

レーザーによる板材の矯正加工に関する研究

金沢大学 理工研究域 機械工学系

教授 上田 隆司

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008206)

キーワード：レーザー加工，矯正加工，フォーミング

1. 研究の目的と背景

薄板の歪み取りのためには局部加熱であるガス炎や TIG で必要部分を加熱する手法が取られているが，同手法の問題点とし，加熱領域が広域であること，加熱後には水冷処理が必要であること，および自動化や高速化が難しいといった問題がある。

それに対し，レーザーを用いた矯正方法は，熱源をレーザーとすることで熱量の制御が容易であり，また板材の熱伝導による自己冷却作用で冷却出来ることから自動化が可能であると考えられる。さらにレーザーを使用する利点として，スポット径を小さくすることができ，小さな歪みに対応が可能である。さらに，局部的に加熱するため，部品全体を熱変形させずに矯正可能であると考えている^{1,2)}。本研究では，レーザー矯正加工の基礎的研究として SS400 板材に鋼材を押しつけて作製した 3 種類の圧痕の矯正加工について報告する。

2. レーザ矯正加工の原理

図 1 にレーザー照射による矯正の原理を示す。板材に変形が生じたとき，材料は平らな状態に比べ伸びた状態となっている。この伸びを収縮し，変形を矯正することがレーザー矯正の目的となる。

レーザー照射による変形原理を板材の断面の模式図を用いて説明する。レーザーが照射されているときを加熱過程とすれば，(a) 加熱過程に示すように，照射部は加熱され膨張し，圧縮応力が生じる。この応力により塑性ひずみが生じれば，レーザー照射終了後の (b) 冷却過程において板材が収縮する。

本研究では，図 1 (c) のように板材に作成した圧痕に対してレーザー走査を行い，図中の矢印の方向へと材料を収縮させることで矯正を行う。

3. 圧痕の作成

図 2 に圧痕の作成装置概略図，および圧痕を作

成した板材を示す。図のようにゴムシート上に置いた SS400 板材に対して，ロードセルを用いて荷重を測定しながら鋼球 ($R=25$) を押しつけ，板材に円状の圧痕を作成している。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。図 3 に圧痕の凸部が下向きになるように置いたときの座

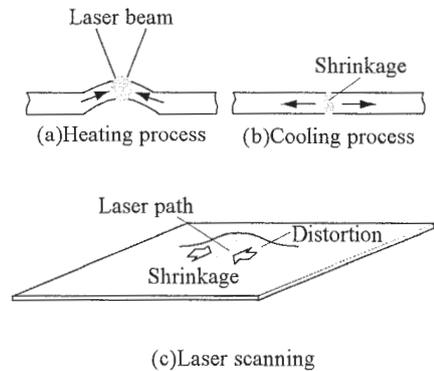


Fig. 1 Mechanism of laser correcting

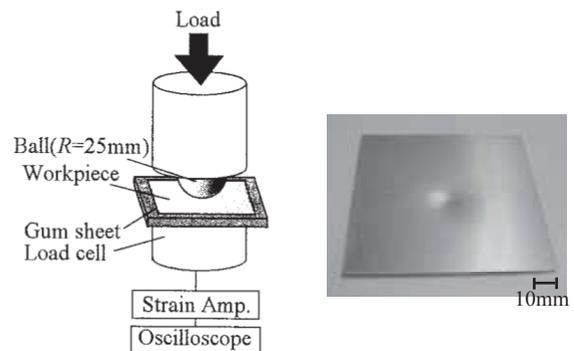


Fig. 2 Method for making distortion

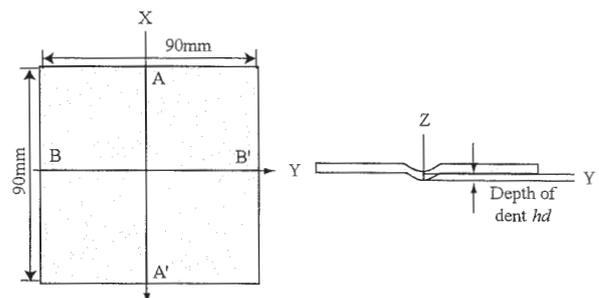


Fig. 3 Coordinate axes of sheet metal

標を示す。圧痕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 にレーザ変位計を用いて測定した圧痕断面のプロファイルを示す。圧痕の形状の対称性を調べるため, 図 3 に示した A-A' 面と B-B' 面の 2 方向で測定を行っている。図から A-A' 面と B-B' 面のプロファイルはよく一致しており方向によってへ偏りのない圧痕が作成できていることが分かる。また, 本研究では図 4 に示すように, 圧痕の頂点の深さを圧痕深さ h_d と定義する。

本研究では, 同様にして円柱 (半径 $R=5\text{mm}$, 長さ $L=20\text{mm}$) の底面および側面を押しつけた圧痕を作成し (図 5, 6), それぞれ矯正可能な条件について調べた。尚, 球を押しつけ作成した圧痕を点圧痕, 円柱の側面を押しつけたものを線状圧痕, 底面を押しつけたものを面圧痕とする。

4. 有限要素法による塑性ひずみの解析

レーザ矯正加工を行うにあたり, レーザの走査パスを決定するため, また矯正メカニズムの解明

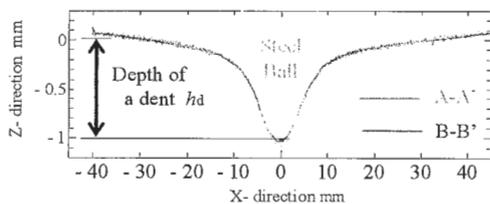


Fig. 4 Profile of distorted SS400 sheet

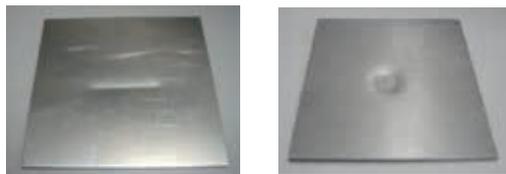


Fig. 5 Photograph of distorted SS400 sheet

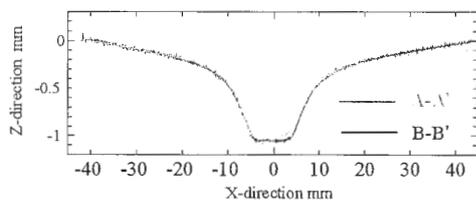
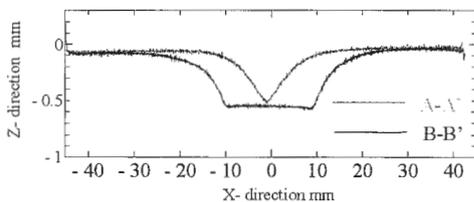
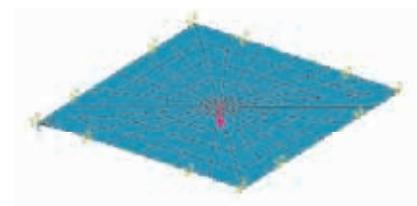


Fig. 6 Profile of distorted SS400 sheet

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。

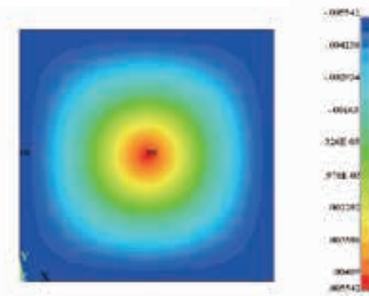
解析に用いたモデル図を図 7(a) に示す。形状は, 実験で用いた板材と同様の $90 \times 90 \times 0.6\text{mm}$ とした。実験では鋼球を押しつけて点圧痕を作成したが, 解析では図に示すように, 板材中央部に点荷重を加えて圧痕を作成する。解析は, 4 節点有限ひずみシェル要素を用いて, 要素数 448 個,



(a) FEM model



(b) Displacement of Z-direction



(c) Distribution of plastic strain

Fig. 7 Results of FEM analysis

Table 1 Experimental conditions

Laser		CO2 laser
Wavelength	m	10.6
Beam diameter D	mm	1.02(df=0)
Laser power Q	W	100
Material		SS400
Feed rate V	mm/s	5
Material size	mm	90*90*0.6

節点数 465 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。

図 7(b) に示した除荷後の Z 方向の変位から、前節で示した圧痕の 3 次元プロファイルと同様に、円形の変位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変位と同様、圧痕の中心部へ向かうほど大きくなっており、中心部で最も大きいことが分かる。このことから、レーザ照射により矯正を行うためには圧痕の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。

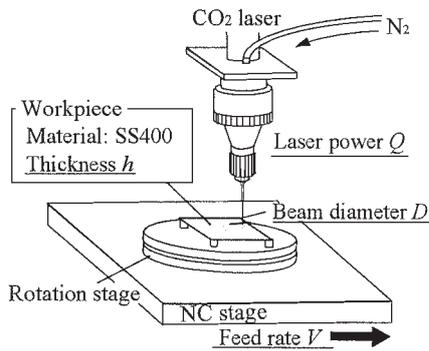


Fig. 8 Experimental set-up

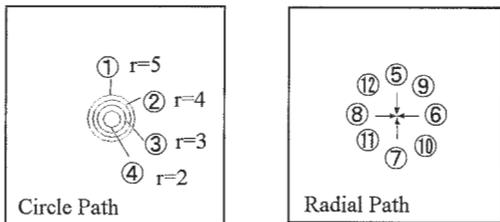


Fig. 9 Laser paths

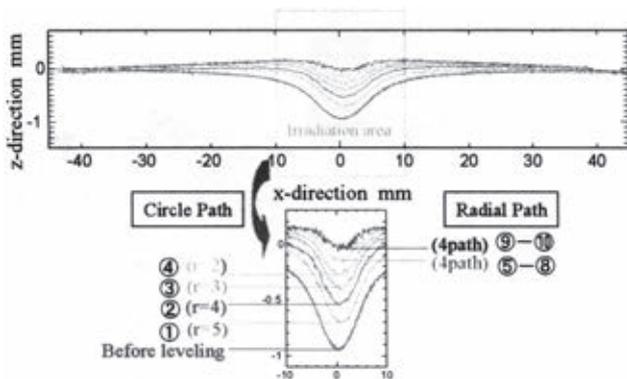


Fig. 10 History of laser leveling

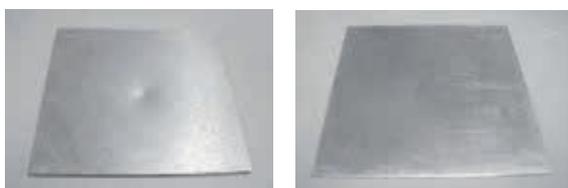
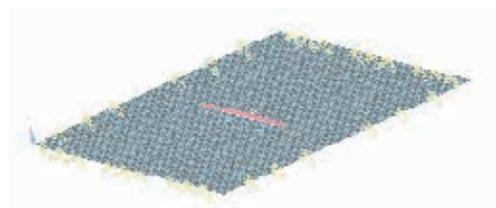


Fig. 11 After leveling of point impression

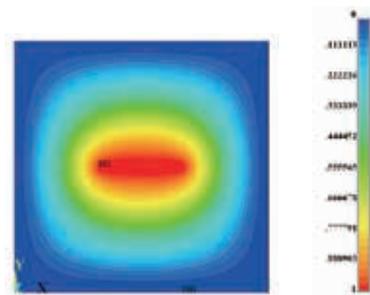
矯正を行う範囲については、解析結果より塑性ひずみの生じている範囲が半径 5mm 程度であることから、レーザ走査を行う領域を半径 5mm と定めた。

5. 矯正加工実験

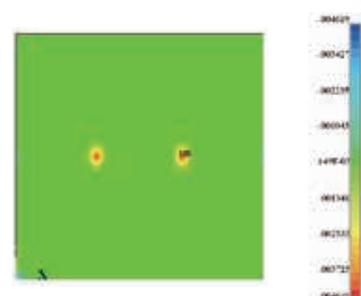
図 8 に矯正加工実験の装置概略図を示す。レーザは連続発振の CO₂ レーザを使用する。あらかじめ圧痕を作成した板厚 $h=0.6\text{mm}$ の SS400 板材を 2 軸の NC ステージ上に固定した回転ステージ上に設置し、レーザをレーザパワー Q で照射しながら、NC ステージを一定の送り速度 V で移動または回転ステージを一定回転数 N で回転させてレー



(a) FEM model



(b) Displacement of Z-direction



(c) Distribution of plastic strain

Fig. 12 Results of FEM analysis

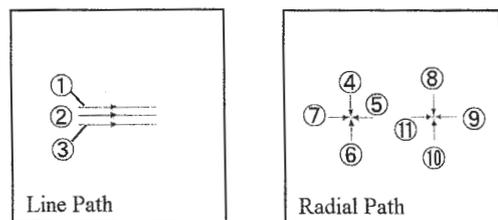


Fig. 13 Laser paths

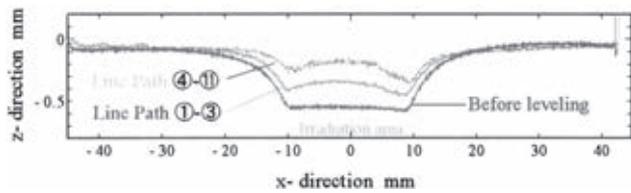


Fig. 14 History of laser leveling

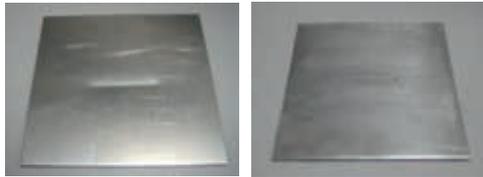
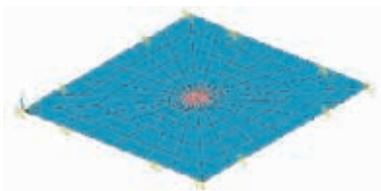
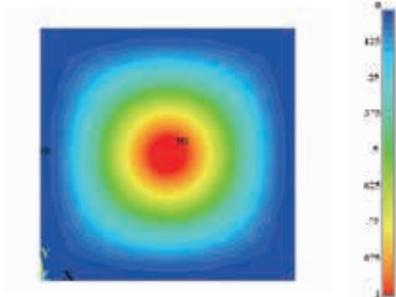


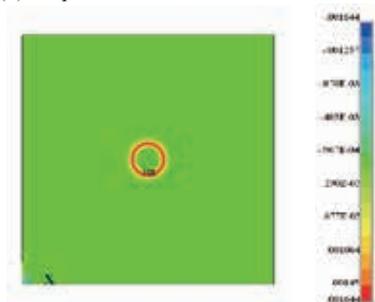
Fig. 15 After leveling of line impression



(a) FEM model



(b) Displacement of Z-direction



(c) Distribution of plastic strain

Fig. 16 Results of FEM analysis

ザ走査を行った。レーザービーム径 D はデフォーカス量によって制御できる。またレーザー加工において、レーザー照射面に形成される酸化膜は表面性状の悪化を招くため、不活性ガスにより酸化を防ぐ必要がある。本研究では、窒素ガスをレーザー照射時に供給することにより酸化膜の形成を防いだ。

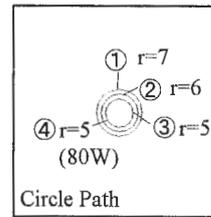


Fig. 17 Laser paths

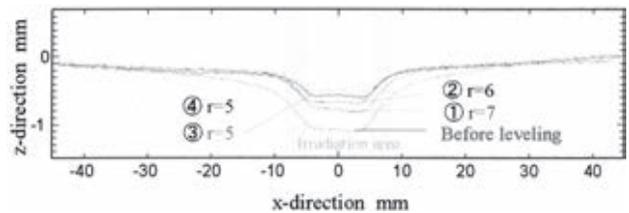


Fig. 18 History of laser leveling

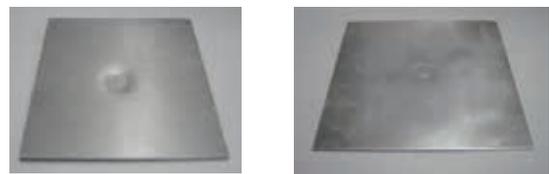


Fig. 19 After leveling of face impression

6. 点圧痕における矯正結果

図9は点圧痕のレーザー矯正におけるレーザーパスを示したものである。まず圧痕を中心に走査半径5mm, 4mm, 3mm, 2mmで同心円状に $Q=100W$, $V=5mm/s$ でレーザー照射を行った。その結果、図10の断面プロファイルの変化から深さ $h_d=1mm$ あった変位は $200\mu m$ 程度まで減少したことが分かる。さらに圧痕の中心部に向けて放射状(時計回り)に8パスレーザー照射し、中心部への入熱量を大きくすることで板材をさらに収縮させ、ほぼフラットな状態にまで近づけることが出来た。このときの表面写真を図11に示す。レーザー照射前、中心部に見られた変形は矯正され、矯正後に酸化膜の形成や溶融は生じていないことが分かる。

7. 線状圧痕における矯正結果

点圧痕同様、線状圧痕における塑性歪みの分布を調べた。図12(a)に示すように、板材中央部に線荷重を与えたモデルを作成し、解析を行った。解析結果より図12(b)に変位、図12(c)に塑性歪みの分布を示す。変位の分布は実際の変形形状と同様の形状となっていることが分かる。塑性歪みの分布より、線状の変形が生じ始める両端部にひ

ずみが集中していることが分かる。図13に示すように線状の圧痕に対し直線パスと放射状にパスを与えることで矯正を試みた。図14に矯正過程における断面プロファイルの変化を示す。圧痕深さ $h_d=500\mu\text{m}$ あった変位に対し直線パスを与えることで変位は $350\mu\text{m}$ まで収縮し、さらに両端部に放射状に照射することで $200\mu\text{m}$ 程度まで圧痕が収縮したことが分かる。このときの表面写真を図15に示す。

8. 面圧痕における矯正結果

面圧痕のレーザー矯正においてまず、変形による塑性歪みの分布を調べた。図16(a)に示すように、板材中央部に面荷重を与えたモデルを作成し、解析を行った。解析結果より図16(b)に変位、図16(a)に塑性歪みの分布を示す。変位の分布は実際の変形形状と同様の形状となっていることが分かる。塑性歪みの分布より、面を押し付けた部分に歪みは見られず、その周囲の変位の勾配部に歪みが集中していることが分かる。この部分にレーザー照射することで圧痕の矯正を試みた。図17に面圧痕における走査パス、図18に矯正過程における断面プロファイルの変化を示す。歪みの集中している半径7mmのところから同心円状に走査半径7mm, 6mm, 5mmでレーザー照射したところ深さ $h_d=1\text{mm}$ あった変位は $500\mu\text{m}$ まで減少したことが分かる。

これに対し、溶融を避けるためレーザーパワーを80Wに下げ、再度半径5mmでレーザー照射したところ、圧痕にさらに収縮を与え矯正することが出来た。このときの表面写真を図19に示す。

9. まとめ

板材において局所的に出来た微小な圧痕を矯正し、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材に鋼材を押し付けて作成した点、線状、面圧痕を矯正する方法について検討した。

謝 辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成(AF-2008206)によって行われたものである。記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

1. Ueda T., Sentoku E., Wakimura Y., Hosokawa A.,: Flattering of sheet metal by laser forming, Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47, 1097-1102.
2. Ueda T., Wakimura Y., Furumoto T., Hosokawa A., Tanaka R.: Experimental investigation on laser flattering of sheer metal Flattering of sheet metal by laser forming, Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49, 137-144.