

ホットストリップミルの計算機制御システムと運転実績

Computer Control System of a Hot Strip Mill and Operation Results

黒 津 亮 二*

Ryoji Kurotsu

豊 坂 秀 夫**

Hideo Toyosaka

伊 藤 実***

Minoru Ito

片 岡 健 二****

Kenji Kataoka

峰 松 隆 嗣*****

Takashi Minematsu

御 厨 尚*****

Takashi Mikuriya

Synopsis :

The development of a computer control system of 80" hot strip mill at Chiba Works began in 1964, and successfully completed in March, 1970.

The function of this system covers slab tracking from the furnace delivery to the coilers, mill pacing, roughing and finishing mill set up, coiling temperature control, and data logging. Finishing mill set up is the most important one, and strenuous exertion has been made toward developing the method of predicting roll force. A method based on R.B.Sims' equation, which is simple and that with good accuracy, has been obtained. Standard deviation of roll force prediction is 5%. As for the gauge accuracy, 95% of the first bars of lots, which were rolled by computer set up, fell within $\pm 100 \mu$ of gauge deviation at the leading end of strip. Advantage of the computer control is reflected on 15 t/h productivity improvement, 0.1% rolling yield improvement, 0.15% inspection yield improvement, 12 men saving and more stable operations.

1. ま え が き

当社千葉製鉄所第2ホットストリップミルの建設に際し、計算機制御技術の開発の方針が決定された。これは東芝との共同研究という形をとり、昭和37年当所第1ホットストリップミルにおける予備実験を経て、同39年 TOSBAC-3300 計算機を第2ホットストリップミルに設置し、本格的に

着手した。当時国内では相次いでホットストリップミルの建設が行なわれたが、制御技術的には、ようやく AGC および APC が導入され実用化の段階に入ったところで、計算機制御については、内外ともに検討段階であった。一方制御用計算機についても実用機の試作段階であり、ゲルマニウム素子を用いたものが多く信頼性も十分ではなかった。このような困難な情勢にあったが、昭和41年11月仕上圧延機における計算機圧延に成功し、

* 千葉製鉄所熟間圧延部部長
*** 千葉製鉄所動力部計測課課長
***** 千葉製鉄所動力部計測課

** 千葉製鉄所熟間圧延部第2熟圧課
**** 千葉製鉄所動力部計測課係長
***** 千葉製鉄所動力部計測課

Table 1 Important date of development

1964,	July	Installation of TOSBAC-3300
1965,	February	Installation of F 6 stand
	September	Data logging, off-line data analysis
1966,	July	Start of on-line set-up calculation
	November	First set up experiments
	December	Installation of F 7 stand
		Decision made to install TOSBAC-7000
1967,	September	Second set up experiments
1968,	January	Removal of TOSBAC-3300
	April	Installation of TOSBAC-7000
	November	Third set up experiments
		4th set up experiments
1969,	March	Start of computer operation
1970,	March	Coiling temperature control experiments
	April	Start of 4 crew—3 shift system
		Increase of computer operation

43年4月実用機として TOSBAC-7000 を導入し、44年3月加熱炉出側からコイラーまでの圧延ラインの計算機制御を実用化した。本システムはすべて国産技術により開発したものである。

ホットストリップミルの計算機制御の対象¹⁾としては、板と板の時間間隔を最適に制御するミルペースング、粗圧延機のロール間隙などの自動設定、仕上圧延機のロール回転数や間隙の自動設定、仕上圧延機出側の板の温度制御、巻取温度制御および各種データロギングなどが挙げられる。このうち効果が比較的大きくまた操業上高度の技術とオペレータの熟練を要し自動化の要請の強い仕上圧延機の自動設定と仕上および巻取温度制御の技術が、最も重要な問題である。当所では仕上圧延機の制御技術の開発を主目的にして進めた。

開発経過の主要事項を Table 1 に示す。本報では、実用システムの概要と運転効果について報告する。

2. システムの概要

2-1 第2ホットストリップミルの概要

千葉製鉄所第2ホットストリップミルは、80"全連続式圧延機であり、加熱炉4基、粗圧延機4基、仕上圧延機7基、捲取機4基（うち1基は近接コイラー）から構成されている。生産能力は年産360万tであり、4直3交替で運転されている。製品は、普通鋼、硅素鋼、特殊鋼および縞板で、厚さ1.2mmから16mmまで幅550mmから1880mmまでのコイルである。コイルの平均ロットは約3本と小さく、頻繁にセット替が行なわれる。設備概要を Table 2 にまたレイアウトを含めてシステム構成の概要を Fig. 1 に示す。

2-2 電子計算機および周辺機器

電子計算機の仕様を Table 3 にまとめて示す。TOSBAC-7000 は、制御用として米国 GE 社で開

Table 2 Main specifications of mill

Reheating furnace	4 × 250 t/h	5-zone
Rougher	R 1	2-high, 2 × 1850 kW, DC drive reversing stand
	R 2	2-high, 6000 kW, AC drive
	R 3	4-high, 6000 kW, AC drive
	R 4	4-high, 6000 kW, AC drive
Finisher	Stand	7-stands
	Main motor	F-1 4500 kW
		F-2 through F-6 5250 kW
		F-7 4500 kW
	Roll speed	F-1 31~81 rpm
		F-2 52~127 rpm
		F-3 76~185 rpm
		F-4 110~275 rpm
		F-5 150~365 rpm
		F-6 175~430 rpm
		F-7 200~460 rpm
Coiler	Roll	698 ϕ × 1524 × 2032 mm
	Screw down motor	DC 75/150 HP × 2
		Ward Leonard Control
	Finishing Thickness	1.20~16.0 mm
	Finishing Width	610~1880 mm
		3 × 370 kW, 1 × 525 kW

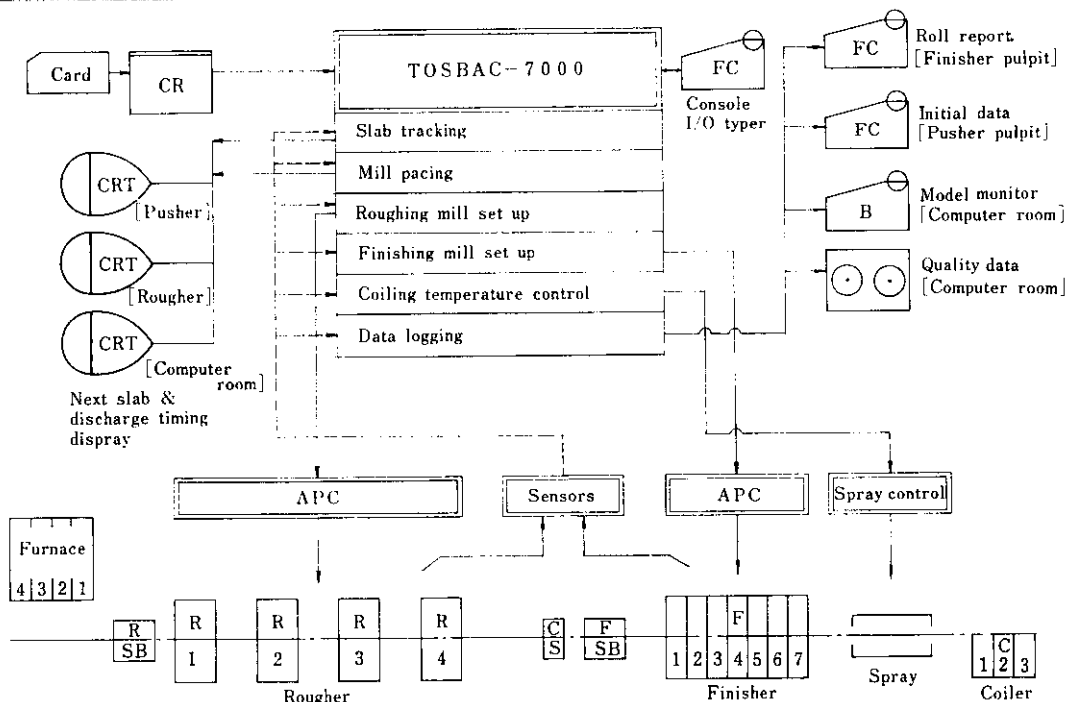


Fig. 1 Diagram of computer system and mill lay-out

Table 3 Computer specifications

Arithmetic unit	Circuit	Si solid state logic circuit
	Word	24 bits+1 bit parity
	Arithmetic operation	binary parallel fixed point, floating point with program
	Operation time	ADD 6.8 μ sec
		MUL 15.98~26.18 μ sec
		DVD 30.9 μ sec
	I/O Channel	6 channels
Core memory	Instruction	120, index and relative adress modification
	Index register	7-index using core memory
	Capacity	16,384 Words
	Cycle time	3.2 μ sec
	Multiplexer	4 channels
	Drum memory	Capacity
		131 kW
Automatic program interrupt	Access Time	average 10 msec
	Level	128, non-inhibitable 16 points, inhibitable 112 points
Analog input	128 points, ADC output 12 bits+1 bit sign+1 bit error, speed 50 points/sec	
Digital input	64 points, 20 bits/point	
Digital output	38 groups, 16 contacts/group	

発されたものを、東芝が国産化したものである。計算機本体は、筐体7面からなる。回路はシリコン半導体素子を用いたスタティック論理回路で、NAND回路が基本となっており、プリント基板に組込まれている。コアメモリ用回路にICを部分的に採用している。コアメモリは、容量16kWで、サイクルタイムは3.2 μ sである。4つのマルチプレクサー・チャンネルをもちこれを介して演算制御装置およびドラム・メモリが結合されている。したがって演算制御装置のレジスタを通過することなく、コアとドラム間のデータ転送を行なうことが可能（サイクル・スチール方式）である。

演算制御装置は、約120個の命令を備えている。可変長演算、ビット演算命令、I/O機器制御に用いるリスト命令、コアメモリの任意の番地をカウンタにする命令、同一命令の繰返し命令および

XEC命令など特色ある命令がある。浮動小数点演算は、専用のプログラム・パッケージへ回路的にジャンプさせて行なう方式をとっている。また入出力制御のためにI/Oチャンネルを6個備えている。

自動プログラム割込（API）は、プログラムによる禁止不能と可能なレベルがある。禁止不能なレベルは、パルスカウンタやI/O機器の準備完了信号に使われる。

アナログ入力用AD変換器は、逐次比較形で、出力は、14ビット（データ12ビット、符号1ビット、エラー1ビット）である。変換速度は、50点/secである。AD変換用直流増幅器は、プログラムにより6段階のゲインが選択可能である。ゼロ点ドリフトは一定時間間隔でプログラムで補正される。マルチプレクサは水銀リレーである。

デジタル出力は、水銀接点のラッチングリレー

ーが使用されている。38グループ（16ビット／グループ）が実装されており、このうちの数グループは、時分割で使用される共通のデータ出力と、出力点選択用にあってられる。これにより出力数を増やしている。

$\frac{1}{10}$ 機器は、2つの $\frac{1}{10}$ チャンネルに接続されたペリフェラル・バッファ・ユニットを介して制御される。データは専用の特殊な命令により演算レジスタを経由せずにコアメモリとバッファ間で転送され、機器の動作完了信号は割込で処理されるため $\frac{1}{10}$ 機器制御のために計算機が専用されることはない。

カードリーダーの検出部は、スターホイールにより接点を駆動する機械式の低速リーダーである。これは初期データカードの読取用に使用される。

CRT 表示装置は、制御装置、表示器およびキーボードからなる。回路はIC化されており、バッファメモリとして専用のコアメモリをもっている。表示器は13行32列で、英数字と特殊記号の表示ができる。また表示をブリンクさせることができる。

2.3 サブシステム機器

システムを構成する電子計算機以外の機器の概要を以下に述べる。

1) 検出器

スラブラッキング用の板検出器は、板の赤外線を検出する熱塊検出器（HMD）や圧延圧力により検出するロードリレーなどを使用している。

板の表面温度は、仕上出側までは、光電管高温計を、コイラー前は、熱電対式放射温度計を使用している。

粗圧延機および仕上圧延機の圧延圧力の測定には、プレスダクタを使用している。

仕上板厚は、F7 スタンド出側に設置されたRaymike-600 X線厚さ計により、また板幅は、赤外線幅計により測定される。

粗圧延機および仕上圧延機のロール間隙は、セルシンエンコーダ式の検出器を専用に設置し、使用している。これの構成概要を Fig. 2 に示す。

仕上圧延機のロール回転数は、電磁式パルス発信器からのパルスを一定時間カウントするデジタル回転計により測定し計算機に発信すると同時にオペレータにも表示している。また最終スタンドの回転数パルスは、板の長さ測定にも使用される。パルスはプリセットカウンタで計数され板の長さ1mごとに1パルス発生する。このパルスを計算機の割込入力に接続し計数し板の長さを測定する。またX線厚さ計の偏差信号を1mパルスにより長さで分類し、各偏差区分ごとの長さを、板

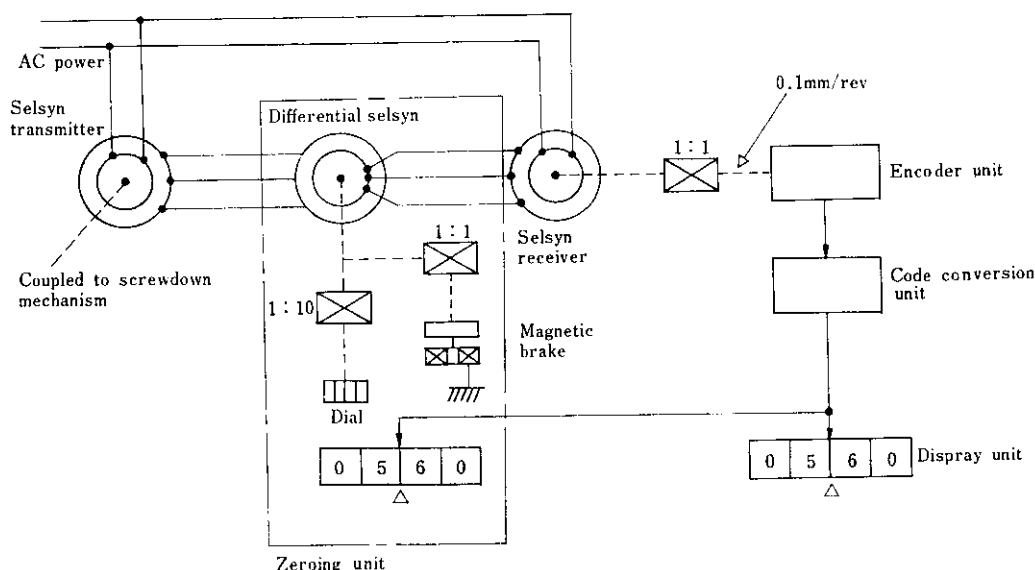
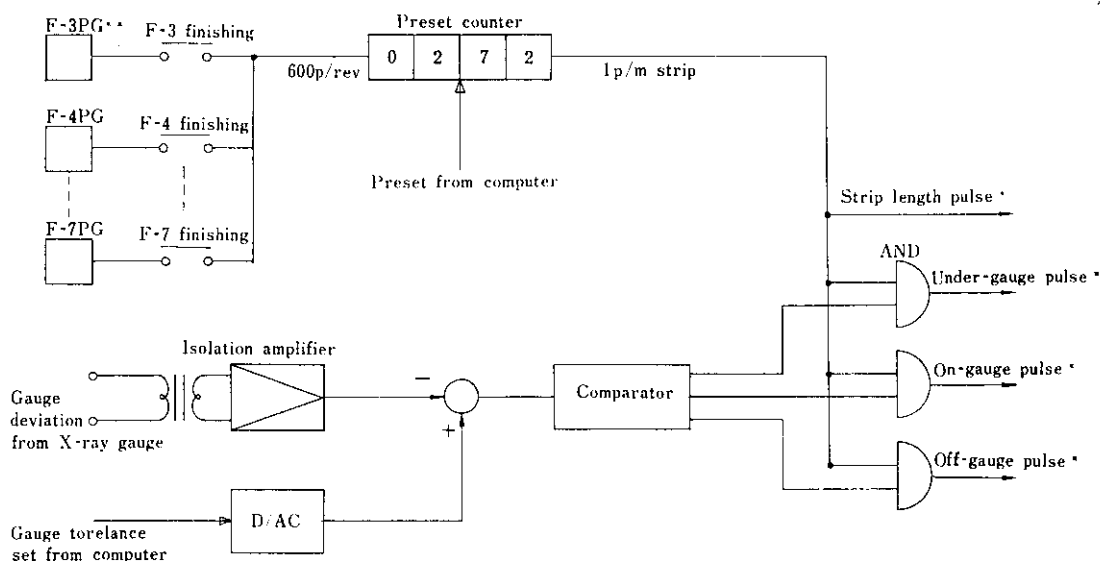


Fig. 2 Roll position sensor

Table 4 Typical sensors

Measured value	Location	Sensor specifications
Bar position	Rolling line	25—infra-red HMD load relays with load cells
Rolling force	$R_1 \sim R_4$, $F_1 \sim F_7$	Pressductor, 2×1800 t (each stand)
Bar temperature	R_4 delivery	Photo-electric pyrometer, $800 \sim 1400^\circ\text{C}$
	Finisher entry	Photo-electric pyrometer, $600 \sim 1200^\circ\text{C}$
	Finisher delivery	Photo-electric pyrometer, $600 \sim 1000^\circ\text{C}$
	Coiler entry	total radiation pyrometer, $400 \sim 800^\circ\text{C}$
Strip thickness	F-7 delivery	Raymike—600 X ray gauge, $0 \sim 16.00$ mm
Strip width	F-7 delivery	Infra-red width gauge, $600 \sim 2500$ mm
Roll gap	$R_1 \sim R_4$, $F_1 \sim F_7$	Shaft position encoder with selsyn drive, increment 0.01 mm
Roll speed	$F_1 \sim F_7$	Solid state digital counter with electro-magnetic pulse generator



*) These pulses are connected to API and counted with computer.

**) Pulse generators are coupled to main motor shaft.

Fig. 3 Diagram of gauge classifier

の全長で除して%単位で表現し、板厚の不良判定に利用している。これをゲージクラシファイヤーと呼び **Fig. 3** にその構成概要を示す。

検出器の仕様を **Table 4** に示す。

2) 位置制御装置 (APC)

位置制御装置は、計算機から設定指令値と起動信号を受けて、ロール間隙などの圧延機諸量を自動的に設定する装置である。設定値は10進デジタルの形で与えられる。これに応じて指令トランスのタップが選択され、設定値に比例した電圧が得られる。これと機器に接続されたセルシン固定子電圧が比較され、回転子巻線に現われる誤差電圧がゼロになる方向に機器を動かす。このように本質的にアナログ式の制御装置である。位置制御は、粗圧延機各スタンドのロール間隙、サイドガイド開度、エッジャー開度、エッジャーロール速度補償量に、また仕上圧延機では、ロール間隙、ロール回転数 (界磁調整器の位置)、サイドガイド開度および昇速量 (パイロット発電機発生電圧調整器の位置) などについて行なう。このうち

R2~R4ロール間隙、粗圧延機および仕上圧延機サイドガイドは、定電圧制御、R1 および仕上圧延機のロール間隙は、可変電圧制御による位置制御である。**Table 5** に APC の性能をまとめて示す。なおR1 は、スラブ厚さに応じて1パス、2パスまたは3パス可逆圧延を行なうので、各パスの設定値はあらかじめ与えておき、パス進めの信号により APC 装置の自動シーケンスが設定値を切換え次パスの設定を自動的行なうようになっている。また仕上関係の APC は、各スタンドの板抜信号により、そのスタンドの機器の APC のみを起動させる単スタンド起動方式をとっている。このため特に、回転数設定については、界磁調整器 (SSRH) と電圧設定器 (MRH) を同時に駆動して設定することができる。これにより設定替所要時間の短縮をはかっている。

2.4 ソフトウェア

1) オンライン・プログラム

オンライン・プログラムは、モニタ・プログラ

Table 5 Automatic position control (APC)

Equipment	Control	Detector	Range	Increment	Remarks
R ₁ screw down	2×37 kW WL	Selsyn	0~ 300 mm	1.0 mm	3 pass set
R ₂ screw down	2×37 kW CP	Selsyn	0~ 300 mm	1.0 mm	
R ₃₋₄ screw down	2×55 kW CP	Selsyn	0~ 200 mm	0.1 mm	
R ₁₋₄ side guide	5.5 kW CP	Selsyn	500~2,000 mm	10 mm	R 1 short stroke at 2nd pass
E ₁₋₄ edger	2×37 kW CP	Selsyn	600~2,000 mm	2 mm	E 1 1st and 3rd pass set 2nd pass short stroke
F ₁₋₇ side guide	5.5 kW CP	Selsyn	600~2,000 mm	2 mm	Short stroke
F ₁₋₇ screw down	2×55 kW WL	Selsyn	0~ 25 mm	0.01 mm	Back lash compensation
F ₁₋₇ speed (MRH)			60~100 %	5 %	To use in case of zooming
F ₁₋₇ speed (SSRH)		Tacho generator	F 1 19~ 82 rpm F 2 32~126 rpm F 3 50~185 rpm F 4 70~215 rpm F 5 90~365 rpm F 6 190~430 rpm F 7 190~460 rpm	1 rpm	MRH and SSRH are to be controlled simultaneously.

Table 6 Initial Data

Coil number	Card or manual set
Customer	Card
Strip specification	Card
Strip thickness	Card or manual set
Strip width	Card or manual set
Slab thickness	Card or manual set
Slab width	Card or manual set
Slab length	Card
Slab weight	Card or manual set
Gauge set	Card or manual set
Gauge tolerance	Card
C %	Card
Mn %	Card
Furnace number	Manual set
Steel grade	Manual set

グレードは、手動設定盤に設定して与えるようにしている。なおカードリーダー故障の場合は、制御に必要な最小限のデータは手動設定により与えることができる。受信データは、タイプアウトされ内容の確認に使われる。誤りがあれば再送により訂正することができる。初期データは、加熱炉ごとに、装入順に伝送し、計算機は、受信順に炉別に格納しておく。各炉60本分のデータを格納す

ることができる。抽出時に必要なデータは、スラブが装入順に抽出されるので、格納順に取り出せばよく、抽出ごとに、オペレータがコイル番号などのキーワードをインプットする必要はない。初期データ項目を Table 6 に示す。

3.2 スラブ・トラッキング

計算機のはたす機能は、圧延ライン上の各板の所在位置に対応づけられている。このため計算機は板の所在をつねに追跡し、的確に捉えておかねばならない。この追跡機能をスラブ・トラッキングという。本システムでは、加熱炉からコイラーまでの圧延ラインを11ゾーンに区分し、各ゾーンの入側に HMD, ロードリレーなどのスラブ位置検出器を置きスラブの進行を検出する。ゾーン区分を Fig. 5 に示す。

トラッキングの開始1本目の板は、プッシャー運転室よりコイル番号で炉別に計算機にインプットする。このうちのいずれかの板が最初に抽出された時点、同様にしてオペレータが計算機にインプットすることによりトラッキングが開始される。以後の抽出からは、装入順に抽出されるとして、自動的にトラッキングが行なわれる。圧延ライン上の各板からそれぞれの位置に応じたトラッキング信号が割込入力を通じて計算機に入ってくる。この信号の入り方は、ランダムのように見えるが、各板について見れば、順序正しく入ってくる。このトラッキング信号を各板に対応づけ、そのタイミング（ライン上の所在位置）での機能を

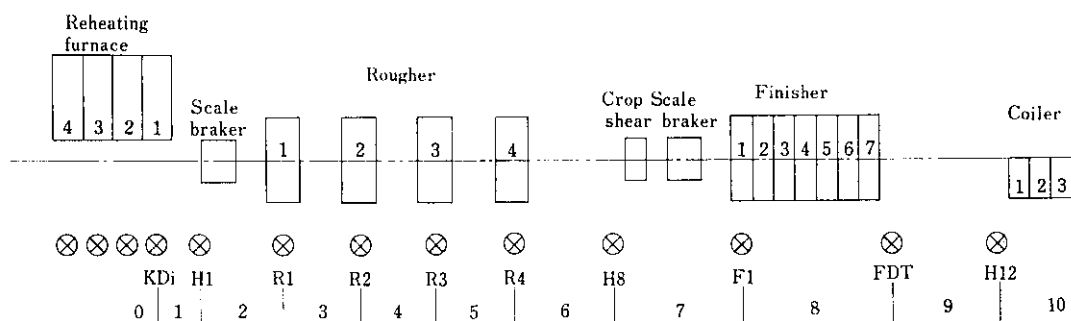


Fig. 5 Rolling line divided into 11 zones for slab tracking

スタートさせるソフトウェアをミル・トラッキング・プログラムと呼んでいる。

ライン上に配置された検出器からのトラッキング信号は十分信頼性のある信号でなければならない。このため検出器を2重に設置し、または万一検出されなかった場合でも信号が抜けないう補助検出器を設置し、さらに信号が入り過ぎないよう信号のホールド回路を設けるなどハードウェア上で対策を講じている。一方、ソフトウェアでも正しい信号のみ抽出するようにしている。万一トラッキングがずれた場合には、オペレータ・デスクで修正することができる。なおトラッキング信号としては、板の先端がゾーンに入ったときのオン信号が基本であるが、板の尾端がゾーンから出たときのオフ信号も圧延機の設定タイミングなどに使われるため、ミル・トラッキング・プログラムでチェックするようにしている。

計算機によるトラッキング状況をオペレータが確認する手段として、ブッシャーおよび粗圧延機運転室のCRT表示器に各炉のつぎに抽出されるスラブのコイル番号・規格・製品寸法を表示（在炉スラブ表示）している。また仕上圧延機運転室につぎの圧延コイル番号と製品寸法を電光表示盤に表示している。計算機室でもCRTおよび数字表示器により同様の確認が可能である。板が半成その他の理由で途中でラインからおろされる場合は、オペレータがリジェクト発信をして処理する。

3.3 抽出ピッチ制御

4基の加熱炉からスラブが抽出されるタイミングを適正に定めることは、生産能率向上の点から、圧延作業の安定化の点からもきわめて重要なことである。抽出のタイミングは、スラブの装入段取作業から、加熱炉、粗圧延機および仕上圧延機、コイラー、ダウンエンダーおよびコイルカーなどライン上のすべての作業および設備の処理能力から決まるものである。本システムでは、入口および出口設備の処理能力は十分あるとして、加熱炉および仕上圧延機の処理能力のみを考え、それぞれの能力から決まる抽出間隔のうち大きい方を採用している。抽出間隔はスラブ寸法と製品寸

法により標準値をテーブル化して与えている。

計算機は、RSBを通過する板の時間間隔が上述の方法で定められた基準値になるように粗圧延機オペレータに、CRT表示器およびブザーを用いて抽出を指令する。オペレータはこの指令にしたがってブッシャー・オペレータに抽出を指令する。CRT表示器には抽出間隔（ピッチ、先行板H1オンから後続板H1オンまでの時間）および現在時刻から抽出までの時間をH1オンのタイミングで表示する。現在時刻から抽出までの時間は10sec間隔で減数表示し、残りの10secのとき抽出炉のコイル番号（在炉スラブ表示）をブリンクさせ0secのとき抽出指令ブザーを鳴らす。また仕上圧延機の圧延時間間隔を実測し、同じCRTに表示し参考としている。この制御を行なうことにより、圧延ピッチのバラツキが小さくなり、1本につき少なくとも2sec以上のピッチ短縮が行なわれている。

3.4 粗圧延機自動設定

設定モードが「自動」のとき計算機は、各スタンドのロール間隙、エッジャー・ロール開度、サイドガイド開度の自動設定を行なう。エッジャー・ロール回転数のドラフト補償は、圧下量が小さく、ほとんど行なう必要がないので、現状では実施していない（設備上は可能）。R1が3パス圧延の時は、ロール間隙は3パス分設定する。

各設定値は、数式モデルによる計算は行なわず、オペレータの経験にもとずく標準作業をテーブル化して記憶しておき、スラブ寸法・製品寸法およびスチール・グレードから該当する設定値を索引している。

粗圧延機の設定替は、主にロットの変わり目（スラブ寸法または製品寸法の変わり目）で行なわれる。この場合、板が加熱炉から抽出されたとき各設定値の索引が行なわれ、先行板がすでに通過した圧延機のAPCにのみ設定出力を出し、かつ起動信号を出して自動設定を行なう。先行板が通過中または未通過のスタンドは、その板がそのスタンドを抜けるごとに、後続板に対する設定出力および起動出力を与えるようにしている。自動起動を行なった場合は設定完了信号を受けて設定精度

をチェックし、また該当板が噛込む前に設定完了か否かをチェックし異常な場合は、警報を発信する。

3.5 仕上圧延機の自動設定

1) 概 要

設定モードが「自動」のとき、計算機は、クロップシャーおよびF1～F7スタンドのサイドガイド開度、各スタンドロール間隙と回転数、昇速量およびスタンド間スプレー・パターンの自動設定を行なう。この他に上記モードに関係なくX線厚さ計および赤外線幅計の自動設定、AGCの自動ロックオンおよびゲージクラシファイヤーの制御などを行なうようにしている。

計算機による仕上圧延機の設定替は、おもにロットのvariety目で行なわれる。またロットの2本目以後のコイルに対しては、設定計算は行なわれるが、設定変更は、必要な場合のみ行なわれる。ロットのvariety目の1本目の板がR4に噛込むと、計算機は、板の先端部分の圧延圧力とロール間隙を測定し、R4出側板厚を計算する。またエッジャー・ロール開度を測定して板幅を決める。さらにR4出側の板の温度も測定する。これより板の先端部分で所定の製品板厚および仕上り温度が得られるように、仕上各スタンドのロール間隙およびロール回転数を数式モデルを用いて計算する。これらの設定値およびサイドガイド設定値は、仕上スタンドAPCに出力され、先行板のすでに通過したスタンドに対しては、起動がかけられる。先行板を圧延中のスタンドは、その板がそのスタンドを抜けるごとに、順次起動がかけられる。設定が完了すると設定値のチェックを行なう。

2) 設定計算の概要

設定計算の流れを Fig. 6 に示す。おもな項目について以下に説明する。

(a) 仕上入側温度の予測

R4出側の板の温度(R4DT)から仕上圧延機入側の板の温度(FET)を予測し、圧延圧力およ

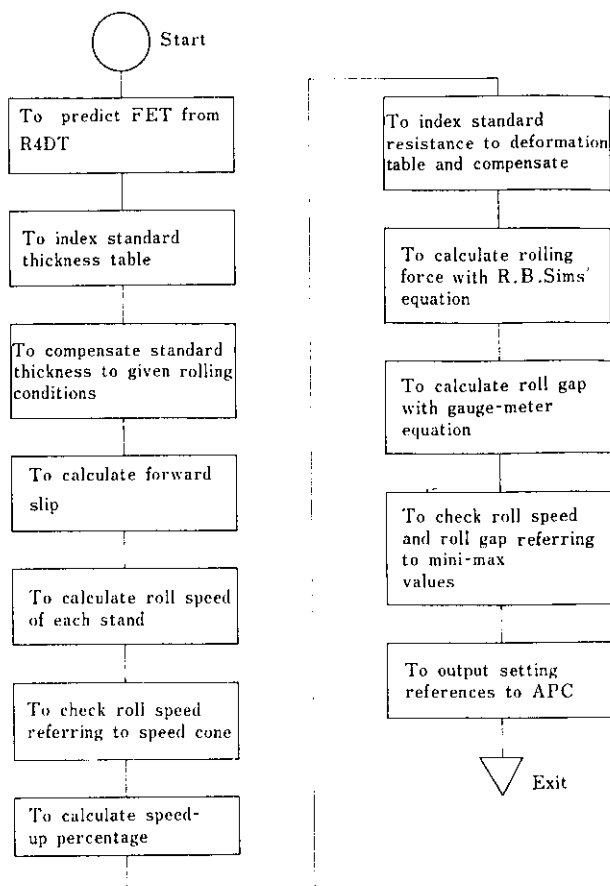


Fig. 6 Flow chart of set-up calculation

び回転数の計算に使用する。板の先端部分がR4から仕上圧延機入側まで進行する間に、熱放射のみによって温度が低下すると仮定すると次式²⁾が成立する。

$$\rho CH_R A dT = -2\epsilon\sigma A \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \cdot dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- ρ : 板の密度 (7850 kg/m³)
- C : 板の比熱 (0.194 kcal/kg°C)
- H_R : R4出側板厚 (m)
- A : 板の表面積 (m²)
- ϵ : 板の熱放射率 ($\epsilon \approx 0.5$)

σ : ステファン・ボルツマン定数
(4.88 kcal/m²h°K⁴)

T : 板の温度 (°K)

T_a : 周囲温度 (°K)

である。(1) 式を板が R4 出側温度計から仕上圧延機入側温度計まで移動するに要する時間 t まで積分すると

$$\hat{T}_E = 100 \cdot \left[\frac{3\sigma}{50\rho C} \cdot \frac{\varepsilon t}{H_R} + \left(\frac{T_R}{100} \right)^{-3} \right]^{-\frac{1}{3}} \quad \cdots (2)$$

を得る。なお $T_a/T = 0$ とした。ここに T_R , $\hat{T}_E$ はそれぞれ R4 RT と FET の温度 (°K) である。(2) 式を使用する場合 t は、板の長さ、R4 ロール速度およびテーブル速度から計算される。また ε は、 T_R , T_E , t を実測して (2) 式から逆算した値を使用する。

(b) 各スタンド出側板厚の決定

各スタンドの板厚は、通常パワー・カーブと負荷配分率を用いて決定される。すなわち各スタンド出側板厚に対して、シートバーをその板厚までに圧延するのに必要な単位重量当たりの変形エネルギーを実測データから求めておく。これをパワー・カーブと呼ぶ。設定計算のさいは、各スタンドに割当てる圧延負荷の比 (負荷配分率) を与えて、パワー・カーブからそれに相当する仕事量と板厚を決める。この方法は、パワー・カーブの測定精度がかならずしも十分でなく、また負荷配分率を与える仕方は、オペレータの作業と直接つながらないため、本システムでは、直接各スタンドの板厚を与えるようにしている。すなわち製品寸法の適当な区分ごとに、標準板厚をテーブル化しておく。このテーブルの値を、仕上板厚とシートバー厚さにより補正して各スタンド板厚とする。すなわち

$$h_i = a_i \cdot (h_7 - h_{70}) + b_i \cdot (H_R - H_{R0}) + h_{i0} \quad \cdots (3)$$

ここに

h_i : 各スタンド出側板厚

h_{i0} : 各スタンド出側板厚のテーブル値

H_R : シートバー厚さ

H_{R0} : シートバー厚さのテーブル値

a_i, b_i : 補正係数

である。 a_i, b_i の値は、実際の圧延データから求める。

なお形状調整のために、オペレータが F5~F7 板厚を修正できる機能を備えている。

(c) 各スタンド回転数の決定

まず最終スタンド回転数を決める。これは、製品寸法および仕上圧延機出側温度 (FDT) の目標値によってテーブル化されている。テーブルの値は、その区分内で許される最大値であり、FDT が目標範囲におさまリ、モータも許容負荷以下で、コイラー巻きつき状態も良好で、巻取温度も制御可能な範囲にあるように、オペレータの作業にもとづいて選ばれた値である。この最終スタンド回転数を用いて、各スタンド回転数は、つぎのマスフロー一定の関係式より計算される。すなわち

$$N_i = N_7 \cdot \frac{D_7 h_7 (1 + f_7)}{D_i h_i (1 + f_i)} \quad \cdots (4)$$

ここに

N_i : 各スタンドのロール回転数

D_i : 各スタンドのロール直径

f_i : 各スタンド先進率

である。なお板の先進率 f_i は、実測して求めた値である。このようにして定められた板厚と回転数について、FDT を予測して目標値とのずれをチェックし、また各スタンド許容負荷およびスピード・ユーンのチェックを行なう。テーブルの値がすべて実際の圧延作業結果にもとづいて選定されているため、大きな条件変化がない限りチェックにかかることはない。

(d) 圧延荷重の予測

圧延荷重の計算式は、R. B. Sims の式³⁾を使用する。すなわち

$$F_i = BK_i Q_i \sqrt{R'_i (\bar{h}_{i-1} - \bar{h}_i)} \quad \cdots (5)$$

$$Q_i = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{r_i}{1-r_i}} - \pi - \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \cdot \sqrt{\frac{R'_i}{h_i}} \cdot \left[\log_e \frac{h_{ni}}{h_i} + \frac{1}{2} \log_e (1-r_i) \right] \quad \cdots (6)$$

$$\frac{h_{ni}}{h_i} = 1 + \tan^2 \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r_i}{1-r_i}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h_i}{R'_i}} \log_e (1-r_i) \right\} \quad (7)$$

である。また、偏平変形したロールの半径は、Hitchcock の式⁴⁾ を用いて計算する。すなわち

$$\frac{R'_i}{R_i} = 1 + \frac{2C_i F_i}{B(h_{i-1} - h_i)} \quad (8)$$

$$C_i = \frac{8(1-\nu_i^2)}{\pi E_i} \quad (9)$$

以上の式で

F_i : 圧延荷重 (t)

B : 板幅 (mm)

K_i : 平均変形抵抗 (t/mm²)

R'_i : 偏平変形したロールの半径 (mm)

r_i : 圧下率

h_{ni} : 中立点の板厚 (mm)

R_i : ロールの原半径 (mm)

E_i : ロールのヤング率 (t/mm²)

ν_i : ロールのポアソン比

である。

上式により圧延荷重を計算する場合、(5)、(8) 式を F_i と R'_i の連立方程式として解かねばならない。しかしながら、(6)、(7) 式に見られるように、 R'_i の入り方が複雑なため、解析的には解は書き下せない。そこで逐次繰返しによる数値計算を行なう方法と、通常の圧延条件の範囲で、(6)、(7) 式をより簡単な式で近似し、解析的に解ける形にする方法⁵⁾ の2つが考えられる。前者によれば、7 スタンドの計算に長時間かかるのでオンライン計算では不適当である。そこで後者の近似式を用いる方法を検討し、以下のように決めた。すなわち(7)式中で中立点の板厚は、 R'_i にほとんど関係ないとし、(10) 式

$$x_i \equiv \frac{1}{2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r_i}{1-r_i}} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h_i}{R_i}} \cdot \log_e (1-r_i) \quad (10)$$

の x_i を用いて

$$\frac{h_{ni}}{h_i} \approx 1 + \tan^2 x_i \approx 1 + x_i^2 \quad (x_i \ll 1) \quad (11)$$

と近似する。このとき (6) 式は、

$$Q_i = f_1(r_i) - f_2(r_i) \sqrt{\frac{R'_i}{h_i}} \quad (12)$$

ただし

$$f_1(r_i) \equiv \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{r_i}{1-r_i}} - \frac{\pi}{4} \quad (13)$$

$$f_2(r_i) \equiv \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \cdot \log_e (1+x_i^2) \cdot (1-r_i)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

となる。この結果 (5)、(8) 式は、 F_i 、 R'_i の連立2次方程式に帰着され、簡単に解が求められる。この方法によれば、近似精度は5%以内であり、計算時間は繰返し法に比して約1/5に短縮される。

次に (5) 式を使う場合に、平均変形抵抗 K_i の値が必要である。このためには、試片を試験機で引張、または圧縮試験を行ない変形抵抗を測定し、加工条件との間の関係式⁶⁾ を求めるか、圧延データを大量に採取して変形抵抗と圧延条件を表わす要因との間の関係式を回帰分析により求めるなどの方法⁷⁾ が用いられる。当初回帰分析による方法について検討したが、回帰係数の物理的意味づけができず、本システムでは採用しなかった。けっきょく変形抵抗は実測圧延データを次式に用いて計算し、製品寸法およびスチール・グレードの適当な区分ごとに標準値を選定し、テーブル化している。

$$K_i = \frac{F_i}{B Q_i \sqrt{R'_i (h_{i-1} - h_i)}} \quad (15)$$

これを設定計算で使用する場合は、標準条件からのずれを簡単な補正式で補正して使用する。この方法によるロット1本目の圧延荷重の予測精度は、Fig. 7 に示すとおりであり、誤差の標準偏差は約5%である。

なお同じ仕様のコイルを続けて圧延する場合は、2本目以後は、前の板の実測圧延データから予測モデルの誤差を修正することができるため、予測精度は向上する。しかしロット1本目の予測精度の向上には、ほとんど役立たない。ロット1本目の予測精度が計算機制御の効果を左右するの

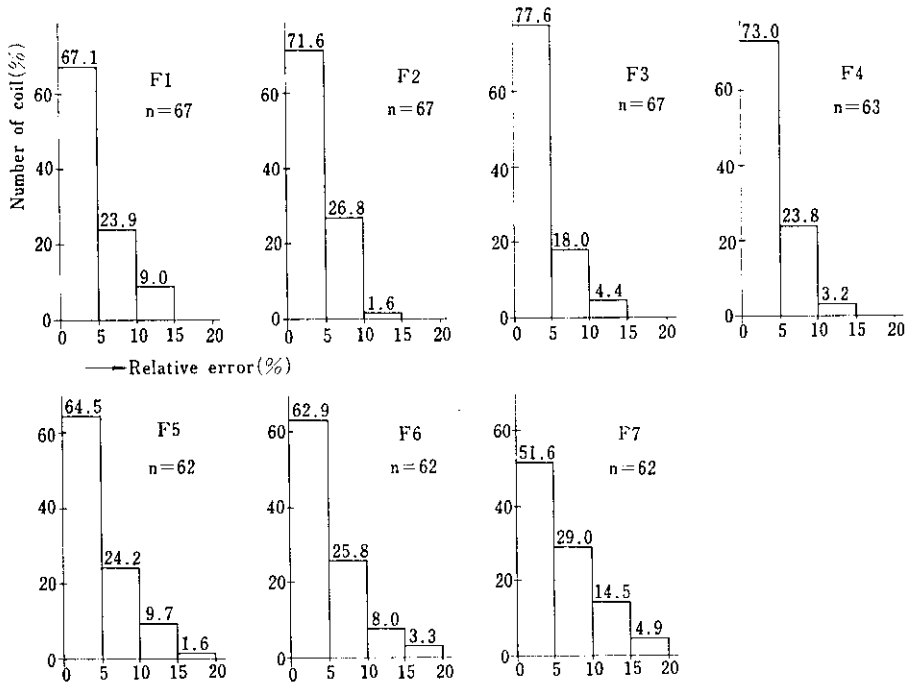


Fig. 7 Accuracy of predicting roll force. Data were taken when strips were rolled by computer set-up

(Thickness 1.18~12.26 mm
Width 756~1877 mm
Low carbon steel)

でその精度向上が最も重要な課題である。

(e) ロール間隙の計算

ロール間隙の計算には、ゲージメータの式⁸⁾を用いる。すなわち

$$S_i = h_i - \left(\frac{F_i}{M_i} + S_{0i} - \Delta S_i + k_i \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに

- S_i : ロール位置計設定値 (mm)
- M_i : 圧延機の弾性係数 (t/mm)
- ΔS_i : バックアップロール・ベアリングの油膜厚 (mm)
- S_{0i} : ロール位置計のゼロ点の初期値 (mm)

k_i : ゲージメータ定数 (mm)

である。 M_i , S_{0i} , ΔS_i の値は、板なしの状態でロールを接触させ、さらに荷重をかけて、いろいろな条件の下であらかじめ測定しておく。 F_i の小さい範囲では、 F_i と S_i の関係は、非線形のため、この部分は折線近似で使用する。

一方ゲージメータ定数 k_i は、ロール替後、板の圧延を繰返すことにより、ロールが加熱冷却されて膨張、収縮および摩耗する結果として、ロール間隙が変化するので、これを補正する量である。これは、圧延データから各板ごとに計算し、つぎの板の設定計算に使用する。

3.6 巻取温度制御

板の先端が最終スタンドを出てから、一定長さごとに板厚、回転数および板の温度(FDT)を測定し、モデルにより目標温度に冷却するためのスプレー・バンク冷却水のオン・オフ・パターンを予測計算する。板が巻取温度計に達すると同じ長さごとに実測し、予測誤差を求め、誤差を修正するようにバーニヤ・バンクのフィードバック制御を行なう。なお予測モデルはその板の実測値により数回の修正が行なわれる。巻取温度制御については別の機会に詳細を報告する。

3.7 データロギング

1) 圧延日報

各班ごとに、圧延した板のロットごとの仕様と本数および重量を集計し、圧延能率を計算し、タイプライタでプリントアウトする。また半成品についても同様の記録を行なう。

2) 品質記録

各コイルごとに、仕様、板厚および板幅の平均・最大・最小値、仕上および巻取温度の最大・最小値、板厚の社内公差 $\pm 30\mu$ ・ $\pm 50\mu$ による分類、AGCおよび計算機の使用モードなど品質管理に必要なすべてのデータを紙テープにパンチアウトしている。これらのデータは、UNIVAC-494で圧延実績として編集され、品質の定常的管理に活用されている。

3) モデル監視記録

仕上設定計算用と巻取温度制御用の2つがある。いずれも予測計算結果と実測結果を、必要な変数ごとに対比してタイプライタにプリントアウトしている。これにより予測計算の精度チェックと精度向上のための検討を行ない、また圧延作業の解析などにも利用している。これらのデータは必要に応じて紙テープにパンチアウトすることができ、オフライン解析に用いる。

4. 運転実績と効果

4.1 計算機の稼働率

計算機システムの稼働率は99%以上を維持している。システムの保全作業は中央演算処理部以外には特殊な端末機をのぞいて、すべて自社で行なっている。

4.2 各機能の実用状況

1) 抽出ピッチ制御

抽出ピッチ制御を行なうことにより、抽出ピッチが以前より平均2sec短縮されていることが実測されている。

2) 粗圧延機の自動設定

計算機による粗圧延機の自動設定は、ほぼ100%使用され、作業の安定化、ミスロールの減少をもたらしている。またオペレータを1×4名省力化した。

3) 仕上圧延機の自動設定

普通鋼から特殊鋼まで、全製品(厚み1.1~16mm, 幅700~1880mm)の90%以上が計算機の自動設定により圧延されている。本システムの設定計算方式はオペレータの作業経験にもとづいているため、異和感がなく、精度も経験豊かなオペレータの手動設定に比してすぐれているため、積

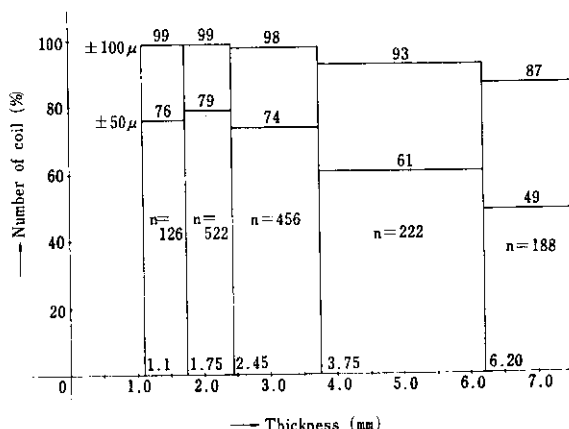


Fig. 8 Thickness accuracy of the first bar of lots rolled by computer set-up.

極的に使用されている。とくに45年4月より4直3交替制が実施され、各班の平均経験年数が低下した結果、計算機の設定を使用しなければ能率が著しく低下する結果となっている。これは1ロットの平均本数が約3本であり、セット替が多く、かつ短時間で行なう必要があるためと考えられる。

計算機の自動設定により圧延された板の先端部分の板厚精度をロット1本目に限って調査してみると Fig. 8 のごとくで、 $\pm 100 \mu$ 以内に平均 95% がおさまっている。

4) 巻取温度制御

近接コイルの設置で、スプレー・バンクの配列が不規則となり、自動制御に不適となったため、現在、改造を計画中で、実験的に使用されている状態である。改造を待って本格的に実用化する予定である。

5) データロギング

圧延日報は常用されている。品質記録データはコイル1本ごとに自動的に各種のデータが採取され、加工されるため、従来、記録員が記録計から抜き取りで採取していたのに比して、価値の高いデータが集められる。この結果、新しい観点からの品質管理が可能となり、製造現場に対して迅速な処置がとれるようになった。

4.3 効果

計算機システムの運転効果としては、以下のようない点があげられる。

1) 省力化

圧延ラインは計算機導入以前に、可能な自動化が高度に行なわれている。そのため計算機導入による省力化の効果は、比較的小さい。本システムでは記録員、粗圧延機オペレータなど12人が省力化された。

2) 生産能率の向上

これには2つの要素がある。第1は、粗・仕上圧延機の自動設定を行なうことにより、ミスロールの本数が減り、ダウンタイムが減少する結果、生産量が増える。第2は、仕上圧延機の自動設定により、手動設定に比して、設定替時間が短縮される(平均約 5 sec) 結果、抽出ピッチが短縮さ

れ、生産量が増大する。本システムでは、以上を総合して、生産能率 15 t/h の向上がみられる。

3) 歩止りの向上

ミスロール本数の減少による圧延歩止りの向上は 0.1%，板厚・板幅および温度不良コイルの減少による検査歩止りの向上は 0.15% である。

Table 7 Advantages of Computer Control

Productivity increase	15 t/h due to shortening of set up time and reducing cobbles
Rolling yield improvement	0.1 % due to reducing cobbles
Inspection yield improvement	0.15 % due to improvement of gauge and temperature accuracy
Man power saving	12 men
Additional advantage	More stable operation, lower experience of operators

上述の効果をまとめて Table 7 に示す。生産量が多いため利益は大きい。

以上は定量的に評価可能な部分であり、この他に、作業の標準化による操業の安定化の効果が大きい。操業が安定すると変動要因が少なくなり、計算機制御自体がますます安定化し、効果がることになる。またオペレータに要求される熟練度も低減する。

5. まとめ

以上、千葉製鉄所第2ホットストリップミル計算機制御システムの内容と運転実績について説明した。

このシステムは、昭和39年に開発に着手し、44年3月完成した。本システムはTOSBAC-7000を中心として構成され、加熱炉出側からコイラーまでの圧延ラインの自動運転を行なっている。

開発の主目標は仕上圧延機の制御方法であり、数式モデルを基礎にし、作業経験を活かした比較的簡単で精度の良い方法を開発し、実用化した。圧延圧力の予測誤差は標準偏差で5%以内である。

粗圧延機および仕上圧延機の自動設定使用率はそれぞれ、ほぼ100%、90%以上であり、自動設定を使用する作業が通常となっている。

仕上圧延機の自動設定を使用した場合のロット1本目の厚み精度は、板厚によって異なるが、 $\pm 100\mu$ 以内に平均95%がおさまる。

本システムによる効果は、生産能率向上15 t/h 圧延歩止り向上0.1%、検査歩止り向上0.15%、および省力化12名である。その他、作業の安定化ならびにオペレータに要求される熟練度の低減などの効果がみられる。

おわりに、本システムの開発にご協力された東京芝浦電気株式会社各位に深く感謝するとともに、開発開始以来、千葉製鉄所の関係各課の多数の方々のご協力のもとに本システムが完成したことを改めて付記する。

参 考 文 献

- 1) R. G. Beadle: Iron & Steel Eng., (1964) 7, 71
- 2) R. W. Lee, R. B. Sims: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), (1963) 3, 270
- 3) R. B. Sims: Proc. Inst. Mech. Eng., 168 (1954), 191
- 4) A. Troost, et al: Stahl u. Eisen, 82 (1962) 14, 957
- 5) 志田: 日立評論, 47 (1965) 9, 57
- 6) 日本鉄鋼協会: 圧延理論とその応用, (1970), 156
- 7) J. S. Ride: Iron & Steel Eng., (1960) 11, 77
- 8) P. Cosse, M. Economopoulos: C. N. R. M., 21 (1969) 12, 41