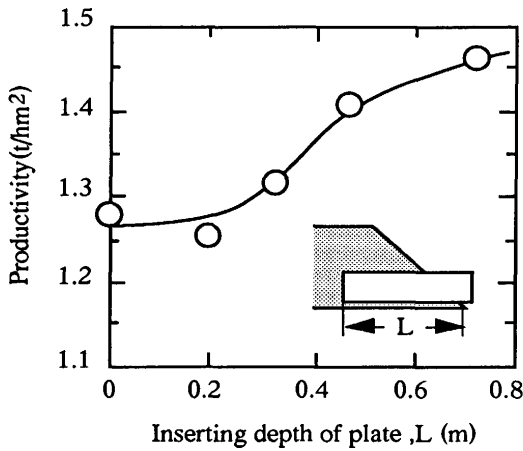


Fig. 5. Effect of inserting depth of slitting plate on productivity.

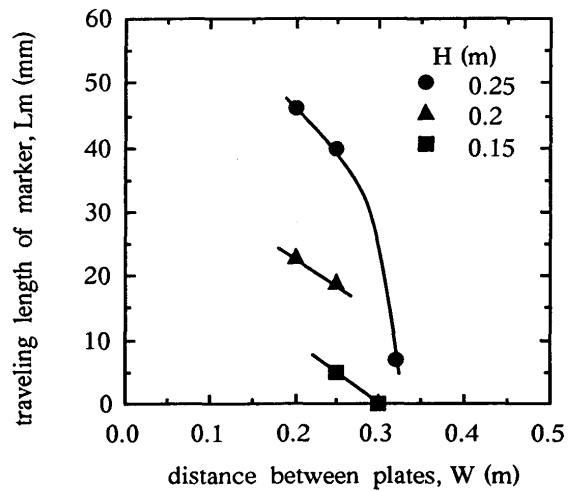


Fig. 7. Influence of distance between plates on traveling length of marker.

孔が粗大化していた。

3・2 装入シミュレーター実験結果

Fig. 5 に挿入板先端のベッド斜面下端部からの距離Lと焼結生産率の関係を示す。なお板はパレット幅方向中央部への1枚のみの挿入である。Lが小さい場合は、生産率の向上は認められないが、0.5m以上では生産率の向上が顕著となり約15%の生産率向上となった。従って通気スリットの形成効果を得るには、ベッド斜面下端部より0.5m以上板を挿入する必要があると考えられる。

次に挿入する板の間隔を検討するため、2枚の板を用いた装入実験を行った。板の間隔を0.2m、高さを0.25mとした場合には、挿入板の間で原料が滞留し、装入原料がオーバーフローした。そこで原料滞留状態を調べるため、Fig. 6に示すようにベッド内にマーカーとして石灰粉を埋め込み、挿入する板の間隔Wと高さHを変えた場合のマーカーの移動距離 L_m を測定した。その結果をFig. 7に示す。Wを大きくし、Hを小さくすることにより L_m は小さくなり、滞留が起りにくくなる結果が得られた。本実験ではHを0.15mとし、Wを0.3mとしたときにマーカーの移動は起こらず円滑な装入が可能であった。

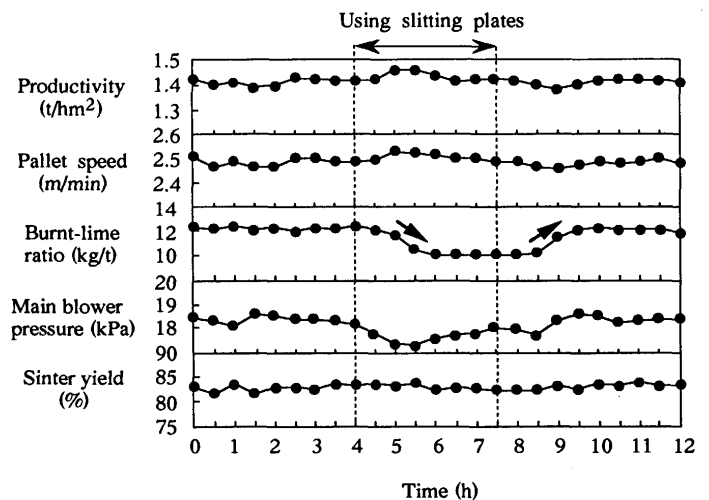


Fig. 8. Results of Mizushima 2DL operation.

3・3 実機実験結果

先の結果に基づき水島第2焼結機において実機実験を行った。挿入する板の間隔を0.4m、板の高さを0.2mとして等間隔に9枚の板を挿入した。Fig. 8に操作データの推

移を示す。板の挿入により通気が改善し、メインブローアの吸引圧の低下が認められた。これに対応して生石灰添加量を減らし、生産率を一定とする通気調整を行った結果、板の挿入により生石灰原単位は2 kg/t-s低減した。逆に板をベッドから抜くことにより通気は悪化し、生石灰原単位が再び上昇した。

焼結鉦歩留に関しては、板の挿入中の低下は認められなかった。

以上のようにベッド下部に垂直に板を挿入することにより、焼結ベッドの通気性が大幅に改善されることが実機においても確認された。

4. 考察

4.1 通気スリット形成時のベッド内ガス流速分布と通気性の関係

小型試験鍋内での2次元のガス流速分布を汎用流体解析プログラムPhoenicsを用いて計算した。計算に当りベッド内の圧力損失はErgunの式¹⁰⁾により求めた。

$$\Delta P/H = 150(1-\epsilon)^2 \cdot \mu \cdot U / (\epsilon^3 \cdot d_p^2) + 1.75(1-\epsilon) \rho_g \cdot U^2 / (\epsilon^3 \cdot d_p) \dots\dots\dots (1)$$

ここでガス粘度 μ を $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 、原料粒子径 d_p を 0.002m 、ガス密度 ρ_g を 1.3kg/m^3 として以下の計算を行った。また解析領域としてベッド内の原料帯を想定し、ここでの風速への温度の影響は小さいと考え、等温度場として扱った。焼結中の原料帯の流速計算は、乾燥帯より上部を一括した層として圧損、層厚をFig. 2より求め、残りの原料帯の層厚と圧損を算出して行った。小型鍋試験の結果では、吸引負圧 5.9kPa での点火前のベッド通過風量は、通気スリットのないとき $0.73 \text{Nm}^3/\text{min}$ であり、この結果より、空間率 ϵ は 0.34 と算出された。一方、通気スリットを形成した場合の通過風量は $0.78 \text{Nm}^3/\text{min}$ であり、通気スリットの ϵ は、通気スリット以外の ϵ を 0.34 とし、風量を実測値に合わせるように計算して求めた結果 0.41 であった。この計算結果より、通気スリット部分の空間は板の形状そのままの空間ではなく、ここに原料が流れ込んだ比較的疎な充填状態の原料層を形成しているものと考えられる。

点火後通過風量は急激に低下し、焼結初・中期の風量は、通気スリットのない条件では、 $0.33 \text{Nm}^3/\text{min}$ 、通気スリットを形成したときは $0.41 \text{Nm}^3/\text{min}$ 程度であった。Fig. 2の結果より原料帯より上部の乾燥帯、燃焼反応帯および焼結帯の圧力損失と層厚はトータルして概ね 3.5kPa 、 0.2m となり、この値を用いて先と同様に空間率 ϵ を計算した。通気スリットのない条件での原料層の ϵ は 0.25 、通気スリットを形成した場合の通気スリットの ϵ は 0.40 と算出された。次に通気スリットを形成した時の風速分布の計算結果をFig. 9に示す。通気スリットを形成しない条件ではガス

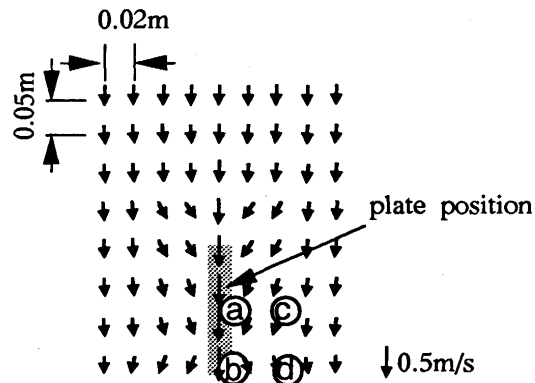


Fig. 9. Calculated velocity pattern of gas flow in the slit formed bed.

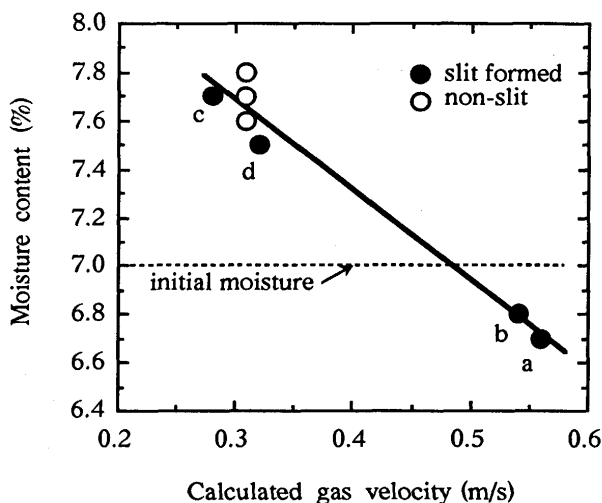


Fig. 10. Relationship between calculated gas velocity and moisture content.

流速はベッド内ではほぼ均一に 0.31m/s 程度であったが、通気スリットを形成した場合、ガス流れに偏りが生じ、図中a, b点ではガス流速は 0.56m/s と大巾に増加した。c, d点では 0.28m/s と若干の減少であった。

Fig.10に計算した流速とサンプリングした原料の水分の関係を示す。図中記号a~dは、Fig. 9中での位置に相当する。流速の増加に対応して原料水分は低下しており、通気スリットの形成によりガス湿度が相対的に低下し、水分の凝縮が抑制されたと考えられる。

通気スリットを形成しない時の、点火前後での湿潤帯形成による原料層の ϵ の減少は 0.09 であり、その内訳は、凝縮水分の体積分と粒子再配列に伴う層収縮分³⁾と考えられ、増加した水分 0.5% の体積は ϵ の 0.02 程度に相当し、残りの 0.07 程度の減少が層収縮によるものと考えられる。これに対し通気スリットの形成時には、通気スリット部分での水分凝縮が抑制されたことにより、上記の空間率の減少が起こらず、これにより通気性が改善されたと考えられる。

4.2 挿入板間での原料滞留条件

挿入板間での原料滞留条件を力学的に検討した。Fig.11

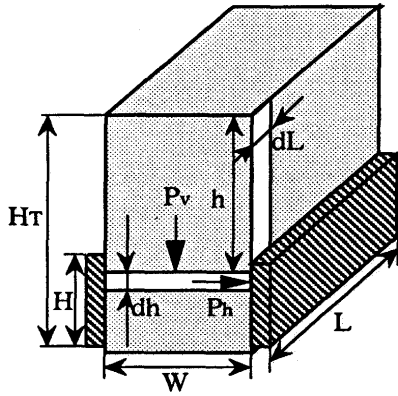


Fig. 11. Modeling for calculation of powder pressure.

に示すモデルに基づき、Janssenの式¹¹⁾を応用し、平行平板間の粉体圧を計算した。微小区間dh, dL間の粉体層にはたらく上下方向の力のバランスは

$$W \cdot dL \cdot P_v + W \cdot dL \cdot \rho_B \cdot dh = W \cdot dL \cdot (P_v + dP_v) + 2 dL \cdot \mu_w \cdot K_a \cdot P_v \cdot dh \dots (2)$$

となる。

ここで主動粉体圧係数K_aは

$$K_a = P_h / P_v = (1 - \sin \phi_1) / (1 + \sin \phi_1) \dots (3)$$

である。

これより

$$\int_0^h dh = \int_0^h \{1 / (\rho_B - 2 \mu_w \cdot K_a \cdot P_v / W)\} dP_v \dots (4)$$

h=0のときP_v=0より

$$h = \{W / (2 \mu_w \cdot K_a)\} \ln \{ \rho_B / (\rho_B - 2 \mu_w \cdot K_a \cdot P_v / W) \} \dots (5)$$

となり、P_h=K_a・P_vよりP_hは

$$P_h = (\rho_B \cdot W / 2 \mu_w) \{1 - \exp(-2 \mu_w \cdot K_a \cdot h / W)\} \dots (6)$$

と求まる。このP_hにより粉体層には摩擦力F_hが作用する。

$$F_h = 2 L \cdot \mu_w \int_{H_T-H}^{H_T} P_h dh = W \cdot \rho_B [H - (1/Y) \{ \exp(-Y \cdot H_T) - \exp(-Y \cdot (H_T - H)) \}] \dots (7)$$

ここで

$$Y = 2 \mu_w \cdot K_a / W$$

である。

この摩擦力F_hにより粉体層にせん断力τ・L・Wが加わるが、層内応力が限界せん断応力τ_L以上になったとき、パレットの動きに抗して原料が滞留し、マーカーが移動すると考えられる。そこでマーカー移動距離L_mが摩擦力と限界せん断力の差に比例すると仮定すると、

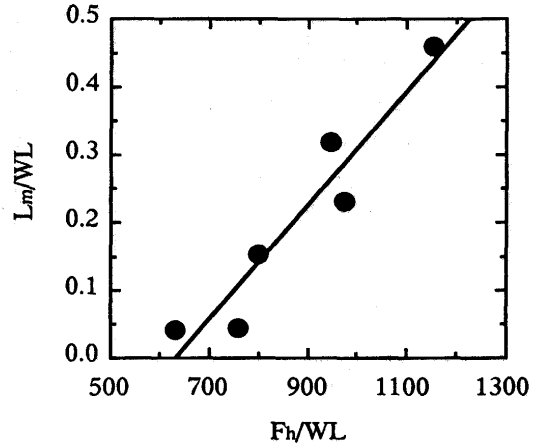


Fig. 12. Plots of L_m/WL and F_h/WL.

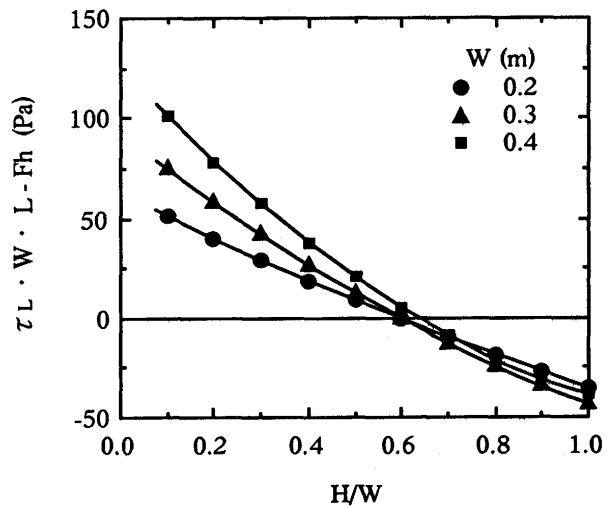


Fig. 13. Relationship between the difference of calculated forces and H/W.

$$L_m = A (F_h - \tau_L \cdot W \cdot L) \dots (8)$$

のようになる。L_mの測定値とその時のWおよびHから求めたF_hの計算値を用いて(8)式の両辺をW・Lで除した値をプロットするとFig.12のようになり、x軸切片が限界せん断応力τ_Lに相当し、627Paと求まる。ここでF_hの計算に当たっては、板と原料の摩擦係数μ_wを0.3、原料嵩密度ρ_Bを2000kg/m³、内部摩擦角φ₁を40°とした。

この限界せん断応力を用いて、WとHを変化させたときの限界せん断力と摩擦力の差を計算した結果がFig.13である。この差が正の場合マーカーが移動しない条件と考えられ、Wに寄らずH/Wが0.5以下の場合マーカーが移動しない即ち原料が滞留しない条件と考えられる。

実験結果においてもH=0.15m, W=0.30mのときマーカー移動が生じないことや実機テストにおいても原料滞留が生じないことから、原料滞留条件の実験結果と計算結果との対応は良いと考えられる。

5. 結言

焼結ベッドに板を挿入し機械的に通気スリットを設け通気性を改善する方法に関し、鍋試験による焼結特性の解析、装入実験による通気スリット形成方法の検討および実機実験を行った。

(1)原料ベッド下部に通気スリットを設けた場合、全圧損が低下し、通気性が改善される。ベッド内のガス流速分布の計算により、通気スリット部分の空間率は0.40程度であり、この部分のガス流速は均一なベッドの1.8倍程度と考えられる。

(2)装入シミュレーターを用いた実験では、原料装入時に形成される斜面下部に高さ0.25m、幅0.02mの板を0.7m挿入し、抜き出したベッドを負圧11.8kPa一定条件で焼結した場合、生産率は約15%向上した。

(3)通気スリットを形成する際、挿入する板の間での原料の滞留を防止するには、板の高さHと板の間隔Wの比H/Wを0.5以下とする必要があると考えられる。

(4)実機焼結機においても給鉱部ベッド下部に板を挿入することにより通気性が向上し、生石灰低減が可能となることが確認された。

記号

d_p : 粒子径(m)
 F_n : 板と原料との摩擦力(N)
 H : ベッド層高方向距離(m)

H_r : 原料層厚(m)
 L : 挿入板のベッド内での長さ(m)
 L_m : マーカー移動距離(m)
 K_a : 主動粉体圧係数
 P_h : 水平方向の粉体圧(Pa)
 P_v : 鉛直方向の粉体圧(Pa)
 ΔP : 圧力損失(Pa)
 U : ガス層内流速(m/s)
 W : 板の間隔(m)
 ε : 層空間率
 μ : ガス粘度(Pa·s)
 μ_w : 板と原料の摩擦係数
 ρ_B : 原料嵩密度(kg/m³)
 ρ_g : ガス密度(kg/m³)
 τ : せん断応力(Pa)
 τ_L : 限界せん断応力(Pa)
 ϕ_i : 内部摩擦角

文 献

- 1) 和島正己, 細谷陽三, 柴田充蔵, 相馬英明, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), 1719.
- 2) 佐藤駿, 吉永真弓, 一伊達稔, 川口尊三: 鉄と鋼, 68 (1982), 2147.
- 3) 柴田充蔵, 和島正己, 相馬英明, 松岡 宏: 鉄と鋼, 70 (1984), 178.
- 4) 坂本 登, 野田英俊, 熊坂 晃, 谷中秀臣: 鉄と鋼, 75 (1989), 50.
- 5) 喜田村健治, 三宅貴久, 柳沢一好, 小野啓雄, 正保 剛: 鉄と鋼, 78 (1992), 1037.
- 6) 小幡昊志, 高橋博保, 安田素郎, 渡辺 実, 田辺仁志, 石橋源一: 材料とプロセス, 4 (1991), 117.
- 7) 小西行雄, 井川勝利, 反町健一, 滝平憲治, 藤井紀文, 安川明生: 材料とプロセス, 8 (1995), 915.
- 8) 鈴木治久, 黒川 博, 吉田 均, 加太茂久, 飯田洋行: 材料とプロセス, 8 (1995), 905.
- 9) H.Beer, K.Kersting and P.Werner: Ironmaking Conf. Proce. 54 (1995), 523.
- 10) S.Ergun: Chem.Eng. Progress, 48 (1952), 89.
- 11) H.A.Janssen: V.D.I., 39 (1895), 1045.