

粗粒子充填層における微粉の上昇速度の 直接測定

© 1991 ISIJ

論 文

草壁 克己*・山木 健之*²・諸岡 成治*

Direct Measurement of Ascending Flow of Fines through Packed Bed of Coarse Particles

Katsuki KUSAKABE, Takeyuki YAMAKI and Shigeharu MOROOKA

Synopsis :

Silica-alumina particles of 68 μm diameter were continuously fed at the bottom of a bed packed with glass beads of 4.5 mm diameter and were entrained upward through the bed. A small amount of tracer particles was injected into the gas-solid flow, and the ascending velocity of the fines was measured directly using bifurcated optical fiber probes. The dynamic hold-up of fines in the bed was determined from the weight of elutriated particles after the supply of fines was suddenly stopped. Then the gas velocity was much increased, and the entrained particles were assigned as the static hold-up. The ascending velocity of fines was a little dependent on the feed rate of fines, and the value near the column wall was higher than that in the core region. The successive collision model proposed was effective to explain the behavior of fines in the gas-solid flow through the packed bed.

Key words : blast furnace; gas-solid cocurrent flow; packed bed; dynamic hold-up; optical fiber probe.

1. 緒 言

近年、高炉内への微粉炭の吹込み量が増大し、これに伴い未燃焼チャーの高炉内における挙動についての関心が高まっている。また、高炉の操業限界を予測するための流体力学モデルが開発されているが、高炉下部での現象を推定するためには精度が不十分である。コークス充填層内の通気性に密接に関連する微粉の運動に関しては、コールドモデルによる実験的な研究が必要である。

草壁ら¹⁾は、粗粒子充填層内に蛍光染料を含浸したトレーサー微粉を少量吹き込み、これを充填層内部の光プローブで検出することによって、層内における微粉の上昇および下降速度を測定した。また、充填層内の固気2相流における微粉の挙動に関する研究^{2)~4)}や層内の伝熱⁵⁾の研究もなされている。

高炉の解体調査結果⁶⁾から、高炉部には多量の粉が滞留しているものとみられる。特に充填層内の微粉濃度が高い場合については微粉の挙動を直接測定して検討することが重要である。

そこで本研究では、粗粒子の充填層中を微粉が固気2

相流となって流れる場合に、ガス流速および微粉の供給流量を変えて、圧力損失、滞留量（層内で流動している微粉のホールドアップ）、蓄積量（粗粒子の表面に付着あるいは間隙に取り込まれて、そのガス流速では動かない微粉のホールドアップ）を測定した。また、蛍光染料を含浸したトレーサー微粉を層内に導入して、これを一対の光プローブで検知し、微粉の上昇速度と供給流量との関係を検討するとともに、供給流量と滞留量との関係から間接的に導かれる上昇速度との比較を行った。

2. 実 験

2.1 実験装置および使用粒子

実験装置を Fig. 1 に示す。装置は内径 100 mm、高さ 1 m のアクリル樹脂製の円筒である。充填粒子は径 4.52 mm の球状ガラス粒子で塔全体に充填した。粗粒子充填層の空間率は 0.35 であった。固気2相流として吹き込む微粉は、多孔質シリカアルミナ粒子（ストークス径 68 μm 、密度 1 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、計算上の流動化開始速度および終端速度は、それぞれ 2.2 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ および 0.14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）を用いた。また、同じ微粉に蛍光染料を含浸さ

平成2年12月17日受付 (Received Dec. 17, 1990)

* 九州大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki Higashi-ku Fukuoka 812)

*2 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

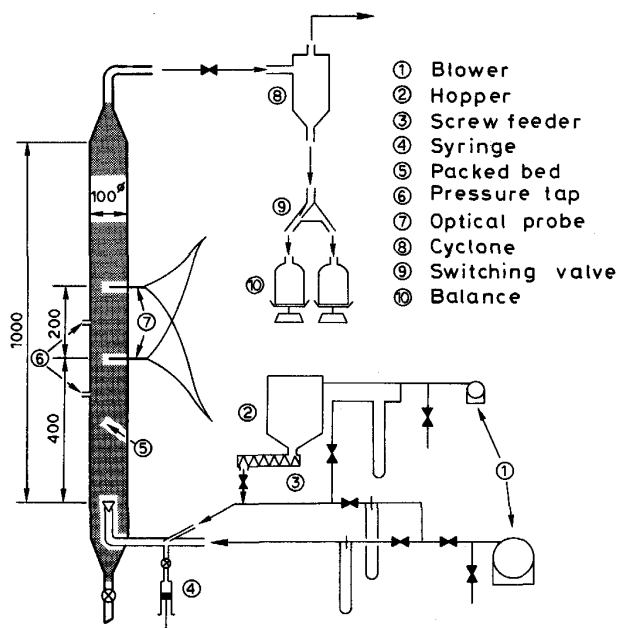


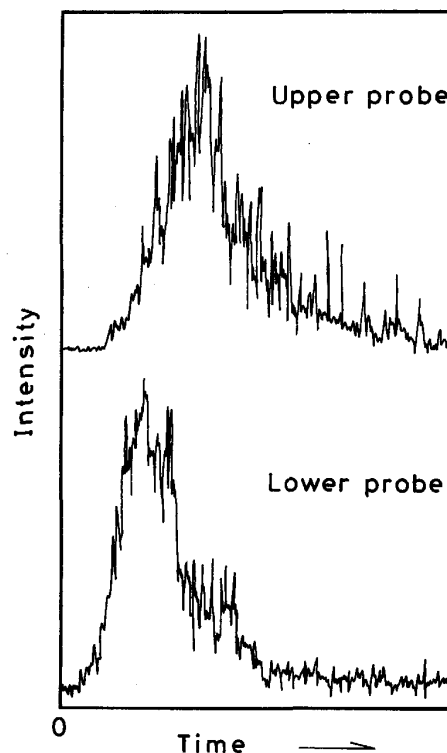
Fig. 1. Experimental apparatus.

せてトレーサー微粉とした。気体としては常温常圧の空気をを用いた。

2.2 実験方法

一定流量の気流中にスクリーフィーダーで供給されたシリカアルミナ粒子を同伴させ、分散器より充填層内に吹き込んだ。層内を通過した粒子はサイクロンで固気分離し、秤量器上の容器に回収した。層内の圧力損失は、分散器から 300 mm と 500 mm の位置に設置した圧力タップで測定した。微粉の供給流量は回収容器中の重量の経時変化を記録して求めた。充填層内の微粉の滞留量 (H_d , 図中には Dynamic hold-up と記述) は、一定ガス流速を維持した状態で、スクリーフィーダー下部のストップバルブを遮断し、それと同時にサイクロン下部の切替えバルブで微粉を別の容器に回収し、その重量を測定し、充填層の単位体積当たりに換算して求めた。このとき、層出口からサイクロン部までに滞留している粉体量を別途測定して補正した。微粉供給口から層分散器までの微粉の量は、滞留時間が短いので無視できた。このようにして滞留量を測定した後、ガス流速を $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上とし、飛び出してくる微粉の重量を測定し、充填層の単位体積当たりに換算した値を蓄積量 (H_s , 図中には Static hold-up と記述) とした。

層内の微粉の上昇速度は、充填層の入口パイプ内にトレーサー粒子 (約 1 cm^3) を注射器で送入し、層上部の上下 2 箇所に設置した光プローブで、トレーサー微粉が通過する時間を検出し、その時間差とプローブ間の距離とから算出した。光プローブの間隔は 200 mm とした。



$$U_f = 0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \Delta h = 0.20 \text{ m} \quad \Delta t = 0.33 \text{ s} \quad \overline{u_{sp}} = 0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fig. 2. Responses of optical fiber probes.

典型的な例を Fig. 2 に示す。微粉の上昇速度の半径方向分布は、上下の光プローブを中心から 10 mm 間隔でずらしながら測定した。光プローブの形状および測定原理の詳細は前報¹⁷⁾に示した。

3. 衝突モデルによる微粉の層内透過速度

重力場において微粉が鉛直方向に上昇運動を開始するとき、粒子の速度は重力、浮力および流体抵抗力の関数となり、しだいに定常速度へ移行する。粗粒子充填層内では、微粉は粗粒子と衝突し、いったん静止した後に気流中へ戻ることを繰り返すために、自由な空間内を流れる固気 2 相流における上昇速度よりも遅くなる¹⁸⁾。このモデルでは、微粉が充填粒子に衝突した時に、鉛直方向の速度成分が 0 となるとした。また、微粉が径 d_p の充填粒子と衝突して次の粒子に衝突するまでの距離を αd_p とした。微粉の時間平均の上昇速度は次のようになる¹⁾。

Stokes 域

$$\frac{\overline{u_{sp}}}{U_f / \varepsilon_f - v_t} = 1 - \frac{\overline{u_{sp}} v_t}{\alpha g d_p} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\alpha g d_p}{\overline{u_{sp}} v_t} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Newton 域

$$\frac{\bar{u}_{sp}}{U_f/\varepsilon_f - v_t} = 1 - \frac{\bar{u}_{sp}v_t}{ag d_p} \left(\frac{v_t}{U_f/\varepsilon_f - v_t} \right) \times \ln \left[\left(\frac{1}{2v_t} \right) \left\{ \left(\frac{U_f}{\varepsilon_f} + v_t \right) - \left(\frac{U_f}{\varepsilon_f} - v_t \right) \exp \left(-\frac{ag d_p}{\bar{u}_{sp}v_t} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ε_f は充填層内におけるガスが流れる空間の体積分率である。

4. 実験結果

4.1 滞留量と蓄積量

Fig. 3 にガス流速と層内圧力損失との関係を示す。図中の数字は微粉の供給流量、 G_k ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)である。実線は ERGUN⁹⁾の式に基づく計算値である。空塔基準のガス流速が $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上では、後述のように運動状態の微粉の滞留量は $5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ よりも小さく、固気2相流の圧力損失は単相流に比べて差がなかった。微粉の供給流量を一定に保って、ガス流速を低下してゆくと、あるガス流速で微粉の滞留量が急激に増加し、2相流れから流動層流れに変わる。本実験で用いた微粉は低密度で粒径が小さく、終端速度が $0.14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であるから、 $U_f \geq 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲（粗粒子の間の流速は $0.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）では微粉滞留量の急激な増加は起こらず、圧力損失が若干増加するにすぎなかった。Fig. 4 は、微粉の滞留量とガス流速の関係を示す。滞留量はガス流速が $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲で急激に減少し、その後徐々に

減少した。 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上のガス速度では、粒子供給流量の増加とともに滞留量が増加した。山岡²⁾および柴田

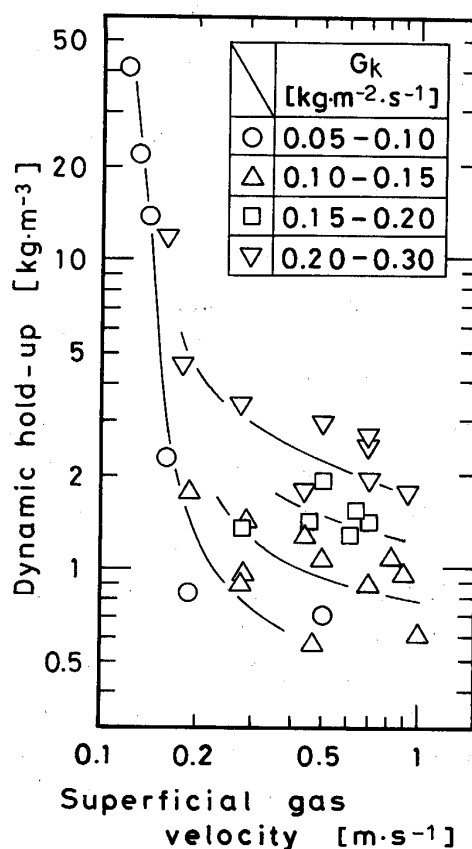


Fig. 4. Dynamic hold-up.

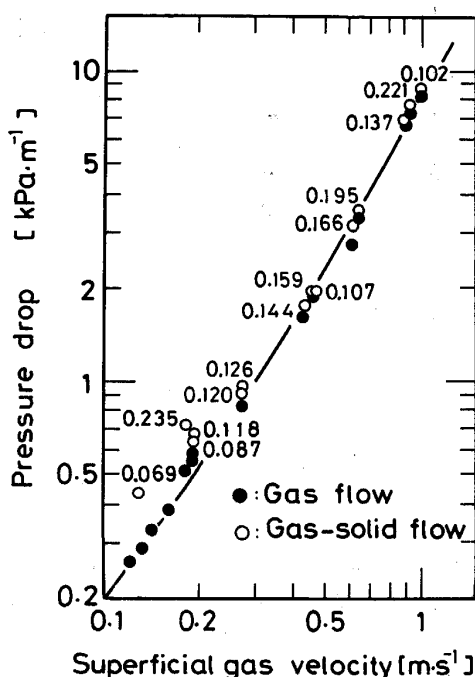


Fig. 3. Pressure drop in packed bed.

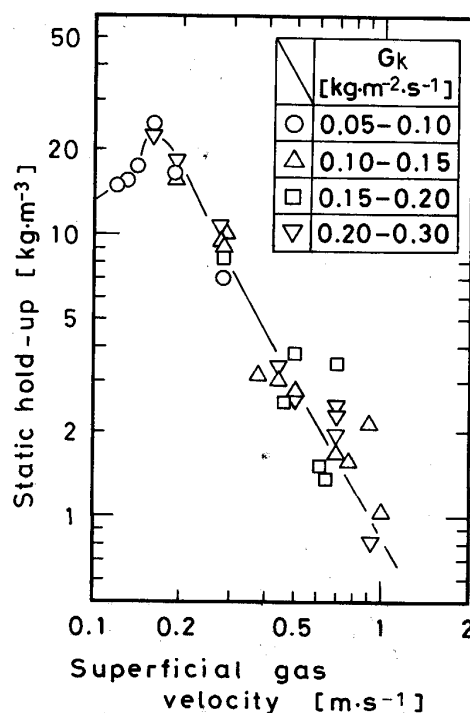


Fig. 5. Static hold-up.

ら³⁾の研究においても、微粉の終端速度以下のガス流速では、滞留量の急増が見られた。

Fig. 5 は、微粉の蓄積量とガス流速の関係である。蓄積量は $U_f \div 0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で最大値となるが、それ以上のガス流速では、ガス流速の増加とともに減少する。 $U_f \leq 0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲では、塔下部において微粉が蓄積を始めており、粒子の供給を止めると排出されることから、蓄積量の一部が滞留量として計測されていると推定される。

4.2 上昇速度の半径方向分布

光プローブで直接測定した微粉の上昇速度の半径方向分布を Fig. 6, 7 および 8 に示す。ガス流速が $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、粒子供給流量にかかわらず、微粉の上昇速度は半径方向で一定であった。ガス流速が $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ および $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ では、微粉の上昇速度が壁近傍で高くなった。これは充填層内の空間率が内部に比べて壁近傍で大きいからである。Fig. 9 は、塔の中心軸上で測定した微粉の上昇速度とガス流速との関係を示す。微粉の供給流量が $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ における固気 2 相流中の微粉の上昇速度は、微粉を連続的に供給しない状態でトレーサーだけを送入して速度を測定した場合の結果とはほぼ同じであった。本実験では固気比 (= 微粉の質量流量 / 空気の質量流量) が最大でも 0.4 と小さいことがその理由であろう。

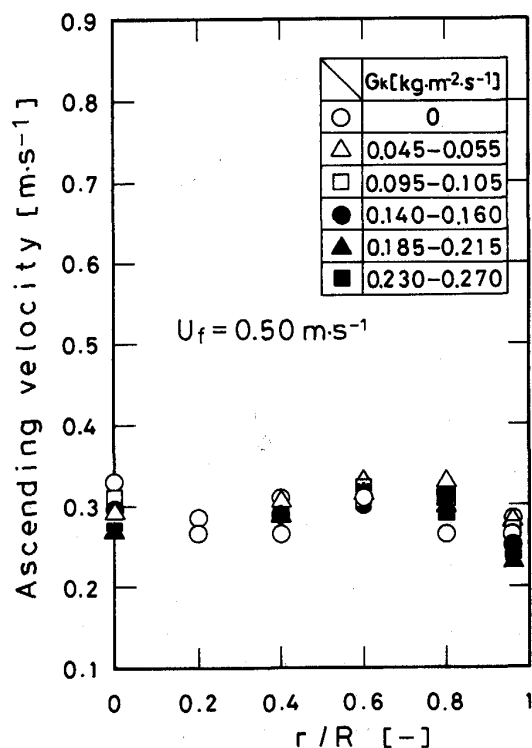


Fig. 6. Radial distribution of ascending velocity at superficial gas velocity of $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.3 上昇速度に及ぼす供給流量と滞留量の影響

Fig. 10 は、微粉の断面平均の上昇速度と供給流量の

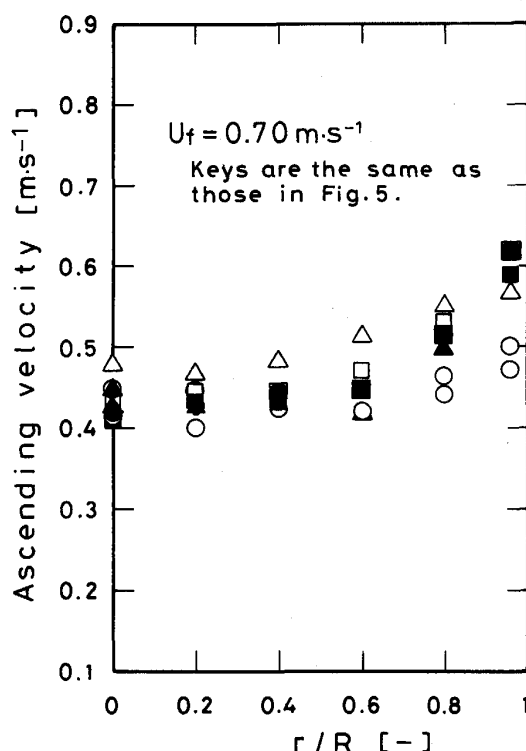


Fig. 7. Radial distribution of ascending velocity at superficial gas velocity of $0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

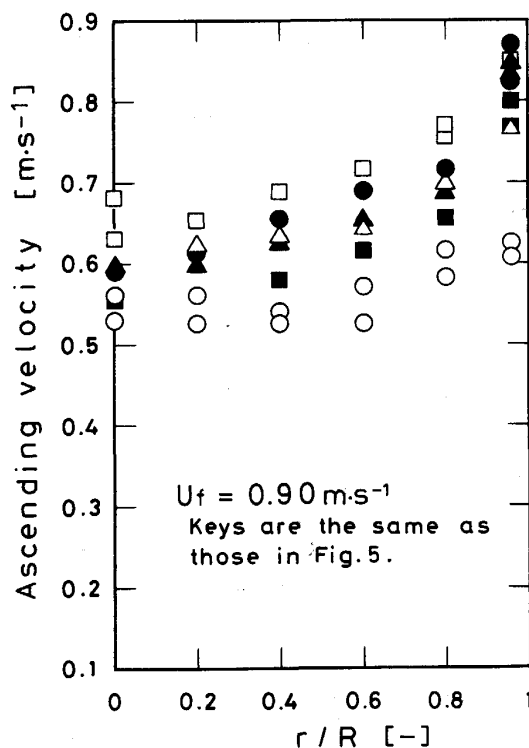


Fig. 8. Radial distribution of ascending velocity at superficial gas velocity of $0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

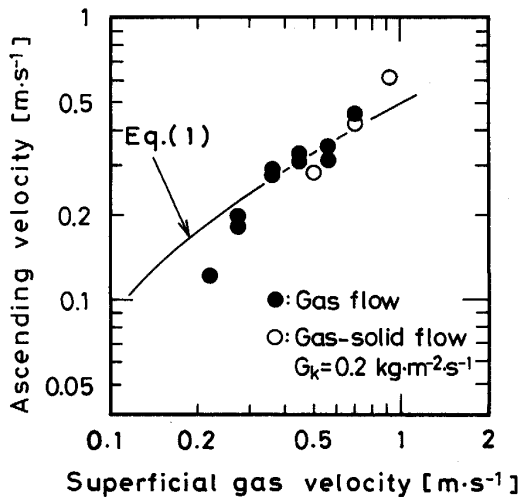


Fig. 9. Comparison of ascending velocities for gas flow and gas-solid flow.

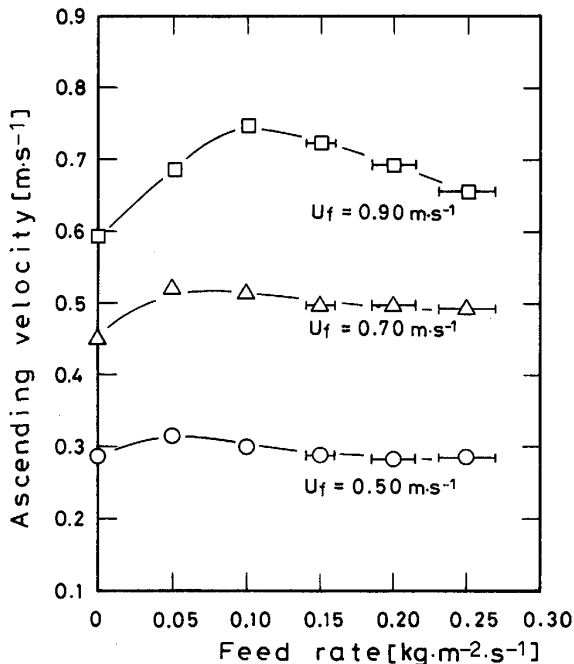


Fig. 10. Effect of feed rate on ascending velocity.

関係を示す。ガス流速が $0.7 \sim 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ では、上昇速度が最大となる微粉の供給流量が見られた。微粉の供給量が小さい場合には、微粉が凝集しており⁹⁾、終端速度が見かけ上増大するのであろうと推定されるが、この点については今後検討する必要がある。なお、微粉の供給流量が著しく大きくなると、固気2相流れから流動層流れへと変化するが、本実験ではそこまで達していない。

充填層内の固気2相流では、微粉が粗粒子上や粗粒子間に一部蓄積し、残りは流動する。微粉の上昇速度と滞留量の間に次の関係が成立する。

$$G_k = H_d \bar{u}_{sp} \quad (3)$$

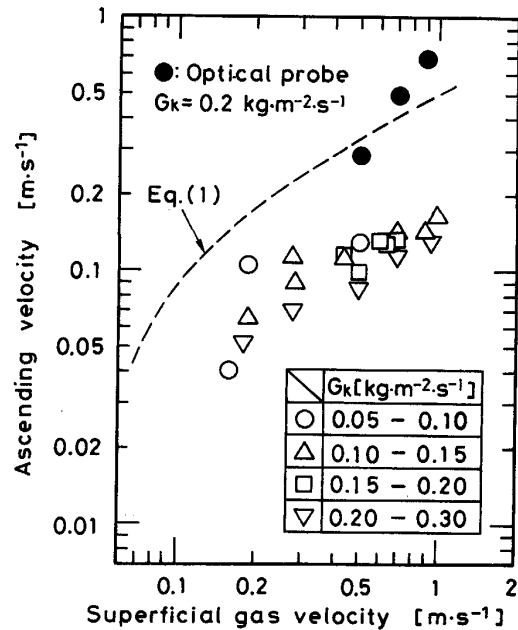


Fig. 11. Ascending velocity calculated from dynamic hold-up and feed rate of fines.

(3)式から求めた微粉の上昇速度 $\bar{u}_{sp}$ を、光プローブで直接測定した上昇速度とともに Fig. 11 に示す。図中の破線は衝突モデル((1)式)を用い、 $\alpha = 2/3$ とした計算値である。ただし、微粉の占める体積は無視した。微粉の上昇速度はガス流速の増大とともに増加する傾向を示すが、衝突モデルからの計算値に比べて小さい。これは、 H_s の一部を H_d として見積もっているためと推定される。すなわち、微粉の供給を止めると、 H_s となっていた微粉が崩れだし、気流中に分散して H_d となった可能性がある。山岡²⁾ および柴田³⁾ は H_d と H_s を区別していないので、(3)式を用いて微粉の上昇速度を計算することはできない。

柴田³⁾ は、層内の微粉に加わる定常1次元場を仮定した力の収支から、微粉の透過速度を求めている。基礎式は、

$$\begin{aligned} (3/4) C_{Dm} \frac{\rho_f}{\rho_k d_k} |U_f/\varepsilon_f - \bar{u}_{sp}| (U_f/\varepsilon_f - \bar{u}_{sp}) \\ = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_k}\right) g + 2f_{kk} \frac{\bar{u}_{sp}^2}{D^*} \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、(4)式左辺はガスと微粉との相互作用力、右辺第1項は重力、第2項は塔壁と微粉および充填粒子と微粉の相互作用力を表している。また、 C_{Dm} は充填層内の流体に対する微粉の抵抗係数であり、次式で表される¹¹⁾。

$$C_{Dm} = C_{D\varepsilon_{sp}}^{-4.7} \quad (5)$$

この式を用い、本実験条件下での微粉の上昇速度を計算

すると, $U_f = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で $\overline{u_{sp}} = 0.3$ または $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_f = 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で $\overline{u_{sp}} = 0.9$ または $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ となる. 小さい数値が彼らの(16)式, 大きい数値は(17)式から求めたものである. なお, FAN ら⁵⁾ は ε_{sp} の代わりに ε_f , D^* の代わりに充填層の直径を用い, 数種類の充填粒子との組合せから f_{kk} の値を得ている. 本実験の条件に当てはめてみると, $U_f = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で $\overline{u_{sp}} = 0.4 \sim 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $U_f = 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ で $\overline{u_{sp}} = 0.5 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ となり, 柴田らによる計算値に近い. FAN らが使用した装置の直径が本実験とはほぼ同じであったため, D^* の代わりに塔径を用いた影響が出なかったものと思われる. いずれにしても, 既往の推算式は光プローブで直接測定した微粉の上昇速度よりも大きい値を与える. 今後, さらに研究を行う必要がある.

5. 結 言

粗粒子充填層内を固気2相流が流れる条件で, 微粉の上昇速度, 滞留量および蓄積量を測定した. また, 光プローブを用いて微粉の上昇速度を直接測定した. 本実験では固気比が小さいので, 微粉の上昇速度は微粉の供給流量の影響を受けなかった. 固気2相流中での微粉の上昇速度は, 塔中心部に比べ塔壁側での上昇速度が大きくなった.

粗粒子充填層内の微粉の上昇速度は, 衝突モデルから導かれた(1)式あるいは(2)式で推算が可能であることがわかった.

本研究にあたり日本鉄鋼協会特定基礎研究会「充填層中の気・固・液移動現象」部会(部会長, 東北大学選鉱製錬研究所八木順一郎教授)の援助を受けた. 謝意を表します.

記 号

C_D : 単一粒子の抵抗係数 (—)

C_{Dm} : 粒子群の抵抗係数 (—)
 D^* : 充填層内でガスが流れるチャンネルの相当径 (m)
 d_k : 微粉の平均径 (m)
 d_p : 粗粒子の径 (m)
 f_{kk} : (4)式で定義した相互作用係数 (—)
 G_k : 微粉の供給流量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
 g : 重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
 H_d : 充填層の単位体積当たりの微粉の滞留量 (動的ホールドアップ) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{bed}$)
 H_s : 充填層の単位体積当たりの微粉の蓄積量 (静的ホールドアップ) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{bed}$)
 R : 充填層の半径 (m)
 r : 充填層の半径方向座標 (m)
 t : 時間 (s)
 U_f : ガス空塔速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 $\overline{u_{sp}}$: 充填層内の微粉の壁に対する上昇速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 v_t : 微粉の終端速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 α : 衝突間隔を決める係数 (—)
 ε_f : 充填層内のガスの体積分率 (—)
 ε_{sp} : 粗粒子充填層の空隙基準の微粉の体積分率 (—)
 ρ_f : ガスの密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 ρ_k : 微粉の密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

文 献

- 1) 草壁克己, 山木健之, 諸岡成治, 松山久義: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 1407
- 2) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 403
- 3) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晋一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77 (1991), p. 236
- 4) L. S. FAN, M. TODA and S. SATIJA: Powder Technol., 36 (1983), p. 107
- 5) A. R. BALAKRISHNAN and D. C. T. PEI: Powder Technol., 62 (1990), p. 51
- 6) 小嶋鴻次郎, 西 徹, 山口徳二, 仲摩博至, 井田四郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 570
- 7) S. MOROOKA, K. KUSAKABE, N. OHNISHI, F. GUJIMA and H. MATSUYAMA: Powder Technol., 58 (1989), p. 271
- 8) J. VALENZUELA and L. R. GLICKSMAN: Fluidization IV (1983), p. 161 [Engineering Foundation]
- 9) S. ERGUN: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 93
- 10) 幡野博之, 松田裕光, 河野尚志: 化学工学論文集, 16 (1990), p. 841
- 11) J. F. RICHARDSON and W. N. ZAKI: Trans. Inst. Chem. Eng., 32 (1954), p. 682