

論 文

粉体吹き込み精錬法における粉体の侵入・分散挙動
ならびに混合攪拌挙動に関する基礎的検討成田貴一*・牧野武久*²・松本 洋*²・小川兼広*²Fundamental Study of the Penetration and Dispersion of Powder
and the Mixing Characteristics in Powder Injection Refining

Kiichi NARITA, Takehisa MAKINO, Hiroshi MATSUMOTO, and Kanehiro OGAWA

Synopsis :

Behaviours of injected powder and characteristics of mixing in the powder injection refining have been investigated by water model experiments. The results obtained are as follows.

(1) The critical velocity of a particle for the penetration into liquid could be expressed by Engh's equation.

(2) The penetration distance of a particle is given by the parameter which is the ratio of the kinetic energy of a particle to the turbulent shearing force.

(3) The behaviour of floatation or sedimentation is decided by the parameter which is the ratio of the buoyancy force of a particle to the turbulent shearing force.

(4) Time for dispersion of particles is a function of stirring power and liquid volume, and is about a twentieth of mixing time.

(5) The formula for mixing time is affected by the method of tracer addition and the method of stirring. Mixing time is expressed as a function of stirring power for the tracer injection and as a function of both stirring power and liquid volume for the gas bubbling with tracer addition onto the liquid surface.

1. 結 言

近年、溶銑や溶鋼中に反応ガスや不活性ガスを多量に吹き込む技術や粉・粒体を吹き込む技術が急速に進歩し、これらのインジェクション技術が溶銑、溶鋼の精錬に積極的に利用されている。とくに粉体吹き込み法は溶銑予備処理法における脱硫剤吹き込みに利用されるいつぼり、カルシウム合金や合成フラックス、合金元素の吹き込みによる溶鋼の脱酸、脱硫、介在物形態制御ならびに合金添加法として炉外精錬プロセスのなかで利用分野がひろがりつつある。また最近では溶銑脱リンの分野でも積極的にとりあげられる傾向にある。

粉体吹き込み法では粉・粒体が直接溶銑・溶鋼中へ添加されるので、反応界面積が著しく増加し、精錬効率および添加歩留りが飛躍的に増大する。著者ら^{1)~3)}はさきに溶鋼中への Ca 粉体吹き込みにおける脱硫反応機構および介在物形態制御機構について検討をおこない、こうした精錬上の有利性をあきらかにした。

いつぼり粉体吹き込み法を利用して例えば合成フラッ

クスを均一に分散させ、鋼材の用途に応じた望ましい組成の介在物を生成させる場合や Pb などのように難溶性の高密度金属粒を溶鋼中に均一に分散・溶解させる場合には、粉体の溶鋼中への侵入、分散混合挙動を把握することがとくに重要となる。しかしながらこの分野では ENGH ら⁴⁾⁵⁾、中西ら⁶⁾が粉体の侵入挙動について検討をおこなっているのみで、研究報告は比較的少ない。

そこで本報ではコールドモデル実験により、粉体吹き込み法における粉体の侵入・分散挙動を観察し、さらに混合攪拌挙動を調査し、通常ガス吹き込みによる混合攪拌との比較をおこなったのでその結果を報告する。

2. 実験方法

本実験に用いた実験装置の概略を Fig. 1 に示す。粉体の液中への侵入挙動ならびに分散挙動の観察には 2 次元モデル容器を用い、液の均一混合時間の測定には 3 次元モデル容器を用いた。容器はそれぞれ透明アクリル樹脂製であり、容器の大きさの影響を調べるため、2 次元モデル容器として $31 \text{ cm}^W \times 35 \text{ cm}^H \times 10 \text{ cm}^D$ および 51

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 1 月 11 日受付 (Received Jan. 11, 1982)

* (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-8 Wakino-hama-cho Chuo-ku Kobe 651)

Table 1. Powder used for experiment.

Powder	Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Contact angle (°)	
			to water	to 43% KI sol.
Polystyrol	0.7 (0.59 ~ 0.84)	1.0	87	70
Foaming polystyrol	1.3 (1.19 ~ 1.41)	0.2	88	
Foaming polystyrol	0.7 (0.59 ~ 0.84)	0.5	88	
Acryl	0.7 (0.59 ~ 0.84)	1.1	80	72
Acryl	0.3 (0.21 ~ 0.42)	1.1	80	72
Acryl	0.2 (0.15 ~ 0.25)	1.1	80	72
Glass bead	0.7 (0.59 ~ 0.84)	2.4	18	
Glass bead	0.055(0.034~0.07)	2.4	18	
Glass balloon	0.11 (0.074~0.15)	0.31	18	
Sugar	0.7 (0.59 ~ 0.84)	1.6	—	
Sugar	0.4 (0.30 ~ 0.50)	1.6	—	
Teflon	0.7 (0.59 ~ 0.84)	2.1	104	
Silica sand	0.7 (0.59 ~ 0.84)	2.6	—	

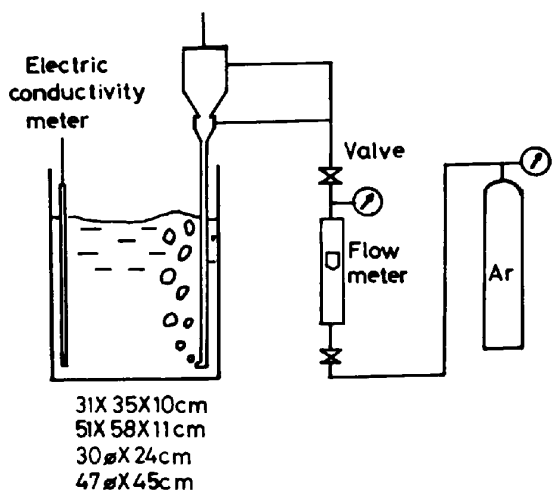
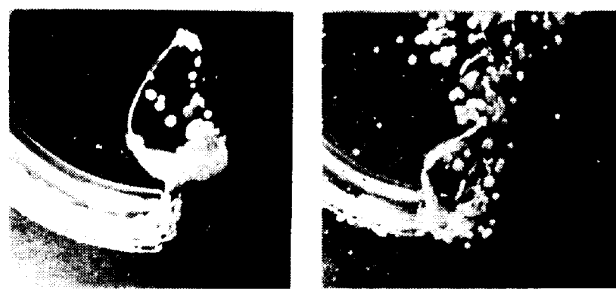


Fig. 1. Experimental apparatus.



(a) Re=552 gas flow rate=21/min
nozzle dia.-4.7 mm powder 0.7 mmφ foaming polystyrol
(b) Re=1477 gas flow rate=51/min

Photo. 1. Influence of gas flow rate on penetration of powder.

cm^W × 58 cm^H × 11 cm^D の 2 種類, 3 次元モデル容器として 30 cmφ × 24 cm^H および 47 cmφ × 45 cm^H の 2 種類を用いた. ここで容器の高さは水浴の深さを示している. なお実験には主として水を用いたが, 一部の実験では密度調整のため 43 wt% ヨウ化カリウム水溶液 (密度: 1.42 g/cm³) を用いた. 粉体の吹き込み実験ではホッパー内に装入した粉体を Ar ガスとともに搬送し, 浸漬ランスを通して横向きノズルおよび下向きノズル (ノズル内径: 2 mmφ, 4 mmφ および 4.7 mmφ) より水浴中に吹き込んだ. 吹き込みに用いた粉体の粒径および物性値を Table 1 に示す. 粉体の粒径は 0.05~1.3 mm, 密度は 0.2~2.6 g/cm³ であり, 各粉体はふるいを用いて粒度調整した. また各粉体粒子と水および 43 wt% ヨウ化カリウム水溶液との接触角を測定した結果をあわせて Table 1 に示した. なお粉体の侵入挙動および混合攪拌挙動は以下の方法で調査した.

(i) 粉体粒子の液中への侵入挙動

写真撮影により粒子が気泡界面を突き破つて液中へ侵入する条件を判別し, さらに侵入した粒子について気泡界面からの粉体の侵入到達距離を測定した.

(ii) 粉体粒子の分散挙動

粉体吹き込み開始から 1 s に 3 コマずつ連続的に写真撮影し, 粒子が容器内全体にほぼ均一に分散されるまでの時間を判定し, 粉体粒子の分散時間とした.

(iii) 液体の均一混合時間

ガス吹き込みおよび粉体吹き込み時の水浴内の混合攪拌特性を調べるため, 20 wt% 塩化カリウム水溶液をトレーサーとして浴面に添加し, 電気伝導度計により, 濃度変化を測定し, 濃度が一定値となつた点を均一混合時間とした. 電気伝導度計の応答速度は約 2~3 s である. またトレーサーの添加位置の影響を調べるため, トレーサーを Ar ガスとともに吹き込む方法およびトレーサーを含浸させた発泡スチロール粉体を吹き込む方法を採用した.

3. 実験結果および考察

3.1 ノズル近傍における粉体の動力的挙動

3.1.1 液中への粉体の侵入挙動

Photo. 1 は 4.7 mm 横向きノズルを用いて発泡スチロール粉体 (密度: 0.5 g/cm³, 粒径: 0.7 mm) を水中に吹き込んだ場合の粒子の挙動の一例を示したものである. Ar 流量が大きく, 粒子の運動エネルギーが大きい場合には粒子は気泡界面を突き破つて液中へ侵入するが, Ar 流量が小さい場合には粒子は気泡界面に捕捉さ

れ、気泡底部に堆積したり、気泡全面を被いながら気泡とともに浮上する状況が観察された。粉体粒子が液中へ侵入する条件は粒子の運動エネルギー、気泡-液体-粒子間の界面エネルギーの変化および粒子が液体からうける抗力によつてきまり、ENGH ら⁴⁾はこれらを考慮し、理論解析により(1)式を提案している。

$$\frac{u_0^2 r_p \rho_l}{8 \sigma_1} > \left(1 + \frac{\sigma_{sl} - \sigma_s}{\sigma_1}\right) \exp\left(\frac{3\rho_l}{4\rho_p}\right) + \left(1 - \frac{\sigma_{sl} - \sigma_s}{\sigma_1}\right) - \frac{8\rho_p}{3\rho_l} \left\{ \exp\left(\frac{3\rho_l}{4\rho_p}\right) - 1 \right\} \quad (1)$$

ここで u_0 : 気泡界面へ衝突する際の粒子の速度 (cm/s), r_p : 粒子半径 (cm), ρ_l, ρ_p : それぞれ液体および粒子の密度 (g/cm³), $\sigma_1, \sigma_{sl}, \sigma_s$: それぞれ液体の表面張力, 粒子-液体間界面張力および粒子の表面張力 (dyn/cm) である。なお σ_1, σ_{sl} および σ_s と接触角 θ との間には(2)式の関係があり、(2)式を(1)式に代入すれば(3)式が得られる。

$$\cos \theta = (\sigma_s - \sigma_{sl}) / \sigma_1 \quad (2)$$

$$\frac{u_0^2 r_p \rho_l}{8 \sigma_1} > (1 - \cos \theta) \exp\left(\frac{3\rho_l}{4\rho_p}\right) + (1 + \cos \theta) - \frac{8\rho_p}{3\rho_l} \left\{ \exp\left(\frac{3\rho_l}{4\rho_p}\right) - 1 \right\} \quad (3)$$

そこで発泡スチロール粉体 ($\rho_p: 0.5 \text{ g/cm}^3, r_p: 0.35 \text{ mm}$), ポリスチロール粉体 ($\rho_p: 1.0 \text{ g/cm}^3, r_p: 0.35 \text{ mm}$) およびアクリル粉体 ($\rho_p: 1.1 \text{ g/cm}^3, r_p: 0.35 \text{ mm}$) の3種類の粉体を水中および43 wt% ヨウ化カリウム水溶液中へ吹き込んだ場合の侵入状況を判別し、(3)式によつて求めた臨界侵入速度との対応をプロット

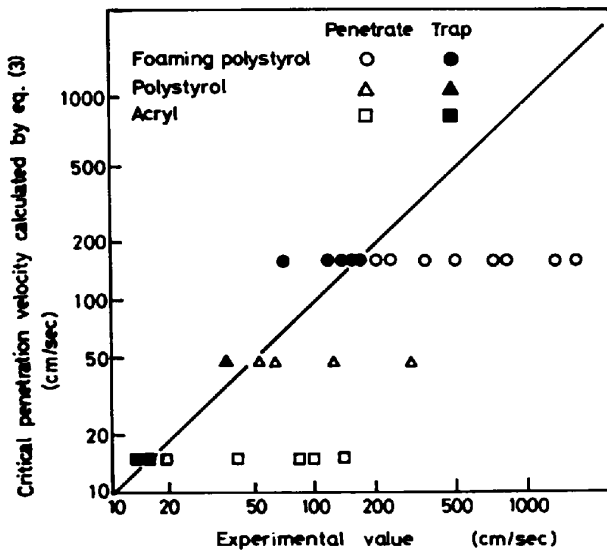


Fig. 2. Relation between calculated value and experimental value for penetration velocity of injected powder.

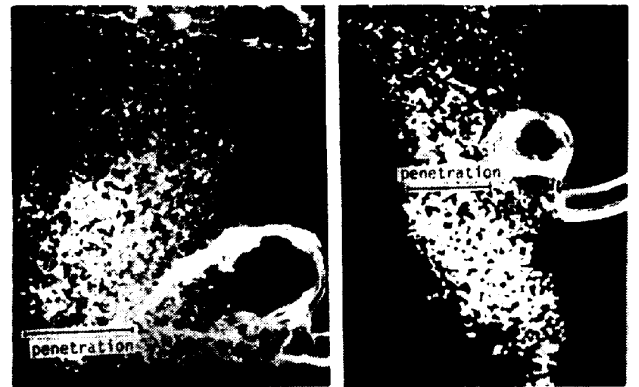
した結果を Fig. 2 に示す。なお図中の粉体侵入速度の実験値は、ノズル先端におけるガスの線速度に等しいとして、(4)式より求めた。

$$u_0 = \frac{4Q}{\pi d_0^2} \quad (4)$$

ただし Q : ガス流量 (cm³/s), d_0 : ノズル直径 (cm) これよりコールドモデル実験によつて得られた臨界侵入速度は ENGH らの計算式によつて得られた値にはほぼ一致した。したがつて以後の実験条件の設定および実験データの整理に必要な各種粉体の臨界侵入速度として(3)式による計算値を使用した。

3.1.2 液中へ侵入した粒子の浮上・沈降挙動

Photo. 2 にショ糖粉体 ($\rho_p: 1.6 \text{ g/cm}^3, d_p: 0.7 \text{ mm}$) を 4.7 mm 横向きノズルより水中へ吹き込んだ場合の粒子の挙動の一例を示した。気泡界面を突き破つて液中へ侵入した粒子は一定の距離(侵入距離)侵入した後、急激に速度を減じ、ガス流量が大きい場合には浮上し、



(a) Injection gas flow rate = 96 Ncm³/sec powder = 0.7 mmφ sugar
(b) Injection gas flow rate = 15 Ncm³/sec powder = 0.7 mmφ sugar

Photo. 2. Influence of injection gas flow rate on behaviour of powder penetrating into water.

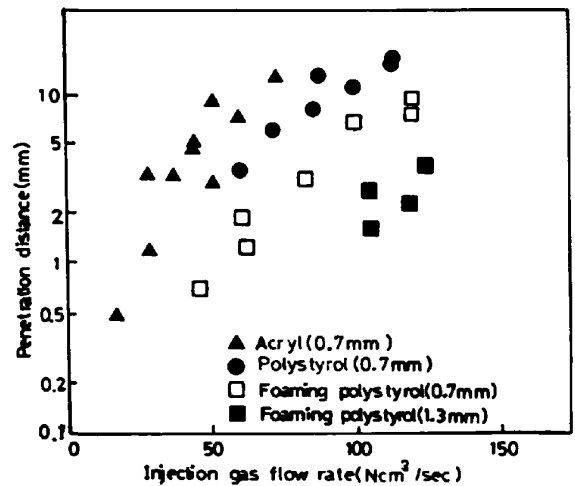


Fig. 3. Relation between penetration distance and injection gas flow rate.

ガス流量が小さい場合には沈降する現象が認められる。これは気泡の上昇に伴って発生する液本体の上昇力と粒子に働く重力との関係によつて生ずる現象であり、液体より密度の大きい粒子でも循環流によつて容器内に分散され得ることを示している。

また Fig. 3 は各種粉体を 4.7 mmφ 横向きノズルを用いて水中へ吹き込み、各粒子の侵入距離を測定した結果を示したものであり、侵入距離はガス流量の増加とともに増大し、また粒子の密度および粒子径によつて侵入距離が異なる。これらの粒子の侵入距離および浮上・沈降の条件を体系的に把握することは精練剤や合金元素の粒度、密度およびガス吹き込み攪拌力を設定する上で非常に重要であると考えられ、粒径、物性の異なる粉体の挙動を定量化するため以下の検討をおこなつた。

(1) 液中への粒子の侵入距離

液中への粒子の侵入距離は粒子の運動エネルギーと液体から受ける抵抗力の関係によつて決まると考えられるが、気泡周辺の液体は強い乱流領域にあり、粒子の運動方程式を設定することが困難である。そこで粒子の侵入距離を示す指標として便宜上、(粒子の運動エネルギー)/(粒子が受ける抵抗力)で定義されるパラメータ α を導入した。ここで粒子 1 個の運動エネルギー E は(5)式で示される。

$$E \propto d_p^3 \rho_p u_0^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

また乱流領域において粒子が受ける抵抗力は乱流運動エネルギーによつてもたらされる剪断力が支配的であると考へ、(6)式⁹⁾で示される剪断力 τ を適用し、粒子 1 個が受ける抵抗力 R_1 として(7)式を用いて近似した。

$$\tau = C^{1/2} \rho_l K \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$R_1 = C^{1/2} \rho_l K (\pi d_p^2 / 4) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで C : 定数、 ρ_l : 液体の密度 (g/cm³)、 K : 乱流運動エネルギー = $\frac{1}{2} \Delta u^2$ (dyn·cm/g) である。(5)および(7)式より α は(8)式のように表される。なお C は一定として式から除外した。

$$\alpha = E/R_1 \propto d_p u_0^2 \rho_p / \rho_l K \quad \dots \dots \dots (8)$$

いつぼう(8)式において乱流運動エネルギー K を単位重量あたりの吹き込みガスの仕事率で定義されている攪拌動力 $\dot{\epsilon}_g$ (W/t) に比例していると仮定し、さらに粒子が液中へ侵入し得る臨界侵入速度に対応する α の値を 0 にするため、修正 α' を(9)式で表示した。なお粉体吹き込み法における攪拌動力 $\dot{\epsilon}_g$ としては 3.3 項での検討にもとづき(10)式で示される SUNDBERG⁹⁾ の式を用いた。

$$\alpha' = d_p \rho_p u_0^2 / \rho_l \dot{\epsilon}_g - d_p \rho_p u_0^{*2} / \rho_l \dot{\epsilon}_g^* \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\dot{\epsilon}_g = \frac{0.0062 Q T_1}{M_1} \{ \ln(1 + 0.000968 \rho_l Z) + (1 - T_0/T_1) \} \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで Q : ガス流量 (l/min)、 $T_1 \cdot T_0$: 液浴および吹き込みガスの温度 (K)、 M_1 : 液浴重量 (t)、 Z : ガス吹き込み深さ (cm)、 u_0^* : (3)式によつて求められる粒子の臨界侵入速度、 $\dot{\epsilon}_g^*$: u_0^* に対応した攪拌動力値であり、(4)および(10)式より得られる(11)式を用いて求めた。

$$\dot{\epsilon}_g^* = \frac{0.000292 u_0^{*2} d_p^3 T_1}{M_1} \cdot \{ \ln(1 + 0.000968 \rho_l Z) + (1 - T_0/T_1) \} \quad \dots \dots (11)$$

そこで(9)式で示されるパラメータ α' を用いて種々の粉体の侵入距離を整理した結果を示すと Fig. 4 のとおりである。Fig. 4 よりあきらかなように侵入距離は α' によつてほぼ定量化できるが、テフロン粒子の場合は他の粒子に比較して侵入距離が著しく小さな値を示している。これはテフロン粒子の水との接触角が比較的大きく、テフロン粒子が水にぬれにくいために生じた現象であると考えられる。すなわち、浅井ら¹⁰⁾が指摘しているように粒子が小径になるほど粒子のぬれ性が侵入挙動に大きな影響をおよぼすこと、またテフロン粒子を水浴面に添加した場合、ほとんどの粒子は沈降せず水浴面に浮上していることから、粒子が気体を付着したまま液中へ侵入し、見かけの密度が著しく小さくなつたためであると考えられる。

以上の結果より粉体を液中へ深く侵入させ、気泡群から分離するためには粉体の粒径を大きくし、粉体の吐出速度を大きくとり、さらに攪拌動力を小さくすることが必要であるが、粉体の粗粒化は反応界面積の減少につながるので、できるだけ径の小さいノズルを用いて少流量のガスで粉体を吹き込むことが有利である。なお吹き込みガス量は後述のように高密度粉体の液中への分散を目

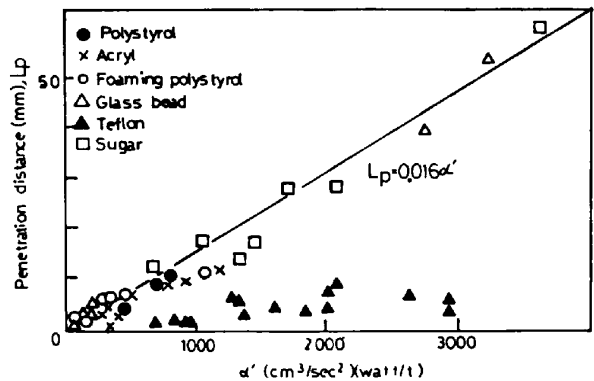


Fig. 4. Relation between penetration distance and parameter α' .

的とした場合や浴全体の混合攪拌が重要な場合には十分確保する必要があり、したがって目的に応じて最適流量の設定が必要となる。

なお気泡界面からの侵入距離 L_p として Fig. 4 より (12)式が得られた。

$$L_p = 0.016\alpha' \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

(2) 液中へ侵入した粒子の浮上・沈降挙動

液中へ侵入した粒子の浮上・沈降は粒子に作用する重力および浮力と液の上昇流からうける抵抗力との関係によつて決まる。そこで便宜上(粒子に働く沈降力)/(液体の上昇流からうける抵抗力)で定義されるパラメータ β を導入した。ここで粒子1個に働く沈降力 F は (13)式で示される。

$$F = (\pi d_p^3 / 6) (\rho_p - \rho_l) g \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで g : 重力加速度 (cm/s^2) である。

また液の上昇流からうける抵抗力 R_2 を (7)式で近似すれば (7)および (13)式よりパラメータ β は (14)式で表される。

$$\beta = F / R_2 \propto d_p (\rho_p - \rho_l) g / \rho_l K \quad \dots\dots\dots (14)$$

(14)式において K が $\dot{\epsilon}_g$ と比例関係にあると仮定し、 β' を (15)式で表示した。

$$\beta' = d_p (\rho_p - \rho_l) g / \rho_l \dot{\epsilon}_g \quad ((\text{cm}^2/\text{s}^2) / (\text{W/t})) \quad \dots (15)$$

そこで種々の粉体を横向きノズルより吹き込み、粒子が液中へ侵入した後、浮上・沈降する状況を写真撮影により判定し、粒子の侵入距離とをあわせて β' で整理した結果を Fig. 5 に示した。 β' が負の場合、すなわち粒子の密度が液体より小さい場合は、粒子は当然浮上するが、粒子の密度が液体より大きい場合でも $\beta' < 3.0$ の範囲であれば粒子は循環流によつて浮上、分散される。いつぼう下向きノズルを用い、水より密度の小さい粉体を吹き込んだ場合、粉体はいつたん液中へ侵入した後浮上するのに対し、密度が水より大きい粉体はすべて容器底部に沈降した。すなわち下向きノズルではノズルの下部に強い上昇流は存在せず、密度の大きい粉体を効果的に浴内へ分散させる点で不利である。

3.2 粉体の分散挙動

Fig. 6 は発泡スチロール粉体を Ar ガスとともに水中に吹き込んだ場合の粒子の分散挙動の一例を示したものであり、粒子は気泡の上昇に伴つて発生する循環流に沿つて浴内にひろがり (Fig. 6(a)), いつたんほぼ均一に分散したのち (Fig. 6(b)) 再び粒子は浮力の影響をうけて浴表面近くに集積する傾向にある (Fig. 6(c))。同様に水より密度の大きい粉体を吹き込んだ場合には浴底部に集積する傾向が認められた。そこで粒子が容器全体にほぼ均一に分散されるのに要する時間を粉体の分散

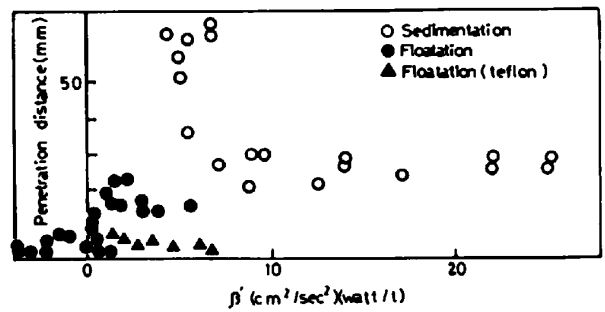


Fig. 5. Relation between behaviour of injected powder and parameter β' (horizontal nozzle).

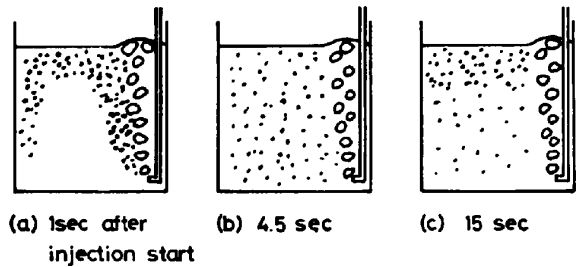


Fig. 6. Behaviour of dispersion of injected foaming polystyrol powder (Injection gas flow rate: $230 \text{ cm}^3/\text{s}$).

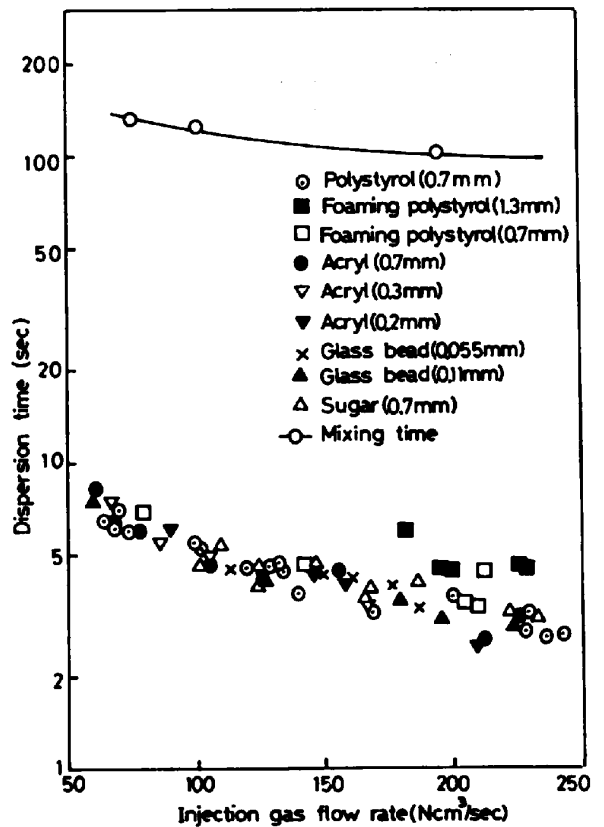


Fig. 7. Relation between powder dispersion time and injection gas flow rate.

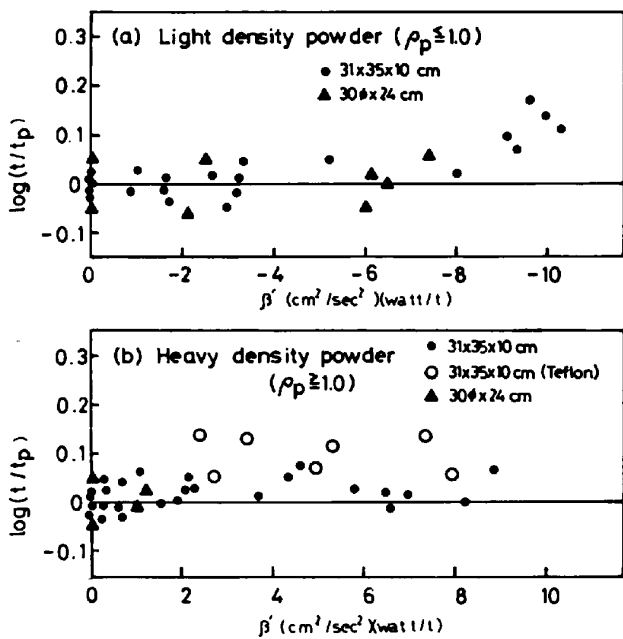


Fig. 8. Relation between t/t_p and parameter β' .

時間と定義し、分散時間とガス流量との関係を整理した結果を示すと Fig. 7 のとおりである。なお Fig. 7 には同一の 2 次元モデル容器を用いて浴面に KCl 水溶液をトレーサーとして添加して測定した均一混合時間もあわせて示した。粉体の分散時間はガス流量の増大とともに減少し、液の均一混合時間のおよそ 1/20 である。粉体分散時間と均一混合時間との定量的な関係はあきらかでないが、本実験で得られた粉体分散時間における KC トレーサー濃度は均一混合時のトレーサー濃度の約 60% であつた。また Fig. 7 において密度が 1.0 g/cm³ のポリスチロール粉体に比較して、密度が水と大きく異なる粉体は若干分散時間が大きくなる傾向にある。そこでポリスチロール粉体の分散時間 t_p を基準値とし、一般の粉体の分散時間を t/t_p で基準化し、前掲のパラメータ β' との関係でプロットした結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) は密度が 1 より小さい粉体の場合であり、 β' が負側に大きい場合すなわち粉体の浮力が大きくしかも攪拌動力値が小さくなると分散時間は大きい値を示す。いつぼう Fig. 8(b) は密度が 1 より大きい粉体の場合であるが、本実験条件の範囲では β' の影響が比較的少ない。なおテフロン粉体の場合には同一 β' 値で比較すると分散時間は異常に大きい値を示しており、前述のようにテフロン粒子の見かけの密度が小さくなつていていることに起因していると考えられる。

以上のように粉体の密度によつて液内への分散挙動が大きく異なるので、例えば低密度の精錬フラックスを鋼浴内に長時間滞留させたり、あるいは高密度の合金元素を効率よく均一分散化させる際には、粉体の粒度を小さ

くし、攪拌力を大きくすることが必要となる。

3.3 粉体吹き込みにおける液浴の均一混合時間

3.3.1 均一混合時間におよぼす粉体およびガスジェットの運動エネルギーの影響

粉体吹き込みにおける液浴の混合攪拌は基本的にはガス吹き込み攪拌と同一と考えられる。ガス吹き込みによる混合攪拌特性を示す尺度として、(10)式で示される攪拌動力が用いられている。

さらに FERRETTI¹¹⁾ は攪拌動力の算出に際し、気泡の仕事率に加えてノズル出口でのガスジェットの運動エネルギーを考慮した式を提案しているが、LEHRER¹²⁾ によればガスジェットの運動エネルギーが攪拌動力に利用される率は非常に小さく、利用率として 6% を採用している。

いつぼう粉体吹き込みでは上記攪拌動力のほか粉体もつ運動エネルギーが加わり、これらガスおよび粉体の運動エネルギーを(10)式に加えれば(16)式が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_p = & \frac{0.0062 Q T_1}{M_1} \{ \ln(1 + 0.000968 \rho_1 Z) \\ & + (1 - T_0/T_1) \} + 0.000376 \rho_g Q^3/d_0^4 M_1 \\ & + 0.0000225 m Q^2/d_0^4 M_1 \quad (W/t) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここで ρ_g : ガス密度 (g/cm³)、 d_0 : ノズル径 (cm)、 m : 粉体供給速度 (g/s) である。

そこでまず(16)式におけるガスジェットの運動エネルギーの影響を調べるため、ノズル径を変えてガス吹き込みをおこない、均一混合時間を測定した結果を Fig. 9 に示した。なお本実験で供給されるガスジェットの運動エネルギーは(10)式で与えられる攪拌動力の 0.3~4.1 倍であり、同一ガス流量でノズル径が異なる場合のガスジェットの運動エネルギー比は 16:1 である。Fig. 9 によると均一混合時間におよぼすノズル径の影響はほとんど認められず、したがつてガスジェットの運動エネルギーは実質的に混合攪拌に寄与していないものと考えられる。

また粉体の運動エネルギーの影響を調べるため、スチ

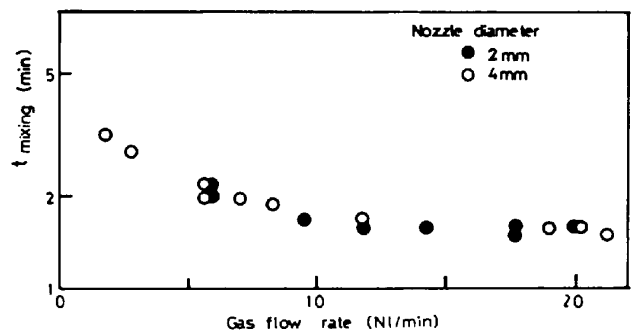


Fig. 9. Influence of nozzle diameter on mixing time.

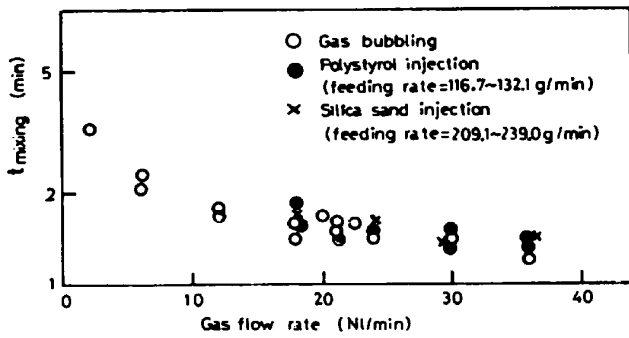


Fig. 10. Influence of the energy of injected powder on mixing time.

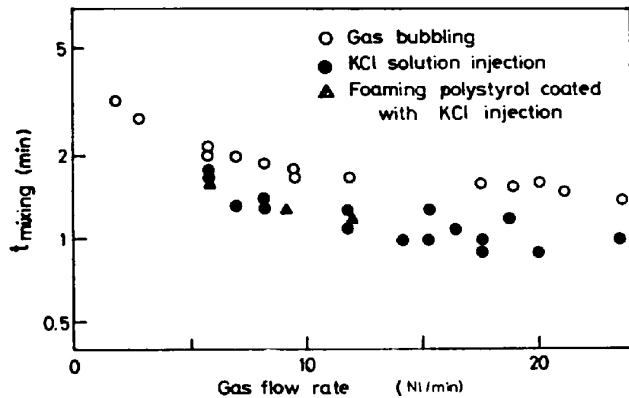


Fig. 11. Influence of the position of tracer addition on mixing time.

ロール粉体およびけい砂粉体を吹き込み、均一混合時間を測定し、ガス吹き込みのみの場合と比較した結果を Fig. 10 に示す。なお本実験で供給される粉体の運動エネルギーは (10) 式で与えられる攪拌動力の 0.4~1.7 倍である。Fig. 10 によるとガス吹き込みと粉体吹き込みとは均一混合時間の差はほとんど認められず、したがって粉体の運動エネルギーは混合攪拌には実質的に寄与しないものと考えられる。

以上の結果より、粉体吹き込みにおける攪拌動力として気泡の仕事率のみを考慮し、本報告ではすべて (10) 式を用いた。

3.3.2 均一混合時間におよぼすトレーサー添加位置の影響

粉体吹き込みを利用して合金元素の添加をおこなう場合、合金元素は溶鋼中に直接吹き込まれるので、通常の鋼浴面へ添加する場合に比較して溶鋼・均一化が促進されると考えられる。Fig. 11 にトレーサーを (1) 浴表面に添加、(2) ガスとともに吹き込む、(3) トレーサーを含浸させた発泡スチロール粉体を吹き込む方法によつて均一混合時間を測定した結果を示した。ガス流量が比較的小さい場合にはトレーサーの添加位置の影響は小さいが、ガス流量が増加するにつれてトレーサー吹き込みの

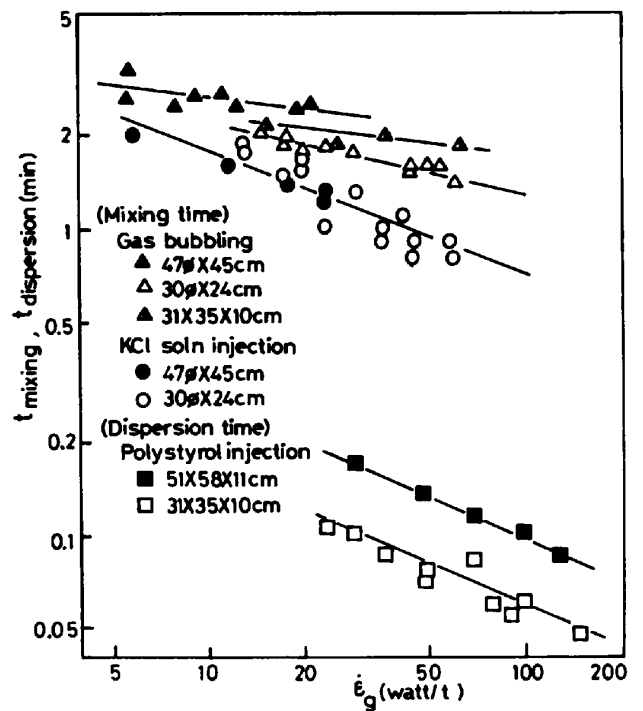


Fig. 12. Relation between mixing time and parameter ϵ_g .

方が均一混合時間は小さくなり、均一化が促進されることがわかる。これらの現象の相異を調べるため、染料をトレーサーとし、添加直後のフローパターンを観察した結果、浴面添加の場合にはトレーサーが液本体の循環流に稀釈されるまでかなりの時間を要するのに対し、トレーサー吹き込みの場合には吹き込み直後に広範囲の循環流に稀釈される傾向が認められた。

3.3.3 粉体分散時間および均一混合時間と攪拌動力との関係

Fig. 12 はトレーサーを浴面に添加した場合およびトレーサーを吹き込んだ場合の均一混合時間ならびに粉体吹き込みにおける粉体の分散時間をそれぞれ 2 種類の大きさの容器を用いて測定した結果を攪拌動力 ϵ_g で整理したものである。なおガス吹き込みの場合、2 次元モデル容器を用いて測定した均一混合時間もあわせて示した。トレーサーを浴面に添加した場合の均一混合時間および粉体の分散時間はそれぞれ容器の大きさによつて異なるのに対して、トレーサー吹き込みの場合には容器の大きさの影響をほとんどうけず、均一混合時間は ϵ_g のみで整理することができた。またトレーサー浴面添加の場合に比較してトレーサー吹き込みの方が均一混合時間は小さい。そこで Fig. 13 は粉体分散時間および液の均一混合時間を $\epsilon_g (M_1/\rho_1)^{-2/3}$ で整理した結果を示したものであり、粉体の分散時間およびトレーサー浴面添加の均一混合時間はいずれも $\epsilon_g (M_1/\rho_1)^{-2/3}$ で整

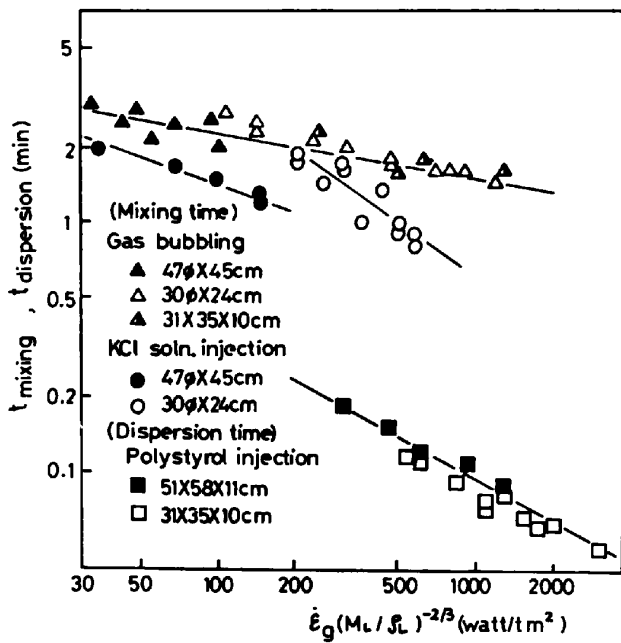


Fig. 13. Relation between mixing time and parameter $\dot{\epsilon}_g (M_1/\rho_1)^{-2/3}$

理できた。

以上のようにトレーサーの添加位置、方法によつて均一混合時間が異なり、また均一混合時間を表示するパラメータが異なる理由は明らかでないが、循環流内の乱流運動エネルギー分布と密接な関係にあると考えられる。すなわち 3.3.2 項で述べたようにトレーサー吹き込みの場合にはノズル近傍およびガス気泡上昇域におけるきわめて高い乱流運動エネルギーによつてトレーサーが液中深く分散し、広範囲の循環流内に捕捉されるため容器の代表長さによる影響が小さいのに対し、トレーサー浴面添加では添加位置付近におけるトレーサーの分散領域が小さく、そのため液本体の循環流による混合が支配的であり、容器の代表長さによる影響が現れたものと考えられる。いつばう粉体吹き込みの場合はトレーサーが固体粒子であり、そのためノズル近傍およびガス気泡上昇域における高い乱流運動エネルギーの影響は液体トレーサーの場合ほど受けにくく、容器全体への混合はやはり液本体の循環流による混合が支配的であり、したがつてトレーサー浴面添加の場合に近い挙動を示すものと考えられる。また本実験では比較的の小規模のモデル容器を使用しており、トレーサー吹き込み直後に分散される領域が容器全体のかなりの部分を占めているので、液本体の循環流による混合の影響が少なくなつたこともひとつの理由であると考えられる。

なお本実験によつて得られた液の均一混合時間および粉体分散時間と攪拌動力との関係を示すと(17)~(19)式である。

トレーサー浴面添加：

$$\tau = 6.2 \{ \dot{\epsilon}_g (M_1/\rho_1)^{-2/3} \}^{-0.21} \quad (\text{min}) \quad \dots\dots (17)$$

トレーサー吹き込み：

$$\tau = 4.57 \dot{\epsilon}_g^{-0.42} \quad (\text{min}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

粉体分散時間 (ポリスチロール粉体)：

$$t = 4.15 \{ \dot{\epsilon}_g (M_1/\rho_1)^{-2/3} \}^{-0.56} \quad (\text{min}) \quad \dots (19)$$

4. 結 論

コールドモデル実験により粉体吹き込みにおける粉体の侵入、分散挙動ならびに混合攪拌挙動を調査し、以下の結果を得た。

(1) 粉体が気泡界面を突き破つて液中へ侵入する条件は ENGH らが提出した式によつて求められる条件と一致した。

(2) 液中への粉体の侵入距離ならびに侵入後の浮上・沈降挙動は液からうける抵抗力と粉体の運動エネルギーならびに粉体にかかる重力および浮力の関数によつて決まり、種々の粉体について統一的に表示できる関係式を導出した。

(3) 粉体の分散化は液の均一混合に比較して短時間に進行し、液と密度の異なる粉体はいつたん分散されたのち浴面あるいは底部に集積する。

(4) 液の均一混合時間はトレーサーの添加方法によつて影響をうけ、トレーサー浴面添加に比較してトレーサー吹き込みでは均一混合時間が小さくなる。またトレーサー浴面添加の均一混合時間は $\dot{\epsilon}_g (M_1/\rho_1)^{-2/3}$ で整理できるのに対し、トレーサー吹き込みの場合は $\dot{\epsilon}_g$ で整理された。

なお粉体吹き込みに関する動力的検討は主としてコールドモデル実験に頼るところが多く、溶銑・溶鋼中での挙動と異なる点も数多く指摘¹⁴⁾¹⁵⁾されており、したがつて物性・温度の差を考慮した実操業プロセスへの対応が今後の課題である。

文 献

- 1) K. NARITA, T. MAKINO, H. MATSUMOTO, K. OGAWA, and K. KAWAI: Proceedings of Sixth International Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting, San Diego, California (1979), p. 170
- 2) 成田貴一, 牧野武久, 松本 洋, 小川兼広: 日本金属学会第2総合分科シンポジウム, “ガス-スラグ-メタル系における界面現象”(1979), p. 21
- 3) 成田貴一, 牧野武久, 松本 洋, 小川兼広: 鉄と鋼, 65 (1979), A145
- 4) T. A. ENGH, H. SANDBERG, A. HULTKVIST, and L. G. NORBERG: Scan. J. Metall., 1 (1972), p. 103
- 5) T. A. ENGH, K. LARSEN, and K. VENÅS: Ironmaking Steelmaking, 6 (1979), p. 268

- 6) 中西恭二, 江島彬夫, 鈴木 宰, 数土文夫: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1323
- 7) J. SZEKELY, H. Y. WANG, and K. M. KISER: Metall. Trans., 7B (1976) June, p. 287
- 8) D. B. SPALDING: VDI-Forsch.-Heft., 549 (1972), p. 5
- 9) Y. SUNDBERG: Scan. J. Metall., 7 (1978), p. 81
- 10) 渡辺吉夫, 浅井滋生: 鉄と鋼, 67 (1981), S 219
- 11) A. FERRETTI: Boll. Tec. Finsider, 361 (1977), p. 209
- 12) L. H. LEHRER: I & EC, Progress Design and Development, 7 (1968), p. 226
- 13) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p.672
- 14) J. W. MCKELLIGET, M. CROSS, and R. D. GIBSON: Ironmaking Steelmaking, 6 (1978), p. 282
- 15) G. N. ORYALL and J. K. BRIMACOMBE: Metall. Trans., 7B (1976), p. 391

統 計

21世紀にかけての人口と資源の見通し

これは OECD レポートを東海大学の金子先生がモジュレートしたものである†。これによると, 20 世紀から 21 世紀にかけて, 地球上の社会は大きな困難に遭遇する。図によれば, 第 1 の苦悩は人口の増加が極大に達することである。第 2 は銅, 亜鉛, 水銀, モリブデン, タングステン, クロムなどの重要金属資源の枯渇がいよいよ現実化することである。

† 金子秀夫: “資源と社会の未来像”, 塑性と加工, 22 (1981-11) 250, p. 1053

