碗形レーザフォーミングの収縮量に及ぼす板長と初期曲率半径の影響*

秋山 哲也**, 篠原 統紀***, 牧野 隼人***, 寺崎 俊夫**

Effect of Plate Length and Initial Curvature on Shrinkage in Laser Formed Bowl Plate*

by AKIYAMA Tetsuya**, SHINOHARA Tohki***, MAKINO Hayato*** and TERASAKI Toshio**

In the previous reports, one of the authors showed that a long specimen's in-plane strain geodetically estimated from the final shape after laser forming has sufficient agreement with the in-plane strain measured from a distance change of landmarks.

For short specimens, these two type in-plane strains are not compatible because of the in-plane strain parallel to laser heating line.

To form bowl shape thin plate by laser forming, accurate in-plane strain should be introduced into the plate. So, both parallel and perpendicular in-plane strains should be presented accurately for objects in various size and shape.

In this report, effects of both specimen length and initial curvature on in-plane strains in two directions, parallel and perpendicular, are investigated experimentally.

Key Words: Laser forming, Bowl shape, Thin plate, Two direction, In-plane strain, Initial curvature, Plate length

1. 緒 言

板材に面内ひずみを与えて曲面を形成するという点で、造船現場での線状加熱¹⁾やプレス²⁾、新幹線先頭車両の板金などと共通点を持つレーザフォーミング³⁻⁷⁾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。

前報^{9, 10)}で著者らは、板長の長い試験片の碗形レーザフォーミングでは、加熱部の収縮量から見積もられる面内ひずみ量と、結果的に現れた形状から幾何学的に逆算される面内ひずみ量が概ね一致することを示した。板長が短い試験片ではこれらの値は一致せず、これは加熱部の収縮方向に対し垂直な方向（縦方向）の伸びの面内ひずみが原因で変形量が小さくなることが分かった。

レーザフォーミングを用いて目的の形状を作るためには、横方向のひずみと縦方向のひずみが幾らに成るかなど、与えたひずみがどこにどれだけ使われるのか、またその使われ方に対し板長や初期形状はどのような影響を与えるのかを我々研究者が十分理解しておく必要がある。そのためには、原因因子を抽出したモデルを用いて考えることが大事である。

本研究では、このようなモデルの構成に先立ち、モデル

に組み込むべき重要な因子は何であるのか、またどのような性質を組み込む必要が有るのかを調べた。具体的には、板幅方向の加熱線に対し垂直（板長）方向の見かけの収縮と板幅方向の見かけの収縮に及ぼす試験片の板長、初期曲率半径の影響について調べた。

2. 実 験

2.1 試験片

試験片には、前報^{9, 10)}と同じ市販のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用いた。降伏応力は 221 MPa, 引張強さ 705 MPa, 伸び 69% である。化学成分の詳細は、前報^{9, 10)}に掲載の通りである。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を理論的に求めることが可能である碗形とし、初期の形状は部分円筒である。光

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

*受付日 平成21年9月24日 受理日 平成22年1月18日

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

***学生員 九州工業大学大学院 Student Member, Graduated student, Kyushu Institute of Technology

Table 1 Experimental conditions and results.

Specimen type ; length L and curvature R_{B0}	$L=300\text{mm}$					
	$R_{B0}=100 (n=1)$		$R_{B0}=400 (n=2)$		$R_{B0}=800 (n=1)$	
Type of curvature radius	R_B	R_L	R_B	R_L	R_B	R_L
Initial (mm)	110	21000	403	31627	840	24022
After laser forming (mm)	109	1752	358	887	571	826
$\varepsilon_Q(49)$	-0.0063		-0.0038		-0.0025	
$\varepsilon_S(49)$	-0.0065		-0.0039		-0.0025	
$\varepsilon_Q(49)/\varepsilon_S(49)$	97%		97%		100%	

Specimen type ; length L and curvature R_{B0}	$L=100\text{mm}$					
	100 ($n=1$)		400 ($n=1$)		800 ($n=2$)	
Type of curvature radius	R_B	R_L	R_B	R_L	R_B	R_L
Initial (mm)	100	18710	424	600911	705	31493
After laser forming (mm)	97	2646	387	1144	592	1320
$\varepsilon_Q(49)$	-0.0048		-0.0027		-0.0015	
$\varepsilon_S(49)$	-0.0065		-0.0061		-0.0051	
$\varepsilon_Q(49)/\varepsilon_S(49)$	74%		44%		29%	
$\varepsilon_V(49)$	0.0013 (0.0010)		0.0022 (0.0017)		0.0031 (0.0023)	
$\{\varepsilon_Q(49)-\varepsilon_V(49)\}/\varepsilon_S(49)$	94 (89) %		80 (72) %		90 (75) %	

R_B : curvature radius along width direction, R_L : curvature radius along longitudinal direction,

ε_Q : total strain needed to build bowl shape with R_B and R_L ,

ε : strain measured along longitudinal direction,

ε_V : strain along width direction,

$\varepsilon(49)$: strain at $l_y = 49\text{mm}$, $\varepsilon(0)$: strain at $l_y = 0\text{mm}$, $\varepsilon_S(49) = \varepsilon(49) - \varepsilon(0)$.

Fig. 2 Heating path.

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 $B=100\text{mm}$ 、板厚 $h=2.4\text{mm}$ とした。Table 1 の Specimen type の行に、試験片の初期形状を示す。上段の表は板長 L が $L=300\text{mm}$ と長い試験片、下段の表は L が $L=100\text{mm}$ と短い試験片の条件である。 n は繰返し数を示す。初期曲率半径 R_{B0} は、 $R_{B0}=100\text{mm}$ 、 400mm 、 800mm の 3 種類を用意した。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、 $L=100\text{mm}$ の試験片に対しては、Fig. 1 に示す Line 1 から Line 6 までの 6 ヶ所を番号順に、板幅方向に、

Table 2 Laser heating condition.

P_{laser} (W)	a (mm)	d (mm)	v_1	v_2	v_3 (mm/min)	v_4	v_5
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

内側から外側に向かって線状に加熱した。加熱は 48mm デイフォーカスした YAG レーザで行い、試験片半幅 50mm のうち 35mm 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 7mm 間隔に 5 等分し、レーザー Torch 移動速度を調整した。このときの加熱条件を Table 2 に示す。この加熱条件は、線上加熱の収縮に及ぼす加熱条件の影響を検討⁷⁾後、碗形成形を実際に行っている参考文献 6 の加熱条件を採用したものである。

板長 $L=300\text{mm}$ の試験片については、初期曲率半径 $R_{B0}=100\text{mm}$ の試験片に対し板長中央部 $L_h=100\text{mm}$ の範囲についてのみ Fig. 1 に示す加熱を $L=100\text{mm}$ の試験片と同じ要領で行った。 $R_{B0}=400\text{mm}$ と $R_{B0}=800\text{mm}$ については、板長 300mm の全範囲に加熱を行った。このとき、板長方向に $L_h=100\text{mm}$ の範囲を 3 区画設け、中央部の Line 1 を加熱後、左右の区画の Line 1 をそれぞれ加熱し、この操作を Line 6 まで繰り返した。この場合、加熱部は全部で 18 ヶ所となる。

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ことは、前報^{9, 10)}と同じである。

加熱後の曲面の2つの主曲率半径は、Fig. 1 の中央部 $L_0=100$ mm の範囲について、中央と両端部の3点の座標から求めた。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。Table 1 のInitialの行に、レーザ加熱前の板幅方向曲率半径 R_B と板

Fig. 3 Schematic diagram of forming curved surface.

長方向曲率半径 R_L を示す。After laser forming 行に、加熱後の曲率半径を示す。

3. 結果と考察

3.1 板幅の変化

3.1.1 板幅の変化測定の必要性

Fig. 3 (a) は、Fig. 1 の中央部幅100 mm の範囲を模式的に示している。図中の食違い $-V$ は Fig. 1 の Line 1 の見かけの収縮を表現している。このとき平板は図に示すように凸面を示すと推察される。さらに Fig. 3 (b) に示すように、板幅方向の伸び $+V$ が同時に発生していたならば、凸面は形成されない。また、板幅方向に変位が認められても、Fig. 3 (c) に示すような均一な変形であるならば、曲面の形成には寄与しない。

以上の観点から、板幅方向の変形を調べておく必要がある。

3.1.2 板幅の変化に及ぼす初期曲率半径の影響

Fig. 4 は、加熱前後の、試験片の幅の変化を x 軸方向に沿って調べた結果である。幅は、Fig. 1 に示す縦に並んだ標点間の距離を合計して求めた。変化量には、表面と裏面の平均値を採用し、曲げの影響が入り難いようにした。図は板長の中心から端までの幅の変化を示している。いずれの条件でも、板中央に圧縮が発生している。板長が100 mm の試験片について注目すると、測定点が2点しかないため変化の分布を知ることはできないが、初期曲率半径が大きいほど変化が大きく、板端部に近づくほど伸びを生じている。長い試験片でも、板端部では幅の広がりを見せている。板幅の変化に及ぼす初期曲率半径の影響は、板長方向に沿う曲率の曲がり易さを用いて、定性的に理解できる。本実験のように板幅が同じで曲率半径が異なる試験片に同じ大きさの板長方向の固有ひずみを与えた場合、曲率半径が小さいほど加熱位置の重心と板断面の図芯の距離が大きく、曲がりやすい¹¹⁾。変形しやすい場合には、変形に逆に働くひずみの発生量は小さい。

Fig. 4 Displacement distribution along x direction.

3.1.3 板幅の変化に及ぼす板長の影響

長い試験片では、中央から板長の2/3以上の範囲ではほぼ一定値の収縮を示している。 $R_{B0}=800$ の試験片でも、2/3以上の範囲ではほぼ一定値の収縮を示す点で共通の結果を示した。サンパナの原理が現れている。拘束の小さい自由端近傍のみに変形が現れている。力学モデルを構築する際には、板幅方向のひずみ分布に及ぼす板長の影響を組み込む必要が有る。

3.1.4 曲面形成に寄与する板幅方向のひずみ

前報^{9, 10)}では、板幅の変化から見積もられる板幅方向の面内ひずみを算出した。本研究の長い試験片では、板長の多くの範囲で幅が一定値とみなせるので、曲面形成に寄与する板幅方向の面内ひずみは無いものとして取扱った。

短い試験片については、Fig. 3 (b) に示した効果が予想される。幾何学では、主曲率が R_B と R_L のトーラス上の楕円の場合、ひずみ ε は式(1)で示される。

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

さらに、余弦に2次までのテーラー展開を当てはめて収縮量を表すと

$$\varepsilon = \frac{l_y^2}{2R_B R_L} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(2)となり、収縮は近似的に距離の2乗に比例する。

板幅方向の伸びが生じて、最終的な形状が正確なトーラスの一部とみなせる形状を保つならば、見掛けの収縮は2次関数に成るはずで、その1部を受け持つ板幅方向の伸びも2次関数となる可能性が高い。この場合、幅の変形は ax^2+b で近似できるはずで、実験点を通る2次曲線をFig. 4中に示す。一方、本研究の測定点数は2のため、分布形状までは検討できない。そこで、前報^{9, 10)}と同様に直線近似した場合と2次関数に近似した場合の $l_y=49$ mmの位置での縦方向の面内ひずみ量を $\varepsilon_{s(49)}$ としてTable 1に併記した。括弧内の値が、2次近似した場合の値である。

3.2 加熱部の板長方向の収縮量

3.2.1 板長の影響

Fig. 5に、板長(加熱線垂直)方向の収縮量の測定結果の1例を示す。縦軸は板長方向の見かけのひずみである。これは、Line 1からLine 6を挟む標点間距離の変化から算出した6つの板長方向ひずみの平均値 ε である。図中の細い実線、破線、一点鎖線は、それぞれのプロットを、頂点を $l_y=0$ 軸上に持つ2次式($S=a l_y^2+b$)で近似した曲線である。どの条件も、うまく2次式で近似できている。これは、トーラスを作成するために必要な収縮量の理論値が2次式で近似できることを考えると、トーラスの作成に適した収縮

分布が現れているものと推察される。Fig. 5中の●印の $R_{B0}=800, L_L=100$ と○印の $R_{B0}=800, L_L=300$ を比較すると、○印の方が試験片中心部($l_y=0$)で収縮が大きく、板端部(実測点は $l_y=49$)で小さくなっている。その結果、○の方が収縮量の変化量は小さくなっている。

すなわち、板長の増加で、板長方向収縮量の変化は小さくなると言える。

これは、以下のように定性的に理解できる。まず、長い試験片の場合、端部から遠い中央部では試験片自身の拘束により、板幅方向のひずみ変化が生じにくい。何らかの原因で十分な変形が阻害された場合、結果として変形に見合う見かけの面内ひずみは小さく修正される。短い試験片では板幅方向のひずみが生じうるが、長い試験片では板長方向の見かけのひずみのみで対応しなくてはならない。このため、長い試験片の板長方向ひずみの方が小さくなると考えられる。変形を阻害する力としては、曲面の曲げ変形に伴う曲げ応力の発生などが考えられる。

3.2.2 初期曲率半径の影響

Fig. 5中の■印の $R_{B0}=100, L_L=100$ と●印の $R_{B0}=800, L_L=100$ の分布を比較する。初期曲率半径の大きい●の方が、試験片中心部($l_y=0$)で収縮が大きく、板端部(実測点は $l_y=49$)で小さくなっている。その結果、●の方が収縮量の変化量は小さくなっている。この変化量の $l_y=49$ での値を、 $\varepsilon_{s(49)}$ としてまとめてTable 1に示す。初期曲率半径の増加で、板長方向収縮量の変化は小さくなる。この傾向は、板長が長い方が顕著である。これは、曲率半径が小さいほど加熱位置の重心と板断面の図芯の距離が大きく、曲がりやすい¹¹⁾。曲がり易いほど十分な変形が達成され、結果的に見かけのひずみは大きくなる。またこの傾向は、長い試験片の方が板長方向のひずみに直接現れやすい。

3.2.3 収縮分布の変化と平均値の関係

Fig. 5中の太い実線は、○印の $R_{B0}=800, L_L=300$ をシフトして、 $l_y=0$ の位置で●印の $R_{B0}=800, L_L=100$ とそろえた曲線

Fig. 5 Shrinkage distribution along y direction.

である．図中の $\Delta \varepsilon_{\text{Max}}$ は， $R_{B0}=800$ ， $L_L=300$ と $R_{B0}=800$ ， $L_L=100$ の $l_y=0$ から端部間での収縮量 ε の変化量の差である．また，図中 $\Delta \varepsilon_{\text{Base}}$ は，○印のシフト量である．今回の実験結果のすべての組合せにおける $\Delta \varepsilon_{\text{Max}}$ と $\Delta \varepsilon_{\text{Base}}$ の関係を Fig. 6 に示す．概ね， $\Delta \varepsilon_{\text{Base}}=\Delta \varepsilon_{\text{Max}}/3$ の直線で整理できている．これは，Fig. 6 中の模式図に示すように， $f=ax^2$ の2次式の原点から任意点までの平均値と最大値の関係と同じである．この関係を Fig. 5 の○と●の場合で説明すると以下のようになる．細い実線の分布に引張の力の分布を加え，太い実線の分布を作る．加えた力をキャンセルするために，加えた合力に釣合う力を反対向きに均一な分布として作用させる．このような操作で収縮分布の変化が決まっているならば，2次曲線の性質から，全幅（50mm）の $1/\sqrt{3}$ の位置（ l_y が約29mm）は，不動の点となる．Fig. 5 および後掲の Fig. 7 中の各曲線は，概ねこの関係を満たしている．

板長方向の合力が零でかつ試験片を変形させる力としては，板曲げに伴うモーメントを候補に挙げることができる．

3.3 変形後の曲率半径

3.3.1 曲率半径の測定結果

板幅方向の曲率半径の測定結果を R_B ，板長方向の曲率半径の測定結果を R_L として Table 1 に示す．長い試験片で初期曲率半径 $R_{B0}=100$ mm のものでは試験片数が1，加熱前の板幅方向半径が110 mm，板長方向の半径が21000 mm であること，レーザフォーミング後には，板幅方向半径が109 mm，板長方向の半径が1752 mm に成っていたことを示す．加熱前の板長方向の半径21000 mm は，部分円筒形の板長方向の曲率半径の測定結果である．短い試験片で初期曲率半径 $R_{B0}=100$ mm のものでは，試験片数が1，加熱前の板幅方向半径が100 mm，板長方向の半径が18710 mm であること，レーザフォーミング後には，板幅方向半径が97 mm，板長方向の半径が2646 mm に成っていたことが分

かる．短い試験片の板長方向は，長い試験片に比べ半径が大きく，長い試験片に比べ変形量が小さいことがわかる． $R_{B0}=400$ と $R_{B0}=800$ においては，板幅方向，板長方向ともに，短い試験片の変形が小さい．

3.3.2 変形結果を得るため必要な収縮量の推定値

主曲率半径が R_B と R_L のトーラス上の楕円（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．

Table 1 に示す加熱後の曲率半径 R_B ， R_L のトーラスを幾何学的に作るために必要な面内ひずみの理論値を表中に ε_Q (49) として示す．実験値と比較しやすいように $l_y=49$ mm の位置の値として表している．

初期曲率半径が大きい試験片の方が， $\varepsilon_Q(49)$ の値が小さい．これは，曲率半径が小さいほど加熱位置の重心と板断面の図芯の距離が大きく曲がりやすい¹⁰⁾ことが変形にも現れていると考えられる．また，短い試験片の方が $\varepsilon_Q(49)$ が小さい．すなわち，短い方が変形し難い．言い換えると，初期曲率半径が大きいほど，板長が短いほど，変形量が小さく変形し難くなっている．

3.4 曲面形成に寄与する面内ひずみの構成

板長が長く，板幅方向のひずみの影響が無視できる場合には，成形結果は板長方向の面内ひずみの効果のみで説明できるはずである．Fig. 7 は，板長が長い試験片について，実測した板長方向ひずみと，成形結果から幾何学的に求められるひずみ ε_Q を比較して示している．ひずみの実測値の変化量と ε_Q は良く一致している．

板長が短い場合には板幅方向に ε_v の発生が見られるため，Table 1 に示すように， ε_s と ε_Q には大きな差がある．Fig. 3 (b) に示す $-V$ の働きを ε_s （負）が， $+V$ の働きを ε_v （正）が受け持っていると定量的に考えてよいならば，最終形状から見積もられる面内ひずみ ε_Q から ε_v を差し引いた

Fig. 6 Relationship between maximum change of shrinkage and shift of shrinkage..

Fig. 7 Comparison between measured shrinkage and estimated shrinkage for long specimens.

値と ε_s はよく一致するはずである。Table 1の最下段に割合を示す。 ε_v を考慮しない $\varepsilon_Q/\varepsilon_s$ よりも高い割合で説明できている。

これは、2方向のひずみを考慮すべきであることを示しているものの、今回測定した板幅方向ひずみの単純な足し算で表現できないことを示しているものと思われる。

以上より、レーザフォーミングの変形を検討するための数学モデルでは、①加熱で導入した板長方向のひずみにより誘発される板幅方向のひずみを板長の関数として取扱えることが必要であること、また、②初期曲率半径が大きくなるほどひずみの変化幅 $\Delta\varepsilon_s$ が小さくなるモデルであること、③板長方向のひずみと板幅方向のひずみの両方を考慮したひずみで変形が決まるモデルであること、④変形を抑制する働きとして曲げに伴うモーメントを要素に持つことが挙げられる。

4. 結 言

板厚、板幅、入熱条件を一定にし、碗形成形の場合の収縮量分布に及ぼす板長および初期曲率半径の影響を調べた。得られた結論を、レーザフォーミングの数学モデル構築の観点から以下に述べる。

1. 板幅方向の見かけのひずみは、試験片が長い程また初期曲率半径が小さいほど、変化の幅は小さい。
2. 板長方向の見かけのひずみは、試験片が長い程また初期曲率半径が大きいほど、変化の幅は小さい。
3. 初期曲率半径や板長の影響を受けて板長方向の見かけのひずみの分布形状が変化する場合、その平均値はほとんど変化せず、また分布の形は1次の項を持たない2次関数ではほぼ近似できた。
4. 変形後の形状から幾何学的に求められる面内ひずみ量の推定値は、初期曲率半径が大きい程また試験片が短い程小さい。
5. レーザフォーミングの数学モデルでは、板長方向と板幅

方向の両方を見かけのひずみが考慮され、これらに板長及び初期曲率半径が影響を及ぼすことのできるモデルが必要である。また、ひずみ分布が変化する場合、その主たる原因はモーメントと関連付けられる必要が有る。

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)
- 9) T. Akiyama, T. Terasaki, T. Kitamura: Estimation of In-Plane Strain in Laser Formed Bowl Plate, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 27 (2009) 139-144. (in Japanese)
- 10) T. Akiyama, T. Terasaki: Estimation of In-Plane Strain in Laser Forming, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 27 (2009) 225s-230s.
- 11) T. Akiyama, Y. Kakuho, T. Terasaki, T. Kitamura: Effect of Initial Curvature on Shrinkage in Laser Heating on Saddle Curved Thin Plate, Quarterly Journal of The Japan Welding Society 27 (2009) 61-66. (in Japanese)