論文

薄鋼板調質圧延中に生じる縦バックルに及ぼす
出側流出角の影響

岡崎 俊郎* 木村 幸雄*

木島 秀夫* 三宅 勝*

Effect of Delivery Angle on Longitudinal Buckling
in Temper Rolling of Thin Steel Strips

Toshiro OKAZAKI*, Yukio KIMURA*,

Hideo KIJIMA* and Masaru MIYAKE*

(Received on March 26, 2019)

In temper rolling of double reduced thin strips, shape defect called “longitudinal buckling” appears. In previous study, the effect of several rolling conditions on the longitudinal buckling was investigated. However, effect of delivery angle over 4 degree has not been experimented. In this paper, effect of large delivery angle is investigated in laboratory rolling. Results show that by increasing delivery angle, the buckling appears clearly and the number of waves decreases, and by the delivery angle over 24 degree the buckling disappears. If the delivery angle is the same, the buckling form does not change by the distance between work roll and auxiliary roll. Next we calculate the buckling characteristics of the sheet which twines around the work roll by the elementary theory. We find that the change of number of waves by the delivery angle calculated from the analysis almost agrees with the experimental result when the delivery angle is larger than 10 degree. It is estimated that the longitudinal buckling is initiated around roll gap and changes under the influence of the shape of sheet which twines around the work roll.

Key words: rolling, temper rolling, skin pass, model simulation, flatness, buckling, longitudinal buckle, cross buckle.

1. 緒言

薄鋼板の調質圧延時にクロスバックルや縦バックルと呼ばれるスジ状の表面模様が発生することがある。特に縦バックルは長手方向に平行な波形状として現れ、冷延-焼鈍後に二次冷延が施された薄板に関して発生しやすいと言われている。これらが発生した板は表面欠陥品とされ矯正工程等の追加工程が必要となることが多い。

この現象は圧延で生じる鋼板内部残留応力による圧延機出側での鋼板の座屈現象（バックリング）と考えられており、これまでに発生防止の為に圧延条件の検討や発生メカニズムの解明に関する報告がされてきた^{1)~3)}。

木島ら¹⁾は圧延条件が縦バックル発生挙動に及ぼす影響を実験により調査し、下記の傾向を明らかにしている。

- ・圧延荷重を低減すると波高さが減少する。
- ・圧延張力の大きさによらず縦バックルは発生する。
- ・ワークロール粗さの低減により波高さが減少する。
- ・圧延出側流出角増加により波高さが増加する。

また小森²⁾は縦バックルの波長を座屈の初等解析により求めており、解析より得られた縦バックルの波長は実験値と概ね一致することを示した。また、解析モデル上、調質圧延ロールの算術平均粗さが低いと座屈しにくい結果となっており、実験と傾向が一致している。

縦バックルを防止する為に、圧延荷重やワークロール粗さを変更することは製品特性への影響が大きく実用上困難な場合が多い。一方、流出角の変更は比較的製品特性への影響が小さく重要な縦バックル防止方法である。一般的な調質圧延機には通板の安定化、張力測定などの目的から出側に補助ロールが設置されており、水平なパスラインに対し圧延出側流出角を付与することが可能である。

従来の検討の中で、流出角度の影響については木島ら¹⁾により流出角度 0~4° の範囲でラボ実験による調査が行われているが、それ以上の流出角を付与した場合の挙動については検討されておらず、また、解析による検討もされていない。

本報告では冷延-焼鈍後に二次冷延（圧下率約 40%）を施した鋼板に対する調質圧延（圧下率 2%以下）において、従来検討よりも大きな流出角を付与した場合の縦バックル発生挙動をラボ実験にて調査した結果を述べる。また、圧延

* JFE スチール(株), スチール研究所 〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation,
Kawasaki-cho 1, Chuo-ku, Chiba 260-0835, Japan.
E-mail: t-okazaki@jfe-steel.co.jp

出側において鋼板がワークロールに巻付いている部分（巻付部）の形状が縦バックル発生挙動に影響している可能性を検討するため、巻付部の座屈モードを初等解析により求め実験結果と比較した。

2. 実験方法

縦バックル発生挙動を明らかにするため、コイル圧延機を用いた調質圧延実験を実施した。圧延条件を Table 1 に、実験に使用したラバ圧延機の模式図を Fig. 1 に示す。圧延機は 2Hi である。ワークロール直径は 330 mm であり、ロール表面粗さを円筒研磨で $1.3 \mu\text{m}Ra$ としたものをを用いた。圧延スタンド出側には直径 200 mm の補助ロールを設置し、高さを変更することによって圧延出側流出角を $0\sim 40^\circ$ の範囲で変更した。流出角 0° の場合には補助ロールと鋼板は接触しないようにしている。また、補助ロールは圧延方向に可動であり、巻き付き部から補助ロールまでの距離の影響を調査する為ワークロールと補助ロールの中心間の水平距離を 225 mm, 375 mm の 2 条件設けた。

供試材は板厚 0.25 mm, 板幅 300 mm の軟鋼材を板厚 0.15 mm まで二次冷延したものを使用した。供試材の降伏応力は 657 MPa であった。圧延条件は圧延荷重を 5.3 kN/mm, 入出側張力を 100 MPa, 圧延速度を 10 m/min とした。また潤滑条件は Dry とした。

調質圧延後、コイルより採取した鋼板サンプルを定盤上に圧延時の上面を上にして静置し、走査式レーザ距離計により幅方向の表面プロファイルを測定した。

3. 実験結果

Fig. 2 に、ワークロールと補助ロールの中心間の水平距離が 225 mm の場合について、補助ロールの高さを変更して流出角を変更した時の圧延後のサンプル外観を示す。流出角 0° の場合には比較的不明瞭な多数の縦バックルが観察できる。流出角 5° から 14° に増加すると縦バックルの本数（波数）が減少し、一本ずつが明瞭な縦バックルになっている。流出角 24° の場合、縦バックルは見られなかった。図示していないが、 24° より大きい流出角の場合についても観察を行ったが縦バックルは見られなかった。

Table 1 Experiment condition

Rolling load per width [kN/mm]	5.3
Thickness at entry side [mm]	0.15
Width [mm]	300
Unit tension at entry side [MPa]	100
Unit tension at delivery side [MPa]	100
Work roll diameter [mm]	330
Roughness of work roll surface [$\mu\text{m}Ra$]	1.3
Auxiliary roll diameter [mm]	200
Distance between work roll and auxiliary roll [mm]	225, 375
Delivery angle [$^\circ$]	$0\sim 40$
Rolling speed [m/min]	10
Lubrication	Dry

Fig. 3 に、表面プロファイルの測定結果を圧延時のワークロールと補助ロールの中心間の水平距離が 225 mm の場合について示す。鋼板を静置した状態で反り量の小さい幅中央付近について示しており、Fig. 2 における板左端部から 50 mm の位置を横軸の 0 mm とし、Fig. 2 における板右端部に向かって表面プロファイルを測定した結果である。流出角 14° の場合は凹凸形状が明確であった箇所を示すため、Fig. 2 における板左端部から 175 mm の位置を横軸の 0 mm とした。流出角 0° , 5° , 14° の場合は表面プロファイルに凹凸形状が見られることが分かる。流出角が大きいほど凹凸形状が明確となる傾向がある。流出角 14° では明確な凹凸形状が確認でき、圧延時の下面に向けた凸形状を有している。流出角 24° では凹凸形状が見られないことが確認できる。

Fig. 1 Figure of rolling equipment

Fig. 2 Appearance of sheet after skin-pass rolling (Distance between work roll and auxiliary roll: 225 mm)

Fig. 3 Wave chart of longitudinal buckling (Distance between work roll and auxiliary roll: 225 mm)

Fig. 4 Effect of delivery angle to buckling behavior (Distance between work roll and auxiliary roll: 225 mm)

(a) Influence of height of auxiliary roll

(b) Influence of delivery angle

Fig. 5 Effect of distance between work roll and auxiliary roll to buckling behavior

Fig. 2 および Fig. 3 より外観上縦バックルが存在する鋼板では表面プロフィール上で局所的に凹部と凸部が隣接して存在する箇所が存在することが分かる．測定した表面プロフィールから、凹部と凸部の高低差を波深さとして評価した．このとき、鋼板の反り形状の影響を除くため、測定した表面プロフィールの 2 次の近似曲線を最小二乗法により求め、測定した表面プロフィールとの差を評価対象とし波深さを評価した．また、鋼板の外観から幅全体における縦バックルの本数（波数）を評価した．

Fig. 4 に、ワークロールと補助ロールの中心間の水平距離が 225 mm の場合について、流出角に対する波数と波深さの変化を示す．波数に関しては、流出角の増加に伴い減少し、流出角 24° 以上で縦バックルの消失に伴いゼロとなる．波深さに関しては、流出角上昇に伴い増加した後、流出角 24° 以上では縦バックルの消失に伴い 0 μm となる．

Fig. 5 に流出角に対する縦バックルの波数の変化に関して、ワークロールと補助ロールの中心間の距離が 225 mm の場合と 375 mm の場合を比較している．同じロール高さで比較した場合は両者で波数に差があるが、同じ流出角で比較した場合は非常に近い波数となる．

ワークロールと補助ロールの中心間の距離が 375 mm の場合に関して、圧延後に補助ロールを通過する前の鋼板について縦バックル有無を観察した．ワークロールと補助ロ

ールの間の鋼板外観を下方から目視で観察したところ、補助ロール通過後に縦バックルが存在するものは、補助ロール通過前にも縦バックルが存在していることが確認できた。

4. 解析モデル

流出角により縦バックルの波数と波深さが変化したことから、鋼板がワークロールに巻付いている部分（巻付部）の形状が縦バックル発生挙動に影響している可能性が考えられる。検証の為、曲率を有する平板として巻付部をモデル化し、座屈モードを初等解析により求め実験結果と比較した。

今回検討したモデルについて述べる。ロールバイト出口面の近傍ではロールからの拘束により板幅方向弾性ひずみがゼロと仮定すると式(1)が成り立つ。ここで、 ε_z は板幅方向ひずみ、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z はそれぞれ長手方向、板厚方向、および板幅方向応力を示す。なお本稿において引張応力を負、圧縮応力を正の値として記す。

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \} = 0 \quad (1)$$

ここでロールバイト出口における応力状態として、長手方向応力を張力 t_f 、板厚方向応力を圧延材の変形抵抗 k_f と仮定し、式(1)より板幅方向応力 σ_z を式(2)で表す。

$$\sigma_z = \nu(k_f - t_f) \quad (2)$$

本モデルでは巻付部に式(2)の板幅方向応力が均一に働くと仮定し、これが弾性座屈限界を超えると縦バックルが発生すると考える。これは大胆な仮定であるが、初等解析法を用いるために本報告ではこの仮説を採用する。

Fig. 6 Buckling model of sheet with curvature

本報告では、縦バックルを Fig. 6 のように無負荷状態でのワークロールと同じ曲率を有する平板の弾性変形としてモデル化し、式(3)～(5)により座屈限界応力 σ_{cr} を求めた⁴⁾。ここで、 a は板幅、 h は板厚、 r は曲率半径(ワークロール半径)、 β は巻付角(流出角)、 m 、 n はそれぞれ板幅方向、および長手方向波数を示す。

実際には長手方向に鋼板が連続して存在するが、本解析ではワークロール中心直下からワークロールに巻付いている部分までをモデル化している。鋼板の長手方向および幅方向端部は自由端として扱い、圧延ロールや長手方向に連続して存在する鋼板による拘束は考慮せず、また、鋼板に働く張力も考慮しない。また、鋼板がワークロールから受ける圧力は無視する。一般に圧延後の残留応力は長手方向、板幅方向に均一ではないとされているが^{5)~7)}、板幅方向応力は平板内で一様に働いていると仮定している。

$$\sigma_{cr} = \alpha E \frac{\left(\frac{n^2 \pi^2}{\beta^2} + \lambda^2 \right)^2}{(1 - \nu^2) \lambda^2} + E \frac{\lambda^2}{\left(\frac{n^2 \pi^2}{\beta^2} + \lambda^2 \right)^2} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{m \pi r}{a} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{h^2}{12 r^2} \quad (5)$$

5. 解析結果

Fig. 7 に Table 1 に示した条件を用い式(3)により計算した座屈限界応力の理論値を示す。鋼板がロールに沿って曲がっている状況を仮定し長手方向波数 $n=1$ としている。本条件で式(2)により計算される幅方向応力は約 171 MPa である。なおポアソン比 ν は 0.3 とした。

Fig. 7 に示す結果より流出角が 23° 以上ではいずれの板幅方向波数 m でも座屈限界応力は 171 MPa 以上であり、座屈は発生しないことを示す。また、流出角が小さい場合は板幅方向波数 m が大きい条件で座屈限界応力は小さくなり、流出角が大きい場合は板幅方向波数 m が小さい条件で座屈限界応力は小さくなる。つまり、流出角が大きいほど小さい波数 m で座屈しやすい事を示している。

Fig. 7 Calculated buckling limit stress (Number of waves in longitudinal direction: $n=1$)

Fig. 8 Effect of delivery angle to buckling behavior (Distance between work roll and auxiliary roll: 225 mm)

Fig. 7 に示す解析結果から、各流出角において座屈限界応力が最小となる板幅方向波数 m を算出した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 4 に示す実験における流出角の変化に対する縦バックルの波数変化を併せて記載している。高流出角 (10° 以上) において両者は近い変化をしている。

6. 考 察

以上の実験および解析から圧延側流出角が縦バックル発生挙動に及ぼす影響について考察する。

まず、実験結果について従来の知見と比較し考察する。木島ら¹⁾は流出角 $0 \sim 4^\circ$ の範囲で、流出角増加により波高が増加し縦バックルが明確になる事を明らかにしており、これは今回の実験結果と同様である。また、小森²⁾は縦バックルの波長を座屈の初等解析により求めており、ロールバイト近傍の変形を仮定する事により流出角が 0° の場合について木島らの実験¹⁾と近い波形が予測できることを示している。以上より、流出角が 0° の場合について、縦バックル波数はロールバイト近傍での変形により決まっていると理解できる。

次に、流出角を従来条件以上に大きくした場合の実験結果について考察する。Fig. 2 および Fig. 4 に示す実験結果から、流出角の増加に伴う縦バックルの波数の変化が明らかとなった。この時、鋼板が補助ロールを通過する前に既に縦バックルは存在しており、また、流出角が等しければワークロールと補助ロールの間の距離を変えても縦バックル波数が変化しなかった。このことから、ロールバイト出口近傍から巻付き部での鋼板に対する拘束条件により縦バックル波数が決定していると考えられる。

さらに、前述の実験結果と解析結果とを比較して考察する。Fig. 7 に示す解析結果から、曲率を有する平板は流出角が大きいほど小さい板幅方向波数 m で座屈しやすく、一定角度以上で座屈が発生しなくなる挙動を示し、これは Fig. 4 に示す実験結果と定性的に一致することが分かった。Fig. 8 に示す縦バックル波数に関する実験結果と解析結果の比較より、高流出角 (10° 以上) において両者は非常に似た変化をしている事が分かる。このことから、高流出角で観察される縦バックルはロールバイト出側での板幅方向圧縮応力による座屈現象であって、その座屈後の板形状はワー

クロールへの巻付部の形状によって決定されるものと推測される。また、解析において、板幅方向応力を式(2)と仮定したが、仮に実際の幅方向応力の大きさが異なっていたとしても、曲率を有する平板は流出角が大きいほど小さい板幅方向波数 m で座屈しやすいという特性は変わらないため、定性的に実現象と一致する。

一方で、実現象と解析モデルには下記のような差異があり座屈現象への影響が考えられる。解析モデルでは長手方向に連続して存在する鋼板を考慮していない。連続して鋼板が存在すると圧縮応力による座屈を抑制する作用が生じる可能性がある。また、解析モデルでは鋼板がロールに沿って曲がっている状況を仮定し長手方向波数 $n=1$ としている。長手方向波数 $n=1$ と仮定すると実験結果と定性的に一致するが、より高次の波数を仮定すると 23° 以上の流出角でも座屈が発生する可能性がある。

また、座屈の形状は幅方向に均一なサインカーブを仮定しているが、実際には Fig. 2, Fig. 3 に示すように幅方向に均一ではなく、下面に向けた凸形状を有する場合もある。ワークロールと鋼板間の面圧により、鋼板の面外変形を抑制しようとする作用が働き、それにより面圧分布が局所化していることも考えられ、縦バックルの波形状と関連している可能性もある。また、本モデルでは巻付部においてはロールバイトでの拘束による板幅方向応力が均一に働くと仮定しているが、前述の通りこれは大胆な仮定である。巻付部全体の幅方向弾性ひずみがゼロであることを前提としており、この妥当性については検討が必要である。

これらの差異により解析モデルにより全ての実験結果を説明することは困難である。一方で、高流出角での波数についてはよく一致しており、解析モデルで仮定した事項が実際の座屈挙動に大きく影響しているといえる。

以上の議論より、縦バックル発生時の波数について、流出角が 0° の条件では従来提案されたメカニズムにより現象を説明でき、流出角を大きくした場合の挙動については幅方向に圧縮応力を受ける曲率を有する平板の座屈挙動から波数変化を説明できる。また、縦バックルとして観察される座屈形状は、ロールバイト近傍での変形により決まっているだけでなく、その下流側のワークロールとの接触状態も大きな影響を与えると理解できる。したがって、縦バックルについては、多数の微小波が生じる座屈の発生挙動と、その座屈形状が成長・消滅する発展挙動に分けて理解する必要がある。

7. 結 言

二次冷延後鋼板の調質圧延において、従来検討よりも大きな流出角を付与した場合の縦バックル発生挙動をラゴ実験にて調査した。また、圧延出側において鋼板がワークロールに巻付いている部分（巻付部）の座屈特性を初等解析により求め実験結果と比較した。結果、以下の知見が得られた。

- (1) 実験結果より、流出角の増加に従い縦バックルの波数が減少し一本ずつが明瞭となることが分かった。流出角を一定以上とすると縦バックルは消失した。
- (2) 実験結果より、流出角が同じであれば、ワークロールと補助ロールの距離が縦バックルに及ぼす影響は小

さいことが分かった。

- (3) 解析により得られたワークロールへの巻付部の座屈挙動は、流出角が大きいほど小さい板幅方向波数 m で座屈しやすく、一定角度以上で座屈が発生しなくなるという特性を持つ。この特性は、高流出角 (10° 以上) 条件において実験結果と似ており、縦バックルの発生挙動は巻付部の形状と関係していることが示唆される。

参 考 文 献

- 1) Kijima, H. & Kitahama, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **43**-493 (2002), 150-154.
- 2) Komori, K.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **36**-410 (1995), 211-217.
- 3) Komori, K.: Tetsu-to-Hagané, **94**-10 (2008), 70-77.
- 4) Timoshenko, S.P. & Gere, J.M. : Theory of Elastic Stability, (1961), 485-487, McGraw-Hill.
- 5) Yukawa, N., Ishikawa, T. & Tozawa, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **28**-312 (1987), 28-33.
- 6) Yukawa, N., Ishikawa, T. & Tozawa, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **28**-314 (1987), 251-256.
- 7) Yukawa, N., Ishikawa, T. & Tozawa, Y.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **28**-318 (1987), 726-732.