

技術報告

UDC 621.771.26-523

形鋼ミル計算制御システム*

土屋健治**・加茂川喜郎**

土屋孝男**・塩田敏彦**

Automatic Rolling System of H-Shapes by Computer

Kenji TSUCHIYA, Yoshiro KAMOGAWA,
Takao TSUCHIYA, and Toshihiko SHIOTA

Synopsis:

The Nippon Steel Corporation has long been realizing the necessity of developing an automatic rolling system of H-shapes. In an attempt to complete a new automatic system, not only mathematical models but also various sensors were first studied by the Nippon Steel Corporation.

Based on these achievements, we have successfully realized a dynamic computer control system for rolling H-shapes for the first time.

The new system comprises an automatic rolling system of universal mills of H-shapes and various sub-systems which support the main system. The main role of the automatic rolling system is to determine optimum conditions of rolling.

The system makes it possible to roll H-shapes uniformly in quality and get the required high-level quality of H-shapes.

1. ま え が き

形鋼製品はその種類および寸法が多岐にわたり、一般的には、多品種少量圧延を余儀なくされていた。さらに板圧延に比較し変形メカニズムが複雑であること、検出端開発が困難であつたことなどもあり、その製造技術は長年にわたる操業技術の蓄積と、現場作業者の技能によつて支えられてきた。

しかし、昭和36年H形鋼の専用圧延機としてユニバーサルミルが導入され、かつ日本経済が目覚ましい成長をとげたことにより、昭和40年以降基礎資材としてのH形鋼の需要が大幅に伸び、その利用技術も著しく進歩した。

このような需要の拡大、利用技術の進歩に伴い、品質要求もしだいに高度化し、従来の経験的圧延法では効率的な生産の達成が困難となり、科学的圧延法への脱皮が意識的に指向されるようになった。

当社でも早くからこの点を認識し、高品質H形鋼製造体制への体質改善をはかるべく、H形鋼ミル計算制御システムの開発を目標に、数式モデルおよび各種検出端の

開発を行ない、さらにそれらをベースに昭和47・48年の2年間を費し、世界初の本格的なダイナミックコントロール機能を有する形鋼ミル計算制御システムの導入ならびに実用化に成功した。

2. 堺大形ミル計算制御システム

2.1 システムの概要

本システムはH形鋼用ユニバーサルミルの最適セットアップを目的としたもので、主要機能として自動パススケジュール作成・修正および自動セットアップ機能を有し、本格的なダイナミックコントロールを特徴とし、加熱炉出側から仕上ミル出側までのミルラインをその制御範囲とする。

システムの構成は自動圧延システムとそれをサポートするサブシステムよりなる。自動圧延システムは設備条件、作業条件、鋼片仕様、製品仕様などに基き圧延すべき製品目標寸法を決定し、それを実現するべく品質・能力および設備条件を考慮した最適圧延パススケジュールを作成する機能と、その作成されたロール間隙設定値を各ミルAPC (Automatic Preset Control) 装置に自動

* 昭和49年11月、塑性加工連合講演会にて発表 昭和50年4月21日受付 (Received April 21, 1975)
(依頼技術報告)。

** 新日本製鉄(株)堺製鉄所 (Sakai Works, Nippon Steel Corp., 1 Yawata-cho Chikuko Sakai 590)

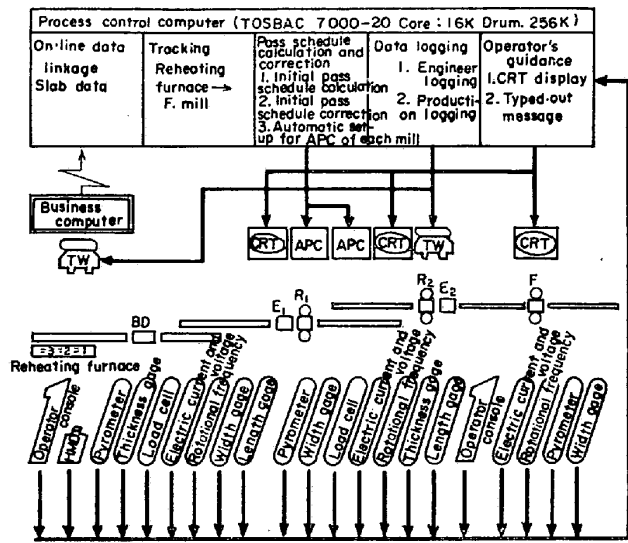


Fig. 1. Control function of the automatic H-shapes rolling system.

セットアップする機能およびミルラインに配備された多種多量の検出端実測値による適応制御機能を兼ね備えている。

また、サブシステムはオンラインデータリンク、トラッキング、データログ、オペレーターガイダンスの各機能を有し、自動圧延システムを有機的にサポートしている。Fig. 1に本システムの概念図を示す。

なお、制御用計算機としては TOSBAC 7000-20 を用いている。

2.2 パススケジュール計算モデルの構成

まず、本システムの根幹をなすパススケジュール計算モデルについて説明する。モデルは Fig. 2 に示される各個別モデルより構成されており、その内容は既に開発実用化されている板圧延モデルとは根本的に異なっている。

本システムの各モデルの理論の導入と展開については文献1) に詳細が述べられているので詳細はこれに譲るとして、ここではその結果を述べるだけにとどめる。

2.2.1 製品目標寸法作成モデル

本モデルは上位の計算機より与えられた製品公称寸法・寸法規格のデータに、需要家からの特別仕様条件ならびに圧延諸条件を加味して、実際に圧延すべき製品目標寸法の決定を行なう。以下、この方法について述べる。

① 目標ウェブ厚・フランジ幅を寸法規格および特別仕様で規制される上下限許容寸法の中央値に設定する。

② 次にフランジ厚およびウェブ高を決定する。ウェブ高寸法 W_h は次式により表わされる

$$W_h = 2 \cdot \alpha_f \cdot F_t + \alpha_w \cdot U_n + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot U_i \dots \dots \dots (1)$$

したがって、圧延条件が固定されると、ウェブ高寸法

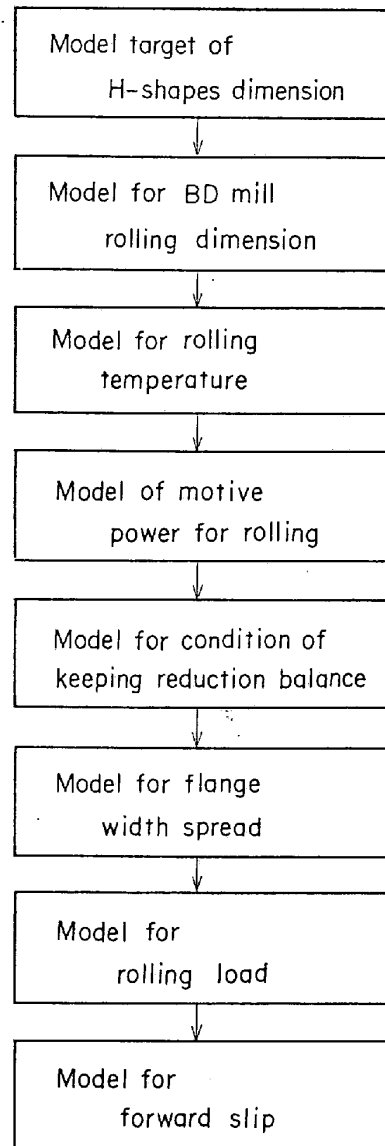


Fig. 2. Composition of pass schedule calculation model.

はフランジ厚で調整されることとなる。そのためフランジ厚はフランジ独自の寸法規格・特別仕様を満足するとともに、ウェブ高についても寸法規格・特別仕様を満足するような目標値になるよう調整する。

以上により圧延すべき寸法諸元が確定される。

記号

- W_t : ウェブ厚 (サフィックス 1: 圧延前, 2: 圧延後)
- F_t : フランジ厚 (")
- F_h : フランジ幅 (")
- S_w : ウェブ断面積 (")
- S_f : フランジ断面積 (")
- η_w : ウェブ厚延伸
- η_f : フランジ厚延伸
- η_t : トータル延伸

η_h : フランジ幅拡り係数
 U : 水平ロール胴幅 (i : ミルサフィックス)
 α_w, α_f : ウェブおよびフランジの仕上り温度係数
 S_h, S_v : ウェブおよびフランジロール間隙
 $\Delta W_t, \Delta F_t, \Delta F_h$: ウェブ厚, フランジ厚, フランジ幅肉引け量
 $\Delta H, \Delta V, \Delta E$: ウェブ厚, フランジ厚, フランジ幅圧下量
 γ_i : 各ミル水平ロール胴幅影響係数
 ΔM : フランジからウェブへのメタルフロー量
 β : フランジ肉引け係数
 k_t : 実効変形抵抗
 V : 圧延材の体積
 C_1 : フランジ幅拡り係数
 C_2 : フランジ残存係数
 $\lambda_{tj}, \lambda_{wj}$: j パスまでの全断面, ウェブ厚累積延伸
 $\lambda_{tn}, \lambda_{wn}$: 最終パスまでの全断面, ウェブ厚累積延伸
 τ : サイズ別圧下バランスの条件定数
 Q_w, Q_f : H形鋼特有のウェブおよびフランジ形状係数
 P_{h0}, P_{v0} : ウェブおよびフランジの板圧延荷重
 ψ : 縦ロール圧延荷重影響係数
 σ_w, σ_f : ウェブおよびフランジの相互作用応力
 k_w, k_f : ウェブおよびフランジの変形抵抗
 ξ : 相互作用係数
 ΔF_t : フランジ幅自由拡り量
 $\Delta F_t'$: フランジ幅復元量
 L_w, L_f : ウェブおよびフランジ投影接触長さ
 p_w, p_f : ウェブおよびフランジ圧延応力
 A_w, A_f, A_v : ウェブ面, フランジ内側面, フランジ外側面投影接触面積
 Y : フランジ片幅
 $\bar{V}_{rh}, \bar{V}_{rf}, \bar{V}_{rv}$: ウェブ面, フランジ内側面, フランジ外側面のロールと圧延材の平均相対滑り速度
 V_x, \bar{V}_x : 圧延材速度および圧延材平均速度
 μ, μ' : ロール摩擦係数, 縦ロールベアリング摩擦係数
 δ_{h1}, δ_{v1} : ウェブおよびフランジの板圧延先進係数
 δ_h, δ_v : 水平ロールおよび縦ロール先進係数
 R_h, R_v : 水平ロールおよび縦ロール半径
 W : 変形に要する仕事量
 W_h : ウェブ高寸法
 V_{Rh}, V_{Rv} : 水平ロールおよび縦ロールの周速度
 V_2 : 圧延材出口速度

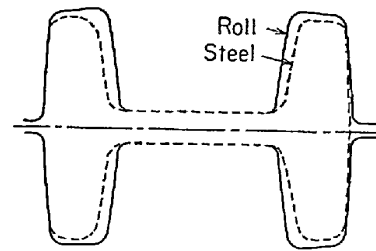


Fig. 3. Roll and steel profile at BD mill.

ϕ_w, ϕ_f : ウェブおよびフランジのH形鋼形状係数
 R_0 : ベアリング半径
 \bar{V}_{fv} : 縦ロールと圧延材の平均相対滑り速度
 θ : 縦ロールテーパ

2.2.2 BD仕上り断面推定モデル

一般に同一孔型で複数パス圧延を行なうと, Fig. 3 のように孔寸法型どおりの材料断面が確保できない. このようにロール間隙寸法に較べ材料寸法が小さくなる現象をここでは肉引け現象と呼ぶ.

$$\eta_t = (2S_{f1} + S_{w1}) / (2S_{f2} + S_{w2}) \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta_w = W_{t1} / W_{t2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_f = F_{t1} / F_{t2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta_h = F_{h2} / F_{h1} \dots\dots\dots (5)$$

で定義される. $\eta_t, \eta_w, \eta_f, \eta_h$ をそれぞれトータル圧延伸, ウェブ延伸, フランジ延伸, フランジ幅拡り係数と名付ける.

形鋼圧延の場合は一般的にウェブ部とフランジ部の圧下率が異なる. それにもかかわらず一体として圧延されるため, ウェブ部とフランジ部の間でメタルの授受が行なわれる. フランジ部からウェブに向かって流れるメタルフロー量を ΔM とすると, ΔM は次のようになる.

$$\Delta M = S_w (1/\eta_w - 1/\eta_t) = 2S_{f1} \times (1/\eta_t - \eta_h/\eta_f) \dots\dots\dots (6)$$

メタルがウェブとフランジの間で, 全く自由に移動できる場合には式(6)で表わされる ΔM のメタルフローが起こる. しかし, 実際にはメタルフロー量が制約されるため, 形鋼圧延の場合には, ロールにより加えられた圧下率とは異なつた延伸を示す.

すなわち, $\eta_f \geq \eta_w$ の場合にはウェブが肉引け現象を起し, $\eta_f < \eta_w$ の場合にはフランジが肉引け現象を起こして ΔM の不足分を補うことにより, バランスした圧延を可能にしている. 以下, 肉引け量の実験式を示す.

(1) $\eta_f \geq \eta_w$ の場合 (フランジ部肉引けなし)

$$\Delta W_t = S_h - W_{t1} / \eta_f \dots\dots\dots (7)$$

(2) $\eta_w > \eta_f$ (ウェブ部肉引けなし)

$$\Delta F_t = (1 - 1/\eta_t^{1-\beta}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta F_h = (1 - 1/\eta_t^\beta) \dots\dots\dots (9)$$

2.2.3 圧延温度モデル

一般に鋼材の熱間圧延において、圧延中の温度を正確に知ることは非常に重要である。その推定温度の正確さが、その後の圧延能率を左右し、製品の良否を決める鍵となる。圧延温度の推定に関しては、これまで各種の方法が提唱され実用化されている。例えば、

- ① 温度計により鋼材の表面温度を実測する方法。
- ② 鋼材の熱収支計算を行なうことにより、鋼材の平均温度を求める方法。
- ③ 非定常の二次元熱流偏微分方程式を解くことにより、鋼材の温度分布を求める方法²⁾³⁾。

などである。

上記③の方法により求めたH形鋼断面の温度分布図をFig. 4に示す。図からも明らかなように表面温度と平均温度が異なるため、①の方法は採用できない。②の方法は表面温度の推定ができないため、実測データによる精度の検証ができず、その推定が正しいか否かの判定ができず、時として不正確な推定値をもとに圧延制御が行なわれる憾みがある。

③の方法は鋼材断面の温度分布が求められるため、①、②の欠点を解消し得る有効な手段であるが、計算に長時間要するためオンラインでの使用が不可能である。

著者らは前述した各方法の欠点を解消し得る新しい計算方式を開発した。その方法は熱収支計算による平均温度推定式と簡易差分方程式による平均表面温度差の推定式とを開発し、その両者により平均温度と表面温度を求め、温度計実測値により表面温度の修正を行ない、さらに平均温度の補正も行なう方式である。

2.2.4 圧延動力モデル

圧延動力モデルの主要機能は与えられた圧延モータの許容運転最大トルクのもとで、圧延可能なウェブ部・フランジ部こみのトータル延伸 η_t を決定することである。

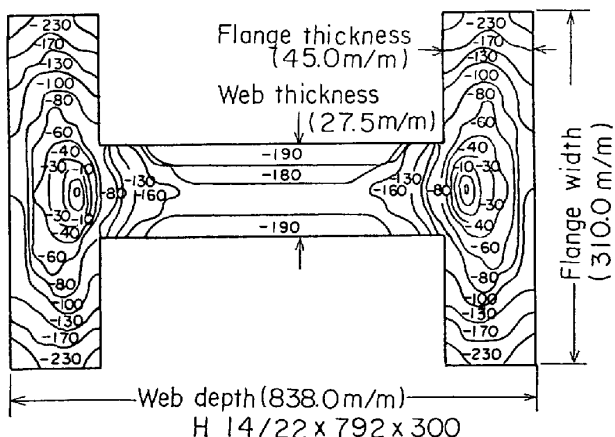


Fig. 4. Temperature distribution during rolling.

る。圧延における変形が一軸の理想的応力状態で行なわれていると仮定すると⁴⁾ この変形に要する仕事量 W は、

$$W = 9.8V \cdot k_t \cdot \ln \eta_t \dots\dots\dots (10)$$

となり、 W 、 V 、 η_t を実測することにより実効変形抵抗 k_t を求めそれを数式化することに成功した。

2.2.5 フランジ幅拡がりモデル

フランジ幅拡がりモデルの主要機能は、ユニバーサルミル圧延時のフランジ幅の変化量を推定することである。

ユニバーサル、エッジャーの連続配列のミルにおいてリバース圧延を行なった場合にはユニバーサルミルに供給される圧延材はユニバーサルミル圧延後のものと、エッジングミル圧延後のものの2とおりがある。

フランジ幅拡がりモデルは、この各々の場合についての幅変化を推定する必要があるため、著者らはユニバーサルミル通過後の鋼材を圧延する場合のフランジ幅の自由拡がり量の推定式と、エッジングを行なったことによりフランジ先端部に生ずるふくらみがユニバーサル圧延時にフランジ幅変化に与える影響量の推定式とを開発した。

フランジ幅自由拡がり量 ΔF_1 は次式で表わされる。

$$\Delta F_1 = C_1 \cdot \Delta V - \Delta H \dots\dots\dots (11)$$

エッジング後のユニバーサル圧延におけるフランジ幅復元量 $\Delta F_1'$ は次式で表わされる。

$$\Delta F_1' = C_2 \cdot \Delta E \dots\dots\dots (12)$$

2.2.6 圧下バランス条件式

前述した圧延動力モデルを用いて、被圧延材のトータル延伸が求められる。それに基づきウェブ厚、フランジ厚およびフランジ幅をそれぞれどのように圧下するかを決定する必要がある。

板材と異なりH形鋼は、前述したようにウェブ部とフランジ部がそれぞれ異なった圧下率で圧延されるにもかかわらず、一体として伸びなければならない。このためウェブ部とフランジ部の圧下率の間にはおのずからある制約条件が生まれる。この制約条件をここでは圧下バランス条件と呼ぶ。

この条件はウェブ部とフランジ部の延伸をほぼ一致させた状態に保つのがベターであるが、実際にはそのような条件が確保できないため、そのアンバランスをどこで吸収するかが問題となる。経験的に材料厚みの厚いうちに、このアンバランスを吸収するよう圧下配分を決定する必要がある。本システムでは実操業経験を基にした次のようなモデル式を用いて、圧下配分を決定している。

$$\left(\frac{\lambda_{tj}-1}{\lambda_{tn}-1}\right)^r = \frac{\lambda_{wj}-1}{\lambda_{wn}-1} \dots\dots\dots (13)$$

上式を満足するような λ_{wj} および λ_{tj} を求めることにより、ウェブ部とフランジ部の延伸が決定される。さ

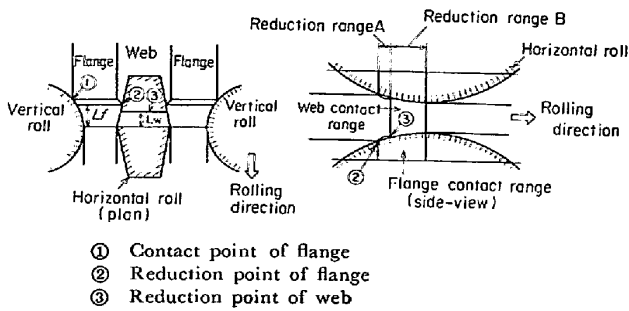


Fig. 5. Roll contact point of web and flange.

らに、フランジ部についてはフランジ幅振り式とマスフローコンスタントの関係式により厚みと幅の圧下量が決まる。

2.2.7 圧延荷重モデル

圧延荷重モデルの主要機能はユニバーサルミル圧延時の圧延荷重の予測を行ない、その荷重によるミルスプリング量を考慮したロール間隙の設定を行ない、各パスの目標出側寸法を確保することにある。

板圧延分野においては既に実用に耐えうる精度の圧延荷重モデルが開発されていたが、そのモデルのH形鋼圧延への適用は下記理由により不可能であった。

① ウェブの投影接触長さ L_w と、フランジの投影接触長さ L_f は Fig. 5 に示すように、一般的には $L_f > L_w$ となり、1パスの圧延過程はフランジのみの単独圧下領域Aとウェブとフランジが同時に圧下される領域Bに分けられる。

② 圧下領域Aにおいてウェブは水平ロールにより圧下されないが、フランジと一体となっているため、フランジ圧下の影響により引張られ、ウェブ厚を減ずるといわれるウェブ肉引け現象を呈する。

③ 圧下領域Bにおいては、一般的にはウェブ圧下率 $>$ フランジ圧下率のため、ウェブはフランジによりその伸びが拘束され、圧延後のウェブ厚が水平ロール間隙より厚くなるウェブ復元現象を起こす。

④ 圧下領域AおよびBにおいて、ウェブとフランジの圧下率が異なるにもかかわらず、ウェブとフランジは一体として伸びるため、圧下率の大きい方に圧縮力、小さい方に引張力が作用する。

以上述べたごとく、ウェブ肉引け・ウェブ復元現象およびウェブとフランジの圧下率の差に起因する相互作用力の影響などH形鋼特有の変形メカニズムを圧延荷重モデルでは考慮する必要がある。

いまウェブとフランジの間に相互作用力が働きフランジはこの相互作用力によつて圧縮応力 σ_f を受け、ウェブは引張応力 σ_w を受けているものとする。このとき例

えば縦ロール圧延荷重 P_v は純粹の板圧延荷重、すなわちウェブとフランジをウェブ付根部で切り離した場合の圧延荷重 P_{v0} よりも何倍が大きくなることが想定される。同様に、水平ロール圧延荷重 P_h は純粹の板圧延荷重 P_{h0} よりも逆に小さくなることも容易に推察される。

Q_f, Q_w をH形鋼特有の形状係数とすると、

$$P_v = Q_f \cdot P_{v0} \dots\dots\dots (14)$$

$$P_h = Q_w \cdot P_{h0} + \phi \cdot P_v \dots\dots\dots (15)$$

のように縦および水平ロール圧延荷重は記述される。

ただし、 $Q_w, Q_f, \sigma_w, \sigma_f$ は次のように計算される。

$$Q_w = (k_w - \sigma_w) / k_w \dots\dots\dots (16)$$

$$Q_f = (k_f + \sigma_f) / k_f \dots\dots\dots (17)$$

$$\sigma_w = \xi \cdot k_w \cdot (\eta_f - \eta_w) \cdot 2S_f / (2S_f + S_w) \dots\dots\dots (18)$$

$$\sigma_f = \xi \cdot k_f \cdot (\eta_f - \eta_w) S_w / (2S_f + S_w) \dots\dots\dots (19)$$

式(14)~(19)の諸関係式を圧下領域Aと圧下領域Bにわけて、それぞれ適用することにより水平ロール圧延荷重および縦ロール圧延荷重が推定できる。

2.2.8 先進係数モデル

本モデルはユニバーサルミルとエッジングミルの連続ミルの速度制御を司るものである。先進係数を δ とすると板圧延においては $\delta > 1.0$ であるのに対して、H形鋼圧延では $\delta < 1.0$ となることが多い。

これは縦ロールが無駆動であるため、水平ロールがウェブを圧下するとともに、フランジを圧減するに要する力も受け持つ必要があるからである。

摩擦条件は滑り摩擦とし、摩擦力は圧延材とロールとの相対滑り速度比に比例するものとして、圧延材に作用する力の関係式を導くと次のようになる。

水平ロールの外周面(ウェブ接触面)の摩擦力 Z_1 は次のようにして計算される。

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\tau h} &= \frac{1}{L_w} \int_0^{L_w} (V_{Rh} \cdot \cos \psi_h - V_x) dx \\ &= V_{Rh} \int_0^{L_w} \frac{\sqrt{R_h^2 - x^2}}{R_h} dx - \bar{V}_x = V_{Rh} - \bar{V}_x \dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$V_x = \frac{\eta_t + 2}{3} V_2 \dots\dots\dots (21)$$

$$\delta_h = V_2 / V_{Rh} \dots\dots\dots (22)$$

したがつて、圧延応力分布を一様と仮定すると、

$$Z_1 = 2\mu P_w A_w \frac{\bar{V}_{\tau h}}{V_x} = 2 \cdot \mu P_w A_w \left(\frac{\eta_t + 2}{3\delta_h} - 1 \right) \dots\dots\dots (23)$$

となる。

次に水平ロール側面(フランジ内側接触面)に作用する力 Z_2 を求める。Fig. 6のA点における V_{rf} は次のようになる。

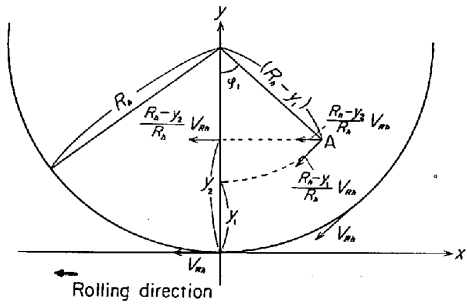


Fig. 6. Velocity of horizontal roll.

$$V_{rf} = \frac{R_h - y_1}{R_h} \cos \phi_h \cdot V_{R_h} - V_x$$

$$= \frac{R_h - y_2}{R_h} V_{R_h} - V_x \dots \dots \dots (24)$$

$$\therefore \bar{V}_{rf} = \frac{1}{Y} \frac{1}{L_f} \int_0^Y \int_0^{L_f} \left(\frac{R_h - y_2}{R_h} V_{R_h} - V_x \right) dx dy$$

$$= \frac{R_h - Y/2}{R_h} \bar{V}_x \dots \dots \dots (25)$$

したがって、

$$Z_2 = 2\mu P_f A_f \frac{\bar{V}_{rf}}{\bar{V}_x} 2\mu P_f A_f \left[\frac{(\eta_t + 2)(R_h - Y/2)}{3 \cdot \delta_h \cdot R_h} - 1 \right] \dots \dots \dots (26)$$

となる。

堅ロールの外周面（フランジ外側接触面）の摩擦力 Z_3 は次のようになる。

$$\bar{V}_{rv} = \frac{1}{A_v} \int_0^{A_v} \left[\frac{R_v - (Y + W_{t2}/2) \tan \theta}{R_v} \cos \phi_v V_{Rv} - V_x \right] ds = \frac{R_v - (Y + W_{t2}/2) \tan \theta}{R_v} V_{Rv} - \bar{V}_x \dots \dots \dots (27)$$

$$\therefore Z_3 = 2\mu \cdot P_f A_v \frac{\bar{V}_{rv}}{\bar{V}_x} = 2\mu P_f \cdot A_v \left[\frac{\{R_v - (Y + W_{t2}/2) \tan \theta\} (\eta_t + 2)}{3 \cdot \delta_v \cdot R_v} - 1 \right] \dots \dots (28)$$

次に、水平ロールの外周面に作用する力 Z_1 を求めた場合と全く同様にして、H形鋼のウェブ部およびフランジ部をそれぞれ単独に切りはなして圧延した場合に要する力 Z_w, Z_f が次のようにして計算される。

$$Z_w = 2\mu \cdot P_w \cdot A_w \cdot \phi_w \left[\frac{1}{\delta_{h1}} \left(1 + \frac{\Delta H}{3S_h} \right) - 1 \right] \dots \dots (29)$$

$$Z_f = 4\mu \cdot P_f \cdot A_f \cdot \phi_f \left[\frac{1}{\delta_{v1}} \left(1 + \frac{\Delta V}{3S_v} \right) - 1 \right] \dots \dots (30)$$

ここで

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = Z_w + Z_f \dots \dots \dots (31)$$

の条件が成立するから、各関係式を整理することにより δ_h が計算される。

$$\delta_h =$$

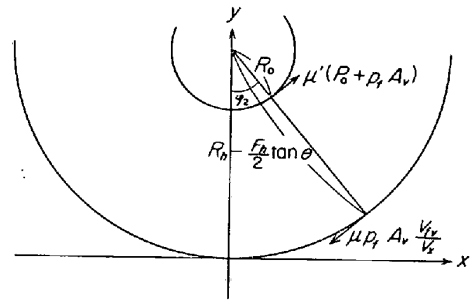


Fig. 7. Rower balance of vertical.

$$\frac{\eta_t + 2}{3} \left[p_w A_w + p_f A_f \frac{R_h - Y/2}{R_h} \right]$$

$$P_w A_w + P_f A_f - P_f A_v \left[\frac{\{R_v - (Y + W_{t2}/2) \tan \theta\} (\eta_t + 2)}{3R_v \cdot \delta_v} - 1 \right] + p_w A_w \phi_w \left[\frac{1 + \Delta H / 3S_h}{\delta_{h1}} - 1 \right]$$

$$+ 2P_f A_f \phi_f \left[\frac{1 + \Delta V / 3S_v}{\delta_{v1}} - 1 \right] \dots \dots \dots (32)$$

ここで δ_v は堅ロールの力の釣合い式より次のようにして求められる。

$$-\mu p_f \cdot A_v \cdot \bar{R}_v (\bar{V}_{fv} / \bar{V}_x - 1) = \mu' R_0 (P_0 + p_f A_v) \dots \dots \dots (33)$$

堅ロール平均半径 \bar{R}_v はフランジ幅拡りを無視すると、

$$\bar{R}_v = R_v - F_h \cdot \tan \theta / 2 \dots \dots \dots (34)$$

となる。また、

$$\bar{V}_{fv} = \int_0^\phi V_{Rv} \cos \phi_2 d\phi = V_{Rv} \dots \dots \dots (35)$$

$$\delta_v = V_2 / V_{Rv} \dots \dots \dots (36)$$

なる関係式も成立する。したがって δ_v は

$$\delta_v = \frac{\eta_t + 2}{3 \left[1 - \frac{\mu' R_0}{\mu p_f A_v (R_v - F_h \cdot \tan \theta / 2) (P_0 + p_f A_v)} \right]} \dots \dots \dots (37)$$

となる。

2.3 システム機能

2.3.1 概説

圧延パススケジュールは、まず加熱炉抽出時に鋼片仕様・圧延条件に基づき、製品目標寸法が決定され、BD圧延完了時点で $R_1 E_1$ のパススケジュールが計算され $R_1 E_1$ 延圧完了時点で $R_2 E_2$ およびFミルのパススケジュールが作成される。このようにして作成されたパススケジュールは、各圧延パスごとにAPC装置から送られるパスアドバンス信号のタイミングで、ロール間隙設定値・ドラフト補償値・デスクーリング信号・フランジ強制水冷出力信号などの設定信号をAPC装置に送り出される。

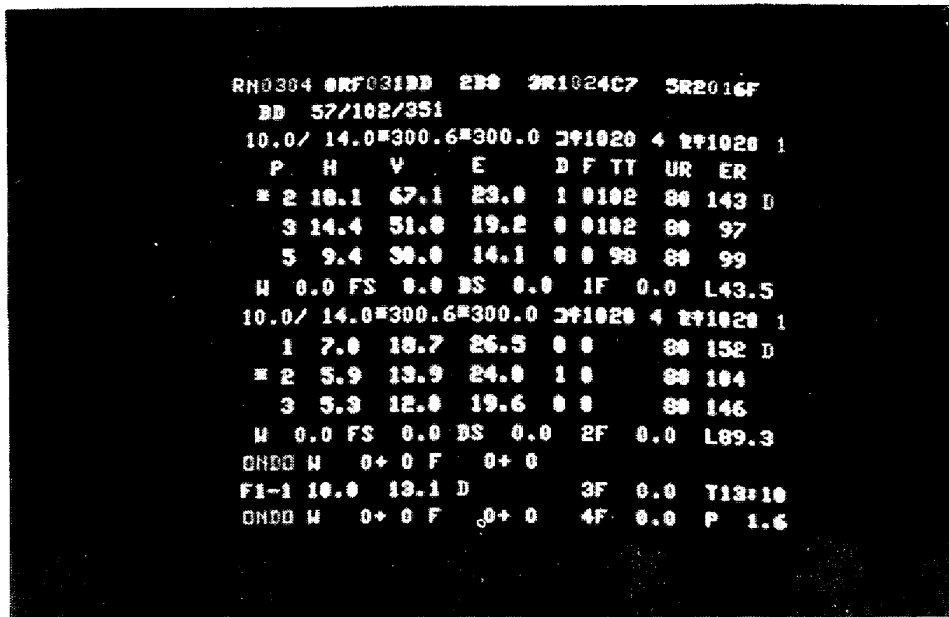


Photo. 1. CRT display

このパススケジュール作成機能および設定出力機能をサポートするため、下記サブ機能を具備している。

① 各ミルスタンド廻りに配備した厚み計・フランジ幅計・ロードセル・鋼材長さ計・温度計などの検出端から各種実測値に基づき、次パス・次スタンド・次鋼片に対するパススケジュール修正機能（適応制御機能）。

② ビジコンとオンラインデータリンクすることにより、本プロコンに必要なデータを取込むことで、データの信頼性向上とインプット作業の省力化をはかっている。

③ さらに、CRT表示装置にトラッキング状況・鋼片仕様・製品目標寸法・圧延パススケジュール・各種検出端の実測データなどを表示し、オペガイドしている。

2.3.2 プロセス主要制御項目および方法

(1) ウェブ厚・フランジ厚・フランジ幅制御

計算機システムは設備条件・作業条件・鋼片仕様・製品仕様などに基づき、各パスのウェブ厚・フランジ厚・フランジ幅の目標出側寸法およびそれを実現するための各パスのユニバーサル水平ロール間隙・縦ロール間隙およびエッジャーロール間隙の設定値を前記数式モデルにより計算する。この計算されたパススケジュールを各ミルAPC装置に出力することにより圧延を遂行する。

この圧延の進行過程において、各種検出端を用いた圧延特性値の測定を行ない、これら実測データとモデルの予測値とを比較し、偏差が生じた場合には後述するパス間・スタンド間・鋼片間の適応制御を行ない、パススケジュールの適正化を図ることにより、寸法制御を行なっている。

なお、これらの他に作業者のパススケジュール修正要求も加味できるようにシステム設計がなされている。

① 鋼片間アクション (BTB)

本機能は圧延寸法・圧延温度・圧延動力・圧延荷重に対するオンライン学習機能で、前材の圧延特性値の予測値と検出端実測値との偏差を解析し、各種パラメータの修正を行なうことにより、次材のパススケジュールの適正化を図ろうとするものであり、その修正内容により次の3レベルに分類される。

(i) 次材パススケジュールの全面修正（圧延特性値の予測精度が全般的に悪い場合）

(ii) 各パスの負荷率修正（各パスの負荷アンバランス）

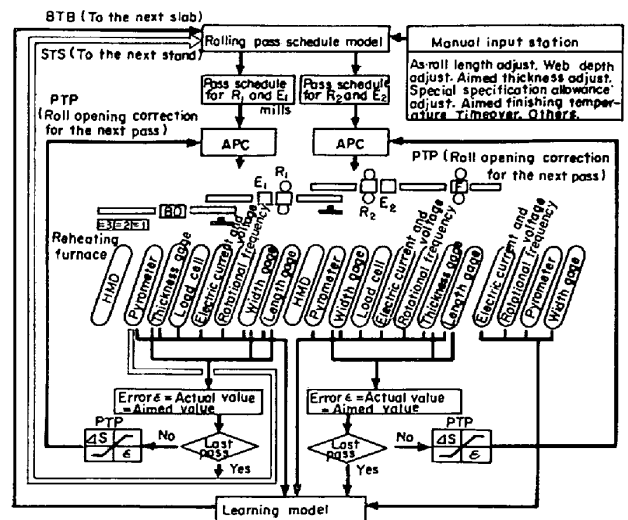


Fig. 8. Control method of the automatic wide flange shapes rolling system by computer.

(iii) 各パスロール間隙修正 (数式モデルの予測精度が高く、次材も前材パススケジュールの使用が可能な場合で、圧延荷重実測値などをもとにロール間隙のみ修正)

② スタンド間アクション (STS)

本機能は R_1E_1 ミル圧延段階で発生したモデルの予測値と検出端実測値との誤差を、 R_2E_2 ミルおよびミルのパススケジュール作成モデルにフィード・フォワードすることにより、当該材の $R_2E_2 \cdot F$ 圧延の適正化を図ろうとするものである。

本機能も前記BTB機能と同じくモデルの予測精度により、3レベルに分類されている。

③ パス間アクション (PTP)

本機能は当該材の各パスの目標出側寸法に対し、厚み計・フランジ幅計・長さ計などの実測データが誤差を持った場合に、次パスのロール間隙修正を行なうことによりウェブ厚・フランジ厚・フランジ幅および圧延伸び長さの適正化を司るフィードバック機能である。

(2) ウェブ高制御

現状では、ウェブ高のオンラインの寸法測定装置が設置されていないため、作業者がサンプルを採取し圧延寸法の管理を行なっている。サンプルを測定した結果、ウェブ高寸法を修正する必要が生じた場合には、設定盤を介してその過不足量を入力する。このデータを基にモデルが製品目標寸法およびパススケジュールの修正を行なう。

(3) 形状制御

ウェブ波・フランジ波発生およびフランジ先端整形不良などのトラブルについては、パススケジュール作成モデルにそれらのトラブル防止諸条件を盛り込むことにより対処している。従って本来それらのトラブルは発生しないものと考えられるが、それにもかかわらずそれらのトラブルが発生した場合には、設定盤を介してパススケジュールの修正が可能なシステムを構成としている。

(4) 圧延温度制御

H形鋼圧延においては衝撃値の保証・機械試験値の安定化ならびに残留応力の軽減を目的として温度コントロールを行なう。本システムではウェブまたはフランジのいずれか一方の圧延仕上り温度を指定することにより、

Table 1. Comparison of quality

		Pre-set rolling	Computer rolling
Flange width	Disqualified H-shapes (%)	0.16	0.07
	Standard deviation (mm)	0.58~1.08	0.40~0.76
Web of center	Disqualified H-shapes (%)	0.51	0.25
	Standard deviation (mm)	1.09~1.95	0.76~1.40

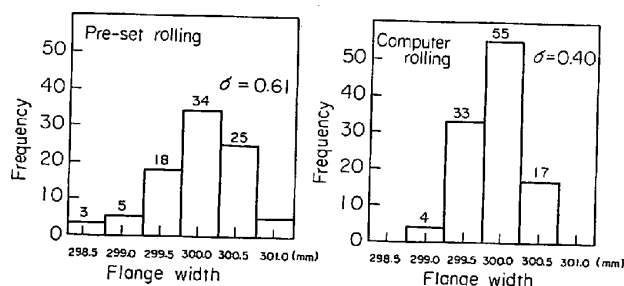


Fig. 9. Histogram of flange width (H 10/15 x 300 x 300)

水冷装置の制御を行ない所定の温度を確保する。

(5) その他の制御

伸び長さ・圧延ピッチ・トラブル処理などについても設定盤を介して調整可能なシステムとなつている。

以上述べたごとく本システムは、検出端実測値にもとづいて行なう適応制御機能と作業者による設定修正機能とにより、各鋼片ごとに適正なパススケジュールの作成を行ない、製品寸法形状の高精度な制御性能を遂行せしめている。

3. システム導入の成果

本システムを導入した結果、鋼片1本ごとに最適なパススケジュールによる圧延が可能になつたこと、および圧延過程における検出端の実測値に基づく適応制御機能が附加されていることにより、Table 1, 2, Fig. 9に示すように従来のプリセット圧延に比較して、寸法精度レベルが大幅に向上した。

また、自動パススケジュール作成および修正機能を有していることにより、オペレータが従来のように圧延結

Table 2. Fitness ratio for standard of JIS 1/2.

Size	H 16/28 x 900 x 300	H 11/17 x 600 x 200	H 13/21 x 400 x 400	H 10/15 x 300 x 300
Pre-set rolling	60.0%	81.4%	66.6%	72.5%
Computer rolling	84.6%	94.4%	93.5%	92.0%

果に基づき、パススケジュール修正を行なう必要がなくなつたため、ロール調整時間が大幅に削減され、圧延休止率が約 2.5% 減少した。

その他、圧延諸条件の変動を考慮したパススケジュールによる圧延が可能になつたことにより、コントロールドローリングも容易に行なえるようになった。更に、プロダクションログ、エンジニアログのオンライン化、CRT表示装置 (Photo. 1 参照) の設置による圧延状況の監視作業の簡素化がはかられた。

4. あとがき

ユニバーサルミルによるH形鋼圧延の計算制御システ

ムは、今回のシステム開発により概ね満足すべき形で完成したと考えられる。今後は一般形鋼にどのように計算制御システムを導入して行くかが大きな課題であろう。

最後に、本システムの開発に際し、東京芝浦電気(株)から寄せられた多大の御協力に対し、厚く御礼申し上げる次第である。

文 献

- 1) 中島, ほか: 製鉄研究 275号, (1972), p. 42
- 2) W. H. GIEDT: 基礎伝熱工学, (1960), p. 57
「丸善」
- 3) 平松, ほか: 鉄と鋼, 56(1970), p. 74
- 4) 岡本, ほか: 圧延理論とその応用, (1969), p. 35
「日本鉄鋼協会」