

|||||  
論 文  
|||||

## 圧延仕上鋼板のローラーレベラーにおける残留応力解析モデルの開発

久保達博\* 相沢敦\* 原健治\*\*

### Development of Residual Stress Analysis Model of cold-rolled steel sheets in Roller Leveling

Tatsuhiko Kubo, Atsushi Aizawa, Kenji Hara

#### Synopsis :

In roller leveling process of steel sheets, residual stress variations of cold-rolled steel sheets are different from those of annealed steel sheets. However, it is difficult to estimate the residual stress distribution of cold-rolled steel sheet correctly by conventional analysis models developed for annealed steel sheets. So, a new residual stress analysis model for roller leveling has been developed in order to estimate the residual stress distribution of cold-rolled steel sheets. Summary of this study is as follows.

- (1) It was observed unique phenomena that after roller leveling of the cold-rolled steel sheet, the residual stress increased toward tension side near the sheet surface, on the other hand, toward compression side in the middle of sheet thickness.
- (2) In repetitive small strain load tests using cold-rolled steel sheets, the Bauschinger effect i.e., the phenomena that compressive yield stress is getting lower than the tensile yield stress, was observed in the longitudinal direction, but not observed in the sheet width direction.
- (3) A new residual stress analysis model has been developed considering the Bauschinger effect of materials and its anisotropy.
- (4) Analysis by the model showed that the calculated residual stress distributions were in relatively good agreement with those obtained experimentally. Thus, the applicability of the present analysis model has been ascertained.

## 1. 緒言

近年、品質、歩留向上の観点から薄板の平坦度や反りなどの形状精度に対する要求は厳しくなっている。コイルで出荷された薄板は、巻き癖（L反り）があるため、需要家では一般的にローラーレベラーでL反りを矯正後、打抜きやプレス加工に供している。しかし、ローラーレベラーによりL反りが矯正されても、薄板で残留応力が大きい場合には、打抜き後の製品の平坦度が劣化したり、エッチング処理や熱処理時に変形が大きくなったことがある。このようにレベラー後の残留応力は、製品形状に大きく影響を及ぼすため、レベラー矯正時の残留応力の変化挙動を把握することが重要である。

一般に、ローラーレベラーにおいては、残留応力分散

効果があるといわれており、焼鈍仕上材のレベラーによる残留応力の変化について実験や解析の観点から種々報告<sup>1,2)</sup>されている。一方、自動車部品などを中心として、普通鋼や特殊鋼に圧延を施して強度を高くした材料（以下、圧延仕上材と記す）の需要が増えている。圧延仕上材においては、ローラーレベラーによる残留応力変化は、焼鈍仕上材とは挙動が異なり、従来の解析手法では圧延仕上材の残留応力変化の予測が困難であった。

従来のレベラー解析手法で圧延仕上材の残留応力変化が予測できない理由として、圧延仕上材と焼鈍仕上材の材料特性の違いが影響しており、圧延仕上材の特性が考慮されていないためと考えられた。そこで、繰り返し微小歪荷試験を行い圧延仕上材の材料特性を調査した結果、圧延仕上材は焼鈍仕上材と比較してバウシinger効果や異方性が大きいことが明らかになった。バウシinger

\*加工技術研究部 加工第二研究チーム 主任研究員

\*\*加工技術研究部 上席専門員

一効果や異方性を考慮したレベラー解析手法については、報告例は見当たらない。そこで、バウシinger効果や材料の異方性を考慮したレベラー解析モデルを開発し、圧延仕上材の残留応力変化のメカニズムについて考察したので、その結果について報告する。

## 2. ローラーレベラーによる残留応力変化挙動の調査

圧延仕上材の平坦度をローラーレベラーにより矯正した時の残留応力変化は、焼鈍仕上材のそれとは異なる。そこで、中炭素鋼の焼鈍仕上材および圧延仕上材（圧下率54.5%）について、ローラーレベラーによる矯正前後の残留応力変化挙動を比較した。

Fig. 1 にローラーレベラーの模式図を示す。ローラーレベラーは、千鳥状に配置したロールにより繰り返し曲げ、曲げ戻し変形を与えることにより、鋼板の巻き癖を

Table 1 Leveling conditions

Material used	Middle carbon steel (annealed steel sheets) Middle carbon steel (cold-rolled steel sheets, rolling reduction : 54.5%)
Size	t1.0mm × w98mm × C
Roll diameter	φ 70mm
Roll pitch	73mm
Number of work rolls (upper part/lower part)	8/8
Intermesh (entry/exit)	4.7mm / -0.9mm (annealed steel sheets) 4.2mm / -1.6mm (cold-rolled steel sheets)

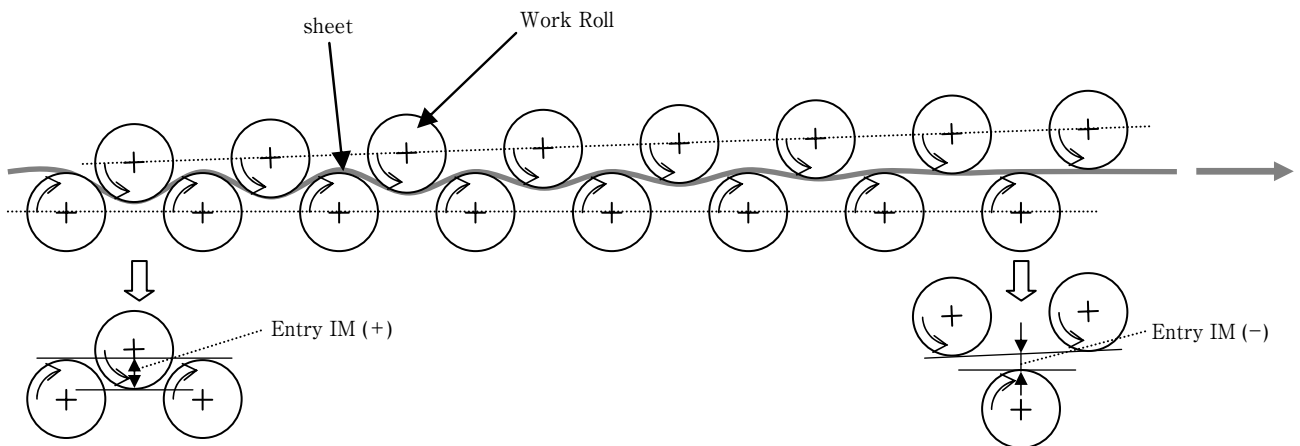


Fig. 1 Schematic illustration of roller leveler.

矯正する装置である。Table 1 に、レベラー条件を示す。供試材のコイルの巻き癖を矯正し、かつ、焼鈍仕上材および圧延仕上材のインターメッシュ（ロール押込み量、IM）がほぼ同等となる条件で矯正を行なった。

矯正前後の供試材について、長手方向残留応力の板厚方向分布を逐次エッチング法<sup>3)</sup>により測定した。Fig. 2 に示すように、供試材を幅30mm、長さ200mmの短冊状に切り出し、FeCl<sub>3</sub>水溶液により表層から50μm間隔でエッチングを行い、エッチングごとの反り（曲率）の変化から式（1）により残留応力を求めた。

$$\sigma(a) = \frac{E}{6} \left[ (h-a)^2 \frac{d\phi}{da} - 4(h-a)\phi + 2 \int_0^a \phi(x) dx \right] \dots (1)$$

ここで、σ(a)は板厚の深さaの部分の残留応力、Eはヤング率、hは板厚、φは曲率である。

Fig. 3 に、中炭素鋼の焼鈍仕上材および圧延仕上材のローラーレベラー前後の残留応力変化挙動を示す。焼鈍仕上材では、ローラーレベラー前の残留応力はほとんど認められないが、ローラーレベラー後は、繰り返し曲げ・曲げ戻し変形を受けて残留応力が発生し、板厚中心

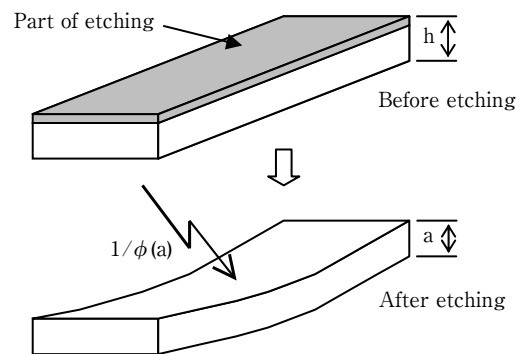


Fig. 2 Schematic figure of serial etching method.

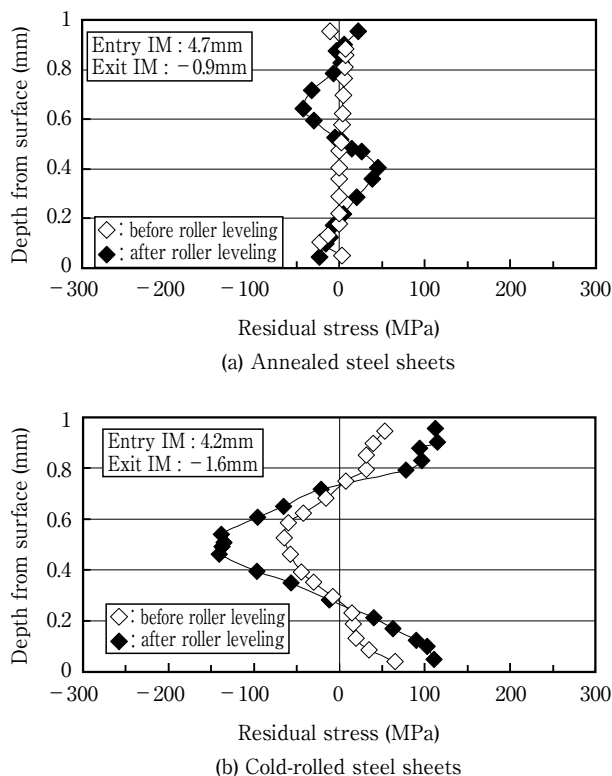


Fig. 3 Residual stress distributions before and after roller leveling.

に対して点対称の残留応力分布となっている。それに対して、圧延仕上材においては、ローラーレベラー前は前工程の圧延で生じた残留応力を有しており、表裏面では引張の残留応力、板厚中央部では圧縮の残留応力となっている。この圧延仕上材にローラーレベラーを付与した場合は、表裏面は引張側に、板厚中央部は圧縮側に残留応力が增大している。

レベラーにより残留応力が增大する現象として、テンションレベラーのように張力を付与しながら曲げ・曲げ戻し変形を与えた場合には、表裏面で圧縮側に、板厚中央部で引張側に残留応力が增大することが報告されている<sup>4,5)</sup>。これに対して、本研究により明らかにされた圧延仕上材のローラーレベラーによる残留応力変化は、表裏面で引張側に、板厚中央部で圧縮側に残留応力が変化しており、圧縮応力を受けながら曲げ・曲げ戻し変形を受けているのと同様な変化が生じている。しかしながら、ローラーレベラーは矯正のための張力は付与されずに曲げ・曲げ戻し変形を受けていることから圧縮応力が作用することは考えられない。また、圧縮応力を受けているのであれば、焼鈍仕上材の残留応力変化も圧延仕上材と同様な挙動をとるはずである。そこで、圧延仕上材と焼鈍仕上材で残留応力変化挙動が異なる理由として、これらの材料特性の違いが影響していると考えられる。

### 3. 繰り返し微小歪負荷試験

圧延仕上材と焼鈍仕上材の曲げ・曲げ戻し変形での材料特性の違いを調査するために、繰り返し微小歪負荷試験を行なった。

Table 2 に試験条件を、Fig. 4, 5 に試験片および試験

Table 2 Testing conditions

Material used	Middle carbon steel (annealed steel sheets) Middle carbon steel (cold-rolled steel sheets, rolling reduction : 54.5%)
Thickness	1.0mm
Testing strain	$\pm 0.2 \sim \pm 1.0\%$
Strain gauge	Attachment in both side of test piece
Testing speed	0.2mm/min

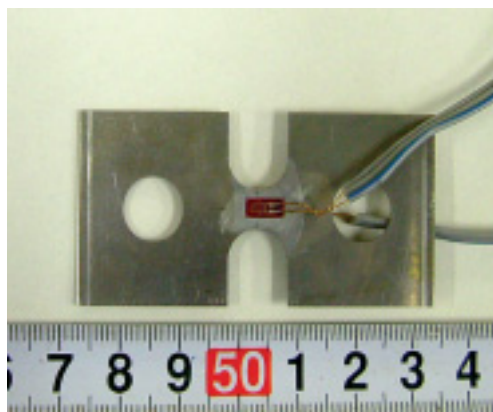


Fig. 4 Test piece with strain gauge.

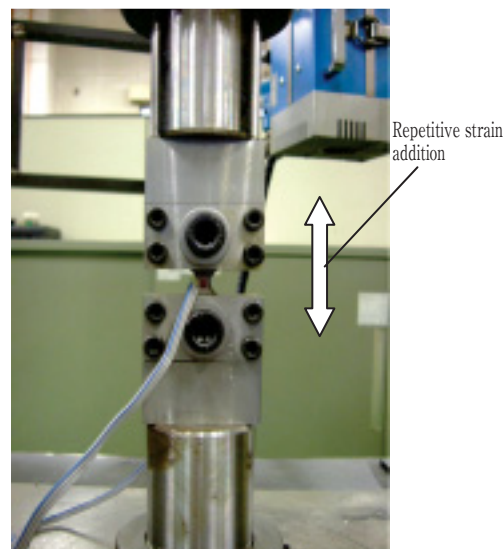


Fig. 5 Repetitive small strain load test.

の概要を示す。歪ゲージを試験片の応力集中部の表裏面に1枚ずつ貼り付け、引張と圧縮の微小歪を繰り返し付与した。

歪は、Fig. 6に示すように、±0.2%の歪から0.2%づ

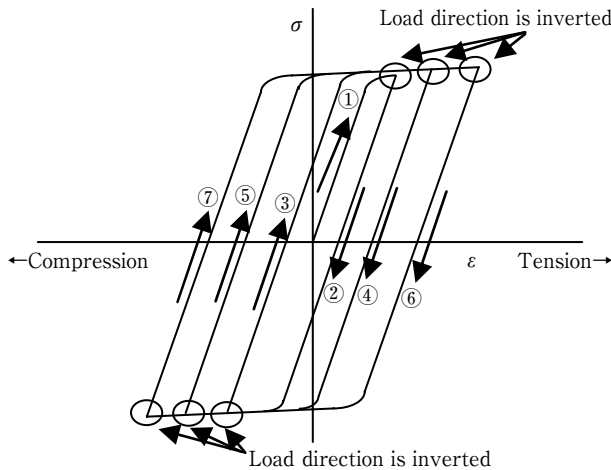
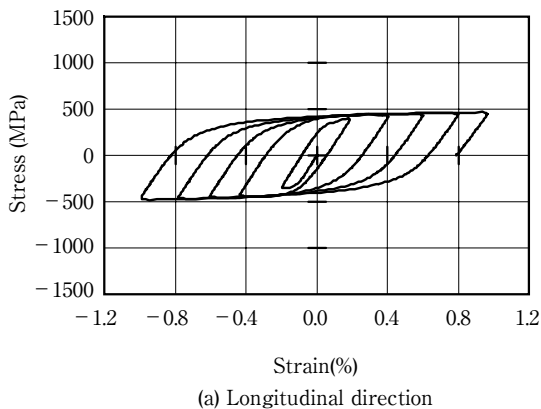


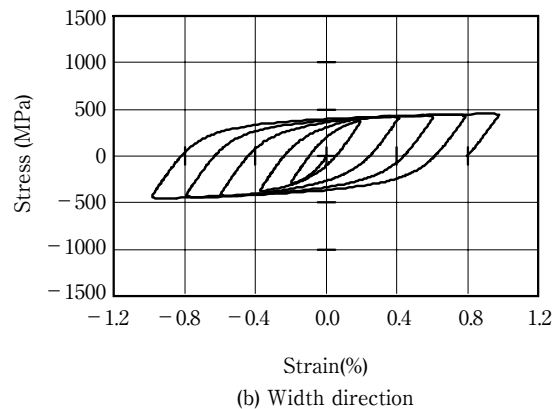
Fig. 6 Outline of repetitive small strain load test. (stress-strain curve)

つ増加させるとともに負荷方向を反転するように付与した。また、ローラーレベラーで付与される最大の歪量を想定し、±1.0%まで付与することとした。圧縮負荷時に曲げが発生した場合は表裏面に差異が生じるので、表裏面の歪を平均化することにより、曲げの歪成分をキャンセルさせる方法を採用した。また、材料の異方性を調査するため、試験片を採取する方向を長手方向と板幅方向とした。

Fig. 7に、繰り返し微小歪負荷試験による焼鈍仕上材の応力-歪曲線を、Fig. 8に圧延仕上材の応力-歪曲線をそれぞれ示す。焼鈍仕上材の応力-歪曲線は、長手方向および板幅方向ともに、同一歪に対する引張と圧縮の応力が同じで原点を中心とする点対称の応力-歪曲線となる。一方、圧延仕上材の板幅方向の応力-歪曲線は、引張と圧縮の応力がほぼ同じであるが、長手方向については、例えば引張側と圧縮側で同じ0.8%の歪では引張側の応力が1100MPaであるのに対し圧縮側の応力は900MPaと、同一歪で引張応力より圧縮応力の

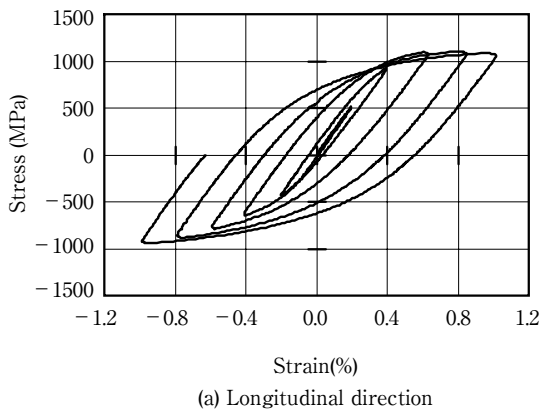


(a) Longitudinal direction

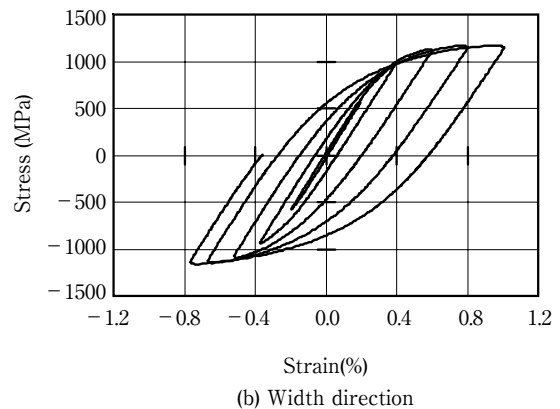


(b) Width direction

Fig. 7 Stress-Strain curve. (annealed steel sheets)



(a) Longitudinal direction



(b) Width direction

Fig. 8 Stress-Strain curve. (cold-rolled steel sheets)



方が低くなっている。この現象は、バウシニング効果であると考えられる。圧延仕上材では平面歪変形が支配的となる圧延による予変形を受けており、長手方向に圧延により伸ばされるため長手方向でバウシニング効果が大きくなったものと考えられる。一方、圧延では板幅方向にはほとんど変形しないことから、板幅方向でバウシニング効果がほとんど無かったものと考えられる。

圧延仕上材のように、長手方向にはバウシニング効果が大きく、板幅方向にはバウシニング効果がほとんど無い材料については、レベラーシミュレーションにおける残留応力解析において、従来の解析モデル<sup>6-9)</sup>で考慮されていなかったバウシニング効果と材料の異方性を考慮する必要がある。

#### 4. レベラー解析モデルの概要

繰り返し曲げ・曲げ戻し変形における反りや残留応力を対象とした解析モデルについては多くの報告<sup>6-9)</sup>があるが、バウシニング効果や材料の異方性を考慮した解析モデルについては、報告例は見当たらない。圧延仕上材のような、バウシニング効果が大きく異方性のある材料のレベラー解析を行なう場合については、これらの材料特性を考慮した解析モデルが必要である。そこで、バウシニング効果や材料の異方性を考慮したレベラー解析モデルを検討した。

##### 4.1 記号説明

本解析モデルに使用する主な記号を以下に示す。なお、Fig. 9に示すように、xは長手方向、yは板厚方向、zは板幅方向と定義した。

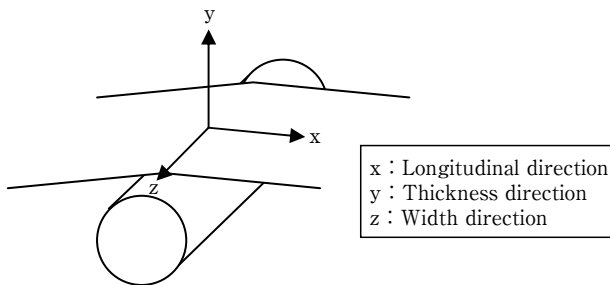


Fig. 9 Definition of x, y and z directions.

$\sigma_x$  : 長手方向応力                       $\varepsilon_x$  : 長手方向歪  
 $\sigma_y$  : 板厚方向応力                       $\varepsilon_y$  : 板厚方向歪  
 $\sigma_z$  : 板幅方向応力                       $\varepsilon_z$  : 板幅方向歪

$\varepsilon_c$  : 板厚中央長手方向歪  
 $\bar{\sigma}$  : 相当応力                                  H : 加工硬化曲線の勾配  
X : 長手方向降伏応力                      Y : 板厚方向降伏応力  
Z : 板幅方向降伏応力                      E : ヤング率  
 $\nu$  : ポアソン比    h : 板厚     $\sigma_f$  : ユニット張力  
k : 曲率    IM : インターメッシュ    p : ロールピッチ

##### 4.2 仮定条件

- レベラーの解析モデルにおいて次の仮定を用いる。
- (1) 板の横断面は変形中も平面を保持する。
  - (2) 板幅に対し板厚が十分に小さいため、平面歪を仮定する。
  - (3) 板厚方向応力を無視する（平面応力の仮定）。
  - (4) 張力は、幅方向に一様に作用し、レベリング中は一定である。

##### 4.3 構成式

応力-歪関係式としては、弾性変形においては式(2)、(3)で示すHookeの法則に、塑性変形においては式(4)～(6)に示すPrandtl-Reussの式に従うとした。

$$d\varepsilon_x = \frac{d\sigma_x - \nu \cdot d\sigma_z}{E} \dots\dots\dots (2)$$

$$d\varepsilon_y = \frac{-\nu \cdot (d\sigma_x + d\sigma_z)}{E} \dots\dots\dots (3)$$

$$d\varepsilon_x = \frac{d\sigma_x - \nu \cdot d\sigma_z}{E} + \frac{(2\sigma_x - \sigma_z) \cdot (2\sigma_x - \sigma_z) \cdot d\sigma_x + (2\sigma_z - \sigma_x) \cdot d\sigma_z}{4H \cdot \bar{\sigma}^2} \dots (4)$$

$$d\varepsilon_y = \frac{-\nu \cdot (d\sigma_x + d\sigma_z)}{E} - \frac{(\sigma_x + \sigma_z) \cdot (2\sigma_x - \sigma_z) \cdot d\sigma_x + (2\sigma_z - \sigma_x) \cdot d\sigma_z}{4H \cdot \bar{\sigma}^2} \dots (5)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_z)} \dots\dots\dots (6)$$

材料の降伏条件としては、従来のレベラー解析モデルではMisesの降伏条件式が用いられている。本解析モデルでは、新たに、異方性に対するHillの降伏関数<sup>10)</sup>に平面応力の条件を与えて導出した式(7)の降伏条件式を導入した。式(7)では、長手方向、板厚方向、板幅方向の降伏応力X, Y, Zを用いることにより材料の異方性を考慮できるが、X=Y=Z= $\bar{\sigma}$ とすれば、等方性材料の降伏条件であるMisesの降伏条件式に一致する。本解析モデルでは、入力データを変えることにより、異方性材料と等方性材料の両方の材料モデルの解析が可能である。また式(7)において、各方向の降伏応力を引張と圧縮で変えることにより、バウシニング効果を考慮することが可能となる。

$$\frac{\sigma_x^2}{X^2} + \frac{\sigma_z^2}{Z^2} - \left( \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \right) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_z = 1 \dots\dots\dots (7)$$

各板厚方向位置での長手方向歪増分  $d\epsilon_x$  と板厚中央長手方向歪増分  $d\epsilon_c$  の関係は式 (8) で表され、 $d\epsilon_c$  は、式 (9) の張力条件を満たすように求める。

$$d\epsilon_x = dk \cdot y + d\epsilon_c \dots\dots\dots (8)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x \cdot dy = h\sigma_f \dots\dots\dots (9)$$

曲率式には、式 (10) に示す日比野の実験式<sup>11)</sup> を用いた。

$$k = \frac{m(IM+h)}{(p/2)^2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $m$  は比例定数であり日比野は実験から  $m=6$  と求めた<sup>11)</sup>。そこで、本モデルにおいても  $m=6$  とした。

4.4 計算手順

Fig.10 にレベラー解析モデルのフローチャートを示す。板を長手方向および板厚方向で微小要素に分割し、上記の構成式を差分式に置き換えて、数値解析により

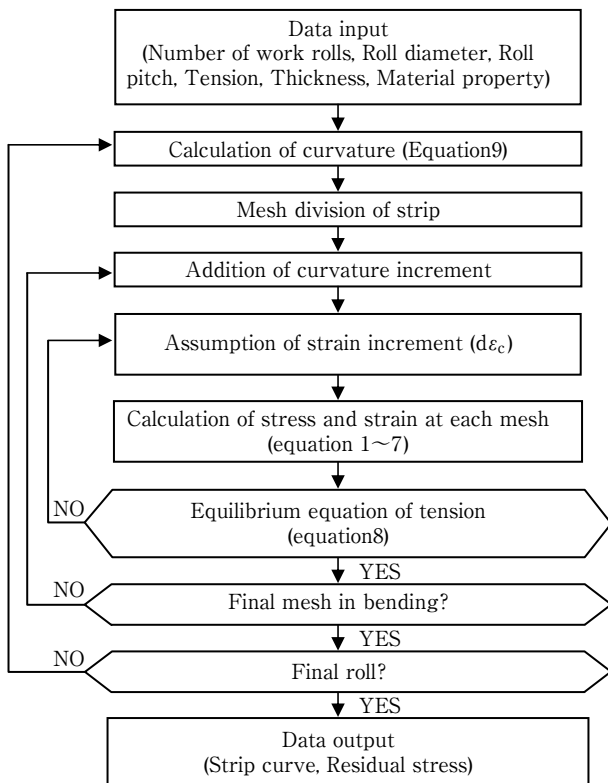


Fig.10 Flow chart of leveler analysis.

繰り返し曲げ・曲げ戻し変形を解析する。曲率増分ごとに板厚中央長手方向歪増分  $d\epsilon_c$  を仮定し、長手方向および板幅方向応力の分布を求め、求めた長手方向応力の分布が式 (9) の張力条件式を満足するまで収束計算を行なう。解析結果としては、反り量、残留応力分布などが得られる。

5. レベラーシミュレーションによる残留応力解析

4章で述べたレベラー解析モデルにより、Table 1 に示したレベラー条件でローラーレベラーによる残留応力解析を行なった。解析においては、従来のバウシinger効果および材料の異方性をともに考慮しない場合とバウシinger効果および材料の異方性をともに考慮した場合で解析を行ない、実験値と比較して本解析モデルを検証した。なお、板厚方向の降伏応力としては、実験による測定が困難なことから、圧延における予変形は平面歪変形であることから、長手方向の降伏応力と同じであると仮定して解析を行なった。

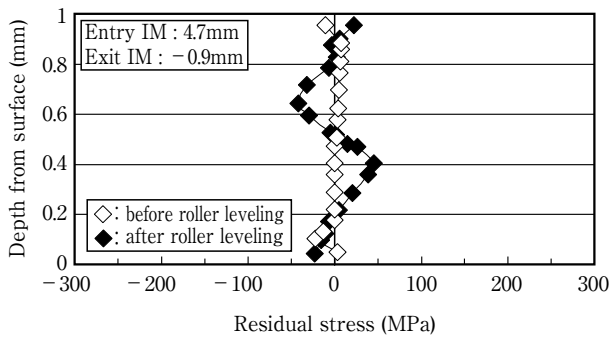
Fig.11 に、焼鈍仕上材のローラーレベラー前後における残留応力変化の解析と実験結果を示す。焼鈍仕上材の場合は、バウシinger効果や異方性がほとんど無いため従来モデルのようにこれらを考慮しなくても、残留応力の解析は測定結果と定性的に一致する。

Fig.12 に、圧延仕上材のローラーレベラー前後における残留応力の解析と実験結果を示す。解析では、ローラーレベラー前の残留応力を直線近似して解析を実施した。従来モデルのように (b) のバウシinger効果および材料の異方性を考慮しない解析では、板厚中央部の圧縮の残留応力がローラーレベラー前後でほとんど変化しておらず、実験結果とは異なっている。これに対し、(c) に示す本解析モデルのようにバウシinger効果および異方性を考慮した解析では、ローラーレベラー前に比較しローラーレベラー後は板厚中央部の圧縮の残留応力が増大しており、実験結果と定性的に良く一致する。

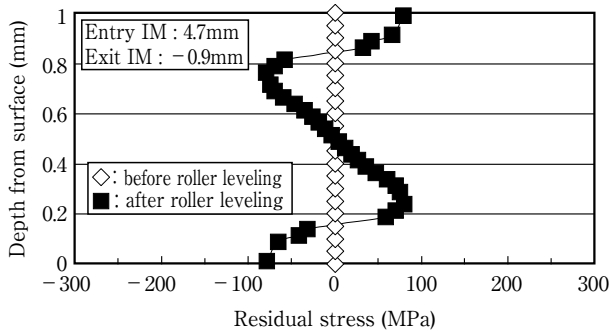
このように、ローラーレベラーにより圧延仕上材の板厚中央部において圧縮の残留応力が増大する現象は、バウシinger効果や材料の異方性を考慮することにより再現できる。

6. ローラーレベラーによる残留応力変化のメカニズム

ローラーレベラーによる繰り返し曲げ・曲げ戻し変形



(a) Measured



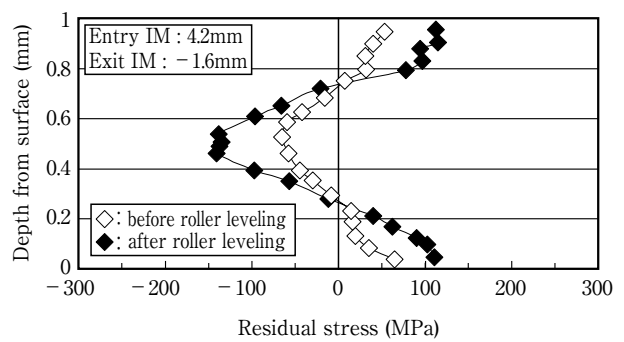
(b) Calculated (without Bauschinger effect or anisotropy)

Fig.11 Residual stress distributions before and after roller leveling. (annealed steel sheets)

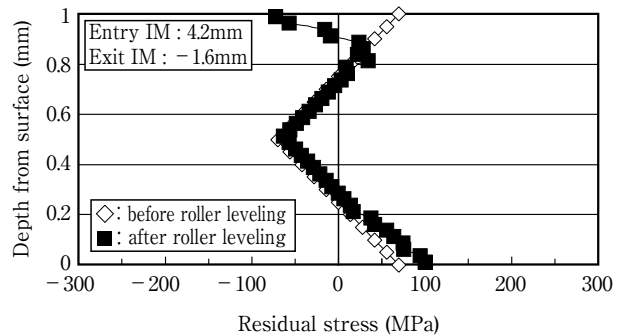
において、バウシンガー効果の影響の大きい材料の板厚中央部の圧縮応力が増大するメカニズムは、以下のように考えられる。

Fig.13に、無張力状態のバウシンガー効果を考慮しない場合の曲げ・曲げ戻し変形時の板厚方向の応力分布を、Fig.14にバウシンガー効果を考慮した場合の曲げ・曲げ戻し変形時の板厚方向の応力分布を示す。バウシンガー効果を考慮しない場合は、曲げ変形時に、曲げの中立面が板厚中心位置にあり、板厚中心に対し点対称の応力分布となる。板厚中央部は歪が小さく弾性変形領域であり、板厚表裏面側は歪が大きくなるため塑性変形を生じる。その後曲げ戻し変形では、板厚中心に対し点対称で変化するため弾性変形領域の板厚中央部の応力は0に戻り、表裏面の塑性変形を生じた部分のみ残留応力を生じる。

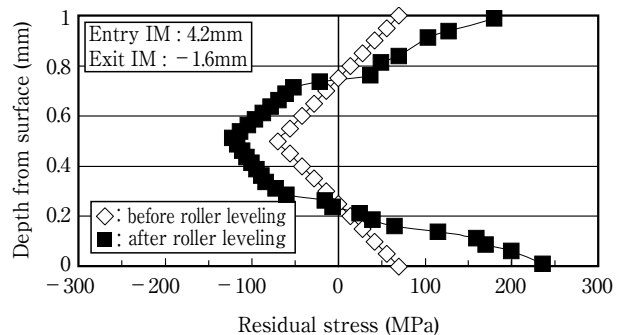
これに対し、バウシンガー効果を考慮した場合は、曲げ変形時に、引張方向よりも圧縮方向が小さい応力で降伏し、塑性変形を開始するため、板厚中心に対して点対称の応力分布とはならず、曲げ中立面が曲げの外側にシフトすることにより引張と圧縮応力のバランスが保たれ



(a) Measured



(b) Calculated (without Bauschinger effect or anisotropy)



(c) Calculated (with Bauschinger effect and anisotropy)

Fig.12 Residual stress distributions before and after roller leveling. (cold-rolled steel sheets)

る。そのため、板厚中心位置では、圧縮の応力となり、曲げ戻し変形後には、板厚中央部に圧縮の応力が残存する。曲げ・曲げ戻し変形を繰り返すことにより、板厚中央部の圧縮の残留応力が蓄積されて増大するとともに、表裏面では引張側に増大する。

このように、ローラーレベラーによる繰り返し曲げ・曲げ戻し変形において、圧延仕上材の板厚中央部の残留応力が増大する現象は、バウシンガー効果によるものと推測する。

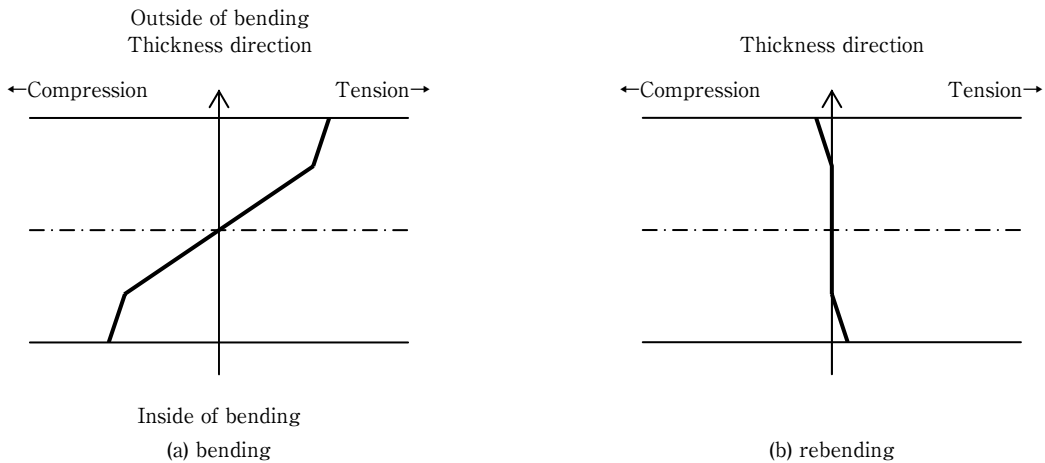


Fig.13 Schematic representation of stress distribution in bending and rebending deformation. (Material without Bauschinger effect)

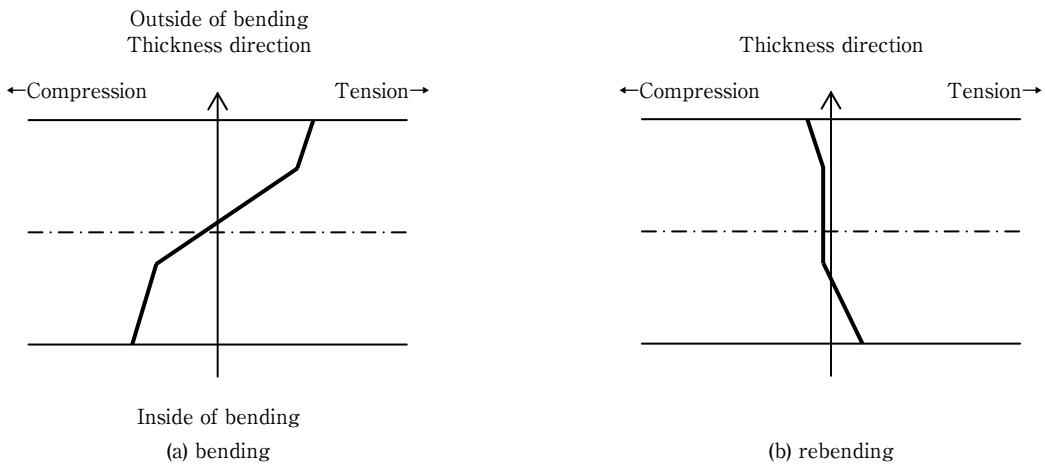


Fig.14 Schematic representation of stress distribution in bending and rebending deformation. (Material with Bauschinger effect)

## 7. 結 言

圧延仕上材特有のローラーレベラーによる残留応力変化を予測するレベラー解析モデルを検討し、以下の結果を得た。

- (1) 圧延仕上材をローラーレベラーで矯正した際の残留応力は、表裏面では引張側に、板厚中央部では圧縮側に変化する圧延仕上材特有の現象が観測された。
- (2) 圧延仕上材を供試材とし、引張および圧縮の繰り返し微小歪を付与する試験を行うと、長手方向では引張

側よりも圧縮側で降伏応力が低下するバウシンガー効果が認められ、板幅方向ではバウシンガー効果の無い異方性が認められ、圧延仕上材特有の現象が観測された。

- (3) 圧延仕上材特有の残留応力変化を予測するために、レベラー解析手法として、Hillの降伏関数に平面応力の条件を与えて材料の降伏条件式を導入し、バウシンガー効果および材料の異方性を考慮した残留応力解析モデルを構築した。
- (4) 本解析モデルにより圧延仕上材のローラーレベラーによる残留応力の変化挙動を解析した結果は、実験値



と定性的に良く一致し、本解析モデルはローラーレベラーによる圧延仕上材の残留応力変化を予測するうえで有効である。

- (5) ローラーレベラーにより圧延仕上材の矯正を行った際の残留応力変化のメカニズムについて考察を行った。

#### 参考文献

- 1) 日比野文雄：機械の研究, 10-1 (1968), 105.
- 2) 日比野文雄：塑性と加工, 2-9 (1961), 359.
- 3) 米谷茂：残留応力の発生と対策, 養賢堂, 東京, (1987), 49.
- 4) 的場哲, 永広和夫, 瀧文男, 阿高松男, 青木至：塑性と加工, 42-488 (2001), 959.
- 5) 柳修介, 服部重夫, 石川孝司：塑性と加工, 42-488 (2001), 939.
- 6) 緋田良之, 益居健, 安藤功司：平成3年度塑性加工春季講演会, (1991), 685.
- 7) 美坂佳助, 益居健：塑性と加工, 17-191 (1976), 988.
- 8) 山下道雄, 磯部邦夫, 小林真, 齊藤輝弘：第44回塑性加工連合講演会, (1993), 461.
- 9) 前田恭志, 柳修介, 服部重夫：第171回塑性加工シンポジウム (1996), 71.
- 10) 富田佳宏：弾塑性力学の基礎と応用, 森北出版, 東京, (1995), 40.
- 11) 日比野文雄：塑性と加工, 31-349 (1990), 208.