レーザによる板材の矯正加工に関する基礎的研究*

千 徳 英 介** 上 田 隆 司*** 細 川 晃***

Fundamental Study on Laser Leveling of Sheet Metal

Eisuke SENTOKU, Takashi UEDA and Akira HOSOKAWA

Laser leveling is an application of laser forming. Laser leveling of a sheet metal is a plastic process caused by thermal stresses which are produced in the sheet by laser irradiation. In this paper, a spherical distortion on a sheet metal is leveled by laser irradiation. As a model of a circular distortion, the distortion is intentionally introduced on the sheet metal by pressing a steel ball of 25 mm radius against it. As work materials, steel sheet and stainless steel sheet whose thickness is 0.6mm are used. Laser beam is radially irradiated at the center of circular distortion for leveling the distorted sheet metal. Continuous CO₂ laser beam is used and its power is changed at the range of 80W ~200W under a constant scanning speed of 2mm/s. After laser irradiation, a distortion of about 400μm high becomes almost flat without melting a sheet metal.

Key Words : laser leveling, sheet metal, laser forming, thermal stress

1. 結 言

工業用材料として使われる板材の形状精度の要求はますます高くなっており、製造後に、要求される形状への矯正が必要となることが多い。また自動車のボディなどの板材を素材とする部品とくに外観部品では、製造時もしくは製造後に生じた小さな圧こんが問題となり、精度良く矯正する必要がある。

従来の板材の矯正方法であるプレス、ローラーによる方法は大きな装置が必要であり、局所的な微小な圧こんの矯正においては時間、コスト面で問題がある。また、バーナーなどを用いた局所加熱法による矯正方法では作業者の熟練が要求される。

一方、レーザ照射によって金属板材に自由曲面を創成するレーザフォーミング加工の分野においては、基礎的研究が盛んに行われておりレーザを用いた塑性加工の変形メカニズムなどに関して多くの知見が得られている^{2)・4)}。

そこで本研究では、従来の矯正加工法の問題を解決する新しい板材の矯正加工法として、レーザを用いた矯正加工を試みた。レーザ矯正加工法は、レーザ照射部に発生する熱応力を利用して材料を塑性変形させて矯正する加工法である。レーザを熱源とすることで、レーザのもつ高いエネルギー密度、微小スポット径により高い精度で、局所的な矯正が行える。さらに入熱量の制御もしやすいため、レーザの走査パス、加工条件などによりあらゆる形状の圧こんに対応できれば自動化も容易である。ところが、これまでレーザを矯正加工に使用した例としては溶接後に生じた曲げ変形の矯正⁵⁾が報告されている程度である。

そこで本論文では、レーザ矯正加工の基礎的研究としてSS400 板材、および SUS304 板材に鋼球を押しつけて作製した円状の圧こんの矯正加工について報告する。矯正時のレーザ走査パスは有限要素法によって得られた塑性ひずみ

分布より決定し、加工条件の矯正結果への影響についても述べる。

2. レーザ矯正加工の原理

図1にレーザ照射による矯正の原理を示す。平板上に(a)に示すような凸状のゆがみが生じたとき、その近傍では元の平らな状態に比べ材料が伸びた状態となっている。このとき、この圧こん部分にレーザを照射すると、(b)に示すように照射部は膨張し、圧縮応力が生じる。この応力により塑性ひずみが生じるとき、レーザ照射終了後の(c)冷却過程において板材に引張力が生じ、圧こんは収縮する。

3. 円状圧こんの作成

図2に円状圧こんの作成装置概略図、および圧こんを作成した板材を示す。図のように鋼球(半径 $R=25\text{mm}$)に上方から荷重をかけ、鋼球をゴムシート上においた厚さ 0.6mm のSS400 板に押しつけて円状の圧こんを作製している。板の形状は $50 \times 50\text{mm}$ とし、鋼球の押し込みによる圧こんに対して十分に大きくした。圧こん作製時の押しつけ力を一定とするため、鋼球押し込み力をロードセルを用いて測定した。

図2に示す写真から、板材中央部に円形のくぼみが視認できる。この圧こんの高さは $200\mu\text{m}$ 程度であるが、外

Fig. 1 Mechanism of laser leveling

* 原稿受付 平成19年 6月 18日

** 正会員 JSTイノベーションサテライト滋賀(滋賀県栗東市上砥山232)

*** 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科(金沢市角間町)

Fig. 2 Method of making circular indentation

Fig. 3 Coordinate axes of sheet metal

Fig. 4 Profile of SS400 sheet with indentation

Fig. 5 3D Profile of SS400 sheet with circular indentation

Fig. 6 Relation between load and height of indentation

観部品においては大きな問題となることわかる。

図 3 に圧こんの凸部が上向きになるように置いたときの座標を示す。圧こんの頂点を原点にして X 軸、Y 軸をとり、高さ方向を Z 軸としている。図 4 にレーザー変位計を用いて測定した圧こん断面のプロファイルを示す。圧こんの形状の対称性を調べるため、図 3 に示した A - A' 断面と

(a) FEM model

(b) Displacement in Z-direction

(c) Plastic strain of indentation

Fig. 7 Results of FEM analysis of circular indentation

B - B' 断面の 2 方向で測定を行っている。図から A - A' 断面と B - B' 断面のプロファイルはよく一致しており方向によって偏りのない圧こんが作成できていることがわかる。また、本論文では、図 4 に示すように、圧こんの頂点の高さを圧こん高さ h_d と定義する

このような断面プロファイルを組み合わせて作成した圧こんの 3 次元プロファイルについて、圧こんを中心として $50 \times 10\text{mm}$ の領域のみ測定した結果を図 5 に示す。3 次元プロファイルからも圧こんが円状に変形していることがわかる。本装置を用いた圧こん作製時の荷重と圧こん高さの関係を図 6 に示す。荷重を増加させることで圧こん高さを直線的に大きくできることがわかる。また、本装置では最大で $400\mu\text{m}$ 程度の圧こんが作成できることがわかる。

4. 有限要素法による塑性ひずみの解析

レーザー矯正加工を行うにあたり、レーザーの走査パスを決定するため、また矯正メカニズムの解明を行うために、矯正前の板材に生じている塑性ひずみの分布を知ることは重要である。ここでは有限要素法を用いて塑性ひずみの分布の解析を行う。

解析に用いたモデル図を図 7(a) に示す。形状は、実験で

Fig. 8 Laser paths

Fig. 9 Experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Laser		CO ₂ (CW)
Laser power Q	W	100
Beam diameter D	mm	1
Feed rate V	mm/s	5
Material		SS400
Thickness of sheet metal h	mm	0.6

用いた板材と同様の $50 \times 50 \times 0.6\text{mm}$ とした。実験では鋼球を押しつけて圧こんを作成したが、解析では図に示すように、板材中央部に Z 方向の強制変位を加えて圧こんを作成する。解析は、8 節点アイソパラメトリック要素を用いて、要素数 300 個、節点数 482 個の 3 次元体としてメッシュを構成して 3 次元弾塑性解析を行った。取り扱いを簡単にするため、周囲は固着とした。

強制変形後の Z 方向の変位を図 7(b) に示す。前節で示した圧こんの 3 次元プロファイルと同様に、円状の圧こんが得られていることがわかる。このときの塑性ひずみの分布を図 7(c) に示す。図から塑性ひずみは圧こんの中心部へ向かうほど大きくなっており、圧こんの中心部でひずみ量が最も大きいことがわかる。このことから、レーザ照射により矯正を行うためには圧こん中心部に最大の圧縮塑性ひずみを生じさせるようなレーザ走査パスを選択する必要がある。そこで本論文では、圧こん中心部にレーザ走査が集まる放射状のパスを用いて矯正加工を行った。図 8 に示すように、各々のレーザ走査は圧こん中心部へ向けて行い、それぞれのパスは図中の番号の順に時計回りの方向へ 90° づつ角度を変えて行った。

矯正を行う範囲については、図 7(c) の結果より塑性ひずみが生じている範囲が半径 5mm 程度であることから、レーザ走査を行う領域を半径 5mm と定めた。ただし、圧こんの頂点近傍において、大きな圧縮の塑性変形を生じさせるため、それぞれのレーザパスが 1mm づつ重なるように配慮し、各レーザの走査パス長さを 6mm としている。

(a) Before laser irradiation

(b) After 1st path

(c) After 2nd path

(d) After 3rd path

(e) After 4th path

Fig. 10 Leveling process

5. 矯正加工実験

5.1 実験方法および装置

図 9 に矯正加工実験の装置概略図を示す。レーザは連続発振の CO_2 レーザを使用する。圧こんを作成した板厚 $h=0.6\text{mm}$ の SS400 板材を 2 軸の NC ステージ上に固定した回転ステージ上に設置し、レーザ光をレーザパワー Q で照射しながら、NC ステージを一定の送り速度 V で移動させた。レーザビーム径 D はデフォーカス量によって制御できる。

5.2 放射状レーザ走査パスの矯正プロセス

SS400 板材に作成した圧こん高さ $h_d=200\mu\text{m}$ の圧こんに対して $Q=100\text{W}$, $V=5\text{mm/s}$ の条件で放射状レーザ走査パスを用いて矯正加工を行ったときのレーザ走査 1 パスごとに 3 次元プロファイルを測定し、矯正プロセスを観察した。

図 10(a) は矯正前の圧こんが作成された板材の 3 次元プロファイルである。3 次元プロファイルは前述したように、 $50 \times 10\text{mm}$ の領域を測定した。図 10(b) ~ (e) はそれぞれの図中の左図に示したレーザ走査を行った後のプロファイルであり、時計回りにレーザパスを変えて計 4 本の走査を

Fig. 11 Effect of height of indentation on leveling

Fig. 12 4paths and 8paths

行った。

図 10(b) から、レーザ走査を行うことで圧こんの高さが減少することがわかる。続いて、2 本目の走査を行った後の (c) では板材のレーザ走査を行った側が全体的に高くなっており変形に偏りが生じたことがわかる。しかし、続く (d) に示す 3 本目の走査の後のプロファイルからもわかるようにレーザ走査を繰り返すに従い、圧こん高さは減少している。そして、(e) に示す 4 本目のレーザ走査の後には圧こんはほぼなくなり、また板材の変形にも偏りなく平らな状態になっていることがわかる。

このように、レーザ走査を圧こんに対し放射状に行うことで、板材の変形が残ることなく矯正が行えることがわかった。また、圧こん高さはレーザ走査 1 本ごとに減少していくことがわかった。

5.3 圧こん高さの影響

ここでは、板厚 $h=0.6\text{mm}$ の SS400 板材に対し 278, 464N の 2 種類の荷重で圧こんを作成し、それぞれ圧こん高さ $h_d=200, 420\mu\text{m}$ の圧こんをレーザパワー $Q=100\text{W}$ 、送り速度 $V=5\text{mm/s}$ で矯正を行った。

図 11 にそれぞれの圧こんの矯正前と矯正後の断面プロファイルを示す。図 (a) は $h_d=200\mu\text{m}$ の矯正結果であり、レーザ照射後には圧こんがない状態となっていることが分かる。図 (b) は $h_d=420\mu\text{m}$ の圧こんの矯正結果である。本図では、図中に 4paths と 8paths と 2 種類のプロファイルを表記している。

これははじめの 4 パス後のプロファイルと、そのとき残っている圧こんをさらに矯正するために 4 パス追加し、図 12 のように計 8 本のレーザ走査をおこなった後のプロ

Fig. 13 Effect of laser power on leveling (SS400)

Fig. 14 Transition of height of indentation (SS400)

Fig. 15 Photograph of leveled SS400 sheet after painting

Table 2 Experimental conditions

Laser		CO ₂ (CW)
Laser power Q	W	200
Beam diameter D	mm	2
Feed rate V	mm/s	5
Material		SUS304
Thickness of material h	mm	0.6

Fig. 16 Laser leveling of SUS304

ファイルである。図からわかるように、4 パス後、8 パス後と圧こん高さを減少させることができる。8 パス後にも圧こんが少し残っているが、さらにレーザ照射を繰り返せば圧こんを矯正することができると思われる。

5.4 レーザパワーの影響

レーザパワー $Q=100\text{W}$ では圧こんを矯正加工できたが、それ以下のレーザパワーでも矯正が可能ならば材料表面への熱的ダメージを軽減することができる。そこで、ここで

はレーザーパワーを 80W と変化させ $h_d=200\mu\text{m}$ の圧こんの矯正加工を行い、レーザーパワーの矯正結果への影響について調べた。

図 13 にレーザーパワー $Q=80\text{W}$ で加工を行ったときの断面プロファイルを示す。図からわかるように、4 パス後では $h_d=60\mu\text{m}$ 程度の圧こんが残っているが、8 パス後ではほぼ圧こんは消えている。このことから、レーザーパワーが小さく入熱量が小さい場合にはパス数を増やす必要があることがわかる。

図 14 に、圧こん高さの推移を示す。レーザーパワー $Q=100\text{W}$ の場合、圧こん高さ $h_d=200\mu\text{m}$ では 4 パス後に、矯正がうまく行われていることがわかる。しかし $h_d=420\mu\text{m}$ の圧こんに対しては 4 パス後では $h_d=200\mu\text{m}$ 、8 パス後に $h_d=100\mu\text{m}$ の圧こんが残っている。したがって、圧こん高さの減少量に注目すれば、初めの 4 パスで $200\mu\text{m}$ 程度減少しているが、4 パスから 8 パスの間の減少量は $100\mu\text{m}$ 程度となり、減少量が低下していることがわかる。これは、圧こん中心部に加工硬化が生じ、中心部が塑性変形しにくくなるためと考えられる。図 14 には $Q=80\text{W}$ の場合も示しているが、最初 $h_d=200\mu\text{m}$ であった圧こんが 4 パス後に $h_d=60\mu\text{m}$ となり、8 パス後に圧こんはほぼ消えており、矯正加工が緩やかに行われたことがわかる。

5.5 材料表面の熱損傷

図 15(a) に示すように、本加工ではレーザー照射により溶融は起こらないものの材料表面が酸化され、線状の照射痕が残る。しかし、圧こんが矯正されていれば酸化による表面の荒れは特に問題ではなく、例えば図 15(b) に示すように塗装を行えば照射痕は全く見えなくなってしまう。

照射痕の根本的対策は材料の酸化を防ぐことであり、窒素ガス雰囲気や真空中で加工する方法などが考えられ、今後の研究課題である。

6. ステンレス平板への適用

本加工法は、材料に生じる熱応力を利用しているため加工材料の熱的物性値に大きく影響を受ける。ここでは、SS400 より熱伝導率が小さく、熱膨張率が大きい SUS304 板材に対する矯正加工を行ってみた^{*}。

SS400 板材と同様の装置を用いて表 2 の実験条件にて矯正を行った。SS400 材ではレーザーパワーを 100W、ビーム径を 1mm とし加工を行ったが、SUS304 材ではレーザーパワーを 200W、ビーム径を 2mm とし加工している。レーザーパワーは 2 倍になっているが、ビーム径も 2 倍にしていることから、単位面積あたりのパワーは逆に 1/2 と小さくなっている。熱伝導率の小さい材料では十分な温度勾配を持たせることができ、広い領域を加熱することで安定した矯正

加工を行うことができる。逆に、熱伝導率の良い材料に対しては、狭い領域に大きな熱量を加える必要があり、矯正加工がむずかしくなると言える。

SUS304 平板上に作られた圧こんのプロファイルを図 16 に示す。矯正前に $h_d=250\mu\text{m}$ であった圧こんが矯正加工後にはほぼ消えている。図 11(a) に示す SS400 材の結果と比較すると、図 16 ではほぼ完全な平面が得られていることがわかる。熱伝導率が小さく、熱膨張率の大きい SUS304 材に対して、本加工法が非常に有効であることがわかる。

7. 結 言

板材において局部的にできた微小な圧こんを矯正し、元の平面を得ようとする新しい加工法として、レーザーを用いた矯正加工を試みた。その基礎的研究として、SS400 材、及び SUS304 材に鋼球を押しつけて作成した円状圧こんを矯正する方法について検討した。得られた主な結果をまとめると次のようになる。

- (1) 板材に鋼球を押し付けた時の塑性ひずみ分布を有限要素法を用いて調べ、得られたひずみ分布をもとに圧こんに対して有効にレーザーを照射する方法を検討し、照射方向を 90° づつ変化しながら放射状に照射する方法を提案した。
- (2) 放射状に 90° づつ回転してレーザーを照射するとき、照射 1 回ごとに圧こん高さは減少しており、4 回照射して 1 回転することにより偏りない矯正を行なえる。
- (3) 圧こん高さが低い場合には 4 回 1 組の放射状照射を 1 回行うことで矯正可能であったが、高い場合には 4 回 1 組の加工回数を増やす必要がある。加工回数が増えると、矯正速度は低下してくる。
- (4) レーザーパワーを大きくし入熱量を増やせば、少ないレーザー照射回数で矯正が行え、レーザーパワーが小さく入熱量が小さい場合には照射回数を増やす必要がある。
- (5) 熱伝導率が小さく熱膨張率が大きい材料ほど矯正加工がしやすく、SUS304 材では $250\mu\text{m}$ 程度あった圧こんを消すことができ、ほぼ完全な平板を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会 編：矯正加工，コロナ社，(1992)1.
- 2) Y.Namba : Laser Forming of Metals and Alloys, Proceedings of LAMP '87, (1987) 601.
- 3) F.Vollertsen : Mechanisms and models for laser forming, Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94,1, (1994) 345.
- 4) 天田重庚，白井直樹：レーザー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.
- 5) M.Geiger, F.Vollertsen, G.Deinzer : Flexible Straightening of Car Body Shells By Laser Forming, SAE paper.

^{*}SS400: 熱膨張率 $12.1 \times 10^{-6}/\text{K}$, 熱伝導率 $52.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
 SUS304: 熱膨張率 $17.3 \times 10^{-6}/\text{K}$, 熱伝導率 $15.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$