熱延ランナウトテーブル通板解析*

(ROT 通板不安定現象に対する実験的検討)

青江 信一郎^{*1}, 小原 祐司^{*2}, 林 宏 優^{*1}
石野 和成^{*1}, 原 賢 治^{*3}, 北浜 正法^{*2}

Strip Running Analysis on Hot Run-Out-Table (Experimental Approach for ROT Strip Running Unstability)

Shin-ichiro AOE^{*4}, Yuji OHARA, Hiromasa HAYASHI,
Kazushige ISHINO, Kenji HARA and Masanori KITAHAMA

^{*4} Mechanical Engineering Department, JFE R & D Corporation,
1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 210-0855 Japan

In the Hot-Rolling process, when a thin strip runs on the Run-Out-Table (ROT) at high speed in the state of non-tension (a head or a tail of a strip), the defects resulting from the running instability pose a chronic problem. Moreover, for the running unstable phenomenon, the maximum line speed has been restrained, and has also become a prevention factor of productivity. In order to solve and improve this problem, various methods have been proposed from the former, but it has not eradicated completely. In this paper, we propose two types of the experimental method to simulate the ROT running phenomenon in a laboratory. The ROT strip running unstability theorem was proven by using them experimentally. By utilizing them, the improvement cost and term become cheaper and shorter.

Key Words: Hot-Rolling Process, Strip, Beam, Run-Out-Table, ROT, Unstable, Buckling, Motion Equation, Similarity, Experimental Device, Simulator

1. 緒 論

鋼板の熱間圧延工程では、ストリップは仕上げ圧延において所定の板厚まで圧延加工された後に、100～150 m 程度の水冷帯において所定の温度まで冷却され、コイラーに巻き取られる。ストリップの最先端や最尾端は、水冷帯のランアウトテーブル(以下 ROT)を無張力かつ高速で走行する。その速度は、ミルおよび操業条件により異なるが、一般的に 11 m/s 程度に達する。比較的薄いストリップでは、ROT 上を走行する際に、「頭折れ」(図 1)、「ダブリ込み」(図 2)等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。

前報⁽¹⁾において、ROT 通板不安定現象の理論検討を行い、そのメカニズムの本質を理論的に解明した。ROT 通板不安定現象は、遠心力に起因する慣性圧縮力が軸力方向に作用した座屈問題(ROT 通板不安定現象と座屈現象の等価原理)であり、一般的には固有

値問題である。座屈荷重に対応する安定・不安定の臨界速度(ROT 通板安定限界速度)を、

$$P_c = \rho A v_c^2 \cdots \cdots \cdots (1)$$

で求めることができる。ここで、 P_c は座屈荷重値、 ρ はストリップの密度、 A はストリップの断面積、 v_c は通板安定限界速度である。

また、テーブルロールが等ピッチで配置されている

Fig. 1 Folded defect in head

Fig. 2 Folded defect in middle

* 原稿受付 2008 年 9 月 10 日.

^{*1} 正員, JFE 技研(株) (〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1).

^{*2} JFE 技研(株).

^{*3} JFE スチール(株) (〒210-0868 川崎市川崎区扇島 1-1).

E-mail: s-aoe@jfe-rd.co.jp

場合、ストリップの先端に空力が作用する場合における ROT 通板安定限界速度の理論解を求めた。さらに、テーブルロール摩擦力が作用する場合について考察した。

実際の熱延ラインで発生する ROT 通板現象は、ストリップの力学特性および周辺設備の外乱等による未観測情報が多く含まれた現象であるため、実操業のデータから理論を証明することは困難である。また実際の生産ラインでは、実験費用が莫大で時間的制約も大きく、実質的に不可能である。可能な限り理論に基づいて理想化された実験室レベルで安価なラボ通板試験を行うことができれば、理論の確証、現象の詳細な観察が可能となる。また理論では安定・不安定の臨界点しかわからないが、ラボ通板試験では不安定へ移行した後のストリップの詳しい挙動も観測することが可能となる。さらにラボ実験機で得られた知見を実際の熱延ラインへ適用することも可能となる。

エンジニアリング的な観点に立つと、本研究の目的は通板安定限界速度を上げることであるから、式(1)から座屈荷重値を上げればよいことがわかる。実際の熱延ラインの複雑な設備条件下で座屈荷重の理論値を求めることは困難である。したがって座屈荷重値を実験的に求めることができれば、ROT を実験的に評価することが可能となる。さらに実験的に座屈荷重向上手段を考案することが可能となる。

本論文では、まず実機 ROT の通板現象を実験室で再現するための実験方法、実験装置(ランナウトシミュレータ)およびその実験結果について述べる。次に ROT 上の板の座屈荷重を求めるための座屈試験実験方法、およびその実験結果について述べる。

2. ランナ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

ランナウトシミュレータ(以下 ROS)とは、実機

Table 1 Specification of ROS

Table Roller Diameter	φ 40 mm
Table Roller Pitch	43 mm
Maximum Velocity	5 m/s
Roller Material	Aluminum Alloy

Fig. 3 Run-out simulator

ROT を模擬(スケールダウン)した通板実験を行うための実験装置である。実機とほぼ同等の通板現象が再現できるために、直感的な通板現象の把握を可能とする。

2・1 実験装置(ランナウトシミュレータ) 図3に ROS の模式図を示す。ROS は実機 ROT の約 1/10 スケールであり、実機と同様に上下ワークロールからシートを送り出し、複数の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させる実験装置である。表1に ROS の仕様を示す。テーブルロール周速度は最大で 5 m/s(2 400 rpm)まで上げることが可能である。全てのテーブルロールは同じ速度で回転する。テーブルロール群の上側には、通板材の浮き上がり高さ(ループ高さ)を計測するためのレーザ変位計が所定ピッチ毎に設けてある。ループ高さの計測値を用いて、安定か不安定かを判明する。また、不安定な場合には、ループ高さの大きさをもって不安定の度合いを評価する。

2・2 ROT 通板現象の相似則 実機と ROS ではサイズ、通板材の物性が異なるので、両者の間の整合性をとるために、ROT 通板現象の相似則を導く必要がある。

ROT 上を安定に走行するストリップのたわみは微小であると仮定して、ストリップの運動方程式を定式化すると式(2)で表される⁽²⁾⁽³⁾。

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

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 t はストリップが ROT 上を通板開始してからの時間、 x はストリップ進行方向の位置であり、ワークロール位置を零として空間に固定されている。 w はストリップの鉛直方向のたわみ、 E はストリップの縦弾性係数、 I はストリップの断面二次モーメント、 F は鉛直方向の分布荷重、 D/Dt は式(3)で定義される物質微分、 v は通板速度である。

式(2)の運動方程式において、ストリップの物性、形状値はストリップ移動方向に対して一定であり、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次式のストリップの運動方程式が成り立つ。

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

ここで、 μ はストリップとテーブルロール間の摩擦係

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.

式(4)の左辺第二項の物質微分項を定常化し, ストリップに作用する摩擦力, 空力, 重力を微小とすると, ストリップの定常状態の運動方程式は式(5)で表される⁽¹⁾.

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + \rho A v^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0 \quad (5)$$

式(5)に ROT 通板不安定現象と座屈現象の等価原理(固有値問題)⁽¹⁾を用いると, 式(1)の ROT 通板安定限界速度が求められる.

式(4)を無次元化すると, ストリップの運動方程式は式(6)となる.

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial \xi^4} + \alpha \frac{D^2 \omega}{D \tau^2} - \frac{\alpha}{\beta} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + \frac{1}{2} C_L \gamma \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + \delta = 0 \quad (6)$$

ここで,

$$\alpha = \frac{\rho A v^2 L^2}{EI} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{v^2}{\mu g L} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{\rho_a W v^2 L^3}{EI} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\rho A g L^3}{EI} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{vt - x}{L}, \quad \tau = \frac{v}{L} t, \quad \omega = \frac{w}{L} \quad (11)$$

L は代表長さ(例えばロールピッチ)である. 無次元数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は, おのおの(慣性力)/(剛性), (慣性力)/(摩擦力), (空力)/(剛性), (重力)/(剛性)の意味がある. これらの無次元数の全てが, 実機 ROT と ROS で同じになれば, 両者の通板現象は同等となる(相似則).

2.3 実験目的 本実験の目的は, ROT の通板不安定現象の指導原理式である式(1)が成り立つかどうかを実験的に検証すること, また式(1)から求める等ピッチで配置されたテーブルロールの場合における ROT 通板安定限界速度の理論式(12)⁽⁴⁾が成り立つかどうかを実験的に検証することである.

$$v_c = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \frac{\sqrt{3} \pi h}{6L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

ここで, L はテーブルロールピッチ, h はストリップ板厚である.

2.4 実験条件の選定(無次元数 α) 実験目的から, 最も重要な無次元数は α である. ROT 通板限界速度 v_c における臨界無次元数 α_c は, 式(12)を式(7)へ代入すると求められる.

$$\alpha_c = \pi^2 \approx 9.8696 \quad (13)$$

通板不安定現象を発現させるためには, 式(7)の無

次元数 α が式(13)の臨界無次元数 α_c 付近の値になるように実験条件を設定する必要がある. 本実験では, 試験材として一般的なナイロン材を選定した. その理由としては, 5 m/s(表1に示す ROS の最大速度)以内の通板速度で, ナイロンの物性値(密度, 縦弾性係数)と市販のナイロンシート材の板厚から求まる式(7)の無次元数 α が式(13)の条件を満たしやすいことである. ナイロン材ということで, 温度変化により縦弾性係数が変化してしまうために, 公称の物性値に信頼性が乏しい. したがって, 所定の温度条件下で共振法を用いて縦弾性係数を計測した. また, 実験時にナイロン材が常に同じ温度となるように, 恒温機を用いてナイロン材の温度管理を行った.

2.5 実験条件の選定(無次元数 β) 次に重要な無次元数は β である. 無次元数 β は慣性力と摩擦力の比であり, 先端からの不安定領域の長さ(ロール本数)を意味している⁽¹⁾. 無次元数 β が小さすぎると, 不安定領域が短くなりすぎて, 場合によっては通板不安定性が ROS による実験では現れない, 観測しにくくなる.

ROT 通板安定限界速度 v_c における臨界無次元数 β_c は式(8), 式(12)から次式であらわされる.

$$\beta_c = \frac{v_c^2}{\mu g L} = \frac{\pi^2 EI}{\mu \rho A g L^3} = \frac{\pi^2 E h^2}{12 \mu \rho g L^3} \quad (14)$$

式(14)から板厚 h を変更すれば, 臨界無次元数 β_c を調整することが可能である. しかしながら, 臨界無次元数 β_c を大きくするために板厚を大きくすると, 式(12)から ROT 通板安定限界速度も大きくなる. ROT 通板安定限界速度は, ROS の通板速度仕様範囲以内にすることが必要である.

摩擦係数 μ に関しては, 所定長さのアルミ板の裏に通板材を貼り付けた試験材を作成し, 試験材をテーブルロール上におき, テーブルロールを回転させたときに作用する摩擦力を計測し, その摩擦力と試験材の自重の比から実験的に求めた.

2.6 実験条件の選定(無次元数 γ, δ) パラメータ γ は板剛性に対する空力の影響度合いを示すパラメータであり, 図1に示す頭折れのような最先端の不安定現象に関係する. ROT 通板安定限界速度 v_c における臨界無次元数 γ_c は式(9), 式(12)から次式であらわされる.

$$\gamma_c = \frac{\rho_a W v_c^2 L^3}{EI} = \frac{\pi^2 \rho_a L}{\rho h} \quad (15)$$

本実験の目的において, 空力の影響を考える必要はない. しかしながら臨界無次元数 γ_c が大きいと頭折れが多発し, その影響で本来の通板試験を行うことができないので, 通板材の最先端部位のみを場合によ

ては補強する必要がある。補強の方法としては、粘着テープを貼り付けることで板厚を厚くする方法が最もシンプルであるが、最先端部位の自重も重くなるため最先端部位の摩擦力が大きくなり、その影響で ROT 通板安定限界速度が高くなる副作用がある。したがってあまり最先端部位の自重を重くしすぎないように注意すべきである。

無次元数 δ は板剛性に対する重力の影響度合いを示すパラメータである。本実験の目的において、重力の影響を考える必要はないので無視する。

2・7 実験条件 表 2 に最終的に選定した実験条件を示す。本実験では、板厚 0.21 mm (Case 1) と板厚 0.31 mm (Case 2) の 2 水準の通板材を選定した。式 (14)、式 (15)、式 (10) から得られる無次元数 β_c , γ_c , δ および前報⁽¹⁾ にて示した頭折れが発生する ROT 通板安定限界速度 v_c^{Head} と式 (12) から得られる ROT 通板安定限界速度 v_c も表 2 に示す。また比較・参考データとして実機 ROT において実際に操業されているストリップの仕様を表 2 に示す。本論文では v_c^{Head} を求めるために、揚力係数 C_L をクッタ・ジュコフスキーの定理⁽⁵⁾ から求められる平板に対する揚力係数とした。揚力係数は式 (16) となる。

$$C_L = 2\pi \dots\dots\dots (16)$$

ただし、今回のような半無限長平板問題に対して有限長平板の揚力係数が妥当かどうかについては疑問が残るところである。事実、経験的、数値解析的にはこの揚力係数値より小さい値とするほうが、現実の現象に近くなることはわかっているが、この値を本論文では採用する。

Case 1 と Case 2 を比較すると、板厚が大きいため

Case 2 の ROT 通板安定限界速度の理論値は当然 Case 1 より大きくなる。Case 2 では通板速度を大きくする必要があり、速度が大きいために現象の計測、観測が困難となる。

Case 2 の臨界無次元数 β_c は Case 1 よりも大きく、不安定現象長さが長くなり、その意味では、現象の計測、観測がしやすくなる。

Case 1 の臨界無次元数 γ_c は Case 2 よりも大きく、頭折れが発生しやすいことが予想される。頭折れが発生する ROT 通板安定限界速度 v_c^{Head} と ROT 通板安定限界速度 v_c の乖離が実機 ROT に比べて ROS では大きいために、ROT 通板安定限界速度 v_c に至るまでに巨大な頭折れが発生し、実機 ROT で発生するようなループ発生現象を観測できなかった。 v_c^{Head} を上げるために、最先端部位のみを補強した。

Case 1 と Case 2 とともに一長一短をもっているが、ROS の最大速度仕様 5 m/s を考慮すると、Case 1 がより通板材としては適している。もし Case 1 よりも板厚を小さくすれば、通板速度は低くできるものの、不安定現象長さが短くなりすぎるため ROT 通板安定限界速度以上の領域においても不安定現象の発生がみられなくなる。

2・8 実験結果 図 4 に Case 1 および Case 2 の実験結果を示す。横軸は通板速度、縦軸はレーザ変位計で計測された最大ループ高さである。菱形のプロット (凡例で t 0.21) は Case 1 の実験結果、正方形のプロット (凡例で t 0.31) は Case 2 の実験結果を示している。実験は同一実験条件下で複数回実施し、その平均値をプロットしている。当然ではあるが、不安定領域では個々のサンプル間での最大ループ高さの再現性、相関性はなく、統計処理により傾向が得られる。

図 4 から、実験により得られたループの発生、非発生の境目となる通板速度と式 (12) の ROT 通板安定限界速度の理論値はよく一致していることがわかる。

Table 2 Experimental conditions

	Case 1 (ROS)	Case 2 (ROS)	ROT
ρ	1261 kg/m ³	1261 kg/m ³	7800 kg/m ³
E	3.3E+8 Pa	3.3E+8 Pa	1.2E+11 Pa
h	0.21 mm	0.31 mm	1.2 mm
W	70 mm	70 mm	1000 mm
μ	0.47	0.47	0.2
α_c	9.8686	9.8686	9.8686
β_c	25.92	56.48	125.48
γ_c	1.92	1.30	0.53
δ	0.81	0.37	0.39
v_c^{Head}	1.59 m/s	2.47 m/s	9.12 m/s
v_c	2.27 m/s	3.34 m/s	10.16 m/s

Fig. 4 Experimental results

通板速度が ROT 通板安定限界速度以上の領域では、通板速度が大きいほどループ高さも高くなる。個々のサンプルでみれば、通板速度が ROT 通板安定限界速度以上であってもループが発生しない場合もある。一方で、通板速度が ROT 通板安定限界速度以下の場合には、ループは発生しない。

以上から、ROT 通板安定限界理論は正しいことが確認された。ROS で現れる通板不安定現象は実機の ROT と同じ現象であるので、ROS で何らかの通板を安定化する対策が実現できれば、それを実機の ROT へ転用することが可能となり、より定量的な対策の提案、開発期間の短縮、開発コストの低減が可能となる。

ROT 通板不安定現象を他の力学現象の類似で考えてみると、無次元数 α は、流体力学におけるレイノルズ数に対応するような無次元数である。すなわち、無次元数 α が臨界値 α_c 以下では、層流のような安定した状態である。パラメータ α が臨界値 α_c を超えると、ループ高さを予測することが困難な乱流のような不安定な状態になる。

3. ストリップ座屈試験装置

ROS を用いれば実機を模擬した条件下で実験的に ROT 通板安定限界速度を求めることが可能となる。別の ROT 通板安定限界速度を求める実験方法として、式(1)の等価原理式を用いて、ROT 上のストリップの座屈荷重から ROT 通板安定限界速度を求めることも可能である。

3・1 実験装置と実験手順 図5にストリップ座屈試験装置の模式図を示す。本装置は、テーブルロールを模擬した回転しないパイプ、パイプ群上に置かれ

Fig. 5 Strip buckling experimental device

た試験材であるストリップ、ストリップに圧縮荷重を作用させるための手動レバーを備えた油圧式の加圧装置、加圧装置内部に設置された圧縮荷重を計測用ロードセルの荷重表示装置により基本的に構成される。ストリップ座屈試験装置は可動部分はほとんどなく装置構成がシンプルであるため、実機 ROT 相当のスケールのものが安価で製作可能である。

実験手順としては、実験員が手動レバーにより加圧装置を手動で作動させ、徐々にストリップに作用する圧縮荷重を上昇させていく。この間、圧縮荷重値は荷重表示装置に常に表示されている。圧縮荷重を上昇させていくと図6のように座屈にいたるが、座屈の瞬間に荷重表示装置に表示された荷重値が突然下がるので実験員がその下がる直前の値(極大値)を記録する。その値を座屈荷重値とする。加圧装置の油圧を抜けば圧縮荷重が零となり、可逆的にストリップはまた元の状態に戻る。このような作業を繰り返すうちに、座屈荷重値近傍の挙動がストリップのたわみ形状等の視覚的情報から感覚的にわかりはじめると、実験員はその付近では圧縮荷重を小刻みに上げるなどすることで座屈荷重値の計測精度が上がってくる。

3・2 座屈荷重の換算式 ROT 上を走行するストリップは高温の鋼板であり、室温の鋼板よりも表2に示すように縦弾性係数が低くなる。またストリップ座屈試験で用いるストリップ形状、装置寸法は、実

Fig. 6 Buckling mode of strip

Fig. 7 Transverse deflection of strip

機 ROT のストリップと若干異なる。ストリップ座屈試験装置でえられた座屈荷重値を高温のストリップの座屈荷重へ換算する必要がある。室温鋼板の座屈荷重を高温鋼板の座屈荷重への換算式は、

$$P_{c1} = \frac{E_1 I_1 L_1^2}{E_0 I_0 L_0^2} P_{c0} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 P_{c1} 、 E_1 、 I_1 、 L_1 は高温鋼板の座屈荷重、縦弾性係数、断面 2 次モーメント、テーブルロール代表ピッチであり、 P_{c0} 、 E_0 、 I_0 、 L_0 は室温鋼板の座屈荷重、縦弾性係数、断面 2 次モーメント、テーブルロール代表ピッチである。

3・3 実験条件と実験結果 実験に使用したストリップは板厚 0.9 mm、板幅 1.219 m、板長 2.4 m の鋼板であり、縦弾性係数は 2.1×10^{11} Pa である。実験によりえられた座屈荷重値は、114 kgf であった。図 7 にストリップたわみ形状計測値のグラフを示す。テーブルロールピッチを半周期とした正弦状の座屈モードがあらわれていることがわかる。

この場合の座屈荷重の理論値は 98 kgf であり、実験値は理論値より若干大きめとなるがよく一致している。この差異の原因としては、実験で用いた鋼板が 2.4 m と短めであるため、ストリップ両端の境界条件の影響が若干現れてしまったものと考えられる。

テーブルロール形状は実機 ROT とストリップ座屈試験装置で同じとし、式 (17) を用いて表 2 の実操業ストリップ材の座屈荷重 P_{c1} を計算すると、座屈荷重値 P_{c1} は 127 kgf となる。

式 (1) とこの座屈荷重値を用いると、高温鋼板の ROT 通板安定限界速度は 11.5 m/s と算出される。この値は実操業における経験値とほぼ近い値である。

座屈現象は最も座屈荷重値が低い座屈モードへ座屈するということが構造力学の定石であり、この考えを踏襲すると、最も座屈荷重が低い座屈モードであるストリップ両端を固定端とした一つの山形状しか現れないのではという懸念もあった。実験結果は予想どおりの座屈形状が発生しており、ROT 通板不安定現象の本質は座屈現象であるということが理論の上だけでなく実験的にも証明された。

4. 結 言

本論文では、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 ROT 上を高速に走行する際に、「頭折れ」、「ダブリ込み」等の名称で呼ばれる通板不安定性について、実験的な考察を行い、次に示す成果を得た。

(1) 実機 ROT をスケールダウンした ROS によ

る通板試験方法を提案した。

(2) ROS と実機 ROT との間の整合性をとるための相似則、実験パラメータの設定方法を考案した。

(3) ROS の実験でえられた通板安定限界速度は、ROT 通板安定限界速度の理論値とよく一致することが確認でき、ROT 通板安定限界理論が証明された。

(4) ストリップ座屈試験装置を用いて、ROT 通板安定限界速度を求める方法を提案した。ストリップ座屈試験装置は可動部分がほとんど存在しないために、装置コストが安価であり、設置も単純であるので、実験室レベルで実機と同じスケールを模擬することが可能となる。

(5) ストリップ座屈試験装置よりえられた座屈荷重値から換算された ROT 通板安定限界速度は経験的な値、および理論値とほぼ一致する結果がえられた。このことから ROT 通板不安定現象の本質は座屈現象であることが証明できた。

ROS を用いることで、通板安定化対策を実験室レベルで開発することが可能となり、開発コストの低減、開発期間の短縮化が見込まれる。また、ストリップ座屈試験装置にて考案した通板安定化手段(座屈荷重向上手段)は、そのまま実機へ転用できるため、開発コストの低減、開発期間の短縮化が見込まれる。

ROS およびストリップ座屈試験装置において、実機 ROT を ROT 通板安定理論に基づいて模擬しているが、おのおのにはやはり欠点がある。ROS はスケールダウンされた実験装置であるので、通板安定化手段をある程度の定量化することには寄与するが作り込み、実機特性に合わせてカスタマイズする過程においては若干力不足となる。ストリップ座屈試験装置は通板が安定している状態を模擬しているので、通板が不安定な状態については何も回答がえられない。それらを解決するためには、数値シミュレーションの手段が有効となってくる。

文 献

- (1) Aoe, S., Hayashi, H., Ishino, K., Kobayashi, M., Ohara, Y. and Kitahama, S., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 721 (2006), pp. 2921-2925.
- (2) Mote, C. D., Jr., *Journal of The Franklin Institute*, Vol. 279, No. 6 (1965), pp. 430-445.
- (3) Galip Ulsoy, A., *Journal of Vibration, Acoustic, Stress*, Vol. 108 (1986), pp. 207-212, Reliability in Design.
- (4) Nakamura, Y. et al., METHOD AND DEVICE FOR CONVEYING STRIP IN HOT ROLLING, *Japanese Patent Disclosure*, 2000-225410, A (2000).
- (5) Murata, S. et al., *Fluid Mechanics*, (1979), pp. 52-53, Morikita Publishing.