

内97-31

早稲田大学大学院理工学研究科

## 博 士 論 文 概 要

### 論 文 題 目

急冷凝固メルトドラッグ法の  
薄板成形機構の解明と  
新プロセスの創造

申 請 者

鈴木 進補

Shinsuke SUZUKI

機械工学専攻・塑性工学研究

1997年12月

工業製品の素材に対する要求は、大量生産低コスト化からより一層の低コスト化、高品質化へと様がわりしてきている。その一方で、素材製造が、資源・エネルギーの大量消費及び地球温暖化をはじめとする地球環境問題の一因となっているのが否めないのが実情である。素材の中でも薄板は厚さ1mm程度の平板として定義され、最も需要の高いものの一つである。しかし、薄板製造には、従来多くの圧延、加熱工程を要することが問題であった。ここで近年、多くの研究機関において薄板連続鋳造プロセスの研究開発が盛んに行われている。連続鋳造プロセスは、溶湯から直接薄板を作製するため、従来の工程と比較し大幅な省工程化が可能であるとともに、急冷効果により材質の改善が期待できる。しかし、薄板連続鋳造法を実用化のレベルまで高めるためには、より高い品質、生産性が要求され、さらに現行の圧延プロセスと比較した付加価値が求められている。このため、従来の代表的な薄板連続鋳造プロセスである単ロール法及び双ロール法は、いずれも実用化には多くの課題を残している。

そこで、本研究では薄板連続鋳造法の可能性を拡大するために、機構が簡潔で新たな機能を付与する可能性を多く有するメルトドラッグ法を拡張したプロセスを検討した。まず、急冷凝固した薄板をさらにクラッド化することによって新たな機能を付与することができることから、メルトドラッグ法を応用し溶湯から直接厚さ1mm程度の急冷凝固クラッド材を作製する方法を考案した。さらに、単ロール法の欠点である自由凝固面、板厚分布を改善するとともに、急冷組織を有する薄板の作製可能領域の高速化を実現するプロセスを考案した。

メルトドラッグ法の薄板成形のメカニズムを解明するとともに新たな薄板連続鋳造プロセスを構築することを目的として以下の研究を行った。

(1) 単ロールのメルトドラッグ法に関し、各成形因子が薄板作製に与える影響を調査した。また、伝熱・凝固・流動に関する数値解析及び温度計測用ロールによって、薄板作製時の温度プロフィールを解明し、薄板作製機構を推測した。この結果から、メルトドラッグ法の理論解析モデルを構築した。

(2) (1)で構築した理論解析モデルをメルトドラッグ法にノズルを2つ設置した方法に適用し、母材(第1層、ロールに直接接触する薄板)と表材(第2層、母材上で成形成する薄板)の温度プロフィールの推定を行った。さらに、実験装置の設計・試作を行い、各成形因子がクラッド材の接合状態、接合界面の状態、合金元素の拡散状態及び断面組織に及ぼす影響を調査し、急冷凝固クラッド材作製可否、接合メカニズム及び最適作製条件を検討し、本プロセスを構築した。

(3) (1)で明らかとなったメルトドラッグ法の基本的特性を基に、自由凝固面側を半凝固成形する成形ロールを装備したプロセスを設計・試作し、各成形因子が薄板自由凝固面性状及び断面組織に及ぼす影響を調査した。これにより、凝固途中の溶湯の半凝固成形機構を推測するとともに、自由凝固面性状改善に関する最適条件を見出した。

(4) (3)で明らかとなったメルトドラッグ法の半凝固成形特性を基に、薄板作製の高速化を目的として、自由凝固面側の半凝固成形と二次冷却的効果を有する成形ベルトを装備したプロセスを設計・試作した。各成形因子が薄板自由凝固面性状及び断面組織に及ぼす影響を調査し、高速薄板作製の可能性を検討した。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章において、薄板素材製造に対する社会的要件から本研究を行なう背景について述べ、従来の連続鋳造法での問題点とその改善方法について論じ、急冷凝固法の見地から作製される薄板に対する評価基準を提示した。同時に、従来のクラッド材作製方法とその問題点を検討し、新たな概念を取り入れたクラッド材作製方法についての可能性を説いた。また、半溶融・半凝固加工法開発の背景を論じ、従来の薄板連続鋳造プロセスの革新的改善策のひとつとして半溶融・半凝固加工との融合したプロセスの有用性について記述した。最後に、本研究で研究対象とする新たな薄板連続プロセスの薄板成形特性を数値解析的に検討する方法論について述べた。

第2章において、本研究で独自に設計・試作した実験装置の特徴、仕様を記述した。

第3章～第6章では、実験的手法、数値解析の観点から単ロールのメルトドラッグ法に関する基本的特性についてを明らかにし、薄板成形機構の解明を行った。第3章において、今まで鉄鋼材料の薄板作製に関する報告例しかなかったメルトドラッグ法のアルミニウム合金薄板作製の基本的特性を把握するため、A1-12mass%Siを実験試料に用い、ロール周速、液面位置、溶湯高さ及びロール材質などを成形因子とし、その板厚、板厚分布、自由凝固面性状およびロール接触面性状に及ぼす影響について論じた。第4章は、伝熱、凝固解析により凝固途中の溶湯及びロールの温度プロフィールを計算した。このとき、解析に不可欠な値であるが未知である熱伝達係数を作製される薄板の板厚や冷却速度分布から推定した。成形条件などが熱伝達係数に与える影響を検討することによりロールと溶湯間の接触状態を中心に薄板成形機構を考察し、解析モデルを構築した。第5章では、簡易的な流動解析プログラムSOLAに熱エネルギー保存式を連成して解析することにより、ロール軸方向に垂直な平面に関する二次元の温度プロフィールを明らかにした。第6章においては、温度計測用ロールを考案、試作して薄板作製過程でのロール表面の温度プロフィールを明らかにし、上述の解析結果の妥当性、成形条件が温度プロフィールに与える影響、ロール温度が作製される薄板の特性に与える影響を明らかにした。

第7章～第9章は、急冷凝固クラッド材作製プロセス構築について論じた。第7章は、クラッド材作製時の温度プロフィールの解析を行い、成形条件が、接合、界面の状態に及ぼす母材界面付近温度の影響を定量的に論じた。第8章は、単ロールのメルトドラッグ法にさらにもう1つノズルを設置し、溶湯から直接クラッ

ド材を作製するプロセスについて、クラッド材の接合状態、冷却状態に及ぼすロール周速、冷却区間長さ等の影響を調査し、その諸特性を明らかにし、クラッド材作製の可能性を明らかにした。第9章は、異種合金クラッド材作製時の接合状態、断面組織、合金元素の拡散状態を調査し、表材と母材の融点が異なる場合の、融点が高い側から低い側への熱影響について論じた。この結果、急冷凝固法と溶融接合の同時複合加工という新たな概念を創出し、繰り返し曲げによっても剥離せず、急冷効果が認められるクラッド材作製に成功した。

第10章、第11章は、第3章で提示された単ロールのメルトドラッグ法による薄板作製で問題となっていた自由凝固面性状、自由凝固面側の冷却状態、板厚分布に関する対処法のとして、成形ロールを付加した方法を考案し、その成形特性を検討した。新たに考案した自由凝固面を凝固・成形する成形ロールを付加したプロセスにおいて、実験試料にAl-Si合金を用い、自由凝固面性状、冷却状態及び断面組織に及ぼす成形条件の影響を論じた。この結果、自由凝固面の半凝固相を凝固・成形する半凝固加工と急冷凝固法の同時複合加工の概念に基づいた新分野を開拓し、単ロールで問題であった自由凝固面のファイン化、プロフィール制御、冷却状態のコントロールが可能となることが明らかとなった。

第12章では、自由凝固面を凝固・成形し、溶湯の凝固完了まで冷却する成形ベルトを付加したプロセスについて、表面性状、冷却状態に及ぼすロール周速、成形開始位置等の影響について論じた。この結果、自由凝固面のファイン化、プロフィール制御、冷却状態のコントロールが可能で、ロール周速  $250 \text{ m/mi}$  という高速域においてもその成果の認められる薄板の連続的作製が可能になり、薄板作製の高速化が実現された。

第13章では、上記を通じて得られた結論を述べている。

以上から、本研究では単ロール急冷凝固法のメルトドラッグ法を応用したプロセスを構築することにより薄板連続鋳造法の可能性の拡大を試みた結果、以下の結論を得た。

(1) メルトドラッグ法に対して提案した伝熱凝固理論解析に適切な熱伝達係数を推定することにより、温度プロフィール、板厚、冷却速度に関し解析値、実験値の一致がみられ、本プロセスの薄板成形特性が明らかとなった。

(2) メルトドラッグ法にノズルを複数設置する方案を考え、上記の理論解析を適用した結果、接合状態の良好な急冷凝固クラッド材作製手法を確立した。

(3) 薄板作製のファイン化、高速化を目的として、半凝固成形、二次冷却を取り入れた成形ロール付加方式と成形ベルト付加方式を提案し、その有効性を実証した。