

板材矯正工程における表面ひずみおよび板厚と矯正条件の関係

瀬川 明夫*

Relation between Flattening Conditions and Surface Strain and Plate Thickness

Akio SEGAWA

Synopsis : At Present, the flattening process has been operated by experience and intuition of the expert. On the other hand, the quantification of the flattening condition has been required, and it is urgent to clarify the mechanism of the flattening process.

This study carries out the roller leveler flattening for the plate, and it aims at the quantification of the flattening condition, while the mechanism of the flattening process is clarified by surface strain measurement under straightening and contact point observation with the roll, after shape evaluation.

As a result, the quality of 3-points bending condition in the top and bottom roll greatly influenced the plate shape by the surface strain comparison of maximum value and roll contact location under flattening, and it became clear that the possible range for flattening had been decided.

And, the prospect that the intermesh of the top and bottom roll uniquely sets became possible was obtained as the flattening condition.

Key words: plate flattening; roller leveler; flattening condition; surface strain; 3-points bending.

1. 緒言

通常、圧延・押し出し・引き抜き等の工程を経た金属製品の最終工程が形状不良を抑止する矯正工程であることが多く、板・棒・線・管・型材といった多くの製品の品質に直接、影響を及ぼすため、素材製造の重要な工程となっているが¹⁾、その矯正条件の決定はオペレータの経験と勘に頼っているため、ロール矯正のメカニズムの検討による定量化が取り組まれている²⁻⁴⁾。

これまでロール矯正に関して種々の研究が行われ、通板後の残留曲率においては、板材に塑性変形率70%以上の曲げを与えて徐々に矯正を行うと板先端部の鼻曲がりは発生せず、ロール本数を増やすほど板先端部の鼻曲がりや残留曲率は低減され、同一な矯正条件においては材料の降伏曲率に起因して残留曲率が異なることが明確になっている^{4,5)}。矯正中の通板挙動について、数値解析では三点曲げの原理に基づいて曲げ・曲げ戻しが行われ、素材そのものの材料特性を無視しているため矯正中はロール頂点で材料が接触し表面ひずみの極値と仮定されており、上ロールの押し込み量により矯正中の曲率及び表面ひずみは決定されることが明らかになっている³⁾。

本研究では、ロール矯正において変形抵抗の異なる数種の材料を用いて通板中の板挙動や供試材の表面ひずみ、通板後の残留曲率を測定し、矯正条件の定量化を目指す。

2. 実験方法

2.1 ロールレベラー

実験で使用するロールレベラーの外観とロール配置をそれぞれFig. 1, Fig. 2に、性能諸元をTable 1に示す。

本ロールレベラーは上部ロール：4本、下部ロール：

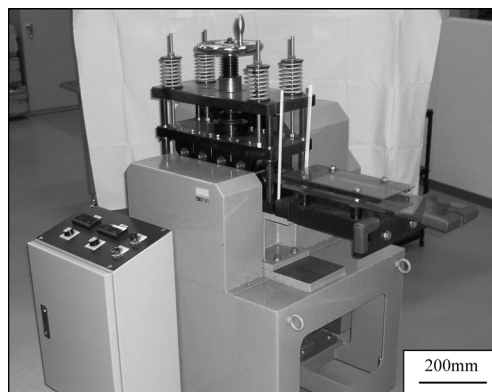


Fig. 1. External appearance of roller leveler.

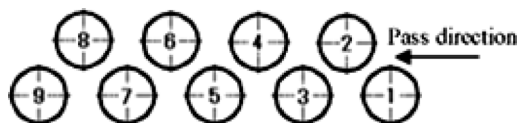


Fig. 2. Roll configuration of roller leveler.

Table 1. Specifications of roller leveler.

Roll material	SUJ 2
Roll diameter /mm	50
Roll pitch /mm	80
Roll speed /m・min ⁻¹	1~6

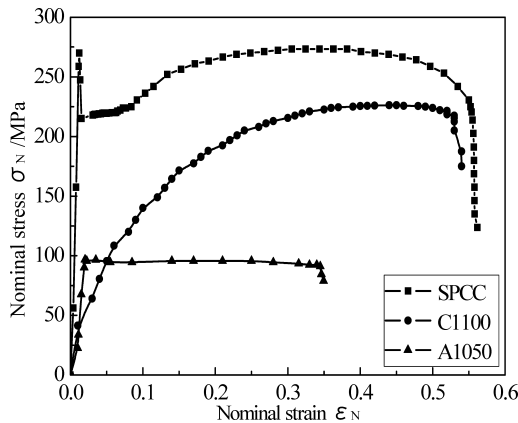


Fig. 3. Results of tensile test.

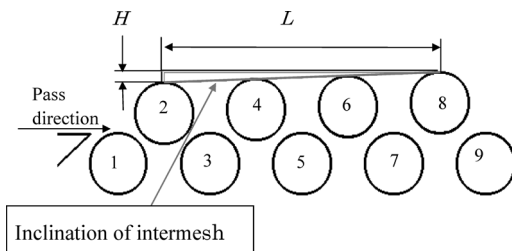


Fig. 4. Adjustment of intermesh.

5本から構成され、押し込み量（インターメッシュ）の調整は上部ロールチョックとフレームの間にシムを挿入することで行うものである。また、上部ロールは個々にインターメッシュ調整を可能としている。

2・2 供試材

一般的な材料であること、および変形抵抗の差異が明確になることを考慮し、SPCC、A1050、C1100の3種類を用いた。Fig. 3に各供試材の引張試験結果を示す。

これより、A1050を軟質材、SPCCを硬質材、C1100を両者の中間の材料と位置づけた。

2・3 インターメッシュの設定

Fig. 4にインターメッシュの調整法を示す。

本研究で使用するローラーレベラーは、上部ロール（2、4、6、8番ロール）でインターメッシュを個々に設定可能であるが、今回は、実機でのインターメッシュ調整の簡便さを考慮し、上部ロールすべてを一定の傾きとなるように、設定することとした。

与えられるインターメッシュは、次式で示される。

$$\alpha = \tan \theta \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

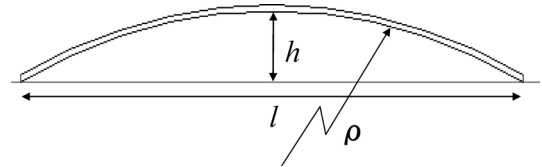


Fig. 5. Measurement of curvature.

$$\tan \theta = \frac{H}{L} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 α ：インターメッシュ[%]、 H ：最大押し込み量（入側）[mm]、 L ：上ロールの入側-出側間距離[mm]である。

2・4 検討項目

通板中の板材の挙動を明確にするため、以下の項目に関して、測定、観察を行った。

(1) 板表面ひずみ

板材表面にひずみゲージを貼付し、データロガーを介して、PCに取り込む。ひずみゲージ貼付箇所は、板材中央とした。なお、事前に行った予備実験より、通板中の表面ひずみは、板材の表裏、長手方向定常部貼付位置による差異は無いことを確認している。

(2) ロールとの接触位置

通板中の板材の様子をビデオカメラにて撮影し、ロールとの接触位置と表面ひずみ変化の関係を明確にする。ローラーレベラーにおいては、板材は曲げ-曲げ戻しを繰り返され平坦化されるが、表面ひずみの極値（最大ひずみ）が、どの位置で生ずるかを検討した。

(3) 残留曲率

通板後の板材に残留曲率がある場合について測定を行った。Fig. 5に残留曲率測定方法を示す。

また、曲率の算出は次式で行った。

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{8h}{l^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 κ ：曲率[m⁻¹]、 ρ ：曲率半径[m]、 l ：弧の投影長さ[m]、 h ：波高さ[m]である。

3. 初期曲率が無い場合の矯正可能範囲の検討

矯正条件の定量化に当たり、初期曲率を付与しない板材を通板し、残留曲率が生じないインターメッシュの上限（矯正可能範囲）を調査した。換言すれば、平坦な板を通板し、平坦度が保たれるインターメッシュの範囲を求め、後述する初期曲率が存在する場合（形状不良を想定）の矯正可能範囲調査と併せ、一意的に矯正条件を定めることが可能であるか検討するものである。

3・1 実験条件

実験条件を Table 2 に示す。また、インターメッシュ設定に際し、Fig. 4 に示した上部ロールの個々の押し込み設定値とインターメッシュの関係は Table 3 のようになる。

なお、試料寸法は、0.8t×50w×300l である。また、予め焼なまし処理を行い、表面粗さは 0.3μm Ra に研磨している。

3・2 実験結果

矯正可能範囲を調査した結果を Table 4 に示す。また、残留曲率が生じたインターメッシュと残留曲率の値を Table 5 に示す。

これより、C1100 が最も矯正可能範囲が狭いことがわかる。また、矯正可能範囲を超えた後の残留曲率を見ると、今回の試料の中で硬質材と位置づけた SPCC が最も小さい値となったが、A1050 と大きな差は無い。一方 C1100 においては、矯正可能範囲の狭さのみならず、残留曲率も他の試料と比較して大きい値となっている。Fig. 3 に引張試験結果を示したが、C1100 は、SPCC、A1050 に比較し、ヤング率が小さく、かつ加工硬化が大きい材料となっており、通板中に作用する曲げひずみ量に対する変形の度合いが大き

Table 2. Experiment conditions.

Roll speed	/m・min ⁻¹	1
Intermesh	/%	0～1.875
Initial curvature of strip	/m ⁻¹	0

Table 3. Relation between adjustment value and intermesh.

Adjustment value /mm (Roll No.2→Roll No.8)	Intermesh /%
4.5, 3, 1.5, 0	1.875
3, 2, 1, 0	1.250
1.5, 1, 0.5, 0	0.625
0, 0, 0, 0	0

Table 4. Limit of flattening.

Specimen	Inclination of Intermesh /%
SPCC	0～1.750
C1100	0～1.250
A1050	0～1.625

Table 5. Value of residual curvature.

Specimen	Intermesh /%	Curvature /m ⁻¹
SPCC	1.875	6.22
C1100	1.375	10.7
A1050	1.750	8.00

いことが推察され、矯正されにくいものと思われる。

Table 4 の結果より、C1100 が最も矯正可能範囲が小さい結果となったが、インターメッシュ 1.25% の値において、すべての供試材が矯正可能であることがわかる。

インターメッシュ 0.625% と 1.25% の条件での表面ひずみ測定結果をそれぞれ、Fig. 6、Fig. 7 に示す。

図中、No. 1 から No. 9 はローラーレベラーの各ロール番号であり、概略図は Fig. 6 中に示した。また、C.P. は、ビデオ観察によるロールとの接触位置である。Fig. 8 にビデ

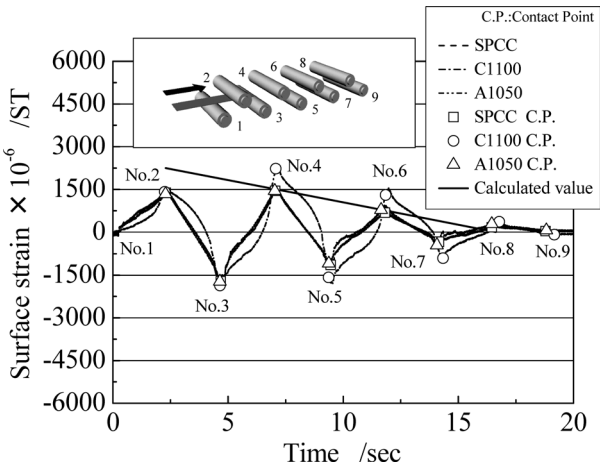


Fig. 6. Results of surface strain measurement (intermesh: 0.625%).

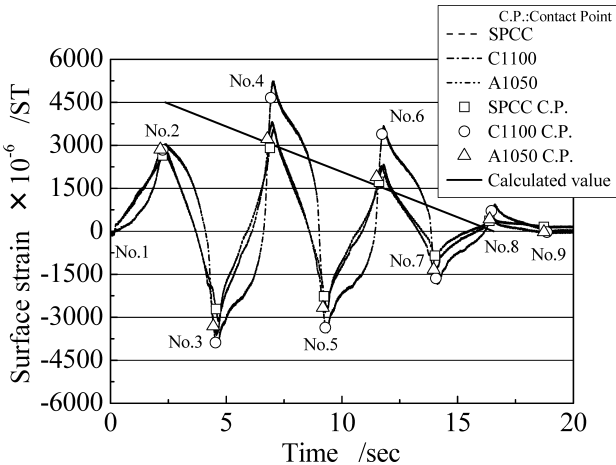


Fig. 7. Results of surface strain measurement (intermesh: 1.25%).

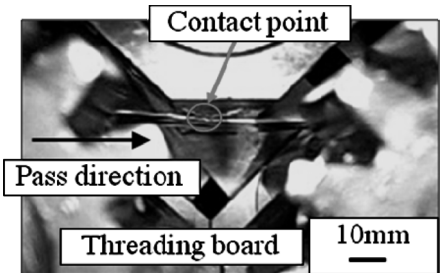


Fig. 8. View of passing zone in roll bite.

オ観察中の通板の様子を示す。板材側面にマーキングを施し、ビデオ画像をコマ送りし、接触位置を求めた。

また、図中の実線は、日比野によるひずみの実用算式⁵⁾により算出した値である。

$$\varepsilon_i = \frac{3(\delta_i + t)t}{L_p^2} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 ε_i ：表面ひずみ[ST]， δ_i ：押し込み量[mm]， t ：板厚[mm]， L_p ：上下ロール間距離[mm]である。

Fig. 6, Fig. 7より、インターメッシュに比例し、表面ひずみ量も増加する。ローラーレベラー出側に向かい、表面ひずみ量は減少し、平坦化されていく。また、SPCC、A1050は変形抵抗の差異に関係なく、同等の値となっている。C1100は、他の試料に比べ、表面ひずみの値、変化ともに大きいことがわかる。インターメッシュが小さい場合、表面ひずみの最大値はロールとの接触点と一致するが、インターメッシュが大きくなると、ロール接触点が入側にずれている。前述の通り、C1100のみ、応力-ひずみ関係が他の2種と異なっており、変形能の違いによるものと思われる。

式(4)で求めた表面ひずみの値は、ロールNo. 4, 6, 8の位置で実験値と近似した値となっている。特にSPCC、A1050ではロール接触点での値と一致する。ロールNo. 2においては、ロールNo. 1での拘束が十分ではなく、ロールNo. 2で付与される曲げひずみ量が小さくなることが推察される。ロールNo. 3以降では上下ロールによって三点曲げ状態となり、十分な曲げ-曲げ戻しによって板は矯正される。すなわち前段も含め、上下ロールでの三点曲げ状態の良否が重要であることを示唆していると言える。

4. 初期曲率を与えた場合の矯正可能範囲の検討

前述の結果を踏まえ、実機の形状不良に相当する初期曲率を付与した試料を用いて、矯正可能範囲の検討を行った。

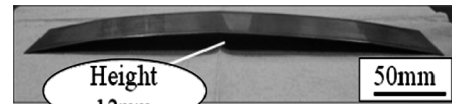
4.1 実験条件

初期曲率は、 1 m^{-1} と 2 m^{-1} の2水準とした。Fig. 9に外観形状を示す。他の条件はTable 2に準じているが、インターメッシュは、0.625%、1.25%の2種とした。また、試料寸法ならびに前処理も初期曲率無しの場合と同条件である。初期曲率は小型圧延機の三点曲げモードを利用して付与した。

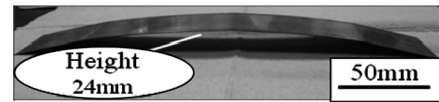
4.2 実験結果

初期曲率 1 m^{-1} 、インターメッシュ0.625%での表面ひずみ測定結果をFig.10に、インターメッシュ1.25%での表面ひずみ測定結果をFig.11に示す。

インターメッシュ0.625%では平坦時に比べ、SPCCでは



Initial curvature: 1 m^{-1}



Initial curvature: 2 m^{-1}

Fig. 9. External view of strip with initial curvature.

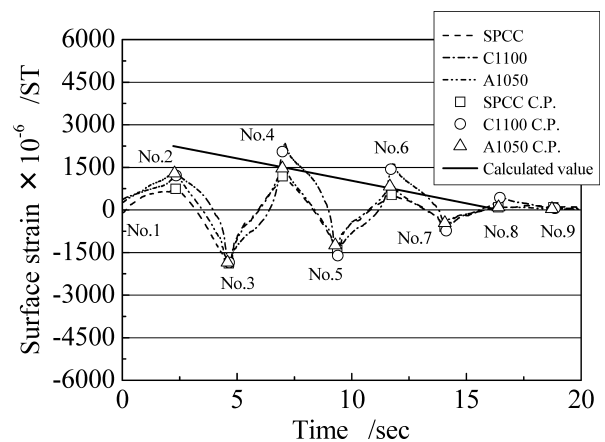


Fig. 10. Results of surface strain measurement (initial curvature: 1 m^{-1} , intermesh: 0.625%).

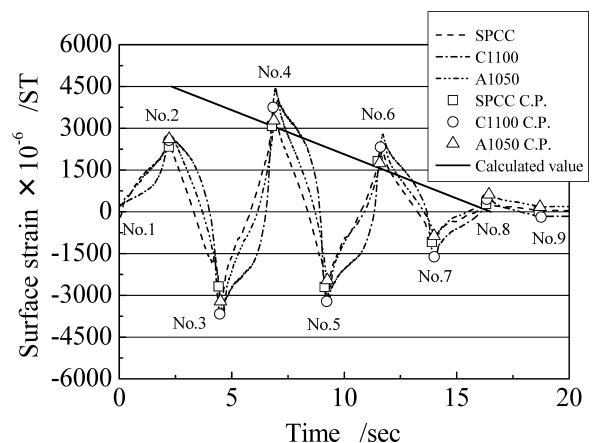


Fig. 11. Results of surface strain measurement (initial curvature: 1 m^{-1} , intermesh: 1.25%).

表面ひずみの極値は小さくなり、SPCCとA1050には通板後残留曲率が生じていたが（SPCCでは、 0.0712 m^{-1} ，A1050では、 0.0267 m^{-1} ），1.25%では表面ひずみは平坦時と同一な結果となり、通板後の残留曲率も生じていない。これは初期曲率を付与しての通板では板の曲率により、板とロール接触及び板の挙動が平坦時とは異なり、三点曲げによる曲げ量が小さくなるため、表面ひずみに影響すると

考え、1.25%では大きい押し込み量により、十分な曲げが加えられたため、表面ひずみへの影響は小さくなったと考えられる。また、インターメッシュが大きい場合、全供試材で接触点、極値、理論値、ともに平坦時とほぼ同一の値となる。これより、インターメッシュの増加によって三点曲げでの曲げ-曲げ戻しの状態に近づくと通板時の板の挙動及び表面ひずみは平坦時と同一になると考えられるため、表面ひずみは三点曲げ状態の良否に依存すると推察される。

さらに、大きな形状不良を想定した初期曲率 2 m^{-1} では、インターメッシュ0.625%では平坦時に比べ、全供試材で表面ひずみの極値は小さくなり、SPCCとA1050に残留曲率が生じていたが（SPCCでは、 0.616 m^{-1} 、A1050では、 0.237 m^{-1} ）、インターメッシュ1.25%では表面ひずみは平坦時、初期曲率 1 m^{-1} 付与時とほぼ同一な結果となり、残留曲率も生じていなかった。

以上より、インターメッシュが大きくなるに伴い、極値と接触点には差が生じ、理論値は接触点に近似するため、極値と理論値には差が生じる。このため、初期曲率が平坦時ではインターメッシュが小さいほど表面ひずみの極値、接触点、理論値は近似するが、初期曲率が増加するに伴い、表面ひずみは小さくなるため、小さいインターメッシュで矯正可能な形状欠陥であれば前述した理論式は適用できると推察される。通板中の表面ひずみは板の変形抵抗の影響は小さく、三点曲げの良否に依存すると推察される。

インターメッシュ1.25%では初期曲率の有無に関係なく、全条件で同一な表面ひずみになり、初期曲率 2 m^{-1} 付与時でも全供試材で、残留曲率は生じていないため、この条件では理想的な三点曲げでの曲げ-曲げ戻しにより矯正されると考えるため、板厚0.8mmでの最良条件はインターメッシュ1.25%であると推察する。

5. 板厚と矯正可能範囲の関係

矯正条件の定量化に向けて、前述の結果より、ローラーレベラー内での三点曲げの良否の影響が強いことがわかってきた。すなわち材料が異なっている、形状が同一であれば、特定の因子によって適切なインターメッシュが推定できる可能性がある。式(4)では、形状の因子は板厚であり、ここでは、0.8mmの板厚に加え、0.4mm、1.6mmに板厚を変化させ、検討を加えた。

5.1 実験条件

Table 6に実験条件を示す。

なお、供試材は同様に、SPCC、A1050、C1100の3種類を用いているが、C1100の板厚0.4mmについては、実験を行っていない。また、実験前の処理等はすべて同一の状態としている。

Table 6. Experiment conditions.

Thickness / mm	0.4, 0.8, 1.6
Roll speed / $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	1
Intermesh / %	0~3.25
Initial curvature / m^{-1}	0, 1, 2

Table 7. Limit of flattening.

Thickness / mm	Specimen	Intermesh / %
0.4	SPCC	0~3.250
	C1100	—
	A1050	0~3.250
0.8	SPCC	0~1.750
	C1100	0~1.250
	A1050	0~1.625
1.6	SPCC	0~0.625
	C1100	0~0.625
	A1050	0~1.250

5.2 実験結果

Table 7に初期曲率無しの場合における矯正可能範囲調査結果を示す。

これより、板厚が小さいほど矯正可能範囲は大きいことがわかる。

初期曲率を付与した場合、 1 m^{-1} では、板厚0.4mmにおいてはインターメッシュ2.50%で矯正限界となった。

また、板厚1.6mmにおいてはインターメッシュ0.625%において、C1100は残留曲率は生じなかったが、SPCCでは微少な残留曲率が生じていた。

表面ひずみ測定では、インターメッシュ0.625%の場合では傾き0.75%と比べ、全体的に表面ひずみの極値は小さく、各供試材の残留曲率も小さくなり、C1100は残留曲率が生じなかった。これは板厚が大きいと変形がしにくく、初期曲率 1 m^{-1} 付与時はインターメッシュ0.75%では押し込みが大きく、通板中の曲げ-曲げ戻しの影響が通板後にも残ったと考えられる。

さらに大きな形状不良である初期曲率 2 m^{-1} の条件では、板厚0.4mmの場合は、押し込み量の傾き2.875%ではSPCCに残留曲率が生じ、2.50%ではすべての供試材に残留曲率は生じず、矯正された。

板厚1.6mmにおいては、インターメッシュ0.625%の場合は全ての供試材に残留曲率が生じた。インターメッシュを大きくしていくと、0.75%でC1100のみ矯正される結果となったが、SPCC、A1050ともに残留曲率は小さくなっており、板厚1.6mm、初期曲率 2 m^{-1} 付与時では0.75%の方が最良の矯正条件と言える。

板厚が大きい場合は、初期曲率付与時の予変形の影響も現れており、一様な曲率ではなかったことが推定される。

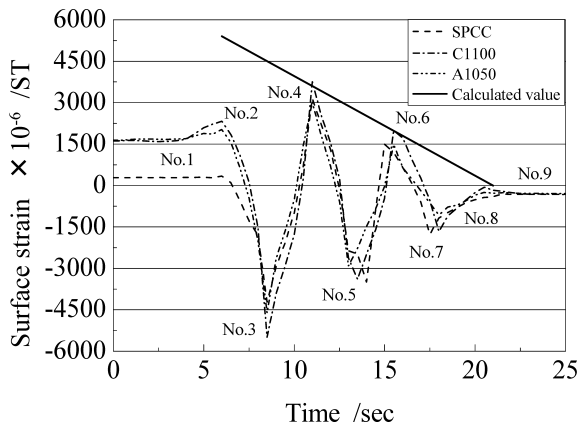


Fig. 12. Example results of surface strain measurement (thickness: 1.6 mm, initial curvature: 2 m^{-1} , intermesh: 0.75%).

以上より、初期曲率無し、 1 m^{-1} を付与した場合の板厚1.6 mmの最良の矯正条件は0.625%であり、0.75%の場合は残留曲率が生じた。しかし、初期曲率 2 m^{-1} を付与した場合は、押し込み量の傾きを大きくした方が残留曲率は小さくなった。これは、0.625%では初期曲率に対して曲げ-曲げ戻しが小さく、初期曲率が残る、押し込み量の傾きを0.75%にした場合は十分な曲げ-曲げ戻しが行われ、残留曲率が小さくなったと考えられる。板厚0.4 mm, 0.8 mmの場合は、初期曲率を与えると、平坦時と同じか、それより小さい押し込み量の傾きでなければ矯正されなかったが、板厚1.6 mmの場合は、初期曲率 1 m^{-1} を付与した時の最良の矯正条件は0.625%であり、初期曲率 2 m^{-1} を付与した時の最良の矯正条件は0.75%であった。このことから、板厚が大きく、初期曲率も大きい形状不良の場合、押し込み量の傾きを大きくしたほうが矯正される可能性がある。

表面ひずみ測定の一例として、板厚1.6 mm、初期曲率 2 m^{-1} 、インターメッシュ0.75%の場合をFig.12に示す。なお、接触位置観察は行っていない。

6. 結言

Table 8に各板厚における最適矯正条件、Fig.13に本結果

Table 8. Proper flattening conditions.

Thickness /mm	Intermesh /%
0.4	2.50
0.8	1.25
1.6	0.625
	(Initial curvature: 1 m^{-1})
	0.75
	(Initial curvature: 2 m^{-1})

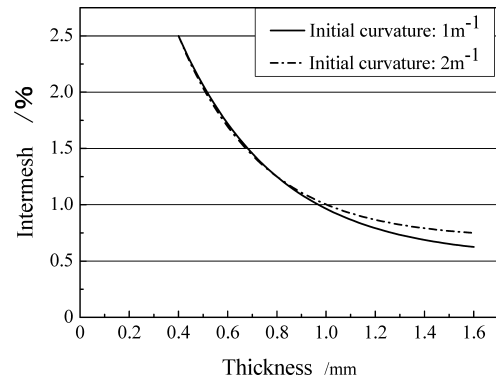


Fig. 13. Proper flattening condition curve.

を含めた板厚と矯正条件の関係を示す。これより、本実験で用いた変形抵抗の範囲、形状不良の大きさであれば、板厚によって最適な矯正条件を一意的に設定できる可能性はあると言える。

文 献

- 1) 鈴木 弘：機械の研究，**50** (1998)，681.
- 2) 社団法人日本塑性加工学会編：矯正加工—板，管，棒，線を真直ぐにする方法—，コロナ社，東京，(1996)，1.
- 3) T.Higo, H.Matsumoto, S.Ogawa, *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **43** (2002), 439.
- 4) 阿高松男，榎本匡志：第58回塑性加工連合講演会講演論文集，(2007)，481.
- 5) F.Hibino: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **31** (1990), 208.