

熱間圧延ランアウトテーブルにおける通板シミュレーション技術

Strip Running Simulation on Hot Run-Out-Table

青江信一郎 AOE Shin-ichiro JFE 技研 機械研究部 主任研究員(副課長)
林 宏優 HAYASHI Hiromasa JFE 技研 機械研究部 主任研究員(課長)
川島 浩治 KAWASHIMA Koji JFE スチール 技術企画部 主任部員(副部長)

要旨

熱間圧延ランアウトテーブルにおけるストリップの通板不安定現象に関して、理論・実験・数値解析に取り組んだ。通板が不安定となる限界通板速度を理論的に導き、実験および数値解析によりその妥当性を確認した。さらに、実機における通板速度と設備条件の関係を考察した。本検討結果は、熱間圧延ランアウトテーブルでの設備改善検討やメンテナンス指針に活用されている。

Abstract:

Dynamic characteristics of strips on run-out tables in hot strip mills are studied to stabilize strip movement. The maximum stable threading speed is derived theoretically, and is verified by experiments and numerical simulations. Relationships between threading speed and conditions of run-out equipments in production mills are discussed. Results of this study have been applied to evaluating effective modification of run-out devices and clarifying the guideline of maintenance.

1. 緒言

熱間圧延工程において、比較的薄いストリップが無張力状態（先端、尾端）でランアウトテーブル（ROT）上を高速に走行する際に、「頭折れ」(Fig. 1), 「ダブリ込み」(Fig. 2) などの名称で呼ばれる通板不安定性に起因する欠陥が慢性的な問題となっている。頭折れやダブリが発生し、コイラー・ピンチロールで折れ込むと次工程でその部分を切り捨てるため歩留りが低下する。また通板が極端に不安定になると先端がコイラーに到達せず重大トラブルとなり多大なダウンタイムを生ずる場合がある。

このため、操業面からは最大通板速度を経験的に安定な速度に制約しているが、生産性の阻害要因となる。さらに通板速度制約による先端の温度低下を補償するために加熱温度を高くしており、エネルギー原単位の面からも問題である。一方、設備・制御面では、ROTの各ローラーや各種ガイドのレベルや摩耗状況、各ゾーンの速度偏差などを経験的に定められた管理範囲内に収めるために多大な労力を投入してメンテナンスを行っている。通板を安定化するために、従来からさまざまな対策が提案されているが、完全に安定化するには至っておらず、上記操業や設備・制御面からの各種制約も経験的に定められたもので、その妥当性は必ずしも明確ではない。

この理由として、(1) ROT上での走行不安定挙動を合理



Fig.1 Folded defect in head



Fig.2 Folded defect in middle

的、明快に説明できる指導原理が不明、(2) 高速かつ非定常な通板不安定現象に対し実機で対策の確証・最適化をすることが困難などがあり、ROT通板不安定現象を再現するための実験的手法、数値シミュレーション手法が存在していないことが根源にあると思われる。

本論文では、まず、ROT通板不安定現象の指導原理となるROT通板安定限界について、理論展開する。次に、ROT通板不安定現象を実験的に再現できる「ランアウトシ

ミュレータ」により、本理論の結果を実験的に検証をした結果、および、計算機上で通板現象を再現可能なROT通板シミュレーションについて述べる。さらに、これらの検討結果をもとに、実機ROT設備における通板安定限界について考察する。

2. ROT 通板安定限界理論

2.1 ROT 上を走行するストリップの定常状態の運動方程式

ROT 上を安定に走行するストリップの運動方程式を微小変形と仮定して定式化すると (1)式で表される。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{D}{Dt} \rho A \frac{Dw}{Dt} = F, \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 w はストリップの鉛直方向の撓み、 E は縦弾性係数、 I は断面二次モーメント、 ρ はストリップの密度、 A はストリップの断面積、 F は鉛直方向の分布荷重、 D/Dt は物質微分、 v は通板速度である。断面はライン方向に一様である場合を考えると、(1)式から (2)式のストリップの運動方程式が得られる。

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2\rho Av \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \rho Av^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = F \dots (2)$$

(2)式において、左辺第1項は曲げ剛性項、左辺第2項は鉛直方向の慣性力、左辺第3項はコリオリ力、左辺第4項は遠心力項である。定常状態（時間微分項が0）を考えると、(2)式からストリップの定常状態の運動方程式は (3)式で表される¹⁾。

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + \rho Av^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = F \dots \dots \dots (3)$$

2.2 ROT 通板不安定現象と座屈現象の等価原理 (ROT 通板安定限界理論)

梁が圧縮荷重 P により圧縮されたときの梁の撓み方程式は、(4)式で表される²⁾。

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} = F \dots \dots \dots (4)$$

(4)式は座屈現象（弾性不安定現象）を表す式であり、(3)式と (4)式を比較すると、(3)式第2項の ρAv^2 を (4)式

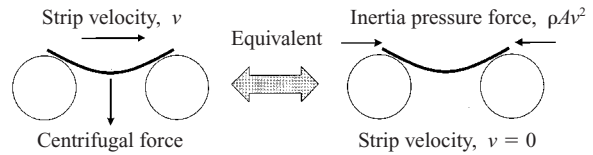


Fig.3 Equivalent theorem

の圧縮荷重 P と考えればまったく同等のものとなる。すなわち、ROT 上を走行するストリップの不安定現象は、圧縮荷重 ρAv^2 が作用した座屈現象であると考えられる (ROT 通板不安定現象と座屈現象の等価原理)。この原理の考え方を Fig. 3 に示す。圧縮荷重 ρAv^2 は遠心力に起因する見かけの圧縮力（慣性圧縮力）と呼ぶことにする。

(4)式に基づく座屈理論によれば、オイラーの座屈荷重 P_c とよばれる固有の圧縮荷重が存在し、圧縮荷重 P が座屈荷重 P_c より大きくなれば、座屈現象が発生し梁は大きく撓む。このことを (3)式に基づく ROT 上を走行するストリップの現象にあてはめれば、慣性圧縮力 ρAv^2 が固有の慣性圧縮力 ρAv_c^2 より小さければストリップは安定に走行し、慣性圧縮力 ρAv^2 が固有の慣性圧縮力 ρAv_c^2 より大きくなれば、ストリップはループを発生して不安定な走行状態となる。ここで、 v_c は (4)式の座屈荷重 P_c に対応する (3)式から求まる固有の通板速度であり、ROT 通板安定限界速度と呼ぶことにする。ROT 通板不安定現象と座屈現象の等価原理を用いれば、座屈荷重 P_c と ROT 通板安定限界速度 v_c の間の関係式は (5)式で表される。

$$P_c = \rho Av_c^2 \dots \dots \dots (5)$$

(5)式は ROT 通板不安定現象の指導原理式である。

(5)式を用いて、最も単純な等ピッチ間隔 L でテーブルロールが並んでいる ROT の問題に対して、ROT 通板安定限界速度を求めてみる。このような問題の座屈荷重は、梁長 L の両端単純支持の座屈荷重と同じとなり、(6)式で表される²⁾。

$$P_c = EI \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \dots \dots \dots (6)$$

(6)式を (5)式へ代入すると等ロールピッチでの ROT 通板安定限界速度が求められ、(7)式で表される¹⁾。

$$v_c = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \dots \dots \dots (7)$$

実際の ROT の通板問題では、上の問題のように単純なものではなく、ロールピッチが不均等であったり、ガイドがあったり、断面2次モーメントが不均等であったり、2次元梁ではなく3次元の板であるが、汎用の構造解析ソフ

トウェア、あるいは実験により座屈荷重を求めることができれば、(5)式の等価原理式を用いることで通板安定限界速度を求めることが可能となる。

3. ランアウトシミュレータによる ROT 通板安定限界理論の実験的検証

3.1 ランアウトシミュレータと相似則

Fig. 4 にランアウトシミュレータ (ROS) を示す。ROS は実機 ROT の 1/10 スケールであり、実機と同様にワークロールからシートを送り出し、テーブルロールを模擬した搬送ロール群上にシートを通板する実験装置である。ROS は実機の 1/10 スケールであるため、実機と整合性を取るために、ROT 通板現象の相似則を導く必要がある。(1)式の運動方程式において、分布荷重 F がテーブルロールの摩擦力、ストリップに作用する空力、自重により構成されているとすると (8)式で表されるストリップの運動方程式が成り立つ。

$$\rho A \frac{D^2 w}{Dt^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \mu \rho A g x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} C_L \rho_a W v^2 \frac{\partial w}{\partial x} - \rho A g = 0 \dots\dots (8)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 g は重力加速度、 C_L は揚力係数、 ρ_a は空気密度、 W はストリップ幅である。(8)式を無次元化すると、(9)式の無次元化されたストリップの運動方程式が求まる。

$$\frac{D^2 \omega}{Dt^2} + \alpha \frac{\partial^4 \omega}{\partial \xi^4} - \beta \xi \frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} C_L \gamma \frac{\partial \omega}{\partial \xi} - \delta = 0 \dots\dots (9)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{EI}{\rho A v^2 L^2}, \quad \beta = \frac{\mu g L}{v^2}, \quad \gamma = \frac{\rho_a W L}{\rho A}, \quad \delta = \frac{g L}{v^2},$$

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{v}{L} t, \quad \omega = \frac{w}{L}, \dots\dots (10)$$

L は代表長さ (例えばロールピッチ) である。無次元化パラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は、おのおの(剛性)/(慣性力)、(摩擦力)/(慣性力)、(空力)/(慣性力)、(重力)/(慣性力)の意味がある。これらの無次元化パラメータすべて

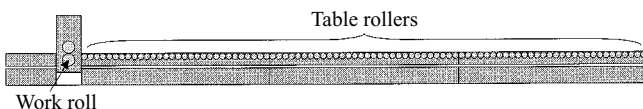


Fig. 4 Run-out simulator

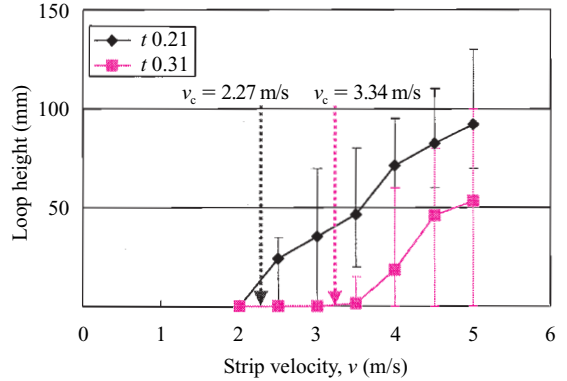


Fig. 5 Experiment results

を実機 ROT と ROS で同じとすれば、両者の通板現象は同等となる (相似則)。

3.2 実験条件と実験結果

本実験の目的は、ROT 通板安定限界理論を実験的に検証することである。したがって、パラメータ α が最も重要なパラメータとなる。本実験では、実機での作業範囲との相似則を考慮しつつ 2 水準の通板材厚みを選定し、さらに通板速度を変えることで、実験的に ROT 通板安定限界速度 v_c を求めた。Fig. 5 に実験結果を示す。横軸は通板速度であり、縦軸はループ高さの最大値である。Fig. 5 から、(7)式から得られるそれぞれの厚みにおける通板安定限界速度を境にして、通板速度が限界速度より小さければ安定であるが、大きければループが発生し不安定であることが分かる。また、通板速度が大きくなるほど、ループ高さも大きくなる傾向がある。(7)式の理論値と実験値はよく一致しており、通板安定限界理論の妥当性が証明された。

4. ROT 通板シミュレーション

Fig. 6 に示す multi-body dynamics を基礎とした ROT 通板シミュレーションを開発した。ストリップのモデルは、複数の剛体と曲げに相当するバネからなる離散化モデルである。ストリップとテーブルロール間の衝突力、摩擦力、空力、その他ストリップに作用する外力を考慮できる。本シミュレーションを用いることで、従来は実機実験でしか分からなかったことが、計算機上である程度の最適化が可能となり、開発期間の大幅な短縮が可能となる。

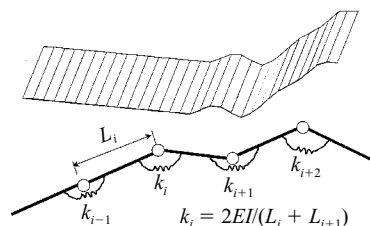


Fig. 6 ROT strip running simulation model

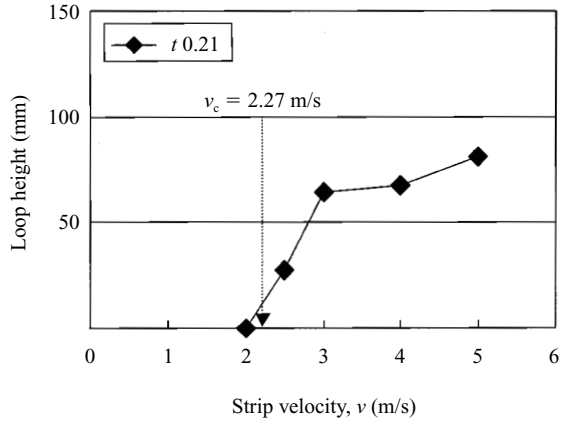


Fig.7 Simulation results

ランアウトシミュレータの ROT 通板シミュレーションによる数値シミュレーションを行った。その結果を Fig. 7 に示す。シミュレーションにより得られた ROT 通板安定限界速度は、ほぼ (7) 式の理論値となった。また Fig. 5 の実験結果と比較すると、通板不安定領域でのループ高さの大きさも比較的良好一致していることが分かる。ROT 通板シミュレーションを用いることで、通板安定限界速度を求めることが可能であり、さらに理論では解析不能である通板不安定領域での挙動も計算できる。

5. 実機 ROT 通板限界の現状と考察

上記のように通板不安定限界について、理論・実験・数値解析により明らかにした。本章では現状の社内ホットストリップミルにおける薄物通板速度と設備条件の関係についてまとめる。Fig. 8 に、実機における ROT のテーブルロールピッチに対する薄物材の先端通板速度を、(7) 式による理論安定限界速度と対比して示す。なお A ミルを基準として正規化表示としている。実機における先端通板速度はテーブルロールピッチが大きいほど低下している。また、実機の前通板速度は理論安定限界速度よりもやや高い場合もあり、ストリップの軽度なばたつきを許容しつつ大トラブルが発生しない範囲で効率最大化を目指しているものと推察される。一方、個別に見ると、理論安定限界速度よりもやや低めの通板速度としているミル (ミル B, C) もある。これらのミルについては、テーブルロールのレベル管理など設備上の問題点や、部分的にロールピッチが大きくなっているセンサーゾーンなどが影響している可能性がある。4 章で紹介した ROT 通板シミュレーションを活用して、テーブルロールのレベルの違いによる通板不安定化への影

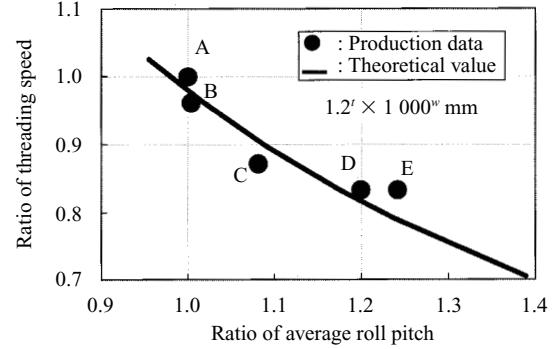


Fig.8 Relationships between roll pitch and threading speed

響や、部分的にロールピッチが変化している影響などを定量化し、実機におけるメンテナンス基準および設備改善の指針として活用している。

6. 結言

熱間圧延ランアウトテーブルにおけるストリップ通板時の不安定現象について理論・実験・数値解析により検討を加え下記の結論を得た。

- (1) ROT 通板不安定現象を説明する ROT 通板安定限界理論を展開し、ROT 通板安定限界速度を導出した。
- (2) ROT 通板不安定現象を実験的に再現するランアウトシミュレータにより ROT 通板安定限界理論の正当性を実験的に確認し、さらに通板数値シミュレーションとも良好一致することを確認した。
- (3) 社内熱間圧延ミルにおける先端通板速度と理論限界速度を比較・考察を行った。
- (4) 本検討結果は、熱間圧延ランアウトテーブルでの設備改善検討やメンテナンス指針として活用されている。

参考文献

- 1) 新日本製鐵. 中村洋二ら. 特熱間圧延におけるストリップ搬送方法および装置. 特開 2000-225410. 2000.
- 2) チモシェンコ, ギャー. 弾性安定の理論(上). プレイン図書出版, 1974.



青江 信一郎



林 宏優



川島 浩治