

## 学位論文題名

## 連铸鑄片の表面欠陥の改善に関する研究

## 学位論文内容の要旨

鋼の連続鑄造は1950年代によく工業化された。我が国の鋼の生産量に占める連続鑄造の比率は1970年には約10%であったが、1980年には約60%と急激に増大し、現在は100%に近づきつつある。この間、鑄片を高温状態で熱間圧延工程に送る直送化のための技術開発が盛んに行われた。直送化を図るためには鑄片の無手入れ化が必須であり、鑄片表面欠陥防止技術の開発がきわめて重要な課題となってきている。

特に、鑄型内で発生する表面欠陥については、鑄型内の凝固現象が非常に複雑であり、発生機構・防止対策ともにまだ解明されていない点が多い。このため、鑄型内で不均一凝固しやすい、炭素量が0.08~0.16%程度の亜包晶鋼の表面割れや近年生産量が急増している極低炭素鋼の気泡欠陥が問題となっている。

一方、現状の連続鑄造に代わる新しい連続鑄造技術の創出に対する熱意も大きいものがあり、ストリップ連铸などニアネットシェイプキャスト法の開発も精力的に行われている。ニアネットシェイプキャストは製品に近い形状をしており、圧延率が少ないため表面品質に対する要求が特に厳しい。

このような背景から、特に最近問題になっている亜包晶鋼の表面割れ、極低炭素鋼の気泡欠陥、さらに将来連铸技術としてのストリップ連铸における表面欠陥の発生機構の解明およびその改善技術の開発を本研究の目的とした。以下にその概要を示す。

第1章では、鋼の連続鑄造の歴史、連铸鑄片の表面品質改善技術の重要性について述べた。また、連铸鑄片に発生する表面欠陥を分類し、その特徴を述べるとともに、それらの改善技術に関する従来の研究について紹介した。さらに、本論文の目的・構成について示した。

第2章では、鋼の連続鑄造に必須の鑄型振動と鑄片表面性状の関係について述べた。鋼の連続鑄造においては、鑄型と鑄片の焼き付きを防止するために鑄型を振動する必要がある。このため、鑄型の振動に応じて鑄片表面にはオッシレーションマークと呼ばれる凹みが生ずる。オッシレーションマーク部には応力が集中しやすく、また不均一凝固しやすいため横割れや気泡欠陥が発生しやすい。そこで水モデル装置・試験連铸機・実機改造連铸機・実機連铸機を用い、オッシレーションマークの生成におよぼす鑄型振動条件の影響について調査・研究した。その結果、鑄型振動数の高サイクル化によりオッシレーションマーク深さの低減および横割れの防止が可能なることを明らかにした。本技術を日本で初の高級鋼用ビレット連铸機に稼働当初から適用することにより、非常に良好な表面品質が得ら

れることを示した。

第3章では、鑄型内で発生する横割れの起因となる、深いオッシレーションマーク（ディプレッションマーク）の生成機構およびコーナー横割れの防止対策について述べた。亜包晶鋼の高速鑄造化を図った際に、鑄片コーナー部に鑄型内で発生したと考えられる横割れが多発した。横割れはディプレッションマークの底に発生し、鑄型振動条件の改善では解決できなかった。そこで割れ部の調査・数値解析・実機試験をおこない、ディプレッションマークの生成機構を明らかにした。また、湯面変動量の低減によるディプレッションマーク発生の防止およびモールドパウダー物性の改善・鑄型狭面テーパの適正化による摩擦力の低減により、鑄型内で発生するコーナー横割れを低減できることを示した。

第4章では、亜包晶鋼の縦割れの起因となる鑄型内の凝固遅れの発生機構および縦割れの防止対策について述べた。鑄片中央部の縦割れは緩冷却モールドパウダーの採用により防止できている。しかしながら、さらなる高速鑄造化を図った際に、浸漬ノズルからの吐出流が衝突するコーナー近傍に凝固遅れや縦割れが発生した。また、縦割れ部を起点にして鑄型直下でブレイクアウトすることもあり大きな問題となった。そこで、水モデル試験、数値解析により鑄型内の熱流動を改善する新しい浸漬ノズルを開発し、実機テストを通じてコーナー部の凝固遅れおよび縦割れを防止した結果について述べた。

第5章では、表面割れとならんで問題となっている、気泡欠陥の生成機構について示した。気泡欠陥は微細な欠陥ではあるが、近年生産量が急増している極低炭素鋼に発生しやすい。極低炭素鋼は表面品質に対する要求が非常に厳しい用途に用いられるため、その防止技術の開発が求められている。そこで、気泡欠陥の生成機構、製品におけるスリバー欠陥との対応についての調査・研究をおこなった。その結果、極低炭素鋼は不均一凝固しやすく、溶鋼の粘度も大きいこと、気泡が捕捉されやすいこと、気泡の内壁には $Al_2O_3$ が存在する場合があること、またこの $Al_2O_3$ がスリバー欠陥の原因であることを明らかにした。鑄型内での気泡の浮上性の改善、タンディッシュ内での二次酸化の防止および製錬機能の強化をおこない、これらの欠陥を大幅に改善できることを示した。

第6章では、二次冷却帯で発生する表面割れについて述べた。二次冷却帯で発生する割れはおもに横割れである。通常の鋼種では防止できているが、Nb、Vなどを含む鋼種は割れ感受性が大きく問題となっている。これらの鋼種の高温引張試験、炭窒化物の析出挙動と高温延性の関係について調査した。その調査結果に基づき、新連鑄機の矯正帯長さの短縮・矯正点数の低減をおこなうことにより、二次冷却帯での横割れを防止できることを示した。

第7章では、ストリップ連鑄における表面欠陥の防止技術について述べた。ストリップ連鑄技術は、溶鋼から直接2～3mm厚みの薄板を製造する技術であり、現在世界各国で盛んに開発が進められている。ストリップ連鑄により得られた鑄片の凝固組織、ローラー鑄片間の伝熱挙動、水モデルによる流動調査などをおこない、表面欠陥の発生機構を明らかにした。また、板厚に応じた適正な鑄造速度を設定することにより横割れを、ロール上の溶鋼量と注入する溶鋼量との比を0.2以上にすることにより縦割れを低減できることを示した。

第8章では、連鑄鑄片に発生する各種の表面欠陥の発生機構および防止対策についてまとめて示した。

以上のように、本論文は連鑄鑄片の表面欠陥の発生機構の解明およびその改善技術の開発について述べたものである。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 昌 行  
副 査 教 授 石 川 達 雄  
副 査 教 授 石 井 邦 宜  
副 査 教 授 成 田 敏 夫

## 学位論文題名

### 連铸铸片の表面欠陥の改善に関する研究

我が国の素鋼生産に占める連続铸造の比率は、1970年には約10%であったが、1980年には約60%と急激に増大し、現在はほぼ100%に近づきつつある。この間、铸片直送化のための铸片表面欠陥の防止あるいは低減技術の開発がきわめて重要な課題になった。铸型内で発生する表面欠陥については、铸型内の凝固現象が非常に複雑なため、発生機構・防止対策ともにまだ解明されていない点が多く、特に铸型内で不均一凝固しやすい、炭素量が0.08~0.16%程度の亜包晶鋼の表面割れや、近年生産量が急増している極低炭素鋼の気泡欠陥が大きな問題となっている。さらに現状の連続铸造に代わる新しい連続铸造技術として、ストリップ連铸などニアネットシェイプキャスト法の開発も精力的に行われているが、この連铸材の圧延率が少ないため表面品質に対する要求も特に厳しく、表面欠陥の防止対策も重要課題となっている。

本論文は、亜包晶鋼の表面割れ、極低炭素鋼の気泡欠陥、さらにストリップ連铸における表面欠陥等の铸片表面部に発生する欠陥の発生機構の解明に関する研究結果およびその改善技術の開発をまとめたもので、8章より構成されている。

第1章では、本研究の技術的重要性と目的・意義および本論文の構成について述べている。

第2章では、オッシレーションマークの生成におよぼす铸型振動条件の影響についての研究結果を述べている。铸型振動数の高サイクル化により、オッシレーションマーク深さの低減および横割れの防止が可能であり、本技術を日本で初の高級鋼用ビレット連铸機に適用することにより、非常に良好な表面品質を得ている。

第3章では、铸型内で発生する横割れの起因となる、深いオッシレーションマーク（ディプレッションマーク）の生成機構を、割れ部の調査、数値解析、実機試験等で検討し、湯面変動量の低減によるディプレッションマーク発生防止およびモールドパウダー物性の改善、铸型狭面テーパの適正化による铸片-铸型間の摩擦力の低減により、コーナー横割れを低減できることを述べている。

第4章では、亜包晶鋼の縦割れの起因となる铸型内の凝固遅れの発生機構および縦割れ

の防止対策について述べている。一般的には緩冷却化により防止できたが、高速鋳造化で凝固遅れや縦割れが再度発生した。そこで、水モデル試験、数値解析により鋳型内の熱流動を改善する新しい浸漬ノズルを開発し、実機テストを通じてコーナー部の凝固遅れおよび縦割れを防止できることを示している。

第5章では、極低炭素鋼の気泡欠陥と製品としてのスリバー欠陥の生成機構について述べている。極低炭素鋼は不均一凝固しやすく、溶鋼の粘度も大きいため気泡が捕捉されやすいこと、気泡の内壁には $Al_2O_3$ が存在し、この $Al_2O_3$ がスリバー欠陥の原因であることを明らかにした。鋳型内での気泡の浮上性の改善、タンディッシュ内での二次酸化の防止および製錬機能の強化をおこない、これらの欠陥を大幅に改善できることを示している。

第6章では、Nb、Vなどを含む割れ感受性の高い合金鋼の二次冷却帯で発生する表面横割れについて述べている。これらの鋼種の高温引張試験、炭窒化物の析出挙動と高温延性の関係について調査し、連铸機の矯正帯長さの短縮、矯正点数の低減をおこなうことにより、横割れを防止できることを示している。

第7章では、ステンレス鋼のストリップ連铸における表面欠陥の防止技術について述べている。ストリップ連铸により得られた鋳片の凝固組織、ロールと鋳片間の伝熱挙動、水モデルによる流動調査などをおこない、表面欠陥の発生機構を明らかにし、板厚に応じた適正な鋳造速度を設定することにより横割れを、ロール上の溶鋼量と注入する溶鋼量との比を0.2以上にすることにより縦割れを低減できることを示した。

第8章は、本論文のまとめであり、連铸鋳片に発生する各種の表面欠陥の発生機構および防止対策について簡潔に示している。

これを要するに、著者は、炭素鋼、ステンレス鋼に発生する連続鋳造鋳片の表面欠陥に関して、不均一凝固殻の生成機構や気泡のトラップ機構などに新知見を得るとともに、表面欠陥の大幅な低減に成功しており、鉄鋼材料工学の進歩に寄与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者と認める。