
熱延仕上げミルにおけるクラウン・形状制御モデルの開発と実機適用

Development of Profile and Flatness Control Models and Application to Mizushima Hot Strip Mill

米田 裕紀(Hironori Yoneda) 北浜 正法(Masanori Kitahama) 侍留 誠(Makoto Shitomi)

要旨：

近年、熱間圧延鋼板の板プロフィール・平坦度に対する需要家の要求は一段と厳しさを増している。所望の板プロフィールを安定して製造するためには、高精度なクラウン・形状予測モデルとそれに基づいた圧延条件の決定が不可欠である。今回、オンラインにて使用可能な、分割モデルを簡略化した解析解モデルであるロール変形モデルと、3次元剛塑性 FEM と分割モデルの連成解析により求めた板クラウン形成モデルを開発し、高精度なプロフィール予測を可能とした。また、このモデルを水島製鉄所ホットストリップミルに適用し、低クラウン、良好な形状の鋼板を製造する技術を確立した。

Synopsis：

The customer's requirement for better Strip profile and flatness is growing stricter. Accurate models to estimate profile and logic to determine rolling conditions, based on these models, are required in order to produce hot-rolled strips with good profiles and flatness. Two models have been developed by Kawasaki Steel. One is an analytical roll deformation model, which is a simplification of a strict roll deformation model. The other is a strip profile model, which is derived from a coupled model of a rigid-plastic FEM and the roll deformation mode. By the application of these models to Mizushima Hot Strip Mill, a hot rolling technology to achieve excellent strip profiles and flatness has been established.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Profile and Flatness Control Models and Application to Mizushima Hot Strip Mill



米田 裕紀

Hironori Yoneda
水島製鉄所 熱間圧延
部熱延技術室

北浜 正法

Masanori Kitahama
技術研究所 加工・制
御研究部門 主任研究
員(課長)

侍留 誠

Makoto Shitomi
水島製鉄所 設備技術
部開発設計室長(部長
補)

要旨

近年、熱間圧延鋼板の板プロフィール・平坦度に対する需要家の要求は一段と厳しさを増している。所望の板プロフィールを安定して製造するためには、高精度なクラウン・形状予測モデルとそれに基づいた圧延条件の決定が不可欠である。今回、オンラインにて使用可能な、分割モデルを簡略化した解析解モデルであるロール変形モデルと、3次元剛塑性 FEM と分割モデルの連成解析により求めた板クラウン形成モデルを開発し、高精度なプロフィール予測を可能とした。また、このモデルを水島製鉄所ホットストリップミルに適用し、低クラウン、良好な形状の鋼板を製造する技術を確立した。

Synopsis:

The customer's requirement for better strip profile and flatness is growing stricter. Accurate models to estimate profile and logic to determine rolling conditions, based on these models, are required in order to produce hot-rolled strips with good profiles and flatness. Two models have been developed by Kawasaki Steel. One is an analytical roll deformation model, which is a simplification of a strict roll deformation model. The other is a strip profile model, which is derived from a coupled model of a rigid-plastic FEM and the roll deformation model. By the application of these models to Mizushima Hot Strip Mill, a hot rolling technology to achieve excellent strip profiles and flatness has been established.

1 緒 言

近年、需要家における歩留り向上、省工程、自動化のニーズが高まり、それにともないホットストリップミル製品に対する品質要求は、圧延技術の進歩にあいまって、一段と厳しいものになっている。その中でも板厚の幅方向分布すなわち板プロフィール(クラウン)、および平坦度の高精度化が強く要望されるようになってきている。また、製造する側にとっても、通板形状の安定化、耳切り代削減による歩留り向上、圧延条件規制緩和(スケジュールフリー圧延)などの実現のため、高精度な平坦度・板クラウン制御が期待されている。

このような要求に対して、ハード面ではワークロールベンダー力を調整しワークロールのたわみ量を制御するロールベンディング法、中間ロールを軸方向にシフトさせることによりワークロールベンディングの効果を大幅に向上させた HC ミル(6 段圧延機)¹⁾、ロール軸を互いに交差させてロール間の軸方向ロールギャップ分布を変化させるロールクロスミル²⁾、テーパ付ワークロールシフトミル(K-WRS ミル)³⁾、などが熱延仕上ミルに実用化され、信頼度の高いオンライン用平坦度検出器やプロフィール測定器の開発ともあわせ、大きな発展がみられた。

一方、所望の板プロフィール・平坦度を常に安定して確保するためには、高精度なクラウン・形状予測モデル、およびそれに基づいた圧延条件の決定が必要である。水島ホットストリップミルでは、高精度なクラウン・形状予測モデルを開発し、1995 年 1 月より実機仕上ミルセットアップに適用し、板クラウン・形状の高精度化を実現した。

本報ではこのクラウン・形状予測モデルの概要と、実機適用結果について報告する。

2 水島ホットストリップミルにおけるクラウン・形状制御概要

2.1 設備および制御構成

水島ホットストリップミル仕上ミルの概要を Fig. 1 に示す。ここで、板クラウン、板形状を決定する要素として、ワークロール (WR) のイニシャルロールクラウン、各スタンド圧延荷重、WR および中間ロール (IMR) のシフト位置、WR ベンダー力、圧延サイクル構成(圧延材の板厚・幅接続、1 コイルあたりの圧延時間、先行材圧延後の圧延ピッチによる WR サーマルクラウンの変化および WR 摩擦の進行)などが挙げられる。

これらに対する制御は、大きくセットアップ制御とダイナミック

* 平成 8 年 5 月 7 日原稿受付

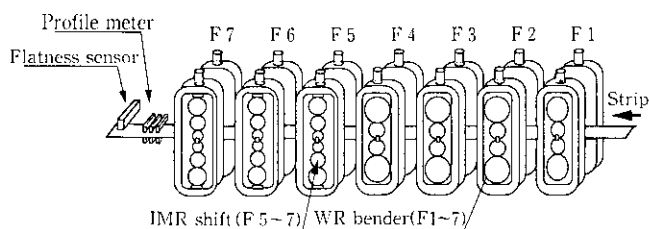


Fig. 1 Layout of Mizushima hot strip finishing mill

制御に分けられ、制御対象となるアクチュエータは、圧下配分（圧延荷重）、WR および IMR シフト位置、WR ベンダー力である。

従来のセットアップ制御においては、圧下配分については各スタンドの圧延荷重がオフラインであらかじめ決定しておいた目標荷重パターンになるよう収束計算を行い、IMR シフト位置、ベンダー力設定については、計算機内のプリセットテーブルおよびオペレータによる修正により設定されていた。また WR シフト位置はバー間でサイクリックにシフトされていた。

今回新たに開発したクラウン・形状制御システムにおいては、クラウンおよび形状の目標値を達成するように、圧下配分、中間ロールシフト位置および WR ベンダー力が決定される。一方、セットアップ制御には圧延荷重などのセットアップ予測誤差があり、さらにコイル内での圧延荷重変化、サーマルクラウンの成長を考慮すると、圧延状況の変化に応じたリアルタイム制御が必要である。リアルタイムに制御可能な制御要素としては、WR ベンダー力および各スタンドの圧下配分があり、センサとしては仕上ミル最終スタンド出側に形状検出器およびプロフィール測定器を有している。これらの検出器により実績クラウン・形状を測定し、WR ベンダーおよび圧下配分によって閉ループのフィードバック制御を実施した。

2.2 クラウン・形状予測モデル概要

クラウン・形状が目標値となるように計算機によるセットアップを実現するためには、高精度なクラウン・形状予測モデルが必要であり、今回これらのモデルの高精度化を図った。Fig. 2 に新プロフィールモデルの構成を示す。

本モデルは、サーマルプロフィールモデル、摩耗プロフィールモデル、ロール変形モデル、転写率・遺伝係数モデル、形状変化係数モデルから成り立っている。サーマルプロフィールモデル、摩耗プロフィールモデルは、圧延の進行にともなうロールプロフィールの変化を計算し、ロールイニシャルプロフィールと合わせることで、無負荷時のロールプロフィールを計算する。ここで、サーマルプロフィールモデルは、ロール内部の温度分布を求め軸方向の膨張量分布を計算する2次元軸対称差分モデルと、径方向の温度差を求め膨張量を計算する1次元差分モデルから成り立っている。最近のロール水冷条件の変化やロール材質の変更に伴い、サーマルクラウンを実測し水冷の熱伝達係数等の境界条件について見直しを行った。摩耗プロフィールモデルは、圧延荷重、圧延距離および圧延材鋼種などから計算される。ロール材質の変更、油圧延設備改造などに伴い、ロール摩耗を実測し摩耗係数を見直した。

ロール変形モデルについては、ロールプロフィールの経時変化の影響も考慮して圧延中のロールの弾性変形を計算し、さらに無負荷時のロールプロフィールと重ねることによって負荷時の WR のロールギャッププロフィールを算出する解析解モデルを開発した。さらに板プロフィールは、負荷時のロールギャッププロフィールと入側板プロフィールの線型結合で表わされるものとした。ロールギャッププロフィ

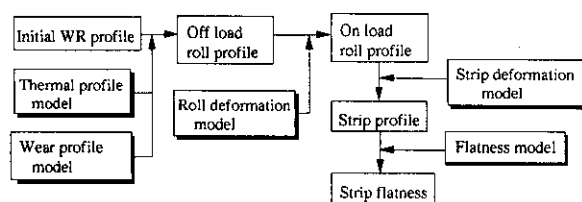


Fig. 2 Model components of profile and flatness

ルの転写率および入側板プロフィールの遺伝係数と呼ばれる影響係数については、剛塑性有限要素法とロール変形モデルを連成した解析モデルの結果から数式モデルを作成した。以上により求めた各スタンドのクラウン比率変化に形状変化係数を乗じることで、平坦度を求めることができる。

これらのモデルはすべて幅方向に複数の任意位置での値を求めることが可能である。これらのうち、次章以降でロール変形モデル、転写率・遺伝係数モデルにつき詳細に述べる。

3 圧延機変形モデル

圧延ロールには材料からの圧延荷重およびロールベンダー力等の荷重が作用するため、軸心のたわみおよび表面の偏平が発生する。WR は IMR あるいは BUR によってバレル部を支持されており、ロール間には圧延荷重およびロールベンダー力の反力としての分布荷重が発生する。したがって、WR の弾性変形を求めるためには、外力として圧延荷重およびロールベンダー力、内力としてロール間の接触荷重分布を知る必要がある。ロール間の分布荷重はロール寸法やロールの表面形状に影響を受けるために、ロール間の接触問題とロールの弾性変形特性を連立して解く必要がある。ロールの弾性変形量を求める手法として、Shohet らの提案する「分割モデル」と呼ばれる手法がある⁴⁾。分割モデルでは、ロール群および圧延材をバレル方向に分割し、各スリット要素でのロール間接触条件および荷重とモーメントの釣り合い式を導き、ロール間の接触荷重分布を未知数とする連立方程式を解くことによってロールの弾性変形特性を計算する。この方法は汎用的かつ厳密であるが、バレル方向の分割数の連立一次方程式を解く必要があり計算時間が長い、およびロールの弾性変形量の目標値が与えられた場合のベンダー力あるいは圧延荷重を求めるいわゆる逆問題が解けないこと等の理由で、オンラインでのクラウン・形状制御に用いるにはやや難があった。筆者らは、分割モデルの汎用性や厳密さを損なわない程度に簡略化した解析解モデルを開発し、4 段圧延機に適用した⁵⁾。本章では、解析解モデルをさらに発展させ、6 段圧延機にも適用可能としたモデルについて説明する。

3.1 圧延機変形の解析解モデルの概要

3.1.1 ロールたわみモデル

幅方向に均一な荷重が板から作用する場合のロールたわみを解析的に求めるために、以下の仮定を置く。

- (1) ロール間の接触バネ定数は幅方向で一定とする。
- (2) ロールの胴長とシフト量から幾何学的に決定されるロールの有効接触部内では非接触状態が発生しない。
- (3) ロール間の接触荷重分布は4次以下の多項式で表せる。

これらの仮定の下で、ロールのたわみ変形を圧延荷重、WR ベンダー、および無負荷時ロールプロフィールに起因する項の3者に分離する。これらの影響による WR たわみを単独に計算し、おのおのの

変形を重ね合わせる手法を用いた。また、ロール間の接触荷重による変形については、各ロールが剛体接触した場合の接触荷重分布（直線あるいは折れ線分布：1次項）と、各ロールのたわみ差によるロール間の不適合量を補正するための4次式で与えられる接触荷重分布（4次項）によるものの2者を考え、それぞれによるたわみを重ね合わせるものとした。

(1) 圧延荷重によるたわみ

(a) 1次項

Fig. 3に示すように、各ロールが剛体接触した場合の荷重分布およびたわみはBURの場合を例にとり以下のように表わされる。

[荷重分布]

$$P_{BU} = (6 B_{BU} x_{BU} + B_{BU}^2 - 3 B_{BU} B_{BU}) P / B_{BU}^3 \quad (0 < x_{BU} < B_{BU}) \quad \cdots (1)$$

[たわみ式]

$$\begin{aligned} v_{BU} = & \left\{ \begin{aligned} & -(x_{BU} + B_{BU})^3 / 12 E_n I_n + k (x_{BU} + B_{BU}) / \\ & 2 G_n A_n D_{BU} + C_1 (x_{BU} + B_{BU}) \} P \quad (x_{BU} < 0) \\ & = [\{ 6 B_{BU} x_{BU}^3 + 5 (B_{BU} - 3 B_{BU}) B_{BU} x_{BU}^2 - 10 B_{BU}^3 \\ & \quad (x_{BU}^3 + 3 B_{BU} x_{BU}^2) \} / 120 E_n I_n B_{BU}^3 - k \{ 2 B_{BU} x_{BU}^3 \\ & \quad + (B_{BU} - 3 B_{BU}) B_{BU} x_{BU}^2 - B_{BU}^3 x_{BU} \} / 2 G_n A_n B_{BU}^3 \\ & \quad + C_3 x_{BU} + C_4 \} P \quad (0 < x_{BU} < B_{BU}) \\ & = [\{ (x_{BU} - W_n)^3 - 3 B_{BU} (x_{BU} - W_n)^2 \} / 12 E_n I_n \\ & \quad - k (x_{BU} - W_n) / 2 G_n A_n + C_5 (x_{BU} - W_n) + C_6 \} P \\ & \quad (B_{BU} < x_{BU} < W_n) \\ & = \{ -(x_{BU} - W_n - B_{BU})^3 / 12 E_n I_n + k (x_{BU} - W_n \\ & \quad - B_{BU}) / 2 G_n A_n D_{BU} + C_7 (x_{BU} - W_n - B_{BU}) \} P \\ & \quad (W_n < x_{BU} < W_n + B_{BU}) \end{aligned} \right\} \quad \cdots (2) \\ C_3 = & [\{ 5 B_{BU}^2 + 10 (B_{BU} + 3 B_{BU}) W_n \} \\ & + B_{BU} \{ 4 B_{BU}^2 + 10 (B_{BU} + B_{BU}) W_n / W_n \}] / 120 E_n I_n \\ C_5 = & - [\{ 5 B_{BU}^2 + 10 (B_{BU} + 3 B_{BU}) W_n \} + B_{BU} \\ & \quad \{ -4 B_{BU}^2 + 10 (B_{BU} + B_{BU}) W_n / W_n \}] / 120 E_n I_n \\ C_1 = & C_3 + B_{BU}^3 / 4 E_n I_n, \quad C_7 = C_5 - B_{BU}^3 / 4 E_n I_n \\ C_4 = & C_1 B_{BU} - B_{BU}^3 / 12 E_n I_n + k B_{BU} / 2 G_n A_n \\ C_6 = & - B_{BU}^3 / 12 E_n I_n + k B_{BU} / 2 G_n A_n - C_7 B_{BU} \end{aligned}$$

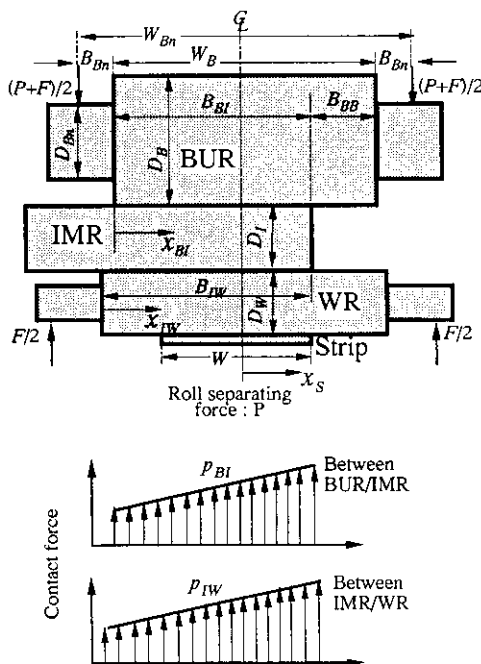


Fig. 3 Definition of variables for roll deformation calculation

ここで、 v_{BU} は圧延荷重の1次項によるBURのたわみ、 E_n はヤング率、 G_n は横弾性係数、 I_n はBURの断面2次モーメント、 A_n は断面積、 k は形状係数（4/3）であり、添字 n はネック部での値を示す。また、その他の記号はFig. 3中に示した。

IMRおよびWRについても同様に圧延荷重の1次項によるロールたわみ式、 v_{IM} 、 v_{WR} を導くことができる。

(b) 4次項

1次項で求めたたわみは各ロールが単独で変形するとした場合のものであり、各ロール間でのたわみの適合条件を満たしていない。BUR-IMRおよびIMR-WR間でそれぞれ代表点を5点ずつ選び、それらの点でのたわみの適合条件を満たすように4次の接触荷重分布 P_{IM} およびその荷重によるたわみ v_{IM} 、 v_{WR} 、 v_{WR} を求める⁵⁾。結局、圧延荷重によるWRたわみは、下式で表わされる。

$$v_{WR} = v_{WR1} + v_{WR2} \quad \cdots (3)$$

(2) ロールベンダーによるたわみ

圧延荷重によるたわみと同様に、1次項および4次項によるたわみ v_{FWR1} 、 v_{FWR2} を求め、最終的には下式によってロールベンダーによるたわみ v_{FW} を求めることができる。

$$v_{FW} = v_{FW1} + v_{FW2} \quad \cdots (4)$$

(3) ロールプロフィールによるたわみ

ロールのインシヤルクラウン、サーマルクラウンおよび摩耗形状によりロール間の接触荷重分布が変化し、ロールのたわみも変化する。一般にサーマルクラウンや摩耗は複雑な形状であり、簡単に関数近似することは困難である。複雑なロール表面形状によるロールたわみと等価な4次式形状のロールクラウンを求めることによってこの影響を考慮する。Fig. 4に示すように、ロール間のバネ定数 k_n が一定とし、荷重とモーメントの釣り合い条件を考慮すると、任意のロールプロフィール $g(x)$ によるロール間接触荷重分布 $w(x)$ を求めることができる。式(5)に示すように、この接触荷重を3回積分することによってロールたわみを求めることができる。ただし、任意のロールプロフィールの場合、解析的に積分を実行することはできず、数値積分を行う必要がある。また、その結果求められるたわみは、各ロール単独にたわむとした1次項のたわみである。

[任意のロールプロフィールによるたわみ]

$g(x)$: arbitrary

$$w(x) = k_n \{ g(x) + bx + c \}$$

$$s(x) = \int_0^x w(\eta) d\eta$$

$$m(x) = \int_0^x s(\eta) d\eta$$

$$v_{BU}(x) = \theta_1 x + \int_0^x m(\eta) (\eta - x) d\eta \quad \cdots (5)$$

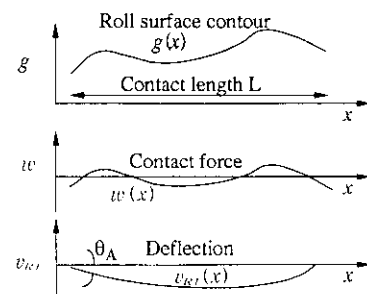


Fig. 4 Roll deflection by roll profile

$$\theta_A = \frac{1}{LEI} \int_0^L m(\eta)(\eta-x) d\eta$$

一方、ロールプロファイルが4次式で表わされるとすると、接触荷重分布およびたわみは解析的に求めることができ、式(6)のように表わされる。

[4次のロールプロファイルによるたわみ]

$$g'(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4$$

$$w'(x) = k_w c(x)$$

$$v_w'(x) = \frac{L^4 k_w}{EI} \{c_2 f_1(x) + c_3 f_2(x) + c_4 f_3(x)\} \dots\dots\dots (6)$$

$$f_1(x) = \frac{\xi}{720} - \frac{\xi^4}{144} + \frac{\xi^5}{120} - \frac{\xi^6}{360}$$

$$f_2(x) = \frac{17\xi}{8400} - \frac{\xi^4}{120} + \frac{3\xi^5}{400} - \frac{\xi^7}{840}$$

$$f_3(x) = \frac{19\xi}{8400} - \frac{\xi^4}{120} + \frac{\xi^5}{150} - \frac{\xi^8}{1680}$$

$$\xi = x/L$$

数値積分で得られた任意プロファイルによるロールたわみと4次式プロファイルによるたわみを等置して、4次式プロファイルの係数に関する連立方程式(7)が得られ、これを解くことによって任意プロファイルによるたわみと等しいたわみを与える4次式のロール形状(等価ロールクラウン)が得られる。なお、係数 c_2 と c_3 は荷重とモーメントの釣り合いより求めることができる。

$$\frac{L^4 k_w}{EI} \begin{bmatrix} f_1(L/4) & f_2(L/4) & f_3(L/4) \\ f_1(L/2) & f_2(L/2) & f_3(L/2) \\ f_1(3L/4) & f_2(3L/4) & f_3(3L/4) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_{w1}(L/4) \\ v_{w1}(L/2) \\ v_{w1}(3L/4) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

得られた等価ロールクラウンを用いて、前節と同様に各ロール間のたわみが適合するように4次項も考慮したロールプロファイルによるWRたわみ v_{wv} を求めることができる。

3.1.2 WR表面偏平量

WRと材料間の偏平変形は戸沢の式⁹⁾を基本とし、簡略化のために幅方向に均一な線荷重がロールバイト中央位置に作用した場合のロールバイト出口点での偏平量を求める式とした。また、ロールの有限性に関する補正も行ない、式(8)を導いた。

$$\varepsilon(x) = \frac{(1-\nu^2)}{\pi E_w} \frac{P}{W} \ln \left\{ \frac{\sqrt{(x^-)^2 + (ld/2)^2} - x^-}{\sqrt{(x^-)^2 + (ld/2)^2} - x^+} \right\} \left\{ \frac{\sqrt{(x^+)^2 + (ld/2)^2 + R^2} - x^+}{\sqrt{(x^+)^2 + (ld/2)^2 + R^2} - x^-} \right\} \dots\dots (8)$$

ここで、 x : 板中央を基準とした座標、 ε : WR表面偏平量、 $x^- = x - W/2$ 、 $x^+ = x + W/2$ 、 ld : 接触弧長、 ν : ポアソン比、 E_w : WRのヤング率、 R : WR半径、である。

3.1.3 負荷時ロール表面プロファイル

以上でロールの変形特性を記述する式がすべて提示された。無負荷時のロールプロファイルを表すサーマルプロファイル $u_w(x)$ 、摩耗プロファイル $W_w(x)$ 、イニシャルクラウン $c_i(x)$ の3者、および荷重・WRベンダー・ロールプロファイルの3者によるWRたわみ $v_{wv}(x)$ 、 $v_{wv}(x)$ 、 $v_{wv}(x)$ 、およびWR表面偏平 $\varepsilon(x)$ を合計することにより、式(9)に示すロール1本分の負荷時WR表面プロファイル $C_c(x)$ が得られる。さらに圧延機中央を基準とした負荷時のロールギャッププロファイル $C^*(x)$ は点対称条件を適用して式(10)で表わされる。

$$C_c(x) = -u_w(x) + W_w(x) + c_i(x) + v_{wv}(x) + v_{wv}(x) + v_{wv}(x) + \varepsilon(x) \dots\dots\dots (9)$$

$$C^*(x) = 2C_c(0) - \{C_c(x) + C_c(-x)\} \dots\dots\dots (10)$$

Table 1 Calculating conditions

Case	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Dimension of rolls (mm)	WR/IMP/BUR : ϕ 600/600/1 300×2 300 L				
Strip width (mm)	1 200			800	
Roll separating force (MN)	9.8				
Bending force per chock (KN)	0	490		0	
IMP shifting (mm)	0	400		0	
WR crown (mm)	0			0.3	0

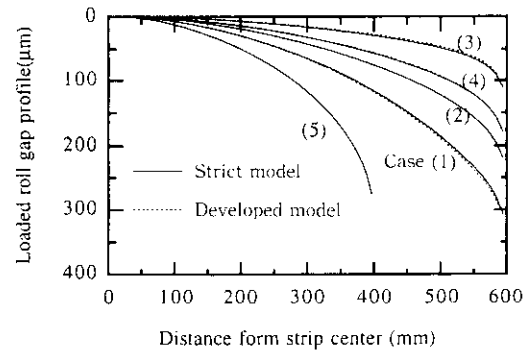


Fig. 5 Accuracy of developed model

3.2 ロール変形モデルの精度

Table 1に示す計算条件の下で本ロール変形モデルと厳密モデルである分割モデルによる結果と比較することによって精度を検証した。Fig. 5に負荷時ロールギャッププロファイルの計算結果を示す。板幅、ロールベンダー力、イニシャルクラウンなどの違いによらず分割モデルと本モデルによる負荷時ロールギャッププロファイルは数 μm 以内の精度で良く一致している。

4 圧延材料側の板クラウン形成モデル

出側板クラウンは、圧延荷重分布が正確に与えられればロールギャップ分布を介して予測可能である。しかし正確な荷重分布の予測には、材料の変形とロールの変形を連成した多くの収束計算が必要のため、オンラインで実行するのは非常に困難である。そのため、前述の圧延機変形モデルにおいて、平均線荷重予測値を板幅方向に均一分布させた時のロールギャッププロファイルを基に、圧延材の変形条件により補正する板クラウン形成モデルを適用する。

板クラウン形成モデルは、圧延スケジュール(入/出板厚、板幅)、入側板クラウン、鋼種による変形抵抗値、など条件変化の影響を包含するモデルが必要である。熱延ミルにおける広範な圧延条件範囲を網羅するため、熱間圧延の塑性変形状態を比較的精度良くシミュレートできる3次元剛塑性有限要素法解析⁷⁾(以後剛塑性FEMと呼ぶ)を適用し、分割モデルと組み合わせた連成解析システムを開発した⁸⁾。

4.1 連成解析システムの概要

Fig. 6に連成解析システムのフローチャートを示す。このシステムでは、圧延条件を入力後、分割モデルにより出側板厚分布計算、ロール偏平半径分布計算を仮定し、それらの境界条件下で剛塑性FEM

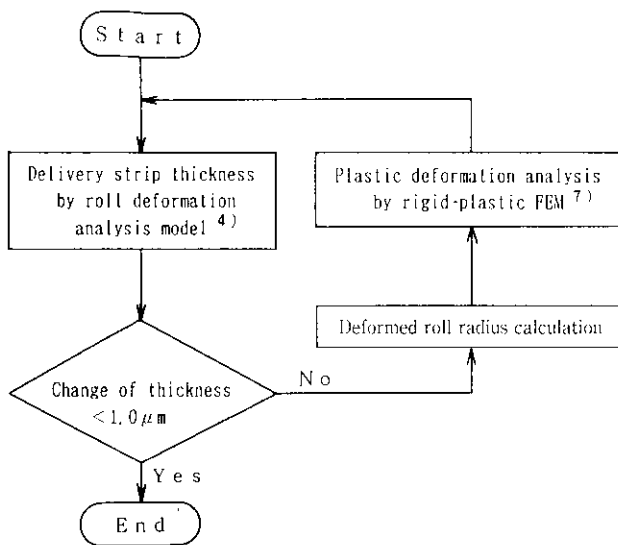


Fig. 6 Block diagram for calculation of delivery thickness distribution (coupled analysis model)

解析を行い荷重分布を求める。しかる後に再度分割モデル計算を行い、板厚分布の誤差が $1\mu\text{m}$ 以下となるまで繰り返し計算を行う。分割モデルは、水島ホットストリップミル仕上ミルの仕様に合わせて、4 Hi ミル及び 6 Hi ミルのモデルを使用する。

また、剛塑性 FEM は、式(11)の汎関数 Φ を用い、小坂田らの提案している⁹⁾ 圧縮性材料の塑性力学を応用した方法を使って定式化した。式(11)を有限要素表示し停留条件を求めると式(12)が求められる⁷⁾。

$$\Phi = \int_V \int_{\dot{\epsilon}} \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} dV + \int_{S_r} \tau_r \Delta v dS - \int_{S_r} \bar{T} \cdot u dS \quad \dots\dots\dots (11)$$

τ_r : ロール接触面 S_r に働く摩擦応力

$\bar{T}$: 入出側断面 S_r に働く張力応力ベクトル

Δv : ロールと材料との相対速度

$\dot{\epsilon}$: 相当歪速度 $\bar{\sigma}$: 変形抵抗 u : 速度場

$$\Sigma \int \frac{\partial}{\partial \dot{\epsilon}} [K] \{U\} dV + \Sigma \int \frac{\tau_r}{\Delta v} [F]^T [F] \{\Delta U\} dS - \Sigma \int [N]^T (\bar{T}) dS = \{0\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$[K] = [B] \left\{ \frac{2}{3} [R] + \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) [S] \right\} [B]$$

$\{\bar{T}\}$: 張力応力ベクトル g : 定数

$\{\Delta U\} = \{U\} - \{U_n\}$ $\{U\}$: 節点速度

$\{U_n\}$: 節点におけるロール速度 $[B]$: Bマトリックス

$[N]$: $\{u\} = [N] \{U\}$ $\{\dot{\epsilon}\} = [B] \{U\}$

$[F]$: $\{u\} = [F] \{U\}$

本モデルは 3 次元の定常解析で、要素には 8 接点 6 面体の一次のアイソパラメトリック要素を使用する。

Fig. 7 には解析領域、要素分割の概略図を示す。解析領域は上下左右対称の $1/4$ モデルであり、要素分割は厚み方向が 1 または 2 要素、圧延方向はバイト内を 5~9 要素とし、バイト後方に 3 要素、前方に 2 要素設定した。幅方向は板端ほど細かく分割し、20~30 要素 (最小幅 5 mm) となっている。

Fig. 8 に、この解析システムによる結果の一例を示す。この解析は、仕上ミルの F1 ミル~F7 ミル間を順次計算して求めた板厚分布と、実圧延で得られた値を比較したものである。板端付近に $10\mu\text{m}$ 程度の誤差は見られるものの、板幅全般にわたり計算値と実績値が良く一致しており、熱間圧延での板クラウン、形状を議論する板端 25 mm 以内において十分使用できる。

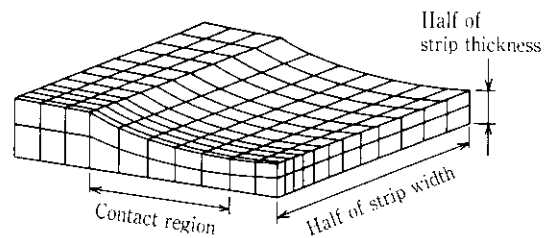


Fig. 7 Schematic illustration of the rolled material for rigid-plastic FEM

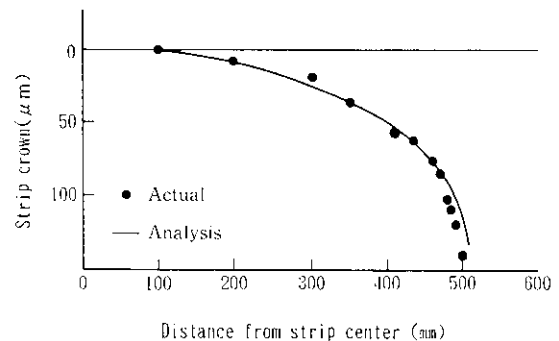


Fig. 8 Comparison of actual result with calculated result by coupled analysis

4.2 板クラウン形成モデルの定式化

圧延機出側の板クラウンを、入側板クラウンの影響と、ロールギャッププロファイルの影響に分離して定式化する。前者は一般に入側板クラウンの遺伝係数と呼ばれる¹⁰⁾ 係数であり、クラウン変化がある場合の荷重分布変化を介した出側クラウンへの影響度合を示す。また後者は、ロールギャッププロファイルの転写率¹¹⁾ と呼ばれ、均一荷重分布下での計算ロールギャッププロファイルの出側板クラウンへ影響係数である。

4.2.1 入側板クラウンの遺伝係数モデル式

入側板クラウンの遺伝係数を、式(13)で定義する。

$$\beta = \partial Cr^h / \partial Cr^i \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 Cr^h : 出側板クラウン、 Cr^i : 入側板クラウン、である。

Fig. 9 にはその解析例として、入側板クラウンプロファイルの差による影響量の違いを示す。特に板幅端部付近においては、材料の塑

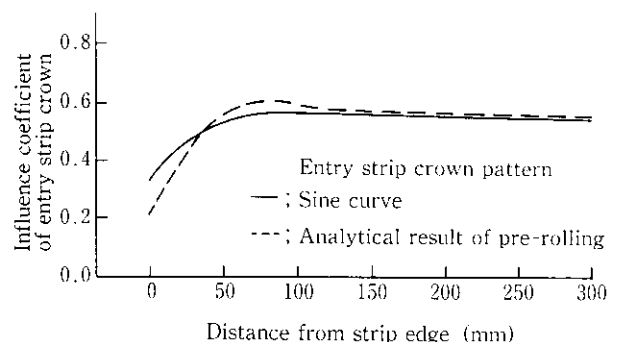


Fig. 9 Comparison of influence coefficients relating with entry strip crown pattern for coupled analysis

性流動による圧力分布が特徴付けられるため差が現われるが、数値的には比較的小さいので、今回のモデル化では入側クラウンのプロファイルを正弦近似で与えた。

Fig. 10 は、各種板厚における幅方向遺伝係数分布を示す。

摩擦係数、張力、ロール径、クラウン制御条件なども含めて検討した結果、クラウン遺伝係数に取り込むパラメータを、入側板厚： H 、板幅： W 、圧下率： γ 、平均変形抵抗： km 、板端からの距離： x_c とした。式(14)に、解析結果を重ね帰分析して得られた遺伝係数式を示す。

$$\beta = \{a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot H) + c_1\} (d_1 \cdot \gamma + e_1) \quad (14)$$

$$a_1, c_1 = F_1(x_c, W)$$

$$b_1 = G_1(km)$$

ただし、 d_1, e_1 は定数であり、 F_1, G_1 は関数表示を表わす。

4.2.2 ロールギャッププロファイルの転写率モデル

均一荷重分布下でのロールギャッププロファイルの転写率を、式(15)で定義する。

$$\alpha = \partial C_r^h / \partial C_r^p \quad (15)$$

ここで、 C_r^h ：ロールギャッププロファイル、である。

Fig. 11 は、各種板厚についての転写率の幅方向分布を示す。板厚に応じてその転写率の水準が異なると共に、幅方向端部において特に大きな変化が現われている。転写率においても、遺伝係数と同様なパラメータを採用し、式(16)で定式化した。

$$\alpha = \{a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot H) + c_2\} (d_2 \cdot \gamma + e_2) \quad (16)$$

$$a_2, c_2 = F_2(x_c, W)$$

$$b_2 = G_2(km)$$

ただし、 d_2, e_2 は定数であり、 F_2, G_2 は関数表示を表わす。

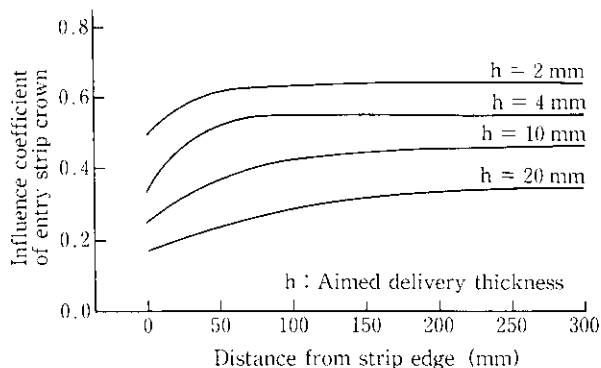


Fig. 10 Influence coefficients relating with entry strip crown

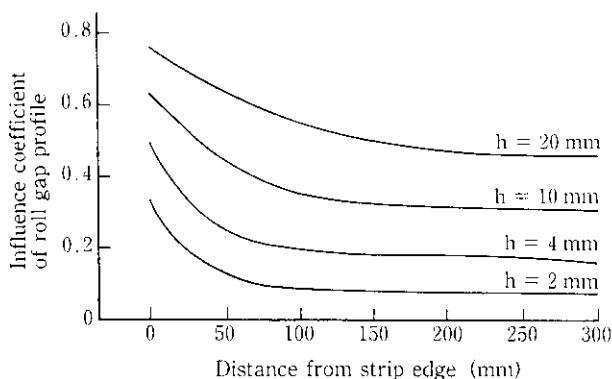


Fig. 11 Influence coefficients relating with calculated roll gap profile

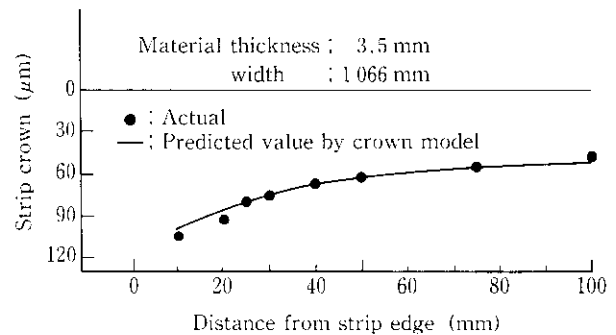


Fig. 12 Comparison of actual result and predicted value by crown model

4.3 板クラウン予測モデル式の検証例

前項に示す入側クラウンの遺伝係数、ロールギャッププロファイルの転写率の両モデルとも前述の連成解析システムを適用して求めた結果を重ね帰分析により定式化したものである。これらのモデル式を実機圧延に適用した場合の計算値と実機実績値の比較例を Fig. 12 に示す。対象としている板端部 25 mm 以内の領域において、良い一致が見られる。

5 実機適用結果

5.1 実機での新プロフィールモデル精度

水島ホットストリップミル仕上ミル実機での新プロフィールモデルによるクラウン予測精度を Fig. 13 に示す。従来モデルでは予測誤差の標準偏差が $\sigma = 17 \mu\text{m}$ であったのに対し、本モデルでは $\sigma = 10 \mu\text{m}$ と大幅に改善された。

5.2 仕上ミルセットアップへの新プロフィールモデルの適用

以上述べてきた新プロフィールモデルを、仕上ミルセットアップ用プロコンに組み込み、実機への適用を図った。仕上げミルのセットアップにおいては、モデルに基づいて計算した板プロフィールおよび形状を最適化するように、圧下配分、WR ベンダー力、IMR シフト位置の各設定値を決定する。この実現のため、計算機では式(17)に示

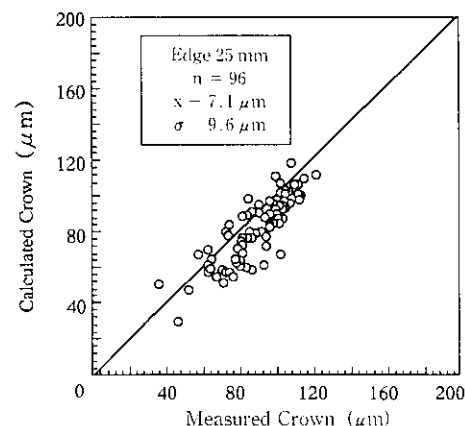


Fig. 13 Comparison between calculated and measured crown at F7 stand after hot rolling (developed model)

す評価関数 J を最小化するように収束計算を行う¹²⁾。

$$J = f(\lambda_i, \lambda_i^{STM}, Cr_{F7}, Cr_{F7}^{STM}) + g(h_i, h_i^{STO}, B_i, B_i^{STO}, S_i, S_i^{STO}) \dots (17)$$

λ_i ; i スタンド計算急峻度 λ_i^{STM} ; 目標急峻度

Cr_{F7} ; 仕上出側計算クラウン Cr_{F7}^{STM} ; 目標クラウン

h_i ; i スタンド板厚 h_i^{STO} ; i スタンド板厚標準値

B_i ; i スタンドWRベンダー力 B_i^{STO} ; WRベンダー力標準値

S_i ; i スタンドIMRシフト位置 S_i^{STO} ; IMRシフト標準位置

ここで、第1項は目標とする形状・クラウンを達成するという条件を数式化したものであり、第2項は第1項を最小化する解の組み合わせの中でどれを選択するかを決めるためのものであり、各因子にはおのおの重み係数を配する。これを制約条件付きの凸2次計画問題として解き、解 (h_i, B_i, S_i) を求める。

5.3 実機適用結果

以上述べた高精度プロフィールモデルに基づいたセットアップを1995年1月より、水島ホットストリップミル仕上ミルに適用している。その結果、低クラウン仕様材で、板端25mm位置のクラウンについて平均値が5 μ m、標準偏差 σ が3 μ m減少した。また薄物形状厳格材については、仕上ミル最終スタンド出側形状の標準偏差 σ が

30%減少した。

現在、本セットアップシステムは全鋼種で100%使用されており、板プロフィール・形状の品質向上、および水島ホットストリップミルの操業安定化に寄与している。

6 結 言

熱間圧延仕上げミルにおけるクラウン・形状予測モデルの高精度化および実機適用を行ない、以下の結論を得た。

- (1) 本モデルは、分割モデルを簡略化した解析解モデルであるロール変形モデルと、3次元剛塑性FEMと分割モデルの連成解析により求めた板クラウン形成モデルを特徴とし、幅方向任意点での高精度なプロフィール予測が可能である。
- (2) 本モデルを水島ホットストリップ仕上ミルセットアップに適用するにあたり、板プロフィールおよび板形状を最適化する手法を開発した。
- (3) 本システムは全鋼種で100%使用されており、低クラウンかつ良好な形状の鋼板を製造する技術を確立した。

参 考 文 献

- 1) 梶原利幸, 藤野伸弘, 西 英俊, 志田 茂: 日立評論, 56(1974)10, 919
- 2) 大森舜二, 塚本 彦, 日野裕之, 中島浩衛, 森本磨瑛雄, 中沢 吉: 33回塑加連講演, (1982), 419
- 3) 三宅祐史, 鎌田征雄, 浜田圭一, 広瀬勇次, 小川洋三, 豊島 貢: 川鉄技報, 16(1984)4, 235
- 4) K. N. Shohet and N. A. Townsend: *J. Iron and Steel Inst.*, 206(1968)11, 1088
- 5) 北浜正法, 鎌田征雄, 音田聡一郎, 成田健次郎: 塑性と加工, 36(1995)417, 1163
- 6) 石川孝司, 中村雅勇, 戸澤康寿: 塑性と加工, 21(1980)273, 902
- 7) 二階堂英幸, 林 宏之, 侍留 誠, 瀬戸恒雄, 直井孝之: 塑性と加工, 31(1990)350, 378
- 8) 谷口 徹, 侍留 誠, 岡田公之, 二階堂英幸: 第44回塑加連講演, (1993), 19
- 9) K. Osakada, J. Nakano, and K. Mori: *Int. J. Mech. Sci.*, 24(1982)8, 459
- 10) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本結美, 栗津原博, 木村智明, 志田 茂, 梶原利幸: 塑性と加工, 23(1982)263, 1172
- 11) 小川 茂, 松本結美, 浜崎修一, 菊間敏夫: 塑性と加工, 25(1984)286, 1034
- 12) 河野晃彦, 米田裕紀, 古川誠博, 浦野 朗, 北浜正法: 材料とプロセス, 7(1994)5, 1388