

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.33 (2001) No.3

数値解析・形鋼特集号

弾塑性有限要素法による極薄鋼板のレベラ矯正時の残留応力・反り解析

Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Strip Curvature and Internal Stress Imparted
by Roller Leveler

狩野 裕隆 (Kano, H.) 剣持 一仁 (Kenmochi, K.)

要旨：

極薄鋼板のローラレベラ矯正仮定において鋼板に発生する残留応力と反りを予測するために弾塑性有限要素法による解析を実施した。平面歪み状態を仮定し、静的陰解法を適用した非定常解析にてロールとの接触を判定しつつレベラ矯正過程を計算するシミュレーションモデルを構築し、レベラ条件が鋼板の反りおよび残留応力におよぼす影響を検討した。低張力の条件下では鋼板の反りに対する張力の影響が比較的大きく、ワークロール径を小さくすることによって反り低減能力が向上し、ワークロールを増やすことによって残留応力を低減できる結果が得られた。

Synopsis：

An elasto-plastic finite element analysis has been performed to estimate the curvature and internal stress of a cold rolled steel strip, passing through a roller leveler. In the analysis, plane strain assumption was adopted. Strip regions were divided into finite element meshes in longitudinal and thickness directions and non-steady boundary conditions were applied. Thus, there was established a simulation model for calculating, the process of levelling, while judging, the contact of a steel strip with rolls. The effects of leveller rolling conditions on curvature and residual stress were studied. Results calculated with this model are as follows: In case that tension is relatively low, the effect of tension on strip curvature is relatively large. The bow of a sheet was reduced by decreasing the diameters of leveler rolls. Residual stress was reduced by increasing the number of leveler rolls.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

弾塑性有限要素法による 極薄鋼板のレベラ矯正時の残留応力・反り解析*

川崎製鉄技報
33 (2001) 3, 112-116

Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Strip Curvature and Internal Stress Imparted by Roller Leveler



狩野 裕隆
Hirotaka Kano
技術研究所 加工技術
開発センター 主任研
究員(課長補)



剣持 一仁
Kazuhito Kenmochi
技術研究所 研究企画
業務部企画開発室 主
査(課長)・工博

要旨

極薄鋼板のローラレベラ矯正仮定において鋼板に発生する残留応力と反りを予測するために弾塑性有限要素法による解析を実施した。平面歪み状態を仮定し、静的陰解法を適用した非定常解析にてロールとの接触を判定しつつレベラ矯正過程を計算するシミュレーションモデルを構築し、レベラ条件が鋼板の反りおよび残留応力におよぼす影響を検討した。低張力の条件下では鋼板の反りに対する張力の影響が比較的大きく、ワークロール径を小さくすることによって反り低減能力が向上し、ワークロールを増やすことによって残留応力を低減できる結果が得られた。

Synopsis:

An elasto-plastic finite element analysis has been performed to estimate the curvature and internal stress of a cold rolled steel strip, passing through a roller leveler. In the analysis, plane strain assumption was adopted. Strip regions were divided into finite element meshes in longitudinal and thickness directions and non-steady boundary conditions were applied. Thus, there was established a simulation model for calculating, the process of levelling, while judging, the contact of a steel strip with rolls. The effects of leveller rolling conditions on curvature and residual stress were studied. Results calculated with this model are as follows: In case that tension is relatively low, the effect of tension on strip curvature is relatively large. The bow of a sheet was reduced by decreasing the diameters of leveler rolls. Residual stress was reduced by increasing the number of leveler rolls.

1 緒 言

薄鋼板の平坦度や反りに対する要求は年々厳格化しており、これらに対応するため、テンションレベラあるいはローラレベラの形状矯正能力向上が重要となっている。レベラ矯正における反りを高精度で予測することは、レベララインの設計、操業条件の最適化に重要であり、そのために矯正中の板の加工曲率を精度良く推定する必要がある。この加工曲率を推定するために、美坂¹⁾・益居²⁾らの実験に基づく研究のほか、近年では、弾塑性 FEM による矯正過程の解析^{3,4)} も行なわれている。

本報では、低張力下での極薄鋼板のレベラ矯正において、板厚方向応力を考慮した平面歪み弾塑性 FEM を用いてレベラ矯正過程を解析するモデルを構築し、レベラ条件が鋼板の反りおよび残留応力におよぼす影響を検討した。

2 解析モデル

解析には、平面歪み弾塑性 FEM を適用した。その概要を Table 1 に示す。変形後の配置に基づく仮想仕事の原理式 (1) を離散化して、これにより得られる節点力の釣合式に対して繰り返し計算によって収束させる静的陰解法を採用した。

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = \int_{S_1} t_j \delta u_j dS + \int_V \rho b_j \delta u_j dV \dots\dots\dots (1)$$

Table 1 Overview of FE analysis model

Element type	4-node plane strain selective reduced integration
Time integration	Non-steady static implicit scheme
Return mapping	Mean normal method
Roll	Rigid
Friction between strip and rolls	Negligible

* 平成13年5月17日原稿受付

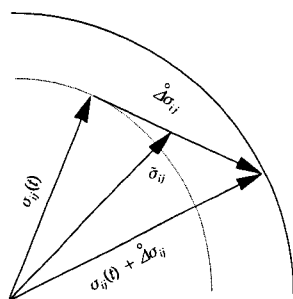


Fig. 1 Mean normal method

ここで、 σ_{ij} は真応力テンソル、 σ_{ij} は仮想変位による真歪みテンソル、 t_j は単位面積あたりの表面力ベクトル、 δe_j は仮想変位ベクトル、 $\bar{b}_j$ は単位質量あたりの物体力ベクトル、 ρ は質量密度、 S_i は解析対象の表面積、 V は解析対象の体積である。

Mises の降伏条件を採用した連合流れ則では、偏差応力 σ'_{ij} と塑性歪み増分 $d\epsilon'_{ij}$ は (2) 式に示す関係となる。

$$d\epsilon'_{ij} = d\lambda \sigma'_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $d\lambda$ は比例定数である。(2) 式を有限の増分に対して適用するために、近似式 (3) を用いる平均法線 (mean normal) 法を採用した。

$$\Delta\epsilon'_{ij} = \Delta\lambda \bar{\sigma}'_{ij} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\Delta\epsilon'_{ij}$ は有限の歪み増分、 $\bar{\sigma}'_{ij}$ は、増分ステップの塑性変形における偏差応力の平均的な値である。ステップ全体が塑性変形の場合は、Fig. 1 に示すように増分ステップ開始時の応力 $\sigma_{ij}(t)$ と増分ステップ終了時の応力 $\sigma_{ij}(t) + \Delta\sigma_{ij}$ の平均であり、(4) 式となる。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}(t) + \frac{1}{2} \Delta\sigma_{ij} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{ij}$ は要素とともに回転する座標系に基づく応力増分である。レベラ矯正の解析ではインターメッシュが大きい場合、要素の回転が大きくなる。微小歪みを用いると剛体回転に対して本来生じるはずのない圧縮歪みが生じ、回転角が大きい場合その誤差が増大し無視できなくなる。本報では、このような問題のない Green-Lagrange 歪みを採用した。なお、Green-Lagrange 歪みは 1 増分ステップ開始前の配置を基準として求めた。平均法線法で求めた応力は要素とともに回転する座標系に基づく応力であるから、(5) 式の座標変換によって 1 ステップ終了後の応力を求めた。

$$\sigma_{ij}(t + \Delta t) = R_{ik}(\sigma_{kl}(t) + \Delta\sigma_{kl})R_{jl} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 R_{ij} は剛体回転をあらわす正規直交テンソルである。なお、(5) 式は、要素の体積変化の影響を無視した近似式である。通常の弾塑性体では、体積変化は微小なので近似誤差は比較的小さい。

また、変形後の節点反力は変形後の配置に基づいた B マトリックスと $\sigma_{ij}(t + \Delta t)$ から求めた。節点変位の予測値を求めるための剛性方程式の係数行列の計算には、弾塑性の接線剛性マトリックスおよび幾何剛性マトリックスを用いた。

2.1 接触の取り扱い

Fig. 2 に鋼板とロールとの接触計算のフローチャートを示す。ロールを剛体とし、鋼板・ロール間の摩擦は無視した。接触の取り扱いについては Fig. 3 に模式的に示すように、変位境界条件として与えた。増分ステップの計算開始時点で、前ステップでの各節点の

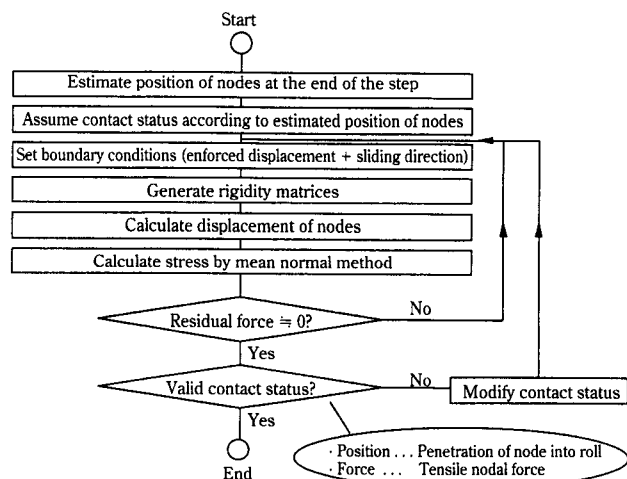


Fig. 2 Analysis flow for 1 step calculation

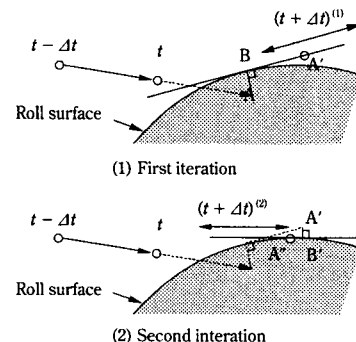


Fig. 3 Boundary conditions for contact analysis

移動量をもとに、ステップ終了時点での節点位置を予測し、各節点の接触状態を仮定する。ロールと接触すると仮定した節点について、その予測節点位置に最も近いロール面上の点を通る接線を想定し、その接線上に拘束させる境界条件を与えて節点変位を求め、その結果に基づき予測節点位置を修正し収束計算を行なうようにした。また、一旦節点力の釣合に関する収束が得られた時点で、接触を仮定した節点について法線方向の引っ張り節点力の有無を検出し、非接触を仮定した節点についてはロールへの貫通の有無を判定し、その結果をもとに接触状態の仮定を修正して再度計算し、矛盾のない状態にいたるまで収束計算を行なった。鋼板のパウシガ効果は考慮せず等方硬化とした。

3 解析結果

3.1 加工曲率

Table 2 に示す case 1 の条件にて、ロールによる曲げの解析を実施し、レベラ矯正中の鋼板の加工曲率を求めた。Fig. 4 に示すようにインターメッシュ h' をレベラの入側から出側まで均一とし、張力 T を一定に保った状態で、徐々にロール押し込み量 h' を増加させて解析を行なった。

また、比較として美坂の式¹⁾による計算を行なった。

インターメッシュおよび張力と加工曲率の関係を計算した結果を Fig. 5 に示す。鋼板の加工曲率はインターメッシュ h' の増加にと

Table 2 Conditions of case 1

Thickness of strip	(mm)	0.19
Yield stress of strip	(MPa)	420
Work hardening coefficient of strip	(MPa)	700
Roll diameter	(mm)	45
Half roll pitch	(mm)	35
Number of rolls		5
Tension	(MPa)	0~30
Intermesh	(mm)	0~9

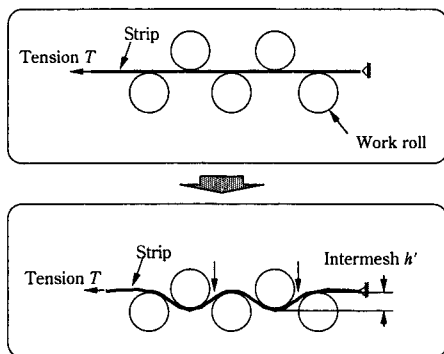


Fig. 4 Boundary conditions (case 1)

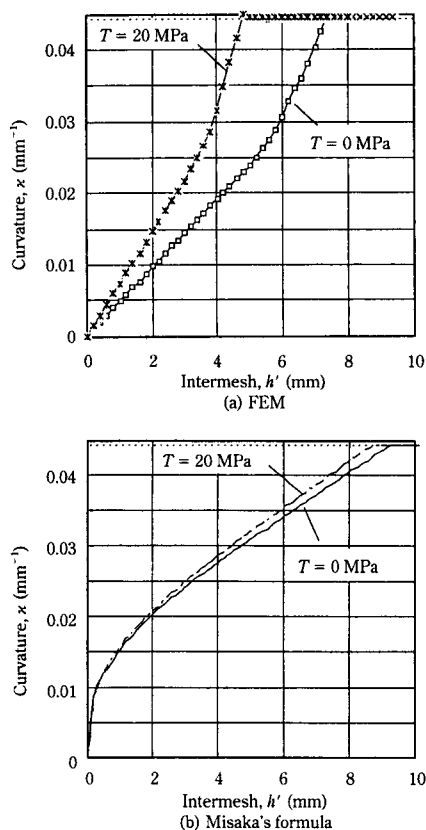


Fig. 5 Relationship between intermesh and curvature (case 1)

もない上昇し、各ロールとの接触位置にて極大となるが、その中でも中央のロールとの接触位置での拘束が強いため鋼板の加工曲率は中央のロール位置において最大となる。Fig. 5 には、この加工曲率の最大値 κ とインターメッシュ h' の関係を示した。(a) は FEM による計算結果である。図中でインターメッシュ h' が 3 mm 以下と

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{6h'}{p^2} f(\alpha) \\ f(\alpha) &= \frac{\alpha^2 (e^\alpha - e^{-\alpha})}{3[\alpha(e^\alpha + e^{-\alpha}) - (e^\alpha - e^{-\alpha})]} \\ \alpha &= \sqrt{\frac{Ttp^2}{4D}} \\ D &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \\ f(\alpha) &\rightarrow 1 \quad (\alpha \rightarrow 0) \end{aligned}$$

κ : Curvature (maximum)
 h' : Intermesh
 p : Half roll pitch
 T : Tension
 t : Thickness
 D : Flexural rigidity
 E : Young's modulus
 ν : Poisson ratio

$$Fx - Ty - M = 0$$

$$M = -D \frac{d^2y}{dx^2}$$

Fig. 6 Elastic beam model

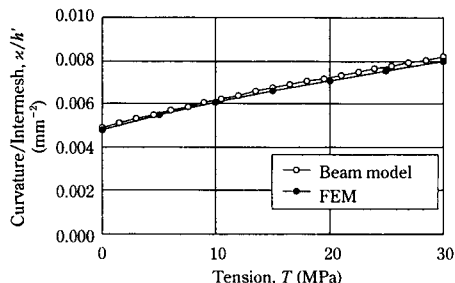


Fig. 7 Relationship between tension and ratio of curvature and intermesh under elastic deformation (case 1)

小さい場合は弾性変形なのでインターメッシュ h' と加工曲率 κ の比がほぼ一定となっている。さらにインターメッシュ h' を増加させると鋼板に塑性変形が生じ、曲率増分に対する曲げモーメント増分が低下するため、 κ/h' は弾性域での値より大きくなる。さらに h' を増加させると鋼板はロールになじみ、加工曲率は一定となる。弾性域における κ/h' と張力 T の関係について、Fig. 6 に示す弾性梁モデル⁵⁾ による解析解とともに Fig. 7 に示す。弾性域において、FEM による計算結果は梁モデルによる解析解とよく一致している。張力が変化すると加工曲率が大きく変化しており、張力によってレベラ矯正後の反りが大きく変化する可能性を示唆している。Fig. 5(b) の美坂の式による計算結果ではインターメッシュが小さいときもインターメッシュと加工曲率の関係は線形にはなっておらず、また、張力が加工曲率におよぼす影響も FEM の結果に比べ小さくなっている。

次に Table 3 に示す条件で解析を実施した。Fig. 8 に示すようにロール本数を 8 本に変更し、入側のインターメッシュを出側のインターメッシュより大きくし、また、ロールの押し込みが終了した後に鋼板を長手方向に移動させ、定常状態に達するまで解析を続けた。メッシュ分割は、板厚方向の分割数を 6、長手方向の分割幅を約

Table 3 Conditions of case 2

Thickness of strip	(mm)	0.19
Yield stress of strip	(MPa)	420
Work hardening coefficient of strip	(MPa)	700
Roll diameter	(mm)	45
Half roll pitch	(mm)	35
Number of rolls		8
Forward tension	(MPa)	20
Intermesh (entry/exit)	(mm)	5/3

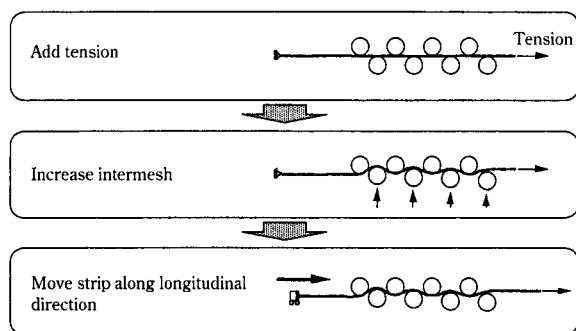


Fig. 8 Boundary conditions (case 2)

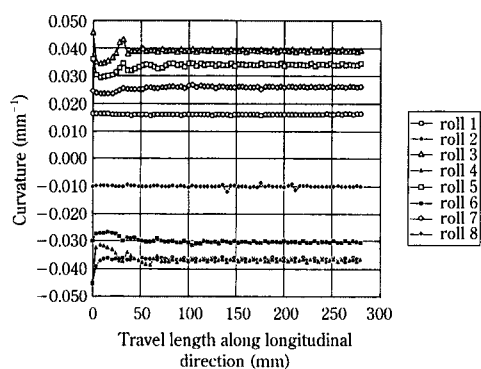


Fig. 9 Chart of curvature (case 2)

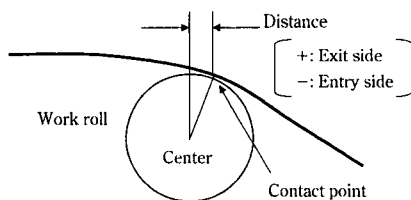


Fig. 10 Contact point of strip and roll

0.2 mm とした。

case 2 の計算結果として、各ロールとの接触位置における鋼板の加工曲率の変化の様子を Fig. 9 に示す。ここで、曲率の符号は正を下に凸、負を上凸とした。鋼板の長手方向移動にともない曲げ曲げ戻しによって加工曲率が変化しているが、鋼板の移動距離 100～150 mm 以降ではほぼ定常状態となっている。塑性変形が進展すると、Fig. 10 に示すように、各ロールと鋼板の接触位置はそれぞれのロール中心位置から水平方向に移動した位置となる。Table 4 に、ほぼ定常状態に達したときの各ロールと鋼板の接触位置を各ロール中心位置からの長手方向の距離で示した。ロールと鋼板の接触面が進行方向に対して傾きを持つので各接触位置において鋼板がロールから受ける接触面圧力に長手方向成分が生じて、Fig. 11 に示すように鋼板の移動にともない出側張力と入側張力の間に差が生じ、出側張力のほうが入側張力より大きくなる。曲げ曲げ戻しにともなう抵抗の分だけ出側張力のほうが入側張力より大きくなると解釈することもできる。

ほぼ定常状態に達したときの鋼板の加工曲率の計算結果を Fig. 12 に示す。入側および出側両端のロールにおいて加工曲率の極大・極小値の絶対値が中央 6 本のロールの場合に比べて小さくなっ

Table 4 Contact point at each roll

Contact roll	Distance (mm)	Direction
#1	2.58	Exit
#2	-0.67	Entry
#3	-1.67	Entry
#4	-1.18	Entry
#5	-1.37	Entry
#6	-0.77	Entry
#7	-0.85	Entry
#8	-1.75	Entry

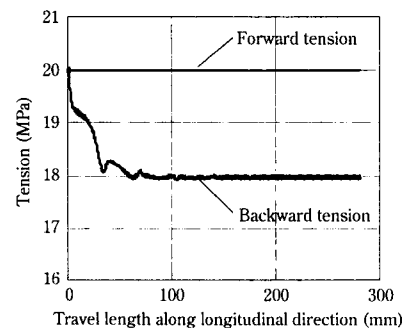


Fig. 11 Forward and backward tension

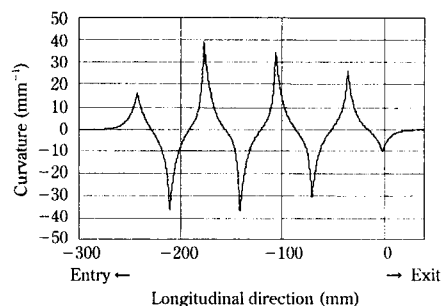


Fig. 12 Calculated curvature value in leveling process

ている。また、Table 3 に示すように入側のインターメッシュのほうが大きいので各ロール接触位置における加工曲率も入側のほうが大きく、出側に近づくほど小さくなる。

3.2 反りにおよぼすレベル条件の影響

入側のインターメッシュおよび張力が長手方向反り (L-bow) におよぼす影響を計算した結果を実験結果と合わせて Fig. 13 に示す。

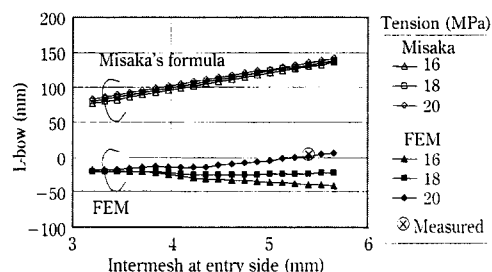


Fig. 13 Example of calculated L-bow value after leveling

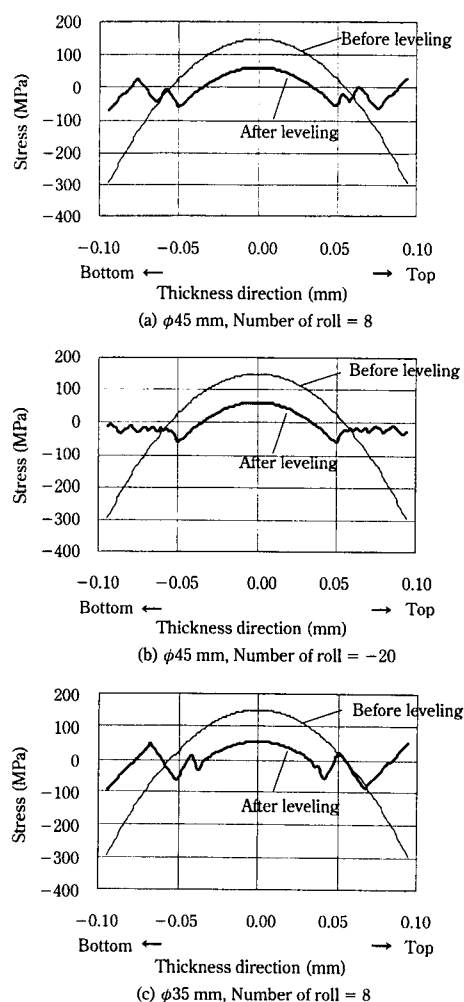


Fig. 14 Residual stress distribution

ここで、初期 L 反りは -18 mm (上に凸)、出側インターメッシュ 3.2 mm 、実験における張力は 20 MPa であり、反り量は長さ 1 m あたりの値である。美坂の式を用いた場合に比べ FEM による計算結果は実験結果に近い結果が得られている。また、張力の変化に対する L 反りの変化を比較すると、美坂の式を用いた場合反りの変化がほとんどないのに対し、FEM の結果では張力の変化による反り変化が大きく、とくに入側インターメッシュが大きい場合に顕著である。

3.3 残留応力におよぼすレベラ条件の影響

Fig. 14 にレベラ矯正前の鋼板の残留応力を放物線分布と仮定した場合のレベラ矯正前後の残留応力を示す。(a) は $\phi 45\text{ mm}$ のワークロールを 8 本とした場合のレベラ矯正後の残留応力を計算した結果である。本図よりレベラ矯正によって残留応力が低減していることがわかる。また、(b) はワークロールを 20 本に増加させた場合の残留応力の計算結果である。(a) の 8 本の場合と比べると鋼板の表面付近の残留応力が低減しており、反り矯正には有利であることがわかる。(c) はワークロールを 8 本のままロール径を $\phi 35\text{ mm}$ に変更した場合の計算結果である。(a) の $\phi 45\text{ mm}$ の場合に比較して、加工曲率が大きくなるため板厚中央に向かって塑性変形領域が拡大して、レベラとしての反り矯正能力は向上するが、表面付近の残留応力は増大している。

4 結 言

鋼板のレベラ矯正過程を解析する弾塑性 FEM モデルを構築して、矯正における鋼板の反りおよび残留応力を明らかにした。さらなる計算精度向上を図るためには、吉田⁶⁾らが指摘しているようにバウシング効果を考慮した構成式の採用が必要である。今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 美坂佳助, 益居 健: 塑性と加工, **17**(1976)191, 988
- 2) 益居 健, 美坂佳助: 塑性加工論, (1973), 81
- 3) 卜部正樹, 吉田総仁, 谷田圭司, 梶原哲雄: 塑性と加工, **39**(1998) 444, 82
- 4) 狩野裕隆, 剣持一仁, 鎌田征雄: 塑性加工論, (1997), 447
- 5) 服部重夫, 前田恭志, 松下富春, 村上昌平, 秦 純二: 塑性と加工, **28**(1987)312, 34
- 6) 吉田総仁: 塑性と加工, **41**(2000)478, 1082