

前号 (Vol.15 No.7 P.448) からの続き

3.2 ガス吹き込み

3.2.1 バブリングとジェッティング

ガスをノズルから鋼浴へ吹き込むと、流量が低いうちは 断続的に気泡が発生する。この場合、ガスはノズルを出ると 同時にノズル径よりも大きく広がり気泡を形成する。この現 象をバブリングと呼ぶ。流量が増加すると、吹き込まれたガ スが連続的なジェットとして浴内へ侵入し始めるが、これを ジェッティングと呼ぶ(図52)^{46,48)}。バブリングからジェッティ ングへ遷移する条件は(3.2.1)式で定義されるみかけ上の音 速(M'=1)より少し大きいところにある(図53)^{47,48)}。

$$\mathbf{M}' = \frac{\mathbf{q}_g}{\mathbf{\nu} \mathbf{A}_N} \tag{3.2.1}$$

ここで、qg はガス流量 (m³/s)、A_N はノズル断面積 (m²) で、_ν は室温における音速 (m/s) であるが、この条件はバブ



図 52 バブリング (a) とジェッティング (b) 挙動の観察例 (文献 48) による)

リングからバブリングとジェッティングが混在する条件への 遷移であり、さらに流量を増加すると完全にジェッティング となる条件が現れる (図 54)⁴⁸⁾。

3.2.2 底叩き

バブリングとジェッティングが混在する流量では、一旦、 ノズルから出た気泡が後退し炉底を強い衝撃を与える「底叩



図 53 バブリングからジェッティングへの遷移開始条件(文献 47) による)



図 54 完全ジェッティング領域への遷移条件(文献 48) による)

き」現象を引き起こすため操業上は注意が必要である。ノズ ルを水浴へ突き出させた実験によれば図 55 のように気泡の 後退現象が観察される⁴⁹⁾。気泡後退長さ l_B (m) は (3.2.2) 式で計算される修正フルード数 Fr' と良い関係があるが (図 56)、Fr'が 30 以上になると後退現象が観察されなくなり、底 叩きが消滅する。これは、定性的にはガスが完全にジェッティ ング領域に入ったことに対応するものと思われる。

$$\operatorname{Fr}' = \left(\frac{\rho_{g}}{\rho_{L}}\right) \left(\frac{u^{2}}{d_{N} \times g}\right) \left(\frac{d_{N}}{h_{0}}\right) \dots (3.2.2)$$

ここで、uは標準状態でのガス噴出速度 (m/s)、dN はノズ ル直径 (m)、h₀ は吹き込み位置の浴深 (m) である。

3.2.3 気泡塔

浴に吹き込まれたガスによる液体の流動は、ガスの持つ運動エネルギーに起因する運動量支配域(ジェットコア域)と、 気泡の浮力に支配される浮力支配域(プルーム域)に分けられる(図57)⁵⁰⁾。運度量支配域の高さは後記の吹き抜け現象 と関連して重要である。浮力支配域ではガスは気泡群を形成



図 55 気泡の後退現象 (文献 49) による)



図 56 気泡後退長さと修正フルード数の関係 (文献 49) による)

し浮上して行くが、この気液混相域を気泡塔 (プルーム) と 呼ぶ。

気液混相中の気体の体積分率をガスホールドアップと呼 び、様々な液体で測定されている。図58には溶鉄系で測定 された各高さ位置でのガスホールドアップの分布を示すが、 溶鉄系であっても水や水銀で求めた実験式と大きな差はな い51)。このような結果から、気泡塔の面積を計算できるが、 ガスホールドアップは水平方向に次第にゼロに近づくため、 どこまでを気泡塔と定義するかで値が異なる。図59は全ガス 量の90.7%が存在する領域を気泡塔とした場合の気泡塔半径 の高さ方向の変化を示したものである 52)が、気泡塔が広がる 角度 (コーンアングル) は片側 12~15°である。図 60 は水銀 浴での実験結果で同様に全ガス量の90%が存在す領域とし て示したものであり、この場合も12°程度である53)。また、 図 61 に示すように各高さでの気泡塔半径はガス流量にはあ まり依存しない53)。これらの知見は2次精錬で反応界面積や スラグ巻き込みなどに影響を持つプルームアイ(自由表面で の気泡塔断面)を推定する上で重要である。



図 57 底吹きされた気泡の挙動(文献 50) による)



図 58 ガスホールドアップの分布; Fe-Ar 系での測定値と水モデルによる 回帰式との比較(文献 ⁵¹)による)

尚、攪拌条件によっては気泡塔が旋回する現象が知られて いる⁵⁴⁾。これは容器の直径 d_v と浴高さ h_vの比で図 62のよう に、第1種と第2種の旋回運動があり、第1種は気泡の生成、 上昇に伴う気体から液体への周期的加振がスロッシング(容 器が加振されることで液体の振動が誘起される現象)を引き おこしているもので、第2種は気泡噴流に同伴される液体の 壁への付着現象による。取鍋内の溶鉄は h_v/d_v が1以下にな る場合があり、インジェクションなどで精錬時に多量のガス を吹き込むとスロッシングが起こり操業に支障をきたすこと もあるため注意が必要である。

また転炉では底吹き羽口の位置やガス流量によって大きな 揺動が起こることも知られている。この場合には、羽口配列、 浴深、ガス流量などにより、①気液共存域(気泡塔に相当)



図 60 気泡塔の広がり角度(文献 53) による)

を中心としてU字管中の液の振動のように左右に揺れるタイ プと、②2つに分かれた気液共存域が近づいては離れる運動 を繰り返すタイプに分かれ、同じ攪拌エネルギーであれば① の振動エネルギーの方が大きい⁵⁵⁾。

3.2.4 気泡径

ノズルから浴内に吹き込まれた気泡のサイズは、ノズルを 出た直後の生成気泡径と、浮上域での安定気泡径に分けて評 価される。

生成気泡径に関する知見は水系や水銀系で数多くあるが、 気泡発生頻度が数個/sという非常に小さなガス流量での気 泡直径 d_B (m) に対してはノズル直径 d_N (m)、液の表面張力 σ (N/m)、液の密度 ρ_L (kg/m³) で決まる (3.2.3) 式⁵⁶⁾ が、 20 ~ 30 個/sの発生頻度になるとガス流量 q_g (Nm³/s) とノ ズル直径のみで決まる (3.2.4) 式⁵⁷⁾ が成り立つ (図 63)。

$$d_{\rm B} = (\frac{6\,\sigma\,d_{\rm N}}{\rho\,{}_{\rm L}\,g})^{1/3} \dots (3.2.3)$$

$$d_{\rm B} = 0.54 \times 10^{-2} \times \{ q_{\rm g} \times 10^{6} \times (d_{\rm N} \times 10^{2})^{0.5} \}^{0.289} \dots (3.2.4)$$



図 61 気泡塔半径に対するガス流量の影響(文献 53) による)





(3.2.4) 式における dn はノズル直径を用いたが、正確には 浴とノズル材質間の濡れに依存した値をとる。つまり、浴と ノズルが濡れる場合、気泡は出口に付着して成長した後に離 脱するため、離脱直前の最大付着気泡直径 dath (m)を dNの 替わりに用いると良く整理ができる。図64に接触角と最大付 着気泡直径の関係を示す⁵⁸⁾が、接触角が大きく濡れが悪い 場合には気泡は付着したまま成長することがわかる。これは ポーラス煉瓦からのガス吹き込みを考える場合に極めて重要 であり、溶鉄と耐火物間の濡れは悪いため、各気孔から出た ガス気泡はポーラス煉瓦表面で付着成長し、お互いに合体し た上で溶鉄中へ浮上して行くことになる。つまり、ポーラス 煉瓦の気孔径を細かくしたところで溶鉄中の気泡が微細化さ れるわけではない。尚、水と耐火物の濡れは良いため、水モ デルではポーラス煉瓦から容易に微細気泡が生成することに は注意を要する。図65には同じポーラス煉瓦から、ガスを水 中に吹き込んだ場合と、溶鉄中に吹き込んだ場合 (X線透過 写真)を比較したものであるが、水中へは3mm 程度の微細 気泡が得られるのに対して、溶鉄中ではポーラス煉瓦表面で 30mm 程度まで付着成長していることがわかる 59)。



図 63 ガス流量と気泡径の関係 (文献 57) による)



図 64 接触角と気泡径の関係(文献 58) による)

一方、気泡浮上域では合体・分裂した結果、ある安定気 泡径になる。この時の気泡径はノズル出口での運動量やノ ズル径などの影響を受けず、(3.2.5)式のように空塔速度 Vs (m/s)で記述できる⁶⁰。ここで空塔速度とは充填物がないと した場合の流体の見かけの速度であり、この場合にはガス流 量を断面積で割った値である。尚、実際の取鍋や転炉での空 塔速度を求める際には、断面積で割る他に気泡塔断面積で割 る場合もある。

気泡径は気泡による脱ガス反応や介在物の吸着などを考え る際に重要であるが、取鍋精錬等の場合には、生成気泡径で 考えるのではなく安定気泡径で考えるべきである。図66に測 定例を計算値とともに示すが、実操業を考えると気泡径は数 cmと推定される。

3.2.5 吹き抜け

転炉で底吹きガス流量を増加しすぎたり浴深を浅くしすぎ



図 65 ポーラス煉瓦から水中と溶鉄中ヘガスを吹き込んだ場合の相違 (文献 ⁵⁹ による)



図 66 空塔速度と気泡径の関係(文献 60) による)

たりすると多量にスプラッシュが発生する。これは底吹きガ スの吹き抜け現象として捉えられているが、図 67⁶¹に示すよ うに、3.2.1節で示したジェッティング領域で生成するジェッ トコア域が鋼浴深さに等しくなった場合に起こる。

ジェットコア先端でのガスの動圧と静圧の関係からジェッ トコア高さh_J (m) は (3.2.6) 式で求められる。ここで、v_J は ガスの平均流速 (m/s) である。これを、試験転炉での実 験値に合わせ、かつ、操業パラメータで書き直したものが (3.2.7) 式である⁶¹⁾。ここで n_N は底吹きノズル個数である。 (3.2.7) 式を変形すると (3.2.8) 式が得られ、吹き抜け限界は 修正フルード数 Fr,v'の1/3 乗に比例することになる⁶²⁾。尚、 上底吹き転炉では単なる浴深さでなく、上吹きガスで形成さ れるキャビティー深さを差し引く必要がある点に注意すべき である。

 $h_{\rm J} = 1.5 \; (\frac{\rho_{\rm g} v_{\rm J}^2 \; (6.2 d_{\rm N})^2}{\rho_{\rm L} g})^{1/3} \cdots (3.2.6)$

$$h_{\rm J} = 0.247 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho_{\rm g} \, (q_{\rm g} \times 10^{\circ})^2}{\rho_{\rm L} \, n_{\rm N}^2 (d_{\rm N} \times 10^2)^2} \right)^{1/3} \dots (3.2.7)$$

| $h_J/d_N = 2.08 n_N^{-2/3} Fr_{,N'}^{1/3}$ | |
|--|--|
| $\mathrm{Fr,v'} = \frac{\rho_{g}}{\rho_{L}} \times \frac{\mathrm{v_{J}}^{2}}{\mathrm{n_{N}}^{2}\mathrm{d_{N}}g}$ | |

3.2.6 気泡到達距離

AOD や RH の浸漬管ではガスを水平方向に吹き込んでい る。こういった場合には、水平方法への到達距離 L_H (m) を 把握する必要がある (図 68)。流動解析でガスの軌跡を計算 した例は多いが、簡単な指標としては、水平方向に吹き込 まれたガスの平均流速 v_H (m/s) を用いて、(3.2.9) 式に示し た修正フルード数 Fr,_H'の 1/3 乗に比例するという関係があ る⁴⁹⁾。



図 67 底吹きガスによる吹き抜け挙動(文献 61)による)

$$L_{\rm H}/d_{\rm N} = 3.7 {\rm Fr}_{,{\rm H}^{'1/3}}$$

$${\rm Fr}_{,{\rm H}^{'}} = \frac{\rho_{\rm g}}{\rho_{\rm L}} \times \frac{{\rm V}{\rm H}^{2}}{d_{\rm N}{\rm g}}$$
(3.2.9)

この関係は溶融金属でも成り立つが、ガスホールドアップ の分布には大きな差がある。図 69 は水浴と水銀浴にガスを 吹き込んだ場合のガスホールドアップ分布を示すが、水モデ ルでは羽口と気泡到達距離位置の中間点付近にピークを持つ のに対して、水銀浴ではほとんどの気泡が羽口付近の壁面に 集中して存在している⁶³⁾。

3.2.7 羽口冷却

溶鉄にガスを吹き込む場合には、羽口での冷却バランスを 適正にして、マッシュルームと称される凝固鉄を生成させて 保護することが一般的である。特に、酸素ガスを吹き込む場 合には、適正な冷却条件を保たないと羽口が大きく溶損し、 その速度が急激な場合には設備事故にさえつながる場合があ る。不活性ガスを吹き込む場合には、冷却不足の場合には溶 損が起こり、冷却過剰の場合には過度に凝固鉄が成長し吹き 込み流量が制約を受けることになる。



図 68 横吹きガスの挙動 (文献 49) による)



図 69 水浴と水銀浴での横吹き時のガスホールドアップ分布の比較 (文献 ⁶³⁾による)

通常、不活性ガスを吹き込む場合は単管ノズルを用いるの に対して、酸素ガスを吹き込む場合には2重管ノズルを用い、 内管から酸素、外管から LPG のような冷却ガスを吹き込む。 いずれの場合でも、羽口の冷却は原理的には入熱量と抜熱量 のバランスである。

単管の場合には図70のように、溶鋼から羽口周囲への入 熱 (q_L)、羽口周辺から吹き込みガスへの抜熱 (q_G)のバラン スであり、それぞれの熱伝達率 (W/ (m²・K))をh_L, h_G、溶 鋼温度をT_L、羽口出口のガス温度をT_Gとし、凝固鉄生成の 臨界条件では羽口周囲の温度が溶鋼の凝固温度 (T_F) である と仮定すると (3.2.10) 式が得られる⁶⁴⁾。

$$\frac{h_L}{h_G} \frac{T_L - T_F}{T_F - T_G} = C$$
(3.2.10)

ここでCは定数である。ガス温度を、断熱膨張を考慮した ノズル出口での真の温度とし、hg、hLを化学工学で得られて いる実験式を用いて表すと、水浴や酢酸浴に冷却したガスを 吹き込んだ実験での凝固物生成臨界条件は図71のように、 良く整理できる⁶⁴⁾。



図70 羽口周囲の熱伝達(文献 64) による)



図71 単管羽口先端への凝固物生成臨界条件(文献 64)による)

2 重管羽口の場合には、入熱速度と抜熱速度のバランスで ある受熱指数 (Hc) が提案されている。受熱速度は、酸素と 溶鋼成分との反応熱のうち羽口と直接接触する部分のみが羽 口に伝熱すると仮定した熱量であり、抜熱速度は外管ガスに よる対流伝熱と分解熱である。

$$H_{C} = \frac{0.05 \{(\Delta h_{i}/4.184) \times V_{B02} \times (d_{OTO}^{2} - d_{OTI}^{2})/d_{ITI}^{2}\}^{0.5}}{0.13 \frac{d_{OTI} V_{LPG}^{0.8}}{(d_{OTI}^{2} - d_{ITO}^{2})^{0.8}} + 38 V_{LPG}}$$

ここで、△h は酸素による各成分の反応発熱量 (kJ/ Nm³-O₂)、V_{BO2} は底吹き酸素流量 (Nm³/h)、d_{ITI}、d_{ITO} は内 管の内径と外径 (m)、d_{OTI}、d_{OTO} は内管の外径と内径 (m)、 V_{LPG} は LPG 流量 (Nm³/h) である。羽口の健全域は、この 受熱指数と (3.2.2) 式で示した修正フルード数 Fr' とを用いて 図 72 のように表される⁶⁵。

これに対して、熱バランス式を解いて吹錬中のマッシュ ルームの挙動を計算する試みもある^{66,67)}。基礎式は (3.2.12) 式であり、左辺は発熱項で、第一項はマシュルーム成長に伴 う発熱 (凝固潜熱他)、第二項は酸素により生じる火点からの 輻射熱、第三項は溶鋼とマッシュルーム間の伝熱である。こ れに対して右辺は冷却項で、第一項は内管ガス (酸素) 顕熱 による冷却、第二項は外管ガス (LPG 等)の顕熱・潜熱 (分 解熱)による冷却である (図 73)。



図 72 2 重管羽口の羽口健全域 (文献 65) による)

ここで、Tは温度 (K) であり下添えのLは溶鋼、MRはマッ シュルームを示す。t は時間 (s)、C_{PL} は溶鋼比熱 (J/ (kg・ K))、 w_{MR} はマッシュルームの質量 (kg)、Q_L は凝固潜熱 (J/kg)、Q_{BHS} は火点からの輻射熱 (W=J/s) である。また、 h_{MR} は溶鋼とマッシュルーム間の熱伝達率 (W/ (m²・K))、 A_{MR} はマッシュルーム表面積 (m²)、 Δ Hog は外管ガスの分解 熱 (J/Nm³) であり、V はガス流量 (Nm³/s)、C_{Pg} は気体の 比熱 (J/ (Nm³・K))、 Δ T は気体のマッシュルーム内での温 度変化 (K) であり、下添えの IG は内管ガス、OG は外管ガ スである。

火点からの輻射熱は図74のように酸素ガス流量に比例し、 また、右辺第一項の酸素ガス顕熱による冷却熱と相殺されて いるという実験結果がある⁶⁶⁾。



図73 2重管羽口周囲の熱的条件(文献 66) による)



図 74 火点からの輻射熱、酸素ガス顕熱による冷却熱と酸素ガス流量と の関係(文献 ⁶⁶⁾ による)

3.2.8 気泡上昇速度

液体内での気泡直径 d_Bなる単一気泡の浮上速度 u_B (m/s) は、浮力と液体の抵抗力の釣り合いである (3.2.13) 式から、 (3.2.14) 式で表すことができる。ここで C_D は抵抗係数であ る。

$$\frac{4}{3}\pi \left(\frac{d_{\rm B}}{2}\right)^{3} \left(\rho_{\rm L} - \rho_{\rm g}\right) \mathbf{g} = C_{\rm D}\pi \left(\frac{d_{\rm B}}{2}\right)^{2} \frac{1}{2}\rho_{\rm L} u_{\rm B}^{2}$$
.....(3.2.13)

$$u_{\rm B} = \left(\frac{4gd_{\rm B} (\rho_{\rm L} - \rho_{\rm g})}{3C_{\rm D} \rho_{\rm L}}\right)^{1/2} \approx \left(\frac{4gd_{\rm B}}{3C_{\rm D}}\right)^{1/2} \cdots (3.2.14)$$

抵抗係数は球形の場合、レイノルズ数により図75のように 変化し、各レイノルズ数の範囲で次式のように整理され、そ れぞれの場合の浮上速度は(3.2.15)式で表される⁶⁸⁾。

$$\left. \begin{array}{c} {\rm Re} < 1 \quad {\rm C_D} = 24 / {\rm Re} \quad ({\rm Stokes} \, \mathcal{O} \ensuremath{\mathbb{C}} \ensuremath{\mathbb{C}} \ensuremath{\mathbb{C}} \ensuremath{\mathbb{C}} = 24 / {\rm Re} \quad ({\rm Stokes} \, \mathcal{O} \ensuremath{\mathbb{C}} \ensuremath{\mathcal{O}} \ensuremath{\mathbb{C}} \ensuremath{\mathbb{C}}$$

$$Re < 1 \quad u_{B} = \frac{d_{B^{2}} (\rho_{L} - \rho_{g}) g}{18 \,\mu_{L}}$$

$$30 < Re < 300 \quad u_{B} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_{L} - \rho_{g})^{2} g^{2}}{\rho_{L} \,\mu}\right]^{1/3} d_{B}$$

$$1000Re < 150000 \quad u_{B} = \left[\frac{3d_{B} (\rho_{L} - \rho_{g}) g}{\rho_{L}}\right]^{1/2}$$

$$(3.2.15)$$

また、キノコ型の笠状の場合にはレイノルズ数によらず C_D は2.80となるため、簡単に (3.2.16) 式で計算することもでき る⁶⁹⁾。



気泡直径を用いない形では、ガス流量 qg (m³/s) を用いた (3.2.17) 式も提示されている⁷⁰⁾。

$$\mathbf{u}_{\rm B} = \frac{0.44 \; (\mathbf{q}_{\rm g} \times \mathbf{g}^2)^{1/5}}{(0.26 \; (\frac{\rho_{\rm L}}{\rho_{\rm g}})^{0.07})^2} \dots (3.2.17)$$

尚、気泡滞留時間を考える場合には、気泡塔を形成する液体自体の上昇速度 u_L (m/s) も考慮する必要があるが、これは数値計算による流動解析結果を回帰して求めた (3.2.18)式⁷¹⁾で計算できる。

$$u_{L} = 19.9 \times \frac{q_{g}}{d_{v}^{2}} \times (\frac{g \times dv^{5}}{q_{g}^{2}})^{0.24} \times (\frac{hv}{dv})^{0.20} \dots \dots (3.2.18)$$

ここで、hv は浴深 (m)、dv は浴直径 (m) である。

また、気泡上昇域 (気泡塔) 面積 A_P (m²) を用いた、 (3.3.19) の実験式も得られている ⁷²⁾。

さらに、無次元流速、アスペクト比、無次元ガス流量の関係である (3.2.20) 式と実験値との対比から (3.2.21) 式も導出 されている⁷³⁾。尚、q'gは平均深さと温度で補正したガス流量 (m³/s) である。

$$\frac{u_{\rm L}h_{\rm V}^2}{q'_{\rm g}} = c \; (\frac{h_{\rm V}}{r_{\rm V}})^{\rm a} (\frac{q'_{\rm g}^2}{gr_{\rm V}^5})^{\rm b} \cdots (3.2.20)$$

3.2.9 スパウトアイ (プルームアイ)

底吹きされたガスによる気泡塔の自由表面での断面を プルームアイ (plume eye) と呼ぶ。この部分をスパウト (spout)、スラグを除去して自由表面が露出した部分をスパ ウトアイ (spout eye) と呼ぶ場合もある (図 76)。この領域で ガス/メタルが接触するため、取鍋脱ガスが盛んな欧米で主 に研究がおこなわれている。

プルームアイ面積 (Ase; m²) に対しては、水ー油系、水銀 ー油系や溶鋼ースラグ系の実験結果⁷⁴⁾ に基づく (3.2.22) 式 のような回帰式⁷⁵⁾ がある。ここでhsはスラグ厚 (m) である。

$$\frac{A_{se}}{(h_v + h_s)} = 0.02 \; (\frac{q_g^2}{g \times hv^5})^{0.375} \cdots (3.2.22)$$

一方、この領域のエネルギーバランスに基づき無次元式を 立てると (3.2.23) 式となる。ここでA_Pは図77で示したプルー ム面積 (m²) で、 u_L は 3.2.7 節で示した気泡塔を形成する液体自体の上昇速度である。また、 $\Delta \rho$ はバルク液体 (溶鋼) と被覆液体 (スラグ) の密度差である。

$$\frac{\mathbf{A}_{se}}{\mathbf{A}_{p}} = \mathbf{a} + \mathbf{b} \; (\frac{\rho_{L}}{\Delta \rho} \times \frac{\mathbf{u}_{L}^{2}}{\mathbf{g} \mathbf{h}_{s}})^{1/2} \cdots (3.2.23)$$

図 78 には (3.2.23) 式により各種実験値を整理した結果を 示すが、良く対応している。

この結果を回帰して (3.2.24) 式が得られている 76)。

ここで、uLは (3.2.25) 式を用い、気泡塔のコーンアングルを12°としている。

$$\frac{A_{se}}{hv^2} = 0.574 \times \left(\frac{\rho_L}{\Delta\rho} \frac{u_L^2}{gh_s}\right)^{0.62} - 0.15 \dots (3.2.24)$$

$$u_{L} = 17.4 \times q_{g}^{0.244} \times (\frac{\rho_{g}}{\rho_{L}})^{0.0218} \times h_{V}^{-0.08} \dots (3.2.25)$$

(次号 Vol.15 No.9 に続く)



図 76 スパウトアイ (プルームアイ)の生成



図 77 スパウトアイの構造(文献 76)による)



図 78 (3.2.23) 式による各種実験値の整理(文献 76) による)

参考文献

- 46)小沢泰久,森一美,佐野正道:鉄と鋼,67 (1981), 2655.
- 47) 小沢泰久, 森一美:鉄と鋼, 68 (1982), 90.
- 48) 小沢泰久, 森一美:鉄と鋼, 68 (1982), 98.
- 49) 石橋政衛, 山本里見: 鉄と鋼, 65 (1979), A133.
- 50) 井口学,竹内博明,森田善一郎:鉄と鋼,76 (1990), 699.
- 51) 井口学,川端弘俊,森田善一郎,中島敬治,伊藤陽一: 鉄と鋼,80 (1994),365.
- 52) 川上正博, 富本登, 伊藤公允: 鉄と鋼, 68 (1982), 774.
- 53) 佐野正道, 牧野浩, 小沢泰久, 森一美: 鉄と鋼, 72 (1986), 1552.
- 54) 井口学, 細原聖司, 古賀敏之, 山口竜介, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), 1778.
- 55) 加藤嘉英,中西恭二,野崎努,鈴木健一郎,江見俊彦:鉄と鋼,68 (1982),1604.
- 56) 佐野正道, 森一美:鉄と鋼, 60 (1974), 348.
- 57) L.Davidson and E.H.Amick, Jr. : AIChE Journal, 2 (1956), 337.
- 58) K.Mukai : ISIJ Int., 32 (1992), 19.

- 59) 向井楠宏:高温融体の界面物理化学,アグネ技術セン ター,(2007),113.
- 60) 佐野正道,森一美,藤田康久:鉄と鋼,65 (1979), 1140.
- 61)加藤嘉英,野崎努,鈴木健一郎,中西恭二,永井潤:
 鉄と鋼,65 (1979),A137.
- 62) 甲斐幹,大河平和男,樋口満雄,平居正純:鉄と鋼,68(1982),1964.
- 63) 青木裕幸,石松宏之,宮本健一郎,瀧川家光:材料と プロセス,11 (1998),747.
- 64) 片桐衆,小沢泰久,森一美,佐野正道:鉄と鋼,73 (1987),2206.
- 65) 脇元博文,山元勇夫,石橋政衛,山本里見,宮崎喬:鉄と鋼,66 (1980), s242.
- 66) 岸本康夫:日本鉄鋼協会第24回鉄鋼工学セミナーテキ スト第3分冊,(1998),33.
- 67) C.Xu, Y.Sahai and R.I.L.Guthrie : Ironmaking and Steelmaking, 11 (1984), 101.
- 68)谷口尚司,八木順一郎:材料工学のための移動現象論, 東北大学出版会,(2001),43.
- 69) D.W. van Frevelen and P.J.Hoftijzer : Chem. Eng. Prog., 46 (1950), 29.
- 70) 井口学,出本庸司,菅原直也,森田善一郎:鉄と鋼,78 (1992),407.
- 71) 沢田郁夫, 大橋徹郎: 鉄と鋼, 73 (1987), 669.
- 72) 佐野正道, 森一美:鉄と鋼, 68 (1982), 2451.
- 73) D.Mazumdar : Metall. Trans. B, 33B (2002) , 937.
- 74) K.Yonezawa and K.Schwerdtfeger : Metall. Trans. B, 30B (1999), 411.
- 75) Subagyo, G.A.Brooks and G.A.Irons : ISIJ Int., 43 (2003), 262.
- 76) K.Krishnapisharody and G.A.Irons : Metall. Trans. B, 37B (2006), 763.

(2010年3月25日受付)