

技術報告

UDC 621.771.23 : 681.3 : 62-531

厚板圧延における平面形状制御方法

平井 信恒*・吉原 正典*・関根 稔弘*
坪田 一哉*・西崎 宏*

Development of the Plan View Pattern Control System in Plate Rolling

Nobutsune HIRAI, Masanori YOSHIHARA, Toshihiro SEKINE,
Kazuya TSUBOTA, and Hiroshi NISHIZAKI

Synopsis:

In plate rolling, it has been sought for many years to make plates rectangular as correct as possible, as one of the methods to improve the yield. MAS rolling (Mizushima Automatic Plan View Pattern Control System) has been developed as a completely new method to make the plan view pattern into a rectangular shape. To improve the controlling accuracy of the MAS rolling system, the following techniques also have been developed.

- (1) Plan View pattern prediction models which also calculates the width gain in the MAS rolling.
- (2) Application of AG (Absolute Gauge)-AGC (Automatic Gauge Control) to the thickness profile control of the MAS rolling.

This report also describes the different width rolling as an application.

1. 緒 言

厚板圧延における歩留り向上には、

- (1) スラブを指定された寸法に圧延する技術—すなわち圧延寸法制御技術
- (2) 圧延した鋼板のトップボトムクロップおよびサイドクロップの発生を減らし、鋼板の平面形状を矩形に近づける平面形状制御技術
- (3) 各種各様の注文を有効に組み合わせてスラブ設計をしたり、転炉などの炉容に合わせて素材設計技術が必要である。

このうち、特に平面形状制御技術に関しては、多品種小ロット生産が基本で、寸法に一品一葉性が強いという厚板圧延の特徴から、いかに精度よく、広い寸法範囲を網羅するかが長年の命題とされてきた。

平面形状制御技術では、大別して

- (1) エッチャーにより、直接的にサイドおよびトップボトムクロップ形状を制御する方法¹⁾。
- (2) 幅出しおよび仕上圧延前に板厚プロフィールに変化を与え、形状を制御する方法^{2)~3)}。

の2種類が代表的である。近年、このいずれにおいてもシステム化が急速に進み、コンピュータによる予測制御技術を駆使した新技術が開発されている。

一方、素材設計技術も、これらの圧延技術の進歩により得られた成果を反映した形で進歩してきている。

本報では、この一例として、川崎製鉄水島製鉄所で開発し、53年より実操業に適用しているMAS圧延法、その応用法である異幅MAS圧延法、さらにはこれらの技術への素材設計の対応について報告する。

2. MAS圧延法 (Mizushima Automatic Plan View Pattern Control System)

厚板の圧延過程は、Fig. 1に示したように、(1)成形圧延、(2)幅出し圧延、(3)仕上げ圧延、の3つに分けられる。このそれぞれの過程においては、圧延方向先端で不均一塑性変形が起これ、これが端部の形状不良部分、いわゆるクロップを形成する。したがって、最終的に得られる鋼板平面形状は、これらの3つの過程での形状変化が複合され、矩形から外れたものとなる^{1)~3)}。

MAS圧延は、この圧延終了後の鋼板平面形状を個々に予測し、圧延中に、その量に応じた厚さプロフィールの

昭和56年4月9日受付 (Received Apr. 9, 1981)

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

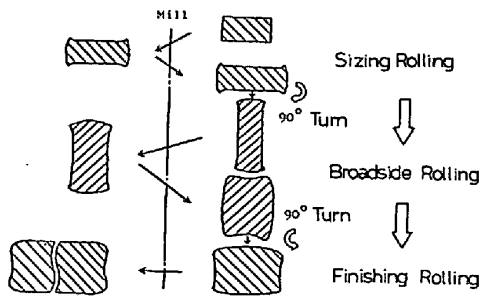


Fig. 1. Plate Rolling Process.

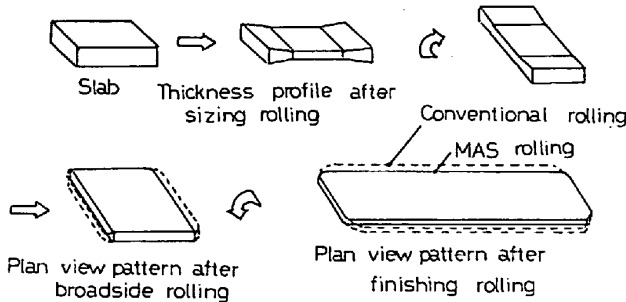


Fig. 2. Principle of sizing MAS rolling to improve the side crop shape.

変化を素材に与え、最終的に鋼板平面形状の矩形化をはかる方法である。すなわち、サイドクロップ形状を制御するためには、成形圧延の最終パスで、(これを成形MAS圧延と称す)、またトップボトムクロップを制御するためには幅出し圧延の最終パスで圧延方向に所定の厚さ変化を与える。(これを幅出しMAS圧延と称す)

Fig. 2は成形MAS圧延の基本的な原理である。

2.1 形状予測モデル

MAS 圧延は、圧延後の鋼板平面形状を定量的に予測し、これに基づいて板厚変化プロファイルを算出、形状を制御するものであるから、これを工程的に実施するためには、正確な平面形状予測モデルが必要である。

Fig. 3に、MAS 圧延で実施している鋼板平面形状予測モデルおよび各種制御情報の計算フローを示す。

図中の(2)および(4)式が鋼板のサイドクロップおよびトップボトムクロップ形状の予測モデルで、式中の $f_1(x)$, $f_3(x)$ および $f_2(y)$, $f_4(y)$ はそれぞれ Fig. 4に示した端部の不均一塑性変形による形状変化を示したものである。形状予測モデルは、これらをパスごとに累積した形で求め、仕上げ圧延での補正は、圧延が進行し板厚が薄くなるにつれて不均一塑性変形の影響が少なくなることを反映させている。

$f_1(x) \sim f_4(y)$ は、プラスチックを用いたモデル実験およびオンラインでの形状変化の定量的な測定(合成写真法)に基づき、数式化したものである¹⁾²⁾。

Fig. 5, 6にこのモデルによる鋼板平面形状予測精度

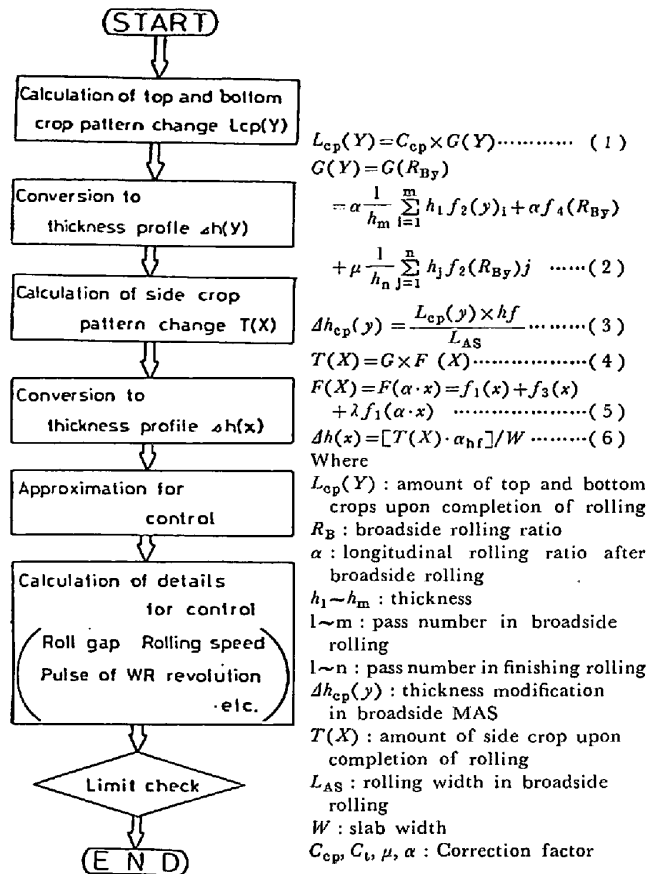


Fig. 3. Flow of calculation in MAS rolling.

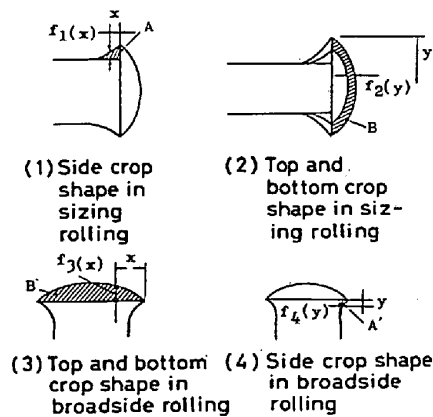


Fig. 4. Formulation of plan view pattern.

を示す。

2.2 形状制御方法

MAS 圧延を行うためには、成形最終パスおよび幅出し最終パスにおける圧延方向厚さ変化量を最終平面形状変化の予測量に応じて正確に求める必要がある。

2.2.1 切削加工スラブによる実験

Fig. 7に示すように切削加工したスラブと通常のスラブを圧延し、その平面形状を比較することにより、切削による板厚変化 Δt と、形状変化 Δl の関係を調査した。ここで、 Δt と Δl の間に体積一定の関係が成立すると

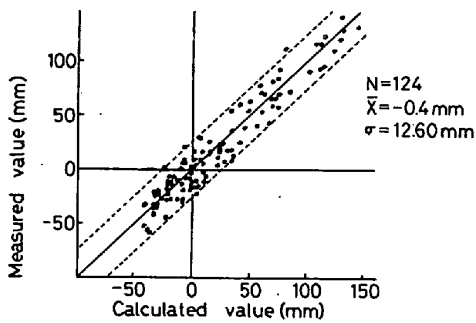


Fig. 5. Accuracy of side crop plan view pattern prediction model.

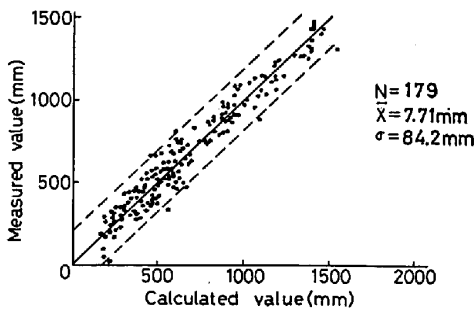


Fig. 6. Accuracy of top and bottom crops plan view pattern prediction model.

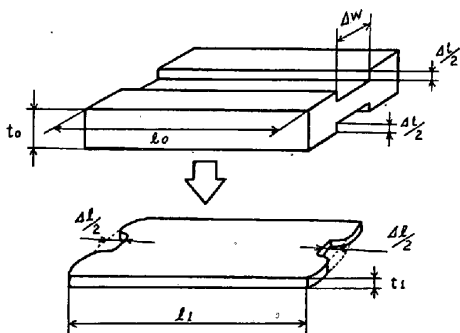


Fig. 7. Shape of the slab used in the experiment and plan view pattern after rolling.

仮定した場合には、(7)式が成立する。

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{t_0} l_1 \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 Δl : 形状変化量 (圧延後)
 Δt : 板厚変化
 t_0 : 圧延前の板厚
 l_1 : 圧延後の板長さ

Fig.8 は実際に得られた形状変化量 Δl_a を上記仮定にもとづき整理したものである。図から MAS 圧延のように、厚さ変化が微小な場合には、形状変化との間には、体積一定の関係が成立すると考えて実用上さしつかえないと考えられる。

2.2.2 厚さプロフィールへの換算

切削加工スラブの実験結果から、MAS 圧延において

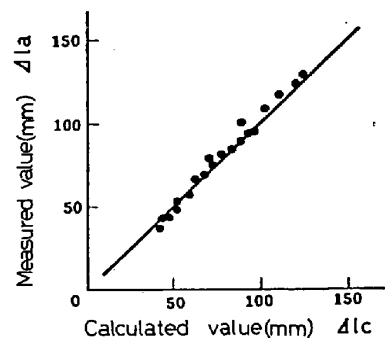


Fig. 8. Comparison between predicted and measured pattern change.

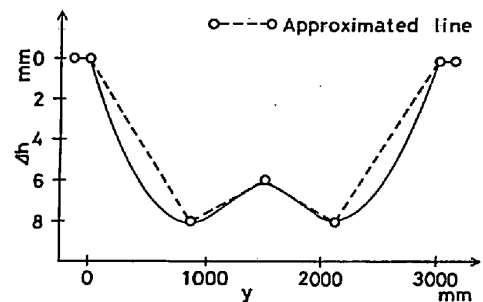
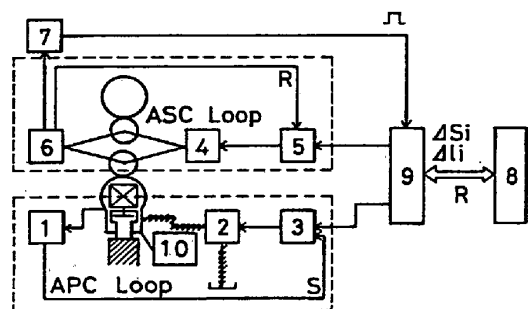


Fig. 9. An example of approximation of thickness profile in broadside MAS.



- | | |
|--------------------------------|---|
| APC Loop | ASC Loop |
| 1 Cylinder position sensor | 4 Main motor |
| 2 Servo valve | 5 Roll speed controller |
| 3 Cylinder position controller | 6 Roll speed detector |
| 7 Pulse generator | r1 Roll revolution pulse |
| 8 Process computer | R Roll revolution speed |
| 9 Micro controller | S Cylinder position |
| 10 Hydraulic push-up cylinder | ΔSi Modification value of cylinder position |
| | Δli Control position |

Fig. 10. MAS rolling control system.

は、形状変化予測量の厚さプロフィールへの換算には、体積一定の関係を用いている。成形 MAS 圧延においては(6)式を、幅出し MAS 圧延においては(3)式を用いて板厚変化量 Δh を算出している。

板厚変化量のプロフィールは、実際の制御では折線近似して与えており、この例を Fig. 9 に示す。

2.2.3 厚さプロフィール制御システム

Fig. 10 に、MAS 圧延での厚さプロフィール制御システムのブロック図を示す。この制御の中で特に圧延速度

は、油圧下能力を最大限に利用し、MAS 圧延を効率よく実施するという意味から重要である。Fig. 11 にロール回転数算出フローを示す。

2.3 MAS 圧延法の成果

Fig. 12 に、成形 MAS の実施により、サイドクロー

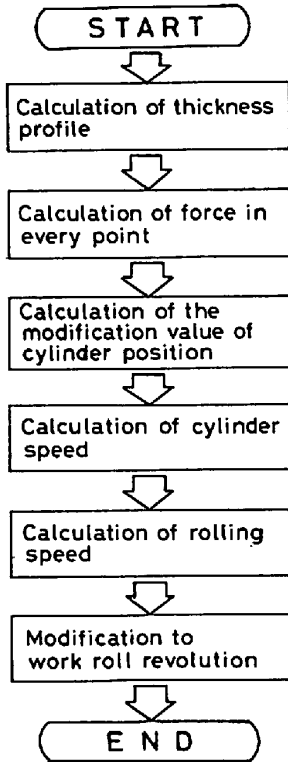


Fig. 11. Calculation flow of work roll revolution.

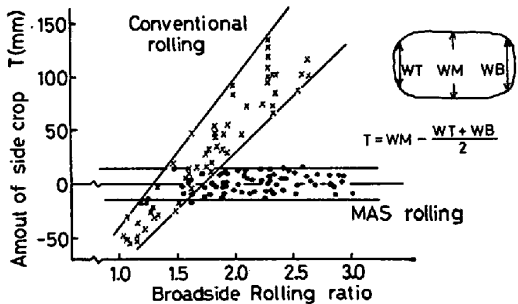


Fig. 12. Improvement of side crop shape through sizing MAS rolling.

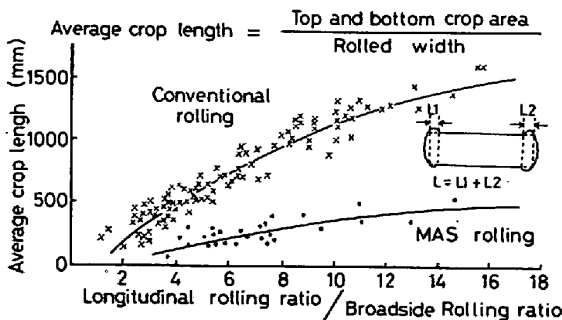


Fig. 13. Improvement of top and bottom crop shape through broadside MAS rolling.

プを制御した結果を、Fig. 13 に、幅出し MAS の実施により、トップボトムクロープを制御した結果を、それぞれ従来のものと比較して示す。これらの図から、MAS 圧延法によるクロープ形状改善効果は明瞭である。

3. 平面形状制御精度の向上

MAS 圧延法により、これまでに述べたような成果が得られたが、この制御精度をさらに向上させ、MAS 圧延法の効果を拡大するため、次のような改善をおこなった。

3.1 平面形状予測精度の向上

2.1 で示した形状予測モデルは、従来圧延、すなわち MAS 圧延を実施しない場合の圧延後の鋼板平面形状を予測するもので、その精度はすでに Fig. 5, 6 で検証されている。しかし、このモデルには、MAS 圧延を実施することにより二次的に発生する平面形状変化が考慮されていない。このため、MAS 圧延の工程化後のデータをもとにこの二次的な平面形状変化を考慮したモデルを作成した。

一般的に、エッジングにより生成したドッグボーンを水平ロールで圧下する場合、いわゆる“幅戻り現象”が起こることが知られている⁹⁾。これは、幅エッジ部には長手方向伸び率の差に起因した圧縮応力が作用して、長手方向メタルフローを抑制し、幅方向メタルフローとなつて現れたものと考えられる。これは MAS 圧延においても全く同様であり、特に大きな板厚修正量 Δh_{crp} を必要とする幅出し MAS 圧延において顕著である。

Fig. 14 は、幅出し MAS を実施したことによる幅形状の変化を、幅出し MAS 板厚変化量 Δh_{crp} について整理したものである。 Δh_{crp} の増加に伴い、 T も増加していることがわかる。これは長手方向先後端では、中央部に比べ圧縮応力が小さいため、それだけ幅方向メタルフローも少ないことに起因したものと考えられる。

従つて、MAS 圧延法で形状予測精度を向上させるためには、この二次的な形状変化をも予測し、補正する必要がある、これを(8)式で与えている。

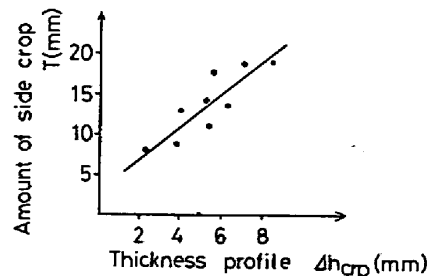


Fig. 14. Relation between the thickness profile Δh and the side crop change.

$$f_s(x) = C_0 + C_1 \frac{\Delta h_{crp}}{hf} x^{-1} + C_2 \frac{\Delta h_{crp}}{hf} x^{-2} \dots (8)$$

ここで h_f : 幅出し最終パスでの平均厚

C_0, C_1, C_2 : 鋼板幅, 幅出し中の鋼板長さにより決定される定数

3.2 MAS 圧延における板厚制御精度の向上

MAS 圧延における板厚制御は,

(1) ねらい板厚が長手方向位置に対して連続的に変化する事。

(2) 板厚修正をおこなうために, パス内で大きな荷重変動を伴う事。

の2点で, 特徴的なものと言える。

当初は, 予測荷重に基づき, 板厚修正量 Δh をロール開度の変化量 ΔS に換算し, ΔS のみを制御する方式であったが, その後, AG (Absolute-Gauge)-AGC 機能

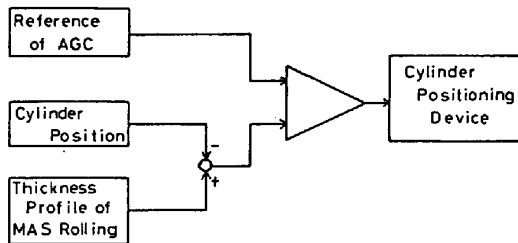


Fig. 15. Thickness control system in AG MAS rolling system.

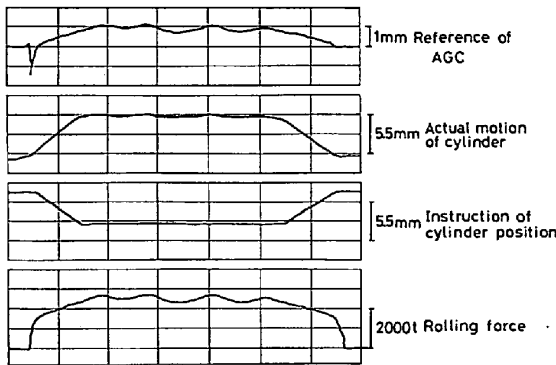


Fig. 16. An example of actual controlled data of MAS rolling.

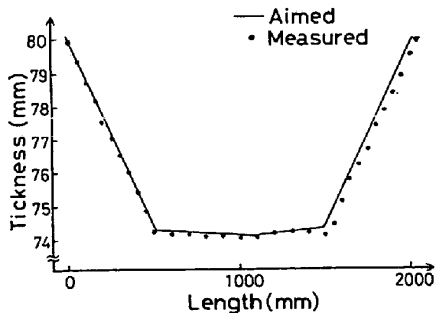


Fig. 17. An example of aimed and measured thickness profile of MAS rolling.

を応用した新しい板厚制御方式を開発, 実用化した。

Fig. 15 は, この板厚制御方式のブロック図である。板厚修正の指令値には Δh を用い, パス中の荷重変動による板厚変化は, AGC により制御される。

Fig. 16 は, 成形 MAS 圧延パスにおける板厚制御の例である。AGC が MAS 圧延の Δh および, スキッドマークによる荷重変動に良く対応していることがわかる。

また, Fig. 17 には幅出し MAS 圧延での狙い板厚プロフィールに実測値を対応させて示す。

4. 異幅 MAS 圧延法

Fig. 18 に, 幅の異なる注文の組み合わせ例を示す。このような組み合わせは, スラブの単重拡大, 連続化をはかるといふ観点から避け難いものとなつている。異幅組み合わせによる歩留りロスを少なくするため, 従来より素材設計技術の向上が指向されてきた。一方, 異幅 MAS 圧延法は, 鋼板に異幅形状を付与することにより, 圧延技術面からこの歩留りロスを解消するものである。

異幅 MAS 圧延法は, MAS 圧延法を応用したもので, 原理的には成形 MAS 圧延と同様である。

Fig. 19 に, 異幅 MAS 圧延法の板厚修正プロフィールの例を模式的に示す。

幅広部の制御点 $P_0 \sim P_3$ での板厚変化量 Δh は, それぞれの長手方向変位 $x_0 \sim x_3$ に対し, (10) 式で表され

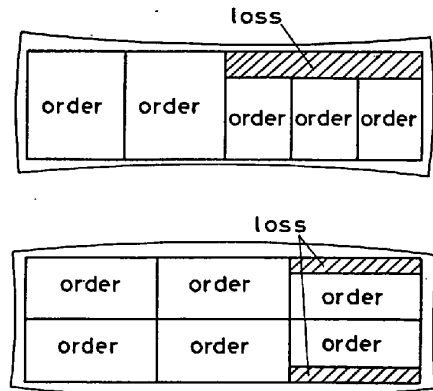


Fig. 18. An example of mixed products.

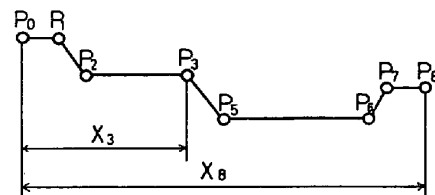


Fig. 19. Thickness profile schematic model in different width MAS rolling.

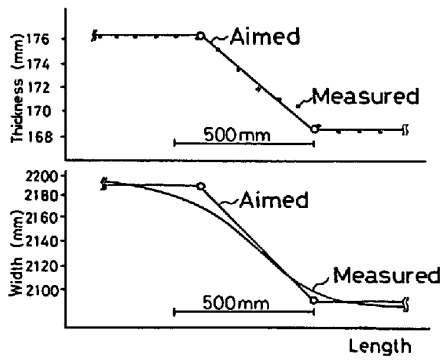


Fig. 20. An example of actual controlled data of different width MAS rolling.

る。

$$\Delta h(x_0 \sim x_3) = \frac{T(x_0 \sim x_3) * H_B}{W_S} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $T(x)$: 長手方向変化 x に対して与えられる幅形状変化予測量
 H_B : 幅出し最終厚
 W_S : スラブ幅

これに対し、幅狭部の制御点 $P_5 \sim P_8$ での板厚変化量 $\Delta h(x_5 \sim x_8)$ は、(10)式の $T(x)$ に異幅量 ΔW を加えて、(11)式で与えられる。

$$\Delta h(x_5 \sim x_8) = \frac{\{T(x_5 \sim x_8) + \Delta W\} * H_B}{W_S} \dots\dots\dots (11)$$

異幅量 ΔW に対しても、幅形状変化予測量 $T(x)$ と同様に体積一定の関係を適用している。

この板厚プロフィールに基づいて異幅 MAS 圧延を実施した場合の鋼板幅形状を Fig. 20 に示す。幅変更部で、実幅形状が(11)式の体積一定の関係で計算した幅形状から外れていることがわかる。これは通常の MAS 圧延に比べ板厚変化量が大きいために幅広部と幅狭部の伸び率の差が相互の拘束力として作用し、その結果幅変更部において非定常なメタルフローが生じたことに起因するものと考えられる。

Fig. 21 は、これを考慮し、補正を加えた場合の板厚プロフィールである。これは、Fig. 19 の板厚プロフィールに新たに P_4 を追加したもので、 P_4 での板厚修正量 $\Delta h(x_4)$ は (12)式、(13)式により与えている。

$$\Delta h(x_4) = \frac{\{T(x_4) - w\} * H_B}{W_S} \dots\dots\dots (12)$$

$$w = \lambda * (\alpha_2 / \alpha_1) * W_1 \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $T(x_4)$: P_4 での幅形状変化予測量
 w : 体積一定の関係を用いた計算値からの幅形状の偏差
 λ : 幅変更部の板厚プロフィールの傾斜によって決まる補正係数

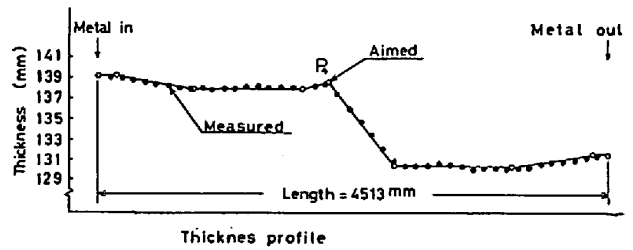


Fig. 21. An example of actual controlled data of different width MAS rolling.

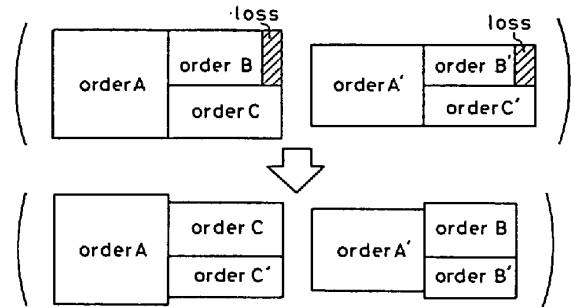


Fig. 22. An example of the method to remove the loss.

α_1 : 幅狭部の幅方向圧延比
 α_2 : 幅広部の幅方向圧延比
 W_1 : 幅広部の幅

5. 異幅 MAS 圧延法への素材設計技術の対応

異幅組み合わせおよび異長組み合わせによる歩留りロス、川崎製鉄水島製鉄所の例でそれぞれ、約 0.4% に達し、このロスを削減することが、従来、素材設計における重要なテーマであった。異幅 MAS 圧延の開発により、前者の異幅組み合わせによる歩留りロスを大幅に削減することが可能となり、組み合わせの自由度が増え、次のような効果が得られる。

- ①. 異長組み合わせによる歩留りロスを削減する。
- ②. スラブ単重の拡大をはかる。

Fig. 22 は、異幅組み合わせを行うことにより、異長組み合わせによる歩留りロスを削減した例である。

以上のように、異幅 MAS 圧延法は、素材設計技術の対応によつて、異幅組み合わせによる歩留りロス削減にとどまらず、その効果を拡大することが可能となり、その総合的な効果は大きいと考えている。

6. 結 言

厚板圧延における歩留り向上に関する技術の一つとして、鋼板の平面形状を矩形に近づける MAS 圧延法を開発した。さらにこの制御精度の向上のために、

- (1) 幅出し MAS 圧延時の「幅戻り」を考慮した平

面形状予測モデルの作成

(2) MAS 圧延時の板厚制御方法として、絶対板厚制御技術の導入

を実施し、これについて述べた。

また、MAS 圧延法の応用技術として、異幅 MAS 圧延法について述べると共に、その素材設計への対応方法について述べた。

これら新技術の開発により、川崎製鉄水島製鉄所第 2 厚板工場では、4.4% の厚板歩留り向上がはかられ、さらにその効果を拡大しつつある。

文 献

1) 髙崎 忍: 日本金属学会会報, 19 (1980) 3

2) 柳沢忠昭, 三芳 純, 坪田一哉, 菊川裕幸, 池谷尚弘, 磯山 茂, 旭 一郎, 馬場和史: 川崎製鉄

技報, 11 (1979) 2

3) 平井信恒, 吉原正典, 坪田一哉, 菊川裕幸, 西崎宏: 鉄と鋼, 66 (1980) 8, A160

4) 石井功一, 坪田一哉, 菊川裕幸, 馬場和史, 旭一郎, 尾山博美: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S306

5) 池谷尚弘, 坪田一哉, 瀬川佑二郎, 磯山 茂, 菊川裕幸, 旭 一郎: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S304

6) 瀬川佑二郎, 石井功一, 池谷尚弘, 磯山 茂, 馬場和史, 尾脇林太郎: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S305

7) 坪田一哉, 竹川英夫, 井上正敏, 磯山 茂, 旭一郎, 池谷尚弘: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S241

8) 坪田一哉, 竹川英夫, 井上正敏, 磯山 茂, 旭一郎, 池谷尚弘: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S279

9) 笹治 峻, 久津輪浩一, 堀部 晃, 野原由勝, 山田稔久, 渡辺和夫: 鉄と鋼, 66 (1980) 8, A165