

冷間タンデム圧延機の板厚制御と段付圧延システム

Automatic Gauge Control and Incoil Thickness Changing System for Cold Tandem Mills

冷間タンデム圧延機の自動板厚制御及び段付圧延について、川崎製鉄株式会社水島製鉄所は日立製作所と共同して新しい制御方式を開発した¹⁾。

この制御システムのうち、自動板厚制御装置では入側に設置された厚み計信号に基づいて、後続スタンドの板厚を体積速度一定の原理に基づき各スタンドの出側板厚を算出し、この信号に基づいて、各スタンドのロール間隙又は張力を予測的又は帰還的に制御して、製品板厚の二乗偏差を最小にするという斬新な手法であり、所期の成果が得られた。

また、段付圧延については、同一サイズの母材より異なったサイズの製品を得るために、圧延中にロール間隙と速度を変更し、短時間にオフゲージの少ないスケジュール変更を行なう独特の方式を開発し成果を確認したので、概要を報告する。

北尾 齊治* Kitao Nariharu
江藤 孝治* Etô Takaharu
松香 茂道** Matsuka Shigemichi
満仲 俊夫** Mannaka Toshio
諸岡 泰男*** Morooka Yasuo

1 緒 言

川崎製鉄株式会社水島製鉄所には、昭和44年(1969年)以来5タンデム冷間圧延設備が稼動しており、トランジスタ演算増幅器によるワイヤードロジック形自動板厚制御(以下、AGCと略す)が順調に動いている。しかし、圧延設備でのAGCは古くて新しい課題であり、製品板厚の精度向上、オフゲージ減少は、量産設備の歩どまり向上に直接結びつくため、稼動後も操業面、設備面で数多くの改良が加えられ、着実にその成果を挙げてきた。しかし、その後の目覚ましい技術革新で、ハードウェアとしては集積回路(IC)演算素子やマイクロコンピュータが出現し、制御システムとしては、従来の入側・出側に集中した帰還制御に対し、各スタンドごとに発生する板厚偏差を正確に求め、予測理論、最適理論を用いてより精密な制御を実現し、製品精度と歩どまり向上を図る考え方が台頭してきた。川崎製鉄株式会社と日立製作所はこれらの要望に対処するため、従来の各種改良の成果を基礎により新しいAGCを確立するため共同して研究を重ねてきたが、その一端を紹介したい。

また同時に別の要望として、最近は能率向上のため製品コイルは大形化するとともに、しばしば一つの母材コイルから何種類かの製品を作る必要があり、段付圧延といわれる技術の確立が必要となってきた。これは高速圧延中の圧延機に対し、ロール間隙、圧延速度及び張力のバランスを維持しながら新しいスケジュールにダイナミックに変更・制御して、高能率かつ高歩どまりの別の製品を作るわけで、特に、張力を含めた新しいスケジュールへの移行及びAGCを継続してオフゲージ量を最小にする方式を開発したので報告する。

2 システム構成

表1にこのシステムの供試圧延機と被圧延材の仕様をまとめて示す。また表2にこのシステムのハードウェアの構成を、図1にシステム機能構成を示す。

図1の実線部分はAGCに関する制御系構成状況を示し、一方、破線は段付圧延に関するものを示す。なお、自動速度制御(Automatic Speed Regulator: 以下、ASRと略す)

表1 供試機と被圧延材仕様 既設の稼動中の油圧圧下タンデムミルを用いて、オンライン性能確認を行なった。

区 分	項 目	内 容
供試機	形 式	四重5基連続式冷間圧延機
	圧 下 方 式	油圧圧下方式 圧下電動機: 1.5kW直流電動機×2/スタンド
	駆 動 方 式	ワークロール双駆動方式
	最高圧延速度	1,500mpm (at No.5スタンド)
	電 動 機 容 量	No.1: DC750V, 1,900kW(2電機子方式) No.2~5: DC750V, 2,700kW(")
被圧延材	材 質	軟鋼タイトコイル
	重 量	最大50t
	板 幅	600~1,600mm
	板 厚	素材1.8~6.0mm, 成品0.2~3.2mm

表2 ハードウェア構成 HIDIC 08を用いた16k語のコンパクトなDDCシステムであり、既設設備への導入が容易である。

区 分	機器名	員数	形 式	仕 様
制御用計算機	CPU	1面	HIDIC 08	コア16k語, 内蔵タイマベース10ms ファームウェア付加減算3.5μs
	CI/O	1台	H-7013C	(ASR)
		1台	H-7015C	(PTR)
	PI/O	2面	H-7600 H-7604	割込: 32点, A/I: 31点, A/O: 20点 D/I: 15語, D/O: 16語, パルス入力: 5点
リンケージ盤		3面	—	信号絶縁, ATRアナログ系等収納
操 作 デ ス ク		1面	—	—

注: 略語説明
A/I (Analog Input: アナログ入力) CPU (中央処理装置)
A/O (Analog Output: アナログ出力) CI/O (コンソール入出力装置)
D/O (Digital Output: デジタル出力) PI/O (プロセス入出力装置)

* 川崎製鉄株式会社水島製鉄所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所日立研究所

には、スタンド速度サクセシブ回路が設けられているが、同図では図示を省略した。なお、同図でAGC系は圧下制御モードと速度制御モードがあり、自動的に切換可能としている。次に、圧下制御モードを中心に述べる。

3 AGCシステム

3.1 板厚検出機能

従来からAGCでの板厚検出方式として、「フックの法則」に基づくゲージメータ方式が採用されているが、ロール偏心、ロール摩耗、ロール熱膨張などに対して検出精度が悪化するという問題があり、このシステムでは第2スタンド以降の厚み検出方式として、体積速度一定則に基づくマスフローゲージ方式を採用した。

第*i*スタンドで、圧延材の流入体積と流出体積は常に等しく、流入速度を V_i 、流出速度を v_i 、流入厚み(入側厚み)を H_i 、流出厚み(出側厚み)を h_i とすると、次の関係式が成立する。

$$H_i V_i = h_i v_i \cdots \cdots (1)$$

一方、流入速度と流出速度との差でスタンド間張力 t_i が変化し、張力一定制御を行なうことにより、第*i*スタンドの流出速度 v_i と第*i*+1スタンドの流入速度 V_{i+1} を等しくすることができる。

また、流出速度 v_i は公知の第*i*スタンドのロール速度 v_{Ri} と先進率 f_i との積で表わされる。

$$v_i = v_{Ri} (1 + f_i) \cdots \cdots (2)$$

先進率 f_i は、圧延中時々刻々変化する入側厚 H_i 、出側厚 h_i 及び張力の微小変動による補正を行ないながら計算される。

以上の各変数間の関係に基づいて、図1に示すMでサンプリ

ングごとに各スタンドごとの出側厚みと先進率を計算している。

3.2 第1スタンドAGC

第1スタンドのAGCは図1に示す板厚制御装置G₁で、第1スタンドの入側及び出側に設置した厚み計の出力信号と圧下位置検出値を基本情報として、フィードフォワード+フィードバック制御を行なわせている。ただし、第1スタンドから出側厚み計までの圧延材移送時間を考慮した制御を行っており、入側厚、出側厚に対する制御ゲインは、圧延速度の関数としている。

3.3 第2～第5スタンドAGC

第2スタンドから第5スタンドまでの制御は、図1に示すG₂～G₅で行ない、サンプリング時点から一定時間T後までの各スタンド出側板厚偏差の自乗積分値を最小にする各スタンドでの圧下位置、張力設定値の補正量を演算し、制御する方式である。

圧下位置制御装置の時定数を T_{Si} 、張力制御装置の時定数を T_{Ni} とすると、ある時刻 $\tau = \tau_0$ から一定時間後 $\tau = \tau_0 + T$ までの第*i*スタンド出側板厚偏差の時間変化 $\Delta h_i(\tau)$ は、各制御装置の時間応答と入側板厚の時間変化から予測することができる。

制御装置の時間応答は、サンプリング時の制御出力量(未知数)に対するステップ応答で表わし、入側板厚の変化による出側板厚変化は、入側板厚の時間微分値を係数とするランプ関数で表わす。入側板厚は図1に示すように、前段スタンドで既に演算されている出側板厚を圧延速度に呼応して移送した値を用いる。このとき、出側板厚偏差は、サンプリング時点でのマスフローゲージ検出値に、上記制御装置及び入側板厚

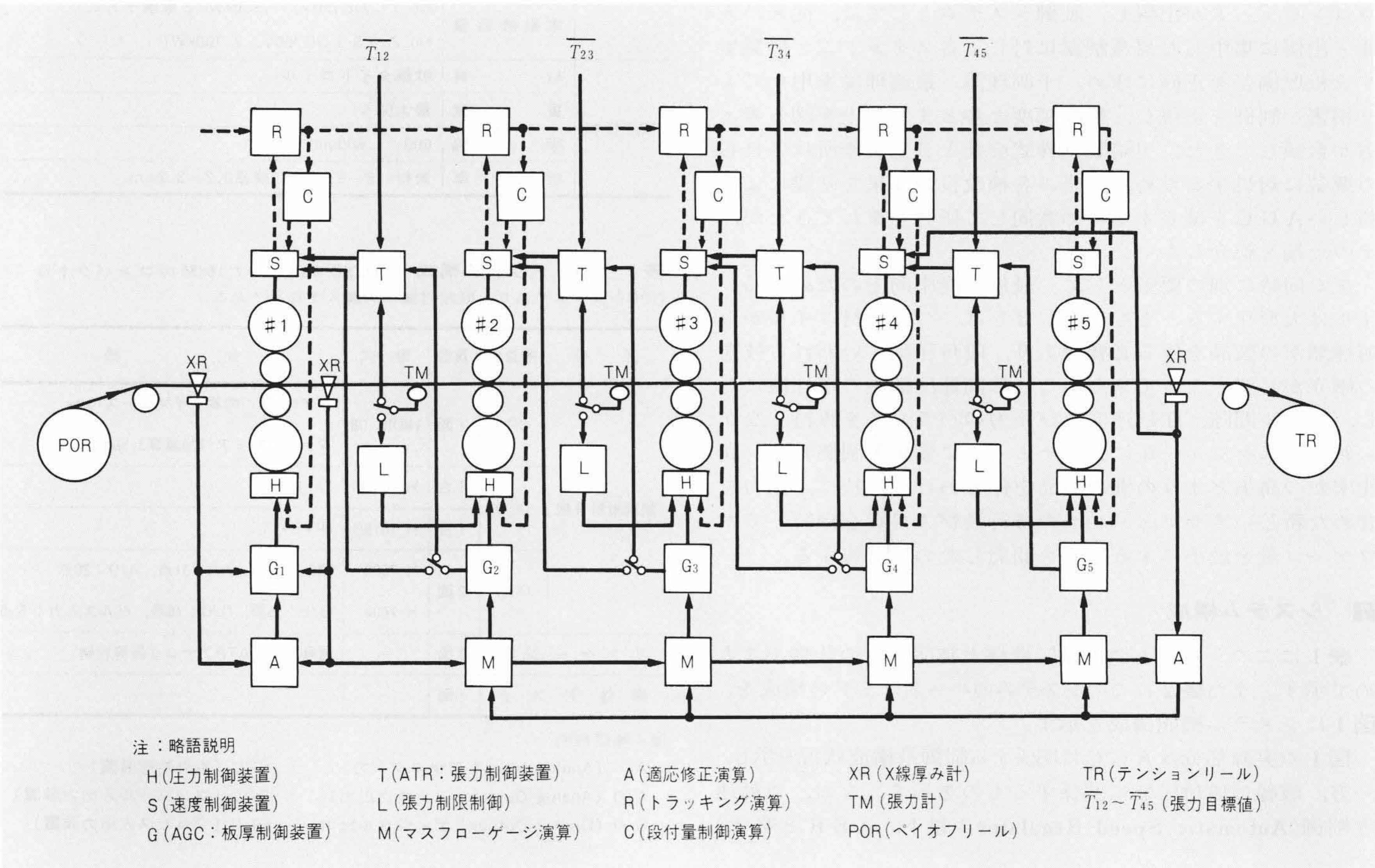


図1 システム機能構成 全スタンドAGCを行なうため、マスフローゲージ演算部を全スタンドに備えているほか、段付圧延中でのAGCを可能としている。

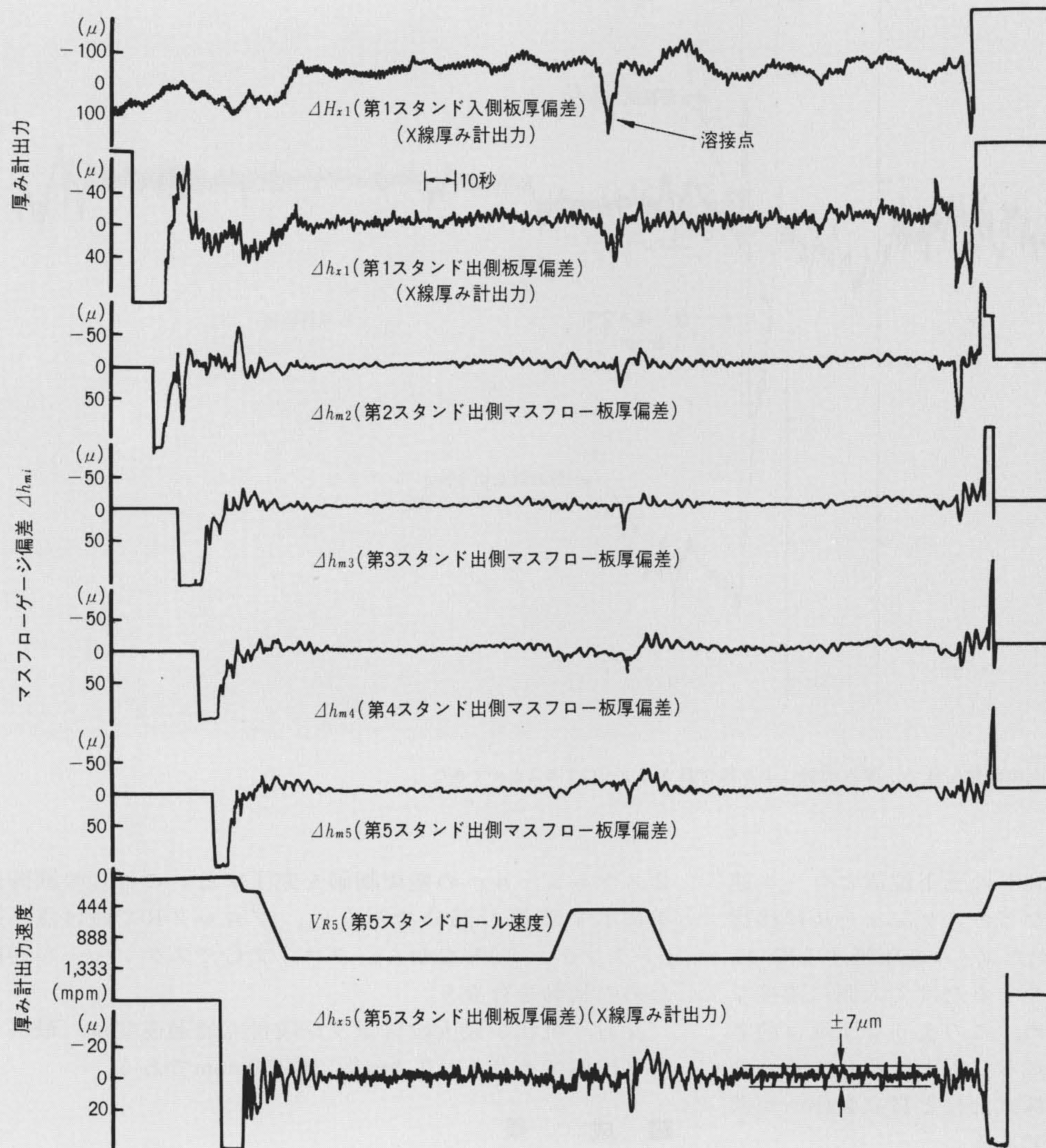


図2 実機実験結果の例
仕上厚1.0mmに対し、5%のクラシファイでのオンゲージ率は99.7%を達成した。

による時間関数を重畳した値として表わすことができる。ただし、未知数である制御出力量の関数となっている。この制御出力量を板厚偏差が最小となるように最適決定する。

最適化評価関数として、第2スタンド以降第5スタンドまでの出側板厚偏差の自乗和積分値を最小化することを考える。すなわち、

$$J = \int_{\tau_0}^{\tau_0+T} \left\{ \sum_{i=2}^5 \Delta h_i^2(\tau) \right\} d\tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

において評価関数値 J を最小にする圧下位置補正量 ΔS_i 、張力補正量 Δt_i を決定する。 J が ΔS_i 、 Δt_i に関する2次式であることから、 $\frac{\partial J}{\partial \Delta S_i} = 0$ 、 $\left(\frac{\partial J}{\partial \Delta t_i} \right) = 0$ を満足する ΔS_i 、 Δt_i 、すなわち、下記8元連立一次方程式の解 $U : (\Delta S_i, \Delta t_i)$ が最適制御量となる。

$$AU = B \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A は時定数 T_{si} 、 T_{ti} 、時間間隔 T 、塑性係数 $\left(\frac{\partial h}{\partial H} \right)_i$

$\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_i$ 、 $\left(\frac{\partial h}{\partial t_f} \right)_i$ 、 $\left(\frac{\partial h}{\partial t_b} \right)_i$ で決まる 8×8 行列、 U は ΔS_i 、

Δt_i を要素とするベクトル、 B は $\Delta h_i(\tau_0)$ 、 $\left(\frac{d\Delta h_i}{d\tau} \right)_{\tau=\tau_0}$ で決ま

るベクトルである。このシステムでは上記方程式を解き、最

適解を比例積分補償し制御出力としている。

3.4 付加的機能

このシステムの付加的機能として次の五つの機能を備え、システムの有効性を向上させている。

- (1) 第1スタンドAGCの制御ゲイン適応修正機能
- (2) かみ込時の張力発生に対する圧下位置補正機能
- (3) 油膜厚み補正機能
- (4) マスフローゲージの適応修正機能
- (5) 手動介入処理機能

4 段付圧延

4.1 段付圧延とその構成

圧延のコストミニマムと需要家へのきめ細かいサービスとを背景とした高効率化、省力化のひとつの重点指向として連続圧延の導入があり、これに関して幾つかの考案^{*1)}や、報告²⁾がある。

連続圧延とは、1本ごとに圧延されていた被圧延材を圧延機入側で次々に溶接し、ある厚みと張力で所定の長さだけ圧

※1) 例えば、特公昭49-36548号、特公昭49-88755号など。

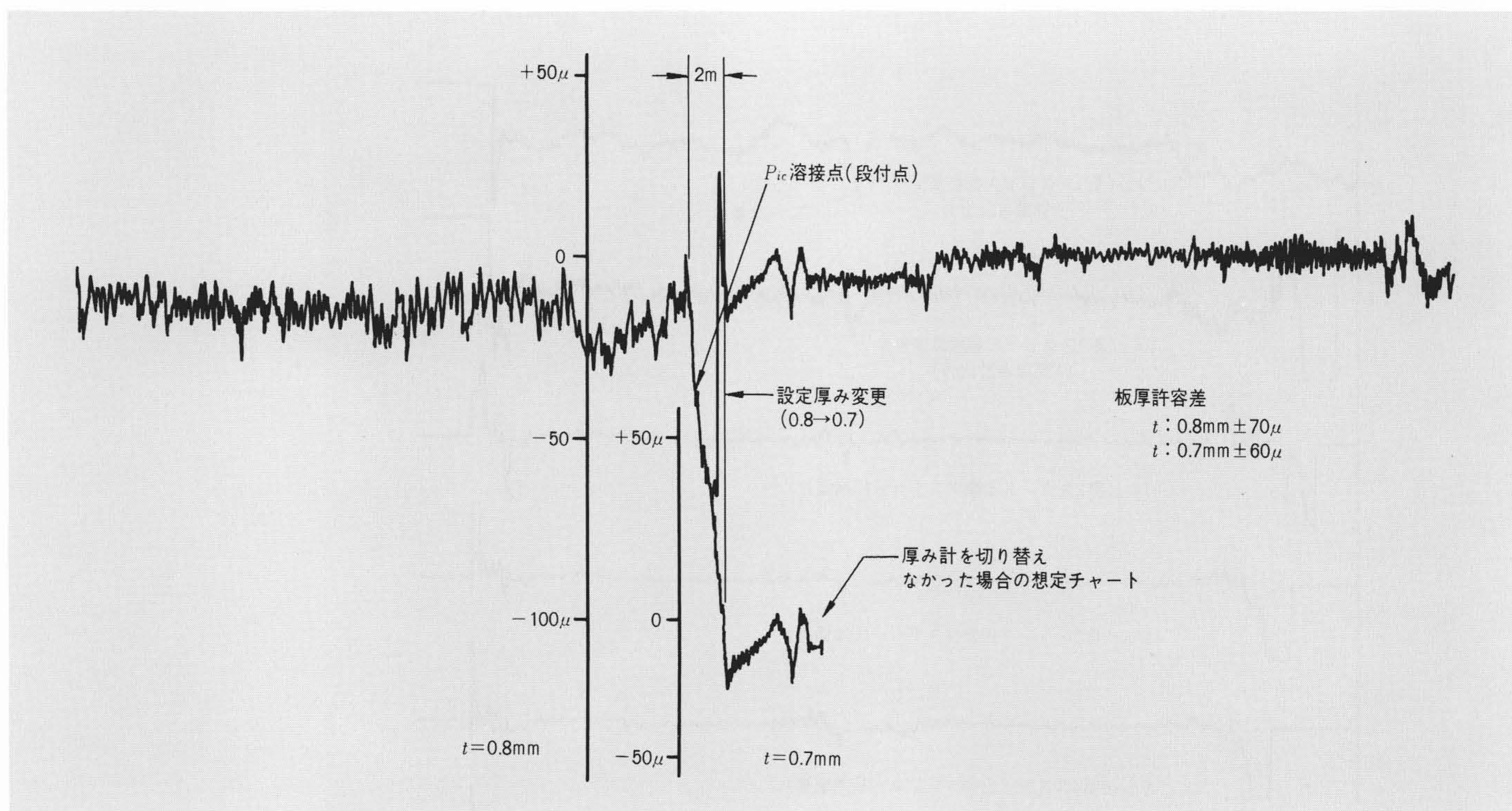


図3 段付圧延実験結果の例 0.1mmの段付圧延で、厚み切替による段付長さを2mにすることができた。

延したのち圧延しながら、全スタンドの压下位置とロール速度を与えられた第2の厚み、張力などのスケジュールに移行させる圧延方法を指す。大形化されたコイルを圧延する際は、コイルの途中でスケジュール替えをするだけで入側に溶接などの特別な設備を必要としないため、このような圧延は前者と区別するため、段付圧延と呼ばれる。以下に紹介するものは、この段付圧延であり川崎製鉄株式会社と日立製作所が共同して独自の方式を開発したものである。

このシステムの特長は、段付点通過時の微少時間を除きAGCを投入しながら行なえる点にあり、オフゲージの発生を最小限に抑制することができ、製品歩どまりに著効を発揮する。

4.2 段付圧延制御

段付点が任意のスタンド*i*より上流側にあるときは、第*i*スタンドの压下と速度は第1スケジュールのそれである。次に段付点が第*i*スタンドにかみ込んだ際、压下は第2スケジュールの压下設定位置に変更するが、第*i*スタンドの前方のスタンド間張力は、第1スケジュールのそれを維持する必要から、压下の修正に伴う先進率の変化分相当だけ第*i*スタンドの速度を変化させる。第*i*スタンドの後方張力、すなわち第(*i*-1)スタンドと第*i*スタンド間の張力は、第2スケジュール値に変更する必要がある、その張力変更に要する第(*i*-1)スタンドの速度変更量 ΔV_{i-1} を出力する。また、ASRにはワイヤードロジックで速度サクセシブ回路が設けられており、第(*i*-1)スタンドよりも上流側のすべてのスタンドでのロール回転速度は、第*i*、第(*i*+1)スタンドの速度変更に伴って、各スタンド間張力が変化しないように修正される。

次に、段付点が第(*i*+1)スタンドにかみ込んだとき、第(*i*+1)スタンドまでの全スタンドに対して、上述の第*i*スタンドの場合と同様の制御が行なわれる。以下同様にして順次、段付点が各スタンドを通過するごとに制御が行なわれ、段付点が巻取機に到達した時点で、第1スケジュールから第

2スケジュールへの変更制御を完了する。これらの制御は図1に示す破線の部分で行ない、ブロックRで段付点を追跡(トラッキング)しながら、ブロックCでスケジュール変更のための制御を行なう。

なお、現状の最大段付量及び段付点通過速度は、最終スタンド出側でそれぞれ0.4mm及び約400mpmである。

5 成 果

既述したこのシステムの成果について次に述べる。

図2にAGCの一成果を示す。同図は仕上板厚1.0mmの例を示すものであるが、他の板厚についてもほぼ同様である。同図の±5%クラシファイでのオンゲージ率は99.7%であり、98.0~99.3%程度といわれていた従来の限界値を更に改善向上するとともに、品質管理の面でも寄与するところが大きであった。

図3に段付量0.1mmの段付圧延実績を示す。段付圧延時もAGCを適用することができることから、厚み計設定切替の過渡時約2mを除きオフゲージは零であることが分かる。

6 結 言

川崎製鉄株式会社と日立製作所は共同して、次代を担うAGCの新方式と段付圧延技術を確立した。このシステム開発は当初から両社の共同研究体制のもとで実施され、単に理論面に走ることなく、実際面からの裏付実験と検証とを重ね、より現実性のあるシステムとしての地歩を固め、新規設備、既設設備を問わず高い適応性をもっている。

最後に、この開発・研究に関し終始熱心な御指導と御助力をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 諸岡, 満仲, 江藤: 冷間タンデムミルの最小自乗偏差板厚制御システム, 昭和53年電気学会全国大会発表論文(1045)
- 2) T. Okamoto: Iron & Steel Eng., 49 (1972) 5, p. 79