
孔型連続ミル計算機制御技術の開発

Development of Computer Control Techniques for Tandem Mill with Grooved Rolls

馬場 和史(Kazushi Baba) 藤本 隆史(Takashi Fujimoto) 新井 和夫(Kazuo Arai)
藤岡 克志(Katsushi Fujioka) 山崎 順次郎(Junjiro Yamasaki) 中西 輝行(Teruyuki
Nakanishi)

要旨：

水島製鉄所鋼片工場仕上ミル(VH4 スタンド連続ミル)をフィールドとして、孔型連続ミル計算機制御技術の開発を行った。制御方式は、バー間寸法制御を目的としたセットアップ制御と、バー内寸法制御を目的としたダイナミック制御の両者で構成した。前者においては、温度、荷重、幅広がりなどの圧延パラメータ予測モデルが開発の中心となるが、孔型圧延の特徴を考慮した高精度のモデルを開発した。後者については、従来の張力制御に代り、圧下制御を主体とした新しい断面形状制御方式を開発した。また、ミルモータに交流可変速制御を適用し、特に、主機は全てデジタル化した。これらの実機への適用結果から、寸法精度の向上効果を確認した。

Synopsis：

Kawasaki Steel has recently developed computer control techniques for a 4-stand tandem mill with grooved rolls, which consists of set-up and dynamic control functions, at the billet mill in Mizushima Works. The essential part of the set-up control, with the main aim of controlling dimensions between bars, comprises sophisticated mathematical models to precisely predict such rolling parameters as material temperature, rolling force, and width spread. They are based on theoretical constructs and actual data from grooved rolling. For dynamic control to achieve uniform sectional dimensions along the length of the material, new sectional profile control techniques, utilizing roll gap control, has been developed, replacing the traditional tension control system. As hardware improvement, A.C. variable speed control systems were adopted in mill motors, among which all the main motors are digitally controlled. As the result, the dimensional accuracy of the product has been significantly improved in the mill.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Computer Control Techniques for Tandem Mill with Grooved Rolls



馬場 和史
Kazushi Baba

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(掛長)



藤本 隆史
Takashi Fujimoto

水島製鉄所 条鋼圧延
部条鋼技術室 主査(掛
長)



新井 和夫
Kazuo Arai

鉄鋼研究所 計測制御
研究部 主査(課長)



藤岡 克志
Katsushi Fujioka

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室



山崎 順次郎
Junjiro Yamasaki

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室 主
査(課長)



中西 輝行
Teruyuki Nakanishi

水島製鉄所 条鋼圧延
部条鋼技術室 主査(課
長)

1 緒 言

水島製鉄所鋼片工場は条鋼向け素材製造プロセス合理化計画の中核工場として、昭和59年2月に移動した¹⁾。本工場は丸および角ビレットの生産を中心に条鋼工場向け素材を供給する工場で、建設の基本理念は、連铸との連続化、自動化を骨子とした徹底したコストダウンとオンライン品質保証体制の確立にあった。

鋼片工場プロセス制御システム^{2,3)}の構築においては、上記工場建設の基本理念をふまえ、素材設計からプロセス自動運転、操業実績管理までの一貫したピース管理と、全プロセスの完全自動運転とを生産能力の異なるプロセスの連続化という局面で実現することを基本的要件とした。さらに、探傷機、寸法計などの品質検査設備の開発と導入を積極的に行い、これらの信号を受けて圧延工場における品質の作り込みを目指した加熱炉およびミルの計算機制御技術を開発し、品質保証体制の確立を図った。

仕上ミル(VH4スタンド連続ミル)では、連铸との連続操業を

要旨

水島製鉄所鋼片工場仕上ミル(VH4スタンド連続ミル)をフィールドとして、孔型連続ミル計算機制御技術の開発を行った。制御方式は、バー間寸法制御を目的としたセットアップ制御と、バー内寸法制御を目的としたダイナミック制御の両者で構成した。前者においては、温度、荷重、幅拡がりなどの圧延パラメータ予測モデルが開発の中心となるが、孔型圧延の特徴を考慮した高精度のモデルを開発した。後者については、従来の張力制御に代り、圧下制御を主体とした新しい断面形状制御方式を開発した。また、ミルモータに交流可変速制御を適用し、特に、主機は全てデジタル化した。これらの実機への適用結果から、寸法精度の向上効果を確認した。

Synopsis:

Kawasaki Steel has recently developed computer control techniques for a 4-stand tandem mill with grooved rolls, which consists of set-up and dynamic control functions, at the billet mill in Mizushima Works. The essential part of the set-up control, with the main aim of controlling dimensions between bars, comprises sophisticated mathematical models to precisely predict such rolling parameters as material temperature, rolling force, and width spread. They are based on theoretical constructs and actual data from grooved rolling. For dynamic control to achieve uniform sectional dimensions along the length of the material, new sectional profile control techniques, utilizing roll gap control, has been developed, replacing the traditional tension control system. As hardware improvement, A.C. variable speed control systems were adopted in mill motors, among which all the main motors are digitally controlled. As the result, the dimensional accuracy of the product has been significantly improved in the mill.

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、従って、多様な圧延サイズ、規格および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。

仕上ミル計算機制御技術は、上記のニーズを受けて開発、実用化したものである。特に、従来の張力制御による形状制御に代って、孔型圧延機では初めて、圧下制御を主体としたMFPC(Mizushima Fine Profile Control)を開発し、バー内寸法精度の向上を図った。また、タンデムミルモータに交流可変速制御を適用し制御精度の向上に寄与させることができた。

本稿では、鋼片工場プロセス制御システムの概要と、仕上ミルの圧延制御技術について述べる。

* 昭和61年1月21日原稿受付

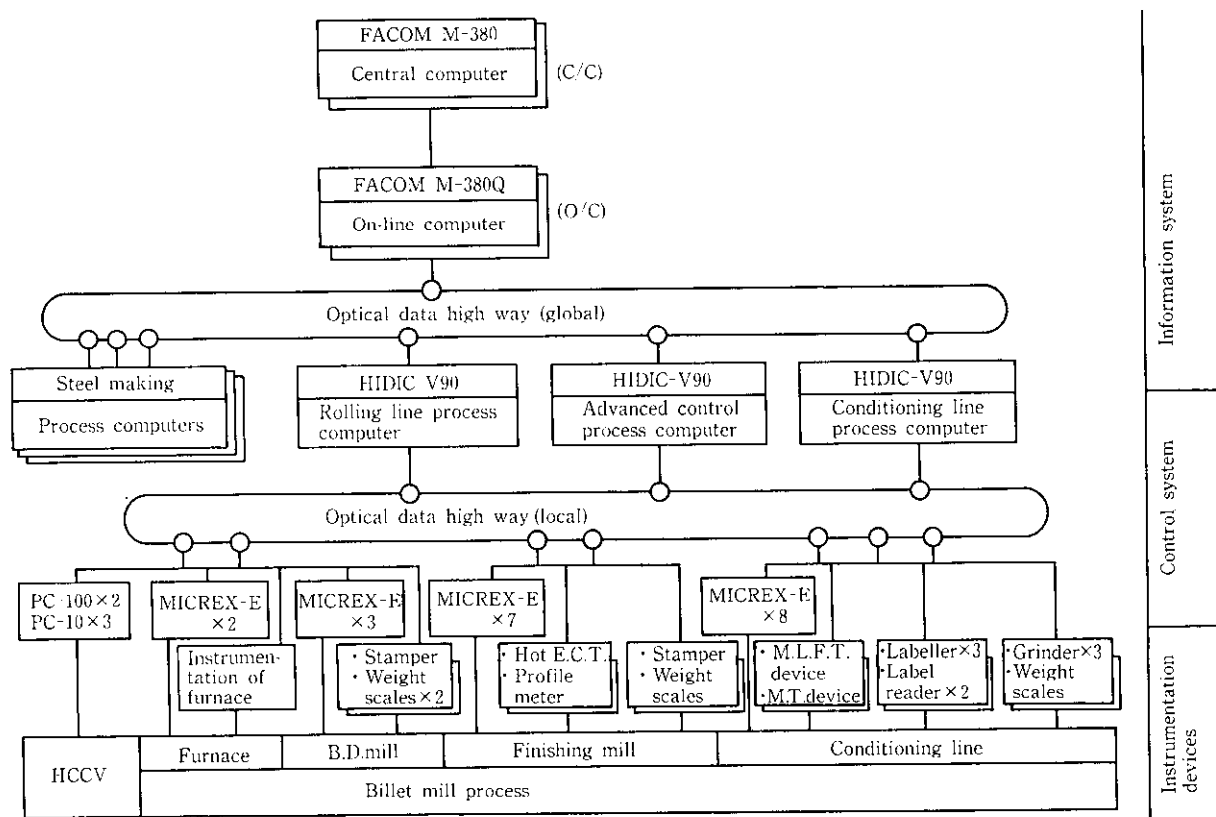


Fig. 1 Configuration of the billet mill information and control system

2 プロセス制御システムの構成と狙い

プロセスの連続化を実現し、かつその両プロセスの高度な自動運転および完全ピース管理を達成するためには、膨大な量の情報の高速処理と汎用性のあるプロセス制御が不可欠であり、Fig. 1に示すような製鋼工場から鋼片工場までを統括する大規模階層構成の計算機システムを構築した。

本システムの特徴は、

- (1) 各階層ごとの機能分担を明確にしたこと
- (2) センサ、自動化機器などの全てのプロセス機器とプロセスコンピュータ（以下 P/C）とをリンケージし、情報の一元ネットワーク化を図ったこと

にある。一般に大規模トータルシステムでは、情報、規準類の氾濫と、機能構成エレメントの多様化により、開発性が阻害された硬直化したシステムとなる危険性がある。また、システム構築時にシステム全体として矛盾のないよう全体設計してゆくことは難しい問題である。上記(1)は、このような問題の解決を狙ったもので、生産管理情報処理をセントラルコンピュータ（以下 C/C、バッチ処理）、オンラインコンピュータ（以下 O/C、リアルタイム処理）に持たせ、プロセス制御、ピーストラッキング、実績収集を P/C に、直接アクチュエータを駆動する設備制御を DDC に分担させた。この結果、各階層間のインターフェイスは非常にシンプルとなり、またシステム構築時、各階層ごとに十分なテストを行ったことにより、システム全体としての問題はほとんど生じなかった。

センサ、自動化機器などの単体機器は、もはや単独では高度な要求に応えられなくなっている。例えば、材料重量用センサである秤量機についてみれば、重量測定してオペレータに表示する機能

だけでなく、異材チェック、鋸断設備や圧延機へのフィードバック、フィードフォワード制御、品質保証データベース構築の検出端など、プロセス制御システムの一構成エレメントとして重要な役割を担わなければならない。特徴の(2)はこのような背景に立ち、システムの高機能化を狙ったものである。

Fig. 2に本制御システムの中核をなす鋼片工場 P/C システムの構成を示す。HIDIC-V90の4台マルチコンピュータシステムである。プロセス制御の面から見た特徴は、仕上ミルのダイナミック制御を P/C レベルで実現した点にあり、これは、

- (1) 複雑なモデルとアルゴリズムに基づく制御を可能とすること
- (2) 孔型ミル制御は当社において未経験の分野であり、ソフト開発性を重視すること

を狙っている。これにより制御周期の確保が問題となるが、CRT用情報を扱う光データループと制御用ループとの分離、高速メモリアンターフェイス型 PI/O (Process Input Output device) の採用などの手段で解決した。

3 孔型連続ミル制御

鋼片工場仕上ミルは粗ミルで中間断面まで圧延された角断面素材(125 mm×142 mm~300 mm×280 mm)からシームレス鋼管の素材となる丸ビレット(110 mmφ~230 mmφ)、線材および棒鋼の素材となる角ビレット(115 mm□, 150 mm□)および外販丸棒(90 mmφ~254 mmφ)を圧延する VH タイプの4スタンド連続ミルである。

仕上ミルの設備諸元を Table 1 に示す。本ミルの特徴は、

- (1) オンラインスタンド交換時間5分以内のロールチャンスフリーミル
- (2) 1ロール、1カリバー

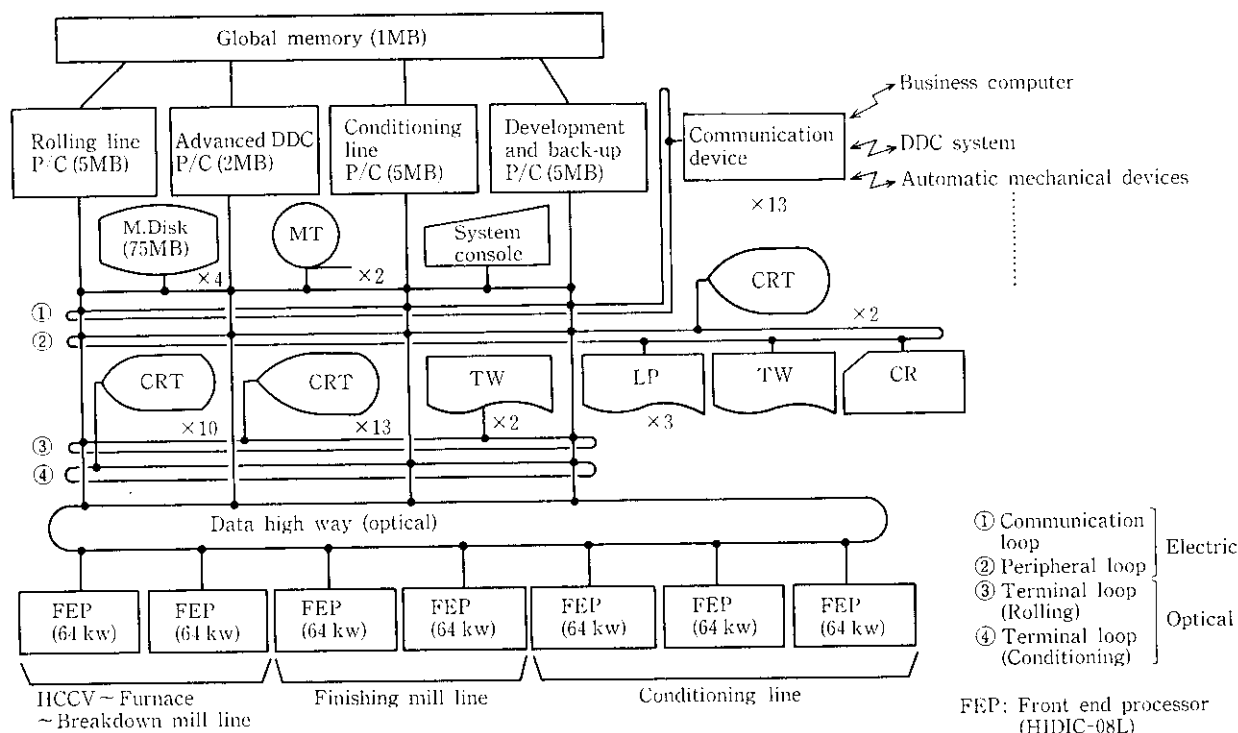


Fig. 2 Configuration of the billet mill process computer control system

Table 1 Specifications of the finishing mill

Equipment	Specifications
Finishing mill (VH mill)	Maker : IHI
	Unit : 4×2
	Type : Horizontal mill×2×2 Vertical mill×2×2
	Roll size : 950 mmφ×500 mm
	Screw down : Motor drive
	Screw up : Hydraulic drive
	Main drive gear ratio: V1 stand 1/32.464 H2 stand 1/28.277 V3 stand 1/27.388 H4 stand 1/22.958
Main motor of finishing mill	Maker : Fuji Electric
	Unit : 4
	V1&H2: AC1200 kW×272/680 rpm
	V3&H4: AC1400 kW×318/795 rpm
	Control : AC-VVVF, digital ASR control

- (3) VH タイプのミル (ノンツイストミル)
 (4) 高剛性ミル (ミル常数 約 300 t/mm)
 (5) 仕上タンデムミル主機に全デジタル交流可変速制御を適用
 (6) 孔型圧延において世界初のダイナミック圧下制御機能の採用
 (7) 各種センサ類の装備 (太さ計, ロードセル, ロール開度センサなど)

があげられる。このうち、(5)~(7) は高度なミル計算機制御による高寸法精度の丸・角ビレットの製造を目的としたものである。

昭和 59 年 2 月の稼動以降、仕上ミルをフィールドとして圧延寸法精度向上を目的に、孔型連続ミル計算機制御技術の開発を行った。特に、上記特徴として示したハードをベースとして、オンライ

ンセットアップ制御、断面形状制御などのソフト機能を開発してきた。以下にその概要について述べる。

3.1 オンラインセットアップ制御

3.1.1 圧延パラメータ予測モデルの開発

セットアップ制御の目的は素材温度、成分およびロール径などの変化に対して、目標通りの寸法に圧延するためのミル操作量（ロール開度、ロール回転数）を決定することにある。このためには圧延時の温度、荷重、天地寸法（圧下方向の材料寸法）、オーバル寸法（圧下方向と垂直方向の材料寸法）などの高精度の予測モデルが必要であり、各種モデル式を開発した⁴⁾。なお、圧延パラメータ予測モデルの開発にあたり、カリバー形状によらない統一式化を指向した。

(1) 温度予測式

統一非定常一次元熱伝導解析解を独自に導出し、これにより大気放冷、水冷、ロール伝熱などによる温度降下量を計算している。従来、非定常熱伝導解析解は表面積比 m を、

$$m = \frac{S \cdot (d/2)}{V} \quad \dots \dots \dots (1)$$

S : 表面積

d : 直径または板厚

V : 体積

で与え、無限長平板 ($m=1$)、円柱、角柱 ($m=2$)、球 ($m=3$) の m が整数値をとる 3 ケースについて個々に与えられていたが、今回これに対して、 m をパラメータとする統一式とし、 m が整数値以外の値をとる形状についても適用可能とした。これにより、従来の円形断面換算法によることなく、ダイヤ、オーバルなど実断面による取り扱いが可能となった。

また、初期温度として、連続加熱炉で行っているブルーム伝熱差分計算結果を使用した。

Fig. 3 は仕上ミル前後での、計算温度と実測温度を材料表面温度で比較したものである。計算精度は、 $\pm 10^\circ\text{C}$ に 85%、 $\pm 20^\circ\text{C}$ に 100% 入っている。

(2) 荷重予測式

変形抵抗は志田の式²⁾、圧下力関数は篠倉の式³⁾を用いて、実機圧延データによりカリバー形状などの影響を補正する修正係数 C_Q を定式化した。

$$P = k_{tm} \times F_d \times Q \times C_Q \quad \cdots (2)$$

P : 圧延荷重

k_{tm} : 平均変形抵抗

F_d : 投影接触面積

Q : 圧下力関数

Fig. 4 に荷重計算精度を示す。カリバー形状によらず $\pm 10\%$ で予測可能である。

(3) ゲージメータ式

カリバー形状を簡略化し、力学的関係より導いたロール変形モデル (δ_R , δ_R^K)、ロール締込法により求めたハウジング変形モデル (S_M) より構成している。

$$H = S_0 + \{S_M(P) - S_M(P_0)\} + \delta_R(P) - \delta_R^K(P_0) + 2H_K \quad \cdots (3)$$

H : 天地寸法

S_0 : ロール開度

S_M : ハウジング変形

δ_R : 圧延時ロール変形

δ_R^K : プリロード時ロール変形

P : 圧延荷重

P_0 : プリロード荷重

H_K : カリバー深さ

Fig. 5 に天地寸法の計算精度を示す。圧延寸法によらず ± 0.15 mm に入っている。

(4) 幅拡がりモデル

カリバー圧延においては、圧延時自由面となるオーバル寸法をいかに目標値に制御するかがポイントとなる。幅拡がりモデルとしては (4) 式に示す篠倉の式が知られている²⁾。

$$\frac{B_1 - B_0}{B_0} = \alpha \times \frac{\bar{l}_d}{B_0 + 0.5H_0} \times \frac{F_{11}}{F_0} \quad \cdots (4)$$

B_0 : 入側材料幅

B_1 : 出側材料幅

H_0 : 入側材料高さ

F_{11} : 孔型排除面積

F_0 : 入側断面積

$\bar{l}_d$: 平均投影接触長

α : カリバータイプによる定数

(4) 式は幾何学的パラメータのみで幅拡がりを表現したものであるが、Fig. 6 に示すように圧延温度が約 850°C 以下になるとオーバル寸法の温度依存性があらわれる。これはフェライト・オーステナイト 2 相域の影響と考えられ、実機圧延結果より α 値を数式化した。

$$\alpha = \alpha(\theta, C, \varepsilon, B_0/B_K) \quad \cdots (5)$$

θ : 材料温度

C : 炭素含有量

ε : 歪

B_K : カリバー幅

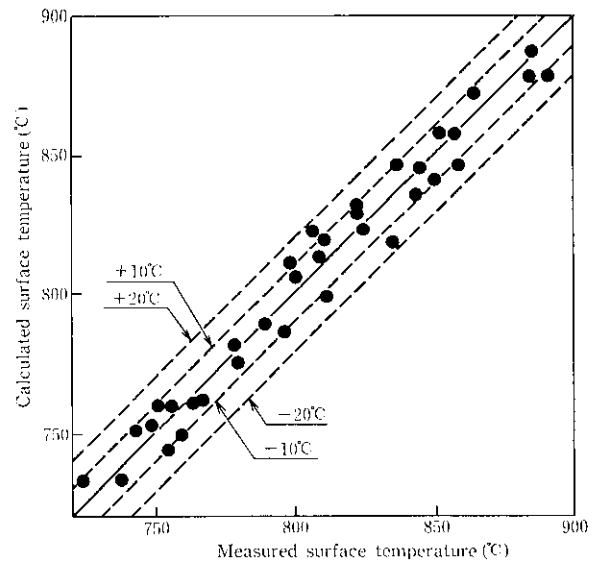


Fig. 3 Comparison between measured and calculated surface temperature

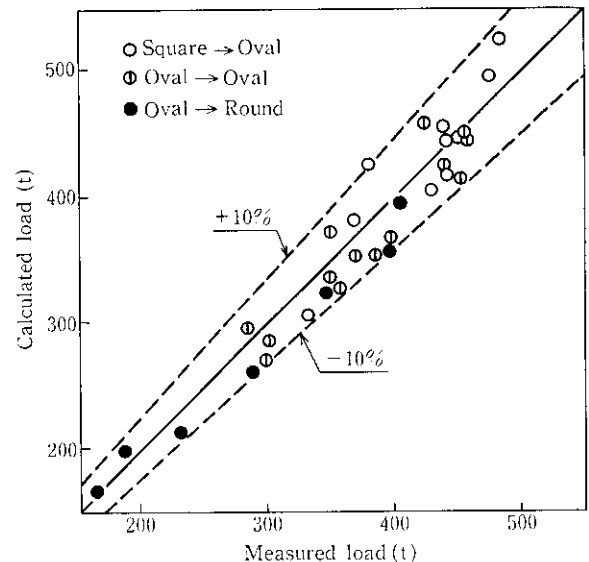


Fig. 4 Comparison between measured and calculated load

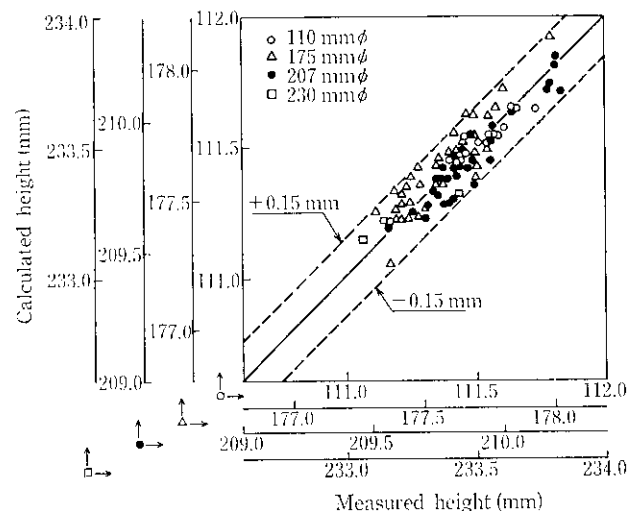


Fig. 5 Comparison between measured and calculated height

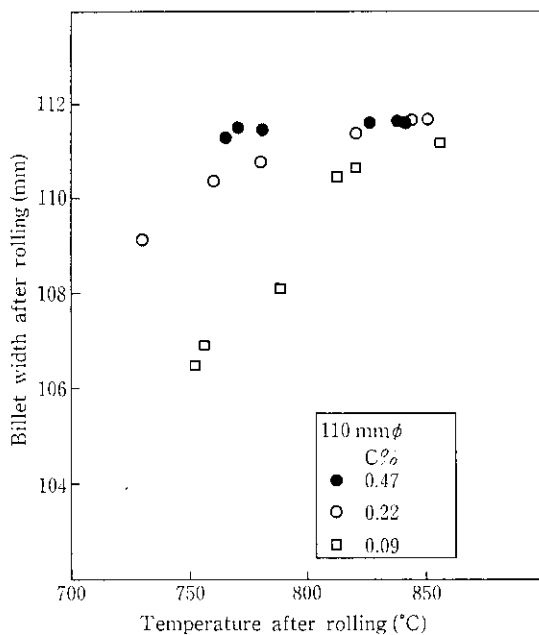


Fig. 6 Dependence of billet width on temperature

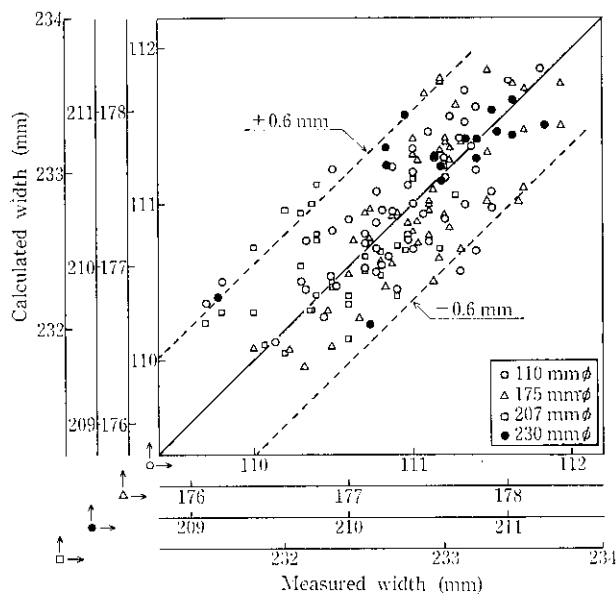


Fig. 7 Comparison between measured and calculated width

Fig. 7 に示すようにオーバル寸法予測精度は ± 0.6 mm である。以上のように各圧延モデルともオンライン使用可能な精度である。

3.1.2 オンラインセットアップ制御の実用化

オンラインセットアップ制御は前節の各モデル式を用いて、圧延直前に材料 1 本ごとに各スタンドでの断面形状変化、温度変化などを予測し、最終目標寸法（天地、オーバル寸法）を得るためのロール開度、ロール回転数を決定するものである。Fig. 8 に本制御の概略計算フローを示す。本方式の特徴を以下に述べる。

孔型圧延の場合、オフラインでロール形状設計が行われ、ここで決定されたカリバー形状はオンライン制御における制約条件となる。従って、オンラインセットアップ制御はロール設計と切り離しては考えられない。このため、

(1) 圧下配分（各スタンド出側目標寸法）はロール設計結果を使

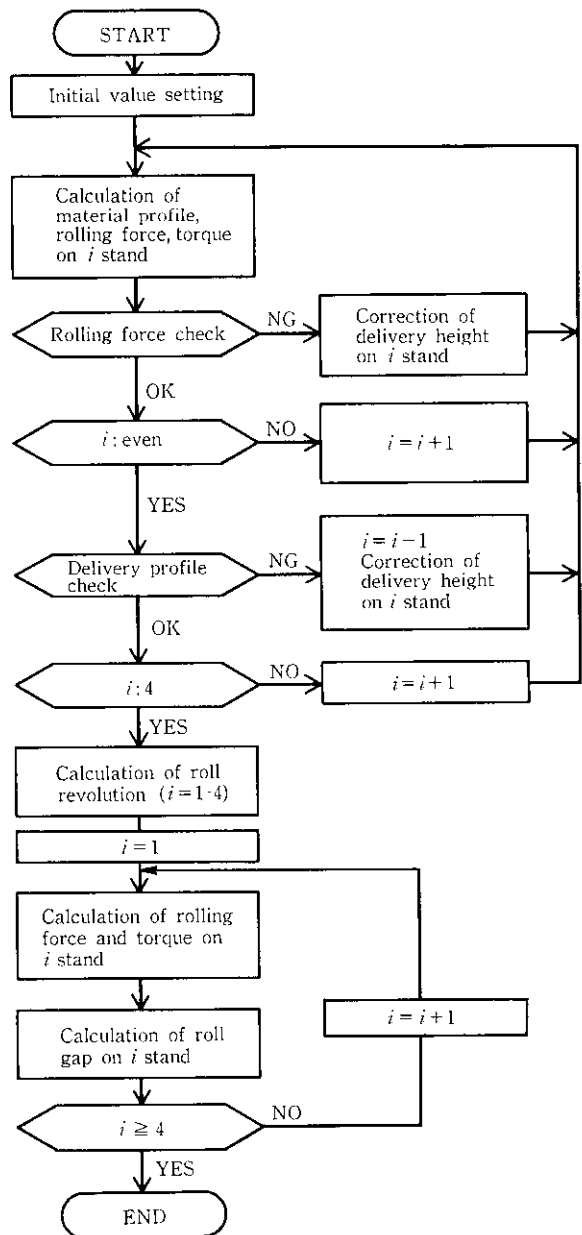


Fig. 8 Calculation flow for on-line set-up control of finishing mill

用し、本制御では既知量とする。

- (2) ロール設計結果であるカリバー形状をロールごとに受信し、これに基づいて断面形状変化を計算する
- (3) 本制御における制御量は天地寸法、オーバル寸法とすることとした。

最終天地寸法に対する操作量は H スタンドロール開度、最終オーバル寸法に対する操作量は V スタンドロール開度とすることを基本とした。すなわち、V と H の 2 スタンドをペアとして、V1 と H2、および、V3 と H4 の各々の出側形状をチェックし、H スタンド出側の天地およびオーバル寸法が目標寸法となるように V スタンド出側目標天地寸法を修正し、収束計算を行った。

Table 2 に本制御による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 (Fig. 6 より幅拡がり量が小さい) 場合であるが、オーバル寸法操作スタンドである V1 および V3 スタンドのロール開度が Case 1 より大きく計算しており、幅拡がり特性を考慮した計算結果であることがわかる。

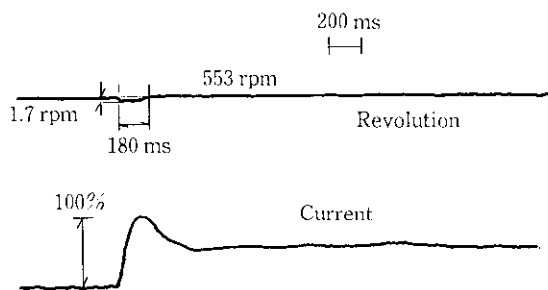


Fig. 13 Impact drop with observer control

3.3 断面形状制御

孔型連続ミルにおいてパー内寸法制御手段として、従来張力制御が広く実用化されている。張力制御は主機速度プリセット誤差を吸収し、張力を一定に制御することにより、先尾端の非定常部を含めた全長の安定した圧延を達成するうえで大きな効果がある。ところが、長手方向に温度差がある場合、天地寸法とオーバル寸法の同時制御のニーズに対しては十分であるとはいえない。これは、実張力測定が難しいこと、実圧延では張力変動以外の要因でも寸法変動が生じること、天地およびオーバル寸法同時制御に対して操作量が1つであることなどの理由による。このような判断から、孔型ミルに初めて圧延中に圧下調整可能な機構を導入し、圧下制御を主体とした断面形状制御 MFPC を開発した。

Fig. 14 は、スキッドマーク部の圧延圧力変動が 120 t 程度の丸ビレットの圧延後の寸法変動例である。スキッドマーク部でオーバル寸法が減少するのは、Fig. 6 で示した温度による幅拡がり特性に起因している。また、Fig. 15 は板圧延で実施されているゲージメータ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時の圧延後の寸法変動例である。無制御時よりもさらにオーバル寸法変動が大きくなっている。これは、V3 スタンドに AGC を適用したことにより、スキッド部の H4 スタンド入側オーバル寸法が減少したためである。このように、一般的に板圧延で実用化されている AGC を VH タンデムミルに適用しただけでは、正しい形状を得ることができない。

このため、(4)、(5) 式で示した幅拡がり予測式をベースとした新しい制御方式を開発した。その考え方を以下に説明する。(以下の ΔX_i はロックオン点からの変化量、 i はスタンド番号を示す。)

- (1) 最終の H4 スタンドでは、通常の BISRA-AGC を行い、天地寸法変動を制御する。
- (2) V3 スタンド荷重変化 ΔP_3 をもとに、(6) 式を逆算することにより材料温度変化 $\Delta \theta_3$ を逐次計算する。

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \times \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial h} \times \Delta h \quad \text{.....(6)}$$

ここで、 Δh は出側天地寸法変動でゲージメータ式 (3) より計算し、影響係数 $\partial P / \partial \theta$ 、 $\partial P / \partial h$ は荷重予測式 (2) から求めることができる。

- (3) V3 スタンド材温変化 $\Delta \theta_3$ をもとに、H4 スタンドでの材温変化 $\Delta \theta_4$ を予測する。ここでは簡易的に $\Delta \theta_4 = \Delta \theta_3$ とした。
- (4) $\Delta \theta_4$ をもとに H4 スタンドでの幅拡がり率変化 $\Delta \beta_4$ を (7) 式により予測する。

$$\Delta \beta = \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \times \Delta \theta \quad \text{.....(7)}$$

ここで、影響係数 $\partial \beta / \partial \theta$ は、幅拡がり予測式 (4)、(5) から

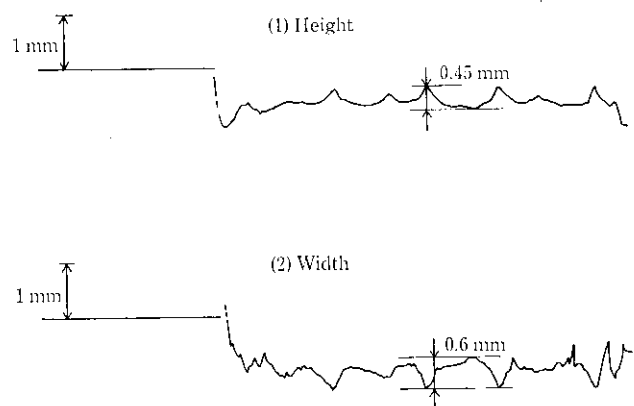


Fig. 14 Dimensional variation after rolling without control

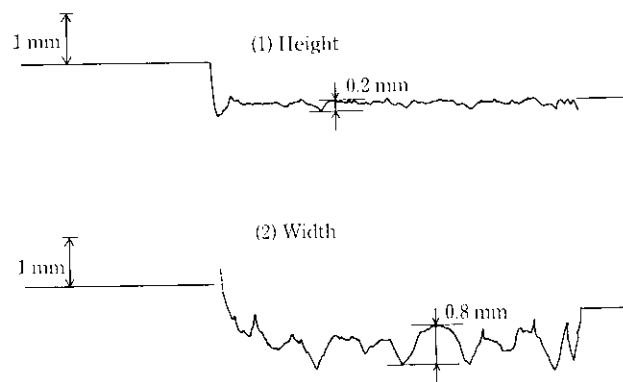


Fig. 15 Dimensional variation after rolling with BISRA-AGC

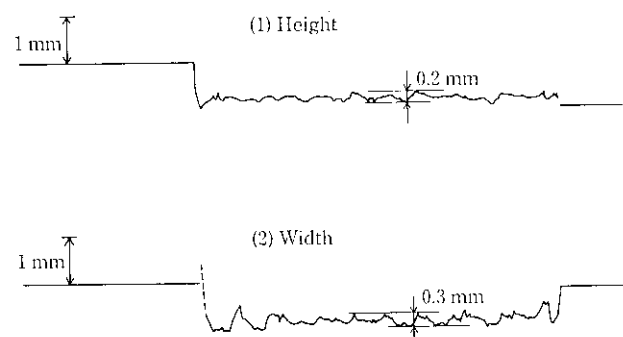


Fig. 16 Dimensional variation after rolling with MFPC

ら求めている。

- (5) $\Delta \beta_4$ 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 ΔB_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 $\Delta \beta$ 、 ΔB を考え、

$$(\beta_L + \Delta \beta) \times (B_L + \Delta B) = b_L \quad \text{.....(8)}$$

となるように、

$$\Delta B = -\Delta \beta \times \frac{B_L}{\beta_L} \quad \text{.....(9)}$$

から ΔB_4 を求めている。ここで、 b は出側オーバル寸法、 L はロックオン点の意味である。

- (6) H4 スタンド入側オーバル寸法変化 ΔB_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 ΔB_4 だけ修正して圧下制御を行う。

以上を制御周期ごとにくり返す。すなわち、V3 スタンドにおいて、目標値を逐次修正しながら圧下制御を行うものである。Fig. 16 に本方式の適用結果を示す。天地寸法、オーバル寸法の変動量が共に他の例に比べ減少していることがわかる。

本方式においては、(6)、(7) 式の影響係数の計算精度、特に幅拡がり式の精度アップにより、さらに制御精度の向上を図ることができる。

4 結 言

孔型タンデム圧延の分野ではこれまでミル制御の主流が張力制御を中心として開発されてきた。そこでは材料のプロフィール、形状を積極的に制御するのではなく、形状が乱れることを抑制する消極的の考え方であった。今回水島鋼片仕上ミルにおいて、ミルセットアップ制御に加えて、バー内リアルタイム制御による MFPC の有効性が実ミルで実証できた。これは板圧延における、制御によってプロフィール、形状および品質を積極的に作り込む思想につながるもので、条鋼圧延技術に与える影響は大きいものと考えられる。今後、これらの考え方をさらに発展させて条鋼製品の品質向上につとめていきたい。

参 考 文 献

- 1) 平井信恒, 古原正典, 中西輝行: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, 3-12
- 2) 山崎順次郎, 中西輝行, 中路 茂, 馬場和史, 菊川裕幸, 藤本隆史: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, 13-22
- 3) 大杉賢三, 上田徹雄, 谷利修己, 羽生正博, 中川康弘, 板倉仁志: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 1, 23-31
- 4) 中西輝行, 藤本隆史, 馬場和史, 新井和夫: 鉄と鋼, 71 (1985) 12, S 1126
- 5) 志田 茂: 日立評論, 52 (1970) 8, 731
- 6) 篠倉恒樹, 勝山昭史: 昭和 54 年塑性加工春季講演会, (1979), 509
- 7) 篠倉恒樹, 勝山昭史: 第 29 回塑性加工連合講演会, (1978), 109