

198-55

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

減圧下ガス吹き込みによる
金属精錬プロセスの解析

申請者

鎌田千綱

Chizuna Kamata

資源及材料工学 材料プロセス工学

1998年12月
(西暦)

さまざまな新材料が開発・実用化されている中で、旧来から工業材料の中核をなす金属も高純化、複合化を図ることによって、従来では考えられなかつた特性を發揮している。多くの場合に金属の高純化に必要となる精錬工程において、溶融金属浴中のガス吹き込みは重要な操作の一つとなる。例えば鉄鋼製錬は一般に、高炉による鉱石からの製錬製造、溶銑予備処理、転炉による製鋼（粗精錬）、2次精錬、鋳造、圧延といった製造工程に分割されるが、転炉および各種2次精錬炉においてガス（O₂、Ar、N₂、CO₂、C₃H₈など）の吹き込みによって高純度の鋼の製造が実現されている。浴中にガスを吹き込むことによって、流体（溶融金属）の輸送、槽内の混合、溶存ガスの除去、介在物の除去などのさまざまな効果が得られる。流体の輸送および槽内の攪拌により、反応物の反応サイトへの輸送と反応生成物の反応サイトからの除去による反応の促進、および温度ならびに成分の均一化といった効果が促進される。また吹き込み気泡（不活性ガス）と溶融金属との接触により溶存ガスが気泡内へと拡散し、気泡とともに系外へと除去される。さらに溶融金属との濡れ性が悪い液中の介在物粒子は、吹き込み気泡へのトラップ、吹き込みによって浴内に生成された乱流場における凝集肥大化による浮上、容器壁への衝突などにより除去される。またガス吹き込みの精錬作用の向上を目的に槽内の減圧が行われる場合、気泡の膨張による気液界面積の増加、溶存ガスの平衡濃度の低下、脱ガス反応の駆動力の増加、吹き込み気泡の上昇時の膨張仕事增加による浴内の攪拌の促進などの効果が期待される。

近年あらゆる産業分野において使用環境の過酷化、成形の複雑化、加工工程の省略化が進んだことにより、不純物元素濃度を数十ppm以下まで低減する事や、消費エネルギーの節約と耐火物の損傷回避を目的として作業時間を短縮する事が要求されており、溶融金属系において減圧下吹き込みによって得られる精錬効果を正確に把握することが必須となってきた。上述した原理を考慮すると、減圧下における吹き込み気泡の存在形態や吹き込みによって生じる浴内の流動状態の解析は高純度金属の製造において極めて重要な課題である。本研究は減圧下吹き込みによる金属製錬プロセスの解析を行うことを目的とし、コールドモデル実験を行い、ガスの吹き込みによる精錬効果の解析や解析の際に重要となる気液の流動に関する調査を行った。

本論文は第1章の「緒論」、第2章の「従来研究」、第3～7章の「本論」、第8章の「総括」の各章で構成されている。第2章以降の章についての概要を以下に述べる。

第2章においては、これまでに報告されたガスリフトポンプに関する解析、吹き込み気泡のサイズ、形状、および上昇速度や、吹き込みによる混合、脱ガス、脱介在物に関する従来研究の調査結果を示す。

第3章においては、「溶融金属系におけるガスリフトポンプの輸送特性の調査」について述べる。ガスリフトポンプを溶融金属系へ適用するために、水浴、グリ

セリン水溶液浴、ウッドメタル浴においてパイプのサイズ、吹き込み深さ、ガス流量、液体の物性値などがガスリフトポンプの輸送特性に及ぼす影響を調査した。可視化実験により輸送可能な領域における流動様式はスラグ流であることを明らかにした。液の輸送に最低限必要なガス流量である臨界流量は、いずれの系においても浸液率や管径の増加とともに減少した。液体の輸送量については液体の密度の影響が大きく、粘性の影響はほとんど見られなかった。補正を施したNicklinの式を用いたスラグ流モデルによって、溶融金属の輸送量を推定するための無次元数を用いた実験式が導出された。また、モデルを用いることによって本実験で得られた臨界流量の結果を再現できた。

第4章においては、「減圧下における単一気泡の挙動観察ならびに混合特性の測定」について述べる。吹き込みによる槽内の混合速度は気泡が浴内を上昇する時に膨張し、その膨張の際に単位体積、単位時間あたりになされる仕事量（攪拌動力）に比例することがわかつており、上述のとおり槽内圧力を減圧することにより気泡の膨張が促進され混合速度の増加が期待できる。蒸気圧の低いシリコンオイルを浴の液体として用い、減圧下（～1.33×10²Pa）においておもに気泡の膨張挙動の調査を目的として単一気泡の観察を行った後、反応容器内の混合速度の指標として均一混合時間を取り上げ、その測定を行った。減圧下において気泡は浴内を上昇する際に浴表面付近において大きく膨張し、形状が楕円球からキノコの笠状と呼ばれる形に変化した。このとき混合速度は低槽内圧力領域（<6.66×10²Pa）で攪拌動力に対して独立になり、一定値をとる傾向が見られた。これは浴表面付近においてほとんどの膨張エネルギーが消費されるために、減圧することによって攪拌動力が増加するにもかかわらず、そのエネルギーが浴全体での混合に使われていないためであると考えられる。

第5章においては「排気過程での脱炭挙動の解析」について述べる。ガス吹き込みにより溶存ガスの除去を行う際には、脱ガス反応の促進を目的として槽内の減圧が行われる。減圧過程における脱ガス反応は吹き込み気泡への拡散による脱ガス、表面からの脱ガスにくわえて液体内部における溶存ガス成分の核生成による脱ガス（内部脱ガスと呼ばれる）反応の和として進行していくと考えられている。水モデルにおいて内部脱ガスの存在を確認した後、坂口らが報告した減圧下（槽内圧力が一定）における脱ガスモデルを改良し、脱ガス速度を示す式に内部脱ガスを考慮した項を加えることによって新たな数学モデルを構築した。

第6章においては、「RH脱ガス装置内の流動特性および脱炭挙動に関する研究」について述べる。RHは溶鋼が満たされた取鍋、取鍋上部に位置し底部に2本の浸漬管が取り付けられた真空槽より構成され、真空槽を減圧した後、片方の浸漬管（上昇管）からガスを吹き込むことにより取鍋→上昇管→真空槽→下降管→取鍋といった循環流が形成される。RHの精錬性能は下降管における溶鋼の流量である環流量に影響を受ける。スケールモデルを用い、水系においてレーザ流

速計により得られた下降管内の液流速分布から環流量を算出した。一方、減圧下において吹き込みが行われていることを考慮し、ガスリフトポンプの原理によって得られたヘッド差が循環流の駆動力になると想え、第3、4章で述べた解析結果を利用して環流量に関する数学モデルの作成を行った。環流量はガス流量を増加させていくとはじめのうちは増加するが、その後飽和する傾向がある。環流量がガス流量とともに増加する領域においては上述の数学モデルを用いて環流量の見積もりが可能となつたが、環流量の飽和傾向に関しての情報は数学モデルからは得ることは出来ない。しかし、実操業は最大環流量近傍の条件下で行われている場合が多いので、飽和環流量を与える条件についての情報は重要となる。吹き込み形式を変化させた実験より環流量の飽和傾向を確認し、上昇管内の流動観察により環流量が飽和する原因を考察した後、観察結果から導かれる条件から飽和環流量を与える最小ガス流量を見積もる。溶鋼系における計算結果より、耐火物の損傷から浸漬管およびオリフィスの径が変化する実操業においては1チャージごとに最適条件を見積もる必要性が示唆された。さらに実操業における脱炭挙動の報告を調査し、第5章で述べた排気過程における脱ガス反応の数学モデルによる見積もり結果と比較してモデルの妥当性を考察する。

第7章においては、「脱介在物特性に関する研究」について述べる。強い乱流が形成されていると考えられるRH真空槽内のレーザシート光を用いた液中粒子の観察を行うことによる脱介在物サイトの有無について調査を行い、下降管上部において形成された渦にトラップされることにより粒子の集合体が形成される様子が観察できた。真空槽内に邪魔板を配置して流れを変化させた実験より、新たな介在物のトラップサイトをつくることが出来る可能性が示唆された。また液中に超音波を照射することにより形成させたキャビテーション気泡による介在物の除去法について考察を行い、局所的に圧力振幅を大きく出来ること、キャビテーション気泡を整流性拡散と呼ばれる過程により成長させることが出来ることから、超音波を用いることによってより小さな介在物を除去できると考えられることが明らかとなった。

最後に第8章では本論のまとめを行う一方、さらに今後の課題についての言及や今後の展望として金属精錬における既存プロセスの最適化に関する考察ならびに新プロセスの提言を行い総括をする。