

タンデム圧延の総合特性の解析

Study on Characteristics of Tandem Strip Mills

—第8報 熱間タンデム圧延のシミュレーション—

—(8) Simulation for Hot Tandem Rolling—

阿 高 松 男*

Matsuo ATAKA

1. ま え が き

圧延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、熱間タンデム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し得ない場合には十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するかは全くわかっていない。したがって、本報では熱間タンデム圧延の主流をなす低張力ループの場合について過渡現象のシミュレーションモデルの概要と計算例について報告する。

2. 記号および現象の把握

H	入側平均板厚 (mm)
h	出側平均板厚 (mm)
H_c	入側中央板厚 (mm)
h_c	出側中央板厚 (mm)
H_e	入側端部板厚 (mm)
h_e	出側端部板厚 (mm)
F	形状制御力 (kg)
L	スタンド間隔 (mm)
S_r	ロール間隙 (mm)
T	圧延温度 (°C)
t_f	前方張力 (kg/mm ²)
t_b	後方張力 (kg/mm ²)
V	ワークロール速度 (mm/s)
V_B	バックアップロール速度 (mm/s)
v_f	材料流出速度 (mm/s)
v_b	材料流入速度 (mm/s)
θ	ループ偏角 (rad)
\dot{V}	ワークロール加速度 (mm/s)

一般に冷間圧延の場合にはスタンド間にある張力を介して上流スタンドの影響が下流スタンドに現われたり、また下流スタンドの影響が上流スタンドに逆に現われてくるような現象があったけれども、熱間圧延の場合にはスタンド間に存在する張力は非常に微弱であってそれが圧延状態を左右するというようなものではない。しかもスタンド間にループがあってスタンド間相互の独立性を強めている。すなわち、あるスタンドに外乱が入ってそのスタンドの圧延状態に変化をもたらしても、その時発生した板厚偏差が更に下流側のスタンドに到達しなければ、下流側のスタンドには影響が現われない。したがって、このような現象を考慮し、更に加減速時に生ずる板厚変化に影響を与える要因として、1) バックアップロールの軸受の油膜厚さの変化、2) ロール等の回転部分の慣性モーメントの影響、3) 駆動モータの加速特性、4) 変形速度の変形抵抗への影響、5) ループ特性などを考慮してシミュレーションモデルを作成した。

3. 数式モデルの基本的概念

モデルの基本的な考え方は冷延の場合^{1)~3)}と同じであるので概要のみを簡単に述べる。加減速時の圧延状態を律する基本方程式は i 号スタンドに関しては次のようになる。

- 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

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

- 2) 平均板厚の定義式

$$\eta_i h_{ci} + \xi_i h_{ei} = 2h_i \quad (\eta_i, \xi_i \text{ は重み})$$

- 3) 圧延条件とロール出側板厚との関係式

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

- 4) 圧延条件と材料流出速度との関係式

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

- 5) ロール間隙における材料の出入量の関係式

$$H_i v_{bi} = h_i v_{fi}$$

- 6) ロール間隙とバックアップロール速度との関係式

$$S_{ri} = g_i(V_{Bi})$$

* 東京大学生産技術研究所 第2部

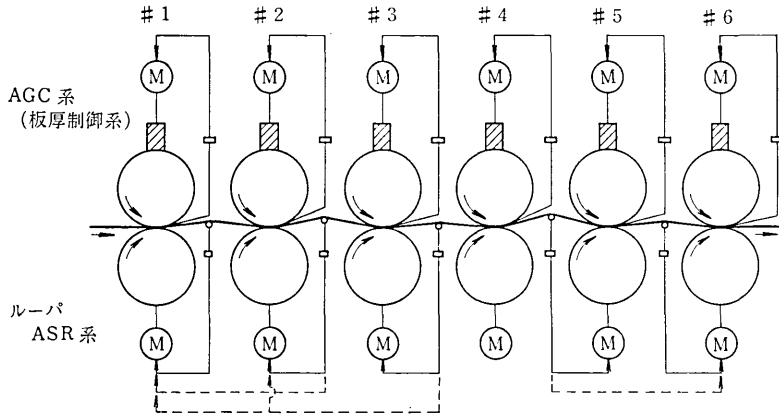


図1 想定した熱間タンデム圧延機系の概略図

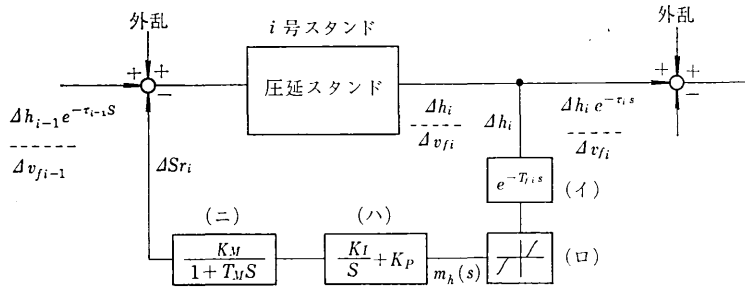


図2 AGC系のブロック図

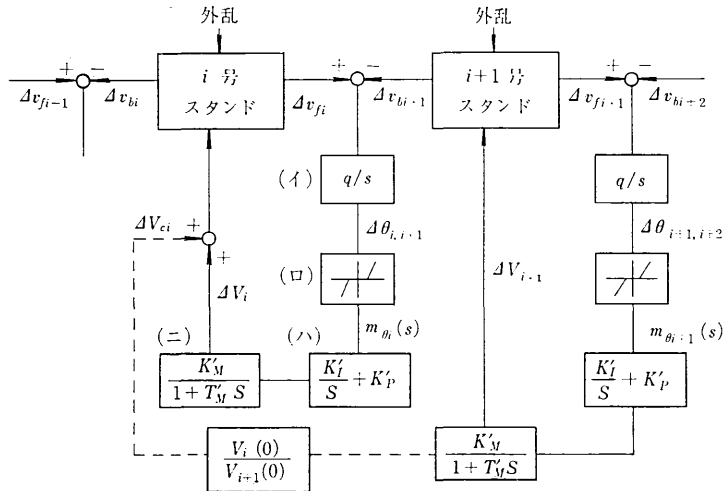


図3 ループASR系のブロック図

7) バックアップロール速度とワークロール速度の関係式

$$V_i = V_{Bi}$$

8) 圧延条件と平均変形抵抗 Y_i との関係式

$$Y_i = Y_i(V_i, H_i, h_i, T_i)$$

9) 張力と板厚との関係式

$$t_{fi} h_i = t_{\delta i+1} H_{i+1} = C_i$$

10) 板厚の伝達遅れの関係式 (τ_i を伝達時間遅れ)

$$H_{i+1}(t) = h_i(t - \tau_i), \quad H_{ei+1}(t) = h_{ei}(t - \tau_i)$$

$$H_{ei+1}(t) = h_{ei}(t - \tau_i)$$

表1 未知変数と既知変数 (但し, i 号スタンドの場合)

外乱および既知変数	
形状制御力の変化量 ΔF_i	ロール間隙の変化量 $\Delta S_{r,i}$
ロール設定速度の変化量 ΔV_i	
伝達時間遅れを考慮して求める変数	
入側平均板厚の変化量 ΔH_i	入側端部板厚の変化量 $\Delta H_{e,i}$
入側中央板厚の変化量 $\Delta H_{c,i}$	材料温度の変化量 ΔT_i
未知 (応答) 変数	
出側平均板厚の変化量 Δh_i	材料流出速度の変化量 $\Delta v_{f,i}$
出側中央板厚の変化量 $\Delta h_{c,i}$	材料流入速度の変化量 $\Delta v_{b,i}$
出側端部板厚の変化量 $\Delta h_{e,i}$	平均変形抵抗の変化量 ΔY_i

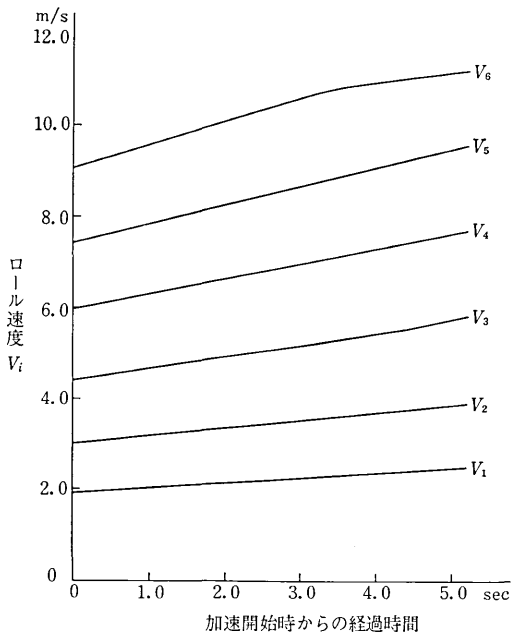


図4 ルーバ ASR 系を導入した熱間タンデム圧延機系の加速特性

11) ループ偏角 $\theta_{i-1,i}$ と材料速度との関係式

$$\theta_{i-1,i}(t) = \theta_{i-1,i}(0) + \int_0^t (v_{f,i-1}(t) - v_{b,i}(t)) dt$$

本報では各スタンドの独立性を尊重したので, 各スタンドごとに上記の式だけを連立させて各スタンドにおける未知変数の変化量を求め, 過渡現象をシミュレートした。ただし, 変数関係を表1に示す。また, 本報で想定した圧延機系を図1に示し, 導入した制御系のブロック図を図2, 図3に示した。

4. 計算例と考察

本報のシミュレーションモデルで4号スタンドのロール速度を6秒間で6→8m/sに直線的に増速した場合の

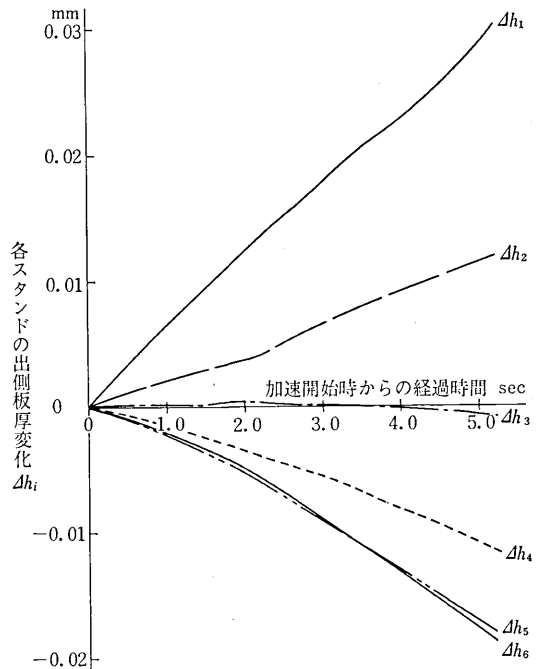


図5 加速期間中の各スタンドの出側板厚変化

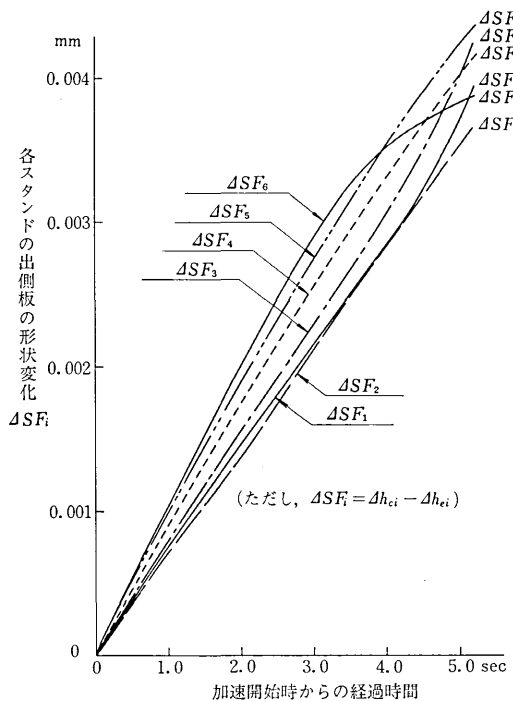


図6 加速期間中の各スタンドの出側板の形状変化

計算例を図4・5・6・7・8に示す (ただし, AGC系のゲインは零とした)。図4はこの場合の増速経路を示す。加速の途中で増速の傾向が変化しているが, これはルーバ ASR 系の制御機構が働いて速度調整を行なった結果が出ているものである。図5は各スタンドの出側板厚変

研究速報

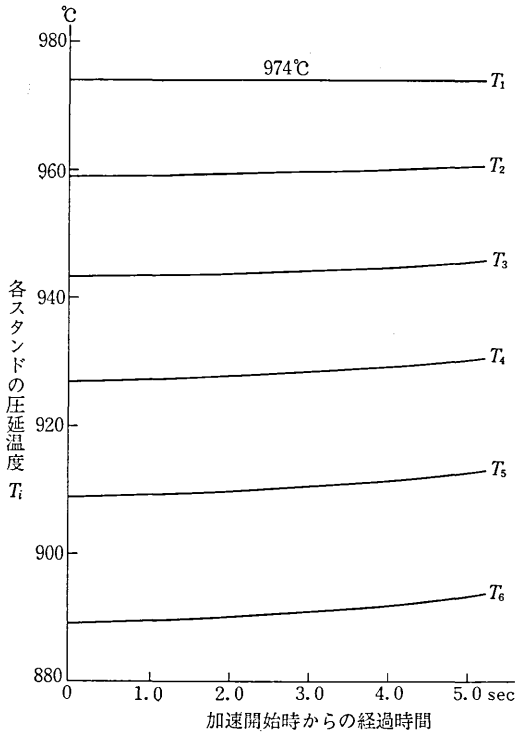


図7 加速期間中の各スタンドの圧延温度変化

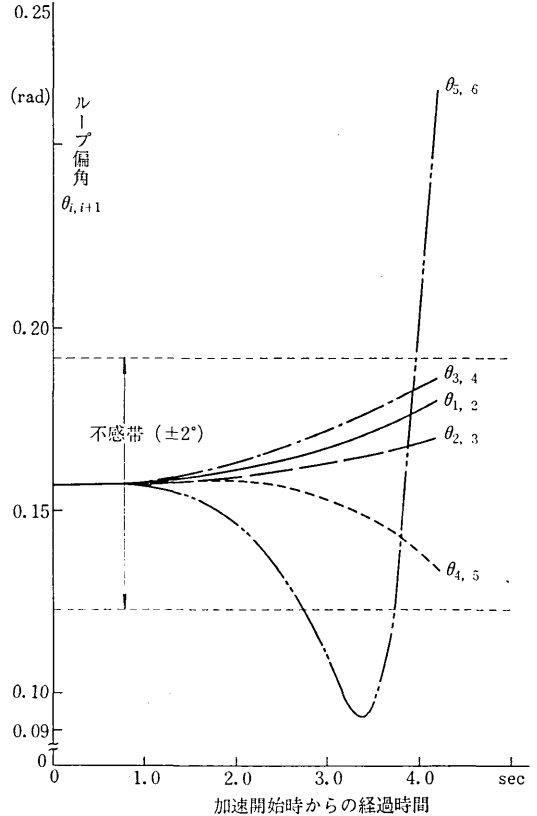


図9 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化を示す。上流スタンドでは歪速度の影響が温度上昇や油膜変化の影響よりも強く現われて板厚は増加ぎみになり、下流スタンドは後者の影響が強く現われて板厚は減少ぎみになる。しかも下流スタンドでは歪速度の影響と温度上昇の影響とが相殺し合って油膜変化の影響が顕著に現われてくるように思われる。図6は各スタンドの出側板のクラウン形状変化を示すが、この図が前述の現象をよく表わしている。すなわち、図4で6号スタンドの増速傾向の異なっている部分に対応して6号スタンドの出側板のクラウン形状の増え方が異なってくる。ただし、加速前には各スタンドの出側板は、平坦であるものとした。図7は各スタンドの圧延温度の上昇するようすを示した。図8は各スタンド間材料のループ偏角変化を示す。この場合、ループ ASR 系には一様に積分ゲイン g_{vI} を 500 として計算した。ただし、図3に示した点線の回路は導入してない。この場合ループ ASR 系のゲイン配分が適正でなかったために制御効果があまり現われなかったので加速終了前に計算を中止した。したがって、ループ ASR 系の適正なゲイン配分の検討が早急に必要であることを痛感したので、次にループ ASR 系の適正なゲイン配分の検討を行なったシミュレーション結果について

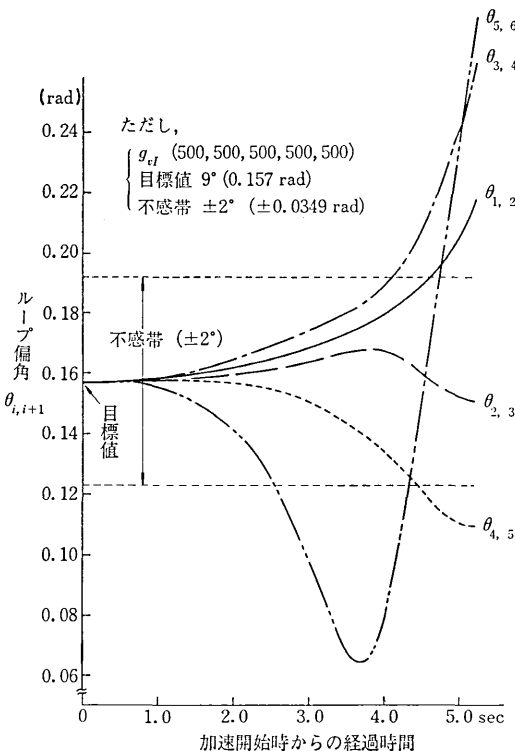


図8 加速期間中の各スタンド間材料のループ偏角変化

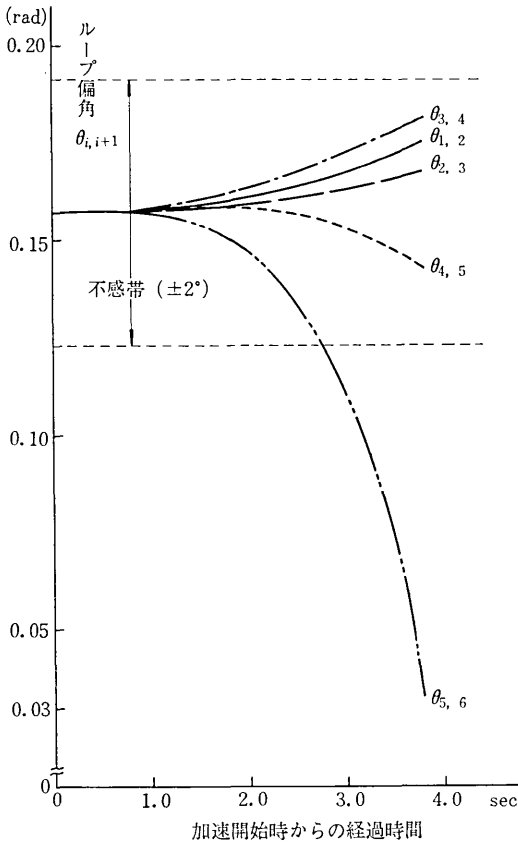


図 10 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化

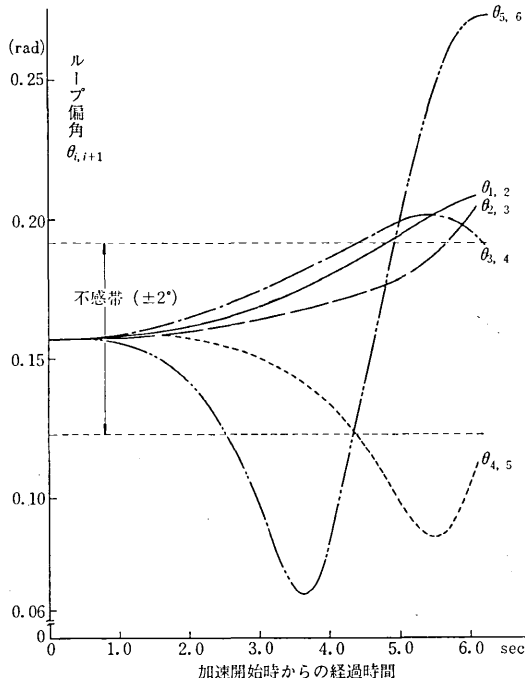


図 11 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化

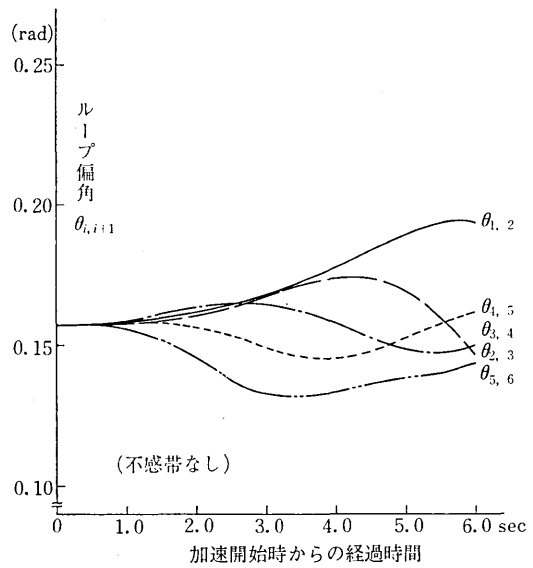


図 12 加速時においてスタンド間の材料が作るループ偏角変化 (不感帯なし)

て例示する。図 9 は比例ゲイン g_{vp} を一様に 5,000 とした場合である。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プ偏角 $\theta_{5,6}$ が発散ぎみになる。それに対して図 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 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であろう。

5. む す び

熱間タンDEM圧延の主要な特性である各スタンドの独立性に主眼において過渡特性のシミュレーションモデルを開発し、その概要を述べ、計算例を示し、さらにループ ASR 系の適正なゲインの検討を行なった。その結果ループ ASR 系の適正なゲイン配分は加速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ということがわかった。なお、本研究を進めるに際して終始適切な助言を下された、鈴木教授に謝意を表します。

(1972 年 4 月 18 日受理)

参 考 文 献

- 1) 阿高・鈴木：塑性と加工，10-104 (1969-9)
- 2) 阿高：生産研究，22-7 (1970-7)
- 3) 阿高：塑性と加工，12-126 (1971-7)