線状加熱加工で用いる横収縮と角変形に関する研究

正員 寺 崎 俊 夫* 山 口 寛 一**
正員 野 本 敏 治*** 北 村 貴 典*

Study on Transverse Shrinkage and Angular Distortion Generated by Line Heating

by Member, Toshio Terasaki Kanichi Yamaguchi
Member, Toshiharu Nomoto Takanori Kitamura

Summary

The transverse shrinkage and angular distortion of line heating have been studied using a theory of torus model and experiments of laser forming. The similarity law was applied for changing from several meters scale of the forming plate in the field to several millimeters scale of specimen. The experiments of laser forming were done under conditions of changing width, thickness, radius of width of plate, line heating length and travel speed. The following results were derived: (1) The radius of width does not almost affect the angular distortion. (2) The conditions of triangle heating are given by both the heating length being above 0.35 times as long as the plate width and the change of travel speed being above three times. (3) The radius of plate width does not affect the transverse shrinkage. (4) The equation of heat input for obtaining the planned transverse shrinkage was proposed.

1. 緒言

線状加熱加工により板を曲げるぎょう鉄作業は熟練技能者の知識（ナレッジ）により成り立っており、技能者のナレッジは技術的に十分に解明されていない分野である。技能者のナレッジは技能伝承されて、ぎょう鉄作業は成り立っている。しかし、熟練技能者の高齢化により、技能伝承の危機が叫ばれ、ぎょう鉄作業を自動化するシステムの研究が盛んに行われてきた¹⁾⁴⁾。線状加熱加工に関する基礎研究は古くからなされていたが⁵⁾¹⁰⁾、技能者のナレッジに注目した基礎研究はほとんど見あたらない。この原因として、板曲げ加工寸法が2m以上であり、研究室で実験できる寸法でなかったこと、線状加熱加工により生じる横収縮や角変形を計測する計測装置が発達していなかったことなどが考えられる。

著者の一人は溶接変形に存在する相似則を明らかにし、横収縮と角変形の整理に成功している¹¹⁾。相似則を使用すると2mの板寸法を相似で小さくして、100mm程度に小さくできるため実験室寸法となり、横収縮や角変形の計測が容易になる。しかも、レーザ変位計の登場に

より計測精度が1/1000mmのオーダーまで向上した。また、現在ではヤグレーザ熱源が使用できるため、線状加熱熱源の熱量を相似で小さくした熱源としてレーザを利用でき、しかも熱源の自動制御が容易である。以上より、研究室で線状加熱加工の基礎研究としてレーザを利用した板曲げ加工（レーザフォーミングと呼ばれている）の研究が行えるようになった。

本研究では最初にぎょう鉄作業者のナレッジを調査し、技能者が使用している折れ（角変形のこと）と絞り（横収縮のこと）の使用状況を把握した。次に、角変形および横収縮に及ぼす線状加熱加工因子を抽出して、線状加熱加工に及ぼす因子の影響をレーザフォーミングにより検討した。

2. 線状加熱加工のナレッジ

造船会社4社のぎょう鉄作業を見学した結果として、熟練工は折れ（角変形）と絞り（横収縮）を使い分けている。ベテランになると折れと絞りを同時に与える熱加工をしているらしい¹²⁾。そこで、技能工のナレッジを調査するために、A社で板幅1000mm、板長さ2000mm、板厚14mmの平板を板幅方向の曲率半径（ R_B とする）2000mmにローラ曲げ加工した後、板長さ方向の曲率半径（ R_L とする）を4000mmにする楕形のぎょう鉄作業を行った。線状加熱加工の要点を整理した図をFig.1に示す。図に示しているように技能工のナレッジは次のよう

* 九州工業大学工学部物質工学科

** 九州工業大学工学研究科学生

*** 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

Fig.1 Specimen and line heating method

にまとめらる。

- (1) 折れ（角変形）は一定速度での線状加熱
- (2) 絞り（横収縮）は加熱速度を変化させた三角焼きの線状加熱

なお、鞍形にぎょう鉄を行うときの絞り（横収縮）は板幅端部近傍は加熱速度が速く、板幅中央で遅い焼き方で、焼線の跡がダイヤモンドの形になるダイヤモンド焼き、あるいは一定速度で焼くとのことであった。

以上の熟練工の技能調査より、線状加熱加工の基礎研究として、次の2点が挙げられる。

- (1) 角変形に関する実験は一定速度での線状加熱加工で行い、入熱や曲率半径などの要因を検討する。
- (2) 横収縮に関する実験は速度変化の三角焼きで行い、加熱速度や曲率半径などの要因を検討する。

3. 角変形（折れ）

3. 1 実験

線状加熱加工ではFig.1に一例を示すようにフレーム曲りと振れを板に与えるときに角変形を使用する。従って、角変形を与える板は一般に曲面板になっている。そこで、Fig.2(a)に示すように、板幅 B の方向に曲率半径 R_B を与え、板長さ L の方向に一定速度で線状加熱加工を行う実験を行って、曲面板の曲率半径 R_B が角変形に及ぼす影響を検討した。なお、ぎょう鉄では板長さ L は板幅 B より十分に長い場合が多いため、Fig.1に示すローラ軸と板の見透し線がなす角 β は一般に小さい。そこで、フレーム曲りで使用する $\beta = 0$ の線状加熱加工のみを角変形の基本実験として行った。熱源としてヤグレーザを使用し、レーザパワー P を800W、レーザ熱源と試験片表面の距離を48mmと一定にして線状加熱した。試験片寸法は板幅 $B=75\text{mm}$ 、板長さ $L=150\text{mm}$ 、板厚 $h=2.4\text{mm}$ であり、曲率半径 R_B をTable 1に示すように正から負まで変化させた。 R_B が正である場合とは、線状加熱線が曲率半径 R_B

Fig.2 Specimen for angular distortion

の中心側の表面にある場合であり（凹タイプとする）、 R_B が負は逆の表面にある場合である（凸タイプとする）。

レーザ熱源は高密度な小入熱が特徴であるため、冷却速度が非常に大きくなり、軟鋼では焼入れされやすい¹³⁾。本研究では線状加熱条件が角変形に及ぼす影響を検討するのが目的であるため、焼入れ効果が検討結果に影響しないように、焼入れされない実験材料としてオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を使用した。なお、試験片はすべて900℃で2時間の応力除去焼鈍を行った¹⁴⁾。

単位線状加熱長さ当たりの熱量 Q_{net} (J/mm) は板に与えられた熱量による板の平均温度上昇 T_{av} (°C) を測定して、SUS304の比熱 $c = 0.502 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ 、密度 $\rho = 0.008 \text{ g/mm}^3$ を用いて求めた^{14), 15)}。

Table 1 Experimental conditions of curved plates and results

R_B (mm)	P (W)	v (mm/s)	Q_{net} (J/mm)	Q_{net}/h^2 (J/mm ³)	θ (rad)
-401	800	20.0	17.7	3.0	0.026
-206	800	20.0	17.7	3.0	0.026
-102	800	20.0	17.7	3.0	0.021
104	800	20.0	17.7	3.0	0.026
232	800	20.0	17.7	3.0	0.033
431	800	20.0	17.7	3.0	0.028
∞	800	20.0	17.7	3.0	0.029
-415	800	33.3	11.1	1.9	0.017
-200	800	33.3	11.1	1.9	0.016
-105	800	33.3	11.1	1.9	0.016
97	800	33.3	11.1	1.9	0.017
224	800	33.3	11.1	1.9	0.018
461	800	33.3	11.1	1.9	0.019
∞	800	33.3	11.1	1.9	0.017

Table 2 Experimental conditions of plates and results

P (W)	v (mm/s)	h (mm)	Q_{net} (J/mm)	Q_{net}/h^2 (J/mm ³)	θ (rad)
1500	25.0	5.73	35.5	1.1	0.011
1500	12.5	5.73	71.2	2.2	0.026
1500	6.3	5.73	130.7	4.0	0.034
1500	5.0	5.73	156.9	4.8	0.034
1500	4.2	5.73	186.8	5.7	0.036
1500	3.1	5.73	235.1	7.2	0.035
1500	1.6	5.73	344.7	10.5	0.026
1500	50.0	3.82	13.6	0.9	0.008
1500	25.0	3.82	27.1	1.9	0.021
1500	12.5	3.82	52.4	3.6	0.034
1500	3.1	3.82	172.2	11.8	0.040
800	26.7	3.82	16.8	1.2	0.011
800	13.3	3.82	26.0	1.8	0.018
800	6.7	3.82	57.3	3.9	0.027
800	40.0	2.0	6.5	1.6	0.014
800	26.7	2.0	10.5	2.6	0.023

次に、溶接変形では角変形は入熱パラメータ Q_{net}/h^2 で整理できている¹⁾。線状加熱加工においても、角変形が入熱パラメータ Q_{net}/h^2 で整理できるか検討した。Fig.2 (b)に平板の試験片を示す。板長さ150mm、板幅75mmと一定にして、板厚、レーザパワーおよび線状加熱速度を変化させて実験を行った。Table 2に実験条件を示す。

3. 2 角変形の測定方法

平板の角変形 θ は次式に示すように線状加熱による板表面の収縮量 S_T と板裏面の収縮量 S_B の差から求めている¹⁾。

$$\theta = (S_T - S_B) / h \quad (1)$$

収縮量 S_T 、 S_B は固有ひずみ発生領域外となる標点間距離50mmにコンタクトボールをセットし、線状加熱加工前後の収縮量を1 μ mの精度で測定した。

曲面板に生じる角変形 θ は曲面板の曲率半径 R_B の影響

Fig.3 Method for calculating angular distortion

Fig.4 Measure method of deflection

を受けるため、式(1)で求めると誤差が生じる。

本論文で使用した角変形を求める方法を以下に説明する。Fig.3に示す原点に紙面に垂直方向に線状加熱された場合を考える。線状加熱する前の曲面板の断面形状を破線の曲線で、線状加熱後の曲面板の断面形状を実線で示す。角変形 θ は原点で生じているため、曲面板は z 軸に対称となる。そこで、 y 正の実線部分の曲面板の断面形状を考える。線状加熱前の曲面板の中心 $A(0, R_B)$ は、線状加熱後には図に示すように角度 $\theta/2$ の反時計回転の剛体移動により $A'(-R_B \sin \theta/2, R_B \cos \theta/2)$ に移動する。図中の $y = l_0$ での z 値を線状加熱前後で z_1 、 z_2 とすると、 z_1 、 z_2 が円周上に存在する条件

$$z_1 = -\sqrt{R_B^2 - l_0^2} + R_B \quad (2-1)$$

$$z_2 = -\sqrt{R_B^2 - \{l_0 + R_B \sin(\theta/2)\}^2} + R_B \cos(\theta/2) \quad (2-2)$$

より、 $y = l_0$ でのたわみ Δz は次式で与えられる。

$$\Delta z = z_2 - z_1 \quad (3)$$

式(2)と式(3)よりたわみ Δz が与えられると、 R_B 、 l_0 の

Fig.5 Distribution of deflection before and after laser heating and deflection increase on $x=0$

Fig.6 Effect of width radius on angular distortion

情報より角変形 θ が計算できる。従って、たわみを測定すれば、曲面板の角変形 θ が求められる。

Fig.4にたわみ測定装置を示す。曲面板の4辺中点を目印にX-Y tableに曲面板をセットする。セット後は最小 $2.5\mu\text{m}$ まで移動制御できるX-Y tableをパソコン制御し、曲面板をx,y方向に5mm間隔で移動し、 $8\mu\text{m}$ の精度をもっているレーザ変位計により曲面板までの距離を測定し記録する。そして、線状加熱前後の曲面板までの距離の差よりたわみを算出する。なお、レーザ加熱により線状加熱線上の表面形状は熱膨張により変化するため、計測は線状加熱面と反対側の面で行った。

測定結果の一例をFig.5に示す。実験値は板長さ中央断面($x=0$)での z_1 (○印)、 z_2 (△印)とたわみ Δz (□印)である。太い曲線は求められた角変形 $\theta=0.023$ を使用して、式(3)より求めている。実験値の□印と曲線が一致していることより、式(3)で角変形が精度良く求められていると考えられる。

3.3 角変形に及ぼす曲率半径の影響

角変形に及ぼす曲率半径の影響を示す実験結果をTable 1の θ の列に示す。Fig.6は加熱速度 20mm/s で入熱パラメータ $Q_{\text{net}}/h^2=3.0\text{J/mm}^3$ での実験結果であり、図中の破線は平板($R_B=\infty$)の実験値である。図中のデータはばらついているが、曲率半径 R_B は角変形に影響を与えていないと見なせる。Table 1の θ の列に示す加熱速度 33.3mm/s で入熱パラメータ $Q_{\text{net}}/h^2=1.9\text{J/mm}^3$ での実験結果では曲率半径が変化した曲面板の角変形は平板の角変形 0.017 に極めて近い値である。以上よりフレーム曲りで使用する $\beta=0$ の線状加熱加工の場合には、角変形に及ぼす曲面板の曲率半径の影響はほとんどないと結論できる。従って、角変形に及ぼす入熱条件などの影響は平板で検討できる。

Fig.7 Effect of heat input parameter Q_{net}/h^2 on angular distortion

3.4 角変形に及ぼす入熱条件の影響

線状加熱速度、レーザパワー、板厚などが角変形に及ぼす影響を実験により検討した。実験結果をTable 2の θ の列に示す。溶接変形の整理で有効であった入熱パラメータ Q_{net}/h^2 で角変形 θ を整理した結果をFig.7に示す。実験条件である板厚 h とレーザパワー P が同じ値であるデータ毎に記号を変えている。▲印はやせ馬の変形形状を示す座屈が生じたデータであり¹⁰⁾、座屈による角変形が含まれており実験曲線である実線からずれている。板厚3種類、レーザパワー2種類と変化しているデータが入熱パラメータで概ね整理できている。従って、Fig.7を使用すればステンレス鋼SUS304に角変形を与える入熱条件は板厚が決まると決定できる。例えば、1回当たりの角変形として最大値を与える条件はFig.7より入熱パラメータ Q_{net}/h^2 が 5J/mm^3 から 7J/mm^3 となる条件であるから、板厚が与えられると、入熱 Q_{net} は決定できる。

3.3節と3.4節の結果より、線状加熱加工で角変形を与える条件を決定するためには、平板を使用して入熱パラメータと角変形の関係を求める実験を行い、Fig.7に示すようにデータを整理しておけば良い。

4. 横収縮(絞り)

4.1 Torusモデルと固有ひずみ

矢村¹⁰⁾は昭和29年に楕円および鞍形曲面はTorus(輪環面)の一部であることを利用して、線状加熱によるガス長さの収縮量を推定した。矢村はユークリッド幾何学を利用して、有用な知見を導いたが、現在ではリーマン幾何学の手法が利用できる。リーマン幾何学では曲

Fig. 8 Torus

面は二つの変数 (u, v) で表示できる。曲面上の点を $p(u, v)$ とすると、線素の長さ ds は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$ds = \sqrt{E du^2 + 2F du dv + G dv^2} \quad (4-1)$$

ただし、 $E = p_u \cdot p_u$, $F = p_u \cdot p_v$, $G = p_v \cdot p_v$: 内積、

$$p_u = \partial p / \partial u, p_v = \partial p / \partial v$$

Fig. 8 に示す Torus 曲面上の任意点 $p(u, v)$ は角度を変数 u, v として使用すると次式で与えられる。

$$p(u, v) = \{(R + r \cos u) \cos v, (R + r \cos u) \sin v, r \sin u\}$$

ただし、 R : 原点から Torus の円中心までの距離

r : Torus 円の半径

u = 一定の線上での曲線の長さは次式となり

$$ds = \sqrt{G} dv = (R + r \cos u) dv \quad (4-2)$$

v = 一定の線上での曲線の長さは次式となる。

$$ds = \sqrt{E} du = r du \quad (4-3)$$

式 (4-3) より、 v = 一定の線上での曲線の長さは変数 v が変化しても変化しない。一方、式 (4-2) より、 u = 一定の線上での曲線の長さは変数 u の変化にともなって変化している。

Fig. 9(a) に示す碗形曲面は Fig. 8 において $u=0$ の子午線を板幅 B の中央断面に一致させ、板長さ方向の曲率半径 $R_L (= R + r)$ 、板幅方向の曲率半径 $R_B (= r)$ とした Torus 曲面で表現できる。 v = 一定の線上は板幅方向となり、 u = 一定の線上は板長さ方向となる。板幅方向の曲線長さは v = 一定の線上であるから、 u が変化しても変化しない。従って、Fig. 9(b) に示すように板長さ L 、板幅 B の平板を板幅方向の曲率半径 R_B の円筒殻に収縮なしで加工できる。 $u=0$ の線上長さ $ds = (R + r) dv$ を基準にすると u 上の長さ $ds = (R + r \cos u) dv$ は次式に示すひずみ $\epsilon(u)$ を $u=0$ の線上の長さに与えることにより導かれる。

$$\begin{aligned} \epsilon(u) &= \{(R + r \cos u) dv - (R + r) dv\} / (R + r) dv \\ &= r(\cos u - 1) / (R + r) = R_B(\cos u - 1) / R_L \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 R_B : 板幅方向の曲率半径 $= r$,

R_L : 板長さ方向の曲率半径 $= (R + r)$

Fig. 9 Bowl model on torus

Fig. 9(a) の図中に示す直交座標を取ると、式 (5) のひずみは x 方向のひずみ ϵ_x となり、Fig. 9(a) の原点から y 方向にガス長さ l_y を取ると、角度 u は $u = l_y / R_B$ で表される。

曲面板に与える固有ひずみ g_x がすべて見かけのひずみ ϵ_x に変換されて弾性ひずみが生じない場合には、Torus モデルより導かれた式 (5) のひずみを固有ひずみとすれば、碗形曲面が作れる。すなわち、固有ひずみ g_x を次式のように与えると Fig. 9(a) の碗形曲面ができることになる。

$$g_x(l_y) = R_B \{ \cos(l_y / R_B) - 1 \} / R_L \quad (6)$$

以上をまとめると R_L 、 R_B の碗形曲面を作るには

(1) 最初に、板幅 B の曲率半径 R_B の円筒殻を作る

(2) 次に、板長さ L 方向の曲率半径 R_L を作るために l_y が一定の線上に式 (6) の固有ひずみを与えることにより作成できる。

Fig. 10 に式 (6) より得られた固有ひずみ分布を示す。縦軸は板幅端部の固有ひずみ $g_x(B/2)$ で任意点の固有ひずみ $g_x(l_y)$ を除した値

$g_x(l_y) / g_x(B/2) = \{ \cos(l_y / R_B) - 1 \} / \{ \cos(B / 2R_B) - 1 \}$ (7) であり、横軸の零は板幅端部を意味する。図では式 (7) のパラメータ R_B / B を 0.3, 0.6, 4 と変化させている。図より固

Fig. 10 Distribution of inherent strain

Fig.11 Specimen for triangle line heating

有ひずみ分布は R_B/B が変化してもあまり変化しないこと、特に、 R_B/B が0.6以上になると固有ひずみ分布形状は一定となっている。

熟練工の技能として、三角焼きで使用する線状加熱長さ b は板幅 B の0.3倍から0.4倍であり、加熱開始からの熱量変化は1:3:5:7:10である。熱量と固有ひずみ値はほぼ比例関係にあることを考えて、Fig.10を見ると加熱幅および熱量変化は固有ひずみ分布に対応している。

4. 2 実験方法

Torusモデルにより R_L , R_B の楕円曲面を作るための固有ひずみは式(7)で与えられる。熱量変化を式(7)に従って与えても発生する固有ひずみは応力の存在により弾性ひずみが生じるため見かけのひずみと一致しない。しかし、弾性ひずみの絶対値より固有ひずみの絶対値が大きければ、見かけのひずみと固有ひずみ値は概ね一致すると見なせる。そこで、4.1節で得られた微分幾何学から得られた知見が楕円曲面作成に有効否かを実験により検討した。

Fig.11に三角焼きの試験片を示す。三角焼きの線状加熱は図中の黒い領域で示す三角形の頂点から板幅端部に向かって行った。線状加熱長を b (mm) とし、レーザによ

Table 3 Experimental condition for changing travel speed

m	v_1 (mm/s)	v_2 (mm/s)	v_3 (mm/s)	v_4 (mm/s)	v_5 (mm/s)
1	15.6				
3	41.2	17	9.2		
5	52.6	27.7	17.1	11.6	8.3

m : numbers of division area in which travel speed is constant

v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 : travel speed

るLine heating 1の終了後に完全冷却してから、Line heating 2を行った。レーザ加熱では熱量が小さいため、加熱部は急冷されるため、加熱後の水冷は行っていない。横収縮は固有ひずみ発生領域外となる標点間距離50mmにコンタクトボールをセットし、線状加熱加工前後の収縮量を $1\mu\text{m}$ の精度で測定した。次式に示す円筒殻の内面の収縮量 S_i と外面の収縮量 S_o の平均値を横収縮 S とした。

$$S = (S_i + S_o) / 2$$

上述以外のレーザ線状加熱に関する実験条件は3.1節と同じである。

4. 3 加熱速度の影響

加熱速度の変化が横収縮に及ぼす影響を調べるために Table 3に示す条件で実験を行った。板に与える全熱量を約2000J、加熱長さ b を35mm、板幅 $B=100\text{mm}$ 、板長さ $L=200\text{mm}$ 、板厚 $h=2.4\text{mm}$ 、曲率半径 $R_B=400\text{mm}$ で実験した。加熱長さ b を m 等分して、加熱速度の変化を次の3種類とした。

(1) $m=1$ で示す一定速度での三角焼き

(2) $m=3$ で示す3段階の速度変化

(3) $m=5$ で示す5段階の速度変化

$m=3$ の3段階の速度変化はA社の現場で使用されている三角焼きの条件であり、 $m=5$ は4.1節で記述した熟練工の技能として伝承されている5段階の速度変化である。

Fig.9の x 方向の見かけのひずみの積分値である横収縮 S は弾性ひずみが生じないときには、固有ひずみ g_x の積分値となる。簡単な考察のために y 点の固有ひずみ g_x は一定であると考え、 S と g_x は比例関係となる。次に、横収縮と入熱は比例すると考えると、入熱が速度に反比例することより、Fig.10に示す固有ひずみ分布を参考にして速度の設定ができる。板幅端部での速度 $v_{0.5B}$ 、ガウス

Fig.12 Effect of speed change on distribution of transverse shrinkage

長さ l_y での速度 v_y の関係は式(7)より次式となる。

$$v_{0.5B} / v_y = \{\cos(l_y / R_B) - 1\} / \{\cos(B / 2R_B) - 1\} \quad \text{--- (8)}$$

式(8)と板に投与される全熱量が一定の条件より、 m 分割で決まる分割された領域の中心までのガス長さ l_y から速度 v_y は決定できる。また、板幅端部での横収縮 $S_{0.5B}$ 、ガス長さ l_y での横収縮 S_y の関係は式(7)より次式となる。

$$S_y / S_{0.5B} = \{\cos(l_y / R_B) - 1\} / \{\cos(B / 2R_B) - 1\} \quad \text{--- (9)}$$

Fig.12に横収縮分布の実験値を示す。横軸はガス長さである。記号○, △, □印はFig.11に示す最初に線状加熱したLine heating 1の実験値であり、●, ▲, ■印は反対側のLine heating 2の実験値である。○, ●印は5回の速度変化、△, ▲は3回の速度変化、□, ■印は速度一定での実験値である。図よりLine heating 1の横収縮がLine heating 2の横収縮分布より少し大きな値になっているが、概ね一致した値になっている。図中の曲線は式(9)に示すTorusモデルにより計算した横収縮分布である。板幅端部に最も近いガス長さ $l_y = 46.5\text{mm}$ の位置で測定されたLine heating 1と2の横収縮の平均値を式(9)に一致させて、式(9)の $S_{0.5B}$ を求めた。図より滑らかな速度変化を示す5回の速度変化による実験値がTorusモデルより予測された曲線分布に最も近いが、3回の速度変化の実験値も同程度である。しかし、速度変化をしない一定速度の横収縮分布はTorusモデルの横収縮分布と一致していないため、梲形曲げ加工に利用できない。

以上より、梲形曲げ加工に使用する三角焼きではFig.10から得られた式(8)に従った、3回以上の速度変化をすれば、Torusモデルの横収縮分布が得られることが実験により明らかになった。

4. 4 加熱長さの影響

加熱長さ b が横収縮に及ぼす影響を検討した。熟練工は b のナレッジとして $0.3B$ から $0.4B$ を三角焼きしている。そこで、Table 4に示す3種類の加熱長さで実験した。速度変化を3回以上与えることを目標にしたが、加熱長さ7mmの実験では加熱長さが短いため、今回用いたヤグレーザでは速度変化を与えることができなかった。板幅 $B = 100\text{mm}$ 、板長さ $L = 200\text{mm}$ 、板厚 $h = 2.4\text{mm}$ 、曲率半径 $R_B = 400\text{mm}$ である。

Table 4 Experimental condition for changing heating length

b (mm)	b/B	v_1 (mm/s)	v_2 (mm/s)	v_3 (mm/s)	v_4 (mm/s)	v_5 (mm/s)
7	0.07	8.3				
21	0.21	17.1	11.6	8.3		
35	0.35	52.6	27.7	17.1	11.6	8.3

b : heating length B : Plate width

v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 : travel speed

Fig.13 Effect of heating length on distribution of transverse shrinkage

Fig.13に横収縮分布に及ぼす加熱長さの影響を示す。オープン記号はLine heating 1の実験値であり、塗りつぶした記号はLine heating 2の実験値である。曲線は4.3節で記述した方法で求めたTorusモデルの横収縮である。図より加熱長さが小さくなると横収縮が小さくなり、実験値と計算値はずれを生じている。 b/B が0.35の実験値は計算値に概ね一致しているが、 b/B が0.21, 0.07と小さくなると計算値と実験値のずれは大きくなっている。梲形形成は三角焼きの積み重ねで作成するため、計算値にほぼ一致している $b/B = 0.35$ が三角焼きの本数の多い梲形形成に適している。従って、現場の熟練工のナレッジである加熱長さ b は $0.3B$ から $0.4B$ は適切な情報であるが、加熱長さはより長い $0.4B$ がよい。

4. 5 曲率半径の影響

板幅方向の曲率半径 R_B が横収縮分布に及ぼす影響を検討した。熟練工が曲率半径 R_B の変化に対して使用しているナレッジは聞くことができなかった。一方、Fig.10より R_B/B が0.6以上であれば固有ひずみ分布は一定となり、式(9)より横収縮の分布も一定となる。従って、板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ が同じになるように入熱を与えれば、横収縮値の分布も同じになることが期待できる。そこで、Table 5に示すように3種類の R_B で実験をした。加熱

Table 5 Experimental condition for changing radius of width

R_B (mm)	R_B/B	v_1 (mm/s)	v_2 (mm/s)	v_3 (mm/s)	v_4 (mm/s)	v_5 (mm/s)
400	4	52.6	27.7	17.1	11.6	8.3
200	2	52.4	27.6	17.0	11.5	8.3
100	1	51.7	27.3	16.9	11.5	8.3

R_B : radius of width in curved plate B : Plate width

v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 : travel speed

Fig.14 Effect of speed change on distribution of transverse shrinkage

長さ $b=35\text{mm}$ で加熱速度を5段階で変化させたが、 R_B が異なったときに、加熱速度がわずかに変化しているのは、 R_B/B の相違により l_y/B 点での式(8)の右辺値が変化したためである。板幅 $B=100\text{mm}$ 、板長さ $L=200\text{mm}$ 、板厚 $h=2.4\text{mm}$ で実験した。

Fig.14に横収縮分布に及ぼす板幅方向の曲率半径 R_B の影響を示す。オープン記号はLine heating 1の実験値であり、塗りつぶした記号はLine heating 2の実験値である。Line heating 1と2のデータはほぼ一致している。図中の曲線は4.3節で記述した方法で求めたTorusモデルの横収縮である。実験値は計算値にほぼ一致し、曲率半径 R_B は横収縮にほとんど影響を与えていない。従って、三角焼きで生じる横収縮値に曲率半径は影響しないと結論でき、熟練工には曲率半径は絞りに無関係というナレッジが存在した。

4. 6 横収縮に及ぼす入熱条件の影響

4.2節から4.5節までの結果より、三角焼きは加熱長さ $0.35B$ 、加熱速度はFig.10または式(8)より決まる5段階の速度変化を行えば、Torusモデルから導かれる式(9)の横収縮分布とほぼ一致した横収縮の実験値が得られた。本

Table 6 Experimental condition for changing heat input

P (J/s)	$Q_{net}^{0.5B}$ (J/mm)	$Q_{net}^{0.5B}/h^2$ (J/mm ³)	v_1 (mm/s)	v_2 (mm/s)	v_3 (mm/s)	v_4 (mm/s)	v_5 (mm/s)
1500	212.9	37.0	26.3	13.9	8.5	5.8	4.2
1500	159.8	27.7	35.1	18.5	11.4	7.7	5.6
800	106.4	18.5	28.1	14.8	9.1	6.2	4.5
800	53.3	9.2	56.1	29.5	18.2	12.3	8.9

$P(\text{J/s})$: Laser power

$Q_{net}^{0.5B}(\text{J/mm})$: heat input at the edge $0.5B$ of plate width

$h(=2.4\text{mm})$: plate thickness v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 : travel speed

Fig.15 Effect of heat input on transverse shrinkage

節では式(9)に示された板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ に及ぼす入熱条件の影響を検討する。加熱速度の変化は式(8)より決まるため、板幅端部での入熱 $Q_{net}^{0.5B}(\text{J/mm})$ と板厚から計算される入熱パラメータ $Q_{net}^{0.5B}/h^2(\text{J/mm}^3)$ が横収縮 $S_{0.5B}$ に及ぼす影響を検討した。Table 6に示すように板幅端部の速度 $v_{0.5B}$ とレーザパワー $P(\text{J/s})$ を変化させて、板幅端部の入熱 $Q_{net}^{0.5B}(\text{J/mm}^3)$ を変化させた。加熱長さ $b=35\text{mm}$ 、板幅 $B=100\text{mm}$ 、板長さ $L=200\text{mm}$ 、板厚 $h=2.4\text{mm}$ 、曲率半径 $R_B=400\text{mm}$ で実験した。

Fig.15に横収縮分布に及ぼす入熱の影響を示す。オープン記号はLine heating 1の実験値であり、塗りつぶした記号はLine heating 2の実験値である。曲線は4.3節で記述

Fig.16 Relation between heat input parameter and transverse shrinkage at the edge of plate width

Table 7 Experimental condition for similarity law

L (mm)	B (mm)	h (mm)	R_B (mm)	P (J/s)	b (mm)	$Q_{net}^{0.5B} / Bh$ (J/mm ³)	v_1 (mm/s)	v_2 (mm/s)	v_3 (mm/s)	v_4 (mm/s)	v_5 (mm/s)
200	100	2.4	400	800	35	0.222	56.1	29.5	18.2	12.3	8.9
400	200	2.4	800	800	70	0.222	28.1	14.8	9.1	6.2	4.5

L : plate length B : Plate width h : plate thickness R_B : radius of width in curved plate

P (J/s): Laser power b : heating length v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 : travel speed

$Q_{net}^{0.5B}$ (J/mm): heat input at the edge $0.5B$ of plate width

Table 8 Experimental result of similarity law

B (mm)	Heating side	S_1 (mm)	S_2 (mm)	S_3 (mm)	S_4 (mm)	S_5 (mm)
100	LH1	0.008	0.018	0.037	0.044	0.061
	LH2	0.007	0.016	0.025	0.038	0.053
200	LH1	0.021	0.039	0.063	0.086	0.123
	LH2	0.020	0.038	0.064	0.089	0.132

B : Plate width LH1: line heating 1 LH2: line heating 2
 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 : transverse shrinkage

した方法で求めたTorusモデルの横収縮である。Fig.15の横軸 $l_y = 50\text{mm}$ での曲線の値より板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ が決まる。入熱パラメータ $Q_{net}^{0.5B} / h^2 = 37, 27.7, 18.5, 9.2$ (J/mm³)に対して、横収縮はそれぞれ0.361, 0.253, 0.142, 0.065mmとなっている。

Fig.16に入熱パラメータ $Q_{net}^{0.5B} / h^2$ と板幅端部の横収縮を板厚 h で割った比 $S_{0.5B} / h$ の関係を示す。縦軸と横軸は溶接変形における横収縮を整理するパラメータである¹¹⁾。図中の直線は原点を通っており、 $S_{0.5B} / h$ が $Q_{net}^{0.5B} / h^2$ に

比例することを意味している。実験値は直線より小さな値を示しているが、概ね $S_{0.5B} / h$ は $Q_{net}^{0.5B} / h^2$ に比例しており、板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ は $Q_{net}^{0.5B} / h$ に概ね比例すると見なせる。

4. 7 相似則

4.6節により板幅 $B=100\text{mm}$ での三角焼きで得られる板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ に及ぼす入熱条件の影響が明らかになった。そこで、板幅寸法 B が変化したときの三角焼きの加熱条件を検討するために、横収縮分布の相似則を利用する実験を行った。相似の基準として板幅 B を使用し、Fig.11の形状をした相似板をTable 7に示す寸法で作成し、相似点の入熱が相似比で与えられるように $Q_{net}^{0.5B} / Bh$ を一定とし更に加熱長さ b が相似比になるように $b/B=0.35$ として、5段階の速度変化で実験を行った。

実験結果をTable 8に示す。 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 はFig.11に示すコンタクトボール位置での横収縮である。LH1とLH2はLine heating 1と2を意味する。Fig.17の縦軸に相似の基準である板幅 B で割った横収縮を取り、横軸に相似点を示すようにガス長さを板幅で割った値を取って、Table 8の横収縮をプロットしている。図中の曲線はTorusモデルより計算している。図より実験値に多少のバラツキが

Fig.17 Arrangement of transverse shrinkage using similarity law

Fig.18 Effect of new heat input parameter on transverse shrinkage at the edge of plate width

存在するが、横収縮の分布に関連して、相似則が成立している。従って、三角焼きの横収縮は S/B の形で次式に示すような $Q_{net}^{0.5B}/Bh$ 、 R_B/B の関数となる。

$$S/B = f(l_y/B, Q_{net}^{0.5B}/Bh, R_B/B) \text{-----} (10)$$

4.5節より板幅方向の曲率半径 R_B が横収縮にあまり影響を与えないこと、4.6節より板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ が $Q_{net}^{0.5B}/h$ で概ね比例関係にあることを考慮すると、式(10)

より $S_{0.5B}/B$ は $Q_{net}^{0.5B}/Bh$ に比例することが期待される。

Fig.18に得られた実験値 $S_{0.5B}$ を整理した結果を示す。実験値は少なくまだまだ多くのデータを蓄積する必要があるが、図より次の実験式が得られた。

$$\begin{aligned} S_{0.5B}/B &= 0.004 Q_{net}^{0.5B}/Bh \\ \therefore S_{0.5B} &= 0.004 Q_{net}^{0.5B}/h \text{-----} (11) \end{aligned}$$

式(11)は5段階の速度変化で、加熱長さが $0.35B$ 以上(最大 $0.5B$)の三角焼きがなされた場合について、板幅端部の横収縮 $S_{0.5B}$ を与えるのに必要な板幅端部の最も遅い加熱速度部分に投与する入熱 $Q_{net}^{0.5B}$ を決めている。

5. 結論

本論文ではぎょう鉄作業者が暗黙知として使用している折れ(角変形)と絞り(横収縮)の加熱条件を、レーザフォーミングの実験と微分幾何学で検討した。角変形と横収縮に及ぼす線状加熱条件の影響についての主な結論を以下に示す。

- 1) フレーム曲りを与えるために使用される角変形は板幅方向の曲率半径 R_B の影響をほとんど受けない。
- 2) 線状加熱加工で得られる角変形は溶接変形と同様に入熱パラメータ Q_{net}/h^2 で決まる。
- 3) 縦曲りを与えるために使用されている三角焼きで得られる横収縮をTorusモデルの微分幾何学と実験により検討した結果
 - a) 加熱長さ b は板幅 B の0.35倍以上が必要である。
 - b) 加熱長さ b 内の加熱速度の変化は3段階以上が必要であり、5段階の変化なら滑らかな横収縮分布が得られる。速度変化の式(8)を提案するが、速度変化は技能工のナレッジである1:3:5:7:10とほぼ一致する。
 - c) 板幅方向の曲率半径 R_B は横収縮分布に影響を与えない。
 - d) 加熱長さ $0.35B$ 、式(8)を近似した5段階変化の加熱速度で、加熱加工した場合、横収縮は板幅端部の加熱速度から決まる単位加熱長さ当たりの入熱 $Q_{net}^{0.5B}$ と板厚 h より決まる $Q_{net}^{0.5B}/h$ に概ね比例すると見なせる。そして、式(11)が板幅端部の横収縮

$S_{0.5B}$ と $Q_{net}^{0.5B}/h$ の実験式となる。

- e) 相似な板に相似な入熱を与える三角焼きにおいては、横収縮は相似則の式(10)で表示される。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費の基盤研究(B)の補助金で行なわれた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 野本敏治, 大森拓也, 須藤拓, 横沢誠, 青山和浩, 斉藤政男: 線状加熱による板曲げ加工用シミュレータの開発, 日本造船学会論文集, 第168号(1990), 529-538
- 2) 上田幸雄, 村川英一: 計算機支援板曲げ方案自動作成システムの開発(第1報) — (第4報), 日本造船学会論文集, 第170号(1991), 577-586, 第171号(1991), 83-93, 第173号(1992), 409-419, 第174号(1992), 683-695
- 3) 富田康光, 橋本聖史, 大沢直樹, 福田柳生, 上月義雄, 脇田尋樹: 線状加熱による作業工程のエキスパートシステムに関する研究, 関西造船協会誌, 第223号(1995), 89-94
- 4) 石山隆庸, 丹後義彦, 中村祐介: FEMを応用した線状加熱自動化の実用化研究, 日本造船学会論文集, 第183号(1998), 335-342
- 5) 橋本敏郎: 線状加熱加工法, 石川島技報, 17(1960), 56-68
- 6) 栖原寿郎: 鋼材の熱塑性加工に関する研究(その一), (その二), 造船協会論文集, 第103号(1958), p.233-243, 第106号(1959), 249-264
- 7) 佐藤邦彦, 松井繁朋, 寺井清, 岩村吉就: 線状加熱板曲げ加工における水冷の効果, 日本造船学会論文集, 第126号(1969), 445-458
- 8) 荒木睦郎, 井上進夫, 堀岡正毅, 安藤政明: 線状加熱加工による鋼板の角変形量について, 日本造船学会論文集, 第133号(1973), 343-348
- 9) 辻勇, 奥村耕之: 鋼材の線状加熱板曲げ加工に関する研究, 西部造船会会報, 第76号(1988), 149-160
- 10) 矢村家利: 曲面成形加工に必要な板材の伸縮量の近似計算式(第1報), 造船協会論文集, 第96号(1954), 143-156
- 11) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, Vol.45(1976), 302-308
- 12) 松岡一祥の研究成果, 私信
- 13) 寺崎俊夫, 山口寛一: 溶接学会全国大会講演概要, 第69集(2001), 108-106
- 14) 藤田輝夫: ステンレス鋼の熱処理, 日刊工業新聞社(1970), 111, 140
- 15) 松山欽一, 寺崎俊夫, 北村貴典, 上木原洋丘: 熱切断加工により板に投与される熱量に関する実験と予測式, 日本機械学会論文集(C編), 66巻(2000), 326-331
- 16) 寺崎俊夫, 前田和伸, 村川英一, 野本敏治: 溶接により生じる平板の座屈発生条件について, 日本機械学会論文集(A編), 第64巻(1998), 2239-2244
- 17) 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何, 裳華房(1977)