

融体精錬反応の速度論基礎

森 一 美*

Fundamentals of the Kinetics in Liquid Metals Refining Processes

Kazumi MORI

1. はじめに

このたび、栄えある西山賞を受賞し、たいへん光栄に存しております。これひとえに、御指導、御鞭撻いただいた諸先生、諸先輩の方々、そして私の大学在職中の協同研究者だった皆さんのおかげであり、深く感謝しております。

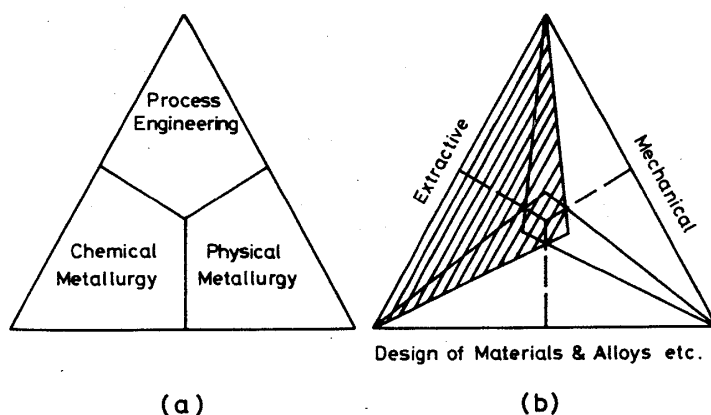
私は大学卒業後しばらくの間スラグに関する研究を行い、その後鋼精錬プロセスを念頭におきつつ融体精錬反応の速度論的基礎を研究課題としてきました。ここでは私が名古屋大学で長年追求してきた溶融金属中の吹込み気泡の挙動に関する問題を中心にしてお話してみたいと思います。

2. 金属製錬学と速度論的基礎

私が名古屋大学へ赴任した1964年、ロンドンのImperial CollegeのF. D. RICHARDSON教授¹⁾が、AIME, Iron and Steel SocietyのHowe Memorial Lectureとして、金属製錬学を中心として金属工学(Metallurgy)の教育研究について講演している。私はその講演論文に接して強い刺激を受け、その後大学で教育研究の問題を考

える上でこのRICHARDSONの論文が非常に参考になった。RICHARDSONは、金属工学の内容をFig. 1のように基礎と応用に分け、そこでは金属製錬学(Extractive metallurgy)を応用とし、その基礎が化学冶金学(Chemical metallurgy)とプロセス工学(Process engineering, Process science)の2分野、ある場合には物理冶金学(Physical metallurgy)も含めた3分野であるとしている。ここで最も注目すべきことは、プロセス工学を金属工学の基礎の3本柱の一つとしていることで、これは金属工学(応用)は必ずマス(mass)をもった“もの”を対象とする学問であることによる。

金属製錬においては、プロセス工学は、主として実際プロセスを数学モデルで解析するための理論として一定の役割をもってきたが、本講で取り上げる精錬の速度論的基礎の立場からは、もう少し突っ込んだ見方が必要である。製鋼精錬のような高温の不均一反応系では、すべて、その速度は異相界面を通しての物質移動の速度に大きく支配される。したがって基礎学問としての精錬反応速度論は、Fig. 2でハッチで示したように化学冶金学(物理化学)とプロセス工学がオーバーラップしたところにある学問と考える。



(a) The three basic sections
(b) The three applied sections

Fig. 1. The anatomy of metallurgy¹⁾.

平成3年4月本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演 平成3年5月10日受付 (Received May 10, 1991)

* 名古屋大学名誉教授 NKK顧問 工博 (Professor Emeritus, Nagoya University; Adviser, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

Key words: extractive metallurgy; steelmaking kinetics; submerged gas injection; bubbling-jetting; nitrogen removal; mass transfer; slag-metal reaction; ladle metallurgy.

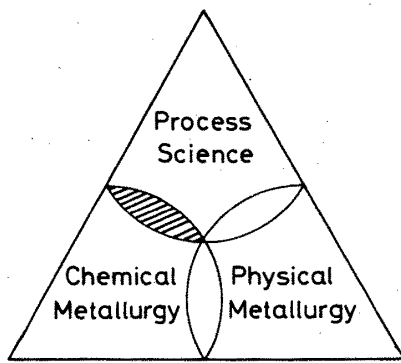


Fig. 2. The basic sections of metallurgy (modified).

精錬プロセスの共通の基礎操作の一つとして浴中へのガス吹込みがある。この場合、吹込み気泡の挙動、液攪拌、気泡界面を通しての物質移動が精錬プロセスのマクロ的な挙動、反応速度を決める重要な要因をなす。このような問題を取り扱う基礎は正に Fig. 2 の化学冶金学とプロセス工学のオーバーラップしたところであり、ここで取り上げる内容もこのような意味の基礎研究である。

溶鉄、スラグは、高温のきわめて特異な物性の液体であり、速度論的研究の対象としては取扱いがきわめて困難で、基礎現象の解明につながる精密な測定値を、溶鉄やスラグを用いた実験のみから直接求めることは容易でない。そこで、低温の熔融金属を含めた種々の液体を用いた“モデル”実験を行い、溶鉄、スラグについては実験可能な条件で研究し、結果を総括して結論を出す。これが私共のとった研究の基本的考え方である。

3. 液体中ノズル (オリフィス) からの気泡生成

種々の液体中に浸漬した上向きノズルからガスを吹込み、ノズルからの生成気泡の大きさ (平均直径 d_B)

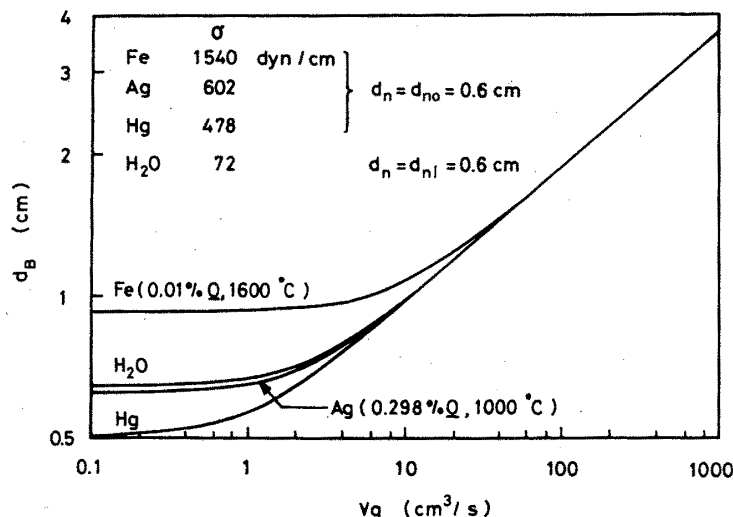
を測定した²⁾³⁾。その結果、気泡の大きさを決定するノズル径 d_n は、ノズルの液体に対する濡れ性によって異なり、ノズルが濡れる水の場合には、ノズル内径 d_{ni} 、またノズルを濡らさない水銀、熔融銀、溶鉄の場合はノズル外径 d_{no} であることを明らかにした。このことを考慮すれば、ノズルからの生成気泡の大きさとノズル径、液体の物性、ガス流量の関係は Fig. 3 のように一つの式で表されるという興味深い結果を得ることができた。

Fig. 3 でわかるように、生成気泡の大きさに及ぼすガス流量 V_g の影響は大きく、 V_g が小さい範囲では d_B は浮力と表面張力の釣合いで決まり、 V_g が大きくなると、液慣性力の影響が大きくなり表面張力の影響は無視できるため、気泡の大きさは液体の種類に無関係になる。

以上の知見は、以下本講で述べるように吹込み気泡の関与する反応系の基礎研究を進める上で不可欠の重要な情報を与えるものである。また実際的には、たとえば、ポーラスプラグからの気泡生成の挙動が溶鋼と水モデルの場合では非常に異なるが、その理由が本研究の結果により説明できる。

液体金属中の浸漬上向きノズルの外径を増加していった場合に生成気泡の大きさはどのように変化してゆくだろうか。これは、実際プロセスにおける炉底羽口からの吹込みガスジェットの挙動いかんということになり、羽口の溶損や閉塞にも密接に関連する重要な問題になる。また、基礎的観点からも非常に興味ある研究テーマであり、私共は、容器底部オリフィスからの水銀・水浴中への窒素・ヘリウムガス吹込みにおける気泡生成の挙動を高速カメラ撮影により調べた^{4)~6)}。

吹き込まれたガスがオリフィス出口において水平方向に広がる現象をバブリング (Bubbling)、オリフィスよりガスジェットとして浴中に侵入する現象をジェッティング (Jetting) と定義した。オリフィス径 $d_o = 0.2$ cm についての観察結果をまとめたのが Fig. 4 で、バブリ



Calculated from the equation

$$d_B = \left\{ \left(\frac{6\sigma d_n}{\rho_l g} \right)^2 + 0.0242 (V_g^2 d_n)^{0.867} \right\}^{1/6}$$

σ : Surface tension of liquid (dyn/cm)

ρ_l : Liquid density (g/cm³)

g : Acceleration of gravity (cm/s²)

Fig. 3. Comparison of size of bubble formed in various liquids³⁾.

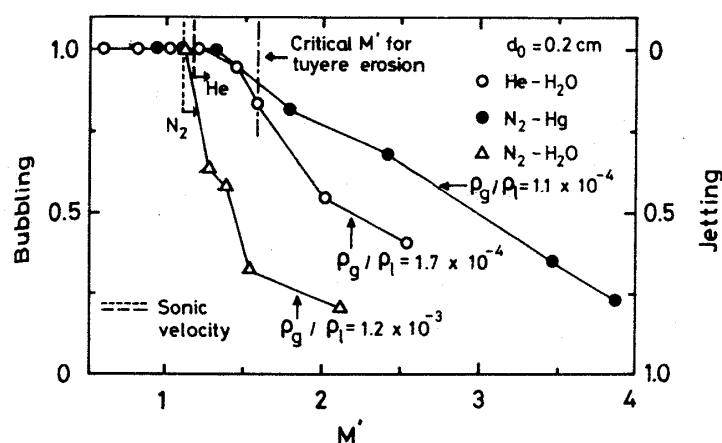


Fig. 4. Time fractions for bubbling and jetting for three models plotted against nominal Mach number⁶⁾.

ング・ジェッティングの時間割合をみかけのマッハ数 M' に対してプロットした。図中の点線は窒素、破線はヘリウムに対する亜音速・音速領域の臨界の M' を示している。図でわかるように、オリフィス出口のガス線流速が亜音速領域にある場合にはバブリングのみであるが、音速領域にはいると、このほかジェッティング現象が起こるようになり、前者から後者への遷移開始の臨界 M' は三つの気/液の組合せにおいてほぼ等しく、液体および吹込みガスの密度の影響はない。しかし、気/液の密度比 ρ_g/ρ_l が大きいほど、バブリングからジェッティングへの遷移は急激であり、安定したジェッティングが起こりやすことがわかる。なお、He/水系の $\rho_g/\rho_l = 1.7 \times 10^{-4}$ は N_2 /溶鋼の場合の ρ_g/ρ_l の値にほぼ等しい。このことから He/水系は吹込み精錬のプロセスシミュレーションのよいモデルであるといえる。

坂口ら⁷⁾は溶鋼中への二重管羽口からの酸素吹込み実験を行い、羽口溶損の起こらないガス吹込み条件を検討している。彼らが求めた結果より、この吹込み条件に相当するガス線流速を求めた。この推定値を Fig. 4 に示したが、これは私共が求めたバブリング-ジェッティング遷移条件に非常に近いところにあり、羽口の溶損防止には音速領域のガス吹込みでジェッティング率を高めることがきわめて重要であることを示している。AOD とか上底吹き転炉ではこのような条件を満たす高压高速のガス吹込みを行っている。

私共は水中へのガス吹込み実験より、ジェッティングの場合のオリフィス近傍の液中へのガスジェットは超音速流れであることを明らかにしている⁵⁾。超音速流れは流体力学的にみて特異な性質のガス流れである。製鋼の現場においてこのようなガス吹込みを行っていることは感動的ですからある。

4. 熔融金属中ガス吹込み反応の速度

RICHARDSON¹⁾は、前述の Howe Memorial Lecture において、1964 年当時における高温製錬反応のプロセス工

学的基礎研究を展望し、つぎのように述べている。焼結や高炉製鉄に関連した気固系では、ガス流れ伝熱のような移動速度論的な知見がかなり蓄積されてきている。これに対し、製鋼のような融体の関与する系については研究は著しく貧弱であり、そのため、高温冶金反応の現象を検討するのに物性値の非常に異なる常温の液体についての研究結果を参考にせざるを得ない状態で、“This is most unsatisfactory” であるとしている。このような背景のもとで RICHARDSON は、Nuffield Research Group、さらに 1963 年に設立された John Percy Research Group を指導し、液体金属中の気泡の上昇速度や、次章で引用する液液系の物質移動速度に及ぼす気泡の界面通過の影響などについての基礎研究を開始している¹⁾¹⁴⁾。

私共は、当初溶融銀中への酸素吹込み実験を行い、酸素濃度の経時変化のデータを求めたが、このデータを理論的に十分説明することはできなかった⁸⁾。ついで、前章で述べた吹込み気泡の大きさの測定研究が進んだ段階で、アルゴン吹込みによる溶融銀の脱酸反応の速度論的実験を行った⁹⁾。この実験で吹込み気泡界面のみを通した脱酸の速度を求め、この結果を理論的に説明することができた。

以上のような溶融銀についての研究に力を得て、溶鉄を対象とした研究に移った。まず、1580°C において 38 mm の内径のマグネシヤるつぼ中の深さ約 50 mm の溶鉄中に窒素を吹込み、気泡界面を通しての溶鉄の窒素吸収速度を測定した¹⁰⁾。同じような実験手法により、溶鉄中吹込みアルゴン気泡界面を通しての脱窒速度を測定する実験を行った¹¹⁾。両者の実験結果を、液側物質移動、界面化学反応およびガス側物質移動（脱窒の場合のみ）の混合律速モデルを用いて解析し、界面化学反応速度定数 k_c を求めた。その結果、両者の場合とも、気泡界面を通しての反応速度は、広範囲の窒素分圧、浴中窒素濃度範囲において同一の値の反応速度定数を用いた混合律速モデルにより統一的に説明できることがわかった。

製鋼における脱窒は 1960 年代鉄鋼会社の技術開発のきわめて重要な課題であった。これと併行する形で基礎研究としての溶鉄脱窒反応の速度論的研究も盛んに行われた。その後しばらく、製鋼脱窒について会社関係者からの話題提供はあまりなかったのではないと思う。1980 年代中頃になり製鋼現場から再び溶鋼脱窒の話が聞かれるようになり、鋼中窒素を 10 数 ppm まで安定して減少させる技術の確立が要望されるようになった。私共の基礎研究もこの現場の要求に大きな刺激をうけ、溶鉄脱窒の基礎研究に一段と拍車がかけられたように思う。

このような実際の課題のあることも念頭におき、同時アルゴン吹込み (ガス流量 V_g)・吹付け (ガス流量 V_b) による溶鉄脱窒の速度論的実験を行った¹²⁾。Fig. 5 にその結果の一例 (○印) を、アルゴン吹付けのみ (●印)、吹込みのみの場合と比較して示した。図でわかるように、同時アルゴン吹込み・吹付けによる脱窒の速度は、他の 2 者の場合に比べてかなり大きい。これは、気泡の浴表面離脱時のスプラッシュの生成、浴表面の乱れにより浴表面の有効表面積が増加することによる。混合律速モデルにより検討し、この有効表面積はるつぼ断面積の約 2 倍であることを明らかにした。なお、Fig. 5 で同時アルゴン吹込み・吹付けについての実線は計算結果で、広い窒素濃度範囲で、実験結果は計算値によく一致している。

浴表面の有効界面積が上記のように増加することは、溶鉄中窒素を 10 ppm 程度の低い濃度範囲まで減少させる上できわめて大きな意味をもつ。脱窒反応は低窒素濃度領域ではほぼ界面化学反応によって律速されるため、図でわかるように窒素濃度の経時変化はきわめて遅くなるからである。なお、以上の研究結果は、たとえば RH のような製鋼の実際装置内で起こる現象を検討する理論的基礎になるものと考えられる。

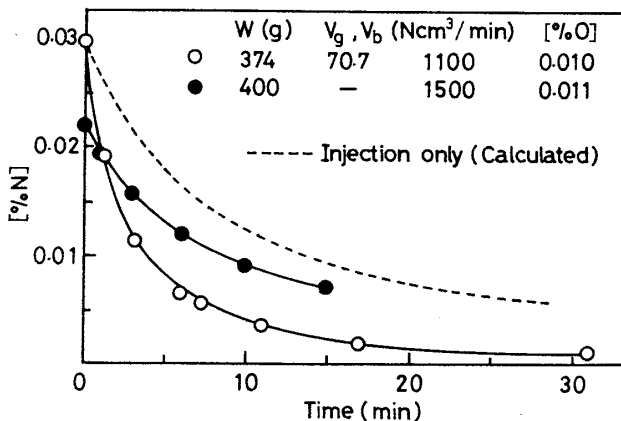


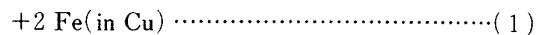
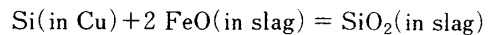
Fig. 5. Comparison of changes in nitrogen concentration with time by Ar injection together with blowing, Ar blowing and Ar injection¹²⁾.

5. ガス吹込み攪拌下のスラグ-熔融金属間物質移動速度

スラグ-溶鋼間物質移動速度に及ぼす気泡攪拌の影響を定量的に解明することは、かつての平炉時代より重要な課題になっており、RICHARDSON¹⁾ は、B. M. LARSEN¹³⁾ による平炉内現象のすぐれた観察結果に触発されてこの問題に大きな関心をもった。これが、前章で述べたように、RICHARDSON らが液体金属中の気泡の挙動の基礎的研究を始めた動機の一つであったと思われる。

RICHARDSON ら、ROBERTSON らは、スラグ-熔融金属間物質移動速度についての基礎的研究として、水溶液-水銀系¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾あるいは溶融塩-溶融鉛系¹⁵⁾¹⁷⁾のような低温のモデル系を用い、比較的低い流量のガス吹込み実験を行った。その後、取鋼精錬について、たとえば脱硫の速度に及ぼすガス吹込みの影響を検討する立場から、有機溶媒-水系を用いたモデル実験¹⁸⁾¹⁹⁾が行われている。しかし、このような有機溶媒-水系では、界面張力・密度などの物性がスラグ-溶鉄系と大幅に異なることが問題として残されている。

私共は 1980 年頃から、スラグ-溶鉄系に近い物性値をもつスラグ-溶銅系を用いることを考え、種々検討の結果、スラグには $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ を基本系とし、溶銅中 Si のスラグ中 FeO による酸化反応



をモデル反応系として選んだ²⁰⁾。この反応系では、スラグが実験的に扱いやすく、律速機構を複雑にする他の同時反応が起こらないため、物質移動の検討を明確な形で行うことができる。そこで、この反応系について、物質移動速度とガス吹込み攪拌の関係の系統的研究を行った²¹⁾²²⁾。

実験の初濃度については、機械的攪拌の条件下の実験により (1) 式の反応がメタル中 Si の物質移動律速になるように決めた $[\% \text{Si}]_0 = 0.1$, $(\% \text{FeO})_0 = 9$ とした。るつぼ底部中心に設置したノズルからアルゴンを吹込みつつ (1) 式反応を進行させ Si 濃度の経時変化を調べた。実験温度は 1250°C とした。実験条件として、吹込みガス流量 V_g , るつぼ内径 d_c , メタル浴深さ h_M , スラグ浴深さ h_{sl} を種々変化させた。なお、以下では V_g は 1250°C , 1 atm に換算した値を示す。

反応速度は

$$-\frac{d[\% \text{Si}]}{dt} = k'_{\text{Si}} \left(\frac{A}{V_M} \right) [\% \text{Si}] \dots\dots\dots (2)$$

A: 反応界面積 (るつぼ断面積)

V_M : メタル容積

で表され

$$-\ln \frac{[\% \text{Si}]}{[\% \text{Si}]_0} = k'_{\text{Si}} \left(\frac{A}{V_M} \right) t \dots\dots\dots (3)$$

により、メタル側 Si のみかけの物質移動係数 k'_{Si} を求めた。

この研究を始めた当初最も興味をもっていた問題は、物質移動係数が吹込みガス流量によりどのように変化するか、とくに高ガス流量域における物質移動係数の急激な増加現象が、本研究のような基礎研究においてどのように現れるか知りたいということであった。

実験結果として現れてきたものは、このような当初の考えを超えた複雑なきわめて興味ある現象である。以下述べる 3 点が予想と異なって得られた新しい知見である。

Fig. 6 および Fig. 7 にメタル側物質移動係数 k'_{Si} と吹込みガス流量 V_g の関係を、るつば径 $d_c=4, 7.5$ cm の場合について示した。 k'_{Si} の V_g 依存性を三つの領域に分類することができた。領域 I では k'_{Si} は $V_g^{1/2}$ に比例して増加し、この関係は RICHARDSON ら^{14)~17)} の低温のモデル実験の結果と一致している。また、領域 III

では、ガス流量が大きいため、スラグのメタル中への巻込み、メタルスプラッシュの発生などスラグ-メタル間界面が激しく乱れ、有効界面積も大きく、みかけ上 k'_{Si} の V_g 依存性が増大したと考えられる。その中間の領域 II では k'_{Si} の V_g 依存性が小さく、とくに $d_c=7.5$ cm の場合には、 V_g が $5 \text{ cm}^3/\text{s}$ から $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ へと 10 倍増加しても、それによる k'_{Si} の増加はごく小さい。これは、この領域ではガス攪拌の強化がメタル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を示すもので、この領域 II の存在をみいだしたことが当初の予想になかった結果の第 1 点である。

前述したような常温の有機溶媒-水系を用いた実験においては¹⁸⁾¹⁹⁾、ガス流量が低い場合、本研究と同じような領域 I が得られているが、ある臨界ガス流量以上において領域 II ではなく領域 III の現象が示されている。これは有機溶媒-水系における界面現象が、高温のスラグ-メタル系と大きく異なるためで、基本的には、両者の界面張力の大きな相違による。水モデル実験の結果を高温のスラグ-溶鉄系に適用する場合に十分な注意を必要とすることを示す好例である。

私共の研究で示された領域 II の存在と関連をもつと思われる興味ある研究がある。東北工学院（中国）の Hsiao Tse-CHIANG²³⁾ は、水中へのガス吹込み時の液表面流速 u_s を測定しているが、 u_s はある吹込みガス流量以上ではガス流量によってほとんど変化しないことを示している。また長谷川ら²⁴⁾ は溶鉄へのガス吹込みにおいて同様の結果を得ている。後者はとくに溶鉄そのものを用いた貴重な研究である。これらの研究結果は、詳細は明らかではないが、ガス吹込みにより液に与えられる攪拌動力が必ずしも液表面の動きを大きくするようには使われていないことを示している。

私共の研究で示された領域 II から領域 III への遷移は、従来の水モデル実験¹⁸⁾¹⁹⁾、あるいは溶鉄を用いた実験²⁵⁾ でみだされている現象と同様のものであり、Fig. 6, Fig. 7 からわかるようにその臨界のガス流量 V_g^{**} は約 $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ で、るつば径に無関係である。これは定性的には現象の起こり方からみてよく理解できる結果である。

LF 脱硫などの実際操業で精錬速度を増加する上からは、領域 III の物質移動係数の大きい条件下のガス吹込みが一応問題になるが、この領域のように高い吹込みガス流量では操業上のデメリットが大きく、むしろ領域 I から II への遷移の現象により大きな注意を払う必要がある。

私共の研究で示された予想外の結果の第 2 点は、物質移動速度に及ぼすスラグ深さの影響である。Fig. 6, Fig. 7 の領域 I ではスラグ深さ h_{sl} は物質移動係数 k'_{Si} に影響しないが、領域 III では h_{sl} が増加するほど k'_{Si} は増大することがわかった。領域 II ではスラグ相

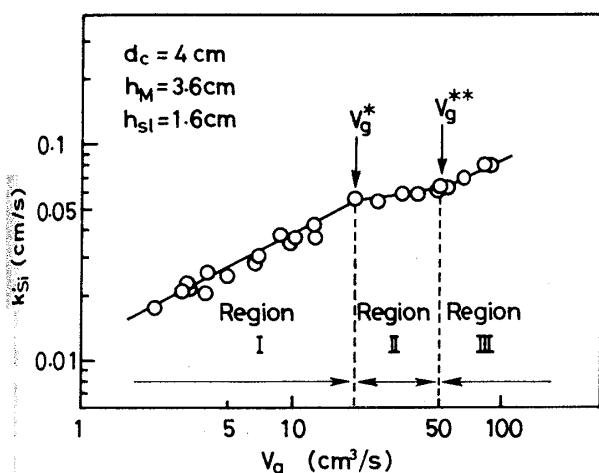


Fig. 6. Relation between k'_{Si} and gas flow rate ($d_c = 4 \text{ cm}$)²¹⁾.

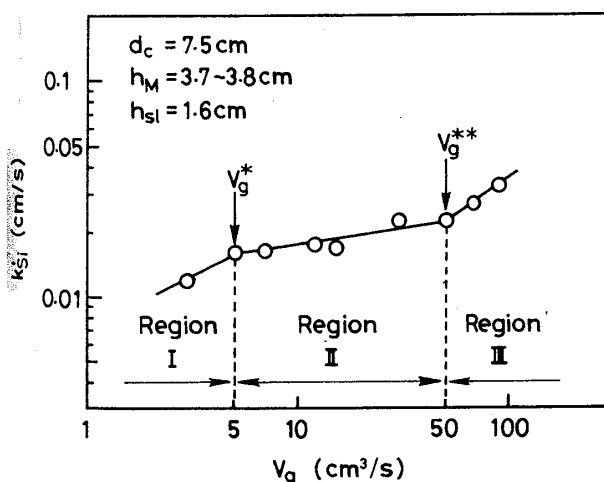


Fig. 7. Relation between k'_{Si} and gas flow rate ($d_c = 7.5 \text{ cm}$)²¹⁾.

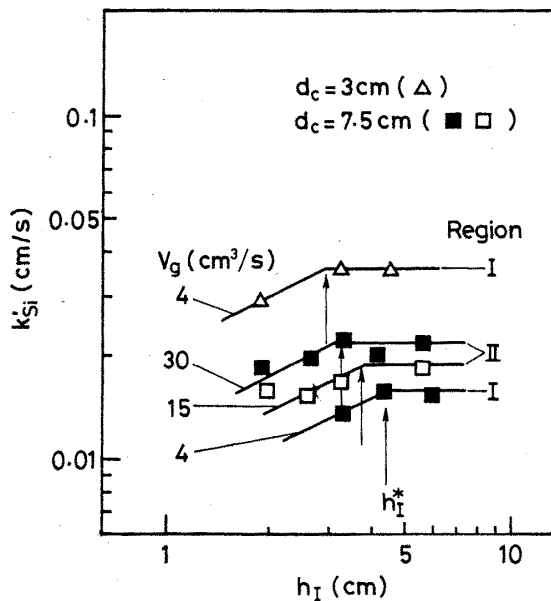


Fig. 8. Relation between apparent mass-transfer coefficient of Si, k'_{Si} and injection depth of metal phase, $h_I^{22)}$.

内の流動範囲が拡大し、界面を通してのスラグ側からメタル側への運動量移動が h_{Si} が大きいほど減少すること起因していると推察している。

予想外の結果の第3点は、物質移動係数に及ぼすメタル深さの影響である。ここではメタル深さそのものの代わりに、メタル内ガス吹込み深さ h_I (ノズル先端とスラグ-メタル界面の間の距離) をとる。Fig. 8 に k'_{Si} と h_I の関係を示す。図からわかるように領域 I, II において、ある遷移メタル深さ h_I^* を境に、 $h_I < h_I^*$ (浴深さが“浅い”) の範囲では k'_{Si} は h_I の $1/2$ 乗に比例して増加し、 $h_I > h_I^*$ (浴深さが“深い”) の場合には k'_{Si} は h_I によって変化しないことがわかった。物質移動係数がメタル深さの“浅い”場合と“深い”場合で異なることは、さきに RICHARDSON ら¹⁷⁾ が水溶液-Hg 系によるモデル実験でみだしてあり、このことから RICHARDSON らはメタル深さの条件を“Low depth”と“High depth”の2種類に分類している。しかし、メタル深さの影響をスラグを用いた高温のモデル系において定量的に明確に求めたのは私共の研究が初めてである。この現象は、ガス吹込みによりメタルに与えられる攪拌動力の消費される場所、消費され方が、メタル深さにより異なることによる。

ガス流量の高い領域 III は、現象の詳細が不明確であるため検討の対象から外せば、物質移動係数とガス吹込み攪拌条件 (ガス流量、メタル深さ (ガス吹込み深さ)) の関係は次の四とおりに分けて検討することができる。

- 1) $V_g < V_g^*$, $h_I < h_I^*$
- 2) $V_g < V_g^*$, $h_I > h_I^*$
- 3) $V_g > V_g^*$, $h_I < h_I^*$
- 4) $V_g > V_g^*$, $h_I > h_I^*$

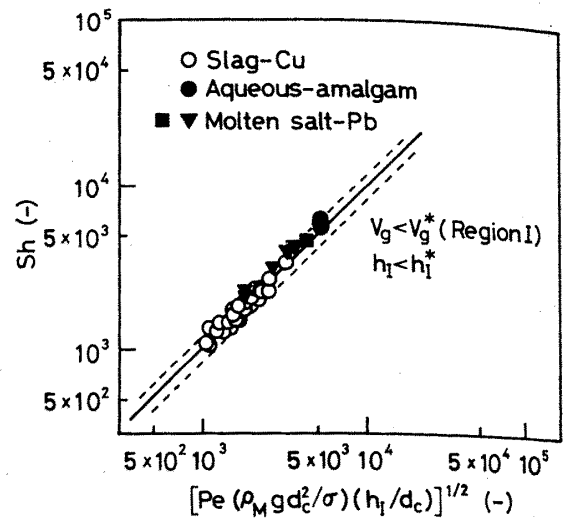


Fig. 9. Dimensionless correlation of mass-transfer data at $V_g < V_g^*$ and $h_I < h_I^*$ ²²⁾.

このうち、1) と 2) の $k'_{Si} \propto V_g^{1/2}$ の関係が成り立つ場合については、DAVIES の乱流理論²⁶⁾ を用い、乱流の渦の大きさ、攪拌動力の消費される場所などを考慮し理論式を導出し無次元相関式を得た。 $V_g > V_g^*$ の 3), 4) については、 $V_g < V_g^*$ の場合の式を参考にして無次元項を仮定し、実験的に無次元項のべき数を求め、無次元相関式を得た。

一例として 1) $V_g < V_g^*$, $h_I < h_I^*$ の場合の実験データを無次元相関式で整理した結果を Fig. 9 に示す。物質移動係数は Sherwood 数 (Sh) にはいつている。○印は本研究のスラグ-Cu 系のデータで、実験結果は V_g , d_c , h_I によらず実線で示した相関式でよく整理されることがわかる。

Fig. 9 には、また、RICHARDSON ら、ROBERTSON らが水-Hg 系¹⁶⁾¹⁷⁾、溶融塩-Pb 系^{15)~17)} についてのモデル実験で得たメタル側物質移動係数 k_M についてのデータも示した。いずれのデータも $k_M \propto V_g^{1/2}$ であるため領域 I に分類され、また実験条件を検討して $h_I < h_I^*$ の“Low depth”のデータのみをとった。図示された結果は誠に興味あるもので、10~20 数年前 RICHARDSON ら、ROBERTSON らにより求められた 25°C の水-Hg 系のデータおよび 450°C の溶融塩-Pb 系のデータ、さらに本研究の 1250°C のという高温のスラグ-Cu 系のデータが、すべて一つの理論式により統一的に整理されることがわかった。これから、Fig. 9 に示された関係は、私共がめざす 1600°C 程度の高温のスラグ-溶鉄系にも適用できるものと推察される。

本研究で得られた無次元相関式を用いて実機の LF 脱硫のデータを整理してみた²⁷⁾。引用した実機データは条件 2) $V_g < V_g^*$, $h_I > h_I^*$ に該当することがわかったので、その条件の私共²²⁾ および RICHARDSON ら¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

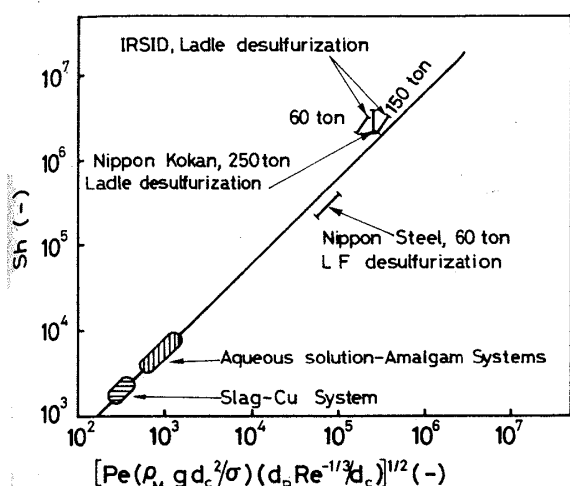


Fig. 10. Dimensionless correlation of the mass transfer data²⁷⁾.

の基礎研究のデータを実機データと一緒に Fig. 10 に示した。直線は私共がスラグ-Cu 系の研究で得た理論的相関式を示したものである。

図からわかるように、実機データは温度、物性値、反応条件が大きく異なる基礎研究から得られた式による計算値にかなり近い。これは基礎研究から得られた相関式が、近似的に実機データに適用されるとみることもできるが、式そのものの適用という点からはさらに検討の余地が残されているようにも思う。

むしろ、Fig. 10 に示されている結果にひそむ理論的意味に多大の興味を感じる。LF 脱硫においては、スラグ-メタル間界面全体が反応に関与すること、界面を通しての物質移動に対するガス吹込み攪拌の影響のメカニズムが、より低温の基礎研究としてのモデル実験系内のそれと本質的には同じであることを実感する。スラグ-溶銅系の研究で示された結果から推測されるように、高温のブラックボックス的な感じの取鍋精錬炉内の反応速度とガス吹込み攪拌の関係が実に複雑、微妙な内容のものであり、スラグ-メタル間界面近傍のメタル側の数 10～数 100 μm 程度のわずかな距離における S 原子の移動の仕方が精錬反応の速度、ひいては精錬コストを決める要因の一つになっているのは実に興味深いことである。

6. む す び

本講演においては、液体金属中の吹込み気泡の挙動、とくに精錬反応速度に対する気泡のかかわり方を例として取り上げ、融体精錬反応の速度論的基礎の意味を考えようとした。速度論の基礎研究から得られる知見として、律速過程の解明、物質移動係数の値、相関式などがある。さらに一般的にみれば、基礎研究では十分にコントロールされた条件のもとで実験を行うため、得られた結果は、

明確であり、一見近づき難い実際プロセスの現象をより身近なものとして理解するための有力な足場を与える。このため、速度論の基礎研究から得られる結論のうち、そこに含まれる定性的事項が最も重要な意味をもつと考える。この方面の研究の今後の発展を心から祈ります。

文 献

- 1) F. D. RICHARDSON: Trans. Metall. Soc. AIME, 230 (1964), p. 1212
- 2) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 348
- 3) 佐野正道, 森 一美, 佐藤哲郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2308
- 4) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2655
- 5) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 98
- 6) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 426
- 7) 坂口庄一, 石橋政衛, 吉井正孝, 山本里美, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 63 (1977), S534
- 8) 森 一美, 佐野正道, 菱田 護, 鈴木 鼎: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1142
- 9) 森 一美, 佐野正道, 星野秀夫: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 182
- 10) 門口維人, 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 70
- 11) 高橋正光, 松田 廣, 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 419
- 12) 高橋正光, 大熊 宏, 佐野正道, 森 一美, 平沢政弘: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 2064
- 13) B. M. LARSEN: A New Look at the Open-hearth Process, Natl. Open Hearth Steel Committee Special Report No. 1 (1956) [AIME]
- 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) J. K. BRIMACOMBE and F. D. RICHARDSON: Trans. Inst. Min. Metall. Sect. C, 82(1973), C63
- 16) 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]
- 17) 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]
- 18) 浅井滋生: 第 100・101 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1986), p. 65
- 19) S. H. KIM and R. J. FRUEHAN: Metall. Trans. B, 18 (1987), p. 381
- 20) 森 一美, 平沢政弘, 新貝 元, 圃中朝夫: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1110
- 21) 平沢政弘, 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
- 22) 平沢政弘, 森 一美, 佐野正道, 島谷祐司, 岡崎義光: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1350
- 23) Hsiao TSE-CHIANG: 名古屋大学講義 (1985)
- 24) 長谷川守弘, 遠藤定道: 鉄と鋼, 73 (1987), S951
- 25) 石田二郎, 山口国男, 杉浦三朗, 山野清市, 早川静則, 出向井登: 電気製鋼, 52 (1981) 1, p. 2
- 26) J. T. DAVIES: Turbulence Phenomena (1972) [Academic Press]
- 27) K. MORI, M. HIRASAWA and M. SANO: Int. Conf. "Secondary Metallurgy" (1987) [Verein Deutscher Eisenhüttenleute]