

ガス吹込み下での溶融Cu中SiO₂介在物の スラグへの除去速度

奥村 圭二*・伴 雅人*²・平澤 政廣*・佐野 正道*・森 一美*³

Rate of SiO₂ Inclusion Removal from Molten Cu to Slag under Gas Injection Stirring Condition

Keiji OKUMURA, Masahito BAN, Masahiro HIRASAWA, Masamichi SANO and Kazumi MORI

Synopsis : Kinetic studies have been made on SiO₂ inclusion removal from molten Cu to Li₂O-SiO₂-Al₂O₃ slag under Ar gas injection stirring condition. The effect of gas injection on the inclusion removal rate has been investigated. Experiments were done at 1523K. The gas flow rate of injected Ar was in the range of 3~60cm³/s under the conditions of 1523K and 1.013×10⁵Pa. The crucible diameters were 30, 40, 60, and 75mm. During each experimental run, the frequency of bubble formation was measured by means of a pressure pulse technique.

The bubble size ranged from 7 to 18mm. From the [mass%O]_T-time relation, the rate constant of inclusion removal, k_0 , was obtained. It is shown that k_0 increases with increasing Ar gas flow rate, V_g . The rate of inclusion removal increases with increasing gas-metal interfacial area. A mathematical model is developed to explain the experimental result. In the model, the inclusion particles are assumed to adhere to the gas bubble-metal interface during the bubble formation and ascent periods. The apparent mass transfer coefficient, k_m , for inclusion removal obtained experimentally is independent of the gas flow rate and the crucible diameter. Thus, it is considered that the inclusion particles are removed from the melt mainly through adhesion to the gas bubble-metal interface.

Key words : inclusion ; deoxidation ; gas injection ; bubble ; steelmaking.

1. 緒言

近年、製鋼分野においては溶鋼へのガス吹込み攪拌が多く行われており、溶鋼内の混合および精錬反応の促進が図られている。鋼の脱酸過程に関しては、脱酸生成物である酸化物系介在物の除去が重要な課題となっている。ガス吹込み攪拌下におけるメタルからの介在物除去機構は、メタル中の介在物の凝集成長、浮上によるスラグへの除去、気泡への付着によるスラグへの除去、耐火物への付着による除去などが考えられるが、メタル中介在物の挙動の複雑さからいまだ十分解明されていない。これまでに介在物除去モデルとして、介在物の凝集成長を考慮したスラグへの除去モデル¹⁾、耐火物壁面への付着除去モデル²⁾などが提案されている。また、Levichの理論³⁾に基づいた気泡への介在物の付着分離に関する研究⁴⁾⁵⁾も行われている。潘ら⁶⁾は、気泡による溶鋼中介在物の付着分離に関する水モデル実験を行い、比較的大きな粒子の気泡への付着過程を直接観察することにより、粒子の気泡への付着速度におよぼす水-粒子間の接触角、粒子径および粒子密度の影響を調べた。また、液体中粒子の気泡への物質移動係数を粒子径、気泡径および粒子密度の関数として表し、乱流衝突項と慣性衝突項に実

験的に分離した。

本研究では、前報⁷⁾により介在物除去の高温モデル実験系として確立したスラグ-溶銅系を用いて、Arガス吹込み攪拌条件下において、SiO₂介在物のメタル相からの除去実験を行い、介在物除去速度に及ぼすガス吹込み攪拌の影響を調べた。実験結果を解析することにより、介在物の気泡-メタル界面への付着を考慮した数学モデルを構築し、メタル相からの介在物除去機構を説明した。

2. 実験装置と方法

2・1 実験装置

実験装置の概略をFig. 1に示す。実験には12kWのSiC抵抗炉を用いた。ムライト製の反応管(145φ×130φ×740mm)内の均熱部にアルミナるつぼ(内径30~75mm, 高さ100mm)を設置した。測温はるつぼ底部に接触させたPt-Pt・13%Rh熱電対により行った。るつぼ底の中心部には外径3mm, 内径1mmのムライト製ノズル管(長さ400mm)を、その先端をるつぼ底部から5mm突き出るように取り付けた。ノズル管の下端と送気管の間に圧力変換器を取り付け、ノズルからの気泡生成に伴って、配管内に発生する圧力変動を電

平成5年7月5日受付 平成5年11月12日受理 (Received on July 5, 1993; Accepted on Nov. 12, 1993)

* 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

* 2 名古屋大学大学院生 (現: 川崎重工業(株)) (Graduate Student, Nagoya University, now Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

* 3 名古屋大学工学部 (現: NKK) (Faculty of Engineering, Nagoya University, now NKK Corporation)

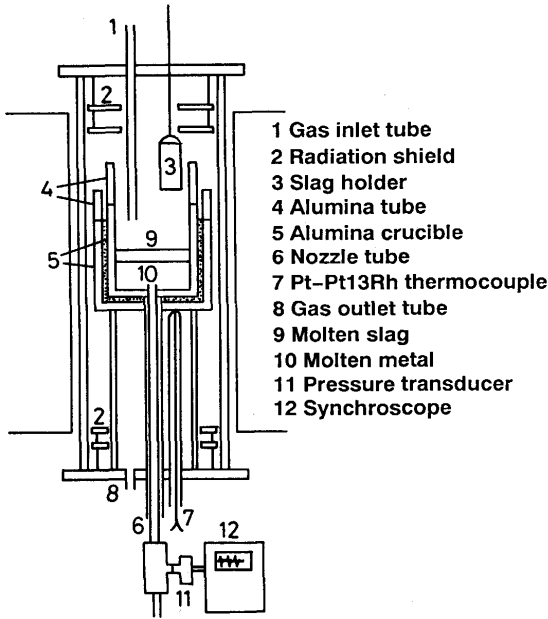


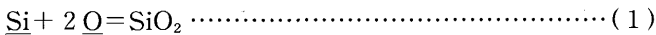
Fig. 1. Experimental apparatus.

圧に変換して測定することにより (圧力パルス法⁸⁾), 気泡生成頻度を測定した。また, 吹込みガスの流量はマスフローコントローラにより設定した。

2.2 実験方法

実験に用いたメタルはCu (0.2~1.3kg), スラグは28mass%Li₂O-58mass%SiO₂-14mass%Al₂O₃の組成の合成スラグ (0.025~0.15kg) である。脱酸剤はCu-30mass%Si合金である。これらは前報⁷⁾と同様にして調製した。実験温度は1523Kである。

Ar雰囲気下 (Arガス流量は1523K, 1.013×10⁵Paで74.4 cm³/s) であるつばに所定量のCuを溶解した後, 0.117mass%Oとなるようにメタル中に酸化銅を添加し, 1800sArガスを吹込み, 攪拌した。このときの吹込みガス流量は5 cm³/sである。ここで, 本研究ではガス流量は1523K, 1.013×10⁵Paに換算した値を示す。その後, Cu-30mass%Si合金をメタル中に添加し30s間攪拌して, (1)式によりメタル中にSiO₂介在物を生成させた。



スラグを溶銅上に添加, 溶解させた後, メタル試料を石英管で採取し, ただちにArガスをメタル中に吹込み, 攪拌を開始した。この時を実験開始時間とした。実験条件として吹込みArガス流量V_gを3~60cm³/s, りつば内径d_cを30~75mm, メタル深さh_Mを20~50mmと変化させた。実験中, 適当な時間間隔で溶銅試料を採取し分析に供した。分析は全酸素については不活性ガス融解・電量滴定法および非分散赤外線吸収法, Siについてはモリブデンブルー吸光度法により行った。一部の試料については, 光学顕微鏡を用いて介在物の粒径分布を調べた。また, 実験中, 適宜, 気泡生成頻度の測定も行った。

3. 実験結果と考察

3.1 生成気泡の球相当直径と吹込みガス流量の関係

気泡生成頻度fと吹込みArガス流量V_gから, (2)式により気泡の球相当直径d_Bを求めた。

$$d_B = \left(\frac{6 V_g}{\pi f} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 2 にd_BとV_gの関係を示す。なお, fは本実験のV_gの範囲では13~30s⁻¹であった。ただし, d_Bの実測値はt=3600sにおけるfから計算した値である。図中に実線でSano *et al.*⁸⁾の(3)式によるd_Bの計算値を示した。

$$d_B = \left\{ \left(\frac{6 \sigma d_{n0}}{\rho g} \right)^2 + 0.0242 (V_g^2 d_{n0})^{0.867} \right\}^{1/6} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, d_{n0}はノズル外径, gは重力加速度である。メタルの表面張力σおよび密度ρはCu中酸素およびSiの濃度が低いので純銅についての値をとり, それぞれ1523Kにおいてσ=1.32 N/m⁹⁾, ρ=7800kg/m^{3 10)}である。実測値は(3)式による計算値よりもわずかに大きく, 本実験のV_gの範囲ではd_Bは7~18mmであることがわかる。なお, d_Bが時間経過とともに減少する傾向がみられた実験もあった。本実験では, メタル中 介在物量が経時変化しているため, 介在物が気泡生成に何らかの影響を与えていると推察されるが, 現時点ではd_Bの経時変化の理由についての詳細は不明である。

3.2 メタル中全酸素濃度の経時変化

Fig. 3 にメタル中全酸素濃度[mass%O]_Tの経時変化の一例を示す。図には時間の経過に伴う[mass%O]_Tの減少の傾向が示されている。また, [mass%O]_Tの減少速度は吹込みガス流量V_gの増加に伴って増大している。本研究では, [mass%O]_Tはt=0sにおいて0.003~0.008mass%からt=3600sにおいて0.0001~0.0004mass%と酸素分析装置の測定限界程度の低い値まで減少した。なお, メタル中Si濃度は0.02~0.08mass%の範囲で実験中はほぼ一定の値であったことから, 実験中は新たなSiO₂介在物の生成反応は進行していないと考えられた。Hendryら¹¹⁾の平衡濃度積データを外挿して求めた平衡酸素濃度[mass%O]_eは0.0002~0.0003

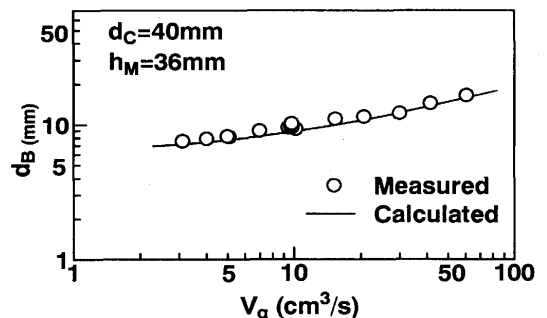


Fig. 2. Relation between bubble diameter, d_B, and gas flow rate, V_g.

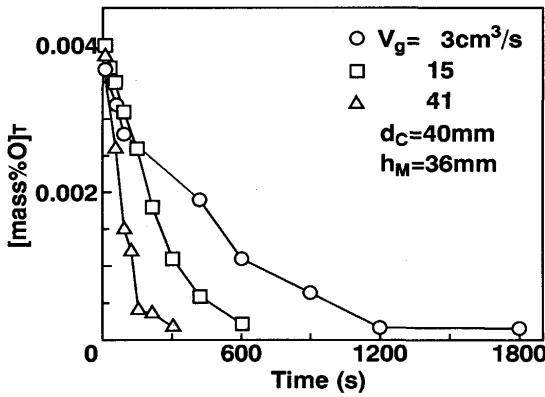


Fig. 3. Typical changes in [mass%O]_T with time.

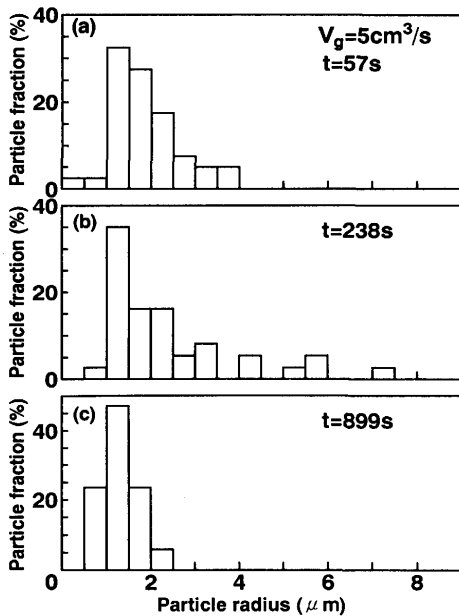


Fig. 4. Apparent size distributions of inclusions.

mass%であるが、スラグ中のSiO₂活量は0.0298¹²⁾であるので、[mass%O]_eはさらに小さいと考えられる。また、メタル中介在物の観察によれば、t = 3600sの試料中にも介在物が存在した。以上のことから、[mass%O]_T > 0.0005の範囲では[mass%O]_Tの経時変化をそのままメタル中SiO₂介在物量の経時変化に対応させてよいと考えられる。

3.3 メタル中介在物の顕微鏡観察

前報⁷⁾と同様に、採取メタル試料中の介在物の光学顕微鏡観察(×400)を行った。メタル中SiO₂介在物は球形であった。また、画像解析の手法を用いて介在物粒径分布の経時変化を調べた。Fig. 4に介在物の粒径分布の一例を示す。SiO₂介在物の粒子半径は7.5μm以下である。t = 57sと238sの粒径分布から、時間経過とともに粒径分布の幅の広がりがみられ、一方、時間がかかり経過したt = 899sの試料では、比較的粒子径の大きい介在物の割合が減少していることがわかる。

3.4 一次速度式による実験結果の整理

メタル中全酸素濃度 [mass%O]_Tの経時変化を一次速度

式で整理した。

$$-\frac{d[\text{mass}\%O]_T}{dt} = k_o [\text{mass}\%O]_T \dots\dots\dots (4)$$

ここで、k_oは介在物除去速度定数である。

Fig. 5に[mass%O]_Tの対数と時間の関係の一例を示す。直線の傾きは吹込みガス流量とともに増加する。この直線の傾きからk_oを求めた。

Fig. 6にk_oと吹込みガス流量V_gの関係を示す。各るつぼ径においてV_gの増加に伴いk_oが増大する傾向がある。Fig. 7にメタル深さh_M = 36mmの実験について、k_oとるつぼ径d_cの関係を示す。各ガス流量においてk_oはd_cの-2乗に比例することが明らかである。Fig. 8にk_oと吹込み深さh₁との関係を示す。V_gとd_cがそれぞれ10cm³/s、40mmの場合の実験結果である。ここで、h₁はノズル先端からスラグ-メタル界面までの距離である。本実験条件下においては、k_oはh₁に依存しないことがわかる。

ガス吹込み攪拌の場合、メタル中介在物の除去が進行する界面として、スラグ-メタル界面、るつぼ-メタル界面に加えて、気泡-メタル界面が考えられる。以下では介在物除去速度に対する吹込み気泡の表面の寄与について、数

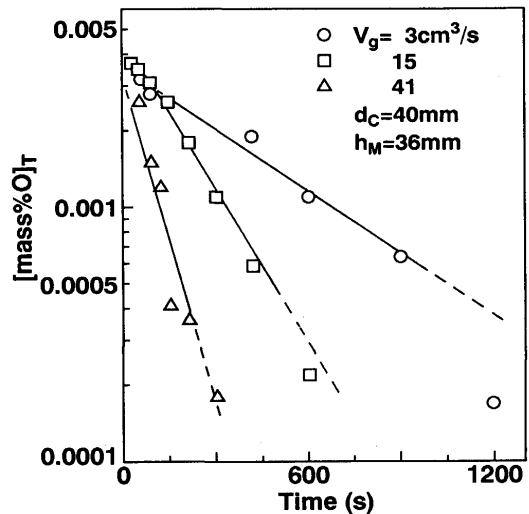


Fig. 5. Typical changes in log[mass%O]_T with time for various gas flow rate, V_g.

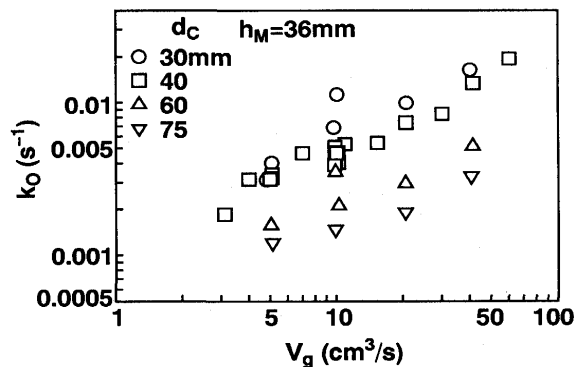


Fig. 6. Relation between rate constant of inclusion removal, k_o, and V_g.

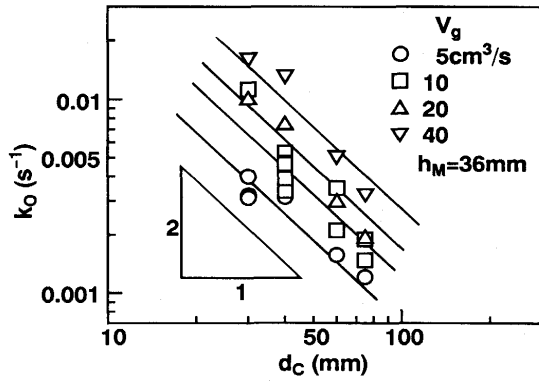


Fig. 7. Relation between k_o and crucible diameter, d_c .

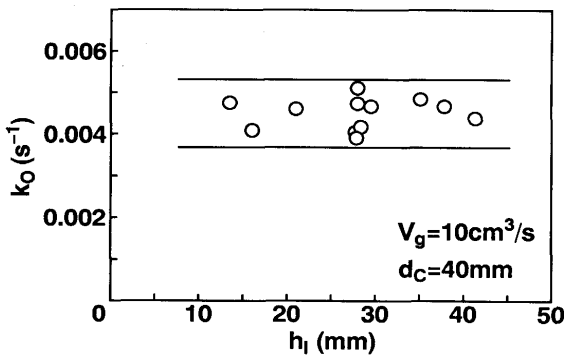


Fig. 8. Relation between k_o and injection depth, h_i .

学モデルにより検討する。

3.5 数学モデルによる介在物除去速度の検討

ガス吹込み攪拌の場合、メタル中介在物粒子が吹込みガス気泡に付着してスラグ-メタル界面まで運ばれ、そこでスラグ相へ除去されると仮定する。

メタル中を上昇する1個の気泡に着目し、気泡-メタル間反応との相似を仮定して、気泡への介在物付着速度を気泡に付着する介在物中の酸素量を用いて(5)式で表す。

$$\frac{dn_o}{dt} = k_m A \left(\frac{\rho_l}{100M_o} \right) [\text{mass}\%O]_T \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 n_o は1個の気泡に付着する介在物中の酸素原子のモル数、 A は気泡-メタル界面積、 k_m はみかけのメタル側物質移動係数、 ρ_l はメタル密度、 M_o は酸素の原子量である。

気泡は近似的に球形であるとして、さらにメタル中を上昇する気泡の膨張を無視して気泡-メタル界面積 A を次式で表す。

$$A = 4 \pi r_B^2 \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 r_B は気泡の球相当半径である。

介在物の気泡への付着については、ノズル先端での気泡の生成・成長時における付着と、ノズルからの離脱後のメタル中上昇時の付着とを考慮する必要がある。

(1) 気泡の生成・成長時

1個の気泡に着目して、時間0～ t の間に吹込まれるガ

ス気泡の体積は(7)式で表される。

$$\left(\frac{4}{3} \right) \pi r_B^3 = V_g \cdot t \quad \dots\dots (7)$$

$V_g = \text{const.}$ として(7)式を t について微分すると、気泡の成長速度 dr_B/dt は(8)式で表される。

$$dr_B/dt = V_g / (4 \pi r_B^2) \quad \dots\dots (8)$$

(8)式と(5)式から(9)式が得られる。

$$\frac{V_g}{4 \pi r_B^2} \frac{dn_o}{dr_B} = k_{m1} A \left(\frac{\rho_l}{100M_o} \right) [\text{mass}\%O]_T \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 k_{m1} は生成・成長時の気泡のまわりにおける介在物のみかけのメタル側物質移動係数である。

気泡半径 $r_B = 0$ から $r_B = d_B/2$ (d_B は離脱気泡の球相当直径)までの積分範囲で(9)式を積分すれば(10)式が得られる。

$$n_o = \frac{\pi^2 d_B^5 k_{m1}}{10 V_g} \left(\frac{\rho_l}{100M_o} \right) [\text{mass}\%O]_T \quad \dots\dots (10)$$

なお、 $[\text{mass}\%O]_T$ は1個の気泡の生成・成長時には一定に保たれるとした。時間 dt の間にメタル中に生成する気泡の数 $V_g \cdot dt / (\pi d_B^3 / 6)$ と(10)式との積をとれば、 dt の間にメタル相から除去される介在物に含まれる酸素量が得られる。したがって、気泡生成・成長時における気泡への介在物の付着によるメタル中の全酸素濃度の変化は(11)式で表される。

$$-\frac{d[\text{mass}\%O]_T}{dt} = \frac{3 \pi d_B^2}{5 V} k_{m1} [\text{mass}\%O]_T \quad \dots\dots (11)$$

ここで、 V はメタル体積である。

(2) 気泡の上昇時

ノズルを離脱した気泡がメタル中を上昇する速度 $v_B = dx/dt$ (x : ノズル先端から鉛直上方への距離)を用いると(5)式は(12)式のように書き直される。

$$v_B \frac{dn_o}{dx} = k_{m2} A \left(\frac{\rho_l}{100M_o} \right) [\text{mass}\%O]_T \quad \dots\dots (12)$$

ここで、 k_{m2} は上昇気泡のまわりにおける介在物のみかけのメタル側物質移動係数である。

1個の気泡が一定速度 v_B でノズル先端 $x = 0$ からメタル浴内をスラグ-メタル界面 $x = h_i$ まで上昇するときその気泡に付着する介在物に含まれる酸素原子のモル数は、(12)式を積分して(13)式により与えられる。

$$n_o = \frac{k_{m2} A}{v_B} \left(\frac{\rho_l}{100M_o} \right) [\text{mass}\%O]_T h_i \quad \dots\dots (13)$$

なお、 $[\text{mass}\%O]_T$ は1個の気泡の上昇時には一定に保たれるとした。時間 dt の間の生成気泡の数 $V_g \cdot dt / (\pi d_B^3 / 6)$ を

考慮し、(13)式からメタル中の全酸素濃度変化は(14)式のように表される。

$$-\frac{d[\text{mass}\%O]_T}{dt} = \frac{6 V_g k_{m2} h_l}{d_B V_B V} [\text{mass}\%O]_T \dots\dots (14)$$

したがって、(11)式と(14)式から、気泡の生成・成長時及びメタル中上昇時の介在物付着によるメタル中全酸素濃度変化は次式で与えられる。

$$-\frac{d[\text{mass}\%O]_T}{dt} = \left(\frac{3 \pi d_B^2 k_{m1}}{5 V} + \frac{6 V_g k_{m2} h_l}{d_B V_B V} \right) [\text{mass}\%O]_T \dots\dots (15)$$

(15)式と(4)式を比較すると、介在物除去速度定数 k_0 は(16)式のように表される。ただし、 k_{m1} と k_{m2} は等しいとして、 k_m で表した。

$$k_0 = \left(\frac{3 d_B^2}{5} + \frac{6 V_g h_l}{d_B V_B \pi} \right) \frac{4}{d_c^2 h_M} k_m \dots\dots (16)$$

ここで、 h_M はメタル深さである。(16)式に実験条件および実験より得られた k_0 の値を代入して k_m を求めることができる。ただし、 d_B は k_0 を求めた時間範囲内の平均値を用いた。このモデル計算において、メタル中気泡はノズル先端からスラグーメタル界面まで一定の自由上昇速度で上昇すると仮定して、

$$v_B = (0.5 d_B g)^{0.5} \dots\dots (17)$$

とした。

Fig. 9には k_m と V_g の関係を示す。各るつば径において k_m は V_g によらず $1.2 \sim 3.4 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の範囲内ではほぼ一定である。本研究の V_g の範囲では気泡径の変化は $d_B = 7 \sim 18 \text{mm}$ とそれほど大きくなかった。また、 d_B が大きくなれば、1個の上昇気泡周囲の液側での物質移動係数はほぼ一定であると考えられる。本研究では液体中の溶質元素の物質移動と同じ機構を粒径数 μm の介在物について仮定したが、本実験で求めたみかけの物質移動係数は、従来得られている溶質元素の物質移動係数にかなり近い値になっている。さらに、 k_m が V_g に依存しないことより、(16)式から k_0 が r ば径 d_c の -2 乗に比例することが説明できる。

Fig.10に k_m と吹込み深さ h_1 との関係を示す。○は、介在物の気泡への付着について、気泡の生成・成長時およびメタル中上昇時を考慮した場合の結果である。●は、気泡のメタル中上昇時のみを考慮した場合の結果で、(16)式の右辺第1項を無視して求めた k_m の値を示す。 h_1 が比較的小さい場合は、介在物除去速度に及ぼす気泡の生成・成長時の寄与が相対的に大きくなることから、本実験系では、気泡の生成・成長時および気泡上昇時の介在物の付着を考慮する必要があると考えられる。

ここで、Fig. 8に示したように、 k_0 が h_1 に依存しないこと

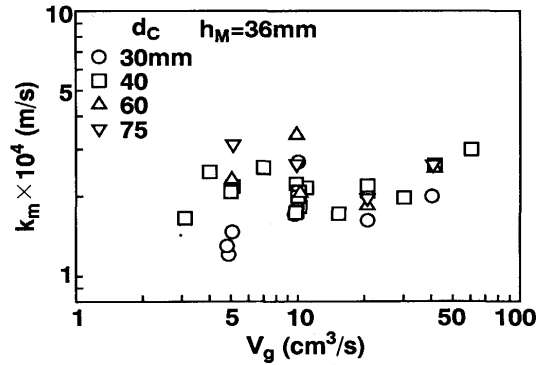


Fig. 9. Relation between apparent mass transfer coefficient, k_m , and V_g .

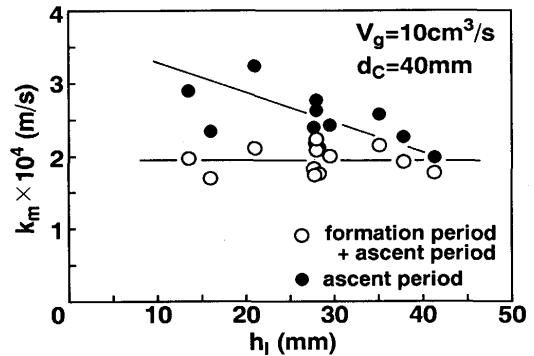


Fig. 10. Relation between k_m and h_1 .

は次のように説明できる。(16)式を次式のように変形する。

$$k_0 = \frac{24 V_g k_m}{d_B V_B d_c^2 \pi} \left(\frac{h_1 + \frac{d_B^3 v_B \pi}{10 V_g}}{h_M} \right) \dots\dots (18)$$

(18)式において右辺の括弧内の分数に着目する。メタル深さのみを変えた実験について、気泡径は $9.4 \sim 11.5 \text{mm}$ であり、大きく変わらない。また、メタル深さ h_M と吹込み深さ h_1 には $h_M = h_1 + 5 \text{ (mm)}$ という関係がある。(18)式右辺の括弧の値に気泡径、気泡上昇速度および吹込みガス流量を代入して計算すると、 $1.00 \sim 1.24$ となりメタル深さによらずほぼ一定値になった。したがって、 k_0 は k_m が一定であれば h_1 によらず一定値になるといえる。

吹込みガス流量 V_g の増加による気泡発生頻度の増大に伴って単位時間当りに生成する気泡ーメタル界面積が増加することから、 V_g の増加とともに気泡への介在物付着量が増え、介在物のスラグ相への除去速度が大きくなると推定できる。Fig.11は単位メタル体積中の気泡ーメタル界面積 S_B と速度定数 k_0 の関係を示したグラフである。なお、気泡生成時の付着の寄与がほぼ等しくなるように、気泡径およびメタル深さがほぼ等しい実験結果について整理した。 k_0 と S_B の関係は比例関係になることがわかる。なお、るつば径 d_c が大きくなり、 S_B が小さい場合の k_0 の値は、実線の値よりも大きくなった。これは、介在物除去速度に及ぼす気泡ーメタル界面の寄与に対して、スラグーメタル界面の寄与が無視

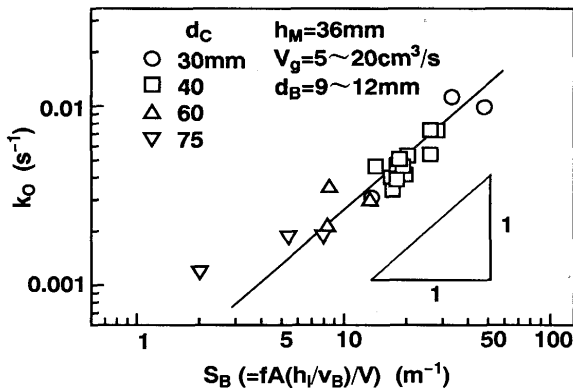


Fig. 11. Relation between k_o and bubble-metal interfacial area, S_B .

できなくなるためであると考えられる。

以上より、本実験における溶銅中の SiO_2 介在物の除去は、るつぼ径が大きく、ガス流量が小さい一部の実験を除けば、気泡への付着による介在物除去の数学モデルによりよく説明できることが明らかである。

3・6 攪拌方法と介在物除去速度の関係

前報⁷⁾において、機械的攪拌条件下における介在物除去機構として、介在物の凝集・合体が重要であると推定した。

介在物除去速度の攪拌方法による変化を調べるためには、同一の攪拌強度における実験結果について比較することが望ましい。しかし、前報では機械的攪拌の所要動力の定量的な評価を行わなかった。したがって、ここでは浴への攪拌動力の投入によって起こるメタル側界面近傍の乱流挙動を反映する液側物質移動に着目し、同一の物質移動係数を与える吹込みガス流量と攪拌回転速度における介在物除去実験の結果を比較する。森ら¹³⁾と平沢ら¹⁴⁾のスラグ-メタル間物質移動速度に関する研究結果によると、ガス吹込み流量 $5 \text{ cm}^3/\text{s}$ と攪拌回転速度 5.83 s^{-1} においてメタル中溶質の物質移動係数が同じ値になる。Fig.12にこれらの実験条件の全酸素濃度の経時変化を示す。機械的攪拌の場合に比べてガ

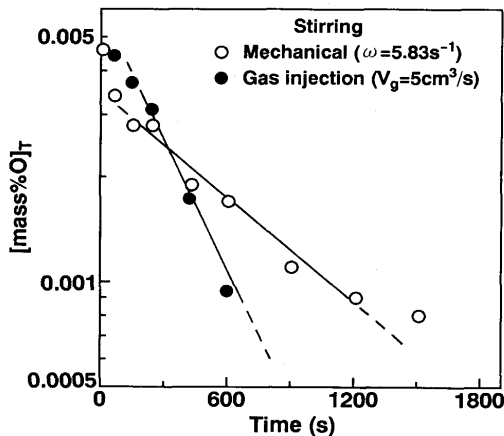


Fig. 12. Comparison of $\log[\text{mass}\%O]_T$ -time relation between mechanical stirring and gas injection stirring.

ス吹込み攪拌の方が介在物除去速度は非常に大きい。したがって、ガス吹込みによるメタル浴からの介在物除去速度はスラグ-メタル界面近傍の乱流状態によっては決定されないと考えられる。さらに、ガス吹込み攪拌条件下では、介在物の気泡-メタル界面への付着を仮定した数学モデルにより実験結果が合理的に説明できることから、介在物除去機構として気泡への付着が重要であることが確認できた。

4. 結言

- 1) 本研究の吹込みガス流量 V_g の範囲では気泡径の変化は $7 \sim 18 \text{ mm}$ とそれほど大きくない。
- 2) ガス吹込み攪拌下では、 V_g の増加に伴い介在物除去速度定数 k_o は増大する。
- 3) みかけの物質移動係数 k_m は V_g によらずほぼ一定であり、溶質元素の物質移動係数に定性的に一致する。
- 4) k_m と吹込み深さ h_i の関係から、気泡の生成・成長時および気泡上昇時の介在物の付着を考慮する必要があると考えられる。
- 5) k_o は単位メタル体積中の気泡-メタル界面積に比例する。
- 6) ガス吹込みによるメタル浴からの介在物除去速度はスラグ-メタル界面近傍の乱流状態の影響を受けない。
- 7) 以上より、ガス吹込み攪拌条件下では、介在物除去機構として気泡への付着が重要であると考えられる。

本研究の研究費の一部は文部省科学研究費奨励研究A(平成元年度) および日本鉄鋼協会より石原・浅田研究助成金(平成元年度)の交付を受けた。記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) U.Lindborg and K.Torssel: Trans. Metall. Soc. AIME, **242** (1968), p.94
- 2) T. A. Engh and N.Lindskog: Scand. J. Metall., **4** (1975), p.49
- 3) V.G.Levich: Physicochemical Hydrodynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1962), p.207
- 4) V. P.Nemchenko and S. I.Popel: Steel in the USSR, (1972), Oct., p.798
- 5) A.G.Szekely: Metall. Trans. B, **7** (1976), p.259
- 6) 潘 偉, 植村健一郎, 小山伸二: 鉄と鋼, **78** (1992), p.1361
- 7) 奥村圭二, 平澤政広, 佐野正道, 森 一美, 袴田成彦, 北澤 真: 鉄と鋼, **80** (1994), p.107
- 8) M.Sano and K.Mori: Trans. Japan Inst. Met., **17** (1976), p.344
- 9) K.Nogi, K.Ogino, A.McLean and W.A.Miller: Metall. Trans. B, **17** (1986), p.163
- 10) J.F.Elliott, M.Gleiser and V.Ramakrishna: Thermo-chemistry for Steelmaking, Vol. I, (1960), [Addison-Wesley]
- 11) A.Hendry and H.B.Bell: Trans. Inst. Min. Metall., **Sect.C.83** (1974), C.10
- 12) M.S.Bafghi, Y.Ito, S.Yamada and M.Sano: ISIJ Int., **32** (1992), p.1280
- 13) 森 一美, 平沢政広, 新貝 元, 圃中朝夫: 鉄と鋼, **71** (1985), p.1110
- 14) 平沢政広, 森 一美, 佐野正道, 圃中朝夫, 島谷祐司, 岡崎義光: 鉄と鋼, **73** (1987), p.1343