

粗粒子充填層内における微粉の透過速度

草壁克己*・山木健之*²・諸岡成治*・松山久義*

Percolating Velocity of Fine Particles through Packed Bed of Coarse Particles

Katsuki KUSAKABE, Takeyuki YAMAKI, Shigeharu MOROOKA and Hisayoshi MATSUYAMA

Synopsis:

The percolating velocity of fines through the packed bed of glass beads of 4.5 and 12 mm in diameter and silica gel spheres of 1.5 mm in diameter was measured with bifurcated optical fiber probes. Silica-alumina particles of 68 μm , alumina particles of 211 μm and glass beads of 398 μm were coated with a fluorescent dye, and were used as a tracer. When 1~2 cm^3 of the tracer particles was injected in the gas flow and exposed to ultraviolet light which was introduced with the silica fiber, visible light was emitted and transferred outward with the plastic fiber. The percolating velocity of fines was determined from the time period to pass the distance between the probes.

The ascending velocity of fines increased with increasing gas velocity and size of packed particles. A flow model of fines was proposed on the basis of the successive collision of fines on coarse particles. The percolating velocity of fines agreed with the calculated value. The measuring system developed was proved to be able to detect the local percolating velocity of fines in packed bed. The ascending velocity near the column wall was higher than that in the core region.

Key words: blast furnace; percolating velocity; packed bed; optical fiber probe; multiphase flow.

1. 緒 言

高炉下部(滴下帯)内ではコークス粒子で形成された移動層内を上部から溶銑, 溶滓が流下し, 下部からは高温の還元ガスが上昇している。コークスはレースウェイ内で強力な旋回運動を受けながら燃焼し, その過程で一部分は粉化してコークス微粉となる。一方, 羽口直前から吹き込まれた微粉炭は, 未燃焼チャーを生成し, コークス微粉と同じく還元ガスとともに滴下帯内を移動し, 一部は蓄積すると考えられる。微粉の移動と蓄積は高炉内の通気や通液性に影響を及ぼす¹⁾。

充填層内を移動あるいは層内で流動する微粉の挙動は, 粗粒子の間を上昇するガス流速が微粉の終端速度よりも十分大きければ, 固気2相流として扱うことができる。ただし, 充填層内の通路は充填粒子の間隙であるから, 円管内の流れとは異なり, 充填粒子の壁と微粉との衝突を考慮する必要がある^{2)~4)}。また, 間隙のガス流速が微粉の終端速度よりも小さくなると, 微粉の蓄積が起

こり, 2相流から流動層流れに移行する⁵⁾。この場合には, 充填粒子の細かい間隙で流動化するので, 微粉の質量の一部は粗粒子の壁によって支持され, 圧力損失は微粉の全重量よりも小さくなる⁵⁾。実際の高炉では, 2相流れ, 流動層流れが別の場所に発生するであろうし, 不均一なガス流速分布により, 一部では微粉が固定層状態になることもあるが, 研究例は十分ではない。

山岡⁶⁾⁷⁾ および柴田⁴⁾ は, 充填層内を固気2相として流れる場合の, 微粉とガスの流れについて検討を加えている。微粉の平均上昇速度は, 微粉の供給流量, ガス流速及び微粉の滞留量がわかれば, 物質収支から導くことができるが, 直接測定した例はない。また, ガス流速, 微粉のホールドアップなどが装置内の場所によって異なり, 局所的な流れが平均的な流れとは一致しない可能性がある。

そこで, 本研究では粗粒子の充填層中における, 微粉の流動について検討するために, 蛍光染料を含浸あるいは塗布したトレーサー微粉を層内に送入して, これを複

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)

数の 2 方向性光プローブで検知し、層内における上昇速度および下降速度を測定した。また、微粉の上昇と下降速度に及ぼす充填粒子径、微粉の径およびガス流速の影響を調べ、衝突モデルとの比較を行った。

2. 実 験

2.1 実験装置および使用粒子

本実験では、内径 100 mm, 120 mm および 190 mm のアクリル製円管を用いて充填層を作製した。Fig. 1 に内径 100 mm, 高さ 1 m の装置の概略図を示す。この装置では粗粒子を円管部全体に充填したが、内径 120 mm および 190 mm の装置では、円管長を 2 m とし、多孔分散板より約 0.5~0.8 m の高さまで粗粒子を充填した。微粉としては、多孔質のシリカアルミナ粒子、アルミナ粒子およびガラス粒子を用い、シリカアルミナ粒子とア

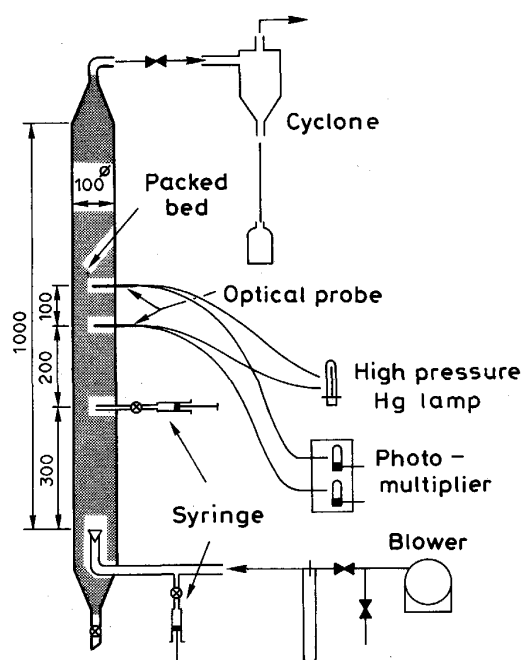


Fig. 1. Experimental apparatus.

ルミナ粒子には蛍光染料を含浸させ、ガラス粒子には蛍光染料を含浸した SiO_2 サブミクロン粒子（日本アエロジル製、粒径 10 nm）を塗布して、それぞれトレーサー粒子とした。実験に使用した粗粒子の特性を Table 1 に、トレーサー微粉の特性を Table 2 に示す。気体としては常温常圧の空気を用いた。

2.2 光プローブによる透過速度測定

Fig. 2 に光プローブによるトレーサー粒子の検出システム⁸⁾の概略図を示す。高圧水銀ランプから出る紫外光（主波長 360 nm）は石英製光学繊維を通して、プローブ先端から充填層内に照射される。ここをトレーサー粒子が通過すると、紫外光は蛍光染料によって可視光（本実験では主波長 510 nm）に変換され、アクリル樹脂製の光学繊維を通して検出系へと導かれる。充填した粗粒子で一部の紫外光が反射されても、アクリル樹脂製光学繊維によってその大部分が吸収される。しかし、励起光と蛍光のスペクトルは少し重なっており、また高圧水銀ランプは可視光も発光する。そこで、励起光スペクトルから波長が 410 nm 以上の部分を除去するために、可視光除去フィルターを、蛍光中の波長 470 nm 以下の成分

Table 1. Properties of coarse particles.

Coarse particles	Glass bead	Glass bead	Silica gel
Diameter, d_p [mm]	12.0	4.52	1.54
Density, ρ_p [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2.44	2.37	1.2
Voidage, ε_p [-]	0.39	0.35	0.34

Table 2. Properties of fine particles.

Fine particles	Silica-alumina	Alumina	Glass bead
Diameter ^{a)} , d_k [μm]	68	211	398
Density, ρ_k [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1.0	1.4	2.5
U_{mf} ^{b)} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	0.0015	0.020	0.13
v_t ^{b)} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	0.14	1.13	3.14

a) Stokes diameter

b) Calculated values

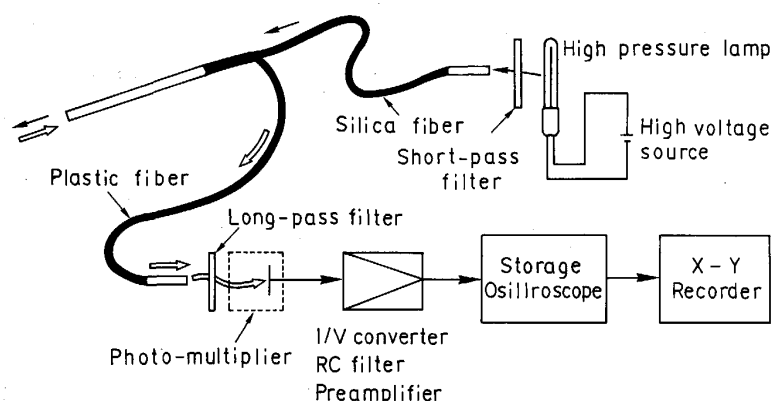


Fig. 2. Measuring system.

を除くために、紫外光除去フィルターをそれぞれ用いた。なお、光プローブは、外径 125 μm の石英製光学繊維と外径 250 μm のアクリル樹脂製光学繊維を内径 2 mm のステンレス管内に束ね、エポキシ樹脂接着剤で固定して製作した。トレーサーによる蛍光の時間変化は、光電子増倍管の出力を電流/電圧変換・増幅した後に、ストレージオシロスコープでモニターし、X-Y レコーダーで記録した。

2.3 実験方法

一定の流速に保った気流中に、1~2 cm^3 のトレーサー微粉をプラスチック注射器を用いて、分散板より 100 mm あるいは 300 mm の位置で送入した。それより上部の充填層の中心軸上において、上下 2 箇所を設置した光プローブで、トレーサーからの蛍光強度を検出した。蛍光強度には時間的な分布があるので、得られた応答曲線を積分し、トレーサー微粉群の平均の通過時間を求めた。光プローブは 50 mm あるいは 100 mm の間隔 (Δh) で設置して置き、各プローブの位置をトレーサーが通過する時間の差 (Δt) を求め、 $\Delta h/\Delta t$ により微粉の上昇速度を算出した。トレーサーの微粉が下降する場合には、充填層の上表面においてトレーサー粒子を送入して上昇流と同様に測定した。

粒子の上昇速度の半径方向分布は、内径 100 mm の装置を用い、光プローブを中心から 10 mm 間隔で移動させて測定した。このとき、充填層のガスの入口管内にトレーサー微粉を送入した場合についても測定を行った。

3. 衝突モデルによる微粉の充填層内透過速度

重力場において粒子が鉛直方向に運動を開始するときには、粒子速度は重力、浮力および流体抵抗力で記述され、しだいに定常速度へ移行する。一方、粗粒子充填層内では、微粉は粗粒子と衝突し、気流中へ戻ることを繰り返すために透過速度は減速する⁹⁾。Fig. 3 は衝突過程

の概念図で、微粉は粗粒子と衝突した瞬間、その速度が 0 となると仮定した。図に示すように、流体抵抗力と重力の大小によって、微粉が上昇だけでなく下降することもあると考えねばならない。1 個の粒子が線速度 U_f/ε_p の気流中で運動を始め、一定速度になるまでの非定常状態の基礎式は次式となる。

$$m \frac{du_{sp}}{dt} = -mg \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_k} \right) + C_D \frac{\pi d_k^2}{4} \frac{\rho_f (U_f/\varepsilon_p - u_{sp})^2}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式を $m = \pi d_k^3 \rho_k / 6$ で除して整理すると、

$$\frac{du_{sp}}{dt} = -g \left(\frac{\rho_k - \rho_f}{\rho_k} \right) + \frac{3C_D}{4} \frac{\rho_f (U_f/\varepsilon_p - u_{sp})^2}{d_k \rho_k} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、Stokes 域 ($d_k v_t \rho_f / \mu_f < 2$) では $C_D = 24/Re$ であり、Newton 域 ($500 < d_k v_t \rho_f / \mu_f < 10^5$) では $C_D = 0.44$ となる。

($\rho_k - \rho_f$)/ $\rho_k \div 1$ とすると、(1) および (2) 式は、

Stokes 域

$$\frac{du_{sp}}{dt} = g \left\{ \frac{U_f/\varepsilon_p - u_{sp}}{v_t} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Newton 域

$$\frac{du_{sp}}{dt} = g \left\{ \frac{(U_f/\varepsilon_p - u_{sp})^2}{v_t^2} - 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

v_t はそれぞれの領域における微粉の終端速度である。初期条件、

$$t = 0 \text{ において } u_{sp} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

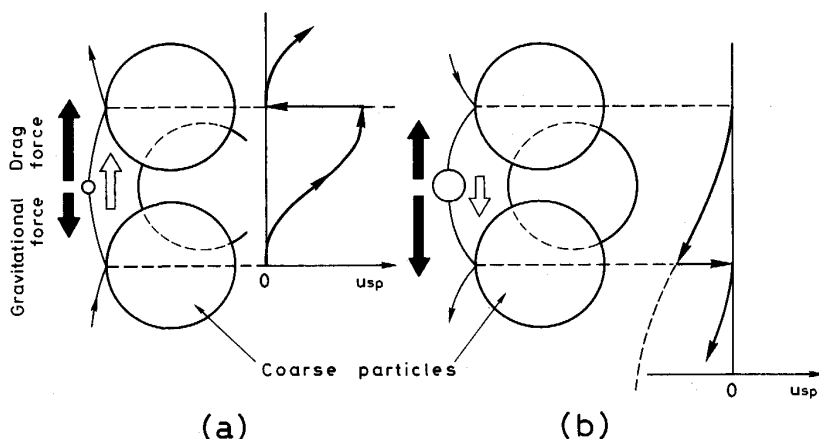
を用いて (3) および (4) 式を積分すると、

Stokes 域

$$u_{sp} = u_t \{ 1 - \exp(-gt/v_t) \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Newton 域

$$u_{sp} = u_t \frac{(U_f/\varepsilon_p + v_t) \{ 1 - \exp(-2gt/v_t) \}}{(U_f/\varepsilon_p + v_t) - u_t \exp(-2gt/v_t)} \quad \dots\dots (7)$$



(a) Ascending state (b) Descending state
Fig. 3. Collision of fines on coarse particles.

ここで, u_t は $t = \infty$ における u_{sp} の値で, $(U_f/\varepsilon_p - v_t)$ となる. 微粉の平均自由行程 x は平均衝突間隔 $\bar{t}$ で決まる.

$$x = \int_0^{\bar{t}} u_{sp} dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

Stokes 域

$$x = u_t [\bar{t} + (v_t/g) \{ \exp(-g\bar{t}/v_t) - 1 \}] \quad \dots\dots (9)$$

Newton 域

$$x = u_t \bar{t} - \frac{(U_f/\varepsilon_p + v_t) - u_t}{(2g/v_t)} \times \ln \frac{(U_f/\varepsilon_p + v_t) - u_t \exp(-2g\bar{t}/v_t)}{(U_f/\varepsilon_p + v_t) - u_t} \quad \dots\dots (10)$$

ここで, $\bar{t} = x/\bar{u}_{sp}$ であり, x は d_p の α 倍とすると, (9) および(10)式より微粉の平均透過速度 $\bar{u}_{sp}$ は,

Stokes 域 (粒子が上昇する場合)

$$\frac{\bar{u}_{sp}}{U_f/\varepsilon_p - v_t} = 1 - \frac{\bar{u}_{sp}v_t}{agd_p} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{agd_p}{\bar{u}_{sp}v_t}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(粒子が下降する場合)

$$\frac{\bar{u}_{sp}}{U_f/\varepsilon_p - v_t} = 1 + \frac{\bar{u}_{sp}v_t}{agd_p} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{agd_p}{\bar{u}_{sp}v_t}\right) \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Newton 域 (粒子が上昇する場合)

$$\frac{\bar{u}_{sp}}{U_f/\varepsilon_p - v_t} = 1 - \frac{\bar{u}_{sp}v_t}{agd_p} \left(\frac{v_t}{U_f/\varepsilon_p - v_t} \right) \times \ln \left[\left(\frac{1}{2v_t} \right) \left\{ \left(\frac{U_f}{\varepsilon_p} + v_t \right) - \left(\frac{U_f}{\varepsilon_p} - v_t \right) \exp\left(-\frac{2agd_p}{\bar{u}_{sp}v_t}\right) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

(粒子が下降する場合)

$$\frac{\bar{u}_{sp}}{U_f/\varepsilon_p - v_t} = 1 + \frac{\bar{u}_{sp}v_t}{agd_p} \left(\frac{v_t}{U_f/\varepsilon_p - v_t} \right) \times \ln \left[\left(\frac{1}{2v_t} \right) \left\{ \left(\frac{U_f}{\varepsilon_p} + v_t \right) - \left(\frac{U_f}{\varepsilon_p} - v_t \right) \exp\left(\frac{2agd_p}{\bar{u}_{sp}v_t}\right) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

4. 実験結果

4.1 微粉の下降速度

Fig. 4 は径 12 mm のガラス粒子を充填した層 (内径 190 mm の装置) の中を下降していく微粉の速度の測定値である. 図中の実線は(12)式の計算値を, 破線は(14)式の計算値を表す. 径 211 μm のアルミナ粒子は, ガス空塔速度が $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で, 径 398 μm のガラス粒子は $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で下降し始めた. ガス流速を小さくすると,

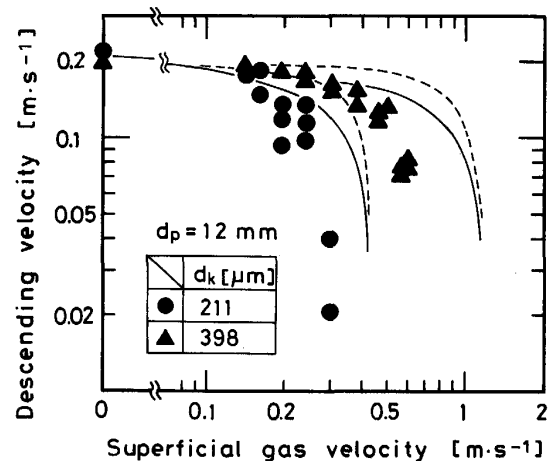


Fig. 4. Descending velocity of fines in packed bed.

いずれの微粉も下降速度が一定値に漸近した. ROES と SWAIL¹⁰⁾ も同様な結果を得ている. (12)式で $U_f = 0$ とし, さらに $|u_{sp}| \ll v_t$ の条件が成り立つとして指数項を展開すると, 以下の式が得られる.

$$|u_{sp}|_{U_f=0} = (gd_p)^{1/2} = (\alpha/2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ガスを流さない場合の粒子の下降速度はトレーサー粒子の径には依存しないことになる. 本実験条件では, アルミナ粒子およびガラス粒子については前記の条件が満足され, ガスを流さずに測定した下降速度は, 約 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり, この値は α を $2/3$ としたときの計算値とはほぼ一致した. VALENZUELA と GLICKSMAN⁹⁾は, 径 700 μm のガラス粒子の流動層中に 38~53 μm の鉄粒子を吹き込んで透過速度を測定し, 同じ α の値を得ている.

ガスを流さない条件における $|u_{sp}|_{U_f=0} = (gd_p)^{1/2}$ に及ぼす粒径比と微粉の種類の影響を Fig. 5 に示す. BRIDGWATER と INGRAM¹¹⁾は, ガラス粒子などの下降速度を測定し, 他の研究者¹²⁾¹³⁾の測定値を併せて考察した.

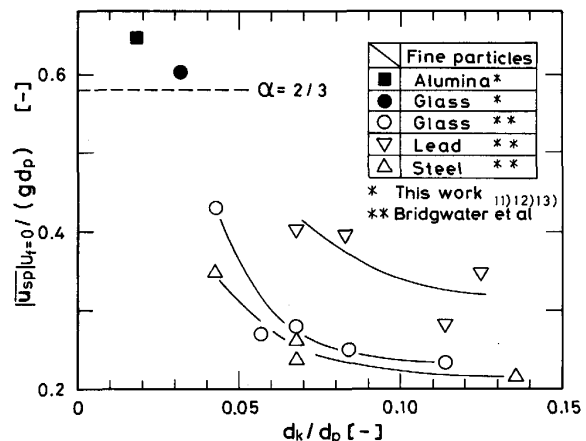


Fig. 5. Effect of size ratio of fine particles to packed particles on descending velocity.

それによれば、粒径比が大きくなれば粒子間の摩擦が大きくなるので、 α は小さくなる。また、微粉が粗粒子に衝突したときの反発力が大きいと α は小さくなる。本研究の結果は彼らの結果とおおよそ一致するが、反発係数の影響についてはさらに検討が必要であろう。なお、微粉の径が小さく、粗粒子に衝突するまでに下降速度が v_t に近付く場合には、(15)式の展開は成り立たない。本実験で用いたシリカアルミナ粒子がこれに当たり、Fig. 5 から α を推定することはできない。

4.2 微粉の上昇速度

Fig. 6 は径 $68\text{ }\mu\text{m}$ のシリカアルミナ粒子の上昇速度に及ぼす充填粒子の大きさの影響を示す。実験は内径 190 mm の装置を用いて行った。充填粒子が小さいほど上昇速度は小さくなった。ガス空塔速度が $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上での実測値は、 $\alpha = 2/3$ とし、Stokes 領域の(11)式から求めた計算線と一致した。このように、(15)式が成立しない場合でも、大略 $\alpha = 2/3$ となることがわかった。ただし、ガス空塔速度が $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下では、トレーサー微粉の蛍光を検出することができなかった。また、Fig. 4 に示す下降速度においても、微粉が静止する条件 ($U_f \varepsilon_p \approx v_t$) までガス速度を上げると測定ができなくなった。送入されたトレーサー微粉は縦方向に移動しながら、横方向にも拡散する。縦方向の拡散は、縦方向の平均流としての移動が速ければ無視できるが、縦方向の移動速度が小さいと、プローブの間隔を通過する時間内に半径方向へ分散してしまう。そのために、トレーサー微粉の濃度が低下し、蛍光強度が検出限界を下回ったものと考えられる。

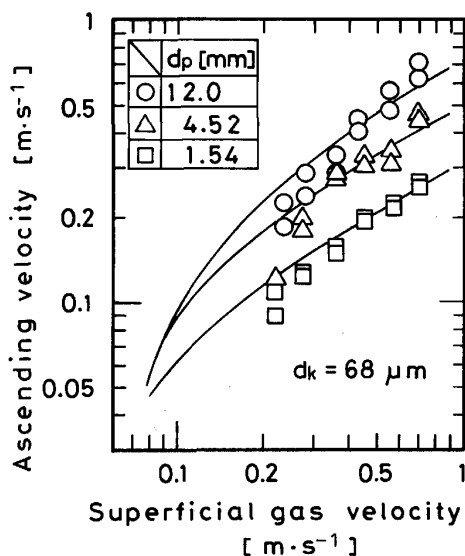


Fig. 6. Effect of diameter of packed particles on ascending velocity of fines.

Fig. 7 は、上昇速度に及ぼす微粉の粒径の影響を示す。この実験では、アルミナ粒子を上昇させるのに十分なガス流速を得るために、内径 120 mm の装置を用いた。粒径 $68\text{ }\mu\text{m}$ のシリカアルミナ粒子の場合、微粉の上昇速度はガス空塔速度に対して約 $1/2$ 次で増加したが、粒径 $211\text{ }\mu\text{m}$ のアルミナ粒子では、ガス速度の依存性が大きくなった。これは、アルミナ粒子は、Allen 域で沈降するので、実線((11)式)と破線((13)式)間の領域に計算線があり、Newton 域に近づくほどガス速度の依存性が高くなることから説明できる。いずれも $\alpha = 2/3$ として計算した。

4.3 上昇速度の半径方向分布

Fig. 8 は径 $68\text{ }\mu\text{m}$ のシリカアルミナ粒子の上昇速度

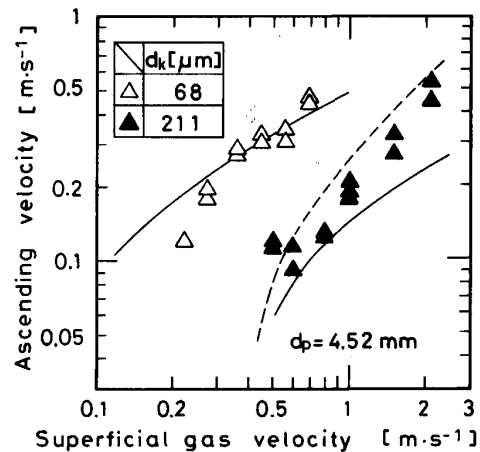


Fig. 7. Effect of diameter of fine particles on ascending velocity.

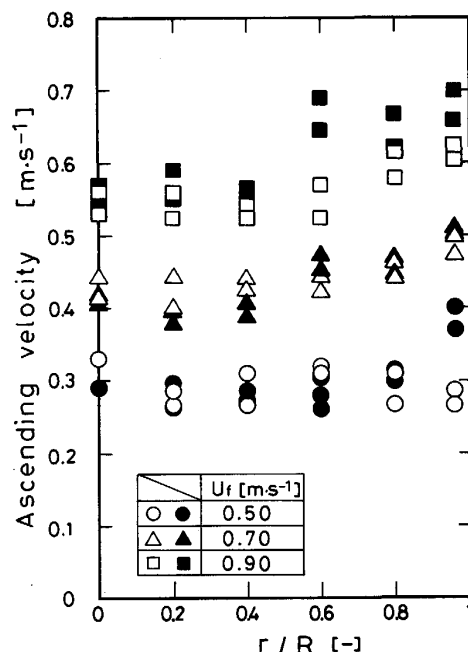


Fig. 8. Radial distribution of ascending velocity.

の半径方向分布を示す。装置の内径は 100 mm, 充填粒子は径 4.5 mm のガラス粒子である。図中○, △, □は分散器の上部, 中心軸近傍にトレーサーを投入した場合で, ●, ▲, ■はガス入口管から投入した場合である。測定誤差を考慮すると, 両者には差がないと判断される。壁近傍での微粉の上昇速度は中心部の値に比べると 10~20% 大きかった。これは充填層内の空間率は壁近傍で大きく, これに伴い壁近傍のガス流量が大きくなるためである。

5. 結 言

粗粒子充填層内に吹き込まれたトレーサー微粉の鉛直方向の透過速度 (上昇と下降速度) を測定した。透過速度に及ぼすガス流速, 充填粒子径および微粉の径の影響と透過速度の半径方向分布について検討を行い以下の結果を得た。

(1) 充填層内の微粉の下降速度は, 粗粒子に衝突するときの速度が終端速度よりも小さい条件では, あるガス速度以下になると微粉の径は関係なく一定値となった。

(2) 充填層内の微粉の上昇速度は, 充填粒子が大きいほど速くなり, 微粉の径が大きい場合にはガス流速の影響を強く受けた。

(3) 以上の結果は衝突モデルから推測した充填層内の微粉の透過速度の計算値とよく一致した。

(4) 微粉の上昇速度は, 中心部に比べて壁近傍で少し高くなった。

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 : 抵抗係数 (—)
 d_k : 微粉の径 (m)
 d_p : 粗粒子の径 (m)

g : 重力の加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
 m : 粒子の質量 (kg)
 R : 充填層の半径 (m)
 r : 装置中心軸からの半径方向位置 (m)
 t : 時間 (s)
 $\bar{t}$: 衝突までに要する平均時間 (s)
 U_f : ガス空塔速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 U_{mf} : 流動化開始速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 u_{sp} : 充填層内の微粉の瞬間透過速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 $\bar{u}_{sp}$: 充填層内の微粉の時間平均透過速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 $u_t: U_f/\varepsilon_p - v_t$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 v_t : 粒子終端速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 x : 微粉の平均自由行程 (m)
 α : 衝突間隔を決める係数 (—)
 ε_p : 粗粒子充填層の空間率 (—)
 μ_f : ガスの粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
 ρ_f : ガスの密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 ρ_k : 微粉の密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 ρ_p : 粗粒子の密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

文 献

- 1) 清水英男, 佐藤憲一, 小島正光, 網永洋一, 中村文夫, 岩永祐治: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 195
- 2) L. S. FAN, M. TODA and S. SATIJA: Powder Technol., **36** (1983), p. 107
- 3) K. KITANO, K. D. WISECARVER, S. SATIJA and L. S. FAN: Ind. Eng. Chem. Res., **27** (1988), p. 1259
- 4) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晉一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 236
- 5) G. DONSI, G. FERRARI, B. FORMISANI and G. LONGO: Powder Technol., **61** (1990), p. 75
- 6) 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 403
- 7) 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 2194
- 8) S. MOROOKA, K. KUSAKABE, N. OHNISHI, F. GUJIMA and H. MATSUYAMA: Powder Technol., **58** (1989), p. 271
- 9) J. VALENZUELA and L. R. GLICKSMAN: Fluidization IV (1983), p. 161 [Engineering Foundation]
- 10) A. W. M. ROES and W. P. M. van SWAAIL: Chem. Eng. J., **17** (1979), p. 81
- 11) J. BRIDGWATER and N. D. INGRAM: Trans. Inst. Chem. Eng., **49** (1971), p. 163
- 12) N. W. SHARPE: Research Project Report. Dept. Chem. Eng. (1967) [Univ. of Cambridge]
- 13) D. C. STOCKER: Research Project Report, Dept. Chem. Eng. (1967) [Univ. of Cambridge]