

Camber Control Techniques in Plate Rolling



田中 佑児
Yuji Tanaka

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室



大森 和郎
Kazuro Omori

水島製鉄所 設備部設
計室 主査(掛長)



三宅 孝則
Takanori Miyake

水島製鉄所 厚板鑄鍛
部厚板鑄鍛技術室



西崎 克己
Katsumi Nishizaki

ハイテク研究所 新素
材研究センター



井上 正敏
Masatoshi Inoue

水島製鉄所 厚板鑄鍛
部厚板鑄鍛技術室 主
査(課長)



手塚 栄
Sakae Tezuka

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(課長)

1 緒 言

圧延における鋼板キャンバー（鋼板の横曲がり）の制御は、圧延の分野に残された大きな技術的課題の一つである。キャンバーは歩留りを下げるほか、格落ちや剪断工程における能率悪化の原因にもなっている。

従来、圧延途中に発生するキャンバーに対しては、圧延オペレータが圧延中にキャンバーの有無を目視で判断し、左右ロール開度差を適宜調節していた。しかし、勘と経験に頼るこの方法では、キャンバーを修正しきれなかった。

そこで近年、圧延におけるキャンバー発生機構、さらにその制御についての研究が、数多く行われるようになってきた¹⁻⁷⁾。現在、キャンバーの防止方法は2種類に分類できる。

一つは、蛇行制御である^{4,5)}。これは、鋼板の蛇行（圧延中に生ずる鋼板噛み込み位置のずれ）を防止することによって、蛇行が原因で発生するキャンバーを抑制する方法である。この方法は、現在、主としてストリップミルに適用されている。しかし、この欠点は一旦発生してしまったキャンバーを修正することができないこと

要旨

水島製鉄所厚板工場では、独自の鋼板キャンバーの測定および制御方法を開発し、実操業へ適用している。測定方法の特徴は、次の2点にある。(1)ミルの直近で、圧延中の鋼板の蛇行の影響を受けることなくキャンバーが測定できる。(2)キャンバー形状を n 次多項式で表現することにより、実際の鋼板の形状を忠実にかつ制御に利用しやすい形で表現できる。

制御方法の特徴は、圧延途中でキャンバーを測定し、その結果から次パスの目標ウェッジを算出し、そのパスでウェッジを制御することによってキャンバーを修正する点にある。本システムは、すでに順調に稼動しており、歩留りの向上、格落ちの減少、剪断工程における能率の向上に寄与している。

Synopsis:

New, unique measuring and control techniques of plate camber have been developed and utilized in the plate mill of Mizushima Works. Features of the techniques are as follows:

- (1) Plate camber can be measured regardless of sideslipping or turning of a plate during rolling.
- (2) Any nonuniform plate camber profile can be accurately expressed in the form of the n -th order polynomial.
- (3) The measured camber is used to calculate the aimed wedge, to which the actual wedge is fed back by a feedback control system, thereby reducing the plate camber in the next pass.

A new control system, which adopted the above-mentioned techniques, has been successfully used and contributing to an increase in yield and a reduction in poor grading and extra processing of plates in the mill.

である。

もう一つは、圧延途中でキャンバーを実測し、その後の圧延パスでキャンバーを修正する方法である^{6,7)}。この方法は測定後制御するので、厚板圧延のような可逆式圧延に適している。

水島製鉄所厚板工場では、後者によるキャンバー制御方法の研究に取り組んできた。その結果、独自のキャンバー測定方法ならびに制御方法を開発した。すでにこのキャンバー制御は工程化され、歩留りの向上と格落ちの減少ならびに剪断工程における能率の向上に寄与している。

本報では、厚板ミルにおけるキャンバー測定方法および制御方法、ならびに実圧延での適用結果について報告する。

2 キャンバーの測定

キャンバー測定にあたっては、まず以下の課題があった。

- (1) 圧延能率を下げないために、できるだけミルの近くで測定で

* 昭和61年2月6日原稿受付

きること。

- (2) 圧延中の鋼板の蛇行等の影響を受けないこと。
- (3) 鋼板の曲がりは長さ方向に必ずしも一様ではないから、それをできる限り忠実に表現できること。
- (4) 測定結果を直ちに制御へ生かせるように、キャンパーが簡潔な関数形式で表現できること。

当所では、鋼板の幅方向中央位置を計測する装置（以下オフセンター計と呼ぶ）を圧延ライン長手方向に3台設置し、鋼板のキャンパー形状を n 次の多項式で表現することによって、上記の課題を解決した。以下でその詳細について述べる。

2.1 測定の原理

Fig. 1 に基づいて測定の原理を説明する。図で、 x 軸が鋼板の長さ方向、 y 軸が幅方向に対応しており、 x_a, x_b, x_c の位置にオフセンター計が設置されているものとする。 x_a と x_c 、 x_a と x_b の距離をそれぞれ L_1, L_2 とする。

いま、鋼板のキャンパー形状が n 次の多項式

$$y = F(x) \\ = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされるものと仮定する。圧延中は、この鋼板が横滑りや回転運動をしながら x 軸の正方向へ進んでいく。ここでは、説明を簡単にするため、横滑り、回転運動がないと仮定する。

ある瞬間に3台のオフセンター計で測定した鋼板の位置をA, B, Cとする。点A, Bを通る直線 l と直線 $x = x_c$ との交点をDとする。このとき、CとDの距離 M は次のように表わせる。

$$M = F(x_c) - H(x_c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

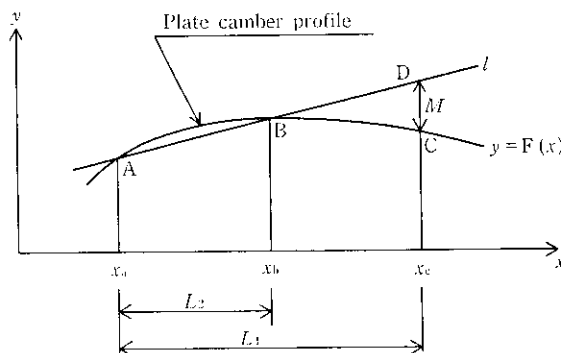
ここで、 $y = H(x)$ は直線 l の式であって

$$H(x) = \frac{F(x_b) - F(x_a)}{L_2}x + \frac{F(x_a)x_b - F(x_b)x_a}{L_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。

鋼板が x 軸正方向へ移動するにつれて M の値は変化する。鋼板が現在より s 移動したときの M の値を $G(s)$ とすれば、曲線 $m = G(s)$ は鋼板の移動にともなう M の変化を表わすことになる。式(1), (3)を式(2)に代入し、さらに x_a, x_b, x_c をそれぞれ $x_a - s, x_b - s, x_c - s$ と書き換えると、 $G(s)$ が求まり、これは $(n-2)$ 次の多項式となる。

$$G(s) = b_0 + b_1s + \dots + b_{n-2}s^{n-2} \quad \dots\dots\dots (4)$$



x_a : Position of No.1 off-center meter
 x_b : Position of No.2 off-center meter
 x_c : Position of No.3 off-center meter

Fig. 1 Principle of measurement

ここで、係数 $b_0, b_1, \dots, b_{n-2}$ は式(1)の係数 $a_2, a_3, \dots, a_n$ の線形結合として表わされる。

$$b_i = \sum_{j=2}^n C_{ij}(x_a, L_1, L_2) \cdot a_j \quad (i=0, 1, \dots, n-2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

C_{ij} は x_a, L_1, L_2 の関数である。

以上のことから、キャンパー形状を表わす多項式 $y = F(x)$ は、以下の手順で求めることができる。

- (1) 鋼板の移動につれて変化する M を追跡する。そして M の変化を式(4)のごとく $(n-2)$ 次の多項式で近似し、 $b_0, b_1, \dots, b_{n-2}$ を求める。
- (2) 連立方程式(5)を解いて、 $a_2, a_3, \dots, a_n$ を求める。
- (3) 鋼板の形状を式(1)で表わせば、任意の2つの測定点 x_1, x_2 において

$$\left. \begin{aligned} F(x_1) &= a_0 + a_1x_1 + \sum_{j=2}^n a_jx_1^j \\ F(x_2) &= a_0 + a_1x_2 + \sum_{j=2}^n a_jx_2^j \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成立する。そこで2つの実測オフセンター量 $F(x_1), F(x_2)$ と既に導出した $a_2, a_3, \dots, a_n$ を式(6)に代入し、この連立方程式を解いて a_0, a_1 を求める。

ところで、これまでの説明では鋼板の横滑りおよび、回転運動がないと仮定してきた。実際にはこれらの運動が生ずるが、本方法によればこれらの影響は無視できる。以下でその理由を説明する。

まず鋼板の横滑りの影響は全く受けない。なぜなら、 $y = F(x)$ が y 軸方向へ平行移動したとしても、 M の値は変化しないからである。

次に鋼板の回転の影響は微小であり無視してさしつかえない。圧延テーブル上での鋼板の回転は高々 0.3° であり、この程度の回転は高々 1mm 以下の M の値の変化をもたらすだけである。従って、回転による M の測定誤差が $y = F(x)$ の係数の推定に悪影響を及ぼす心配はない。本報では省略するが、別途シミュレーションによっても、回転の影響が無視できることを確認している。

2.2 装置の構成

キャンパーメータ（キャンパー測定装置）の検出部の配置を Fig. 2 に示す。検出部は3台のオフセンター計から構成されている。これらの仕様を Table 1 に示す。Fig. 3 には、キャンパーメータのシステム構成を示す。

3台のオフセンター計により鋼板の幅方向中央位置が計測され、

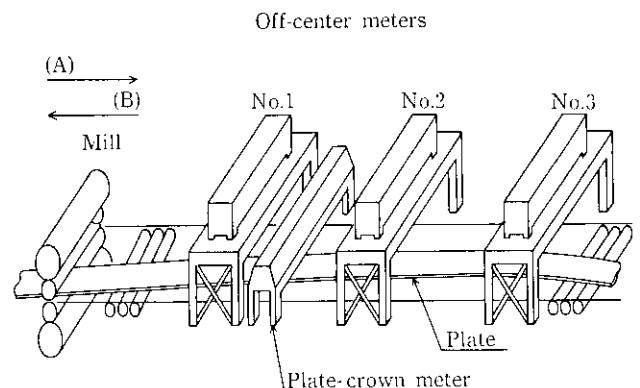


Fig. 2 Arrangement of instruments for camber measurement and control

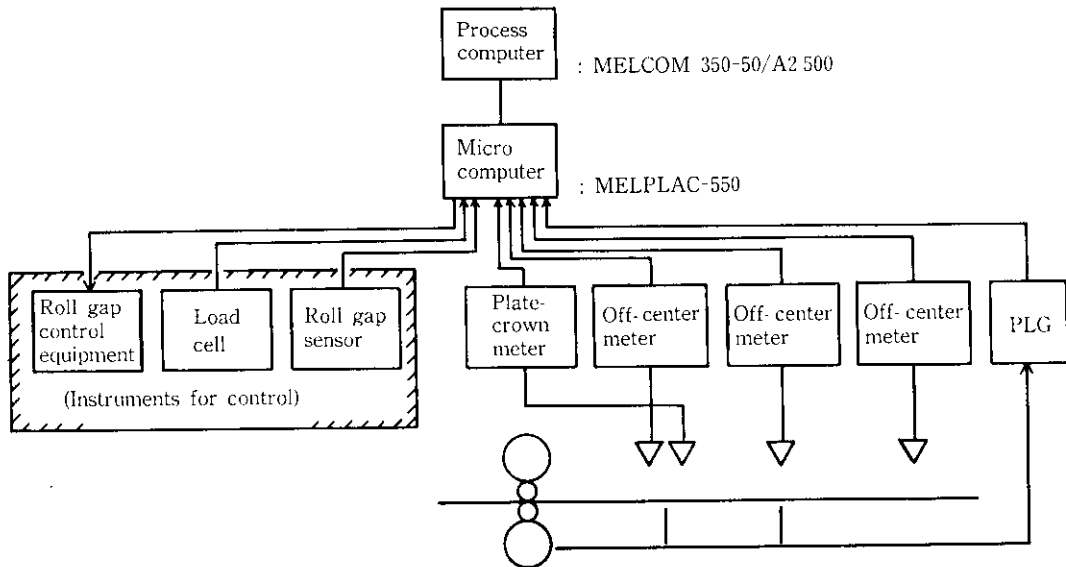


Fig. 3 System configuration for camber measurement and control

Table 1 Specifications of off-center meter

Function	Performance
Measuring range of plate width	1 000 — 5 500 mm
Measuring range of off-center position	± 150 mm
Accuracy	± 2 mm

それをもとにして上位のマイクロコンピュータで距離 M が計算される。これは、プロセスコンピュータへ伝送され、まず $(n-2)$ 次の多項式に近似され、続いて鋼板キャンバーを表わす n 次多項式 $y=F(x)$ の係数 $a_0, a_1, \dots, a_n$ が計算される。こうして求めた形状はキャンバー制御に生かされるほか、オペレータガイダンスとして CRT に図形表示される。

2.3 測定結果

Fig. 4 にキャンバメータによる測定結果の一例を示す。(a) に距離 M の測定値とその近似曲線を、(b) にキャンバー形状の実測値と計算値を示す。なお、 M は 4 次、キャンバー形状は 6 次の多項式で近似した。本キャンバ測定方法によれば、この例のように圧延で発生する多様な曲率を有する曲がり形状を忠実に表現できる。

Fig. 5 には、キャンバメータの測定誤差の分布図を示す。ここでは、鋼板長さ 15 m あたりのいわゆるキャンバ量 (図中の Ca) に換算して評価した。本キャンバメータは、誤差の平均値が 0.79 mm、標準偏差が 2.1 mm という精度を達成することができた。

3 キャンバーの制御

鋼板のキャンバー制御は、キャンバ測定結果にもとづいて行う。まず、キャンバーの測定結果から、キャンバーを修正するために必要な次バスの目標ウェッジ (鋼板左右の厚み差) を算出する。その後、次バスで、目標ウェッジを満足するよう圧延制御する。

以下では、キャンバ制御のために必要なモデルと具体的な制御方法について述べる。

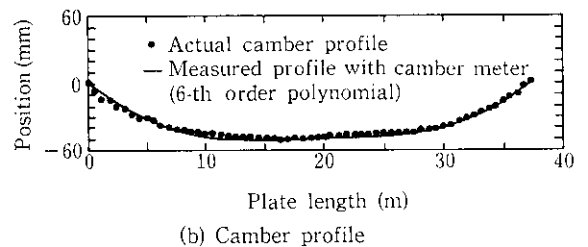
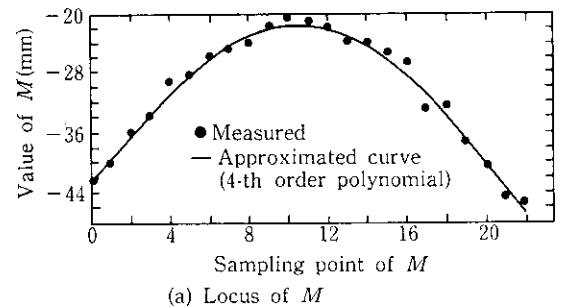


Fig. 4 An example of camber profile measurement

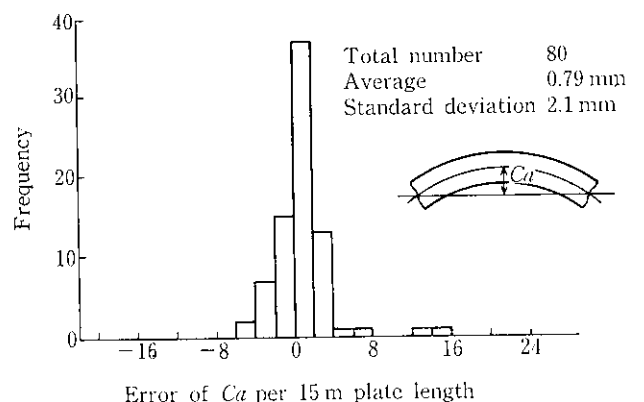


Fig. 5 Histogram of measurement error with camber meter

3.1 キャンパー制御のためのモデル

キャンパーを制御するために次の2つのモデルを作成した。

- (1) 圧延の結果発生する鋼板のキャンパーとウェッジとの関係を表わすモデル: このモデルは、鋼板のキャンパー形状からこれを修正するための目標ウェッジを算出するために使われる。
 - (2) 圧延中のウェッジを観測するためのモデル: このモデルは目標通りにウェッジを制御するために使われる。
- これらのモデルについて以下で詳しく述べる。

3.1.1 キャンパーとウェッジの関係式

(1) 基本モデル

圧延における幅方向メタルフロー等の3次元変形を考えない場合には、両者の関係は圧延材の左右伸び差から一義的に決まり、次式で表現できる。

$$\rho_1 = \frac{1}{\lambda^2} \left(\rho_0 + \frac{\Delta\phi}{B} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda = \frac{h}{H}$$

$$\Delta\phi = \frac{h_{df}}{h} - \frac{H_{df}}{H}$$

ρ_1 : 出側キャンパー曲率

ρ_0 : 入側キャンパー曲率

λ : 圧延による伸び比

$\Delta\phi$: ウェッジ比率変化

B : 板幅

h : 出側板厚

H : 入側板厚

h_{df} : 出側ウェッジ (ワーク側板厚 - ドライブ側板厚)

H_{df} : 入側ウェッジ (ワーク側板厚 - ドライブ側板厚)

(2) モデルミルによる検証

実際の圧延においては、3次元変形の影響を受け、特に板厚の厚い範囲でキャンパーの緩和が生じると考えられる。

そこで、キャンパーとウェッジの関係を定量的に把握するために、まず純鉛を用いたモデル実験を行った。実験では、ウェッジのないまっすぐな板を左右ロール開度差をつけて常温で圧延した。実験ミルの仕様および実験条件を Table 2 に示す。実験材厚み、およびモデルミルのロール径は、実機の 1/6 相当である。

Table 2 Rolling conditions in model mill

Specifications of model mill	Type of model mill		2 Hi
	Work roll diameter		200 mmφ
	Work roll barrel length		500 mm
Conditions of experiment	Material		Pure lead
	Dimensions of specimen	Thickness	2, 4, 8 mm
		Width	150, 250, 350 mm
		Length	500 mm
	Wedge ratio		0, 3, 6, 10%
	Reduction ratio		10, 20%

Fig. 6 はキャンパー曲率の実測値と計算値とを比較したものである。計算値は実測ウェッジを用いて式 (7) から求めたものである。実測値と計算値とはよく一致しており、これは中島ら³⁾によ

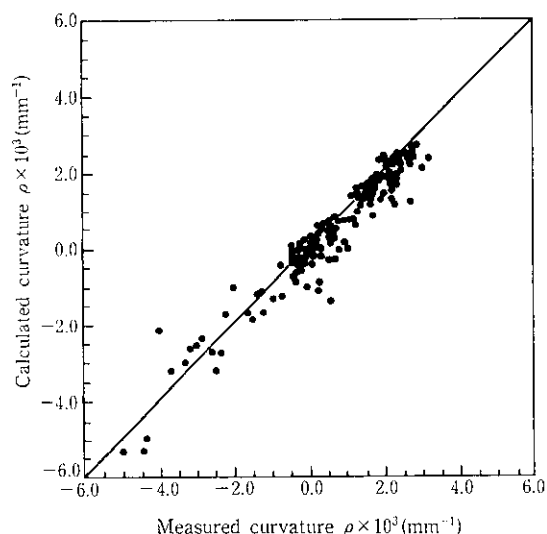


Fig. 6 Comparison of curvature ρ between calculated and measured values (lead rolling)

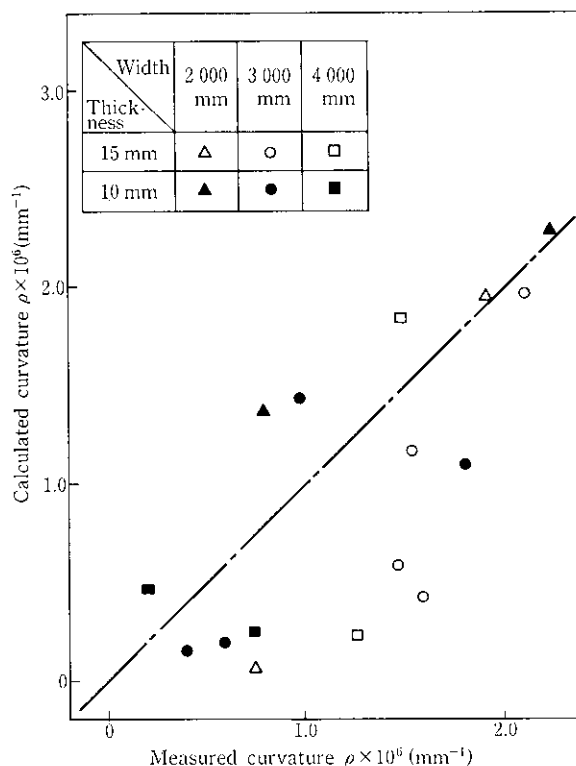


Fig. 7 Comparison of curvature ρ between calculated and measured values (steel rolling)

て得られた結果とも符合する。また、板厚による傾向差は認められず、本実験範囲では幅方向メタルフローによるキャンパーの緩和現象は認められなかった。

(3) 実機ミルによる検証

次に、実圧延におけるキャンパーとウェッジの関係を求めるために実機を用いた実験を行った。実験では、圧延最終パスにおいて左右ロール開度差をつけて圧延し、キャンパーを故意に発生させた。なお、最終パスの前後におけるキャンパーとウェッジは、それぞれキャンパーメータ、クラウンメータを使って測定した。実験材は板幅 2000, 3000, 4000 mm, 板厚 10, 15 mm の普通鋼である。

Fig. 7 はキャンパー曲率の実測値と計算値とを比較したもので

ある。計算値は式(7)から求めたものである。両者は定性的には一致しており、板厚と板幅による顕著な差は認められない。

Fig. 6 と 7 とを比較すると、実機実験結果のばらつきは鉛モデル実験に比べ大きくなっている。この原因は次のように考えられる。

- (1) 鉛モデル実験では、大きなウェッジを作ったので発生キャンバーが大きくなり、それに比べ幅方向メタルフローによる影響はその絶対値が小さいので顕著に表に出なかった。
- (2) 実機実験では、ウェッジを小さな値に抑えたので発生キャンバーが小さく、幅方向メタルフローによる影響などが顕著に表に出てきた。

この問題については、実際の圧延において板幅、板厚に応じてモデル式を調整することにより対処した。

3.1.2 ウェッジ観測モデル

本モデルは、圧延中のウェッジを観測するモデルである。ダイナミックな制御系の中に組み込まれるので演算速度の早さが要求され、式の単純化が必要となる。モデル作成に際しては、精度の維持とともに単純化という点に留意した。

(1) 基本モデル

Fig. 8 はロール変形を無視した場合の圧延機の変形状態を示す。圧延材の蛇行、圧延機の左右ミル定数差、左右ロール開度差、ワークロールクラウン量を考慮し、圧延材とミルの力学的関係から次のような基本モデルが得られる。

$$h_{df} = \left(\frac{P_w}{K_w} - \frac{P_D}{K_D} \right) \frac{B}{l_0} + S_{df} \frac{B}{l_0} + 4C_w \sin\left(\frac{\delta}{W}\pi\right) \sin\left(\frac{B}{2W}\pi\right) \quad (8)$$

P_w : ワーク側圧延荷重

P_D : ドライブ側圧延荷重

K_w : ワーク側ミル定数

K_D : ドライブ側ミル定数

B : 板幅

S_{df} : 左右ロール開度差 (ワーク側ロール開度 - ドライブ側ロール開度)

C_w : ワークロールクラウン

W : ロールバレル長

l_0 : ロールショック間距離

δ : 蛇行量 (鋼板幅方向中央位置の圧延機中央位置からのずれ。オフセンター量とも呼ぶ。ワーク側へのずれを正とする。)

(2) 分割モデルによるシミュレーション

先にロール変形を無視してモデル式を作成したが、実際にはロールのたわみや偏平等の影響を受けるためこれに起因する誤差が生じる。そこで分割モデル⁹⁾によるシミュレーションを行い、基本モデルとシミュレーション結果との差から補正式を作成した。

Fig. 9 は蛇行量、左右ロール開度差およびウェッジの関係をシミュレーションで求めたものの一例である。ウェッジは左右ロール開度差と線形な関係を持つ。また、この直線の勾配が蛇行量によらず一定であることから、ウェッジに対する左右ロール開度差と蛇行量の影響とは独立に扱えることがわかる。

Fig. 10 もシミュレーション結果の一例である。蛇行量がウェッジに及ぼす影響はワークロールクラウンによって異なっており、基本モデル式(8)の妥当性が示されている。

以上のシミュレーション結果をもとに基本モデル式(8)を補正し、次に示す式(9)を得た。なお、ここでは入側ウェッジ H_{df} の

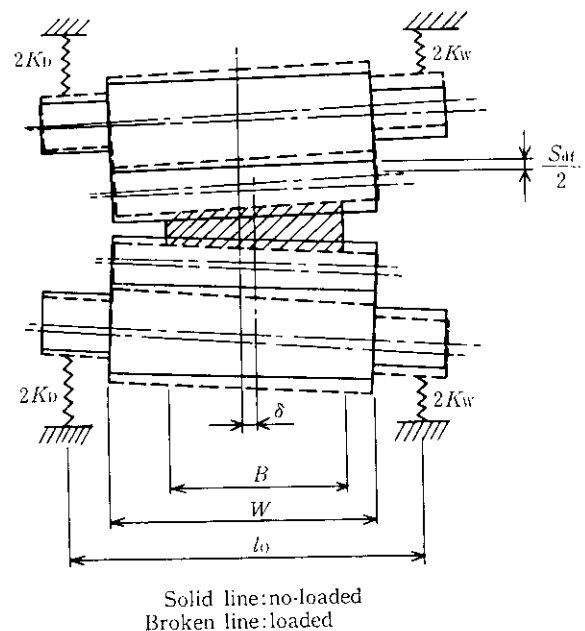


Fig. 8 Wedge model on the assumption that rolls are rigid

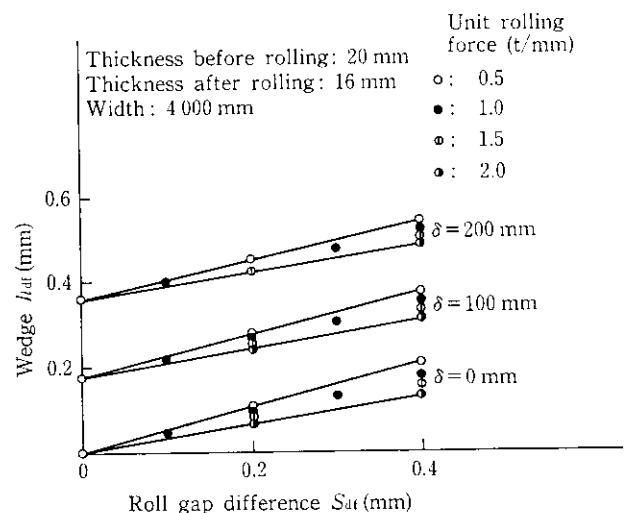


Fig. 9 Relation between wedge h_{df} and roll gap difference S_{df}

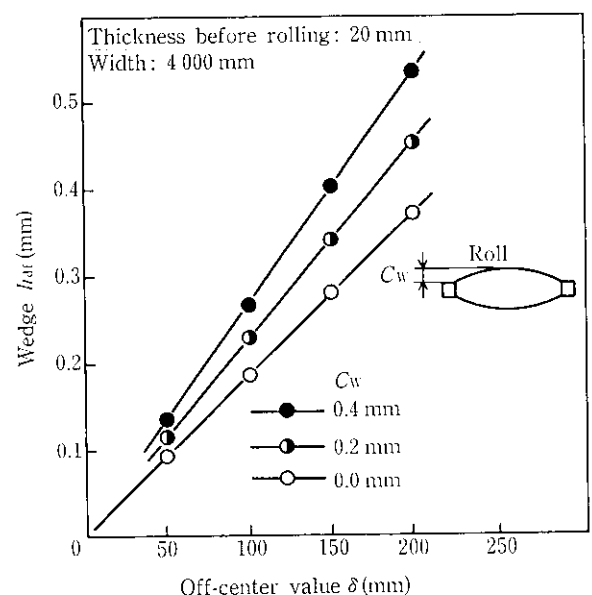


Fig. 10 Influence of work roll crown C_w on wedge h_{df}

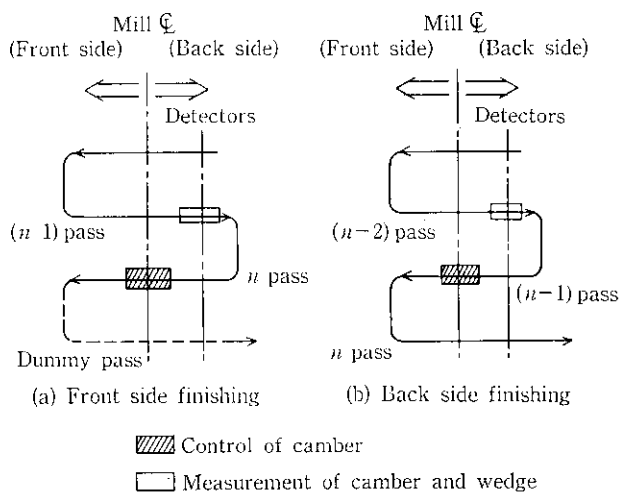


Fig. 14 The timing of camber control

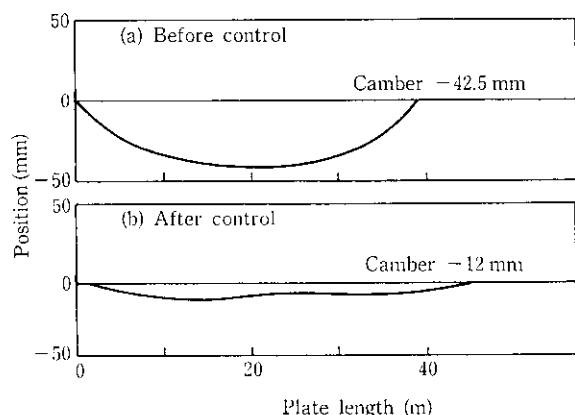


Fig. 15 An example of camber control

を作り、式 (12) から蛇行量の項を消去したウェッジ観測モデルを使っている。

3.3.2 制御結果

厚さ 15 mm の鋼板に対する制御例を Fig. 15 に示す。測定時 42.5 mm あったキャンバーを制御によって 12 mm にまで修正でき効果が明確に出ている。

Fig. 16 に工程圧延でのキャンバー制御実施効果を示す。これは同一ロールチャンスでの圧延結果である。制御ありの場合はばらつ

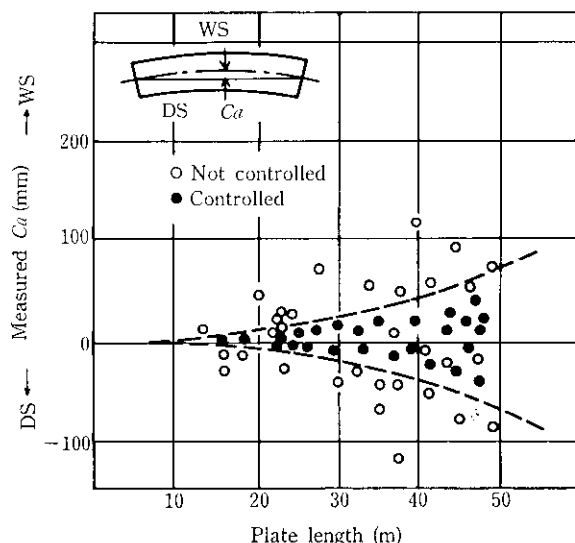


Fig. 16 Effect of camber control

きが半減しており、効果が認められる。鋼板長さ 15 m あたり 5 mm 以内にキャンバーを抑えることができた。

4 結 言

水島製鉄所厚板工場では、独自のキャンバー測定方法、制御方法を開発し、実操業への適用を実現した。本キャンバーメータとキャンバー制御の特徴を以下にまとめる。

- (1) ミルの直近で、圧延中の鋼板の蛇行や回転の影響を受けることなく、キャンバーを測定できる。
- (2) 鋼板キャンバーを n 次の多項式で表現することにより、実形状を忠実に表現でき、直ちに制御に反映できる。
- (3) キャンバー測定結果から目標ウェッジを算出し、次パスでウェッジのフィードバック制御を行ってキャンバーを修正する。

なお、本システムは順調に稼働しており、キャンバーの減少に効果があり、歩留りの向上、格落ちの減少、剪断工程における態率の向上に寄与している。

最後に、キャンバーメータの開発、制御の実現にあたってご協力いただきました株式会社東芝、三菱電機株式会社の関係者各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 林 千博, 河野輝雄: 「ストリップミルにおけるキャンバ発生機構の解析」, 鉄と鋼, 63 (1977) 2, A 21-24
- 2) А.Г. Стукач: "О прокатке листов в валках, наклоненных друг к другу", Tsvetnye Metally, (1978) 3, 58-60
- 3) 中島浩衛, 梶原利幸, 菊間敏夫, 木村智明, 松本紘美, 田川昌良: 「ホットストリップ圧延における蛇行制御法の研究 (第1報) —蛇行およびキャンバーの発生機構に関する理論—」, 昭和55年度塑性加工春季講演会, (1980), 61-64
- 4) 中島浩衛, 梶原利幸, 菊間敏夫, 木村智明, 松本紘美, 田川昌良, 増田一郎, 吉本健一: 「ホットストリップ圧延における蛇行制御法の研究 (第2報) —蛇行制御法の原理とその安定性—」, 第31回塑性加工連合講演会, (1980), 471-474
- 5) 中島浩衛, 梶原利幸, 菊間敏夫, 木村智明, 松本紘美, 田川昌良, 白井康好, 吉本健一: 「ホットストリップ圧延における蛇行制御法の研究 (第3報) —各種外乱下での蛇行制御特性—」, 昭和56年度塑性加工春季講演会, (1981), 147-150
- 6) 浜崎修一, 山田健二, 川並高雄: 「板圧延のキャンバー制御 (第1報, キャンバー形状測定モデルの開発)」, 第36回塑性加工連合講演会, (1985), 169-172
- 7) 山田健二, 浜崎修一, 川並高雄: 「板圧延のキャンバー制御 (第2報), キャンバー形状測定およびキャンバー制御実験結果」, 第36回塑性加工連合講演会, (1985), 173-176
- 8) 芥田友彦, 高橋英雄: 「圧延材のオンライン曲り量計測システム」, 第20回 SICE 学術講演会, (1981), 413-414
- 9) K. N. Shoet, N. A. Townsend: JISI, 206 (1968) 11, 1088