

# ホット ストリップ粗圧延機の無張力制御システム

## Tension-Free Control System Applied to Hot Strip Roughing Mill

2台以上の圧延機にまたがって行なわれる圧延、すなわちタンデム圧延では経済性及び圧延技術上の要求から、当然のこととはいえ圧延機間に発生する張力をどう処理するかが大きな問題である。これについては、従来から各種の方式が考案され、実用に供されている。本稿は、圧延材の温度変化によって発生する張力までも除去できる制御原理式を導き、これを制御用電子計算機HIDIC 150で構成される直接計算制御(DDC)システムにより制御システムを構成し、住友金属工業株式会社鹿島製鉄所ホット ストリップ粗圧延機で実験のうえ確認した。また、制御原理式の妥当性、温度変化に対する制御効果についても確認された。総合制御性能は張力制御精度 $\pm 0.1\text{kg/mm}^2$ 以下である。

山下了也\* Akiya Yamashita  
 福本健三\*\* Kenzō Fukumoto  
 菱屋久保\*\*\* Hisayasu Hishiya  
 諸岡泰男\*\*\*\* Yasuo Moro'oka  
 谷藤真也\*\*\*\* Shinya Tanifuji  
 斉藤奎二\*\*\*\*\* Keiji Saitō  
 桜井孝員\*\*\*\*\* Takakazu Sakurai  
 上金良博\*\*\*\*\* Yoshihiro Kamigane

### 1 緒 言

従来、シングル圧延が行なわれていたホット ストリップミル粗圧延機、形鋼圧延機、棒鋼圧延機などの熱間圧延機では、生産性の向上、設備面積の削減、品質の向上、歩どまりの向上などを目的として2台以上の圧延機にまたがって逐次圧延する、いわゆる連続タンデム圧延化が行なわれるようになった。最近、この連続タンデム圧延の制御で特に注目される技術の一つが無張力制御技術である。

一般に連続タンデム圧延を行なうと、各圧延スタンドの圧下設定、速度設定の不適切や圧延材の長手方向温度変化などにより、スタンド間の圧延材に張力、あるいは圧縮力が発生する。冷間圧延機では張力を積極的に利用して圧延を行なうが、熱間圧延では圧延材の弾性範囲が狭く、張力、圧縮力は圧延材の寸法、形状を変動させ、また、圧縮力は圧延材を蛇行させたり、異常ループ、座屈の発生を招いて圧延失敗(ミスロール)の原因となる。そのため、熱間圧延ではゼロあるいはわずかの張力で圧延する技術、無張力制御技術が要請されてきた。線材においては、圧延材にたるみを作って圧延するフリー ループ制御を、またホット ストリップ 仕上圧延や一部の形鋼圧延ではスタンド間に機械的ループを設置し、ループ制御する方式を採用して張力一定圧延を実現している。しかし、ホット ストリップ 粗圧延、形鋼圧延及び棒鋼圧延では、圧延材寸法が大きいためループ形成が困難であり、またループは圧延材に傷を付けたり、通板時の制御が困難であるなどの問題があるため、新しい原理に基づく無張力制御方式が開発されるに至った。

### 2 無張力制御の概要

無張力制御の本来の目的は、圧延中の種々の外乱に対して圧延材の先端から尾端まで張力を一定に制御することにより圧延材寸法の変動を最小にすることにある。この目的を達成するために、張力検出方式に応じて種々の制御方式(特公昭48-37903, 同48-37909, 西ドイツ特許1279589)が提案されている。圧延中、張力変化を与える外乱として次の項目が考えられる。

- (1) 各圧延スタンドの圧下設定、速度設定の不適切
- (2) 圧延中の圧延材長手方向の温度変化

- (3) 圧延材寸法、組成の長手方向変化
- (4) 圧延材かみ込時の電動機速度のインパクト降下
- (5) 加減速時の電動機の揃速誤差
- (6) ロールの熱膨張、摩耗
- (7) 圧延材先・後端部の過冷
- (8) 電動機の垂下特性の相違

このような外乱によって張力が変動するが、寸法、形状への影響を考えた張力変動の許容値は、ホット ストリップ粗圧延では $0.5\text{kg/mm}^2$ 、形鋼圧延では $0.2\text{kg/mm}^2$ 及び棒鋼圧延では $0.1\text{kg/mm}^2$ と言われる<sup>(2)(3)</sup>。このような許容張力値に対して、従来は各スタンドでの電動機の出カトルク、あるいはトルクと圧延荷重から推測される張力を一定に制御する方式が採用されてきた。しかし、従来方式では圧延材の温度変化を十分に考慮していないため、形鋼、棒鋼に対する許容値を満足させる制御方式としては若干の問題があった。日立製作所はこのことから、形鋼、棒鋼にも使用できる高精度の無張力制御Hitachi Tension Free Control方式(以下、HTFC方式と略す)を開発した。次に、ホット ストリップ粗圧延機を例にHTFC方式及びその実験結果について述べる。

### 3 制御原理

無張力制御の最も重要なポイントは、スタンド間に発生している張力をどのようにして高精度に検出するかにある。以下、HTFC方式における高精度張力検出方法及び制御方法について、図1に示す2スタンド タンデム ホット ストリップ圧延を例にとり説明する。

各スタンドにおける電動機の負荷トルクを $G(t-m)$ 、圧延荷重を $P(t)$ 、ロール半径を $R(m)$ として、スタンド間に張力 $T(t)$ が発生しているとすると、力のつりあいの関係から、それぞれのスタンドにおいて、圧延中次の関係式が常に成立する。

$$G_1 = 2l_1 P_1 - R_1 T \dots\dots\dots (1)$$

$$G_2 = 2l_2 P_2 + R_2 T \dots\dots\dots (2)$$

但し、添字1, 2はスタンド番号を示し、 $l$ はロール中心から圧延荷重 $P$ の等価的作用点までの距離、すなわちトルクア

\* 住友金属工業株式会社鹿島製鉄所建設本部計画部電気計画課 課長 \*\* 住友金属工業株式会社鹿島製鉄所保全部工務課  
 \*\*\* 住友金属工業株式会社鹿島製鉄所保全部圧延保全課 \*\*\*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\*\*\* 日立製作所大みか工場

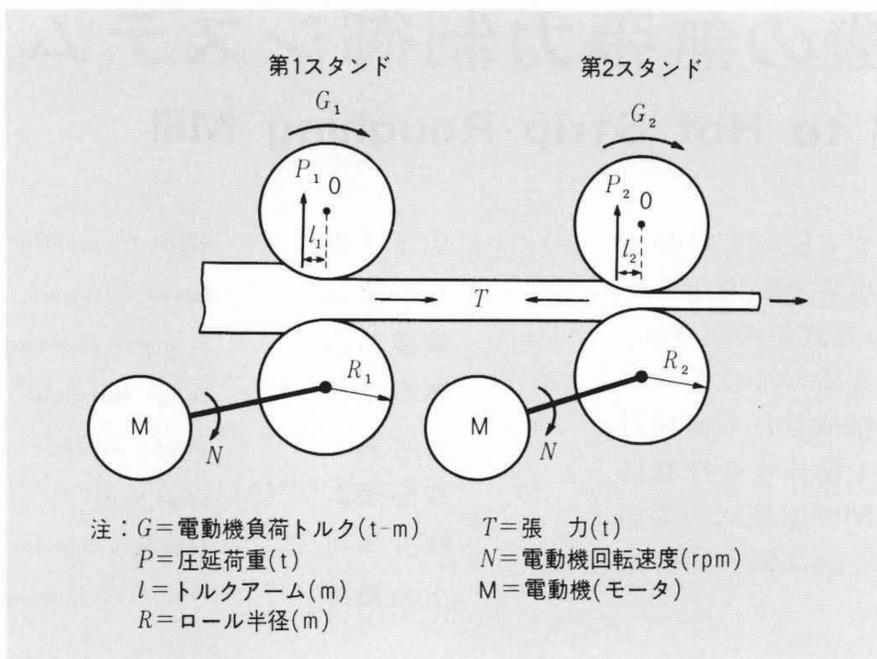


図1 張力検出の原理説明図 連続圧延中の力のつりあいの関係を示す。張力は電動機の発生するトルク、圧延荷重、トルクアームなどにより求められる。

ムを示す。また、ロール速度と電動機速度の比(ギヤ比)は簡単化のため1とする。

一方、電動機の発生出力W(kW)は次式となる。

$$W_i = \left( V_i I_i - J_i \frac{2\pi}{60} \frac{\Delta N_i}{\Delta \tau} \right) \times 10^{-3} - (a_1 N_i + a_2) \dots (3)$$

- 但し、V = 電動機端子電圧(V)
- I = 電機子電流(A)
- N = 電動機回転速度(rpm)
- a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> = 定数
- 添字 i = スタンド番号
- J = 慣性モーメント(kg-m<sup>2</sup>)
- Δτ = サンプルング周期

上記の電動機出力Wと負荷トルクGとがつりあうことより、

$$W_i = 9.8 \frac{2\pi}{60} N_i \cdot G_i \dots (4)$$

が成立する。

以上の諸関係式を用いて、電動機出力W、圧延荷重Pを検出してスタンド間張力Tを検出する。例えば、圧延中に圧延荷重P、トルクアームlが変化しないと仮定すると、第1スタンドにおける関係式から、電動機出力トルクの変化量を検出することによって張力Tを推定することができる。すなわち(1)式から、

$$T = \frac{1}{R_1} (G_1 - G_{10}) \dots (5)$$

但し、G<sub>10</sub>は圧延材が第2スタンドにかみ込む前の電動機負荷トルクで、G<sub>1</sub>、G<sub>10</sub>は(3)、(4)式より求めることができる。この方式が従来方式の一つであるトルク一定制御方式の張力検出式である。しかし、圧延荷重P、トルクアームlは圧延中に2.で示した外乱、特に圧延材の長手方向温度変化によって変動するため、その変動分だけ張力検出誤差が発生することになる。

HTFC方式では圧延中の圧延荷重、トルクアームの変動を考慮して、次に述べる方法で高精度にスタンド間張力を演算する。

まず、各スタンドのトルクアームl<sub>1</sub>、l<sub>2</sub>を圧延開始時の値l<sub>10</sub>、l<sub>20</sub>と圧延中の変化分Δl<sub>1</sub>、Δl<sub>2</sub>の和で表わし、先の(1)、(2)

式を次のように変換する。

$$G_1 = 2(l_{10} + \Delta l_1) P_1 - R_1 T \dots (6)$$

$$G_2 = 2(l_{20} + \Delta l_2) P_2 + R_2 T \dots (7)$$

(6)、(7)式において、電動機負荷トルクG<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>は前述の(3)、(4)式から各スタンドの電動機回転速度N、電機子電流I、電動機端子電圧Vを検出することによって求めることができ、圧延荷重P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>はロードセルなどの圧延荷重検出器より直接検出することができる。また、圧延開始時のトルクアームl<sub>10</sub>、l<sub>20</sub>は圧延材が第1スタンド、第2スタンドにかみ込んだときの電動機負荷トルク、圧延荷重の検出値から次式で求められる。

$$2l_{10} = \left( \frac{G_1}{P_1} \right) B_1 \dots (8)$$

$$2l_{20} = \left( \frac{G_2}{P_2} \right) B_2 - \frac{R_2}{R_1} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) B_2 \left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right) B_1 - \left( \frac{G_1}{P_1} \right) B_2 \right\} \dots (9)$$

添字B<sub>1</sub>は第1スタンドかみ込時、B<sub>2</sub>は第2スタンドかみ込時の値であることを示す。

従って、先の(6)、(7)式はΔl<sub>1</sub>、Δl<sub>2</sub>、Tを未知数とした関係式となるが、Δl<sub>1</sub>、Δl<sub>2</sub>はほとんど圧延材の長手方向温度変化に依存する値であり、Δl<sub>1</sub>=Δl<sub>2</sub>=Δlと仮定することができる。この仮定により、先の(6)、(7)式はΔl、Tの二元連立方程式となり、Δlを消去することによって、次の張力演算式が導かれる。

$$\left( \frac{R_1}{P_1} + \frac{R_2}{P_2} \right) T = \left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right)_0 - \left( \frac{G_2}{P_2} \right)_0 \right\} - \left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right) - \left( \frac{G_2}{P_2} \right) \right\} \dots (10)$$

但し、 $\left( \frac{G_1}{P_1} \right)_0 = 2l_{10}$ 、 $\left( \frac{G_2}{P_2} \right)_0 = 2l_{20}$

(10)式で張力Tを演算するのが、HTFCの張力検出方式で、次のような特長をもつ。

(1) 圧延中の圧延材温度変化を考慮し、高精度に張力を検出する。

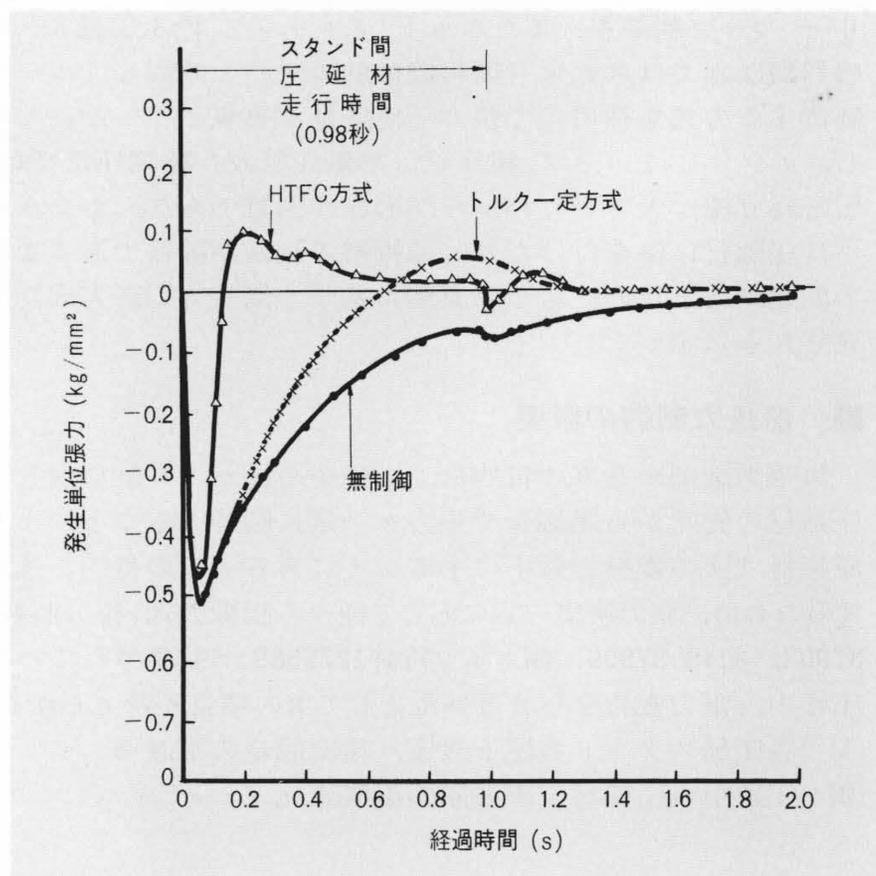


図2 第2スタンドかみ込後の張力変化 HTFC方式、トルク一定方式、無制御の各方式について、シミュレーションによって応答を求めた。

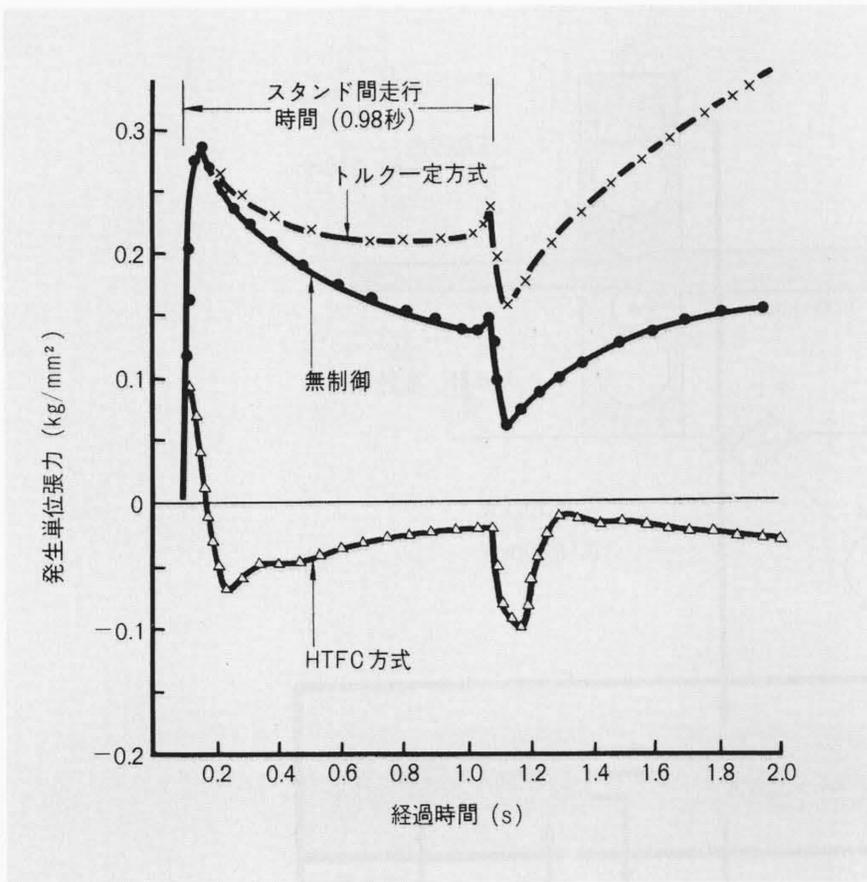


図3 圧延材温度を100°C降下させたときの張力変化 温度変化に対する応答をシミュレーションにより求めた。

(2) 基準値  $\left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right)_0 - \left( \frac{G_2}{P_2} \right)_3 \right\}$  を圧延材かみ込時の検出値から演算するため、すなわち前スタンド間張力が無張力か否かにかかわらず基準値を決定するため、高速通板にも適用可能である。

(3) 二つのスタンドでの情報から張力を演算するため、張力検出の信頼性、制御の安全性が高い。

以上、(10)式で高精度に非接触方式で張力を検出することを示したが、この張力値に基づいた制御方式について次に述べる。

スタンド間の圧延材に張力が発生するのは、第2スタンドのロール回転速度に対して第1スタンドのロール回転速度が遅く、圧延材を引っ張るためである。従って、張力が増大すれば、第1スタンドのロール回転速度を速めて、圧延材の引っ張りを緩めれば張力は減少する。この原理から、HTFCでは、(10)式で検出した張力値を目標張力値と比較し、その偏差に比例積分補償を行なって、第1スタンドの電動機速度の設定値を補正する。サンプリング制御の場合、 $n$ 回目のサンプリング時の制御出力は次式のようになる。

$$X_n = \left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right)_0 - \left( \frac{G_2}{P_2} \right)_0 \right\} - \left\{ \left( \frac{G_1}{P_1} \right)_n - \left( \frac{G_2}{P_2} \right)_n \right\} - \left( \frac{R_1}{P_1} + \frac{R_2}{P_2} \right) \bar{T} \dots \dots \dots (11)$$

$$\left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{1n} = K_1 X_n + \sum_{j=1}^n K_2 X_j \Delta \tau \dots \dots \dots (12)$$

但し、 $\bar{T}$  = 目標張力、 $K_1$  = 比例ゲイン

$K_2$  = 積分ゲイン

$\Delta \tau$  = サンプリング周期

目標張力 $\bar{T}$ がゼロの場合は、二つの相隣るスタンドでの、電動機の負荷トルクと圧延荷重の比の差を一定に制御することになる。

このHTFC方式を、

- (1) 圧延材が第2スタンドに到達したとき(通板時)、
- (2) 圧延材の温度がステップ状に100°C変化したと仮定したとき

の2種についてシミュレーションすると、張力変化は図2、3に示すようになり、0.1秒程度で所定の精度0.1kg/mm<sup>2</sup>以内の単位張力に制御できることが分かる。

#### 4 システムの概要

住友金属工業株式会社鹿島製鉄所のホット ストリップ粗圧延機、第5(R<sub>5</sub>)スタンド、第6(R<sub>6</sub>)スタンドで実作業実験を行なった。HTFC方式の概要を図4に示す。

R<sub>5</sub>スタンドの圧延ロールは定格出力8,100kWの直流電動機(DCM)、R<sub>6</sub>スタンドの圧延ロールは定格出力8,500kWの同期電動機(SYM)によりそれぞれ駆動されている。R<sub>5</sub>スタンドのDCMは、圧延材の先端がR<sub>6</sub>スタンドにかみ込まれるまでは一定速度(ASR)運転され、R<sub>6</sub>スタンドかみ込後から圧延材の後端がR<sub>5</sub>スタンドを抜けるまで(タンデム圧延中)は、電流記憶方式によるトルク一定制御を行なうため、一定電流(ACR)運転を行なっている。この電流記憶方式では、実圧延上不十分な点があるので今回DDCによる無張力制御装置を追加した。

HTFC装置は、HIDIC 150を中心としたDDCシステムにより構成されている。電子計算機は速応性の要求を満足するのに十分なサンプリングピッチを定め、アナログ入力には精度の要求から、サンプリングピッチに同期した積分フィルタを設けて電氣的雑音を除去している。

R<sub>5</sub>スタンドの主回路電流、主回路電圧及び荷重、R<sub>6</sub>スタンドの有効電力、荷重を前述の積分フィルタを介してアナログ入力する。R<sub>5</sub>スタンドの回転数はパルスカウンタのパルス数をカウントし取り込む。これらの入力データから、(3)、(4)式を基に負荷トルクを演算するが、入力データのディメンジョンの関係からそれぞれR<sub>5</sub>スタンドの負荷トルクを次の(13)式で、R<sub>6</sub>スタンドの負荷トルクを(14)式でそれぞれ演算した。

$$G_5 = \frac{A_1 I_5 (V_5 - I_5 r_{a5})}{N_5 \cdot gr_5} - \frac{J_5}{A_2} \frac{\Delta N_5}{\Delta \tau} - (a_2)_5 \dots \dots \dots (13)$$

$$G_6 = \frac{A_1 W_6}{N_6 \cdot gr_6} - (a_2)_6 \dots \dots \dots (14)$$

但し、 $G$  = 負荷トルク(t-m)

$N$  = 電動機回転数(rpm)

$W$  = 同期電動機有効電力(kW)

$(a_2)$  = トルクロス(t-m)

$gr$  = ギアレシオ

$$A_1 = \frac{1}{9.8 \cdot \frac{2\pi}{60}} \dots \dots \dots \text{定数}$$

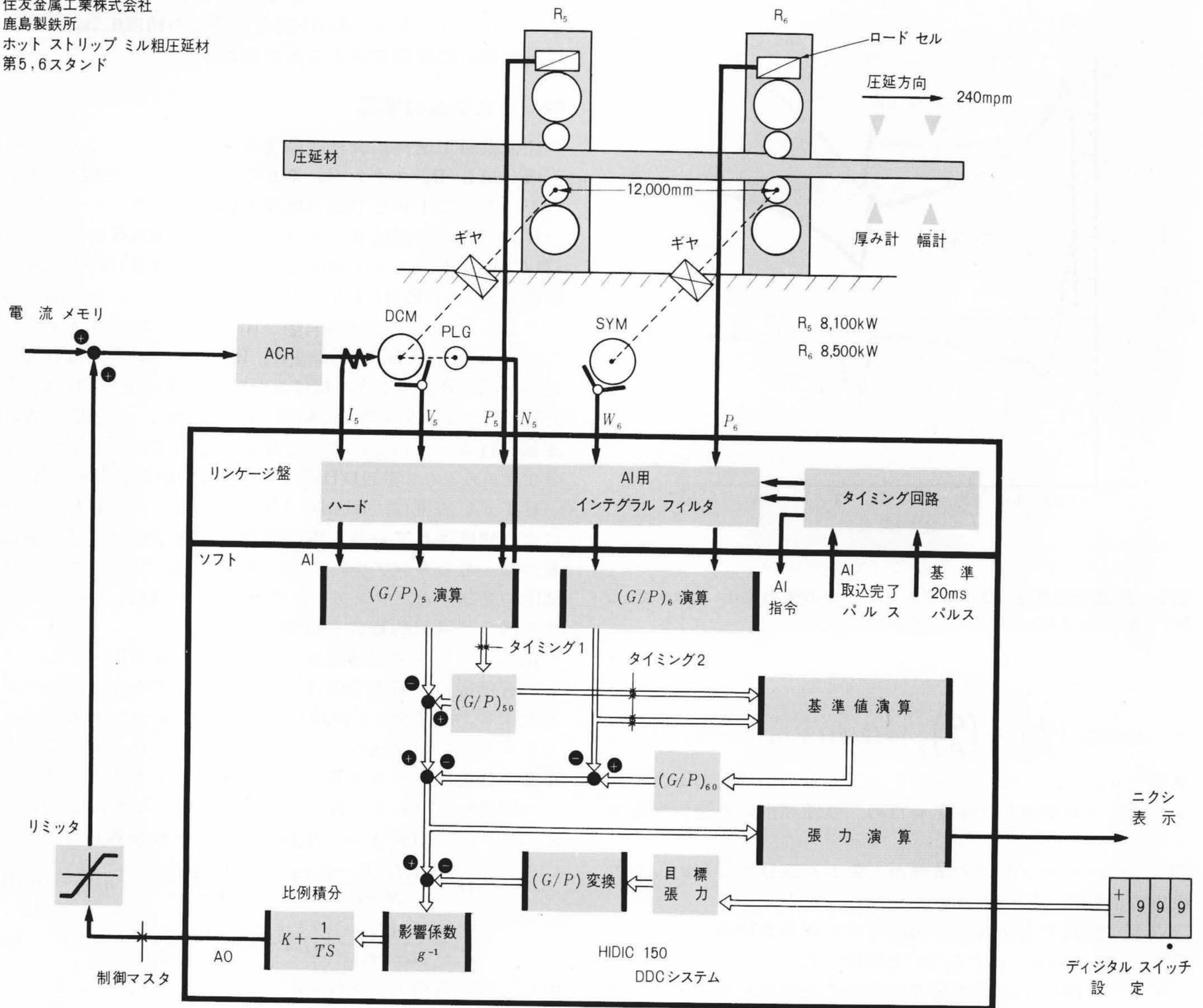
$$A_2 = 9.8 \cdot \frac{1}{\frac{2\pi}{60}} \dots \dots \dots \text{定数}$$

なお、(14)式を演算するに当たって、同期電動機の有効電力 $W_6$ は、かみ込の過渡時での同期電動機固有の振動現象を考慮して求められた値を用いる。

このようにして求めた負荷トルクと、ロードセルより検出した圧延荷重を用い、3.の制御原理で述べたように、R<sub>5</sub>スタンドとR<sub>6</sub>スタンド間のトルク荷重比の差の偏差を求め、その偏差に影響係数(ディメンジョンを合わせるための係数) $g^{-1}$ をかけ、比例積分補償を行ない、制御量をアナログ出力する。一方、トルク荷重比の差の偏差から(10)式に基づき張力を演算し表示出力する。

ここで、R<sub>6</sub>スタンドは同期電動機駆動であることから速度制御の対象にはならず、R<sub>5</sub>スタンドのACR運転の電流記憶値に制御出力量を加算するようにフィードバックループを組ん

住友金属工業株式会社  
鹿島製鉄所  
ホットストリップミル粗圧延材  
第5,6スタンド



注1. 記号説明

R<sub>5</sub>, R<sub>6</sub> = 第5, 第6スタンド  
DCM = 直流電動機  
SYM = 同期電動機  
ACR = 定電流制御装置  
I<sub>5</sub>, R<sub>5</sub> = 主回路電流  
V<sub>5</sub> = DCM 電圧  
P<sub>5</sub> = R<sub>5</sub> 荷重  
N<sub>5</sub> = R<sub>5</sub> 回転数  
W<sub>6</sub> = R<sub>6</sub> 有効電力  
P<sub>6</sub> = R<sub>6</sub> 荷重

2. 汎例ソフト  
A → B → C = ロジック  
A → B → C = C = A · B  
A → B → C = C = A + B  
[ ] = 演算  
[ ] = 記憶テーブル

図4 システム概要 粗圧延機無張力制御システムの構成図を示す。制御用電子計算機HIDIC 150を用いてDDCを構成し、電動機の電流、電圧、荷重速度などを高速で取りこみ、HTFC方式により張力制御演算を行ない制御出力及び張力を得る。

でHTFC方式による制御を行なった。

以上が本システムの基本的な構成であるが、更にデータ収集上次の特長がある。

- (1) システムに柔軟性をもたせるために±99.9tまでの目標張力を任意に与えた制御が可能である。
- (2) データの記録として、ロギングタイプライタにより最大15項目にわたり、データをタイプアウトできる。これは、演算値の確認などに使用する。

5 実験方法及び結果

実験は次の各項目について行なわれた。

- (1) 張力演算式の妥当性の確認〔(10)式の確認〕
- (2) 上記(10)式が圧延材の温度変化に対して有効なものである

ことの確認

- (3) 張力変動の材料形状に対する影響
- (4) HTFCシステムの制御精度(板圧延時)

5.1 張力演算式の妥当性

妥当性のチェックを行なう場合、最も問題になるのは圧延機間に発生する張力をどのようにして検出するかである。

第一の方法は、圧延機間に棒を渡して圧延機間隔の伸縮から張力を求める方法である。図5に張力検出方法の概略を示す。圧延機間にI形鋼を渡し、差動トランスで圧延機の間隔の変化をとらえる。実験結果は図6のグラフで示した。演算式で求めた張力と実測による変位が直線関係にあることが分かる。

第二の方法は、圧延機にまたがって圧延を行なっている際に、連続的に張力を演算しておき、第1の圧延機(R<sub>5</sub>スタンド)

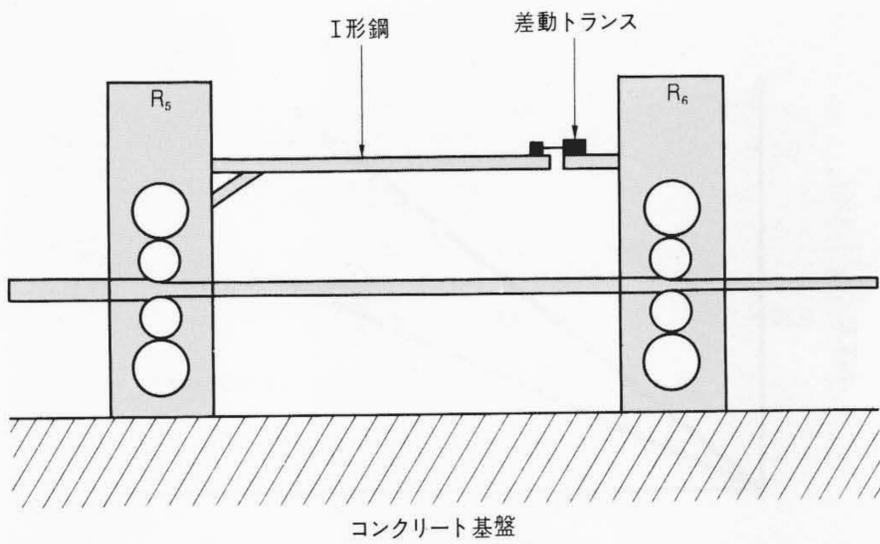


図5 張力検出器の取付け 張力検出器は、圧延機間にI形鋼を渡して取り付けた。スタンド間隔の伸縮により圧延材に発生する張力を検出する。

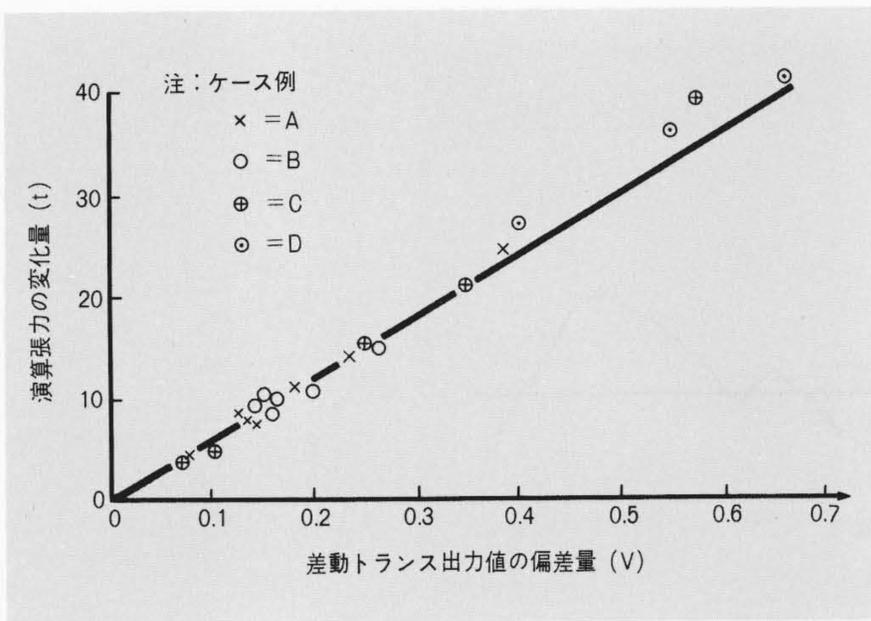


図6 演算張力と差動トランス出力値との関係 演算によって求めた張力と、図5の直接検出方法(差動トランスを用いた)と直線関係にあることを示す。

を材料が抜けた瞬間に第2圧延機(R<sub>6</sub>スタンド)の圧延荷重に変化が生ずることに着目して、この荷重の変化量から求められる張力と、材料が第1圧延機を抜ける瞬間の演算張力とを比較することにより、演算式の妥当性をチェックする方法である(図7)。演算式はよく知られた式であり<sup>(1)</sup>、熱間圧延の前方張力と荷重との関係を示す式から導いた結果を(15)式に示す。

$$T = \frac{\bar{P}_6}{P_6} \cdot \frac{\bar{P}_6 - P_6}{\sqrt{R'_6(H-h)} \cdot b} \cdot \frac{S}{\alpha} \dots \dots \dots (15)$$

- 但し、 $T$  : 張力
- $P_6$  : R<sub>6</sub>スタンドの荷重(R<sub>5</sub>スタンドを抜ける前)
- $\bar{P}_6$  : " (R<sub>5</sub>スタンドを抜けた後)
- $R'_6$  : R<sub>6</sub>スタンドのロールの偏平ロール半径
- $H$  : R<sub>6</sub>入側板厚
- $h$  : R<sub>6</sub>出側板厚
- $b$  : 板幅
- $S$  : 圧延材断面積
- $\alpha$  : 後方張力係数

以上の2方式のチェックによって、張力演算式はその妥当性が十分確認できた。

5.2 温度変化に対する有効性

図8に、圧延材の後半を冷却して実験した結果を示す。すなわち、圧延材前半は1,100°C、後半は1,050°Cに冷却した

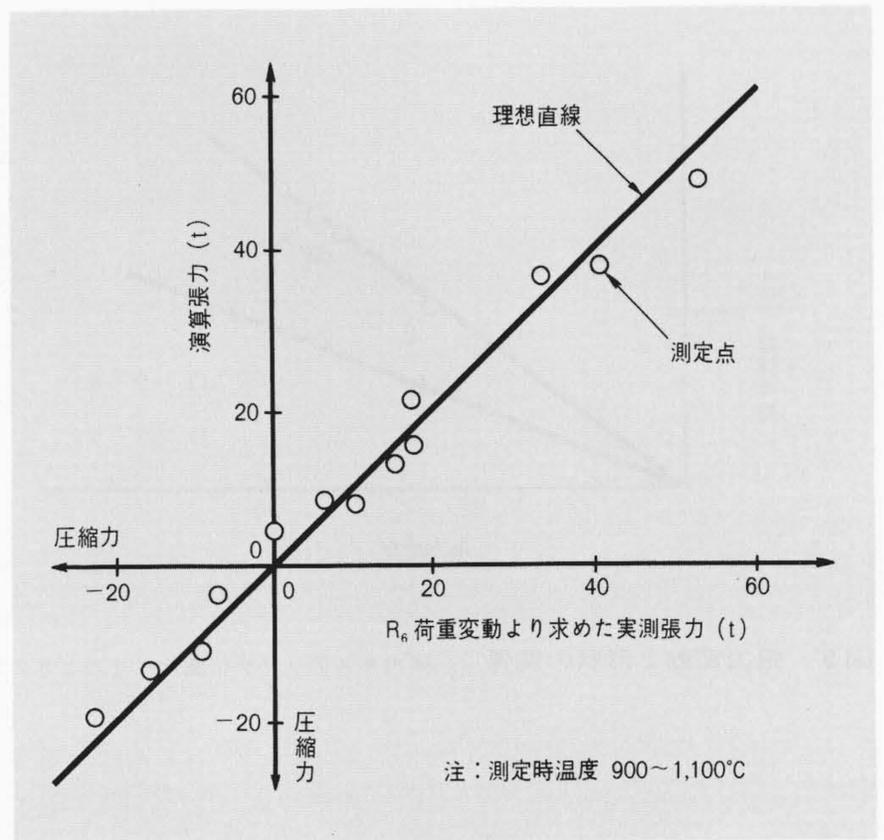


図7 張力演算式の妥当性 R<sub>5</sub>スタンド抜け時のR<sub>6</sub>スタンドの荷重変動分から、張力の演算式の妥当性をチェックしたもの。マイナス側は圧縮力を示す。

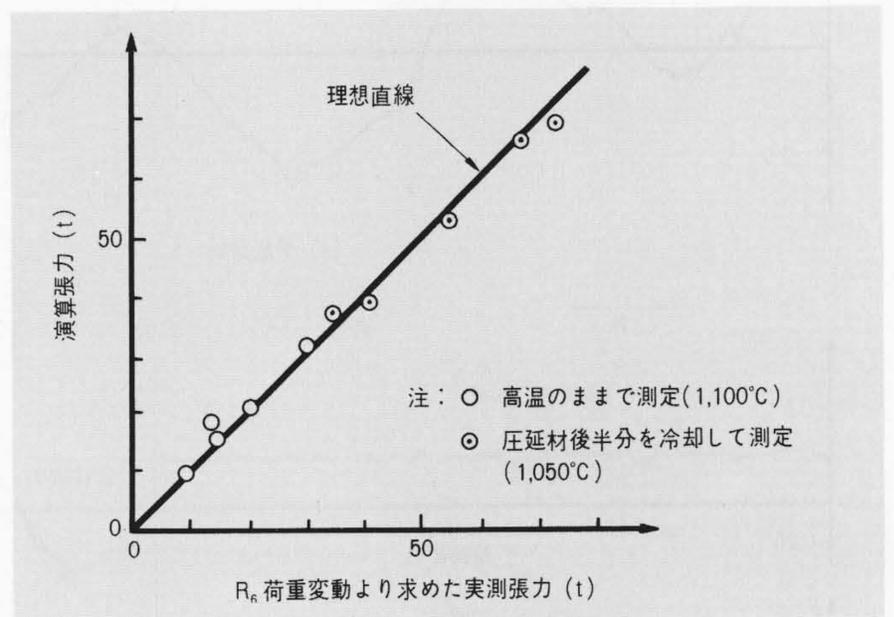


図8 温度変化と演算張力 強制的に材料の後半を冷却して圧延し、温度変化による張力変動が正しく検出されていることを示す。

場合で、温度変化があった場合(50°C)でも正しく張力を演算していることが分かる。

5.3 張力変化の材料形状に対する影響

張力変動が材料形状の変化に及ぼす影響を求め、テンションフリー制御の所要精度を定める必要がある。図9は圧延途中においてステップ状に張力を変化させて、形状の変化を求めたものである。幅に対しては3 mm/kg/mm<sup>2</sup>、厚みに対しては0.3mm/kg/mm<sup>2</sup>の影響がある。

5.4 総合制御効果

図10の(a)はHTFC方式を使用していないときの張力変動を示すものである。同図(b)はHTFC方式を適用した場合で、無制御時±0.6kg/mm<sup>2</sup>に対して、±0.06kg/mm<sup>2</sup>に制御できたことを示している。また、同図(b)の後半部は途中HTFCを切った場合を示している。

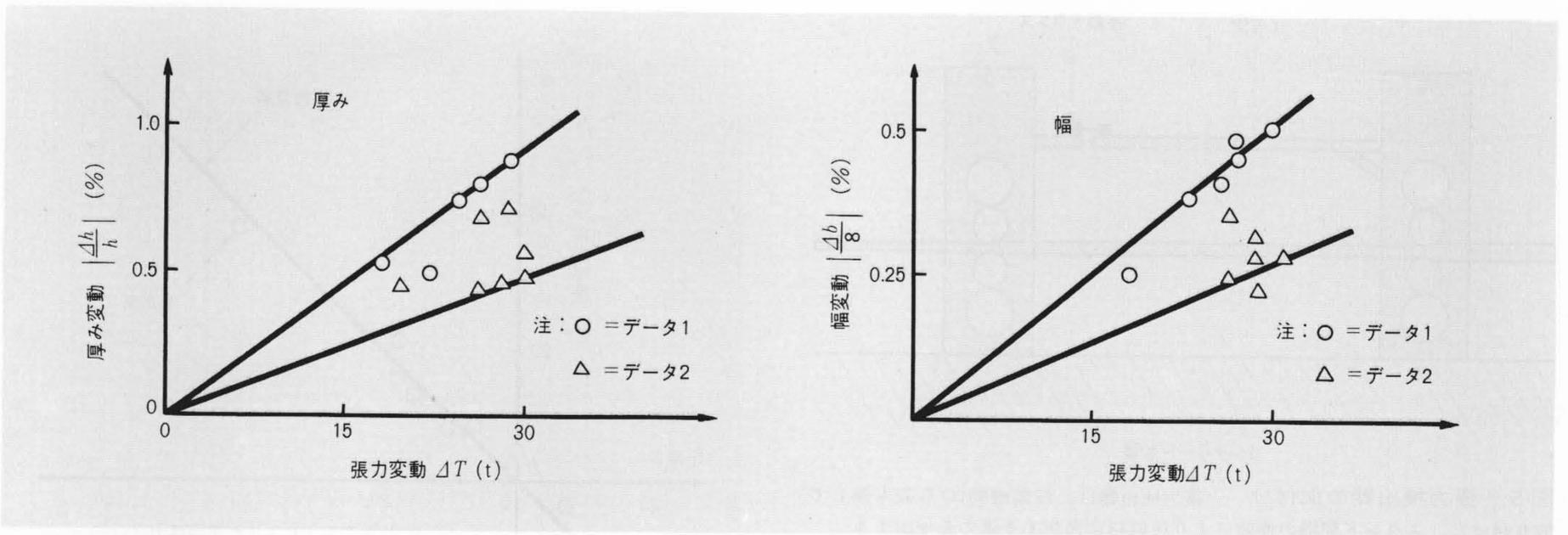


図9 張力変動と形状の関係 張力をステップ状に変化させたときの形状に対する影響を示す。

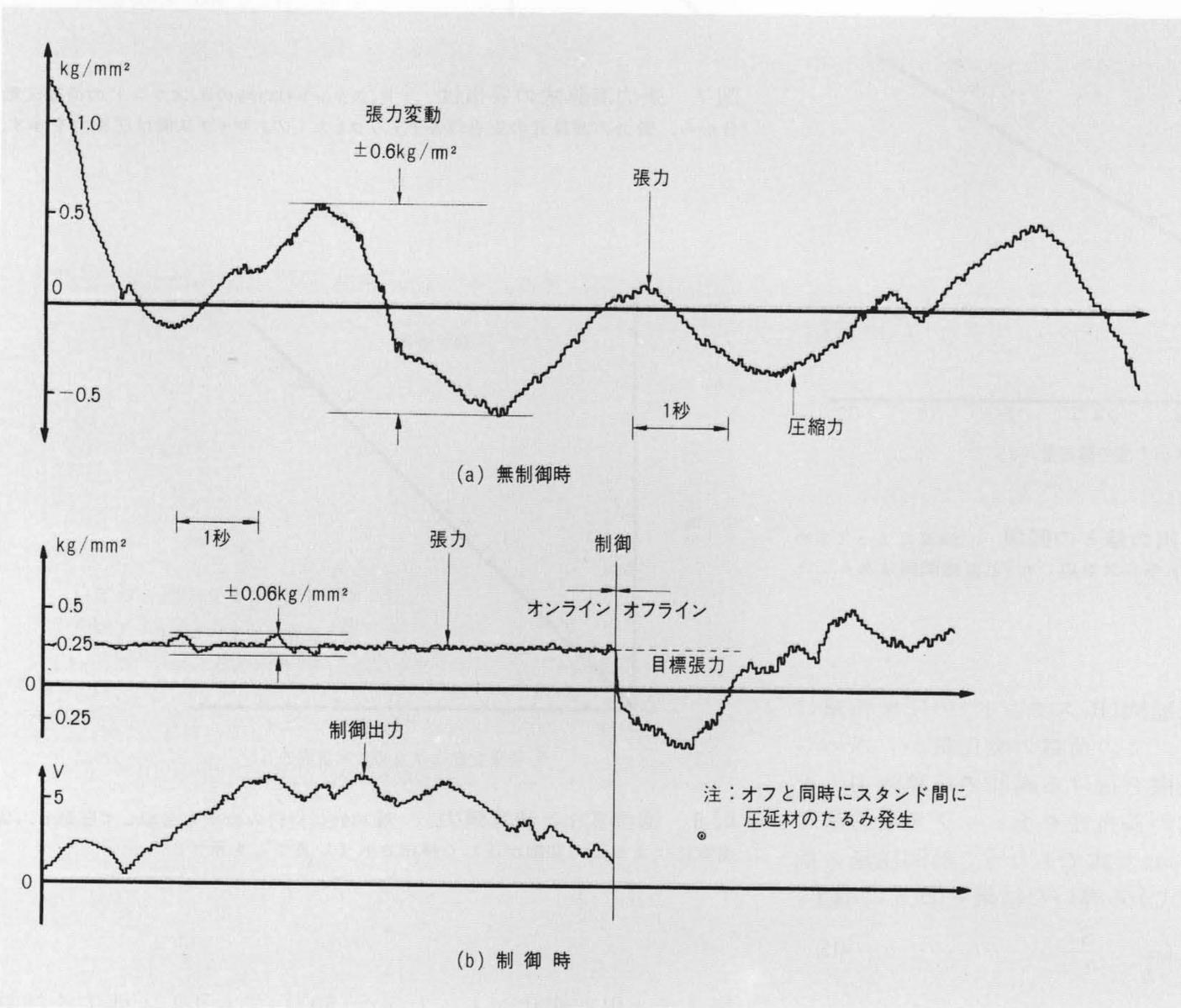


図10 制御効果 図(a)は無制御時の張力変動を、(b)はHTFC方式による制御効果を示す。後半は同一材料でHTFCを切ったときの状態を示す。

## 6 結 言

圧延材の温度変化による張力の発生に着眼した制御方式を考案し、これを実圧延に適用し、その効果を確認した。特に、

(1) 精度の高い制御原理式の導入とその妥当性をスタンド間に梁を渡すなどして実機で確認した。

(2) 上記高精度演算を含む制御システムを、HIDIC 150 DDCシステムにより実現した。

以上により開発されたHTFC方式は、各種のタンデム圧延機に適用が可能である。すなわち、

(1) 形鋼圧延機、棒鋼圧延機への適用

(2) ホット ストリップ ミルへの適用、特に粗スタンド及び仕上初期スタンドに有効である。

最後に本制御システムの開発に当たり、御協力をいただいた関係各位に対し深い謝意を表わす次第である。

## 参考文献

- (1) 日本鉄鋼協会編「圧延理論とその応用」(昭44-12)
- (2) 富岡：「棒鋼・線材圧延技術の進歩」鉄と鋼 p.1726~1763 Vol 59, No.13(昭48-11)
- (3) 馬場：「形鋼圧延機の進歩」鉄と鋼 p.1855~1862 Vol 59, No.13(昭48-11)