
厚板圧延における新平面形状制御法の開発 —差厚幅出し圧延法—

Development of New Plan View Pattern Control in Plate Rolling

饗場 満雄(Mitsuo Aiba) 千貫 昌一(Masakazu Sengan) 渡辺 秀規(Hideki Watanabe) 塚原 戴司(Taiji Tsukahara) 高橋 祥之(Shyoji Takahashi) 奥村 健人(Taketo Okumura) 金田 欣亮(Yoshiaki Kaneda)

要旨：

厚板圧延における最近の歩留り向上技術は急速な進歩を遂げている。それらの中でも MAS 圧延などに代表される平面形状制御技術の進歩は著しいものがある。筆者らは新たに、既設圧延機への適用が容易な新平面形状制御圧延法を開発した。新圧延法の特徴はロールを傾斜して圧延することにある。それは、平面形状を矩形にするためには、鋼板の先後端に生ずる不均一変形部分の形状を修正するように圧延すれば良いからである。この圧延法を当社千葉製鉄所厚板工場において実施、命令歩留りを 1%向上できた。

Synopsis：

Recently techniques to improve material yield in plate rolling have made rapid progress. Among them, the progress of the plan view pattern control rolling, represented by MAS rolling and others, is remarkable. The authors have developed another plan view pattern control rolling, which can be easily applied to existing mills. The new method is characterized by the inclination of rolls during rolling. All that is required to make the plan view pattern rectangular is modify the shapes of nonuniformly deformed portions which are liable to generate at both leading and trailing ends of the plate. In spite of its easy application, this method can improve material yield by 1%. Satisfactory results are being obtained by its application to the plate mill of Chiba Works at Kawasaki Steel Corporation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

厚板圧延における新平面形状制御法の開発 —差厚幅出し圧延法—

Development of New Plan View Pattern Control in Plate Rolling

饗 場 満 雄*
Mitsuo Aiba

千 貫 昌 一**
Masakazu Sengan

渡 辺 秀 規***
Hideki Watanabe

塚 原 戴 司****
Taiji Tsukahara

高 橋 祥 之*****
Shyoji Takahashi

奥 村 健 人*****
Taketo Okumura

金 田 欣 亮*****
Yoshiaki Kaneda

Synopsis:

Recently techniques to improve material yield in plate rolling have made rapid progress. Among them, the progress of the plan view pattern control rolling, represented by MAS rolling and others, is remarkable. The authors have developed another plan view pattern control rolling, which can be easily applied to existing mills.

The new method is characterized by the inclination of rolls during rolling. All that is required to make the plan view pattern rectangular is modify the shapes of nonuniformly deformed portions which are liable to generate at both leading and tailing ends of the plate.

In spite of its easy application, this method can improve material yield by 1%. Satisfactory results are being obtained by its application to the plate mill of Chiba Works at Kawasaki Steel Corporation.

1. 緒 言

厚板圧延では製品の用途が広く、素材(スラブ)の幅よりも広幅の鋼板を製造することが要求されるため、スラブは長さ方向ばかりではなく幅方向にも圧延される。そのため、鋼板の平面形状は長さ方向の端部ばかりではなく幅方向の端部も不均一に変形し、その結果、鋼板先後端のエンドクロップだけではなく、幅方向にも凸形や凹形のサイドクロップを生じる。厚板の製品は原則として矩

形であるからこれらの部分は歩留りのロスとなる。しかも厚板歩留りロスの約50%を占めているので、歩留りを向上するためには、圧延最終の鋼板平面形状をできるだけ矩形に近づけることが必要である。

鋼板の平面形状を矩形にするための最近の圧延技術としては、MAS 圧延法¹⁻⁴⁾、エッジャー圧延法^{1,5)}などがあり、いずれも歩留り向上に大きく寄与している。筆者らは新たに、既設圧延機でもほとんど改造することなく容易に適用でき、しかも十分な効果を上げることのできる新しい厚板平面

* 千葉製鉄所企画部企画開発室主査(課長待遇)

*** 千葉製鉄所熱間圧延部厚板課

***** 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室

***** 千葉製鉄所設備部設備技術室

(昭和55年12月8日 原稿受付)

** 千葉製鉄所熱間圧延部厚板課課長

**** 千葉製鉄所熱間圧延部熱延技術室主査(掛長待遇)

***** 千葉製鉄所管理部厚板管理課掛長

形状制御圧延法を開発した。これを、「差厚幅出し圧延法」と呼び、現在、当社千葉製鉄所厚板工場において実施し成果を上げている。ここでは、本圧延法の考え方とサイドクロップ形状の改善に対する効果について報告する。

2. 厚板の平面形状

厚板圧延においては、初めに、スラブの長さ方向に1～4パスの圧延を行って正確な幅出し圧延開始厚を決め(成形圧延)、しかる後に、スラブの向きを90度変えて幅方向に圧延を行い所定の幅を得る(幅出し圧延)。その後再び90度向きを変えて長さ方向に圧延して所定の板厚を得る(仕上圧延)というのが普通である。

鋼板端部に生じる不均一変形は、圧延初期の成形圧延、幅出し圧延の段階で顕著に起こり、成形圧延の圧下量および製品幅とスラブ幅の比(以下幅出し比と称す)などに影響される。それは、成形圧延や幅出し圧延のように、圧延の際の板幅(幅出し圧延の時は成形圧延後の長さに等しい)と板厚の比の値が小さい場合には圧延方向と直角方向(すなわち圧延時の幅方向)の両端部の変形自由度が大きくなり、圧延時の幅方向中央部に比べて大きな幅広がりを生ずるからである^{6,7)}。特に、最も自由度の大きい嚙込端、嚙抜端での幅広がりは大きくなる。その結果、圧延時の幅方向両端部の伸び率が、中央部の伸び率に比べて小さくなって、圧延後の鋼板平面形状が、圧延方向には凸形の形状となり、これと直角な方向には凹形の形状となる。

成形圧延および幅出し圧延時の不均一変形の発生機構は本質的には同じものであり、成形圧延と幅出し圧延の変形が重なって鋼板長手方向先後端のエンドクロップ(以下単にクロップと称す)と幅方向のサイドクロップの形状を決定する⁸⁾。すなわち、Fig. 1に示すように、

(1) 圧延長/スラブ長、(以下圧延比と称す)が、相対的に幅出し比よりも大きい場合にはクロップ形状が凸形となり、サイドクロップ形状は凹形となる(Fig. 1 (a)参照)。

(2) 圧延比が相対的に幅出し比よりも小さい場合にはクロップ形状は凹形となり、サイドクロップ

形状は凸形となる(Fig. 1 (b)参照)。

以下、サイドクロップについては凹形のものをツヅミ、凸形のものをタイコと呼んで区別する⁹⁾。

また、サイドクロップの形状は圧延時のロールクラウンにも影響される¹⁾。Fig. 2に幅出し比、ロ

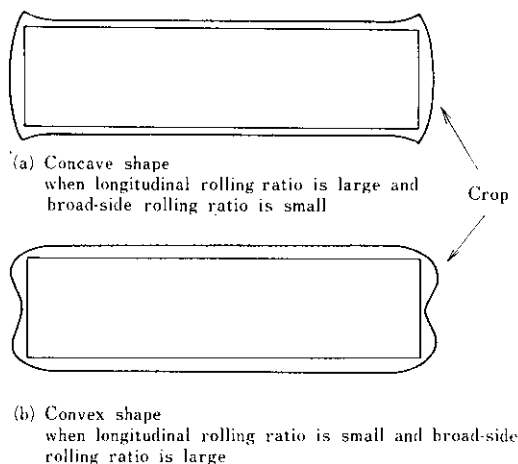


Fig. 1 Two typical plan view patterns of rolled plates

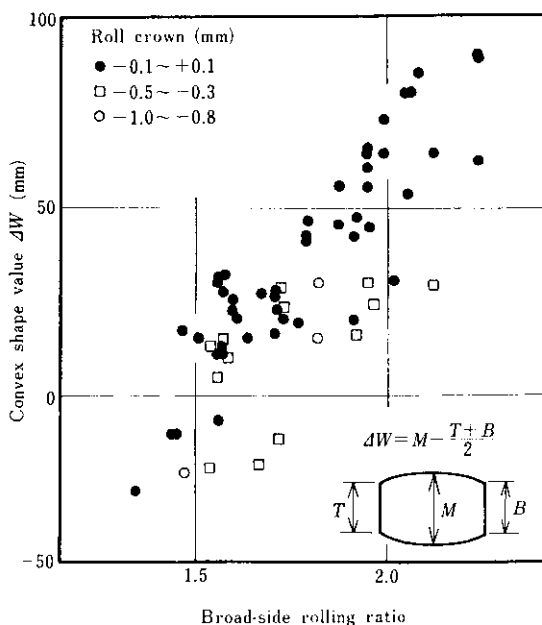


Fig. 2 Convex shape value at conventional rolling

ールクラウンとタイコ量の関係を示す(以下、タイコ量 ΔW は先後端の幅の平均値と中央部の幅との差で(1)式で定義する)。

$$\Delta W = M - \frac{T+B}{2} \dots\dots\dots(1)$$

M : 長さ方向中央部の幅

T : 長さ方向先端部の幅

B : 長さ方向後端部の幅

タイコ量は幅出し比に従ってマイナスからプラスへ（サイドクロップはツヅミからタイコへ）と変化し、ロールクラウンがマイナスになる、すなわち、ロールの摩耗が大きくなるとタイコ量は小さくなる。

3. 差厚幅出し圧延法

この圧延法の特徴は、成形圧延、幅出し圧延の過程で不均一に変形した鋼板の端部（幅出し圧延時の両幅端）だけを、幅出し圧延後に、スラブを転回せずにそのまま、不均一変形量に応じてロールを傾斜させて圧延することである。Fig. 3 にその圧延過程を示す。図中の斜線部分が本圧延法によって変形する部分である。圧延は両幅端に対して行うので、バススケジュール上は幅出し圧延パスが2パス追加される。

3.1 差厚幅出し圧延法の原理

幅出し圧延後の鋼板平面形状を、幅出し比が大

きくタイコ形状になったことを想定して、Fig. 4 (a)のようにモデル化する。Fig. 4 は平面形状の片側だけを示したものである。端部の幅は中央部の幅 M に比べて ΔW （タイコ量に等しい）だけ小さく、また、端部から $\alpha \cdot l$ の長さの部分で中央部より幅が狭くなる。したがって、不均一に変形した長さ $\alpha \cdot l$ の領域の幅を広げて中央部の幅 M と同じ値にすれば鋼板平面形状は矩形になる。そのためには、Fig. 4 (b)に示すように、ロールを傾斜させて端部へ行くほど圧下量を大きくして圧延方向（図中矢印）の伸び率を大きくすることが必要である。そこで差厚幅出し圧延パスの圧下量とロールの傾斜角度を決めるために以下の仮定を設ける。

- (1) 幅出し圧延後に不均一に変形している部分（図中の点を打った部分）の体積は差厚幅出し圧延前後で不変である。
- (2) ロールはクラウンが無いものとする。

以上のことから、不均一変形部分に含まれる微小要素 dx を考えると、差厚幅出し圧延前後の体積について次の等式が成立する。

$$\begin{aligned} & \left(M - \frac{\Delta W}{\alpha \cdot l} \cdot x \right) \cdot t \cdot dx \\ &= \left(t - \frac{\Delta h_c}{\alpha \cdot l} \cdot x \right) \cdot M \cdot dx \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

x : 端部からの距離

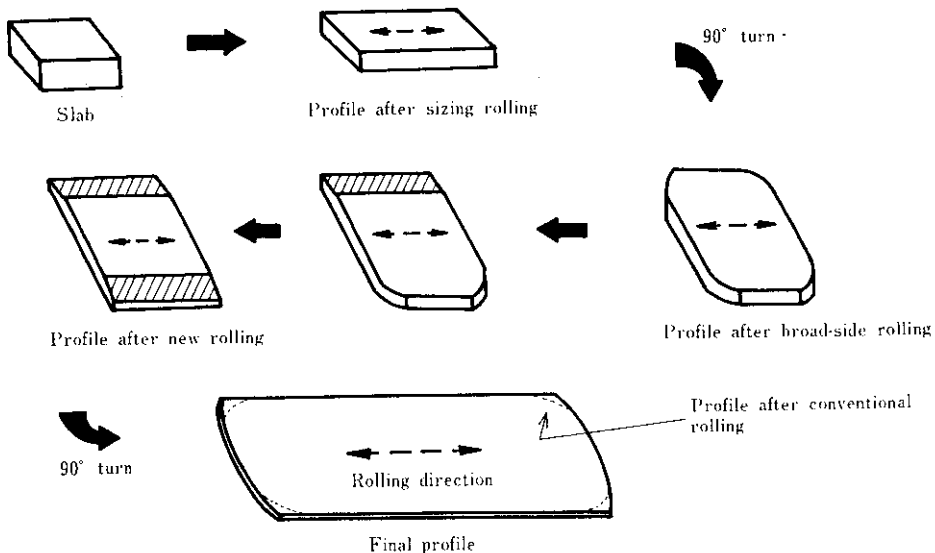
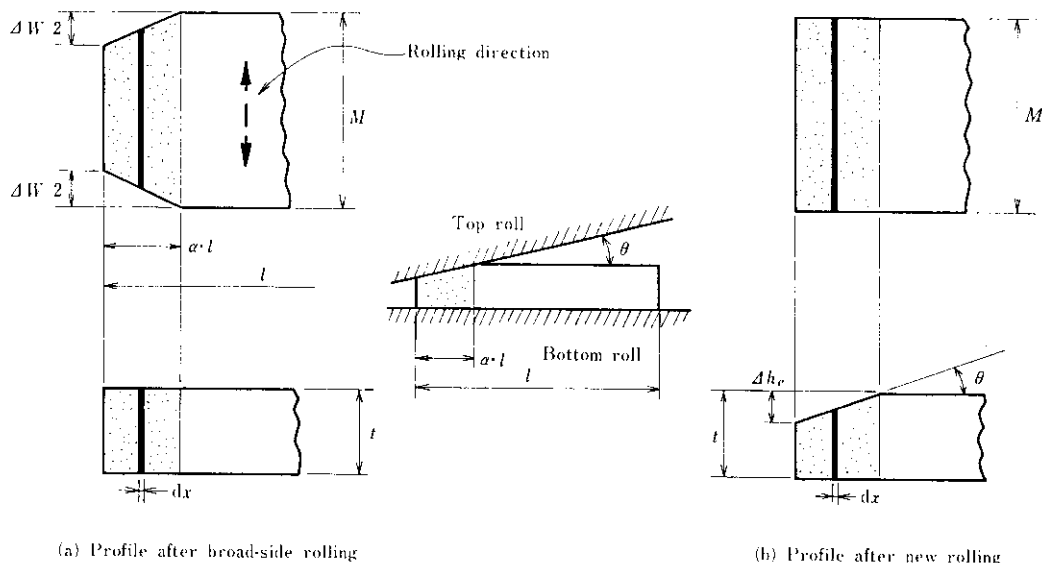


Fig. 3 Process of new plan view pattern control rolling



M : Width after broad-side rolling

Fig. 4 Principle of plan view pattern control

したがって、鋼板端部の圧下量 Δh_e は (3) 式で表わされる。

$$\Delta h_e = \frac{t \cdot \Delta W}{M} \dots \dots \dots (3)$$

また、ロールの傾斜角 θ は、 Δh_e と不均一変形部分の長さ $a \cdot l$ の比で (4) 式のように表わされる。

$$\tan \theta = \frac{\Delta h_e}{a \cdot l} = \frac{t \cdot \Delta W}{a \cdot l \cdot M} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

- Δh_e : 鋼板端部の圧下量
- θ : ロールの傾斜角度
- a : 定数

このようにして圧下量とロールの傾斜角度が求まれば差厚幅出し圧延パスの圧下設定値は、幅出し圧延終了厚を基準にして Fig. 5 の幾何学的関係から次のように求めることができる。Fig. 5 は差厚幅出し圧延中の状態を圧延方向からみたものである。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= t + \left(\frac{L+l}{2} - a \cdot l \right) \cdot \tan \theta \\ S_2 &= t - \left(\frac{L-l}{2} + a \cdot l \right) \cdot \tan \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、

S_1, S_2 : 圧下設定値

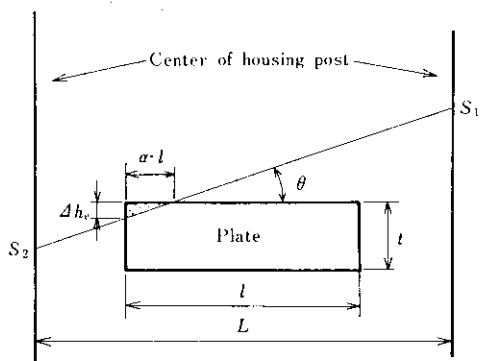
t : 幅出し圧延終了厚

l : 成形圧延後の長さ

L : 圧延機ハウジングポストの芯間距離

L は、一般に、ロールを傾斜させる時のドライブサイド側、ワークサイド側のそれぞれの支点間距離である。

以上のことより、 S_1, S_2 を決めて、初めにドラ



- S_1, S_2 : Screw positions to incline rolls
- h_e : Reduction of the plate edge
- t : Thickness after broad-side rolling
- l : Length after sizing rolling
- θ : Inclining angle
- a : Constant
- L : Length between housing post centers

Fig. 5 Screw positions of rolling mill

イブサイドを S_1 に、ワークサイドを S_2 に設定してワークサイド側を圧延して形状を修正し、次に、 S_1 と S_2 を逆に設定してドライブサイドを圧延して形状を修正すれば鋼板の両端部を矩形にすることができる。両端部で形状が異なればそれぞれの不均一変形に応じた S_1 , S_2 の設定を行う。

なお、(5)式は幅出し圧延後に差厚幅出し圧延を行う場合のものであるが、不均一変形量を予測して、幅出し圧延前に差厚幅出し圧延を行ってあらかじめ形状を修正しておくということも可能である。いずれの場合も形状修正に対する効果は同じである。

また、差厚幅出し圧延後には、ロールと接触した鋼板の断面形状が Fig.4 (b) に示したようにテーパーになるが、これは仕上圧延において修正されるので製品の厚みには影響しない。

3.2 タイコ量予測式

パススケジュールの計算において(5)式から差厚幅出し圧延パスの圧下設定値を求めるためには、圧延最終形状におけるタイコ量を予測することが必要である。タイコ量は、

- (1) 成形圧延、幅出し圧延、仕上圧延といった各圧延段階の圧下量
- (2) 幅出し比
- (3) 幅出し圧延開始時の形状比（成形圧延後の長さで幅出し圧延開始厚の比）
- (4) ロールクラウン

などを使って精度良く予測することができる。形状比は圧延中の幅広がり的大小を決め、この値が小さいほど幅広がりは大くなる⁷⁾。また、ロールクラウンを考えることによってロール摩耗の増加に応じたタイコ量の時系列的变化を予測することができる。この時のロールクラウンとしては、ロール胴長中央部のロール径と幅出し圧延時のスラブ端部に当たるロール径の差を用いる。予測式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \Delta W = & a_0 + a_1 \cdot BR + a_2 \cdot (\Delta H_S)^{b_1} + a_3 \\ & \times \frac{(\Delta H_B)^{b_2}}{TS} + a_4 \cdot (\Delta H_F)^{b_3} + a_5 \cdot \frac{l}{TB} + a_6 \\ & \times \frac{C_{ew} \cdot M}{t} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、

- BR : 幅出し比
 TS : 初期スラブ厚
 M : 幅出し圧延後の中央部の幅
 t : 幅出し圧延終了厚
 ΔH_S : 成形圧延総圧下量
 ΔH_B : 幅出し圧延総圧下量
 ΔH_F : 仕上圧延総圧下量
 TB : 幅出し圧延開始圧 (= TS - ΔH_S)
 C_{ew} : 幅出し圧延時の板幅相当クラウン

$a_0 \sim a_6$ および $b_1 \sim b_3$ は重回帰分析によって求まる値である。得られた式の精度を Fig.6 に示す。精度は標準偏差で 12.0mm である。

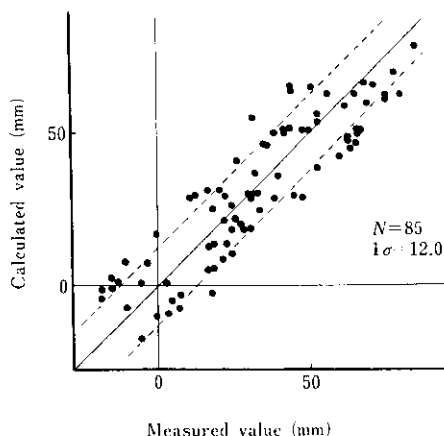


Fig. 6 Accuracy of predicting convex shape value

また、圧延中の鋼板の板幅相当のロールクラウンを求めるためにはロールプロフィールの予測をすることが必要となる。ロールプロフィールはロールの摩耗量から決めることができ、摩耗量は(7)式から求めることができる。

$$RW_i = (c_0 + \frac{c_1}{D_w}) \cdot \Sigma \left(\frac{F \cdot LP}{WP} \right)_i \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

- RW_i : ロールバレル方向位置 i での摩耗量
 D_w : ワークロール直径
 F : 各パスの圧延荷重
 LP : 各パスの圧延長
 WP : 各パスの圧延幅

$\Sigma (F \cdot LP / WP)_i$ は位置 i での積算圧延量を表わし D_w の項はロール径による補正項である。また、 c_0 , c_1 は重回帰分析によって求まる値である。

3.3 形状修正係数

Fig.4 中の $\alpha \cdot l$ は不均一変形部分の鋼板端部からの長さである。したがって α は不均一変形部分が成形圧延後の長さに占める割合を表わし、これを形状修正係数と呼ぶ。

この値は、幅出し比、圧延比、形状比などによって変化するが、圧延比と幅出し比の比で整理すると Fig.7 に示すようにほぼ一定の値となる。したがって形状修正係数は一定値を(4)式、(5)式へ代入して差厚幅出し圧延パスの圧下設定値を求める。

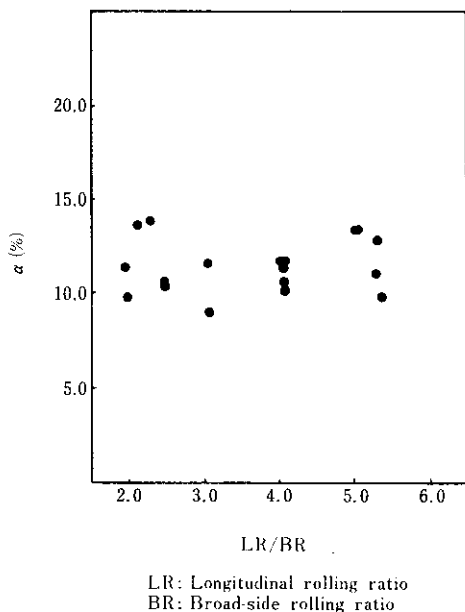


Fig. 7 Variation of profile modification coefficient α

3.4 制御システム

差厚幅出し圧延の制御システムを Fig.8 に示す。圧下 APC はドライブサイド、ワークサイドの単独駆動が可能のように 2 ループとし、圧下スケジュールに対して、圧下位置センサー、ロードセルの信号によってパス進捗を行い、差厚幅出し圧延パスではドライブサイド、ワークサイドの圧下位置を別設定する。

鋼板のロールへの嚙込、嚙抜検出はロードセルからの荷重のオンオフ信号で行っているが、通常の圧延に比べて差厚幅出し圧延は荷重レベルが非

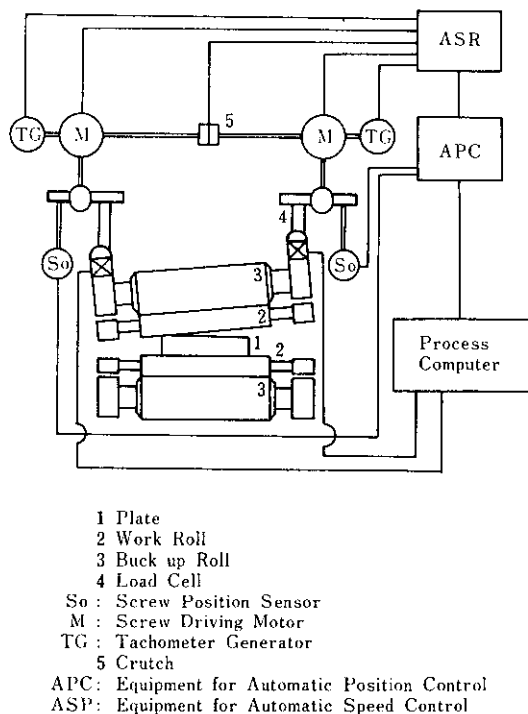


Fig. 8 Control system of new rolling

常に低いために、差厚幅出し圧延パスについては荷重の検出レベルを 50t に下げている。

圧下スケジュールの計算はプロセスコンピューターによって行い、成形圧延—幅出し圧延—差厚幅出し圧延—仕上圧延を組立てる。差厚幅出し圧延を行わなかった場合(通常の圧下スケジュール)のタイコ量を予測し、この値がある値以下になれば差厚幅出し圧延のパスは飛越して圧延が実施される。

また、差厚幅出し圧延の圧下設定値は、成形圧延、幅出し圧延の実績を使って再計算するシステムになっている。

3.5 プラスチシンによる変形特性調査

差厚幅出し圧延を行った時の材料の変形特性を調査するために Fig.4 (a) のような、幅出し圧延後の鋼板平面形状の片側を想定したプラスチシンスラブを使って実験を行った。実験条件を Table 1 に示す。タイコ量は 30mm, $\alpha \cdot l$ は 100mm とした。また、鋼製ロールを使用し、ロールとプラスチシンの間の潤滑剤には熱間圧延の摩擦状態に対応さ

Table 1 Experimental condition for plasticine

Dimension of the test piece	28t×250w×350ℓ (mm)
Convex shape value	30 (mm)
Roll diameter	300 (mm)
Inclining angle	1.92 (deg)
Reduction of the edge	3.36 (mm)
Lubricant	CaCO ₃
Temperature	20 (deg)

せるために炭酸カルシウム (CaCO₃) 粉末を用いた。圧延時のプラスチシンの温度は 20℃ とした。さらに、実験材の表面には変形状態が観察できるように 10mm 間隔の格子線を罫書いた。

実験結果を以下に示す。差厚幅出し圧延前後の平面形状の比較 (Photo. 1 参照) から、差厚幅出し圧延で圧下された部分が圧延方向に伸び、その伸び率は端部へ行くほど大きくなっているのがわかる。この実験からはさらに以下のことが明らかになった。

- (1) 圧下された部分に引張られて変形するために形状が変化している部分の長さはロールの胴長方向の接触長さよりも長く、その値は $\alpha \cdot l$ の約 1.15 倍である。
- (2) 端部から長さ $\alpha \cdot l$ の角の部分 (Photo. 1 ▽印参照) は長さ方向中央部の幅よりも広くなり、両

端に対して差厚幅出し圧延を行えばサイドクロップの形状が凸形部が 2 箇所ある 2 山形になる。

- (3) 端部のクロップに相当する部分が丸くなり、差厚幅出し圧延によって凸形のクロップが成長する。

嚙込側、嚙抜側での形状に非対称性が見られるが、これは圧延中にプラスチシンスラブが斜行したためである。

3-6 実機による変形特性調査

次に、実機圧延によって材料の変形特性を調査した。供試材として、プラスチシンの時と同じく幅出し圧延後の平面形状を想定したモデルスラブ (Fig. 9 参照) を用いた。実験条件を Table. 2 に

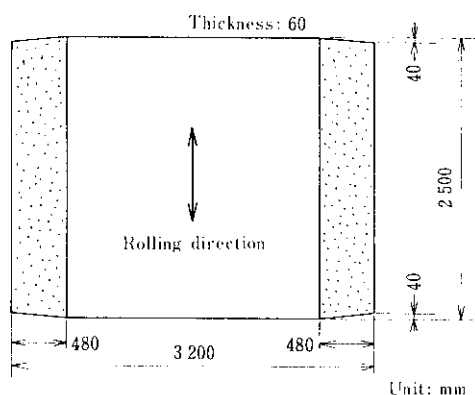


Fig. 9 Model slab dimensions to ascertain the effect of new rolling method

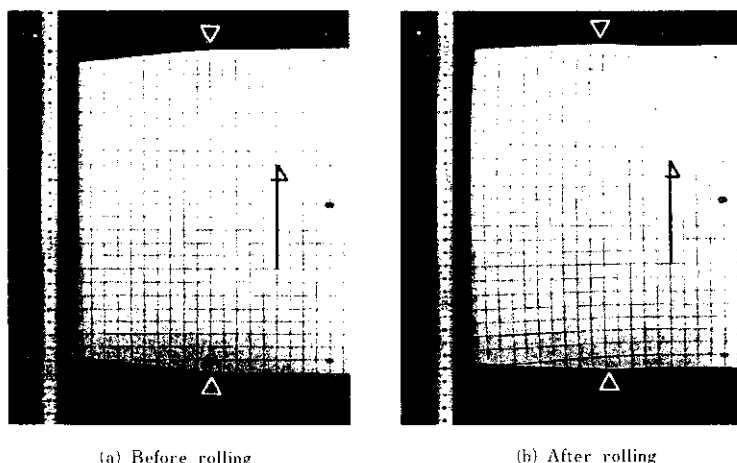


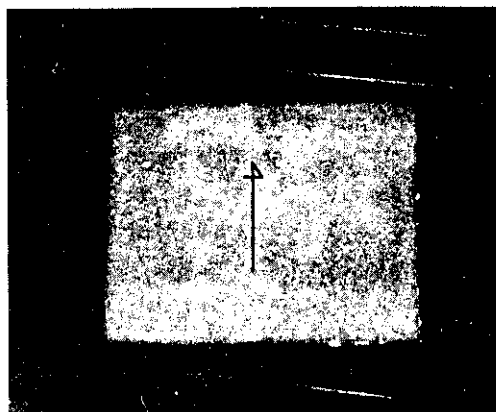
Photo. 1 Profile of the plasticine slab

Table 2 Experimental condition for actual slab

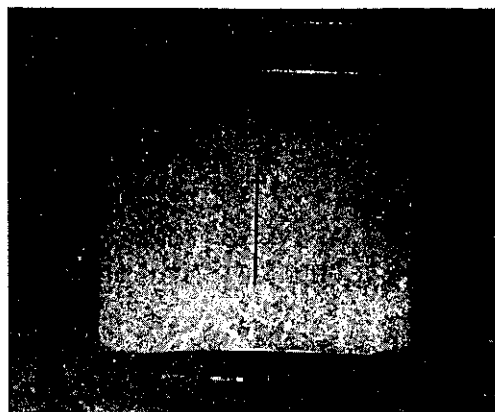
Dimension of the slab	60t×2 500w×3 200l (mm)
Convex shape value	80 (mm)
Roll diameter	991 (mm)
Inclining angle	0.23 (deg)
Reduction of the edge	1.92 (mm)

示す。タイコ量は 80mm, $\alpha \cdot l$ の値は 480mm とした。加熱炉で 1 200℃ に加熱した後差厚幅出し圧延を両端部に対して行い、圧延前後の形状を比較した。

差厚幅出し圧延前後の平面形状の比較を **Photo. 2** に、平面形状、断面形状の測定結果を **Fig. 10** に示す。端部の压下量、板厚のテーパー角度ともほ

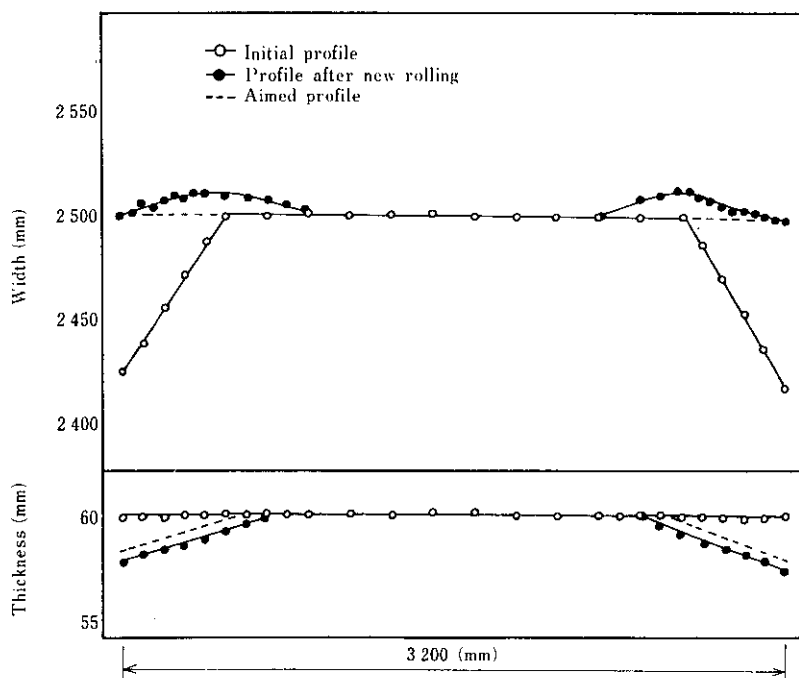


(a) Before rolling



(b) After rolling

↑: Rolling direction

Photo. 2 Profile of the actual slab**Fig. 10** An example of plate profile by new rolling

ば目標に一致しており、プラスチックを用いた実験同様に平面形状が改善され矩形化している。プラスチックの実験と対比して以下のようなことが明らかになった。

- (1) プラスチックの時と同じく、圧下された部分に引張られて変形する部分があり、形状が変化している部分の長さはロールの胴長方向に $a \cdot l$ の 1.3 倍となっている。
- (2) サイドクロップは 2 山形となるが、両端の幅と中央部の幅は等しくなっている。
- (3) 端部のクロップに相当する部分は、やはりプラスチックの時と同じく丸くなり、凸形のクロップが成長する。
- (4) 圧延中にスラブが斜行することはない、したがって、嚙込側、嚙抜側は対称に変形している。
- (5) 本実験の場合、圧延荷重は百数十 t であった。

4. 効 果

Fig.11 に通常圧延材と幅出し圧延後に差厚幅出し圧延を行ってタイコ形状の修正を行ったもののサイドクロップの比較を示す。図中縦軸は最小幅からの偏差であり、横軸は先後端のクロップを除いた有効長さである。

この例の幅出し比は 1.98、圧延比は 10.3 である。

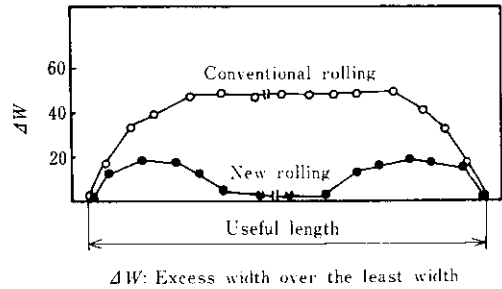


Fig. 11 Comparison of convex shape by new rolling with conventional one

この程度の幅出し比になると、通常圧延を行った場合にはタイコ量は 50mm にもなる。しかし、差厚幅出し圧延を行うことによってタイコ量をほぼ 0mm にすることができる。

また、横軸（有効長さ）と幅の各点を結んだ線が囲む面積がタイコによる歩留りのロスになる。差厚幅出し圧延材のサイドクロップは 2 山形になっているが、面積的には通常圧延材よりも小さく、歩留りロスが少ない。この例の場合、歩留りの向上は約 1% である。

次に、Fig.12 に幅出し比をいろいろ変えた場合の通常圧延材と差厚幅出し圧延材のタイコ量の比較を示す。通常圧延材では幅出し比の増加につれ

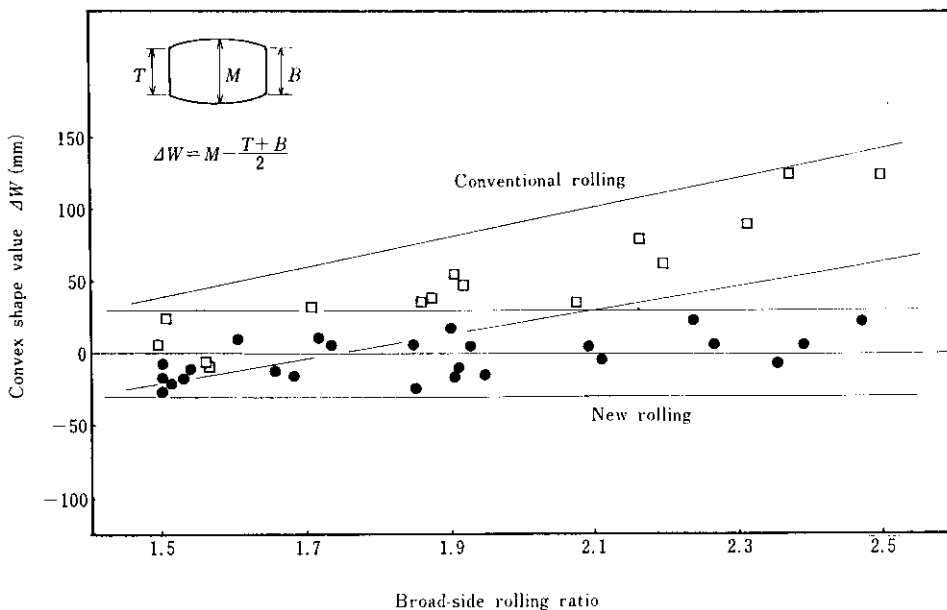


Fig. 12 Comparison of convex shape value by the change of broad-side rolling ratio

てタイコ量も大きくなっているが、差厚幅出し圧延材ではサイドクロップの形状がほぼ矩形化されるので、タイコ量が幅出し比に関係なく一定の値となる。

また、プラスチックやモデルスラブを用いた実験でみられた凸形クロップの成長については、成形圧延、幅出し圧延の過程における平面形状の変化の影響の方が強いために、差厚幅出し圧延材で特にクロップの値が大きくなっているということはなく実用上は問題ない。

5. 結 言

厚板圧延の平面形状は幅出し比、圧延比の組合わせによって複雑に変化し、先後端に生じる不均一変形が歩留りロスを大きくする。筆者らは、この不均一変形部分の形状を修正するために、既設圧延機へ、最小限の改造によって容易に適用できる平面形状制御圧延法（差圧幅出し圧延法）を開発し、プラスチック、実機による実験でその効果を確認した。現在、千葉製鉄所厚板工場において実用化に成功し成果を上げている。

本報告は差厚幅出し圧延による幅形状の改善方法とその効果について述べたものである。本圧延法による歩留り向上効果は1%が認められた。

参 考 文 献

- 1) 崎崎：日本金属学会報，19（1980）2，79
- 2) 池谷，坪田，瀬川，磯山，菊川，旭：鉄と鋼，65（1979）4，304
- 3) 瀬川，石井，池谷，磯山，馬場，尾脇：鉄と鋼，65（1979）4，305
- 4) 石井，坪田，菊川，馬場，旭，尾山：鉄と鋼，65（1979）4，306
- 5) 笹治，久津，堀部，野原，山田，渡辺：鉄と鋼，66（1980）8，A 165
- 6) 川村，福田，佐藤，平石，森：鉄と鋼，63（1977）4，217
- 7) 五弓，木原，前：塑性と加工，11（1970）108，11
- 8) 柳沢，三芳，坪田，菊川，池谷，磯山，旭，馬場：川崎製鉄技報，11（1979）2，1
- 9) 鈴木ほか：鉄鋼便覧（日本鉄鋼協会編），（1980），255〔丸善〕