

博士(工学) 吉田直嗣

学位論文題名

高りん低炭素鋼の凝固組織形成と  
オーステナイト粒径制御に関する研究

学位論文内容の要旨

低炭素鋼材料の連続鋳造過程で形成されるオーステナイト結晶粒すなわち鋳造 $\gamma$ 粒は一般に数mm以上の粗大な柱状晶であると認識されているが、その形成過程について基本現象の理解は未だ十分ではない。粗大な鋳造 $\gamma$ 粒は、高温延性を低下させ熱間割れの原因となるばかりでなく、フェライト結晶粒微細化を目指した加工熱処理の障害にもなる。したがって、鋳造 $\gamma$ 粒組織制御は、熱間延性を改善し加工熱処理に適した母材を創形・創質するための重要な課題の一つである。

本研究は、鋳造 $\gamma$ 粒径の支配因子を明らかにし微細化のための指針を得ること、そして典型的な偏析元素であるりん(P)が強力なBCC安定化作用を有することに着眼し、P添加によって鋳造 $\gamma$ 粒組織を制御することを目的とした。本論文は全7章から構成されており、その概要は以下のとおりである。

第1章では、凝固から連続する冷却過程で生じるオーステナイト結晶粒を鋳造 $\gamma$ 粒と定義し、鋼の製造工程における鋳造 $\gamma$ 粒の位置づけを概観するとともに、鋳造 $\gamma$ 粒の形成に関する従来の知見をまとめ、本研究の目的を述べた。

第2章では、鋳造 $\gamma$ 粒の形成に関する従来研究の知見から粒径予測の前提となる仮説を提示した後、Burke-Turnbullの古典的粒成長理論に基づいて凝固後の冷却過程における粒径の予測モデルを構築するとともに予測モデルの妥当性と鋳造 $\gamma$ 粒径の支配因子を検討した。

鋳造 $\gamma$ 粒径は古典的粒成長モデルによる予測とよく一致し、予測モデルの前提から、 $\gamma$ 粒成長過程は高温の $\gamma$ 単相域における急成長過程が支配的であり、粒界移動律則による二乗則の正常粒成長に従う。鋳造 $\gamma$ 粒の微細化には、急成長開始温度 $T_{rg}$ の低温化と冷却速度 $\dot{T}$ の増大が有効であると考えられる。冷却過程の途中から急冷凍結を行っても、包晶点付近の高温における $\gamma$ 粒成長量が非常に大きいため $\gamma$ 粒の微細化は困難である。以上は、鋳造 $\gamma$ 粒径を制御するための指針となる基礎知見である。

第3章では、強力なBCC安定化作用を有しあつ代表的な凝固偏析元素であるりんの効果に注目し、P含有鋼の平衡状態図を作成するとともに熱分析実験を行い、Pが凝固とその後の冷却過程における相変態温度に及ぼす影響について検討した。

Pは、状態図に $\gamma$ ループを形成し強力なBCC安定化作用を有する。また、Pは平衡分配係数が比較的小さく、BCC安定化作用とミクロ偏析の相乗作用により $\gamma$ 単相化温度を低下させるのに最も適する。

0~0.5 mass%のPを含有する0.10 mass% C鋼は、 $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \gamma$ の凝固パスを経ると推定される。鋼中のP量が増加すると、液相線温度、 $\gamma$ 相の晶析出開始温度、固相線温度、 $\gamma$ 相の析出終了温度のいずれも低下するとともに、 $(L + \delta + \gamma)$ 三相共存域および $(\delta + \gamma)$ 二相共存域の温度区間が低温側に拡大する。熱分析実験では、平衡状態図に比べ、P量増大による固相線温度および $\gamma$ 相析出終了温度の低温化傾向が助長されてより顕著に現れており、ミクロ偏析を伴った非平衡凝固が生じていることが示された。以上の知見は、Pが $\delta$ 相の存在する温度域を低温側に拡大させ、 $\gamma$ 相組織形成に大きな影響を及ぼすことを示唆する。

第4章では、最大0.2%のPを含有する0.1%C鋼の100mm厚スラブを連続铸造試験を行って、試作したスラブの铸造組織を調査し、凝固組織に及ぼすP添加の影響を検討した。

P添加はデンドライト形態を複雑化するが、デンドライトの1次および2次アーム間隔はP添加量によらずほぼ同程度である。また、P添加はデンドライト樹間のMn分散を促進し高固相率部のMn偏析を低減する。このMn偏析挙動は、Pのミクロ偏析のBCC安定化作用による三つの効果、すなわち、包晶反応の抑制・ $\delta/\gamma$ 間の溶質再分配の促進・ $\delta$ 相中での速い拡散により生じる。また、旧 $\gamma$ 粒内部のP濃化スポットでは、球状 $\alpha$ フェライトの生成が認められ、これが局所 $A_3$ 点が高まることにより高温で優先的に形成したものと推定される。

高P添加鋼の $\gamma$ 粒径は、P無添加鋼のそれに比べ約1/2に細粒化する。Pによる $\gamma$ 粒の微細化は、凝固モードが $\delta$ 凝固化すること、 $\delta$ 相の存在温度範囲が低温側に拡大すること、更にPの偏析がそれを助長することにより、 $\delta$ 相が第二相として作用して $\gamma$ 単相化温度範囲を低温側に狭め、高温域での $\gamma$ 粒成長が抑制された結果と推定される。主要なメカニズムはデンドライト樹間において $\delta$ 相を低温まで残留させることである。このように、Pの有するミクロ偏析とBCC安定化の相乗作用による铸造 $\gamma$ 粒の微細化効果を実験的に確認した。

第5章では、Pのミクロ偏析に注目し、高りん低炭素鋼が液相から凝固を経て冷却される際の $\gamma$ 相組織形成過程を次の四つのアプローチによって考察した。1) 高りん低炭素鋼特有の新しい凝固モードを提案しその妥当性は凝固解析によって検証した。2) 高りん低炭素鋼の連続変態過程を直接観察し、 $\delta \rightarrow \gamma$ 変態の際一部の $\delta$ 相が残留すること、残留した $\delta$ 相が $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の優先サイトであることを確認した。3) スラブのミクロ偏析マップの熱力学的解析を行い局所変態温度を推定した。4) 粒径予測モデルを用い、P添加がミクロ偏析とBCC安定化の相乗作用によって铸造 $\gamma$ 粒微細化を導く機構を総括した。

第6章では、ニアネットシェイプ領域の铸造厚2~100mmの薄鋼板連続铸造における铸造 $\gamma$ 粒径について、第2章で導いた古典的粒成長モデルによる粒径予測式が適用可能であることを実証し、铸造厚さ低減による急冷の効果、および、りん添加の効果について指標化した。

第7章は本論文の総括である。

# 学位論文審査の要旨

主査 助教授 大 笹 憲 一  
副査 教授 大 貫 惣 明  
副査 教授 秋 山 友 宏  
副査 教授 野 口 徹

## 学位論文題名

### 高りん低炭素鋼の凝固組織形成と オーステナイト粒径制御に関する研究

低炭素鋼材料の連続铸造過程で形成されるオーステナイト結晶粒すなわち铸造 $\gamma$ 粒は一般に数mm以上の粗大な柱状晶であると認識されているが、その形成過程について基本現象の理解は未だ十分ではない。粗大な铸造 $\gamma$ 粒は、高温延性を低下させ熱間割れの原因となるばかりでなく、フェライト結晶粒微細化を目指した加工熱処理の障害にもなる。したがって、铸造 $\gamma$ 粒組織制御は、熱間延性を改善し加工熱処理に適した母材を創形・創質するための重要な課題の一つである。

本研究では、铸造 $\gamma$ 粒径の支配因子を明らかにし微細化のための指針を得ること、および典型的な偏析元素であるりん(P)が強力なBCC安定化作用を有することに着眼し、P添加によって铸造 $\gamma$ 粒組織を制御することを検討している。

铸造 $\gamma$ 粒の形成に関する従来研究の知見から粒径予測の前提となる仮説を提示し、Burke-Turnbullの古典的粒成長理論に基づいて凝固後の冷却過程における粒径の予測モデルを構築するとともに予測モデルの妥当性と铸造 $\gamma$ 粒径の支配因子を検討した。铸造 $\gamma$ 粒径は古典的粒成長モデルによる予測とよく一致し、予測モデルの前提から、 $\gamma$ 粒成長過程は高温の $\gamma$ 単相域における急成長過程が支配的であり、粒界移動律速による二乗則の正常粒成長側に従うことを明らかにしている。また、铸造 $\gamma$ 粒の微細化には、急成長開始温度 $Tr_g$ の低温化と冷却速度 $T$ の増大が有効であることを示し、冷却過程の途中から急冷凍結を行っても、包晶点付近の高温における $\gamma$ 粒成長量が非常に大きいため $\gamma$ 粒の微細化は困難であることを示し、铸造 $\gamma$ 粒径を制御するための指針となる基礎知見を明らかにしている。

次に、強力なBCC安定化作用を有しつつ代表的な凝固偏析元素であるPが凝固とその後の冷却過程における相変態温度に及ぼす影響について検討した。鋼中のP量が増加すると、液相線温度、 $\gamma$ 相の晶析出開始温度、固相線温度、 $\gamma$ 相の析出終了温度のいずれも低下するとともに、 $(L + \delta + \gamma)$ 三相共存域および $(\delta + \gamma)$ 二相共存域の温度区間が低温側に拡大することを確認し、りん添加により、ミクロ偏析を伴った非平衡凝固が生じることを示した。以上の知見より、Pが $\delta$ 相の存在する温度域を低温側に拡大させ、 $\gamma$ 相組織形成に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

続いて、最大0.2%のPを含有する0.1%C鋼の100mm厚スラブの連続铸造試験を行い、試作したスラブの铸造組織を調査し、凝固組織に及ぼすP添加の影響を検討した。その結果、P添加はデンドライト形態を複雑化するが、デンドライトの1次および2次アーム間隔はP添加量によらずほぼ同程度であること、また、P添加はデンドライト樹間のMn分散を促進し高固相率部のMn偏析を低減することを明らかにした。さらに、高P添加鋼の $\gamma$ 粒径は、P無添加鋼のそれに比べ約1/2に細化することを示し、その理由は、凝固モードが $\delta$ 凝固化すること、 $\delta$ 相の存在温度範囲が低温側に

拡大すること、更にPの偏析がそれを助長することにより、 $\delta$ 相が第二相として作用して $\gamma$ 单相化温度範囲を低温側に狭め、高温域での $\gamma$ 粒成長が抑制されることを示した。このように $\gamma$ 粒微細化の主要なメカニズムはデンドライト樹間に於いて $\delta$ 相を低温まで残留させることであることを実験的に確認した。

またPのミクロ偏析に注目し、高りん低炭素鋼が液相から凝固を経て冷却される際の $\gamma$ 相組織形成過程を次の四つのアプローチによって考察した。1) 高りん低炭素鋼特有の新しい凝固モードを提案しその妥当性を凝固解析によって検証した。2) 高りん低炭素鋼の連続変態過程を直接観察し、 $\delta \rightarrow \gamma$ 変態の際一部の $\delta$ 相が残留すること、残留した $\delta$ 相が $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の優先サイトであることを確認した。3) スラブのミクロ偏析マップの熱力学的解析を行い局所変態温度を推定した。4) 粒径予測モデルを用い、P添加がミクロ偏析とBCC安定化の相乗作用によって铸造 $\gamma$ 粒微細化を導く機構を総括した。

以上の知見に基づいて、ニアネットシェイプ領域の铸造厚2~100mmの薄鋼板連続铸造における铸造 $\gamma$ 粒径について、導いた古典的粒成長モデルによる粒径予測式が適用可能であることを実証し、铸造厚さ低減による急冷の効果、および、りん添加の効果について指標化した。

これを要するに、著者は、低炭素鋼の铸造 $\gamma$ 粒の形成機構を明らかにし、冷却速度制御とりん添加による铸造 $\gamma$ 粒微細化法を新たに提案し、その効果を実証したもので、鉄鋼材料工学に対して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ものと認める。