

論文

ガス吹込み攪拌下のスラグ-熔融金属間反応系
におけるメタル側物質移動の解析平沢 政広*・森 一美*²・佐野 正道*²
島谷 祐司*³・岡崎 義光*⁴The Analysis of Metal-side Mass-transfer in a Slag-Metal Reaction
System with Gas-injection StirringMasahiro HIRASAWA, Kazumi MORI, Masamichi SANO,
Yuhji SHIMATANI and Yoshimitsu OKAZAKI

Synopsis :

A theoretical analysis has been made on the metal-side mass-transfer in a slag-metal reaction system with gas-injection stirring. Considerations have been given of the fluid flow in the vicinity of the slag-metal interface. On the basis of a theory of turbulence phenomena, metal-side mass-transfer coefficients are derived as functions of gas-injection stirring conditions. The theoretical equations are rearranged to dimensionless correlation equations.

The mass-transfer data obtained by the authors for molten slag-Cu reaction system of Si oxidation by FeO at 1 250°C and the available data of model studies at low temperature (aqueous solution-amalgam system at room temperature and molten salt-molten Pb system at 450°C) are correlated successfully by the equations obtained in the present study. It is found that the dimensionless correlation equations obtained in the present study are applicable to the data of ladle desulfurization, as far as the rate is controlled by the mass-transfer in the metal phase.

Key words : slag-metal reaction ; mass transfer ; gas injection ; dimensionless correlation ; ladle metallurgy.

1. 緒 言

著者らは前報¹⁾において、ガス吹込み攪拌下の溶銅中 Si のスラグ中 FeO による酸化反応速度について研究し、メタル側 Si 物質移動係数とガス吹込み攪拌条件の関係を実験的に明らかにした。

本研究では前報で得られた実験結果に加えて更に若干の実験を追加し、これらの結果についてスラグ-熔融金属浴の流動状態を考慮した流体力学的な理論的考察を加えた。その結果、メタル側物質移動係数とガス吹込み攪拌条件の関係を無次元化した一般式によつて表し、これにより実験結果を統一的に整理することができたので報告する。

2. 理論的考察

2.1 攪拌動力とメタル側物質移動係数の関係

前報¹⁾の実験より、メタル側 Si の見かけの物質移動

係数 k_{Si}' と吹込みガス流量 V_g 及びメタル深さ h_M の関係において遷移ガス流量 V_g^* , V_g^{**} , 遷移メタル深さ h_M^* が存在し、これらの遷移条件を境にして、 k_{Si}' の V_g 及び h_M に対する依存性の変化することが明らかとなっている[†]。この内 k_{Si}' の V_g 依存性は、次の三つの領域に分類された。(i) 領域 I ($V_g < V_g^*$) : k_{Si}' が $V_g^{1/2}$ に比例して増加する。(ii) 領域 II ($V_g^* < V_g < V_g^{**}$) : k_{Si}' の V_g 依存性が小さい。(iii) 領域 III ($V_g > V_g^{**}$) : k_{Si}' の V_g 依存性が再び増大する。また、 k_{Si}' の h_M 依存性については、領域 I, II において、メタル深さが $h_M < h_M^*$ の場合に k_{Si}' が h_M とともに増大し、 $h_M > h_M^*$ では k_{Si}' が h_M によらず一定となった。領域 III の場合、前報で述べたように、実際の反応界面積の変化が見かけの k_{Si}' の変化に影響すると考えられるため、以下では見かけの k_{Si}' を近似的にメタル側の

† 以下、本研究では文献 1) を“前報”として引用する。また、前報で用いた記号、前報における実験データの分類(領域 I など)を本論文でも同様に用いる。

昭和 60 年 10 月・61 年 4 月本会講演大会にて発表 Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 27 (1987) 4 に掲載
昭和 61 年 9 月 18 日受付 (Received Sep. 18, 1986)

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

*² 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

*³ 名古屋大学大学院 (現: (株)不二越) (Graduate School, Nagoya University, Now Nachi-Fujikoshi Corp.)

*⁴ 名古屋大学大学院 (Graduate School, Nagoya University)

物質移動係数そのものとして取り扱うことのできる領域 I, II の場合に重点をおいて考察を進める。

スラグ-メタル間反応系における物質移動速度に及ぼすガス吹込みの影響を定量的に検討する場合、まず、ガス吹込みによつてスラグ-メタル浴に加えられる攪拌動力について検討する必要がある。本研究ではメタル側物質移動係数を検討の対象とするため、メタル相に加えられる攪拌動力に注目する。この攪拌動力 $\dot{\epsilon}$ はメタル・スラグ浴が浅い場合には近似的に次式で表される²⁾。

$$\dot{\epsilon} \doteq V_g g h_l \rho_M \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_g は浴温度、1 気圧に換算した吹込みガス流量、 g は重力加速度、 h_l はノズル先端からスラグ-メタル界面までの距離 (メタル吹込み深さ)、 ρ_M はメタル相の密度である。

(1) 式によれば、メタル相に加えられる攪拌動力がメタル吹込み深さ h_l に依存する。このため、前報の k_{Si}' と h_M の関係を再検討し、 k_{Si}' と h_l の関係として Fig. 1 に示した。ここで、ノズル先端とつば底の距離 0.5 cm から¹⁾、 $h_l = h_M - 0.5$ (cm) である。図から、 h_M^* に代わつて遷移メタル吹込み深さ h_l^* が得られる。また、図より、領域 I, II において、 $h_l < h_l^*$ の範囲では k_{Si}' が h_l の 1/2 乗に比例して増加し、 $h_l > h_l^*$ の範囲では k_{Si}' が一定の値をとること、および h_l^* は V_g の増大とともに減少することがわかる。

前報の Fig. 10 に示した $V_g < V_g^*$ の場合の $k_{Si}' \propto (V_g / d_c^2)^{1/2}$ の関係と、Fig. 1 の $h_l < h_l^*$ における $k_{Si}' \propto h_l^{1/2}$ の関係から、 $V_g < V_g^*$ かつ $h_l < h_l^*$ の範囲で、 k_{Si}' と $(V_g h_l / d_c^2)$ の関係を実験データにより調べた。Fig. 2 にその結果を示す。図より、 $k_{Si}' \propto (V_g h_l / d_c^2)^{1/2}$ の関係が成り立つことがわかり、この場合、 $k_{Si}' \propto (\dot{\epsilon} / A)^{1/2}$ (A : つば底断面積) が予想される。し

かし、 $V_g > V_g^*$ または $h_l > h_l^*$ の実験データはこの関係では表されないため、攪拌動力 $\dot{\epsilon}$ を単純にメタル側物質移動係数 k_{Si}' と結びつけるのではなく、スラグ、メタル相の流動と k_{Si}' の関係を検討することが必要であると考えられた。

2.2 スラグ-メタル浴の流動状態とメタル側物質移動係数の関係

2.2.1 スラグ深さの影響についての実験

前報では、 $V_g < V_g^*$ の領域で二つのスラグ深さについて実験し、 k_{Si}' の V_g 依存性の小さな領域 II におけるメタル側の k_{Si}' および遷移ガス流量 V_g^* がスラグ深さ h_{sl} によつて変化する傾向のあることが示された。そこで本研究では、新たに $h_{sl} = 1.2 \sim 2.0$ cm とスラグ深さを系統的に変化させて実験を行い、領域 II における k_{Si}' の h_{sl} 依存性について調べた。なおメタル深さは $h_l > h_l^*$ の条件である。Fig. 3 にその結果を示す。図中○は $d_c = 4$ cm, $V_g = 40$ cm³/s, $h_l = 3.1$ cm の場合、●は $d_c = 7.5$ cm, $V_g = 30$ cm³/s, $h_l = 4.5 \sim 5.5$ cm の場合の実験である。

図より、本研究の h_{sl} の範囲では、領域 II の範囲の V_g において k_{Si}' はスラグ深さ h_{sl} の増加とともに増大し、 $k_{Si}' \propto h_{sl}^{1/2}$ の関係を仮定することができる。

2.2.2 スラグ-メタル浴の流動

本研究の対象とするスラグ-メタル浴の場合、気泡の浮力による仕事のために、メタル相、スラグ相それぞれに Fig. 4 に模式的に示したように液の流動が生じると考えられる。ここで、前報で得た気泡径 $d_B = 0.7 \sim 1.4$ cm より、メタル相内の流動は乱流であると考えられる⁴⁾⁵⁾。一方、スラグ相内の流動については、本研究で対象とするスラグの粘度の推定値が約 0.4~1 Pa·s と大きいため¹⁶⁾¹⁷⁾、乱流が形成されているかどうかは現時点では明確でない⁴⁾⁵⁾。

メタル相内の乱流は、スラグ-メタル間界面張力が大

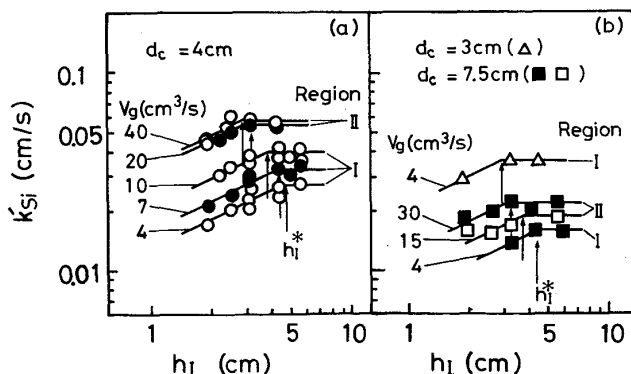


Fig. 1. Relation between apparent mass-transfer coefficient of Si, k_{Si}' , and injection depth of metal phase, h_l .

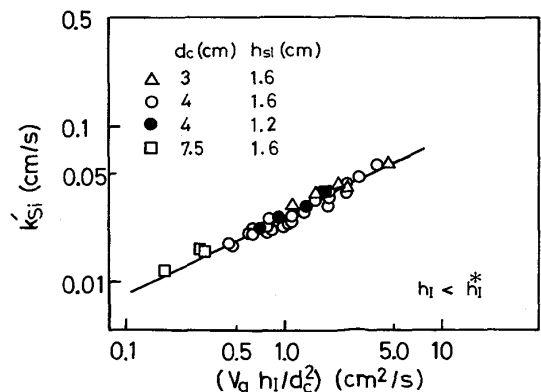


Fig. 2. Relation between k_{Si}' and $(V_g h_l / d_c^2)$.

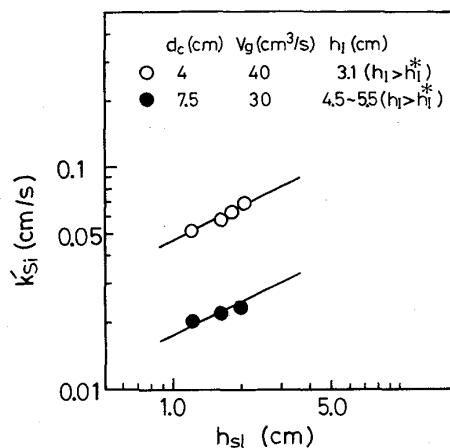


Fig. 3. Relation between k'_{Si} and slag depth, h_{sl} .

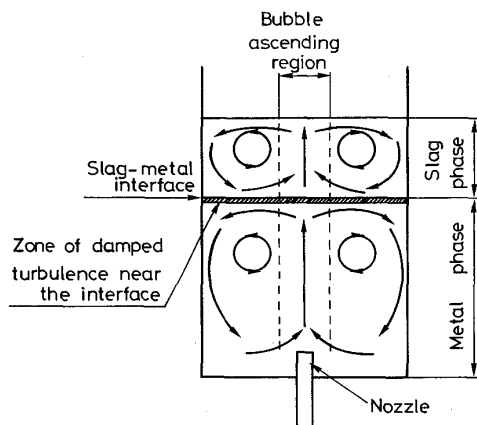


Fig. 4. Schematic representation of the flow patterns in a slag-metal bath.

きく、スラグ相の粘性が高いため、界面近傍では減衰され、Fig. 4 に示した“Zone of damped turbulence”⁶⁾が界面近傍のメタル側に形成されると推定される。この場合、“Zone of damped turbulence”内で界面近傍にメタル側物質移動について境膜を仮定できる。“Zone of damped turbulence”およびその中の境膜の厚さはメタル相の乱流の強化により減少する。一方、界面に近いところでは、メタル側とスラグ側の流動は図に示したように逆方向となり、スラグ相内の流速によつては、スラグ相バルクからスラグ-メタル界面への運動量移動によりメタル側界面近傍における乱流の減衰が強化され、“Zone of damped turbulence”およびメタル側境膜の厚さは増大する場合のあることも考えられる。

吹込みガス流量が小さく、スラグ相内の流速が粘性の差のためメタル相に比べ無視できるほど小さい場合、メタル側物質移動はスラグ側の影響を受けないと考えられる。領域 I ($V_g < V_g^*$) はこのような場合に相当すると

考えられる。

領域 II ($V_g^* < V_g < V_g^{**}$) では、前報で考察したように、 V_g の増加による攪拌の強化がそのままメタル側界面近傍における物質移動の促進に有効に現れていない。このような領域 II では、ガス吹込み流量の増加からのスラグ側の流動増加がスラグ-メタル界面近傍でのメタル相の乱流の減衰効果として現れ、そのことが k'_{Si} の V_g 依存性を小さくする一つの理由になつていていると考えられる。またこの場合、スラグ深さ h_{sl} が大きくなると、スラグ相内の流動範囲が拡大するため、スラグ-メタル界面を通してスラグ側からメタル側への運動量移動が減少し、メタル相の乱流を減衰させる効果が弱まり、結果的に k'_{Si} は h_{sl} が大きくなるほど増大すると推察される (Fig. 3)。

2.2.3 乱流理論の適用

前項の考察に従つてメタル相の乱流について理論的考察を行い、メタル側物質移動係数を数式的に表すことを検討する。ここでは、スラグ側の流動のメタル側物質移動に及ぼす影響が無視できる領域 I の $V_g < V_g^*$ の場合を考える。

Fig. 4 に示したように、攪拌によりメタル相内の流動が乱流となり、メタル側界面近傍に“Zone of damped turbulence”の形成が仮定できる場合、メタル側の物質移動係数 k_M を DAVIES⁶⁾ の理論を用いて (2) 式で表すことができる。

$$k_M^2 = \text{const.} \cdot \frac{D_M \rho_M v_0^3}{\sigma_e} \approx \text{const.} \cdot \frac{D_M \rho_M v_0^3}{\sigma} \quad \dots (2)$$

ここで、 D_M はメタル中溶質の拡散係数、 ρ_M はメタル密度、 v_0 はメタル側界面近傍における乱流の強さを表す代表速度¹²⁾である。 σ_e は、“Zone of damped turbulence”における渦運動の抑制に寄与するスラグ-メタル界面張力と重力による圧力の効果の和 (“Equivalent” interfacial (surface) tension⁶⁾) である。ここでは、スラグ-メタル系では界面張力 σ が大きいことから $\sigma_e \approx \sigma$ ととつた。

メタル相内の乱流は攪拌の動力の投入によつて生じ、この乱流によつて、メタル相内では運動エネルギーの熱エネルギーへの散逸が生じて投入された攪拌の動力が消費される。メタル相内の単位質量当たりの流体の運動エネルギーの散逸速度 P_M は (3) 式で表される⁶⁾。

$$P_M = (\bar{v}')^3 / l_e \approx v_0^3 / l_e \quad \dots (3)$$

ここで $\bar{v}'$ と l_e はそれぞれいわゆる “Energy containing eddies” の変動速度の rms 値 (すなわち実効値) 及び渦

¹²⁾ v_0 はせん断乱流の理論において一般に摩擦速度 (Friction velocity) と呼ばれる¹⁸⁾。

の大きさの平均値である。ROBERTSON と STAPLES⁷⁾ による水中へのガス吹込み時の浴内の乱流の熱線流速計による測定によれば、容器径、吹込みガス流量を一定とした場合に、浴深さが“浅い”（～2.5 cm）場合には、上昇流域における乱流は十分発達しておらず、乱流の強い領域は浴表面下の比較的表面に近い範囲に限られる。一方、浴深さがある程度“深く”なると（～6 cm）、上昇流域における乱流が十分発達し、乱流の強い領域が浴表面近くからかなり深くまで拡がるのがわかっている^{7,8)}。本研究におけるスラグ-溶銅系のメタル相についてもガス吹込みに伴う浴内の乱流の発達、乱流の強い領域について同様のことが考えられる。

メタル相内で乱流の強い領域は界面から厚さ L までのところにあると仮定し、この領域において主としてガス吹込みによりメタル相に加えられた攪拌動力 $\dot{\epsilon}$ の乱流による散逸がおこると考える。この時、 P_M は（4）式で表され、（4）式と（3）式より v_0 は（5）式で表される。

$$P_M \approx \frac{\dot{\epsilon}}{\rho_M(\pi/4)d_c^2 L} = \frac{V_g g h_I}{(\pi/4)d_c^2 L} \quad (4)$$

$$v_0 \approx \left[\frac{V_g g h_I}{(\pi/4)d_c^2} \cdot \frac{l_e}{L} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ROBERTSON と STAPLES⁷⁾ は、本研究と同様に DAVIES の理論を用いてメタル相の乱流について定性的な考察を行い、“Energy containing eddies” の大きさ l_e を $l_e = (16 \sigma / \Delta \rho g)^{1/2}$ と表している^{†3}。これは l_e が事実上スラグ、メタル相の物性値によって決まることを意味している。本研究では、物質移動をさらに定量的に深く考察するため、 l_e のガス吹込み条件による変化を考察する。

l_e は円管内乱流の場合管径に比例する⁶⁾。また、攪拌羽根を用いた攪拌槽における実験⁹⁾ では攪拌羽根の幅によつて決まることがわかっている。

メタル吹込み深さ h_I が“浅い”時、上昇流域における乱流が十分発達しないため、メタル相内の乱流は上昇流域における流れでなく、乱流の強い厚さ L の領域内での流れによつて代表させることが適当である。これから（6）式を仮定する。

$$l_e \propto L \quad (6)$$

（2）、（5）、（6）式より（7）式が得られる。

$$k_M \propto \left[\frac{D_M \rho_M}{\sigma} \cdot \frac{V_g g h_I}{(\pi/4)d_c^2} \right]^{1/2}$$

〔メタル相が“浅い”時〕……………（7）

メタル相が“深い”場合、上昇流域における乱流が十分発達するので、 l_e は上昇流域内の乱流を表す因子によ

つて代表され则认为られる。すなわち、 l_e は円管内の乱流の場合⁶⁾ との類推から次のように仮定する。

$$l_e \propto d_P Re^{-n} \approx d_B Re^{-n} \quad (8)$$

ここで d_P はメタル相の上昇流域直径を表し、前報の実験において吹込みガスが単一気泡となることから、 $d_P \approx d_B$ とおいた。 Re は $(4 V_g / \pi d_c^2)$ を代表速度に、 d_c を代表長さにとつたレイノルズ数である。 n はべき数である。また、メタル相が“深い”場合にはメタル相内の乱流の強い領域が拡大するので、

$$L \propto h_I \quad (9)$$

と仮定できる。（2）、（5）、（8）、（9）式より（10）式が得られる。

$$k_M \propto \left[\frac{D_M \rho_M}{\sigma} \cdot \frac{V_g g (d_B Re^{-n})}{(\pi/4)d_c^2} \right]^{1/2}$$

〔メタル相が“深い”時〕……………（10）

メタル相が“浅い”時に成立する（7）式は、メタル側の物質移動係数が $(V_g h_I / d_c^2)^{1/2}$ に比例することを表しており、Fig. 2 に示した $V_g < V_g^*$ （領域Ⅰ）、 $h_I < h_I^*$ の実験結果を定性的に説明する。一方、メタル相が“深い”時に成立する（10）式は、メタル側の物質移動係数が $(V_g / d_c^2)^{1/2}$ に比例し、 h_I に依存しないことを表しており、領域Ⅱ、 $h_I > h_I^*$ の実験結果の傾向を説明する。また、遷移メタル吹込み深さ h_I^* が Fig. 1 に示されたように V_g の増大に伴つて減少することは次のように考えられる。すなわち、 V_g の増大に伴い、メタル相全体に乱流流れが拡がつてゆき、そのため h_I が比較的小さい場合にも、 V_g が大きければメタル側の物質移動係数 k_M がメタル相が“深い”場合の（10）式によつて表わされるようになると考えられる。

3. 実験データの無次元項による整理

3.1 ガス流量域Ⅰ ($V_g < V_g^*$) の物質移動係数の無次元化

（7）式及び（10）式を無次元化し、種々の実験条件の下で得られた実験データを無次元項を用いて整理する。 k_M としてメタル側 Si の見掛けの物質移動係数 k_{Si} をとる。無次元項中の代表長さとしてるつば径 d_c 、代表速度としてるつば断面積当たりの吹込みガス流量 $[V_g / (\pi d_c^2 / 4)]$ をとれば（7）式から（11）式、（10）式から（12）式の無次元相関式が得られる。

（i）メタル相が“浅い”場合

$$Sh = C_1 \left[Pe \left(\frac{\rho_M g d_c^2}{\sigma} \right) \left(\frac{h_I}{d_c} \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

（ii）メタル相が“深い”場合

^{†3} $\Delta \rho$ はスラグ相とメタル相の密度差である。

$$Sh = C_2 \left[Pe \left(\frac{\rho_M g d_c^2}{\sigma} \right) \left(\frac{d_B Re^{-n}}{d_c} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (12)$$

$$Sh = k_M d_c / D_M, \quad Pe = (4 V_g / \pi d_c^2) d_c / D_M,$$

$$Re = (4 V_g / \pi d_c^2) d_c / \nu_M$$

ここで Sh はシャーウッド数, Pe はペクレ数, ν_M はメタルの動粘度, C_1, C_2 は定数である。

3.2 遷移メタル吹込み深さ h_I^* の検討

(11) 式と (12) 式の Sh を等しいとおくことにより, メタル相が“浅い”状態から“深い”状態に遷移するメタル吹込み深さ h_I^* について, (13) 式の関係の成立することが予想される。

$$(h_I^* / d_B) \propto Re^{-n} \dots \dots \dots (13)$$

(13) 式は $V_g < V_g^*$ の領域 I についての (11), (12) 式から予想される関係であるが, Fig. 1 に示されているように k_{Si}' と h_I の関係が領域 I, II にかかわらず定性的に同じ傾向を示すことから見て, (13) 式が領域 II についても成り立つと仮定し, 領域 I, II を含めて (13) 式を実験データに適用した。Fig. 5 はその結果で (h_I^* / d_B) の測定値と Re の関係を示す。

図より (13) 式で予想されたとおり, 近似的に領域 I, II を含めて (h_I^* / d_B) と Re の間には相関が認められ, $n \approx 1/3$ が得られた。これから, (14) 式が得られる。

$$(h_I^* / d_c) \propto (d_B Re^{-1/3} / d_c) \dots \dots \dots (14)$$

前報で述べた種々のメタル深さの条件下の実験から (14) 式に則った $(h_I / d_c) - (d_B Re^{-1/3} / d_c)$ の関係を求め Fig. 6 に示した。図中●が $h_I = h_I^*$ の実験結果である。また, 図中に 2.2.3 で言及した ROBERTSON と STAPLES の水浴を用いた実験⁷⁾ における条件を△ (“浅い” 場合), ▲ (“深い” 場合) で示した。水中で生成する気泡の d_B は計算式¹⁰⁾ により求めた。図より, メタル深さの遷移点 h_I^* についての相関式 (14) 式は, 著者らの溶銅モデル実験と ROBERTSON らの水モデル実験を含めて, 実験結果をよく表していることがわかる。

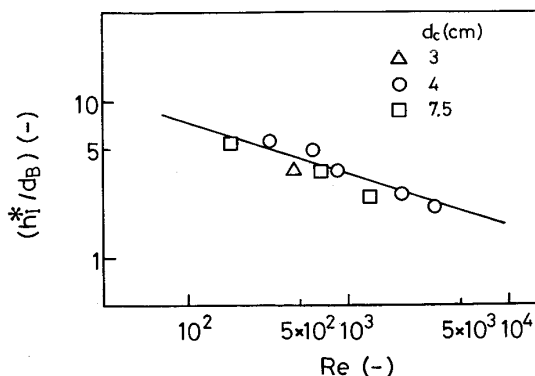


Fig. 5. Relation between (h_I^* / d_B) and Re .

3.3 ガス流量域 I ($V_g < V_g^*$) のデータの整理

ガス流量 $V_g < V_g^*$ の領域 I の実験データを, メタル相が“浅い” ($h_I < h_I^*$) 場合については (11) 式を, メタル相が“深い” ($h_I > h_I^*$) 場合については (12) 式 ($n = 1/3$) を用いて整理した。ここで, $D_{Si} = 6.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ とした¹¹⁾。また界面張力 σ は ANTONOV の規則により $\sigma = |\sigma_M - \sigma_S| = 930 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ とし, これに $\pm 30\%$ の誤差を見込んだ。ここで σ_M, σ_S はそれぞれメタル, スラッグの表面張力で, $\sigma_M = 1320 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ¹²⁾, $\sigma_S = 390 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ (“Surface tension factor”¹³⁾ を用いた計算値) の値を用いた。なお, 従来のスラッグ-メタル系の σ の実測値を検討した結果, 多くの場合 $\pm 30\%$ の誤差範囲で ANTONOV の規則による計算値を σ の代表値として用いることができると考えられた。

Fig. 7 に $h_I < h_I^*$ の範囲の実験データを, Fig. 8 に $h_I > h_I^*$ の範囲の実験データをそれぞれ (11) 式, (12) 式によつて整理した結果を示す。図中の○が本研究のスラッグ-Cu 系のデータである。図より, 実験結果は V_g, d_c, h_I によらず (11) 式 ($C_1 = 1.0$) または (12) 式 ($C_2 = 6.0, n = 1/3$) によつてよく整理されることがわかる。なお図中の破線は σ の誤差範囲を表す。

Fig. 7, 8 中には, また, 水溶液-アマルガム系⁷⁾⁸⁾¹⁴⁾, 溶融塩-鉛系³⁾⁸⁾ を用いた RICHARDSON, ROBERTSON らの低温のモデル実験から得られたメタル側物質移動係数のデータを整理して示した。いずれのデータも $k_M \propto V_g^{1/2}$ であるため, 領域 I に分類した。更に, h_I について, Fig. 6 に従つて $h_I < h_I^*$ か $h_I > h_I^*$ かを分類した。 h_I についての分類は RICHARDSON らの “High depth”, “Low

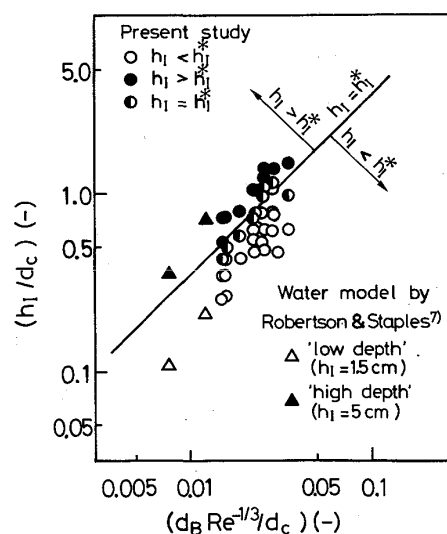


Fig. 6. Transitional injection depth of metal phase, h_I^* , represented by the relation between (h_I / d_c) and $(d_B Re^{-1/3} / d_c)$.

depth” の分類⁸⁾と一致した。なお、 d_B は実験式¹⁰⁾により計算して求めた。

Fig. 7, 8 より、高温のスラグ-溶銅系のデータと低温のモデル実験のデータが、実験温度、物性値が異なるにもかかわらず、(11), (12) 式によつて統一的に整理されることがわかる。このことから、本研究における乱流理論を基礎とした理論的検討の妥当性が示され、(11), (12) 式は $k_M \propto V_g^{1/2}$ の関係の成り立つ場合に一般的に成立する関係であると考えられる。

3.4 ガス流量域 II ($V_g^* < V_g < V_g^{**}$) のデータの整理

k_{Si}' の V_g 依存性の小さい $V_g^* < V_g < V_g^{**}$ の領域 II におけるメタル側の物質移動を詳細に検討するためには、スラグ相の粘性などの物性値の異なる実験データを

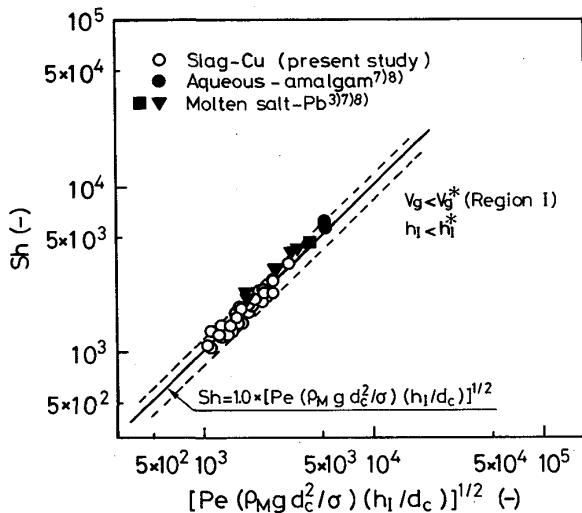


Fig. 7. Dimensionless correlation of mass-transfer data at $V_g < V_g^*$ and $h_l < h_l^*$.

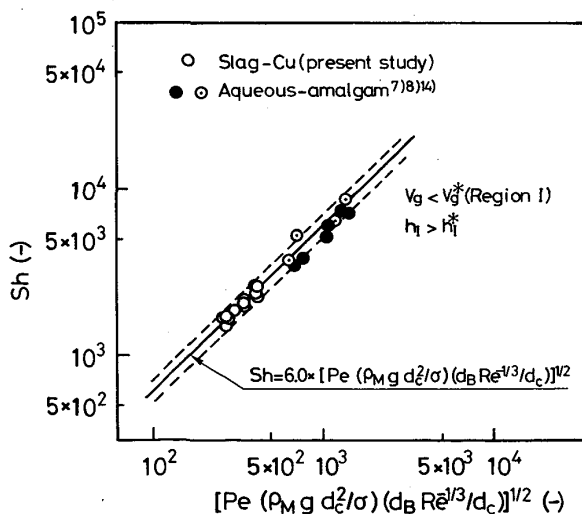


Fig. 8. Dimensionless correlation of mass-transfer data at $V_g < V_g^*$ and $h_l > h_l^*$.

比較することが重要であると考えられる。しかしながら、この領域の存在は本研究によつて初めて見出されたものであり、スラグの物性値を変化させた実験データがないため現時点では詳細な検討が困難である。このため、ここでは領域 I についての無次元式から類推される無次元項をはじめから与え、これにより実験データの整理を行う。

メタル深さの分類は Fig. 6 により行う。また、スラグ深さの影響については Fig. 3 より $k_{Si}' \propto h_{sl}^{1/2}$ が成り立つので、この点を考慮し、また領域 I に対する (11), (12) 式を勘案して (15), (16) 式を仮定する。

$$Sh = C_3 \left[Pe^\alpha \left(\frac{\rho_M g d_c^2}{\sigma} \right)^\beta \left(\frac{h_l}{d_c} \right) \left(\frac{h_{sl}}{d_c} \right) \right]^{1/2}, \quad (h_l < h_l^*) \quad (15)$$

$$Sh = C_4 \left[Pe^\alpha \left(\frac{\rho_M g d_c^2}{\sigma} \right)^\beta \left(\frac{d_B Re^{-1/3}}{d_c} \right) \left(\frac{h_{sl}}{d_c} \right) \right]^{1/2}, \quad (h_l > h_l^*) \quad (16)$$

ここで、 C_3, C_4 は定数、また α, β はべき数である。

べき数 α, β について実験データを (15), (16) 式により最小二乗法を用いて整理し、 $\alpha = 0.425, \beta = 0.654$ の値を得た。

Fig. 9, 10 に、 $h_l < h_l^*, h_l > h_l^*$ の実験データをそれぞれ (15), (16) 式により整理した結果を示す。図より、 V_g, d_c, h_l, h_{sl} を変化させた実験データはよく整理されていると言える。ただし、Fig. 10 の $h_l > h_l^*$ の場合に、 $d_c = 3$ cm のるつば径の小さな場合のデータが幾分他のデータからはずれている。この場合、るつば径 $d_c = 3$ cm に対して気泡径が $d_B \approx 1$ cm 程度と比較的大きいため、るつば断面積に対する気泡分散領域の割合が大きくなり、スラグ-メタル浴の流動に、よりるつば径の大きい場合とは何か現象的に異なる面が現れているものと考えられる。

Fig. 9, 10 より (15), (16) 式の C_3, C_4 は $C_3 = 1.0 \times 10^2, C_4 = 6.0 \times 10^2$ となる。この定数はスラグの物性値の影響により本研究のスラグ-溶銅系以外の反応系では変化することが考えられるが、この点は現時点では明らかでない。

3.5 遷移ガス流量 V_g^*, V_g^{**} の検討

3.5.1 V_g^* について

領域 I と II で成立する (11), (12), (15), (16) 式の無次元相関式を比較することにより、遷移ガス流量 V_g^* のるつば径及びスラグ深さによる変化を無次元化した形で数式表示することができる。

$V_g = V_g^*$ のときのペクレ数を遷移ペクレ数 $Pe^* = [(4V_g^* / \pi d_c^2) \cdot d_c / D_M]$ とすれば、メタル相が“浅い”

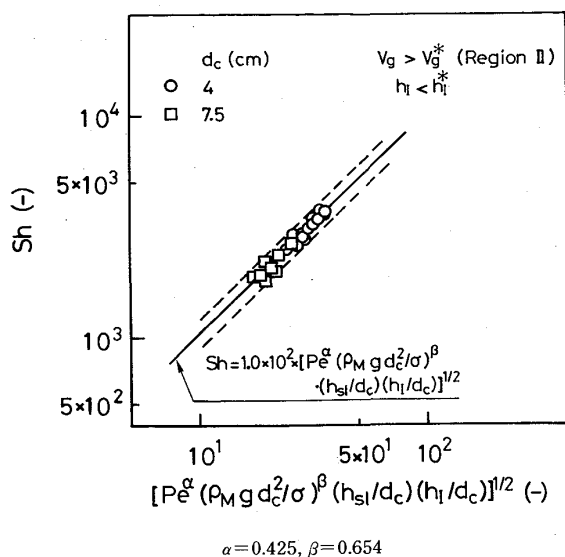


Fig. 9. Dimensionless correlation of mass-transfer data at $V_g > V_g^*$ and $h_l < h_l^*$.

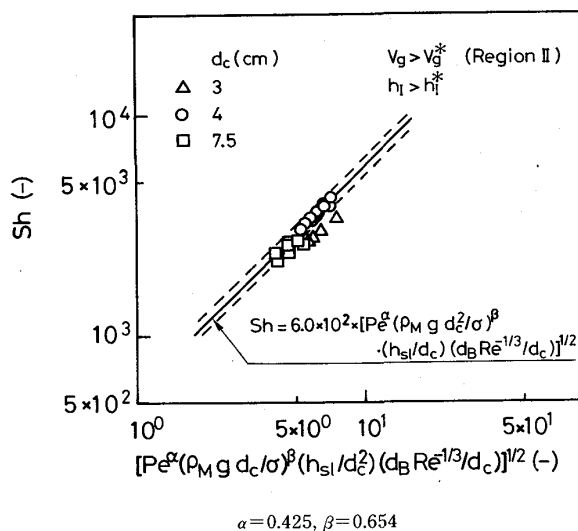


Fig. 10. Dimensionless correlation of mass-transfer data at $V_g > V_g^*$ and $h_l > h_l^*$.

場合の (11) 式と (15) 式, メタル相が“深い”場合の (12) 式と (16) 式の右辺をそれぞれ等しいとおくことにより (17) 式が得られる。

$$\left(\frac{h_{sl}}{d_c}\right) = 10^{-4} Pe^{*1-\alpha} \left(\frac{\rho_M g d_c^2}{\sigma}\right)^{(1-\beta)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし $\alpha = 0.425$, $\beta = 0.654$ である。(17) 式は V_g^* が d_c , h_{sl} によつて変化することを表している。

Fig. 11 は (17) 式の関係を実験結果と比較したものである。図中○, ●, □, △が実測点, 実線が (17) 式の計算を表す。図より, $d_c = 3$ cm の△を除き, (17) 式により遷移ガス流量 V_g^* のデータを整理できることがわかる。 $d_c = 3$ cm の場合には, 3・4 で述べたように, りつば径が小さいため, $d_c = 4, 7.5$ cm の場合と比べて

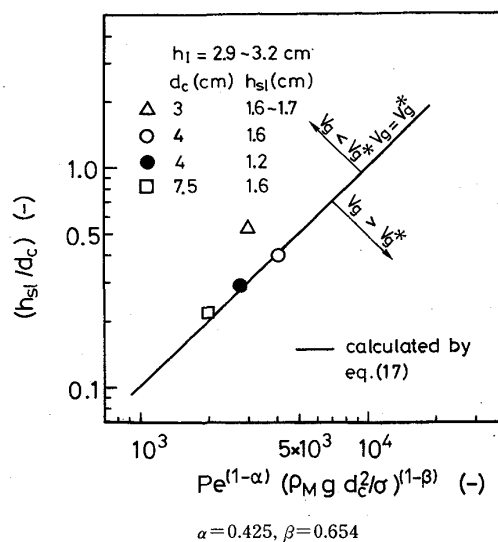


Fig. 11. Transitional gas flow rate, V_g^* , represented by the relation between (h_{sl}/d_c) and $Pe^{(1-\alpha)} (\rho_M g d_c^2 / \sigma)^{(1-\beta)}$.

現象的に異なる面があると思われる。

3・5・2 V_g^{**} について

Fig. 12 に前報の $h_l = 3.1 \sim 3.2$ cm 一定, $h_{sl} = 1.6 \sim 1.7$ cm 一定の条件の実験から得られた領域 II から III への遷移の V_g^{**} と りつば径の関係を示す。図より, V_g^{**} は りつば径 d_c によらず一定であることがわかる。これは, 吹込みガス流量 V_g の増大に伴うメタル相, スラグ相内の上昇流域における流速の増加そのものが界面の力学的不安定をもたらす主要な原因になっていることを示すと考えられる。しかし, 界面の力学的不安定条件と液滴 (スラグ滴, メタル滴) の生成条件及び生成量の関係は現時点では十分解明されていないので, $V_g > V_g^{**}$ の領域 III における k_{sl}' とガス吹込み攪拌条件の関係については今後検討する予定である。

3・6 無次元相関式のまとめと実操業データへの適用

以上の検討から, メタル側物質移動係数について遷移条件 (V_g^* , h_l^*) によつて分けられるガス流量, メタル深さの四つの範囲に対応する無次元相関式が得られた。Table 1 はこの無次元化式と適用範囲をまとめて示したものである。

RIBOUD と OLETTE¹⁵⁾ はガス攪拌下の取鋼脱硫のフランスにおけるデータを調査し, メタル側 S 物質移動係数 k_S について $k_S = \gamma (4 V_g D_S / \pi d_c^2)^{1/2}$ が成り立つことを報告している。ここで $\gamma = 500 \text{ m}^{-0.5}$ である。この値を本研究の結果から検討してみる。

上記の物質移動係数 k_S は $V_g^{1/2}$ に比例しているのが本研究の領域 I の場合の無次元相関式が用いられる。ただし, 実操業の条件が明確でないので, 仮に 250 t 取

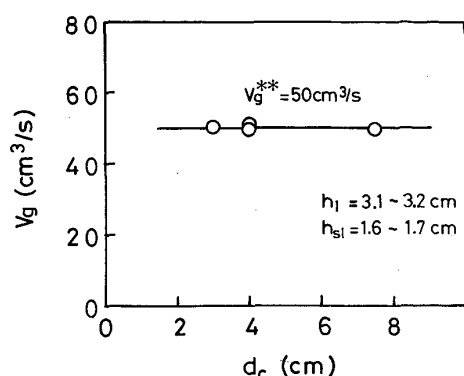


Fig. 12. Relation between the transitional gas flow rate V_g^{**} and d_c .

鋼の条件¹⁵⁾をとり, $V_g = 0.21 \text{ m}^3/\text{s}$ (1873 K, $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), $(\pi d_c^2/4) = 12.5 \text{ m}^2$, $h_M = 2.9 \text{ m}$ とする. また, $h_I = h_M$ ととり, $d_p = 0.37 h_M^{10)}$ とすれば Fig. 6 より $h_I > h_I^*$ となる. このような V_g , h_I についての条件の場合 γ は Table 1 より $\gamma = 6.0 \cdot (\rho_{Fe} g d_p Re^{-1/3}/\sigma)^{1/2}$ であり, $\rho_{Fe} \approx 7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu_{Fe} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\sigma \approx 1 \text{ N/m}$ (いずれも 1873 K) とすれば $\gamma \approx 300 \text{ m}^{-0.5}$ となり, 実操業データに近い値である. 本研究の無次元相関式は実操業の取鍋と比べて極めて小規模のモデル実験のデータから得られたものであるが, 上記の比較から本研究の結果は実際の精錬操作にも適用可能であると思われる.

4. 結 論

前報の溶銅-スラグ間 Si 酸化反応系を用いた実験から得られたメタル側物質移動係数とガス吹込み攪拌条件の関係について, 新たな実験データもいれて理論的考察を行った. 考察においては, スラグ-メタル界面近傍の流動状態を考慮して, メタル側物質移動係数とガス吹込み攪拌条件の関係を乱流理論を用いて表した. 得られた理論式から無次元相関式を導き, これにより実験データを整理して, 物質移動係数に対するガス吹込みの影響を明らかにした. 同時に, 無次元相関式の適用条件を示した. 本研究で得た無次元相関式により, 本研究のデータのみでなく, 従来の低温のモデル実験のデータも統一的に整理することができた. 更に, 本研究の検討結果は実際の精錬データにも適用可能であると考えられた.

本研究における流体力学の問題について名古屋大学航空学教室保原充教授に有益な御助言をいただき深く感謝申し上げます. なお, 本研究における実験データの整理に名古屋大学大型計算機センターを利用した. 本研究の研究費の一部は文部省科学研究費奨励研究 A (昭和 58, 60 年度) および日本鉄鋼協会より石原・浅田研究助成金

Table 1. Dimensionless correlation equations and transitional conditions obtained from the present study.

	$V_g < V_g^*$ (Region I)	$V_g^* < V_g < V_g^{**}$ (Region II)
$h_I < h_I^*$	$Sh = 1.0 \times [Pe(\rho_M g d_c^2/\sigma) \cdot (h_I/d_c)]^{1/2}$	$Sh = 1.0 \times 10^2 \times [Pe^g(\rho_M g d_c^2/\sigma)^\beta \cdot (h_I/d_c) (h_{sl}/d_c)]^{1/2}$
$h_I > h_I^*$	$Sh = 6.0 \times [Pe(\rho_M g d_c^2/\sigma) \cdot (d_B Re^{-1/3}/d_c)]^{1/2}$	$Sh = 6.0 \times 10^2 \times [Pe^g(\rho_M g d_c^2/\sigma)^\beta \cdot (d_B Re^{-1/3}/d_c) (h_{sl}/d_c)]^{1/2}$

$$\alpha = 0.425, \beta = 0.654$$

Transitional conditions

$$h_I^* : (h_I^*/d_c) = 36 \times (d_B Re^{-1/3}/d_c)$$

$$V_g^* : (h_{sl}/d_c) = 10^{-4} \times Pe^{*(1-\alpha)} (\rho_M g d_c^2/\sigma)^{(1-\beta)}$$

$$V_g^{**} : V_g^{**} = 50 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Sh = \frac{k_M d_c}{D_M}, \quad Pe = \frac{(4 V_g / \pi d_c^2) d_c}{D_M}, \quad Re = \frac{(4 V_g / \pi d_c^2) d_c}{\nu_M}$$

(昭和 57 年度) を受けた. 記して感謝の意を表す.

文 献

- 1) 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
- 2) 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2451
- 3) J. K. BRIMACOMBE and F. D. RICHARDSON: Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C, **82** (1973), C63
- 4) D. BHAGA and M. E. WEBER: J. Fluid Mech., **105** (1981), p. 61
- 5) 柘植秀樹: 気泡・液滴・分散工学 (化学工学協会編) (1982), p. 1 [樞書店]
- 6) J. T. DAVIES: Turbulence Phenomena (1972) [Academic Press]
- 7) D. G. C. ROBERTSON and B. B. STAPLES: Process Engineering of Pyrometallurgy, ed. by M. J. JONES (1974), p. 51 [The Institution of Mining and Metallurgy]
- 8) F. D. RICHARDSON, D. G. C. ROBERTSON and B. B. STAPLES: Proceedings Darken Conference on Physical Chemistry in Metallurgy (1976), p. 25 [United States Steel Corporation Research Laboratory]
- 9) H. G. SCHWARTZBERG and R. E. TREYBAL: I & EC Fundamentals, **7** (1968), p. 1
- 10) M. SANO and K. MORI: Trans. Jpn. Inst. Met., **17** (1976), p. 344
- 11) 平沢政広, 松浦正博, 森一美: 日本金属学会誌, **50** (1986), p. 796
- 12) K. NOGI, K. OGINO, A. MCLEAN and W. A. MILLER: Metall. Trans. B, **17** (1986), p. 163
- 13) R. E. BONI and G. DERGE: J. Met., **7** (1956), p. 53
- 14) W. F. PORTER, F. D. RICHARDSON and K. N. SUBRAMANIAN: Heat and Mass Transfer in Process Metallurgy, ed. by A. W. D. HILLS (1967), p. 79 [The Institution of Mining and Metallurgy]
- 15) P. V. RIBOUD and M. OLETTE: Proceedings of 7th ICVM (1982), p. 879 [The Iron and Steel Institute of Japan]
- 16) H. R. SHAW: Am. J. Sci., **272** (1972), p. 870
- 17) 溝口数一, 岡本一徳, 杉之原幸夫: 日本金属学会誌, **46** (1982), p. 1055
- 18) 小橋安次郎, 丸尾 孟: 乱流現象の科学 (巽友正編) (1986), p. 369 [東京大学出版会]