

熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術

Strip Crown and Flatness Control for Hot Strip Mill

佐藤 全佳 機械事業本部産業システム事業部圧延機プロジェクト部 課長
口 誠 寛 機械事業本部産業システム事業部圧延機プロジェクト部
本 城 恒 元機械事業本部産業システム事業部 技師長
阿 部 勇 次 機械事業本部産業システム事業部圧延機プロジェクト部 課長

熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御能力のさらなる向上と高精度化を目的として、CNP (Combined Numerical Profile) Mill を制御端とする鋼板形状制御システム PFSU (Profile and Flatness Set Up System) を開発した。本システムは実操業において、その高い形状制御能力と制御精度を実証し、客先から大きな評価と信頼を得ている。本稿では、熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術の概要を述べる。

IHI has developed the Strip Crown and Flatness Control System consisting of a Combined Numerical Profile (CNP) Mill and the Profile and Flatness Set Up System (PFSU) to improve the strip crown and flatness in the Hot Strip Mill (HSM). This system has high controllability and accuracy in hot rolling operations and the quality of the strip shape of hot coils has been also improved remarkably. These performances were sufficient for satisfaction of the customer's requirements. The latest IHI technique of strip crown and flatness control, using the CNP Mill and PFSU, in HSM is described.

1. 緒 言

熱間帯鋼の寸法精度厳格化は 1960 代から始まった長手方向の板厚精度の改善に加え、幅方向の板厚偏差（板クラウン）に目が向けられるようになった。最近、熱間仕上圧延工程における多品種、少量生産化に伴い、より付加価値の高い極薄鋼板や高張力鋼板に代表される高強度材の圧延が積極的に試みられるようになってきている。これに伴い、製品寸法となる板クラウン・平たん度の改善はもとより、仕上ミルスタンド間の安定通板と下流工程での加工性の確保を目的として、さらなる板形状の改善が求められている。

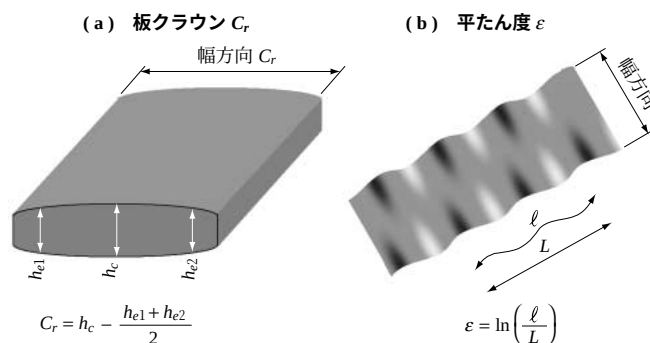
これらの背景から、鋼板形状制御能力の向上と高精度化を同時に満たす技術の開発を目的として、CNP (Combined Numerical Profile) Mill とこれを制御端とする鋼板形状制御システムPFSU (Profile and Flatness Set Up System) を開発し、客先に納入してきた。本技術は立上げ直後から順調に稼働するとともに、実機操業においてその高い形状制御能力と制御精度を実証し、鋼板品質の飛躍的な向上を果たした。

本稿では、熱間帯鋼仕上圧延設備における最新の鋼板形状制御技術を紹介する。

2. 鋼板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たん度の定義が用いられる。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、板幅中央板厚と板端から 25 ～ 40 mm 位置の板厚差で定義される。一般に、板幅中央部の板厚が板端部より厚い場合を凸クラウン、板幅中央部板厚が板端より薄い場合を凹クラウンと呼ばれる。

一方、平たん度（第1図 - (b)）は板幅方向の長手方向の伸び差で定義する。第1図に示す板端部が板幅中央部に比べて伸びている耳伸びと、板幅中央が板端部に比べて伸



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

びている中伸びに大別されるが、特に広幅材では板幅 1/4 部分の伸びの程度も評価指標として使われる。

第 2 図に鋼板形状に影響を及ぼす要因を示す。平坦度変化は主にクラウン比率の変化に起因する。板クラウンを変化させる要因は、圧延条件と操業条件に分けられるが、各々の要因が複雑に絡み合い変化する。このため、板クラウン・平坦度は圧延中時々刻々と変化していく。

従来の形状制御では、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。しかし、最近の計算機の飛躍的な進歩は、コイル全長にわたって板クラウン・平坦度を高精度に制御する総合的な形状制御技術の開発を可能とした。

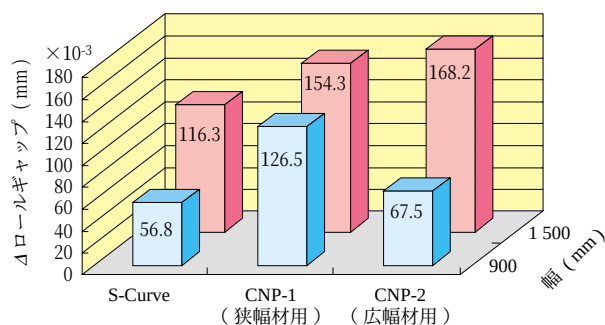
当社は**第 3 図**に示す取組みに沿って、総合的な鋼板形状制御システムを開発した。

3. 鋼板形状制御システム概要

3.1 形状制御ミル

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。ワークロールに付与する特殊なプロファイルは、各 HSM ごとの①生産品種（鋼種・寸法）②Product Mix（生産構成）③目標形状範囲を考慮して数値的に決まる。

第 4 図に CNP Mill の板クラウン制御能力を示す。図は板幅 900 mm 位置（狭幅材相当）と、板幅 1 500 mm



第 4 図 CNP Mill の板クラウン制御能力
Fig. 4 Strip crown controllability of CNP Mill

位置（広幅材相当）におけるロールギャップ変更量を示す。ロールギャップ変更量は、単純凹凸型ロールプロファイル（S カーブ）を使った形状制御ミルと比較して、1 000 mm 以下の狭幅材を生産の主体とした CNP Mill で 120%（狭幅材）～30%（広幅材）、1 250 mm 以上の中・広幅材を生産の主体とした場合で 20%（狭幅材）～50%（広幅材）向上する。

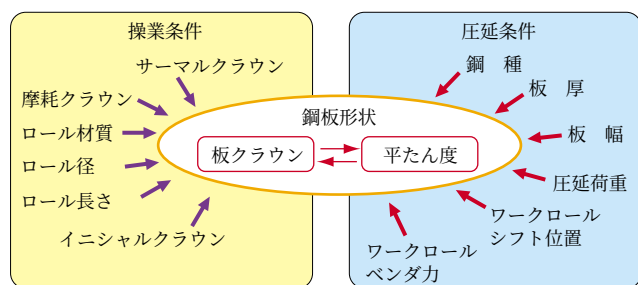
実機圧延テストで得られた鋼板の幅方向板厚分布を**第 5 図**に示す。ロールギャップ変更量と同様に、実板クラウンでも高い板クラウン変更能力が確認された。

3.2 形状制御ミルの最適スタンド配置

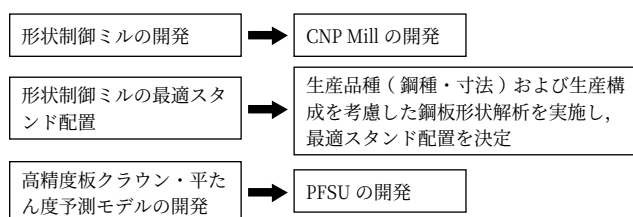
形状制御ミルの能力を効率良く発揮させるために、仕上圧延機における形状制御アクチュエータの最適配置を検討した。形状制御ミルは板クラウンが変化しても平坦度が乱れない、いわゆる形状不感帯の大きい上流スタンドに配置することを基本とし、Product Mix、操業条件を考慮した板クラウン・平坦度シミュレーションを実施した結果（**第 6 図**）を基に最適な位置に配置した。

第 7 図に実機操業状態における板クラウンの推移を示す。**第 7 図 - (a)** は形状制御アクチュエータを使用しない場合の板クラウン推移を示し、**第 7 図 - (b)** は形状制御アクチュエータを使用した場合の板クラウン推移を示す。圧延本数が進むにつれ、材料からの入熱でワークロールのサーマルクラウンが成長し、板クラウンは凹方向に変化する（**第 7 図 - (a)**）。このため、従来までは板クラウン・平坦度の安定した造り込みが困難であった。

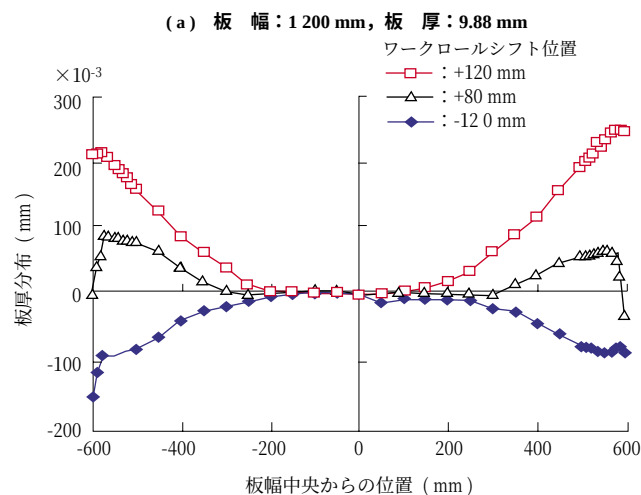
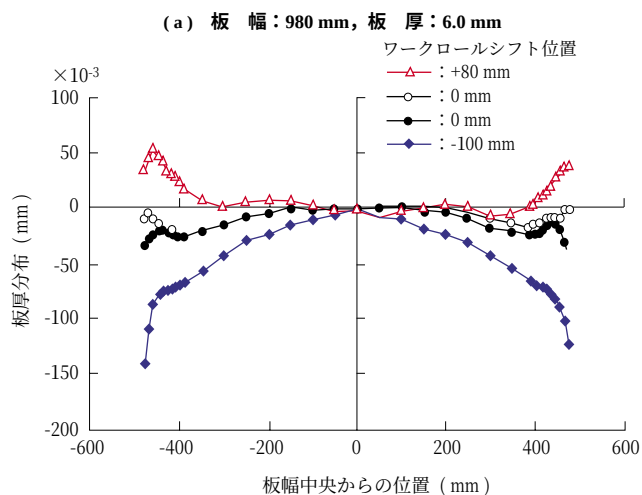
これに対し、**第 7 図 - (b)** のように形状制御アクチュエータを最適に配置することで、サーマルクラウン、ロール摩耗などの操業条件に影響されず、安定した目標板クラウンの造り込みが可能となった。



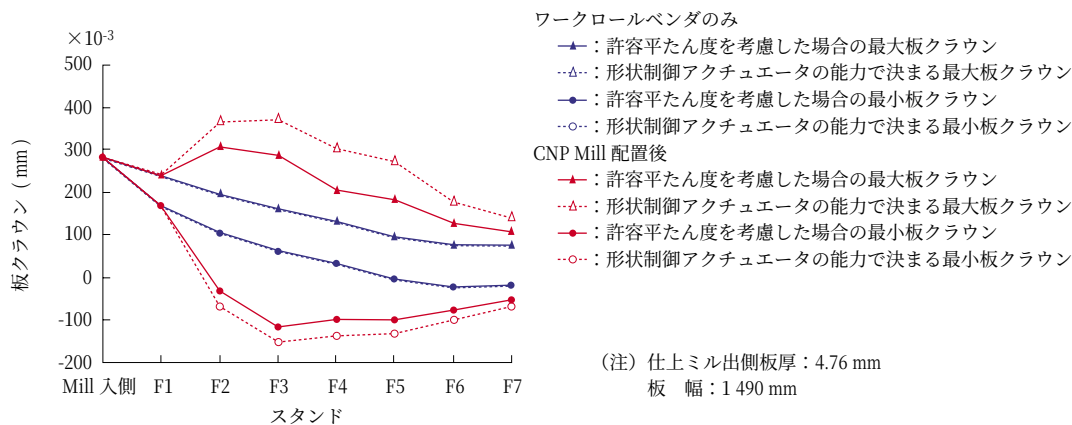
第 2 図 鋼板形状に影響を及ぼす要因
Fig. 2 Influential factors affecting strip crown and flatness



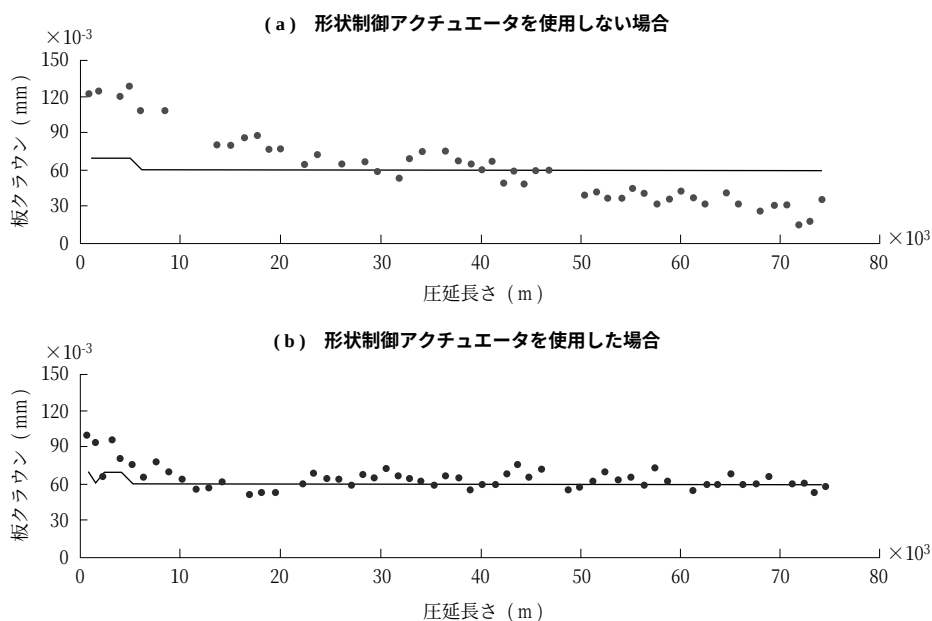
第 3 図 板形状制御技術開発に対する取組み
Fig. 3 Approach to develop strip crown and flatness control



第 5 図 実機圧延テストで得られた鋼板の幅方向板厚分布
Fig. 5 Transversewise thickness distribution reduced in rolling test



第 6 図 板クラウン・平たん度シミュレーション結果
Fig. 6 Strip crown simulation in finishing mill train



第 7 図 実機操業状態における板クラウンの推移
Fig. 7 Strip crown changes in actual rolling

3.3 PFSU

コイルごと、コイル全長にわたって板形状を精度良く造り込むためには、高精度の板クラウン・平たん度予測技術の開発が不可欠となる。第8図に鋼板形状制御システムの構成を示す。

PFSU は以下に挙げる三つの機能で構成される。

- ① 板クラウン・平たん度予測およびアクチュエータ設定機能
- ② 板クラウン・平たん度学習機能
- ③ ロールサーマルクラウン・摩耗予測機能

(1) 設定モデル

粗ミルで圧延された粗バーが仕上圧延機入側に達したとき、仕上ミルのセットアップが開始される。このタイミングで、PFSU は目標板クラウン・平たん度を造り込むための形状制御アクチュエータ設定値を計算する。

第9図に PFSU 設定計算フローを示す。板クラウン・平たん度の目標値が上位コンピュータから送られてくるとともに、仕上各スタンド出側板厚、圧延荷重予測値などの ① 圧延条件と ② 操業条件が入力データとして PFSU に与えられる。PFSU はこれらのデータに基づき、各スタンド出側の板クラウン・平たん度を予測するとともに、中間スタンドの許容平たん度を考慮して、目標板クラウン・平たん度を造り込むことが

できるワークロールシフト位置、ワークロールベンダ力を決定する。

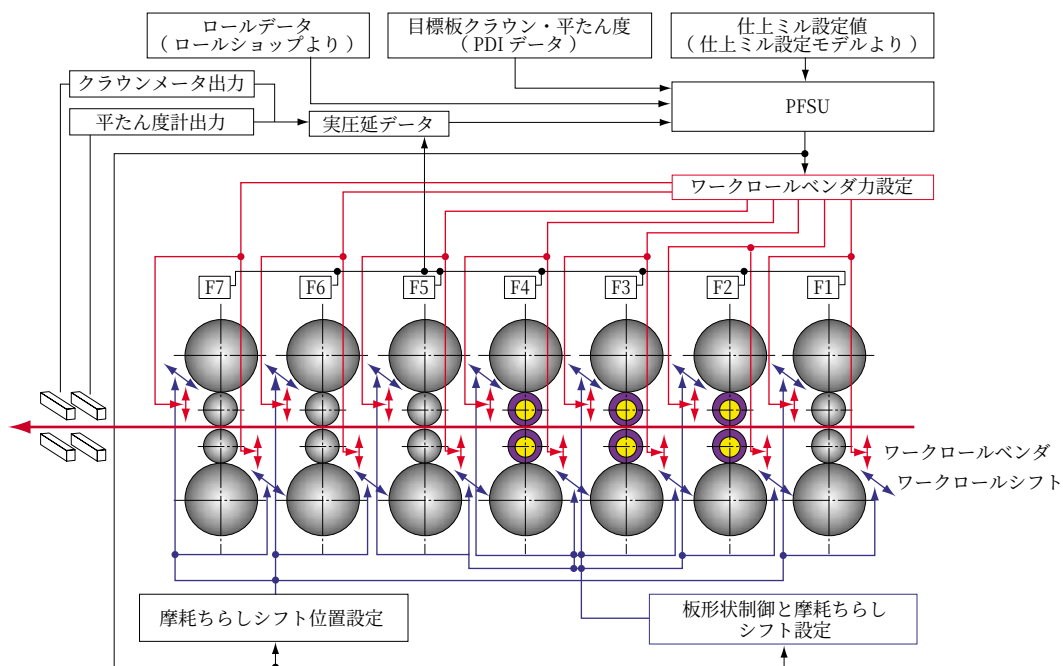
(2) 学習モデル

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・平たん度を高精度に予測する。しかし、圧延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り、実圧延データを元とした学習機能は不可能である。このため、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。

学習モデルは仕上圧延開始後、ストリップ先端が仕上ミル最終スタンドを抜け、板クラウン・平たん度実績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・平たん度を再計算するとともに、得られた再計算値と実測値を比較し、両者が一致するよう各種モデル影響係数を逐次修正する。

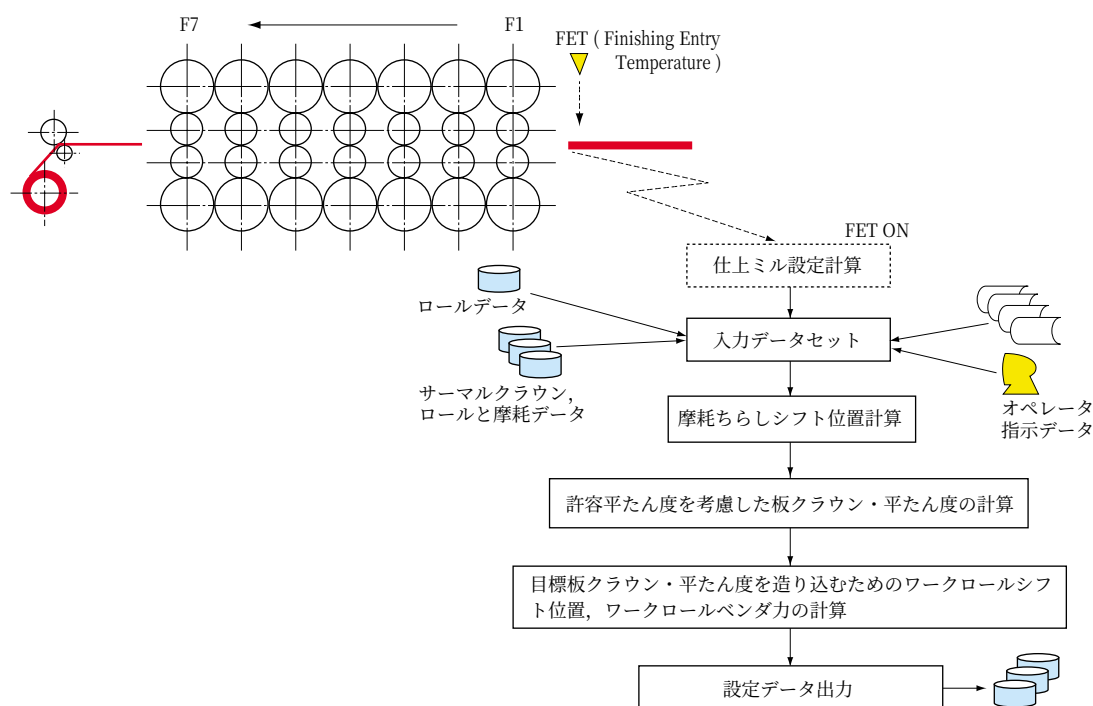
(3) ロールサーマルクラウン・摩耗予測モデル

実圧延ではストリップ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。



第8図 鋼板形状制御システムの構成

Fig. 8 System configuration of IHI strip crown and flatness control



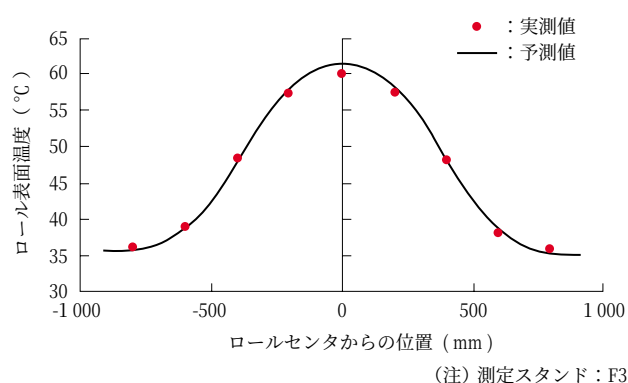
第9図 PFSU 設定計算フロー
Fig. 9 PFSU set up calculation flow

一方、仕上ミルの場合、ロール摩耗は圧延長さの影響を最も大きく受け、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、高精度なサーマルクラウンおよびロール摩耗予測モデルが不可欠である。

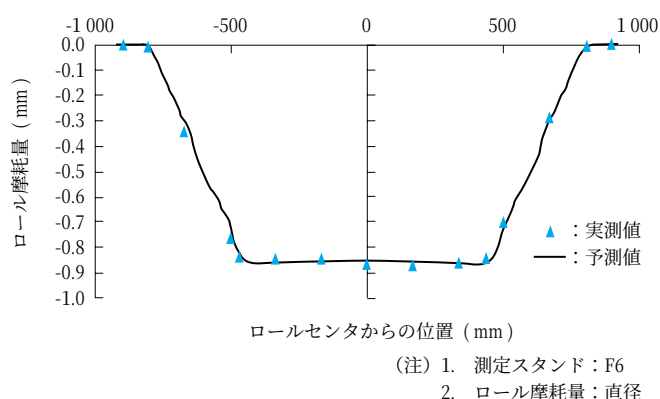
両モデルは幅方向左右非対称・上下対称の 1/2 モデルを用い、実績データを基にロール内部の温度分布とロール摩耗分布を高精度に予測することができる。ロール内部温度は差分法を基礎とした数値計算を行うが、圧延中は材料からの入熱によるロール内部の温度変化が急激なことから、内部温度の変化に追従し、かつ、サーマルクラウンを精度良く予想する目的で、短周期の計算を実施している。

第10図に PFSU サーマルクラウンモデルによるロール表面温度分布計算結果を、第11図に PFSU 摩耗モデルによるワークロール摩耗プロファイル計算結果を示す。両モデルともに実測値と極めて良く一致している。

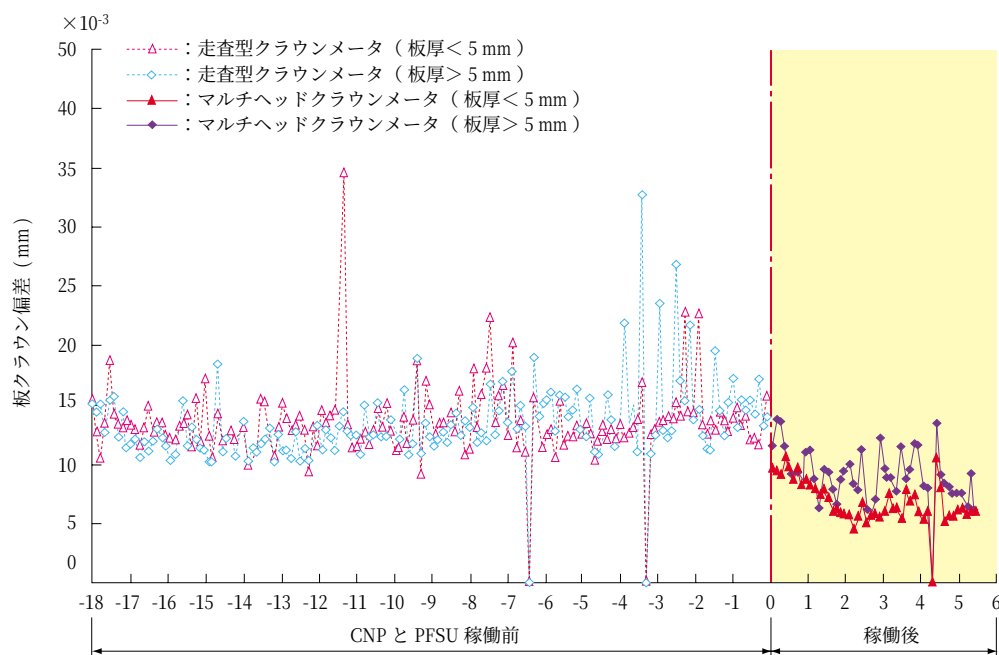
PFSU サーマルクラウン・摩耗予測モデルで計算された結果は、PFSU 共有のデータテーブルに保存され、逐次更新される。設定モデルおよび学習モデルはこのデータテーブルを参照し、最新のサーマルクラウン・摩耗クラウンを使って板クラウン・平坦度を計算する。



第10図 PFSU サーマルクラウンモデルによるロール表面温度分布計算結果
Fig. 10 Temperature distribution calculated by PFSU thermal crown model



第11図 PFSU 摩耗モデルによるワークロール摩耗プロファイル計算結果
Fig. 11 Wear profile of work roll calculated by PFSU wear model



(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 12 図 実機操業における板クラウン精度推移
Fig. 12 Performance of strip crown control

4. 実機稼働状況

第 12 図に実機操業における板クラウン精度推移を示す。縦軸は板クラウン実測値と目標値の偏差を表しており、CNP Mill と PFSU が稼働後、この板クラウン偏差はおおよそ 1/2 に改善することが確認された。本結果は板形状厳格化に対する客先の要求を十分に満足させるものであった。

5. 結 言

熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御能力のさらなる向上と高精度化を目的として開発した CNP Mill とこ

れを制御端とする鋼板形状制御システム PFSU の概要を述べた。本システムは、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、客先より大きな評価と信頼を得ることができた。今後、さらなる顧客満足度の向上を目指し、新技術の開発に努力していく所存である。

— 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。