

# 2 ロール矯正におけるロールプロフィールと 残留応力の理論的考察

## －棒線における矯正と残留応力の研究－

早稲田大学理工学部 機械工学科

教授 浅川基男

(平成9年度研究開発助成 AF-97004)

## Theoretical consideration of roll profile by a two-roll straightening technique

### －A study of Higher straightening and Lower

### Residual stress Technology of bar products －

Professor of Waseda University

MOTOO ASAKAWA,

A two-roll straightening of bar products has become popular because of higher straightening, lower residual stress and polishing requirements of customers associated with the automobile, precision machine and office automation industries. However the technology has not advanced over the past few years, and the method still relies on the experience and perception of the artisans. In the present paper, the goal of this study is a roll profile is determined and evaluated, considering a straightening method based on elasto-plastic theory such as plastic distribution and bending numbers of bar products. In addition, a simulation program has been developed, which evaluates an arbitrary roll profile to attain straightening effects. First, the traditional roll is evaluated based on elasto-plastic theory, the faults of this roll is discussed about straightening effect. At the same time, using a simulation program calculated the residual stress of traditional roll. As a result, the fault of this roll is also indicated about residual stress, and it is shown that residual stress is influenced by the roll profile. Lastly some roll profiles is analyzed and evaluated, the optimal roll profile is suggested, which is to give a necessary and sufficient max plastic ratio and to make a gentle slope in the latter half of the plastic region.

**Key words :** process simulation, bending, straightening, drawing, two-roll straightening, roll profile, elasto-plastic theory, plastic ratio

(プロセス・シミュレーション, 曲げ, 真直, 引抜き, 2ロール矯正, ロールプロフィール, 弾塑性理論, 塑性率)

### 1. はじめに

棒鋼・線材に用いられる2ロール矯正は、引抜き加工後の真直度向上、残留応力低減、表面研磨を目的に広く用いられている。

近年、精密機器、工作機械や自動車、複写機・プリンタ等の事務・情報機器の高性能化に伴い、これらに使用されるシャフトの高真直度、低残留応力への要求は厳しさを増している。しかし、2ロール矯正の技術はこれに対応できず、現場熟練工の技に頼っているのが現状である。著者らは熱間圧延材の金属的・機械的性質と真直度

に焦点をあて、圧延材および圧延条件と真直度の関係を素材の側から実験的に検討してきた<sup>1)</sup>。ここでは2ロール矯正の理論解析から、あるべき矯正法について考察することにした。

そこで、(1)現在使用されている2ロール矯正法を弾塑性力学的見地から矯正原理に基づいて検討する。(2)同時に従来の経験的ロール設計法を廃し、最適な弾塑性領域(ロールプロフィール)を与えることができるロール設計法を考案する。(3)矯正効果の評価の一つとして残留応力の低減・細分化を解析するソフトを開発し、パソコン上で任意のロールプロフィールを評価する。(4)

以上を総合的に検討し、残留応力低減のための望ましいロールプロフィールを見いだすことにした。

## 2. 現状ロールプロフィールの力学的考察<sup>2), 3)</sup>

まず、現状ロールを弾塑性理論により評価する。対象とした材料はS45C直径10mmの圧延線材 (Table 1) である。通常の引抜き材は表層に引張り、内部に圧縮の残

Table 1 Chemical composition weight %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.46	0.19	0.75	0.02	0.023	0.020	0.02	0.13

留応力分布が生じる。そのため、引抜き材を引張り試験すると、材料表面から順次内部へと降伏するため Fig.1 に示すように降伏点が明瞭でない。したがってあらかじめ

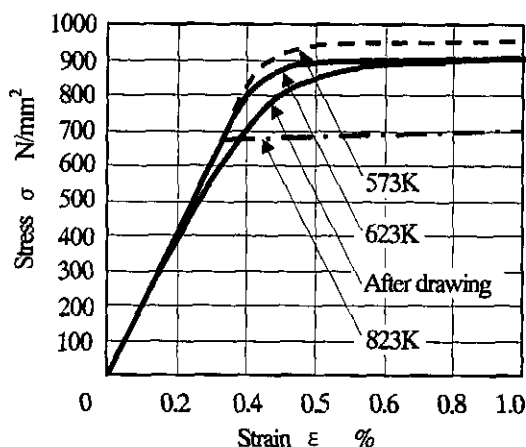


Fig.1 stress-strain curves by stress relieved annealing

め各保持温度 90min で残留応力除去焼鈍した結果、降伏点が明確かつ軟化が起こっていない 623K の条件を採用し、直線硬化型の応力ひずみ線図に近似した。その値を弾塑性解析の材料特性値 (Table 2) とした。

Table 2 Material properties

Yield stress N/mm <sup>2</sup>	Youn's modulus N/mm <sup>2</sup>	Work Harding coefficient N/mm <sup>2</sup>
880	2.06×10 <sup>5</sup>	2.57×10 <sup>3</sup>

つぎに現状のロールプロフィールを測定した結果、材料と接触する部分は双曲線と近似できた。このロールと矯正時の交角から材料のたわみ形状  $V(z)$  を算出し、(1)式を用いて材料長手方向  $z$  の曲率の分布  $\kappa(z)$  を求めた。

$$\kappa(z) = \frac{\partial^2 V(z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

この式は梁のたわみ論に基づくものであり、材料は断面に対して十分長手方向に長いとしている<sup>4)</sup>。現状ロールの曲率分布を Fig.2 に示し、その性能を考察した結果、以下のことが判明した。①最大曲率点は一点しかない。

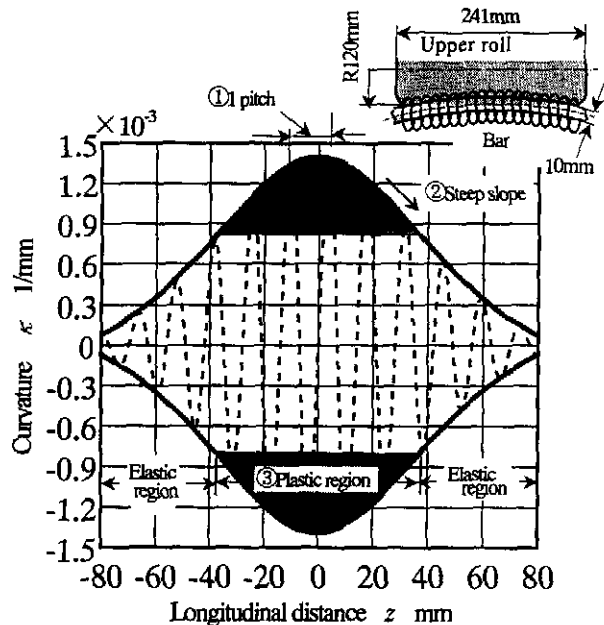


Fig.2 Curvature distribution of two-roll straightening

これは材料回転1ピッチ分を一定の最大曲率まで負荷できないため、最大曲率を均一に付与するという矯正の原理を満足せず、真直度を得られにくい。②実質的な矯正効果を支配する後半の弾塑性境界近傍は塑性率が急激に低下しており、表層部分の残留応力低減効果を十分に果たしていない。③矯正に寄与しない弾性域の部分が、ロール長さを十分に使い切れていない。特に塑性変形を伴った後半部分の繰り返し曲げ回数が2~3回と少なく、そのため曲げ曲率の収斂が難しくなるため、十分な真直度を得られにくい。

## 3. 弾塑性理論に基づいたロール設計法

2ロール矯正法の矯正効果を左右するのはロール内での弾塑性分布である<sup>5)</sup>。そこで、まず望ましい弾塑性分布を設定してからロールプロフィールを設計する方法を提案する。ここで、降伏応力  $\sigma_y$  は引抜き材を残留応力除去焼鈍した Fig.1 の結果から求めており、材料のバウシinger効果は考慮していない。また、純粋曲げを仮定した時の塑性率  $\xi$  を(2)式に示す。

$$\xi = 1 - \frac{\eta}{d} \quad (2)$$

塑性率  $\xi$  とは Fig.3 に示すように、断面内の塑性域の割合としている。

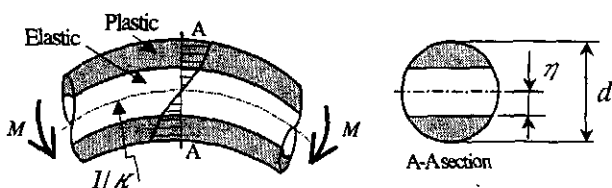


Fig.3 Definition of plastic ratio

以下に提案するロール設計法の具体的設計手順を示す。

- 1) 材料定数である降伏応力  $\sigma_y$ , ヤング率  $E$ , 直線硬化係数  $H$  と材料径  $d$ , 最小ロール径  $R_0$ , ロールと材料の傾斜角  $\theta$  を入力する。
- 2) 材料軸  $z$  方向の塑性率分布  $\xi(z)$  を任意に設定する。
- 3) 材料の曲率  $\kappa(z)$  を計算する。

$$\kappa(z) = \frac{2\sigma_y}{\{1 - \xi(z)\}Ed} \quad (3)$$

- 4) 材料のたわみ角  $\phi(z)$  を計算する。

$$\phi(z) = \int \kappa(z) dz \quad (4)$$

- 5) 材料のたわみ  $V(z)$  を計算する。

$$V(z) = \int \phi(z) dz \quad (5)$$

- 6) たわんだ材料に外接するようにロール径  $R$  を計算する。

$$R = G(V, \theta, R_0) \quad (6)$$

これは、すでに述べた現状ロール (Fig.2) を考察した解析法を逆行する方法である。すなわち現状ロールは双曲線を与えた結果、一つの弾塑性分布が得られたが、新しい方法ではこれとは逆に、矯正を支配する材料の弾塑性分布を先に与え<sup>6)</sup>、これを満足するようなロールプロフィールを求める。矯正原理から矯正に最適な弾塑性分布をあらかじめ与えられる利点がある。

#### 4. 弾塑性シミュレーション<sup>7)</sup>

最適なロールプロフィールを設計するには、試作ロールをその度ごとに製作、検証する方法では効率が悪い。そこでロールプロフィールの性能の一つである残留応力を理論的に評価できるシミュレーションプログラムを開発した。

このシミュレーションの概略を Fig.4 に示す。図は円筒座標系で表示しており、 $z$  を長手方向、 $r$  を半径方向、 $\theta$  を円周方向としている。また、材料が送り量  $\Delta z$  だけ移動し、それに伴い回転量  $\Delta \theta$  だけ回転するとき、添字  $i$  を  $i+1$  とし、 $i=k$  でロールと材料が離脱する。材料一断面内の任意の点を  $P_i(r, \theta)$  とし、その点の応力とひずみを  $\sigma_i(r, \theta)$ ,  $\varepsilon_i(r, \theta)$  とする。任意の4つの点  $P_i(r_m, \theta_n)$ ,  $P_i(r_{m+1}, \theta_n)$ ,  $P_i(r_m, \theta_{n+1})$ ,  $P_i(r_{m+1}, \theta_{n+1})$  に囲まれた斜線部を微小面積  $\Delta S$  とし、この  $\Delta S$  の持つ応力はその周りの4点の持つ応力の平均とする。そして、ロールから受ける曲げ曲げ戻しの履歴を逐次計算していくことにした。この計算では、材料のピッチを考慮し、矯正ロール内での材料の送りと回転を再現している。まず、ここで用いる記号を以下に示す。

- $P_i(r, \theta)$ :  $i$  断面の任意の点
- $\sigma_i(r, \theta)$ :  $i$  断面の任意の点の応力
- $\varepsilon_i(r, \theta)$ :  $i$  断面の任意の点のひずみ
- $\kappa_i$ :  $i$  断面の材料の曲率
- $M_i$ :  $i$  断面のモーメント
- $\Delta \sigma_i(r, \theta)$ :  $i$  断面の任意の点の応力増分
- $\Delta \varepsilon_i(r, \theta)$ :  $i$  断面の任意の点のひずみ増分
- $\Delta \kappa_i$ :  $i$  断面の任意の点の曲率増分

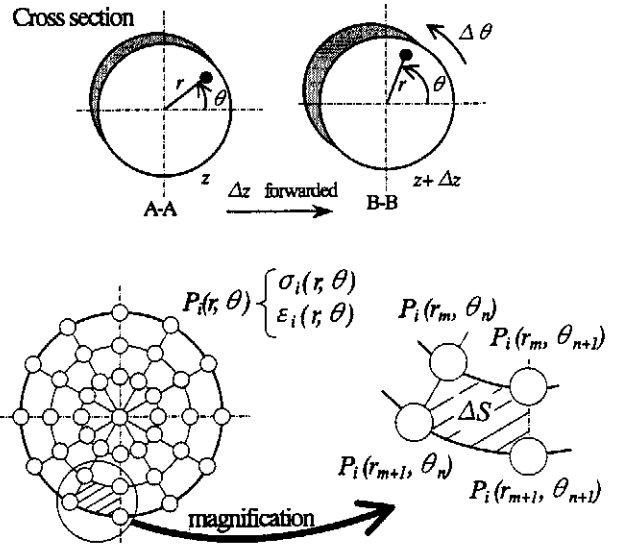
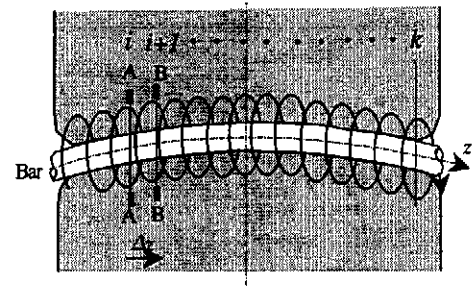


Fig.4 Evaluation method of roll profile

- $\sigma_{ie}$ :  $i$  断面の任意の点の弾性域での応力
- $\sigma_{ip}$ :  $i$  断面の任意の点の塑性域での応力
- $\sigma_{oy}$ : ひずみ 0 での降伏応力
- $E$ : ヤング率
- $H$ : 直線硬化係数

本解析で用いる仮定を示す。

- (1) 材料横断面に垂直な軸方向の応力、ひずみのみ考慮する。
- (2) 中立軸は常に材料の中心線に一致する。
- (3) 軸方向ひずみは直線分布とする。
- (4) 材料の曲げ曲率は対向するロールの曲率と一致する。

本シミュレーションは繰り返し曲げの履歴を追うため、引張り、圧縮における応力とひずみの関係を正確に知ることが重要になってくる。そこで、Fig.5 のように引張り、圧縮の繰り返し試験を行った。この結果を基に応力とひずみの履歴はバウシinger効果を考慮した線図を Fig.6 に与える。

次に、具体的な計算順序を以下に示す。

- 1) ロールの曲率  $\kappa_i$  を入力する。
- 2) 曲率増分  $\Delta \kappa_i$  を計算する。  

$$\Delta \kappa_i = \kappa_i - \kappa_{i-1} \quad (7)$$
- 3) ひずみ増分を計算し、ひずみを求める。  

$$\Delta \varepsilon_i = r \cdot \sin \theta \cdot \Delta \kappa_i + \kappa_i \cdot (r_i \cdot \sin \theta_i - r_{i-1} \cdot \sin \theta_{i-1}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \Delta \varepsilon_i \quad (9)$$
- 4) 弾性域と仮定し、応力増分、応力を計算する。

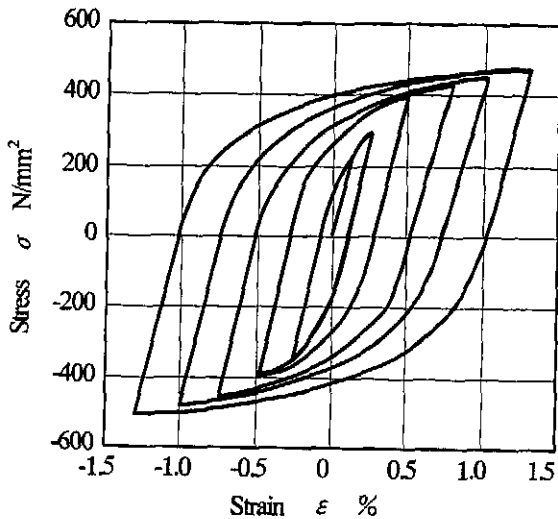


Fig.5 Experimental Stress-strain diagram

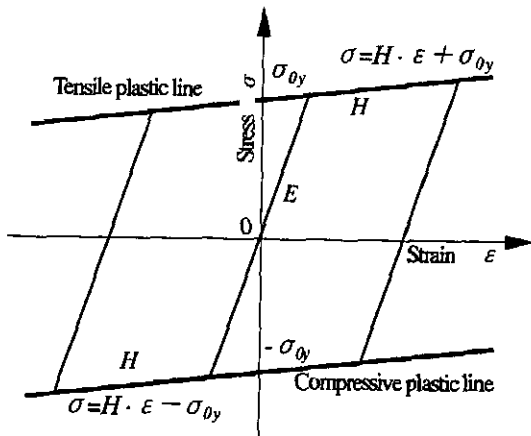


Fig.6 Schematic stress-strain diagram for simulation

$$\Delta \sigma_i = E \cdot \Delta \varepsilon_i \quad (10)$$

$$\sigma_{ei} = \sigma_{ei} + \Delta \sigma_i \quad (11)$$

5) 塑性域と仮定し、応力を求める。

$$\sigma_{pi} = H \cdot \varepsilon_i + \sigma_{0y} \quad (\Delta \varepsilon_i > 0) \quad (12)$$

$$\sigma_{pi} = H \cdot \varepsilon_i - \sigma_{0y} \quad (\Delta \varepsilon_i < 0) \quad (13)$$

6) 弾性、塑性の判断をし、現在の応力値を決定する。

$$\sigma_i = \sigma_{ei} \quad (|\sigma_{pi}| > |\sigma_{ei}|) \quad (14)$$

$$\sigma_i = \sigma_{pi} \quad (|\sigma_{ei}| > |\sigma_{pi}|) \quad (15)$$

7) ) に戻り、 $i = k - 1$  まで繰り返す。

8)  $i = k - 1$  のときのモーメントを計算する。

$$M_{k-1} = \int \sigma \cdot r \cdot \sin \theta dS \quad (16)$$

9) スプリングバックを考慮し、 $i = k$  のときの応力とひずみを計算する。

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{k-1} - \frac{M_{k-1}}{EI} \quad (17)$$

$$\sigma_k = \sigma_{k-1} - \frac{M_{k-1}}{I} \quad (18)$$

10) 断面内の残留応力の面積積分 (=内力) が 0 (=外

力) になるように残留応力の軸を調整する。

$$\int \sigma_k dS = 0 \quad (19)$$

### 5. 現状ロールの性能評価<sup>7)</sup>

Fig.2 において評価を行った現状ロールについて、シミュレーションを試みた。残留応力のない材料に Fig.3 で解析した曲率分布を与え、矯正後の残留応力の分布を検討することにした。Fig.7 にシミュレーション結果を示す。

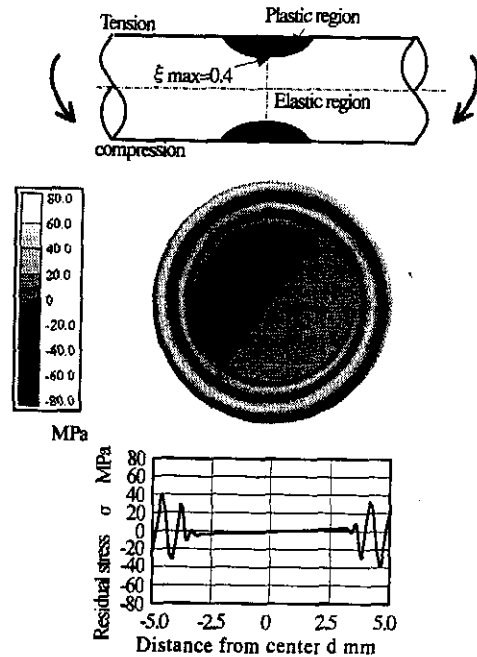


Fig.7 Residual stress of traditional roll

上段は解析対象の弾塑性分布を表し、中段は一断面内軸方向残留応力を白(張力)黒(圧縮力)で表記しており、白黒のコントラストが強いほど高い応力が残留していることを表しており、また白黒がより密になっている程、応力がよく細分化されていることを表す。下部はそれを水平中心線上で表記した分布を示す。

本結果を考察すると、表層部分の残留応力は特に大きい。これは Fig.2 で指摘したように弾塑性境界近傍の塑性率低減が急激であることによる。

引抜き等による初期残留応力がある場合は塑性の入らない材料内部は初期の残留応力分布がそのまま残り、表層部分の残留応力は初期残留応力のない場合と同じ傾向を示している。

以上、弾塑性分布の解析(Fig.2)並びに、残留応力シミュレーションの結果(Fig.7)をまとめると現状ロールの改善すべきポイントは①最大塑性率を1ピッチ一定に与えること。②塑性領域を長くすること。③弾塑性領域後半、弾塑性領域近傍の塑性率低減の傾きを緩やかにすることである。

### 6. 最適ロールプロフィールの提案

今度はこのシミュレーションを用いて、ロールプロフィールの理想型の検証を行う。材料に与える曲率分布は

Fig.8 に示す通りである。比較を容易にするため、塑性率

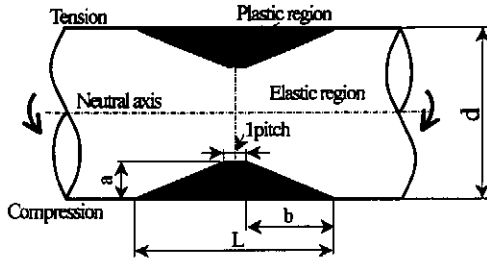


Fig.8 Plastic ratio distribution for simulation

遞減の傾きを直線化した。シミュレーションは最大塑性率  $\xi_{max}$  を変化させた場合 ( $\xi_{max}=2a/d=0.4, 0.8$ , ただし遞減の傾き  $\xi_{max}/S=5.20$ , ここで  $S=2b/d$ ) と, 繰り返し曲げの遞減の傾きを変化させた場合 ( $\xi_{max}/S=5.20$  (前述と重複),  $2.60, 1.30$ , ただし  $\xi_{max}=0.4$ ) の2パターンを行った。シミュレーションの結果を Fig.9 に示す。

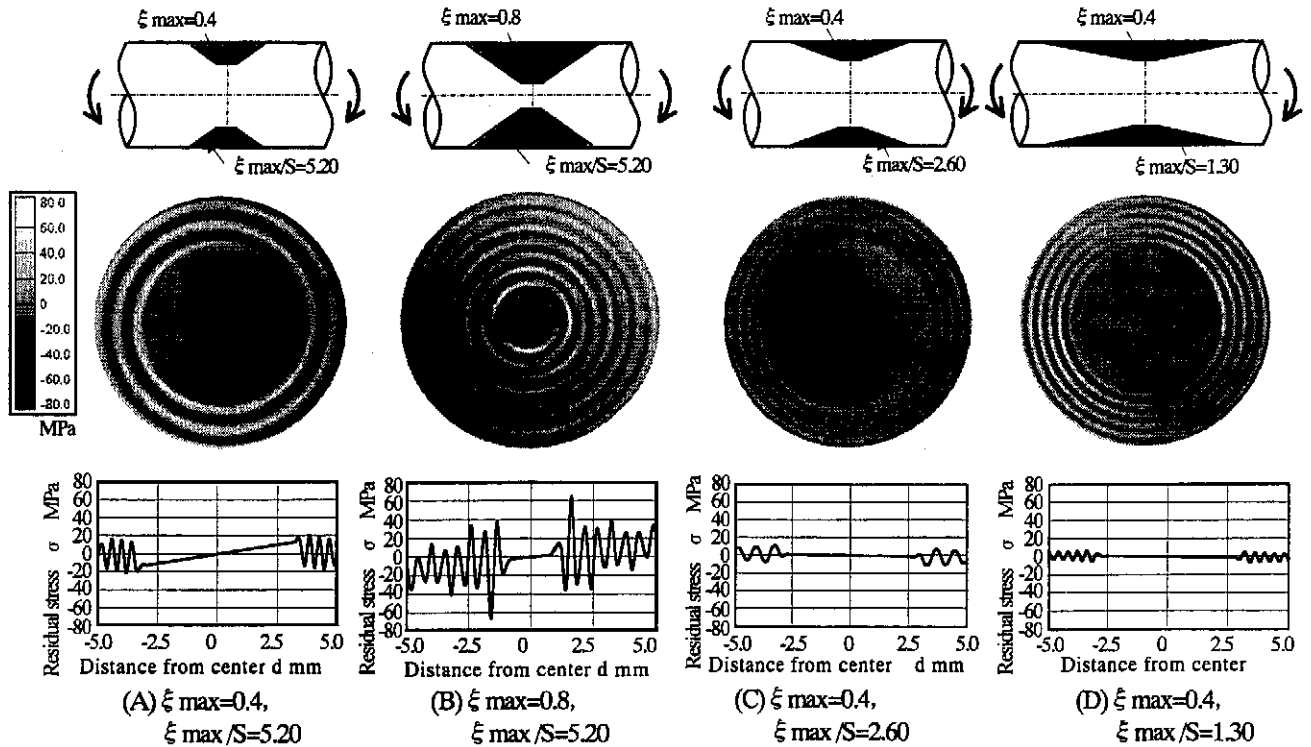


Fig.9 Change of residual stress distribution by  $\xi_{max}$

Fig.9 (A), (B) によると, 最大塑性率を高くすると, 材料内部の残留応力を細分化できるが, 反面最大塑性率が高すぎると, 特に材料内層の残留応力が極端に大きくなる (B)。また, Fig.10 (A), (C), (E) から塑性率遞減の傾きが緩慢であればあるほど細分化, 絶対値ともよい値を示している (D)。

以上から塑性率の理想的分布は, (1) 必要十分量に過不足なく最大塑性率を与え, (2) 遞減の傾きはできる限りゆるやかに遞減できるようなロールプロフィールといえる。

## 7. 結言

棒線の2ロール矯正によるロールプロフィールと残留応力について理論的考察を行い, 以下の結論を得た。

- (1) 残留応力を低減・細分化させるためのロールプロフィールを評価できるシミュレーションソフトを開発した。
- (2) 現在使用されている双曲線型ロールプロフィールの欠点と改善点を見いだした。
- (3) 理想的な弾塑性分布をあらかじめ考えて, これを満足するようなロールプロフィールを設計する方法を考案した。
- (4) 開発したソフトを用い, さまざまなロールプロフィールをシミュレーションし, 残留応力を低減・細分化させる理想的なロールプロフィールを示唆することができた。

## 参考文献

- 1) 浅川基男: 塑性と加工, 41-468 (2000), 69-73.
- 2) 錦古里洋介・浅川基男・鈴木得功: 平10 塑加春講論, (1998), 417-418.
- 3) Asakawa, M., Nishikori, Y., & Yanagihashi, T.: Proceedings of 6th ICTP, (1999), 1507-1510.
- 4) 古堅宗勝: 第70回塑性加工講習会, (1995), 13-28.
- 5) 曾田長一郎: 塑性と加工, 5-41 (1964), 345-357.
- 6) 木内学: 塑性と加工, 37-428 (1996), 900-906.
- 7) 錦古里洋介・浅川基男・鈴木得功: 49回塑加連講論, (1998), 7-8.