

レーザフォーミング加工に関する基礎的研究(第2報)*

千徳英介*** 上田隆司** 山田啓司** 細川 晃**

Basic Study on Laser Forming (2nd Report)

Eisuke SENTOKU, Takashi UEDA, Keiji YAMADA and Akira HOSOKAWA

Laser forming of a sheet metal is the bending process caused by the thermal stresses which is produced in the sheet by laser irradiation. Therefore, the temperature distribution in the sheet irradiated with laser beam is one of important factors to determine the bending angle of the sheet. In this study, the influence of temperature distribution and the experimental conditions like the diameter of laser beam and the thickness of a sheet on the bending angle is investigated experimentally. The temperatures of a surface irradiated with CO₂ laser and its opposite surface are measured using an infrared radiation pyrometer with an optical fiber. As a result, the bending angle is directly proportional to the temperature T_s at the sheet surface irradiated with laser beam and the beam diameter D , and inversely proportional to the thickness h of the sheet. A parameter indicated by $D^{1.41} T_s^{1.5} / h^{1.7}$ has high correlation with the all bending angles obtained under various experimental conditions.

Key words : laser forming, CO₂ laser, temperature measurement, two-color pyrometer, optical fiber, thermal stress

1. 緒 言

レーザフォーミング加工は、レーザ光を熱源として金属材料を局部的に加熱し、そのときに発生する熱応力を積極的に利用した塑性加工法のひとつである。一般的な塑性加工法であるプレス加工などに比べ、高価な金型を必要としないために多品種少量生産における加工コストを抑制できる。また、その他の熱応力を利用した塑性加工法として、造船の分野ではガスバーナを熱源とした線状加熱板曲げ加工が古くから実用化されており、ローラやプレスによる曲げ変形の形状修正、複雑な曲面の生成などに用いられている。しかし、水冷の必要性などから作業には高度な熟練が必要とされるため、入熱量の制御が容易なレーザ光を用いることによる加工の自動化が期待されている。

これまで、自由曲面の生成¹⁾、様々な金属材料の加工²⁾、FEMを用いたシミュレーション³⁾など多くの研究がなされており、変形には様々なパラメータが複雑に関係していることが知られている。特に、熱応力の発生に大きく関わる加工部温度は大変重要である。しかし、レーザ加工部の温度変化は局部的であるため精度のよい測定が困難であり、解析的に求めた例⁴⁾は多いが実験的に求めた例はまだまだ少ない。

そこで、本研究では光ファイバ型2色温度計を用いて加工部の温度測定をおこなうことにより、加工部温度を変形量を制御するための制御信号として用いることの可能性を検討することを目的としている。前報⁴⁾では板材のフォーミング加工における変形角度と加工部温度 T 、表裏温度差 ΔT 、熱膨張率 β 、板厚 h 、加熱領域などの加工パラメータとの関係を示す式を次元解析より導き、光ファイバ型2色温度計による加工部裏面の温度測定実験及びFEMを用いた温度解析によって加工部温度の影響について式の妥当性を示した。

本報では、フォーミングの代表的な変形メカニズムである

TGM(Temperature Gradient Mechanism)を取り上げ、2組の光ファイバ型2色温度計を用いて加工部の温度を表面、裏面から同時に測定し、加工部温度や表裏温度差が変形角に及ぼす影響を定量的に検討すると共に、板厚、加熱領域などの加工パラメータの変形角への影響についても調べてみた。

2. 実験方法

2.1 実験装置および実験条件

図1に実験装置の概略図、表1に実験条件を示す。加工物を片持ち状態に固定したX-Yステージを一定の送り速度 V で移動させ、CO₂レーザ光を連続照射して加工を行う。同時に加工部と加工部裏面の温度を測定している。加工物にはSUS304板材を用いており、表面をサンドブラスト処理してレーザの吸収率を高めると同時にそのばらつきを抑えている。レーザパワー Q 、送り速度 V 、ビーム径 D 、板厚 h をそれぞれ変化させて加工実

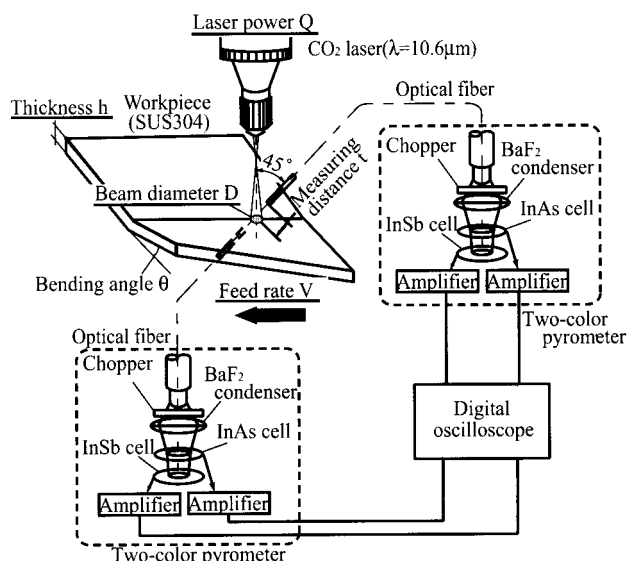


Fig.1 Scheme of experimental apparatus

* 原稿受付 平成16年7月23日
 ** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)
 *** 学生会員 金沢大学大学院

験を行い、そのときの表面温度 T_s 、裏面温度 T_b を測定した。変形角 θ の測定は、通常1パス($N=1$)後、レーザ変位計を用いて行っているが、変形の小さな厚板の場合のみ走査回数 $N=10$ パス後 θ を測定している。

2.2 温度測定

加工中の加工部温度測定には、図2に示す光ファイバ型2色温度計を用いる。光ファイバにはNSGカルコゲナイド光ファイバ(コア径 400 μ m)を使用する。本温度計は測定対象物から輻射される赤外線が光ファイバにより受光し、チョッパー、集光レンズを介して2色素子へと伝送する。素子はInSb上にInAsを積層した構造を有し、表層のInAs素子には3 μ m以下の波長の赤外線が吸収され、InAs層を透過した3~5.5 μ mの赤外線がInSb素子に吸収され、それぞれ電気信号に変換される。両素子からの出力は増幅後、デジタルオシロにて記録される。図3にInSb, InAsそれぞれの素子からの出力の比と、その時の温度

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Material		SUS304
	Dimensions	mm	20×50
	Thickness h	mm	0.3~5
	Blasting grain		WA#320
Forming conditions	Laser power Q	W	60~1100
	Beam diameter D	mm	1.42~3.42
	Feed rate V	mm/s	2.5, 5, 10
Measuring condition	Measuring distance t	mm	4,8

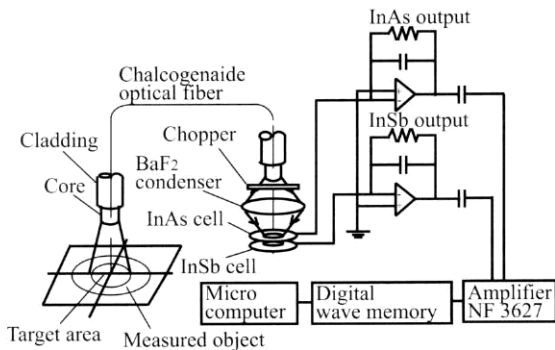


Fig.2 System of two-color pyrometer

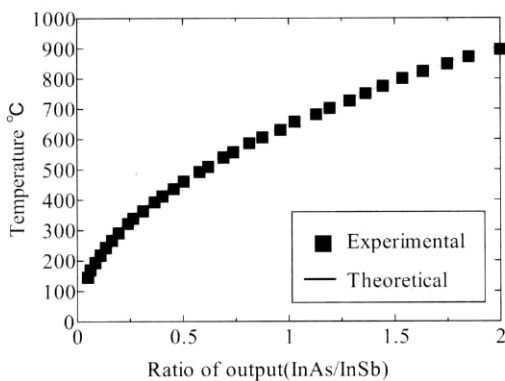


Fig.3 Calibration curve of two-color pyrometer

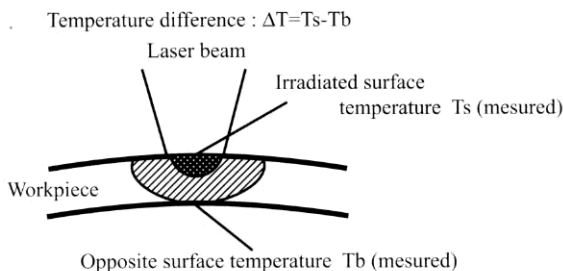


Fig.4 Illustration of temperature measuring

の関係を示す。シンボル黒四角は温度計の実験結果であり、実線は理論的に求めた温度計の感度曲線⁵⁾を示している。この図から実験値と理論曲線は良く一致しており、この校正曲線を用いて温度を求めることが出来る。

図1に示すように、2本の光ファイバをそれぞれレーザ照射部中心と照射部裏面に向け、レーザ光軸に対し45°傾斜させて設置している。受光面から測定点までの距離 t は原理的に測定温度に影響しないことから、一般に4mmとした。本実験では加熱部と光ファイバの位置関係が変化しないことから、常に加熱部の温度測定を行うことができる。測定温度を図4のように定義して、加工部表面温度 T_s 、裏面温度 T_b から、表裏温度差 ΔT を算出する。

2.3 サンドブラスト処理

レーザ吸収率を高めるために、吸収剤を塗布する代わりに、加工物表面にサンドブラスト処理を施してレーザ吸収率を高めた。ブラスト加工を施した材料表面の吸収率を測定しているが、吸収率の測定には図5に示す積分球を用いた。積分球にはCO₂レーザに対して高い反射率をもつ無酸素銅(反射率:98%)⁶⁾を用い、次式より吸収率を算出している。

$$\alpha_w = 1 - R_w = 1 - \frac{V_w \cdot R_R}{V_R} \tag{1}$$

ここで、 α_w は吸収率、 R_w は試料表面の反射率、 R_R は反射光の理論反射率、 V_w は試料を設置した場合の測定出力、 V_R は反射光を測定した出力であり、リファレンス材料には積分球と同じ無酸素銅を用いた。

図6にブラストに用いた砥粒の粒度と吸収率の関係を示す。図より、ブラストに用いた砥粒の粒度が大きくなり砥粒径が小さくなると表面粗さが小さくなり、吸収率が低下し、表面処理無しの場合に近づいている。ポリシングを行った場合にはさらに吸収率が低下した。また #320 以降では表面粗さの影響が飽和しており、以後の実験では、#320の砥粒によるブラスト処理を施した加工材料を用いる。

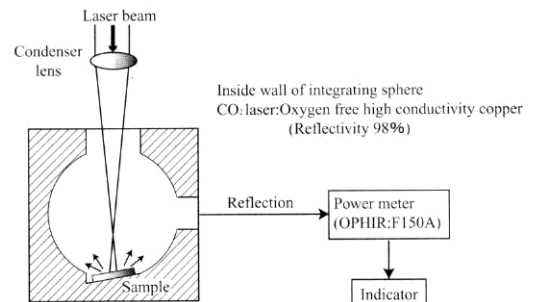


Fig.5 Measuring reflectivity with integrating sphere

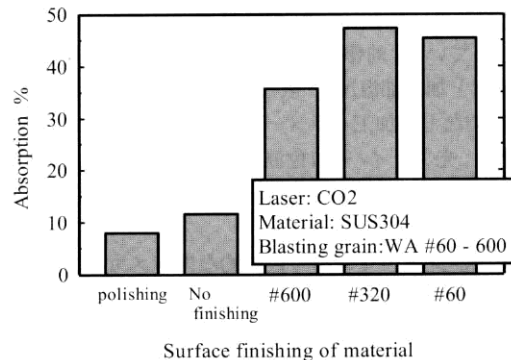


Fig.6 Influence of grain size on absorption

3. 加工要因の変形量への影響

フォーミング加工による板材の変形過程には、加熱過程、冷却過程の2過程を経て塑性変形に至る TGM, BM, UM の3つの代表的な変形機構が考えられている⁷⁾。TGM(Temperature Gradient Mechanism)は代表的な変形であり、加熱によって板厚方向に生じる温度勾配によって曲げが生じる。BM(Buckling Mechanism)による変形は板厚方向の温度勾配が小さな場合に生じ、座屈によって板材が上方向または下方向に変形しTGMのように曲げ方向が一定しない。UM(Upsetting Mechanism)は板厚方向の温度勾配が小さな場合に生じるためBMと似ているが、レーザビーム径が板厚にたいして小さい場合に生じる。加熱部が小さいために座屈せず、膨張部分全体に塑性ひずみを生じる。この場合、板材は曲げ変形せず、面内変形によって加工物の長さが短くなる変形がおこる。

ここで、板材のフォーミング加工ではTGMが最も基本的な変形機構であり、前報⁴⁾では角度と加工要因との間の関係を次元解析により求め、さらにその関係に材料物性値の温度依存性を考慮して、最も簡単な形として次式を導出している。

$$\theta \propto \frac{\beta \cdot l \cdot \Delta T}{h} f(T) \quad (2)$$

ここで、加工部温度 T 、表裏温度差 ΔT 、熱膨張率 β 、板厚 h 、変形領域 l である。材料物性値の温度依存性は $f(T)$ で表している。式(2)は加工条件の各要因の変形角 θ への影響を定性的に示しているが、式によれば、材料の熱膨張率が大きいほど、板厚方向の温度勾配が大きいほど、変形領域(加熱領域)が大きいほど、板材の変形角 θ は大きくなり、逆に板厚が厚くなって板の曲げ剛性が大きくなるほど変形角 θ は小さくなることを示している。一方、板材の温度 T の影響は複雑であり、温度が高

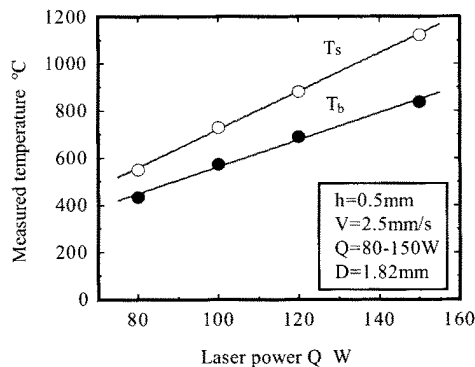


Fig.7 Influence of laser power on top and bottom surface temperature

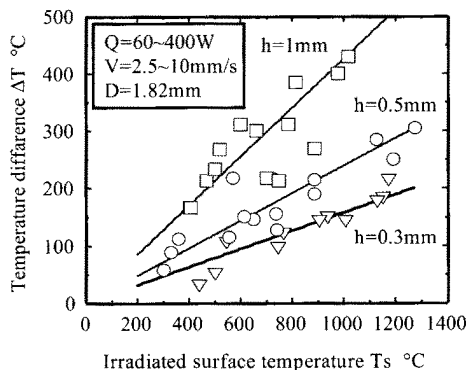


Fig.8 Relation between top surface temperature and temperature difference

くなると材料の降伏応力や変形抵抗は小さくなり、熱膨張率 β は大きくなる⁷⁾。

そこでここでは、式(2)を

$$\theta \propto \frac{\beta \cdot l^b \cdot (\Delta T)^c}{h^a} f(T) \quad (3)$$

ただし、 a, b, c は定数

と置き直し、実験により式(3)に含まれている各要因の変形角への影響を詳細に調べるとともに、 $f(T)$ を求めることによって式(3)の完成度を高めることにする。さらに、求めた式の妥当性についても検討する。

3.1 加工物温度 T の影響

式(3)において、温度差 ΔT 及び $f(T)$ の2つの要因が含まれているが、基本的にはいずれも同じ加熱温度が原因となっている。そこで、ここでは、熱応力の発生、物性値などに影響を及ぼす加工物温度 T の影響について調べる。

図7は板厚 $h=0.5\text{mm}$ の加工物を送り速度 $V=2.5\text{mm/s}$ 、ビーム径 $D=1.82\text{mm}$ のもとで、レーザパワー Q を変化させて加工を行ったときの表面温度 T_s 、裏面温度 T_b を測定した結果である。この図から T_s, T_b 両方とも Q の増大にともない直線的に上昇することがわかる。また、温度が高くなるほど表裏温度差 ΔT は大きくなっている。これらの結果は前報⁴⁾で示した熱伝導解析と同様の結果である。

送り速度 V 、レーザパワー Q を変化させて温度測定を行った時の表面温度 T_s と表裏温度差 ΔT の関係を図8に示す。オーステナイト系ステンレスでは 1200°C 付近まで熱物性値に変極点がないため⁹⁾、図のように T_s と ΔT の間に直線関係が成り立ち

$$\Delta T = C_1 T_s \quad \text{ただし、} C_1 \text{ は定数}$$

と表すことが出来る。そこで、式(3)において、材料温度 T を表面温度 T_s で代表することにとすると、

$$\theta \propto C_1 \frac{\beta \cdot l^b \cdot T_s^c}{h^a} f(T_s) \quad (4)$$

となる。

ここで、 T_s を $f(T_s)$ に含めることにすれば、式(4)は次のようになる。

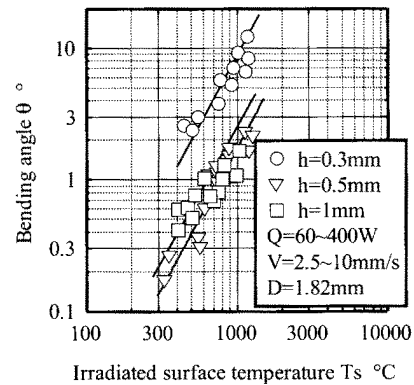


Fig.9 Influence of irradiated surface temperature on bending angle

⁹⁾表面温度と裏面温度の平均値を板材温度とすべきであるが、制御号として温度を用いる場合の簡便性なども考慮し、ここでは表面温度 T_s を加工部温度 T としている。

$$\theta \propto \frac{\beta \cdot l^b}{h^a} f(T_s) \quad (5)$$

そこで、 $f(T_s)$ を求めるために T_s を変化させたときの変形角 θ を調べると、図9のように両対数グラフ上で直線関係があり、

$$\theta \propto T_s^{1.5}$$

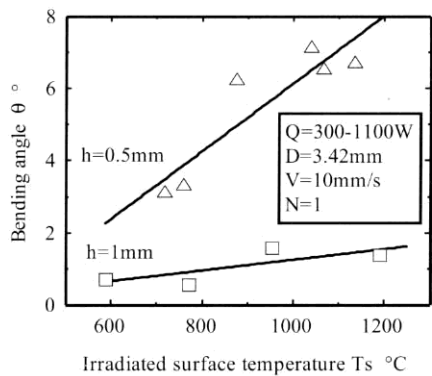
と表すことができる。したがって、式(5)において

$$f(T_s) = T_s^{1.5} \quad (6)$$

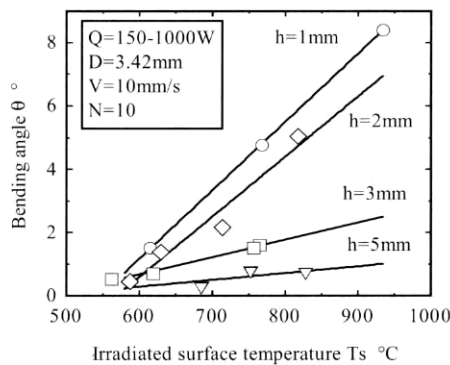
とおくことができ、結局式(3)は

$$\theta \propto \frac{\beta \cdot l^b}{h^a} T_s^{1.5} \quad (7)$$

と表すことができる。



(a) $h=0.5\sim 1\text{mm}$



(b) $h=1\sim 5\text{mm}$

Fig.10 Relations between irradiated surface temperature and bending angle

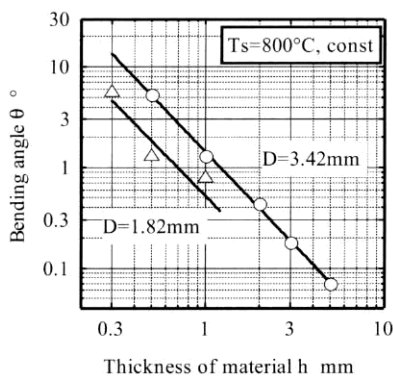


Fig.11 Influence of Thickness of material on bending angle

3.2 板厚 h の影響

種々の板厚 h の材料に対して $V=10\text{mm/s}$ のもとで加工し、板厚 h が変形量へ及ぼす影響を調べた。図10に各板厚における表面温度 T_s と変形角度 θ の関係を示す。(a)は、 $h=0.5\sim 1\text{mm}$ の結果、(b)は $h=1\sim 5\text{mm}$ の結果である(板厚の厚い(b)ではレーザー照射回数 $N=10$ での加工結果を示しており、表面温度 T_s も10回目の照射時のものである)。図のようにそれぞれの板厚における T_s と θ の関係は直線的となる。

図10(a)(b)より、温度の影響を除くため表面温度 $T_s=800^\circ\text{C}$ での h と θ の関係を読みとり、両対数グラフに示したものが図11

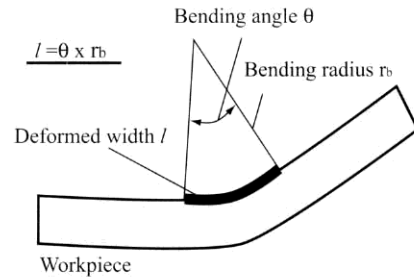


Fig.12 Definition of deformation width

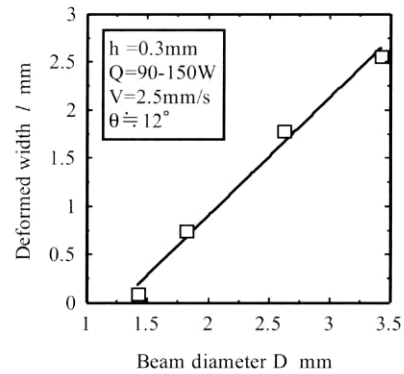
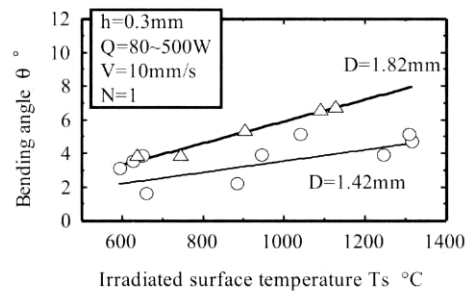
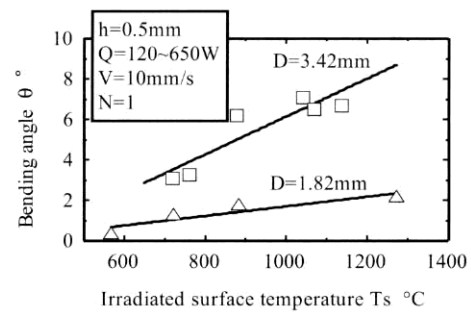


Fig.13 Relations between beam diameter D and deformed width



(a) $h=0.3\text{mm}$



(b) $h=0.5\text{mm}$

Fig.14 relations between irradiated surface temperature and bending angle when beam diameter is changed

である。図から、 h の増加にともない θ は急激に減少することがわかり、変形角と板厚の関係は次のように表すことができる。

$$\theta \propto \frac{1}{h^{1.7}} \tag{8}$$

3.3 変形領域 l の影響

ここでは、変形領域 l の変形角 θ への影響について調べる。

変形領域 l は図12に示すように、変形角 θ と曲率半径 r_b から求めることができる。一方、変形領域 l はレーザ照射領域に大きく影響される。そこで、レーザ照射領域に影響するレーザビーム径 D と変形領域 l の関係を調べたものが図13であるが、両者の間には直線関係が成り立っている。そこで、変形領域 l をビーム径 D に置き直すことが出来ることから、 D が θ に及ぼす影響を調べることにする。

図14(a)(b)にビーム径 D を変化させて加工を行ったときの表面温度 T_s と変形角度 θ の関係を示す。板厚 h を変えており、(a)は $h=0.3\text{mm}$ 、(b)は $h=0.5\text{mm}$ の結果である。いずれの結果においても、大きなビーム径 D で大きな変形角 θ が得られている。

これらの結果より表面温度が一定の場合の結果を比較することによって、温度の影響を排除して D が θ に及ぼす影響を知ることができる。そこで、 $T_s=800^\circ\text{C}$ の時のビーム径 D と変形角度 θ を読みとり、 D が θ に及ぼす影響を調べた結果を図15に示す。図よりビーム径 D と θ の関係が求まり、次のように表すことができる。

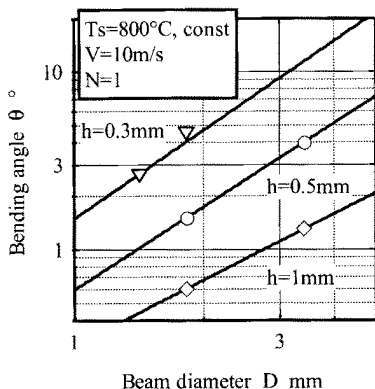


Fig.15 Influence of beam diameter on bending angle

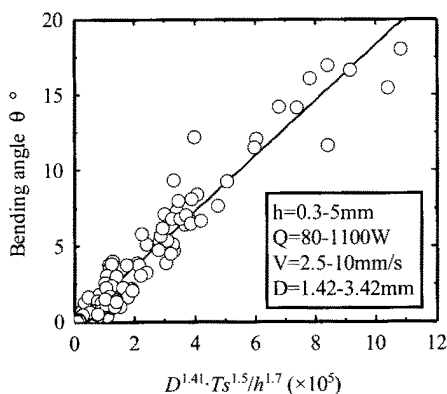


Fig.16 Relations between $D^{1.41}Ts^{1.5}/h^{1.7}$ and bending angle

$$\theta \propto D^{1.41} \tag{9}$$

3.4 式の妥当性の検討

式(7)を式(8)、(9)を用いて完成すると、

$$\theta \propto \frac{\beta \cdot D^{1.41}}{h^{1.7}} Ts^{1.5} \tag{10}$$

が得られる。式(10)は表1に示す加工条件の範囲で成立する。熱膨張率 β は加工材料としてSUS304だけを使用していることから、ここでは定数として扱うことにする。

式(10)が薄板 SUS304 の変形角への各要因の影響を表しており、変形角はビーム径 D の 1.4 乗に比例し、照射温度 T_s の 1.5 乗に比例し、板厚 h の 1.7 乗に反比例することになる。また、この式には β 以外の材料物性に関係した要素が含まれていないことから、種々の材料に適用出来る可能性もあり、次報で検討する。

式(10)の妥当性を調べるため、板厚 h 、レーザパワー Q 、送り速度 V 、ビーム径 D などの加工条件を変化させて加工を行ったときのパラメータ $D^{1.41}Ts^{1.5}/h^{1.7}$ と変形角度 θ の関係を図16に示す。

図よりパラメータと θ の間には直線関係があり、式(10)はこれら3つのパラメータの θ への影響をほぼ満足のいくレベルで表していることがわかる。なお、ここで式(10)を考えれば図16に示された直線の傾きが熱膨張率 β によって決定されると考えられ、この点も含めて次報で検討することにする。

4. 結 言

CO_2 レーザを用いてSUS304板材のレーザフォーミング加工を行い、フォーミングの代表的な変形メカニズムTGMについて、照射部温度を中心に加工条件が変形角に及ぼす影響について調べた。また、導出した式の妥当性について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 変形角はビーム径 D の 1.4 乗に比例し、照射温度 T_s の 1.5 乗に比例し、板厚 h の 1.7 乗に反比例する。
- (2) 曲げ変形に大きく影響すると考えられる表裏温度差の影響は板材の表面温度(レーザ照射部温度)の影響を含めて考えることが出来る。
- (3) 導出された式は定性的に加工条件の変形角への影響を良く表している。

参 考 文 献

- 1) F.Vollertsen M.Geiger: SYSTEMS ANALYSIS FOR LASER FORMING, Transactions of NAMRI/SME 23, (1995) 33.
- 2) Y.Namba: Laser Forming of Metals and Alloys, Proceedings of LAMP '87, (1987) 601.
- 3) 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, 日本機学会論文集 62, 604, C, (1996) 2764.
- 4) 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.
- 5) 上田隆司, 入山孝弘, 杉田忠彰:レーザ照射部のフラッシュ温度測定, 精密工学会誌, 61, 2(1995) 278.
- 6) EDWARD W.WASHBURN PH.D.:INTERNATIONAL CRITICAL TABLES OF NUMERICAL DATA, PHYSICS, CHEMISTRY AND TECHNOLOGY, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 253.
- 7) F.Vollertsen: Mechanisms and models for laser forming, Laser Assisted Net shape Engineering Proceedings of the LANE'94 1, (1994) 345.
- 8) 長谷川正義: ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社, (1960) 173.
- 9) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック, 養賢堂, (1990) 192.