鉄鋼製造プロセスと混相流^{*}

Multiphase Flows in Ironmaking and Steelmaking Processes

井 口 学^{**}
IGUCHI Manabu

山 本 富士夫[†]
YAMAMOTO Fujio

植 村 知 正^{***}
UEMURA Tomomasa

森 田 善一郎^{††}
MORITA Zen-ichiro

Abstract Multiphase flows are very popular in ironmaking and steelmaking processes and are characterized as follows : (1) The temperature of fluids in metallurgical reactors is higher than about 1500℃, hence measurements of transport phenomena (fluid motion, heat and mass transfer) are very difficult. (2) The flow in the reactors is highly turbulent (turbulence components are usually larger than mean flow values) and chemical reactions take place at the same time. Many “cold model” experiments have been carried out due to the difficulty in doing measurements under realistic conditions. Water, oil (silicone oil, pentane, liquid paraffin, etc.) and metals with low melting temperatures (mercury, Wood’s metal, etc.) are used as working fluids. Transport phenomena encountered in ironmaking and steelmaking processes (hot metal pretreatment, converter, second refining processes, etc.) are covered here and previous experimental and theoretical results on this subject are reviewed.

Keywords : Multiphase Flow, Ironmaking, Steelmaking, Injection, Momentum Transfer, Heat Mass Transfer, Bubbling Jet

1. はじめに

ベッセマーによって1856年に開発された酸性底吹き転炉¹⁾にはじまり現在国家的プロジェクトとして鋭意開発が進められている鉄浴式溶融還元法^{2)~5)}に至るまで、鉄鋼製造分野で

は空気、酸素、窒素、アルゴンなどのガスの吹込みだけでなく、ガスとともに石灰、ソーダ灰、石炭、鉄鉱石などの粉粒体の浴内への吹込みを伴う多くの吹練操作が行われている^{6)~9)}。ガス吹込みの主な目的は浴の均一混

* 1992.1.28 受付

** 大阪大学工学部材料開発工学科 〒565 吹田市山田丘 2 - 1 TEL(06)877-5111(内線4431)

*** 大阪大学基礎工学部機械工学科

† 福井大学工学部機械工学科

†† 大阪大学工学部材料開発工学科

合と反応の促進にあり、これらの操作はインジェクション冶金と総称されている^{6),7)}。鉄鋼製造プロセスにおける反応容器内の流れ場の特徴の一つは化学工学、機械工学などの分野で対象とする管の直径と長さの比が通常10のオーダーよりも大きいのにに対して1のオーダーの点にある。すなわち反応容器内では主流の方向に発達した流れ場といったものは形成されないと考えてよい。浴内の流れ場は気液2相流あるいは気液固3相流になるが、浴の温度が約1500℃以上と非常に高いために、吹込まれた常温のガスは熱伝達により急激に膨張する。また溶融した金属の密度が大きいためにガスの上昇に伴う静水圧変化による膨張も無視できない。さらにガスはより高い反応効率を目指して一般に過剰に吹込まれるために、浴内の流れ場は非常に激しい乱流場になっている⁸⁾。

約1500℃を越える溶融金属の流動速度を測定する方法は皆無といっても過言ではなく、わずかに浴表面にトレーサーを浮かべることによって¹⁰⁾、あるいは円板の流動抵抗を利用して平均速度を求める試みがなされているにすぎない¹¹⁾。また気泡の流動特性の測定によく用いられる電気探針法も高温における探針の溶損や絶縁物の問題が残されている¹²⁾。流れ場に関する計測が十分でないため熱伝達や物質移動の系統的評価もなされているとはいえない。このような計測上の困難からコールドモデル実験と称される水あるいは低融点溶融金属である水銀、ウッドメタルなどを用いた実験が活発に行われている⁸⁾。水が用いられるのは動粘度が溶鋼の値によく似ているためである。上記研究成果は日本鉄鋼協会の“鉄と鋼”、“ISIJ International”をはじめ、“日本金属学会誌”、“Trans JIM”、“Metallurgical Transactions B”、“Ironmaking and Steelmaking”、“Steel Research”などの学術雑誌に発表されている。

反応に関する研究成果の紹介は別の機会に譲るとして、本稿ではガス吹込みを伴う反応容器内の輸送現象（ガスと液体の流動特性、

熱伝達と物質移動）に着目し、主としてコールドモデル実験で得られた成果について紹介する。

2. 流動現象

鉄鋼製造プロセスにはFig. 1に示すような多様な形式の反応容器があるが、ここでは最も基本的な流れ場として、底吹き転炉のモデルである円筒容器内の液体中へのガス吹き込みにより形成される気液2相流を対象とする。転炉とは周知のように、酸素ガスなどを吹込み、磷、硫黄、炭素などの不純物の除去を行う反応容器である。他の容器については文献^{1),8)}を参照されたい。

底吹き円筒容器内の流れ場はFig. 2に示すように気液分散部とそれを取り巻く逆流循環流部とから構成される。ガスの吹込み条件としては底吹きに限定し、ガスが気泡になって上昇するような状態すなわちBubbling状態を取扱う^{6),7)}。Bubbling状態は吹込みガス流量 Q_g により、さらに低ガス領域（気泡の平均直径 d_B が Q_g に依存しない）、中間ガス領域（ d_B が Q_g とともに増加する）、高ガス領域

Fig. 1 Ironmaking and steelmaking processes

Fig. 2 Experimental apparatus

域 (d_B が Q_g の増加につれて逆に減少する)に分類できる¹³⁾。ノズル出口のガスの線流速が音速を超えたときに現れる Jetting 状態については改めて言及したい。

2. 1 上昇気泡噴流の定義

容器の底の中心に設けたノズル (単孔ノズル、多孔ノズル、多孔質ノズル) から鉛直上方に吹込まれたガスは気泡群となって上昇していく。ノズル出口で形成される気泡の平均直径の推算式は佐野らの論文に詳しい¹³⁾。ガスの吹込みによって形成される気液分散部はガスの慣性力が無視できるほど小さければブリュームと呼んでよい¹⁴⁾。しかし無視できなければ、ノズル出口近傍では噴流の性質が、ノズルから離れたところではブリュームの性質が現れる。慣性力が無視できなくなるのは次式で定義される修正フルード数 Fr_m がおよそ 1 よりも大きい場合である¹⁵⁾。

$$Fr_m = \rho_g Q_g^2 / \rho_L g d_n^5 \quad (1)$$

Fr_m はガスがノズルを出るときに有する慣性力と気泡に働く浮力との比、 ρ_g はガスの密度、 ρ_L は液体の密度、 g は重力加速度、 d_n はノズル径である。したがって $Fr_m \geq 1$ のとき、気泡分散部を単にブリュームと呼ぶには抵抗がある。ある流体を密度差のある同じ流体中へ吹出したときに形成される流れ場に関して、噴流とブリュームおよびこれら二つの流れの移行領域を含めた全体が浮力噴流と呼ばれていることになり¹⁶⁾、ここでは気泡噴流と呼ぶことにする。

2. 2 気泡噴流の旋回

気泡は常に真上に向かって上昇するわけではなく、ある条件下で容器中心軸の周りを旋回しながら上昇することがある^{17), 18)}。この場合の旋回は Fig. 3 に模式的に示したように、その発生機構の相違に基づき 2 種類に大別される¹⁸⁾。一つは浴深が浴径の約 1 倍までの比較的浅い場合に起こり、気泡噴流の半径方向変位は比較的小さく、旋回周期は短いといった特徴がある。また浴内の液体はスロッシング^{19), 20)} に似た挙動を示す。これを第 1 種旋回と呼ぶ。第 1 種旋回は浅水波と深水波の境界である $H_L/D = 0.3$ を境にして 2 つのモードに分けられる。深水波モードの旋回周期 T_s はスロッシングの旋回周期^{19)~21)} にはほぼ一致する。

他の一つの旋回は浴深が浴径の約 2 倍以上のところで起こり、気泡噴流の半径方向変位は非常に大きくなって、側壁近くまで接近し、旋回周期はかなり長くなる。これは逆流循環部に現れるリング渦の崩壊に伴う現象であり、第 2 種旋回と名付けた。

このような旋回現象によって浴内に投入された物質が均一に分散するまでの時間として定義される均一混合時間⁸⁾ は著しく短くなり、反応促進の面では有利であるが、容器壁の浴損が大きくなるといった好ましくない面もある。

Fig. 3 Classification of swirl motions in a cylindrical bath

2. 3 上昇気泡噴流の気泡特性(単孔ノズルの場合)

気泡噴流中の気泡の挙動は以下の諸量によって記述できる。(1) 気泡頻度 f_B 、(2) ガスホールドアップ (ボイド率) α 、(3) 平均気泡上昇速度 u_B 、(4) 気泡の形状寸法 (平均直径 d_B あるいは平均貫通距離、形状係数など)

これらは電気探針法、シュリーレン法、高速度ビデオカメラを用いた画像解析などの手法によって求めることができ、(1) ノズル径 d_n 、(2) 吹込みガス流量 Q_g 、(3) 液体と気体の密度 ρ_L 、 ρ_g 、(4) 表面張力 σ 、(5) 液体の粘度 μ 、(6) 液体と気体の温度差などの関数となる。特に液体の密度が大きい場合や温度差が大きい場合には気泡が上昇しながら膨張するので、現象は複雑になる²²⁾。

流れ場が乱流状態にあるときの気泡特性に関する従来の研究はおもに水浴^{23)~28)}、水銀浴^{24), 29)~32)}、ウッドメタル浴³³⁾を用いて活発に行われており、Bubbling 状態における気泡特性はほぼ明らかにされている。ただし高温の溶鉄や溶銅中における気泡特性は前述のように計測上の困難さにより、十分な成果は得られていない¹²⁾。

いずれの浴においてもガスホールドアップ α の中心軸上値 α_{cl} が約50%よりも小さい軸位置 ($z \leq z_0$) では、 α と気泡頻度 f_B はつぎの正規分布で近似できる。

$$\alpha = \alpha_{cl} \exp[-\ln 2 r^2 / b_\alpha^2] \quad (2)$$

$$f_B = f_{B,cl} \exp[-\ln 2 r^2 / b_f^2] \quad (3)$$

ここで z はノズル出口からの距離、 z_0 は $\alpha_{cl} = 50\%$ となる軸位置²⁴⁾、 r は半径座標、 b_α 、 b_f は α と f_B の半値半幅、添字 cl は容器中心軸上の値を表す。浴内の気泡噴流部は Fig. 4 に示すように運動量支配領域、遷移領域、浮力領域、表面領域に分けられる。 α_{cl} 、 $f_{B,cl}$ 、 b_α 、 b_f ならびに気泡の平均上昇速度 u_B に対する推算式が d_n 、 Q_g 、 ρ_L 、 ρ_g 、 σ 、の関数として導かれている^{27), 28), 32)}。液体の粘度の影響については文献^{33)~35)}を参照されたい。

Fig. 4 Classification of the flow field in a cylindrical bath

著者らは水-空気系と水銀-空気系の実験結果に基づき、密度比 ρ_L / ρ_g が両気泡噴流の間 ($800 < \rho_L / \rho_g < 12000$) にある任意の気泡噴流の気泡特性に対する推算式を提案し、その妥当性を水-ヘリウム系²⁴⁾、ウッドメタル-窒素系気泡噴流³⁶⁾と比較して確認している。ただしこれらの推算式によって高温溶融金属中の気泡特性がそのまま推算できるわけではない。気液間の温度差と静圧変化に伴う気泡の膨張を考慮した推算式を導出する必要がある。

2. 4 気泡に誘起される液体の流動現象

2. 4. 1 単孔ノズルの場合

液体の流動特性の測定はおもに熱膜流速計やレーザードップラー流速計 (LDV) を用いて行われている³⁷⁾。ただし周知のように熱膜流速計は乱れ強さが25%を越えるような激しい乱流場の計測には適していない。またLDVも液体が透明である場合に限られる。温度が約750℃ (キュリー点) までの高温溶融金属の流動速度の測定を対象として永久磁石を利用したプローブが開発されているが^{38), 39)}、精度については十分検討されていない。このプローブでは溶鋼の流動速度は測定できない。

レーザードップラー流速計を用いた従来の研究は水-空気系気泡噴流の外側の気泡のほとんど存在しない逆流循環領域を対象として

おり、気泡噴流内の流動特性に関する報告は少ない^{15), 40)}。

著者らは気泡噴流内の平均速度だけでなく3方向の乱れ特性(乱れ強さとレイノルズ応力)を測定し、軸方向の平均速度と乱れ強さに対する推算式を提案している^{41), 42)}。

Fig. 5 に座標系を示す。軸方向に z 、半径方向に r 、周方向に θ をとっており、平均速度を $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ 、乱れの rms 値を u'_{rms} 、 v'_{rms} 、 w'_{rms} と表す。浴中心軸上の平均速度 $\bar{u}_{cl}$ と乱れの rms 値 $u'_{rms,cl}$ の分布を Fig. 6 に示す。ノズルから離れるにつれて $\bar{u}_{cl}$ と $u'_{rms,cl}$ はともにゆっくりと減衰する。また乱れ強さ $T_{uc} = u'_{rms,cl} / \bar{u}_{cl}$ はいずれの Q_g に対しても約 40~50% となっている。噴流内の

Fig. 5 Coordinate system and velocity components in a cylindrical vessel

Fig. 6 Distributions of axial mean velocity and rms fluctuation on the centerline of the vessel

$\bar{u}$ の分布はいたるところではほぼ正規分布に従う。しかし、 u'_{rms} の分布は運動量支配領域 ($z \leq 70\text{mm}$) では正規分布に一致しないが、浮力領域 ($z \geq 100\text{mm}$) になると正規分布に従うようになる。この事実は、運動量支配領域の乱れの生成は主に周囲流体の巻き込み (entrainment) に基づいて行われ、浮力領域の生成は巻き込みだけでなく、気泡の後流 (wake) によっても生じることを意味している。

Fig. 7 の循環流領域における3方向の乱れの rms 値は従来からいわれているようにほぼ等しい値をとるが、気泡噴流内では、軸方向の乱れ成分が半径方向ならびに周方向乱れ成分の約1.6倍となっている。Fig. 8 に2次元のLDVを用いて測定した浮力領域にお

Fig. 7 Axial, radial and tangential rms fluctuation profiles in the buoyancy region ($z=139.8\text{ mm}$)

Fig. 8 The radial distributions of Reynolds shear stress in bubbling jet

るレイノルズ応力分布を示す。図中の実線は境界層近似とブシネスク近似に基づく運動方程式から導かれた値であり⁴³⁾、破線は单相流の自由噴流に対する値である¹⁶⁾。中心軸近傍における測定値と実線の一致は比較的良好である。レイノルズ応力が容器中心で零とならないのは、容器中心軸と噴流中心軸が一致していないためである。

流れ場に関する理論的研究としては円筒浴のはかに連続製造設備のタンディッシュ、モールドなどの流れ場を対象として、おもに $k-\epsilon$ モデルに基づく解析が行われている^{15), 40)}。これについては詳細な解説が沢田らによりなされている⁴¹⁾。ただし円筒浴の逆流循環部以外での実験結果との十分な検証は行われていない⁴⁵⁾。

また最近、浴鋼中の微小非金属介在物の除去が重要な課題となっているが^{46), 47)}、この場合にも $k-\epsilon$ モデルによる粒子移動の計算が行われている⁴⁶⁾。しかしながら、乱れ強さが平均流と同じあるいはそれ以上のオーダーである浴内の流れ場への $k-\epsilon$ モデルの適用については問題がある³⁷⁾。

2. 4. 2 多孔ノズルの場合

多孔ノズルからガスが吹込まれる場合も、ノズルから離れた浮力領域における平均速度は単孔ノズルの値に一致するが、乱れの rms 値はかなり小さくなる。すなわち、浮力領域の乱れ強さ T_{uc} は単孔ノズルの場合 $T_{uc} = 40 \sim 50\%$ であるのに対し、多孔ノズルの場合は約 30% から 40% となる^{42), 48)}。

2. 4. 3 多孔質ノズルの場合

Anagbo らは水浴中へ多孔質ノズルをとおしてガスを吹込んだときの気泡特性と液体の流動特性について調べている⁴⁹⁾。ノズルから遠く離れた軸位置におけるガスホールドアップと平均気泡上昇速度は単孔ノズルの場合の浮力領域に対して導かれた式²⁸⁾で精度よく近似できる。

2. 5 球の抵抗係数に及ぼす乱れ強さと乱れのスケールの影響

激しい乱流中を運動する固体の抵抗係数を知ることは反応容器内に吹き込まれた固体だけでなく溶湯中の非金属介在物やスクラップ等の動的挙動を考える上で重要な課題の一つである⁴⁶⁾。しかし、 C_D と T_u の関係に関する従来の実験結果はまちまちであり^{50)~53)}、今後の解明が待たれる。

3. 熱伝達

3. 1 気泡噴流中に浸漬した固体からの熱伝達

浴内へ投入された固体の溶解がガス吹込みにより著しく促進されることが知られている。このような状況下の熱伝達をガスホールドアップや気泡頻度などの気泡特性に着目して整理する方法も試みられているが、系統的に整理するには至っていない^{54), 55)}。著者らは固体を取り巻く液体の流れに着目しつつ熱伝達データの整理を行った。

3. 1. 1 球の場合

水で作製した球の水-空気系気泡噴流中における溶解挙動を観察し (Fig. 9)、半径の減少率から球の周りの局所ヌッセルト数 Nu_θ を求め、球の前面における値を Merk⁵⁶⁾ の解と比較することにより測定法の妥当性を確認した^{57), 58)} (Fig. 10)。 Nu_θ を球表面全体にわたって平均して平均ヌッセルト数 Nu を求めた。

Fig. 9 Time-dependent contour lines of a melting ice sphere

Fig. 10 Comparison of measured and predicted values of local Nusselt number Nu_θ in water jets ($d_n=0.005$ mm)

Fig. 11 Comparison of Nu between the present measured values and Whitaker's empirical formula

Fig. 12 Comparison of Nu between the present measured values and empirical formula

なお球への近寄り流れの乱れ強さを变化させるため、容器の底のノズルから水を吹き込んだときに形成される水噴流中にも氷球を浸漬した。Fig. 11に示すように、平均ヌッセルト数 Nu に及ぼす乱れ強さの影響はかなり強いことが判明した。そこで Whitaker の式⁵⁹⁾をもとにし、レイノルズ数 $Re_p (= \bar{u}_c d_0 / \nu_b)$ 、プラントル数 Pr 、乱れ強さ T_u の関数として推算式を提案した。(Fig. 12)

3. 1. 2 直方体物体の場合

直方体物体の平均ヌッセルト数 Nu は、球に対する上記推算式中の直径 d_0 を球表面積相当直径 d_{02} を用いることによって精度よく近似できる⁶⁰⁾。角が存在すると流れの剥離が起きるが、乱流混合が激しいと剥離が抑制され、しかも熱伝達に及ぼす平均流の寄与に比べて乱れ成分の寄与が大きくなり、熱伝達は直方体の周りで一様化することになる⁵⁸⁾。この事実に基づけば、気泡噴流内においては角の無い物体はもとよりのこと他の角のある物体の平均ヌッセルト数 Nu も球の Nu の推算式における d_0 を d_{02} で置き換えることにより近似できるものと考えられる。

3. 2 気泡噴流における気泡と液体間の熱伝達

鉄鋼製錬プロセスにおいては、ガスは通常浴温よりも低い温度で吹込まれる。したがって、ノズル出口でマッシュルームと呼ばれる多孔質の塊ができることがある^{61)~63)}。これに関する研究は比較的多いが、ガスがノズル出口で気泡になり、上昇する過程において浴の混合に及ぼす膨張効果の定量的評価はなされていない⁷⁾。また気泡と液体間の熱伝達率についてもよくわかっていない。

著者らは単孔ノズルから低温の液体(空気、ヘリウム、窒素)を室温近傍の水の中へ吹込み、熱電対を用いて気泡と液体間の熱伝達を調べるとともに気泡頻度とガスホールドアップ、気泡上昇速度を電気探針法で測定し、気泡の膨張の様子を高速度ビデオカメラで観察した。熱伝達率の値は固気間の熱伝達率とほぼ等しいオーダーの値となっており、ペクレ数の関

Fig. 13 Relation between Nu_{mp} and $Pe/(1+\kappa)$

数として整理でき、Kronig-Brink が求めた Hadamard 型の流れ場を有する流体球の熱伝達率よりもかなり大きくなる (Fig. 13)。

4. 物質移動

4. 1 固-液間の物質移動

製錬容器の浴内に浸漬した固体からの物質移動に関する従来の研究はおもに円柱を対象とし、半径の減少率から Sherwood 数をレイノルズ数とシュミット数の関数として導いている⁽⁶⁵⁾⁻⁽⁶⁸⁾。しかしながら上に述べたように熱伝達が乱れ強さに大きな影響を受けることから、物質移動についても乱れ強さを考慮した議論が必要である。著者らは底吹き気泡噴流内に浸漬した白金製の平板と球からの物質移動を電気化学的方法によって測定した。溶液は 0.01 mol FeSO₄ (0.1 N H₂SO₄ 中) である。限界電流⁽⁶⁹⁾の現れる電位の範囲では

の反応は拡散律速となる。すなわち電流値は白金電極表面に到達する Fe²⁺ イオンの量で決まる。したがって、限界電流を測定すれば局所の物質移動が求まる。

平板の物質移動係数は Pohlhausen の式⁽⁷⁰⁾をもとに乱れ強さの影響を考慮した次式で整理できる (Fig. 14)。

$$Sh = 0.664 Re^{(0.5+0.107T_u)/3} Sc \quad (5)$$

$$10^2 < Re < 10^4, 0.4 < T_u < 5$$

Fig. 14 Comparison of the measured values of Sherwood number for plate with calculated values

Fig. 15 Comparison of the measured values of Sherwood and Nusselt numbers for sphere with calculated values based on Eq. (6)

ここで Sh はシャーウッド数、 T_u は乱れ強さ、 Sc はシュミット数である。

球の物質移動係数は Ranz-Marshall の式⁽⁷¹⁾をもとに乱れ強さの効果を平板の場合と全く

同じ関数形で考慮した次式

$$Sh = 2 + 0.60Re^{(0.5+0.10Tu)/3} Sc^{-1/3} \quad (6)$$
$$10^3 < Re < 10^4, 0.3 < Tu < 0.5$$

で近似できる (Fig. 15)。また同図に示した熱伝達係数の測定値も式 (6) で近似できる。

式 (5)、(6) と同じような整理法で円柱の物質移動係数もよくまとめられる⁷²⁾。

4. 2 気-液間の物質移動

気液間の物質移動については CO₂ ガスをを用いた研究がある。詳細については文献^{73)~75)}を参照されたい。

4. 3 液-液界面におけるスラグ滴の巻き込み

精練プロセスでは通常メタル層の上にスラグを置き、処理を行っているが、条件によってはスラグがメタル中へ巻き込まれ、製品の品質が落ちる。スラグ滴の発生条件の解明と巻き込みの防止策に関する研究がおもにコールドモデルを用いて行われている^{76), 77)}。

5. 画像解析

底吹き円筒浴内に吹込まれたガスが気泡となって上昇していく様相と気泡に誘起される液体の速度と乱れを同時に求める試みが画像解析の手法を用いて行われている^{78)~80)}。3次元解析手法の開発が切望される。

6. おわりに

鉄鋼製造プロセスにみられる種々の反応容器内の輸送現象のうち、最も基本的なモデルとしてガスの吹込みを伴う円筒浴内の輸送現象に着目し、主としてコールドモデル実験で得られた混相流に関する研究成果を紹介した。実際の浴内の流れ場は極めて複雑であり、これらの結果をそのまま実操業に適用するわけにはもちろんいかないが、少なくともどのようなパラメータが重要であるのかの指標は与えられる。実操業に近い状況下の輸送現象を模擬しうるホットモデル実験を可能にするためには、流速計をはじめとする高温場での計測法の開発が不可欠である。

参考文献

- (1) 日本金属学会編：鉄鋼製錬、丸善(1985)。
- (2) 山田統明ほか4名：CAMP-ISIJ, 4, 57 (1991)。
- (3) 成田貴一：溶融還元製鉄法、神戸製鋼所技術開発本部(1989)。
- (4) 片山裕之：日本学会会議公開講演会、新材料創製のためのプロセッシング講演概要1(1991)。
- (5) 鉄鋼基礎共同研究会界面移動現象部会報告書、日本鉄鋼協会(1991)。
- (6) 森一美、佐野正道：鉄と鋼、67-6, 672 (1981)。
- (7) 森一美ほか2名：鉄と鋼、69-15, 1714 (1983)。
- (8) 日本鉄鋼協会編：第100・101回西山記念技術講座、攪拌を利用した最近の製鋼技術の動向、日本鉄鋼協会(1984)。
- (9) 日本鉄鋼協会共同研究会熱経済技術部会編：鉄鋼製造における模型理論とスケールアップ、日本鉄鋼協会(1986)。
- (10) T. Lehner et al.: Scaninject II, 2nd Int. Conf. Injection Metallurgy, Lulea, Sweden, 22(1980-6)。
- (11) T. C. Hsiao et al.: Scand. J. Metall., 9, 105 (1980)。
- (12) M. Kawakami et al.: Proc. 6th Int. Iron Steel Congress, 1, Nagoya, 429(1990)。
- (13) 佐野正道ほか2名：鉄と鋼、63-14, 2308(1977)。
- (14) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック、500, 丸善(1987)。
- (15) J. Szekely: Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press (1979)。
- (16) 石垣博：日本機学会論文集B編、50-453, 1240(1984)。
- (17) 加藤嘉英ほか4名：鉄と鋼、68, 1604 (1982)。
- (18) 井口学、森田善一郎：日本金属学会秋期大会シンポジウム講演概要集, p. 114 (1990-9)。

- (19) 木村明憲, 大橋弘隆: 日本機化学会論文集 (第1部), 44, 3024(1978).
- (20) 木村明憲, 大橋弘隆: 日本機化学会論文集 (第1部), 44, 3446(1978).
- (21) 日本流体力学会編: 流体力学ハンドブック, 720, 丸善(1987).
- (22) M. Iguchi et al.: Proc. Int. Conf. Multi-phase Flows '91-Tsukuba, 2, 387(1991).
- (23) 川上正博ほか2名: 鉄と鋼, 68, 774(1982).
- (24) K.H. Tacke et al.: Metall. Trans. B, 16B, 263(1985).
- (25) A.H. Castillejos and J.K. Brimacombe: Metall. Trans. B, 18B, 659(1987).
- (26) S. Taniguchi et al.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28, 262(1988).
- (27) 井口学ほか3名: 鉄と鋼, 76, 840(1990).
- (28) 井口学ほか3名: 鉄と鋼, 77, 1426(1991).
- (29) M. Sano et al.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 26, 298(1986).
- (30) A.H. Castillejos and J. K. Brimacombe: Metall. Trans. B, 20B, 595(1989).
- (31) 川上正博: 昭和62年~平成元年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書, (1990).
- (32) 井口学ほか3名: 鉄と鋼, 78-3掲載予定(1992).
- (33) T. Miyahara et al.: J. Chem. Eng. Jpn., 21, 620(1988).
- (34) T.A. Engh and M. Nilmani: Metall. Trans. B, 19B 83(1988).
- (35) M. Iguchi et al.: Proc. 6th Int. Iron Steel Congress, Nagoya, 1, 469(1990).
- (36) Y.K. Xie et al.: Proc. 6th Int. Iron Steel Congress, Nagoya, 1, 421(1990).
- (37) 森田善一郎, 井口学: 日本学術振興会製鋼第19委員会鋼中非金属介在物小委員会提出資料, 19委介在物-40, 1(1991-9).
- (38) R. Ricou and C. Vives: Heat Mass Transfer, 25-10, 1579(1982).
- (39) H.-C. Lee et al.: Metall. Trans. B., 15B, 734(1984).
- (40) J. Szekeely et al.: Ladle Metallurgy, Springer Verlag(1989).
- (41) 井口学ほか2名: 鉄と鋼, 76, 699(1190).
- (42) 井口学ほか2名: CAMP-ISIJ, 4, 977(1991).
- (43) 井口学, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78, 66(1992).
- (44) 沢田郁夫ほか3名: 鉄と鋼, 77, 1234(1991).
- (45) O.J. Ilegbusi et al.: ISIJ International, submitted.
- (46) 谷口尚司: 鉄と鋼, 75, 187(1989).
- (47) 日本学術振興会製鋼第19委員会鋼中非金属介在物小委員会第1回(1990)~第7回(1991)提出資料, 日本学術振興会.
- (48) M. Iguchi et al.: Proc. Int. Conf. Multi-phase Flows '91 Tsukuba, 391(1991).
- (49) P.E. Anagbo and J.K. Brimacombe: Metall. Trans. B, 21B, 637(1990).
- (50) R. Clift et al.: Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press(1978).
- (51) 川端弘俊ほか3名: 風洞, 8, 46(1990).
- (52) R. Clift and W.H. Gauvin: Canad. J. Chem. Eng., 38, 189(1960).
- (53) A. Clamen and W.H. Gauvin: AIChE J., 15-2, 184(1969).
- (54) S. Taniguchi et al.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 23, 565(1983).
- (55) S. Taniguchi et al.: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 23, 571(1983).
- (56) H.J. Merk: J. Fluid Mech., 5, 460(1959).
- (57) 井口学ほか3名: 鉄と鋼, 73, 1496(1987).
- (58) 井口学ほか2名: 鉄と鋼, 74, 2106(1988).
- (59) S. Whitaker: AIChE J., 18, 361(1972).
- (60) 井口学ほか4名: 鉄と鋼, 75, 2031(1989).
- (61) S. Ohguchi and D.G.C. Robertson: Iron-making and Steelmaking, 10-1, 15(1983).
- (62) C. Xu et al.: Ironmaking and Steelmaking, 11-2, 101(1984).
- (63) 片桐衆ほか3名: 鉄と鋼, 73, 2206(1987).
- (64) 井口学ほか3名: 鉄と鋼, 78-3, 掲載予定(1992).

- (65) R.Kronig and J.C. Brink: Appl.Sci. Res.Sect.A2,148(1950).
- (66) 小坂岑雄, 蓑輪晋: 鉄と鋼, 53,983 (1967).
- (67) 鈴木鼎ほか2名: 鉄と鋼, 65,1131(1979).
- (68) 桜谷敏和, 森一美: 鉄と鋼, 69,60(1983).
- (69) T.Mizushima: Advances in Heat Transfer, 7,89(1971).
- (70) E.Pohlhausen: Z.AMM, 2,115(1921).
- (71) W.E.Ranz and W.R.Marshall, Jr.: Chem.Eng.Prog., 48,141,173(1952).
- (72) D. Mazumdar et al.: Steel Research, 61,339(1990).
- (73) 川上正博, 堂脇正市, 伊藤公允: 日本金属学会秋期大会シンポジウム講演概要集, p.123(1990-9).
- (74) 谷口尚司ほか2名: 鉄と鋼, 65,1455 (1979).
- (75) 別所永康ほか2名: 日本金属学会誌, 55-8,860(1991).
- (76) Z.Xiao et al: Chin.J.met.Sci.Technl., 3,187(1981).
- (77) 井口学ほか3名: CAMP-ISIJ, 4,980 (1991).
- (78) T.Uemura et al.: Proc.6th Int.Iron Steel Congress, 1,477(1990).
- (79) F.Yamamoto et al.: Proc.Int.Conf.Multiphase Flow 'Tsukuba, 1,251(1991).
- (80) 植村知正ほか2名: 第6回流れの計測大阪シンポジウム講演論文集, 62(1991).