



受賞技術-31

世界最速を実現する調質圧延装置の開発

Development of a Hot Skin Pass Mill which Achieves
the World's Highest Rolling Speed

小笠原知義
Tomoyoshi Ogasawara

JFEスチール(株) スチール研究所
圧延・加工プロセス研究部
主任研究員

1 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、圧延機入側と出側で鋼板に所定の張力をかけつつ、伸び率(圧延前後の板長さの増加率)にして数パーセントで圧延することで最終品質を造り込む。これらの品質のうち平坦度は、図2に示すように板幅方向の分布を持ち、これをフラット状態、つまり、幅方向の伸びが均一となる状態に制御することが要求される。また、強度調整と降伏点伸び特性解消には、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。本稿では、平坦度 f は、ある幅位置の長手伸び L と、 L を基準とした任意の幅位置の長手伸びとの偏差 ΔL を用いた伸び差率として $f = \Delta L / L \times 10^5$ [I-unit] で定量化する。また、伸び率 e は、圧延

機入側の板厚 H 、出側の板厚 h 、入側速度 V_{in} 、出側速度 V_{out} としたとき、 $e = (H-h) / h \times 100 = (V_{out} - V_{in}) / V_{in} \times 100$ [%] とする。

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

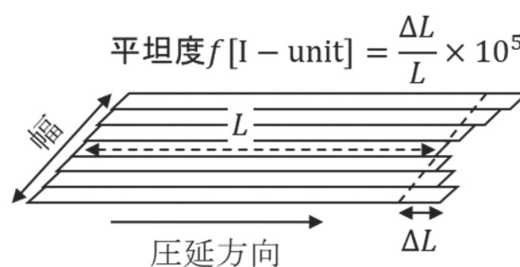


図2 鋼板の平坦度評価

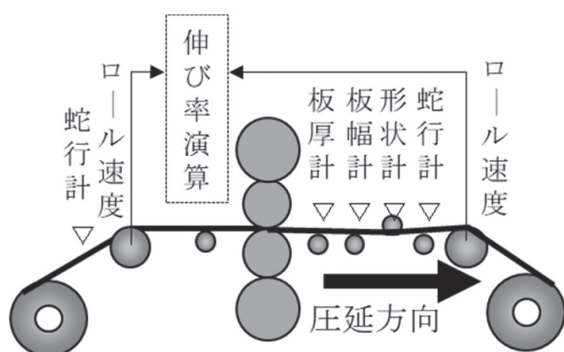


図1 調質圧延設備

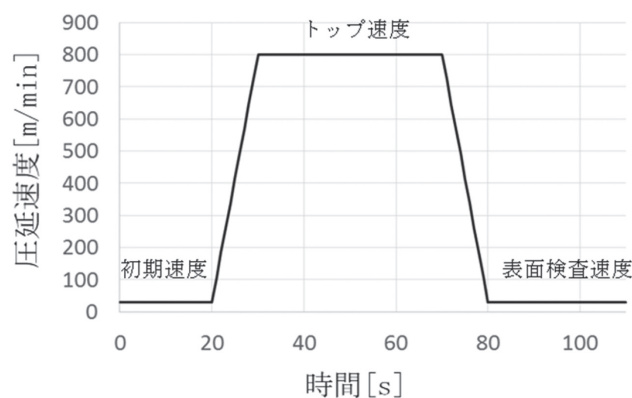


図3 圧延速度パターン

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現象）という課題のため、鋼板全長にわたる平坦度の向上と圧延速度の高速化の実現が困難であり、これを解決する技術開発が求められていた。

本稿では、上記課題を解決する、一般財団法人機械振興協会から第54回機械振興賞（機械振興協会会長賞）を受賞した「世界最速を実現する調質圧延装置の開発」の内容を紹介する。なお、本技術は、IT技術を活用した最適化・シミュレーション技術と各種センサーデータの融合による“Cyber Physical System”¹⁾のコンセプトにもとづき開発した制御技術であり、熱延調質圧延では世界最速（当社調べ）である最高圧延速度800m/minで各種制御量を高精度に自動制御することを可能とし、鋼板品質向上とともに生産能率向上に寄与する²⁾。

2 開発した制御技術の概要

調質圧延設備において開発した制御機能は、図4に示す、(A) 平坦度を向上させる最適フィードバック制御、(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。本制御における操作量は、片压下位置、ベンダ圧力、圧延荷重である。なお、圧延荷重は圧延の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压下位置を調整するマイナーループ制御により、操作量として扱うことが可能である。以降の、2.1節、2.2節、2.3節で各制御機能開発の背景と特徴について概説する。

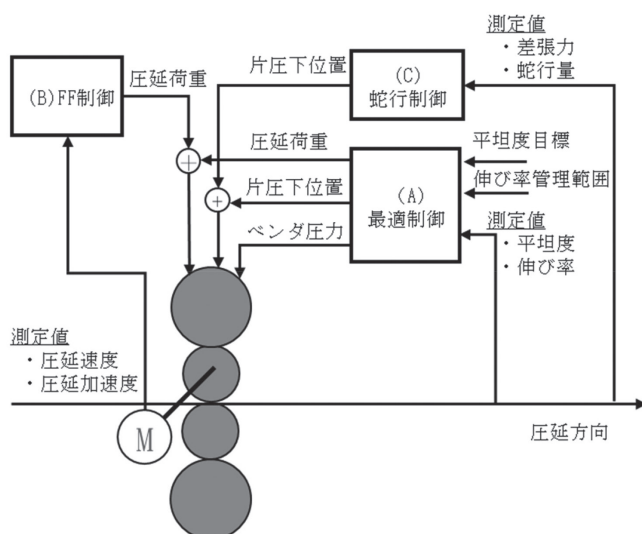


図4 開発した制御機能

2.1 平坦度を向上させる最適フィードバック制御

従来の平坦度制御手法には、形状計での平坦度測定値と目標値との偏差が最小となるような片压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³⁾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制御⁴⁾を組み合わせた制御手法（図5 (a)）などがある。また、従来の伸び率制御手法には、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制御⁵⁾（図5 (b)）がある。このような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も同時に変化する影響で平坦度まで変化する。このように、両者は相互に影響しており、伸び率を優先して圧延荷重を調整すると、目標の平坦度が得られない場合があった。

この問題に対して、筆者らは、伸び率を平坦度への影響を考慮して制御することで、平坦度を向上させることができると考えた。これを実現するために、まず、図6に示す出力に対する操作量の影響を定量化し、操作量から出力を予測する数式モデルを構築した。そして、このモデルによる平坦度予測値と平坦度測定値の偏差の2乗値を、伸び率管理範囲や各アクチュエータの動作速度等の各種制約下で最小化する最適化

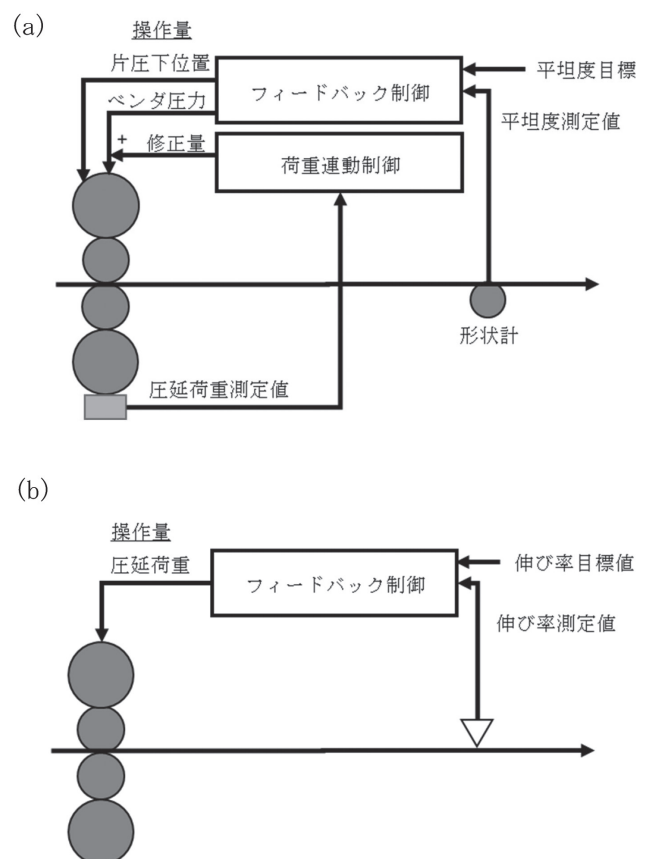


図5 従来手法 (a) 平坦度制御、(b) 伸び率制御

問題（2次計画法）に帰着し、これを制御周期毎に解くことで最適な操作量をリアルタイムに決定し、それを圧延機に設定し制御する最適フィードバック制御手法⁶⁾を開発した。これによると、従来のように、伸び率が一定値に制御される保証はないが、制約条件として伸び率管理範囲に収まるように制御されるため、伸び率に関する品質への問題は生じない。そして、平坦度を最適化するように伸び率や各種操作量を設定するため、平坦度が向上する。

2.2 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変形抵抗変化が大きく、加減速時に伸び率が大きく変動することを実機で確認した。圧延速度高速化のためには、加減速中の伸び率変動を低減し、これによる伸び率管理範囲外れの可能性を低減する必要がある。この課題に対しては、予測モデルを適用して、適切に圧延荷重を調整する必要がある。ここで、調質圧延における物理モデルでは、計算負

荷や予測精度に課題があるため、過去の圧延実績にもとづいた統計モデルの活用が有効である。

開発手法は、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もと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⁶⁾であり、これにより、効果的に加減速における伸び率変動を抑制する。

2.3 高速圧延中の蛇行抑制制御

従来、圧延作業者が経験にもと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⁷⁾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、板厚等）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。

3 適用事例

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）を対象に、開発手法の適用材と非適用材で圧延後の平坦度を比較する。ここで、平坦度の評価値は、平坦度の板幅方向最大値の長手平均とした。図7にその比較

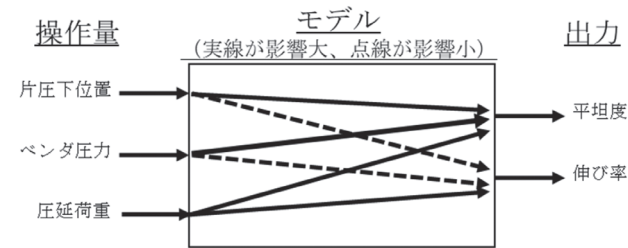


図6 出力に対する操作量の影響

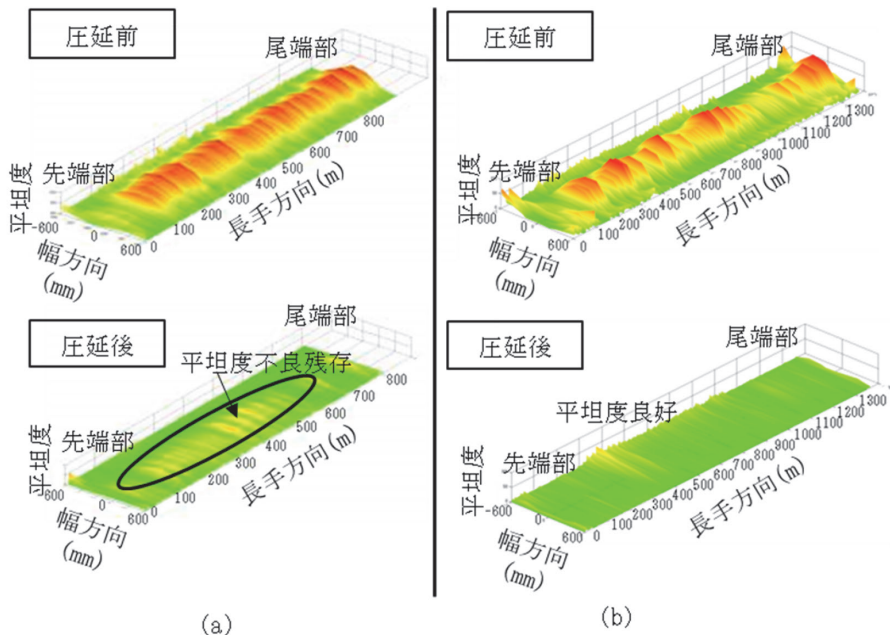


図7 平坦度の改善効果 (a) 従来手法、(b) 開発手法

結果を示す。図7 (a) の非適用材（従来手法）では39 [I-unit]なのに対して、図7 (b) の適用材では20 [I-unit]となっており、開発手法適用により平坦度は、大幅に改善されている。

次に、平坦度改善効果を統計的に示す。ここで、従来手法は、伸び率を一定の目標値に制御する方法とした。そして、

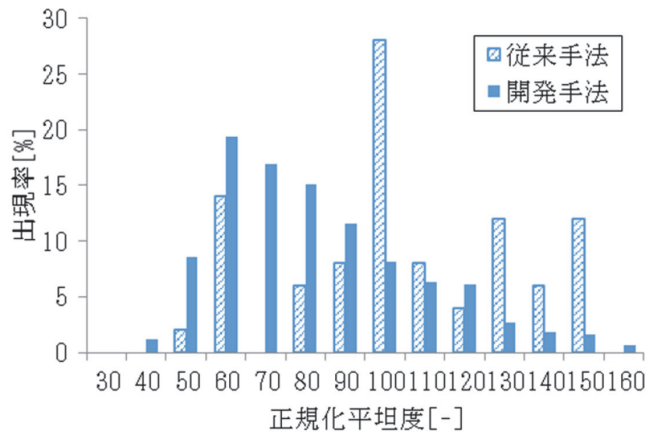


図8 平坦度の改善効果(統計評価)

実験数（被圧延材の数）は、開発手法適用が443、従来手法適用が50であり、被圧延材は、入側厚が1.5 mmから2.8 mmの範囲、板幅が750 mmから1300 mmの範囲の軟鋼とした。図8に示すヒストグラムの横軸は、従来手法を適用した被圧延材の尾端部平坦度の平均値を基準として規格化した平坦度の大きさを表している。つまり、従来手法の尾端部平坦度の平均値を f_{ave} として、評価対象材の尾端部平坦度を f_i としたとき、評価対象材は、 $f_i/f_{ave} \times 100$ として評価する。また、ヒストグラムの縦軸は、出現率（その区間内の被圧延材の数と全被圧延材の数の比率）を表している。従来手法の平坦度の平均値100に対して、開発手法では、平坦度の平均値は78となり、その効果が確認できた。また、開発手法の分布は、従来手法よりも裾野が狭く、ばらつきが小さい。

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9 (a) - 図9 (c) は、それぞれ圧延速度、圧延荷重変更量、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している。フィードフォワード制御を適用した場合では、圧延荷重の修正が迅速に行われており、伸び率

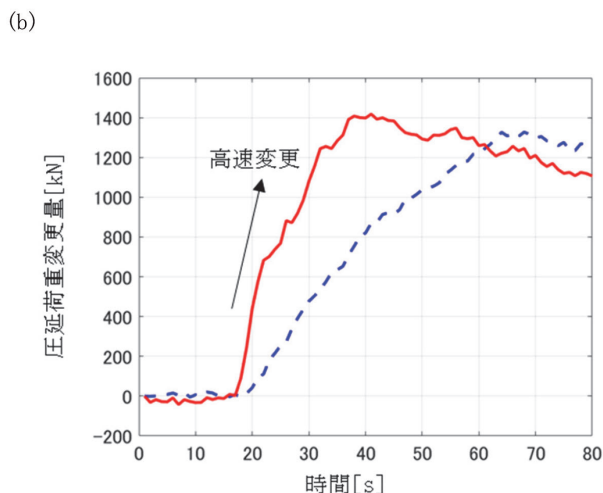
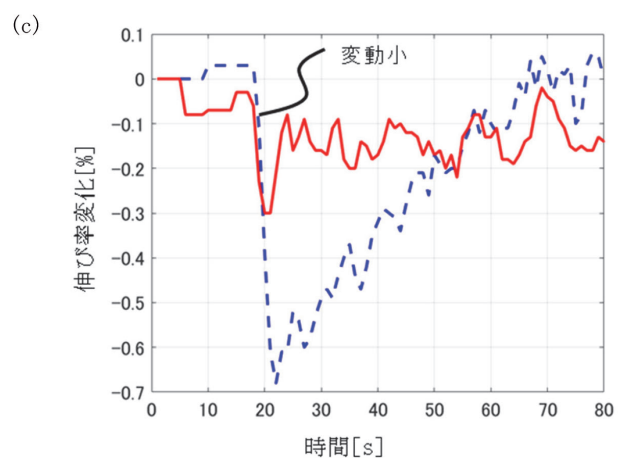
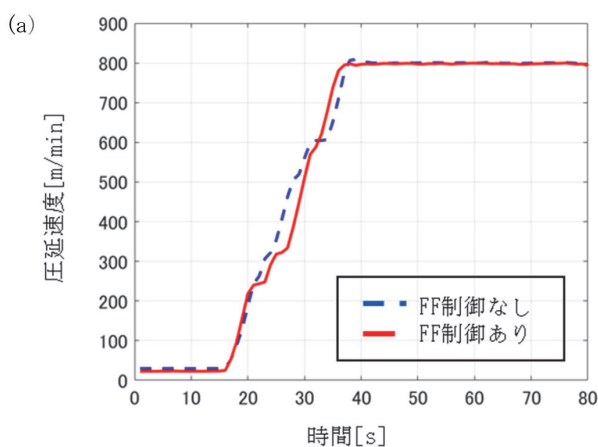


図9 フィードフォワード制御による伸び率変動抑制効果 (a) 圧延速度、(b) 圧延荷重変更量、(c) 伸び率変化

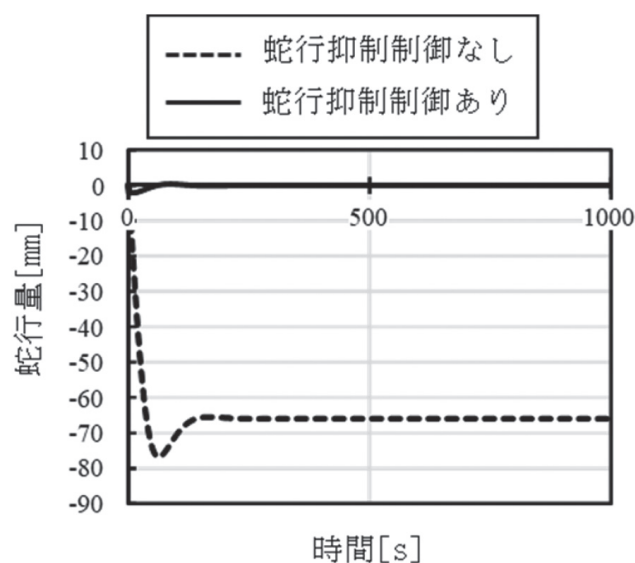


図10 蛇行抑制効果(シミュレーション)

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（この場合、-0.5%以下）を抑制できる。

最後に、蛇行抑制効果検証結果を図10に示す。開発した差張力零制御を適用しない場合には、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、800m/minの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。

4 おわりに

IT技術を活用した最適化・シミュレーション技術と各種センサーデータの融合による“Cyber Physical System”の考え方にもとづき、熱延調質圧延では世界最速（当社調べ）で

ある最高圧延速度800m/minで、蛇行を抑制しつつ、平坦度と伸び率を高精度に自動制御する技術を開発した。本制御機能は、以下の3機能からなる。

- ・平坦度を向上させる最適フィードバック制御
- ・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
- ・高速圧延中の蛇行抑制制御

これにより、熱延鋼板の品質向上とともに高い生産性で製造することが可能となった。なお、本制御はモデル式に基づく制御であるので、そのモデル精度が制御性能を左右する。したがって、モデルを圧延の実績値を用いて逐次更新することや、新しく圧延する材料に対応するためにFEM解析を活用するなどのモデル精度を維持する仕組みが必要となると考えられるが、これは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) J.Lee, B.Bagheri and H.Kao : Manufacturing Letters, 3 (2015), 18.
- 2) 小笠原知義, 館野純一, 浅野一哉 : JFE技報, (2018) 42, 22.
- 3) 板圧延の理論と実際 (改訂版), 日本鉄鋼協会圧延理論部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (2010), 310.
- 4) I.Hoshino, M.Kawai, M.Kokubo, T.Matsuura, H.Kimura and H.Kimura : IFAC Proc., 26 (1993), 569.
- 5) 佐々木徹, 岸田朗, 小田島昭雄 : 川崎製鉄技報, 3 (1971), 10.
- 6) 小笠原知義, 北村拓也, 青江信一郎, 館野純一, 浅野一哉 : 鉄と鋼, 105 (2019), 512.
- 7) 青江信一郎, 北村拓也, 小笠原知義, 三宅勝 : 塑性と加工, 61 (2020), 107.

(2020年11月27日受付)