

論文の内容の要旨

論文題目：冷間タンデム圧延機におけるパススケジュールの最適化に関する研究
氏 名： 村上 晃

本研究は、鉄鋼プロセスの冷間タンデム圧延機において、板厚張力制御系の目標値であるパススケジュールを最適化し、板厚精度の高い冷延鋼板を高い生産性で製造することを目的とする。



図1 冷間タンデム圧延機

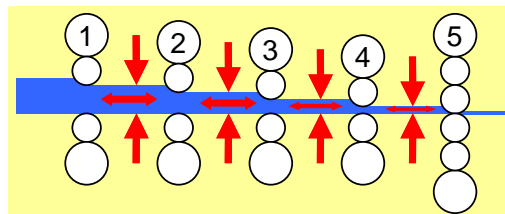


図2 パススケジュール

(板厚目標値と張力目標値)

本論文では、パススケジュールの最適化に関し、①板厚目標値の最適化、②張力目標値の最適化、③板厚目標値・張力目標値を圧延中に変更する最適制御の3つの手法を提案し、実機適用により有効性を定量的に確認した。

各章の概要は次の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景、冷間圧延に関する板厚張力制御に関する研究、本研究の目的と概要について述べた。

第2章では、冷間圧延の概要、パススケジュール、圧延モデル、最適化に関する課題について述べた。以下に詳細を説明する。

冷間タンデム圧延機では、原板である熱延鋼板を、複数スタンドのロールにより連続して薄く圧延し、目標の最終板厚の冷延鋼板を製造する。各スタンドにおいて、適切な圧延荷重を維持することにより鋼板の良好な形状を保ち、モータ電流を定格範囲内に維持することにより定格オーバーによる圧延機停止を防止し、鋼板の張力過大起因の板破断等を防止し、板厚と張力を適切に制御し、板厚精度の高い冷延鋼板を高い生産性で製造することが必要となる。

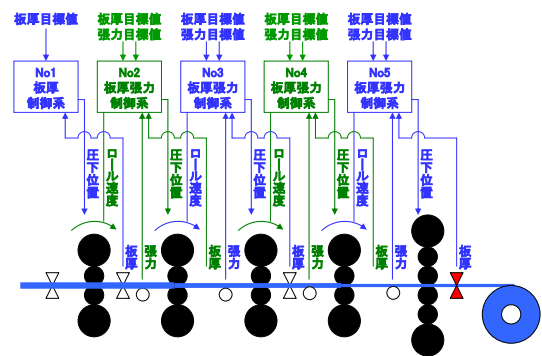


図3 板厚張力制御系

従来の板厚のみを制御する板厚制御系に代わって、スタンド出側の板厚とスタンド間の張力を制御するために、板厚と張力の両方を制御する板厚張力制御系の適用が進んでいる。板厚張力制御系は、制御量をスタンド出側板厚・スタンド間張力とし、操作量をロールの压下位置・回転速度とする多入出力制御系となっていることが多い。

ここで、板厚張力制御系の目標値は、鋼板の圧延前に設定される。なお、一般に、スタンド出側の板厚目標値をパススケジュールと呼ぶが、本論文では、広く、スタンド出側板厚目標値とスタンド間張力目標値を合わせてパススケジュールと呼ぶこととしている。理由は、これらの値が、板厚張力制御系の目標値となっているからである。

パススケジュールの値により、圧延荷重やモータ電流が変化し、また、圧延荷重やモータ電流が適切な場合に板厚張力制御の適用が可能となり板厚精度が良好となる。したがって、パススケジュールを適切に設定し維持することにより、板厚や形状の良好な冷延鋼板を高生産性で製造可能となる。

近年、自動車や電気製品に使用される鋼板の板厚精度要求が厳格になるとともに、高張力鋼板と呼ばれる高強度の鋼板の生産量が増加してきている。そこで、パススケジュールの最適化が重要となっている。

最適化に用いる圧延モデルについては、多変数・非線形の圧延モデルを示した。圧延モデルは、スタンド出側板厚の式、スタンド間張力の式、圧延荷重の式、モータ電流の式等から成り、第3章から第5章の最適化においては、これらの式を用いる。

最適化に関する課題としては、(a)モデル等にばらつきがある場合の最適化、(b)テーブル化された制御パラメータの最適化、(c)圧延機の圧延荷重・モータ電流の最適制御があることを示した。

第3章では、1つ目の手法である①板厚目標値の最適化について述べた。すなわち、(a)モデル等にばらつきがある場合の最適化の課題に関して、数理計画法の1つである機会制約条件計画問題を用いてパススケジュールを設計する手法を提案した。機会制約条件計画問題では、ばらつきについて確率分布を仮定するケースが多いが、過去の実績圧延入出力データと圧延モデルを用いることにより、変数の確率分布を仮定することなく、実際のばらつきを直接的に反映した。ここで、連続的な確率分布ではなく、実績データを用いることから、シグモイド関数で制約条件を近似し、逐次2次計画法による求解を可能とし、さらに、各制約条件の確率を個別に緩和することで、制約の優先順位付けを可能とした。パススケジュール設計に本手法を適用し、パススケジュールのうちの板厚目標値を最適化し、特に高張力鋼板の板厚公差外れ長さについて、13~35%の低減効果

を確認した。本手法は、対象モデルと過去データが存在する場合の、ばらつきを考慮した制御パラメータの最適化一般に広く適用可能と考えられる。

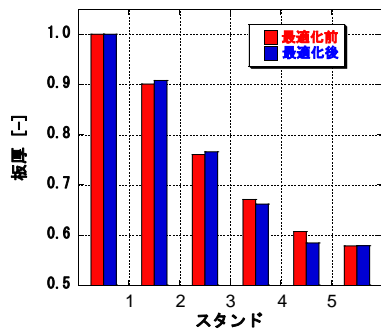


図4 板厚目標値の最適化

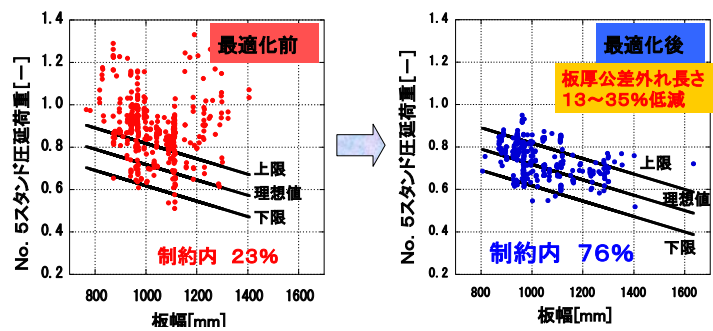


図5 実験結果：No. 5 スタンド圧延荷重

第4章では、2つめの手法である②張力目標値の最適化について述べた。すなわち、(b) テーブル化された制御パラメータの最適化に関して、パススケジュールのうちの張力目標値の最適化について述べた。対象圧延機では、圧延速度に依存する張力目標値としており、この張力目標値と圧延速度との関係を張力カーブと呼んでいる。テーブル内の升目のうち、過去のデータがある升目については、張力カーブを最適化する際に、板厚張力制御系の特性を利用し、最適化問題を、静的な圧延モデルのみを用いた部分問題とすることにより計算時間を短縮し、安定して最適解が得られるようにした。また、過去のデータがない升目については、テーブル全体において、テーブルの各升目で求められる張力カーブの代表値の近似曲面を用いることにより、段階的な最適化を行った。これにより、テーブル全体で滑らかな張力カーブ代表値を持つような設計が可能となり、加減速時において、張力目標値が最適化された。実機適用の結果、減速時のオフゲージ長さが平均で37%減少したことを確認した。本手法は、鉄鋼プロセスに限らず航空機や自動車においても、制御パラメータがテーブル化されている場合の最適化の一手法となると考えられる。

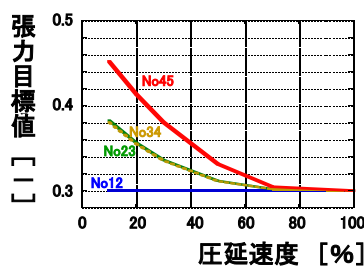


図6 張力目標値の最適化

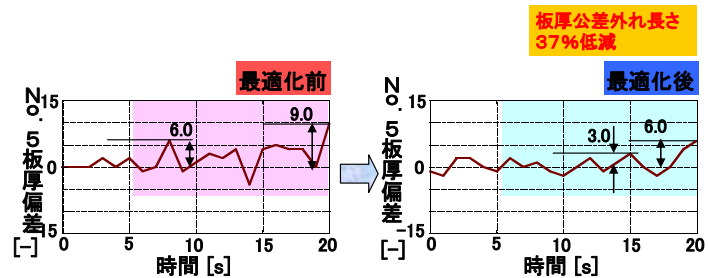


図7 実験結果：No. 5 板厚偏差

第5章では、3つめの手法である③パススケジュールを圧延中に変更する最適制御について述べた。すなわち、(c) 圧延機の圧延荷重・モータ電流の最適制御に関して、パススケジュールを圧延中に変更する最適制御について述べた。本論文では、この制御をミルバランス制御と呼んでいる。理由は、圧延機（ミル）の圧延荷重やモータ電流の全スタンドでの分布パターン（バランス）を制御するからである。

ミルバランス制御では、パススケジュールの最適化によっても残る誤差や圧延中の鋼板の硬さの変化等に対応するため、最終板厚精度を維持しつつ、パススケジュールを変更し、圧延荷重や

モータ電流を制御する。そこで、従来の板厚張力制御系の外側に新たな制御ループを付加した多変数のカスケード制御系を構成した。

設計手法としては、最適性が保証された解が解析的に得られ調整が容易な I L Q 設計法を用いた。実機に適用した結果、圧延荷重変動を抑制し良好な板形状が確保できるとともに、最終板厚の精度が維持されることが確認された。また、圧延条件の誤差等により一部のスタンドのモータ電流が過大な場合であっても、圧延速度の減速なしにモータ電流を低減でき、この結果、最高圧延速度を平均で 2.4% 増加することができ、生産性を高く維持することができた。本手法は、鉄鋼プロセスの熱間圧延機や、アルミニウムや銅の圧延機にも適用可能と考えられる。

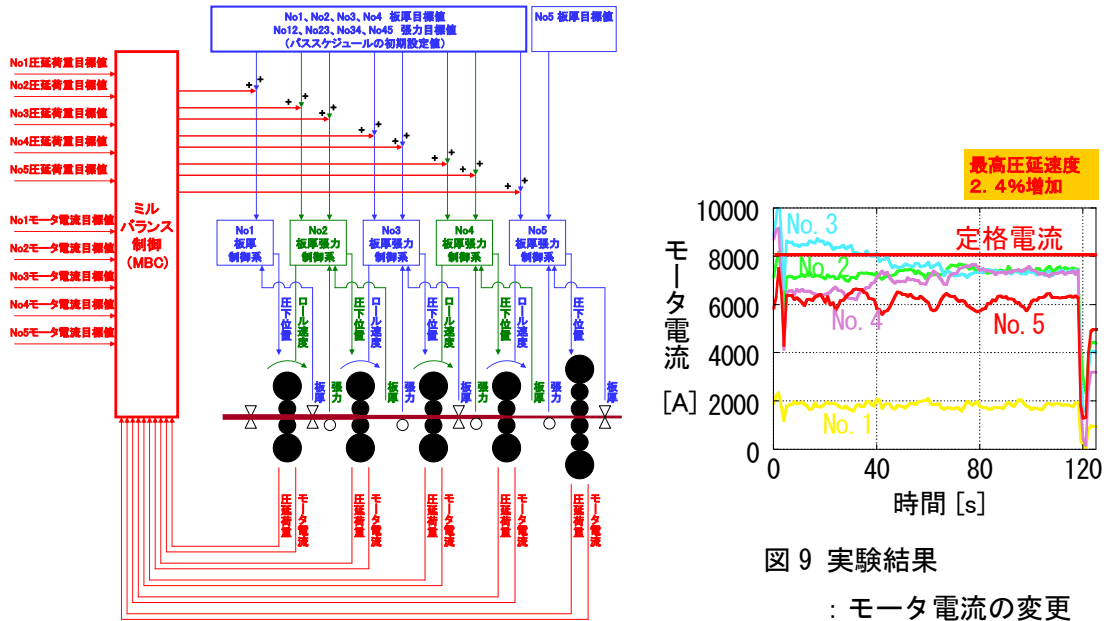


図 8 ミルバランス制御
(板厚目標値と張力目標値を変更する最適制御)

第 6 章は結論であり、本研究の成果をまとめると同時にさらなる研究課題について述べた。本論文で提案した最適化の手法は、鉄鋼の冷間圧延に限らず、他のプロセスや装置での最適化・最適制御による制御性向上にも寄与するものと考えられる。

今後の課題として、分散処理による最適化計算の高速化、評価関数・制約条件・制御ゲインの自動決定、経時変化に対する学習が挙げられる。