

## 技術報告

## 孔型連続ミル計算機制御技術の開発

藤本 隆史\*・馬場 和史\*・新井 和夫\*<sup>2</sup>  
中西 輝行\*・山崎順次郎\*

## Development of Computer Control Techniques for Tandem Mill with Grooved Rolls

Takashi FUJIMOTO, Kazushi BABA, Kazuo ARAI,  
Teruyuki NAKANISHI and Junjiro YAMASAKI

## Synopsis :

Kawasaki Steel has recently developed computer control techniques for a 4-tandem mill with grooved rolls at the billet mill in Mizushima Works.

These techniques consist of set-up and dynamic control functions. The purpose of set-up control is to decide the manipulating variables (roll gap, roll revolution) which cause material dimensions to achieve the aimed value by means of the mathematical models. We have developed such presice models as to be applied to on-line control. On the other hand, the purpose of dynamic control is to achieve uniform sectional dimensions along the length of the material. Development has also been made on the new sectional profile control technique to utilize dynamic roll gap control, firstly as a grooved mill.

As the result of these application, the dimensional accuracy of the product has been significantly improved in the mill.

Key words : rolling ; billet ; computer control ; grooved rolls ; set-up control ; dynamic control ; tandem mill.

## 1. 結 言

水島製鉄所鋼片工場は 1984 年 2 月に稼動し、丸および角ビレットを中心とした条鋼工場向素材を圧延する新鋭工場である<sup>1)</sup>。本工場は連铸との連続化・同期化操業を基本とし、徹底した自動化・高度なオンライン品質保証を達成している<sup>2)</sup>。

仕上ミルでは、連铸との連続化・同期化操業を可能とするため、迅速スタンド交換によるロールチャンスフリーを実現しており<sup>3)</sup>、多様な圧延サイズ、鋼種に対応した汎用性のある制御方式が要求される。また、シームレスパイプ素材である丸ビレットは全品種カットビレットからの積み上げによる素材計算を実施しており、圧延制御面で厳しい寸法精度が要求されている。

このようなニーズを受けて、仕上ミルを対象に孔型連続ミル計算機制御技術の開発を行つた。特に、孔型連続圧延の分野で主流であつた張力制御に代わつて、孔型圧延機では初めてオンラインリアルタイム圧下制御による断面形状制御・MFPC (Mizushima Fine Profile

Control) を開発し、バー内長手方向寸法精度の向上を図つた<sup>4)</sup>。

本稿では水島鋼片工場仕上ミルで開発した孔型連続ミル計算機制御技術についてべる。

## 2. 仕上ミルの概要

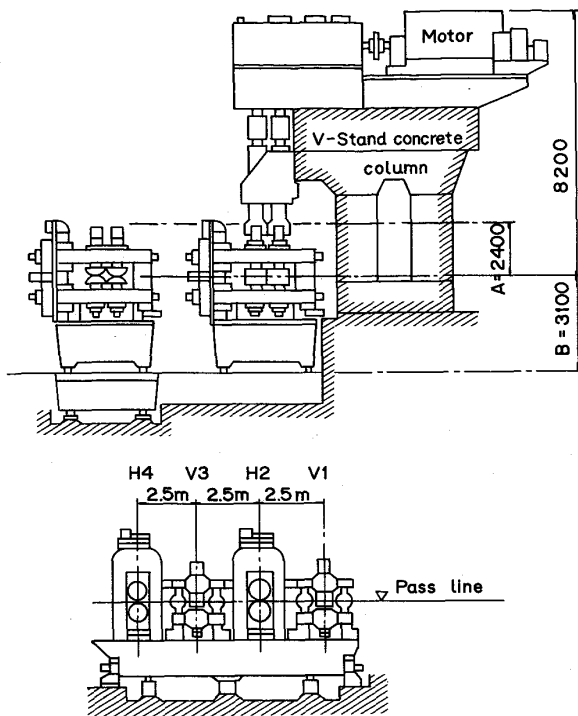
铸片工場仕上ミルではシームレス鋼管用素材となる丸ビレット (110 mm $\phi$ ~230 mm $\phi$ )、線材・棒鋼用素材となる角ビレット (115 mm $f$ ~150 mm $f$ ) および外販用丸棒 (90 mm $\phi$ ~254 mm $\phi$ ) を圧延している。仕上ミルの設備仕様を Fig. 1 に示す。このミルの特徴は、

- (1) VH (Vertical-Horizontal) タイプの 4 スタンド孔型連続ミル
- (2) オンラインスタンド交換時間 5 min 以内のロールチャンスフリーミル
- (3) スタンド間距離 2.5 m のコンパクトミル
- (4) 1 ロール 1 カリバー方式
- (5) ミル常数 300 t/mm の高剛性ミル
- (6) 孔型圧延において世界初のダイナミック圧下制御

昭和 61 年 9 月 1 日受付 (Received Sep. 1, 1986)

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

\*2 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)



| Mill                         |              |                                                            |
|------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------|
| Rolling size (mm)            |              | 90~250 φ 82 f 150 f                                        |
| Roll type                    |              | Single groove roll                                         |
| Number of stands             |              | 4                                                          |
| Roll diameter                |              | 950 mm                                                     |
| Roll barrel                  |              | 500/620 mm                                                 |
| Total weight                 |              | 880 t                                                      |
| Distance between each stands |              | 2 500 mm                                                   |
| Height of mill               | Total height | 5 500 mm                                                   |
|                              | Height A     | 2 400 mm                                                   |
|                              | Height B     | 3 100 mm                                                   |
| Total length of mill         |              | 11 300 mm                                                  |
| Main motor                   |              |                                                            |
| Capacity                     |              | V1・H2 : 1 200 kW<br>V3・H4 : 1 400 kW                       |
| Control                      |              | AC VVVF Digital ASR                                        |
| Motor rpm                    |              | V1, H2 : 272/680 rpm<br>V3, H4 : 318/795 rpm               |
| Gear ratio                   |              | V1 : 1/32.464 H2 : 1/28.277<br>V3 : 1/27.388 H4 : 1/22.958 |
| Sensor                       |              |                                                            |
| Load cell                    |              | 600 t × 2/stand                                            |
| Top hat sensor               |              | Minimum bit 10 μm                                          |
| Profile meter                |              | Accuracy 70 μm                                             |

Fig. 1. Specifications of the finishing mill.

(AGC) 機能の採用

(7) 主機モーターに全デジタル交流可変速制御の採用

(8) 各種センサーの装備 (プロフィール計・ロードセル・ロール開度センサーなど)

があげられる。(6)~(8)にみられるように高度なミル

制御を指向した構成としている。なお以降では仕上ミルの各スタンドを上流側より V1・H2・V3・H4 と呼ぶ。

### 3. 孔型連続ミル計算機制御の概要

孔型圧延におけるミル制御の目的は、材料温度・寸法・材質などの変化に対し、天地寸法 (高さ) およびオーバー寸法 (幅) とともに目標どおりの寸法に圧延されるようロール開度・ロール回転数をコントロールすることである。特に、オーバー寸法はカリバーで拘束されない自由面となるので外乱の影響を受けやすく、オーバー寸法をいかに制御するかがポイントとなる。ミル制御には、材料温度変化・荷重・トルクなど種々の圧延パラメーターを予測するモデル式が必要であるが、オーバー寸法制御のためには特に幅拡がり予測式が重要となる。鋼片工場稼動以来、制御アルゴリズムの開発と並行して高精度の圧延パラメーター予測モデル式を作成してきた。

今回開発したミル制御は、大別してセットアップ制御とダイナミック制御の2つより構成している。

#### 3.1 セットアップ制御

圧延開始前に材料ごとの圧延現象 (断面形状変化・材料温度・荷重など) を予測し、目標寸法を得るために必要な各スタンドのロール開度・ロール回転数を決定し、初期設定する。

#### 3.2 ダイナミック制御

スキッドマークなどの外乱に対して、圧延中に一定の制御周期で材料長手方向寸法を一定に制御するものである。従来の張力制御にかわって孔型圧延では世界初のダイナミック圧下制御を開発した。

4章ではオーバー寸法制御に特に重要である幅拡がり予測式、5章では圧延パラメーター予測式を用いたオンラインセットアップ制御、6章では孔型圧延では世界初のダイナミック圧下制御について述べる。なお、幅拡がり予測式以外にも種々のモデル式の開発<sup>4)5)</sup>を行っているが本稿では省略する。

## 4. 幅拡がり予測式

#### 4.1 篠倉の幅拡がり予測式

孔型圧延における幅拡がり予測式としては(1)式に示す篠倉の式<sup>6)</sup>が知られている。

$$\beta = \frac{B_1 - B_0}{B_0} = \alpha \times \frac{\bar{l}_a}{B_0 + 0.5H_0} \times \frac{F_H}{F_0} \dots\dots\dots (1)$$

$\beta$ : 幅拡がり率  $B_0$ : 入側幅  $B_1$ : 出側幅  $H_0$ : 入側高さ  $\bar{l}_a$ : 平均投影接触長  $F_H$ : 孔型排除面積  $F_0$ : 入側断面積  $\alpha$ : 係数

このモデル式は材料形状・カリバー形状などにより決ま

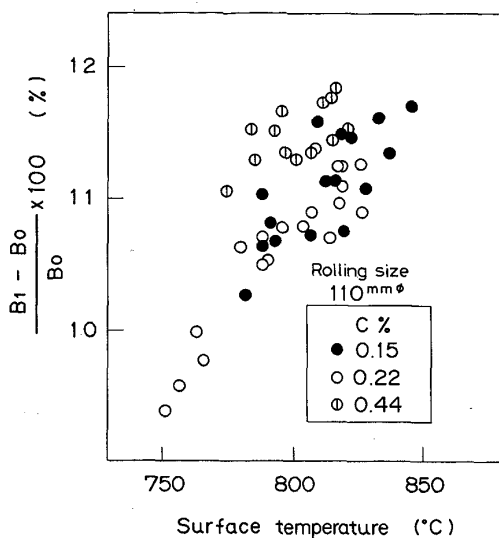


Fig. 2. Dependence of width spread ratio on temperature.

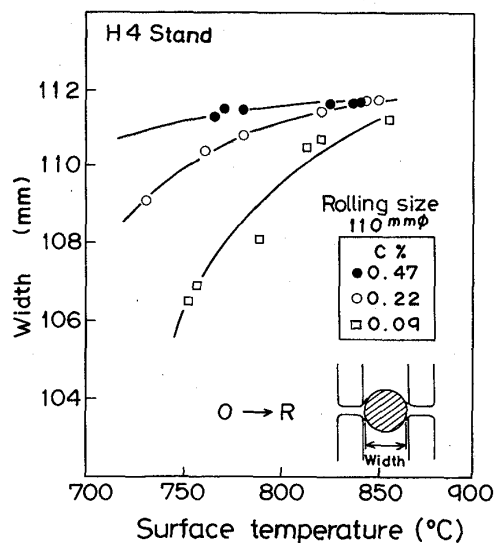


Fig. 3. Dependence of width on temperature.

る幾何学的パラメーターのみで幅拡がりを変現している。ミル後面に設置したプロフィール計の実測値より求めた幅拡がり率と H4 スタンド出側表面温度との関係を Fig. 2 に示す。温度低下とともに幅拡がり率は減少し、炭素含有量によつてその傾向は異なる。従つて、幅拡がり現象を幾何学的パラメーターのみで表現することはできない。

#### 4.2 幅拡がりの温度依存性

実機圧延実験を行い幅拡がりにおよぼす温度・成分の影響を調査した。実験は 110 mmφ ビレットをロール開度・ロール回転数一定の条件で H4 スタンド出側表面温

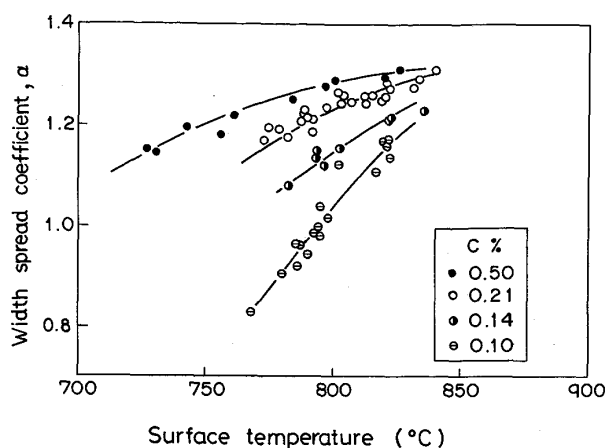


Fig. 4. Dependence of width spread coefficient on temperature.

度を 730°C~850°C の間で変化させて圧延した。なお、実験は炭素含有量の異なる 3 種の方法について行つた。Fig. 3 に実験結果を示す。圧延後の幅は温度低下とともに減少する。また、温度が高くなると一定値に近づく。この幅拡がりの温度依存性は低炭素鋼ほど顕著である。幅拡がりの温度依存性について、永井<sup>7)</sup>は種々の鋼種に対しての平ロールによる熱間圧延実験結果よりオーステナイト相域のものは温度による幅拡がり率の差異はほとんど認められないが、フェライト相域の場合には高温のものほど幅拡がり率は大きくなると報告している。今回の実験結果と永井の報告より、炭素鋼における幅拡がりは、次のような温度依存性を示すと考えられる。高温のオーステナイト相域では幅拡がりは温度に依存せず一定である。温度が低下しフェライトとの 2 相域になると、フェライト相域の温度依存性の影響が顕われ、幅拡がりが減少する。

#### 4.3 温度依存性を考慮した幅拡がり予測式

(1) 式の篠倉の幅拡がり式は、幅拡がりが温度依存性を示さないオーステナイト相域でのモデルであると考え、2 相域への適用範囲の拡大を検討した。基本モデルとしては(1)式を用い、係数  $\alpha$  を温度・炭素含有量などをパラメーターとして数式化を試みた。実機圧延データより係数  $\alpha$  を逆算し、種々のパラメーターで整理した。1 例を Fig. 4 に示す。これらの解析結果より係数  $\alpha$  の実験式を得た。

$$\alpha = \alpha_0 \varepsilon + \alpha_1 \ln C + \alpha_2 \frac{B_0}{B_K} + \alpha_3 \cdot C_\alpha + \alpha_4 \quad \dots (2)$$

$\varepsilon$ : 歪み  $C$ : 炭素含有量  $B_0$ : 入側幅  $B_K$ : カリバー幅  $C_\alpha$ : 2 相率 (表面温度と炭素含有量の関数)  $\alpha_0 \sim \alpha_4$ : 係数

Fig. 5 に係数  $\alpha$  として (2) 式を用いた場合のオーバル寸法の予測精度を示す。種々のサイズにおいて  $\pm 0.6$  mm の範囲でオーバル寸法が計算できており、オンラインモデルとして使用可能なレベルである。

## 5. オンラインセットアップ制御

### 5.1 セットアップ制御の特徴

孔型圧延の場合、オフラインで材質・温度などを仮定してロール設計が行われ、カリバー形状・圧下配分などが決定される。ここで決定されたカリバー形状はオンラ

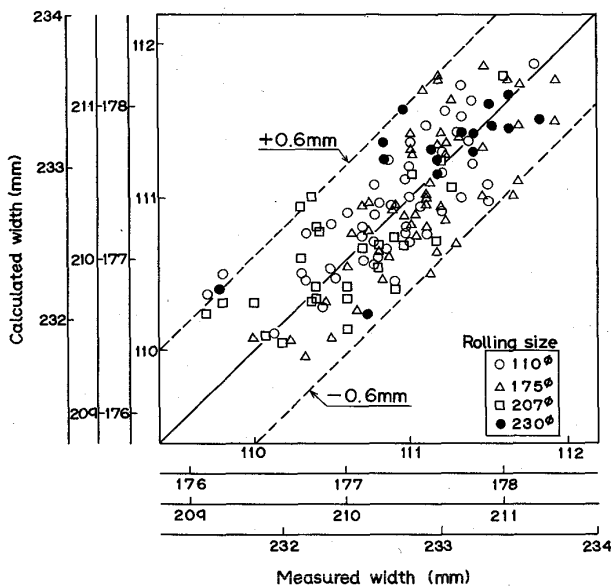


Fig. 5. Comparison of measured and calculated width

インでは変更不可であり、オンライン制御における大きな制約条件となる。従つて今回開発したセットアップ制御においては、ロール設計時に計算した圧下配分（各スタンド出側目標寸法）を初期値として使用し、温度・材質などの変化により生じる寸法変動を吸収すべく収束計算により圧下配分を最適化する方式とした。

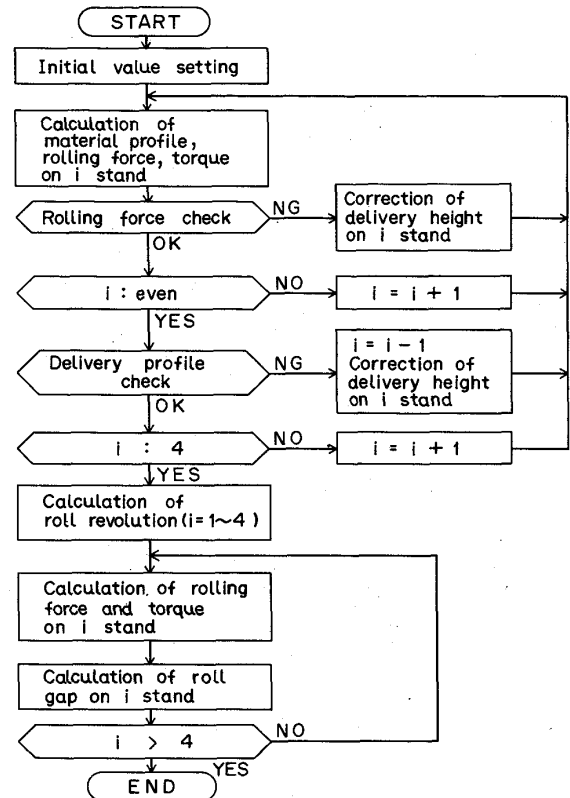


Fig. 6. Calculation flow for on-line set-up control.

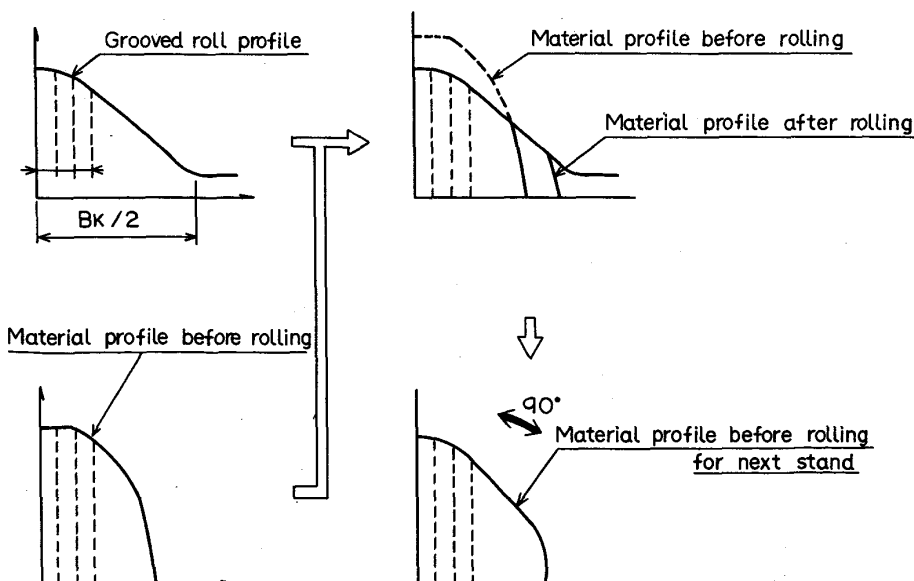


Fig. 7. Method of calculating sectional profile.

Fig. 6 にセットアップ制御の収束計算フローを示す。セットアップ制御の制御量は天地・オーバル寸法であるが、天地寸法は最終スタンド (H4) のロール開度で制御できるのに対し、オーバル寸法は 1 つ上流スタンド (V3) のロール開度で制御する必要がある。従つて V スタンドと H スタンドをペア (V1 と H2, V3 と H4 の 2 組) として、H スタンド出側形状をチェックしオーバル寸法が許容範囲に入るまで V スタンド出側寸法を修正し収束計算を行つている。

セットアップ制御において各スタンドの断面形状の計算精度は、幅広がりや荷重などの予測精度に影響し、収束計算結果を左右するので非常に重要である。今回の制御においては Fig. 7 に示す断面形状計算方法を採用した。これはカリバーおよび材料断面形状を幅方向  $n$  等分の折線近似した座標で表現し、両者を重ね合わせて圧延時の出側材料形状を求める方式である。本方式はカリバー形状によらない汎用方式であり、分割数を増すことで精度向上がはかれる。現状、ロール中心で対称とみなし、片側 10 分割で十分な精度を得ている。

Table 1. Examples of calculated data by set-up control.

| Case | Stand | Height (mm) | Width (mm) | Temp. (°C) | Load (t) | Roll gap (mm) | Roll speed (rpm) |
|------|-------|-------------|------------|------------|----------|---------------|------------------|
| 1    | V1    | 115.1       | 150.1      | 830        | 386      | 9.3           | 14.90            |
|      | H2    | 122.5       | 132.5      | 837        | 363      | 7.7           | 17.81            |
|      | V3    | 100.9       | 138.4      | 843        | 268      | 8.3           | 21.52            |
|      | H4    | 111.3       | 111.3      | 848        | 251      | 5.8           | 25.03            |
| 2    | V1    | 115.7       | 150.7      | 818        | 369      | 9.9           | 14.95            |
|      | H2    | 122.6       | 132.5      | 826        | 375      | 7.8           | 17.85            |
|      | V3    | 101.9       | 138.3      | 832        | 244      | 9.4           | 21.53            |
|      | H4    | 111.3       | 111.3      | 837        | 267      | 5.7           | 25.03            |

Size=110mm $\phi$ , Carbon=0.10%

## 5.2 セットアップ制御の実用化

Table 1 に収束計算結果の例を示す。Case 2 は Case 1 に比べて材料温度が低い場合である。4 章で述べたように材料温度低下に伴い幅広がり量が小さくなるため、オーバル寸法を制御する V1 および V3 のロール開度が Case 1 より Case 2 で大きくなつており、幅広がり温度依存性を考慮した計算結果となつている。

Fig. 8 にこの制御方式で実圧延を行つた結果を示す。制御なし (図中白印) の場合に比べて、制御あり (図中黒印) は材料温度変化があつても天地・オーバルとも精度よく制御できている。

## 6. 断面形状制御 (MFPC)

### 6.1 BISRA-AGC の孔型圧延への適用

孔型連続ミルにおいてバー内長手方向寸法制御手段としては、張力制御が一般に知られている。張力制御は張力を一定に保つようロール回転数を補正することにより、ロール回転数の初期設定誤差などを吸収し、張力変動によるオーバル寸法の変動を防止するものである。しかし、実圧延においてはスキッドマークなどの張力以外の要因でも寸法精度を生じ、張力制御のみで長手方向寸法変動をコントロールすることは困難である。バー内長手方向の天地・オーバル同時制御を狙つてダイナミック圧下制御の適用を試みた。

Fig. 9 にスキッドマークにより約 120 t の荷重変動がある丸ビレットの天地・オーバル寸法変動の 1 例を示す。スキッドマーク部で天地寸法が大きくなつてのに対して、オーバル寸法は逆に小さくなつている。これは 4 章で述べた幅広がり温度依存性のためである。

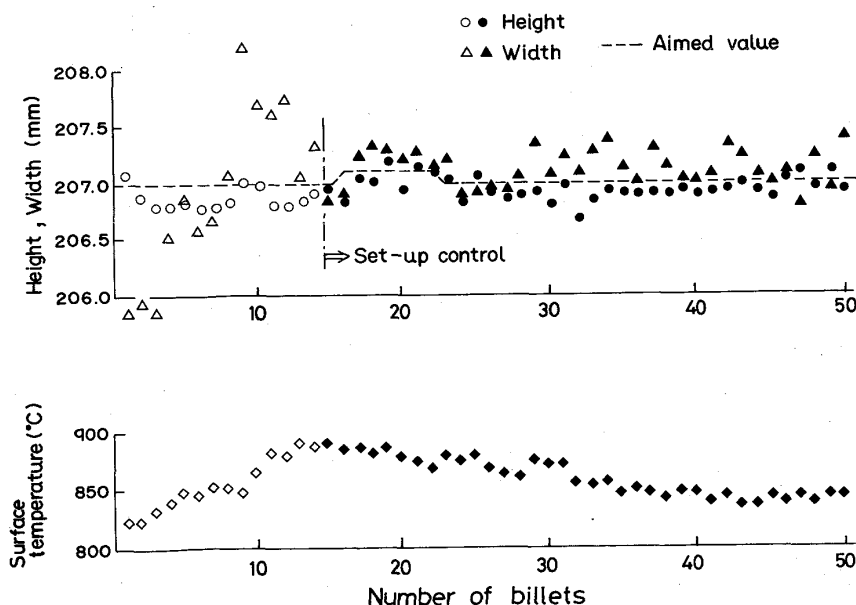


Fig. 8. Results of on-line set-up control.

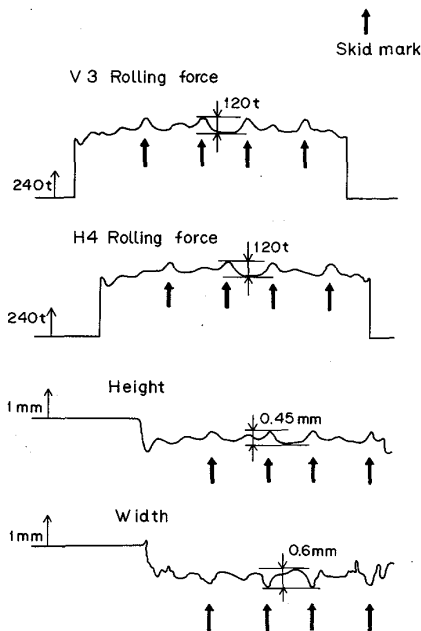


Fig. 9. Dimensional variation without control.

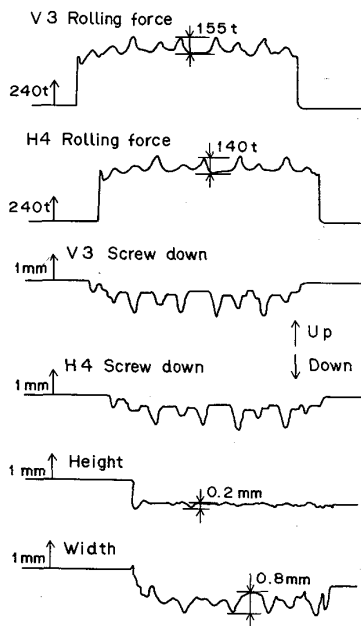


Fig. 10. Dimensional variation with BISRA-AGC.

Fig. 10 に板圧延で一般的に使用されているゲージメーター方式荷重フィードバック AGC (いわゆる BISRA-AGC) を V1~H4 の全スタンドに適用した結果を示す。Fig. 12 の無制御時に比べて天地寸法変動は半減しているのに対して、オーバー寸法変動は逆に大きくなっている。

Fig. 11 にスキッドマークによるオーバー寸法変動の模式図を示す。(a) に示すように、スキッドマーク部で

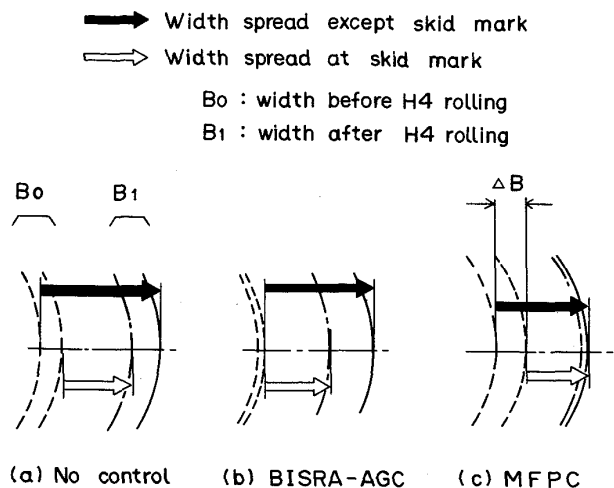


Fig. 11. Conception of MFPC.

は温度の影響で幅拡がり量は小さくなるが、V3 スタンドでのミル伸びの影響により入側オーバー寸法は大きくなっているため、結果的にはスキッドマークによる幅拡がり量の変動は幾分緩和される。一方、BISRA-AGC を適用すると (b) に示すように、H4 入側オーバー寸法が一定となるため、温度による幅拡がり量の差がそのまま寸法変動として残り、無制御に比べて寸法変動が増大する結果となる。従ってスキッドマークによるオーバー寸法変動を制御するためには、(c) に示すように幅拡がり量の差に応じてあらかじめ H4 入側オーバー寸法に変動を与えておく必要がある。4 章で述べた幅拡がり予測式をベースとしてスキッドマークによる幅拡がり量変動を予測し、H4 出側でオーバー寸法が一定となるよう V3 スタンドロール開度を制御する新しい圧下制御方式 (MFPC: Mizushima Fine Profile Control) を開発した。

## 6.2 MFPC の実用化

独自に開発した MFPC において、圧下修正量の決定方法を具体的に説明する。なお、以下で  $\Delta X_i$  はロックオン点からの変化量を示し、 $i$  はスタンド番号を示す。

(1) 最終の H4 スタンドは BISRA-AGC を用いて天地寸法変動を制御する。

(2) 圧延中の荷重変動の大きな要因は、材料温度と寸法の変動であると考えられるから、ロックオン点近傍の微小変化量に対しては (3) 式で線形化する。

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \times \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial h} \times \Delta h \quad \dots\dots\dots (3)$$

$P$ : 圧延荷重  $\theta$ : 材料温度  $h$ : 天地寸法

ここで、 $\Delta h$  はゲージメーター式より求め、ロードセルにて測定した荷重変化  $\Delta P$  と合わせて、材料温度変化

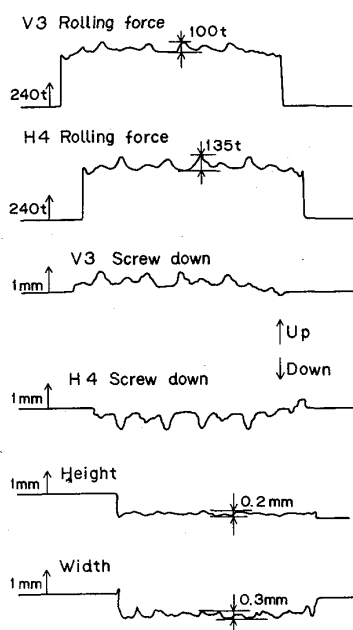


Fig. 12. Dimensional variation with MFPC.

$\Delta\theta$  を求める。影響係数  $\partial P/\partial\theta$  および  $\partial P/\partial h$  は荷重予測式から求める。

(3) V3 スタンドにおいて(2)項の方法で、V3 スタンド通過時の材料温度変化  $\Delta\theta_3$  をリアルタイムに計算する。

(4)  $\Delta\theta_3$  より H4 スタンド圧延時の温度変化  $\Delta\theta_4$  を予測する。圧延温度予測モデルより計算可能であるが、ここでは簡易的に  $\Delta\theta_4 = \Delta\theta_3$  としている。

(5) 既に述べたように圧延中の幅拡がり変動の大きな要因は材質変化であると考えられるから、(1)式を次のように線形化する。

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial\theta} \times \Delta\theta \quad (4)$$

$\beta$ : 幅拡がり率

ここで影響係数  $\partial\beta/\partial\theta$  は幅拡がり予測式より求める。 $\Delta\theta_4$  より H4 スタンドでの幅拡がり率変化  $\Delta\beta_4$  を計算する。

(6)  $\Delta\beta_4$  を用いて H4 スタンド出側オーバル寸法を一定とする入側オーバル寸法変化  $\Delta B_4$  を求める。ここではロックオン点からの幅拡がり率、入側オーバル寸法の変化量  $\Delta\beta \cdot \Delta B$  を考え、

$$(\beta_L + \Delta\beta) \times (B_L + \Delta B) = b_L \quad (5)$$

$\beta_L, B_L, b_L$  はそれぞれロックオン点での値となるように、

$$\Delta B = -\Delta\beta \cdot \frac{B_L}{\beta_L} \quad (6)$$

から  $\Delta B_4$  を求める。

(7) H4 スタンド入側オーバル寸法変化  $\Delta B_4$  は、V3 スタンド出側天地寸法変化であるから、V3 スタンドにおいて目標値を  $\Delta B_4$  だけ修正して圧下制御を行う。

Fig. 12 に MFPC を実施した時の一例を示す。H4 スタンドでは BISRA-AGC によりスキッドマーク部で圧下は締方向に動作しているのに対し、V3 スタンドでは逆に圧下は開き方向に動作していることがわかる。これにより天地・オーバルともに無制御時に比べてバー内寸法変動を大幅に改善することができ、その有効性を実証した。

## 7. 結 言

孔型連続圧延の分野ではこれまで寸法制御の主流が張力制御を中心として開発されてきた。張力制御は材料の形状を積極的に制御するものでなく、形状が乱れるのを抑制するものであった。高寸法精度化のニーズを受けて、水島製鉄所鋼片工場仕上ミルにおいて天地・オーバルの同時制御を目的とした孔型連続ミル計算機制御の開発を行い次の結論を得た。

(1) 炭素鋼の幅拡がり現象は2相域において温度依存性を示す。これを考慮することにより、 $\pm 0.6 \text{ mm}$  の精度でオーバル寸法を予測できる。

(2) 圧延パラメーター予測モデル式を用いたオンラインセッティング制御により圧延寸法精度の向上が図れる。

(3) 孔型連続圧延においては世界で初めてダイナミック圧下制御を実用化し、独自に開発した MFPC によるバー内長手方向寸法制御の有効性が実証できた。

終わりに幅拡がりの解析にあたり有益な御助言を賜りました(株)富士電機総合研究所の篠倉恒樹氏に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 平井信恒, 吉原正典, 中西輝行: 川鉄技報, 17 (1985), p. 3
- 2) 山中榮輔, 山崎順次郎, 中川康弘, 柴山卓真, 三浦隆義: 川鉄技報, 17 (1985), p. 39
- 3) 山崎順次郎, 中西輝行, 中路 茂, 馬場和史, 菊川裕幸, 藤本隆史: 川鉄技報, 17 (1985), p. 13
- 4) 馬場和史, 藤本隆史, 新井和夫, 藤岡克志, 山崎順次郎, 中西輝行: 川鉄技報, 18 (1986), p. 152
- 5) 中西輝行, 藤本隆史, 馬場和史, 新井和夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S1126
- 6) 篠倉恒樹, 勝山昭史: 第29回塑性加工連合講演会 (1978), p. 109
- 7) 住友金属工業(株) (私信) 1969年12月