

学 位 論 文 題 名

Fundamental study on behavior of bubbles
and fluid flow induced by injected bubbles
in metallurgical refining processes

（冶金精錬プロセスにおける気泡と気泡に誘起される
流れの挙動に関する基礎的研究）

学位論文内容の要旨

日本の鉄鋼業が国際競争力を維持するためには、その技術力を生かして、更なる品質の向上とコストダウンが求められる。中でも鉄鋼製造コストに及ぼす上工程の寄与は大きく、とりわけ超清浄鋼製造技術分野では、精錬工程がその品質の鍵を握る。溶銑予備処理、転炉や溶鋼処理など多くの精錬操作では、反応効率の向上と温度や成分の均一化のために気泡噴流を利用している。この操作を効率化することは処理時間の短縮（＝溶鋼温度降下の低減）や副原料原単位低減、高価なアルゴンガスの低減などに繋がり、品質やコストを大きく左右する。したがって従来から気泡噴流を利用した精錬操作の最適条件（吹き込み量、吹き込み位置、吹き込み深さ、容器形状など）の探索のためにコールドモデル実験や数値計算など、多くの試みがなされてきた。なかでもコールドモデル実験は現象の可視化が容易に出来、現象の理解に役立つことから、この手法を使って多くの知見と一定の成果が得られている。また、ナビエ・ストークス方程式と乱流モデルを用いた流れ場の数値予測は材料開発分野においても多くの適用例がみられるようになっている。

コールドモデル実験から得られた結果を製造現場に適用する際、実際のプロセスとの違いについて理論的に説明する必要に迫られることは多くある。にもかかわらず、それらのまとまった知見は意外に少ないように思われる。たとえば、実際のプロセスにおいては吹き込まれたガスと溶鉄の間には熱伝達があり、コールドモデルではその影響を通常無視している。第1章ではこの影響について円筒容器内水の中に低温ガスを底中央より吹き込むことでガスホールドアップ分布や気泡頻度などの気泡特性を電気探針法で調査した。併せて気泡温度変化を Micro-thermocouple を用いて直接測定することによって気液間熱伝達も調査した。その結果、気泡と液の熱伝達は非常に速く、ノズルの近傍でほぼ完了すること、気泡の膨張は縦方向よりも横方向に顕著に現れること、また気泡特性は、同質量流量の吹き込みとほぼ同じような挙動を示すことを明らかにした。気液間熱伝達を著す無次元式も提案した。以上の結果を第2章ではウッドメタル浴を用いて確認した。液体側の物性値は異なるにも関わらず、結果は水モデルを用いた場合と気泡特性に及ぼす影響や、気液間熱伝達に及ぼす影響は同様であり、実験値は、第1章で提案した無次元式をそのまま適用し、整理することが出来た。すなわち気液間熱伝達は、気体側の熱伝達に律束され、液

体の物性には依存しないことを確認した。実際の精錬操作では気泡噴流の吹き込みは底中央だけでなく、斜めや横など様々な方向から吹き込まれる。基礎的検討としては底中央に加えて、水平方向から吹き込んだ場合の挙動についての知見がさしあたり必要である。そこで第3章では、水平気泡噴流に及ぼす気液間熱伝達の影響について第1章と同様の低温ガス吹き込みの手法で調査した。気泡はノズル近傍で膨張するため、吹き込み方向へは分散しにくかった。噴流の軌跡を詳細に調べ、定式化した。低温ガス吹き込みの軌跡の場合、ノズルから遠ざかるにつれて、鉛直方向に上昇しようとする傾向が顕著（上昇速度もやや大）であり、気液間熱伝達が無い場合との違いがみられることを明らかにした。

また実際のプロセスではガス吹き込み羽口近傍にはマッシュルームと呼ばれるポーラス状の塊が出来ることがあり、これが生じた場合の気泡特性を調査しておくことは重要である。第4章では第1章で用いた実験装置でマッシュルーム生成を再現し、その生成過程を詳細に調査するとともに、それが生成した場合の気泡特性と気泡に誘起される流れを調査した。その結果、マッシュルームの生成過程と形状は、ノズル周辺材質の熱伝導率に強く依存すること、気泡特性は、生成前と生成後で極端に異なり、ガスホールドアップ、気泡頻度や気泡上昇速度などの気泡特性などを定量化した。さらに、多孔ノズルをマッシュルームモデルとして用い、その気泡噴流に誘起される流れを単孔ノズルと比較した。円筒浴内での循環量はマッシュルームモデルのほうが大きい、気泡噴流内の乱れ強さは単孔ノズルの方が大きかった。

鉄鋼製造現場でのプロセス改善場面において、気泡噴流に誘起される溶鉄の流速がどの程度なのかを大まかに推定したいことがよくある。第5章では適用範囲の広い、軸対称2次元系での液速度や気泡上昇速度分布を推定できる数学モデルについて検討した。従来のモデルはエネルギー保存則や運動量保存則などをベースとしているものが多く、実プロセスとの検証もやや曖昧なものが多かった。そこで本章では基礎方程式として連続の式と運動量保存則、構成方程式としてガスホールドアップ分布やその半値半幅に関する実験式を、気泡と液の相対速度を表すモデルとしてはスリップモデルとドリフトフラックスモデルを用いることで精度よく、簡便に計算できるモデルを提案し、実験値と比較した。液速度分布については水-空気系、水銀-空気系、ウッドメタル-水銀系でよい一致が得られた。気泡上昇速度分布においては、ドリフトフラックスモデルよりもスリップモデルの方がより実験値に近かった。

一方、計算機と数値シミュレーション技術の進歩により、単相流については、連続の式、NS 方程式と乱流モデルなどを用いて、複雑な形状のなかでの3次元流れの数値計算が一般に利用されているものの、容器内気液2相流の数値計算については実用段階にない。この分野での数値シミュレーション技術を確立させるためには、精度よい流れ場の実験値や乱流現象の解明が欠かせない。実際の溶鉄を使つての実験は流速測定に限界があることから、ウッドメタルを用いて第6章で平均流特性を、第7章で乱流特性をそれぞれ調査した。流速測定と乱流測定にはマグネットプローブを用いた。気泡中の流速測定ではプローブからの信号に気泡信号が混入するため、この信号を除去する独自の方法を開発し、流速測定と乱流測定を可能にした。電気探針法で測定した気泡特性は気泡形状にの違いに起因するガスホールドアップ分布の違いが気泡径の3倍程度の軸位置付近でみられたが、他は水-空気系の特性とほぼ同様であった。しかしながら平均流特性は水-空気系と同様であった。また半径方向乱れとレイノルズ応力は水-空気系よりも大きかった。また乱流構造の解析に

は4象限分類法を用いた。噴流の内部と外部とでは乱流構造は異なり、内部は **Inward interaction**, 外部は **Outward interaction** が乱流生成を生成していることが明らかとなった。これは水-空気系がいずれの場所でも **Ejection** が乱れを生成している結果とは異なっており、気泡形状の違いなどが影響した結果と考えられる。

以上

学位論文審査の要旨

主査	教授	井口	学
副査	教授	石井	邦宜
副査	教授	工藤	昌行
副査	教授	篠原	邦夫

学位論文題名

Fundamental study on behavior of bubbles and fluid flow induced by injected bubbles in metallurgical refining processes

(冶金精錬プロセスにおける気泡と気泡に誘起される
流れの挙動に関する基礎的研究)

現在日本の鉄鋼業は更なる国際競争力の維持努力を迫られている。品質の向上とコストダウンは終わりのない課題であり、中でも精錬工程での品質向上とコストダウンは企業収益への影響度が大きいため各方面で精力的な研究開発が継続されている。

本論文はこの精錬・製鋼分野における要素技術ともいえる攪拌コントロール技術に関する基盤研究であり、流動・伝熱・物質移動といった移動現象のみならず、独自の流体計測法の開発なども含まれ、次の如く多くのオリジナリティに富む内容である。またそれらの基本は物性値の違いなどをふまえてモデル実験で得られた知見をどのようにプロセス改善、装置改善に結びつけて行くべきか、適用するべきかを論じたいへん有益な内容と言える。

まず、実際のプロセスにおいて存在する、吹き込まれたガスと溶鉄の間の熱伝達が気泡噴流に与える影響は従来検討された例がない。著者らは気泡噴流場で従来曖昧に解釈されていた気液間熱伝達が攪拌特性に及ぼす影響を独自の計測法で定量化しながら、水のみならず熔融金属（ウッドメタル）でも明らかにしている。熔融金属は水と比較するとその取扱いは比較にならないほどの配慮を要すが、困難な実験を通して現象解明に取り組む意欲、精度よい実験データを抽出できた技術バックボーンは評価できる。さらに気液間熱伝達の無次元式を提案し、さらにその特性はガスの物性値に依存することを指摘したことは今後の他の研究分野においても広く応用できるものと考えられる。

実際の精錬操作では気泡噴流の吹き込みは底中央だけでなく、斜めや横など様々な方向から吹き込まれる。著者は基礎的検討としては底中央に加えて、水平方向から吹き込んだ場合の挙動についても検討し、改善に向けた吹き込み操作方法や装置設計の着眼点を指摘した。その着眼点は多いに注目され、実施に適用されるものと考えられる。

さらに実際のプロセスではガス吹き込み羽口近傍にはマッシュルームと呼ばれるポラス状の塊が出来ることがあり、これが生じた場合の気泡特性を調査しておくことは浴の攪拌特性を評価する上で重要である。このマッシュルーム生成過程を水モデルで可視化した例はめずらしく、さらにそれが生成したときの流動特性調査は例がない。モデル実験でマッシュルーム生成現象を可視化し、現象の理解を促進したことは大いに評価できる。

鉄鋼製造現場でのプロセス改善場面において、気泡噴流に誘起される溶鉄の流速がどの程度なのかを念頭に置きながら業務を進めることは重要である。著者は適用範囲の広い、軸対称2次元系での液速度や気泡上昇速度分布を推定できる簡便な数学モデルについて検討している。従来のモデルはエネルギー保存則や運動量保存則などをベースとしているものが多く、実プロセスとの検証もやや曖昧なものが多かった。ところが著者は構成方程式としてガスホールドアップ分布やその半値半幅に関する実験式を用いることで精度よく、簡便に計算できる数学モデルを提案した。このモデルは現場技術者、開発者にとって有益なツールになることが予想される。

一方、計算機と数値シミュレーション技術の進歩により、単相流については、連続の式、ナビエ・ストークス方程式と乱流モデルなどを用いて、複雑な形状のなかでの3次元流れの数値計算が一般に利用されているものの、上記気泡噴流内部の流れの数値計算については実用段階にない。この分野での乱流数値シミュレーション技術を確立させるためには、精度よい流れ場の実験値や乱流現象の解明が欠かせない。著者は実際の溶鉄を使つての実験には流速測定に限界があることから、低融点合金であるウッドメタルを用いて平均流特性と乱流特性をそれぞれ調査している。なかでも著者が独自に開発した流速・乱流測定プローブとデータ処理システムを用いてその解明を試みた点は画期的であるといえる。著者は得られた結果を水モデルでの結果と比較しつつ、その特性と両者の相違を明らかにしている。したがって得られた知見も乱流現象の解明や乱流モデルの構築に資すること大である。

これを要するに著者は、モデル実験手法の留意点や計画法、流動予測、さらには気泡噴流内の乱流現象に対して新たな知見を得たものであり、金属精錬工学のみならず、熱工学や化学工学分野に対しても貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。

以上