

鋼の連続鋳造における初期凝固制御に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 溝口, 利明, Mizoguchi, Toshiaki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/43791

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

鋼の連続铸造における初期凝固制御に関する研究
Study on Control of Initial Solidification in Continuous Casting Process of Steel

金沢大学大学院 自然科学研究科

機械科学 専攻

次世代鉄鋼総合科学 講座

溝口 利明

鋼の連続鋳造法は転炉法とともに20世紀の鉄鋼製造プロセスを変革した主要技術である。粗鋼生産量に対する連続鋳造法の割合を示す連続鋳造比率からみると、鋼の連続鋳造法は技術的に成熟期を迎えたように見える。しかしながら、一方では需要家の品質、材質に対するニーズは、益々厳格化、多様化が進んでおり、現行連続鋳造法においても、これまで以上に高品質の鋳片を高い生産性の下で製造可能な鋳造技術開発が重要となっている。また、熱延工程における粗圧延や仕上圧延の省略を狙ったニアネットシェイプ鋳造法と呼ばれる新鋳造プロセスの鋼への適用開発においては、生産性確保のための飛躍的な鋳造速度向上、及び大幅な歩留り悪化防止のための無手入れ化が求められている。

本研究では、鋼の連続鋳造における高効率高品質鋳片の製造を目的として、現行連続鋳造法と双ロール鋳造法での鋳片表面品質改善、及び現行連続鋳造法でのBO防止において重要となる初期凝固の安定化のために、現象の再現が可能ないくつかのモデルを開発し、ラボ実験や実際の鋳造で妥当性を検証した。さらに、モデルを使って操業条件が初期凝固に及ぼす影響を定量的に検討し、安定制御のための具体的方法を提案した。

以下、各章毎の概要と得られた結論を述べる。

【第1章】

第1章では、序論として、鋼の連続鋳造法が発展進化する過程において、本研究が必要とされた背景と研究目的、及び論文構成について述べた。

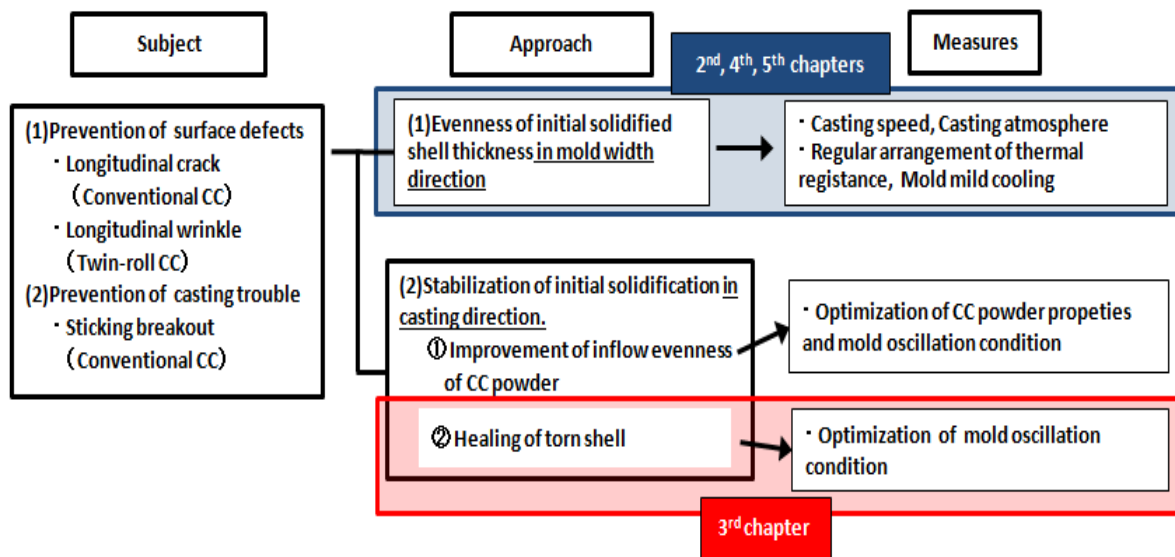


Figure 1 Relation between research subjects and each chapter.

【第2章】

第2章では、主に現行鋳法における初期凝固シェル不均一生成挙動について述べた。鋳型幅方向における初期凝固時のシェルの伝熱計算、応力計算、浮き上がり計算を連成したモデルを開発し、シェル浮き上がりによるシェル不均一生成挙動とそれに及ぼす諸要因の影響を解析することにより、鋳型幅方向における初期凝固シェルの不均一生成機構の定量的解明を試みた。鋳型浸漬実験と従来知見との対比により、本モデルが実現象を充分再現できることを確認し、熱移動律速がメナスカスから2~3秒までは鋳型/溶鋼界面であるのに対し、それ以降はシェル内の熱伝導となるため、不均一凝固の低減にとって、メナスカスから数秒以内の制御が重要であることを明らかにした(Figure 2)。さらに、シェル不均一度の低減にとって、鋳型/溶鋼間の伝熱抵抗規則配置化(Figure 3)、鋳造速度の増加、およびモールド緩冷却化が有効であることを示した。

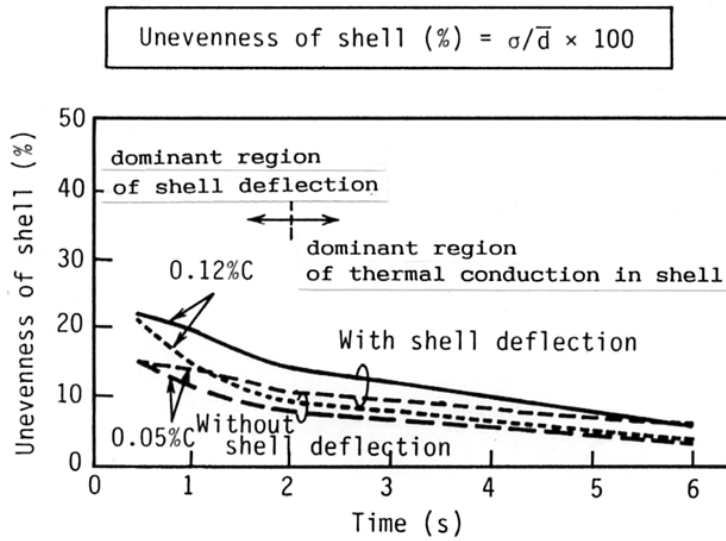


Figure 2 Change in unevenness of shell with time.

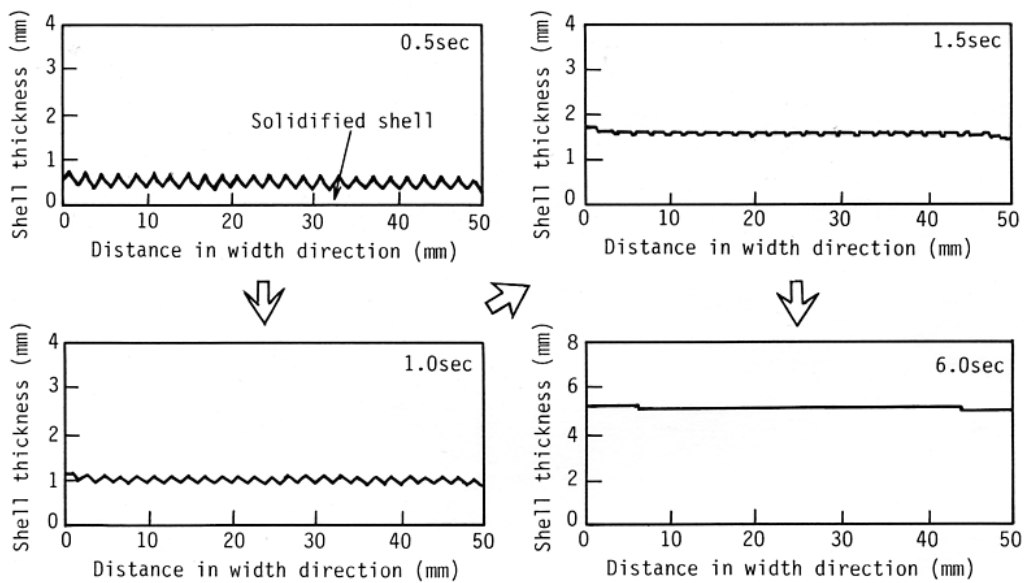


Figure 3 Growth behavior of solidified shell.

(0.12%C steel, casting velocity 1.2mpm, regular arrangement of h_1 and h_2)

【第3章】

第3章では、現行連続鋳造法における鋳型振動影響を考慮した鋳造方向の凝固シェル成長について述べた。鋳造方向における鋳型オシレーション 1 サイクル中のシェル破断・修復挙動と凝固・応力歪解析を連成した凝固シェル成長の力学モデルの開発を行い(Figure 4)、拘束性 BO に及ぼす C 濃度、鋳造速度、パウダー粘度や鋳型オシレーション条件の影響を検討した。得られた計算結果は従来知見や実鋳造での BO 検知頻

度と良く一致し(Figure 5)、モデルが妥当であることを確認した。本モデルによって、高速鋳造時の拘束性 BO 防止のための鋳型オシレーション適正化の考え方、及び適正条件を明らかにし、種々の鋼種において最適な鋳造条件、鋳型オシレーション条件を定量的に検討できるようになった。

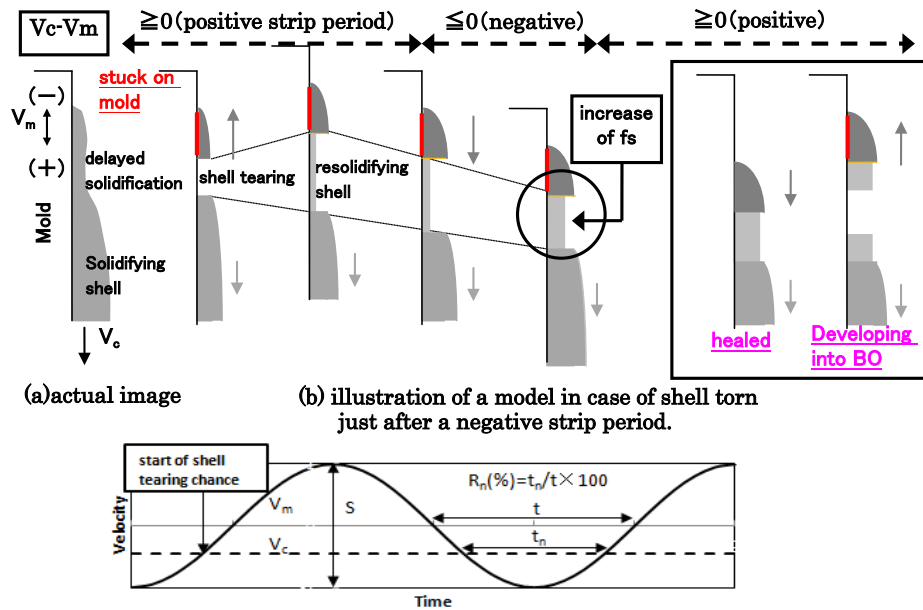


Figure 4 Concept of shell growth model considering a shell healing process.

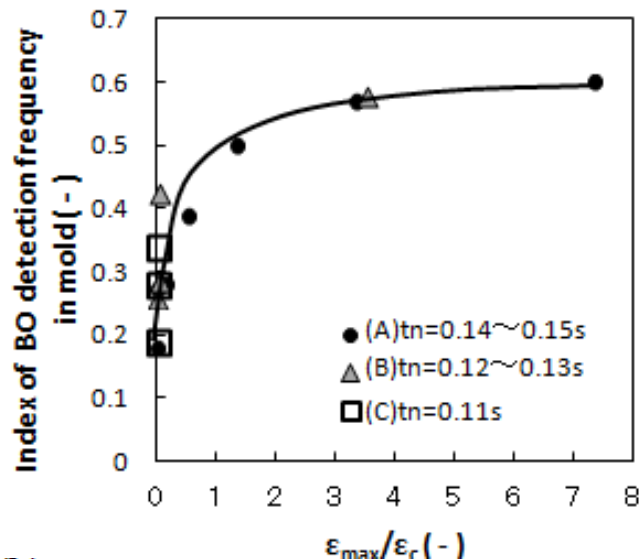


Figure 5 Influence of $\epsilon_{max}/\epsilon_c$ calculated by developed model in this study on an observed index of BO detection frequency in mold during actual casting, under the calculated condition of 0.12mass% C, $\eta=0.12Pa \cdot s$, $BP=1160^\circ C$, $\delta_p=15\mu m$ with oscillation conditions of (A) $f=87\sim 150$ cycle/min, $S=5\sim 11mm$, (B) $f=110\sim 160$ cycle/min, $S=5.5\sim 9.5mm$, (C) $f=157\sim 175$ cycle/min, $S=3\sim 9mm$.

【第4章】

第4章では、ニアネットシェイプ連鑄法のひとつである双ロール鑄造法における鑄片表面性状とメナスカス形状の関係について述べた。小型双ロール鑄造装置を使って、物性値が異なる3種の金属、すなわちSUS304ステンレス鋼、S53C鋼、Cu-Sn合金の鑄造実験、熔融金属/ロールの接触開始位置の検知実験、及び動的メナスカス形状の理論解析を行い、双ロール鑄造法における鑄片表面性状と熔融金属のメナスカス挙動との関係を明らかにすることにより、鑄造方向に連続して発生する表面しわ形成を支配するロール表面近傍でのメナスカス降下量や臨界鑄造速度などの影響を検討した。鑄造速度の増加に伴って、鑄片表面しわ(くぼみ)の深さは浅くなり、表面しわを有する鑄片から平滑表面の鑄片に変化することが分かった(Figure 6)。実験で得られた表面しわ形成防止の臨界鑄造速度は、SUS304鋼とCu-5%Sn合金で約0.60m/s、S53C鋼で約0.45m/sであり、鋼種毎に異なることが分かった。耐火物棒をロール面に沿って設置すると、設置深さが同じ場合でも、ある鑄造速度以下になると凝固遅れが生じることから、鑄造速度が速いほどロール/熔融金属の接触開始位置が降下する、すなわち、メナスカス降下量が増加することが分かった。一方、動的メナスカス形状の近似解析により、メナスカス降下量は、鑄造速度と熔融金属の表面張力の増加および密度の減少に伴って増加することを明らかにした。これらに基づくと、実験で得られた表面しわの消滅する臨界鑄造速度に対するメナスカス降下量の推算値は、3種の鑄造金属に対してほぼ同じの約3.5mmの値であった(Figure 7)。このことは、表面しわを形成しない臨界メナスカス降下量が存在すること、および、メナスカス降下量を約3.5mm以上にすれば、湯面振動が溶湯/ロールの接触開始位置まで伝播しなくなり、表面しわ形成に及ぼす湯面振動の影響が無くなることを意味していると推察された。表面しわ防止の臨界鑄造速度の理論式を導出し、臨界鑄造速度が、臨界メナスカス降下量と熔融金属の密度の増加および表面張力の減少に伴って大きくなることを明らかにすることができた。

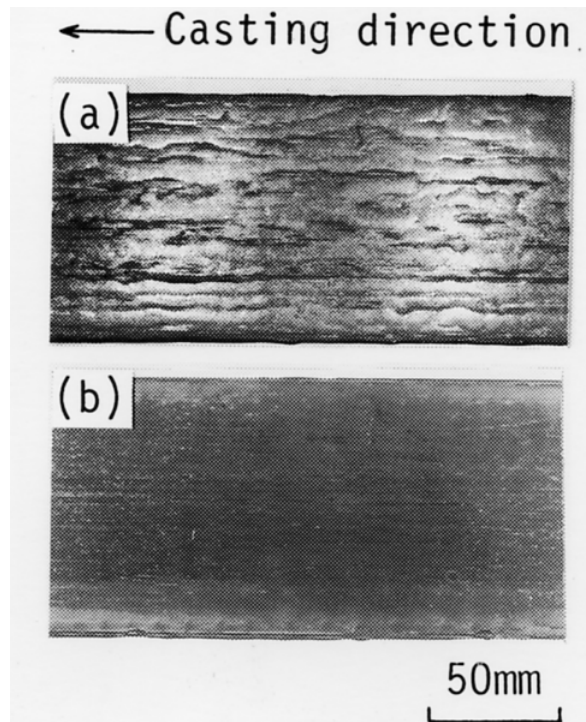


Figure 6 Effect of casting speed on surface appearance of strip. (SUS304 steel)

(a) $V_c=0.30\text{m/s}$, $d=2.2\text{mm}$, (b) $V_c=1.18\text{m/s}$, $d=1.2\text{mm}$

(V_c : casting velocity, d : strip thickness)

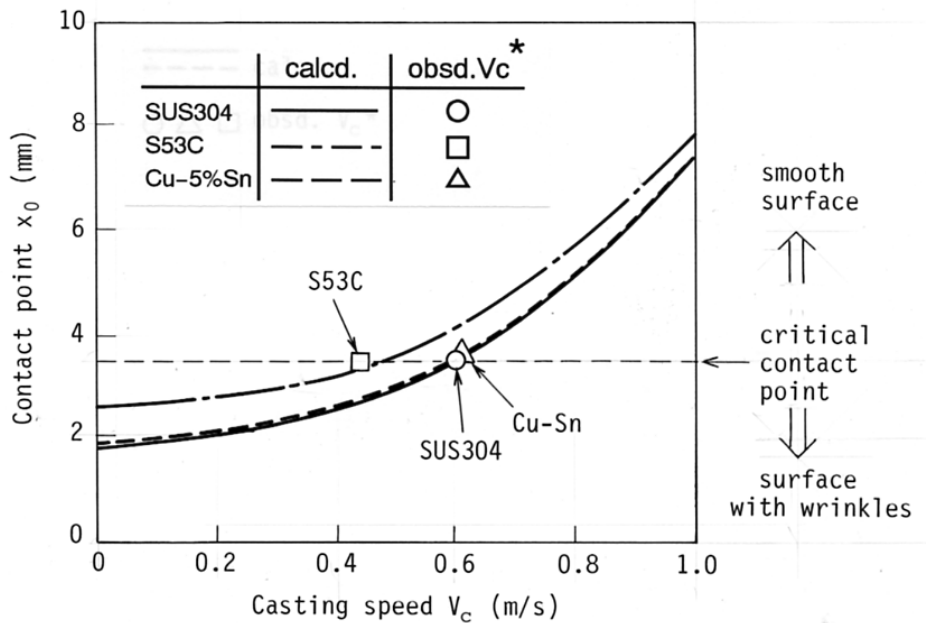


Figure 7 Effect of casting speed on the contact point between molten metal and roll.

【第5章】

第5章では、双ロール鋳造における鋳片表面形成に及ぼす鋳造雰囲気の影響について述べた。小型双ロール鋳造装置を用いて、Arガス、Heガス、または空気中でSUS304ステンレス鋼の鋳造実験を行い、双ロール鋳片の表面形成に対する鋳造雰囲気の効果を検討した。同一鋳造速度で比較すると、鋳片厚さはArガス、空気、Heガスの順に増加した(Figure 8)。これは、ロール/メタル間の伝熱抵抗となるガス膜に関し、Heガスの方がArガスに比べて、動粘度が9倍大きいためにガス膜厚さは約3~5倍大きい、熱伝導度が8倍大きいこと、結果として、Heガスの方が、ロール/メタル間の総括熱伝達係数が大きいことによると推察された。鋳片の表面しわは、いずれのガスにおいても、ある臨界の鋳造速度以下で発生し、この臨界鋳造速度はArガス、空気、Heガスの順に減少した(Figure 8)。また、しわが発生する条件下では、同一鋳造速度で比較すると、しわの深さもArガス、空気、Heガスの順に減少した。この表面しわの発生傾向は、同じ鋳造速度で比較すると、ガス膜厚さの変動が生じた時、Heガスの場合の方がArガスの場合より総括熱伝達係数の変動が小さいことによる(Figure 9)と考えると良く理解できる。空気中で鋳造する場合、表面しわ以外に微細な割れやスラグなどの酸化膜の付着が散見され、良好な表面性状の鋳片を得ることは困難であり、ArガスやHeガスを使った鋳造雰囲気の制御が必要であることを明らかにした。

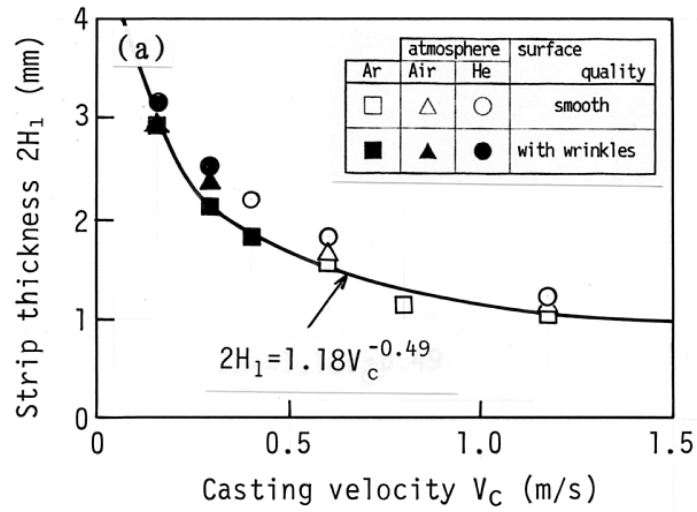


Figure 8 Change in thickness and surface quality of cast strip as functions of casting velocity for various casting atmospheres.

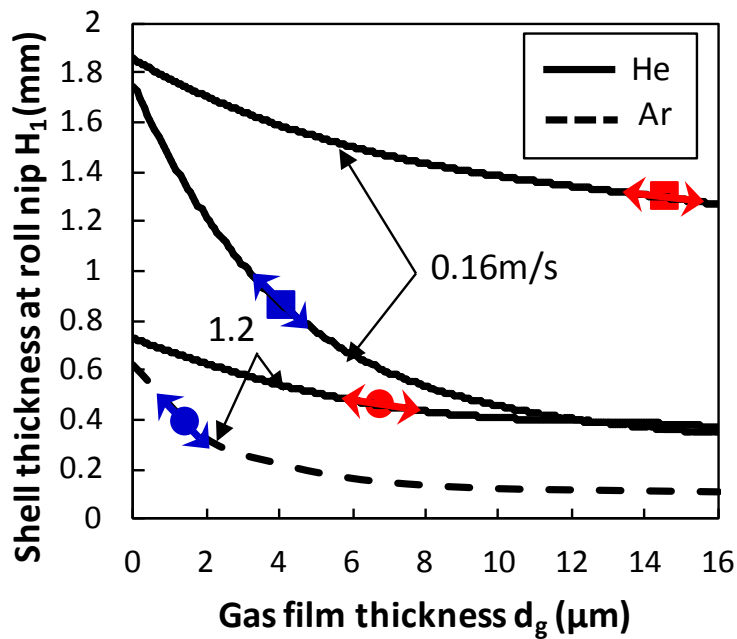


Figure 9 Effect of gas film thickness between roll and metal on the shell thickness at roll nip. \bullet , \blacksquare represent estimated values obtained from the analysis of gas film thickness.

【第 6 章】

第 6 章では、結論として、本研究を総括し、今後の展開について述べた。本研究では、鉄鋼製造の基幹プロセスである連続鋳造法を主な対象として、鋼の連続鋳造における初期凝固制御に関する課題を研究した結果についてまとめた。本研究で得られた成果と既存の品質向上技術を有機的に組み合わせることによって、また、今後のセンシング技術や数値解析技術の進展によって、連続鋳造法で現在よりも効率的に高品質な鋼材が製造されるようになり、工業的に有益な技術として鉄鋼業の発展に寄与するものと確信する。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

鋼の連続鋳造における初期凝固制御に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 溝口 利明

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

当該学位論文に関し、平成 27 年 8 月 4 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。同日に口頭発表の後、第 2 回学位論文審査会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は学位論文研究において、先ず現行連鋳法に関して、①初期凝固殻の不均一生成挙動について、伝熱計算、応力計算、浮き上がり計算を連成したモデルを開発し、不均一凝固の低減にとって、メニスカスから数秒以内の熱伝達の制御が重要であることを明らかにした。また、②鋳型振動の 1 周期間のシェルの破断・修復挙動と凝固・応力歪解析を連成した凝固殻成長の力学モデルを開発し、拘束性 BO 防止のための鋳型振動条件の適正化の指針を示し、かつ具体的条件を明示した。次に双ロール鋳造法に関して、③溶融金属/ロールの接触開始位置の検知実験、および、動的メニスカス形状の理論解析を行って鋳片表面性状とメニスカス形状の関係を調べ、表面しわ防止の臨界鋳造速度の理論式を導出した。さらに、④鋳片表面性状の鋳造雰囲気の影響を調べて、臨界鋳造速度は Ar、空気、He 雰囲気の順で減少し、それはガス膜厚の変動による鋳片/ロール間の総括熱伝達係数の変動が小さくなることによることを明らかにした。

以上のように、本論文は鋼の連続鋳造、および、双ロール鋳造における初期凝固殻の形成に関し新知見を見出し、かつ、操業に適用可能なモデルを提案し、生産性および品質の向上に対する学術的および工業的価値が高く、博士(工学)の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)