

旋回液体噴流の攪拌特性および 熔融金属への適用の可能性に関する研究

学位論文内容の要旨

従来、攪拌子(インペラ)を用いた機械式攪拌、ガス吹き込み攪拌、液体吹き込み攪拌、電磁攪拌、超音波を用いた攪拌、貫入噴流を用いた攪拌、スタティックミキサを用いた攪拌といった多くの攪拌方法が提案されて実用に供されており、特に工学分野では古くからインペラを液中に浸漬させ、回転させることで浴内の液体を攪拌する方法が広く用いられている。しかしながら、汚泥のように流体の粘度が高く、雑多な物体が含まれているといった場合、それらがインペラに巻きついて回転自体が不可能になるだけでなく、インペラを破損させる恐れがある。また、鉄鋼精錬プロセスにおいては、溶鋼とスラグの攪拌には機械式攪拌、アルゴンガスによるガス吹き込み攪拌、そして電磁攪拌が用いられているが、機械式攪拌に着目すると、溶鋼中に浸漬物を投入させることに対する安全性や、品質の低下が懸念される。また、従来のガス吹き込み攪拌では上昇する気泡に追従する溶鋼の流れでは完全な攪拌は見込まれない。

本学位論文は、以上のような問題点を解決するために、底部からの液体吹き込みにより生じる旋回噴流の優れた攪拌作用を利用した新規攪拌手法を考案し、旋回噴流の基本特性を調査するとともに、この手法の熔融金属への適用の可能性を実験的、理論的に明らかにしたものであり、全8章から構成されている。

ここで、旋回噴流とは、球形及び円筒形の容器内に攪拌対象となる液体を貯留し、容器底部に設置したノズルから液体またはガスを吹き込むことで発生した噴流が旋回する現象を指す。便宜上、液体を吹き込んだ際に発生する旋回噴流を“旋回液体噴流”、ガスを吹き込んだ場合を“旋回気泡噴流”と名付けている。旋回噴流の発生は、ノズル出口で発生した噴流が液面に衝突し、液面を上下に揺らす運動を行うことから始まる。この運動が大きくなった時、噴流は液面を突き抜け、噴流が落下した方向への液面の往復運動が生じる。さらに往復運動が大きくなった時、往復運動は周方向への運動に移行し、旋回運動となる。ここで、ガス吹き込みでは旋回は吹き込まれたガスの浮力に依存する。しかし、浮力が慣性力に移行するのに時間を要するガス吹き込みに比べ、液体吹き込みは非常に短時間で旋回が発生するため、本研究では液体吹き込みによる旋回液体噴流に着目した。

旋回の種類には、容器内に入った液体の浴深を一定の状態に保ち、その高さで旋回を発生させる“定常状態”において発生する旋回液体噴流と、噴流を発生させることで徐々に浴深が増加する“過渡状態”において発生する旋回液体噴流があり、特性の調査項目として旋回の発生する条件範囲(旋回発生領域と称する)、噴流開始時間、旋回終了時間、旋回周期、発生した波の振幅、浴内の均一混合時間が挙げられる。

第1章では、既存の攪拌手法を挙げ、それに対する旋回液体噴流の持つ優位性や特徴について述

べ、本研究の位置と目的を明らかにした。

第2章では、水円筒容器を用いた水モデル実験により定常状態での基本特性の調査を行い、それらの実験結果を元に実験式の提案および理論式との比較を行った。特に旋回周期に関しては、旋回運動を円筒容器に外部から振動を加えた際に発生する往復運動の一種と見なして、その振動周期の理論式と比較することにより、両者がほぼ一致するという結果を得た。また、液体の吹き込み位置を偏心させた場合の基本特性の変化について調査を行い、吹き込み位置が壁面に近づくに従い旋回発生領域は徐々に狭くなるが、旋回開始時間、旋回終了時間および旋回周期などの基本特性には吹き込み位置は影響を及ぼさないことを明らかにした。一方、均一混合時間については、偏心吹き込みの場合の方が短くなる結果を得た。それは特に中心から容器内径の1/6倍離れた位置で最も短くなり、これよりさらに壁面に近づくに従って長くなる結果となった。偏心吹き込みの場合では浴内の流れが非対称かつ複雑になることがこれらの結果に関連している。

第3章では、定常状態において水の上に低密度の液体を上乗せした二液層の場合の基本特性を調査した。その結果、上層の厚さに応じて境界に二種類の旋回が発生した。上層が一定の境界値より薄い場合に上層と下層が混ざり合い水単層と同じ周期で旋回する様子を Type A とし、境界値より厚い場合に上層と下層の境界で緩やかな旋回が発生するものを Type B と定義した。Type B に関しては上層中を下層が旋回するという考えから両層の密度差を考慮にいたした修正重力を用いることで理論式に近似することが出来た。この取り扱いは、上層に用いた液体の物性値を変えた場合にも適用可能であったことから、妥当な提案であると考えられる。

第4章では、定常状態および過渡状態における中心吹き込みによって発生する旋回液体噴流の特性の比較を、水単層および二層とした場合のそれぞれで行った。過渡状態においては液体の吹き込みを行い続けるため、定常状態に比べて旋回発生領域は全体的に浴深の深い側に移行する結果となった。しかしながら吹き込み流量によっては噴流が非常に高い位置にまで達してしまっただけで、最初から浴内に吹き込み液体と同種の液体を入れておくことで、噴流発生時の勢いを緩和させることを考えた。これにより初期液面高さごとの基本特性の比較を行った結果、旋回発生領域に関しては初期液面の高さ分旋回が発生する液面高さが高くなるが、終了する高さは一定であること、浴内にある程度液体が入っている方が旋回開始時間は早くなること、旋回周期は常に一定であることが分かった。浴内の液体を二層にしても、上層の液体の種類にほぼ依存しないこと、また低密度粒子を上乗せした場合でも、粒子が巻き込まれる条件であれば低密度の液体を上乗せした場合と変わらないという結果から、二層条件に対応する新たな実験式を提示した。

第5章では、旋回発生領域の実験式の提案を行っている。理論的な検討と実験結果から旋回発生領域の境界を4種類に分類し、定常状態、過渡状態、またそれぞれの場合での二層条件に対する実験式を提案した。

第6章では、汎用熱流体解析ソフトを用いたシミュレーションを行って、定常状態および過渡状態それぞれの条件において旋回液体噴流を再現し、水モデル実験によって得られた実験結果との比較を行った。この結果、容器底部に液体引き抜きのノズルがついている定常状態においては液体吹き込みのノズルのみ設置されている過渡状態に比べ複雑な流れになっているが、浴深が増加するに従って似通った内部流動となることが分かった。また、数値計算結果においても旋回周期が理論式で近似できることを示した。

第7章では、省エネルギー化を考慮し液体を吹き込む駆動力に位置エネルギーを用いる方法を検討し、液体に水銀を用いることによっても旋回を発生させることが出来ることを実証した。さらに、液体金属の場合も水モデル実験を元に提案した実験式や理論式で整理が出来ることを示した。

第8章は総括であり、今後の展望や課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 大 参 達 也
副 査 教 授 松 浦 清 隆
副 査 教 授 鈴 木 亮 輔

学 位 論 文 題 名

旋回液体噴流の攪拌特性および 溶融金属への適用の可能性に関する研究

攪拌は、材料製造、リサイクル、廃棄物処理等の材料プロセスを構成する主要な単位操作の一つである。このため近年の省資源・省エネルギーの要請に伴って、攪拌技術のさらなる高度化が求められている。鉄鋼精錬プロセスにおいては、これまで溶鋼とスラグの攪拌にガス吹き込み攪拌や機械式攪拌が用いられてきたが、気泡の上昇に追従する溶鋼の流れを利用する従来のガス吹き込み攪拌では十分な攪拌効果が得られないこと、また、機械式攪拌では溶鋼中に攪拌子を浸漬することに伴う安全性や製品品質の低下が懸念されることなどの問題がある。

本論文は、以上のような問題点を解決するために、容器底部からの液体吹き込みにより生じる旋回噴流の優れた攪拌作用を利用した新規攪拌手法を考案し、この旋回液体噴流の基本特性を調査するとともに、本手法の溶融金属への適用の可能性を実験的・理論的に明らかにすることを目的としたものであり、全8章から構成されている。

第1章では、既存の攪拌手法の問題点を整理し、それに対する旋回液体噴流の優位性や特徴について述べ、本研究の位置と目的を明らかにしている。ここで、旋回噴流とは、球形または円筒形の容器内に攪拌対象となる液体を貯留し、容器底部に設置したノズルから液体またはガスを吹き込むことで発生した噴流が旋回運動する現象を指す。特に液体を吹き込んだ際に発生する旋回噴流を“旋回液体噴流”と称し、ガス吹き込みによる“旋回気泡噴流”と区別する。ガス吹き込みではガスの浮力が慣性力に移行して旋回が発生するのに時間を要するのに対し、液体吹き込みでは非常に短時間で旋回が発生する点で有利である。

また、攪拌の実施様態として、容器内の浴深を一定に保ちつつ旋回を発生させる“定常状態”での旋回液体噴流と、噴流液体の導入による浴深の増加過程で旋回を発生させる“過渡状態”での旋回液体噴流との二種類を検討し、旋回の発生する条件範囲(旋回発生領域と称する)、旋回開始時間、旋回終了時間、旋回周期、発生した波の振幅、浴内の均一混合時間を調査した。

第2章では、液体の位置エネルギーを駆動エネルギーとする旋回液体噴流を利用した新規省エネルギー攪拌手法の概要を提示するとともに、水モデル実験により定常状態での旋回液体噴流の基本特性の調査を行い、実験式による整理と理論式との比較を行った結果を述べている。とりわけ旋回周期の検討において、旋回運動を円筒容器に外部から振動を加えた際に発生する往復運動の一種と見なして導入した振動周期の理論式と実験結果とが良く一致することを明らかにしたことは重要な

成果である。

第3章では、水の上に低密度の液体を上乗せした二液層の場合の基本特性を調査した結果を述べている。一連の実験の過程で、上層の厚さに応じて二種類の旋回様式が現れることを新たに見いだしたことは注目に値する。上層が一定の境界値より薄い場合に上層と下層が混ざり合い水単層と同じ周期で旋回する様式を Type A とし、境界値より厚い場合に上層と下層の境界で緩やかな旋回が発生するものを Type B と定義した。Type B に関しては、上層中を下層が旋回するという考えから両層の密度差を考慮に入れた修正重力を導入した理論式により実験結果を説明できることを示した。

第4章および第5章では、定常状態および過渡状態の各場合における旋回液体噴流の特性を比較するとともに、理論的な考察に基づいて旋回発生領域の境界を四種類に分類し、定常状態/過渡状態、および単液層/二液層の各条件に対する実験式を提案している。

第6章では、汎用熱流体解析ソフトを用いた数値シミュレーションにより旋回液体噴流を再現して、水モデル実験のデータと比較した結果を示している。数値シミュレーションの結果でも旋回周期が理論式と一致することを明らかにした。さらに、速度ベクトルパターンの比較により明らかになった粒子画像流速計の問題点について議論している。

第7章では、水および水銀を用いた実験により、液体の位置エネルギーを駆動エネルギーとした旋回液体噴流の発生について調査した結果を述べている。いずれの液体の場合でも旋回が発生することを実証し、さらに、液体金属の旋回液体噴流の特性も水モデル実験による実験式で整理することが可能であることを明らかにした。

第8章は総括であり、本研究で得られた結果をまとめるとともに、実用化研究の展望や課題について述べている。

これを要するに、著者は、旋回液体噴流の特性に関する新たな知見を得るとともに、旋回液体噴流を利用した新規省エネルギー攪拌手法を提案し、熔融金属への適用可能性を明らかにしたものであり、材料プロセス工学に対して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。