

討13 ガス吹き込み精錬における流動と反応速度

名古屋大学工学部

○佐野正道 森 一美

1. 緒言

最近の10年間に於いて、銅浴の攪拌が精錬反応速度に大きな影響を及ぼすことが明らかにされ、各種精錬プロセスにおいてガス吹き込み攪拌が実施されるようになってきた。本報では、ガス吹き込み攪拌に伴う液体流動およびスラッグ-メタル間反応速度に対するガス吹き込み攪拌の影響について検討する。

2. 吹き込みガスの有効攪拌動力

吹き込みガス(モル流量 \dot{n})の有効攪拌動力 \dot{E} は次式で表わされる。¹⁾

$$\dot{E} = \dot{n}RT_L \left[\ln(P_1/P_2) + \eta \left\{ (T_0/T_L) \ln(P_0/P_1) + (1 - T_0/T_L) + \frac{1}{2} \rho_{G0} u_{G0}^2 (T_0/(P_0 T_L)) \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 R は気体定数、 T は温度、 P は圧力、 η は定数、 ρ は密度、 u は速度、添字1は羽口(P_1 は羽口における静圧)、2は雰囲気、 L は液体、 G はガス、0は羽口(P_0 は羽口におけるガス圧)である。

(1)式中の η は吹き込みガスの攪拌動力のうち液体流動に有効に使われる割合($\eta < 1$)である。Lehrer,²⁾成田ら、³⁾村田らによると、浴の混合(均一混合時間)に対するガスの運動エネルギーの寄与は小さい($\eta = 0.06^3, 0.15^4$)。また、ガスの圧力減少($P_0 \rightarrow P_1$)および温度上昇($T_0 \rightarrow T_L$)に伴う膨張が羽口近傍で起これば、それらの攪拌動力に対する η の値は小さいと考へられ、今後実験的検討が必要である。

3. ガス吹き込みによる液体流動

3.1 次元解析 液体中へのガス吹き込みにより、Fig.1に示すような気液混相の上昇領域が形成される。吹き込まれたガスが持つ慣性力によって生じる流動はジェット(jet)、またガスに依り浮力によって生じる流動はプルーム(plume)と呼ばれる。ジェットあるいはプルームは上昇とともに周囲の液体を巻き込むため、その質量流量 m はノズルからの距離 h とともに増加する。

ジェット中の質量流量 m について次元解析を行うと、

$$m = k_j M_j^{1/2} \rho_L^{1/2} h \quad (2)$$

ここで、 k_j は定数、 M_j はジェットの慣性力(過剰運動量流束⁵⁾ $= \pi r^2 \rho_j u_j^2$ 、 r :ジェット半径、 ρ_j :ジェットの密度、 u_j :ジェットの速度)、 ρ_L は液密度である。浮力の影響が無視できる場合、 $M_j = M_0 (= \pi r_0^2 \rho_{G0} u_{G0}^2, r_0$:ノズル半径)一定であるから、 m は h に比例して増加する。単位ジェット長さあたりの質量流量の変化は、

$$dm/dh = k_j M_0^{1/2} \rho_L^{1/2} \quad (3)$$

これまで、等温の気体-気体ジェットについて k_j の値として0.22~0.404が実験的に得られている。⁵⁾

一方、プルーム中の質量流量 m について次元解析を行うと、

$$m = k_p (\dot{V}_G \rho_L g)^{1/3} \rho_L^{2/3} h^{2/3} \quad (4)$$

ここで、 k_p は定数、 \dot{V}_G はガス流量、 g は重力加速度である。また、

$$dm/dh = (5/3) k_p (\dot{V}_G \rho_L g)^{1/3} \rho_L^{2/3} h^{-1/3} \quad (5)$$

プルームに関する研究は非常に少なく、これまで $k_p = 0.15, 0.20$ が実験的に得られているのみである。⁶⁾

一般に、液体中へのガス吹き込みの場合、気液の密度差が大きいので、ノズル近傍を除いてプルームが形成されると考へられる。溶融金属へのガス吹き込みにおいては、溶融金属の密度が大きいので、さらにガスの慣性力の流動に対する寄与は小さくなる。

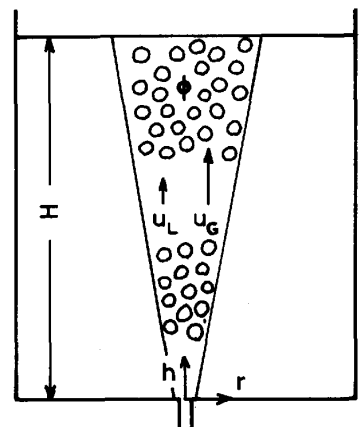


Fig.1 Plume model

3.2 ガス吹き込みによる液体流動に対する巨視的収支 Fig.1に示した液体流動について巨視的収支をとる。なお、プルーム横断面のガス速度 u_g 、液速度 u_L およびガスホールドアップ中は均一とする。

ガス、液体に対する巨視的な物質収支はつぎのように表わされる。

$$\pi r^2 \phi \rho_g u_g = \rho_g \dot{V}_g \quad (6), \quad \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \{ \pi r^2 (1-\phi) \rho_L u_L \} = \frac{5}{3} k_p (\dot{V}_g \rho_L g)^{1/3} \rho_L h^{2/3} + k_j M_0^{1/2} \rho_L \quad (7)$$

なお、ガスの粘性力およびガスに依る浮力による液の巻き込み速度には加減性があると仮定した。

プルームに対する運動量収支は、

$$\frac{d}{dt} \{ \pi r^2 (1-\phi) \rho_L u_L^2 \} = \pi r^2 \phi \rho_L g + u_L \frac{dm}{dt} \quad (8)$$

ここで、 u_L は巻き込まれる周囲の液体の速度である。

プルームに対する機械的エネルギー収支は、

$$\frac{d}{dt} \left[\pi r^2 (1-\phi) \rho_L u_L \cdot \frac{1}{2} u_L^2 \right] = \dot{V}_g \rho_L g \frac{u_L}{u_g} + \frac{1}{2} u_L^2 \frac{dm}{dt} - E_v \quad (9)$$

ここで、 E_v は周囲の液体の巻き込みによるエネルギー損失で、 $u_L = u_L$ のときに $E_v = 0$ 、 $u_L = 0$ のときには $E_v = \frac{1}{2} u_L^2 \frac{dm}{dt}$ である。また、右辺第1項中の u_L/u_g は吹き込みガスの攪拌動力のうち液体流動に有効に使われる割合を表わす。

プルーム中の u_g 、 u_L と ϕ の間には次の関係がある。

$$u_g - u_L = u_g / \phi - u_L / (1-\phi) = u_{b0} / (1-\phi) \quad (10)$$

ここで、 u_g 、 u_L はプルーム断面積基準のガス及び液体の空塔速度、 u_{b0} は単一気泡の上昇速度である。

(6), (7), (8) (又は(9)) および(10)式を連立させることにより、 r 、 ϕ 、 u_g 、 u_L について解くことができる。Fig.2には、プルーム中の液体上昇流量 \dot{V}_L とガス流量 \dot{V}_{GN} の関係を示した。計算においては、 $r_0 = 0.01$ m、 $u_L = 0$ 、浴深さ $H = 1$ m、 $k_j = 0.282$ ⁵⁾、および $k_p = 0.15, 0.20, 0.30$ とした。なお、 $k_p = 0.3$ は水銀中へのガス吹き込みにおいて求められた値である⁷⁾。 \dot{V}_L と \dot{V}_{GN} の関係は両対数プロットによりほぼ直線で表わされ、その勾配は ~ 0.35 ($\dot{V}_{GN} < 0.1$ Nm³/min)、 ~ 0.40 ($0.1 < \dot{V}_{GN} < 1$ Nm³/min)で、前報⁸⁾で得た勾配0.339より若干大きい。これは、前報においてプルーム半径はガス流量によって変化せず、一定と仮定しているのに対し、実際にはガス流量とともに若干ではあるがプルーム半径が大きくなることによる。なお、 $\dot{V}_{GN} = 1$ Nm³/minの場合について、12ル半径 r_0 を0.005~0.05 mの範囲で変化させて計算した場合、 \dot{V}_L の変化は約3%程度であった。これより、前述の浴の混合に対するガスの運動エネルギーの寄与が小さいことが説明される。液体中へのガス吹き込みの場合、実験データが少いため、現時点では k_p の値を確定することはできないが、大略0.15~0.3程度であると考えられる。

4. スラグ-メタル間反応速度に対するガス吹き込み攪拌の影響

Robertson と Staples⁹⁾は、従来のガス吹き込み攪拌を行ったスラグ-メタル間反応のモデル実験(アマルガム-水溶液系、鉛-溶融塩系)の結果をまとめている。実験条件をTable 1に示した。

Table 1 Experimental Conditions of model studies on slag metal reaction

Investigator	System	Vessel Diameter d_c	Depth of metal phase H	Gas flow rate V_G	Remarks
Subramanian et. al ¹⁰⁾	Amalgam-Aqueous solution	7, 14, 22.9 cm	66, 60 cm	36~605 cm ³ /min	Bubble frequency = 12, 24 min ⁻¹
Staples ⁹⁾	Amalgam-Aqueous solution	7, 14 cm	2.5, 5.7 cm	100~400 cm ³ /min	Nozzle diameter = 1 mm
	lead-molten salt	7 cm	~2.5 cm	100~400 cm ³ /min	

なお、Subramanianら¹⁰⁾は、浴下部は内径14cm、浴上部10cmはTableLに示した内径の容器を用いた。

Fig.3には、メタル側物質移動係数の条件で得られた物質移動係数 k_M と $D\dot{V}_G/d_c^2$ (D :拡散係数, d_c :容器直径)の関係を示した。図から明らかのように、若干の例外を除いて k_M は $D\dot{V}_G/d_c^2$ の関数として表わされる。Staplesの浴深さ $H=5.7$ cmの場合の k_M は2.5cmの場合の k_M より大きい。Subramanianらの60, 66cmの場合の k_M とはあまり差がない。また、Fig.3には1ズルが3本の結果も含まれているが、他の1ズルが1本の結果によく一致している。

Staplesの実験結果より、メタル側、スラグ側物質移動係数は次式により表わされる。

$$k^2 = BD\dot{V}_G/d_c^2 \quad (11)$$

ここで、 B は定数(cm^{-1})である。Robertsonら⁹⁾によると、 B はメタル浴深さによって異なり、浴深さが大きいときには $B \approx 120$ (メタル側), ≈ 80 (スラグ側), 浴深さが小さいときには $B \approx 80$ (メタル側, マルガム-水浴液系), ≈ 120 (メタル側, 鉛-溶融磁系), ≈ 40 (スラグ側)である。

最近、実機についてスラグ-メタル間反応速度に対するガス吹き込み攪拌の影響が調べられている。^{11,12)}

それによると、反応速度は溶鋼単位質量あたりの吹き込みガスの攪拌動力 $\dot{\epsilon}_M$ とともに増加することから示されている。沢田ら¹¹⁾によると、

$$k^2 \propto H^2 \dot{\epsilon}_M / d_c \propto H^2 \dot{V}_G / d_c^3 \quad (12)$$

物質移動係数 k の浴深さ H 、容器径 d_c に対する依存性は(11)式と(12)式で異なり、今後さらに検討する必要があると考えられる。なお、Subramanianら¹⁰⁾とStaples⁹⁾の実験結果の比較からは、メタル浴深さが大きい場合に浴深さの影響がみられない。しかし、両者の一致はみかけ上で、Subramanianらの実験では気泡頻度が非常に少なく、液体の流動状態によって浴深さの影響がStaplesの実験とは異なっていると考えられる。また、実機における高ガス流量の吹き込みでは単一ズルと複数ズルを用いた場合、明らかに複数ズルの方が反応速度が大きい。¹²⁾これは、液体中に吹き込まれたガスが気泡群を形成する場合、液体の上昇流量は上述の解析より大略 $n^{2/3}$ (n :ズル本数)に比例して大きくなることによる。一方、Staplesの実験では1ズル本数の影響は全くみられない。この点に関しては理論的説明が困難であり、今後の検討が求められる。

文献

1) 森, 佐野: 鉄と鋼, 67 (1981), p672, 2) L.H. Lehrer: IEC Process Des. Dev., 7 (1968), p226, 3) 成田, 牧野, 松本, 小川: 鉄と鋼, 69 (1983), p392, 4) O. Haida and J.K. Brinacombe: SCANINJECT III, (1984), 5:1, 5) F.P. Ricou and D.B. Spalding: J. Fluid Mechanics, 11 (1961), p21, 6) W. Rodi: "Turbulent Buoyant Jets and Plumes", (1982), (Pergamon Press), 7) 牧野, 佐野, 森: 未発表, 8) 佐野, 森: 鉄と鋼, 68 (1982), p2451, 9) D.G.C. Robertson and B.B. Staples: "Process Engineering of Pyrometallurgy" ed. by M.J. Jones, (1974), Inst. of Mining and Metallurgy, 10) K.N. Subramanian and F.D. Richardson: J. Iron Steel Inst., 206 (1968), p576, 11) 沢田, 大橋, 梅田: 鉄と鋼, 70 (1984), s161, 12) 成田, 有馬, 高橋, 岩本, 坂根, 茨城: 鉄と鋼, 70 (1984), s125

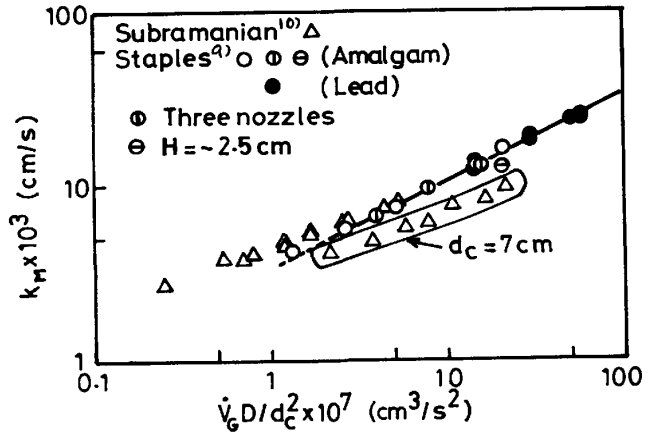


Fig.3 Relation between k_M and $\dot{V}_G D / d_c^2$