

	なかだ	まさゆき	
氏名	中田	正之	
授与学位	博士	(工学)	
学位授与年月日	平成15年	3月24日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条	第1項	
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科	(博士課程) 金属工学専攻	
学位論文題目	連铸および造塊で製造された鋼の品質向上に関する研究		
指導教官	東北大学教授	溝口 庄三	
論文審査委員	主査 東北大学教授	溝口庄三	東北大学教授 大内千秋
		東北大学教授	谷口尚司

論文内容要旨

1. 研究の目的

鋼の铸塊の内質は近年の技術開発によって大きく向上してきたが、まだいくつかの課題が残されている。

- 1) 造塊法の課題：铸造する鋼塊はサイズが大型化するほど、内部のマクロ偏析やポロシティーの生成が増え、歩留まりが低下する傾向にある。
- 2) 連铸法の課題：铸片表層直下の初期凝固部の健全性は、铸片の無手入化のために重要である。特に水平連铸のように不連続的に初期凝固が開始されると、铸片の表層直下にポロシティーや割れが発生し問題となる場合がある。また、通常のスラブ連铸では中心偏析の解決のために铸型内電磁攪拌や軽圧下法が実用化されてきたが、今後の高級化ニーズに対応できる技術が必要となる。スラブ連铸の高速化の限界を向上する技術を確立し、高効率なプロセスを確立する必要がある。

そこで、本研究ではこれらの課題を解決するために、

(1) 凝固界面の形状制御技術と(2) 凝固組織の微細化技術の開発を行った。(1)については大型鋼塊の場合、鋼塊の形状を抜本的に変更し鋼塊中央部の凝固界面を平滑にし、鋼塊低部から頭部に向かう一方向凝固させる技術の開発を行った。また連铸では、初期凝固制御の課題が最も大きい水平連铸に焦点を絞り、铸型内に高周波磁場を印加することで凝固界面の形状制御を行う技術を開発することを目的とする。また、(2)については、従来の電磁攪拌において問題であった、溶鋼の流動に伴って発生するホワイトバンドにおける負偏析の発生しない新技術の開発を行った。全体考察として、主に初期凝固部の凝固界面の形状制御のために高周波磁場を印加して、大型のスラブ連铸で铸造された铸片の表面性状と铸造速度の大幅な向上することを目的として基礎的な検討を行い、その可能性を見極めることを目的とする。

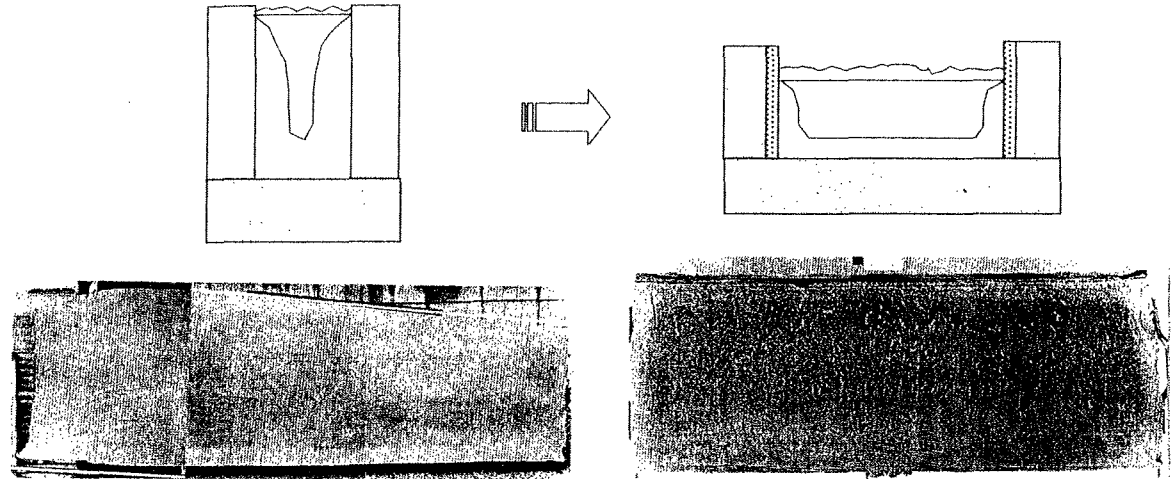
2. 研究の内容

2-1 凝固界面形状の制御による铸塊の内質向上技術

2-1-1 大型鋼塊の一方向凝固による凝固組織と偏析の制御

従来の造塊法に比べて大幅に铸型の高径比を小さくし、铸型内面の全面に断熱ボードを設置して側面からの凝固を抑制し、鋼塊中央部の凝固界面の形状を変更することで、凝固組織の改善とポロシティーの発生の削減、およびマクロ偏析を大幅に低減できる大型の一方向凝固鋼塊の铸造技術を開発した(図1)。まず、数値解析などを行うことにより、鋼塊の大部分を一方向凝固させるための適正な高径比や铸型内壁の断熱条件を定量化した。それに基づいて铸造された鋼塊を調査したところ、最大70 tの鋼塊まで側面の極一部を除き大部分が一方向凝固を達成していることが判明した。得られた鋼塊を圧延して従来の大型鋼塊と比較した

ところ、圧下比の小さい極厚鋼板で健全性に大きな差が有り、一方向凝固鋼塊の優位性が明らかになった。また、マクロ偏析と鑄造条件の関係を調査したところ、側面からの凝固を抑制することで逆V偏析の発生を抑制でき、鋼塊頭部のマクロ偏析も大幅に低減できることを見出した。さらに、伝熱計算による逆V偏析の生成時期の推定、鋼塊頭部直下のバルク溶鋼の溶質濃化時間の調査などから、一方向凝固鋼塊のマクロ偏析の生成メカニズムが明らかになった。本技術で製造される鋼塊は、鋼塊高さを一定に保った場合、鋼塊幅を大きくするほど（大単重化することに等しい）高径比が小さくなり、マクロ偏析が軽減し、同時にポロシティーの低減も達成されることになるため、従来の鋼塊の問題が解決でき、工業的に有意義な結果となった。



＜従来の鋼塊（50 t）＞

＜一方向凝固鋼塊（41 t）＞

図1 一方向凝固鑄造のイメージと凝固組織

2-1-2 水平連鑄の初期凝固界面の形状制御による内質向上技術

水平連鑄では3重点（溶鋼/鑄型/耐火物で形成されるコーナー）において凝固が開始されるため、ここでの溶着不良（コールドシャットクラック）が発生しやすい問題があった。そこで、凝固界面形状を改善し、初期凝固を適切に制御するために、鑄型部に高周波磁場を印加する技術を開発した(図2)。まず、小型連鑄機を用いて水平連鑄の3重点での初期凝固制御を想定したものを予備実験としておこない、初期凝固制御のための必要条件を調査した。その結果、高周波磁場を3重点近傍に印加することで、磁気圧力とジュール熱の効果により、耐火物側からの凝固が抑制され、鑄片表層直下のコールドシャット部の未溶着が大幅に改善された。ただし、実機の水平連鑄の場合は、初期凝固部に加わる溶鋼静圧が非常に大きいため、ジュール熱の効果のみにより初期凝固制御が達成されることがわかった。本技術を実機の水平連鑄に適用した結果、従来問題となっていた鑄片表層直下のコールドシャットクラックが、大幅に改善された。

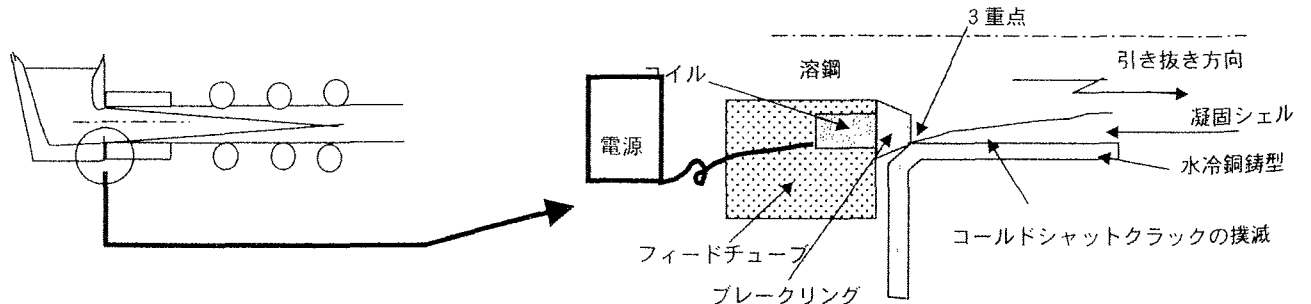


図2 高周波磁場印加による水平連鑄の初期凝固制御技術

2-2 凝固組織の微細化による内質向上技術（パルス放電による凝固組織制御）

鋼の連铸铸片の凝固組織を微細化し中心偏析を低減するためには、铸型部への電磁攪拌の適用が一般的であるが、攪拌によって生ずる負偏析が問題になる。本研究では、これを根本的に解決するために新しい凝固組織制御法を提案し、そのメカニズムを考察した。手法としてはコンデンサーから、電荷を短時間でパルス的に放電しそれを凝固途中の鋼のインゴットに直接通電する（図8）。これを、定期的に繰り返すことで共存相中のデンドライトが分断され、組織の微細化が達成できることを見出した（図9）。本法では、通常の電磁攪拌のような、強い渦流が発生しないため、凝固界面での負偏析は全く発生しないことも見出した。Sn-Pb合金を用いた基礎実験の結果、共存相中の低固相率の領域でパルス放電によりデンドライトが分断され易いことと、不十分な条件ではデンドライトが折じ曲げられた状態で残存することから、直接通電時のピンチ力に基づくせん断力が支配的であると推定した。

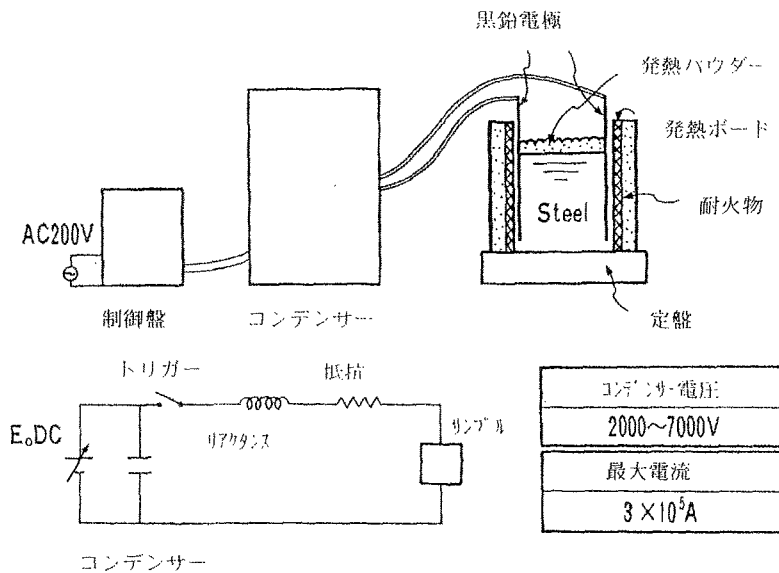


図3 パルス放電による新凝固組織微細化法

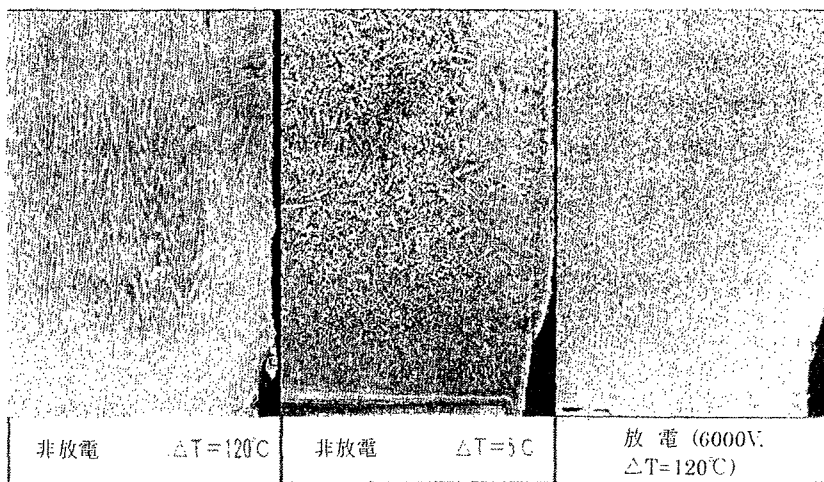


図4 パルス放電の適用結果（鋼種：0.6%炭素鋼、
放電時の電圧：6000V、印加電流：200kA）

2-3 高周波磁場印加による連鑄鑄片の表面品質と鑄造速度向上に関する考察

スラブ連鑄のオッシレーションマーク深さの低減と、鑄型内潤滑の向上を目的とした高周波磁場印加による初期凝固制御の可能性を調査、考察した。小型実験の結果、適正な高周波磁場を初期凝固部に印加することで、オッシレーションマークが消滅し、さらにモールドフラックスの消費量も大幅に向上した。これにより、モールドフラックスの限界消費量を 10m/min 程度の高速鑄造時にもクリアできることが推定された。また、鑄型振動によるシェル圧縮の限界についても考察し、現状の鑄型振動機構ではネガティブストリップを安定に与えることができる条件から最大 10m/min の鑄造速度が上限と見積もられた。

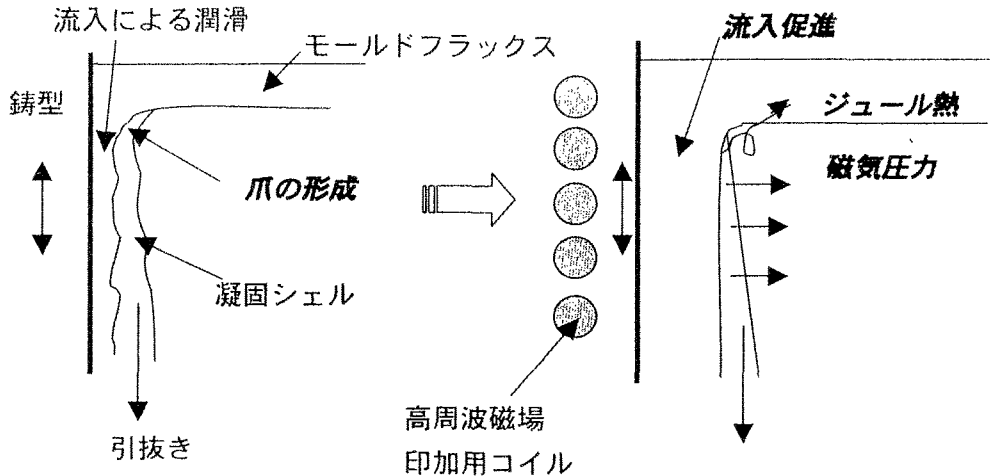


図5 高周波磁場印加による連鑄の初期凝固制御法

3. 結論

本研究では、鋼の鑄塊中の偏析やポロシティー等の問題を解決し内質を向上するために、凝固界面の形状を制御することと、凝固組織そのものの微細化を行う新技術を検討した。その結果、凝固界面形状の制御による偏析やポロシティー低減効果が明瞭に得られ、従来技術では不可能であった実機鑄塊の大幅な品質が向上された。また、その際の改善メカニズムも明らかにした。さらに、凝固組織微細化のための新技術の効果を明らかにして、従来技術に対する優位性とそのメカニズムを明らかにした。最後に全体考察として、製造現場で一般的に用いられている大型連鑄の高速化の検討を行い、高周波磁場を初期凝固部に印加することで鑄型内潤滑が大幅に向上して、鑄片表面の品質が向上すると共に従来にない 10m/min 程度の高速鑄造の可能性が判明した。

以上の点より、本研究は学術的に工業的にもおきな成果を得ることができ、今後の技術の発展に寄与できるものと考えられる。

論文審査結果の要旨

鉄鋼の凝固プロセスは、製造コストを大きく左右するばかりではなく、最終製品の品質や性能に決定的な影響を及ぼす。そこで、本研究においては、大型鋼塊の造塊法と連続鋳造法を取上げ、その鋳片の品質向上を達成するために、凝固界面形状と凝固組織の制御を行うための工業的手法を検討し、その制御メカニズムを学術的に考察することを目的とする。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、一方凝固法による鋼塊の凝固界面形状制御法を明らかにしている。鋼塊の高さを低くして扁平型とし、さらに側面からの抜熱を抑制して、鋼塊の大部分を一方凝固させる方法を開発している。その結果、凝固界面の形状制御が可能となり、内部品質が大幅に向上することを述べている。また、マクロ偏析の生成機構について考察し、従来の造塊法とは逆に鋼塊のサイズを大型化することで、マクロ偏析を低減できる技術を確立している。

第3章は、連続鋳造法において、凝固初期に高周波磁場を印加し、初期凝固界面の形状制御する方法を述べている。小型試験や数値解析を行い、通常の連続鋳造法のように、初期凝固部に加わる溶鋼静圧が小さい場合に高周波磁場を印加すると、磁気圧力によって溶鋼の自由界面形状を制御できることを明らかにしている。また水平連鋳のように溶鋼静圧が高い場合には、ジュール発熱効果によって凝固界面形状制御ができることを明らかにしている。以上の知見を基に、実機の水平連鋳法へ高周波磁場印加法を適用し、従来から問題となっていた表層部の割れ欠陥であるコールドシャットクラックを撲滅し、鋳片の表面性状を大幅に向上させている。

第4章は、パルス放電による凝固組織の微細化法について述べている。連鋳鋳片の中心偏析を軽減するためには、中心部の凝固組織を微細粒状晶化する必要がある。その対策として、大型のコンデンサーに電荷を蓄え、鋼の凝固途中に間歇的に直接通電（パルス放電）して、凝固界面に作用する電磁力によってデンドライトを分断し、凝固組織を微細粒状晶化する方法を開発している。まず、低融点合金を用いた基礎実験で、凝固組織を改変するための固相率と印加電圧の関係を求め、ついで、溶鋼を用いたスケールアップ実験において、凝固組織改変のための必要な印加電流値を明確にしている。これらの結果から、凝固組織の改変メカニズムを考察し、パルス放電によって固液共存相中に瞬間的なピンチ力が働き、デンドライトを破断することを明らかにしている。また、従来の電磁攪拌法では、攪拌を行った部分に負偏析が生じるために品質的に問題が発生する場合があるが、パルス放電では瞬間的なピンチ力の作用に基づくものであるため、負偏析が全く発生しないことは大きな利点である。

第5章は、高周波磁場を印加した初期凝固組織制御法によって得られる、スラブ連続鋳造法の鋳型潤滑性能の向上と、その結果として可能となる高速鋳造の可能性について述べている。高周波磁場を印加すると、モールドフラックスの流入が促進され、鋳型内の潤滑が大幅に向上し、10m/min程度の超高速鋳造も可能となることを明らかにしている。

第6章は総括であり、本研究の結論を述べている。

以上要するに本論文は、表層と内部の凝固組織を改善するためには、凝固界面の形状制御が重要であることを指摘し、そのために必要な新しい電磁気力利用技術について、実験的、理論的に詳細に検討し、その可能性を明らかにしたもので、材料工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。