

タンデム圧延の総合特性の解析

Study on Characteristics of Tandem Strip Mills

第4報 熱間タンデム圧延の加減速特性

(4) Transient Characteristics of Hot Tandem Strip Mills during Acceleration and Deceleration Period

鈴木 弘*・阿高松 男*

Hiromu SUZUKI and Matuo ATAKA

1. ま え が き

熱間タンデム圧延の動特性の解析例は冷間の場合に比して少ない⁽¹⁾。各スタンドの圧延温度の把握と、スタンド間にあるルーパの挙動の把握とが困難なことが原因である。本報では圧延温度変化およびルーパ特性を近似的なモデルで数式化し、それらをタンデム圧延現象を論ずる数学的モデルの中に導入して、デジタル計算機を使用し、熱間タンデム圧延の加減速特性の解析をした。

2. 仮定および解析法

記号

- H : 入口側平均板厚 (mm)
- H_e : 入口側端部板厚 (mm)
- H_c : 入口側中央板厚 (mm)
- h : 出口側平均板厚 (mm)
- h_e : 出口側端部板厚 (mm)
- h_c : 出口側中央板厚 (mm)
- t_f : 前方張力 (kg/mm²)
- T_f : 前方張力 (kg)
- t_b : 後方張力 (kg/mm²)
- T_b : 後方張力 (kg)
- S_r : ロール設定間隔 (mm)
- v_f : 材料流出速度 (mm/s)
- v_b : 材料流入速度 (mm/s)
- V : ロール設定速度 (mm/s)
- V_B : バックアップロール速度 (mm/s)
- F : 形状制御力 (kg)
- Y : 平均変形抵抗 (kg/mm²)
- M : ルーパモーメント (kgmm)
- l : ルーパ腕の長さ (mm)
- θ : 圧延温度 (°C)
- L : スタンド間隔 (mm)

熱間タンデム圧延の加減速現象を論ずる際に考慮した因子は次のとおりである。(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の影響、(4)変形速度の変形抵抗への影響、(5)ルーパの影響などである。さらに解析に用いた仮定を整理すると、(1)

粗板厚は均一とする、(2)1号スタンドに入る圧延材の温度は既知である(計算例では一定としている)、(3)最終スタンド出口の張力は変化しない、(4)圧延材の温度は板厚方向および幅方向には均一とする、(5)加減速過程は等加速過程が段階的に集結したものと考える、(6)各スタンド間にある材料はルーパを離れてたままのものとす。

一般に熱間タンデム圧延機系には非常に複雑な AGC 系および ASR 系を備えているが、過渡特性の解析法を開発することを当面の目的とするので、AGC・ASR 両

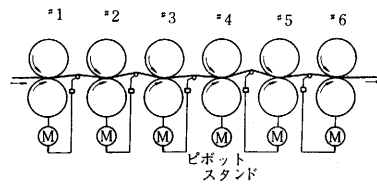


図1 設定した系

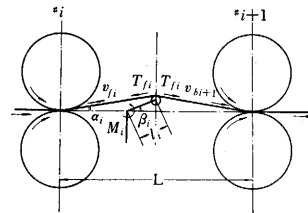


図2 ルーパのモデル化

系については簡単な系を設定した。すなわち、4号スタンドをピボットスタンドとし、各スタンド間のルーパは材料に一定の張力を与える作用をするものとする。次に、各スタンド間のルーパについては次のような仮定をする。(1)スタンド間における材料の弾性的な伸縮は無視する。(2)ルーパと材料との接点は両スタンドから等距離にある。(3)ルーパによってスタンド間張力は一定に保たれる。(4)ルーパは不感帯に入っている時にはロール速度を修正せず、不感帯から外れた時にロール速度を変えて不感帯内に収めるようにする。ルーパを図2のようにモデル化して上述の仮定を用いて数式化すると、

スタンド間にある材料と材料傾角との関係式

$$\sum_{k=1}^j (v_{fi,k} - v_{bi+1,k}) \Delta t = L (\sec \alpha_{i,j} - 1) \quad (1)$$

(ただし、 k, j は時刻を表わし、 i はスタンド番号を表わす)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

ルーバの支点まわりのモーメントの釣合式

$$M_{i,j} = 2T_{rj} \sin \alpha_{i,j} \cdot l_i \cos \beta_{i,j} \quad (2)$$

ルーバ腕の傾角と材料傾角との関係式

$$L \cdot \tan \alpha_{i,j} / 2 = l_i \sin \beta_{i,j} \quad (3)$$

各スタンド間隙における材料の出入量の関係式

$$\left. \begin{aligned} U &= v_{f1,j} h_{1,j} \\ v_{bi,j} H_{i,j} &= v_{f1,j} h_{i,j} \quad (i \geq 2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで (1) 式はスタンド間にたまった材料の量を示すもので、左辺は各微小時間 Δt にスタンド間にたまった材料の量を計算時刻 t_i まで集積した量を示し、右辺はそれを幾何学的関係から求めた量を示す。(2)式はスタンド間張力を一定に保つためのルーバのモーメント、(3)式は図2から明らかであり、(4)式の考え方は前報と同様である。

圧延材の温度は圧延条件によって左右されるが、温度変化に関しては次の4因子を考え温度項の数式化を行なう。(1)周囲雰囲気への熱伝達損失による温度降下 $\delta\theta_T$ 、(2)圧延材表面からの輻射熱損失による温度降下 $\delta\theta_R$ 、(3)圧延の変形熱による温度上昇 $\delta\theta_H$ 、(4)冷却水への熱損失とロールへの熱伝導損失による温度降下 $\delta\theta_c$ 、ここで(1)、(2)は伝熱工学の理論から求まり、(3)は圧延過程を単純圧縮変形とみなして計算を行なえるが、(4)に関しては理論的に解いた例がないので Sims の実験式⁽²⁾を採用した。(1)、(2)の計算には材料が i 号スタンドから $(i+1)$ 号スタンドに達するまでの時間を必要とするが、板厚偏差の到達時刻を絶えず追跡してあるので計算可能である。以上より、 i 号スタンドにおける材料の温度と $(i+1)$ 号スタンドに達した時の材料の温度との温度差 $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta_{i,i+1} = \delta\theta_T + \delta\theta_R + \delta\theta_c - \delta\theta_H \quad (5)$$

と表わせる。

前述のようにして、温度項およびルーバの数式化を行ない、熱間タンデム圧延現象を論ずる式の中へ導入する。すなわち、熱間タンデム圧延の加減速状態を律する基本方程式 (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

$$\Phi(F_i, H_{ei}, h_{ei}, H_{ci}, h_{ci}, t_{bi}, t_{fi}, Y_i) - (h_{ci} - h_{ei})/2 = 0 \quad (6)$$

(2) 平均板厚の定義式

$$\eta_i h_{ei} + \xi_i h_{ci} = 2h_i \quad (\eta_i, \xi_i \text{ は重みを示す}) \quad (7)$$

(3) 圧延条件とロール出側板厚との関係式

$$h_i = h(F_i, S_{ri}, H_i, t_{bi}, t_{fi}, Y_i) \quad (8)$$

(4) 圧延条件とロール出側材料流出速度との関係式

$$v_{f1,j} = v_f(V_i, \dot{V}_i, H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, Y_i) \quad (9)$$

(5) ロール設定間隙とバックアップロール速度との関係式

$$S_{ri} = g(V_{Bi}) \quad (10)$$

(6) 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

$$V_{Bi} = V_i \quad (11)$$

(7) 圧延条件と平均変形抵抗との関係式

$$Y_i = Y_i(V_i, H_i, h_i, \theta_i) \quad (12)$$

(8) 板厚と張力との関係式

$$t_{fi} h_i = t_{bi+1} H_{i+1} \quad (13)$$

に前述の(4)式を加え、第2報と同様に Taylor 展開し線型化を行なって、微小時間刻みごとに漸次計算を繰り返してゆく。この場合材料速度として平均材料速度 v_{mi} を

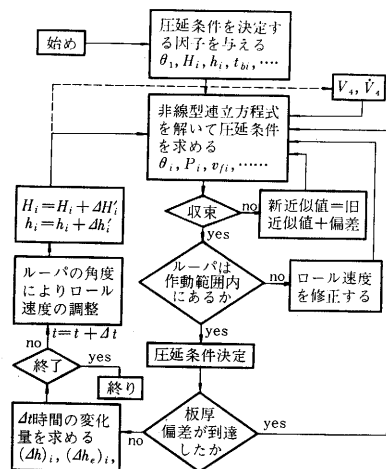


図3 計算の流れ図

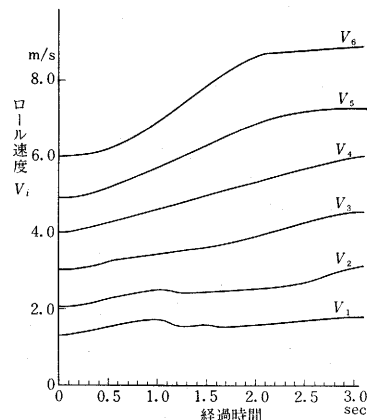


図4 加速時のロール速度

$$v_{mi} = (v_{f1,j} \cos \alpha_{i,j} + v_{bi+1,j} \cos \alpha_{i,j})/2$$

と定義して用いる。計算の流れ図を図3に示す。

4. 計算結果

4号スタンドのロール速度を3秒間で4→6m/sに増速した場合のこの解析法による計算例を図4, 5, 6, 7に示す(ただし、時間刻み $\Delta t = 0.1 \text{ sec}$)。図4はこの場合の各

研 究 速 報

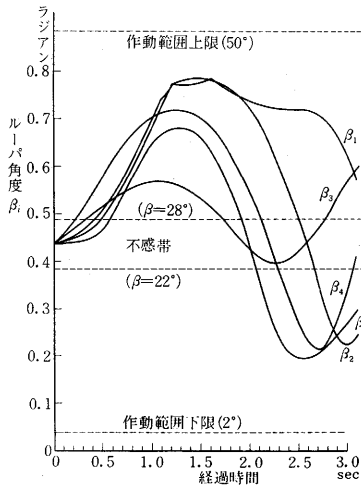


図 5 加速時のルーパー角度変化

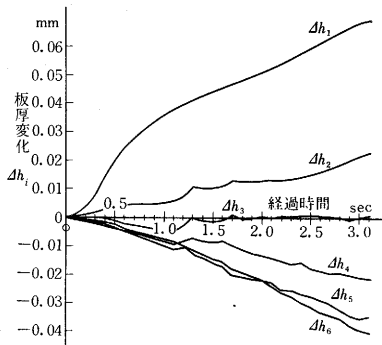


図 6 加速時の板厚変化

スタンドの増速経路を示すもので、 V_1 、 V_2 の曲線に一時減速している個所が見られるのは、速度調整があまり有効でなくルーパーが作動範囲限界に近づいたので、作動範囲内に入れるように強制的に速度を変えたことを示す(図 5 参照)。図 4、図 5 両図から不感帯を外れた時以後は増速の仕方が変わっていること、この設定した系では β_1 、 β_2 に対する制御函数の効果があまりないことがわかる。図 6 中の下流スタンドの板厚が減少しているのは温度上昇や油膜変化が原因と思われる。上流の 1 号スタンドでは入側の温度を一定にしてあるので、板厚を減少させる油膜変化の影響よりも歪速度の影響が勝って、結果として板厚が増大しているが、2 号スタンドでは板厚を減少させる因子として温度上昇がさらに加わるので、

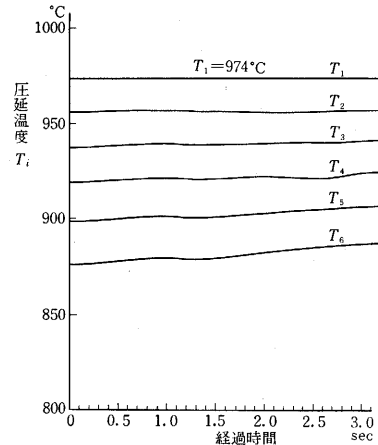


図 7 加速時の各スタンドの温度変化

板厚の増え方は 1 号スタンドより小さい。図 7 は各スタンドの圧延温度が上昇するようすを示したものである。

5. む す び

熱間タンDEM圧延の解析の際に取り扱いの困難なルーパーの挙動特性および圧延材の温度を数式化し、加減速特性を解析的に求める一つの解析法を求めた。実際の圧延では ASR 系および AGC 系の導入により複雑な系になっているので、それを数式化してこの解析にさらに導入する必要があるが、本研究は熱間タンDEM圧延の動特性の解析の第一段階として意味のあるものとする。さらに複雑な ASR 系および AGC 系をも導入し実際の圧延現象への近似度を高めて、この方面の一般的なシミュレーションへと発展させることは可能である。したがってこのような解析を行なうことにより理想的な制御体系を検討することが可能となり、現在現場で問題になっているズーミング作業および仕上温度制御の改善が可能である。なお、本研究の応用に当っては、それぞれの圧延機のルーパー特性を形式構造に即して数式化する必要のあることと、さらに冷却水への熱損失およびロールへの熱伝導損失による温度降下は対象とする圧延機の実状を表わす式を用いなければならないことはいままでのない。

(1969年 1月16日受理)

参 考 文 献

- (1) 平岡：第18回塑性加工連合講演会前刷集，1967-11.
- (2) P. W. Lee, R. B. Sims & H. Wright J. Iron & Steel Inst. (1963-3) 270.