

© 1986 ISIJ

充填層内における微粉を伴った気体の流れの挙動

論文

山岡 秀行*

Flow Characteristics of Gas and Fine Particles in Packed Bed

Hideyuki YAMAOKA

Synopsis :

A cold model experiment and a theoretical study concerning the two phase flow of gas and solid in a packed bed were performed and the following results were obtained.

- 1) Pressure drop and powder hold-up increased with the decrease in gas velocity when gas velocity was below a certain value.
- 2) A theoretical model to predict the pressure drop and the powder hold-up was developed under the assumption that the interaction force between gas and powders was expressed by the Ergun type gas flow resistance.
- 3) On the basis of this model, the aggravation of gas flow resistance of the blast furnace under the conditions of reduced production rate was explained to be caused by the accumulation of powders in the lower part, above tuyere level, of the furnace.

1. 緒 言

従来、高炉のガス流れを研究する場合、炉内を流れるガスは、Ergun式に代表されるように、粉を含まない清浄なガスとして取り扱われてきた。

しかし、コークスの反応や衝撃による粉化、鉱石の熱割れや還元粉化、さらに、炉下部で生成する金属や金属酸化物の蒸気の再凝縮などの過程を経て生成する粉の一部は気流中に混入して移動、または、局部蓄積することにより充填粒子とは異なる挙動を示すと考えられる。

このように、粉体が気流によつて輸送される現象は、粉体輸送技術と関連して発展した固気2相流の研究分野で取り扱われているが¹⁾、充填層中の粉体気流輸送に関する研究例は少なく²⁾、高炉のガス流れを固気2相流の視点から検討した例はみられない。

そこで、冷間実験を行い充填層中の固気2相流の特性を検討するとともに、粉の運動状態と圧力損失を予測する理論式を導出し、高炉通気現象について考察した。

2. 充填層内固気2相流冷間実験

充填層を形成させる粒子、および気流中に含まれる粉として、形状係数 $\phi_k=1$ 、みかけ密度 $\rho_k=2500 \text{ kg/m}^3$ のガラス球を用い、気体としては常温常圧の空気を用いて、各種の充填粒子径と粉径の組合せに対し、空気流速

と粉供給速度を変化させて、層内における粉の滞留量と圧力損失におよぼす影響を調査した。

2.1 実験方法

実験装置を Fig. 1 に示す。内径 50 mm、長さ 600 mm の、両端を 45° の円錐状にしたアクリルパイプ製本体を垂直に保持し、その内部にガラス球の充填層を形成させ、スクリーフィーダー式の粉切出し装置でガラス

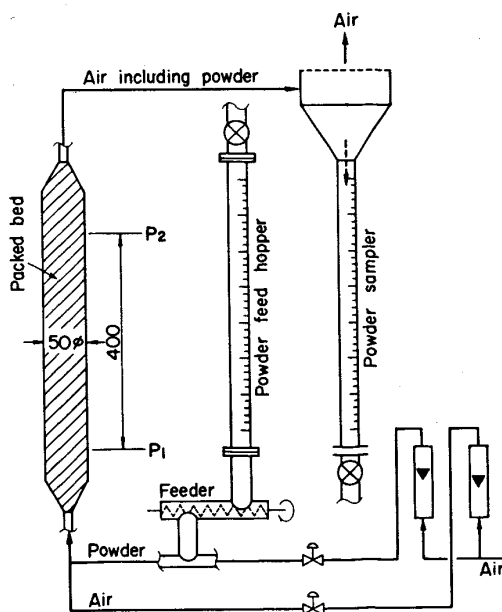


Fig. 1. Experimental apparatus.

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 4 月 5 日受付 (Received Apr. 5, 1985)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

球粉を切り出し、空気輸送して本体下端から吹き込んで層内に固気2相流を形成させた。圧力損失は、本体に400 mmの間隔で設けた静圧孔を用いて測定した。粉供給速度は、ホッパー内の粉の減量を計量して求めた。また、粉回収速度は、本体上端から排出される空気中の粉をサイクロンで分離し、目盛り付きホッパーに回収して粉の増量を計量することにより求めた。

充填粒子として用いたガラス球の直径は2.4, 4.0, および6.1 mm ϕ 、粉として用いたガラス球の直径は0.07, 0.12, および0.25 mm ϕ である。

上記の粉の単粒子終端速度は、常温常圧の空気に対し、それぞれ0.44, 1.17, および2.80 m/sと計算される¹⁾。そこで空気流速はこの値を含む範囲とし、充填層空隙率 $\varepsilon_p=0.4$ を考慮して、空塔速度で0.085~2.0 m/sに設定した。

一方、粉供給速度は空塔流量で $G_k=0.05\sim0.80$ kg/m²·sの範囲に設定した。この結果、空気質量流量に対する粉の質量流量の比で定義される固気比 μ は、最大空塔空気流速条件に対し $\mu=0.02\sim0.33$ 、最小空塔空気流速条件に対し $\mu=0.50\sim8.0$ の範囲に設定されたことになる。

実験手順をFig. 2に示す。本体にガラス球を充填したあと、空気のみを流して清浄ガスに対する圧力損失を測定(A)する。次に、所定の量で粉供給を開始すると圧力損失は急速に上昇(B)するが、やがて定常化するとともに粉の供給速度と回収速度は等しくなる(C)。この状態で圧力損失を測定し、清浄ガスに対する圧力損失の増加分を固気2相流に起因する圧損増分とした。最後に、D点で粉供給を停止すると、しばらくの間粉回収は持続されるが、やがて粉回収は完了し、層内の粉滞留は解消され圧力損失も元に戻る(E)。この間に回収された粉を

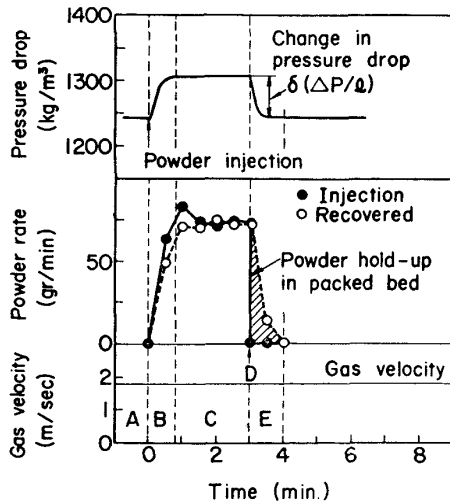


Fig. 2. Experimental procedure.

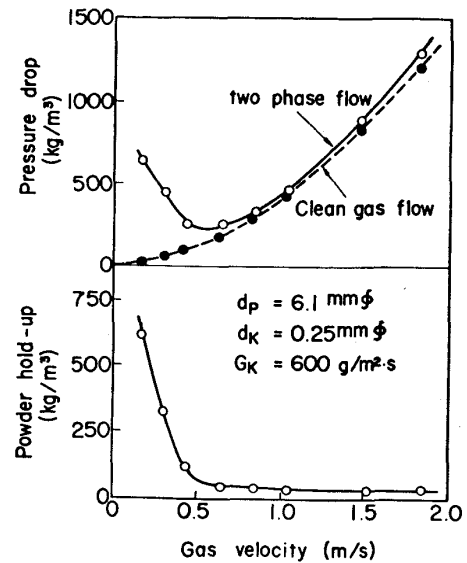


Fig. 3. Difference in pressure drop between clean gas flow and two phase flow in packed bed, observed.

計量し、充填層内空隙容積当たり換算した値を粉滞留量とした。ただし、空気流速の低い実験条件の場合、粉供給停止後粉回収が完了しても層内に粉が滞留状態で残存し、圧力損失も回復しないことがある。このような場合には、空気流速を増加させて粉を全量回収するようにした。

2.2 実験結果

充填粒子径6.1 mm ϕ の場合を例にあげ、粉を含まない清浄空気と0.25 mm ϕ のガラス球粉を含む固気2相流に対して測定された空気流速と圧力損失の関係をFig. 3に示す。

空気流速が0.5 m/s以上の場合、固気2相流の圧力損失の方が清浄空気より若干大きくなるが、両者に顕著な差異はない。しかし、それ以下の空気流速になると、空気流速の低下に対して固気2相流の圧力損失は、粉滞留量の急激な増加をとめない、清浄空気の場合とは逆に上昇することが判明した。

粉供給速度に対する粉滞留量と圧損増分の関係をFig. 4に示す。

空気流速が0.43 m/s以上の比較的空気流速の高い条件では、粉滞留量と圧損増分は粉供給速度に比例する。しかし、Fig. 3で圧力損失が空気流速の低下に対して逆に上昇する流送域(ここでは0.30 m/s)になると、粉滞留量と圧損増分は粉供給速度に対して原点を通らない直線関係へと移行する。

空気流速に対する粉滞留量、および圧損増分の関係をFig. 5に示す。

充填粒子径が小さいほど高流速域(ここでは0.5 m/s

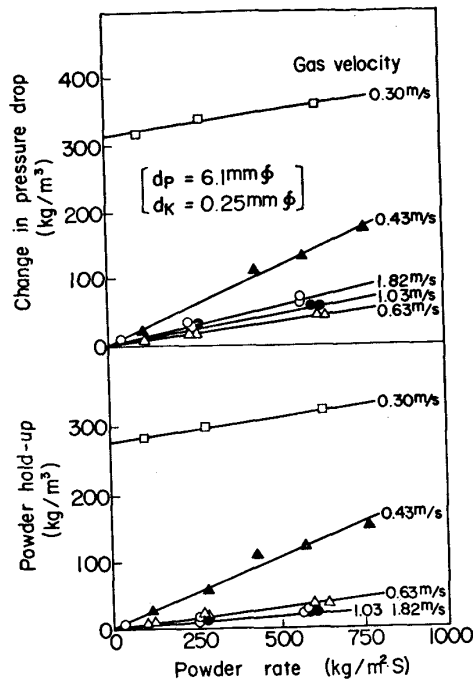


Fig. 4. Effect of powder rate on the change in pressure drop and powder hold-up.

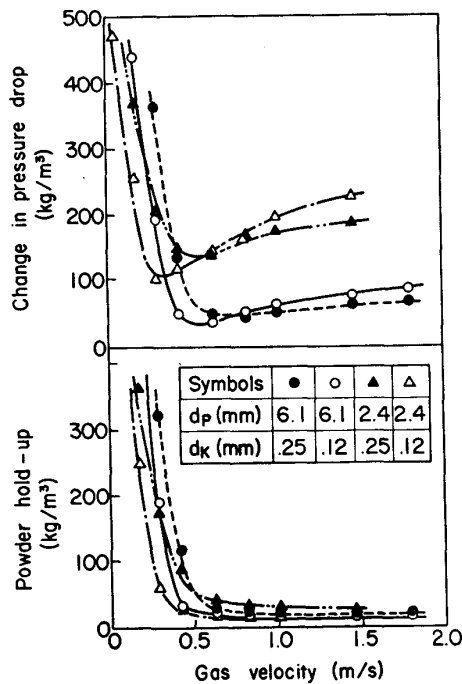


Fig. 5. Effect of the diameters of particle and powder on the change in pressure drop and powder hold-up.

以上)における圧損増分は大きくなる。

また、粉径が小さいほど高流速域における圧損増分は大きくなるとともに、粉滞留量の増加をとめない圧損増分が上昇する限界空気流速は低くなる。

以上、固気2相流の場合、ガス流速をある限界流速を越えて低下させると、粉滞留量の増加をとめない、圧力

損失は空気流速の低下に対して逆に上昇すること、さらに、この限界空気流速は粉供給速度、粉粒子径、および充填粒子径に依存することが示された。

3. 充填層内固気2相流の理論的検討

粉体の巨視的な運動状態に着目し、充填層内における固気2相流の状態と、冷間実験で示した特異現象の発生条件について理論的検討を行った。

3.1 状態記述式の導出

固気2相流中の粉の状態は、巨視的にみた場合、濃度、すなわち粉滞留量と速度で記述できる。

粉滞留量を充填層空隙単位容積当たり存在する粉の量として定義すれば、充填層空隙基準の粉体空隙率 ϵ_k とみかけ密度 ρ_k を用いて、粉滞留量 H_k は次式で記述される。

$$H_k = (1 - \epsilon_k) \rho_k \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、粉の有効流路を考慮すれば、粉の速度 U_k 、粉滞留量 H_k 、および粉供給速度 G_k の間に次の関係が成立する。

$$G_k = \epsilon_p H_k U_k \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、粉は重力、およびガスとの相互作用力を受けて運動し、運動に対して運動抵抗力が作用していると考えられるので、定常状態において、次式に示す力の均衡関係が成立する。

$$F_{k,g} - H_k \cdot g / g_c = R_k \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $F_{k,g}$ はガスと粉の相互作用力、 $H_k \cdot g / g_c$ は粉滞留量に相当する重力、 R_k は運動抵抗力を示す。

ガスの状態は圧力と速度で記述される。

充填層内におけるガスの有効流路を考慮すれば、実質速度 U_g と空塔速度 V_g との間には次の関係が成立する。

$$V_g = \epsilon_p \epsilon_k U_g \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方、粉とガスの速度は必ずしも一致しない。したがって、ガスには充填粒子とともに粉との相互作用力が作用していると考えられるので、圧力損失 $\Delta P/l$ は次式で記述される。

$$\Delta P/l = F_{p,g} + F_{k,g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $F_{p,g}$ はガスと充填粒子との相互作用力、 $F_{k,g}$ はガスと粉との相互作用力を示す。

3.2 相互作用記述式の導出

清浄ガス流れに対する圧力損失 $\Delta P_0/l$ は Ergun タイプの流体抵抗力を用いて次式のように記述できる。

$$\Delta P_0/l = 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1 - \epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right)^2 \frac{V_g}{\epsilon_p} + 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \left(\frac{1 - \epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right) \left(\frac{V_g}{\epsilon_p} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、固気 2 相流の場合にも、ガスと充填粒子に着目すれば、Ergun タイプの流体抵抗力が適用できると考えられる。そこで、(4)式から得られる粉体空隙率 ϵ_k の影響も補正した実質流速を採用し、ガスと充填粒子との相互作用力 $F_{p,g}$ を次式で記述した。

$$F_{p,g} = 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right)^2 \frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} + 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right) \left(\frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

気流中の単一粒子とガスの相互作用力は、ニュートン抵抗力とストークス抵抗力を用いて記述される¹⁾。しかし、粉が集団化して存在する場合、単一粒子よりもガスとの相互力は増大するとされている¹⁾³⁾ もの、定説化された記述式は存在しない。

ここでは、気流中の粉体集団も、粉との相対速度で流れるガスに対して 1 種の充填層を形成しており、Ergun タイプの流体抵抗力を適用しようと考え、代表直径として粉体集団の水力直径を、ガス流速としてガスと粉の相対実質速度を用いた次式によりガスと粉の相互作用力 $F_{k,g}$ が記述できるとした。

$$F_{k,g} = 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_k}{\epsilon_k \phi_k d_k} \right)^2 (U_g - U_k) + 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \frac{1-\epsilon_k}{\epsilon_k \phi_k d_k} (U_g - U_k)^2 \dots\dots\dots (8)$$

本仮説の妥当性を実験結果を用いて検討する。

粉体集団を充填層とみなす場合、抵抗係数 f_k とレイノルズ数 Re_k は以下のように記述される。

$$f_k = \frac{g_c \cdot F_{k,g}}{\rho_g (U_g - U_k)} \left(\frac{\epsilon_k \phi_k d_k}{1 - \epsilon_k} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$Re_k = \frac{\rho_g (U_g - U_k)}{\mu_g} \left(\frac{\epsilon_k \phi_k d_k}{1 - \epsilon_k} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、粉体空隙率 ϵ_k 、ガス実質速度 U_g 、および粉の速度 U_k は、(1)、(2)、(4)式を用いて、粉供給速度 G_k 、ガス空塔速度 V_g 、および粉滞留量 H_k の実測値から計算できる。また、ガスと粉との相互作用力 $F_{k,g}$ は、(5)、(6)、(7)式を変形して得られる次式に実測の圧損増分 $(\Delta P/l - \Delta P_0/l)$ と粉体空隙率 ϵ_k 、およびガス空塔速度 V_g を代入して計算することができる。

$$F_{k,g} = (\Delta P/l - \Delta P_0/l) - 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right)^2 \frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} (1-\epsilon_k) - 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \left(\frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} \right)^2 (1-\epsilon_k^2) \dots (11)$$

以上の手続きを経て求められた抵抗係数 f_k とレイノルズ係数 Re_k の関係を Fig. 6 に示す。ここで、特に高 Re_k の領域でデータのばらつきが大きい原因として、この領域に対応する空気流速の高い実験の場合、粉滞留量が少ないので計量誤差が大きくなったことがあげられる。しかし、結果は、おおむね Ergun の関係を用いて整理されていることから、上記の仮説は妥当なものと考えられる。

粉の運動抵抗力として粉体間、および粉と充填粒子の相互作用力をあげることができるが、同一性状の粉体集団の場合、巨視的にみれば、粉は同一速度で運動していると考えてよいので前者の影響は無視できる。また、粉と充填粒子の相互作用としては、衝突と摩擦があげられるが、上昇運動主体の本実験条件では後者の影響は少ないので、ここでは、粉と充填粒子の相互作用として衝突のみをとりあげ、2種類の粉体群の衝突における運動量変化を示す次式¹⁾により粉体運動抵抗力 R_k を記述した。

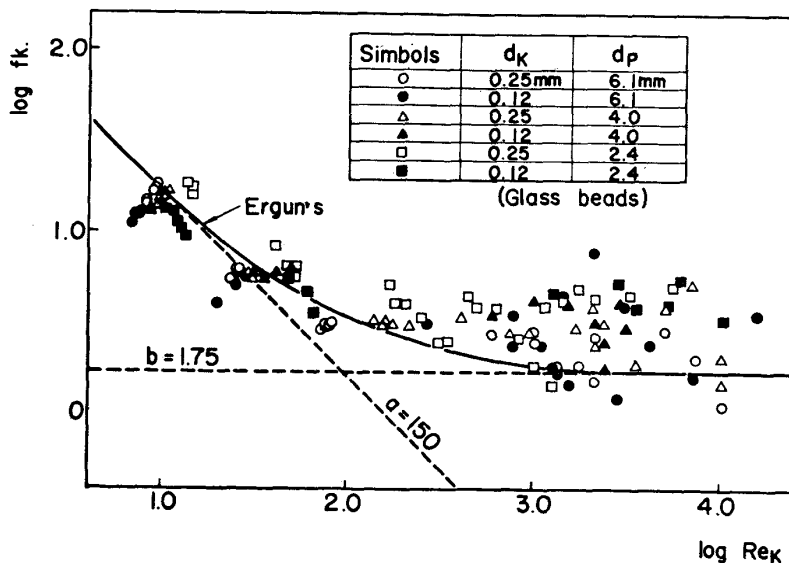


Fig. 6. Friction factor f_k vs REYNOLD's number Re_k plot for the gas flow resistance in the packed bed of powders.

$$R_k = \frac{1}{g_c} 3\beta \frac{1+e_{k,p}}{1-e_{k,p}} \times \frac{(1-\epsilon_p)\rho_p(1-\epsilon_k)\rho_k(d_p+d_k)^2}{\rho_p d_p^3 + \rho_k d_k^3} U_k |U_k| \quad (12)$$

ここに、 β は反発角補正係数であり、球の場合、 $\beta = 1/2$ となる。また、 $e_{k,p}$ は反発係数でありガラス球同士の衝突では、 $e_{k,p} = 0.94$ 程度の値⁴⁾とされている。

一方、運動抵抗力は粉の速度が増大する高ガス流速条件下で圧損増分の主要因子になると考えられることに着目し、空気流速 $V_g = 1 \text{ m/s}$ における圧損増分の、各種の充填粒子と粉の組合せに対する実測値を(12)式を用いて統一的に説明しうる反発係数を求めたところ、Fig. 7に示すように、 $e_{k,p} = 0.9$ となり、上記物性値に近い値が得られた。

3.3 粉、およびガス状態の計算

(2)~(5)式で示した状態方程式と、(7)、(8)、(12)式で示した相互作用力記述式を用いれば、固気2相流の状態指標を計算することができる。

(2)、(3)式に示された粉の状態方程式を、(1)、(4)、(8)および(12)式を用いて整理すれば次式に示す連立方程式が得られるので、粉の状態指標 ϵ_k, U_k が計算される。

$$150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_k}{\epsilon_k \phi_k d_k} \right)^2 \left(\frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} - U_k \right) + 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_k}{\epsilon_k \phi_k d_k} \right)^2 \left(\frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} - U_k \right)^2 = (1-\epsilon_k)\rho_k + \frac{1}{g_c} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1+e_{k,p}}{1-e_{k,p}} \times \frac{(1-\epsilon_p)\rho_p(1-\epsilon_k)\rho_k(d_p+d_k)^2}{\rho_p d_p^3 + \rho_k d_k^3} U_k |U_k| \quad (13)$$

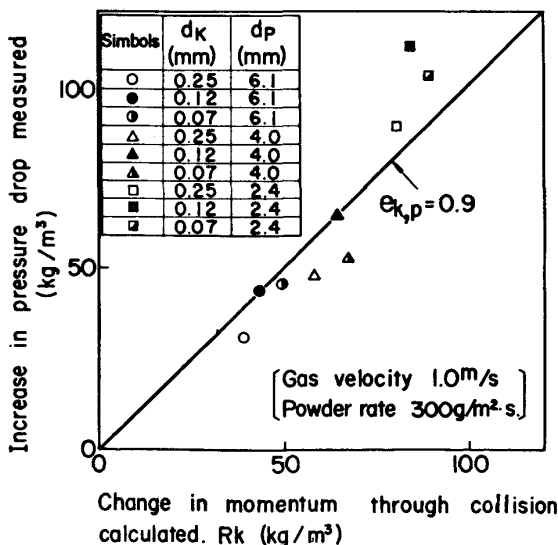


Fig. 7. Fitting of repulsion parameter.

$$G_k = (1-\epsilon_k)\rho_k U_k \epsilon_p \quad (14)$$

また、得られた粉の状態指標 ϵ_k, U_k を用いれば、(1)式から粉滞留量 H_k が、(4)式からガス実質速度 U_g が、(5)、(7)、(8)式から圧力損失 $\Delta P/l$ がそれぞれ計算される。

一方、清浄ガス流れに対する固気2相流の圧損増分 ($\Delta P/l - \Delta P_0/l$) は、(5)、(6)式と(3)式の関係を用いれば、次式に示すように、粉の状態指標で整理される。

$$\Delta P/l - \Delta P_0/l = (1-\epsilon_k)\rho_k \left[1 + \frac{1}{g_c} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1+e_{k,p}}{1-e_{k,p}} \cdot \frac{(1+d_k/d_p)^2}{1+\rho_k d_k^3/\rho_p d_p^3} \cdot \frac{1-\epsilon_p}{d_p} U_k |U_k| + \frac{1}{\rho_k} \left\{ 150 \frac{\mu_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right)^2 \frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} + 1.75 \frac{\rho_g}{g_c} \left(\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p \phi_p d_p} \right) \left(\frac{V_g}{\epsilon_p \epsilon_k} \right)^2 (1+\epsilon_k) \right\} \right] \quad (15)$$

ここで、右辺第3項の、粉存在によるガス流速変化に起因する Ergun 抵抗の増大分は、他の2項に比べて小さい。したがって、圧損増分の主要因は、第1項に示す重力と第2項に示す運動抵抗力とみなすことができる。

以上の手続きで計算される固気2相流状態指標を、ガス実質速度に対して整理した結果を Fig. 8 に示す。

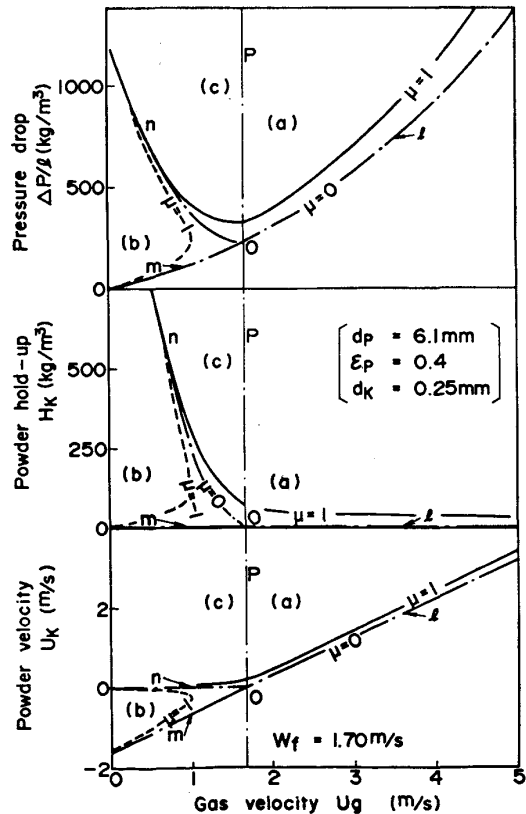


Fig. 8. Powders movement and pressure drop under the two phase flow of gas and solid, calculated by the model.

図中, 0点と直線 p を規定する粉の単粒子終端速度 W_f は, (13)式で $\epsilon_k=1, U_k=0$ とした次式で計算される。

$$W_f = \frac{V_g}{\epsilon_p} = \left(\frac{g_c \phi_k d_k \rho_k}{1.75 \rho_g} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (16)$$

また, (13)式で, $\epsilon_k=1$ とすれば曲線 l, m が, また $U_k=0$ とすれば曲線 n が求められる。

固気 2 相流状態は, 0 点, 直線 p , および曲線 l, m, n で区分される次の 3 領域に分類される。

(a) 粉体上昇運動領域; ガスの実質速度が単粒子終端速度を上回る領域であり, 粉は余り滞留量を増加させることなく, 次式に示すように, ガスとの相対速度が, おおむね単粒子終端速度に等しくなる条件で上昇運動する。

$$U_g - U_k = W_f \dots \dots \dots (17)$$

この場合, 圧力損失は若干増加する程度である。

(b) 粉体降下運動領域; $U_g < W_f$ の条件で $G_k < 0$ とすると, 図中 $\mu = -1$ の点線で示すように, (13), (14)式は同一ガス流速に対して 2 種類の解を有する。しかし, 圧力損失の低い状態の方が安定と考えられるので, 粉は, 余り滞留量を増加させることなく, (17)式の関係を保つて降下運動する。

(c) 粉体滞留領域; $U_g < W_f$, および $G_k \geq 0$ の条件で(13), (14)式は $U_k = 0$ の解を有する。この解は, 粉滞留量が増大し, 圧力損失が著しく上昇する状態に対応する。ただし, この状態が持続されるためには, その下方に粉体上昇運動領域の存在することが必要である。

3.4 実験結果との対応

本論文に示した実験では, 充填層下端から粉を強制吹き込みしているため, Fig. 8 に示した固気 2 相流領域の (a)と(c)に対する状態を調査したことになる。

Fig. 3 に示す実験に対応させた計算結果を Fig. 9 に示す。

空気流速を低下させると, ある限界流速以下の条件で, 粉滞留量の増加をとめない, 圧力損失が逆に上昇する固気 2 相流の特性がよく説明されている。ここで, 限界流速は, (16)式に示した単粒子終端速度に相当 $V_g = \epsilon_p W_f$ する。

Fig. 4 の実験に対応する計算結果を Fig. 10 に示す。

圧損増分と粉滞留量の粉供給速度依存性が, 空気流速に対して, 比例関係と原点を通らない直線関係に区分される特性が, 定性的にはあるが, 説明されている。

Fig. 5 の実験に対応する計算結果を Fig. 11 に示す。

粉滞留量の増加をとめない圧損増分が急激に増大する限界流速の粉径依存性は, (16)式に示したように, 単粒

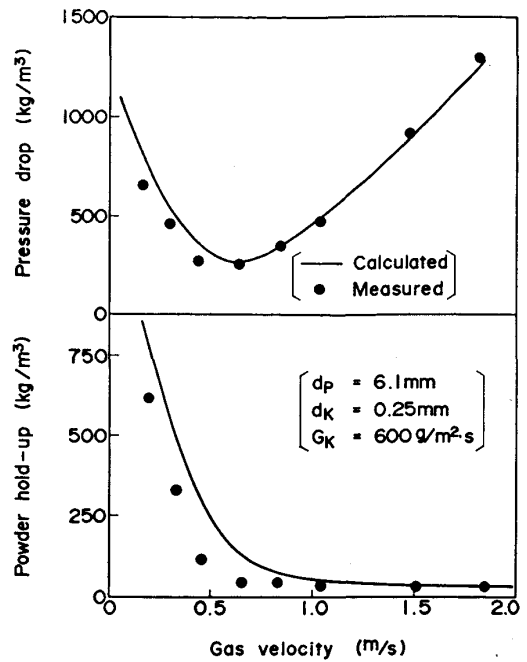


Fig. 9. Change in pressure drop and powder hold-up to the decrease in gas velocity, calculated and observed.

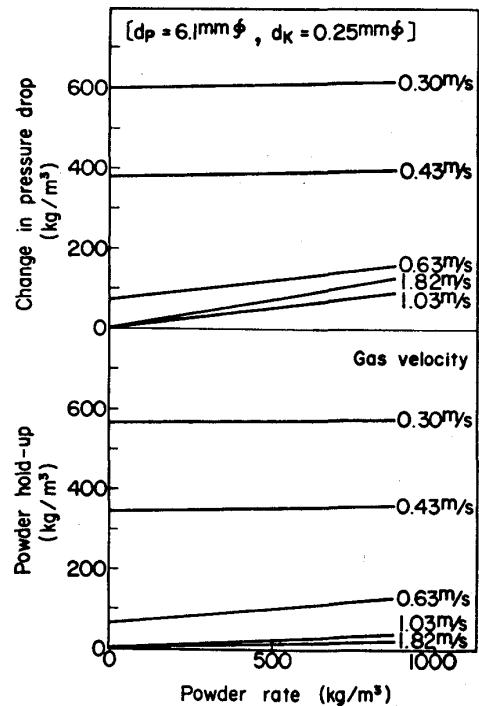


Fig. 10. Effect of powder rate on the gas-solid two phase flow in packed bed, calculated.

子終端速度が粉径 d_k の 1/2 乗に正比例する関係で説明される。

一方, (15)式に示したように, 高空気流速域における圧損増分の主要因は粉の運動抵抗力であるが, (15)式第 2 項から明らかなように, 充填粒子径が小さいほど, ま

た、粒径が小さくなり、(16)、(17)式から明らかのように、粉の速度が大きくなるほど運動抵抗力が増大すると解釈することにより実験結果が説明できる。

(13)、(14)式によれば、固気2相流の特性は粉の密度や形状にも依存する。そこで、ガラス球粉に替えて、密度と形状が異なるコークス粉と鉄粉を用いた実験を追加し、計算結果と対比させたところ、Fig. 12 に示すように、両者に良好な一致性が得られた。

以上、固気2相流の特性は本理論により、定性的には十分説明しうることが示された。

4. 考 察

小倉2高炉では、昭和57年以降の減産過程において、炉下部壁温度の低下をとともなう著しい通気悪化現象

を引き起こした⁵⁾。ここでは、この通気悪化現象について、固気2相流の観点から考察を行った。

4.1 高炉内部における粉体滞留領域

減産に移行する前段階における高炉内部状態を断面均一を仮定した数式モデル⁶⁾を用いて推定し、得られたガス流速を用いて、30mmφのコークス充填層を想定した高炉内部における5mmφ以下の粉の滞留量を(13)式を用いて計算した結果をFig. 13に示す。粉滞留量(ここでは H_k/ρ_k)が0の部分粉体上昇運動領域、0でない部分が粉体滞留領域に対応している。

ここで、粉体滞留領域が形成されるためには、下方に粉体上昇運動領域の存在が必要であることを考慮すると、高炉内において粉体滞留領域は、炉上部と炉下部に形成されると考えられる。

一方、減産を想定した場合、ガス流速の低下とともに

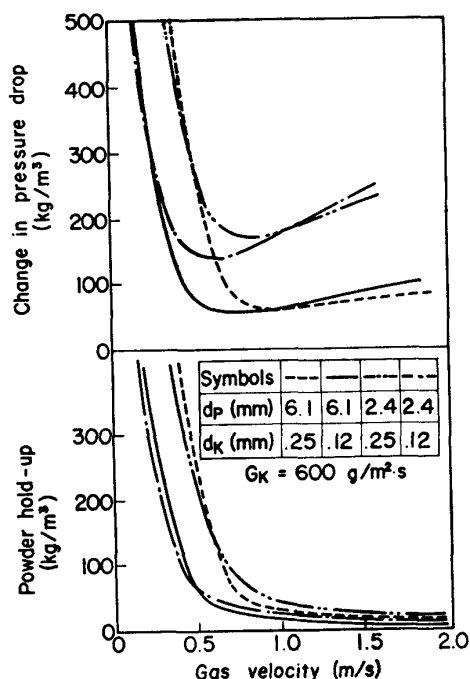


Fig. 11. Effect of the diameters of particle and powder on gas-solid two phase flow, calculated

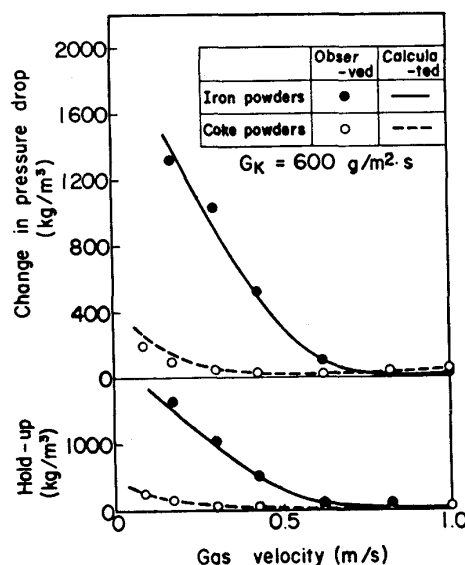


Fig. 12. The two phase flow of air and iron powders ($\rho_k=7000 \text{ kg/m}^3$, $\phi_k=0.7$, $d_k=0.1 \text{ mm}$, $e_{k,p}=0.9$) or air and coke powders ($\rho_k=1000 \text{ kg/m}^3$, $\phi_k=0.7$, $d_k=0.2 \text{ mm}$, $e_{k,p}=0.9$) in glass beads bed ($d_p=6.1 \text{ mm}$).

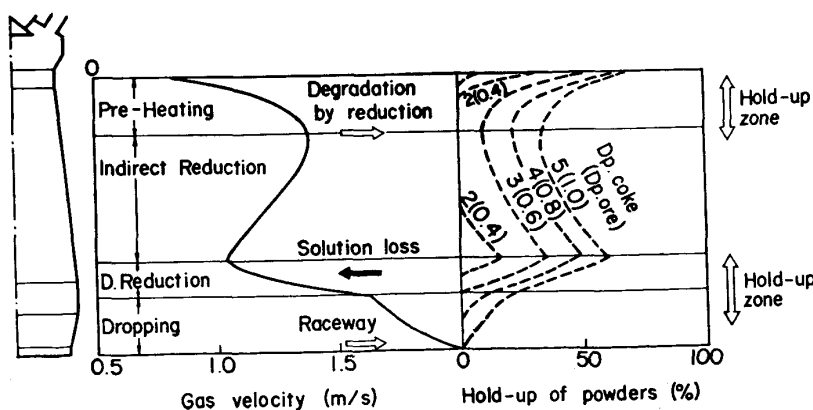


Fig. 13. Powder condense zones in a blast furnace. $\rho_k=1000 \text{ kg/m}^3$, $\phi_k=0.7$ for coke powders $\rho_k=4000 \text{ kg/m}^3$, $\phi_k=0.7$ for ore powders

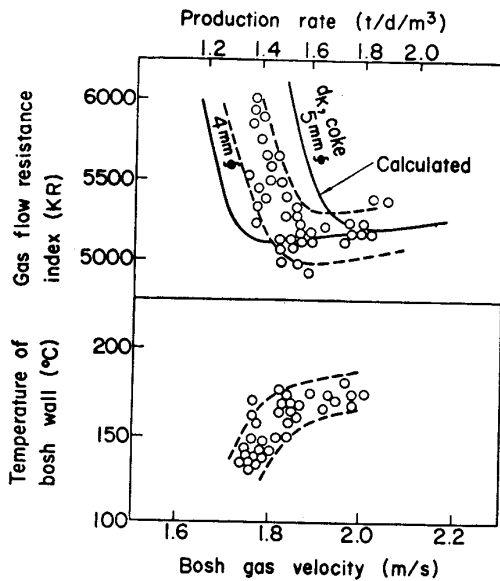


Fig. 14. Gas flow resistance index (KR)⁷⁾ and wall temperature during reduced production operation of Kokura No. 2 blast furnace.

下方の粉体上昇運動領域が縮小するので、炉上部粉体滞留領域は縮小すると考えられる。他方、炉下部粉体滞留領域は、下方にレースウェイという強力な粉体上昇運動領域を有するため、減産下でも粉体供給は持続され、ガス流速の低下とともに肥大化するものと考えられる。

4.2 通気実績との対応

以上の考察の結果を踏まえ、炉下部に着目して羽口レベルの平均ガス流速に対する固気2相流の圧力損失を計算し、清浄ガス流れを前提とした通気抵抗指標 KR⁷⁾に換算して実績と対比させた結果、Fig. 14 に示すように、小倉2高炉の減産過程における通気悪化現象は、4~5mmφのコークス粉の炉下部滞留量増大に起因する通気不良と解釈することにより説明できることが示された。

5. 結 言

高炉のガス流れは固気2相流であるとする考えに立脚し、冷間実験および理論的検討を行つた結果、以下の結論を得た。

1) 固気2相流の場合、ガス流速を限界値以下にすると、粉滞留量の増加をとめない、圧力損失は逆に上昇す

る。

2) この現象は、ガスと粉、および充填粒子の相互作用力として Ergun タイプの流体抵抗を、また粉の運動抵抗力として充填粒子との衝突による運動量変化を採用することにより導出された状態方程式を用いて予測可能である。

3) 減産高炉における通気悪化現象は、ガス流速低下に起因する炉下部粉滞留域の肥大現象として説明できる。

今後、本理論の2次元空間への拡張と粉の発生消滅機構の取り込みを図る予定である。

記 号

d_p, d_k : 充填粒子, および粉の粒子径 (m)

$e_{k,p}$: 反発係数 (-)

f_k : 粉体集団を充填層とみなした抵抗係数 (-)

$F_{p,g}, F_{k,g}$: ガスと充填粒子, および粉の相互作用力 (kgf/m³)

G_k : 粉供給速度 (kg/m² bed·s)

g_c : 重力換算係数 (9.8N/kgf)

H_k : 粉滞留量 (kg/m³)

$\Delta P/l, \Delta P_0/l$: 固気2相流と清浄ガス流の圧力損失 (kgf/m³)

R_{ck} : 粉体集団を充填層とみなしたレイノルズ数 (-)

U_g, U_k : ガス, および粉の実質速度 (m/s)

V_g : ガスの空塔速度 (mbed/s)

W_f : 単粒子終端速度 (m/s)

ϵ_p, ϵ_k : 充填層, および粉体集団の空隙率 (-)

ϕ_p, ϕ_k : 充填粒子, および粉の形状係数 (-)

ρ_g, ρ_p, ρ_k : ガス, 充填粒子, 粉のみかけ密度 (kg/m³)

μ : 固気比 (-)

μ_g : ガスの粘性係数 (kgf·m·s)

文 献

- 1) 森川 信: 流体-固体2相流 (1979), p. 1 [日刊工業新聞社]
- 2) L. S. FAN, M. TODA and S. SATIJA: Powder Technology, 36 (1983), p. 107
- 3) 坂下幸司, 渡辺治夫: 材料, 24 () 262, p. 682
- 4) 杉山隆二: 基礎力学演習 (1960), p. 92 [培風館]
- 5) 芳木通泰, 横井 毅, 米谷章義, 川口善澄, 大西守孝, 山岡秀行: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 732
- 6) 羽田野道春, 山岡秀行, 山縣千里, 佐藤憲一: 鉄と鋼, 62 (1976), S 67
- 7) 的場祥行, 下田輝久: 鉄と鋼, 60 (1974), S 354