

論文内容の要旨

博士論文題目 ホットストリップミルのランアウトテーブルにおける
鋼板冷却制御に関する研究

氏名 中川 繁政

(論文内容の要旨)

鉄鋼製造においてホットストリップミルは熱延鋼板を製造する基幹工程であり、その中でもランアウトテーブル (ROT) における冷却は鋼板の機械的特性を左右する重要な工程である。このため、ROT で冷却される鋼板温度を高精度に制御する技術が必要で、モデルに基づいた計算機制御や制御理論の適用による高精度化に関して、さまざまな研究が行われている。本論文では、ホットストリップミルの ROT における鋼板冷却制御に関して、プロセスモデリング、内部状態計測とその制御応用、制御系の安定性解析並びにモデルに即した制御系設計について考察する。

まず、計算機制御においてはプロセスのモデリングが不可欠であり、ROT の巻取温度制御について、物理モデルを基にしたプロセスのモデリングとモデルに基づいたダイナミック制御について述べる。ダイナミック制御を用いたフィードバック制御方法を提案し、実プラントでの効果を示す。

次に、冷却装置内の注水環境の下で鋼板温度が直接計測できる場合に、鋼板の内部状態である温度情報を有効活用するフィードフォワード制御方法を提案する。提案方式では、巻取温度が低く遷移沸騰領域にあるような高張力鋼板に対しても、冷却途中での鋼板温度変動を検知して冷却水量をフィードフォワード調整できるので、巻取温度の温度変動を抑制でき、また、鋼板の先端部分に対しても有効であることを実機プラントで確認した。さらに、巻取温度だけではなく、冷却過程における鋼板の温度降下履歴を緻密に制御するために、急冷停止温度、中間空冷時間及び巻取温度を同時に制御するダイナミック冷却履歴制御の手法を提示する。本制御により、鋼板の機械特性のばらつきが低減できるようになった。

最後に、遷移沸騰領域における冷却制御の安定性解析と制御系設計について考察する。ここでは、プロセスゲインが鋼板温度に依存するという前提のもとで、冷却制御系を非線形状態空間モデルで表現する。また、近年注目を浴びている多項式二乗和 (Sum Of Squares) を用いた安定性解析を行い、遷移沸騰領域では PI 制御器の比例ゲインを低目に抑える必要があることを示す。更に、SOS の手法を用いて状態フィードバック型の局所制御器を設計する手法を提案し、数値例にてその効果を示す。

氏名	中川繁政
----	------

(論文審査結果の要旨)

本論文は、ホットストリップミルのランアウトテーブルにおける鋼板冷却制御に関する一連の、多角的な視点からの研究をまとめたものである。第2章では基本的な設備や現象の説明の後に、いわゆるセットアップ制御の観点から目標値修正によって巻取温度外れを低減させる計算機制御法について述べている。リアルタイムで熱伝導方程式を解くことで鋼板上の予測点における厚み方向温度分布を求め、これを精密な搬送系のトラッキングと組み合わせることで、正確な温度予測が実現される。これによって同一圧延材内の中盤以降の温度精度を保証することができる。第3章では、新たに開発された、冷却帯内でも使用可能な鋼板温度センサを用いたフィードフォワード制御についてまとめている。従来の放射温度計は、水滴による熱放射光の散乱・吸収の影響を直接受けるため、注水環境下では利用できず、ソフトセンサとしての計算温度に頼るほかなかった。しかしこの新技術によって、各点の温度偏差実測値に基づいて下流冷却バンクの水流量を制御できるようになったため、圧延材先端部から温度精度を確保できるようになったとしている。第4章で冷却履歴制御について言及した後、第5章ではシステム制御理論的な見地から、ハイテン材を含む低温巻取材の冷却時に見られる不安定現象の解明と対策に取り組んでいる。これは膜沸騰と核沸騰の中間に位置する遷移沸騰領域における、見かけの熱伝達率の局所的かつ非線形な変化に起因する。まずこの現象を非線形状態方程式として表現し、これに対して二乗和多項式(Sum Of Squares)による解析法を適用することで、安定マージンの定量的評価をおこなっている。さらに章の後半では、SOSを用いた非線形状態フィードバック制御系設計へと議論を発展させている。SOSは2000年以降、非線形制御系の解析・設計に用いられるようになった手法である。エネルギー関数などの探索にあたっては、従来手法(例えばLMI設計)では正定関数のクラスを行列の二次形式に限ってきた。しかしながら、単項式ベクトルの定数行列に関する二次形式がSOSであることと、その行列の正定性との等価性から、次数を限れば数式処理と半正定値計画問題(SDP)の組み合わせによって、SOSのクラスでの探索が可能になったことが学問的な背景としてある。しかし大規模な計算機資源が必要なこともあって、SOSによる解析・設計を実応用に当てはめて考えるという立場はまだまだ少数派であり、野心的な取り組みといえる。

以上から明らかなように、本論文は鋼板冷却制御に対して、リアルタイム計算機制御、センサ開発とその特性を生かした制御系構築、先端的制御理論の適用など幅広い角度から取り組んだものであり、実際にも大きな成果をあげている。よって博士(工学)の学位論文として十分な価値を有していると認める。