

© 1987 ISIJ

スラグ-溶融金属間反応速度に及ぼす
ガス吹込み攪拌の影響

論 文

平沢 政広*・森 一美*²・佐野 正道*²
圃中 朝夫*³・島谷 祐司*⁴・岡崎 義光*⁵Kinetic Studies on the Rate of Reaction between Molten Slag and Metal
with Gas-injection StirringMasahiro HIRASAWA, Kazumi MORI, Masamichi SANO,
Asao HATANAKA, Yuhji SHIMATANI and Yoshimitsu OKAZAKI

Synopsis :

Kinetic studies have been made on the rate of reaction between molten slag and metal with gas-injection stirring. The explored reaction is oxidation of Si in molten Cu by FeO in a $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}$ slag taking place under the condition of rate-controlling by Si transport in the metal phase. Kinetic experiments were done at 1250°C. The slag-metal bath was stirred by Ar gas injected through a nozzle located at the crucible bottom. The apparent metal-side mass-transfer coefficients of Si, k_{Si}' , are calculated from the kinetic data. Relations between k_{Si}' and experimental conditions (gas flow-rate, V_g ; metal depth, h_M ; slag depth, h_{sl} ; crucible diameter, d_c) have been investigated.

k_{Si}' is found to increase generally with increasing V_g . The dependence of k_{Si}' on the gas flow-rate varies at certain gas flow-rates denoted by V_g^* and V_g^{**} . In the low V_g range ($V_g < V_g^*$: Region I), k_{Si}' is proportional to $(V_g/d_c^2)^{1/2}$. In the medium V_g range ($V_g^* < V_g < V_g^{**}$: Region II), the effect of the increase in gas flow-rate on k_{Si}' is considerably smaller than in Region I. In the high V_g range ($V_g > V_g^{**}$: Region III), the extent of the increase in k_{Si}' with V_g increases again. It is also found that k_{Si}' increases with metal depth, h_M , below a transitional depth, h_M^* . Above the transitional metal depth h_M^* , k_{Si}' becomes independent of h_M . Examinations have been performed of the influence of slag depth, h_{sl} , on k_{Si}' in Regions I and II. In Region I, k_{Si}' is independent of h_{sl} . In Region II, k_{Si}' decreases with the decrease of slag depth.

Key words : slag-metal reaction ; mass transfer ; gas injection ; oxidation of silicon.

1. 緒 言

近年、溶銑予備処理、LD転炉製鋼、あるいは取鍋精錬などの精錬操作において、スラグ-溶鉄間反応の速度とガス吹込み攪拌の関係を定量的に明らかにすることが重要な課題となつている。この分野の基礎的な研究として、以前 RICHARDSON らによる水溶液-アマルガム系¹⁾³⁾⁴⁾、溶融塩-溶融鉛系²⁾⁴⁾などの低温のモデル系を用いた研究が行われ、また最近は実際の立場から有機溶媒-水系を用いたモデル実験⁵⁾が盛んに行われている。しかし、これらの低温における研究では、必ずしも系統的な攪拌

条件の選択をしておらず、また、用いたモデル反応系の物性値の相違から研究結果をスラグ-溶鉄系に適用するには検討すべき多くの課題が残されている。一方、高温のスラグ-溶鉄系を用いた研究には実験的に困難な点が多く、ガス攪拌条件の影響を明確な形で求めることは困難である。

著者らは、スラグ-溶鉄系に近い物性値をもつ高温のスラグ-溶銅系を用いたモデル実験を行うことを考え、そのための準備も兼ね、スラグ-溶銅系における溶銅中 Si とスラグ中 FeO との反応に関して物質移動の律速機構を研究した⁶⁾⁷⁾。本研究ではこの前報の結果をもとに

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：新日本製鉄(株)) (Graduate School, Nagoya University, Now Nippon Steel Corp.)

*⁴ 名古屋大学大学院 (現：(株)不二越) (Graduate School, Nagoya University, Now Nachi-Fujikoshi Corp.)

*⁵ 名古屋大学大学院 (Graduate School, Nagoya University)

して溶銅-スラグ系について、メタル側溶質成分の物質移動律速条件下において物質移動速度に及ぼすガス吹込み攪拌の影響について種々のガス攪拌条件下で実験を行った。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について新しい基礎的知見を得ることができたので報告する。

2. 実 験

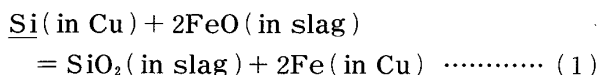
2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験には 13kW の SiC 抵抗炉を用いた。ムライト製の反応管 ($145\phi \times 130\phi \times 740$ mm) 内にアルミナ製のつばを置く。测温はるつば底部に挿入した Pt-Pt-Rh13 熱電対により行う。

るつば底の中心部には外径 3 mm, 内径 1 mm のムライト製ノズル管 (長さ 400 mm) を、その先端をるつば底部から 5 mm つき出させてとりつける。ノズル管の下端と送気管の間に圧力変換器をとりつけ、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する。また、吹込みガスの体積流量は、あらかじめ石けん膜流量計を用いて流量を検定してあるキャピラリー流量計によって測定した。

2.2 実験方法

本研究におけるスラグ-メタル間反応は (1) 式で表される⁶⁾。



実験に用いたメタルは Si 初濃度 ($[\% \text{Si}]_0$) 約 0.1%

の Cu-Si 合金である。スラグは、 $\text{Li}_2\text{O}28\% - \text{SiO}_258\% - \text{Al}_2\text{O}_314\%$ の組成の合成基本スラグに FeO 初濃度 ($(\% \text{FeO})_0$) が約 9% となるように FeO を添加したスラグである。使用したメタル、スラグ量は実験条件により異なり、メタル 130~2100 g, スラグ 24~160 g である。本研究のスラグ、メタル中溶質 (Si, FeO) 初濃度条件下では、(1) 式の反応はメタル側 Si の物質移動律速となることが前報⁶⁾⁷⁾ の研究により明らかとなっている。

所定量の Cu-Si 合金と $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系基本スラグをアルミナ製のつば中 Ar 雰囲気下、 1250°C において溶解し、FeO を添加して (1) 式の反応を行わせる。実験中一定流量の Ar ガスをノズルから吹込みスラグ-メタル浴を攪拌する。実験中石英管吸い上げにより適宜溶銅試料を採取し、化学分析に供して Cu 中 Si 濃度の経時変化を調べる。Cu 中 Si の分析方法は前報⁶⁾⁷⁾ と同様である。実験中適宜気泡生成頻度の測定を行う。

本研究では実験条件を以下のように変化させた。①吹込み Ar ガス流量 (V_g): $32 \sim 1100 \text{ Ncm}^3/\text{min}$, ②メタル深さ (h_M): $2.4 \sim 6.0 \text{ cm}$, ③るつば内径 (d_c): 3, 4 および 7.5 cm 。スラグ深さ (h_{sl}) は本研究では主として $1.6 \sim 1.7 \text{ cm}$ で一定としたが、一部 $h_{sl}=1.2 \text{ cm}$ とした実験も行った。

3. 実験結果と考察

3.1 気泡生成頻度と気泡の球相当直径

Photo 1, 2 にノズルからの気泡生成に伴い配管内に生じる圧力変動 (パルス) の測定結果の代表例を示す。吹込み Ar 流量 V_g は、 1250°C , 1 気圧に換算して、Photo. 1 では $V_g = 18 \text{ cm}^3/\text{s}$, Photo. 2 では $V_g = 91 \text{ cm}^3/\text{s}$ である。以下、本研究では特に断らない限り V_g は 1250°C , 1 気圧に換算した値を示す。最高のピーク

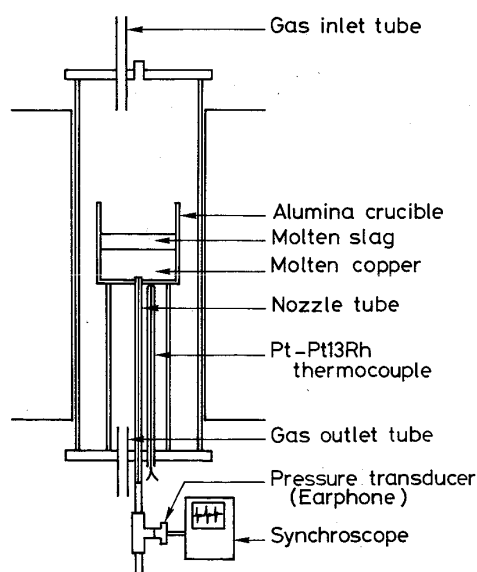


Fig. 1. Experimental apparatus.

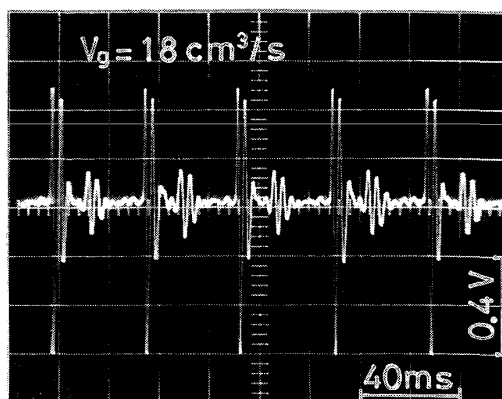


Photo. 1. Variation of pressure in gas supply train during bubble formation ($V_g=18 \text{ cm}^3/\text{s}$).

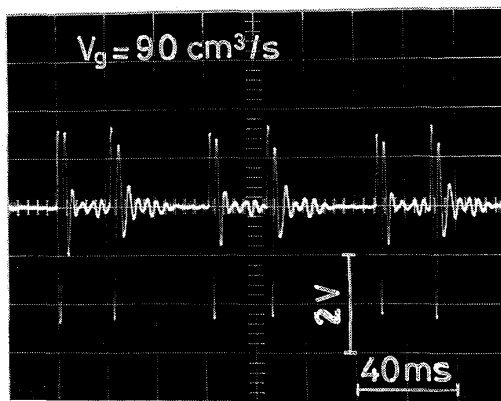


Photo. 2. Variation of pressure in gas supply train during bubble formation ($V_g = 90 \text{ cm}^3/\text{s}$).

間の間隔の測定により気泡生成時間及び気泡生成頻度を測定することができる。Photo. 1 の V_g が低い場合には圧力パルスの発生は規則的であり、ノズルから一定時間間隔で単一の気泡が生成していることがわかる。一方、Photo. 2 のように、 V_g が高い値になるとパルス間の時間間隔の短いものと長いものが交互に現れるようになる。この場合には、大小の気泡が“Pair” となつて生成する⁹⁾。本研究では $V_g > 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ では気泡の“Pair” 生成が顕著なため、気泡生成頻度は $V_g < 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で測定した。

気泡生成頻度 f_B はガス流量 $V_g = 3 \sim 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で V_g とともに増加し、 $f_B = 13 \sim 31 \text{ s}^{-1}$ であつた。気泡の球相当直径 d_B は f_B と V_g より (2) 式から求めた。

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

得られた d_B と V_g の関係を Fig. 2 に示す。図中に実線で SANO と MORI⁸⁾ の導出した (3) 式による計算値を示した。

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

d_{n0} : ノズル外径 (cm) g : 重力加速度 (cm/s^2)

ここで、金属の表面張力 σ および密度 ρ は Si 濃度が低いので純銅についての値¹⁰⁾¹¹⁾ をとり、それぞれ $\sigma = 1320 \text{ dyn/cm}$, $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ とした。図より、(3) 式による計算値は実測値とよく一致し、 d_B の実測値は $V_g = 3 \sim 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $d_B = 0.7 \sim 1.4 \text{ cm}$ であることがわかる。

ノズルから離脱した気泡が金属相を自由上昇速度 $v = (0.5 d_B g)^{1/2}$ で d_B だけ上昇するに要する時間は、 $d_B = 0.7 \sim 1.4 \text{ cm}$ の範囲では、 $0.04 \sim 0.05 \text{ s}$ である。一方、 f_B を求めた V_g の範囲では、気泡生成時間は $f_B^{-1} = 0.03 \sim 0.07 \text{ s}$ であるため、ノズルから離脱した気泡は

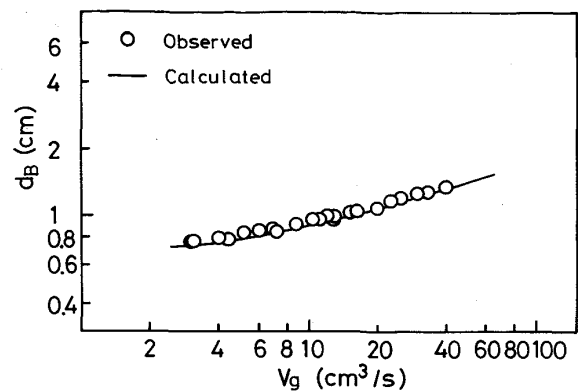


Fig. 2. Relation between size of bubbles and gas flow rate.

ほぼ1個ずつ上下に並んで金属相を上昇すると推定される。

3.2 Si 濃度の経時変化

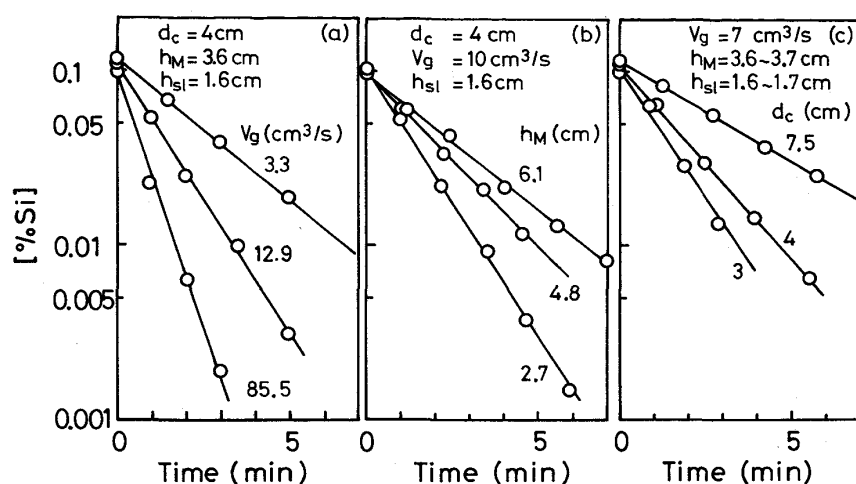
銅中 Si のスラグ中 FeO による酸化反応が金属側 Si 物質移動律速である場合に、(4) 式の関係が成立する⁶⁾⁷⁾。

$$-\ln \frac{[\% \text{Si}]}{[\% \text{Si}]_0} = k_{\text{Si}}' \frac{A}{V} t \dots\dots\dots (4)$$

k_{Si}' は金属側 Si の見かけの物質移動係数、 A は反応界面積、 V は金属体積、 t は時間を表す。

Fig. 3 に、種々の条件下での実験から得られた金属中 Si 濃度 (対数目盛) の経時変化の例を示す。図の (a), (b), (c) はそれぞれ吹込みガス流量 V_g 、金属深さ h_M 、るつば径 d_c のみを変化させ、他の条件を一定とした場合である。本研究のガス吹込み条件の範囲では、すべての実験結果において、Fig. 3 (a) ~ (c) に示されるように、 $\log [\% \text{Si}]$ と時間 t の間により直線関係が得られ、(4) 式の金属側 Si 物質移動律速の関係が実際によく満足されていることが示されている。ここで、反応界面積 A を見積もることができれば (4) 式により k_{Si}' を計算し求めることができる。

ガス吹込み攪拌下のスラグ-金属間反応界面積 A の厳密な値を求めることは一般に困難であり、近似値を用いる必要がある。BRIMACOMBE と RICHARDSON³⁾ の溶融塩-Pb 浴中への Ar 吹込み時の観察によれば、金属相を上昇してきた気泡は界面でいつたん上昇をとめられ、滞留した後に、後続の気泡に押し出されるようにして界面を通過することが認められている。一方、本研究の実験中の観察によれば、 $V_g = 80 \sim 90 \text{ cm}^3/\text{s}$ と非常にガス流量の高い場合を除いて、反応進行中のスラグ表面に出現する気泡の数は常に1個であり、その出現頻度は、目視観察によれば、ノズルからの気泡生成頻度とほぼ同じで

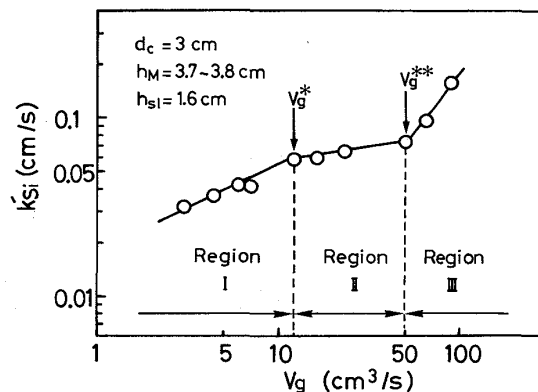
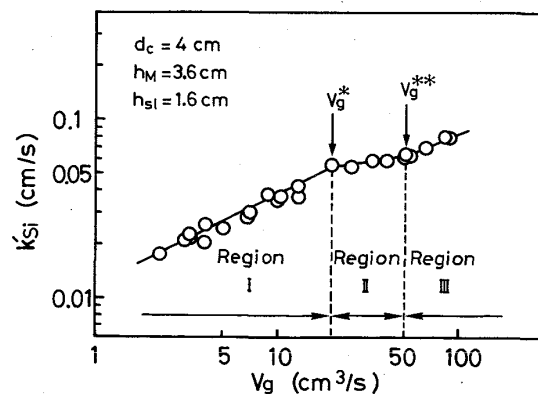
Fig. 3. Typical relation between $\log [\%Si]$ and time.

あつた。このことから、本研究のスラグ-Cu 系においても熔融塩-Pb 系の場合と同様、気泡の界面への滞留が考えられるが、その数はほとんどの場合時間平均して 1 個を超えないと推定される。したがって、気泡によるスラグ-メタル界面積の減少の割合は最大でも、気泡の最大断面積と静止状態のスラグ-メタル界面積にはほぼ相当するつば断面積の比 (d_B^2/d_c^2) 程度であると推察される。 d_c として中間の $d_c=4$ cm を例にとれば、 $d_B=0.7\sim1.4$ cm のときこの比は $0.03\sim0.12$ となり、本研究の実験では多くの場合、界面に滞留する気泡によるスラグ-メタル界面積の減少は 10% 以下にすぎないと考えられる。このため、一応るつば断面積によって反応界面積 A を代表させることとし、(4) 式に基づいて実験結果からメタル側 Si の見かけの物質移動係数 k_{Si}' を計算した。

3.3 物質移動係数と吹込みガス流量の関係

Fig. 4~6 に、実験から得られた Si の見かけの物質移動係数 k_{Si}' と吹込みガス流量 V_g の関係を示す。Fig. 4, 5, 6 はそれぞれ $d_c=3, 4, 7.5$ cm の場合の結果であり、 V_g と d_c 以外の実験条件としては、メタル深さ h_M 、スラグ深さ h_{sl} をすべて一定としてある。図で示されているように、 d_c が一定の時 k_{Si}' は V_g とともに増大するが、 k_{Si}' の V_g 依存性は図中に矢印で示した遷移ガス流量、 V_g^* 及び V_g^{**} 、を境に変化することが見いだされた。このため、Fig. 4~6 の実験結果を次の三つのガス流量域に分類することができる。

(i) 領域 I ($V_g < V_g^*$): k_{Si}' は V_g の 1/2 乗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、Fig. 4~6 を比較すれば、 V_g^* は d_c によって変化するが、 V_g^{**} は d_c によらず一定であること ($V_g^{**}=50$ cm³/s) がわかる。

Fig. 4. Relation between apparent mass-transfer coefficient, k_{Si}' , and gas flow rate ($d_c=3$ cm).Fig. 5. Relation between k_{Si}' and gas flow rate ($d_c=4$ cm).

とくに Fig. 6 の $d_c=7.5$ cm の場合には $V_g=5\sim50$ cm³/s の広い V_g の範囲が領域 II となつていていることが示されている。

$V_g > V_g^{**}$ の領域 III の実験では、 d_c によらず、多量のメタル滴がスプラッシュとして発生することが観察さ

れた。このことから、領域 III では、スラグ-金属界面が激しく乱れるとともに液滴発生による反応界面積の増大がおり、見かけの k_{Si}' の V_g 依存性が増大したと考えられる。

これに対して $V_g < V_g^{**}$ の領域 I, II においては液滴の発生はほとんど観察されておらず、また、とくに領域 II においては k_{Si}' の V_g 依存性が小さい。このことと、前項 3.2 で述べた気泡の界面における挙動を考え合わせれば、領域 I, II では、近似的に反応界面積をつづ断面積によつて代表させ、 k_{Si}' を金属側物質移動係数として扱うことが妥当であると考えられる。以下、本研究では領域 I と II に主として注目して k_{Si}' とガス攪拌条件の関係を検討する。

本研究の領域 I における $k_{Si}' \propto V_g^{1/2}$ の関係は RICHARDSON らの低温におけるモデル実験の結果^{3,4)}と一致しており、 V_g の増大に伴う金属相の攪拌の強化が金属側界面近傍における物質移動を促進することを示す。一方、 $V_g > V_g^*$ の領域 II においては、領域 I と比

べて、攪拌の強化が金属側の物質移動の促進にそのまま有効に現れていないことが示されている。本来、 V_g が大きいほど金属相内の攪拌は強化されるはずであるが、上記の現象は V_g^* を境として、金属相そのものではなく、 k_{Si}' を支配する金属側界面近傍における流体力学的条件の V_g 依存性が変化しているためであると考えられる。

3.4 物質移動係数と金属深さの関係

$V_g < V_g^{**}$ の領域 I 及び II の範囲で金属深さ h_M を変化させて実験を行い、物質移動係数 k_{Si}' と h_M の関係を調べた。結果を Fig. 7 に示す。図の (a) は $d_c = 4$ cm, (b) は $d_c = 7.5$ cm の場合の結果である。なお、スラグ深さは $h_{Sl} = 1.6 \sim 1.7$ cm 一定である。

図より、るつぼ径、吹込みガス流量によらず、ある遷移金属深さ h_M^* (図中矢印) を境に、金属深さの浅い $h_M < h_M^*$ の場合には k_{Si}' は h_M とともに増大するが、金属深さの深い $h_M > h_M^*$ の場合には k_{Si}' は h_M によらず一定となる傾向を示すことがわかる。また、 h_M^* は d_c が一定の場合、 V_g が増大するほど小さな値になることがわかる。RICHARDSON, ROBERTSON および STAPLES⁴⁾ は、水溶液-Hg 系におけるモデル実験の結果から、金属側の物質移動係数が金属深さ h_M を 2.34 cm から 5.8 cm に増加させた場合に増大することを見いだした。このことから、RICHARDSON らは金属深さの条件を“Low depth”及び“High depth”の2種類に分類し、“High depth”の場合には“Low depth”の場合と比べて金属浴内の循環流動がより大きく発達するため、金属側の物質移動係数が増大すると推定した。本研究において見いだされた遷移金属深さ h_M^* の存在、および、物質移動係数 k_{Si}' の h_M 依存性も RICHARDSON らの結果と同様に実験条件による金属浴内の流動

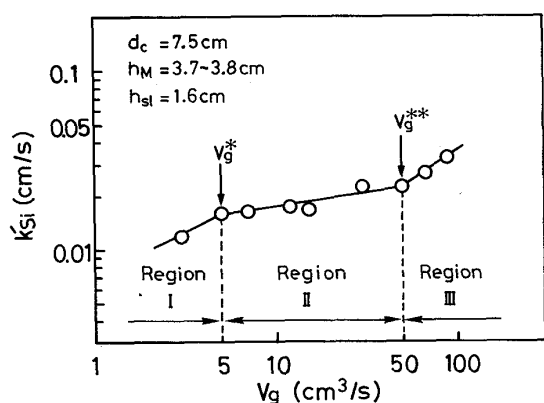


Fig. 6. Relation between k_{Si}' and gas flow rate ($d_c = 7.5$ cm).

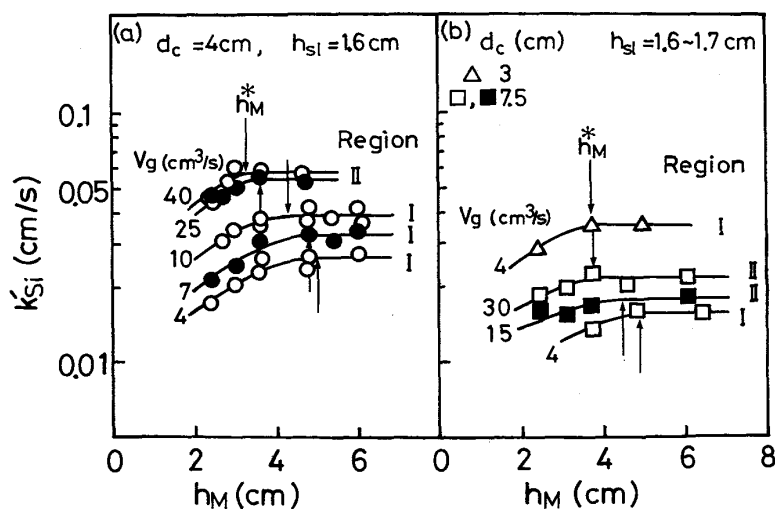


Fig. 7. Relation between k_{Si}' and metal depth, h_M .

状態の変化に関連すると考えられる。しかし、定量的に水溶液-Hg 系の実験結果³⁴⁾と本研究のスラグ-溶銅系の実験結果を比較するためには更に理論的な検討が必要であり、この点については続報¹²⁾で述べる。

次に、 V_g^* と h_M の関係について考察するため、 $h_M > h_M^*$ のデータおよび $h_M < h_M^*$ の代表的なデータを取り、領域 I, II における k_{Si}' と V_g の関係を $d_c = 4$ cm, $h_{sl} = 1.6$ cm 一定の場合について Fig. 8 に示した。図中 ● は $h_M > h_M^*$ のデータ、○ は $h_M < h_M^*$ である $h_M = 3.0$ cm のデータである。また、○ は Fig. 5 の $h_M = 3.6$ cm 一定のデータであるが、この場合には Fig. 7 より $V_g > 25$ cm³/s では $h_M > h_M^*$ に、 $V_g < 25$ cm³/s では $h_M < h_M^*$ の範囲に含まれることが示されている。Fig. 8 より、遷移ガス流量 V_g^* は実験誤差の範囲で、 $h_M > h_M^*$ であるか、または $h_M < h_M^*$ であるかによらず同じ値であることがわかる。このことから、領域 I から II への遷移におけるガス流量 V_g^* には、メタル深さによる流動状態の変化の影響は小さいと考えられる。

3.5 物質移動係数とスラグ深さの関係

スラグ深さ h_{sl} を $h_{sl} = 1.2$ cm と小さくして、 k_{Si}' と V_g の関係を調べた。 $d_c = 4$ cm, $h_M = 3.4 \sim 3.6$ cm 一定とした。得られた実験結果を Fig. 5 の $h_{sl} = 1.6$ cm の場合の結果と一緒にして Fig. 9 に示す。なお、Fig. 9 に示した V_g の範囲では、メタル深さは主として $h_M < h_M^*$ の条件となつている。

図より、 $k_{Si}' \propto V_g^{1/2}$ の成立する領域 I では k_{Si}' は h_{sl} によつて変化せず、一方、 k_{Si}' の V_g 依存性の小さい領域 II では、同じ V_g において、 h_{sl} の小さな場合に k_{Si}' が小さな値となり、 h_{sl} の影響が明確に現れている。更に、遷移の V_g^* は h_{sl} の小さい場合低いガス流量となることがわかる。これらの実験事実、領域 I においては

もつぱらメタル側の流動がメタル側界面における物質移動に影響を与えるのに対して、 $V_g > V_g^*$ の領域 II においてはスラグ側の流動もメタル側界面における物質移動に影響を与えることを示している。

3.6 物質移動係数のるつぼ径による変化

RICHARDSON ら⁴⁾ および ROBERTSON と STAPLES³⁾ は、水溶液-アマルガム系、熔融塩-鉛系を用いたモデル実験の結果から、ガス吹込み攪拌下における物質移動係数とガス流量 V_g およびるつぼ径 d_c の関係を (5) 式によつて整理できることを示した。

$$k_x = \left(\frac{BD_x V_g}{d_c^2} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 k_x は x 成分の“スラグ”（水溶液、熔融塩）側またはメタル（アマルガム、鉛）側物質移動係数、 D_x は拡散係数、 B は [長さ]⁻¹ の次元をもつ比例係数である。

本研究の領域 I, II における実験結果から、 $h_{sl} = 1.6 \sim 1.7$ cm 一定、 $h_M > h_M^*$ の条件に該当するデータを取り、 k_{Si}' と (V_g/d_c^2) の関係を Fig. 10 に示した。実験データとして、 k_{Si}' に対する h_M , h_{sl} の変化の影響が現れないようにとつた。

図より、 $V_g < V_g^*$ の領域 I では、 $k_{Si}' \propto (V_g/d_c^2)^{1/2}$ の関係が成立し、 d_c , V_g によらず (5) 式を用いて実験データを整理できることがわかる。領域 I のデータから (5) 式の比例係数 B を計算し、 $B = 41$ cm⁻¹ が得られた。ここで拡散係数 D_{Si} は $D_{Si} = 6.4 \times 10^{-5}$ cm²/s ととつた⁷⁾。この B の値は、水溶液-アマルガム系および熔融塩-鉛系のメタル側物質移動係数について得られた $B = 80$ cm⁻¹ (“Low depth”)⁴⁾, 120 cm⁻¹ (“High depth”)⁴⁾ および $B = 110$ cm⁻¹⁴⁾ と比較してかなり小さな値となつている。本研究のスラグ-Cu 系と低温のモ

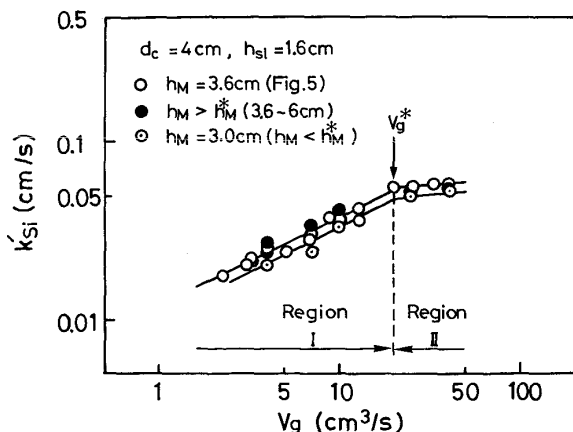


Fig. 8. Relation between k_{Si}' and V_g for different metal depths.

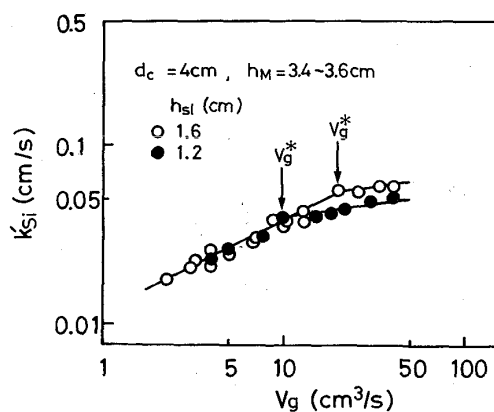


Fig. 9. Relation between k_{Si}' and V_g for different slag depths.

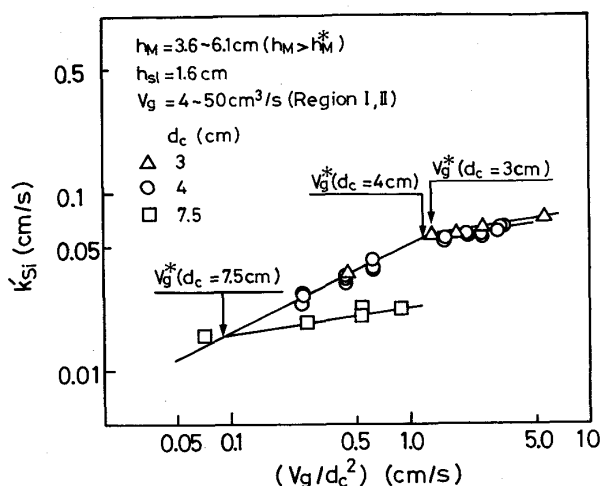


Fig. 10. Relation between k_{Si}' and (V_g/d_c^2) .

デル系における B の値の差は、用いたモデル系の物性値がかなり異なることによるものと考えられる。一方、Fig. 10 において、 $V_g > V_g^*$ の領域 II の実験データは k_{Si}' と (V_g/d_c^2) の関係によつて整理できないことがわかる。

3.7 総括

以上で述べたことからわかるように、ガス吹込み攪拌下では、メタル側物質移動係数は、ガス流量のほかメタル深さ、るつば径、スラグ深さによつて複雑な影響をうける。本論文では実験結果の現象論的な説明とそれについての定性的な説明を加えた。続報¹²⁾においてガス吹込み攪拌下のスラグ-メタル界面メタル側における物質移動現象についての流体力学的な理論的検討を行い、本研究の実験結果を詳細、定量的に検討する。

4. 結 論

スラグ-メタル間反応速度に及ぼすガス吹込み攪拌条件の影響を調べるため、スラグ-溶銅間 Si 酸化反応系について 1250°C で速度論の実験を行つた。実験条件として吹込みガス流量 V_g 、メタル深さ h_M 、スラグ深さ h_{sl} 、るつば径 d_c を変化させ、メタル側 Si の見かけの物質移動係数 k_{Si}' と実験条件の関係を調べ、以下の結果を得た。

(1) k_{Si}' は V_g の増大とともに増大するが、その V_g 依存性は遷移ガス流量 V_g^* 、 V_g^{**} により次の三つの領域に分類される。領域 I ($V_g < V_g^*$): $k_{Si}' \propto V_g^{1/2}$ が成り立つ。領域 II ($V_g^* < V_g < V_g^{**}$): k_{Si}' の V_g 依存性が小さい。領域 III ($V_g > V_g^{**}$): k_{Si}' の V_g 依存性が再び増大する。

(2) 遷移ガス流量 V_g^* は d_c 、 h_{sl} によつて変化するが、 V_g^{**} は一定である。

(3) 領域 III ではスラグ-メタル界面の大きな乱れと液滴 (スラグ滴またはメタル滴) による界面積増加が k_{Si}' を見かけ上増大させると推定される。これに対して、領域 I、II においてはガス吹込みの反応界面積への影響は小さく、 k_{Si}' はメタル側の物質移動係数として扱うことができる。

(4) 領域 I、II において、 k_{Si}' は、遷移メタル深さ h_M^* を境に、 $h_M < h_M^*$ では h_M とともに増大し、 $h_M > h_M^*$ では h_M によらず一定となる。 h_M^* は V_g の増大に伴い減少する。

(5) 領域 I では、 k_{Si}' は h_{sl} に依存せず、また $h_M > h_M^*$ の条件下で $k_{Si}' \propto (V_g/d_c^2)^{1/2}$ の関係が成り立つ。領域 II における k_{Si}' および V_g^* は h_{sl} の減少により減少する傾向が示された。

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 年度、60 年度) および日本鉄鋼協会より石原・浅田研究助成金 (昭和 57 年度) の交付を受けた。記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) 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]
- 2) J. K. BRIMACOMBE and F. D. RICHARDSON: Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C, **82** (1973), C63
- 3) 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]
- 4) 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]
- 5) 浅井滋生: 第 100・101 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 65
- 6) 森 一美, 平沢政広, 新貝 元, 團中朝夫: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1110
- 7) 平沢政広, 松浦正博, 森 一美: 日本金属学会誌, **50** (1986), p. 796
- 8) M. SANO and K. MORI: Trans. Jpn. Inst. Met., **17** (1976), p. 344
- 9) 佐野正道, 森 一美, 藤田康久: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1140
- 10) K. NOGI, K. OGINO, A. MCLEAN and W. A. MILLER: Metall. Trans. B, **17** (1986), p. 163
- 11) J. F. ELLIOTT, M. GLEISER and V. RAMAKRISHNA: Thermochemistry for Steelmaking, I (1960) [Addison-Wesley]
- 12) 平沢政広, 森 一美, 佐野正道, 島谷祐司, 岡崎義光: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1350