

技術論文

熱間圧延仕上ミルにおける高張力鋼，軟鋼の混合圧延のための 高精度板プロフィールモデル

High-accuracy Profile Prediction Model for Mixed Scheduled Rolling of High Tensile Strength and Mild Steel in Hot Strip Finishing Mill

福島 傑 浩*	鷺 北 芳 郎	佐 々 木 保	中 川 繁 政
Suguhiko FUKUSHIMA	Yoshiro WASHIKITA	Tamotsu SASAKI	Shigemasa NAKAGAWA
武 衛 康 彦	焼 田 幸 彦	柳 本 潤	
Yasuhiko BUEI	Yukihiko YAKITA	Jun YANAGIMOTO	

抄 録

熱間圧延仕上ミルにおいて高張力鋼，軟鋼の混合圧延を実現するために必要となるオンライン使用可能な高精度板プロフィール予測モデルを構築した。新手法は分割モデルをベースとしており，その荷重・張力分布を実験およびFEM解析により考察し，板プロフィール変化がない場合の基準分布に，板プロフィール変化による変動分を加味するという新たな荷重・張力分布の計算手法を構築した。特に荷重が高い高張力鋼のプロフィール予測精度が向上し，このモデルが，オンラインのクラウン・形状制御の他，蛇行制御にも適用されることで，高張力鋼と軟鋼の高効率な混合圧延を実現した。

Abstract

High accuracy online strip profile prediction model has been developed for realize mixed scheduled rolling of high tensile strength and mild steel in hot strip finishing mill. New method is based on matrix model. The force and tension distribution is considered by experiment and FEM analysis. First the force and tension distribution when there is no change in strip profile is calculated as the specified value, second the distribution when there is an actual change in strip profile is calculated as the variation from the specified value. Then the profile prediction accuracy of high tensile strength steel, whose rolling force is higher than that of mild steel, was improved. The model was applied to online crown, flatness, and walking control in hot strip finishing mill. As the result, mixed scheduled rolling of high tensile strength and mild steel was commercially promoted.

1. 緒 言

近年，自動車には環境対策としての燃費向上が強く求められ，同時に衝突時の安全性基準もより厳しくなっている。これらの理由から，車体軽量化かつ強度確保が可能な高張力鋼（以下，ハイテン）の使用が急速に拡大しつつある。

熱間圧延（以下，熱延）工程でハイテンを製造する際には，寸法精度の悪化と通板トラブルの増加が問題となる。ハイテンには種々の合金元素が添加されているため，軟鋼より圧延荷重が高く，圧延機のロール変形も大きくなり，仕上寸法，特に板プロフィールを高精度に維持することが困難になる。また，圧延荷重が高いことで鋼板尾端部の蛇行や平坦不良も大きくなりやすく，絞り込みと呼ばれる通板トラブルが生じやすくなるという問題が発生する。

熱延工程でハイテンの製造比率が高まった場合でも，生産効率を高く，製造コストを低く維持するためには，軟鋼とハイテンを同じタイミングで造り分けるためのクラウン制御能力を評価，準備し，さらに高精度にオンライン制御するといったハイテンと軟鋼の混合圧延技術が必要になるが，その基盤となるのが，ハイテンの圧延特性，特に板プロフィールを高精度に予測可能なオンラインモデルである¹⁾。

2. 従来の板プロフィール予測技術

ハイテンの圧延荷重は高く，軟鋼の2倍程度になることがある。このような高い圧延荷重が作用することによってロールが変形することなどを計算して求める板プロフィール予測精度が悪化することになる。板プロフィールの予測精度

* プロセス研究所 一貫プロセス研究部 主幹研究員 茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014

が悪化すると、板プロフィール予測に基づいて計算する平坦度の予測精度が大きく悪化するため、平坦不良が発生することになる。平坦不良が発生すると板が波打って通板することで正常な通板が困難となる他、中伸びが大きい場合には鋼板に穴が開くこともあり、通板速度が制約されたり、圧延トラブルが発生するといった問題が生じる。また、仕上げ圧延後の冷却においても平坦不良が冷却時の温度分布拡大の原因になるため、平坦度の確保への要求は大きい。

また圧延荷重の高いハイテンの圧延では、圧延時の左右非対称性が大きくなりやすい。このような左右非対称状態の圧延では、圧延材の速度も幅方向に分布することになり、この速度分布によって圧延材に回転速度が加えられると、圧延材は本来の進行方向から外れて蛇行しながら圧延されることになる。圧延中に蛇行が生じると、案内ガイドとの衝突によって圧延材のエッジが座屈して折れ込んだ状態で圧延される通板トラブルに至り、圧延ロールが損傷する。

以上のように平坦不良や蛇行が発生すると、通板速度の制約やトラブルによる休止といった生産性の阻害、製造コストの増加、ロール疵が圧延材に転写されることや冷却時の温度分布が生じることによる製品品質の悪化といった問題を引き起こしていた。

この対策として、ハイテンでリード材と呼ばれる圧延材を準備して徐々に圧延荷重レベルを高めながら平坦度や蛇行を確認し、オペレーターの経験に基づいて圧延機の設定を徐々に変化させていく方法をとることもできるが、軟鋼とハイテンの混合圧延では、このように圧延荷重が異なる圧延を交互に行うことになるために、そのような対策をとることができない。

以上に述べた問題を解決するために、ハイテンでも板プロフィールを精度良く予測でき且つオンライン制御に用いることが可能なモデルが必要である。オンライン板プロフィール予測モデルの役割を図1に示す²⁾。オンライン板プロフィール予測モデルは板プロフィール・平坦度制御の設定計算を高精度化することに直接用いられるのに加えて、蛇行制御に必要なレベリング量と蛇行量の関係を表す影響係数を高精度に与えることにより、蛇行制御を効果あるものにす

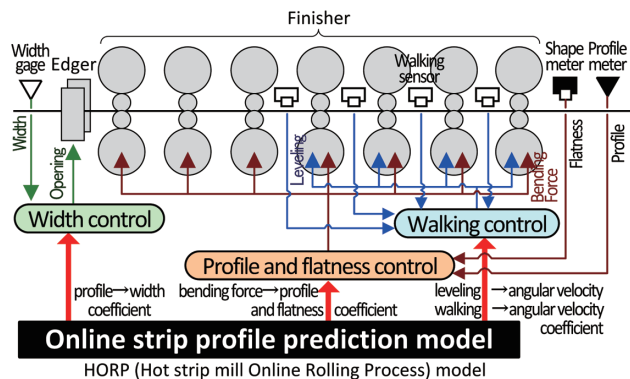


図1 オンラインプロフィール予測モデルの役割
Functions of online profile prediction model

るという役割を負う。

従来から板プロフィールの予測計算には分割モデル^{3,4)}が用いられてきた。分割モデルは一般的には圧延機のロール変形と圧延材の圧延荷重を連成し、くり返し計算をおこなって精度良く板プロフィールを予測する方法である。

図2に示すように、圧延材やロールなどの計算対象を幅方向に分割し、各分割区間は、荷重、変形は均一として扱い、各分割区間のワークロールの偏平、軸心変形などをバックアップロールなどの変位適合条件を考慮しながら計算で求める。図3に示すように板プロフィール変化から張力分布を求める。この手法は張力フィードバック計算と呼ばれ、一般的な解法では収束計算が必要とされる。

張力フィードバック効果のより精緻な計算方法としては、中立点板厚分布を基準として、入側板厚分布および出側板厚分布からそれぞれ入側張力分布と出側張力分布を計算する(1)式が提案されている⁵⁾。

$$\sigma_n = \frac{E \cdot \sum_j \eta_j \cdot \Delta \epsilon_{Hj} \cdot h_j \cdot \Delta x_j}{\sum_k h_k \cdot \Delta x_k} - E \cdot \eta_i \cdot \Delta \epsilon_{Hi} + \sigma_T \quad (1)$$

ここで、添え字の i, j, k は分割区間を意味し、 σ_n : 入側ま

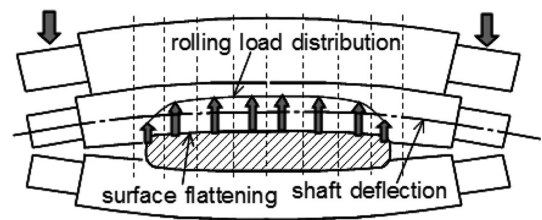


図2 分割モデルによるロール変形の計算
Calculation of roll deformation

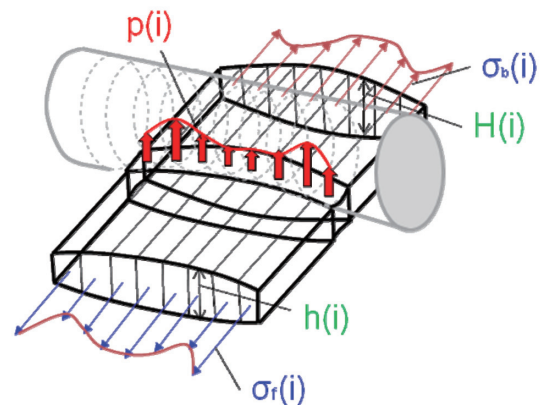


図3 張力フィードバック計算方法
Flow of tension feed back calculation

たは出側張力、 E : ヤング率、 η_i : 形状変化係数⁹⁾、 $\Delta\epsilon_{Hi}$: 中立点での板厚を基準とした入側または出側の板厚ひずみの幅中央区間と i 区間の偏差、 h_i : 入側または出側の板厚、 Δx_i : i 区間の分割幅、 $\sigma_T: \sigma_n$ の平均値である。

以上のように改善されてきたモデルを用いても、板幅端部領域の圧延荷重分布予測精度が原因で、高荷重圧延や薄物材圧延での板プロフィール予測精度が悪化すると考えられる。

図4に示したテストミルを用いて、表1の条件で熱間圧延テストを行い、圧延後の板幅端から25mm位置の板クラウン C_{25} と板幅端から25mmと5mm間のエッジドロップ E_{25-5} の関係を調べた結果を図5に示す。900℃で圧延した通常材では、従来モデルでも板クラウンとエッジドロップ

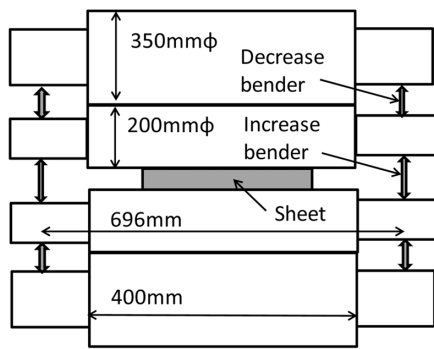


図4 テストミル概要 Model mill

表1 実験条件 Experiment conditions

	Case 1	Case 2	Case 3
Material	Low carbon steel		
Thickness / mm	3		
Sheet crown / μm	0		
Width / mm	250		
Reduction / %	30		
WR diameter / mm	200	100	200
Temperature / °C	900	900	700
WR speed / mpm	60		
Rolling load / ton	72	50	119

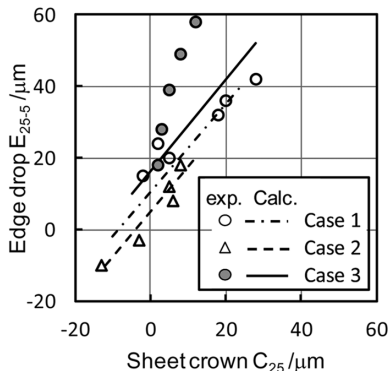


図5 従来モデルのエッジドロップ予測精度 Accuracy of edge drop with conventional model

プの関係を精度良く予測できるが、圧延荷重が1.5倍となる700℃の高荷重圧延材では、エッジドロップの増加を十分に予測できないことが示されている。

また、比較的大きな板クラウンに圧延した場合にも従来モデルではエッジドロップが過小評価されることが図6からも判る。図中のFEM計算値はCORMILL System⁹⁾を用いた計算値である。このFEM計算結果は実測値と良く一致しているが、圧延荷重分布計算結果を従来分割モデルとFEMで比較すると明らかのように(図7)、この板プロフィール予測の差は幅端部の圧延荷重の違いが原因と推察できる。

図8に、従来の分割モデルにFEMで計算された荷重分布を与えて板プロフィールを計算した結果を示す。精度よく板プロフィールを計算できていることから、分割モデルの板

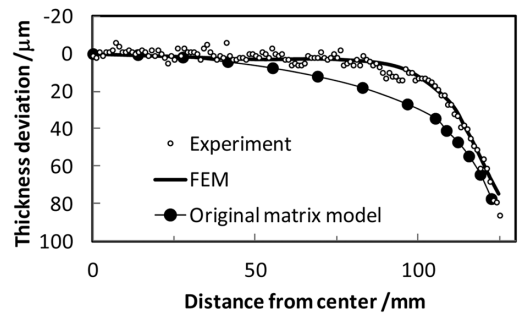


図6 従来モデルとFEMの板プロフィール予測の差 Difference of sheet profile between conventional model and FEM

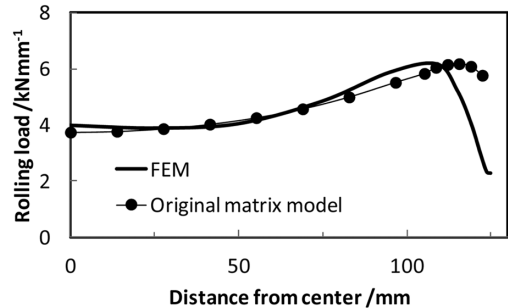


図7 従来モデルとFEMの圧延荷重予測の差 Difference of rolling force deviation between conventional model and FEM

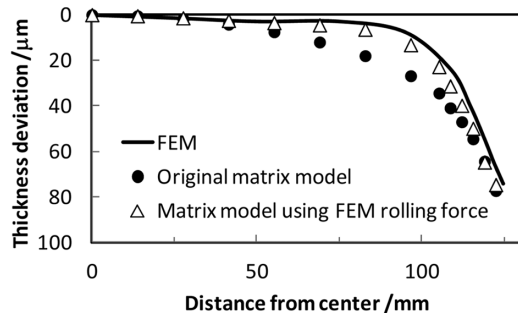


図8 FEM荷重分布予測値を用いることによる板プロフィール予測精度改善効果 Effect of rolling force deviation to profile prediction model's accuracy

幅端部領域の圧延荷重分布計算方法を改善すればよいことが示されている。

3. 改善技術

3.1 板プロフィール予測モデルの高精度化

図7に示すような荷重分布の差が生じる理由を考えるため、ロールを剛体とした条件でFEM解析を行った。解析条件を表2に示す。入側の鋼板を矩形断面として、ワークロールクラウンを凸-フラット-凹として解析した。圧延荷重分布を図9に、入側張力分布を図10に示す。

フラットな剛体ロールで圧延した場合、幅端部近傍までは均一荷重で、板幅端部では圧延荷重が幅中央部に対して約1/2に低下している。これと同じ現象はフラットな金属ロールで入側が矩形な断面のプラステーションを圧延した場合の最大圧延圧力の幅方向分布にも現れている⁹⁾。このようにロールが剛体に近い条件ではロール偏平、ロールたわみが極めて小さく、圧延材の幅中央部も幅端部も一樣な変形となり、幅端部でも幅方向ひずみがほとんど生じない。(2)式に示すLevy-Misesの流動条件より、幅端部では $d\varepsilon_w$ がほぼ0で、境界条件から σ_w も0であるために、静水圧 σ_m もほぼ0となる。

$$\frac{d\varepsilon_l}{\sigma_l - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_h}{\sigma_h - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_w}{\sigma_w - \sigma_m} = d\lambda \quad (2)$$

ここで、 ε は塑性ひずみ、 σ_m は静水圧応力、応力、ひずみの添字 l は圧延の長手方向、 h は板厚方向、 w は板幅方向を示す。

幅端部では幅方向の拘束が低下するために本来幅広がりひずみを生じやすいが、フラットな剛体ロール条件では幅方向ひずみをほとんど生じさせることができないために、幅広がりを拘束するための板厚方向・圧延方向応力が発生する。(2)式で $d\varepsilon_w$ が幅方向の位置によらずにほぼ0であるために幅方向応力 σ_w は静水圧 σ_m とほぼ等しくなり、 σ_w の幅方向分布は σ_m の幅方向分布とほぼ等しくなる。同様に $d\varepsilon_l$ 、 $d\varepsilon_h$ も幅方向均一でほぼ変化しないために、 $\sigma_l - \sigma_m$ 、 $\sigma_h - \sigma_m$ も幅方向にほぼ変化せず、幅方向の応力変化は静水圧成分の変化によるものだけとなる。すなわち板厚方向、板幅方向の圧縮応力は静水圧成分の低下に伴って低下し、長手方向の引張張力応力は増加する。

ワークロール(WR)クラウンを変更した場合、荷重分布や張力分布は、WRクラウン0の荷重分布や張力分布を基準として、板プロフィール変化すなわち各幅位置の板クラウン比率が変化したのに対応して変化しているような計算結果となっている。

従来の分割モデルは、板厚ひずみの幅方向分布が生じた場合に、それに対応した張力が作用して圧延荷重が低下するという計算手法のため、WRクラウンが0でロール弾性変形を考慮しない場合のように幅方向の板厚歪分布差が0となるような対象を計算する場合には荷重分布が生じない

表2 解析条件
Analysis conditions

Mill dimensions	
Work roll diameter	200 mm
Barrel length	400 mm
Rolling conditions	
Entry thickness	3.0 mm
Exit thickness	2.1 mm
Width	250 mm
Entry strip profile	Rectangle
Work roll crown / dia.	50, 0, -50 μm
Flow stress	100 MPa
Friction coefficient	0.35

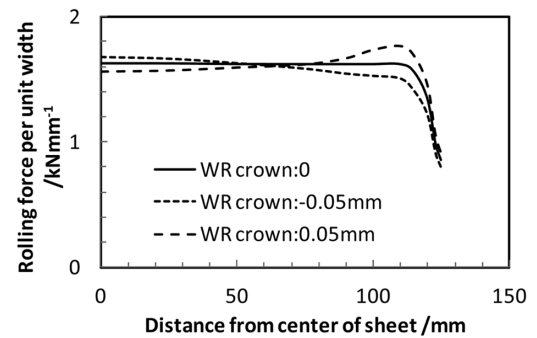


図9 圧延荷重の分布
Calculated distributions of rolling force

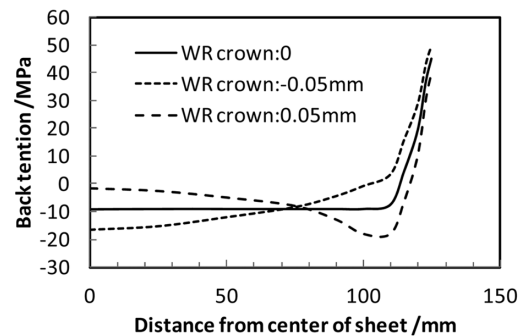


図10 後方張力の分布
Calculated distributions of back tension

ことになる。

そこで、板クラウン比率変化が0の場合に、図9のWRクラウンが0の場合のような荷重分布となり、板厚ひずみ分布が生じた場合に、長手方向ひずみ分布が発生し、そのひずみに対応した入出側張力が作用して、圧延荷重が変化するという張力フィードバック効果を計算する手法を組み合わせた新たな計算手法を考案した(図11)。

新たな計算手法では、図10、図11に示すように、入出側張力は、板厚ひずみの幅方向分布が0の場合にエッジ部分で張力が増加するという基準分布があり、これに対して張力フィードバック効果分の張力分布が付加されることにする。具体的な張力分布 σ_m の計算方法を以下に示す。

$$\sigma_m = \sigma_n + \sigma_{fb} \quad (3)$$

ここで、 σ_n : (1)式で求められる張力フィードバック効果に

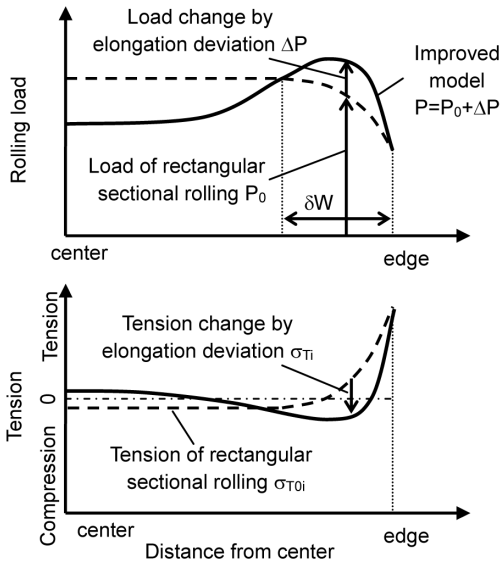


図 11 荷重・張力分布予測の新手法
New rolling load and tension distribution prediction model

基づく分布張力, σ_{T0i} : 板厚ひずみの幅方向分布が 0 の場合の入出側張力であり, σ_{Ti} は幅端部領域の圧延荷重減少分布が幅方向位置の 2 次関数で近似できるとし, さらに入側張力と出側張力が等しいと仮定すると下式で求められる。

$$\sigma_{T0i} = \left(1 - \frac{3W}{3W - \delta W} \cdot f(x) \right) p_m \quad (4)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & : x \leq 0.5W - \delta W \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x - (0.5W - \delta W)}{\delta W} \right)^2 & : 0.5W - \delta W \leq x \end{cases} \quad (5)$$

$$p_m = (1 - \delta W / 3W) p_c \quad (6)$$

ここで, W は板幅であり, x は幅方向位置を表し, 幅中央で 0, 幅端部で $W/2$ となる。 p_c は幅中央の平均圧延圧力を表し, 単位幅荷重を投影接触長で除したものである。また δW は幅端部の圧延荷重減少領域である。

上述の張力計算モデルでは, (1) 式中の形状変化係数 η と (4) から (6) 式中の圧延荷重減少領域 δW を与えなければ荷重分布が求められない。

η は板厚ひずみ偏差の変化とロールバイト入出口の張力に関係づけるパラメータである。図 10 の張力分布計算結果から幅端部から δW の範囲ではその影響が低下していると考えられるため (7) 式に示すように幅端部で減少するような分布を持ったものとした。この減少挙動は高橋ら¹⁰⁾が提案しているように最端部で 0 となる 2 次関数で表した。

$$\eta(x) = \begin{cases} \eta_c & : x \leq 0.5W - \delta W \\ \eta_c \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x - (0.5W - \delta W)}{\delta W} \right)^2 \right\} & : 0.5W - \delta W \leq x \end{cases} \quad (7)$$

ここで W は板幅であり, x は幅方向位置を表し, 幅中央で 0, 幅端部で $W/2$ となる。 η_c は, 形状変化係数の幅中央領域の値であり実験等により求める。

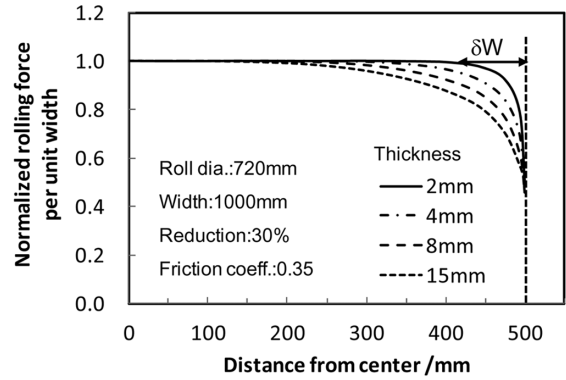


図 12 板厚の δW に対する影響
Influence of thickness to δW

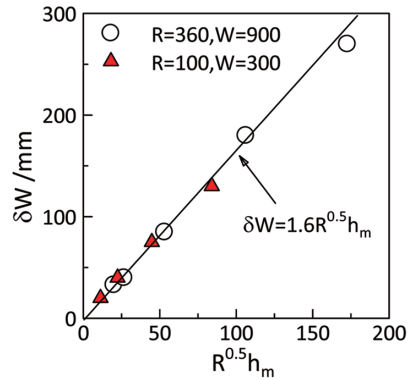


図 13 平均板厚とロール半径の δW に対する影響
Influence of thickness and roll radius to δW

δW は新たに 3 次元 FEM 解析を行って, その特性を検討した。実験室圧延機および実機圧延機を想定した条件にて, 板厚ひずみ偏差が生じないように, 入側を矩形断面の材料として, フラットな剛体ロール条件にて FEM 解析を行った。圧延材とワークロールの摩擦係数は 0.35 で計算した。図 12, 図 13 に示す計算結果から, 幅端部で荷重低下する領域長さ δW を (8) 式のように平均板厚, ロール半径 R にて定式化した。

$$\delta W = 1.6R^{0.5} h_m \quad (8)$$

ここで, 平均板厚 h_m は, 入側板厚 H_c と出側板厚 h_c を用いて以下のように定義する値である。

$$h_m = (H_c + 2h_c) / 3 \quad (9)$$

3.2 分割モデルのオンライン適用

オンラインの計算では, 計算時間の制約から, 精度を確保するための十分なくり返し計算をおこなうことができず, 一般的な解法の分割モデルを適用することが困難であった。これに対して, (10) 式のように圧延荷重の幅方向分布を, 入出側板厚分布, 前後方張力応力分布の偏微分係数を用いた 1 次式で近似することでくり返し計算を必要としない計算法を開発し^{10, 11)}, 分割モデルの短時間計算が可能となり, オンライン計算で用いることが可能となった。前節で説明した新しい張力分布計算手法を導入しても, ほとん

ど計算負荷を増やすことなく取り扱うことができる。

$$p_i - p_c = \frac{\partial p}{\partial h} (h_i - h_c) + \frac{\partial p}{\partial H} (H_i - H_c) + \frac{\partial p}{\partial \sigma_f} (\sigma_{fi} - \sigma_{fc}) + \frac{\partial p}{\partial \sigma_b} (\sigma_{bi} - \sigma_{bc}) \quad (10)$$

ここで、 p : 単位幅荷重, h : 出側厚, H : 入側厚, σ_f : 前方張力応力, σ_b : 後方張力応力, i は i 番目の分割区間, 添字 c は板幅中央部の値を表す。荷重の板厚, 張力による偏微分係数は, 例えば SIMS の荷重計算式に張力の補正を加えたものを用いることで容易に導くことができる。

上記のように圧延荷重分布計算方法を改良した分割モデルによる板プロフィール・板クラウン予測精度の向上効果を実機データで確認した。図 14 は新日鐵住金(株)鹿島製鉄所の熱延工場にて圧延されたハイテン薄物材について、エッジドロップを含む板プロフィール予測精度が向上したことを示す。

同工場にて板クラウンの予測精度改善を確認した結果を図 15 に示す。特に圧延荷重が高くなりがちな薄物材などで予測精度改善効果が大きい。エッジドロップの予測精度を評価すると板厚が薄いほど改善効果が大きいことも判る(図 16)。以上のような改善により得られた高精度なオンライン板プロフィール予測モデルを、仕上圧延機のセットアップモデル¹²⁾として開発してきた HORP (Hot strip mill Online Rolling Process) モデルに組み込み、大きな圧延荷重差があるハイテンと軟鋼の交互圧延でも、仕上ミル通板形状を悪化させることなく目標の仕上板プロフィールに圧延するための設定計算に用いることができた。

またこのモデルはスタンド間蛇行計を用いた蛇行制御¹³⁾においても大きな役割を果たす。蛇行している圧延材は回転しながら並進しているため、蛇行計の設置位置で測定した蛇行量(観測量)と、その下流にある圧延機位置の蛇行量(被制御量)は一致しない。これを補償するため、測定された蛇行量から、状態方程式モデルに基づいて圧延機位置の蛇行量を予測し、レベリング操作量を最適化する。この方法が効果を発揮するためには、レベリング量から角速度分布係数(圧延材の回転角速度を並進速度で除した値)への影響係数 K_{η_s} と、圧延機位置蛇行量から角速度分布係

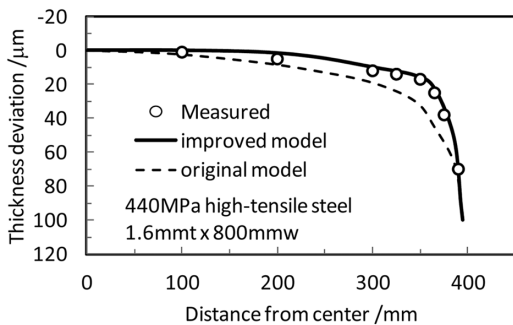
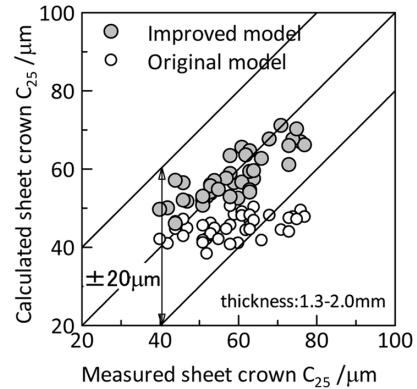


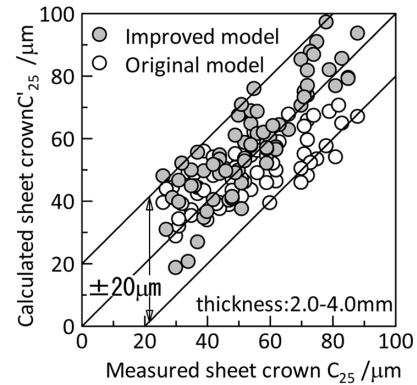
図 14 板プロフィール予測精度の改善
Improvement of strip profile prediction accuracy

数への影響係数 K_{η_y} を高い精度で予測する必要がある。

蛇行が問題となる圧延材の尾端抜け時の圧延機入側の圧延材の回転角速度は入側速度分布と対応する。当該圧延機の出側はまだタンデム圧延状態であるため圧延機出側の速度分布はない。よって、入側速度分布は入出側の板厚比率変化と対応する。したがって、板プロフィールの予測精度が向上すれば、蛇行の回転角速度に関する影響係数である K_{η_s} , K_{η_y} の精度が向上する。蛇行制御の影響係数の精度向上により、制御ゲインの設定精度が向上することで、蛇行制御の制御精度向上につながっている。



(a) Thin gage



(b) Middle gage

図 15 板クラウン予測精度の改善
Improvement of strip crown prediction accuracy

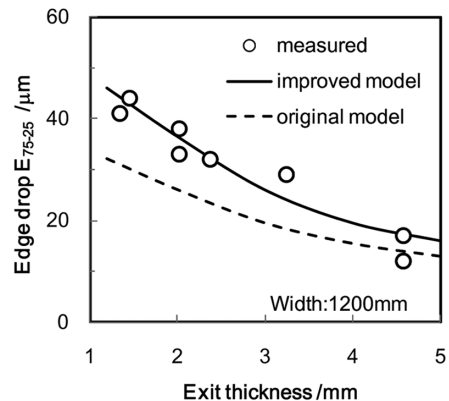


図 16 エッジドロップ予測精度の改善
Improvement of edge drop prediction accuracy

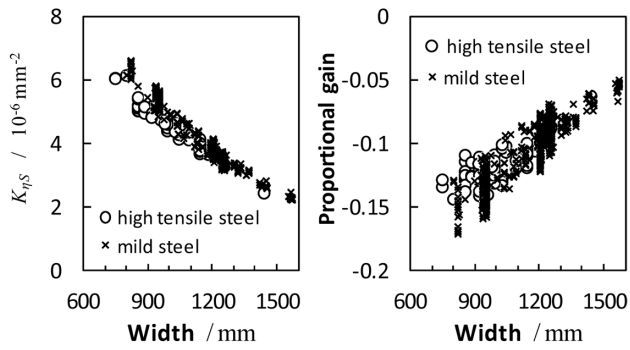


図17 影響係数および制御ゲインのオンラインモデル計算例
Influence coefficient and control gain calculated by online HORP model

HORP モデルの改善により、ハイテンのような高荷重材の板プロフィール予測精度が、軟鋼のような低荷重材の板プロフィール予測精度と同等レベルまで改善されたため、ハイテンの蛇行制御も実用的なものとなった。加えてハイテンは圧延荷重だけでなく、板幅、変形抵抗、圧延速度などの圧延条件も軟鋼とは大きく変化する。非対称圧延のHORPモデルを用いて、圧延材毎に種々の圧延条件に応じて、オンラインで計算することにより、蛇行制御高精度を実現できる。

図17は、板厚1.5～1.7mm材に対する K_{η_y} と、 K_{η_s} 、 K_{η_y} から導出されるレベリング操作の比例ゲインを、ハイテンと軟鋼と比較した結果である。両者とも板幅の影響が大きいが、ハイテンは軟鋼に比べて K_{η_s} も制御ゲインも小さくなっていることが判る。このように、板幅、材質、圧延速度など、蛇行制御の影響因子はすべてHORPモデルの入力値として反映され、その計算結果にもとづいて制御ゲインなどのリアルタイム制御のパラメータが自動的に設定されるために、高応答な蛇行制御が可能となる。

3.3 混合圧延に対応した板クラウン制御能力

軟鋼と同じ圧延機設定にて、圧延荷重が高いハイテンを圧延した場合、ロールのたわみや偏平変形も大きくなるために仕上板クラウンが大きくなってしまい、板厚精度が悪くなる。同一圧延ロールで、軟鋼やハイテンの仕上板クラウンを低減しながら、交互に圧延するような混合圧延を行うためには、仕上ミルの板クラウン制御能力が必要とされる。

表3、表4に示した異鋼種圧延製造条件を対象に、混合圧延に必要な仕上ミル板クラウン制御能力を計算した例を示す¹⁴⁾。

各スタンド許容板クラウン範囲の算出結果を図18に示す。本計算は、各スタンド出側許容急峻度 $\pm 2\%$ の条件で、仕上板クラウンを $30\mu\text{m}$ に圧延するために必要な板クラウン範囲と、粗バークラウン $200\mu\text{m}$ から変更可能な板クラウン範囲をそれぞれ算出し、両範囲の共通部分を許容板クラウン範囲としている。この許容板クラウン範囲内の一つの

表3 ミル寸法
Mill dimensions

Work roll diameter	740 mm
Back up roll diameter	1 540 mm
Barrel length	1 780 mm
Span of loading points	2 820 mm

表4 解析条件
Analysis conditions

Material	Mild steel (C = 0.05 mass%)	High tensile strength steel (HT590 MPa)
Width /mm	950	1 200
Exit thickness / mm	R	36
	F1	23.15
	F2	15.48
	F3	10.9
	F4	7.69
	F5	5.98
	F6	4.62
F7	3.86	2.83

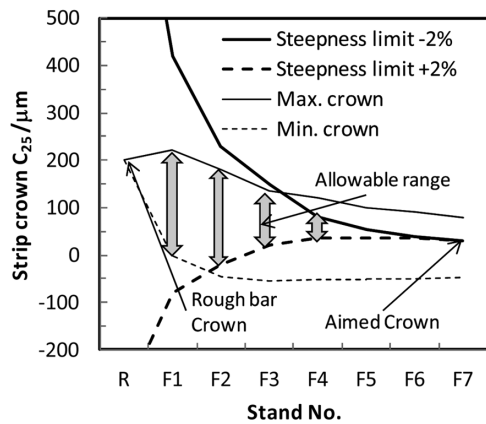


図18 ハイテンの板クラウン許容範囲計算例
Allowable range of strip crown (HT590 MPa)

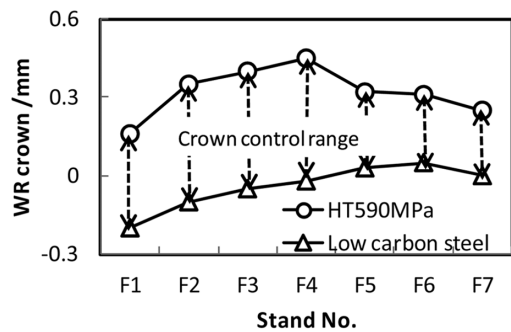


図19 必要クラウン制御能力の計算例
Required capacity of crown control

板クラウン経路と荷重条件から上述の分割モデルで算出した各スタンドに必要な2次曲線ワークロールクラウンを図19に示す。本図から判るように、ハイテンと軟鋼のスケジュールフリー化には、荷重変化の大きい仕上前段スタンドに強力な板クラウン制御能力が必要となる。

またクラウン経路は、仕上出側板クラウン、仕上出側板形状、スタンド間の板形状などを勘案して設定するが、ハイテン、軟鋼の混合圧延では板クラウン制御能力が不足しやすくなり制約条件を緩和する必要が生じる。制約条件を必要以上に緩和することなく最適なクラウン経路を得るために、クラウン経路を2次計画問題に定式化して決定する¹⁾。

4. 実機適用結果

ハイテン、軟鋼の混合圧延の事例を図20に示す。上のグラフより、板幅や板厚や鋼種が混合され、1本の圧延毎に条件が大きく変化していることが判る。中央のグラフにはハイテンと軟鋼の圧延荷重差が大きいF3スタンドのクラウン制御の状況を等価2次ワークロールクラウンで示す。図19にて示したのと同様なクラウン制御範囲にて制御を行っていることが判る。下のグラフには、板端25mm位置の仕上出側板クラウン C_{25} の目標値と実績値の偏差を示す。おおよそ $\pm 20\mu\text{m}$ の精度で制御できていることが判る。こ

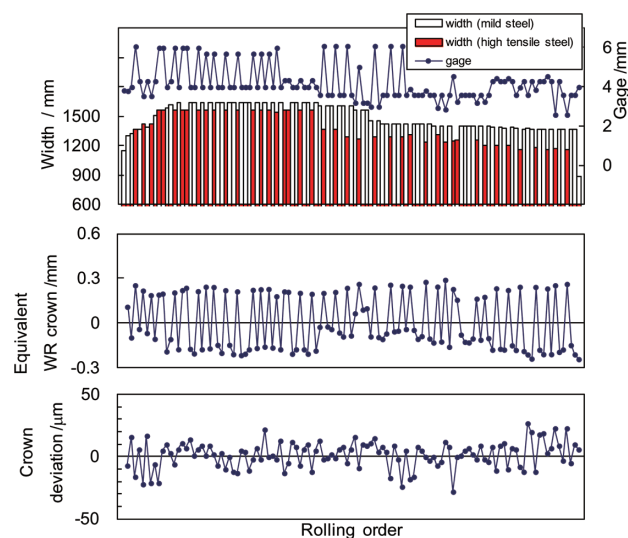


図20 ハイテンと軟鋼の混合圧延の実施例
Example of mixed scheduled rolling of high tensile strength and mild steel

れは軟鋼単独の圧延を行っている場合の精度¹⁰⁾と同等である。

5. 結 言

熱延仕上圧延を対象に、高い圧延荷重となるハイテンの板プロフィールを高精度に予測可能なモデルを開発し、オンライン制御に適用した。そのモデルを用いて、高荷重のハイテンと低荷重の軟鋼を同じワークロールを用いて圧延する混合圧延に必要なクラウン制御能力を検討し、荷重変動が大きくなる仕上前段スタンドで大きな制御能力が必要となることを明らかにした。

それらの技術、知見を活用して、ハイテンと軟鋼の混合圧延が実現した。混合圧延においても、軟鋼単独圧延と同等の精度での板クラウン制御が可能となり、平坦不良等による能率低下も発生していない。高精度板プロフィール予測モデルはスタンド間蛇行計を用いた蛇行制御にも活用され、蛇行による通板トラブル回避の面からも、高能率圧延が可能となった。これらの技術はオペレーターの手介率の低減など、熱延仕上圧延自動化にも寄与している。

参考文献

- 1) 福島傑浩 ほか：鉄と鋼. 100 (12), 1499 (2014)
- 2) 佐々木保 ほか：塑性と加工. 54-635 (12), 1038 (2013)
- 3) Shohet, K.N. et al.: J.Iron Steel Inst. 1088 (1968)
- 4) 河野輝雄 ほか：鉄と鋼. 67 (15), 286 (1981)
- 5) 佐々木保 ほか：鉄と鋼. 79 (3), 360 (1993)
- 6) 中島浩衛 ほか：塑性と加工. 23-263 (12), 1172 (1982)
- 7) 柳本潤 ほか：塑性と加工. 33-383 (12), 1406 (1992)
- 8) 柳本潤 ほか：塑性と加工. 32-367 (8), 1007 (1991)
- 9) 鈴木弘：圧延百話. 東京, 養賢堂, 2000, p. 62
- 10) 高橋亮一 ほか：鉄と鋼. 74 (7), 206 (1988)
- 11) 高橋亮一 ほか：鉄と鋼. 69, 39 (1983)
- 12) 美坂佳助 ほか：鉄と鋼. 67 (15), 2316 (1981)
- 13) 鷺北芳郎 ほか：鉄と鋼. 95 (1), 43 (2009)
- 14) 佐々木保 ほか：CAMP-ISIJ. 8, 452 (1995)



福島傑浩 Suguhiko FUKUSHIMA
プロセス研究所 一貫プロセス研究部
主幹研究員
茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014



武衛康彦 Yasuhiko BUEI
鹿島製鉄所 薄板部 薄板企画室 主幹



鷺北芳郎 Yoshiro WASHIKITA
プロセス研究所 制御研究部
首席主幹研究員



焼田幸彦 Yukihiro YAKITA
鹿島製鉄所 薄板部 精製検査室 室長



佐々木保 Tamotsu SASAKI
日鉄住金テクノロジー(株)
鹿島事業所 参与



柳本 潤 Jun YANAGIMOTO
東京大学 生産技術研究所 教授
工学博士



中川繁政 Shigemasa NAKAGAWA
大分製鉄所 設備部 制御技術室長
博士(工学)