

論文の内容の要旨

論文題目 溶鋼注入プロセスにおける鋼のガス吸収挙動

氏名 岡山 敦

本論文は、製鋼プロセスにおける転炉から取鍋、もしくは取鍋からタンディッシュといった、溶鋼注入時の鋼のガス吸収挙動を取り扱った研究に関するものである。本研究の目的は、水モデル、溶鋼実験、数値計算を組み合わせた手法により、注入現象に関する理解を深めるとともに、溶鋼注入プロセスにおける鋼のガス吸収挙動に及ぼす種々の支配因子を定量的に明らかにすることである。以下に本論文の要旨を示す。

第1章 序論

精錬中の窒素濃度挙動、特に出鋼時の吸窒挙動に関する報告をレビューし、強脱酸条件ほど吸窒量が大きいことを指摘した。出鋼時の吸窒挙動を検討するにあたって、これまで出鋼中の窒素濃度挙動は調査、解析されてきていない課題、また、出鋼時の吸窒挙動を精度良く解析できる手法が確立されていない課題およびその背景について述べた。また、出鋼時の吸窒挙動解析に適用可能な混合律速モデル、物質移動および化学反応速度定数に関する既往知見をレビューした。さらに、今後適用範囲が広がると考えられる CFD を使った研究例を示すとともに、水モデル、溶鋼実験、数値計算を組み合わせた手法を使った、溶鋼注入時の鋼の吸窒挙動解析手法の確立ならびに種々の支配因子の影響を明らかにすることを本研究の目的とすることを述べた。

第2章 注入流のガス吸収挙動に関する水模型実験

ー注入時のガス吸収挙動ー

転炉から取鍋への溶鋼出鋼時に生じる取鍋内での窒素吸収挙動を再現するにあたり、予め溶存酸素濃度を低下させた低酸素水を、転炉を模擬した上容器から、取鍋を模擬した下容器に注入し、その際の溶存酸素濃度の経時変化を連続測定する水模型実験装置を構築した。実験結果から、注入に伴うガス吸収は注入初期に極大値を示し、下容器内の浴深が深くなるに従って低減することを明らかにした。また、注入時のガス吸収挙動は注入に伴うエネルギーに基づいて報告された容量係数の推定式および上容器からの低酸素水による希釈を考慮した推定式を使ってガス吸収挙動を再現できることを確認した。実験結果および推定式を使った検討からは、Fig. 1 および Fig. 2 に示すように注入位置が高く、ノズル径が大きい条件ほどガス吸収速度は大きくなるが、ノズル径に関しては出鋼時間とも関連しており、注入速度を増大させることでガス吸収量自体を低減できる可能性が示された。

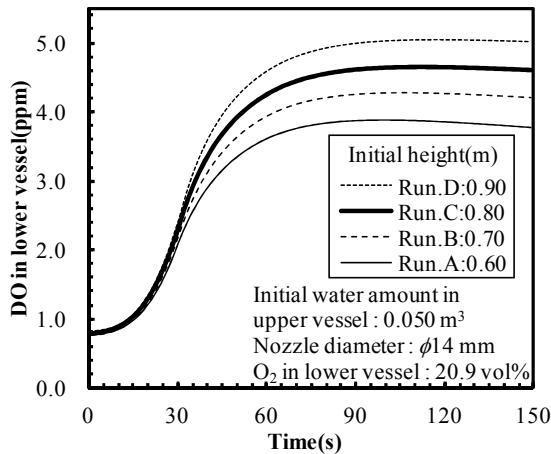


Fig. 1 Effect of initial height on calculated DO during tapping.

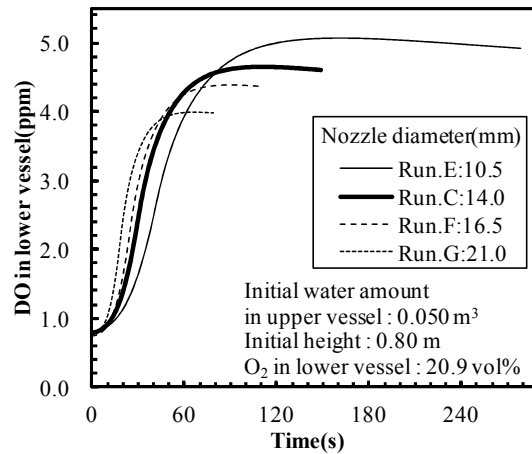


Fig. 2 Effect of nozzle diameter on calculated DO during tapping.

—注入時のガス吸収挙動に及ぼす雰囲気ガス濃度の影響—

注入挙動を調査する水模型実験装置において、雰囲気のガス濃度を任意に調整した状態で、注入に伴う溶存酸素濃度の経時変化を連続測定できる実験装置を構築した。実験結果から、雰囲気中のガス濃度を低減することで注入に伴うガス吸収量を低減できることが明らかになった。雰囲気ガス濃度を変更した際の溶存酸素濃度挙動は、吸ガス容量係数と希釈を考慮した推定式における平衡値に雰囲気ガス濃度を代入することで再現できることが示され、本手法の有用性が確認された。また、下容器内へのアルゴン吹込み実験結果を再現する検討を通して、注入時には容器外からの気相流入が生じており、滝壺へも供給されていることが判明した。さらに、この時の滝壺部および自由表面におけるガス濃度を直接測定した結果を元に、滝壺部、自由表面におけるガス濃度の経時変化を見積もることが出来る推定式を構築した。

—注入に伴う滝壺形成とガス吸収挙動解析—

注入に伴うガス吸収挙動を検討するにあたり、CFD を使った気液界面積の算出を試みた。CFD による気液界面積の計算結果の妥当性を確認するため、注入に伴って滝壺に巻き込まれるガス体積を実験的に評価できる水模型実験装置を構築した。ガス体積評価実験と同じ条件を CFD で再現したところ、Fig. 3 に示すように流体の void 率 F を 0.5 に設定することで実験結果を概ね整理できることを確認した。また、Fig. 4 に示すように、滝壺での気泡を介したガス吸収時の物質移動係数 $k_{m,B}$ と底吹き実験から算出した物質移動係数 $k_{m,B}$ の両者を攪拌動力密度 ε で統一的に説明した。さらに、水-空気系と溶鋼-空気系での CFD 結果を比較し、滝壺部では断続的に比較的大きい気泡が生成していることが示唆された。

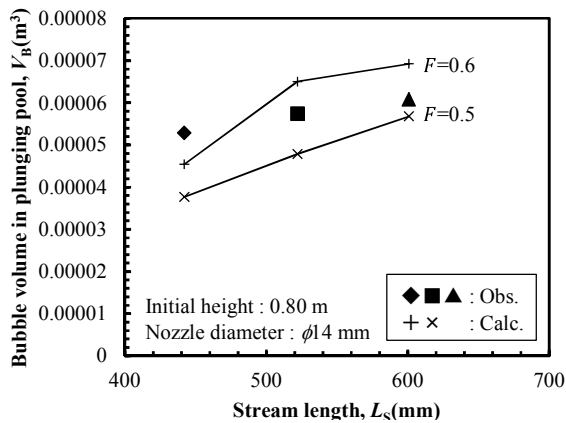


Fig. 3 Relation between stream length and bubble volume in plunging pool.

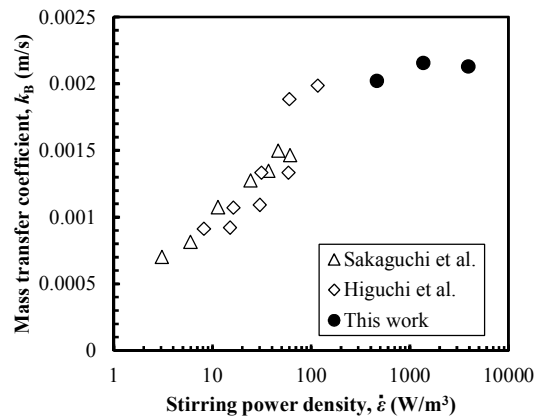


Fig. 4 Relation between ϵ and k_B .

第3章 溶鋼への窒素ガス吹込み時の窒素吸収挙動解析

溶鋼への窒素ガス吹込み実験を通して、気泡界面および自由表面からの窒素吸収速度を評価した。実験装置およびガス吹込み条件を種々変更して攪拌動力密度 ϵ を変えるとともに、物質移動と化学反応の混合律速モデルを使った解析を試みた。CFD を用いた解析により、Fig. 5 に示すように、底吹き実験における気泡表面の面積 A_B および自由表面の面積 A_F を定量的に明らかにした。底吹き実験結果を物質移動、化学反応の混合律速モデルで解析し、 A_B および A_F を代入することで、気泡表面と自由表面の物質移動係数 $k_{m,B}$ および $k_{m,F}$ を算出した。Fig. 6 に示すように、吸窒反応の $k_{m,B}$ 、 $k_{m,F}$ はそれぞれ攪拌動力密度 ϵ の 0.60 乗、0.63 乗で整理でき、その結果は既往研究から考えられる範囲内であることが確認できた。

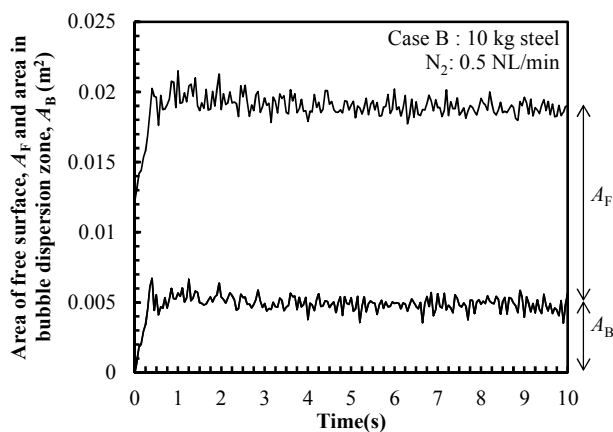


Fig. 5 Changes of area of free surface and area in bubble dispersion zone.

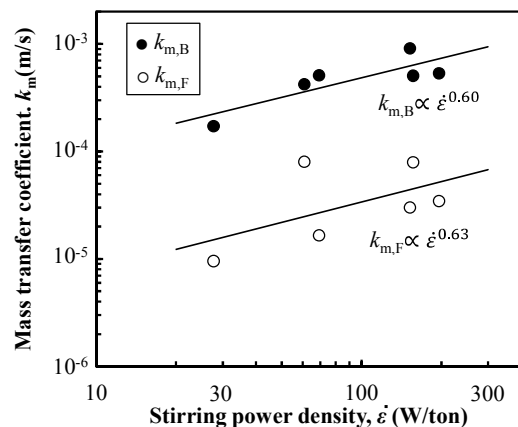


Fig. 6 Relation between ϵ and k_m .

第4章 溶鋼注入時の鋼の窒素吸収挙動解析

高周波誘導炉から捨て型もしくは取鍋に溶鋼を出鋼する際に、受鋼容器内の溶鋼を連続採取する溶鋼実験を行い、出鋼時の吸窒挙動を明らかにした。水モデルおよび溶鋼実験、

数値解析結果をもとに、出鋼時の吸窒挙動を解析可能な混合律速モデルを構築するとともに、物質移動係数 $k_{m,B}$ を攪拌動力密度 ε の関数として定式化し、出鋼時の窒素濃度推移を再現できることを確認した。また、注入中の吸窒過程の物質移動、反応抵抗を比較し、Fig. 7に示すように、注入開始直後は反応抵抗および気側物質移動抵抗が支配的だが、その後は徐々に液側物質移動抵抗の割合が増大し、注入末期には4割から7割が液側物質移動抵抗になることを明らかにした。本研究で構築した手法を用いて100 ton規模の転炉からの出鋼中の窒素濃度推移を推定し、吸窒抑制には出鋼末期に脱酸剤を添加することが有効である一方、Fig. 8に示すように、滝壺部分の窒素分圧を低減することでAl脱酸鋼の吸窒量を0.0005 mass%以下に低減するには、窒素分圧を0.19 atmまで低減することが必要なことを明らかにできた。

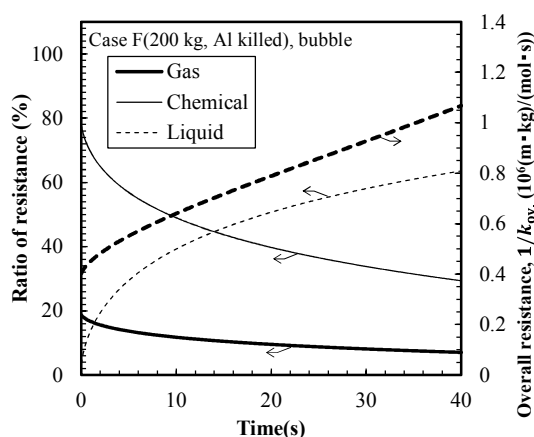


Fig. 7 Ratio of resistance of mass transfer of liquid and gas phase and chemical reaction.

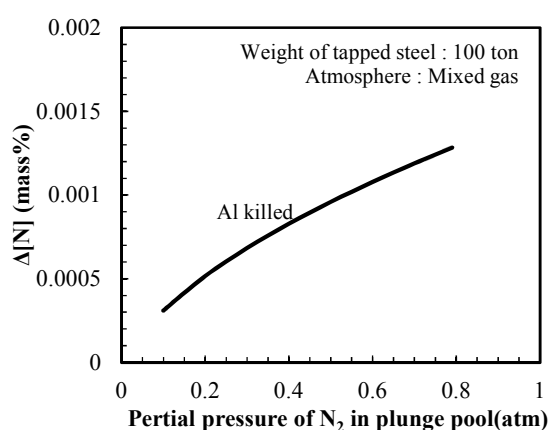


Fig. 8 Relation between P_{N_2} in plunging pool and $\Delta[N]$ during tapping.

第5章 結論

第1章から第4章に記載した内容を纏めるとともに、本研究の工学的意義をまとめた。工学的意義としては、注入流による気泡巻込み現象の解明にVOF法に基づく1流体モデルによる数値解析を適用し、注入現象においても数値解析が有効であることを示した点、気泡界面からの吸窒現象を解析する際、容量係数としてではなく物質移動係数と気泡表面積を分けて評価した点、吸脱ガス反応解析に、液側、気側の物質移動、化学反応抵抗の混合律速モデルを適用し、溶鋼注入時の律速過程を定量的に明らかにした点を挙げ、低窒素鋼溶製プロセスの開発促進に寄与する研究である事を述べた。また、本研究を踏まえた、低窒素鋼溶製に係る製鋼プロセスの将来展望として、脱酸用Alの添加量およびタイミング、転炉出鋼時の注入高さ、取鍋内の窒素分圧を制御することによる低窒素鋼溶製の可能性について述べた。さらに、本研究で定式化した攪拌動力密度 ε と物質移動係数 $k_{m,B}$ の関係式を使った、LF、KIP、V-KIP、CASといった注入現象以外のガス吹込みプロセス、タンディッシュにおける溶鋼再酸化抑制手法への展開について述べた。