

データベースを用いた板材のレーザーフォーミング

大阪大学大学院 基礎工学研究科
助手 大津雅亮
(平成 11 年度奨励研究助成 AF-99023)

キーワード：レーザーフォーミング，曲げ加工，データベース

1. 研究の目的と背景

板材成形の分野では多品種少量生産やプロトタイプングに適した多くの逐次成形法が開発されており、ハンマーやスティック、ボールローラーなどの簡単な形状の工具や、ウォータージェットなどを用いて板材を成形している。また、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^{1), 2)}による板材の曲げ加工も逐次成形と考えることができる。加熱法をガスバーナーからその他の制御可能な物に変更すれば、板材のプロトタイプングに適用できる可能性がある。最近では簡単に制御できる高エネルギー密度の熱源としてレーザーを用いたレーザーフォーミング³⁾⁻⁸⁾の研究が盛んに行われるようになってきている。

レーザーフォーミングでは板材を局部的に高速加熱し、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、板にはねじれが生じる。さらに、レーザー出力の変動や板の表面状態が不均一であると成形形状がばらつき、レーザーフォーミングでは高精度の加工が行えない。

本研究では、板材を安定してねじれ等がなく高精度に成形するために、ロボットハンドと加工条件と成形後の板材の曲率のデータベースを用いて加工工程を制御する。

2. 実験方法

50 W のパルス発振 YAG レーザーを用い、発振周波数 100 Hz、焦点距離 160 mm、レーザービームの焦点直径 0.8 mm で加工を行った。レーザーエネルギーは光ファイバケーブル中で損失するためファイバケーブルの出口で測定した結果、平均出力は 37 W であった。

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。レーザーは発振器から光ファイバケーブルで導き、レーザービームヘッドを固定台に取付け、Fig. 2 示すように試験片の角部をロボットハンドで把持する。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を試験片の裏側から測定するために、レーザー変位計を固定台に取付け、測定データもパーソナルコンピュータに取込む。

試験片には 50 mm × 50 mm に切出した厚さ 1.2 mm の SUS304 を用いる。レーザーの吸収率を均一にするために、

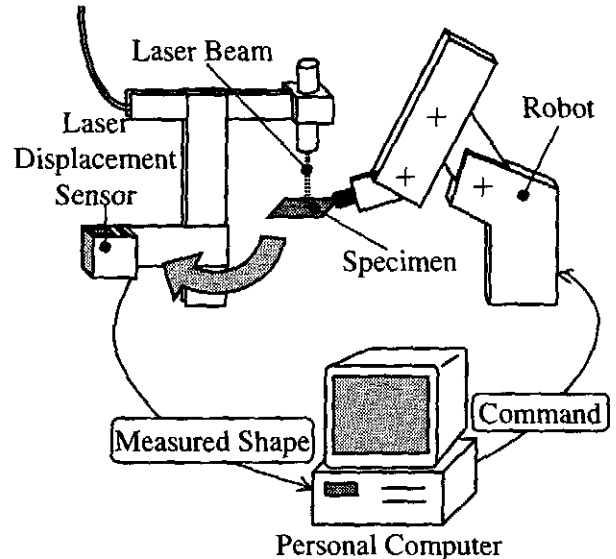


Fig. 1 Experimental apparatus for automatically controlled laser forming with shape measurement and using database.

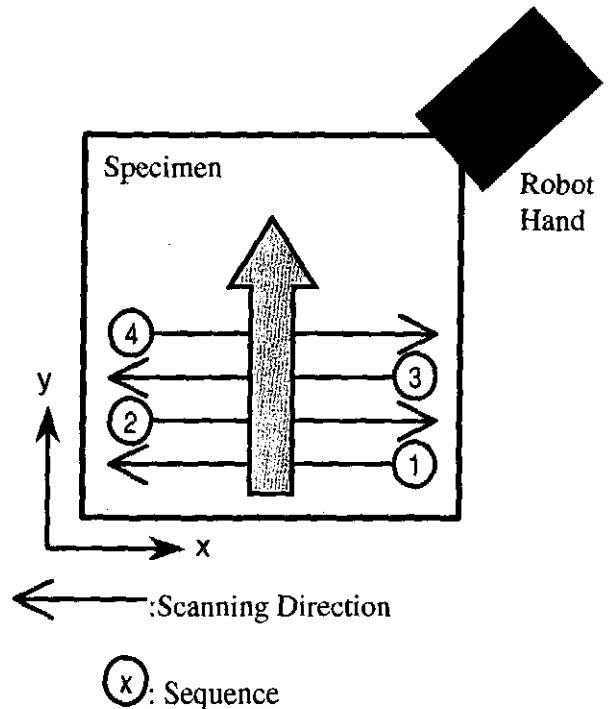


Fig. 2 Methods for gripping specimen and scanning laser beam.

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。

レーザーを走査するための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。レーザーは Fig. 2 に示すように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って走査し、レーザー走査後に試験片の形状を測定する。レーザー走査と形状測定で1ステージとして、複数ステージの加工を行う。

3. 実験結果

3.1 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曲率増分が減少する。これは Fig. 3(a) に示すように、板材の変形量が大きくなり、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正確に加工を行うことができない。加工精度

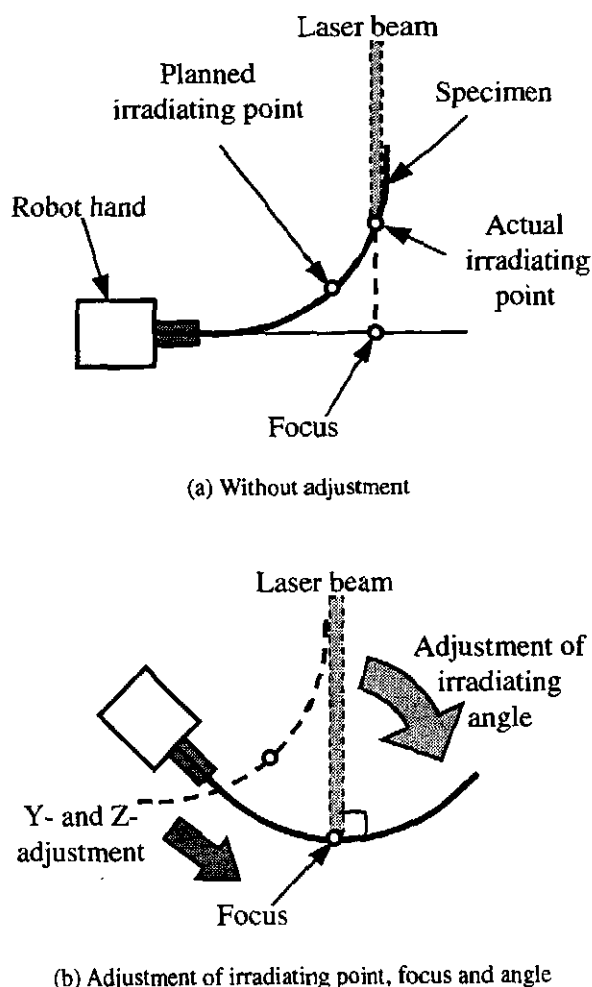


Fig. 3 Method of adjustment of irradiating point, focus and irradiating angle.

を向上させるためには Fig. 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。

前ステージの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。焦点距離、照射角を調整しない場合(Fig. 3(a))と調整した場合(Fig. 3(b))についてそれぞれの平均曲率を比較した。

Fig. 4, Fig. 5 に走査ピッチが 0.6 mm のときの焦点距離と照射角の調整が平均曲率、平均曲率の増分に及ぼす影響を

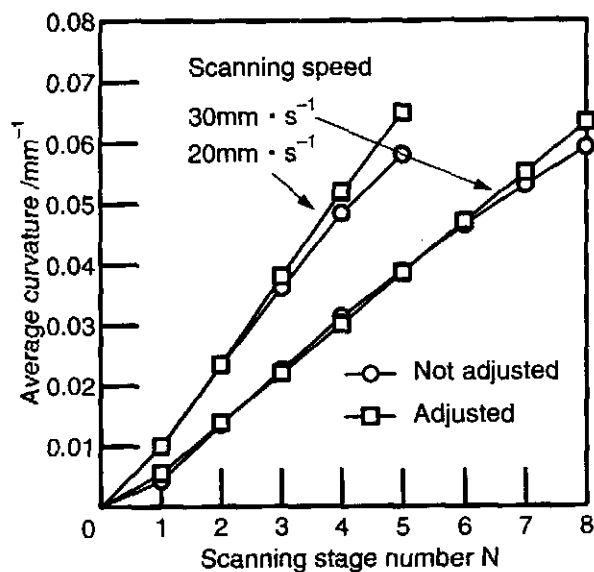


Fig. 4 Effect of adjustments of irradiating point, focus and irradiating angle on average curvature. ($p=0.6$ mm)

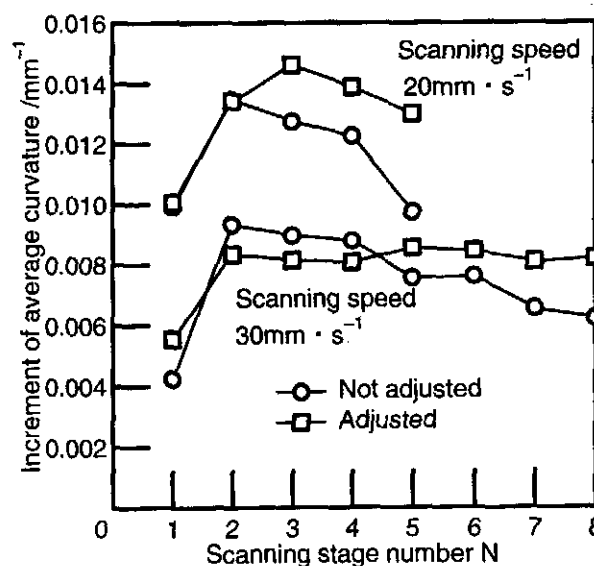


Fig. 5 Effect of adjustments of irradiating point, focus and irradiating angle on increment of average curvature. ($p=0.6$ mm)

示す。平均曲率は焦点距離、照射角の調整をした場合、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が、これは一度レーザーが照射されて表面がわずかに溶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。

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 40 mm/s、走査ピッチ 0.3 mm でレーザーを照射して表面がわずかに溶融したものを用いる。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 (Fig. 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がない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

板材を段階的に目標曲率に成形するために以下の手順で成形する。

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. $\Delta c < \epsilon$ ならば成形を終了する。本研究では ϵ を 0.001 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 Fig. 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溶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目標曲率よりも小さくなっているが、2ステージ目以降では目標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 Fig. 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

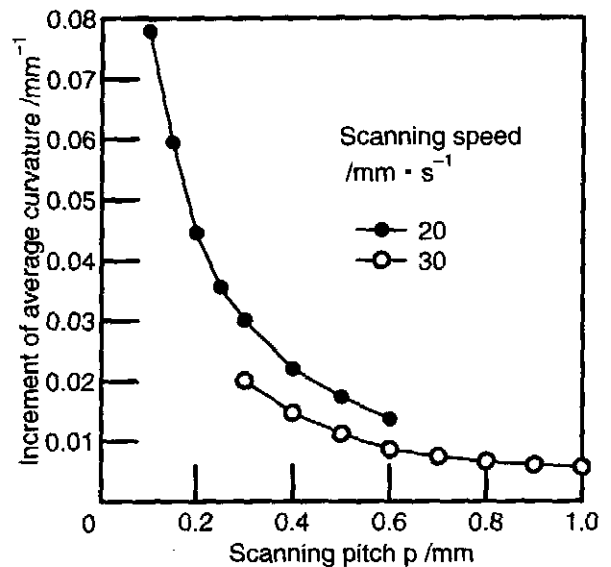


Fig. 6 Relationship between increment of average curvature and scanning pitch stored in database.

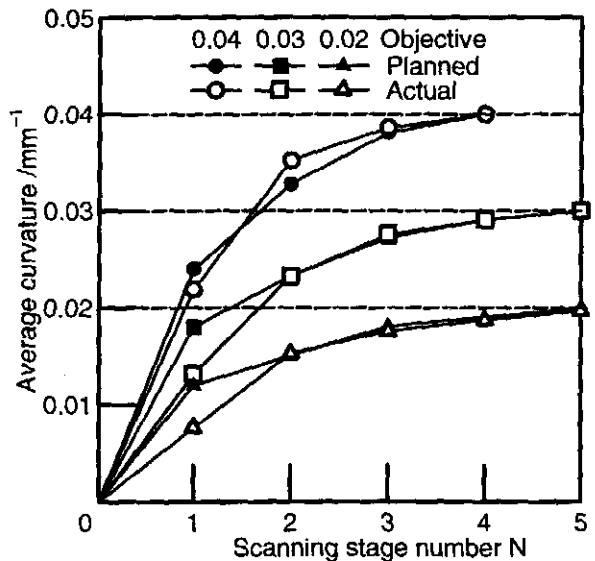


Fig. 7 History of average curvature for forming cylindrical shape by automatically controlled laser forming with adjustments of irradiating point, focus and irradiating angle.

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(0 mmから10 mmまで)と後半部(10 mmから20 mm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 Fig. 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、Fig. 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。曲率分布の不均一さ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。

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

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

ここで Δc_1 , Δc_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 Fig. 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 20 mm/s 、走査ピッチ 0.3 mm 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 Fig. 10 に示す。途中で冷却を行わなかった場合は曲率差は6%であったが、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 $199 \text{ }^\circ\text{C}$ であったが、120秒間冷却した後は $89 \text{ }^\circ\text{C}$ 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

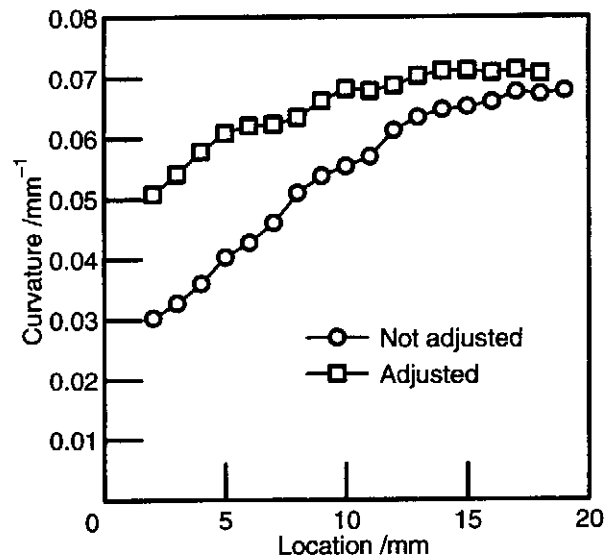


Fig. 8 Effect of adjustments of irradiating point, focus and irradiating angle on curvature distributions. ($v=20 \text{ mm/s}$, $p=0.6 \text{ mm}$, $N=5$)

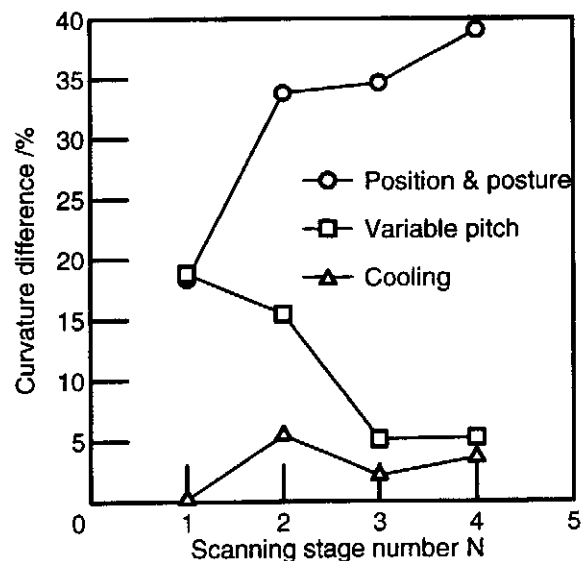


Fig. 9 Variations of curvature difference of sheet between first and second halves with scanning stage number.

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。

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 Fig. 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%で焦点位置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。

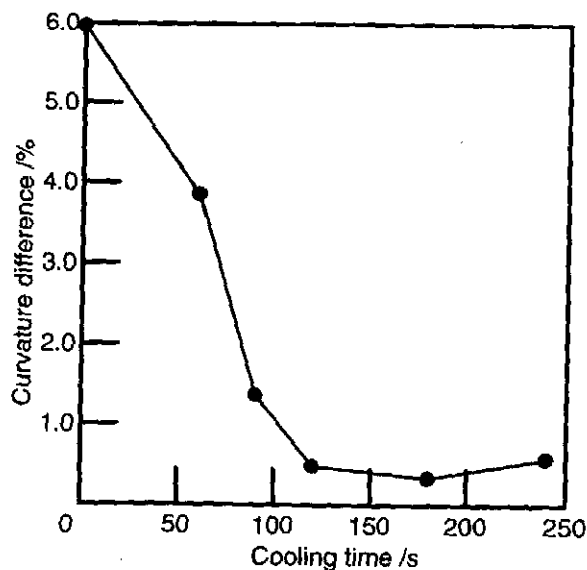


Fig. 10 Effect of cooling time on average curvature difference between first and second halves. (Average curvature of 0.028 mm^{-1} , $v=20 \text{ mm/s}$, $p=0.3 \text{ mm}$)

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点、焦点距離、照射角を調整し、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低減することができた。

本研究で提案した方法を拡張すれば、円筒面だけでなく任意形状を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. & Kais, 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.