レーザフォーミングのシミュレーション*

- 第2報, 板材内部に生じるひずみの検討 -

佐伯 守彦** 土本 知弘*** 細川 健治†

Simulation of Laser Forming

- 2nd Report, Study on Strain Caused by Laser Forming -

Morihiro SAEKI, Chihiro TSUCHIMOTO and Kenji HOSOKAWA

In the laser forming of a metal plate, the bending process is caused by the thermal stresses which are produced in the plate by the laser irradiation. In the present study, the finite element method (FEM: LS-DYNA) is used to analyze the laser forming, in which the laser beam is modeled by the Gaussian distribution, then the bending deformation of the plate is estimated by the FEM. Comparing with the experimental result, the validity of the proposed analytical model of the laser forming is evaluated. In the numerical example, the distribution of the strain in the metal plate is clarified in the laser forming.

Key words: laser forming, finite element method, plastic working, bending deformation, strain distribution

1. 緒 言

レーザフォーミングは金属の板材等の表面に高エネルギー密度のレーザビームを照射することによって、材料中に発生する熱応力を利用し、外力を用いずに板材を所定の形状に塑性変形させる加工法である。この加工法は従来の塑性加工法とは異なり高価な金型を必要とせず、所定の形状に変形させることができ、コストの低減が可能である。また、非接触な熱加工であるため、工具の摩耗および欠損の問題が無く、工具による材料の加工反力が無い。さらに制御も容易なことから、新たな塑性加工法として大きな可能性を有している。

これまでにレーザフォーミングの実験による多くの基礎的な研究^{1)~4)}がなされてきたが、レーザ照射時に照射部が急激に高温に達することから、精度よく温度測定を行うことが難しく、また、実験ではレーザが瞬間的に照射される状況下での複雑な塑性変形挙動のメカニズムを解明することが容易ではないため、シミュレーションによるレーザフォーミングに関する研究が行われた^{5)~7)}。これらの研究成果では、「温度勾配機構(TGM)」等の変形機構が報告されている。「温度勾配機構」は板材へのレーザ照射による熱量流入時とレーザ照射後の冷却時での板材の変形メカニズムを示したものである¹⁾²⁾。しかしながら、加工条件が板材の変形に大きく影響を与えることから、レーザ照射時の金属板内の応力状態やひずみの状態などはまだ十分に明らかにされたとは言えない。また、著者らは、前報において、加工条件が金属板の曲げ方向に及ぼす影響の検証を行った⁷⁾。しかし、レーザの熱量域を矩形でモデル化したことから、内部に生じるひずみ等を解析するには十分でなかった。

本研究では、レーザのモデル化にガウス分布を用いたレーザフォーミングの解析モデルを提案し、解析モデルの妥当性を実験と比較することにより明らかにし、さらに、レーザフォーミ

ング中の金属板内のひずみの状態と変形挙動の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 温度勾配機構(TGM)

図1に「温度勾配機構」における変形挙動を示す。図1(a)のように金属板の表面にレーザが照射されると照射部は急激に温度上昇し、板材表面ほど大きく熱膨張する。このとき、レーザによる急速な加熱のため、板厚方向に急激な温度勾配が生じ、上に凸の形状に変形する。この熱膨張した部分には、照射部裏面や照射部周辺の低温領域によって拘束され、圧縮応力が生じ、また、高温によって降伏応力が低下し塑性変形領域になる。そして、生じた圧縮応力と冷却によるレーザ照射表面部の熱収縮によって金属板は図1(b)のように下に凸の形状に変形し、照射部は塑性変形領域となっているために下に凸の形状が残留する。

Fig.1 Bending deformation of metal plate by TGM

* 原稿受付 平成20年9月26日

** 正会員 中部大学 (愛知県春日井市松本町1200)

*** 学生員 中部大学大学院 (愛知県春日井市松本町1200)

† 中部大学 (愛知県春日井市松本町1200)

3. 解析方法

3.1 解析概要

解析には非線形動的構造解析ソフト「LS-DYNA」を用いて構造/非定常熱伝導解析を実施する。解析例は図2に示すオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)に炭酸ガスレーザを照射した場合とする。解析モデルには8接点6面体 Solid 要素を用い、等方性弾塑性体として有限要素モデルを作成した。雰囲気温度は293Kとし、解析モデルの周囲に存在する空気熱伝達率を考慮して対流熱伝達状態とした。また、板の自重を考慮せずに解析を実施することとした。

3.2 温度依存性を考慮した物性値

レーザ照射時、レーザ照射部表面ほど高温になると共に、レーザ照射部の降伏応力は低下し照射部は塑性変形領域となる。同様に降伏応力以外の物性値にも温度勾配は影響を与えるので、解析には温度依存性を考慮した SUS304 の物性値を用いた。表1に機械的特性を、表2に熱物性値をそれぞれ示す^{8) 9)}。また、硬化係数を用いて金属の硬化を考慮した。ここで、硬化係数は200Kのヤング率の4%と仮定し、温度依存性については降伏応力の温度依存性に準ずるものとし、表3の値を用いた。

3.3 レーザのモデル化

レーザの強度分布は図3に示すガウス分布と仮定した。レーザの出力を Q とし、金属板のレーザ吸収率を ε とするとき、金属板への全流入熱量 W は

$$W = \varepsilon Q$$
 (1)

となり、レーザの強度分布には次式を用いた¹⁰⁾。

$$w = \frac{8W}{\pi D^2} \exp\left\{-\frac{8(x^2 + y^2)}{D^2}\right\}$$
 (2)

このとき、 x と y はレーザ中心からの距離で図2の X 、 Y 方向に対応している。図3の分布図の中心が図2の $lx/2$ の位置を Y 方向に移動する場合を考える。なお、式(1)ではレーザ吸収率 ε を考慮したが、これは金属が表面に光沢を持っており、レーザ出力と金属板への入力エネルギーが等価でないためである。さらに、レーザの走査は、レーザの移動に対応して要素ごとに照射される時間を考え、熱量流入位置を時間とともに一定速度で移動させることによって表現した。

4. 解析モデルの妥当性

レーザフォーミングのシミュレーションを行う上で、解析結果と実験結果の比較を行い、妥当性の検証をする必要がある。よって、文献6)に示されたレーザ照射側への曲げの実験結果とシミュレーションの結果を比較し、解析モデルの妥当性を検証する。解析モデルを図4に示す。実験と同様に縦と横の長さを

Fig.2 Analytical model of laser forming

Table 1 Mechanical properties of stainless steel (SUS304)

Temperature	Young's modulus	Poisson's ratio	Yield stress
K	$\times 10^5 \text{MPa}$		MPa
200	2.07	0.30	269
440	1.82	0.32	182
600	1.67	0.33	126
760	1.53	0.34	98
1000	1.34	0.36	74
1240	1.19	0.37	62
1400	1.08	0.38	55
1720	0.93	0.40	41

Table 2 Material properties of stainless steel (SUS304)

Temperature	Thermal conductivity	Specific heat	Thermal expansion
K	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\times 10^{-5}/\text{K}$
200	16.9	469	1.34
440	19.5	490	1.66
600	22.2	510	1.83
760	26.2	545	1.97
1000	29.2	593	2.10
1240	30.6	652	2.12
1400	31.9	701	2.13
1720	33.0	819	2.15

Table 3 Hardening coefficient of stainless steel (SUS304)

Temperature	Hardening coefficient
K	MPa
200	8280
440	5608
600	3878
760	3016
1000	0
1240	0
1400	0
1720	0

Fig.3 Intensity distribution of laser beam

100mm, 板厚を 1mm とし, その一端を拘束した片持ち状態の正方形金属板(SUS304)に, 表 4 に示す照射条件⁹⁾を与えた. なお, レーザ照射の開始点および終了点はレーザの中心が板材の端面からそれぞれ $D/2$ だけ離れた位置に設定した. また, レーザの吸収率を文献 6) より, $\varepsilon=0.6$ とした. なお, 解析結果の曲げ角は自由端上の点 a の板厚方向の変位から求めた.

図 5 に解析で得られた曲げ角と実験で得られた曲げ角の比較を示す. なお, 照射回数は文献 6) で示された実験結果と比較するため 5 回までとした. 曲げ角の定義を図中に示し, また, 図中の灰色の部分にはレーザ照射されている時間帯を表す. 曲げ角はレーザ照射毎に増加し, 最終的な曲げ角は, 14.53° となった. これは実験により得られた 14.75° と比較してもよく一致した. また, 1 回目のレーザ照射後による結果を除き, レーザ照射毎の実験値と解析値も一致している.

照射側に曲がる実験と同様の条件でシミュレーションを行った結果, 解析によって得られた結果と実験によって得られた結果はよく一致した. また, レーザ照射方向への曲げの理論に従

Fig.4 Laser forming of plate in experiment

Table 4 Experimental conditions

Laser power Q	1500 W
Laser scan speed V	5 m/min
Beam diameter D	5 mm
Number of laser scan N	5
Periodic time t_p	5 s
Absorption ratio ε	0.6
Room temperature T_r	293 K

Fig.5 Bending angle caused by laser forming

う挙動も確認されたことから, 提案した解析モデルによってシミュレーションが可能と考える.

5. 板材内部に生じるひずみ

妥当性が得られた解析モデルを基にして, 図 6 に示した金属板に対して表 5 に示す条件を与えて解析を行った. 点 a の板厚方向の変位より求めた曲げ角を図 7 に示す. 図中の灰色の部分にはレーザ照射されている時間帯を表している. $t_1(=0.03s)$ はレーザ中心が板材端面に照射された時間であり, $t_2(=0.12s)$ は金属板の中心にレーザが照射されたときの時間を, $t_3(=0.17s)$ はレーザ中心が開始位置から板幅の $3/4$ 進んだ時間を, $t_4(=0.24s)$ はレーザの照射が終了した時間を示す. t_5, t_6 は冷却中の時間を表しており, それぞれ 1s, 5s となる. 今回の解析モデルは板材の中心である点 b を通る断面上の点 a で曲げ角を求めているが, 曲げ変形はレーザの入射直後から生じており, レーザが中心に到達する $t=t_2$ の前に「温度勾配機構(TGM)」の初期変形である負の変形が極小になり, レーザが中心に到達した時点では正の変形に転じていることがわかる. レーザフォーミング(温度勾配機構)では, レーザが通過した直後は負の方向に変形するが冷却が

Fig.6 Analytical object for numerical example

Table 5 Analytical conditions

Laser power Q	1500 W
Laser scan speed V	5 m/min
Beam diameter D	5 mm
Number of laser scan N	1
Absorption ratio ε	0.6
Room temperature T_r	293 K

Fig.7 Bending angle caused by laser forming

始まると正の方向に変形する。板材全体の变形挙動はレーザ照射後の冷却領域と未だレーザが照射されていない領域との大きさで決まり、 $t=t_2$ においては、すでにレーザ照射された領域が半分を占めるため、負の变形が現れず正の方向に変形しているものと考えられる。

図7中の時間($t_1 \sim t_6$)における点bのX方向のひずみを板材下面から上面にかけて表したグラフを図8に示す。ひずみが正のときは引張りの状態を、負のときは圧縮の状態を表す。また、板材上面と下面の温度変化を表したグラフを図9に示す。図8より、板材が負の方向へ曲がる $t=t_1$ のときでは、ごく僅かであるが板材上面が引張、板材下面が圧縮となっていることが確認できる。点bにレーザが照射中である $t=t_2$ のとき、板材上面と下面どちらも引張りを受けており、点bをレーザが抜けた後の $t=t_3$ および $t=t_4$ では板材上面に圧縮の状態が、板材下面には引張りの状態を表すひずみがそれぞれ存在しており、中立面が確認できる。また、図9に示すように $t=t_2$ から $t=t_4$ にかけて急激な温度勾配が生じた後、上面と下面が同じ温度に収束しており、この温度変化が板材の曲げ变形(図7参照)および板材内部に生じている長手方向(X方向)のひずみ(図8参照)に劇的な変化を与えていることがわかる。また、曲げ变形はレーザが板材より抜ける $t=t_4$ まで続くが、 $t=t_5(1s)$ 、 $t=t_6(5s)$ では板材の上面および下面の温度がともに等しく、曲げ角に変化はない。図8において、

Fig.8 X-strain caused by laser forming

Fig.9 Temperature caused by laser forming

$t=t_5$ および $t=t_6$ の徐々に冷えている過程では、圧縮ひずみが存在するだけで、曲げ变形が生じた状態で確認できた金属板下面での引張りひずみが存在しないことから、板材はX方向に収縮していることがわかる。

次に、レーザ照射部付近の断面におけるひずみ分布を表した図を示す。図10は図7中の時間($t_2 \sim t_6$)における領域c(図6参照)のX方向のひずみを表す。同様に図11にはY方向のひずみを、図12にはZ方向のひずみを、図13には相当塑性ひずみを示す。ここで相当塑性ひずみは、塑性变形時に生じる塑性ひずみをミーゼスの降伏条件式を用いて計算した。また、図14にはレーザ照射により板材が負の方向に変形している時間 $t=t_1$ の領域cにおける各方向のひずみと相当塑性ひずみを表した。図14より、板材が負の方向に変形している $t=t_1$ のとき、X方向のひずみは照射側に引張部が、下面には圧縮部が存在しており、中立面が確認できる。一方、図10に示すように $t=t_2$ のとき、照射部は膨張しているが、その周辺には圧縮部が存在している。これにより、照射部は周辺部により拘束されはじめていると推察される。レーザが領域cを通過した $t=t_2$ より後は照射部上面を中心にして圧縮部が存在するとともに、その周辺は引張部が存在していることから中立面の存在が確認できる。常温に戻る冷却過程であり照射後の曲げ角が変化しない $t=t_5$ より後では、レーザ照射部を中心にした圧縮領域の大きさがほぼ固定し、b部分(図中の0の位置)の上面、下面ともに圧縮ひずみの状態である。次に図11より、Y方向のひずみは $t=t_2$ のとき、上面は膨張しているが、その後の影響は少ない。また、図12より、Z方向のひずみは、膨張後冷却され、減少することがわかる。最後に、図13の相当塑性ひずみ分布では、レーザ照射部付近ほど大きく塑性変形し

Fig.10 X-strain distribution in area c

Fig.11 Y-strain distribution in area c

Fig.12 Z-strain distribution in area c

Fig.13 Equivalent plastic strain distribution in area c

Fig.14 Strain distribution in area c [$t=t_1(0.03s)$]

ていることがわかる。これらのひずみを総合して考えるとレーザフォーミングによる板材の曲げ加工は板材長手方向(X 方向)のひずみ変形への主要因になっており、 Y 方向、 Z 方向のひずみは膨張していることを示すのみとなっている。

6. 結 言

本論文では、レーザをガウス分布によりモデル化したレーザフォーミングの有限要素解析モデルの提案を行い、文献 6)に示された実験結果との比較により解析モデルの妥当性を検討し、解析例では板材内部に生じるひずみの状態を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- (1) 解析結果と実験結果を比較し、解析モデルの妥当性が明らかになった。また、「温度勾配機構」に従う変形も確認することができた。
- (2) 板材にはレーザが到達していない断面においても曲げ変形が生じることが確認された。これはすでにレーザ照射された領域における変形の影響であり、レーザが通過した領域の大きさと未照射領域の大きさにより変形挙動が決まるためである。
- (3) レーザ照射直後の板材内部に一般的な板材の曲げ加工に生じる中立面を確認することができ、また、照射時のひずみ分布と比較し、照射終了後のひずみ分布に違いがあることが確認された。

謝 辞

本研究は、文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業(平成 16 年度～平成 20 年度)の支援を受けて行われた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) F.Vollertsen: Mechanisms and models for laser forming, Proceedings of the LANE' 94, 1 (1994) 345.
- 2) F.Vollertsen, M.Geiger: SYSTEMS ANALYSIS FOR LASER FORMING, Transactions of NAMRI/SME, 23 (1995) 33.
- 3) 上田隆司, 山田啓司, 及川志郎, 細川晃: レーザフォーミング加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌, 67, 2 (2001) 300.
- 4) 寺崎俊夫: レーザフォーミングにおける変形解析, レーザ加工学会誌, 10, 3 (2003) 249.
- 5) 天田重庚, 白井直樹: レーザ局所加熱法による薄板の曲げ変形, 日本機械学会論文集, 62, 604 C(1996) 2764.
- 6) 難波義治, 片山卓也: レーザ・フォーミングの三次元熱弾塑性解析, 精密工学会誌, 65, 9 (1999) 1330.
- 7) 佐伯守彦, 榊原敦, 細川健治: レーザフォーミングのシミュレーション(第 1 報), 精密工学会誌, 74, 2 (2008) 160.
- 8) ステンレス協会編: ステンレス鋼データブック, 日刊工業新聞社 (2001).
- 9) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, 養賢堂 (1990).
- 10) 牧之内三郎, 難波義治, 大村悦二: ガウス系分布の移動熱源による有限平板の温度分布解析, 日本機械学会論文集, 48, 436 C(1982) 1986.