
小径シームレス圧延制御システムの開発

Development of Automatic Process Control System for Small Seamless Pipe Mill

船生 豊(Yutaka Funyu) 奥村 精(Tadashi Okumura) 紺屋 範雄(Norio Konya)
林 保之(Yasuyuki Hayashi) 岡 弘(Hiromu Oka) 今江 敏夫(Toshio Imae)

要旨：

知多製造所では、中径シームレスミルに引続き、小径シームレスミルを対象にプロセスコンピュータシステムを導入した。このシステムは、多くのオンラインゲージの導入と新しい制御モデルの開発によって高度の圧延制御を実現している。代表的制御として、ピアサの外径を考慮した適応制御モデル、マンドレルミルの断面形状制御モデル、ストレッチレデューサの最適エロンゲーション制御モデルなどを開発した。オンラインゲージ開発の一例として、マンドレルミルのバルジ計について述べた。これらは、いずれも寸法精度向上による品質向上、操業の標準化などに大きな効果をあげている。

Synopsis：

New process computer system has been developed at the 7" seamless tube mill of Chita Works following the 16" seamless tube mill. The former system has realized highly automated control for each mill through the development of on-line gages and rolling control models. Optimal control model for the piercer, cross section profile control model for mandrel mill and adaptive elongation control model for the stretch reducer are mainly described. New bulge gage has been applied to mandrel mill control. The accuracy of the tube dimensions and standardization of rolling operations are remarkably improved by applying the high-level software and hardware to rolling process. An outline of the automatic computer control system, its performances and the results of its adoption are discussed in this report.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Automatic Process Control System for Small Seamless Pipe Mill



船生 豊
Yutaka Funyu
知多製造所 設備部設備技術室 主査(部長補)



奥村 精
Tadashi Okumura
知多製造所 設備部設備技術室 主査(課長)



紺屋 範雄
Norio Konya
知多製造所 設備部設備技術室



林 保之
Yasuyuki Hayashi
知多製造所 第2造管部小径シームレス管課 課長



岡 弘
Hiromu Oka
知多製造所 第2造管部シームレス管技術室



今江 敏夫
Toshio Imae
鉄鋼研究所 知多研究部 主任研究員

1 緒 言

知多製造所におけるシームレス圧延制御技術の開発は、まず中径シームレス工場の建設を機に開発が行われ、すでに数値管理圧延技術として操業に定着している。引き続き 1982 年より、小径シームレス工場を対象にプロセスコンピュータシステムの導入を図り、圧延制御技術の開発を行ってきた。

既設ミルへの制御システムの導入のため、厳しい制約条件が多く、また中径シームレスミルに比較して、小径シームレスミルは圧延速度が速く、多スタンド連続ミルからなる、より複雑なプロセスであるため、開発に当っては多くの困難に直面した。しかし、中径シームレスからの技術トランスファと、過去の豊富な操業技術の蓄積の活用、新しいセンサの開発、モデルミル実験を反映した精度のよい制御モデルの開発などにより、短期間でプロセスコンピュータを含む高度の圧延制御システムを構築し、圧延制御技術の定着を図ることができた。本制御は、信頼性の高いハードとソフトに支えら

要旨

知多製造所では、中径シームレスミルに引続き、小径シームレスミルを対象にプロセスコンピュータシステムを導入した。このシステムは、多くのオンラインゲージの導入と新しい制御モデルの開発によって高度の圧延制御を実現している。代表的制御として、ピアサの外径を考慮した適応制御モデル、マンドレルミルの断面形状制御モデル、ストレッチレデューサの最適エロンゲーション制御モデルなどを開発した。オンラインゲージ開発の一例として、マンドレルミルのバルジ計について述べた。これらは、いずれも寸法精度向上による品質向上、操業の標準化などに大きな効果をあげている。

Synopsis:

New process computer system has been developed at the 7" seamless tube mill of Chita Works following the 16" seamless tube mill. The former system has realized highly automated control for each mill through the development of on-line gages and rolling control models. Optimal control model for the piercer, cross section profile control model for mandrel mill and adaptive elongation control model for the stretch reducer are mainly described. New bulge gage has been applied to mandrel mill control. The accuracy of the tube dimensions and standardization of rolling operations are remarkably improved by applying the high-level software and hardware to rolling process. An outline of the automatic computer control system, its performances and the results of its adoption are discussed in this report.

れ、操業の標準化、品質と生産性の向上、省力などの成果を生んでいる。本稿では、圧延制御システム、センサ、制御モデルについて、その概要を報告する。

2 システム開発環境

2.1 圧延ラインレイアウト

小径シームレス圧延ラインのレイアウトを Fig. 1 に示す。水島製鉄所より搬送されたロングビレットは、ビレット切断ラインでカットビレットに切断される。カットビレットは、ドーナツ型の回転式加熱炉へ装入される。加熱されたビレットは、ピアサで穿孔され中空素管(ホローブルーム)になる。ホローブルームはマンドレルバーが装入され、8スタンドのフルフロートマンドレルミルで圧延され圧延素管(シェル)となる。マンドレルバーは圧延直後、シェルから抜かれ循環再使用される。シェルは再加熱され、24スタンドのストレッチレデューサで所定寸法に絞り圧延される。チェーブは冷却床で冷却され、コールドソーで製品長さに切断される。圧延ラ

* 昭和61年2月20日原稿受付

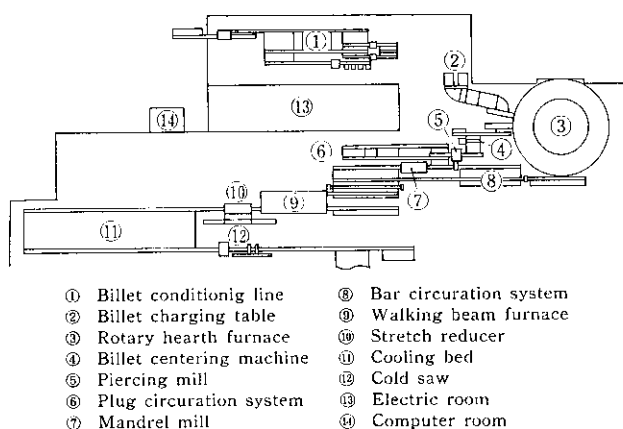


Fig. 1 Layout of 7'' seamless tube mill line

イン上には、常時約 700 ピースの材料が滞在している。

2.2 圧延プロセスの特徴

同じシームレス圧延プロセスである中径シームレスと小径シームレスの圧延プロセスの比較を Table 1 に示す。小径シームレスはマルチスタンドミルゆえ、圧延制御のダイナミックレンジが広範囲であること、圧延速度が高速であることおよび制御ループ数が多いことが特徴である。

小径シームレス圧延ラインは、1971年に建設されたものであり、機械系および電気制御系とも2世代前の設備である。圧延制御システムは、このような既設設備を前提に開発したことも特徴である。

3 制御システムの概要

3.1 機能と目標

今回開発した制御システムの諸機能を Fig. 2 に示す。主な機能は次のとおりである。

- (1) ピーストラッキング： ビレットチャージングから圧延ライン全般にわたる材料のトラッキングとマンドレルバーなどのツーリングのトラッキングを行う。
- (2) ミルの圧延制御： ビアサ、マンドレルミル、ストレッチレデューサについて、塑性理論に基づいたモデルにより学習制御、適応制御モデルを開発し、完全自動圧延を行う。
- (3) 中央計算機とのデータ伝送： 中央計算機と当システムとの間で、圧延スケジュールや圧延実績などの授受を行う。
- (4) オペレータガイダンス： ミルの設定値、実測寸法、トラッキングマップなどを CRT 画面上に表示し、オペレータを支援する。

次に、本制御システムの開発に際して設定した課題を Fig. 3 に示す。制御システムの導入効果を高めるために、並行して進められたオペレータ室の統合、ビアサのプラグバーサーキュレーションなどの既設設備の改善課題も、関連づけて示してある。目的は、品質と歩留りの向上、生産性の向上、省力であるが、加えて操業の完全標準化がベース課題として重要である。

3.2 ハードウェア構成

小径シームレス圧延プロセスの特徴および機能を考慮して、Fig. 4 に示すハードウェア構成とした。構成上、配慮した点は次のとお

Table 1 Comparison of process features between 7'' and 16'' seamless tube mills

	Mill type	Elongation ratio	Rolling length (m)	Rolling speed (m/s)	Cycle time (s)	Control loop
7'' mill	Piercing mill	Cross roll	—	10	1.4	
	Mandrel mill	Multi stand	2.0~4.0	26	5.5	15
	Stretch reducer	Multi stand	1.0~4.5	64	7.8	
16'' mill	Piercing mill	Cross roll	—	9	1.2	
	Elongator	Cross roll	1.2~2.0	13	1.2	
	Plug mill	Single stand	1.1~1.5	19	3.0	25
	Reeler	Cross roll	1.0	19	0.9	
	Sizing mill	Multi stand	1.0	19	3.0	34

On line data-link to central computer

- Rolling items entry
- Transmission of actual rolling data
- Piece reject data processing

Lot trace system

- Piece & tooling tracking
- GO & STOP control for each piece at billet charging and furnaces

Rolling control system

- Piercing mill
- Mandrel mill
- Stretch reducer
- Automatic set-up
- Adaptive control of dimensions
- Realtime tension control in rolling

Operator's guidance by CRT display

- Rolling items
- Piece tracking map
- Graphic display of on-line gage data

Fig. 2 Functions of computer control system

りである。

- (1) ピーストラッキングに対する CPU 負荷軽減を図るために、制御機能をリアルタイム系とオフライン系に分散配置した水平負荷分散システムを採用した。
- (2) 電気品と CPU の機能分担を見直し、より単純化を図った。

- (3) ピース間適応制御に使用するオンラインゲージはデータフリーウェイへ接続し、ピース内最適制御に使用するオンラインゲージは DDC 直結とし、圧延プロセス情報を制御システム内で最適配分すると同時にリアルタイム性を確保した。

このようなハードウェア構成を採用し、ソフトウェア構成にも十分配慮をほどこしたことにより、圧延ラインをサイクルタイム 15

秒で運転しても CPU 負荷率は 60% を越えたことはない。また、制御モデルもすべて 0.3 秒以内に応答している。

4 オンラインゲージの開発

シームレス鋼管に限らず圧延制御システムの構築にはオンラインゲージが不可欠である。そこで本システムでは、Fig. 4 に示す各種のオンラインゲージを開発導入した。

圧延制御モデルの精度を高める上で、Fig. 5 に示すような、マンドレルミル圧延中のバルジ幅を測定することが重要と考え、下記条件を満足するゲージの開発に着手した。

- (1) 圧延機ハウジング間隔は 50 mm ゆえ、この間隔以内で測定可能であること。
- (2) 圧延ロールを交換する場合、ハウジング全体を交換するので、交換作業の障害とならないこと。
- (3) 圧延速度は最大 5 m/s であり、また 200 mm ピッチでバルジの測定値が必要ゆえ、応答性は 40 ms 以下であること。
- (4) 測定精度はミル制御用であるから ± 0.5 mm 以内とする。
- (5) 測定環境はロール冷却水が飛散している熱間圧延雰囲気である。

上記条件を満足するバルジ計として、Fig. 6 に示す構造を持ったコンパクトなゲージを開発した。このバルジ計を用いて、実際に熱間ラインで測定した一例を Fig. 7 に示す。測定結果は、精度 ± 0.5 mm、応答性 33 ms であり、当初の開発目標を十分満足するものである。さらに、ここで開発したバルジ計の技術を、ピアサ出側のホローブルーム外径の計測にも適用し、開発技術の有効活用を

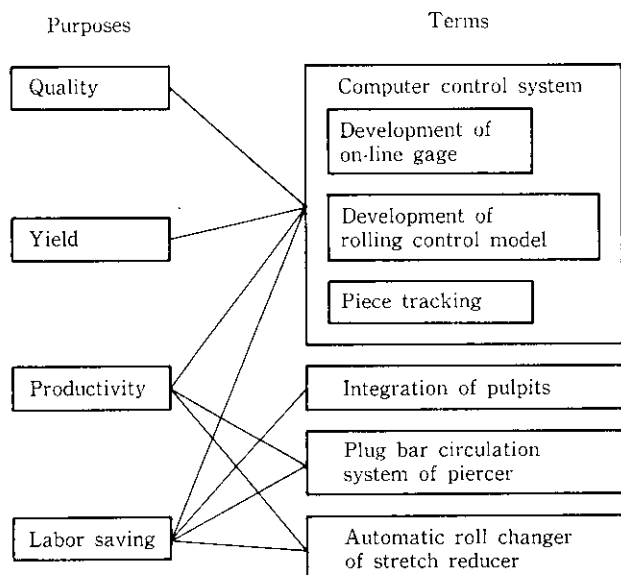


Fig. 3 Purposes of computer control system

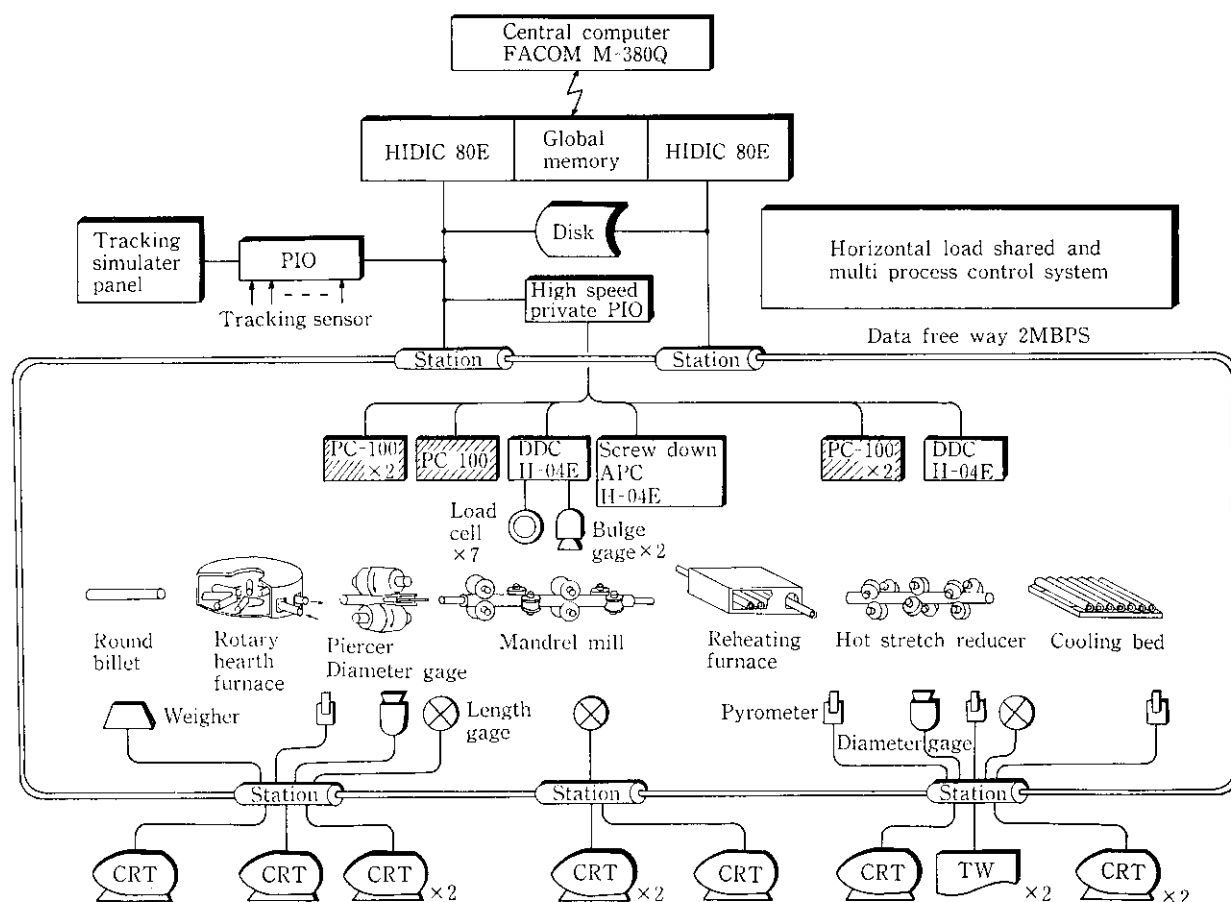


Fig. 4 Basic system configuration of 7'' seamless tube mill

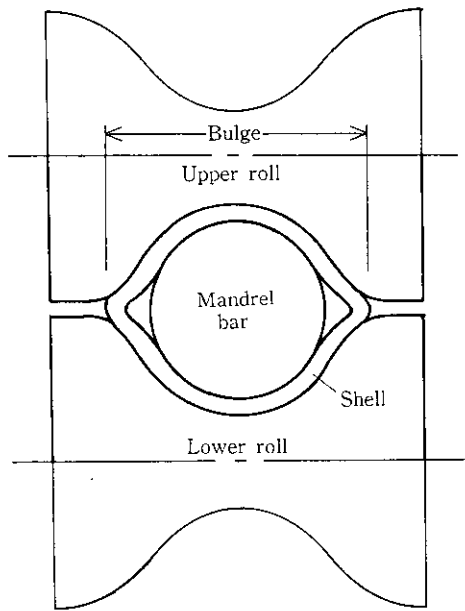


Fig. 5 Cross section profile of shell in rolling at mandrel mill

図っている。

5 圧延制御モデルの開発

5.1 ピアサ¹⁾

ピアサはシームレス圧延プロセスの最上流に位置する穿孔圧延機である。それゆえ、穿孔されたホローブルームの寸法精度を向上すれば下流圧延機のオペレーションを容易にすることになるので、結果として最終製品の寸法精度の向上が期待できる。

ピアサでは、まず、圧延スケジュールによりプラグ外径を選択する。次にゴージ（バレルロール間隔）、リード（プラグ先端位置）、シュー間隔およびフィード角度を決定しなければならない（Fig. 8 参照）。これらの条件を決定するセットアップモデルの基本概念は、当社中径シームレスで開発した考え²⁾をトランスファした。しかし、さらに寸法精度向上および標準化を図る目的で、循環使用するプラグをトラッキングし、Fig. 9 に示す適応制御モデルに反映させた。以下にモデルの考え方を説明する。

Fig. 8 に示すように幾何学的に（1）および（2）式が成り立つ。

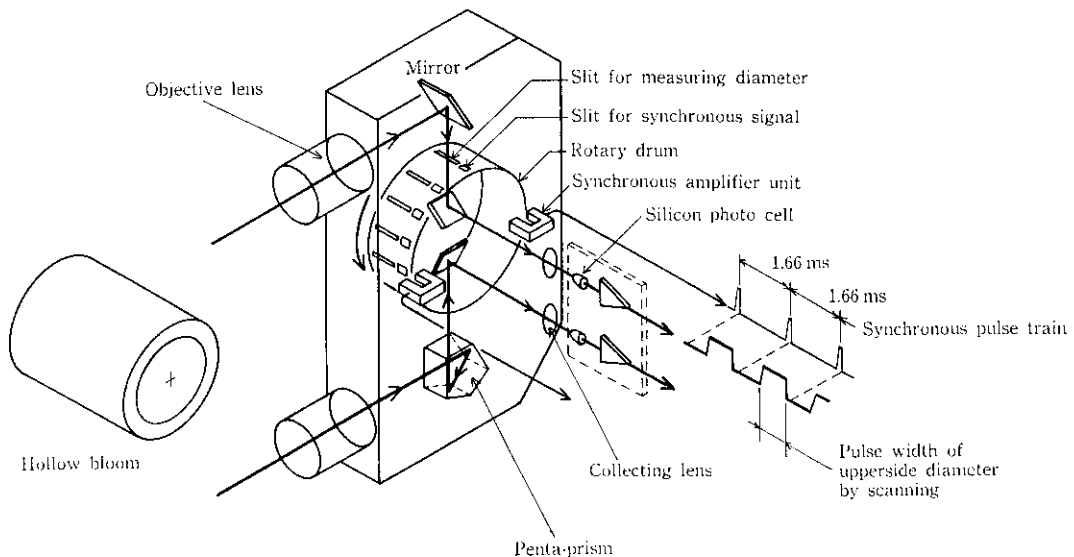


Fig. 6 Schematic structure of bulge gage and its basic measuring principle

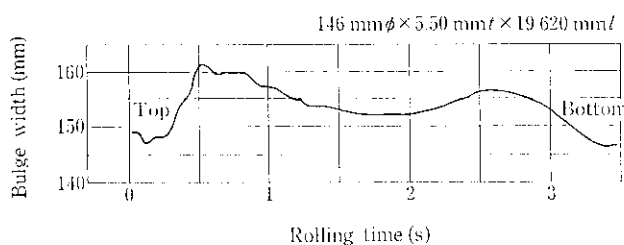


Fig. 7 An example of No. 4 stand outlet bulge width

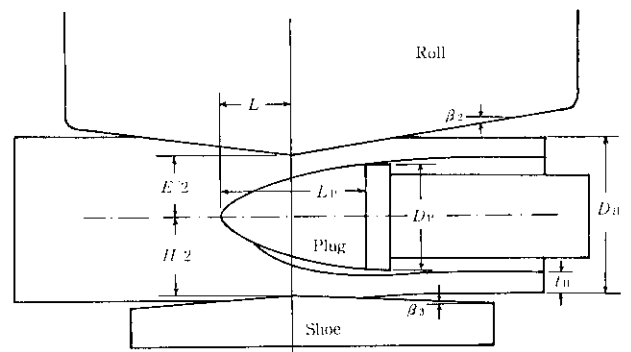


Fig. 8 Concept and notations of piercer

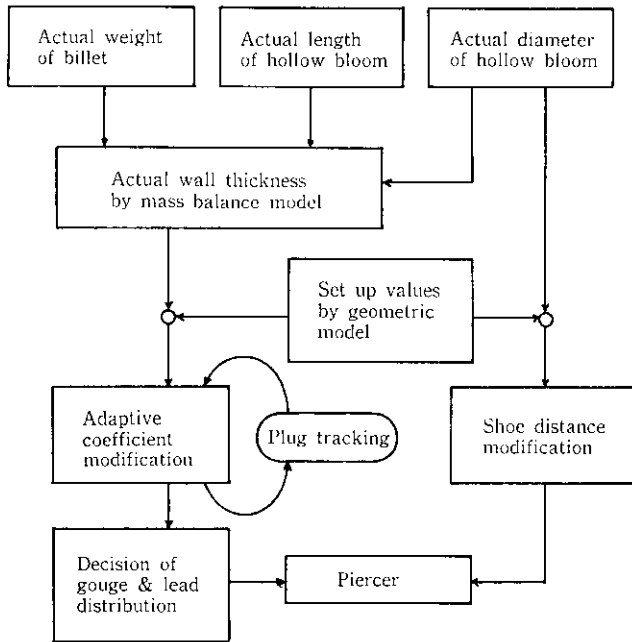


Fig. 9 Block diagram of piercing mill control model

$$\frac{E}{2} + (L_P - L) \tan \beta_2 = t_H + \frac{D_P}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$D_H = a[H + 2(L_P - L) \tan \beta_3] + b[E + 2(L_P - L) \tan \beta_2] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで

D_H : ホローブルームの外径

t_H : ホローブルームの肉厚

D_P : プラグの有効径

L_P : プラグの有効長さ

E : ゴージ間隔

L : リード間隔

H : シュー間隔

β_2, β_3 : ロールおよびガイドシュー出側角度

a, b : 係数

一般的にフィード角度はホローブルーム寸法以外の要素で決定されるので、制御を必要とする項目はリード、ゴージおよびシュー間隔である。ホローブルーム外径は同一サイズに穿孔している場合にはシュー間隔に強く影響される。そこで(3)式に示すように、ビレットをホローブルームに穿孔する場合、その加工量すなわちホローブルーム肉厚によってシュー間隔の外径依存性が変化するので、それを制御パラメータとしている。次に板圧延でのミル定数に相当するシュー定数を定義し、これを制御ゲインとしたフィードバックモデルでホローブルーム外径を制御する。

$$\Delta H = \gamma t_H (D_H^* - D_H) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

ΔH : シュー間隔制御量

γ : 定数

D_H^* : 実測ホローブルーム外径値

ホローブルーム肉厚は、Fig. 8 あるいは(1)式よりわかるようにゴージおよびリード間隔が一定であれば、プラグ有効径に影響される。プラグは同一径をそろえて循環使用するが、穿孔条件および使用回数によりプラグ摩耗量は均一ではない。つまりピースごとに異なる径のプラグで穿孔される。ホローブルーム肉厚の制御モデルの考え方を以下説明する。

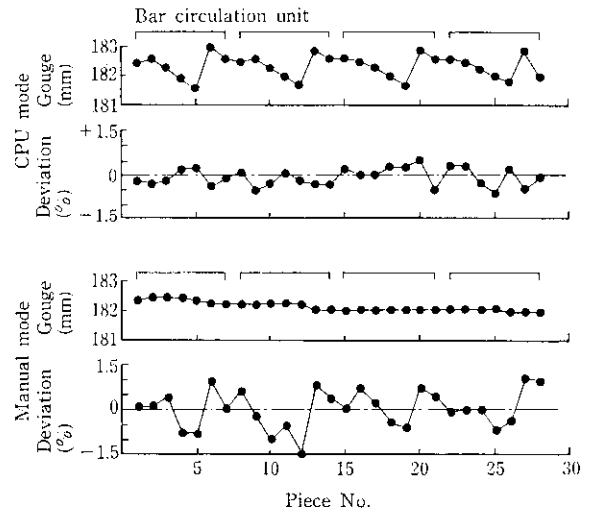


Fig. 10 Typical example between CPU mode and manual mode

まず(4)式により j 番目のプラグで穿孔したホローブルームの実績肉厚 t_H^* を求める。

$$t_H^*(j) = \frac{1}{2} \left(D_H^* - \sqrt{(D_H^*)^2 - \frac{4W_B^*}{\pi \rho_H}} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで

t_H^* : 実測ホローブルーム長さ

W_B^* : 加熱炉によるスケールロス考虑したビレット重量値

ρ_H : 穿孔温度での鉄の密度

次に実績肉厚よりプラグ有効径、ミル定数などの影響を考慮した肉厚補正值 $\Delta t_H(j)$ を(5)式より求める。

$$\Delta t_H(j) = t_H^*(j) + \frac{D_P}{2} - \frac{E}{2} - (L_P - L) \tan \beta_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\Delta t_H(j)$ は循環しているプラグ使用数に応じて、常時トラッキングしている。肉厚を制御できるパラメータは、ゴージあるいはリードであるから、肉厚修正配分係数 $\alpha_1, \alpha_2 (0 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1)$ を用いると(6)および(7)式が得られる³⁾。

$$\Delta E(j \times j) = \alpha_1 \Delta t_H(j) + (1 - \alpha_1) \Delta L(j) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta L(j \times j) = \alpha_2 \Delta t_H(j) + (1 - \alpha_2) \Delta L(j) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで $(j \times j)$ は次のプラグ循環で穿孔する時に使用することを示す。Fig. 10 に、この制御モデルを使用して穿孔した結果、ホローブルーム長さのバラツキが手動穿孔に較べて、ほぼ半減したことを示す。

5.2 マンドレルミル^{4~7)}

フルフロートマンドレルミルは、下記理由によりもっとも圧延現象の解明が困難な圧延機であるといわれてきた。

- (1) カリバーロールによるマルチスタンドの3次元圧延機であるから、操業パラメータが多く自由度が大きい。
- (2) マンドレルバーの圧延中の挙動を観測あるいは制御することが不可能であること、および循環使用されるバーの変動が圧延にとって外乱となる。
- (3) 板の圧延に較べて圧延時間が短く、常に非定常圧延の連続である。

このミルの制御モデルを開発するにあたり、圧延の原点に戻った。まずローカルカリバの改善を実施し、カリバ形状を数式化し

た。次にシェル内面とバーの潤滑性を改善した。第3にロール間隔のバラツキを小さくするために、プリロードを付加したロール間隔零調方式を導入した。この零調方式により、ロール間隔のバラツキが標準偏差で0.1 mm 減少し、設定精度が向上した。これらの改善により、制御環境の向上を図ることができた。

当社のカリバは、前段スタンドで肉厚を減少させ、後段スタンドで偏肉を矯正するよう設計されている。そこで、No. 5 および No.

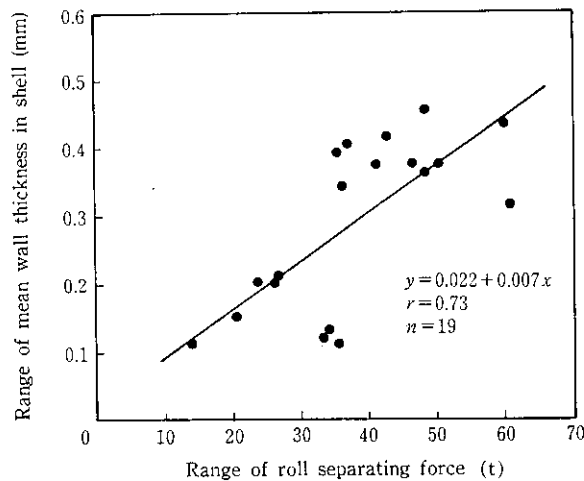


Fig. 11 Relation between wall thickness and roll separating force

6 スタンドの圧延荷重とシェル断面平均肉厚に注目し、1 ピース内における両者の最大値と最小値の差を測定した。No. 5 スタンドの測定結果を Fig. 11 に示す。No. 6 スタンドで同様の測定結果が得られた。その結果、圧延荷重と肉厚がよく対応することを確認した。そこで、管1本の平均肉厚を所定の値にし、かつ円周方向の肉厚分布を均一にするために、圧延荷重を予測して各スタンドの圧延中のロール間隔が所定値になり、かつ奇数、偶数各々の肉厚仕上げスタンドの圧延中のロール間隔が最適値になるように、無負荷時のロール間隔を設定するモデルを開発した。Fig. 12 に、そのシェル断面形状制御モデルの概要を示す。以下モデルの考え方を説明する。

まず、実績ホローブルーム肉厚（入側肉厚）より目標シェル肉厚（出側肉厚）に圧延する全圧延量を求める。次に全奇数スタンドと偶数スタンドでの圧延量、すなわち減肉量を求める。これらの減肉量から、単スタンド当りの減肉量を算出する。この時、出側肉厚分布が円周方向に均一になるように、特に #5 および #6 スタンドの減肉量を最適化している。

次に、これらの減肉量、バー温度、ホローブルーム温度などから回帰や学習により、各スタンドの予測圧延荷重 $\hat{P}(i)$ を推定する。

$$\hat{P}(i) = \left[a(i) + b(i) \left(1 - \frac{t_a(i)}{t_b(i-2)} \right) \right] C_P(i) C_R C_H \dots (8)$$

$$C_B = f_1(\theta_B) \dots (9)$$

$$C_H = f_2(\theta_H) \dots (10)$$

ここで

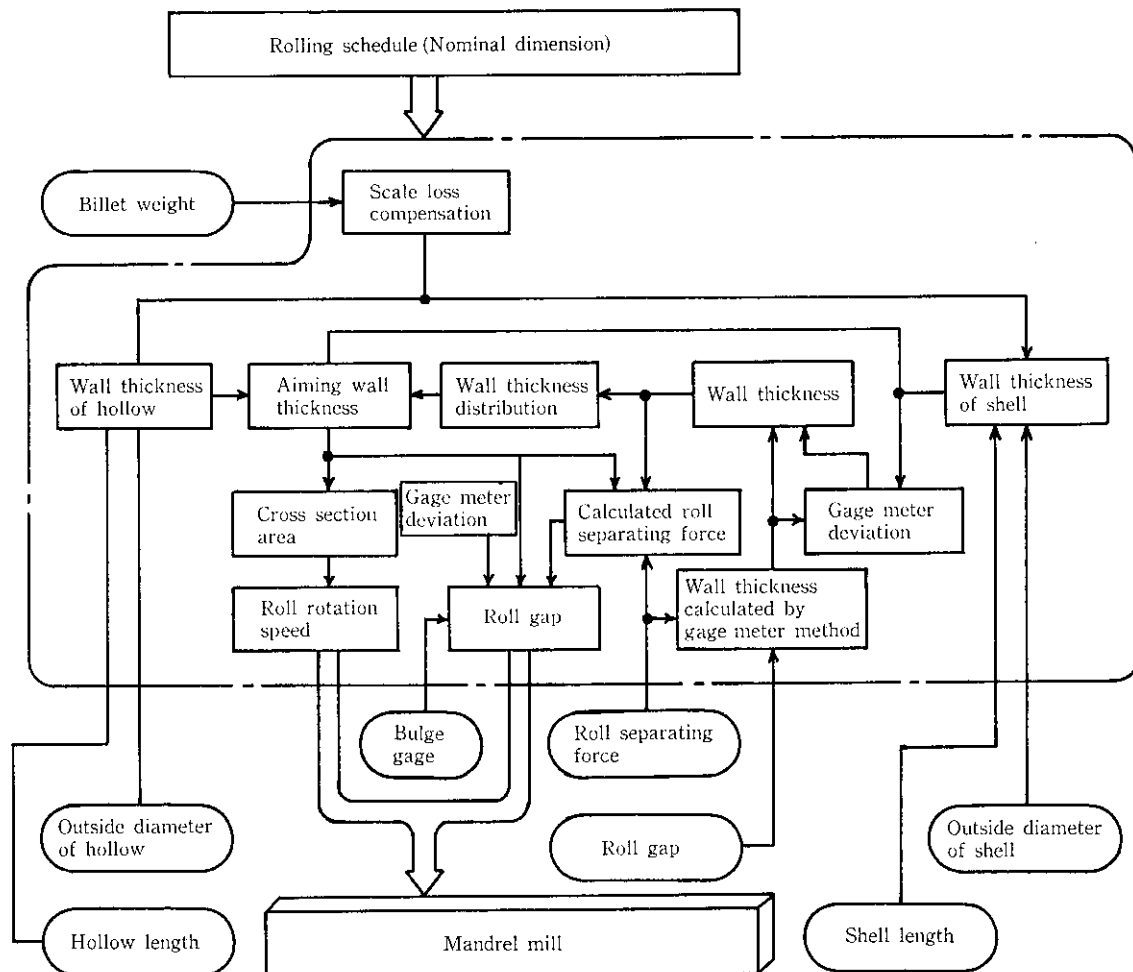


Fig. 12 Block diagram of wall thickness control for shell

i : スタンドナンバー
 C_P : i スタンドの学習係数
 a, b : 鋼種による係数
 $t_a(i)$: i スタンドの出側肉厚
 θ_B : 実測バー温度
 θ_H : 実測ホローブルーム温度

バーの循環使用によるバー温度上昇は、バー径の熱膨張補正を要する程の変化をもたらすわけではないが、しかし、バー表面の潤滑剤塗布状態が変化し、これによりシェル内面とバー表面の摩擦係数が変化する。摩擦係数の変化は、圧延荷重の予測に影響するので、バー温度は制御パラメータとして必要である。ホローブルーム温度は変形抵抗に直接影響するので、制御パラメータとして必要である。

次に各スタンドのロール溝底間隔、すなわち圧下位置 $S(i)$ は、予測圧延荷重 $\hat{P}(i)$ より (11), (12) 式で算出する。

$$S(i) = (D_B - \Delta G) + 2t_a(i) - \frac{\hat{P}(i) - P_0}{M} \quad (11)$$

$$t_a(i) = t_a(i-2) - \Delta t_a(i) \quad (12)$$

ここで

D_B : バー外径

ΔG : ゲージメータ方式による肉厚偏差

$\Delta t_a(i)$: i スタンド減肉量

P_0 : 零調時のプリロード荷重値

M : ミル定数

これで全スタンドのロール圧下位置が決まったので、次にロール回転数 $N(i)$ を決める。ロール回転数は、マスフロー一定則によりシェル断面積とロール中立点の関係から、スタンド間張力を最適値になるように決める。

また、本シェル断面形状制御では、ロール圧下位置が優先、ロール回転数が従であるという考えをとっている。

圧延されたシェルは、実測値としてシェル長さ l_s^* 、圧延荷重 $P(i)$ 、#4 および #7 スタンドバルジ幅値を持っている。圧延荷重より各スタンドの実績肉厚を、ゲージメータ方式で算出する。

$$t(i) = \frac{G(i) - D_B}{2} \quad (13)$$

ここで $G(i)$ は圧延中のロール溝底間隔であり、(14) 式で表現する。

$$G(i) = S(i) + \frac{P(i) - P_0}{M} \quad (14)$$

次に肉厚偏差 ΔG を計算する。この肉厚偏差は、肉厚仕上スタンである #5 および #6 スタンドの実績肉厚 $t(5)$ 、 $t(6)$ と実測シェル肉厚 t_s^* から (15) 式で算出する。

$$\Delta G = \Delta G^{i-1} + 2 \left(t_s^* - \bar{\sigma} \times \frac{t(5) + t(6)}{2} \right) \quad (15)$$

$\bar{\sigma}$: 管のサイズによる定数

ここで ΔG^{i-1} は、一循環前、すなわち同一バーで前回圧延した時の肉厚偏差である。実測シェル肉厚は、(16) 式で求める。

$$t_s^* = \frac{1}{2} \left(D_s^* - \sqrt{(D_s^*)^2 - \frac{4W_B^*}{\pi \rho_s l_s^*}} \right) \quad (16)$$

ρ_s : シェル比重

ここで実績シェル外径 D_s^* は、次のように定義する。シェルの外径形状は通常楕円形であるから、長辺はスタンドバルジ、短辺は $G(i)$ 、すなわち圧延中のロール溝底間隔とする。楕円の円周近似式よりシェル周長を求め、真円に換算した外径を求める。

[Shell: 180 ϕ $\times$ 9.0 t (mm)]
 [Tube: 140.4 ϕ $\times$ 9.24 t (mm)]

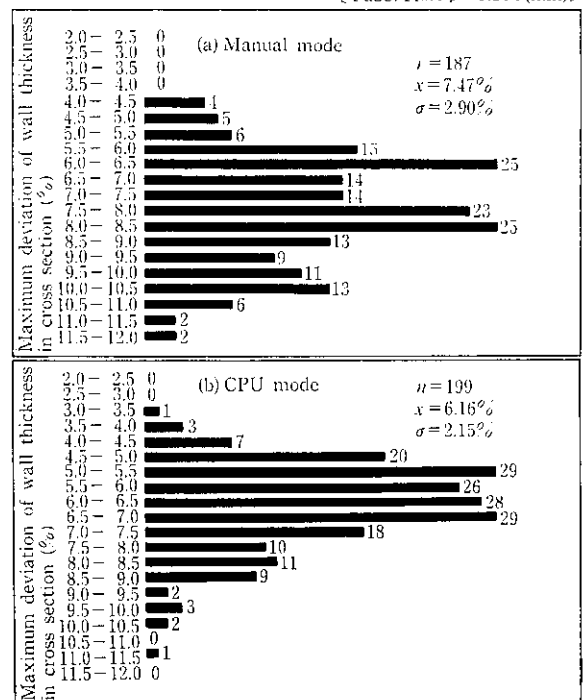


Fig. 13 Comparison of wall thickness deviation in cross section after stretch reducer between manual mode and CPU mode

次に、各スタンドに対して、次回圧下位置修正のための肉厚補正值 $t_c(i)$ を計算する。この肉厚補正值は、実績肉厚と肉厚偏差より (17) 式より求める^{8,9)}。

$$t_c(i) = t(i) + \frac{\Delta G}{2} \quad (17)$$

この肉厚補正值を用いて、(8) 式で次材の予測圧延荷重を推定し (11) 式でロール圧下位置を求める。(11) 式で求めたロール圧下位置とロールカリバよりバルジ幅を予測し、バルジ性の疵が発生しない範囲内に圧下位置があることを確認する¹⁰⁾。

以下この手順を繰返す。

以上がマンドレルミル断面形状制御モデルである。このモデルを用いて圧延した結果、Fig. 13 に断面偏肉率の改善例を、Fig. 14 に伸び長さ、すなわち平均肉厚の改善例を示す。断面偏肉率は約 1% の改善、平均肉厚のバラツキは標準偏差で 0.5% より 0.3% に改善された。さらに、バルジ性の疵発生は、皆無となった。

5.3 ストレッチレデューサ

ストレッチレデューサは外径を所定の寸法に仕上げる絞り圧延機である。このミルはマンドレルミルとは異なり、チューブの内面を圧延する工具はない。また、Fig. 4 に模式的に示すようにロール配置は 120° 方向の 3 ロールであるから圧下系も持っていない。Neumann-Hanke の理論¹¹⁾ によれば、カリバーロールで管外径を絞れば肉厚は厚くなり、また管は長手方向へ伸びる。そこで、肉厚を所定の厚さに仕上げるには管に張力を与えて肉厚を制御しなければならない。管に最適な張力をかける手段としてロール回転数を制御することが必要である¹²⁾。そこで、Fig. 15 に示す最適エロンゲーション制御モデルを開発した。以下このモデルの考え方を説明する。

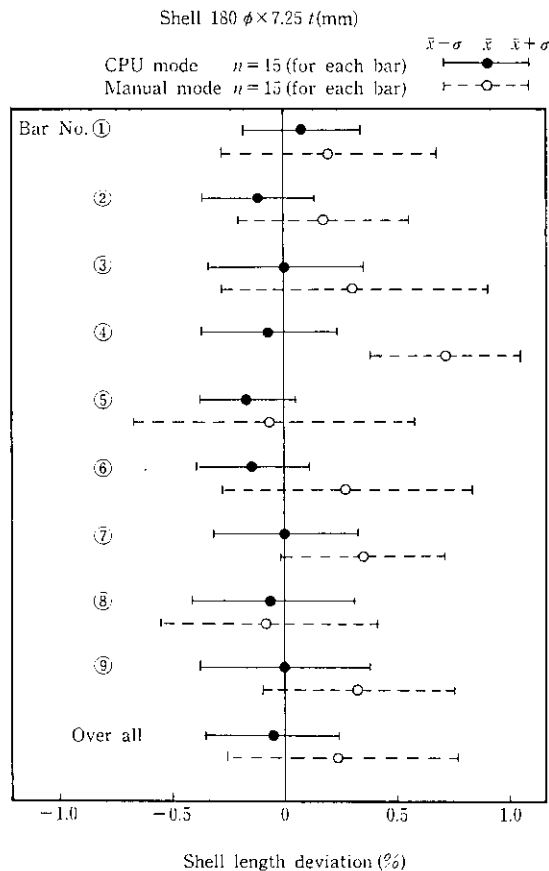


Fig. 14 Comparison of shell length deviation between manual mode and CPU mode

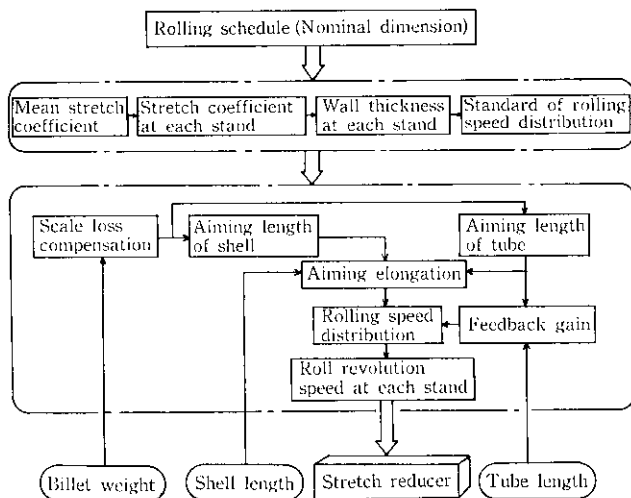


Fig. 15 Block diagram of tube length control

ストレッチレデューサは圧延する管の入側外径と仕上り外径は予めわかっているため、全体の外径絞り率に応じてカリバーロール配列は決まる。そこで前述の Neumann・Hanke の理論式である (18) 式により、平均ストレッチ係数を求める。

$$\frac{2Z(\lambda-1)+(1-2\lambda)}{\varphi_r} = \frac{Z(1-\lambda)+(1+\lambda)}{\varphi_l} = \frac{Z(1-\lambda)-(2-\lambda)}{\varphi_\theta} \quad (18)$$

ここで

Z : 平均ストレッチ係数 (管軸方向応力/変形抵抗)

λ : 肉厚/外径

φ_r : 管の半径方向対数歪

φ_l : 管の長手方向対数歪

φ_θ : 管の接線方向対数歪

平均ストレッチ係数を各スタンド間のストレッチ係数へ配分する。ストレッチ係数と各スタンドの入側および出側外径より、各スタンド出側の肉厚が計算できる。スタンドの入側および出側の外径および肉厚より、マスフロー一定則を適用してロールの周速を求め、ロール回転数を決める。

圧延スケジュールより、ストレッチレデューサでの基準エロンゲーションを (19) 式で求める。

$$E_0 = t_s(D_s - t_s)/l_T(D_T - l_T) \quad (19)$$

(20) 式より目標チューブ長さを計算し、圧延スケジュールで提示されているチューブ長さ l_T との比を求める。(21) 式より求めた目標シェル長さ l_{SA} と実測シェル長さ l_s^* との比を求める。

$$l_{TA} = \frac{W_B^*}{\pi \rho_T t_T (D_T - t_T)} \quad (20)$$

$$l_{SA} = \frac{W_B^*}{\pi \rho_s t_s (D_s - t_s)} \quad (21)$$

次にこれから圧延しようとするチューブのエロンゲーション E' を (22) 式で計算する。

$$E' = E_0 \left(\frac{l_{SA}}{l_s^*} \right) \left(\frac{l_{TA}}{l_T} \right) \quad (22)$$

エロンゲーションが変化した時のチューブ伸び率の関係に対しては、ストレッチ係数をパラメータとした (23) 式に示す回帰式モデルを作成した^{13,14)}。

$$\phi = uZ(E-1)^v \quad (23)$$

u, v : 回帰による係数

ストレッチレデューサのロール回転数は、基準スタンドに対し直線的に変更するのがもっとも簡単である。そこで、(24) 式よりロール回転数の修正量を計算する。

$$\frac{\Delta N(i)}{N(i)} = \frac{\phi(E') - \phi(E_0)}{\phi(E_0)} \times \frac{i}{24} \quad (24)$$

ここで

ΔN : ロール回転数修正量

N : 基準ロール回転数

圧延が終了すると実測チューブ長さ l_T^* が測定できるので、(23) 式を学習しさらに回帰式モデルの精度を向上させるよう配慮している。

この最適エロンゲーションモデルで圧延した場合とオペレータが手動で圧延した場合の、目標チューブ長さと実測チューブ長さのバラツキを、Fig. 16 に示す。開発したモデルを使用して圧延した方が、手動で圧延した時に較べて平均値、標準偏差とも大きく改善されていることがわかる。

6 適用の成果

以上のように、各ミルの制御モデルの内容について説明してきたが、これらのモデル開発は、センサ開発と平行して進められたものもあり、工程的にも困難を伴うものであった。

ミルの CPU モードの適用は、モデル開発完了と同期して進めら

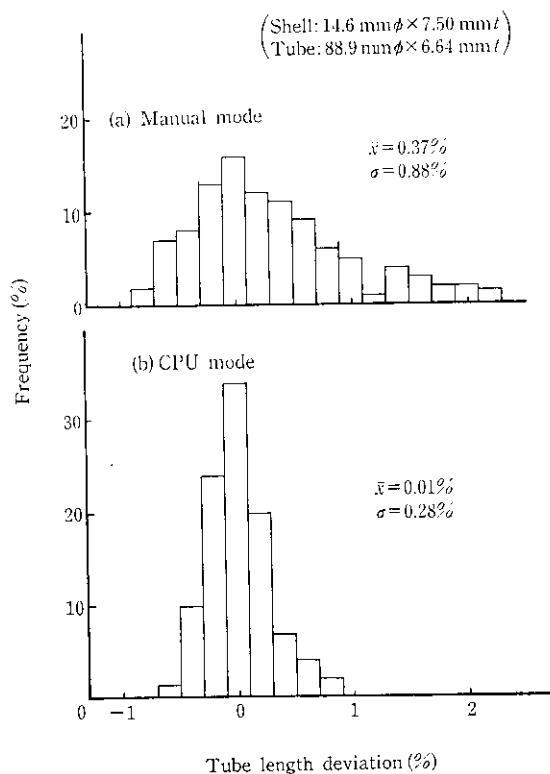


Fig. 16 Comparison of tube length deviation between manual mode and CPU mode

れ、下流のストレッチレデューサから順次工程化された。一例として、ストレッチレデューサの CPU モード適用率の推移を Fig. 17 に示す。現在、すべてのミルで、CPU モード運転が定着している。

これらの適用の部分的成果については、各ミルの制御モデルで述べたが、全体を通しての総合的成果としては、

- (1) ミルの制御モデルによる寸法精度向上の効果で、歩留り向上が 0.4% 向上した。また、パルジ性の疵が完全に 0 になった。
- (2) ミルプリセットの完全自動化と材料トラッキングシステムにより、生産性が約 10% 向上した。

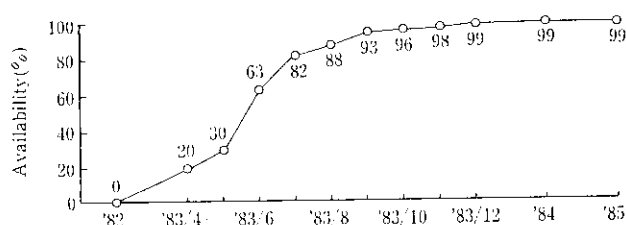


Fig. 17 Availability of CPU mode rolling for stretch reducer

(3) (2) の理由とオペレータ室の統合により、約 10% の省力が可能になった。

などがあげられる。さらに、基盤的成果として、制御システムの開発導入を契機とした操業の徹底した標準化があげられる。これにより、操業の質のレベルアップが容易になった。また、オンラインデータの自動収集および解析機能により、各種の開発および工場実験業務が迅速化されると共に、先に述べた材料トラッキングシステムとあわせて、品質保証体制の強化に大きく寄与している。

7 結 言

シームレス鋼管の品質向上、生産性向上などを目的として、小径シームレス圧延制御システムを開発し、1983 年より順次工程化してきている。これまで述べてきた制御システムの開発、オンラインゲージの開発や圧延モデルの開発などにより、歩留り向上 0.4%、生産性向上約 10%、省力約 10% などの成果をあげることができた。

しかし、シームレス鋼管をとりまく環境はさらに厳しくなっている。そういった状況に対処するために、圧延制御技術においてもより一層のレベルアップが必要と考えている。今後は、高応答の新センサーの開発、塑性加工理論、制御理論を活用した精密モデル、動的モデルなどの開発を行い、制御システムの高度化を行っていく予定である。

おわりに、本システムの開発に当り御協力いただいたメーカーの関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 川崎製鉄(株): 特開昭 57-115907
- 2) 佐山泰弘, 富樫房夫, 江島彬夫, 阿部英夫, 船生 豊, 桜田和之, 間口龍郎, 山口芳男: 川崎製鉄技報, **13** (1981) 1, 1-13
- 3) 川崎製鉄(株): 特開昭 60-137516
- 4) 岡本豊彦, 林 千博: 住友金属, **23** (1971) 4, 59-63
- 5) 鎌田正誠, 岡戸 克, 三原 豊, 藤田文夫, 平川智之, 沼野正隆: 日本鋼管技報, **101** (1984), 22-34
- 6) 林 千博, 山田建夫, 宇多小路 勝, 平尾文樹: 塑性と加工, **24** (1983) 273, 1078-1085
- 7) 紺屋施雄, 岡 弘, 奥村 精, 船生 豊: 「フルフロートマンドレルミルの肉厚制御方法」, 塑性加工春季講演会, **122**, (1985)
- 8) 川崎製鉄(株): 特開昭 60-240323
- 9) 川崎製鉄(株): 特開昭 60-64712
- 10) 川崎製鉄(株): 特開昭 59-78704
- 11) Neumann U. Hanke: *Stahl u. Eisen*, **75** (1955) 22, 1452
- 12) 山田建夫: 日本機械学会誌, **83** (1980) 740, 30-36
- 13) 川崎製鉄(株): 特開昭 58-128209
- 14) 川崎製鉄(株): 特開昭 60-21114