
外法一定 H 形鋼の製造技術と設備

Manufacturing Method and Equipment for Hot Rolled H-Shapes with Fixed Outer Dimension

瀬戸 恒雄 (Tsuneo Seto) 畠中 淳 (Atsushi Hatanaka) 芳村 嘉夫 (Yoshio Yoshimura) 藤本 洋二 (Yoji Fujimoto) 馬場 和史 (Kazushi Baba) 大本 至宏 (Yoshihiro Omoto)

要旨：

今回開発した製造技術はユニバーサルミル圧延法による圧延 H 形鋼の宿命である内法一定寸法の欠点を解消した画期的なものである。その主要技術は幅可変水平ロール・垂直ロール貫通ガイドを有する仕上ユニバーサルミルを用いたウェブ内情縮小法によるウェブ高さ一定化技術、新型ユニバーサル方式によるフランジ幅一定化技術、幅可変ローラ矯正機を用いた矯正技術・およびレーザ距離計による高寸法測定技術を中心とした寸法制御システム技術の確立である。これらの技術を用いることにより従来の H 形鋼より高精度の外法一定 H 形鋼を製造することができる。

Synopsis：

The newly developed techniques described in this paper are epoch-making ones, eliminating the fixed inner dimension which has been an unavoidable outcome of H-shape rolling by the conventional universal mill. The techniques include (1) web inner width reduction by a universal finishing mill which has width variable horizontal rolls and a vertical through-roll guide to form fixed web height, (2) special rolling by a new universal method to produce fixed flange width, (3) straightening by a width variable roller and (4) a measuring control system including a high accuracy laser measurement method. Using these techniques, it has become possible to manufacture H-shapes with a more accurate fixed outer dimension than those produced by conventional rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Manufacturing Method and Equipment for Hot Rolled H-Shapes with Fixed Outer Dimension



瀬戸 恒雄
Tsuneo Seto

水島製鉄所 設備部設計室 主査(課長)



畠中 淳
Atsushi Hatanaka

水島製鉄所 設備設計室



芳村 嘉夫
Yoshio Yoshimura

水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(課長補)



藤本 洋二
Yoji Fujimoto

水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(掛長)



馬場 和史
Kazushi Baba

水島製鉄所 制御技術室 主査(課長)



大本 至宏
Yoshihiro Omoto

水島製鉄所 制御技術室 制御技術室

1 緒 言

従来のユニバーサルミルを用いた熱間圧延法により製造されたH形鋼製品は、水平ロールのロール幅が基準となるウェブ内法寸法一定である。しかし、需要家からは加工性、施工性の良い外法寸法一定H形鋼が長年切望されてきた。当社では、この外法一定H形鋼を熱間圧延法で製造するための多くの研究開発を行い、ユニバーサルミルによるウェブ内幅制御技術、新型ユニバーサル方式によるフランジ幅制御技術の開発に成功し、熱間圧延による外法一定H形鋼製造技術を確立した。本報ではこの外法一定H形鋼 Super HISLEND-H (SHH) の製造技術と設備概要について報告する。

2 開発の目標と課題

2.1 開発目標

従来の熱間圧延法により製造されるH形鋼製品は Fig. 1(a)に示

要旨

今回開発した製造技術はユニバーサルミル圧延法による圧延H形鋼の宿命である内法一定寸法の欠点を解消した画期的なものである。その主要技術は幅可変水平ロール、垂直ロール貫通ガイドを有する仕上ユニバーサルミルを用いたウェブ内幅縮小法によるウェブ高さ一定化技術、新型ユニバーサル方式によるフランジ幅一定化技術、幅可変ローラ矯正機を用いた矯正技術、およびレーザー距離計による高寸法測定技術を中心とした寸法制御システム技術の確立である。これらの技術を用いることにより従来のH形鋼より高精度の外法一定H形鋼を製造することができる。

Synopsis:

The newly developed techniques described in this paper are epoch-making ones, eliminating the fixed inner dimension which has been an unavoidable outcome of H-shape rolling by the conventional universal mill. The techniques include (1) web inner width reduction by a universal finishing mill which has width variable horizontal rolls and a vertical through-roll guide to form fixed web height, (2) special rolling by a new universal method to produce fixed flange width, (3) straightening by a width variable roller and (4) a measuring control system including a high accuracy laser measurement method. Using these techniques, it has become possible to manufacture H-shapes with a more accurate fixed outer dimension than those produced by conventional rolling.

す内法寸法一定であり、外法一定H形鋼は溶接組立で製造されていた。両者はそれぞれ長所短所を有しており、両者の長所を兼ね備えたものが今回開発した Fig. 1(b)に示す熱間圧延による外法一定H

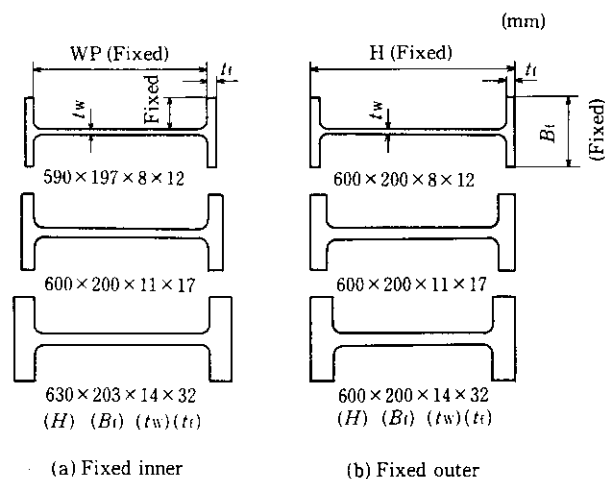
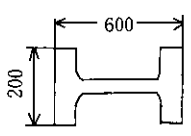


Fig. 1 Comparison between fixed inner and outer dimension H-shape

* 平成2年10月26日原稿受付

Table 1 Example of fixed outer dimension H-shape

Dimension(mm)	Thickness(mm)	
	Flange	Web
	12~28	9~12

形鋼である。その特長を以下に示す。

- (1) 大量生産による安定供給と経済性
- (2) 品質の均一性、信頼性
- (3) 外法寸法一定
- (4) 高寸法精度

などであり、新製品 SHH の仕様は論文「外法一定H形鋼「スーパーハイスレンドH」の開発¹⁾」に示す。Table 1 に代表サイズの例を示すが、フランジ厚さ、ウェブ厚さが変化しても同一呼称寸法内では外法寸法は一定である。

2.2 開発技術課題

当社が世界で初めて開発し実用化した「ウェブ内幅縮小による外法一定H形鋼製造技術」の技術課題を Fig. 2 に、またその開発の経緯を Fig. 3 に示す。溶接H形鋼製品と断面性能、品質、寸法精度等において同等のものを熱間圧延で製造する技術を開発するため、当社においては、Fig. 2 に示す外法一定H形鋼製造技術のうち、1980年よりウェブ部分圧延によるウェブ内幅拡大²⁾を、1986年よりウェブ内幅縮小圧延³⁻⁵⁾の研究に着手し、1988年12月にウェブ内幅縮小法による内幅制御技術を完成させた。その後、実機による圧延諸特性を調査し、1989年11月に実用化に至った。

1989年11月より新プロセスによるSHHの生産・販売を開始し、その後も順調な生産を続けている。SHHは従来の熱間圧延H形鋼の問題点を根本的に改善するもので、このSHHの製造を可能とするための主要技術は以下のものである。

- (1) ウェブ高さ一定化技術
- (2) フランジ幅一定化技術
- (3) ウェブ薄肉化技術
- (4) 寸法・形状高精度化技術

いずれも従来の熱間圧延H形鋼製造プロセスでは原理的に困難と

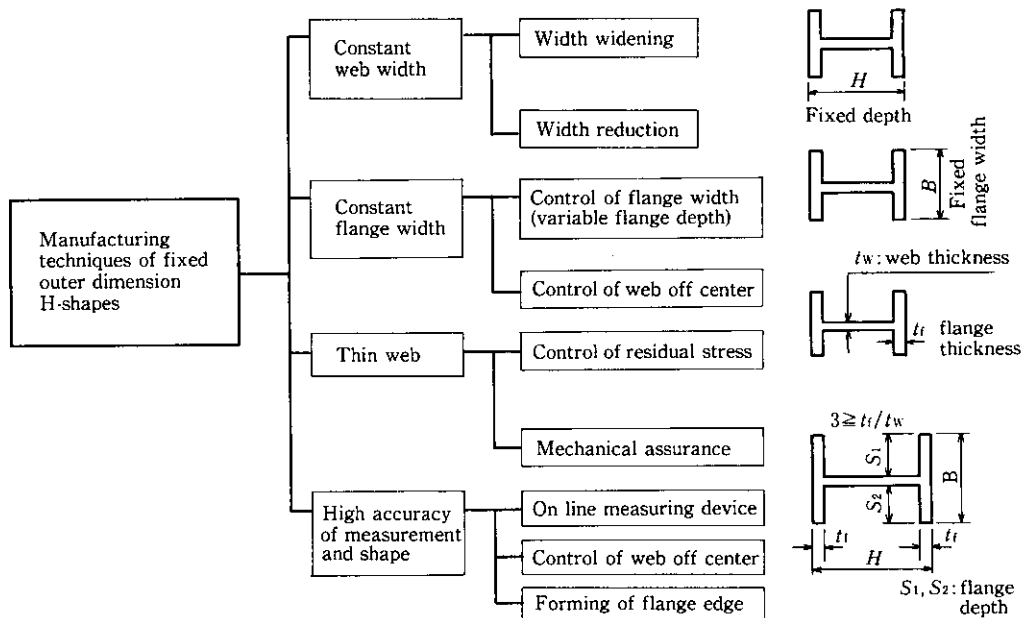


Fig. 2 Technical subject of rolling process in fixed outer dimension H-shapes

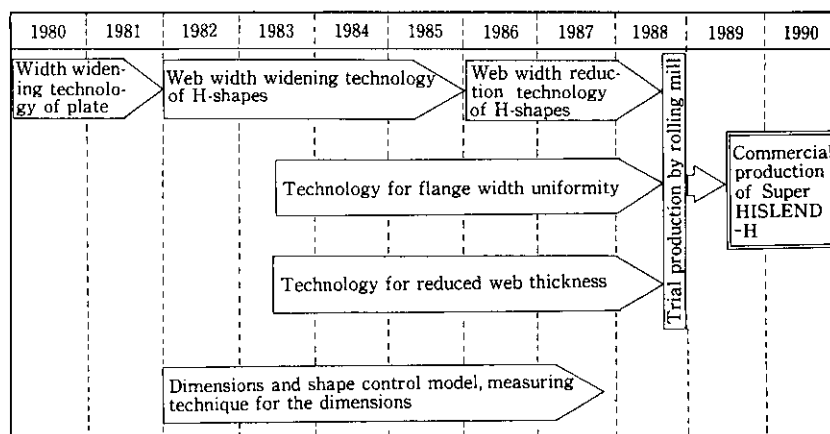


Fig. 3 Progress of technical development at Kawasaki Steel

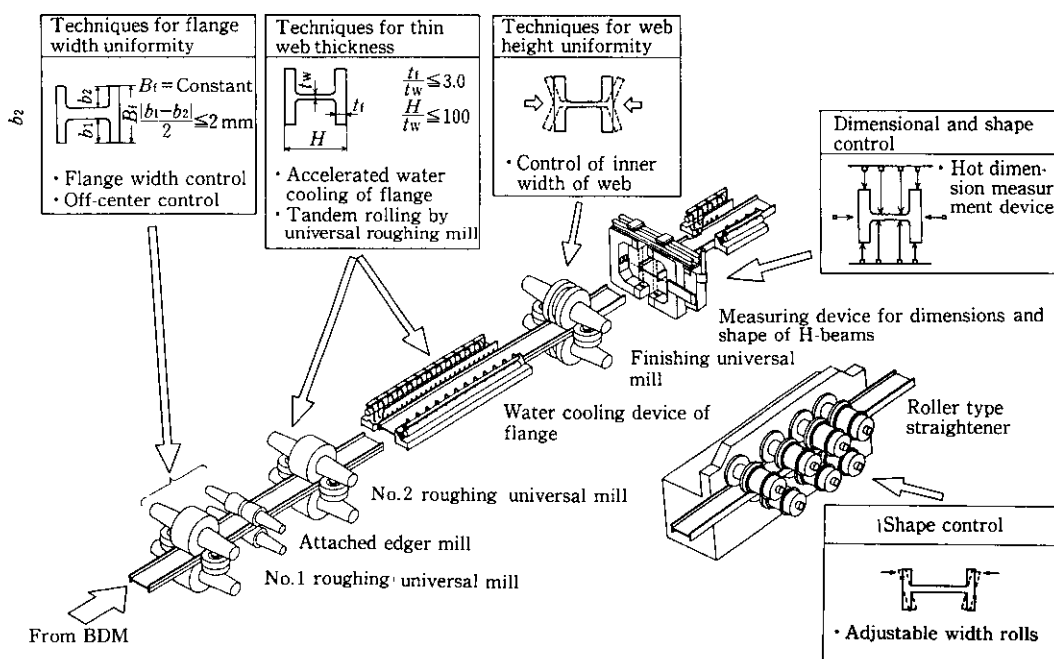


Fig. 4 Production process for fixed outer dimension H-shape and technical subject

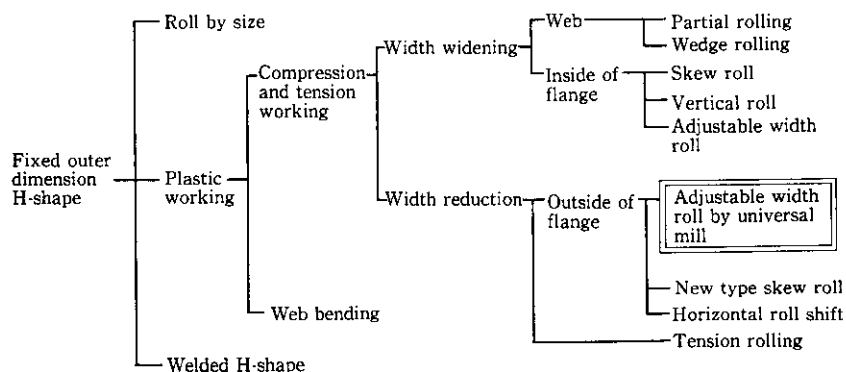


Fig. 5 Production process of fixed outer dimension H-shapes

されてきたもので、これらの技術の確立により初めて熱間圧延による外法一定H形鋼製造が可能となる。以下開発した新技術について詳述するが、ウェブ薄肉化技術に関しては論文「ウェブ薄肉圧延H形鋼製造技術の開発」⁶⁾で述べる。

当社の開発した技術は、既設の製造設備を有効に活用し、新技術、新設備を既設圧延ラインに適用したもので、Fig. 4に外法一定H形鋼製造プロセスの技術構成を示す。

3 ウェブ高さ一定化技術

外法または内法一定にかかわらずH形鋼の製造は熱間圧延であり、塑性加工の分野に属し引張りおよび圧縮加工となる。この具体的な製造方法と考え方をFig. 5に示す。

3.1 圧延方式の検討

Fig. 5に述べた製造方式のうち、ウェブ部分圧延法による内幅拡大法と幅可変水平ロールを有するユニバーサル圧延機による内幅縮小法について検討を行った⁷⁾。

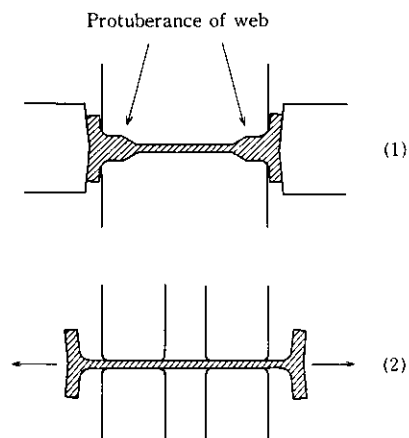


Fig. 6 Web partial rolling method

3.1.1 部分圧延による内幅拡大法

ウェブ部分圧延法の原理をFig. 6に示すが、粗ユニバーサル圧延の段階でウェブの一部に板厚増加部を造形し、この部分を仕上ユ

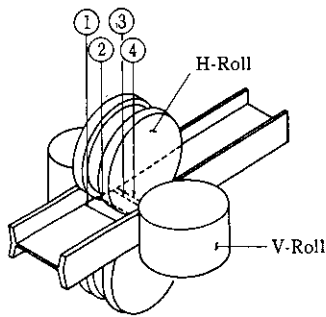


Fig. 7 Characteristic of web inner width reduction method of universal mill

ユニバーサル圧延で局部圧下圧延し、ウェブ内幅を拡大する方式であるが、ロールの耐久性、幅拡大量に限界がある点より実用化に至らなかった。

3.1.2 ウェブ内幅縮小法

Fig. 7 にその特徴を示すが、ウェブ縮小法に比し縮小法の方が温度の高い材料を圧縮加工することになるので、変形の容易さの点から有効であるといえる。ウェブ縮小時にウェブ座屈、ウェブ厚さ変動、中心偏り等の問題が生じるが、ユニバーサル圧延機の特徴である同軸上に水平ロールと垂直ロールを有している点を利用して、垂直ロールでウェブの圧縮成形とフランジの圧延、水平ロールでウェブ拘束とウェブの圧延を行うことで、これらの問題点を解消し実用化が可能となった。

3.2 圧延設備の開発

3.2.1 幅可変水平ロール⁸⁾

熱間圧延でH形鋼ウェブ高さを可変とするウェブ内幅縮小圧延を実現するためには、仕上ユニバーサル圧延機の水平ロールをフランジの厚さに応じてオンラインで幅調整する機能を有するとともに、フランジ圧下荷重に対するスラスト剛性と高精度幅調整機能が要求される。しかしこれらの機能は既存の設備技術では得られないため新たに自社開発を行った。開発し実用化した幅可変水平ロールの構造を Fig. 8 に、基本仕様を Table 2 に示す。

幅可変水平ロールの構造はロールチャック間を高剛性のアーバにて構成し、ロール幅調整機構をロールチャック外側に位置させることでロール軸の曲げ剛性を保ちつつ、信頼性の高いロール幅調整機構を達成している。

幅調整のために分割したロールを各々アーバとスリーブに焼嵌し、操作側のロールを焼嵌したスリーブは操作側ロールチャックに組み込んだスラストベアリングで軸方向を固定し、駆動側のロールを焼嵌したアーバはスリーブの内部を貫通させ、その軸端部を幅調

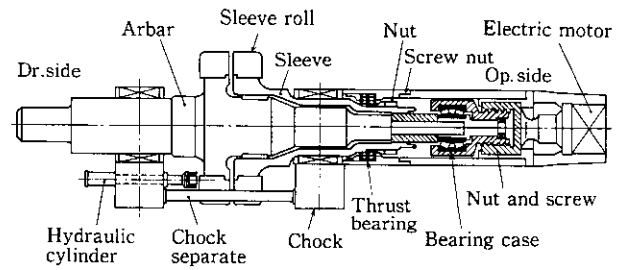


Fig. 8 Schematic view of adjustable width rolls

Table 2 Specifications of adjustable width rolls

Type	Rigid
W. S.	Shift
D. S.	
Drive	Electric motor and hydraulic cylinder
Axial mill modulus	85 t/mm
Accuracy of adjustable width	±0.1 mm
Width adjustment speed	1.0 mm/s
Axial load	200 t
Range of adjustable width	0~110 mm

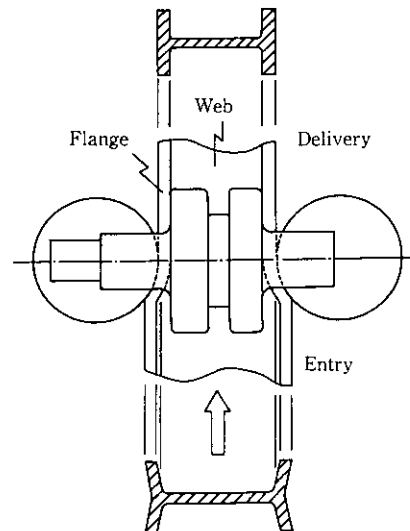


Fig. 9 Web inner width reducing method

整駆動部に接触させた。したがって本ロールは駆動側ロールのみが移動する片側シフト方式の幅可変水平ロールである。幅調整駆動部は Fig. 8 に示すように電動モータ、減速機、スクリー・ナット等によって構成しており、これら全構成部品を幅調整駆動部カートリッジに納め、交換可能な構造とした。

Fig. 9 にユニバーサルミルによるウェブ内幅圧縮状況を示すが、従来圧延では左右の垂直ロールの間隙は水平ロール胴幅と所定のフランジ厚さにするための水平ロール側面と垂直ロールとの隙間により定まるが、本圧延方式での垂直ロールの間隙は目標ウェブ高さで決定され、フランジ圧延のための水平ロールと垂直ロールの隙間は水平ロールのロール幅調整によって行われる。

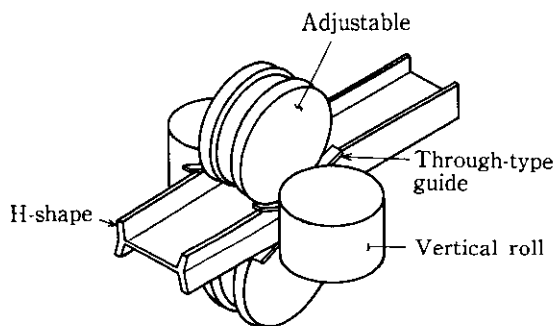


Fig. 10 Guide for H-shape in universal mill

3.2.2 垂直ロール貫通ガイド

ウェブ内幅の縮小圧下が過大になるとフランジが幅方向に移動して中心偏りが発生する。これはウェブ自体が変形する場合とフランジがウェブに対して偏ってロールに噛み込む場合がある。これを防止するため、フランジ端面を拘束し垂直ロールの入側からロールセンターまで一貫して案内するため、垂直ロールにガイドを設けた。その構造を Fig. 10 に示す。

4 フランジ幅一定化

4.1 フランジ幅一定化に要求される技術

従来の粗ユニバーサルミル群は Fig. 11 に示すように、ユニバーサルミル、エッジャ、ガイドから成り、フランジ幅はエッジャロールで圧延され、フランジ脚長はエッジャロールのカリバ深さで規制されるため、ウェブ厚さの変動によりフランジ幅が変化する。

一方、SHH ではフランジ幅が一定のため、ウェブ厚さに応じて脚長の調整が必要であり、フランジ幅圧下とともに脚長調整圧延技

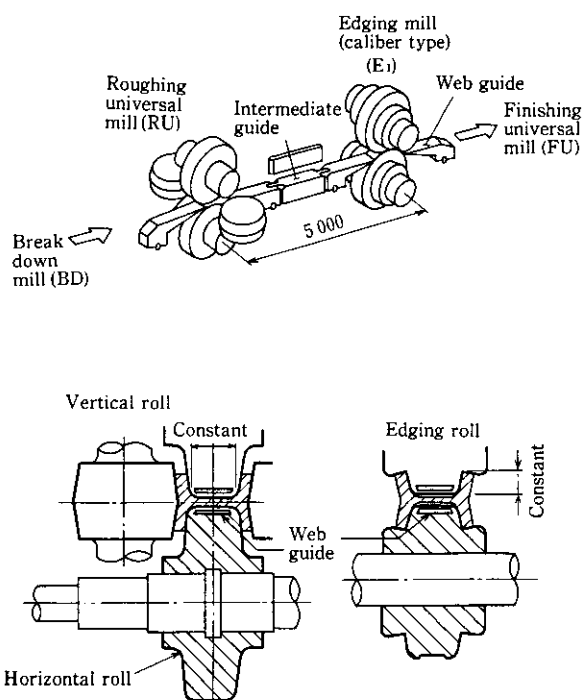


Fig. 11 Conventional rolling method for H-shapes by universal and edging mill

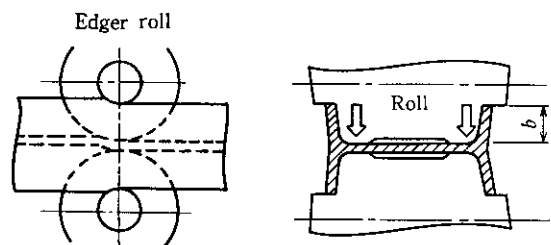


Fig. 12 Principle of reformation of web off-center by edging mill

術の開発が必要である。

4.1.1 従来のエッジャの機能

通常エッジャはフランジ幅圧下と素材断面のばらつきや粗ユニバーサルミルでの不均一圧延等により発生する中心偏りを矯正する機能を有している。この中心偏りの矯正は、Fig. 12 に示すようにエッジャロールのカリバで脚長を拘束し、ウェブ付け替えを行っている。

4.1.2 新エッジャの考え方

将来技術でもあるサイズフリー圧延をも考慮して、従来のエッジャが有していた機能を分割して、剛性の高いフランジ部をローラタイプのガイドで拘束し、中心偏りを制御する新ガイド方式と鼓型ロールによりフランジ幅も制御する新型エッジャを設ける。

4.2 圧延設備の開発

新方式ユニバーサルミル⁹⁻¹¹⁾の概要を Fig. 13 に示し、主要な設備について以下に説明する。

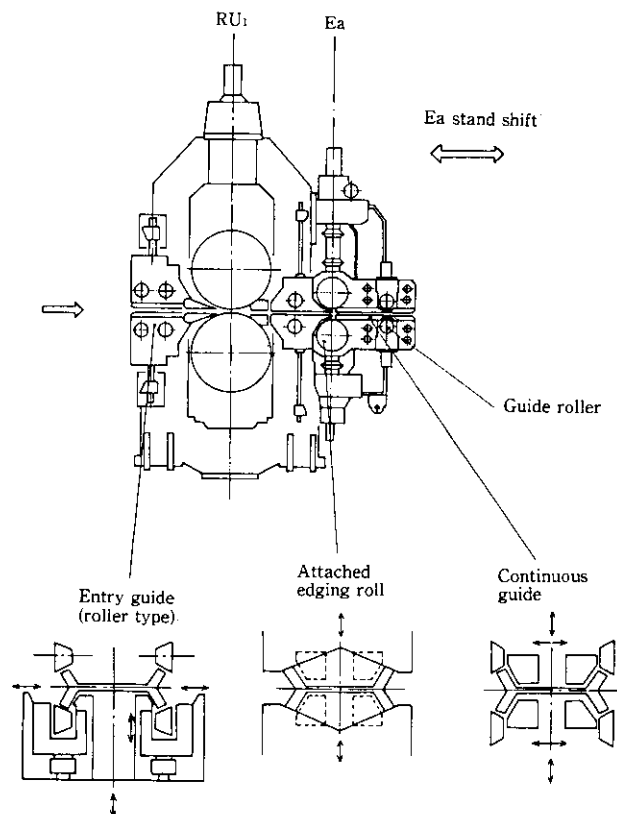


Fig. 13 Conception of new type universal and edging mill (compact universal mill)

Table 3 Specifications of attached edger mill

Item	Specification
Roll	O. D. 698, I. D. 600, L 1 270 (mm)
Roll taper	5 deg.
Radial load	Max. 300 t

4.2.1 新型エッジミル(アタッチドエッジ)

エッジをフランジ幅圧下機能のみとしたことにより、ロールを鼓型でかつ径小とし、粗ユニバーサルミルに近接配置したアタッチドエッジとし、製品サイズによるロール組み替えを不要とした。このアタッチドエッジの仕様を Table 3 に示す。

4.2.2 新方式ミルガイド

中心偏りと圧延条件の関係を調査した結果、噛み込み高さ、噛み込み角度、水平ロールレベル等に相関があることがわかった。すなわち、

- (1) 噛み込み高さおよび噛み込み角度を変えることによりウェブ付け替えが生じ、中心偏りが変化する。
- (2) 上下フランジ内の圧下率差により中心偏りは変化する。

これらから中心偏りを生じさせないためには水平ロールのパスラインを垂直ロール芯と一致させ、材料のフランジ中心をミル芯に水平に噛み込ませればよいことがわかった。このため Fig. 13 に示すように、フランジ端部をユニバーサルミル前後面で確実に拘束し、フランジ内面とウェブ面を案内するガイド方式とした。

4.3 幅可変ローラ矯正機

ローラ矯正機も SHH 対応として仕上ユニバーサルミルの水平ロールと同様、H形鋼のウェブ内幅の変化に追従してオンラインでローラ幅調整のできる Fig. 14 に示す構造とした。幅可変ローラ矯正機は固定側ローラを主軸の固定スリーブに、移動側ローラを固定スリーブ上をスライドできる移動スリーブに取り付け、この移動スリーブを軸端に設けた電動モータ、スクリー・ナット等から成る幅

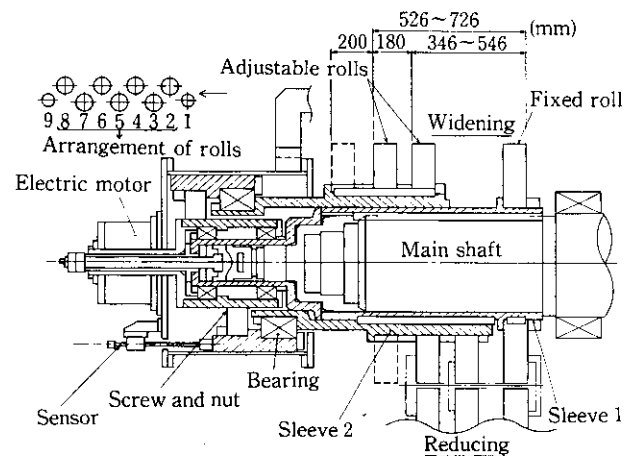


Fig. 14 Adjustable width rolls for roller leveller

調整装置にて移動させる構造とした。

5 寸法・形状制御システム

5.1 プロセス制御システムの概要

SHH を製造するため大形形鋼工場圧延ラインではプロセスコンピュータ (P/C)、ダイレクトデジタルコントローラ (DDC)、熱間寸法測定装置、温度計等多くのセンサと制御装置を用い、寸法・温度制御を行うプロセス制御システムにより圧延機、水冷設備等のプロセス制御、自動操業を行っている。Fig. 15 にそのシステム概要を示す。

5.2 開発技術

高寸法精度のH形鋼を熱間圧延で製造するには高精度なセンサ、高機能な設備とともに以下の制御を高精度に実現する必要がある。

- (1) ユニバーサルミルにおける寸法・形状制御

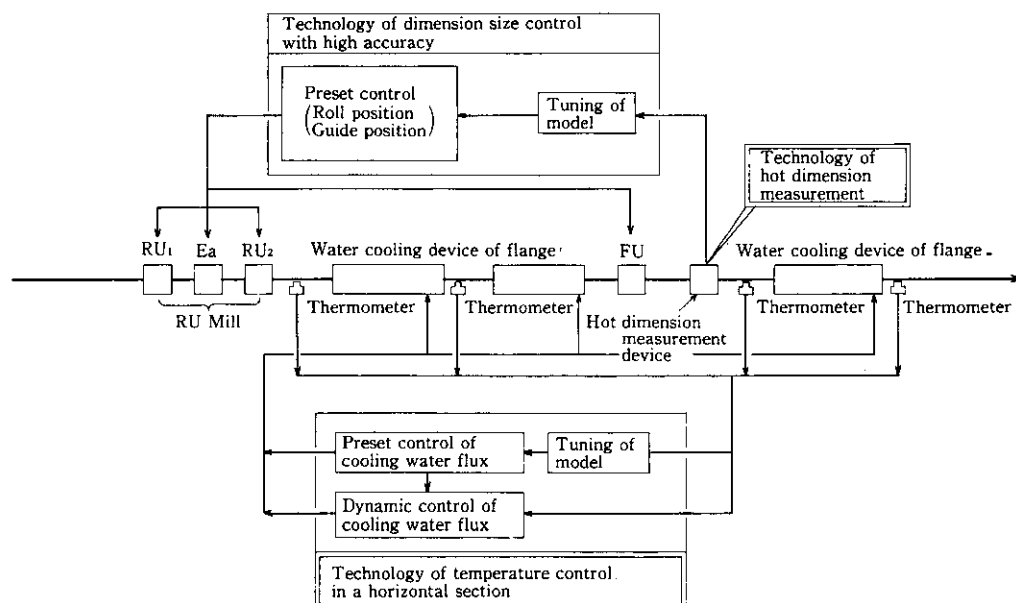


Fig. 15 Schematic diagram of process control system

(2) フランジ水冷設備における温度制御

しかし既存のセンサ、制御技術で SHH に要求される高寸法精度は達成できないため、以下の技術開発を行う必要がある。

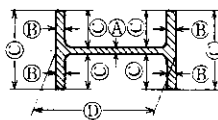
- (1) 形鋼熱間寸法測定技術
- (2) H 形鋼寸法制御技術
- (3) H 形鋼断面温度制御技術

5.3 形鋼熱間寸法測定技術の開発

H 形鋼寸法測定について、測定すべき項目と SHH の寸法精度から必要とする目標測定精度を Table 4 に示す。この目標精度で熱間 H 形鋼をオンラインで連続的に測定する既存技術は存在しないので、レーザー距離計を用いた高精度寸法測定技術^(12,13)を開発した。これらを実用化するために開発した要素技術について以下に説明する。

Table 4 Measurement items and accuracy (μm)

	Item	accuracy (1σ)
A	Web thickness	45
B	Flange thickness	77
C	Symmetry Flange width	210 130
D	Web height	180



5.3.1 レーザ距離計の高精度校正技術

従来の距離計の直線性は測定範囲の $\pm 0.05\%$ が限界であるのに対し、今回の目標精度では $\pm 0.03\%$ 以下にする必要がある。検討の結果、距離計の校正時における受光エネルギー分布形状を安定にすれば高精度化が可能であることがわかった。この具体策として、測定面を回転移動させることを試みた結果、大きな効果を得た。この知見に基づいた校正片を回転させる新しい校正技術を Fig. 16 に示す。本校正技術により、レーザー距離計の直線性を測定範囲の $\pm 0.015\%$ 以下にすることができた。

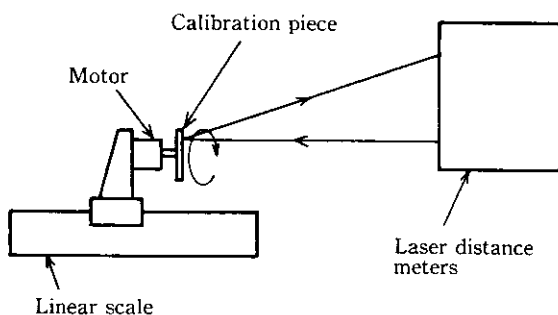


Fig. 16 Method of calibration of laser distance meter

5.3.2 熱ゆらぎのパーズ技術

被測定物が熱間鋼材の場合、測定物近傍の空気が加熱され熱ゆらぎが発生する。この熱ゆらぎが誤差要因となる。この熱ゆらぎ除去方法について種々のテストを行った結果、Fig. 17 に示す方法が効果的であることがわかった。なお被測定物の下面はほとんど熱ゆらぎがない。

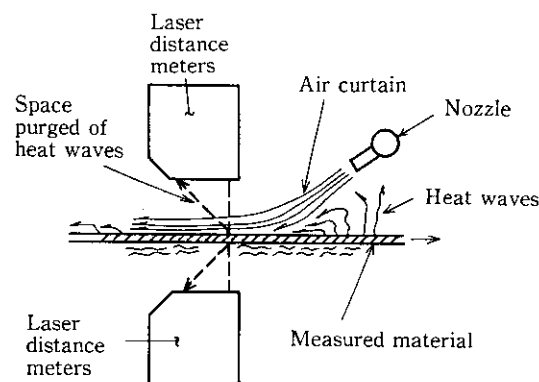


Fig. 17 Method of heat wave purging

5.4 H 形鋼寸法制御

高寸法精度が要求される SHH の製造に関し、圧延プロセス制御として、熱間センサや予測モデルを用いたミルロール位置制御やガイド位置の設定を P/C により実施している。

5.4.1 寸法制御

(1) ウェブ厚さ、フランジ厚さ

各ミルの温度予測・荷重予測よりゲージメータ式を用いてロール位置の設定計算を実施している。また予測モデルは精度向上のため、温度計や荷重計および熱間寸法計等の実測値より学習補正を行っている。

(2) フランジ幅

粗ユニバーサルミルフランジ幅拡がり式や、ウェブ内幅縮小圧延を考慮した仕上ユニバーサルミルフランジ幅拡がり式により、決められた計算手順にしたがって、各パスの目標フランジ幅を求め、エッジャのロール位置設定を行っている。

(3) ウェブ高さ

ウェブ高さは両側フランジ厚さとウェブ内幅の総和である。ウェブ内幅は仕上ユニバーサルミルの幅可変水平ロール幅で制御可能であり、ウェブ高さ精度向上のためミル後面の熱間寸法計で実測した寸法に基づき P/C で学習制御している。

(4) 中心偏り

中心偏り発生を防止するために、粗ユニバーサルミルにおいては、ミル芯へ材料フランジ幅中心を一致させるように、フランジ幅拡がりを考慮してフランジ幅上下拘束ガイドローラを設定した。また仕上ユニバーサルミルでは、フランジ拘束貫通ガイドおよび幅可変ウェブガイド位置をウェブ縮小時の幅拡がりを考慮して設定した。

5.4.2 圧延制御

寸法制御を P/C による圧延制御により実施しており、その主要機能を以下に示す。

(1) 初期ロール圧下位置計算

圧延材の制御情報にしたがって 1 本ごとに温度・荷重計算を行い、ミルのロール圧下位置計算を実行している。

(2) 学習計算

各種熱間寸法計からの実測値を取り込み、モデル式の学習係数を指数平滑法で修正する。

(3) 圧延機自動設定

仕上ユニバーサルミル幅可変水平ロール、フランジ拘束ローラガイド等の設定値を計算し、DDC へ出力する。

制御に用いるため開発したモデル式の主なものは温度式、荷重式、フランジ幅拡がり式、ゲージメータ式等で、このうち荷重式を以下に示す。

<垂直ロール荷重>

$$PV = B_f \cdot L_{dv} \cdot K_{ff} \cdot Q_f \cdot Q_{pf} \cdot \cos \theta$$

<水平ロール荷重>

$$PH = B_w \cdot L_{dh} \cdot K_{fw} \cdot Q_w \cdot Q_{pw} + PV \cdot (\tan \theta + C)$$

$$Q_w = Q_{w0} + Q_{c0} \cdot (r_w - r_f)$$

PV, PH: 垂直, 水平ロール荷重

K_f : 平均変形抵抗

Q : ユニバーサル圧下力関数

Q_p : 板圧延の圧下力関数

θ : 水平ロール側面傾き角

C : フランジ内面摩擦係数

r_w, r_f : ウェブ, フランジ圧下率

L_d : ロール接触長

R : ロール半径

B_f : フランジ幅

t_w, t_f : ウェブ厚さ, フランジ厚さ

なお, 添字Vは垂直ロール, Hは水平ロール, fはフラ

ンジを示す。

6 結 言

ウェブ高さ, フランジ幅の外法一定化技術と寸法制御システム技術を応用し, 形鋼関係者の長年の夢であった高寸法精度外法一定H形鋼製造技術の開発に成功するとともに, ロールチャンスフリー圧延技術確立への道を切り開いた。この開発技術を要約すると以下のとおりである。

- (1) 幅可変水平ロール, 垂直ロール貫通ガイドを有する仕上ユニバーサルミルを用いたウェブ内幅縮小法によるウェブ高さ一定化技術である。
- (2) 剛性の高いフランジ部を粗ユニバーサルミル前後面でローラ型ガイドにより拘束し, 中心偏りを制御する新ガイド方式と鼓型エッジロールによるフランジ幅一定化技術である。
- (3) ローラ矯正機をウェブ内幅の変化に追従するオンライン幅可変ローラとすることによりローラ組み替え不要とした。
- (4) レーザ距離計を用いた走間熱間寸法測定技術を開発し, 高精度寸法制御システムを確立した。

参 考 文 献

- 1) 山口 勝, 志賀勝利, 土井弥彦, 朝生一夫, 阿部英夫, 橋本順次: 川崎製鉄技報, **23** (1991) 1, 1
- 2) 竹林克浩, 草場 隆, 片岡健二: 材料とプロセス, **1** (1988) 2, 502
- 3) 林 宏之, 鎌田征雄, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 藤本洋二: 材料とプロセス, **3** (1990) 2, 489-490
- 4) 林 宏之, 鎌田征雄, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 藤本洋二: 平成2年度塑性加工春季講演会論文集, 216 (1990)
- 5) 藤本洋二, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 齊藤晋三: 材料とプロセス, **3** (1990) 2, 491
- 6) 吉田 博, 近藤信行, 三浦啓徳, 奥井隆徳, 橋本隆文, 河野幹夫: 川崎製鉄技報, **23** (1991) 1, 23
- 7) 林 宏之, 鎌田征雄, 齊藤晋三, 藤本洋二, 河村有秀: 川崎製鉄技報, **23** (1991) 1, 16
- 8) 瀬戸恒雄, 畠中 淳, 中川 豊, 朝生一夫, 三浦啓徳, 藤本洋二: 材料とプロセス, **3** (1990) 2, 488
- 9) 三浦啓徳, 笹田幹夫, 瀬戸恒雄, 中西輝行, 林 宏之, 藤本洋二: 材料とプロセス, **2** (1989) 2, 498
- 10) 藤本洋二, 朝生一夫, 齊藤晋三, 畠中 淳, 中島英二, 藤岡克志: 材料とプロセス, **2** (1989) 2, 1570
- 11) 藤本洋二, 瀬戸恒雄, 笹田幹夫, 朝生一夫, 三浦啓徳, 林 宏之: 平成2年度塑性加工春季講演会論文集, 216 (1990)
- 12) 藤本洋二, 福高善己, 長谷旅思: 材料とプロセス, **1** (1990) 2, 580
- 13) 福高善己, 藤本洋二: 第1回日中計測自動制御国際シンポジウム, (1989), 20-24