

データベースを用いた板材のレーザーフォーミング

大津雅亮*

1. はじめに

板材成形の分野では試作や多品種少量生産に適した逐次成形法が数多く開発されており、その一つにレーザーフォーミングがある。レーザーフォーミングは、造船の分野で行われているガスバーナーを用いた局所加熱による板材の曲げ加工法^{1),2)}の応用として、ガスバーナーの代わりに簡単に制御できる高エネルギー密度のレーザーを加熱源に用いた方法であり、近年盛んに研究が行われている^{3),4)}。

レーザーフォーミングでは板材を局所的に急速加熱し、板厚方向に急激な温度勾配を生じさせて、不均一な熱膨張による熱応力で板材を塑性変形させている。しかし、レーザー走査速度が遅い場合、板材の幅方向にも生じる不均一な温度分布の影響が大きくなり、本来は変形させたくないようなねじれ変形が生じる。また、レーザー出力が変動したり、板の表面状態が大きく影響するレーザーエネルギーの吸収率が不均一になると、成形形状がばらついて高精度の加工が行うことができない。

本研究では、加工条件と成形後の板材の曲率のデータベースとロボットハンドを用いて加工工程を制御する。さらに走査ピッチを途中で変更したり、加工を中断して板材を冷却し、加工中の板材の温度分布を低減することにより、板材を安定してねじれ等がなく高精度に成形する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。レーザーは50Wのパルス発振YAGレーザーを用い、発振器から固定台に取付けたレーザービームヘッドまでは光ファイバーケーブルで導く。レーザーエネルギーは光ファイバーケーブル中で減衰して損失するため、ファイバーケーブルの出口で測定した結果は平均出力が37Wであった。発振周波数は100Hz、焦点距離は160mm、レーザービームの焦点直径は0.8mmの条件で加工を行う。

図2に示すように試験片の角部をロボットハンドで把持して、ロボットで把持している反対側から把持している側に向かって往復しながらレーザーを走査する。レーザーのスイッチのON/OFFやロボットハンドの制御はパーソナルコンピュータで行う。

加工後の試験片の三次元形状は、固定台に取付けられたレーザー変位計を用いて試験片の裏側から測定し、測定データもパーソナルコンピュータに取込む。

2.2 試験片

試験片には50mm×50mmに切出した厚さ1.2mmのSUS304の板材を用いる。板表面におけるレーザーの吸収率を均一にするために、板材の表面をエタノールで洗浄するが、カーボ

ンなどの吸収補助剤は用いない。また、レーザー変位計で形状測定を行う際に測定精度を高めるために、白色ペンキを試験片の裏側に塗布する。

2.3 実験手順

試験片をロボットハンドで把持し、図2に示すようにx方向のレーザー走査を往復しながら、ロボットで把持している反対側から把持している側に向かって行って円筒面状に曲げ加工を行う。加工が終了すると試験片をレーザー変位計のところにロボットで移動し、試験片中央部の形状を測定してy方向の曲率分布を計算する。このレーザー走査と形状計測の手順を1

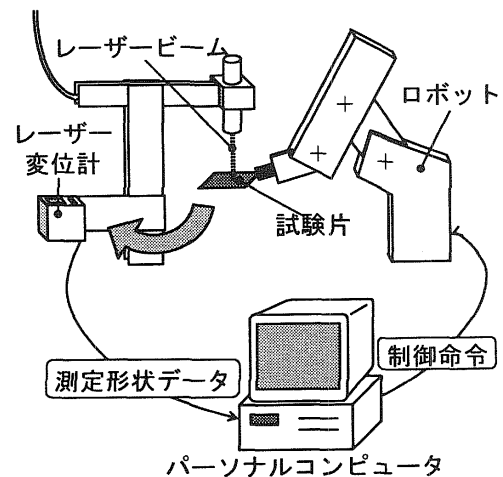


図1 実験装置の概略

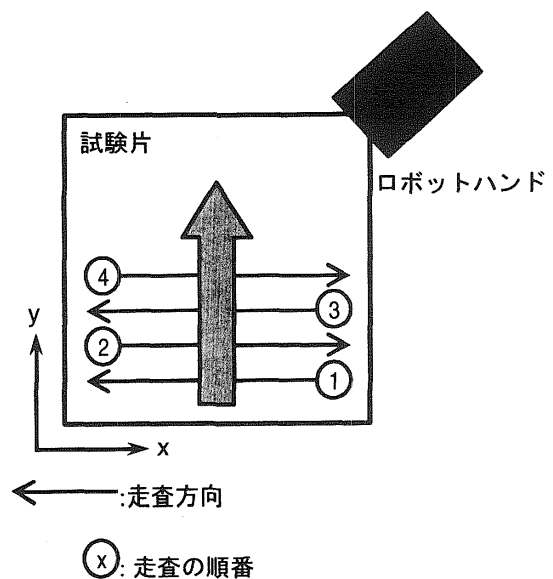


図2 試験片の把持方法とレーザー走査方法

ステージとして、複数ステージの加工を行って曲率分布と曲率増分について調べる。

3. 実験結果

3.1 照射位置, 焦点距離, 照射角の調整

レーザーを照射する際に試験片の変形を考慮していないと、加工ステージが増えるにしたがって各ステージにおける板材の曲率増分が減少する。これは図3(a)に示すように、板材の変形量が大きくなって、一定の焦点距離や照射角で加工ができなくなり、照射されるレーザーのエネルギー密度が減少するためである。また、レーザーの照射位置も変わってしまうために正確に加工を行うことができない。加工精度を向上させるためには図3(b)に示すように、レーザーの照射位置が正しく、焦点距離、照射角が一定となるようにする必要がある。

前の加工ステージにおける板材の形状測定結果を用いて、ロボットハンドの位置と姿勢を調整すれば、正しいレーザー照射位置で焦点距離、照射角を一定とすることが可能である。照射位置や焦点距離、照射角を調整しない場合(図3(a))と調整した場合(図3(b))についてそれぞれの平均曲率を比較した。

図4、図5にそれぞれ走査ピッチが0.6mmのときの照射位置、焦点距離と照射角の調整が平均曲率、平均曲率の増分におよぼす影響を示す。平均曲率は照射位置、焦点距離、照射角の調整をした場合と、調整しない場合ともに加工ステージ数が増加するにつれてほぼ等しく直線的に増加しているが、調整

をしない場合は加工ステージ数が大きくなると調整した場合よりも平均曲率は小さくなった。また、1ステージ目の曲率増分は2ステージ目以降の増分に比べると小さくなっている。これは一度レーザーが照射されて表面がわずかに熔融するとレーザーの吸収率が増加するためと考えられる。曲率増分は加工ステージ数が大きくなると、調整をしない場合は減少するが、調整をした場合はほぼ一定となっている。

3.2 円筒面成形のデータベース

任意の曲率を持つ円筒面の形状に成形する最適加工条件を決定するために、加工条件と平均曲率増分の関係のデータベースを作成する。1ステージ目の曲率増分はそれ以降のステージの曲率増分よりも小さいが、2ステージ目以降で修正が可能のため、2ステージ目の加工条件と平均曲率増分の関係のデータベースを作成する。データベースを作成するために使用する板材は、あらかじめ走査速度40mm/s、走査ピッチ0.3mmで

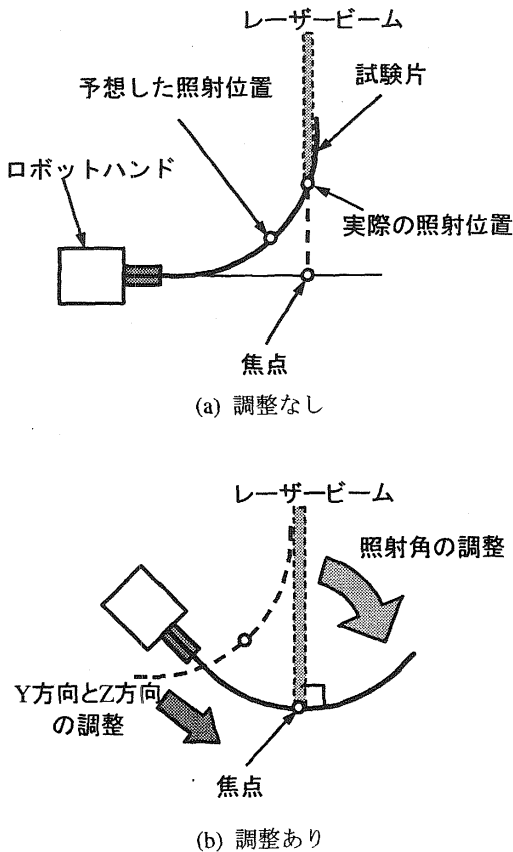


図3 照射位置, 焦点距離, 照射角の調整

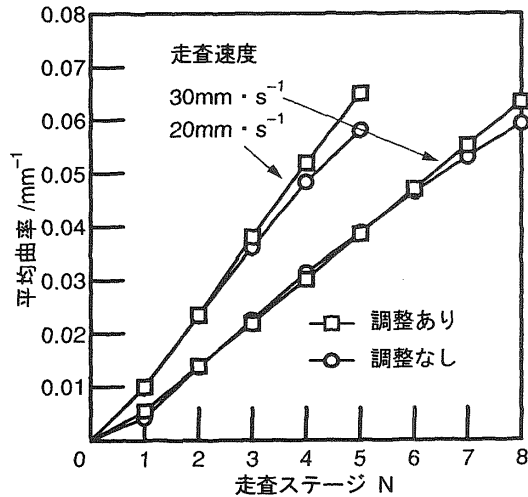


図4 照射位置, 焦点距離, 照射角の調整の有無が平均曲率におよぼす影響($p=0.6\text{mm}$)

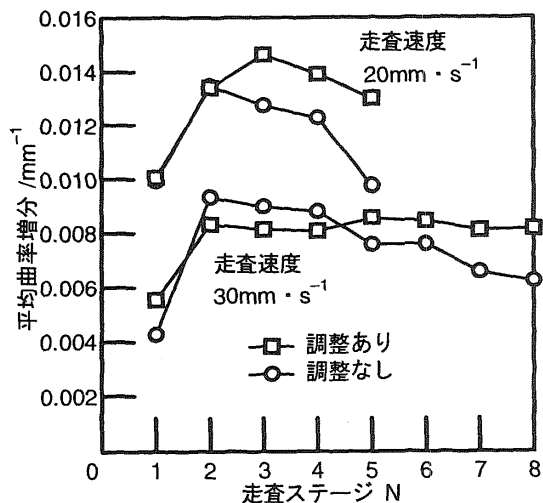


図5 照射位置, 焦点距離, 照射角の調整の有無が平均曲率増分におよぼす影響($p=0.6\text{mm}$)

レーザーを照射して表面がわずかに熔融したものをを用いる。簡単のためにレーザー出力は固定し、走査速度と走査ピッチを変えてデータベースを構築する。

データベースの作成においては照射位置、焦点距離と照射角が一定となるように調整する。得られた平均曲率増分と走査ピッチの関係(図6)をデータベースとして保持する。加工条件を決定する際には、目標の平均曲率増分に対応した走査速度と走査ピッチをデータベースの中から探し出す。所望の平均曲率増分がデータベース中になく場合は内挿して加工条件を決定する。

3.3 データベースと制御を用いた加工方法

板材を一度に大きく変形させると、板面内に大きな温度分布が生じるため、ねじれ変形が生じる。また、レーザー出力の変動やレーザー吸収率の不均一から同じ加工条件を用いても成形形状のばらつきが大きいことがある。大きなねじれ変形が生じたり、成形量のばらつきによって目標形状よりも多く加工してしまうと、修正することが困難になるため、段階的に少しずつ加工する必要がある。板材を段階的に目標曲率に成形するために以下の手順で加工を行う。

1. 現在の平均曲率 c_p と与えられた目標曲率 c_o との差 $\Delta c = c_o - c_p$ を計算する。
2. $\Delta c < \varepsilon$ ならば成形を終了する。本研究では $\varepsilon = 0.001 \text{ mm}^{-1}$ に固定する。
3. 目標曲率を越えないように徐々に近づけるために修正係数 r ($0 < r < 1$) を導入する。 Δc と r の積を次のステージの曲率増分 c_i ($c_i = r \Delta c$) とする。本研究では $r = 0.6$ とした。
4. 曲率増分が c_i となる加工条件をデータベースから求めてレーザーを走査する。
5. レーザー走査後に板材の形状を測定して、加工後の平均曲率 c_p を計算し、手順1に戻る。

異なる目標曲率に成形したときの平均曲率の履歴を図7に示す。加工ステージ数が増加するにしたがって平均曲率は徐々に目標曲率に近づいている。一度レーザーを照射して表面をわずかに熔融した板材でデータベースを作成したため、1ステージ目の平均曲率は予想曲率よりも小さくなっているが、2ステージ目以降では予想曲率と成形曲率は一致している。目標曲率と実際の平均曲率の差は目標曲率が 0.03 mm^{-1} , 0.04 mm^{-1} のときにそれぞれ $2.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$ ($\Delta c/c_o = 0.092\%$), $1.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$ ($\Delta c/c_o = 0.025\%$) であった。目標曲率が 0.02 mm^{-1} のときの曲率差は $2.9 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ ($\Delta c/c_o = 1.5\%$) であった。

4. 曲率の不均一分布の低減

4.1 曲率分布

走査速度は 20 mm/s 、走査ピッチは 0.6 mm で5ステージ加工を行ったときのレーザー走査の開始点から終了点 (20 mm) の曲率分布を図8に示す。焦点距離と照射角を調整しない場合と調整した場合を示している。曲率は走査開始点から終了点まで単調に増加しており、焦点距離と照射角を調整した場合の方が走査開始点と終了点の曲率差が小さくなった。

目標曲率が 0.04 mm^{-1} の場合について、3.3節で示したデータ

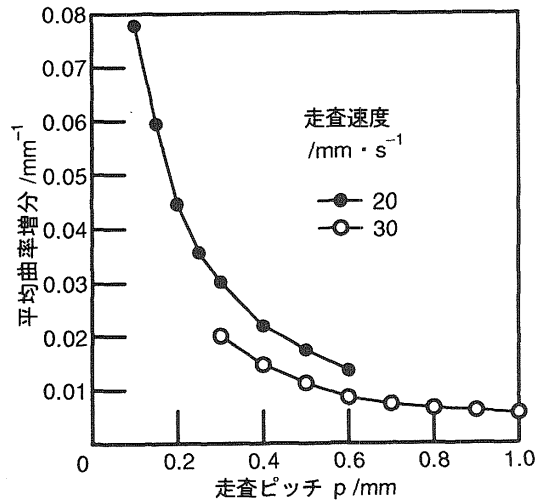


図6 データベースに用いた走査ピッチと平均曲率増分の関係

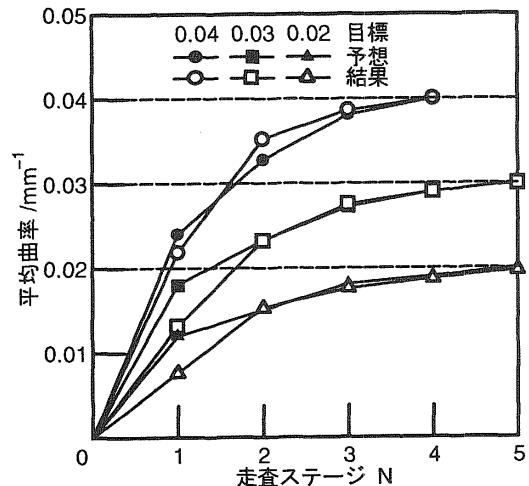


図7 データベースを用いた自動成形による成形曲率の変化

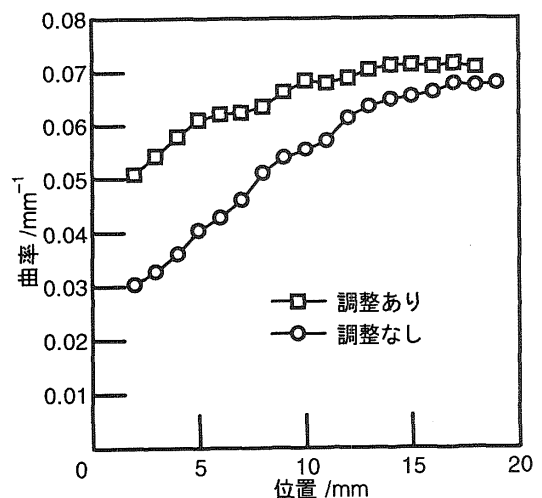


図8 照射位置、焦点距離、照射角の調整が曲率分布におよぼす影響 ($v = 20 \text{ mm/s}$, $p = 0.6 \text{ mm}$, $N = 5$)

ベースと制御を用いた加工によるレーザー走査の前半部(0mmから10mmまで)と後半部(10mmから20mmまで)の平均曲率を比較した。それらの平均曲率の差と加工ステージ数の関係を図9の丸印(○)で示す。曲率差は全体の平均曲率で除して無次元化している。4ステージ目では全体の平均曲率は目標曲率とほぼ一致しているが、曲率差が39%と非常に大きくなった。

4.2 可変走査ピッチ

全体の平均曲率に対してデータベースを作成しても、図8に示すように不均一な曲率分布があり、成形精度を向上するためには曲率分布をより均一にする必要がある。曲率分布の不均一を低減するためにレーザー走査中に加工条件を変更する。簡単な試みとして走査ピッチをレーザー走査の前半部と後半部で変更する。後半部の曲率は前半部よりも大きくなるため、前半部の走査ピッチをデータベースよりも小さくし、後半部の走査ピッチをデータベースよりも大きくする。

前半部、後半部の走査ピッチ p_1, p_2 は次の加工ステージでの曲率増分量に反比例するように、以下の式を用いて決定する。

$$p_1 = p_0 \Delta c_0 / \Delta c_1 \quad (1)$$

$$p_2 = p_0 \Delta c_0 / \Delta c_2 \quad (2)$$

ここで $\Delta c_1, \Delta c_2$ はそれぞれ前半部、後半部の次ステージで増加させたい曲率である。 Δc_0 は板全体で増加させる曲率であり、 p_0 は Δc_0 の曲率増分に対するデータベースから計算された走査ピッチである。 p_1, p_2 を用いることによって全体の走査数は変わらないため、板全体の平均曲率増分は変わらない。

可変走査ピッチを用いたときの曲率差を図9の四角印(□)で示す。1ステージ目の前半部と後半部の曲率差をもとに2ステージ目の走査ピッチを変えるため、2ステージ目以降で可変走査ピッチを用いた方が固定走査ピッチで加工したものよりも曲率差は小さくなっている。4ステージ目では曲率差は5.2%であり、固定走査ピッチの場合の約1/7となった。しかしながら曲率差と全体の平均曲率を比較すると $\Delta c/c_0 = 0.13\%$ であり、まだ偏差は大きい。

4.3 途中冷却

4.3.1 冷却時間の影響

板材にレーザーを照射すると板材の温度は徐々に上昇するとともに曲率増分は大きくなるため、前半部と後半部の曲率差は大きくなる。そこで、レーザー走査の開始点と終了点の板材の温度差を小さくするために、レーザー走査の中間位置まで加工すると、一時走査を停止し、板材を冷却してから再び走査を開始する。

走査速度20mm/s、走査ピッチ0.3mmで加工を行い、途中で冷却を行ったときの前半部、後半部の曲率差と冷却時間の関係を図10に示す。途中で冷却を行わなかった場合は曲率差が6%となっていたが、冷却時間が長くなるにつれて曲率差は小さくなり、120秒以上冷却しても曲率差はほとんど変わらず0.5%以下となった。板材裏側の中心部の温度は前半部を走査した直後は199°Cであったが、120秒間冷却した後は89°Cとなった。

4.3.2 途中冷却の適用

途中冷却のためにレーザー走査を停止すると曲率の不均一

分布の減少には有効であるが、加工時間は増加する。そこで、加工時間を短縮するために冷却中に前半部の形状測定を行った後、レーザー走査を再開する。形状測定には約4分かかるため、板材は十分に冷却されており均一な曲率分布が得られる。後半部の走査後にも同様に後半部の形状測定を行う。

照射位置、焦点距離と照射角の調整、可変走査ピッチ、途中冷却をすべて適用して加工を行った結果を図9の三角印(△)で表す。1ステージ目では曲率差は0.20%で途中冷却を行わなかったもの(19%)と比べて非常に小さくなったが、ステージ数が多くなるにつれて曲率差は大きくなった。4ステージ目では曲率差は3.6%で焦点距離と照射角を一定にした場合(39%)の1/10以下となり、曲率の不均一分布を大幅に低減することができた。

5. まとめ

ロボットハンドを用いた自動制御のレーザーフォーミングにより板材を円筒面に成形した。加工条件の決定にはデータ

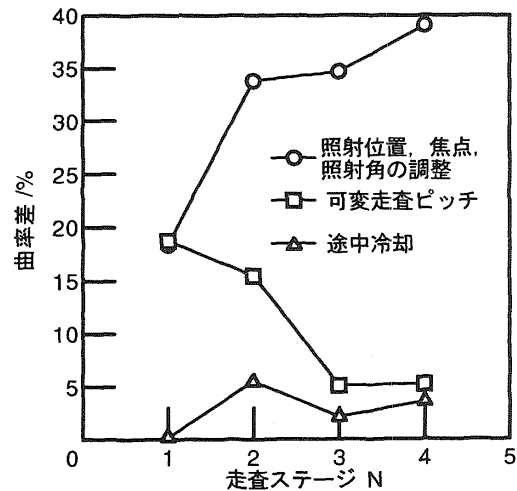


図9 照射前半部と後半部の曲率差

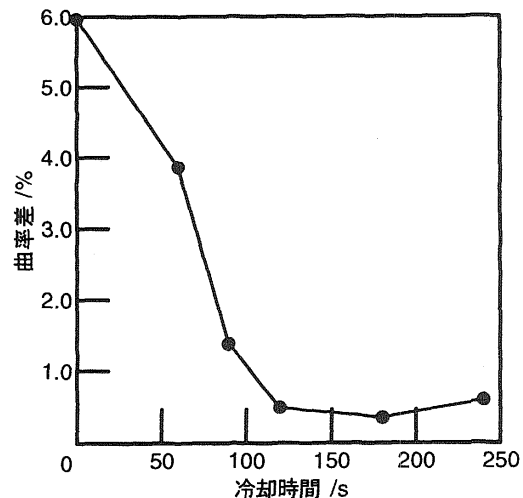


図10 途中冷却時間と曲率差の関係(平均曲率 0.028mm^{-1} , $v=20\text{mm/s}$, $p=0.3\text{mm}$)

ベースを用い、全体の平均曲率だけでなく、曲率分布も考慮して制御を行った。インライン形状測定によりレーザー照射位置、焦点距離、照射角を調整し、さらに可変走査ピッチや途中冷却を行うことによって、曲率の不均一分布を大幅に低減することができた。

本研究では加工の前半部と後半部の2回に分けて成形したが、さらに多く分割することにより曲率の不均一分布を小さくできると考えられる。また、本研究で提案した方法を拡張すれば、円筒面だけでなくその他の形状に加工する際にも、高精度に成形することが可能になると考えられる。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天田金属加工機械技術振興財団の平成11年度奨励研究助成を受けたことを付記し、同財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Holt, R.E.: *Welding J.*, (1971), 416-424.
- 2) Yang, G.: *Doctor Thesis. Osaka University*, (1995), 80-100.
- 3) Namba, Y.: *Proc. Int. Conf. Lasers '85*, (1986), 403-407.
- 4) Scully, K.: *J Ship Production*, 3-4 (1987), 237-246.
- 5) Geiger, M. & Vollertsen, F.: *Ann. CIRP*, 42-1 (1993), 301-304.
- 6) Vollertsen, F., Komel, I. & Kals, R.: *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 3 (1995), 107-119.
- 7) Magee, J., Watkins, K.G., Steen, W.M., Calder, N.J. Sidhu, J. & Kirby, J.: *J. Laser Applications*, 10-4 (1998), 149-155.
- 8) Yau, C.L., Chan, K.C. & Lee, W.B.: *J. Mater. Process. Technol.* 82 (1998), 117-121.