



Title	転炉における脱炭に対する流動-反応を連成した数値計算法の研究
Author(s)	山本, 哲也
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88035
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (山本 哲也)

論文題名 転炉における脱炭に対する流動-反応を連成した数値計算法の研究

論文内容の要旨

転炉は鉄鋼プロセスの中で全体の生産性を左右する重要な工程の一つである。転炉の生産性を向上させるためには、不明点の多い炉内現象の解明が望まれる。転炉内現象は非常に複雑であり、全てを明らかにすることは困難である。特に、エマルジョンゾーン内の現象については、不明点が多く、解析が困難である。比較的、現象把握が進んでいる火点に対しても、解析手法が確立されておらず、圧縮性気液二相流の計算法、脱炭反応モデルに課題が残されている。本研究では、転炉における火点での脱炭現象の解析を目的に、数値流体力学 (CFD) を用いて、化学反応による物質伝達を伴う圧縮性気液二相流の計算法および脱炭反応モデルを提案した。

第1章では、鉄鋼プロセスにおける転炉の位置付け、転炉内現象、数値計算による転炉解析の現状について述べ、本研究の背景と目的を明確にした。

第2章では、転炉における脱炭現象を扱うための基礎となる数値計算法の詳細を述べた。Thermo CIP-CUP法に基づく圧縮性気液二相流の計算法を、化学反応による物質伝達を考慮できるように拡張するとともに、従来CIP法などのセミラグランジュスキームで離散化されていた非保存形の移流項を保存形の移流項とその他の部分に分けて離散化した。この離散化法の改良により、移流項に対する離散化手法の選択の自由度を高めるとともに、非構造格子へ適用できるように拡張し、実用問題に対して有用な手法とした。従来のCFDを用いた転炉における脱炭計算では、物質伝達速度と界面反応速度のどちらか一方のみを脱炭反応の律速過程として考慮していたが、本研究では、物質伝達速度と界面反応速度の両方を律速過程として考慮した反応モデルを構築し、圧縮性気液二相流の計算法と統合した。以上により、転炉での超音速 O_2 ジェットを用いた脱炭解析に適用可能な計算法とした。

第3章では、圧縮性単相流、非圧縮性単相乱流、非圧縮性気液二相流の代表的な問題を解くことにより、流体計算の妥当性を評価した。本計算法により、前記の様々な流れに対して妥当な解が得られたことから、第4章で議論する脱炭反応モデルを評価するのに十分な計算法が確立されたと結論づけた。さらに、転炉に対する水モデル実験としてしばしば研究対象とされる水浴に衝突する高速ガスジェットを計算し、既往文献の測定結果と比較することにより、ジェットによって水面に形成されるキャビティ形状を定性的に再現できることを示した。

第4章では、本計算法を用いて、坩堝内の溶鉄への CO_2 - CO 混合ガスジェットの吹き付けによる脱炭を計算し、実測された文献値と脱炭速度を比較した。その結果、本計算法により、坩堝全体の脱炭速度が定量的に再現された。また、脱炭反応速度が流動-反応の相互作用により変化することが分かった。さらに、物質伝達速度だけでなく、界面反応速度も律速過程として考慮することが、局所的な脱炭現象の再現において重要であることを見出した。

第5章では、実機の1/5スケールの小型試験転炉における超音速 O_2 ジェットによる脱炭を計算し、高炭素濃度の溶鉄浴に対する火点での脱炭を予測した。その結果、本計算法を用いることで、 O_2 、 CO_2 による脱炭、二次燃焼、超音速ガスジェットによるキャビティの形成、底吹きによる攪拌といった転炉の主要な現象を定性的に再現できた。また、火点では吹き込まれた O_2 の約10%しか脱炭に寄与しないことが示唆された。本研究で得られた火点での脱炭割合は、経験式により流動を推定するモデルを用いた既往研究の結果と定性的に一致した。本計算法は、流動を直接計算するため、経験式により流動を推定するモデルと異なり、経験因子に依存せず、適用可能な転炉の条件範囲が広いと考えられる。さらに、本結果から、実転炉では、ジェットの非定常性に起因する微細なスプラッシュ液滴での脱炭が支配的であることも示唆された。

第6章では、本研究を総括した。本研究で初めて提案した流動-反応を連成した数値計算法と転炉内の脱炭現象の解析結果の概略、それらの転炉内現象の全容解明における意義を述べた。最後に、今後の展開として、転炉内の脱炭現象の解明において、ジェットの非定常性を捉えることが可能なlarge eddy simulationを用いたシミュレーションが重要であり、物質伝達に関する新たなサブグリッドスケールモデルを開発する必要があると論じ、結言とした。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (山 本 哲 也)	
論文審査担当者	(職) 氏 名
	主 査 教 授 梶 島 岳 夫
	副 査 教 授 田 中 敏 嗣
	副 査 教 授 芝 原 正 彦
副 査 准教授 大 森 健 史 (大阪市立大学 工学研究科)	

論文審査の結果の要旨

鉄鋼は現代社会において最も広範に使用されている素材であり、その高品質化はわが国の産業の国際競争力向上と市民生活の安全性確保のために不可欠である。転炉は、高炉とともに製鉄の主要工程であり、溶銑から溶鋼を製造する過程で成分調整の役割を担う。転炉内の溶鉄浴に酸素噴流が衝突して形成される火点における流動と反応は、炭素および不純物の除去に対する支配因子である。しかし、実際の転炉の内部は高温であり、超音速噴流に起因する流動と反応はいずれも複雑であるため、計測どころか観察すら困難である。そのため従来は、実験用モデルを対象とした測定データの蓄積と数値シミュレーションによる再現が、気液界面挙動あるいは化学反応に対して個別に試みられてきた。一方、転炉現象の全容解明に基づく設計ならびに運用の高度化に対しては、流動と反応を同時に扱う総合的な数値解析法の確立が必要である。

本論文は、超音速噴流が溶鉄液面に衝突する現象を対象として、気液二相流動と脱炭反応を連成したシミュレーション手法を構築することを目的として実施した研究を取りまとめたもので、以下のような成果を示している。

1. 物質伝達速度と界面反応速度の双方を律速過程として考慮した反応モデルを圧縮性気液二相流の計算法と統合することにより、転炉での超音速酸素噴流による脱炭解析を可能とする手法を提案し、複雑形状境界を有する実機の流れ場に適用可能な非構造格子による数値計算を実現している。
2. ラージ・エディ・シミュレーション (LES) により水浴に衝突する窒素噴流により形成される気液二相乱流に対して数値計算を行い、液面キャビティの形状や非正常挙動について既存の実験結果と比較し、従来のレイノルズ平均流れ計算に比べて格段に優れた再現性を示すことにより、開発した手法の有効性を実証している。
3. 坩堝を用いて実施された CO₂-CO 混合噴流による脱炭の実験を数値的にシミュレートし、脱炭速度に対する CO₂ 濃度依存性を定量的に精度よく算出するためには、流動と反応の相互作用を扱うこと、さらに物質伝達と界面反応の速度を同時に考慮することが重要であることを示している。
4. 構築した数値計算法を実機の 1/5 スケールの試験転炉に適用し、脱炭と二次燃焼、キャビティとスプラッシュの形成、底吹きによる攪拌といった主要な現象がすべて定性的に再現されたことを確認し、工業的実用に向けた定量的な予測のためには微細なスプラッシュによる熱および物質移動のモデル開発が今後の課題であることを明らかにしている。

以上のように、本論文は流動と反応の連成を考慮して転炉内の脱炭現象の解析を可能とする手法を開発し、現象の全容解明とパラメータ依存性の研究の基盤を確立し、その有用性を示した成果を取りまとめたものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。