

レーザーフォーミングされた薄板碗形実曲面の面内ひずみの推定*

秋山 哲也**, 寺崎 俊夫**, 北村 貴典**

Estimation of In-Plane Strain in Laser Formed Thin Bowl Plate*

by AKIYAMA Tetsuya**, TERASAKI Toshio** and KITAMURA Takanori**

To form curved surface, in-plane strain is introduced into a plate by line heating, press working or laser heating in shipbuilding or sheet metal working like nose shape forming for bullet trains. Laser forming could be a potential useful method for sheet metal forming as well as press working.

When forming a curved surface with thin plate in some steps, it is thought to be useful to measure in-plane strain distribution before the forming is finished, to know whereabouts and amount of shortage of in-plane strain. The process to measure in-plane strain in an actual curved surface seems still not to be reported.

In this report, in-plane strain distributions existing bowl shape thin plate made by laser heating is investigated with geodesic lines drawn numerically on the surface. The in-plane strain is calculated with distance change of two geodesic lines. This in-plane strain distribution agrees with a strain distribution measured by shrinkage of the plate when the plate length is long. When plate length is short, these strains do not agree with each other. In this case, existence of some elongations cancelling effective in-plane strains appears in width change of the plate. In a result, in-plane strain measured with geodesic lines is useful to indicate performance of curved surface forming process.

Key Words: In-plane strain, Geodesic line, Laser forming, Bowl shape, Thin plate

1. 緒 言

板材に面内ひずみを与えて曲面を形成する方法は、造船現場での線状加熱¹⁾やプレス²⁾の他、新幹線先頭車両の板金やレーザーフォーミング³⁻⁷⁾などに利用されている。加熱冷却過程で生じる固有ひずみを利用する線状加熱やレーザーフォーミングでは、加工の自動化という観点から、目的の形状を得るための適正な初期形状やひずみを与える場所と量を決定するシステムの研究⁸⁾が行われている。従来の板金分野にレーザーフォーミングが参入できれば、再現性の良い加工技術となる可能性も高い。

曲面を形成する場合には、目的形状にかなった初期形状に板材を曲げ加工し、適正な面内ひずみ量を適正な場所に正確に与える必要がある。しかし、適正な初期形状と適正な面内ひずみが分かっている場合でも、実際に加熱加工を行う際、ガス炎の場合には湿度や気温など、レーザー加熱の場合には板の表面状態や光学系の損耗などにより、予定通りの面内ひずみを与えられない状況が起こることもあり得る。また、加熱条件によっては、段階を経て加熱を繰り返す必要のある場合があり得る。このような場合には、曲面形成途中段階の形状測定を行い、どの部分の形に不足があるかを調べる必要がある。一方で、成形不足の存在が分かっても、その不足を是正するために、どこにどれだけの面

内ひずみを追加すれば良いのかは、簡単にわからないのが現状である。

もしも、工程の途中段階までに導入された面内ひずみの分布を知ることができれば、目的形状と現形状との違いを修正するために加えるべき面内ひずみの決定が容易になると考えられる。しかし、成形途中の曲板に導入された面内ひずみ量を知る方法に関する研究はあまり成されていない。

そこで本研究では、碗形成時に生じた面内収縮の実測値と、計測した曲面形状に測地線を描いて推定した面内ひずみの推定値および曲板の形状をトーラス形状に近似した場合の面内ひずみの理論値を比較し、曲面形成に直接関係する面内ひずみの蓄積量分布が形状測定結果から導出できることを示す。

2. 実 験

2.1 試験片

本研究では、加熱冷却を利用して導入した面内ひずみとその推定法について検討することが目的であるため、面内ひずみ量と形状以外の因子は、冷却前後で変化しないことが望ましい。そこで、加熱前後で材質の変化が少ない材料として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。化学成分と主要な機械的性質を Table 1 に示す。

試験片の初期形状を Fig. 1 に示す。作成する曲面は、形状から面内ひずみが理論的に求めることが可能である碗形とした。碗形の加工では、初期の形状を部分円筒とし、板端部に加熱により面内ひずみが導入されることが多い。本

*受付日 平成20年10月22日 受理日 平成21年4月12日

**正 員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute of Technology

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of material used.

Component mass%	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	<0.08	<1.0	<2.0	<0.045	<0.03	8.0-10.5	18.0-20.0
Mechanical properties	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)				
	221	705	69				

YS : yield strength. TS: tensile strength. El: elongation

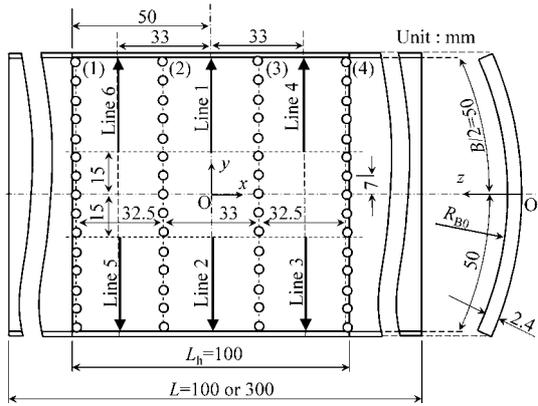


Fig. 1 Specimen size, heating direction and measuring points.

研究では、光学式座標測定機で試験片の形状などの測定が可能な大きさとして、板幅 $B=100$ mm、板厚 $h=2.4$ mm とした。初期曲率半径 R_{B0} と板長 L は、 $R_{B0}=100$ mm、 $L=300$ mm と $R_{B0}=400$ mm、 $L=100$ mm の 2 種類のものを用意した。初期曲率を与えるために行ったローラ加工の残留応力除去のため約 900°C で焼鈍した。

2.2 加熱

加熱は、Fig. 1 に示す Line 1 から Line 6 までの 6 カ所を番号順に、板幅方向に、内側から外側に向かって線状に加熱した。加熱は 48 mm ディフォーカスした YAG レーザで行い、試験片板幅 50 mm のうち 35 mm を加熱した。板端部で大きい入熱とするために、Fig. 2 に示すように、加熱線を 7 mm 間隔に 5 等分し、レーザトーチ移動速度を調整した。このときの加熱条件を Table 2 に示す。

板長 $L=300$ mm の試験片については、板長中央部 $L_h=100$ mm の範囲についてのみ、Fig. 1 に示す加熱を $L=100$ mm の試験片と同じ要領で行った。

2.3 収縮量および曲面形状の測定

収縮は、板長 (x) 方向と板幅 (y) 方向の 2 種類を測定した。Fig. 1 中のならんだ○は、収縮の測定用に設けた耐熱塗料の位置を示す。(1) から (4) までの 4 列あり、たとえば (1) 列と (2) 列の標点間距離 (32.5 mm) の加熱前後の変化からは、Line 5 と Line 6 による収縮量の測定が行える。裏面にも標点が設けてあり、表裏平均を収縮量とした。また、7 mm 間隔で 1 列に並んだ標点間距離の加熱前後の変化から、 y 方向の板の変位を測定した。距離の測定には、非接触三次元光学画像測定機を用い、2 回の測定が $1/100$ mm 以下の精度で再現した値を採用した。本装置は、標点の顕微鏡像の重

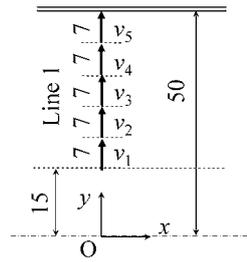


Fig. 2 Division of heating path into five parts with different travel speeds.

Table 2 Laser heating conditions.

P_{laser} (W)	a (mm)	d (mm)	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
			(mm/min)				
1500	4.7	+48	2104	1108	682	462	333

P_{laser} : heat input into the specimen,
 a : Gaussian radius of laser spot on the plate surface
 d : defocus length, v : travel speed

心を、テーブルの移動量と画像処理後の標点重心の画像位置から、 $1/1000$ mm の精度で測定できる。

なお標点間は曲面上に存在するが、板幅方向の標点間距離 7 mm と半径 100 mm の場合、円弧と弦の長さの差は約 0.002 mm、板長方向では標点距離 33 mm で半径が約 1000 mm であり誤差は約 0.002 mm となり、0.01 mm の精度の収縮量の実験値に与える影響はほとんどない。

加熱後の曲面表面の 3 次元形状は、板幅方向 (y 方向) に 4.9 mm 間隔で、板長方向 (x 方向) に 4.7 mm 間隔で座標を移動し、曲面までの z 座標を測定し曲面形状を計測した。この測定には、測定器のオートフォーカス機能を用い、試料表面を映し出した画像に焦点が合う位置の z 座標を自動的に探すことができる機能を利用した。

3. 実験結果

3.1 収縮量の測定結果

初期曲率半径 $R_{B0}=100$ 、板長 $L=300$ mm の試験片における収縮量 S の分布の測定結果を Fig. 3 に示す。縦軸は収縮量、横軸は板中央部からの y 方向表面長さ (ガス長さ) l_y である。図では、加熱位置が軸対称な位置にある Line 1 と Line 2、最も大きい値を示した Line 4 および最も小さい値を示した Line 5 をプロットしている。どの収縮も小さな差の範囲内に収まり、よく似た分布を示している。そこで、 $R_{B0}=100$ 、板長 $L=300$ mm の試験片と $R_{B0}=400$ 、板長 $L=100$ mm の試験片の、全加熱線 6 本の収縮の 1 本当たりの平均の分布を、Fig. 4 に示す。 $R_{B0}=400$ 、板長 $L=100$ mm 試験片の方がわずかに変化量の少ない傾向を示しているが、おおむねよく似た分布である。

3.2 変形後の曲率半径

Fig. 1 に示す y 方向に、4.9 mm 間隔で測定した曲面表面

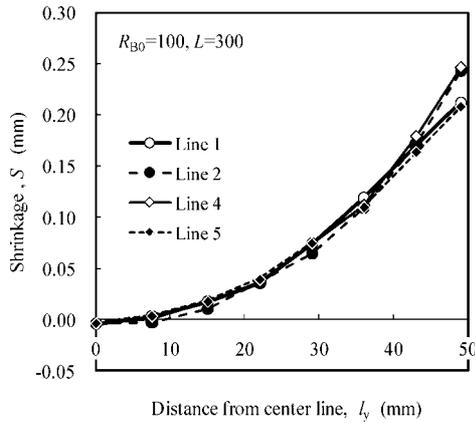


Fig. 3 Shrinkage distributions caused by Laser heating.

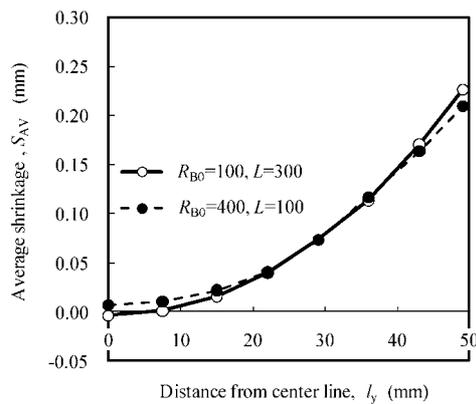


Fig. 4 Shrinkage distributions of specimens with different length.

座標の値から、最小二乗法で円の半径を求め R_B として Fig. 5 に示す。また、 x 方向に 4.7 mm 間隔で測定した結果より求めた半径を R_L として Fig. 5 に示す。○と△は、加熱前には曲率を持たない部分円筒の軸方向であるが、冷却後には湾曲していることがわかる。曲率半径の分布には変動が認められるが、それぞれの曲率の平均値を図中に数値で示す。この値は、加工後形状を単純なトーラスとみなした場合の面内ひずみの算定に用いた。

4. 考 察

4.1 曲面成形に伴う面内ひずみの推定

本研究では、平面から曲面を成形するとき加わる面内ひずみを次のように推定した。平板から球面を作成する場合を例にとり説明する。Fig. 6 (a) は、Fig. 6 (b) に示す弾性体の薄板を球の赤道を中心に貼り合わせた様子を示す。図 (b) に示す太い実線部 AB を最初に赤道に貼り合わせる。このとき、弾性板は球に弧 AB で接している。弾性薄板上の AB 間の道のりは変化しない。次に、弾性板の CD および EF を球に貼り合わせたとすると、球面上の DF 間の道のりと弾性板上の DF 間の距離が異なるため、図 (a) に示すようにタルミが生じることになる。貼り合わせた経路である CD および EF 間の長さは変化しないものとする。このタルミを

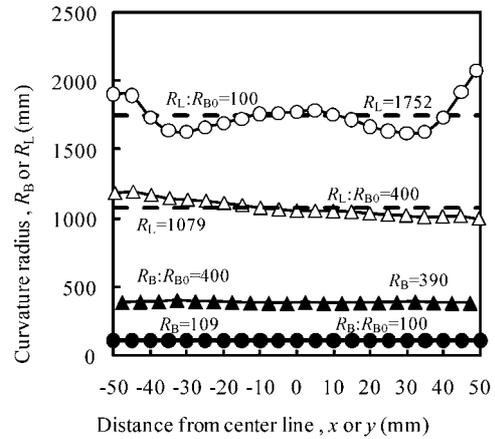


Fig. 5 Radius distributions along x and y axes.

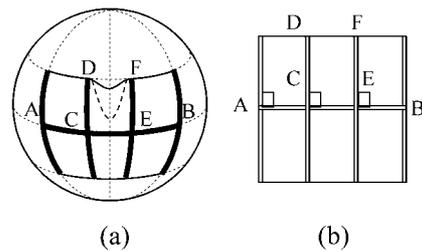


Fig. 6 Relation between geodesic line and in-plane strain.

無くせば、きれいな球面を作ることができる。従って、図 (b) のような弾性板を曲面に貼り合わせたとき生じるタルミを測定すれば、曲面と曲面中に含まれる面内ひずみを知ることができる。図 (a) が目的形状である場合には、計算された面内ひずみは加工に必要な面内ひずみ量となる。図 (a) が加工途中の形状であるならば途中まで導入されたひずみ量となる。図 (b) は、タルミを解消すべき場所が 6 か所あり、これは Fig. 1 に示した試験片によく似ている。

平面に描いた直線が曲面の接線となるように移動させたときの接点の軌跡は、幾何学でいう測地線である。従って、図 (b) のような直線を曲面上に測地線として描けば、線間の距離の変化から、面内ひずみを知ることができる。本研究では、実測した表面形状に以下の要領で測地線を描いた。

試験片の表面座標を、 xy 平面の格子点上の (x, y, z) のデータとして計測した後、格子点を用いて $x-y$ 面上に四角形要素を作り、 z を従属変数に持つ (x, y) 2次元のアイソパラメトリック 1 次要素として曲面を表現した。こうすることで、 (x, y) を与えると z を知ることができ、曲面を数式化できる。

Fig. 7 に、測地線の描き方を示す。幾何学では、測地線の加速度ベクトルは曲面に垂直であるとされる。従って、この性質を満たしながら、平面の接点を移動させる作業をコンピュータ内で行う。Fig. 7 (a) において、AB は、点 A, B で曲面と交わる微小な線分とする。点 C は、B を通る垂線 BC と曲面との交点である。このとき、三角形 ABC は、この三角形の内側に接点を持つ接面を代表していると考えられる。次に、線分 BC と同じ長さを持つ線分 BD が曲面と

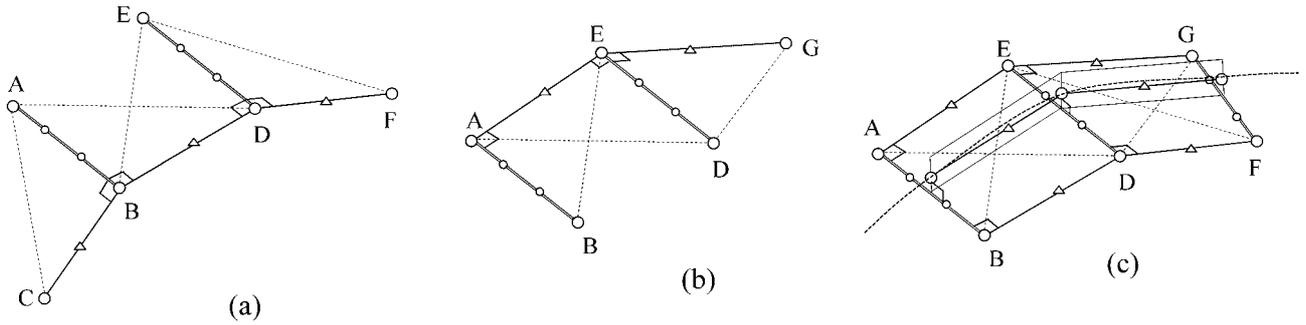


Fig. 7 Consecutive straight lines on a curved surface. (a) lines passing point B; (b) lines passing point A; (c) lines used in this report.

端点で交わる点をDとする。このとき、三角形ABDは、この三角形の内側に接点を持つ接面を代表していると考えられる。線分CBとBDを接線とみなすとき、この接線の加速度ベクトルは

$$\vec{BD} - \vec{CB}$$

で、このベクトルは三角形ACDに垂直であるから、接線CBDを含む接面に加速度ベクトルが垂直となり、離散的な測地線が得られたことになる。線分BDに垂直で線分ABと同じ長さの線分DEと曲面の交点をEとし、線分EDに垂直で線分BDと同じ長さの線分DFと曲面の交点Fを求め、同様の操作を順次繰り返すと、測地線が離散的に得られると考える。

一方、点CBDFは、ここで定義した接面の端の点になっている。Fig. 7 (b)には、線分ABのA点を起点にした場合の測地線を示す。この場合も測地線は、接面の端の点を通っている。

Fig. 7 (a), (b)より、1つの線分ABを起点にして、2つの測地線の候補が上がるのがわかる。また、これらは、線分ABの長さが零に収束するとき、一致する。

本研究では、測地線AEGとBDFの中間に位置し、かつ、線分ABの長さが零に収束するとき、測地線AEGとBDFに一致する測地線を、Fig. 7 (c)のようにして求めた。図中ABは曲面上の点で、点DはFig. 7 (a)と同じ方法で求める。E点はFig. 7 (b)に示す方法で、点Aを起点に求める。線分ABに中点で垂直に交わる平面と曲面の交線を考える。この交線を直線に近似したものが、求める測地線となる。本研究では、線分AEやBDと同じ長さをもつ線分で交線をつないだ。

本方法で求めた面内ひずみは、トーラス形状に関しては、理論値と同じ値が得られることを、 $R_L=300, R_B=100$ の碗形で確認した図をFig. 8に示す。主曲率が R_B と R_L のトーラス上の碗形（ドーナツ形状の最大径を中心とした凸部）の場合、ひずみ ϵ は式(1)で示される。

$$\epsilon = -\frac{R_B}{R_L} \left(1 - \cos\left(\frac{l_y}{R_B}\right) \right) \dots\dots\dots(1)$$

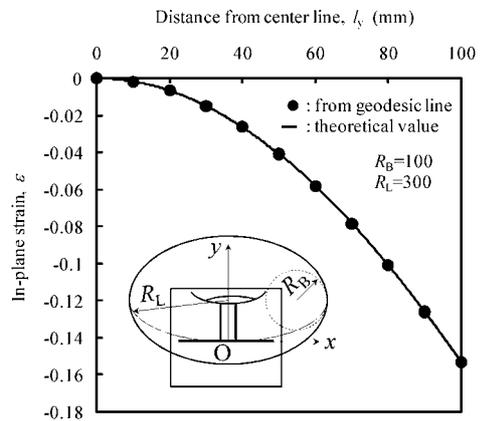


Fig. 8 Comparison between in-plane strain from geodesic line and theoretical equation.

4.2 測地線により求めた面内ひずみについて

実測した曲面上に測地線を描き、間隔の変化率を面内ひずみとして表わした分布□と、標点間距離の変化率●を比較した図をFig. 9 (a), (b)に示す。本研究では、 $-50 < x < 50$ の範囲に、 $y > 0$ と $y < 0$ のそれぞれの範囲に16本の測地線を4.125 mm 間隔に描き、面内ひずみを求めた。図中の○は、トーラス形状に近似した場合に幾何学的に求められるひずみの分布である。

図 (a) は $R_{B0}=100, L=400$ の場合で、 $R_{B0}=400, L=100$ の図 (b) よりも、3本の曲線が近い値を示している。図 (b) では、測地線による値□と幾何学的に求めた値○は近い値を示しているが、標点間距離の変化率は約2倍大きい圧縮ひずみを示している。このことは、標点間距離の変化率が大きくても、実態の変形 (○) はそれを反映していないということで、逆に、測地線による方法は実態の形状変化を反映しているといえる。測地線法では、幾何学的な理論解が求められない曲面形状の場合でも、表面形状が分かれば面内ひずみを求めることができるので、現実の複雑な曲面の面内ひずみの推定に有効と考えられる。

4.3 板幅方向の変位について

Fig. 10 (a) に、Fig. 1 中の Line 1 と Line 2 のみに加熱した場合の変形を模式的に示す。矩形の試験片中に示す円形部

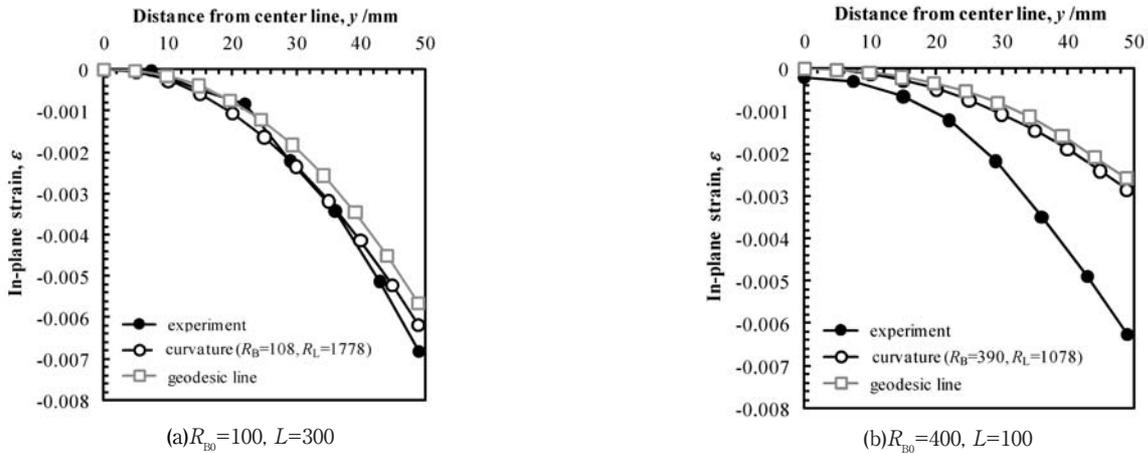


Fig. 9 Comparison of in-plane strains

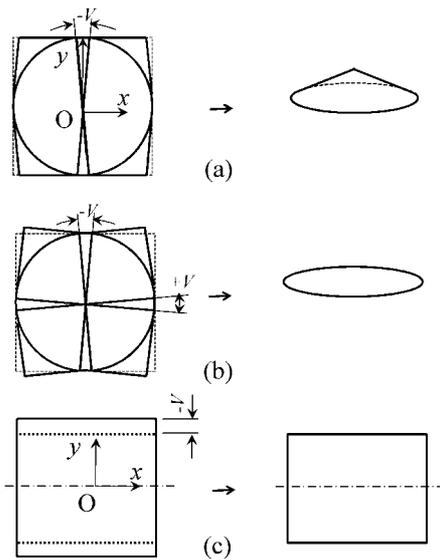


Fig. 10 Schematic diagram of forming curved surface, (a) with gaps of $-V$; (b) with gaps channeled each other; (c) with uniform shrinkage.

分に注目すると、 y 方向に分布した x 方向の収縮の食違い ($-V$) が生じたことで平面から曲面が形成されることが定性的に理解できる。一方、Fig. 10 (b) に示すように、図 (a) の食違いと直角方向に伸びの食違い ($+V$) が同時に生じると、2つの食違いが打ち消しあって曲面は形成されない。このとき、 x 方向に分布した y 方向の食違いは、板幅の変化として計測できる可能性がある。また、Fig. 10 (c) に示すように、板幅の変位が一定値の場合、平板のまま幅のみが変化し、曲面形成に寄与しないことが定性的に理解できる。

そこで、Fig. 1 に示す (3)、(4) 列の標点の y 方向変位の測定結果を Fig. 11 に示す。△と▲で示す $L=300$ の板長の長い試験片では、異なる 2 か所の変位がよく似た値を示している。横軸 $l_y=50$ の位置での変位は、板の半幅の変化を意味するから、板幅の変化が場所によらず均等であることを示している。○と●で示す $L=100$ の試験片では、 x 方向板端部で伸び、板中央部で圧縮の変位であることがわかる。これらの幅の変化を模式的に表して、Fig. 12 に示す。図 (a) に

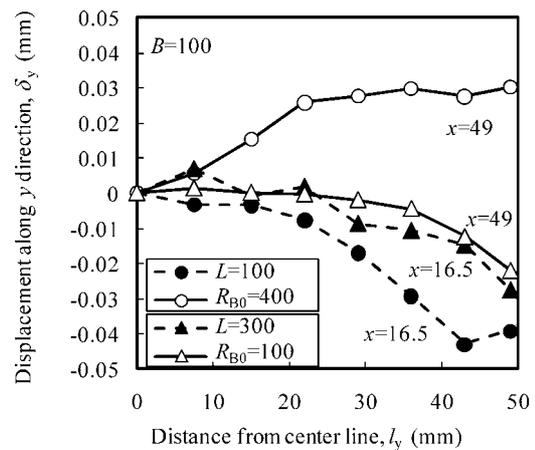


Fig. 11 Displacements along $x=16.5$ and 49 mm lines.

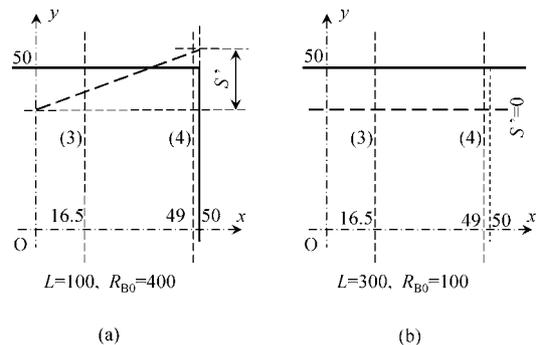


Fig. 12 Schematic diagram of width change, (a) $L=100, R_{B0}=400$; (b) $L=300, R_{B0}=100$.

示す $L=100$ 試験片では、板幅の変化が生じ、(b) の $L=300$ 試験片では生じていない。(a) の場合には、板中心から板端までの幅の変化が、Fig. 10 (b) に示す正の食違いに関係すると考え、Fig. 12 (a) の S' を求めた図を Fig. 13 に示す。横軸 $x=16.5$ と $x=49$ の 2 か所の変位を縦軸に示し、単純に直線で $x=0$ での変位を外挿した。図より S' は、 $L=300$ 試験片の場合 0.01 mm、 $L=100$ 試験片の場合 0.11 mm である。これらは、1 辺が 50 mm についてであるから、面内ひずみに換算すると 0.0002 と 0.0022 に相当する。Fig. 9 で、差の大きかった図 (b) に、 0.0022 の範囲を示して、Fig. 14 に示す。標点間

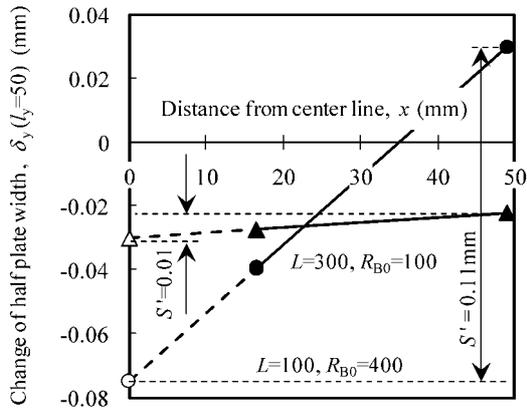


Fig. 13 Estimation of effective shrinkage S' .

距離の変化から求めた収縮ひずみと曲面形状測定から求めた面内ひずみの間の差を説明する有力な候補であることがわかる。

したがって、測地線から求めた面内ひずみは、直接変形に有効な面内ひずみの値を推定するのに適した方法であると言える。

5. 結 言

本研究では、面内ひずみを用いた薄板の曲面形成技術を対象に、加工途中の製品中に含まれる、曲面成形に有効な面内ひずみの推定法を検討した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) レーザフォーミングで作成した曲面の形状を計測し、これを数式化した形状に測地線を描き、測地線間隔の変化率を求めることで、面内ひずみを算出した。
- 2) 測地線により求めた面内ひずみと、曲面をトーラス形状に近似した場合の理論値は比較的良好に一致した。
- 3) 標点間距離の変化率から求めた面内ひずみと測地線から求めた面内ひずみは、軸長の長い試験片の場合にはよく一致したが、長さが短い試験片では一致しなかった。
- 4) 板幅の変化を調べたところ、軸長が長い試験片では軸方向の場所に関係なくおおむね同じ割合で小さくなっていたが、短い試験片では、軸方向端部ほど板幅が広がっていた。
- 5) 板軸長方向の収縮に加え、板幅方向の伸びを合わせた面内ひずみを考えるとき、標点間距離の変化から算出した面内ひずみと測地線による面内ひずみはおおむね一致した。従って、測地線による面内ひずみの推定は、曲面形

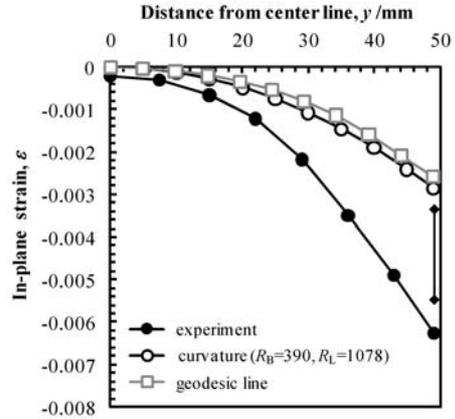


Fig. 14 Effect of width change on estimated in-plane strain.

成に有効に利用されている面内ひずみを計測できる手段になる。

謝 辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B））を得て遂行された。ここに記して謝辞を表す。

参 考 文 献

- 1) T. Nomoto, T. Ohmori, T. Sutoh, M. Enosawa, K. Aoyama and M. Saitoh: Development of Simulator for Plate Bending by Line-Heating, Journal of the Society of Naval Architects of Japan 168 (2002) 527-535. (in Japanese)
- 2) T. Nomoto, M. Ohtsuka and T. Yokoyama: Fundamental study on the bending work using multiple-piston-pressing method for outside plate of ship, Journal of the Society of Naval Architects of Japan 170 (1991) 589-597. (in Japanese)
- 3) M. Kutsuna, K. Itoh and T. Nakamura: Reprints of the National Meeting of J.W.S. 67 (2000) 329-39. (in Japanese)
- 4) H. Yoshioka, T. Akiyama and T. Terasaki: Reprints of the National Meeting of J.W.S. 81 (2007) 58-59. (in Japanese)
- 5) M. Fuchigami, T. Akiyama and T. Terasaki: Reprints of the National Meeting of J.W.S. 81 (2007) 56-57. (in Japanese)
- 6) T. Terasaki and K. Yamaguchi: Reprints of the National Meeting of J.W.S. 71 (2002) 390-391. (in Japanese)
- 7) T. Terasaki, M. Mizukami, M. Nakatani and M. Ohsawa: Effect of line heating factor on transverse shrinkage generated by triangle heating, Journal of the Society of Naval Architects of Japan 193 (2003) 75-83. (in Japanese)
- 8) Y. Tomita, K. Hashimoto, N. Osawa, Y. Fukuda and Y. Kozuki: Studied on the Expert System of Bending Work Using Line Heating, Journal of the Kansai Society of Naval Architects of Japan 224 (1995) 121-130. (in Japanese)