

薄板用リコイラインでの平坦度矯正技術

柳 修介*・服部重夫(工博)*・前田恭志*・井端治廣**・杉本有一郎**・澤田 譲**

*技術開発本部・生産技術研究所 **加古川製鉄所・薄板部

Recoiling Line Flatness Assurance Technology for Thin Strip Materials

Shusuke Yanagi・Dr. Shigeo Hattori・Yasushi Maeda・Haruhiro Ibata・Yuichiro Sugimoto・Mamoru Sawada

In order to provide strips with excellent flatness, the flattening ability of roller levellers was evaluated with a mild steel strip of around 0.4mm thickness. The flatness after tension levelling was examined with an aluminum strip of 0.3mm thickness. The experimental results show a center buckle formation after levelling with an extension rate higher than 0.5%. Numerical studies suggest that this phenomenon was possibly caused by transversal stress variations during levelling. It was also demonstrated that the axially inhomogeneous coil deformations due to the strip crown causes a wavy edge at the inner part of the coil when coiling tension is extremely high.

まえがき = 高い平坦度を要求される薄板製品は、通常リコイラインでレベラ矯正をおこなった後出荷される。いっぽう、このレベラ矯正では高い平坦度がえられるが、コイルに巻取る際に平坦度変化が起こることも報告されており^{1)~4)}、高い平坦度を保証するためには、レベラ矯正条件とともに巻取り条件の適正化が必要である。

そこで、当社では、レベラ矯正時の平坦度予測、巻取り時のコイル変形予測のための解析技術⁵⁾⁶⁾を開発した。これに加え、薄板用リコイラインの実設備を利用して、レベラ矯正条件と平坦度の関係、巻取り時のコイル変形と平坦度変化の関係を調査した⁷⁾。さらに、この実験結果および解析結果をもとに、レベラ矯正と巻取りにおける作業条件を適正化し、薄板製品の平坦度向上に努めている。

本稿では、リコイラインを対象としておこなった実験結果とレベラ矯正・巻取り過程の解析技術の適用例について紹介する。

1. レベラでの平坦度矯正について

軟鋼およびアルミニウムの薄板用のリコイラインを対象に、レベラ矯正条件と平坦度の関係を調査した。両レベラの主仕様を第1表に示す。今回調査対象とした

軟鋼板用ラインのレベラ (Case) はレベラ部の張力調整機構のないローラレベラタイプであるが、巻取り張力によりある程度の張力がレベラ通板中の板に作用する。いっぽう、アルミニウム板用ラインのレベラ (Case) は、レベラ伸び率の検出機構とレベラ張力の調整用プライドルロールを備えたテンションレベラである。

1.1 レベラでの平坦度矯正能力

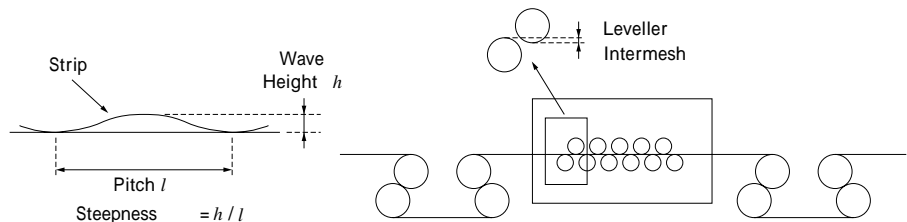
第1表に示す条件でレベラ矯正をおこない、矯正前後の平坦度を調査した。平坦度は第1図に示す急峻度で評価した。また、第1図にはレベラインターメッシュ

第1表 レベラ寸法およびレベラ条件

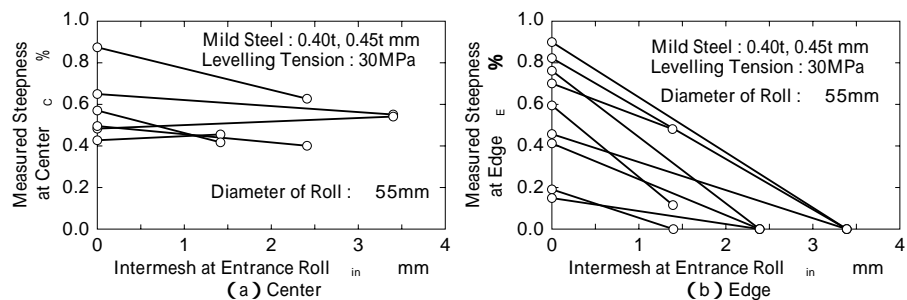
Table 1 Main specification of levelling unit and levelling condition

Case			
Type	Roller Leveller	Tension Leveller	
Leveller Roll	55mm x 15 (Multi-Roller Unit)	18 ~ 35mm x 4 (Extension Unit) 35mm x 10 (Multi-Roller Unit)	
Strip	Material	Mild Steel	Aluminum
	Thickness	0.4, 0.45mm	0.3mm
	Width	1 000mm	1 000mm
Levelling Condition	Intermesh at Entrance Roll : 1.4 ~ 3.4mm Unit Tension : 30MPa	Levelling Extension : 0.2 ~ 0.8%	

第1図 急峻度、レベラインターメッシュの定義
Fig. 1 Definitions of steepness and leveller intermesh

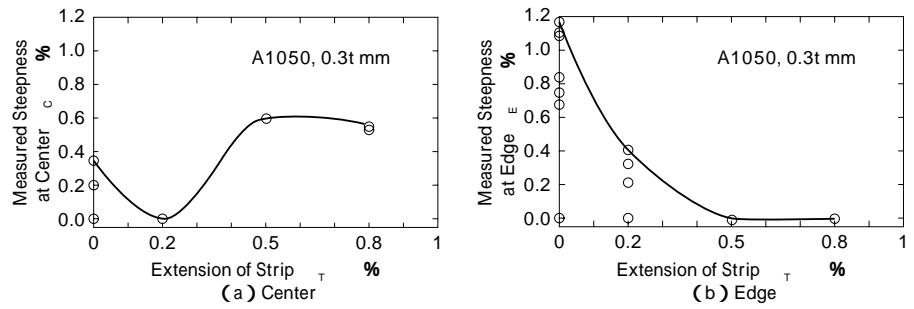


第2図 軟鋼板のレベラ矯正後の急峻度に及ぼす入側インターメッシュの影響
Fig. 2 Relation between intermesh at entrance roll and steepness of mild steel strip after levelling



第3図 純アルミ板のレベラ矯正後の急峻度に及ぼすレベラ伸び率の影響

Fig. 3 Relation between extension of strip through levelling and steepness of aluminum strip after levelling



の定義もあわせて示した。

Case につき、最大インターメッシュ（レベラ入側ロールのインターメッシュ ϵ_{in} ）と入・出側の平坦度の関係を第2図に示す（矯正前の平坦度は $\epsilon_{in}=0$ の軸上の点で示されている）。ローラレベラでも通常の巻取り張力により平坦度の改善が可能であり、同図より ϵ_{in} を増すほど平坦度の改善効果が顕著になることがわかる。また、中伸びのほうが平坦度が改善されにくいことが認められる。

Case についての伸び率と矯正後の平坦度の関係を第3図に示す（矯正前の平坦度はレベラ伸び率 $\epsilon_T=0$ の軸上の点で示されている）。矯正前のコイルには急峻度で0~0.4%の中伸びと0~1.2%の耳波が混在していた。伸び率の増加とともに、中伸び ϵ_c 、耳波 ϵ_e ともに改善されていくが、伸び率を0.5%以上になると、耳波は完全に0となるが、板幅中央部には逆に0.5%程度の中伸びが形成されている。

今回の実験結果からは、ローラレベラタイプでもある程度の平坦度の改善が可能であること、また、薄板製品のレベラ矯正では、中伸び形状が修正されにくく、レベラ伸び率を増すと逆に中伸びが形成されていく場合があるという結果がえられた。

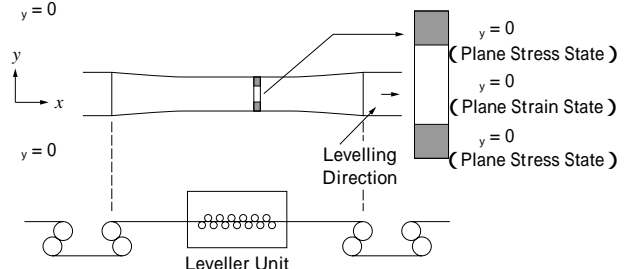
1.2 レベラ矯正後の中伸び形成要因の考察

レベラ矯正時の板変形の解析により、伸び率を増したときに認められた中伸びの形成要因について検討する。

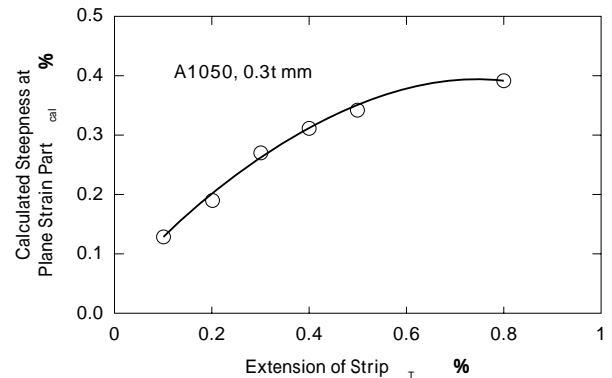
矯正中の板変形の解析方法は、美坂・益居らの二次元を対象とした手法³⁾をもとに、板幅方向にも要素分割をおこない、平坦度を考慮できる解析法に拡張した。とくに、中伸びの形成要因として、板幅方向の応力状態の違い、すなわち、板幅中央部は平面歪み状態で、端部は平面応力状態でそれぞれ矯正中に引張り・曲げ変形を受けることを仮定した。この効果を考慮するために第4図に示すように、端部の1/4ずつの領域を平面応力状態、中央部（全幅の1/2）を平面歪み状態として計算できるようにした。

ここでは、第1表のCase の条件で計算をおこない、平面歪み状態で変形を受ける板幅中央部と平面応力状態で変形を受ける端部の伸び率の差から、中伸びの急峻度を求めた。なお、矯正前の板は平坦（中伸び、耳波とも0）とした。第5図にレベラ伸び率と中伸びの急峻度との関係を示す。ここで急峻度 ϵ_{cal} は、伸び率の差 Δ から次式により求めた。

$$\epsilon_{cal} = (2 / \sqrt{\Delta})^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$



第4図 レベラ矯正中の板各部の応力状態に関する仮定
Fig. 4 Assumed Stress State of Strip under Levelling Process



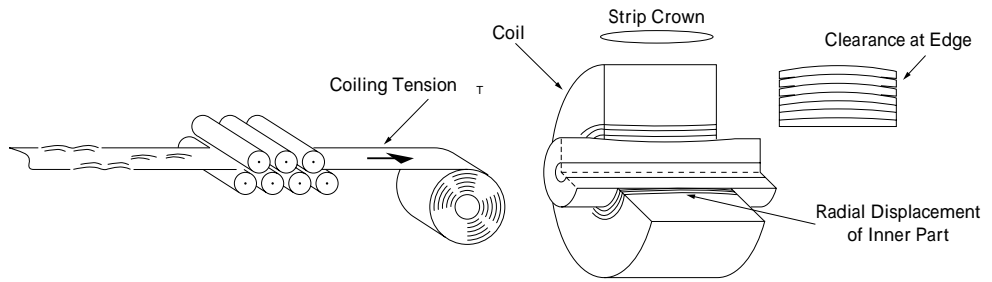
第5図 純アルミ材を対象としたレベラ伸び率と平面歪み分の急峻度の関係の計算結果
Fig. 5 Relation between extension of strip through levelling and calculated steepness of strip at width center in case for aluminum strip

レベラ伸び率を増すにしたがい、平面歪み部(中央部)の伸びが過大になり、0.5%程度の伸び率で急峻度0.3%強の中伸び形状となっている。いっぽう、実機テンションレベラ後の中伸びの実測値（第3図）は、伸び率0.5%のとき急峻度で0.5%強であり、計算された中伸びよりも若干大きい。単純な仮定のわりにはよく対応しており、実機においても応力状態の違いが矯正後の平坦度に影響を与えていると考えられる。

応力状態の違いに起因して形成される中伸びを抑制するためには、伸び率を過度に大きくとらないことが必要である。また、設備的には、レベラのワークロールを支えるバックアップロールを、押し込み量が可変である分割式とし、幅方向でインターメッシュを調整する機構を設けることが有効であると考えられる。

2. 巻取り時のコイル変形と平坦度変化

レベラ矯正により板の平坦度を改善した後でも、コイル巻取り時に平坦度が変化し、要求される平坦度を保証できなくなることがある。そこで、高い平坦度の板を提



第6図 巻取り中のコイル変形
Fig. 6 Deformation of coil under coiling process

供するためには、レベラ条件を適正化するだけでなく、コイル巻取り時の平坦度変化を抑制することが必要である。

巻取り中の平坦度の変化については、板クラウンのある材料を巻取るときにコイル外周部に中伸びが形成されることが報告されている¹⁾。また、コイル内周部には耳波状の平坦度変化の起こることが報告されている²⁾⁻⁴⁾。

コイル内周部に発生する耳波については、これまでに現象論的な説明がなされているが、理論的にその発生機構が論じられてはいなかった。そこで、まず巻取り時にコイル各部に発生する応力・歪み分布を解析する手法を開発した。そして、コイル変形の解析と実機リコイラインを使用したコイル巻取り実験をおこない、内周部の耳波発生機構を明らかにするとともに、その発生に及ぼす巻取り張力、板クラウンの影響を調査して耳波発生条件を定量的に規定し、内周部の耳波不良を生じさせない巻取り、板クラウンの条件を明らかにした。

コイル変形の解析手法、および、実験結果の詳細は文献⁶⁾⁷⁾に譲り、ここではその一端を紹介する。

2.1 巻取り時のコイル変形の考え方

巻取り中のコイルは概略第6図に示すように変形すると考えられる。すなわち、巻取り張力 τ がコイル最外周より、半径方向の圧縮応力として巻取られた部分に作用する。これによりコイルは巻締まっていく。最外周に作用する外圧は、板クラウン、およびこれを反映したコイル巻太り形状、エッジ部に形成されていくすき間により、幅方向分布を有する。これにともない、巻締まりかたもコイル軸方向で不均一となる。このように、板クラウンによりコイルが軸方向に不均一に変形するため、この変形がひとたび塑性域に入ると、平坦度変化が生じると考えられる。

第2表 実験にもちいたコイル、スプール、スリーブの寸法

Table 2 Specification of coil, spool, and sleeve used in recoiling test

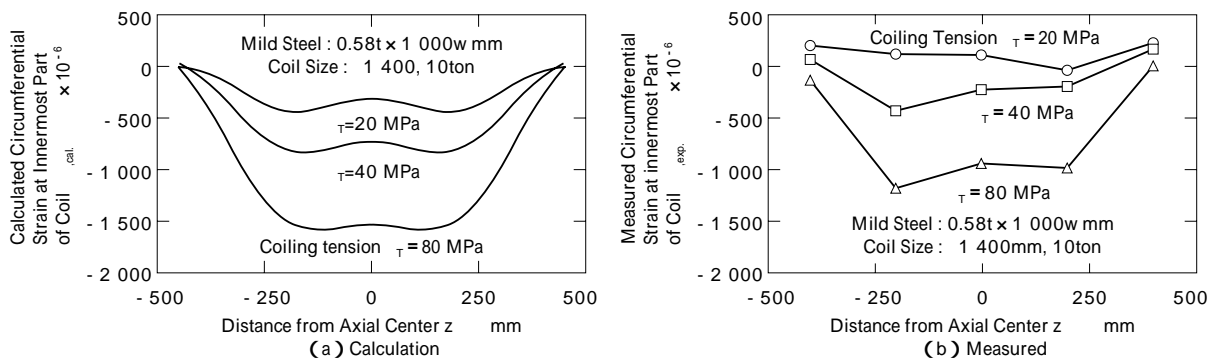
Coil	Inner Diameter	511mm
	Outer Diameter	1 400mm
Strip	Thickness	0.58mm
	Crown Ratio	1%
Spool	Material	Steel
	Length	1 000mm
	Thickness	4.5mm
Sleeve	Material	Rubber
	Length	1 750mm
	Thickness	25.7mm
Coiling Tension		20 40 80MPa

今回開発したコイル変形の解析手法では、板クラウンに起因して生じるコイルの軸方向不均一変形を取り扱えるようにした。

2.2 コイル内周部の変形

コイル変形の解析により、コイル内周部の応力分布を調査した。また、実機リコイラインを使用して、コイル巻取り実験をおこないコイルの変形を実測した。実験には同一コイルを使用し、巻取り張力を変えて3度リコイラを通板、コイル長手方向各部で巻取り前後の平坦度を測定し、平坦度変化の発生の有無を調べた。また、巻取り用のスプールには、内面の20箇所に歪みゲージを貼り周方向の歪みを実測し、これをコイル内周部に発生した歪みとした。使用したコイルの寸法等を第2表に示す。

第2表の条件でおこなったコイル内周部の周方向歪みの計算結果と実測結果を第7図に示す。計算から、板厚の厚い板幅中央部に大きな周方向圧縮応力が発生することが予想され、これが実験によっても確認されている。また、巻取り張力を増すと、圧縮歪みの大きさは相似的



第7図 軟鋼板を対象としたコイル内周部の周方向歪みの計算結果 (a) と実測結果 (b)

Fig. 7 Calculated (a) and measured (b) results of circumferential strain induced at innermost part of coil in case for mild steel

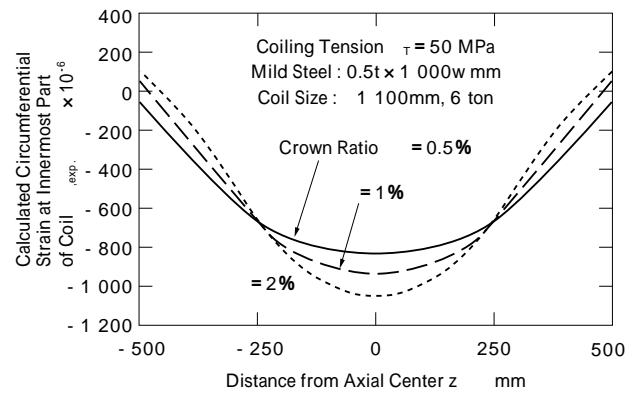
に増していく。

第8図に、板クラウン率（板幅中央部と端部の板厚差 / 板幅中央部の板厚）とコイル内周部の周方向圧縮歪みの関係の計算結果を示す。第8図より、板クラウン率が大きくなると周方向圧縮応力も大きくなるがわかる。

以上から、コイルの不均一変形には、巻取り張力と板クラウンが関係していることが明らかになった。

2.3 平坦度変化の発生機構と発生条件

巻取り時の平坦度変化は、コイルの軸方向不均一変形が過大となり、板材に局部的な塑性変形が生じるために発生すると考えられる。前節の計算、および実験結果より、コイル内周部では板幅中央部に周方向の圧縮応力が形成され、圧縮側に塑性変形しやすい状態にあり、高い巻取り張力で巻き取る、あるいは、クラウンの大きな板を巻き取る場合、中央部が塑性縮みを起こし耳波状の平

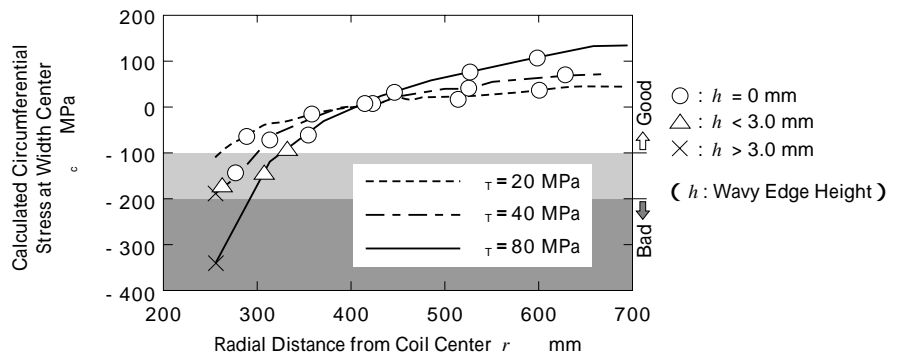


第8図 軟鋼板を対象とした板クラウン率とコイル内周部の周方向歪みの関係の計算結果

Fig. 8 Effect of strip crown ratio upon calculated circumferential strain induced at innermost part of coil in case for mild steel coil

第9図 計算された板幅中央部の周方向応力のコイル半径方向分布と軟鋼板コイルで実測された耳波発生位置の関係

Fig. 9 Radial distribution of calculated circumferential stress at width center and radial position of wavy edge occurrence in coiling test using mild steel strip



坦度変化を呈することが予想される。

コイル巻取り実験では、巻取り張力が大きいときに内周部に耳波不良が認められた。そこで、耳波発生位置の応力状態をコイル変形の解析により推定し、平坦度変化の発生条件を定量的に規定することを試みた。第9図に板幅中央部の周方向応力の半径方向分布と耳波不良の発生位置の関係を示す。同図より、周方向の圧縮応力が100MPaより大きくなると耳波が発生しはじめ、200MPaを超すと顕著な耳波に至ることがわかる。

当社では、以上のような検討をもとに、板クラウンと巻取り張力を適正化し、巻取り時の平坦度変化の防止を図っている。

むすび = 薄板製品の平坦度向上を目的としておこなった実験・解析の結果から、以下のことが確認された。

- 1) 張力の低いローラレベラによる矯正でも、平坦度の改善は可能である。とくに、インターメッシュを大きくすると矯正効果は増す。
- 2) 薄板のレベラ矯正では、耳波にくらべ中伸びが修正されにくく、伸び率を増すと中伸びが形成される場合

がある。レベラ通板中の板の応力状態が幅方向で異なることがその一因であると考えられる。

- 3) 板クラウンにより、巻取り時にコイルは軸方向に不均一な巻締まり変形を受け、コイル内周部に耳波状の平坦度変化を起こしやすい。これを回避するためには巻取り張力を下げる、あるいは板クラウンを小さくすることが必要である。

以上の知見をもとに、リコイラインの操業条件を適正化し、平坦度の良好な板製品の供給に努力している。

参考文献

- 1) 服部重夫ほか：第31回塑加連講論，(1980)，p.459。
- 2) 田中和夫ほか：第41回塑加連講論，(1990)，p.109。
- 3) 内田光俊ほか：平成8年塑加春季講論，(1995)，p.222。
- 4) 的場 哲：第171回塑性加工シンポジウムテキスト (1996)，p.45。
- 5) 前田恭志ほか：第171回塑性加工シンポジウムテキスト，(1996)，p.51。
- 6) 柳 修介ほか：塑性と加工，Vol.39，No.444 (1998)，p.51。
- 7) 柳 修介ほか：塑性と加工，Vol.39，No.446 (1998)，p.226。
- 8) 美坂佳助ほか：塑性と加工，Vol.17，No.191 (1976)，p.988。