

鉄鋼精錬プロセスにおける気液間物質移動のモデル解析

学位論文内容の要旨

鉄鋼精錬をはじめ、多くの金属精錬プロセスにおいて高温の熔融金属中に大量のガスを吹き込み、化学反応を進行させ、組成制御を行うことは古くから広く行われている。しかし、現在の環境、エネルギー問題を鑑みると将来の材料製造プロセスにはエネルギー効率や、排出物など対環境特性の更なる向上が求められることは明らかである。したがって、ガス吹き込みによる精錬プロセスにはより一層の効率化が期待され、溶湯とガスとの迅速な反応、正確な反応量制御によるクリーンな排気など、反応をより精確に制御する技術が求められている。

鉄鋼精錬プロセスにおいてガスと溶鉄、溶鋼との反応の解析では、高温の環境下であることから、素過程としての反応は十分に早く、律速するのは物質移動の側にあると考えられている。そこで、物質移動を促進するための様々な試みとその解析が行われている。理想的には、気液界面積と物質移動係数をそれぞれ独立に評価すべきであるが、溶鉄、溶鋼は一般的に 1500℃以上の高温で、気泡の観察も困難なことから、気液界面積を求めるのは非常に難しい。そのため、気液界面積と物質移動係数との積を液体の体積で除した容量係数による評価が一般的である。

また、物質移動現象に関する解析では水モデルを用いた報告が多いが、物質移動係数に関しては気泡噴流など、気液界面積の評価の難しいものに対する報告は少なく、さらに界面近傍の液流れと物質移動係数との関係を調査した報告は単一上昇気泡についてのものが多く、強い乱流場における物質移動係数を調べた例はほとんどない。またこれまでに為された報告のほとんどは蒸留を二回以上施した非常に清浄な水を用いているが、通常、大量に使用される蒸留水やイオン交換水程度の純度の水を用いた場合の知見は少ない。

本研究は気泡噴流中の気液界面における物質移動係数の評価を目的として実施した。第 1 章は緒言であり、従来の研究状況を調査し、本研究の意義を明確にした。

第 2 章では面積が一定で水平に静置した気液界面において自然対流のみ生じる条件で物質移動係数を測定した。水平に静置した固体平板からの熱移動に近似性が高いことが判り、その式をもとに実験式を導出した。

第 3 章において、ランスを用いて気液界面の面積を一定に保つとともに、その界面に対して任意の流速、乱れ強さの乱流噴流を衝突させた。流れの種類は対向流、平行流、後流で、それぞれについて物質移動係数を測定し、流れのレイノルズ数、

乱れ強さとの関係を調べ、実験式を導出した。この結果によればイオン交換水程度（中程度）に汚染された液中では、固液間物質移動係数に対する実験式で精度よく近似できることがわかった。

第 4 章では界面に噴流を高い速度で衝突させた際の波動が生じる条件での物質移動係数を測定した。これによると、波動の生成しない場合の物質移動係数に較べて 2～3 倍の高い値を示し、物質移動促進への大きな効果を見出した。これは、気液界面に蓄積している汚染物質の物質移動への影響が、波動の生成により小さくなり、清浄な気液界面をもつ場合の物質移動係数に漸近したものと考えられる。

第 5 章では第 3 章までに述べた 3 種類の流れ場を組み合わせ、単一上昇する気泡の周囲に生じる流れ場をモデル化し、その気泡モデルにおける物質移動係数を既知の実験式から推算した。これを実際の単一気泡について測定した物質移動係数と比較した。その結果、気泡高さが小さな場合には第 3 章で明らかにした汚染された界面をもつ気液間物質移動係数に漸近し、気泡高さが約 5mm を越えると第 4 章で明らかにした清浄な界面をもつ気液間物質移動係数に漸近した。気泡高さが約 5mm 以上の気泡表面には波動が観察されることから、この物質移動係数の変化も気泡表面に生成する波動に起因すると考えられる。

第 6 章では気泡噴流における気液間物質移動係数の測定を行った。ガス流量を 0～40cm³/s までの範囲で変化させながら行ったところ、流量が 0～2cm³/s の範囲では気泡の下半分が汚染され、上半分が清浄な界面をもつと仮定した気泡について推算した物質移動係数に漸近した。流量が 2～40cm³/s の範囲では全表面が清浄な場合の物質移動係数に漸近した。ガス流量が大きくなると気泡間の相互作用が強まり界面近傍の流れの乱れが非常に大きくなるので、界面汚染物質の影響が低下して界面が清浄な場合と同じ物質移動挙動を示したものと考えられる。また、本研究のように中程度に汚染された液体を用いた場合、気液間の物質移動係数は液流れの条件により大きく変化するが、その上限は、液が清浄な場合の物質移動係数に等しい。

第 7 章では上吹きランスを用いてガスの効果的な溶解、攪拌を試み、界面の不安定現象観察とともに、気液界面積の評価を行った。また、底吹きの場合には気泡同士の重合、分裂を考慮していない既存の界面積推算式と比較し、本方法による新たな推算式を導出した。

第 8 章では本研究の成果を総括し、今後の展望を述べた。

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	増 田	隆 夫

学 位 論 文 題 名

鉄鋼精錬プロセスにおける気液間物質移動のモデル解析

現在の環境、エネルギー問題に関連して、鉄鋼精錬プロセスをはじめ多くの金属精錬プロセスには、エネルギー効率の格段の向上、排出物、排出ガスの無害化、減量化、リサイクルなど環境負荷をより小さくする方策が求められている。高温の熔融金属を機械的に攪拌することは回転羽根の溶損の問題が避けられないことから、既存の多くの精錬プロセスでは専ら熔融金属中に吹き込まれたガスの浮力を利用して攪拌を行うとともに、気液間反応によって不純物の除去を行っている。本研究は、このようなガス吹き込みを伴う精錬プロセスの内、代表的な精錬反応容器である転炉や取鍋に着目し、精錬のより一層の効率化に資する資料を得ることを目的として実施したものである。熔融金属の温度は 1500°C という高温のため気液間反応の律速過程は物質移動であり、反応の効率化には物質移動係数の正確な評価が必要となるが、実機での評価は難しく、モデル実験に頼らざるを得ない。本研究でも水モデルを用いて非常に強い乱流場における気液間物質移動についてモデル実験を行い、多くの有用な知見を得ている。

本論文は8章から構成されており、その概略は以下のとおりである。

第1章は緒言であり、従来の研究と比較しながら本研究の位置付けを明らかにした。

第2章では、円筒形ランスを用いて面積が一定で水平な気液界面を作り、自然対流のみが生じる条件下で物質移動係数を測定し、物質移動係数の測定値は水平に静置した固体平板からの熱移動に近い値をとることを示すとともに、実験式を導出した。

第3章では、上述のランスを用いて気液界面の面積を一定に保つとともに、その界面に対して流速、乱れ強さの異なる乱流噴流を衝突させた結果について述べている。流れの種類は対向流、平行流、後流で、それぞれについて物質移動係数を測定し、レイノルズ数、乱れ強さとの関係を調べ、実験式を導出した。この式は乱れ強さを気液間物質移動係数の推算に初めて反映させたもので、金属精錬プロセスにとどまらず、多くの化学工学プロセスに有用な知見である。また、イオン交換水のように中程度に汚染された液中では、固液間物質移動係数に対する実験式で精度よく適用できることを明らかにした。

第4章では、水平な気液界面の周りに下向きの流れを生じさせ、気液界面に波動が生じる条件下で測定した物質移動係数は、波動の生成しない場合の物質移動係数に較べて2～3倍の高い値を示すことを見出している。これは、気液界面に蓄積している汚染物質の物質移動への影響が、波動の生成により小さくなり、清浄な気液界面をもつ場合の物質移動係数に漸近したためである。

第5章では、第3章で構築した3種類のモデルを組み合わせて、上昇する単一気泡を模式的に再現して物質移動係数を推算し、実測値と比較している。このように、気泡を幾つかの代表的な部位に分割して物質移動を解析し、その結果を再び持ち寄って全体の物質移動の解析に役立てる手法は、本研究の特徴であり、今後いろいろな状況下にある気泡の物質移動係数の推算に利用できる。

第6章では、多くの気泡が群をなして上昇する気泡噴流における気液間物質移動係数の測定結果について述べている。ガス流量を $0 \sim 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で変化させたところ、流量が $0 \sim 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲では気泡の下半分が汚染され、上半分が清浄な界面をもつと仮定して推算した物質移動係数の値に漸近し、流量が $2 \sim 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲では全表面が清浄な場合の物質移動係数に漸近することを明らかにした。ガス流量が大きくなると気泡間の相互作用が強まり界面近傍の流れの乱れが非常に大きくなって、界面汚染物質の影響が低下し界面が清浄な場合と同じ物質移動挙動を示すためである。また、本研究のように中程度に汚染された液体を用いた場合、気液間の物質移動係数は液流れの条件により大きく変化するが、その上限は、液が清浄な場合の物質移動係数に等しいことを見出すとともに、気液界面積の推算式を提案している。このことは、液相の純度を上げることが困難な実機においてガスの溶鋼への溶解を促進させるための大きな指針を与えている。

第7章では、上吹きランスを用いてガスの効果的な溶解、攪拌を試み、界面の不安定現象の観察結果を示すとともに、気液界面積の評価を行っている。

第8章は結言であり、本研究を総括し、今後の展望を述べている。

これを要するに著者は、強い乱流場における気液間物質移動のモデル実験を行うに際し、多くの斬新な手法を提案するとともに、単一気泡だけでなく気泡噴流内の気泡の物質移動係数について有用な知見を得ており、金属精錬工学のみならず、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