

世界最速を実現する調質圧延装置の開発

JFEスチール株式会社

代表取締役社長 北野 嘉久

JFEスチール(株)	スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部	小笠原 知義
JFEスチール(株)	スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部	青江 信一郎
JFEスチール(株)	スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部	北村 拓也
JFEスチール(株)	西日本製鉄所(福山地区) 熱延部	津山 裕史
JFEスチール(株)	西日本製鉄所(福山地区) 制御部	檀上 孝博

はじめに

熱延鋼板の品質には、平坦度(板幅内での長手方向の伸び不均一性)、強度、プレス加工時のしわの原因となる降伏点伸び特性等があり、近年、これらの品質に対する要求が高まっている。

熱延鋼板の最終製造工程である調質圧延(図1)では、鋼板に対して、わずかな塑性ひずみを加えることで最終品質を造り込む。板幅方向の平坦度分布がフラットな場合、図2(a)に示すように鋼板長手方向にうねりが無い状態であり、端部付近の平坦度が中央部に対して大きい場合、座屈により端部付近にうねりが生じた状態(図2(b))となる。また、強度調整、降伏点伸び解消には、伸び率(長手方向の伸び)を管理範囲内に制御する必要がある。

次に、調質圧延における速度パターンは、図3のように、初期速度からトップ速度まで加速し、その後、鋼板の表面検査速度まで減速するパターンとなるが、生産性向上のためには、トップ速度の高速化による圧延時間の短縮化が有効である。

従来の自動制御手法では、1.伸び率制御の影響による平坦度劣化、2.高速圧延に必要な圧延中の加減速に起因する伸び率変動による管理範囲外れ、3.高速圧延時の蛇行現象(設備損傷の原因となる圧延機中央からずれて圧延される

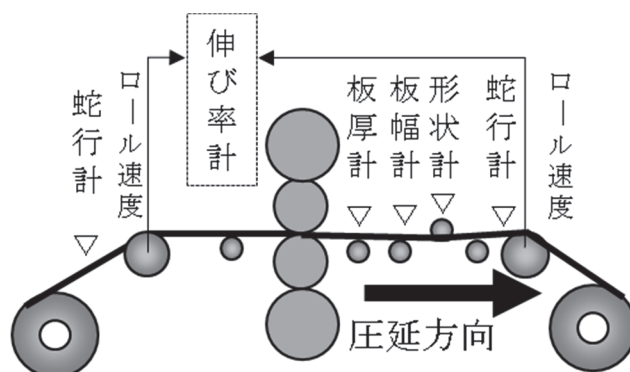
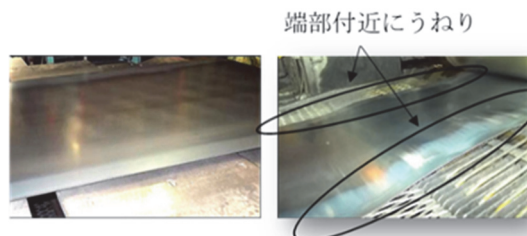


図1 調質圧延装置



(a) 平坦度分布がフラット (b) 平坦度分布が下に凸

図2 平坦度分布による鋼板外観の違い

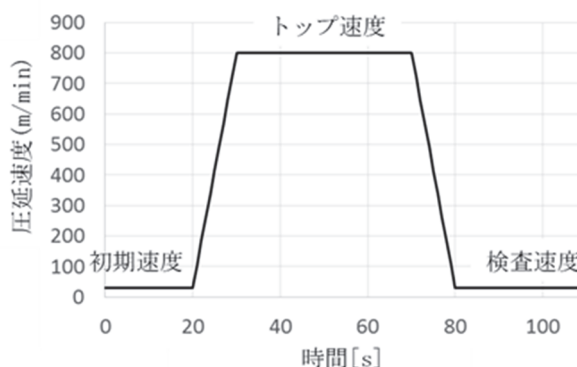


図3 圧延速度パターン

現象)のため、鋼板全長にわたる平坦度のさらなる向上と圧延速度の高速化の実現が困難であり、要望の高い高品質な熱延鋼板を供給するための技術開発が求められていた。

開発のねらい

高品質な熱延鋼板を安価かつ安定的に市場に供給すべく、世界最高速度での安定製造が可能な調質圧延装置を開発する。

装置の概要

本調質圧延装置における制御機能は、図4に示す、(A)平坦度を向上させる最適制御、(B)加減速中の伸び率変動を抑制するフィードフォワード制御、(C)高速圧延中の蛇行抑制制御で構成される。

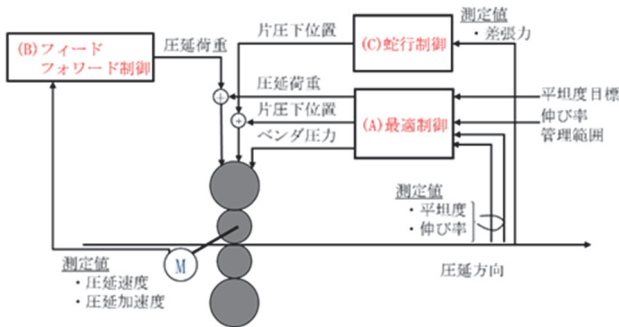


図4 制御機能の構成

本装置の操作量は、片圧下位置(上下圧延ロール間隙の左右差)、ベンダ圧力(圧延ロールを曲げる力)、圧延荷重である。なお、圧延荷重は圧延した結果として表れる物理量であるが、指令した圧延荷重となるように圧下位置(上下圧延ロール間隙)を調整する制御システムにより、操

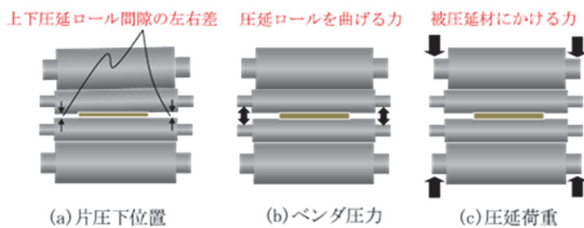
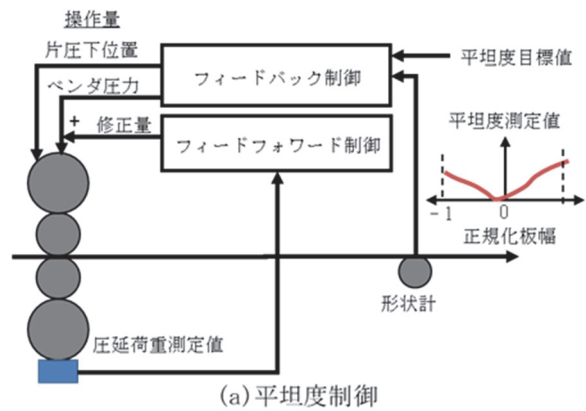
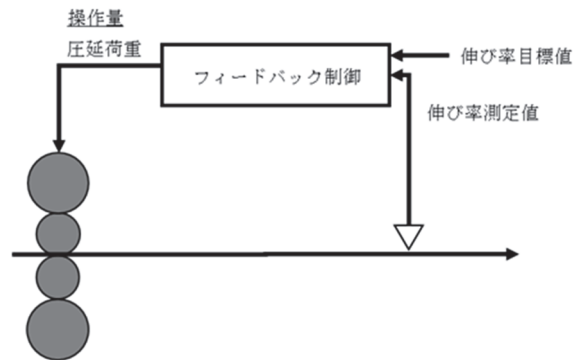


図5 調質圧延装置の操作量

作量として扱うことが可能である。模式的に各操作量(片圧下位置、ベンダ圧力、圧延荷重)を示すと、図5(a) - (c)となる。



(a)平坦度制御



(b)伸び率制御

図6 従来手法

技術上の特徴

(A) 平坦度を向上させる最適制御、(B) 加減速中の伸び率変動を抑制するフィードフォワード制御、(C) 高速圧延中の蛇行抑制制御の各特徴を以下に示す。

(A) 平坦度を向上させる最適制御

従来の平坦度制御手法には、形状計から得られる平坦度測定値と目標値との偏差が最小となるような片圧下位置とベンダ圧力をモデル計算し、それらを設定するフィードバック制御と、圧延荷重変化による平坦度変化の予測値に基づき、ベンダ圧力を設定するフィードフォワード制御を組み合わせた制御手法(図6(a))がある。また、従来の伸び率制御には、圧延荷重の調整により、伸び率を目標値に制御するフィードバック

ク制御 (図6(b))がある。このように平坦度制御と伸び率制御は、それぞれ個別に構築される。

伸び率は、圧延荷重の調整で目標値に制御することが可能であるが、圧延ロールのたわみ状態が同時に変化する影響で平坦度まで変化してしまう。そして、圧延機の特長として、圧延荷重変更による平坦度変化は、他の操作量(片压下位置変更とベンダ圧力変更)を組み合わせたとしても完全に除去できない。従来の伸び率制御手法では、平坦度への影響を考慮せず、一定の伸び率目標値となるように圧延荷重を調整することで圧延荷重変更量が大きくなることもあり、平坦度が劣化することがあった。

開発者らは、伸び率目標値を平坦度への影響を考慮して設定することで、平坦度を向上させることができると考え、シミュレーションモデルと各種制約条件に基づき、平坦度制御偏差を最小化する伸び率目標値と各種操作量を最適計算(2次計画法)により制御周期毎に算出し、それらを圧延機に設定する制御手法を開発した。

(B) 加減速中の伸び率変動を抑制するフィードフォワード制御

調質圧延では、鋼板のひずみ速度(\propto 圧延速度)変化に対して鋼板の降伏応力変化が大きく、圧延速度変化に対して伸び率が大きく変動する。圧延速度高速化のためには、加減速中の伸び率変動を抑制し、管理範囲外れを回避する必要がある。従来、精度に課題のあった物理モデルを使用せず、統計的に得られた圧延速度変更完了までに必要となる圧延荷重変更量と、圧延速度変化と降伏応力変化の関係式に基づいて圧延荷重をリアルタイムに設定するフィードフォワード制御により、効果的に変動を抑制する。

(C) 高速圧延中の蛇行抑制制御

従来、圧延作業者が経験に基づき片压下位置を調整することで蛇行を抑止しており、高速圧延を実現するためには、この作業を自動化する必要がある。新たに開発した調質圧延工程一貫

蛇行シミュレーションで蛇行させにくい設備・操業条件を明確化するとともに、蛇行を誘発する非対称バイアス誤差(圧延機の左右剛性差、被圧延材の変形抵抗差、板厚差等)に対しては、圧延機出側での鋼板差張力が零になるように片压下位置を自動制御することが有効であることを検証した。上記に基づく操業条件設定と差張力零制御により、蛇行が抑制可能となり、高速圧延時の圧延操業安定性が格段に向上した。

実用上の効果

圧延前の平坦度が同程度である被圧延材(低炭材、板幅1200mm、板厚2.0mm)を対象として、従来手法と開発手法を適用した場合の平坦度を比較した。長手方向の平坦度平均値は、従来手法の39[I-unit]に対して開発手法では20[I-unit]に改善されている(図7)。

次に、加減速による伸び率変動を抑制するフィードフォワード制御の有効性を検証した。図8(a)～(c)は、それぞれ圧延速度、圧延荷重変更量(操作量)、伸び率変化であり、点線がフィードフォワード制御非適用、実線がフィードフォワード制御適用に対応する。フィードフォワード制御非適用の場合では、加速時に伸び率が大きく低下している。このような大きな伸び率低下は管理範囲の下限割れとなる可能性が高い。他方、フィードフォワード制御を適用した場合は、圧延荷重の修正が迅速に行われており、伸び率変動が小さい。このように、本開発手法により、圧延速度変更時における伸び率変動が低減でき、管理範囲外れを抑制できる。

最後に、シミュレーションによる蛇行抑制効果を図9に示す。開発した差張力零制御が非適用の場合には、蛇行量は70mm程度発生するのに対して、本制御を適用した場合は、蛇行量が0に収束している。これにより、高速圧延下で蛇行を抑制し、安定した操業ができるようになった。

以上で、世界最高速である800m/min(従来ミ

ルでの最高速度 550m/min) で平坦度を高精度に自動制御することが可能となり、高品質な熱延鋼板を供給することができるようになった。

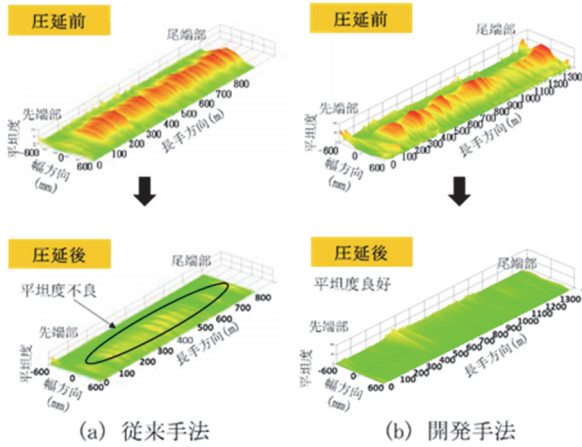


図7 平坦度の改善効果

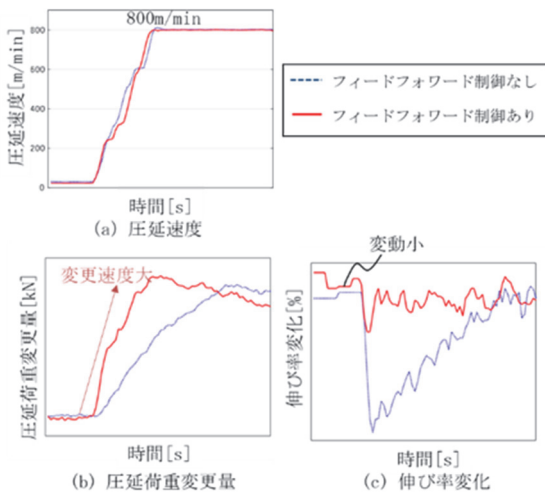


図8 フィードフォワード制御による伸び率変動抑制効果

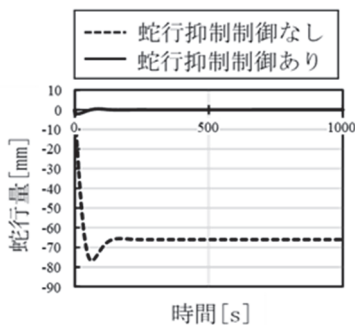


図9 蛇行抑制効果(シミュレーション)

知的財産権の状況

本開発品に関する特許登録は下記の通りである。

- ① 日本国特許第 6176261 号
 名称：鋼板の形状制御装置及び形状制御方法
 概要：平坦度を向上させる最適制御
 - ② 日本国特許第 6332191 号
 名称：調質圧延装置及び調質圧延方法
 概要：加減速中の伸び率変動を抑制するフィードフォワード制御
 - ③ 日本国特許第 6323384 号
 名称：鋼板の蛇行制御方法、鋼板の蛇行制御装置、及び鋼板の製造方法
 概要：高速圧延中の蛇行抑制制御
- この他に、4 件が登録されている。

むすび

本装置により世界最高速（800m/min）での安定製造が可能となり、高品質な熱延鋼板を安価に安定供給できるようになった。

そして、高速化の達成とともに、従来、必要とされていたオペレータによる圧延中の各種操作量の手動設定が不要となり、圧延前後における被圧延材の取り扱いと品質検査に注力できるようになったことで、生産性も飛躍的に向上した。

今後も、制御技術開発を積極的に推進していくことで、高品質な製品の安定供給ならびに生産性の向上に努めていきたい。