

技術報告 厚板圧延におけるキャンバー制御技術の開発

大森 和郎*・井上 正敏*・三宅 孝則*

田中 佑児*・西崎 克己*²

Development of Camber Control Technique in Plate Rolling

Kazuo OHMORI, Masatoshi INOUE, Takanori MIYAKE,
Yuji TANAKA and Katsumi NISHIZAKI

Synopsis:

In plate rolling, camber is a cause of not only yield loss and poor grade, but also an extra process at the shearing line, calling for an establishment of a camber control technique.

This report presents the analysis of camber mechanism, the development of camber-meter and the effect of camber control in the Mizushima plate mill. The results obtained are as follows;

1) Relation between camber and wedge in plate rolling and factors affecting wedge mechanism were clarified, and high-accuracy models applicable to camber control were developed.

2) Plate camber can be measured accurately regardless of sideslipping or turning of a plate during rolling by a developed camber measuring system (camber meter).

3) A dynamic camber control technique using camber meter and camber control model was developed. Camber is reduced noticeably in various plate length by applying this control technique.

1. 緒 言

厚板圧延における平面形状のうち、キャンバー（横曲がり）は歩留りロス、格落ちの原因になるばかりでなく、ガス切り等のシャーライン側での不要工程発生の一因にもなっている。

圧延におけるキャンバーの発生に対しては、種々の要因が影響しており、それぞれの影響度を分離して評価できないためこれまで十分な制御がなされていなかった。

また、オンラインで精度よくキャンバーを測定できるセンサーがなかったことも、キャンバーの修正制御を阻害する一因になっていた。

近年、キャンバー発生機構およびその制御方式に関する研究が盛んに行われているが^{1)~7)}、実機に適用するには至っていない。

そこで、当所においてはキャンバーの修正制御を目的として、キャンバー発生特性の解析と制御モデルの構築、キャンバースタットの開発を行い、実機仕上ミルのキャンバー制御システムを確立した。

2. キャンバー発生要因と制御原理

キャンバーの発生要因としては Table 1 に示すような種々の要因が考えられる。

これらの要因は単独に影響する場合もあるが、複数の要因が影響し合つてキャンバーの発生を引き起こしている場合が多い。特に、蛇行によるオフセンター圧延、入側の左右板厚差、入側のキャンバー形状については、その影響を独立かつ定量的に評価できていないのが実状であつた。

また、入側のキャンバー形状等に対する高精度センサーのないこともキャンバーの修正制御を困難にしていた。

キャンバーを防止する方法としては大きく分けて、

1) 圧延材の蛇行を防止することによつて、蛇行に起因するキャンバーを抑制する方法⁴⁾⁵⁾。

2) 発生したキャンバーを実測し、次パス圧延時に修正制御する方法⁶⁾⁷⁾。

の二つが挙げられる。

このうち、蛇行制御による方法は主としてストリップミルに適用されているが、この方法では一度発生したキ

昭和 61 年 1 月 30 日受付 (Received Jan. 30, 1986)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidoru Kurashiki 712)

*2 川崎製鉄(株)ハイテク研究所 (High-Technology Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Causes of plate camber.

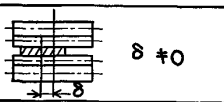
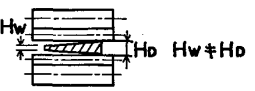
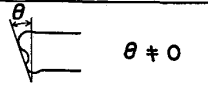
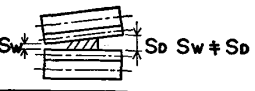
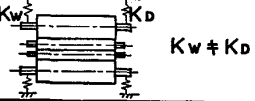
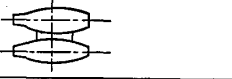
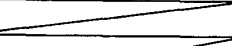
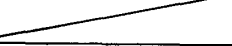
Causes of plate camber	Schematic drawing
Off-center rolling	 $\delta \neq 0$
Wedge before rolling	 $H_w \neq H_b$
Asymmetric crop profile	 $\theta \neq 0$
Roll gap difference	 $S_w \neq S_o$
Difference of mill moduli	 $K_w \neq K_d$
Asymmetric roll profile	
Malfunction of mill hardware	
Difference of plate temperature distribution	

Table 2. Specification of off-center meter.

Function	Performance
Measuring range of plate width	1000 ~ 5500 mm
Measuring range of width deviation	± 100 mm
Measuring range of off-center	± 150 mm
Accuracy	± 2 mm
Sampling time	33 m sec

キャンバーを修正できない。

2) の実測キャンバーにもとづく方法は、同一圧延材に測定結果が適用されるため、厚板圧延のような可逆式圧延には適している。当所においても本方式によるキャンバー制御技術の開発を進めてきた。

3. キャンバー測定装置

キャンバー測定装置開発のポイントは、

- 1) ミル直近に設置可能なこと。
- 2) 圧延中の板の蛇行と回転の影響を受けないこと。
- 3) 圧延材の長手方向の曲がり変化をできるだけ忠実に表しうること。
- 4) 制御系への適用を考慮し、キャンバー形状が関数

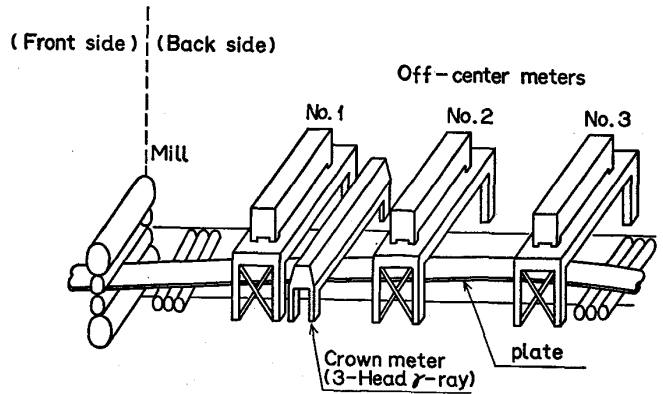


Fig. 1. Detectors of camber meter.

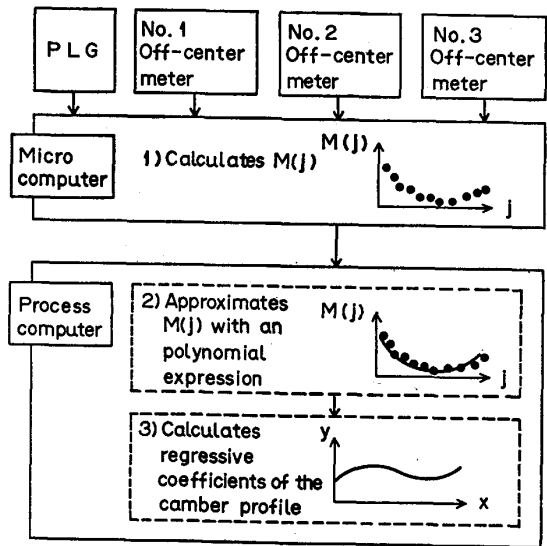


Fig. 2. Process flow of camber-meter.

形で表現できること。

である。これらの条件を満足するセンサーとしてキャンバーメーターを開発し、ミル直近に設置している。

3.1 装置の構成

Fig. 1 にキャンバーメーターの検出部の構成を示す。検出部は圧延ラインセンターを基準にして鋼板センター位置（オフセンター位置）を測定するオフセンター計3台から構成されている。オフセンター計の仕様を Table 2 に示す。

Fig. 2 に示すように、測定されたオフセンター量は鋼板が一定距離搬送されるごとにサンプリングされ、マイコンにて“M”（後述）という値に変換される。データ M はプロセスコンピューターに伝送され、 $(n-2)$ 次の多項式に近似される。さらに、この結果から板キャンバーを表す n 次多項式のパラメーターが求められる。

3.2 測定原理

Fig. 3 にもとづいて測定原理を説明する。

Fig. 3 において、 x 軸が鋼板の長さ方向、 y 軸が幅

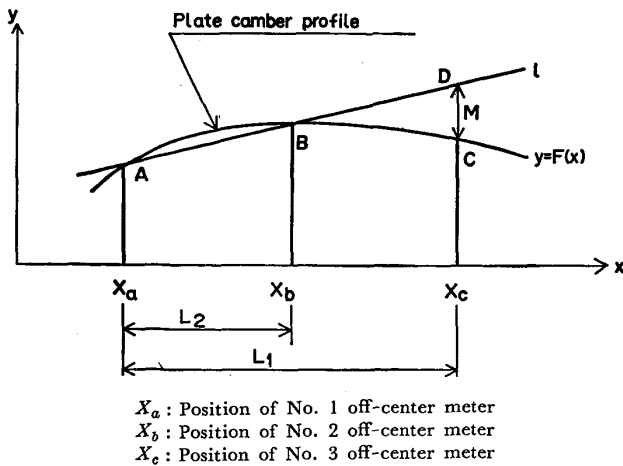


Fig. 3. Principle of measurement.

方向に対応しており、 x_a, x_b, x_c はそれぞれ3台のオフセンター計位置を表している。

ここで鋼板の形状を n 次の多項式

$$y = F(X) = a_0 + a_1 X + \dots + a_n X^n \dots\dots\dots (1)$$

と仮定する。圧延中はこの鋼板が x 軸の正方向に進んでいく。

ある瞬間に3台のオフセンター計で測定した鋼板のセンター位置を A, B, C とし、A, B を通る直線 l と直線 $X = x_c$ との交点を D とし、このときの C と D の距離を M と定義する。

圧延材が ΔX 進行したとき M の値は、

$$M = G(\Delta X) = \frac{L_2}{L_1} \cdot \{F(\Delta X + L_1) - F(\Delta X)\} + F(\Delta X) - F(\Delta X + L_2) \dots\dots\dots (2)$$

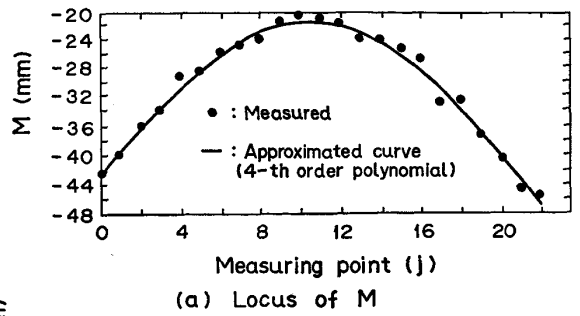
と表される。この M 値は3点 A, B, C の相対的位置関係を表す量である。ここで(1)式を(2)式に代入すると、

$$M = G(\Delta X) = b_0 + b_1 \cdot \Delta X + \dots + b_{n-2} \cdot \Delta X^{n-2} \dots\dots\dots (3)$$

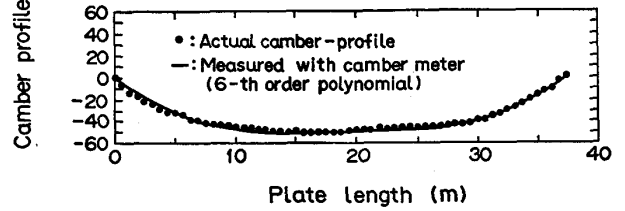
と表すことができる。ここで係数 b_i は係数 a_2 から a_n までの線形結合となる。

したがって、まず鋼板の進行とともに一定長さピッチで M を測定し、この軌跡を $(n-2)$ 次の多項式に近似することによつて b_0, b_1, \dots, b_{n-2} を求め、これから a_2, a_3, \dots, a_n を測定することができる。 a_0, a_1 については同一タイミングで測定された A, B, C のうち任意の2点の測定値を用いて決定することができる。

この方法によれば、圧延材の回転あるいは平行移動による影響を受けないため、圧延中の鋼板に対しても精度よく板プロファイルの測定ができる。



(a) Locus of M



(b) Camber profile

Fig. 4. An example of camber profile measurement.

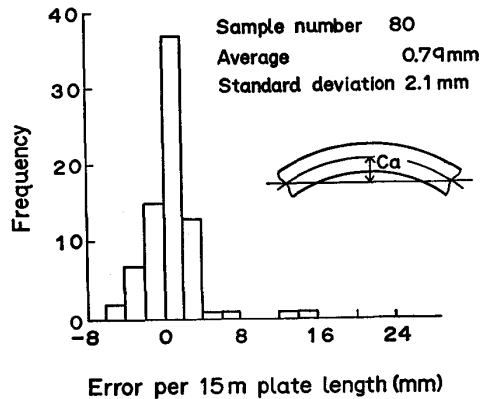


Fig. 5. Histogram of measurement error with camber meter.

3.3 測定結果

Fig. 4 にはキャンバメーターによる実機での測定例を示す。本測定例はキャンバ形状を6次の多項式として求めたものである。

鋼板のキャンバは、長手方向に必ずしも一様でないが、本装置はこのような場合でも精度よく測定できている。

Fig. 5 はキャンバメーターによる板キャンバの測定誤差の分布を示したものである。ここでは鋼板 15 m あたりのキャンバ量に換算して評価している。標準偏差は 2.1 mm におさまっており、十分な精度が得られている。

4. 制御モデルの構成

キャンバを制御するためのモデルは、

1) 入側キャンパー形状, 入側ウェッジ(左右板厚差)をもとに目標ウェッジを算出するためのキャンパーとウェッジの関係式.

2) 圧延材のウェッジを目標ウェッジに制御するためのウェッジ制御モデル.
で構成されている.

これらのモデルについて, 鉛モデル実験および分割モデル⁹⁾によるシミュレーションから得られた結果, 実機検証結果について述べる.

4.1 キャンパーとウェッジの関係式

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.

$$\rho = (1/\lambda^2) \cdot (\rho_0 + \Delta\phi/B) \quad \dots\dots\dots (4)$$

λ : 伸び比 ($=H/h$)

$\Delta\phi$: ウェッジ比率変化 ($=h_{df}/h - H_{df}/H$)

ρ : 出側キャンパー曲率

ρ_0 : 入側キャンパー曲率

B : 板幅

h : 出側板厚

H : 入側板厚

h_{df} : 出側ウェッジ

H_{df} : 入側ウェッジ

(4)式は圧延機入側でウェッジが発生し, これがすべて圧延材の曲がりになると仮定して導いたものであるが, これは中島ら³⁾による圧延材の蛇行特性を表す関係式において, 先進率を0, 幅方向メタルフローがないものとして導いた結果とも一致する.

しかしながら, 実際の圧延においては3次元変形の影響を受けるためウェッジ比率変化がそのまま出側のキャンパーとなつて現れるのではなく, 特に板幅比(板幅/板厚)の小さい範囲でキャンパー発生傾向が緩和されると考えられる.

そこで, 実圧延における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. 実験ミル仕様および実験条件を Table 3 に示す. 実験材厚みおよびモデルミルロール径は実機の1/6相当である.

Fig. 6 はキャンパー曲率の実測値と計算値を比較したものである. 計算値は実測ウェッジを用いて(4)式から求めた. 実測値と計算値はよく一致しており, 本実験範囲では幅方向メタルフローによるキャンパー発生傾向の緩和は生じていないと推察される. また, 板厚, 板幅による傾向差も認められなかつた.

次に, 熱間鋼におけるキャンパーとウェッジの関係を

Table 3. Rolling conditions in model mill.

Specifications of model mill	Type of model mill	2 Hi	
	Work roll dia.	φ 200 mm	
	Work roll barrel length	500 mm	
Conditions of experiment	Material	Pure lead	
	Dimensions of specimen	Thickness (t)	2, 4, 8 mm
		Width (B)	150, 250, 350 mm
		Length (L)	500 mm
	Wedge ratio	0, 3, 6, 10 %	
Reduction ratio	10, 20 %		

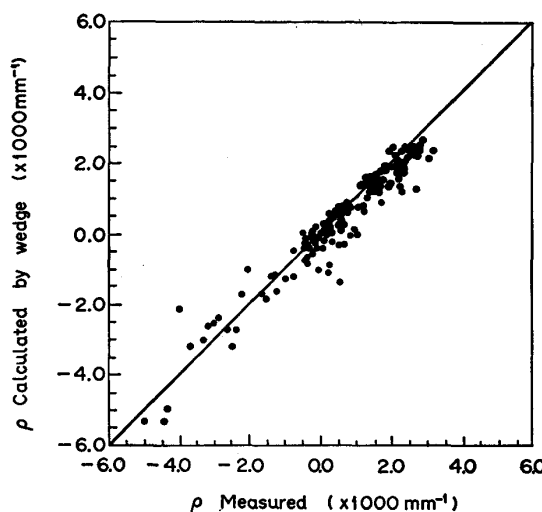


Fig. 6. Comparison of curvature ρ . between calculated and measured values.

求めるために実機実験を行った. 実験は圧延最終パスにおいてレベリング操作し, 故意にキャンパーを発生させることにより行った. 実験材は板幅 2000, 3000, 4000 mm, 板厚 10, 15 mm の普通鋼である. なお, 入出側のキャンパー, ウェッジはそれぞれキャンパーメーター, r 線厚み計で測定した.

Fig. 7 はキャンパー曲率の実測値を(4)式による計算を比較したものである. 両者は大略一致しており, 板厚, 板幅による傾向差もほとんど認められない.

Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると, 実機実験でのばらつきが鉛実験に比べて大きくなっている. これは, 鉛実験ではウェッジ比率変化を大きくとつたのに対し, 実機実験ではウェッジ比率変化が小さいことに起因すると思われる. 後述する実機制御系においては板厚, 板幅に応じたゲインの調整機能をもたせてこれに対処している.

以上得られたモデル式において, 出側キャンパー曲率 $\rho=0$ とおくことによつてキャンパーを修正するための目標ウェッジを得ることができる.

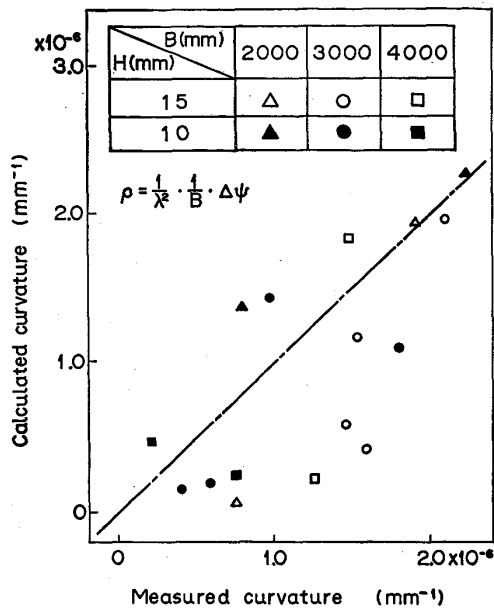


Fig. 7. Comparison of curvature between calculated values and measured values.

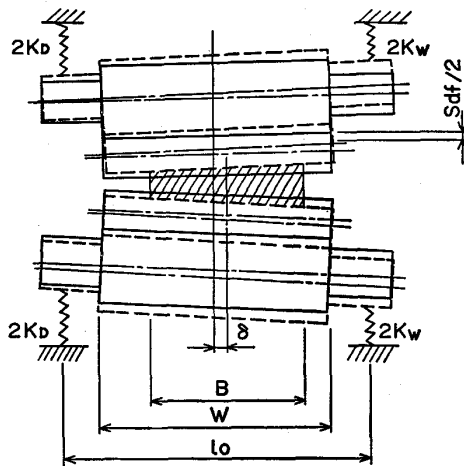


Fig. 8. Wedge model on the assumption that rolls are rigid.

4.2 ウェッジ制御モデル

キャンバーの直接的な発生要因となるウェッジ発生特性のモデル化を行った。モデル化に際しては、オンラインでのダイナミック制御系に組み込むことを考慮して精度の維持とともに単純化という点にも留意した。

4.2.1 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したものである。圧延材の蛇行、圧延機の左右ミル定数、左右ロール開度差、ワークロールクラウン量を考慮し、圧延材とミルとの力学的関係から基本モデル式を導いた。

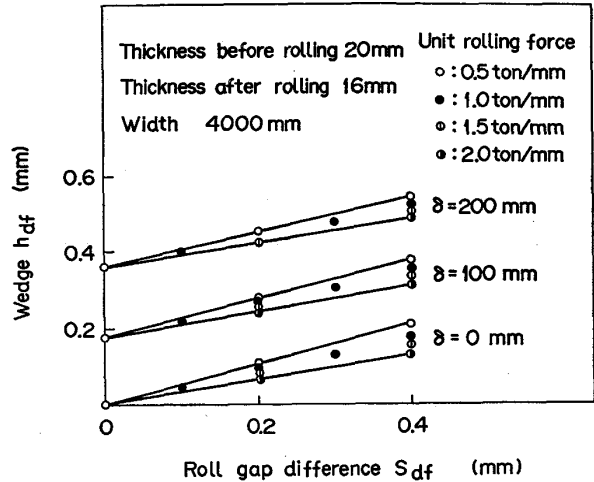


Fig. 9. Relation between wedge h_{df} and roll gap difference S_{df} .

$$h_{df} = \left(\frac{P_W}{K_W} - \frac{P_D}{K_D} \right) \frac{B}{l_0} + S_{df} \frac{B}{l_0} + 4 \cdot C_W \cdot \sin\left(\frac{\delta}{W} \pi\right) \cdot \sin\left(\frac{B}{2W} \pi\right) \dots \dots \dots (5)$$

- h_{df} : 出側ウェッジ
- P_W : 操作側圧延荷重
- P_D : 駆動側圧延荷重
- K_W : 操作側ミル定数
- K_D : 駆動側ミル定数
- B : 板幅
- S_{df} : 左右ロール開度差
- C_W : ワークロールクラウン (半径)
- W : ロールバレル長
- δ : オフセンター量
- l_0 : ロールチャック間距離

4.2.2 計算機シミュレーション

前項では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、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係数式を作成した。

Fig. 9 はオフセンター量、左右ロール開度差とウェッジの関係をシミュレーションで求めた結果の一例である。ウェッジは左右ロール開度差と線形な関係をもっている。また、この直線の勾配がオフセンター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オフセンター量の影響は独立に扱いうることがわかる。

Fig. 10 もシミュレーション結果の一例である。オフセンター量がウェッジに及ぼす影響度はワークロールク

ラウン量によつて異なっており、基本モデル式 ((5) 式) 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の補正を行い、次に示す(6)式を得た。なおここでは入側ウェッジ H_{df} の影響についても考慮している。

$$h_{df} = (e_1 + e_2 \cdot f_2(C_w)) \cdot f_1(\delta) + e_3 \cdot f_3(P_{df}) + e_4 \cdot f_4(S_{df}) + e_5 \cdot f_5(H_{df}) \dots \dots \dots (6)$$

$e_1 \sim e_5$: 基本モデル補正係数式

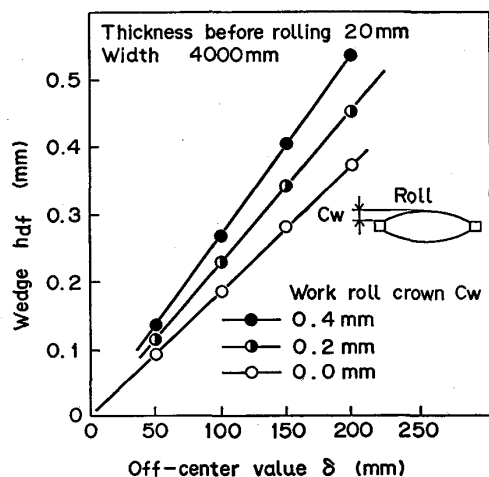


Fig. 10. Influence of work roll crown C_w on wedge h_{df} .

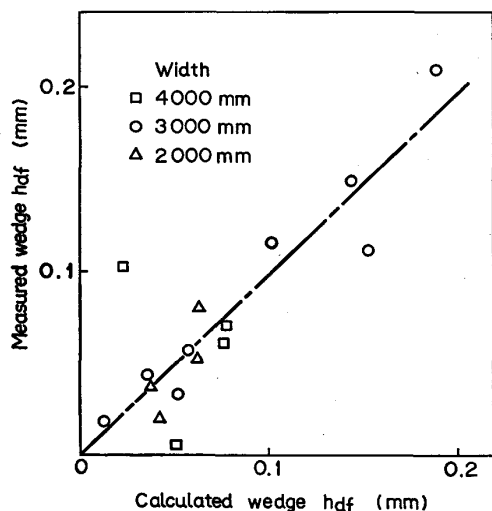


Fig. 11. Comparison of wedge h_{df} between calculated and measured values.

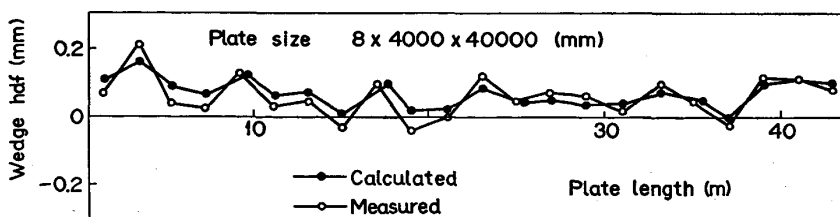


Fig. 12. Comparison of plate wedge between measured and calculated.

$f_1 \sim f_5$: 基本モデル

4.2.3 モデル検証結果

ウェッジ制御モデル ((6)式) を熱間鋼による実験で検証した結果を Fig. 11 に示す。計算値は(6)式で求め、実測値は圧延後マイクロメーターで測定した値である。実験内容は前節のキャンバー発生実験と同一である。種々の圧延条件あるいはロールチャンスによらず、計算値と実測値はよく一致している。

Fig. 12 に板長さ方向のウェッジ変化実測値と計算値の比較例を示す。板長さ方向のウェッジ変化に対してモデル式による計算値はよく対応しており、制御に用いるための精度は十分に得られている。

5. 実圧延への制御適用結果

本章では、実圧延にキャンバー制御を適用した結果について、制御システムの概要、実圧延での制御精度を中心に述べる。

5.1 制御システムの概要

実圧延におけるキャンバー制御の主軸となるロジックおよび数式モデルとしては前章までに述べてきた以下のものがある。

- 1) キャンバー測定ロジック
- 2) キャンバーとウェッジの関係式

入側キャンバー曲率 (ρ_0)、3ヘッド型 γ 線厚さ計で測定された入側ウェッジ (H_{df}) をもとにキャンバー修正に必要な目標ウェッジ (h_{df}^*) を求める。

$$h_{df}^* = (H_{df}/H - \rho_0 \cdot B) \cdot h \dots \dots \dots (7)$$

- 3) ウェッジ制御モデル

圧延中のウェッジ (\hat{h}_{df}) を左右ロール開度差 (S_{df})、左右圧延荷重差 (P_{df}) の情報から演算する。

$$\hat{h}_{df} = b_1 \cdot P_{df} + b_2 \cdot S_{df} + b_3 \delta + b_4 \dots \dots \dots (8)$$

$b_1 \sim b_4$: 係数

Fig. 13 に本システムのダイナミック制御系を示す。

制御フローは上記モデルをベースにして、

- 1) キャンバー形状、入側ウェッジの測定。
- 2) 目標ウェッジの算出。
- 3) 目標ウェッジに対する制御

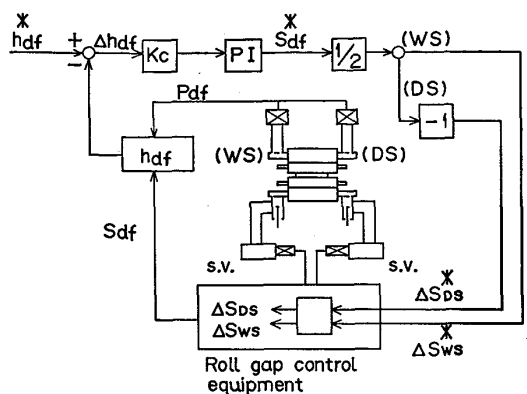


Fig. 13. Block diagram of camber control.

に分かれている。

目標ウェッジの算出までは上位のプロセス・コンピューターで行い、データの収集および制御信号出力は下位のマイクロ・コンピューターで行うシステムとなっている。

また、制御に必要なセンサーは Fig. 1 に示したようにミル後面に設置されている。このため、キャンバーの測定は前面から後面へのパスで行い、制御は後面から前面へのパスで行っている。したがって、制御実施タイミングは Fig. 14 で示すように、最終パスあるいは最終1パス前としている。

5.2 実圧延への適用結果

Fig. 15 に実圧延での制御実施例を示す。本実験例は圧延最終パスで制御したもの (Fig. 14 (a) に対応) であるが、制御前 42.5 mm のキャンバーを制御実施後 12 mm に減少させることができた。この時のロール開度差はダイナミックに変化しており、板長さ方向の目標ウェッジの変化に対しても十分な制御性を有していることがわかる。

また、最終パスでの制御 (Fig. 14 (a)), 最終1パス

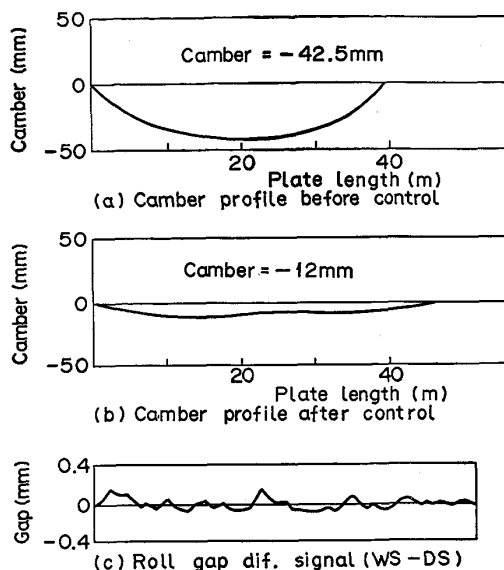


Fig. 15. Effect of camber control. (Plate size : 15 × 3 000 × 40 000)

前での制御 (Fig. 14 (b)) による圧延完了後のキャンバー量の比較も行ったが、両者に顕著な差は見られなかった。したがって、最終1パス前で制御した場合にも制御パスでのロール開度差を保持することにより、修正したキャンバーの再発を防止できると考えられる。

Fig. 16 に工程圧延でのキャンバー制御実施効果を未実施材と比較して示す。いずれも同一ロールチャンスでの実績である。両者ともキャンバー量の平均値はゼロ付近であるが、制御有の場合には圧延長によらずばらつきが半減しており、キャンバー量減少効果が認められる。

6. 結 言

厚板圧延におけるキャンバーの修正制御を目的として制御モデル、センサー、制御系の開発を行い、実機化に

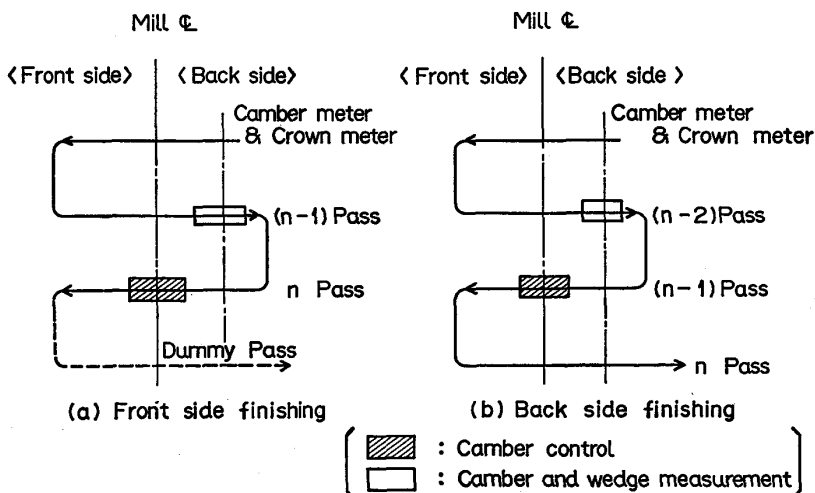


Fig. 14. Camber control pass flow.

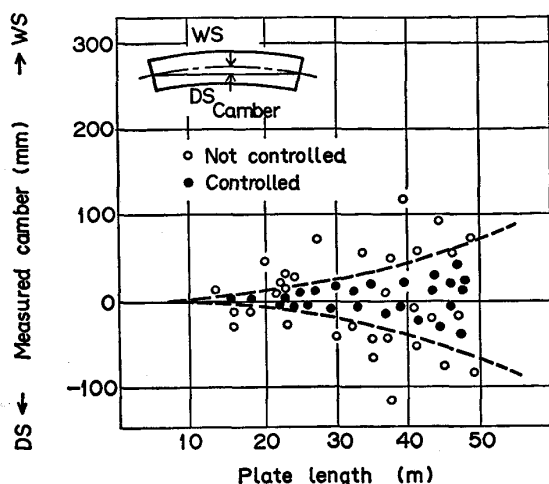


Fig. 16. Effect of camber control.

結びつけた。

(1) ミル後面に3点測定方式のキャンパー測定装置を設置し、圧延中の板の回転、蛇行の影響を受けない精度よい測定ロジックを確立した。

(2) キャンパーとウェッジの関係については、鉛モデル実験にもとづいて定量化した。

(3) ウェッジの発生特性については、圧延シミュレーション計算を行い、実機に適用可能なモデルを作成し

た。

(4) 本制御系を実機に適用した結果、圧延長、板幅によらず良好な制御結果が得られ、歩留り向上、剪断ライン以降の不要工程削減の当初の目標を達成した。

文 献

- 1) 林 千博, 河野輝雄: 鉄と鋼, 63 (1977), A21
- 2) A. Г. СТЫКАЙ: Tsvetnye Metally (1978) 3, p. 58
- 3) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 梶原利幸, 木村智明, 田川昌良: 昭和 55 年度塑性加工春季講演会, p. 61
- 4) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 増田一郎, 梶原利幸, 木村智明, 田川昌良, 吉本健一: 第 31 回塑性加工連合講演会 (1980), p. 471
- 5) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 白井康好, 梶原利幸, 木村智明, 田川昌良, 吉本健一: 昭和 56 年度塑性加工春季講演会, p. 147
- 6) 浜渦修一, 山田健二, 川並高雄: 第 36 回塑性加工連合講演会 (1985), p. 169
- 7) 山田健二, 浜渦修一, 川並高雄: 第 36 回塑性加工連合講演会 (1985), p. 173
- 8) 芥田友彦, 高橋英雄: 第 20 回 SICE 学術講演会 (1981), p. 413
- 9) K. N. SHOET and N. A. TOWNSENT: JISI, 206 (1968), p. 1088