

© 1991 ISIJ

論 文

充填層内ガス-粉体 2 相流れの 1 次元
流動特性柴田耕一朗*・清水 正賢*²・稲葉 晋一*²
高橋礼二郎*³・八木順一郎*³One-dimensional Flow Characteristics of Gas-Powder Two Phase
Flow in Packed BedsKoichiro SHIBATA, Masakata SHIMIZU, Sin-ichi INABA,
Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

Synopsis:

Gas-powder two phase flow in packed beds were investigated by using a one-dimensional cold model and a mathematical model for clarifying the behavior of powders in a blast furnace. Following results were obtained;

(1) Two phase flow showed higher pressure drop compared to clean gas flow. The increase in the pressure loss was mainly caused by the increase in the hold-up of powders in the region of low gas velocity and by the interaction force between powders and packed particles in the region of high gas velocity.

(2) A mathematical model of gas-powder two phase flow in packed beds was developed considering an interaction force between gas and powders expressed by the drag force and the Richardson-Zaki's voidage function.

(3) An interaction coefficient between powders and packed particles which was defined on the basis of the momentum balance equation of powders in packed beds was obtained from the experimental data.

(4) Blockade occurred at the certain gas velocity where the hydraulic diameter of packed bed including powders was below 6 times as long as powder diameter.

Key words: ironmaking; blast furnace; packed bed; cold model experiments; gas-powder two phase flow; mathematical model; blockade.

1. 緒 言

近年、高炉への微粉炭多量吹込みが、銑鉄製造コストの低減に有効な技術として注目されている。高炉へ微粉炭を多量に吹き込んだ場合、微粉炭の不完全燃焼およびコークスの粉化等により多量の粉体が発生する。これらの粉体は、ガスに随伴され高炉充填層内を移動するが、その一部が局所的に蓄積した場合、通気性が悪化すると予想される。従って、高炉への微粉炭多量吹込みを達成するためには、高炉充填層内における粉体を随伴したガスすなわち“固気 2 相流”の流動特性を定量的に把握し、通気性を適正に維持することが重要である。

固気 2 相流の研究は、粉体輸送の分野において管内の

流動機構の解明を目的に進められている^{1)~4)}が、充填層内を対象にした研究例⁵⁾⁶⁾は少ない。特に、高炉内の圧力損失に及ぼす粉体の影響については山岡の研究がみられるのみである。山岡⁷⁾⁸⁾は高炉内のガス流れを固気 2 相流の観点から詳細に検討し、充填層内でのガスと粉体との相互作用力が Ergun タイプの流体抵抗力で記述可能であることを示した。この記述式は、粉体が 1 種の充填層を形成しているとの仮定のもとに作成されたものであり、粉体が集団化して運動するような粉体濃度の高い領域でのみ採用可能⁹⁾で、希薄領域への適用には問題があると考えられる。高炉内の圧力損失を考える場合には、広い粉体濃度域で有効なガス-粉体相互作用力の記述式を導出し、充填層内の粉体滞留量及び圧力損失に及ぼ

平成元年 10 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 6 月 6 日受付 (Received June 6, 1990)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel Ltd.)

*³ 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

す粉体の影響を定量的に把握する必要がある。

以上の観点から本研究では、冷間模型を用いて充填層内固気 2 相流の 1 次元流動特性を調査するとともに、1 次元数学的モデルを構築し、充填層内のガス流れ、特に圧力損失に及ぼす粉体の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験に使用した 1 次元冷間模型の概略図を Fig. 1 に示す。充填塔は内径 100 mm、高さ 1 m の円筒アクリルパイプ製である。高さ方向 100 mm 間隔および周方向 4 か所に圧力測定用タップ (32 ch) を設け、層内の圧力分布を自動測定した。粉体はスクリーフィーダーにより所定量切り出され、搬送用の窒素ガスとともに充填塔下部より吹き込まれる。また充填塔の上部より排出されるガス中の粉体はサイクロンにより分離捕集される。

2.2 実験方法

本実験においては、まず模型内にガラス球の充填層を形成し、その後、充填層下部より窒素ガスとガラス球粉

を吹き込んだ。充填粒子として用いたガラス球、および粉体として用いたガラス球粉の物理性状を Table 1 に示す。実験時には、粉体吹込みにともなう高さ方向の圧力損失の変化を測定した。また実験終了後は粉供給および送風を速やかに停止し、上部より 200 mm 間隔で模型内の粉体および充填粒子を吸引サンプリングした。この吸引試料中の粉体を分離、計量することにより充填層内の粉滞留量を求めた。

3. 実験結果

3.1 実験結果

Fig. 2 に、粉体吹込みにともなう充填層内の圧力損失の変化を示す。粉体の供給を開始すると、圧力損失は清浄ガス流時の値から緩やかに上昇し、やがて定常状態に達した。また定常時には、充填層周方向に圧力分布の無いこと、および供給された粉体は全量排出されていることを確認した。

Fig. 3 は定常状態における充填層高さ方向の静圧分

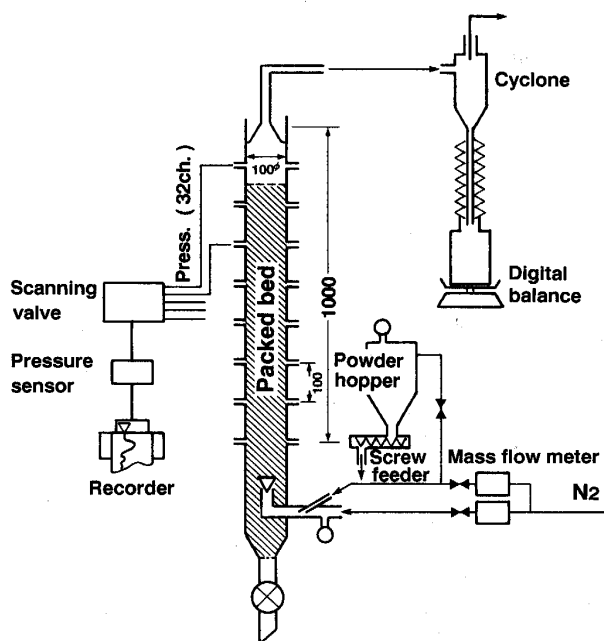


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Characteristics of powders and packed particles.

	Diameter (mm)	Shape factor (—)	Void fraction (—)
Powders	0.075	0.95	
	0.15	0.95	
	0.212	0.95	
Packed particles	4.8	0.85	0.33
	3.0	1.0	0.39
	3.0	0.88	0.34

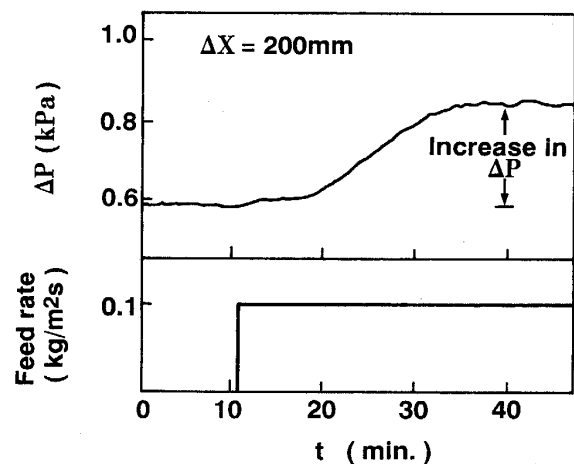


Fig. 2. Change of pressure drop with powder injection.

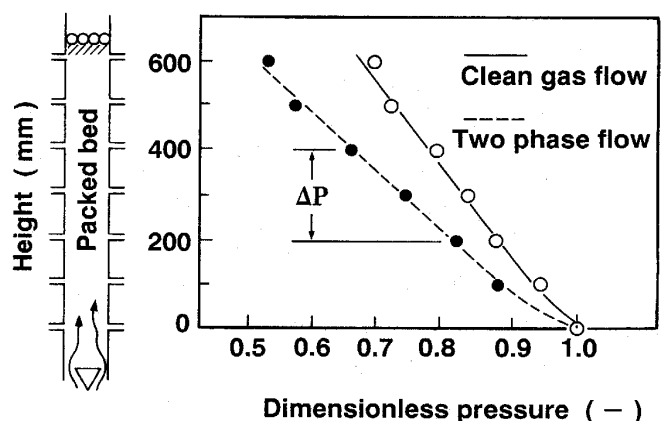


Fig. 3. Longitudinal distribution of static pressure.

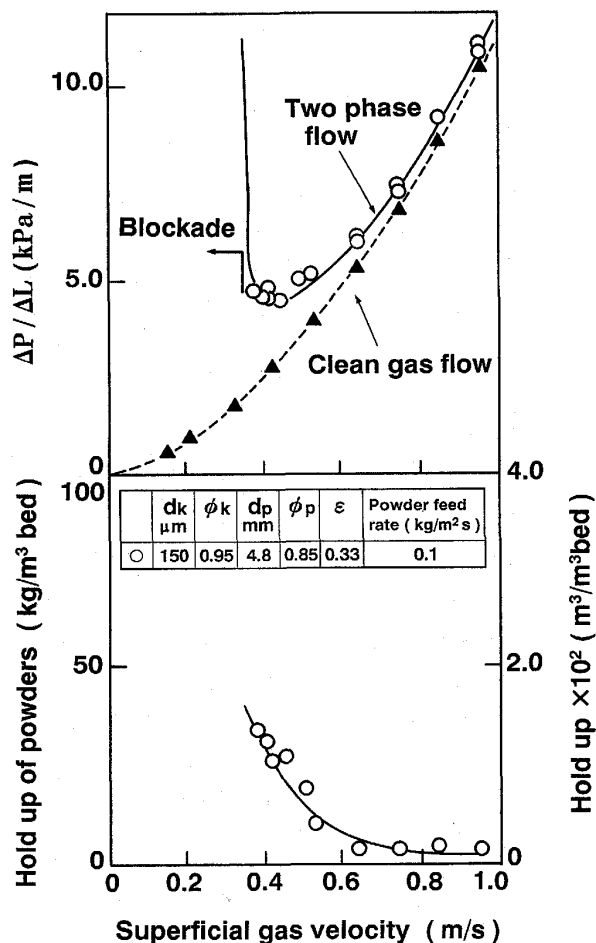


Fig. 4. Effect of superficial gas velocity on pressure drop and powder hold-up for gas-powders two phase flow in a packed bed.

布を示している。粉体およびガスの供給口に近い充填層下部では、上部に比べ圧力損失が大きくなっている。このため本実験では、充填層高さ方向 200~400 mm 間の静圧差を充填層内圧力損失として採用した。

Fig. 4 に充填層内における固気 2 相流の 1 次元流動特性を清浄ガスの場合と比較して示す。充填粒子として 4.8 mm のガラス球、粉体として 150 μm のガラス粉を用いた。なお、粉供給速度は、充填層単位面積当たり 0.1 $\text{kg/m}^2\text{s}$ に設定した。粉体を含む固気 2 相流は、清浄ガス流に比べ大きな圧力損失を示す。また、ガス流速が 0.6 m/s 以下になると、粉滞留量が増加するとともに、清浄ガス流との圧力損失差は大きくなる。さらに、0.35 m/s 以下では、圧力損失は急激に増大し定常状態が得られなかった。そして最終的には充填層の流動化をともなう閉塞現象が生じた。

以上のように、充填層内をガスが粉体を随伴して流れる場合には、清浄ガスの流通時とは、かなり異なった現象を呈することが判明した。

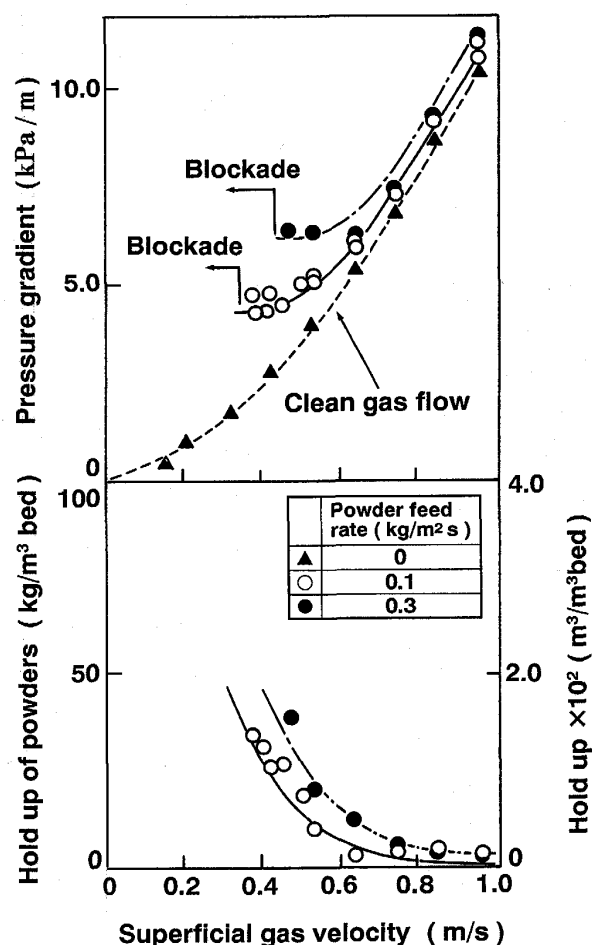


Fig. 5. Effect of powder feed rate on pressure drop and hold-up.

充填層内の固気 2 相流現象に及ぼす粉供給速度の影響を Fig. 5 に示す。本実験では、直径 4.8 mm の充填粒子および直径 150 μm の粉体を用い、粉供給速度を 0.1, 0.3 $\text{kg/m}^2\text{s}$ の 2 段階に変化させた。粉供給速度の増加にともなう、粉滞留量・圧力損失ともに上昇する。また、閉塞現象は、粉供給速度の増加につれて、より高いガス流速で生じるようになる。

Fig. 6 に粉径の影響を示す。粉体として、直径 212, 150, 75 μm の 3 種類のガラス粉を使用した。なお充填粒子径は 4.8 mm、粉供給速度は 0.1 $\text{kg/m}^2\text{s}$ である。粉径が大きいほど、圧力損失・粉滞留量ともに増加する。一方、閉塞が生じる限界ガス流速値は、粉径が 212, 150 μm の場合、粉径の増加にともなう上昇した。しかし 75 μm の場合、設定したガス流速の範囲内では閉塞現象は観察されなかった。

Fig. 7 に、充填層内の粉滞留量に及ぼす充填粒子の影響を示す。本実験においては、(1) 充填粒子径が 3.0 mm、形状係数が 0.88、充填層空隙率が 0.34 の場

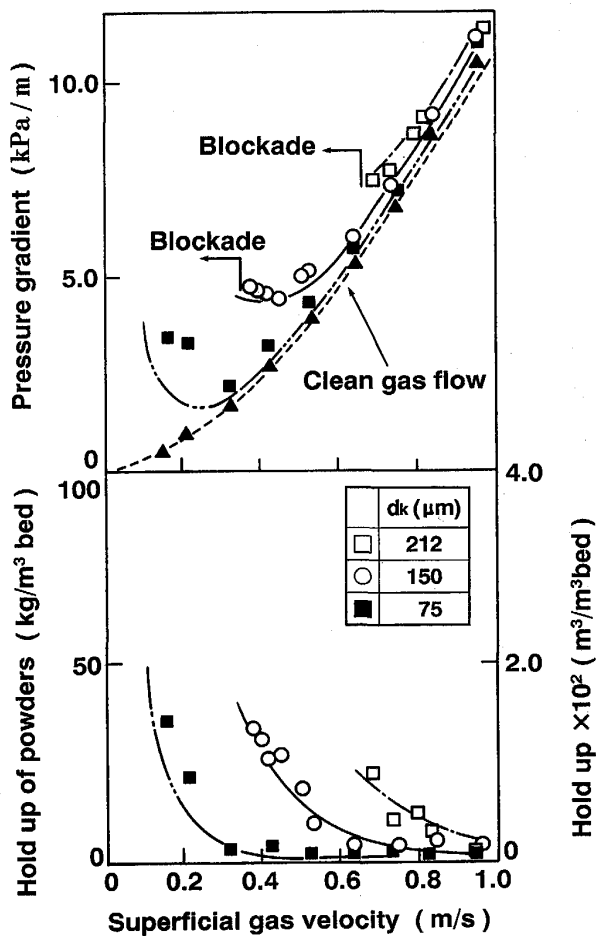


Fig. 6. Effect of powder diameter on pressure drop and hold-up.

合 (◆印), (2) 形状係数, 空隙率がほぼ一定で, 充填粒子径を 4.8 mm に増加させた場合 (○印), (3) 充填粒子径が一定で, 形状係数が 1.0, 空隙率が 0.39 の場合 (◇印), の 3 ケースについて検討した. Fig. 7 から, 充填粒子径のみを変化させた○印と◆印は, ほぼ同様な傾向を示していることがわかる. しかし, 充填粒子の形状が球に近く, 空隙率の大きな◇印の場合には, 他の二つに比べ粉体のホールドアップが著しく減少している.

この結果より, (1) 充填粒子径が充填層内での粉体の滞留量に及ぼす影響は小さい, (2) 粉体の滞留量は, 充填粒子の形状係数や充填層の空隙率の低下によって著しく増加することが明らかとなった.

3.2 山岡⁷⁾の研究結果との比較

山岡⁷⁾は本研究と同様の実験を行い, 充填層内でのガスと粉体との相互作用力が Ergun タイプの流体抵抗力で記述可能であることを示した. ここでは, 山岡⁷⁾によって導出された状態方程式を用いて, 充填層内をガスが固気 2 相流状態で流れる場合の圧力損失を算出した.

Fig. 8 に, 計算値と本実験結果との対応を示す. 粉

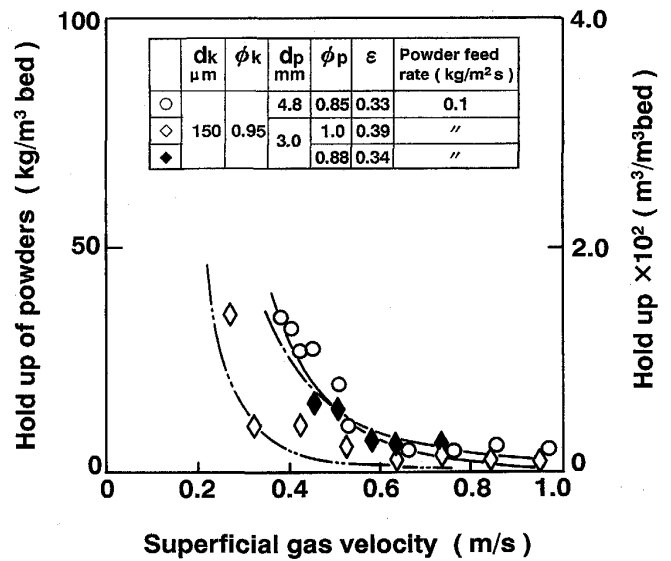


Fig. 7. Effect of size and shape of packed particles on hold-up.

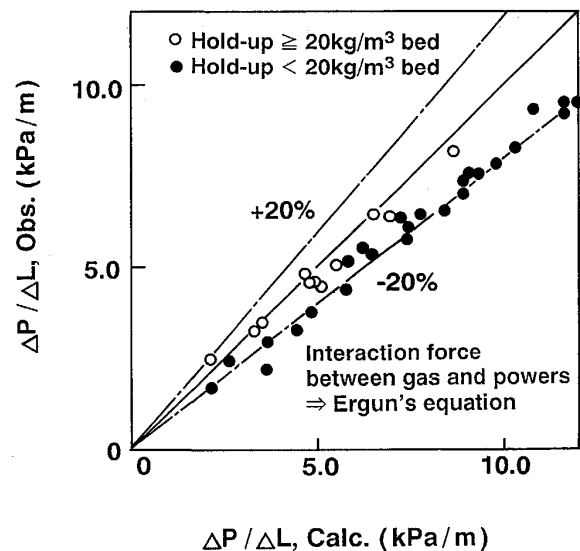


Fig. 8. Comparison of experimental data with calculated value considering an interaction force between gas and powders by the Ergun's equation.

体の滞留量が少ない希薄な固気 2 相流状態の場合に, 計算値は実測値に比べ大きくなる. また, Fig. 9 に山岡⁷⁾の解析手法に従い, 本実験データから求めたレイノルズ数とガスと粉体との相互作用係数の関係を示す. レイノルズ数が 1000 以上の領域では, データのばらつきが大きく, 両者の関係を Ergun の抵抗則で整理することは困難である. 両図の結果は, 希薄な固気 2 相流におけるガス-粉体間の相互作用係数の記述法に起因し生じたものと推察され, Ergun タイプの流体抵抗力を用いることには精度上問題があると思われる.

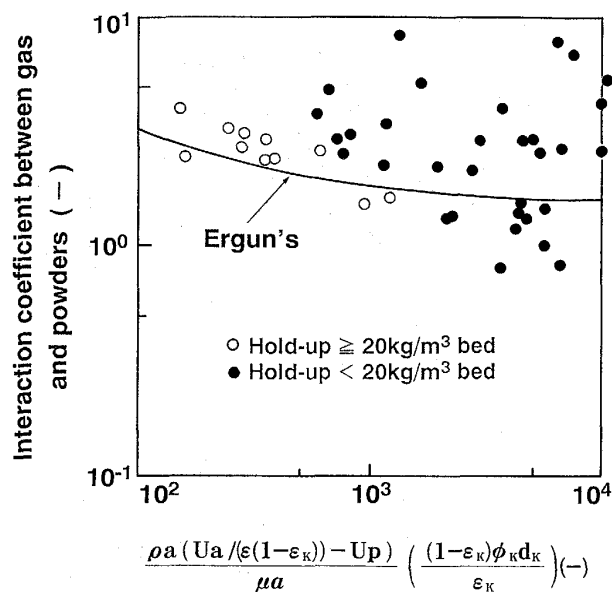


Fig. 9. Comparison of relation between Reynolds number and interaction coefficient of gas-powder with Ergun's equation.

4. 充填層内固気 2 相流の数学的モデル

4.1 基礎方程式の導出

充填層内固気 2 相流の 1 次元数学的モデルを構築するに当たり以下の仮定を置いた。

- (1) 定常状態である。
- (2) 空隙は充填層内で均一に分布している。
- (3) ガスおよび粉体のフローパターンはプラグフローである。
- (4) 粉体の濃度分布は充填層横断面において均一である。

上記の仮定に基づき、充填層空隙単位体積あたりに存在するガスおよび粉体群の物質ならびに運動量の収支より導出された基礎方程式を (1) ~ (5) 式に示す。

(Gas phase)

$$d((1-\epsilon_k)\rho_a U_a)/dx = 0 \quad (1)$$

$$d((1-\epsilon_k)\rho_a U_a U_a)/dx = -d(p(1-\epsilon_k))/dx - (F_{g-b} + F_{g-p}) \quad (2)$$

(Solid phase)

$$d(CU_p)/dx = 0 \quad (3)$$

$$d(CU_p U_p)/dx = F_{g-p} - F_{p-k} \quad (4)$$

$$C = \epsilon_k \rho_p \quad (5)$$

4.2 各種相互作用力記述式

4.2.1 ガスと充填粒子間の相互作用力 F_{g-b}

固気 2 相流の場合にも、ガスと充填粒子間の相互作用力 F_{g-b} は、Ergun タイプの流通抵抗係数によって記述できると考えられる。そこで、粉体の存在に起因するガス

の実質流速の変化を考慮し、 F_{g-b} を (6) 式で表した。

$$F_{g-b} = 150.0 \mu_a \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon \phi_p d_p} \right)^2 \frac{U_a}{\epsilon(1-\epsilon_k)} + 1.75 \rho_a \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon \phi_p d_p} \right) \left(\frac{U_a}{\epsilon(1-\epsilon_k)} \right)^2 \quad (6)$$

4.2.2 粉体群の運動駆動力 (ガスと粉体群との相互作用力) F_{g-p}

単一の粉体がガスより受ける運動駆動力 F_{g-p} は、Stokes, Allen および Newton の流体抵抗係数を用いて記述できる。しかし、粉体濃度が高く粉体が群になって運動する場合には、粉体周辺のガスの流動状態が複雑になり、集団の中の一つの粉体が受ける抵抗係数は、単一粉体の場合と異なった値になると考えられる¹⁰⁾¹¹⁾。従って F_{g-p} の記述式は、粉体の濃度の影響を考慮したものでなければならない。ここでは粉体濃度の影響を表す関数として Richardson-Zaki の空間率関数 $F_O(\epsilon_k)$ ¹⁰⁾ を採用し、(7) ~ (12) 式で F_{g-p} を与えた。

$$F_{g-p} = \{3C_m \rho_a |U_a/(\epsilon(1-\epsilon_k)) - U_p| (U_a/(\epsilon(1-\epsilon_k)) - U_p)\} / \{4\phi_k \rho_p d_k\} C \quad (7)$$

ここで

$$C_m = F_O(\epsilon_k) C_d \quad \{F_O(\epsilon_k) = (1-\epsilon_k)^{-4.7}\} \quad (8)$$

$$R_{ep} < 1.0 \quad C_d = 24.0/R_{ep} \quad (9)$$

$$1.0 < R_{ep} < 10^3 \quad C_d = 24.0(1.0 + 0.15R_{ep}^{0.69})/R_{ep} \quad (10)$$

$$10^3 < R_{ep} \quad C_d = 0.44 \quad (11)$$

$$R_{ep} = \phi_k d_k |U_a/(\epsilon(1-\epsilon_k)) - U_p| (1-\epsilon_k) \rho_a / \mu_a \quad (12)$$

これらの記述式の妥当性については、前述の模型実験結果を用いて検討した。1 次元模型実験の結果を基に得られたレイノルズ数とガス-粉体相互作用係数 C_m の関係を Fig. 10 に示す。Fig. 10 a) は粉体の集団化による抵抗力のずれを補正しない場合、Fig. 10 b) は補正した場合の結果である。いずれの場合も、実験結果は Allen の抵抗係数を用いて整理されている。しかし、空間率関数によって粉体の集団化による抵抗力のずれを補正した b) の場合の方が、ばらつきが少なく精度が高くなっている。この結果より、Allen 領域においては上記の仮説は妥当であると考えられる。また、Stokes, Newton 領域においても、本記述式を用いて F_{g-p} を表現可能であると予想されるが、その妥当性については今後さらに検討する必要がある。

4.2.3 粉体群の運動抑制力 F_{p-k}

粉体群の運動抑制力 F_{p-k} は、(1) 粉体群に作用する重力、(2) 充填粒子と粉体群との相互作用力 (摩擦、衝突) を考慮し (13) 式で表現した。

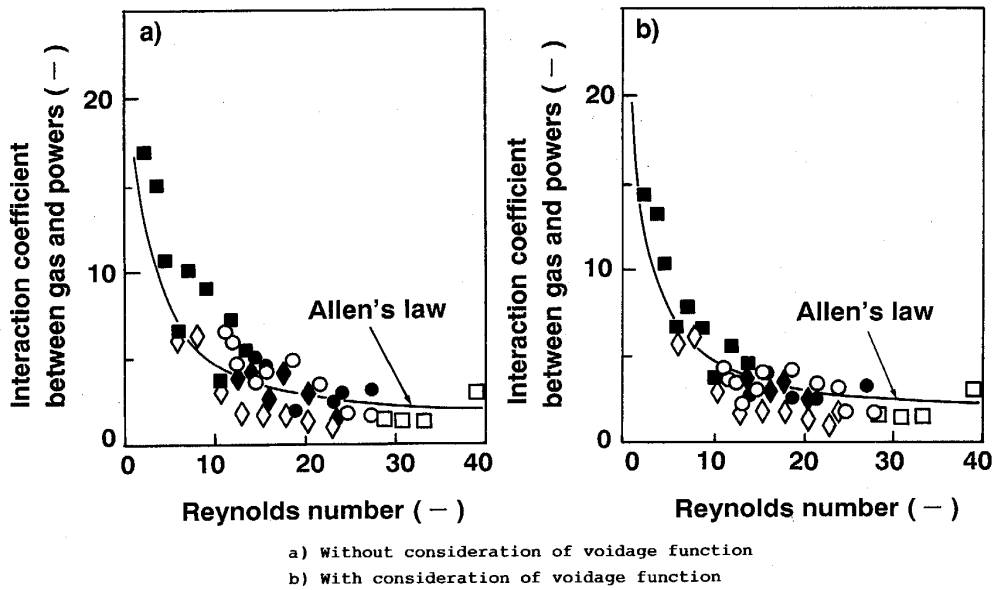
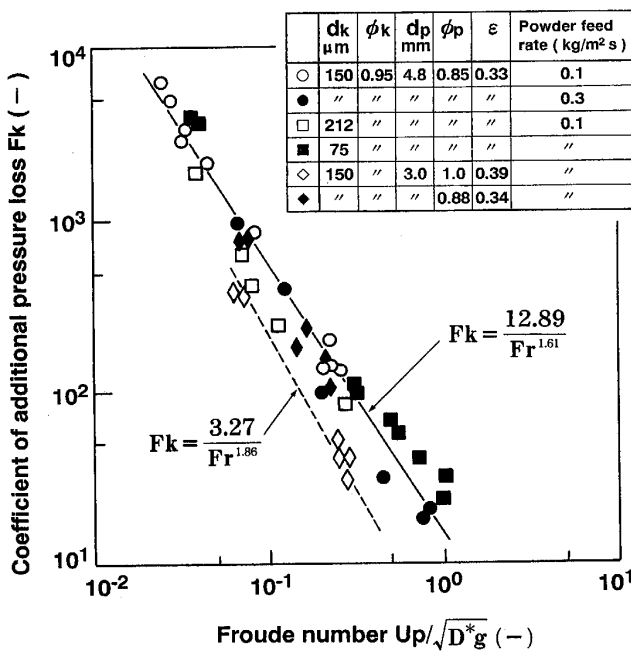


Fig. 10. Relation between Reynolds number and interaction coefficient of gas-powder.


 Fig. 11. Relation between Froude number and F_k .

$$F_{p-k} = C(1 - \rho_a/\rho_p)g + CU_p^2 f_{kk}/2D^* \quad (13)$$

ここで、充填粒子と粉体群との相互作用力は、(13)式の右辺第2項に示すように Fanning の流通抵抗式 (f_{kk} ; 充填粒子-粉体群間相互作用係数) で記述できると仮定した。

さらに、(13)式を(14)式のように簡単化し、付加圧力損失係数 F_k を(15)式で定義した。

$$F_{p-k} = CU_p^2 F_k/2D^* \quad (14)$$

$$F_k = (2(1 - \rho_a/\rho_p)/Fr^2 + f_{kk}) \quad (15)$$

付加圧力損失係数 F_k の値を求めるための信頼できる

理論式は確立されていない。ここでは、1次元の模型実験で得られた圧力損失と粉滞留量を(1)~(5)式に代入することにより、経験的に F_k の値を決定した。

Fig. 11 に各種の粉体と充填粒子ならびに粉供給速度の組合せに対して得られた F_k の値を、フルード数で整理した結果を示す。粉径、充填粒子径および粉供給速度を変化させた実験では、わずかに F_k の粉径依存性が認められるものの、結果は、おおむね(16)式の関係を用いて整理される。

$$F_k = 12.89/F_r^{1.61} \quad (16)$$

しかし、充填粒子の形状が球に近く、空隙率も大きい場合(◇印)には、 F_k の値は小さく、

$$F_k = 3.27/F_r^{1.86} \quad (17)$$

のように得られた。この差異は、充填粒子周りの局所的なガス流れの違いにより生じたものと予想される。

4.3 数学的モデルの妥当性の検証

ここで構築した数学的モデルを用い、充填層内においてガスが粉体を随伴して流れる場合(1次元定常場)の圧力損失と層内粉滞留量を算出した。

Fig. 12 に、数学的モデルによる計算値と模型実験結果との対応を示す。計算値と実測値は良く一致しており、本数学的モデルにより充填層内固気2相流の圧力損失を $\pm 10\%$ の範囲内で、また層内粉滞留量を $\pm 30\%$ の範囲内で予測可能である。

5. 考 察

5.1 充填層内固気2相流時の圧力損失

充填層内をガスが固気2相流状態で流れる場合、清浄なガスに比べ圧力損失が増加することが模型実験より明

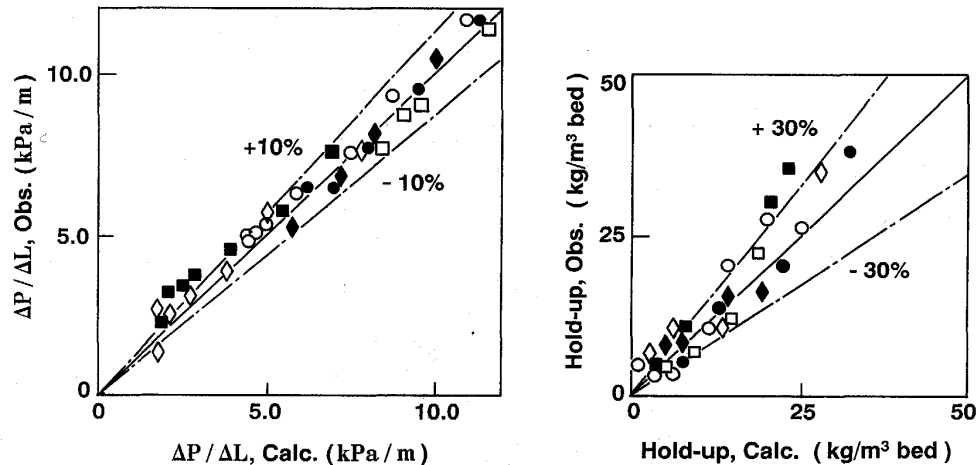


Fig. 12. Comparison of experimental data with calculated value.

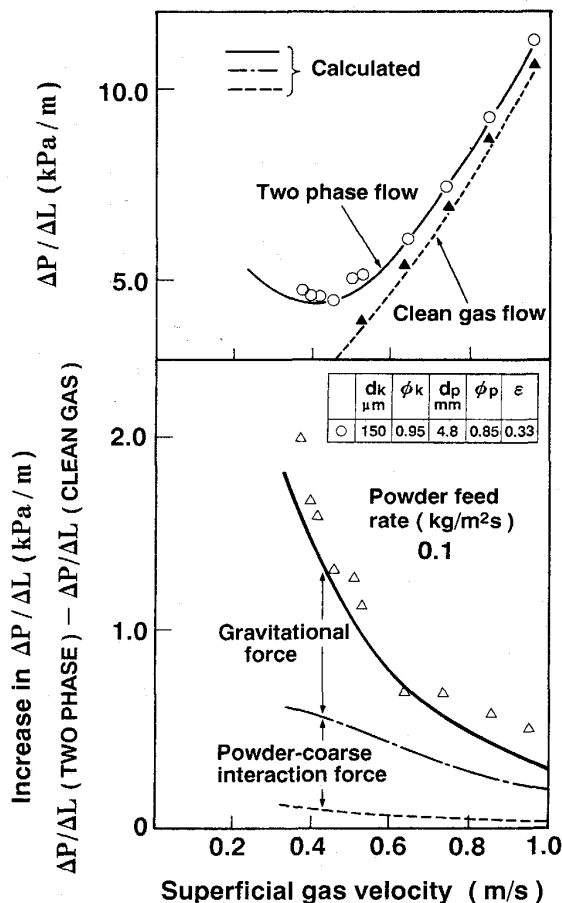


Fig. 13. Cause of increase in pressure drop between two phase flow and clean gas flow.

らかになった。ここでは、数学的モデルにより、固気2相流の圧力損失増加の原因について検討した。

Fig. 13 に、ガスの空塔流速に対する圧力損失と圧力損失増分の関係を示す。Fig. 13 中○、△、▲印は実測値を示す。実験ならびに計算条件は、粉径が 150 μm、充填粒子径 4.8 mm、粉供給速度 0.1 kg/m²s である。

圧力損失が増加する原因は、

(1) 粉体を重力に逆らって上方へ送るための仕事に基づく圧力損失、(2) 粉体と充填粒子との摩擦および衝突による圧力損失、(3) 粉体の存在によるガス流速変化に起因する充填粒子とガスの摩擦抵抗の増大、に大別できる。

Fig. 13 から、(3) 項による圧力損失増加は、他の 2 項に比べ 1~2 桁小さく、無視し得ることが判明した。さらに、高ガス流速域と低ガス流速域では、圧力損失増加の主要因子が異なり、高ガス流速域では(2)項が、また低ガス流速域では(1)項が主要因となることが明らかとなった。

5.2 閉塞限界

1 次元模型を用いた充填層内固気 2 相流の特性を検討した結果、ガス流速をある限界値以下に低下させると閉塞現象が生じることが判明した。高炉内のガス流れは固気 2 相流であるとする考えに立てば、この閉塞現象は高炉の通気限界を決定する重大な問題になると予想される。閉塞を防止し、高炉の安定操業を維持していくには、閉塞の生じる条件を正確に把握することが重要といえる。

1 次元冷間模型実験で得られた実測値に基づき、閉塞の生じる条件を検討した結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 中横軸は充填層内の空隙単位体積当たり存在する粉体の占有率 ε_k を、また縦軸は粉体を含む充填層内の水力学的等価直径と粉径の比 D_{eq}^*/d_k を示す。なお、 D_{eq}^* の計算において、(18)~(20)式に示すように粉体と充填粒子で形成された充填層は、滞留粉と充填粒子の調和平均径に等しい直径を有する粒子で構成された充填層と等価であると仮定した。

$$D_{eq}^* = 2\phi_p D_{peq} \varepsilon_{eq} / (3(1 - \varepsilon_{eq})) \quad (18)$$

$$\text{ここで } D_{peq} = 1 / (W_f/d_k + W_c/d_p) \quad (19)$$

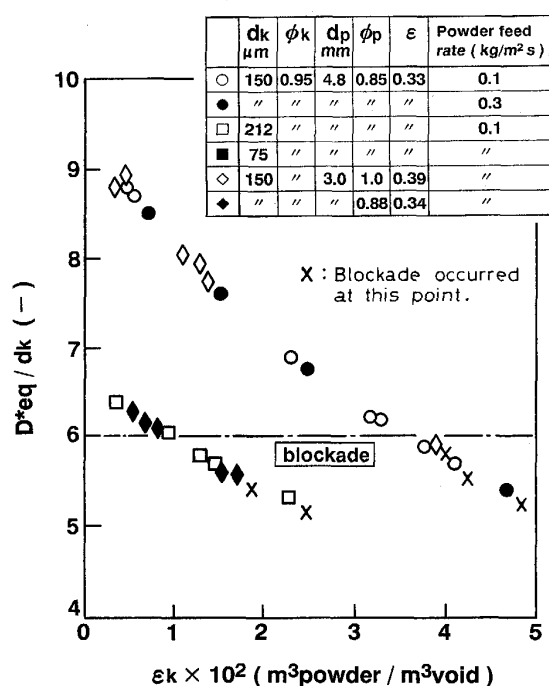


Fig. 14. Condition for blockade.

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon(1 - \varepsilon_k) \quad \dots\dots\dots (20)$$

Fig. 14 より、いずれの実験条件の場合にも、粉体の滞留量が増加し ($\varepsilon_k = 2 \sim 5\%$)、 D_{eq}^*/d_k が $5.5 \sim 6.0$ になった時に閉塞が生じている。このことから、閉塞現象は、充填層空隙内における粉体滞留量の増加により、粉体と充填粒子で形成される充填層の水力学等価直径が、粉径の6倍以下になったときに生じると推定される。この閉塞現象には、粉体間の相互作用力や粉体群の凝集が大きく関与していると予想されるが、本研究ではマクロな現象を確認したにとどまり、詳細については今後の検討課題である。

6. 結 言

冷間模型実験および理論的検討により、充填層内における固気2相流れの1次元流動特性を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 固気2相流れの圧力損失は、清浄ガスに比べ大きくなる。圧力損失増加の主要因は、高ガス流速域では粉体と充填粒子の相互作用力、また低ガス流速域では粉体を重力に逆らって上方へ送るための仕事である。

(2) 充填層内における粉体とガスとの相互作用力は、ドラッグ力と Richardson-Zaki の空間率関数によって表現可能である。

(3) 粉体の運動抵抗係数 (付加圧力損失係数) は、 F_r 数により整理することができる。

(4) 閉塞現象は充填層内における粉体滞留量の増加により、粉体と充填粒子で形成される充填層の水力学等価直径が、粉径の6倍以下になったときに生じる。

記 号

- C : 充填層空隙単位体積当たりの粉体滞留量 (kg/m^3)
 C_d : ドラッグ係数 (—)
 C_m : 修正ドラッグ係数 (—)
 D^* : 充填層内水力学等価直径 (m) $= 2\phi_p d_p \varepsilon / (3(1 - \varepsilon))$
 D_{peq} : 滞留粉と充填粒子の調和平均径 (m)
 d_k : 粉粒子径 (m)
 d_p : 充填粒子径 (m)
 F_r : フルード数 (—) $= U_p / (D^* g)^{0.5}$
 f_{kk} : 充填粒子-粉体群間相互作用係数 (—)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 p : 圧力 (Pa)
 R_{ep} : 粉径基準の粒子レイノルズ数 (—)
 U_a : ガス空塔速度 (m/s)
 U_p : 粉体の速度 (m/s)
 W_c : 充填層単位体積当たり存在する充填粒子の重量分率 (—)
 W_f : 充填層単位体積当たり存在する粉体の重量分率 (—)
 ε : 充填層空隙率 (—)
 ε_{eq} : 粉体と充填粒子で形成された充填層の空隙率 (—)
 ε_k : 充填層空隙単位体積当たりの粉体占有率 (—)
 μ_a : ガスの粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
 ρ_a : ガス密度 (kg/m^3)
 ρ_p : 粉体の密度 (kg/m^3)
 ϕ_k : 粉体の形状係数 (—)
 ϕ_p : 充填粒子形状係数 (—)

文 献

- 森川敬信: 流体-固体2相流 (1979), p. 1 [日刊工業新聞社]
- 辻 裕: 空気輸送の基礎 (1984), p. 1 [養賢堂]
- M. A. ADEUMI and H. ARASTOPOUR: Powder Technology, **48** (1986), p. 67
- H. ARASTOPOUR and D. GIDASPOW: Ind. Eng. Chem. Fundam., **18** (1979), p. 123
- L. S. FAN, M. TODA and S. SATIJA: Powder Technology, **36** (1983), p. 107
- K. KITANO, K. D. WISECARVER, S. SATIJA and L. S. FAN: Ind. Eng. Chem. Res., **27** (1988), p. 1259
- 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 403
- 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 2194
- R. B. BIRD, W. E. STEWART and E. N. LIGHTFOOT: Transport Phenomena (1960), p. 199 [John Wiley & Sons]
- J. F. RICHARDSON and W. N. ZAKI: Trans. Inst. Chem. Eng., **32** (1954), p. 35
- 坂下幸司, 渡辺治夫: 材料, **24** (1975), p. 682