鉄鋼業の高品質薄板製造プロセスにおける

数値流動解析の研究

学位論文内容の要旨

近年、自動車業界を中心として、薄板表面処理鋼板の品質の厳格化が求められるようになった。その対策のためには、薄板表面処理鋼板の内部品質に対しては精錬プロセスおよび製鋼プロセスが、また鋼板表面品質については加熱プロセスおよび表面処理プロセスが影響していることが知られている。この課題を解決するためには、各製造プロセスで生じている現象を適切に把握することにより、高品質な薄板表面処理鋼板を製造するために必要な対策を施すことが重要である。しかしながら、各製造プロセスは高温で実計測が不可能な状況にあたり、侵食性の高い熔融金属だったりするために、これまで全ての実測データを収集することが不可能とされ、ブラックボックス化していた。最近、計算機の高速度化・廉価化と種々の数値解析モデルの提案により、ブラックボックスを数値流体解析で可視化しようとする研究が個別のプロセスで行なわれている。

そこで本研究では、高品質薄板製造プロセスに必須である精錬・ casting・加熱炉・表面処理のプロセスにおける数値流動モデルを構築して、複雑な現象を理解するための系統的研究を行なった。本論文は七章からなり、各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を明らかにした。

第2章では、従来転炉・二次精錬のプロセスで微細に発生したアルミナ介在物が casting時には大径化して品質低下を招く問題があるが、この介在物の大径化について検討された例が少ない。そこで精錬プロセスにおける、特に二次精錬を終了後の溶鋼中に存在するアルミナ介在物の動的挙動と、アルミナ介在物の凝集体について数学モデルを構築した。凝集体のモデルは、(1)流れ時間変動による凝集、(2)重力による差動凝集、(3)流れの乱流による凝集を考慮した。このモデルを、精錬時の静置した取鍋内溶鋼で自然対流状況にあるアルミナ介在物の凝集体挙動に適用した。その結果、介在物の凝集の主原因は差動凝集であること、また自然対流下の凝集体により介在物の濃度分布が発生して濃度分布が50%にもなることがわかり、品質向上のためには、取鍋を静置させることがアルミナ介在物を除去するために、有効な方法であることを示した。

連続 castingプロセスでは casting速度に関係無く casting型内の自由界面であるメニスカス流動を低速化・安定化させるにより、熔融パウダーが溶鋼中への混入することを低減

するために有効な手法であることがわかっている。この目的のために鑄造プロセスにおいては、鑄型内の浸漬ノズルから供給される溶鋼流動に電磁力を印加する方法が広く活用されているが、種々の電磁力を印加した場合の溶鋼流動現象について比較検討されたものは無い。そこで、第3章では、溶鋼流動に電磁力を考慮できる解析モデルを提案して、鑄型内溶鋼流動を解析した。電磁力の印加方法としては、(1) 移動磁場によるもの、(2) 静磁場によるもの、の2種類の電磁力を個別に印加した時の効果を考慮できる数値モデルを作成して検討した。その結果、静磁場よりも移動磁場の方が溶鋼流動の低速化に与える影響が大きく、3.5 m/minの鑄造速度にしても、従来の鑄型内溶鋼流動レベルに制御可能であるという知見が得られた。

スラブ加熱炉での不均一加熱は、スラブ割れの原因や不均一品質の原因となることが知られており、均一加熱することが重要である。また当然のことながら、環境上の問題から高効率であることも重要である。そこで、従来よりも均一加熱・環境調和型の燃焼方式として、拡散燃焼バーナを用いた蓄熱式燃焼炉が開発された。第4章では、流動数値解析モデルを構築して、蓄熱式燃焼炉の均一加熱・高効率化について検討した。燃焼モデルには乱流現象を確率密度関数で考慮した熱平衡モデルを使用した。その結果を試験炉のデータと比較して、炉内温度分布およびエネルギーバランスが良好に一致することが示した。さらに、実機建設前に実機サイズでの蓄熱燃焼炉の数値解析を行ない、試験炉同様に高効率・均一加熱の操業ができることを解析から示した。

前章のスラブ加熱炉においては、環境上の問題から低NO燃焼であることが求められているため、第5章では拡散燃焼バーナを用いた蓄熱式燃焼炉で発生するNO反応生成モデルを製作して解析を行なった。NO生成は燃焼同様に乱流現象を確率密度関数で考慮した(1) サーマル、(2) プロンプト、(3) リバーニング、の3種類のメカニズムを考慮してNO生成モデルに組入れた。試験炉での解析結果は、計測されたNO発生量と50 ppm以下の偏差で、実測と良好な一致をすることがわかり、またNO生成メカニズムはサーマルNOが主原因で、燃料にコース炉のオフガスを用いた今回の試験炉ではリバーニングによる影響が少ないことも示した。

溶融亜鉛めっきプロセスにおいては、最終的なめっき表面に不純物である金属間化合物が表面付着しないようにすることが必須である。そこで第6章では、溶融亜鉛ポット内の溶融亜鉛および不純物である金属間化合物の挙動を解析するモデルを構築した。金属間化合物の物性については不明であったため、独自の方法で物性値計測を行なった。その物性データを用いて溶融亜鉛と不純物である金属間化合物の挙動解析を行なった。その結果、溶融亜鉛よりも比重の高い金属間化合物は、溶融亜鉛ポットの底部において溶融亜鉛流動の乱れの少ない部分に堆積することがわかった。さらに鋼帯入側部分に多く堆積することがわかり、今後のプロセス開発に多くの知見を得た。

第七章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめ、将来への展望について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	井口	学
副査	教授	篠原	邦夫
副査	教授	工藤	昌行
副査	教授	荒井	正彦
副査	助教授	木内	弘道

学位論文題名

鉄鋼業の高品質薄板製造プロセスにおける 数値流動解析の研究

近年、自動車業界を中心として、薄板表面処理鋼板の品質の厳格化が求められるようになった。その対策のためには、薄板表面処理鋼板の内部品質に対しては精錬プロセスおよび製鋼プロセスが、また鋼板表面品質については加熱プロセスおよび表面処理プロセスが影響していることが知られている。この課題を解決するためには、各製造プロセスで生じている現象を適切に把握することにより、高品質な薄板表面処理鋼板を製造するために必要な対策を施すことが重要である。しかしながら、各製造プロセスは高温で実計測が不可能な状況にあたり、侵食性の高い熔融金属だったりするために、これまで全ての実測データを収集することが不可能とされ、ブラックボックス化していた。最近、計算機の高速化・廉価化と種々の数値解析モデルの提案により、ブラックボックスを数値流体解析で可視化しようとする研究が個別のプロセスで行なわれている。

そこで本研究では、高品質薄板製造プロセスに必須である精錬・ casting・加熱炉・表面処理のプロセスにおける数値流動モデルを構築して、複雑な現象を理解するための系統的研究を行なった。本論文は七章からなり、各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を明らかにした。

第2章では、従来転炉・二次精錬のプロセスで微細に発生したアルミナ介在物が casting 時には大径化して品質低下を招く問題があるが、この介在物の大径化について検討された例が少ない。そこで精錬プロセスにおける、特に二次精錬を終了後の溶鋼中に存在するアルミナ介在物の動的挙動と、アルミナ介在物の凝集体について数学モデルを構築した。凝集体のモデルは、(1) 流れ時間変動による凝集、(2) 重力による差動凝集、(3) 流れの乱流による凝集を考慮した。このモデルを、精錬時の静置した取鍋内溶鋼で自然対流状況にあるアルミナ介在物の凝集体挙動に適用した。その結果、介在物の凝集の主原因は差動凝集であること、また自然対流下の凝集体により介在物の濃度分布が発生して濃度分布が50%にもなることがわかり、品質向上のためには、取鍋を静置させることがアルミナ介在物を除去するために、有効な方法であることを示した。

連続鋳造プロセスでは鋳造速度に関係無く鋳型内の自由界面であるメニスカス流動を低速化・安定化させるにより、溶融パウダーが溶鋼中への混入することを低減するために有効な手法であることがわかっている。この目的のために鋳造プロセスにおいては、鋳型内の浸漬ノズルから供給される溶鋼流動に電磁力を印加する方法が広く活用されているが、種々の電磁力を印加した場合の溶鋼流動現象について比較検討されたものは無い。そこで、第3章では、溶鋼流動に電磁力を考慮できる解析モデルを提案して、鋳型内溶鋼流動を解析した。電磁力の印加方法としては、(1) 移動磁場によるもの、(2) 静磁場によるもの、の2種類の電磁力を個別に印加した時の効果を考慮できる数値モデルを作成して検討した。その結果、静磁場よりも移動磁場の方が溶鋼流動の低速化に与える影響が大きく、3.5 m/min の鋳造速度にしても、従来の鋳型内溶鋼流動レベルに制御可能であるという知見が得られた。

スラブ加熱炉での不均一加熱は、スラブ割れの原因や不均一品質の原因となることが知られており、均一加熱することが重要である。また当然のことながら、環境上の問題から高効率であることも重要である。そこで、従来よりも均一加熱・環境調和型の燃焼方式として、拡散燃焼バーナを用いた蓄熱式燃焼炉が開発された。第4章では、流動数値解析モデルを構築して、蓄熱式燃焼炉の均一加熱・高効率化について検討した。燃焼モデルには乱流現象を確率密度関数で考慮した熱平衡モデルを使用した。その結果を試験炉のデータと比較して、炉内温度分布およびエネルギーバランスが良好に一致することが示した。さらに、実機建設前に実機サイズでの蓄熱燃焼炉の数値解析を行ない、試験炉同様に高効率・均一加熱の操業ができることを解析から示した。

前章のスラブ加熱炉においては、環境上の問題から低NO燃焼であることが求められているため、第5章では拡散燃焼バーナを用いた蓄熱式燃焼炉で発生するNO反応生成モデルを製作して解析を行なった。NO生成は燃焼同様に乱流現象を確率密度関数で考慮した(1) サーマル、(2) プロンプト、(3) リバーニング、の3種類のメカニズムを考慮してNO生成モデルに組み入れた。試験炉での解析結果は、計測されたNO発生量と50 ppm以下の偏差で、実測と良好な一致をすることがわかり、またNO生成メカニズムはサーマルNOが主原因で、燃料にコース炉のオフガスを用いた今回の試験炉ではリバーニングによる影響が少ないことも示した。

溶融亜鉛めっきプロセスにおいては、最終的なめっき表面に不純物である金属間化合物が表面付着しないようにすることが必須である。そこで第6章では、溶融亜鉛ポット内の溶融亜鉛および不純物である金属間化合物の挙動を解析するモデルを構築した。金属間化合物の物性については不明であったため、独自の方法で物性値計測を行なった。その物性データを用いて溶融亜鉛と不純物である金属間化合物の挙動解析を行なった。その結果、溶融亜鉛よりも比重の高い金属間化合物は、溶融亜鉛ポットの底部において溶融亜鉛流動の乱れの少ない部分に堆積することがわかった。さらに鋼帯入側部分に多く堆積することがわかり、今後のプロセス開発に多くの知見を得た。

第七章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめ、将来への展望について述べている。

これを要するに著者は、高品質薄板製造に必須である精錬・鋳造・加熱炉・表面処理プロセスにおける数値流動モデルを構築して、複雑な現象を解明し、実機にて高品質薄板の製造を実現したものであり、鉄鋼プロセス工学のみならず、材料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。