

学位論文要旨

製鋼精錬プロセスの生産性および効率の向上に関する研究
Research on Enhancement of Productivity and Efficiency
in Refining Process of Steelmaking

金沢大学大学院 自然科学研究科

システム創成科学 専攻

次世代鉄鋼総合科学 講座

内藤 憲一郎

要約：

To enhance productivity and efficiency in refining process, mainly in BOF (Basic Oxygen Furnace) that is the key process of steelmaking, is an important issue. Since top-blowing and bottom-stirring are the dominant actuators with high-controllability during blowing period, their characteristics and influences on productivity and efficiency were evaluated quantitatively. Besides, it is also important to enhance productivity and efficiency during non-blowing period such as intermediate deslagging of MURC (Multi-Refining Converter) and the mechanism of intermediate deslagging was investigated. The followings are the main contents.

1) The characteristics of top-blown jet under incorrect expansion and the interference behavior of multiple jets were investigated using cold model and the prediction models were proposed.

2) The effects of top blowing and bottom stirring conditions were investigated with the aim of suppressing excessive oxidation using 6t BOF and their effects were elucidated quantitatively through numerical model analysis.

3) The characteristics of top-blown jet and bottom stirring under reduced pressure condition were investigated using cold model and hot model respectively and the estimating equations were proposed.

4) The fluid behavior during intermediate deslagging was investigated using water model and the effects of various factors were evaluated. The results were reproduced by simple model and CFD (Computational Fluid Dynamics) model.

要旨：

【第1章】

第1章では、序論として、本研究の背景、目的、課題について述べた。本研究では、製鋼精錬の基幹プロセスである転炉を主な対象としてプロセスの生産性および効率を向上させることを目的とした。特に、転炉の吹錬工程においては上吹きランスからのガス供給、底吹きによるガス攪拌が支配的かつ制御性の高い操作端であり、それらの特性の定量的評価ならびにそれらが精錬プロセスの生産性や効率に及ぼす影響を検討した。さらに、MURC (Multi-Refining Converter)法のように脱珪・脱りん、脱炭を同一炉で処理する方式の場合、途中で転炉を傾動して脱珪・脱りんスラグを排滓する中間排滓等の非吹錬工程の高効率化によりプロセスの生産性および効率の向上を図ることも可能であると考え、中間排滓の機構に関する検討を行った。

【第2章】

第2章では、転炉上吹きランス噴流の特性について述べた。転炉内反応制御のため、上吹きランス噴流は重要な操作端であるが、転炉精錬においてはラバールノズルが使用されている。しかし、それが本来の適正膨張条件ではなく、広範囲の不適正膨張条件で使用された場合の噴流特性に関する知見、また、多孔ランスの複数噴流間の干渉に関する知見は本研究開発実行当時にはほとんどなかった。そこで、コールドモデル実験により、不適正膨張条件下での噴流特性および多孔ランスから吐出する複数噴流の干渉挙動の検討を行い、不適正膨張時も含めた噴流の中心流速の推定を可能とするとともに、複数噴流の干渉挙動を説明する簡易モデルを提案した。さらに、噴流挙動とダスト発生との関係を検討するため、6t規模の転炉を用いた熱間試験を行った結果、ダスト発生と噴流流速には良い相関があり、不適正膨張条件を利用してソフトブロー化することでダスト発生が減少することを明らかにした。第2章の結論は以下のとおりである。

- 1) 不適正度(P_0/P_{0P})と無次元化した噴流のジェットコア長さ(H_c/H_{cP})の間には良い相関がある。さらに、不適正膨張時も含め、中心流速の推定が可能となった。
- 2) 複数噴流間の圧力差および運動量の保存を仮定することにより、複数噴流の干渉挙動を説明する簡易モデルを構築した。本モデルにより、2つの噴流が互いに徐々に引き寄せられる挙動が再現でき、流速分布の計算結果と測定結果はほぼ一致した。
- 3) ダスト発生と噴流流速には良い相関があり、不適正膨張条件を利用してソフトブロー化することでダスト発生が減少する。これは、噴流流速の低下により、火点域の温度が低下し、ヒューム系ダストの原因となる金属の蒸発が抑制されたためと考えられる。

【第3章】

第3章では、過酸化に及ぼす転炉上底吹き条件の影響について述べた。転炉吹錬の脱炭末期においては溶鋼中[C]が低下すると、雰囲気中のCOガス分圧と平衡するように溶鋼中[O]が上昇する。しかし、攪拌が強い

場合、見かけの CO ガス分圧は 1 気圧以下となり、過酸化が抑制できること知られていた。そこで、6t 規模の転炉を用い、上吹き送酸速度や底吹き攪拌を変更して、過酸化が抑制される現象を系統的に評価した。さらに、実験結果をもとに上底吹き条件とスラグ-メタル界面における物質移動の関係をモデルにより解析し、脱炭末期において、メタル-スラグ間の物質移動は上底吹き転炉においては十分速いこと、さらに反応領域(火点域)の物質移動にはランス噴流のエネルギー以上に脱炭反応で発生する CO ガスのエネルギーが影響していることを明らかにした。従来、水モデル等の試験結果からランス噴流が攪拌に及ぼす影響は底吹きに比べて小さいとされていたが、実際の転炉では脱炭反応で発生する CO ガスによる攪拌が大きく影響していることを新たに見出し、反応領域の攪拌に及ぼす上吹き送酸速度の寄与を示すことができた。第 3 章の結論は以下のとおりである。

- 1) 過酸化を抑制するためには、上吹き送酸速度を低減するとともに、底吹き攪拌エネルギーを高めることが重要である。そのような条件下では、見かけの CO ガス分圧 P_{CO} が 1atm より低いレベルまで抑制される。
- 2) 反応領域の攪拌条件には、噴流の運動エネルギー以上に脱炭反応で発生する CO ガスのエネルギーが大きく影響していると考えられる。
- 3) 反応領域のスラグ-メタル界面における物質移動パラメータ k_1A_{1p} が鉄浴に到達する酸素流量 ηF_{O_2} のべき乗に比例し、そのべき乗数は 0.5~0.7 の範囲である。
- 4) k_1A_{1p} に及ぼす底吹きの影響を 6t 転炉実験と 350t 実機転炉操業のデータを用いて回帰分析にて見積もった結果、底吹きの影響も大きいことが推察された。
- 5) バルクメタルとバルクスラグの酸素ポテンシャルはほぼ等しく、これは、上底吹き転炉において、反応領域外のスラグ-メタル界面における物質移動が十分大きく、ほぼ平衡に達していることを表す。
- 6) 脱炭に消費されなかった酸素はバルクメタルとバルクスラグ間で分配される。すなわち、[O] はバルクメタル中の [C] と [O] の平衡ではなく、バルクメタルとバルクスラグ間の酸素の分配平衡によって決まる。上吹き送酸速度が低く、底吹き攪拌エネルギーが高い条件では、脱炭に消費されない酸素が減少し、見かけの CO ガス分圧 PCO が大気圧条件下においても 1atm よりも小さくなる。
- 7) 改良した脱炭モデルでは、上吹き送酸速度が低く、底吹き攪拌エネルギーが高い条件ほど過酸化が抑制される挙動を再現でき、6t 転炉実験および 350t 実機転炉操業の結果ともよく合致する。
- 8) 上吹き酸素は反応領域におけるスラグ-メタル界面の物質移動促進に対して重要な役割を担うため、上吹き送酸速度を低減することは、吹錬時間の延長を招く。底吹き攪拌エネルギーを増加させることが吹錬時間の延長を防止するために有効であると期待される。

【第 4 章】

第 4 章では、減圧下における上底吹きの挙動について述べた。前章までは転炉のランス噴流や底吹き攪拌の挙動に関する研究を行ってきたが、二次精錬で多用される減圧処理でも、ランス噴流や底吹き攪拌は操作端として使用されている。特に、減圧処理においては、例えばランス噴流の場合、ノズルの入側圧と出側圧の比は、減圧槽内の圧力変化により数十倍~数百倍と大きく変化し、大気圧処理時の数倍とは大きく異なる。また、底吹き攪拌においても、鉄浴表面近傍で圧が急激に解放されるため、大気圧下での挙動とは大きく異なる可能性があると考えられた。そこで、減圧下における上吹き噴流および底吹きの挙動の定量化を目的とし、上吹き噴流挙動についてはコールドモデルで、底吹き挙動については真空試験炉で、雰囲気圧を変化させて減圧下の挙動を調査した。その結果、ランス噴流については、大気圧下と同様に不適正度の概念を用いて、噴流中心軸上の流速が整理できることを見出し、広範囲の減圧条件に適用できる噴流流速の予測式を提案した。また、底吹き攪拌については、自由表面直下で急激に解放されるガス膨張分のエネルギーは浴面を盛り上げる力として寄与しないとしたモデルを提案し、高真空下にも適用できる盛り上がり高さの推定式を構築した。第 4 章の結論は以下のとおりである。

- 1) 上吹き噴流流速は雰囲気圧の低下に伴い増加する。また、雰囲気圧の変化に伴い、ノズル間の噴流流速の大小関係が逆転する場合もあるなど、不適正膨張下でのエネルギー損失により、噴流流速は複雑な挙動を示す。
- 2) 測定結果に基づき、不適正度がジェットコア長さに及ぼす影響を関数化し、噴流流速推定式を構築した。減圧下での広範囲での不適正膨張条件下での噴流挙動をある程度の精度で推定できた。
- 3) 底吹きガスによる浴面の盛り上がり高さは雰囲気圧の低下に伴い増加する。理論的には盛り上がり高さは底吹きエネルギーの 2/3 乗に比例するはずであるが、雰囲気圧の低下に伴い、比例関係からははずれ、盛り上がり高さが小さくなる。これは、雰囲気圧が低い場合、底吹きエネルギーが自由表面直下で急激に解放されるため、浴面を盛り上げる力として有効に作用しないためと推察される。

- 4)自由表面直下で急激に解放されるガス膨張分のエネルギーは浴面を盛り上げる力として寄与しないとしたモデルで補正を行うことにより、高真空下(=雰囲気圧が低い場合)にも適用できる盛り上がり高さの推定式を構築した。

【第5章】

第5章では、MURC法の中間排滓中の流体挙動について述べた。製鋼精錬プロセスの生産性や効率の向上方策は必ずしも前章までに述べてきたようなプロセスの操作端の改善のみに限られるものではなく、MURC法では中間排滓工程の高効率化によりプロセスの生産性および効率の向上を図ることも可能であると考え、中間排滓中の流体挙動に関する知見を得ることを目的に検討を行った。水モデル実験により、中間排滓をシミュレートし、中間排滓中の流体挙動に及ぼす各種因子の影響を検討した結果、中間排滓性に及ぼす傾動パターン、メタル、スラグの物性、炉口形状等の影響が定量的に評価でき、さらに簡易モデルや数値計算により、中間排滓中の流体挙動を再現することに成功した。第5章の結論は以下のとおりである。

- 1)傾動パターンの影響を調査した結果、傾動速度の遅いパターンほど排滓時間は延びるが、排滓量が向上する。また、初期に高速で傾動していても、排滓途中で減速することにより、切り替えタイミングが十分早ければ、同一排滓量下で排滓時間の短縮が可能となる。
- 2)メタル、スラグの物性の影響を調査した結果、スラグ粘度が大きく、スラグとメタルの密度差が小さいほど、メタルが流出しやすく、排滓量が低下する。この結果から、メタル流出にはスラグ粘性によるせん断力と重力(浮力)が影響すると考えられる。
- 3)炉口形状の影響を調査した結果、炉口部への堰設置により、排滓性は向上する。堰の設置によるメタル流出抑制機構には、メタルの遡上をブロックする効果、スラグ流出部の断面積が増加することで流出部のスラグ高さが低下し、位置エネルギーで駆動されるスラグの流速が低下するため、メタルに作用するせん断力が低減する効果があると考えられる。
- 4)水モデル実験結果に基づき、メタル流出限界や排滓速度を予測する簡易モデルを構築し、排滓中の流体挙動を再現できた。
- 5)数値流体解析でも、水モデル実験結果を再現でき、数値流体解析の妥当性が確認できた。

尚、本章で示したように、MURC法の中間排滓にはメタル、スラグの物性が大きく影響するが、実プロセスのスラグは気泡、フラックス固相、晶出固相、粒鉄等が分散したマルチフェーズスラグであり、その物性が排滓性に大きく影響すると推察される。今後、マルチフェーズスラグ中の各種相の存在形態(サイズ、存在箇所等)の解明が進めば、本章の知見をもとに実プロセスでの排滓現象の定量的な予測が可能になると考えられる。

【第6章】

第6章では、結論として、本研究を総括し、今後の展開について述べた。本研究では、製鋼精錬の基幹プロセスである転炉を主な対象として、プロセスの生産性および効率の向上に関する課題について研究を行った結果をまとめた。製鋼精錬プロセスの主要な操作端である上吹きランスからのガス供給、底吹きによるガス攪拌の定量的評価ならびにそれらがプロセスの生産性や効率に及ぼす影響を検討すること、さらにはMURC法における中間排滓中の流体挙動の定量的解明を進めることを通じて、製鋼精錬プロセスの生産性や効率の向上に寄与するものである。また、本研究で得られた知見は、既存の知見および今後のセンシング技術や数値解析技術の進展で得られるであろう知見と合わせて、今後の製鋼精錬プロセスの生産性および効率のさらなる向上の追求につながり、鉄鋼業の発展に寄与するものと確信している。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

製鋼精錬プロセスの生産性および効率の向上に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所属 システム創成科学専攻 次世代鉄鋼総合科学講座

(2) 氏名 内藤 憲一郎

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成26年1月28日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は学位論文研究において、①転炉上吹きランス噴流の不適正膨張条件下で噴流の中心流速の推定を可能とするとともに、複数噴流の干渉挙動を説明する簡易モデルを提案し、かつ、不適正膨張条件を利用してソフトブロー化することでダスト発生が減少することを明らかにした。②過酸化に及ぼす転炉上底吹き条件の影響を解析し、脱炭末期において、メタルスラグ間の物質移動は上底吹き転炉においては十分速いこと、さらに反応領域（火点域）の物質移動にはランス噴流のエネルギー以上に脱炭反応で発生するCOガスによる攪拌が大きく影響していることを新たに見出し、過酸化が抑制される現象を系統的に評価した。③減圧下における上底吹きのランス噴流についても、大気圧下と同様に不適正度の概念を用いて噴流中心軸上の流速が整理できることを見出し、減圧条件に適用できる噴流流速の予測式を提案し、また、高真空下にも適用できる盛り上がり高さの推定式を構築した。④MURC法の間排滓中の排滓性に及ぼす傾動パターン、メタル、スラグの物性、炉口形状等の影響を定量的に評価し、簡易モデルや数値計算により、中間排滓中の流体挙動を再現することに成功した。

以上のように、本論文は転炉、真空脱ガスプロセス操業に関わる幾つか現象に対して新知見を見出し、かつ、操業に適用可能なモデルを提案し、生産性および効率化の向上に対する学術的および工業的価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）