

鉄鋼精錬プロセスにおける気液二相流の コアンダ効果に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

鉄鋼精錬プロセスでは、反応槽内の成分や温度を均一にするための攪拌操作が重要である。1600℃の高温である溶鋼を攪拌するために、これまでは設置が容易で維持費を抑えることができる上、粉体などを一緒に吹き込むことができるガス攪拌が用いられてきた。反応槽内にガスを吹き込む際に用いるノズルの種類やガスを吹き込む方法には様々なものが提案されており、単孔ノズルや多孔ノズル、底吹きや上吹き、あるいはそれらのノズルを複数用いる方法などがある。溶鋼中の気泡の振る舞いを理解するために、数多くの研究が行われているが、溶鋼は高温である上に不透明液体であり、さらに気液二相流の激しい乱流場となっており、現象の解明は容易にはいかない。そこで、溶鋼と動粘度がほぼ等しく、透明液体である水を用いたいわゆる水モデル実験が数多くなされ、水中での気泡の振る舞いは理解されつつある。しかしながら、実操業で多く見られる壁近傍における気泡噴流の挙動や複数の気泡噴流が合体する現象に関してよくわかっていない。気泡噴流が壁に付着したり複数の気泡噴流が合体してしまうと、反応槽内の流動状態が変わってしまうことが予想され、操業を最適化するのには難しくなる。このような背景の元に、本研究は気液二相流のコアンダ効果を理解するために、壁に付着する気泡噴流と二つの気泡噴流が合体するという、主に二つの視点から実験を行った。本論文は5章から構成され、それぞれの概略は以下のとおりである。

第1章は序論として、鉄鋼精錬プロセスの歴史や背景を詳しく述べ、さらにコアンダ効果の原理と工業的な応用例について述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、後の章で行う実験の準備段階として、気泡噴流が壁に付着する条件と二つの気泡噴流が合体する条件について明らかにした。第2章の前半では、どのような条件下で気泡噴流が壁に付着するかについて、関連する旋回現象も交えて実験を行った。ノズルを壁近傍に設置した場合は、ガス吹き込み流量が極端に低い場合を除いて、ほぼすべての条件下で気泡噴流は壁に付着した。壁に付着する条件下では、気泡噴流は常に壁に付着しながら浴表面まで達する。そのため、気泡が浴表面を出てゆく場所に偏りがみられ、スピittingなどが多く起こる可能性がある。

ノズルをある距離より壁から離すと、気泡噴流は浴深 H_L によってノズルを偏心させた方向にゆらいたり、壁と平行の方向にゆらぐことがわかった。従来から言われているように、ノズルを偏心させた場合においても、浴深 H_L と容器直径 D の比であるアスペクト比が 0.5 近傍において、一番旋回現象がおきやすい。また、アスペクト比が 0.5 の場合、ノズル位置

を半径の 1/3 倍程度壁側にずらしても、旋回現象は起こることを明らかにした。

第2章の後半において、二つの気泡噴流の干渉パターンを調べた。パターンを便宜的に4つに分類し、各々の干渉パターンの境界線を気泡噴流の広がり幅を元に導出した無次元数で整理した。溶鋼中の気泡噴流の広がり幅は水モデルの結果とほぼ一致することから、ガス流量などの条件を式に与えることによって、溶鋼中の二つの気泡噴流のおおまかな挙動を明らかにすることができる。

第3章では、気泡噴流が壁に付着するまでの距離を実験的に求めた。付着距離 L_a はノズル先端から壁までの距離 η_n とガス吹き込み流量 Q_g に依存することを明らかにした。さらに、流体に水銀を用いて、水モデルで行った結果と比較検討した。その結果、ブロックタイプのノズルとランスタイプのノズルによって、付着距離 L_a に違いがみられるが、液体の違いによる L_a の差はほとんど見られなかった。これによって、水モデル実験の結果を実機に適用できることが明らかになった。

気泡噴流が壁に付着しているときの気泡特性のうちガスホールドアップや気泡頻度の最大値は、壁の影響のない気泡自由噴流のものとさほど変わりはない。また、壁に付着しても気泡自体の合体や分裂はほとんど起きずに浴表面まで上昇していることを明らかにした。気泡頻度 f_B とガスホールドアップ α について、気泡生成領域を除いて相似則が成り立つことを示し、実験式を導出した。気泡噴流の液流動特性も気泡特性と同様に、気泡生成領域を除けば相似則に従うが、過去の研究者が求めた単相流の実験式とは異なる。特に、乱れ成分の rms 値は、気泡噴流の方がかなり大きいことを明らかにした。

第4章において、二つの気泡噴流が合体する距離 H_c を実験的に求めた。合体距離はノズル間水平距離 L_H と垂直距離 L_v 、気泡噴流の広がり幅と修正フルード数 Fr_m に依存することを明らかにし、これらを用いて得られる無次元数によって合体距離 H_c を整理した。

壁に付着する気泡噴流の場合と同様に、流体に水銀を用いて実験を行った。ノズルによる違いは見られたが、流体の違いによる合体距離 H_c の差は見られなかった。これによって、合体距離についても水モデルの結果が溶鋼に適用できることを明らかにした。

二つの気泡噴流が合体した位置より上方の気泡特性は、浴槽内に吹き込まれる総ガス流量 Q_g が等しい単一ノズルの結果と気泡頻度 f_B と平均気泡弦長さ L_B を除けば一致した。これによって、気泡噴流が合体してしまえば、反応槽内の流動状態はノズルの数にほぼ無関係であるということがわかった。ただし、ノズル数の多いほうが平均気泡径が若干小さくなるので、気液間反応は促進される可能性がある。

第5章は結論として、本研究で得られた知見をまとめ、本研究で得られた結果を実機へ適用する際の問題点や将来への展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	井口	学
副査	教授	篠原	邦夫
副査	教授	石井	邦宜
副査	教授	工藤	昌行
副査	助教授	木内	弘道

学位論文題名

鉄鋼精錬プロセスにおける気液二相流の コアンダ効果に関する基礎的研究

近年、地球温暖化対策として CO₂ ガスの削減が叫ばれ、鉄鋼業界でも CO₂ 削減が求められている。しかし、これまで行われてきた数多くの研究により、鉄鋼製造プロセスの大部分では最適化されつつあり大幅な削減は難しいとされている。しかしながら、溶鋼をガスで攪拌する精錬プロセスにおいては溶鋼が高温であるうえに不透明であり、溶鋼の表面近傍の流速を測定することさえ困難であるのが現状である。そのため、溶鋼内の気泡特性や液流動特性は明らかにされておらず、これらを正確に把握することでさらなる最適化への可能性が残されている。特に、壁近傍を上昇する気泡噴流や、複数の気泡噴流の干渉などについての知見はほとんど得られていない。

一方、主に気相や液相の単相流で研究が行われてきたコアンダ効果であるが、気液二相流に限るとほとんど研究が行われておらず、化学工学の分野で気泡塔の設計に関する研究例がわずかに見られる程度である。

本論文はこのような現況にあるなかで、特に鉄鋼精錬プロセスに関するコアンダ効果について実験的検討を行い、以下の二つの点に主眼を置いて明らかにしている。

- (1) 壁に付着する気泡噴流の挙動
- (2) 合体する二つの気泡噴流の挙動

その結果 (1) の壁に付着する気泡噴流の挙動については、壁とノズル先端との距離 η_n などを変えて実験を行い、気泡噴流が壁に付着する付着距離 L_a は η_n とガス吹き込み流量 Q_g に依存することを明らかにし、無次元数で実験式を導いた。さらに、液体に水銀を用いて水モデル実験の結果と比較検討しており、水モデル実験の結果を実機に適用できること

を明らかにしている。また、壁に付着する気泡噴流の気泡特性のうち、ガスホールドアップや気泡頻度の最大値は、壁の影響がない自由気泡噴流のものとあまり変わらない。また、壁に付着する気泡噴流は壁に付着しても気泡自体の合体や分裂はほとんど起きないということを見出した。壁に付着した気泡噴流の分布は壁噴流と同じように相似則が成り立つことを示し、実験式を導出した。気泡噴流の液流動特性も気泡特性と同様に、気泡生成領域を除けば相似則に従うが、過去の研究者が求めた単相流の実験式とは異なる。特に、乱れ成分の自乗平均の平方根値は、気泡噴流の方が2倍ほど大きいことを明らかにした。

(2) の合体する二つの気泡噴流の挙動については、二つのノズル間水平距離 L_H と垂直間距離 L_v 、ガス吹き込み流量 Q_g などを変えて実験をおこない、気泡噴流の広がり幅の目安を与える式 L が気泡噴流の合体に関与しているものと仮定し、無次元式を導出し、修正フルード数 Fr_m との関係式を提案している。液体に水銀を用いた実験を行い、壁に付着する気泡噴流の場合と同じように、合体距離における水モデルの結果も実機へ適用できることを明らかにした。また、合体した気泡噴流の気泡特性と液流動特性は、反応槽内に吹き込まれる総ガス流量を等しくした場合の、単一ノズルによって形成される気泡噴流の気泡特性や液流動特性にほぼ一致した。ただし、気泡頻度 f_B と平均気泡弦長さ L_B が異なるので、ノズルの数を多くすることによって気液間反応はより促進されるものと思われる。

本論文で導出されたコアンダ効果に関する知見は、溶鋼中での実験は行われていないが、水銀浴での実験を行い、水モデル実験との比較検討を行っている。そのため、密度差や反応容器と液体との濡れ性などを考慮した上での実験式となっており、溶鋼中における気泡噴流の挙動を解明するために一歩踏み出した内容となっている。

これを要するに、著者は、気液二相流におけるコアンダ効果に関して、水と水銀の実験を行い実機への適用性を考慮しつつ、気液二相流の壁付着現象や二つの気泡噴流の合体に対する新しい知見を得たものであり、鉄鋼精錬プロセスにおいてコアンダ効果に関する気泡噴流の挙動の解明に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。