

学 位 論 文 題 名

連続 casting プロセスにおける
モールドパウダーの巻き込み現象

学位論文内容の要旨

鋼の連続 casting において、湯面上に存在するモールドパウダーは、湯面の保温、溶鋼の酸化防止、鋳型と鋳片間の潤滑等の役割を果たしている。しかし、モールドパウダーは様々な要因により溶鋼中に巻き込まれて鋳片中で非金属介在物として存在し、製品の欠陥となる。実機で巻き込み現象を調査することは非常に困難であることから、多くの研究者はコールドモデル実験を行っている。これまでにコールドモデル実験に基づいて提案された巻き込み原因を以下にまとめる。

- (1) 溶鋼の反転流とパウダー層間での剪断流による定常削り込み
- (2) 溶鋼の片流れにより浸漬ノズル周辺で発生するカルマン渦による巻き込み
- (3) 浸漬ノズル吐出孔から上昇してきた Ar ガス気泡が溶鋼/モールドパウダー界面を擾乱することで発生する巻き込み

これらの巻き込みのうち(1)と(2)は、メニスカス近傍の溶鋼流が片流れによって大きくなったときに発生する。しかしながら、流速の臨界値については明確にされていない。連続 casting の高速化に伴い溶鋼流速がさらに大きくなることから、モールドパウダー巻き込みに関する詳細な調査が必要である。そこで本研究では、従来の巻き込み原因をコールドモデル実験によって再検討するとともに、高速連続 casting 時に特に問題になると考えられる二つの新たな巻き込み原因を明らかにし、解決手段を提案した。本論文は七章から成り、各章の概略は以下に示すとおりである。

第一章は序論であり、本研究の背景および目的を明らかにした。

第二章では、溶鋼の偏流によって生じる溶鋼/モールドパウダー間の剪断力によって二液界面が不安定となって発生する新たな巻き込み原因を提案した。食塩水とシリコンオイルを用いたコールドモデル実験の結果、この巻き込みはケルビン-ヘルムホルツ不安定現象に基づいており、二液界面が不安定となる臨界速度は Milne-Thompson によって導かれた式が適用できることがわかった。なお、二液界面が不安定となる臨界速度に対し、モールドパウダーの動粘度の影響はみられなかった。実機でのパラメータを Milne-Thompson の式に代入して計算し、巻き込みが発生する溶鋼の臨界速度を求めた。

第三章では、浸漬ノズル内壁への介在物付着を抑制するために吹き込まれている Ar ガス気泡が、溶鋼/モールドパウダー界面を擾乱することで発生する巻き込みに関して調査した。浸漬ノズルと溶鋼は濡れ性が悪いことから、浸漬ノズル内部に吹き込まれた Ar ガスはカーテン状となる。したがって、ノズル吐出孔から上昇する気泡は巨大であると予想され、本

章では巨大な単一気泡による巻き込みに焦点をあて、巻き込みに及ぼすモールドパウダー焼結層の影響も調査した。コールドモデル実験の結果、気泡とともに上昇してきた溶鋼は、モールドパウダー焼結層に衝突すると鑄型の厚み方向へ広がり、鑄型壁面で下方向へ反転してモールドパウダーを巻き込むことが明らかになった。巻き込み深さが浅くとも、巻き込まれたモールドパウダーは鑄型壁面において凝固シェルに補足される可能性は十分にある。

第四章では、従来知られていなかった巻き込み機構を明らかにした。溶鋼の片流れが生じて溶鋼流が浸漬ノズルを横切ると、ノズル後方では圧力が減少する。その結果、モールドパウダーがノズル壁面に沿って降下し、ノズル吐出孔まで達すると溶鋼吐出流によって細かく分断されて巻き込みが発生する。この巻き込みを検証するためにコールドモデル実験を行った結果、従来から鑄片中で観察される微細な介在物の存在を十分に説明できることが分かった。浸漬ノズルに沿って降下するモールドパウダーの降下距離は、浸漬ノズルと溶鋼の濡れ性に大きな影響を受けており、濡れ性が良い場合と比べて濡れ性が悪い場合の方が約 1.5 倍深くモールドパウダーは降下した。モールドパウダーの降下距離に対する実験式を導出し、実機でのパラメータを代入して巻き込みが発生する溶鋼の臨界速度を求めた。

第五章では、第四章で提案した巻き込みの抑制法について述べている。ノズル周囲の圧力差を軽減すれば第四章の巻き込みは抑制されることから、圧力差の生じにくい楕円断面の浸漬ノズルを使用することでモールドパウダー巻き込みの抑制を試みた。コールドモデル実験の結果、楕円の短軸と長軸の比が小さくなるほどモールドパウダーの降下が抑制されることを明らかにした。さらに、従来のモールドパウダー巻き込み抑制手段の一つである電磁力による溶鋼流制御と比べて、省エネルギーである優れた巻き込み抑制手段であることを示した。

第六章では、従来からの巻き込みと本研究で提案した巻き込みを総合的に検討し、いずれが主たる巻き込み原因であるか判断した。第一章から第五章で述べたように、モールドパウダーの巻き込みは以下の五種類に大別される。

- (1) 溶鋼の反転流とパウダー層間での剪断流による定常削り込み
- (2) 急激な流れの変化による溶鋼/モールドパウダー界面での剪断流による巻き込み
- (3) 溶鋼の片流れにより浸漬ノズル周辺で発生するカルマン渦による巻き込み
- (4) 浸漬ノズル吐出孔から上昇してきた Ar ガス気泡が溶鋼/モールドパウダー界面を擾乱することで発生する巻き込み
- (5) 浸漬ノズル周辺の圧力差に起因した巻き込み

以上のうち、(1)～(3)、(5)は溶鋼流速が大きすぎるときに発生する。このなかで、巻き込みが発生する溶鋼の臨界速度が最も小さいものは(5)であることから、溶鋼流速が大きいときに発生する巻き込みの主原因は(5)であることが推察される。さらに、浸漬ノズルの断面形状を短軸と長軸の比が 0.7 である楕円形にすれば、(5)の巻き込み臨界速度を他の巻き込みによる臨界速度と同程度まで上げることができる。また、溶鋼の偏流が発生して溶鋼流速が小さい側では(4)の巻き込みが発生することから、モールドパウダー巻き込みの主原因は(4)、(5)であると判断した。

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	石井	邦宜
副査	教授	工藤	昌行
副査	助教授	木内	弘道

学位論文題名

連続鑄造プロセスにおける モールドパウダーの巻き込み現象

鋼の連続鑄造において、湯面上に存在するモールドパウダーは、湯面の保温、溶鋼の酸化防止、鑄型と鑄片間の潤滑等の役割を果たしている。しかし、モールドパウダーは様々な要因により溶鋼中に巻き込まれて鑄片中で非金属介在物として存在し、製品の欠陥となる。モールドパウダーの巻き込みは、主に鑄型内に周期的な偏流や片流れが発生して溶鋼流速が大きいときに発生するとされている。さらに近年、連続鑄造の高速化が進み鑄型内の溶鋼流速も大きくなってきたことから、モールドパウダーの巻き込みを詳細に調査する必要性が高まってきた。そこで本論文では、高速連続鑄造を想定してコールドモデル実験を行った結果、従来にはない新たなモールドパウダーの巻きこみ機構を提案している。従来から指摘されている巻きこみ機構と本論文で提案した巻きこみ機構をまとめて以下に示す。

- (1) 溶鋼の反転流とパウダー層間での剪断流による定常削り込み
- (2) 急激な流れの変化による溶鋼/モールドパウダー界面での剪断流による巻き込み
- (3) 溶鋼の片流れにより浸漬ノズル周辺で発生するカルマン渦による巻き込み
- (4) 浸漬ノズル吐出孔から上昇してきた Ar ガス気泡が溶鋼/モールドパウダー界面を擾乱することで発生する巻き込み
- (5) 浸漬ノズル周辺の圧力差に起因した巻き込み

以上のうち、本論文において提案しているのは(2)、(5)である。

(2)の急激な剪断流による巻きこみでは、溶鋼とモールドパウダーの速度差が臨界値

に達すると界面が不安定となって波が発生するケルビン-ヘルムホルツ不安定理論に基づいて、溶鋼/モールドパウダー界面が不安定となる臨界速度を求めている。不安定となった界面の一部は分断されて、巻きこみが発生する。界面が不安定になる予測式としては、実機におけるモールドパウダー焼結層による壁の影響を考慮した Milne-Thompson の式が適用可能であった。

(5)の浸漬ノズル壁面における圧力差に起因した巻きこみは、実機の鋳型内における周期的な偏流や片流れによって溶鋼が浸漬ノズルを横切ったときに発生する巻きこみとして本論文で提案している。モールドパウダーは、浸漬ノズル表面の圧力が減少した表面に沿って降下し、吐出孔まで達すると吐出流によって細かく分断されて巻きこみが発生する。この巻きこみ機構によって、鋳片中で観察される微細な非金属介在物を十分に説明することができる。さらに、浸漬ノズル外表面の濡れ性の違いによって浸漬ノズルに沿って降下するモールドパウダーの降下形状および降下距離が異なり、実機を想定した溶鋼とノズルの濡れ性が悪い方がモールドパウダーは降下しやすいことを明らかにしている。

上記(1)～(3), (5)の巻きこみ機構に対し、巻きこみが発生する溶鋼の臨界速度に関する予測式に実機のパラメータを代入して臨界速度を計算した結果、(5)の巻きこみ臨界速度が最も小さかった。また、溶鋼流速の関係ない(4)の巻きこみに関しては、本論文において詳細なコールドモデル実験を行った結果、モールドパウダー滴は巻きこみ深さに関わらず鋳型壁面の凝固シェルに補足される可能性が高いことを示唆している。したがって、モールドパウダーの主要な巻きこみは(4), (5)であるとしている。

本論文では、モールドパウダーの巻きこみ機構を調査するだけでなく、巻きこみ抑制についても述べている。(5)の巻きこみを抑制するために、浸漬ノズル周辺の圧力差を軽減する楕円断面を有する浸漬ノズルの使用を提案し、コールドモデル実験によりその効果を実証している。

これを要するに、著者は、連続鋳造プロセスにおけるモールドパウダー巻きこみに対して新知見を得たものであり、近年高まる連続鋳造の高速化に対して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。