

熱間板圧延における形状制御技術の開発

— 板クラウン・平坦度制御システム PFSU の開発 —

Profile and Flatness Set Up System for Rolling Mill

佐藤 全佳 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理
口 誠 寛 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理

鋼板形状制御の高精度化を目的として、形状制御システム PFSU (Profile and Flatness Set Up System) を開発した。本システムは、当社で開発の CNP (Combined Numerical Profile) Mill と組合せることで、実操業において高い形状制御能力と制御精度を実証し、飛躍的な鋼板品質の向上を果たすとともに、客先から高い評価を得ている。本稿では、熱間帯鋼仕上圧延機および可逆式仕上圧延機における最新の鋼板形状制御システム PFSU の概要を紹介する。

IHI has developed the Profile and Flatness Set Up System, PFSU, in order to improve the crown and flatness control in a hot rolling mill. This system allows high controllability and accuracy with the CNP (Combined Numerical Profile) Mill developed by IHI in hot rolling operation, and quality of the shape is also improved remarkably. These improvements satisfied the customer's requirement. The latest IHI's technique for crown and flatness control in hot strip mill and reversing finishing mill is described.

1. 緒 言

熱間板圧延における寸法精度の厳格化は、1960 年代の板厚精度の改善に始まり、板幅精度、幅方向の板厚分布（板クラウン）の改善へと推移してきた。近年、熱間圧延工程において、多品種・少量生産が主流となり、より付加価値の高い極薄鋼板や高張力鋼板などの難加工材の圧延が盛んに試みられるようになった。これに伴い、難加工材圧延時の板形状（板クラウン・平坦度）の確保、さらなる改善が求められている。

従来の形状制御技術は、自由に板クラウン・平坦度を造り込むことのできる高い制御能力をもった「形状制御ミル」の開発に注力されてきた。加えて、最近の計算機制御の飛躍的な進歩は、鋼板全長にわたる板クラウン・平坦度の高精度な予測と、形状制御アクチュエータの最適制御を可能にした。

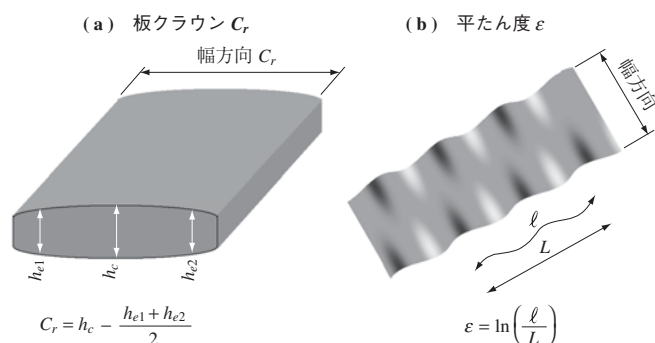
これらの背景から、当社は鋼板形状セットアップ制御の高精度化を目的として、形状制御システム PFSU (Profile and Flatness Set Up System) を開発し、当社で開発の CNP (Combined Numerical Profile) Mill と組合せることで、実操業において高い形状制御能力と制御精度を実証し、鋼板品質の向上を果たした。

本稿では、熱間帯鋼仕上圧延機および可逆式仕上圧延機における鋼板形状制御システム PFSU を紹介する。

2. 形状制御の基本的な考え方

鋼板形状を評価する指標として、第 1 図に示す板クラウンと平坦度が一般的に用いられる⁽¹⁾。板クラウン（第 1 図 - (a)）は板幅方向の板厚のばらつきを表し、板幅中央部の板厚と板端所定位置（25 ~ 100 mm）の板厚の差で定義される。

一方、平坦度（第 1 図 - (b)）は板幅方向の長手方向伸び差で定義され、板端部が幅中央部に比べて伸びた状態で現れる「耳伸び/端伸び」と、板幅中央部が端部に



第 1 図 板クラウンと平坦度の定義
Fig. 1 Definition of strip crown and flatness

比べて伸びた状態で現れる「中伸び／腹伸び」に大別される。

平坦度の変化は、主に板クラウン比率（板クラウンを中央部の板厚で割ったもの）の変化に起因する。板クラウンを変化させる要因は鋼種、板寸法、圧延荷重などの圧延条件と、ロール材質、イニシャルクラウン、サーマル・摩耗クラウンなどの操業条件に分けられる。これらの要因は多種にわたるうえ、各々が複雑に絡み合い、板クラウン・平坦度は圧延中時々刻々変化する。

この変化に対して、圧延機は目標形状に造り込む手段として、作業ロールベンディング装置⁽²⁾を装備しているが、当社はより形状制御能力の高い CNP Mill を開発、実機化した。

CNP Mill は、特殊なロールプロファイルを付与した作業ロールをロールバレル方向にシフトさせることによって、板クラウン・平坦度を制御する圧延機である。詳細は本 IHI 技報掲載論文「板圧延における IHI 形状制御装置」を参照されたい。

PFSU はこれらの諸条件を考慮して、板クラウン、平坦度を予測するとともに、板クラウン変化による平坦度の変化を許容範囲内に抑えながら、目標クラウン・平坦度を造り込むための CNP ロールシフト位置、作業ロールベンディング力などのアクチュエータ制御量を決定する。

3. 鋼板形状制御 PFSU の基本構成

PFSU は以下に挙げる三つの機能によって構成される。

- ① 板クラウン・平坦度予測機能および CNP ロールシフト位置設定・作業ロールベンディング力設定機能
- ② 板クラウン・平坦度学習機能
- ③ ロールのサーマルクラウン・摩耗予測機能

3.1 設定モデル

3.1.1 熱間帯鋼仕上圧延設定モデル

第 2 図に熱間帯鋼仕上圧延機 PFSU 計算フローを示す。粗圧延機で圧延された粗バーが仕上圧延機入側に達した時、仕上圧延機の最終セットアップが開始される。このタイミングで PFSU は目標クラウン・平坦度を造り込むための CNP ロールシフト位置と作業ロールベンディング力設定値を最終決定する。

設定計算開始時、板クラウン・平坦度目標値が上位コンピュータから送られてくるとともに、仕上圧延機各スタンド出側板厚、圧延荷重予測値などの圧延条件と、作業

ロール／控ロール径などの操業条件が入力データとして与えられる。設定計算はこれらのデータを使って、各スタンド出側の板クラウン・平坦度を予想するとともに、各スタンド出側の許容平坦度を考慮して、目標クラウン・平坦度を造り込む CNP ロールシフト位置と作業ロールベンディング力設定値を決定する。

3.1.2 熱間可逆式仕上圧延設定モデル

第 3 図に可逆式仕上圧延機 PFSU 設定計算フローを示す。基本的な計算のフローは 3.1.1 項の熱間帯鋼仕上圧延機と同じであるが、可逆式圧延機では多パス圧延となることから、各パス圧延開始前に設定計算を行う。その際、すでに圧延の終わったパスについては、実績値を使って板クラウン・平坦度を計算し、該当パス以降の CNP ロールシフト位置と作業ロールベンディング力設定値を修正する。

3.2 学習モデル

PFSU 設定モデルは圧延条件・操業条件を入力データとして、圧延理論に基づき、板クラウン・平坦度を予測する。しかし、理論式自体が少なからず誤差をもつことに加えて、ほかのモデルが計算した予測値を入力データとして使うこと、また、入力データが実測値であっても測定誤差を含むことなどによって、PFSU の板クラウン・平坦度予測値は少なからず誤差を含む。

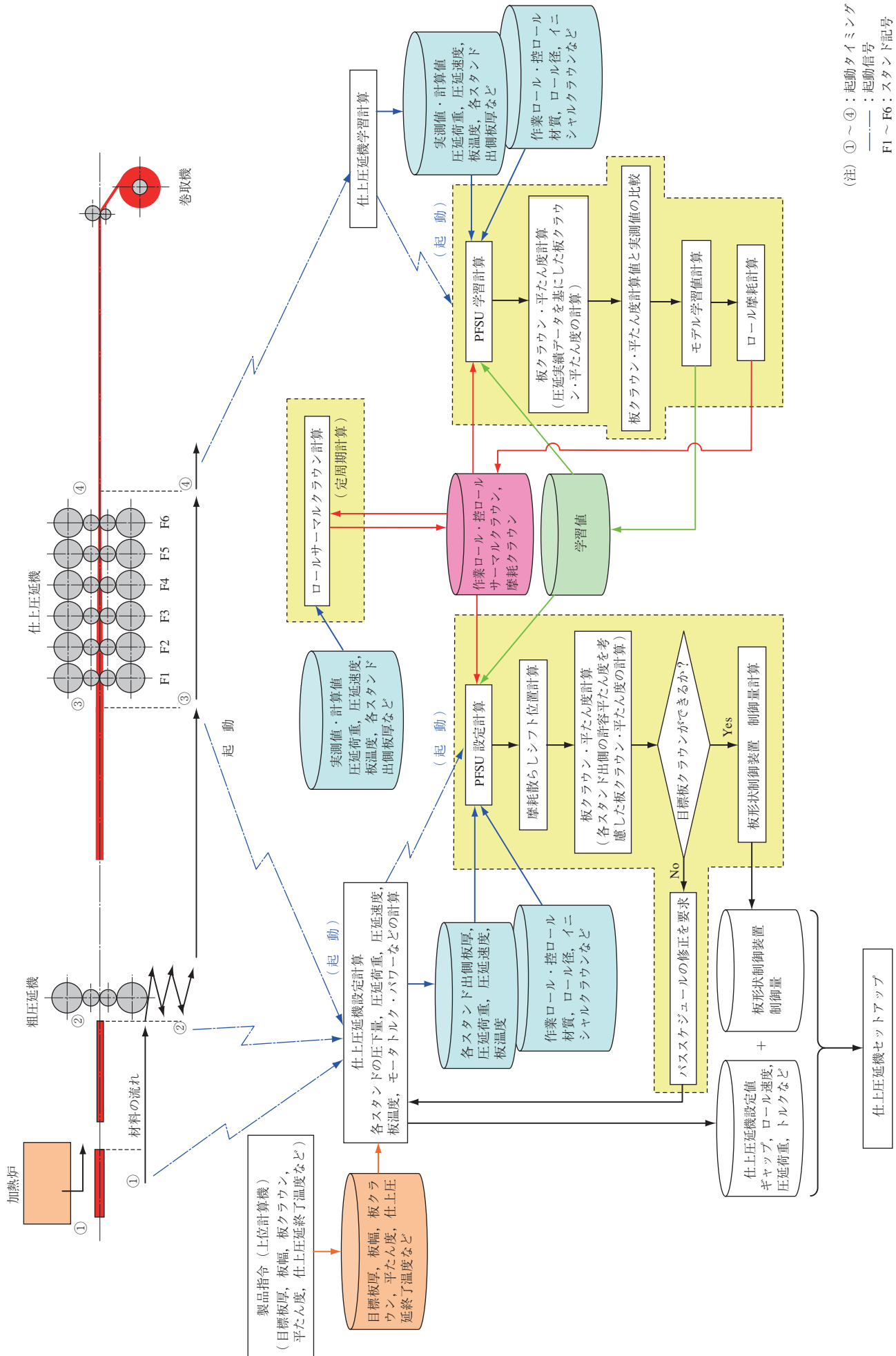
そこで、PFSU はモデル予測値と実測値を比較し、必要に応じて誤差を自動修正する学習機能を備える。PFSU 学習モデルは最終スタンド／最終パスの圧延が始まり、板クラウン・平坦度の実績値が収集された時点で計算を開始する。圧延実績値を使い、板クラウン・平坦度を再計算するとともに、実測値と比較して、両者が一致するようにモデル影響係数を逐次修正する。

3.3 サーマルクラウン・摩耗クラウン予測モデル

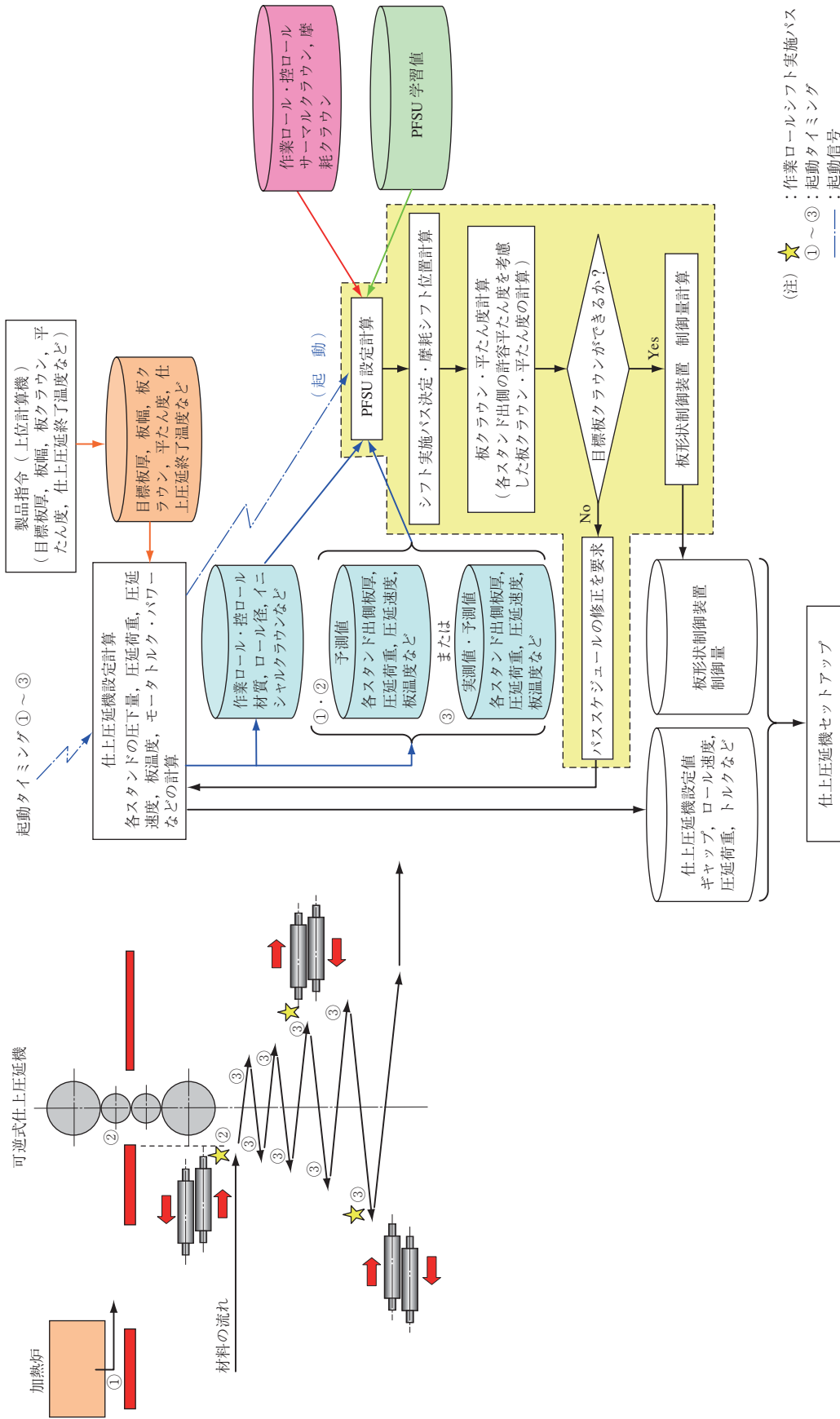
実圧延では、圧延材からの熱の移動によってロールが熱膨張し、サーマルクラウンが形成される。サーマルクラウンは圧延が進むにつれて成長し、板クラウンを凸から凹方向に変化させるように作用する。

一方、ロール摩耗は圧延長さの影響を強く受け、圧延長さの増加に従って、板クラウンを凸方向に変化させる。板クラウン・平坦度を精度良く予測するためには、高精度なロールサーマルクラウンおよびロール摩耗予測が不可欠である。

両モデルは幅方向左右非対称－上下対称の 1/2 モデルを用い、実績データを使ってロール内部の温度分布と摩耗分布を計算する。ロール内部の温度分布は差分法を基礎とした数値



第2図 熱間帯鋼仕上圧延機 PFSU 計算フロー
Fig. 2 PFSU calculation flow for hot strip mill

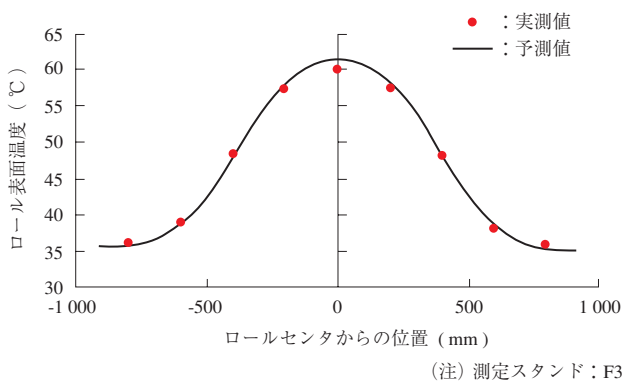


第 3 図 可逆式仕上圧延機 PFSU 設定計算フロー
Fig. 3 PFSU set up calculation flow for reversing finishing mill

計算を行う。ロールへの入熱条件が時々刻々変化することから、圧延時の内部温度の急激な変化に追従し、かつ、精度良く予想する目的で、短周期の計算を実施している。

ロール幅方向の摩耗分布は、圧延スケジュールに応じて、各スタンド／各パスのロール幅方向圧延圧力分布と圧延長さを基に、圧延終了後に計算される。

第4図にサーマルクラウンモデルによる作業ロール表面温度分布計算結果⁽¹⁾を、第5図にロール摩耗モデルによる作業ロール摩耗プロファイル計算結果⁽¹⁾を示す。実測値は通常の操業サイクル終了後、ロールを抜取り、測定したものであるが、両モデルともに実測値と極めて良く一致している。

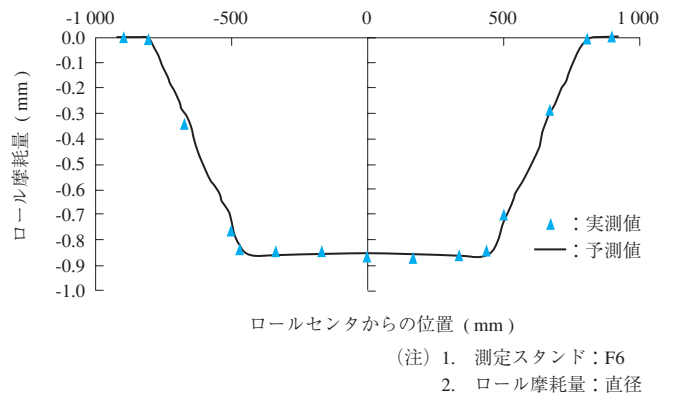


第4図 サーマルクラウンモデルによる作業ロール表面温度分布計算結果
Fig. 4 Temperature distribution predicted by PFSU thermal crown model

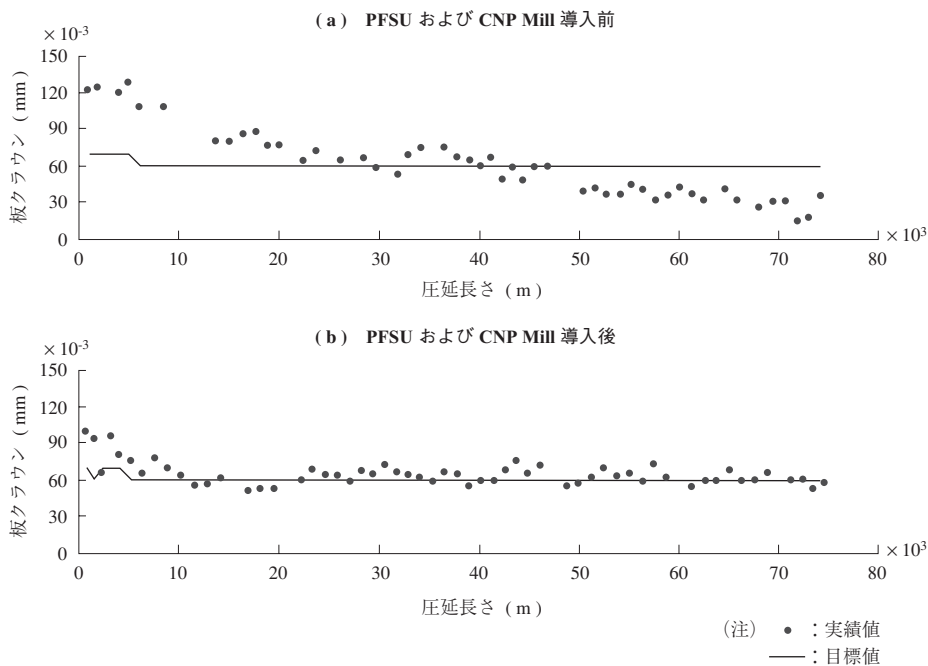
サーマルクラウンモデル、摩耗モデルで計算された結果は、PFSU内の共有テーブルに随時保存される。設定モデルおよび学習モデルはこのデータテーブルを参照し、最新のサーマルクラウン、摩耗クラウンを使って板クラウン・平坦度を計算する。

4. 実機稼働状況

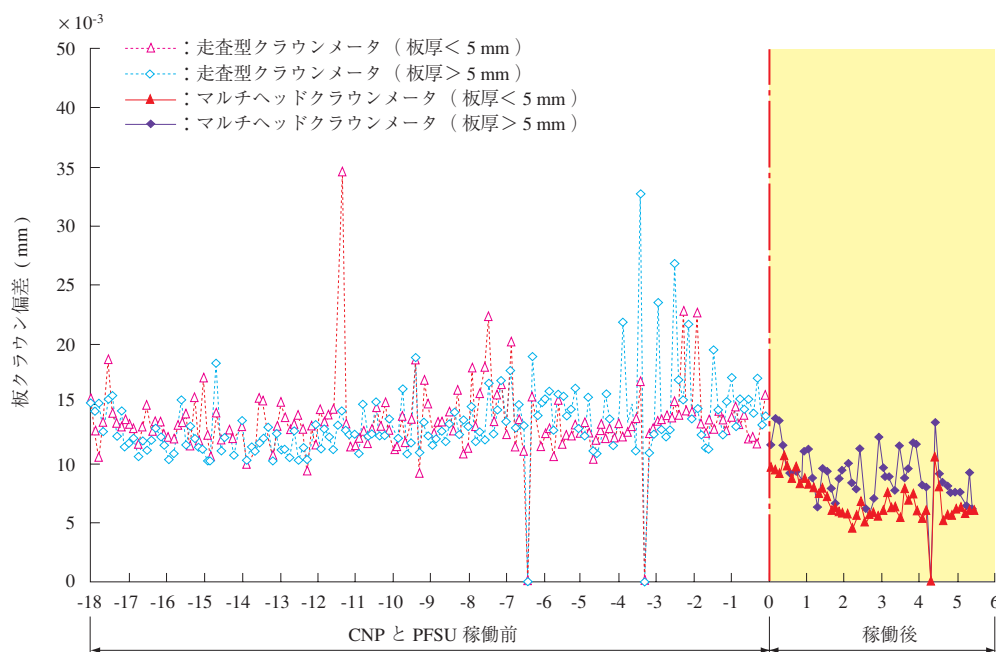
第6図に熱間帯鋼圧延1操業サイクルにおける板クラウンの推移を示す。PFSUとCNP Millの導入前(第6図-(a))は圧延本数が増えるに従い、材料からの入熱で作業ロールのサーマルクラウンが成長し、板クラウンは小さくなり(凸→凹方向に変化)、目標クラウンに造り込



第5図 ロール摩耗モデルによる作業ロール摩耗プロファイル計算結果
Fig. 5 Wear profile of work roll predicted by PFSU wear crown model



第6図 実操業における板クラウンの推移
Fig. 6 Strip crown changes in actual rolling



(注) 1. 縦軸は (実績板クラウン-目標板クラウン) の標準偏差を示す。
2. 横軸は稼働期間 (月) を示す。

第 7 図 実操業における板クラウン制御精度の推移
Fig. 7 Performance of strip crown control

むことが困難となった。

これに対して、PFSU と CNP Mill の導入後 (第 6 図 - (b)) は、操業サイクル全体にわたって、目標クラウンと実績の差 (クラウン偏差) が小さくなっており、サーマルクラウン、ロール摩耗などの圧延・操業条件の変化に影響されず、正確に板クラウンを予測し、制御することが可能となった。

加えて、操業サイクル開始直後のクラウン偏差は、PFSU と CNP Mill の導入前に比べて大きく改善しており、CNP Mill の高い形状制御能力も併せて証明された。

第 7 図に熱間帯鋼圧延実操業における板クラウン制御精度の推移を示す⁽¹⁾。PFSU + CNP Mill 稼働後、板クラウン実測値-目標値の標準偏差は稼働前に比べ 1/2 程度までに改善した。

5. 結 言

熱間板圧延設備における板形状制御技術の高精度化を目的として開発した PFSU は、CNP Mill と組合せることに

よって、実機操業においてその高い形状制御能力と制御精度を実証し、鋼板品質の飛躍的な向上を果たした結果、客先から大きな評価と信頼を得ることができた。

今後、さらなる鋼板品質の向上に貢献できるよう新技術の開発に努力して行く所存である。

— 謝 辞 —

本技術の実機化に当たり、多くのご指導とご協力をいただいた東芝三菱電機産業システム株式会社をはじめ、関係各位に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 佐藤全佳, 口 誠寛, 本城 恒, 阿部勇次: 熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術 石川島播磨技報 第 44 巻第 5 号 2004 年 9 月 pp. 352 - 357
- (2) 鈴木 弘: 圧延百話 圧延の疑問と基本常識 第 18 話 養賢堂 2000 年 3 月 p. 102