

討24 熱延仕上圧延機における張力制御の解析と開発

日本鋼管(株)京浜製鉄所 ○斎藤 森生, 谷本 直
林 美孝, 藪内 捷文

1. 緒言

熱延仕上圧延機では、圧延機間にルーパが設置され、材料に適度な張力を与えると同時に、材料速度の変動を吸収する緩衝装置としての機能を持たせている。ルーパ制御は一般に、材料張力と材料ループ量の変化をルーパ角度で検出し、上流圧延機のロール速度とルーパ駆動トルクを操作して、張力とルーパ角度を目標値に保つ制御を行なっている。(図1) 近年、製造範囲の拡大に伴って、ルーパには大断面鋼板(厚物)を持ち上げる剛性と同時に、小断面鋼板(薄物)にて板厚、板幅に影響を与えない微小張力を維持できる鋭敏さという相矛盾する要求が強まっており、その制御は困難であるにもかかわらず、従来その解析は板厚制御などに比べ少なかった。^{1), 2)}

今回、ルーパ制御における材料張力の挙動をシミュレーションにより解析し、非線形計画法と結合して系の制御性に関する定量的な評価を試み、また、本制御に現代制御理論を適用し、シミュレーションにてその効果を確認したので、その結果を報告する。

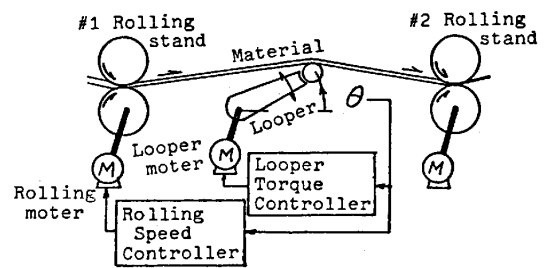


Fig.1 Looper Mechanism

2. 記号

本報では次の記号を用いている。但し、添字1, 2は圧延機番号を、添字0は基準値を、Δは基準値からの偏差を表わす。また、太文字はベクトルを、行列の右肩の^vは転置を表わす。

- b: 材料幅, F: ルーパに加わる力, g: 重力加速度, GD²: ルーパGD² (= 4gJ),
- G_R: ルーパ減速比, H: 圧延機入側板厚, h: 圧延機出側板厚, J: ルーパ慣性能率,
- L₀: 圧延機間距離, L: 材料ループ長, r: ルーパアーム長, r_L: ルーパ重心アーム長,
- T_{Ref}: ルーパ駆動トルク, T_{Fric}: ルーパ摩擦トルク, V: 入側材料速度, v: 出側材料速度,
- v_R: 圧延モーター速度, W_L: 材料自重, W_L: ルーパ自重, x: ルーパロール位置,
- ε: 材料歪, σ: 材料張力, ω: ルーパモーター回転角, θ: ルーパ角度

3. プロセス及び制御系の定式化

3-1. プロセス

1) 圧延機内の材料変形プロセス

圧延理論で一般的とされている以下のモデル式を用いた。

- a) 変形抵抗: 美坂の式
- b) ロール偏平: Hitchcockの式
- c) ハウジングの伸び: ゲージメータ式
- d) 入出側材料速度: 連続の式
- e) 圧延荷重, 先達率: 張力を考慮したSimsの式

2) 圧延機間材料の運動方程式

$$\frac{W_L}{g} \ddot{x} = F - hb(\sigma_1 + \sigma_2) - W_L \quad (3.1)$$

3) 張力発生プロセス

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{1}{L_0} \left\{ \int_0^t (V_2 - v) dt + L(t) - L(0) \right\} \quad (3.2) \quad \sigma = \eta \epsilon^m \quad (3.3)$$

4) 材料の走行プロセス

$$H_2(t) = h_1(t-T) \quad \text{但し,} \quad \int_{t-T}^t v(\tau) d\tau = L(t) \quad (3.4)$$

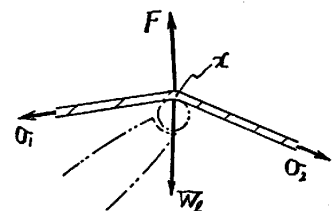


Fig.2 Material Dynamics

5) ルーバの運動方程式 (図3)

$$J\ddot{\theta} = T_{Ref} - \frac{1}{G_R} (r \times F + r_L \times W_L) - T_{Fric}(\dot{\theta}) \dots\dots (3.5)$$

6) 圧延モーター特性 (1次遅れ)

$$T_{\omega} \dot{v}_{R1} + v_{R1} = v_{R1Ref} \quad (T_{\omega}: \text{時定数}) \dots\dots (3.6)$$

3-2. 制御系 (現状設備)

1) 圧延ロール速度制御装置 (PID制御方式)

$$v_{R1Ref} = v_{R1o} \left\{ 1 + K_p(\Delta\theta + K_D \Delta\dot{\theta} + \frac{1}{K_I} \int_0^t \Delta\theta dt) \right\} \dots\dots (3.7)$$

2) ルーパトルク制御装置 (静的釣合補償方式)

$$T_{Ref} = \frac{1}{G_R} \left\{ r \times \{ hb(\sigma_o + \sigma_{2o}) + W_{L2} \} + r_L \times W_L \right\} \dots\dots (3.8)$$

以上のダイナミクスを非線形のまま、シミュレーターを構成した。

4. 最適化手法との結合による解析

4-1. 非線形計画法との結合

与えられた製造、設備条件下での制御結果を比較するには、最適制御状態を相互に比較する必要がある。

ここでは前記の制御を含むシミュレーターと非線形計画法 (Fletcher-Powell法) を結合して、張力変動とルーバ角変動が最小となる制御パラメータ (PID) を検索し、その成績を各条件で比較している。(図4)

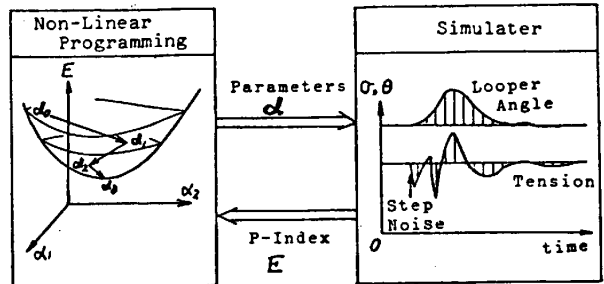


Fig.4 Linkage with Non-Linear Programming

すなわち、評価指標を次式で定義し、以降の制御性の比較は全て最適状態で行なっている。

$$E \cong \int_0^T \{ W_1(\sigma_o - \sigma)^2 + W_2(\theta_o - \theta)^2 \} dt \dots\dots (4.1)$$

外乱としては、上流圧延機入側板厚を1%ステップ状に変化させた。

4-2. 板厚の影響

ルーバ駆動軸にかかるトルク成分は、(3.5)式のルーバ運動方程式から次式で表わされる。

$$T_{TL} = T_{Ref} - (T_o + T_{W2} + T_{WL} + T_{IW2} + T_{Fric}) \dots\dots (4.2)$$

- 但し、 T_{TL} : ルーバ慣性トルク, T_o : 張カトルク
- T_{W2} : 材料自重トルク, T_{WL} : ルーバ自重トルク
- T_{IW2} : 材料慣性トルク

制御中の各トルク成分を厚物 (板厚14.7mm) と薄物 (板厚1.63mm) について比較したものを図5に示す。ここでは定常状態の他に各成分の最大値、最小値も示す。厚物では張カトルクの変動は少なく、制御が良好であるのに反し、薄物では張カトルクとルーバ慣性トルクの変動が大きく制御性が悪いことがわかる。以降の解析は、表1に示す薄物について行なった。

4-3. ルーバGD²の影響

ルーバGD²を変化させた時の制御性の改善状況を図6に示す。ルーバGD²が小さいと、張力変動がルーバ角度に反映されやすく、良好な制御性を得る。

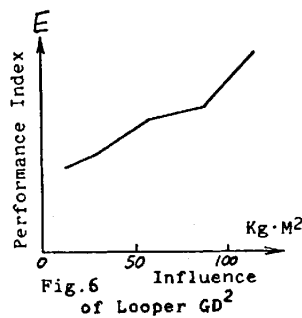


Fig.6 Influence of Looper GD²

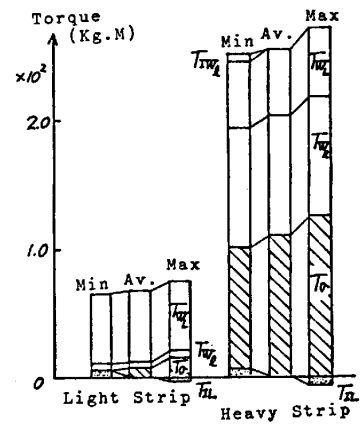


Fig.5 Torque Decomposition

Table 1. Rolling Condition

	#1 Rolling Stand	#2 Rolling Stand
Thickness (mm)	2.61	1.97 1.63
Tension (Kg/mm ²)	-	0.7 -
Looper Angle (deg)	-	20 -
Rolling Velocity (MPM)	506	623
Material Temp. (deg.)	919	891
Material Width (mm)	875	

4-4. 実張力を用いたPID制御

従来の張力制御では、材料張力を直接測らず、ルーパ角度の変動としてとらえ制御していた。近年、ルーパに荷重計を組込んだルーパ張力計が実用化され始めており、本計測値を直接フィードバックする方式の効果を推定した。ここでは圧延ロール速度制御装置に、実張力によるPID制御を加えた。制御状況を図7に示すが、評価指標は半減しており、ルーパGD²を約1/3にしたのと同様な効果がある。

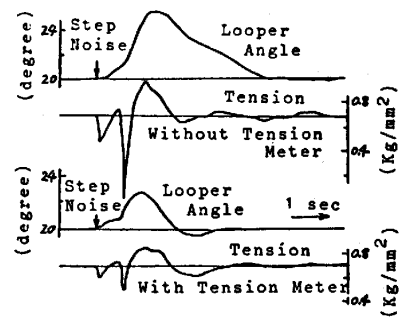


Fig.7 Feedback Control with Tension Meter

5. 現代制御理論の適用

5-1. 目的

張力の制御対象は、上流圧延機ロール速度とルーパ駆動トルクを入力とし、張力とルーパ角度を出力とする多変数制御系となっている。(図8) 小寺ら³⁾は、本対象にクロスコントローラを配置して、張力がルーパ角度と干渉しない対角化制御を提案し、実用化している。一方、ルーパには、外乱により張力が増加すると、材料がルーパを引き下げループ気味となり過大張力を自然に防止する優れた機能がある。筆者らは、この干渉機能を積極的に生かし、設備能力を最大限に引き出すため、積分形最適レギュレータの適用を考えた。

5-2. プロセスの線形化

第3章で述べたプロセスを基準値(θ₀, σ₀)回りで線形化する。

1) ルーパ運動方程式

$$\Delta \ddot{\theta} = a_{11} \Delta \dot{\theta} + a_{12} \Delta \theta + a_{13} \Delta \sigma + b_{11} \Delta T_{Ref} \quad (5.1)$$

但し、 $a_{11} \cong -\frac{D}{J}$, $a_{12} \cong -\frac{D}{J} \left\{ \alpha_0 \left(\frac{\partial K_0}{\partial \theta} \right)_{\theta_0} + \left(\frac{\partial K_0}{\partial \theta} \right)_{\theta_0} \right\}$, $a_{13} \cong -\frac{D}{J} K_1(\theta_0)$, $b_{11} \cong -\frac{D}{J}$, D : ルーパ軸摩擦係数
 $K_1(\theta) \cong 2h_0 b r (r \sin \theta - c_1) / \sqrt{c_2^2 + (r \sin \theta - c_1)^2}$, $K_2(\theta) \cong 2\rho h_0 b r \cos \theta \sqrt{c_2^2 + (r \sin \theta - c_1)^2} + W_L r \cos(\theta + \theta_0)$, c_1, c_2 : 設備定数

2) 張力発生プロセス

$$\Delta \sigma = \frac{E}{L_0} \int_0^t (\Delta v_2 - \Delta v_1) dt + \frac{E}{L_0} \left(\frac{\partial K_0}{\partial \theta} \right)_{\theta_0} \Delta \theta \quad (5.2)$$

但し、 $K_0(\theta) \cong 2\sqrt{c_2^2 + (r \sin \theta - c_1)^2}$, $E \cong \left(\frac{\partial K_0}{\partial \theta} \right)_{\theta_0}$, $K_0(\theta) \cong \pi \varepsilon^m$

ここで下流圧延機の制御にて Δv_2 を無視できるとすると、次式を得る。

$$\Delta \dot{\sigma} = a_{31} \Delta \dot{\theta} + a_{32} \Delta v_{R1} \quad (5.3) \quad \text{但し、} \quad a_{31} \cong \frac{E}{L_0} \left(\frac{\partial K_0}{\partial \theta} \right)_{\theta_0}, \quad a_{32} \cong -\frac{E}{L_0} (1 + f_{10})$$

3) 圧延モータ特性

$$\Delta \dot{v}_{R1} = a_{41} \Delta v_{R1} + b_{42} \Delta v_{R1,Ref} \quad (5.4) \quad \text{但し、} \quad a_{41} \cong -\frac{1}{T_{ms}}, \quad b_{42} \cong \frac{1}{T_{ms}}$$

4) 積分因子の導入

$$\Delta \dot{z}_\sigma = -\Delta \sigma + \Delta \sigma_{Ref}, \quad \Delta \dot{z}_\theta = -\Delta \theta + \Delta \theta_{Ref} \quad (5.5)$$

以上の線形微分方程式を連立して次の状態方程式を得る。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.6)$$

但し、 $x \cong \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \sigma \\ \Delta v_{R1} \\ \Delta z_\sigma \\ \Delta z_\theta \end{bmatrix}$, $A \cong \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, $B \cong \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ b_{42} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $u \cong \begin{bmatrix} \Delta T_{Ref} \\ \Delta v_{R1,Ref} \end{bmatrix}$

5-3. シミュレーション

表1に示す薄物に対して評価指標を以下に採った。

$$M \cong \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5.7)$$

但し、 $Q \cong \text{diag}(0, 1, 1, 0, 100, 100)$, $R \cong \text{diag}(10^{-7}, 10^{-7})$

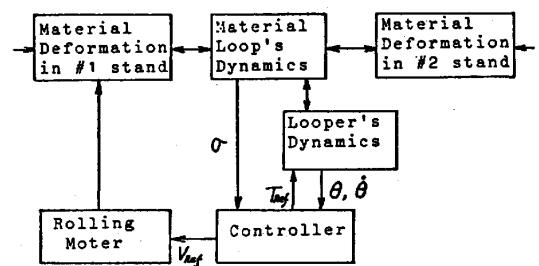


Fig.8 Block Diagram of Tension Control

本評価指標を最小とすべく、最適レギュレータ理論により Riccati 方程式を解いてフィードバック行列 K を求め、制御を行なった。外乱は第4章と同じく、上流圧延機の入側板厚を1%ステップ状に変化させた。(図9)

5-4. シミュレーション結果

制御した結果を図10 Case I で示す。参考までに第4章で求めた従来方式を Case II で、実張力を用いたPID制御を Case III に示す。

(4.1)式で示す評価指標 E で各方式を比較した結果を図11に示す。積分形最適レギュレータの制御成績が非常に良好であり、プロセスの線形化に際して無視した圧延機内の材料変形による外乱をも十分吸収していることがわかる。

なお、当初積分因子のない通常の最適レギュレータを試みたが、薄物に対しては出力が整定せず、比較的制御しやすい厚物でもオフセットを生じてしまう。(図12)

5-5. 他の特徴

積分形最適レギュレータの特徴は、目標値の変更に制御がオフセットなく追従する点にある。一方、圧延機間で張力を意図的に変更して板幅を変化させる事は、永年のニーズであった。また、材料先端、後端部が圧延機間を通過する時は、ルーパ角度を意図的に変化させる必要がある。今回のシミュレーションにて、目標張力をステップ状に変化させた時の上記制御結果を図13に、目標角度を変化させた時の結果を図14に示す。ともに満足できる応答をしている。

6. 結言

今回、熱延仕上げ圧延機材料張力の挙動解析に、制御装置とルーパを含めた非線形シミュレーションモデルを作成した。さらに、非線形計画法と組合わせて設備の最適条件における制御性を比較、評価した。

また、与えられた設備を最も有効に使用するために、現代制御理論の適用を試み、積分形最適レギュレータが有効であることをシミュレーションにて確認した。あわせて、本制御は目標値の変更に追従するなど、実際の張力制御に要求される各種機能をも満たすことがわかった。なお、制御を含むシミュレーターと非線形計画法を結合して評価することは、今後の機械、電気設備を設計する際にも有効な方法となるであろう。

(参考文献)

- 1) 高橋, 美坂 “熱延ルーパのシミュレーション”
昭和50年度 塑性加工学会連合講演会
- 2) 今井 他 “IHI新式油圧ルーパの開発”
IHI技報 Vol 17, No 4, 1977
- 3) Y. Kotera, F. Watanabe “Multivariable Control of Hot Mill Looper” 8th IFAC 86.1, 1981

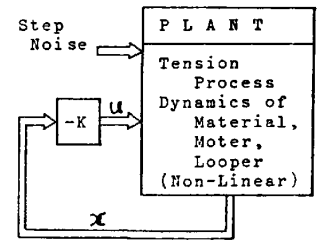


Fig.9 Simulation of Regulator

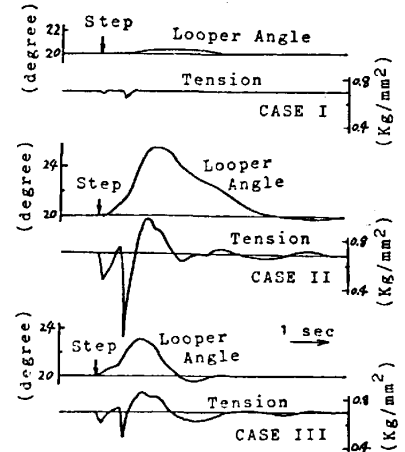


Fig.10 Control Results

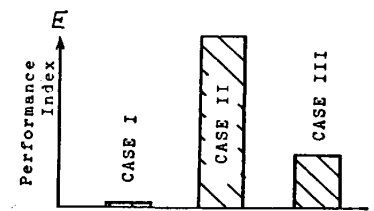


Fig.11 Comparison of each Case

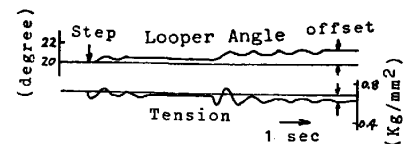


Fig.12 Control results by Non-Integral type Regulator

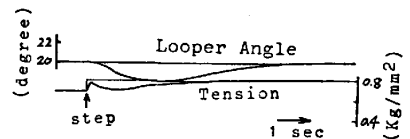


Fig.13 Tracking to Tention Reference change

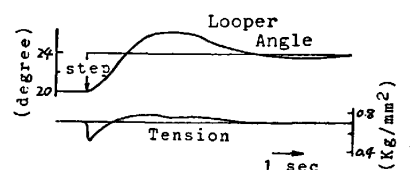


Fig.14 Tracking to Looper angle Reference change