

タンデム圧延の制御系の最適化について

Optimization of the Control Systems for Tandem Strip Rolling Mills

阿 高 松 男*

Matsuo ATAKA

最近タンデム圧延作業にコンピュータ・コントロールが採用されるようになってきたがその成果を十分に発揮するためにはシステム（機械系・制御系・作業内容までを含めて）としての最適化を検討しておく必要がある。本報では制御系の最適化ということに目的を絞ってこの方面の研究を展望し著者が作成したシミュレーションモデルを用いて行なってきた研究の一部を紹介しシミュレーションによる解析的研究の得失などをまとめてみた。

1. はじめに

わが国の鉄鋼製品の生産量は世界に比較し得る国がないほど急上昇を続けたので、最新鋭設備があいついで設置された。また製品の多量の世界との競争に打ち勝って輸出するためには品質の向上についてもきびしい要求が課せられた。したがって、生産の中心をなすタンデムミルの作業に対する要求は世界の水準を越えてきびしいものがあり、要求を満たすためには各種の対策がとられていて、その一つとして圧延作業の自動化が取り入れられた。

圧延技術においてすでに確立されている自動化の技術中の大きなものは2種ある。その一つは圧延後の肉厚を測定してこれを公差内に保つフィードバック制御の形態である。いま一つの形態は、圧延作業内容を示す圧延プログラムを自動的に実施させるプログラム制御の形態である。さらに圧延機の高度の自動運転の目的で制御計算機を直結して運転の指示を与えるいわゆるコンピュータ・コントロールの方法が盛んに採用されるようになってきた。これは上記のフィードバック制御とプログラム制御の両性能をそなえているばかりでなく、さらにこれらの両者では実現できなかった新しい機能をも発揮できる強力なものである。タンデムミルの運転条件を支配する独立変数は非常に多く、理想的な作業は人手ではとうてい実現は望めないで、計算機を使用して人手による従来の作業を復元するだけでなく、より高度の要求を盛り込んだ作業方式を新たに採用することも可能になる。

タンデム圧延作業の最適化を実現するためには、作業条件（たとえば、各スタンドの圧下率配分・動力配分・加減速度の加減速パターン・ズーミングの方法……など）のような作業内容を示す）・制御系の特性（たとえば、AGC系・ASR系・形状制御系……などの特性）・機械的特性（たとえば、圧延機剛性などのように機械の構造寸法から決まってくる特性を示す）などの見地からそれら因子の相互作用の影響を考慮してタンデム圧延現象

を総合的に検討してゆく必要のあることはすでに述べた¹⁾。すなわち、コンピュータ・コントロールを採用したとしてもシステムとしての機械系に欠陥があったのではその効果を十分に発揮することは出来ない、また制御系の特性・作業条件が不満のものであっても同様のことがいえる。したがってコンピュータ・コントロールを採用するか否かにかかわらず、タンデム圧延作業の最適化に対する対策を検討しておくことは必要である。システムとしての機械系の改善・作業内容の技術向上・制御系の改善という3拍子がそろい、さらにこれらの特性を考慮した精度のよいプロセス方程式ができてはじめてコンピュータ・コントロールの機能が十分に発揮されるのである。

著者は以前からタンデム圧延作業の最適化を目指して上記3者の見地から研究を進めているが、本報では特に制御系の最適化という見地からその手法と2～3の解析例について述べる。

2. タンデム圧延の制御系について

タンデム圧延の制御系と一口で言ってもそれには種々のものが含まれる。特に代表的なものについて操作量と制御量となる因子を図1に整理して示した。ともかく熱間圧延と冷間圧延とは現象が異なるので、大別分類して示した。すなわち、冷間タンデム圧延の場合には各スタンド間に張力が作用しているため、張力を介して上流側スタンドにおける圧延状態の変化の影響が下流側にまでおよび、逆に下流側の変化の影響が上流側に現われるという非常に複雑な特性を示す。それに反して、熱間タンデム圧延の場合には圧延される材料の温度を介して上流側スタンドにおける圧延条件の影響（履歴現象として）が下流側スタンドに現われるというかなり単調な現象を呈するが、圧延中の真の材料温度の把握が非常に困難なため特性の把握は一層複雑である。しかしこの場合には冷間圧延の場合のような大きなスタンド間張力は存在しないので、下流側スタンドの影響が上流側に溯って現われることもなく、現象が各スタンドごとに独立になる。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

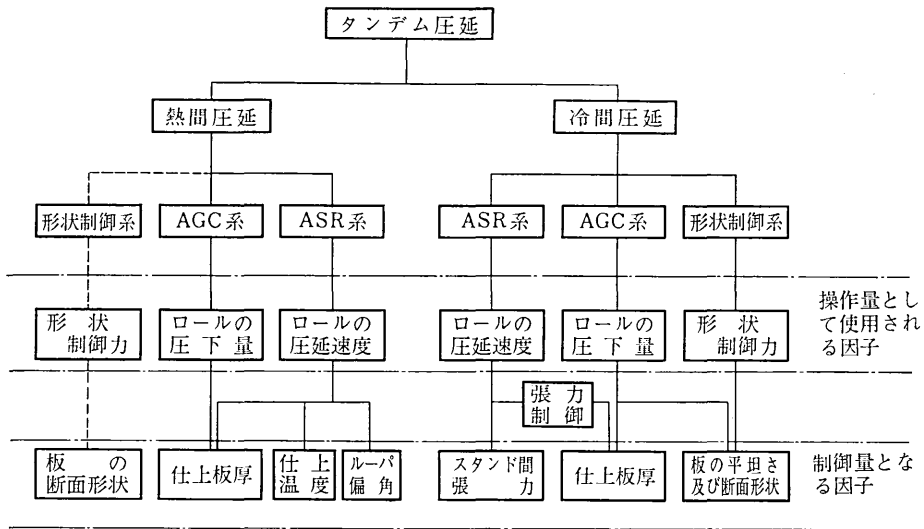


図 1 タンデム圧延の制御系の操作量と制御量との関係

したがって制御系の特性もこれらの現象の特徴をふまえて検討する必要があるので、冷間と熱間とに大別した。

図中に点線で示した部分はまだ制御系が導入されていないか、あるいは導入されていてもあまり使用されていない、実用の域には程遠いものを示す。定常圧延時の長手方向の板厚変動の制御（広義の意味で AGC 系および ASR 系をまとめて考えた制御系）はかなり古くから技術課題として取り扱われ、工業技術として一応の完成に達している。しかし通板時ならびに加減速時における板厚制御方式については、理論的な研究にもとづく明確な対策は公表されたものがない。圧延速度が逐年上昇するに従い、加減速時に発生するオフゲージ部の長さが増大する傾向があるので、この加減速時の板厚制御の問題が重大になってきた。コイルの絶対長の増大、加減速時間の短縮などの対策により、この種のオフゲージ部の占める比率はある程度減少できるが、その損失は累積されると漠大になり無視できないばかりでなく、加減速時間の短縮のためにはモータ容量を増大させることが必要となるので、加減速時の対策のために多大な設備費をかける結果となりはなはだ不利である。したがってこの方面の技術はまだ未熟であるといっても過言ではない。また、形状制御については冷間圧延の定常圧延時の形状制御が最近行なわれるようになってきたが、システムとしてポリシーは一定しておらず、極言すれば現場的な試みにとどまっている場合がほとんどである。今後は優秀なセンサーの開発をも含めてこの方面の系統的な研究を待たなければならない。

次に制御系の最適化を目指して、現在までに行われてきた研究を展望してみよう。

3. 従来の研究の展望

タンデム圧延の制御系の代表的なものは図 1 に示してあるが、そのうちで製品の寸法精度と密接な関係のある AGC 系については過去 20 年間に BISRA などの研究により実用化され、その成果が種々報告されている。一般にタンデム圧延の制御系の研究は現場の経験と勘を頼りにトライ・アンド・エラー方式で断片的に行われてきたものがほとんどである。そして研究の中心となったものも製品の寸法精度と直接関係のある AGC 系であったが、系統的に行われたものは皆無である。近年になってそれらを解析的に扱った研究が現われてきた。すなわち、1955 年に Hessenberg & Jenkins によって、圧下およびロール回転速度設定値の両者の変化が板厚と張力とにおよぼす影響を求める基本式が導入され、定性的検討が若干なされたのが始めてである²⁾。その後 Phillips は圧延荷重・圧延トルク・中立点板厚の微小変動率と出口板厚・入口板厚・後方張力・前方張力の微小変動率とを一次式で結び、薄板圧延の場合についてその係数を Bland & Ford の理論式³⁾によって求め、コールドタンデムミルの板厚微細調節すなわち vernier gauge control system (最終スタンドのロール速度により張力を変化させ仕上げ板厚の制御を行う) に対するアナログ・シミュレーションを行っている。特にある定常状態から別の定常状態に移行する場合を対象として板厚制御装置の満たすべき性能の検討に主眼を置いている⁴⁾。Courcoulas & Ham は圧延荷重および圧延トルク両者の微小変動と圧下設定値・出口板厚・入口板厚・後方張力・前方張力の微小変動とを結び、体積速度一定の原理と合わせて incremental equilibrium equation を導き、これを用いて薄板圧延の場合における圧下およびロール回転速

度設定値の微小変動が板厚・材料速度・張力などに及ぼす影響を数値計算した⁵⁾。Lianis & Ford は前記の両者の研究を進展させ、BISRA の 4 段圧延機での実験値との比較を行った⁶⁾。

Phillips や Ham の手法は現在までのタンデム圧延の制御系の研究の 2 つの主流の基礎となった。すなわち、一つは各因子の変動量を線型の式で結び、アナログ計算機を用いてシミュレーションを行う方法で、他の一つはある定常状態から他の定常状態に移行する場合、ある因子（おもに圧延条件を規定する因子）が他の因子（おもに製品の形状を規定する因子）に影響を及ぼす程度を incremental equilibrium equation を用いてデジタル計算機で計算してゆく方法で、いわゆる影響係数を媒介として特性を求める手法である。先ず、前者の流れをくむものとして Sekulic & Alexander は BISRA のアナログ計算機を利用して 4 スタンドタンデムミルの総合特性を研究するシミュレータを組み、たとえば素材板厚のステップ状の変化に対して最終スタンドを不変に保つように 1 号スタンドの前方張力を制御する場合の各種の因子の応答などを示し、板厚自動制御の新しい系を提案した⁷⁾。この後、アナログ計算機を用いて制御系の最適化を目指した研究はいくつか報告されているが、アナログ計算機は精度の点ではデジタル計算機に及ばないこと、さらに各変数の変化量が大きい場合には用いる数式の各係数が変わってくるにもかかわらず一定としているので誤差が生じること、近似式を導く過程において比較的無理な仮定がはいっていることなどの欠点があるが、多くのケースのシミュレーションを短時間で行うには有利である。また、後者の流れをくむものとして美坂は実際の圧延作業を圧延理論を応用して解析することに主眼を置き、オペレータまたは制御系の操作量である各スタンドのスクリー位置およびロール設定速度の微小変化と各スタンドの馬力・張力・板厚の変化との関係を明らかにしようとした。すなわちある定常状態から微小な変化が生じ、新しい定常状態に移行する際の各変数の変化量の間の相互関係について定量的考察（いわゆる影響係数を媒介として）を行う基本方針を明らかにした^{8), 9)}。これは Ham らの流れをくむ一連の研究を整理して明快な形にしたものであるといえる。さらにこれを進展させて板の幅方向の板厚分布をも考慮した鈴木・鎌田の研究があるが^{10), 11)}、これらの影響係数の考え方は実際の現場では適応制御という形で計算機制御の一役をになっている。しかし外乱の変化量が小さい場合の制御特性は前記のアナログ・シミュレーションかまたは影響係数による考察で充分であるが、外乱の変化量の大きい場合には前記の両手法とも不利であるので、制御系の特性や加減速時または通板時の特性を検討するために影響係数の考え方を採用したシミュレーションモデルが開発され^{12), 13)}、

その後田沼・大成はそれとは別に圧延理論式を微小時間ごとに非線型連立方程式として解いてゆくモデルを開発し¹⁴⁾、M. Jamhidi & P. Kokotovic はコイラーのモータ特性および圧下モータ・駆動モータなどのモータ特性（トルクと界磁電流との関係）をも導入して動特性をシミュレートできる数学モデルを発表した¹⁵⁾。さらに小西・鈴木は制御系を一般的な型で数学モデルの中に導入し制御効果を解析的に論じられる手法を開発し、制御量のパターン認識ができればそれに見合った制御系の形態を提案できるものである¹⁶⁾。しかし最適な制御系に対する制御量のパターンの与え方が難しいので、このモデルを生かしたこの方面の研究はなされておらず、制御系を想定してシミュレーションを行うにとどまっている。

また、形状制御に関する研究は単スタンドにおける制御技術の研究はかなり行われているが、マニュアルな部分が入り込まない完全に自動的な形状制御はまだ確立していない。まして現象の複雑なタンデム圧延における形状制御の系統的な研究は皆無に等しい¹⁷⁾。

現在までに制御系の最適化を目指して上記のような研究が行われているが、どの研究も制御系の最適化ということを議論するにはあまりにも断片的である。しかし若干のシミュレーションによって少なくとも制御系の最小限の必要条件ぐらひは発見できるので、現在の制御系をより理想的なものに近づけることはできよう。このような観点からも著者も加減速時のシミュレーションを行なっているので、その計算手法と 2~3 の結果について次に述べる。

4. シミュレーションによる制御系の検討例

1. 記号

H : 入側平均板厚 (mm)	h : 出側平均板厚 (mm)
H_e : 入側端部板厚 (mm)	h_e : 出側端部板厚 (mm)
H_c : 入側中央板厚 (mm)	h_c : 出側中央板厚 (mm)
F : 形状制御力 (kg)	Y : 平均変形抵抗 (kg/mm ²)
L : スタンド間隔 (mm)	S_r : ロール間隙 (mm)
t_f : 前方張力 (kg/mm ²)	t_b : 後方張力 (kg/mm ²)
T : 圧延温度 (°C)	u : 摩擦係数 (無次元)
v_f : 材料流出速度 (mm/s)	v_b : 材料流入速度 (mm/s)
\dot{V} : ワークロール加速度 (mm/s ²)	θ : ループ偏角 (rad)

V : ワークロール速度 (mm/s)

2. 冷間圧延の場合

前述したように加減速時にはかなりのオフゲージ量であるけれども、現在加減速時のオフゲージに対する対策として加減速時間を短縮して AGC を使用しない方法が採られているが、逆に加減速時間を多少延ばしてもその期間に AGC を完全に作動させることによってオフゲージを除去することも考えられる。著者はこの後者の観点

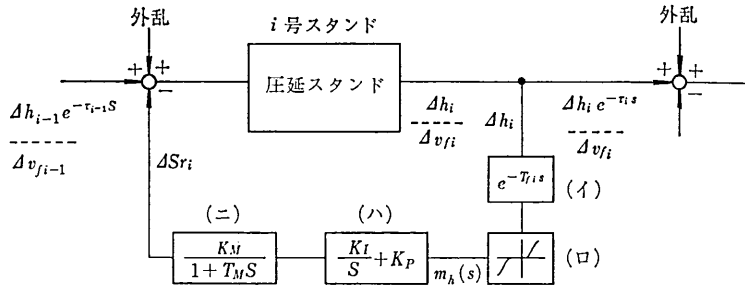


図2 AGC 系のブロック図

に立って加減速時における板厚制御の解析的研究を行ったが、その概要を述べる。

解析に用いたモデルの基本的構成の詳細についてはすでに発表してあるので、ここでは簡単に述べる¹²⁾。タンデム圧延の特性を律する基本方程式は i 号スタンドに関して、

- 1) ロール変形とロール出側板の形状との幾何学的適合条件式

$$\Phi_i(F_i, H_{c_i}, H_{e_i}, h_{c_i}, h_{e_i}, t_{f_i}, t_{b_i}, \mu_i, Y_i) - (h_{c_i} - h_{e_i})/2 = 0 \quad (1)$$

- 2) 平均板厚の定義式

$$\alpha_i h_{c_i} + \beta_i h_{e_i} = 2h_i \quad (2)$$

(但し、 α_i, β_i は重みを示し、計算では $\alpha_i = \beta_i = 1$)

- 3) 各スタンドのロール間隙における材料の流入・流出量の関係式

$$\left. \begin{aligned} v_{f_{i-1}} H_i &= v_{f_i} h_i \\ U &= v_{f_i} h_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- 4) 圧延条件とロール出側板厚との関係式

$$h_i = h_i(F_i, S_{r_i}, H_i, t_{f_i}, t_{b_i}, \mu_i, Y_i) \quad (4)$$

- 5) 圧延条件とロール出側材料流出速度との関係式

$$v_{f_i} = v_{f_i}(V_i, \dot{V}_i, H_i, h_i, t_{f_i}, t_{b_i}, \mu_i, Y_i) \quad (5)$$

- 6) ワークロール速度と摩擦係数との関係式

$$\mu_i = f(V_i) \quad (6)$$

- 7) ロール設定間隙とバックアップロール速度との関係式

$$S_{r_i} = g(V_{B_i}) \quad (7)$$

- 8) ワークロール速度とバックアップロール速度との関係式

$$V_i = V_{B_i} \quad (8)$$

- 9) 張力の関係式

$$h_i t_{f_i} = H_{i+1} t_{b_{i+1}} \quad (9)$$

- 10) 板厚の伝達遅れの関係式

$$\left. \begin{aligned} H_{i+1}(t) &= h_i(t - \tau_i) \\ H_{c_i}(tt) &= h_{c_i}(t - \tau_i) \\ H_{e_{i+1}}(t) &= h_{e_i}(t - \tau_i) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(但し、 τ_i を伝達時間遅れとする)

これらの関係式を Taylor 展開し線型化し、微小時間内の変化量を逐次計算して求めてゆく。

ここでは加減速時の板厚制御は板厚偏差を検出した当該スタンドのロール間隙を調節する場合を扱った。AGC のブロック線図を図2に示す。ただし、(イ)は検出遅れを示すもので、 T_{r_i} は検出遅れ時間を示す。たとえばX線板厚測定装置を採用した場合のように板厚偏差の検出機構がスタンド間にある時には検出遅れは大きくなり、ゲージメータを採用した場合のように板厚偏差の検出機構がスタンドにある時には検出遅れはほとんど零に等しい。(ロ)は検出した板厚偏差が感帯からはずれる程大きいかどうかを比較して制御回路に始動の命令を出す論理ブロックを示す。(ハ)はAGC系の操作量を指定する制御ブロックを示す。(ニ)は圧下モータの機械的な遅れを示す。解析では(ハ)および(ニ)のブロックを一緒にして操作量 ΔS_{r_i} を

$$\Delta S_{r_i} = g' m_{h_i} (1 - e^{-\alpha t}) + g_i \int m_{h_i} dt \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \quad (11)$$

と表わして、ゲイン g_i', g_i および時定数 α の配分の仕方を種々に変えた場合の応答性を板厚と形状の観点から整理して、加減速時に対する理想的なAGCのあり方について検討した。すなわち、影響係数の考察によりロール間隙変化が製品の板厚変化に与える影響が大きいのは上流スタンドと下流スタンドとであることがわかっているので、AGCの設置スタンドを表1のようにきめた。

AGCを設置するスタンドを○印で示した。

表1 AGCを設置するスタンド

スタンド	1	2	3	4	5
ケース					
1	/	/	/	/	/
2	○	○	○	○	○
3	○	○	/	/	/
4	○	○	/	/	○
5	○	○	/	○	/
6	/	/	/	○	○
7	○	/	/	/	○
8	/	/	/	/	○

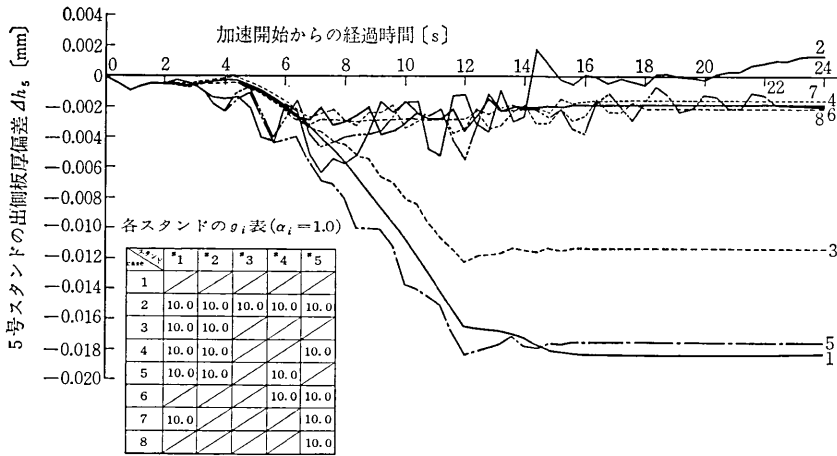


図 3 加速時における最終スタンドの出側板厚偏差

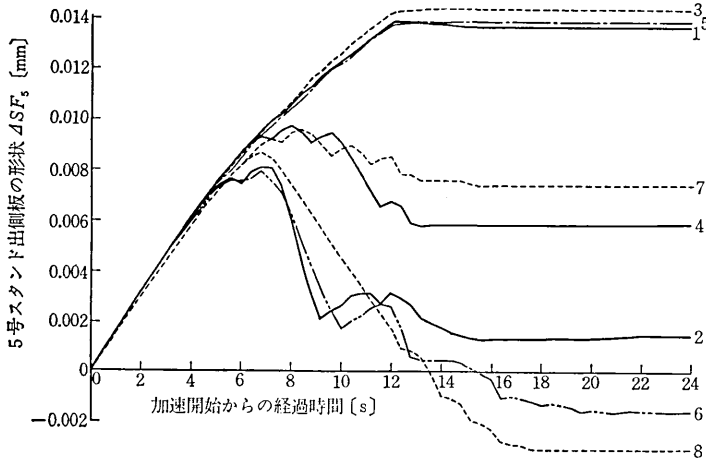


図 4 加速時における最終スタンドの出側板の形状変化 ($\Delta SF = \Delta h_{cs} - \Delta h_{es}$)

シミュレーションの結果を最終スタンドの出側板厚・形状について整理したものが図 3・4 である。ただし、系の安定性をよくするために各スタンドの出側板厚の $\pm 0.2\%$ を不感帯幅とした。図 3 は時定数 $\alpha_i = 1.0$ 、ゲイン $g_i' = 0$ 、 $g_i = 10.0$ とし、各スタンドのゲイン配分を表のように変えた場合の最終スタンドの出側板厚の応答現象を示す。図より 5 号スタンドに AGC のあるケース 2・4・6・7・8 の場合が板厚偏差が少なく早く安定する。したがって加減速時に最終スタンドで速度効果を打消す対策が必要である。図 4 はこの場合の形状変化を示したものである。一般に 5 号スタンドに AGC のあるケースでは形状も良くなっている。図 5 は応答性評価関数として $J_i = T_i \int_0^{T_i} |m_h(t)| dt$ (T_i は系の安定するまでの時間) を定義し、これを縦軸にとり横軸に制御方式を示す前述のケース 1~8 までをとる。図より 5 号スタンドに AGC のあるケース 2・6・7・8 はゲイン $g_i = 10.0$ の時効果が明瞭に表われている。図 6 は上述のゲイン $g_i = 10.0$ の場合を形状について整理したものである。

本研究では従来の考え方とは逆に加減速時間を多少延ばしても、その期間中に AGC を完全に作動させることによってオフゲージを除去する方針で作業改善をはかることを目的として、加減速時の板厚制御のあり方に考察を加えてみた。AGC の方式としては実在のものに従

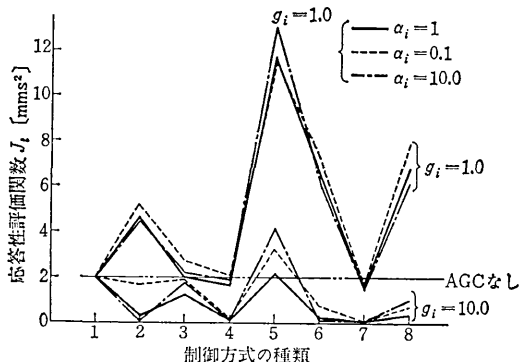


図 5 圧下モータの時定数 ($1/\alpha_i$) およびゲイン (g_i) が応答性に与える影響

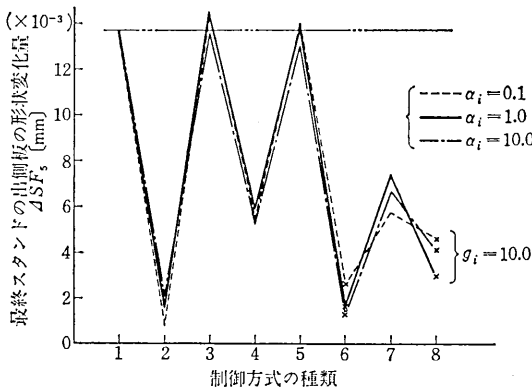


図 6 下圧モータの時定数 ($1/\alpha_i$) およびゲイン (g_i) が板の形状に与える影響 ($\Delta SF_s = \Delta h_{cs} - \Delta h_{es}$)

わなないで、基本的な型式を仮定したので、総合的なシミュレーションの結果が一般の作業指針となることは主張を得ないが、本解析では加減速時には従来の AGC の考え方と異って、むしろ下流側のスタンドでも板厚制御に対する積極的な対策が必要であることがわかった。

3. 熱間圧延の場合

薄板の形状および寸法精度に対する要求が厳しくなるにつれて、当然の結果として熱延原板の形状および寸法精度の向上が検討されるようになってきたが、熱間タンDEM 圧延の板厚制御系はまだその効果が完全とはいえない。おそらく、現在の制御系は制御対象としての圧延特性は現場の経験から得られた不明確な特性であるから、作業内容が大幅に変化して作業者が圧延特性を認識を得ない場合には充分の能力を発揮できない。したがって加減速時のように速度が広範囲に変化するような場合にはどのような制御系が最も効果を発揮し得るかは全くわかっていない。したがって本報では熱間タンDEM 圧延の主流をなす低張力ループの場合についてシミュレーションモデルの概要を述べ、ループ ASR 系の適正なゲイン配分の検討をした結果について簡単に述べる¹³⁾。

モデルの基本的な考え方は冷延の場合と同じである。

すなわち、基本方程式は i 号スタンドに関して

- 1) ロールの変形と出側板の形状との幾何学的適合条件式

$$\Phi_i(F_i, H_{ei}, H_{ci}, h_{ci}, h_{ei}, t_{fi}, t_{bi}, Y_i) - (h_{ci} - h_{ei})/2 = 0 \quad (12)$$

- 2) 平均板厚の定義式

$$\eta_i h_{ci} + \zeta_i h_{ei} = 2h_i \quad (13)$$

(ただし、 η_i, ζ_i は重みを示し、計算では $\eta_i = \zeta_i = 1$)

- 3) 圧延条件とロール出側板厚との関係式

$$h_i = h_i(F_i, S_{ri}, H_i, t_{fi}, t_{bi}, Y_i) \quad (14)$$

- 4) 圧延条件と材料流出速度との関係式

$$v_{fi} = v_{fi}(V_i, \dot{V}_i, H_i, h_i, t_{fi}, t_{bi}, Y_i) \quad (15)$$

- 5) ロール間隙における材料の流入流出量の関係式

$$H_i v_{bi} = h_i v_{fi} \quad (16)$$

- 6) ロール間隙とバックアップロール速度との関係式

$$S_{ri} = g_i(V_{Bi}) \quad (17)$$

- 7) バックアップロール速度とワークロール速度との関係式

$$V_i = V_{Bi} \quad (18)$$

- 8) 圧延条件と平均変形抵抗 Y_i との関係式

$$Y_i = Y_i(V_i, H_i, h_i, T_i) \quad (19)$$

- 9) 張力の関係式

$$t_{fi} h_i = t_{bi+1} H_{i+1} = C_i \quad (20)$$

- 10) 圧延温度 T_i に関する式

$$T_i = \phi_i(T_{i-1}, v_{fi-1}, \theta_{i-1}, H_i, h_i, Y_i) \quad (21)$$

- 11) 板厚の伝達遅れの関係式

$$\begin{aligned} H_{i+1}(t) &= h_i(t - \tau_i) \\ H_{ci+1}(t) &= h_{ci}(t - \tau_i) \\ H_{ei+1}(t) &= h_{ei}(t - \pi_i) \end{aligned} \quad (22)$$

- 12) ループ偏角 $\theta_{i-1, i}$ と材料速度との関係式

$$\theta_{i-1, i}(t) = \theta_{i-1, i}(0) + \int_0^t q(v_{fi-1}(t) - v_{bi}(t)) dt \quad (23)$$

この場合には各スタンドの独立性が強いので、冷延の場合には各スタンドで成り立つ関係式を全スタンドにつ

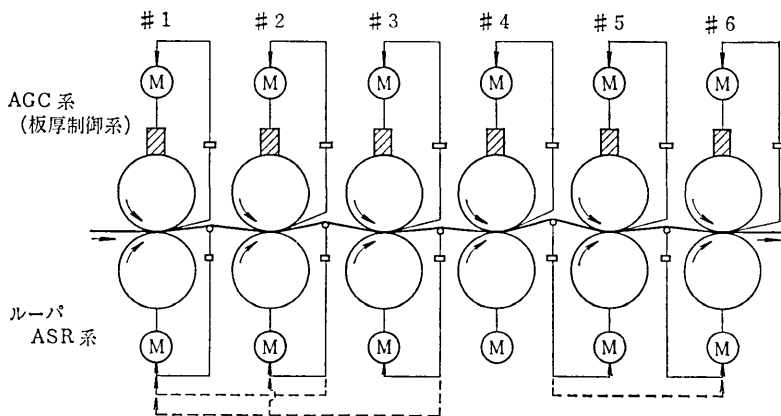


図 7 想定した熱間タンDEM 圧延機系の概略図

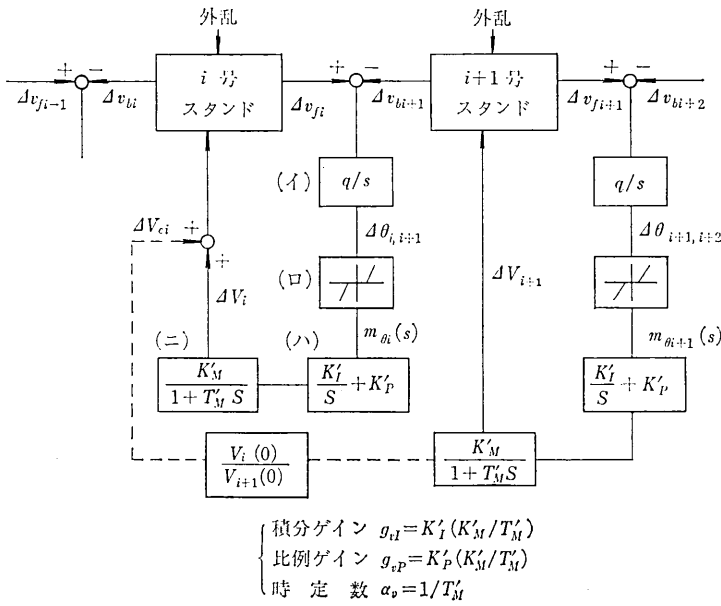


図 8 ルーパ ASR 系のブロック図

いて連立させて解いた手法とは異なり、各スタンドごとに上記の関係式だけを独立させて各スタンドにおける未知変数の変化量を微小時間ごとに逐次求めてゆく。解析で想定した圧延機系を図 7 に示し、導入した制御系のブ

ロック図を図 8 に示した。

シミュレーション結果を次に示すが、本解析では加減速時におけるルーパ ASR 系の適正なゲイン配分を検討するのが目的であるので、ルーパ偏角とゲイン配分との関係のみを示した。図 9 はルーパ ASR 系の比例ゲイン g_{vp} を一様に 5000 とした場合の各スタンド間材料のルーパ偏角変化を示す。この場合にはゲインが大きすぎるため制御のゆきすぎを生じてルーパ偏角 $\theta_{5,6}$ が発散ぎみになる。それに対し図 10 のように比例ゲイン g_{vp} を一様に 100 とした場合には制御効果が現われず反対側に発散ぎみになる。図 11 は制御スタンドの加速開始時における速度比に等しくゲイン配分比をとった場合であるが、この場合には制御効果がよく現われている。また、図 12 には不感帯を零とした場合である。不感帯を小さくすれば制御効果が早く現われることがわかる。以上のことは積分ゲインについてもいえるわけであろう。シミュレーショ

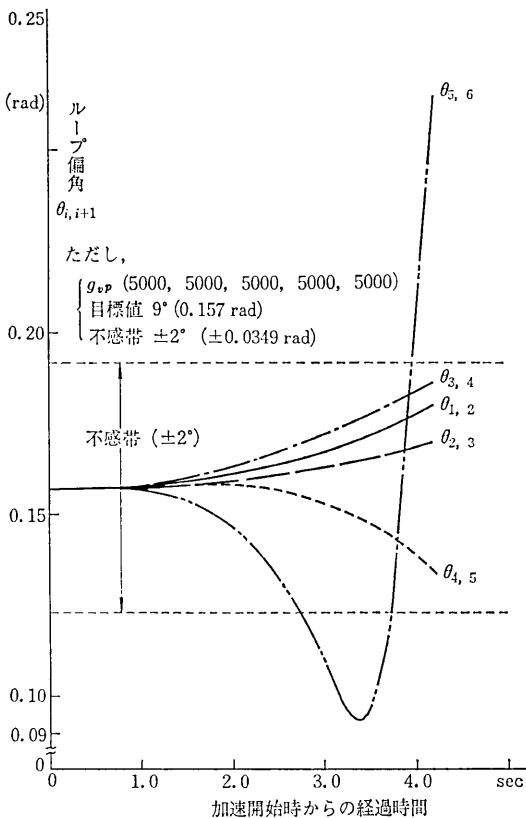


図 9 加速時においてスタンド間の材料が作るルーパ偏角変化

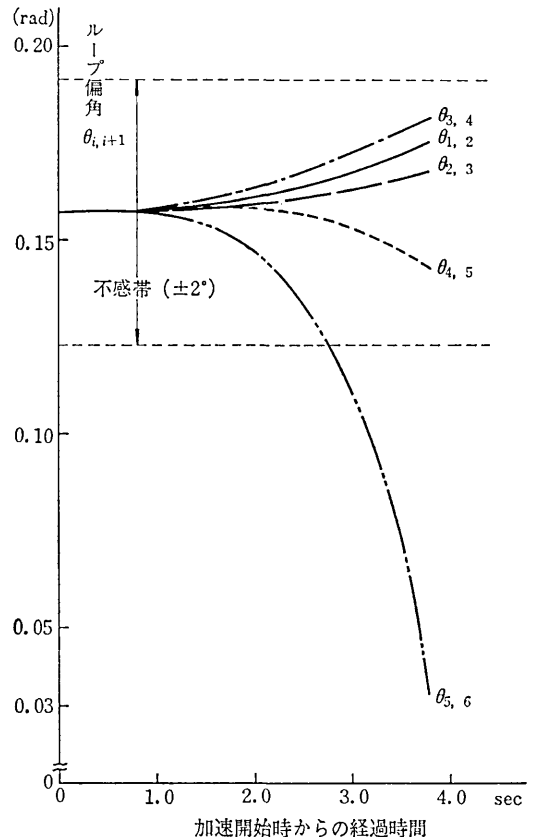


図 10 加速時においてスタンド間の材料が作るルーパ偏角変化

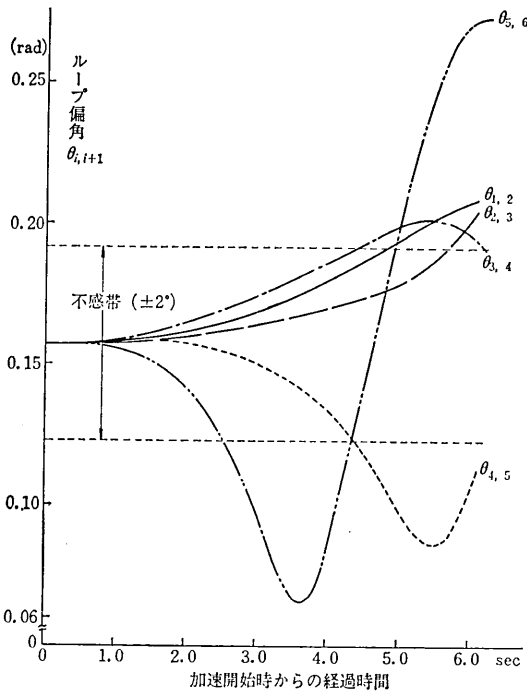


図 11 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化

ンよりルーパー ASR 系の適正なゲイン配分は加減開始時における制御スタンドの速度比とゲイン配分比を等しくすればよいことがわかった。

5. む す び

すでに述べたようにタンDEM 圧延作業の最適化を考えるには作業条件・機械的特性・制御系の特性という3つの見地から検討されなければならないが、本報ではその1つの視点である制御系の最適化ということに目的を絞って、この方面の研究の進められている現状を紹介し、制御系の最適化を目指して著者が行っている研究の一端を示した。この方面の研究の主流となっているシミュレーションモデルによる解析的研究は最適な制御系を見出すためには非常に多数のシミュレーションを行う必要があるという欠点がある反面、現存しないような全く新しい制御形態を想定してシミュレーションを行うことができるという利点があるので、現場の経験や勘から作られた不明確な制御特性に固執せず新しい制御系の開発が可能である。著者の研究結果はその一例であるといえる。今後、形状制御の問題も含めて、タンDEM 圧延作業に最適な制御系の開発研究がさらに活発に行われてゆく

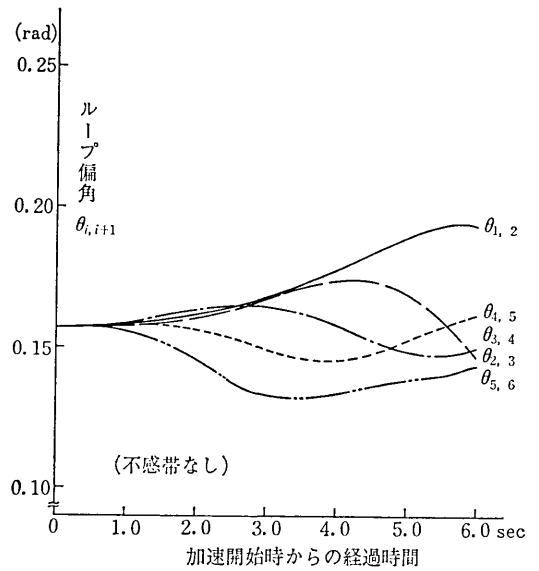


図 12 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化 (不感帯なし)

事を願って本報を終る。

なお、本研究を進めるに際して終始適切なお助言を賜った鈴木教授に心から謝意を表します。

(1973年8月3日受理)

参 考 文 献

- 1) 阿高: 生産研究, 24-8 (1972-8), p. 297
- 2) W.C.F. Hessenberg & W.N. Jenkins; Proc. Inst. Mech. Engr., 169 (1955), p. 1051
- 3) H. Ford, E. Ellsi & D.R. Bland; J. Iron Steel Inst., 168 (1951-5), p. 57
- 4) R.A. Phillips; Amer. Inst. Elect. Engr., (1957-1), p. 355
- 5) J.H. Courcoulas & J.M. Ham; Amer. Inst. Elect. Engr., (1957-1), p. 363
- 6) G. Lianis & H. Ford; Proc. Inst. Mech. Engr., (1957), p. 757
- 7) M.R. Sekulic & J.M. Alexander; J. Mech. Engng. Sci, 4-4 (1962), p. 301
- 8) 美坂: 塑性と加工, 8-75 (1967-4)
- 9) 美坂・高松: 塑性と加工, 4-27 (1963-4)
- 10) 鎌田・鈴木: 塑性と加工, 9-89 (1968-6), p. 395
- 11) 鎌田・鈴木: 塑性と加工, 9-90 (1968-7), p. 459
- 12) 阿高: 生産研究, 22-7 (1970-7), p. 310
- 13) 阿高: 生産研究, 24-7 (1972-7), p. 271
- 14) 田沼・大成: 塑性と加工, 13-133 (1972-2), p. 122
- 15) M. Jamshidi & P. Kokotovic; IJILU. ENG, 70-204 (1970-3), Report R-459
- 16) 小西・鈴木: 第22回塑加連講論 (1971-11)
- 17) 有村・岡戸: 第23回塑加連講論 (1972-11)