

プラスチックのレーザフォーミング

岡本康寛*

1. 緒 言

従来、プラスチック材料は金型を用いた加熱加圧による成形法が主流である。この加工法は大量生産には非常に有効である。しかし、各種形状に対して高価な金型を必要とし、装置は大型なものとなる¹⁾。また、冷却過程での寸法変化、反りおよび曲がりなどを考慮する必要があることから精密な成形には種々の困難がともなう²⁾。

一方、局所的な温度変化を利用したレーザフォーミングは外力に依存しない材料成形法である³⁾。この方法は金型を必要としないことから材料の保持についての制約が少なく、大型の装置も必要としない。また、発振条件を変化させることにより入熱量を広い範囲に制御できることから任意の温度勾配を発生させることができる。さらに、工具の温度上昇や摩耗を考慮する必要がなく⁴⁾、インプロセスで変形量の計測が可能であることから精密な成形が可能となる。したがって、レーザフォーミングは寸法精度を維持する上でもプラスチック材料の成形に有利である。ところで、YAG レーザ光は微小スポットに集光でき、光ファイバによる転送も可能なことから、任意の位置へビームを照射する柔軟な加工システム上での精密微細な3次元形状創成の可能性はある。そこで本研究では、YAG レーザを用いて熱膨張率が大きいプラスチックを所望の形状に成形するレーザフォーミングについて検討した^{5),6)}。金型も大規模な装置も必要としないレーザフォーミングは試作や多品種少量生産に迅速かつ柔軟に適應できる。本稿ではプラスチックのレーザフォーミングにおける曲げプロセスの考察及び、基礎的な特性について論ずる。

2. 試料幅全域一括照射法における非定常熱伝導解析

2.1 非定常解析の理論式⁷⁾

等方性材料のxyz3次元直交座標系における非定常熱伝導方程式は式(1)で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

ここで、 T : 温度、 t : 時間、 λ : 熱伝導率、 ρ : 密度、 c : 比熱、 Q : 発熱量である。解析対象を有限な要素に分割し、要素内の温度分布を式内挿関係マトリクス $[N]$ と時刻 t における要素の接点温度ベクトル $\{\phi\}$ の積で表し、 $[N]$ を重み関数として式(1)にガラーキン法を適用すると次式(2)を得る。

$$\int_{V'} [N]^T \left\{ \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (2)$$

式(2)を部分積分した後、フーリエの法則を代入することに

より、次式(3)のような各要素の非定常熱伝導解析に対する有限要素式が得られる。

$$[k]\{\phi\} + [c]\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{f\} \quad (3)$$

ただし、マトリクス $[k]$ 、 $[c]$ 、ベクトル $\{f\}$ は次式(4)-(6)のように与えられる。

$$[k] = \int_{V'} \lambda \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \quad (4)$$

$$[c] = \int_{V'} \rho c [N]^T [N] dV \quad (5)$$

$$\{f\} = \int_{V'} Q [N]^T dV - \int_{S'} q [N]^T dS \quad (6)$$

2.2 解析モデルおよび解析方法

Fig. 1 に示すような解析モデルを用いて非定常熱伝導解析を行った。図は長さ20mm、厚さ1mmのモデルの断面図を示したものであり、解析では紙面奥行き方向に5mmの幅のある試料としている。この試料の中心部に5×5mmの矩形レーザ光が規定の照射時間5秒だけステップ照射されたものとする。後述のように試料表面に黒色のアクリル塗料を塗布していることから、レーザ光は試料表面でのみで吸収されるものとした。すなわちレーザ光の吸収率を考慮した熱流速として与えた。そして規定照射時間後のレーザ光照射部は大気との対流熱伝達状態とした。吸収率は自記分光光度計(島津製作所社製、UV-3100PC)による測定値97%とした。解析モデルは8接点アイソパラトリックを用い、レーザ光照射部とその近傍はより細かなメッシュに分割した。境界条件は両端を室温30℃の拘束とし、それ以外は、モデル表面に温度30℃の空気との対流熱伝達座標系を付加した。試料は高密度ポリエチレンを等方性材料と仮定し、各物性値はFig. 2に示すように温度依存性を考慮して与えた^{8),9)}。主な解析条件をTable 1に示す。

3. ステップ照射実験

解析結果を実験結果と比較検証するためにレーザ光照射

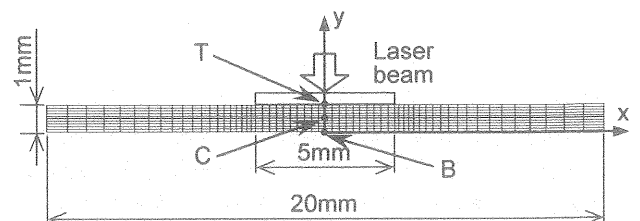


Fig. 1 FEM analysis model

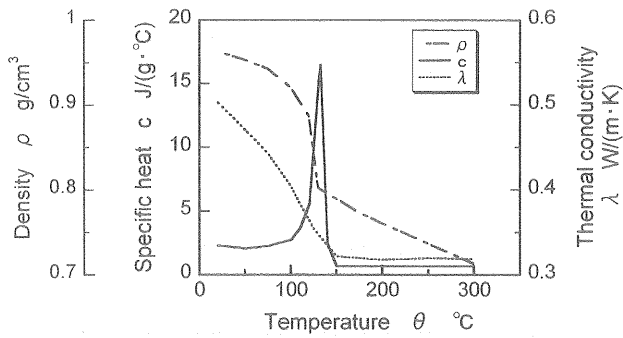


Fig. 2 Temperature characteristics of HDPE

Table 1 FEM analysis conditions

Material	HDPE 5×20×1 [mm]
Laser power P	0.5[W]
Irradiation time T_i	5 [s]
Beam size	5×5 [mm]
Absorption ratio	97 [%]
Heat transfer h	10 [W/(m ² ·K)]
Room temperature T_{room}	30 [°C]

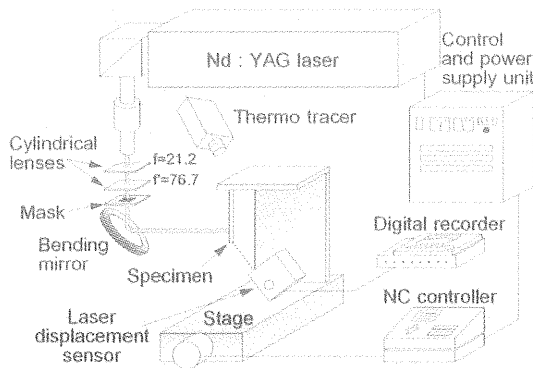


Fig. 3 Experimental setup of area and line scan irradiation

験を行った。Fig. 3 にその実験装置を模式的に示す。発振器には定格出力 15W の Nd : YAG レーザ (Control Laser 社製, 620QT) を用いた。クリプトンアークランプによって励起され、連続波として出力される。発振器から出力されたレーザー光は、シリンダリカルレンズとマスクを通過して鉛直下向きに保持された試料に照射される。ステージに固定したレーザー式変位センサ (KEYENCE 社製, LB-080) によって試料先端部の変位量を測定することにより曲げ角を得た。なお変位センサは、加工用レーザー光との干渉を避けるため、加工用レーザー光軸に対して斜めに設置して測定を行い、その値をデジタルレコーダに記録した。また、最高 30fps で撮影可能な赤外線熱画像装置 (NEC 三栄社製, TH7120MV) を用いて試料表面の温度状態も観察した。なお、今回の測定における最小検知寸法は 0.7mm 角である。

Fig. 4 は一括照射法を模式的に示したものである。発振器から出力されたガウスモードのレーザー光を焦点距離 21.2mm の平凹、焦点距離 76.7mm の平凸の 2 枚のシリン

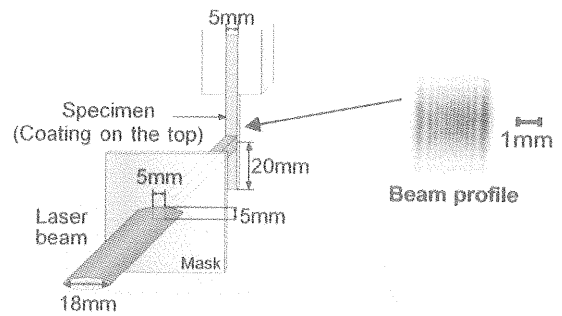


Fig. 4 Schematic illustration of area irradiation method

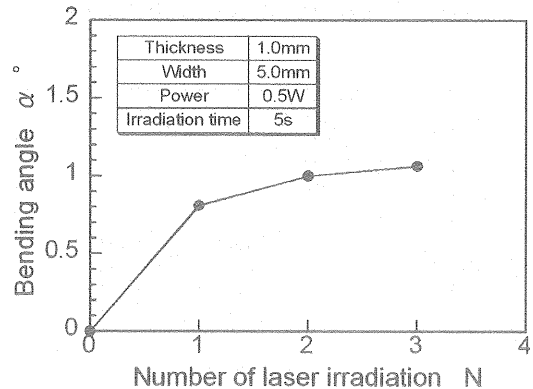


Fig. 5 Relationship between bending angle and number of laser irradiation ($P = 0.5W$)

リカルレンズを焦点位置が一致するように 55.5mm の間隔で設置した光学系を通過させる。これにより直径約 5mm のレーザー光を 1 軸方向に 3.6 倍拡大して平行光とした。その後、5×5mm のスリットを用いて中心部のレーザー光を切り出し、図に示すような強度分布が比較的均一な成形ビームを得た。この成形ビームを試料の先端から 20mm の位置に試料幅全域に照射した。試料には厚さ 1mm、幅 5mm、長さ 60mm の高密度ポリエチレンを用いた。この材料は結晶性を有する熱可塑性樹脂であり、熱膨張率が金属の約 4 倍と大きい^{1), 2)}。また、白濁色をしており、そのままの状態では YAG レーザ光を吸収しにくいので、あらかじめ試料表面にレーザー光の吸収体となる黒色のアクリル樹脂塗料を浸漬法により塗布している。ここではレーザー光照射が 1 回行われるごとに 1 分間の休止時間を与え、冷却が十分に行われるようにした。なお、本論文での曲げ角は、レーザー光照射方向と逆向きに曲がる方向を正としている。

Fig. 5 はレーザー出力 0.5W、照射時間 5 秒にてステップ照射実験を行った時の曲げ角とレーザー光照射回数との関係を示したものである。このように本照射条件において曲げ加工が可能であり、1 回の照射で約 0.8 度の曲げ角を得ている。

Fig. 6 はレーザー出力 1.0W、照射時間 5 秒にてステップ照射実験を行った時の曲げ角の時間的推移を示したものである。レーザー光照射中に曲げ角は減少し、照射終了後直ちに曲げ角は増加している。また、曲げ角の増加は照射後 13 秒程度 ($T_m = 18s$) まで続いていることがわかる。

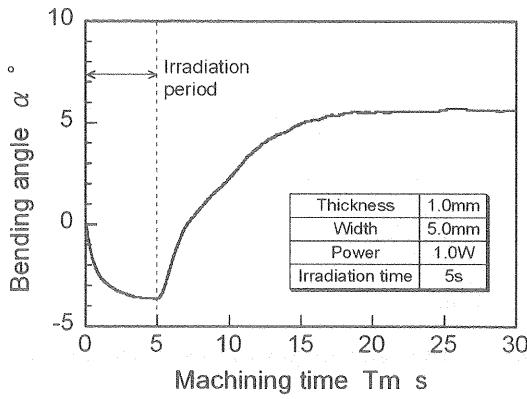


Fig. 6 Change of bending angle ($P = 1.0W$).

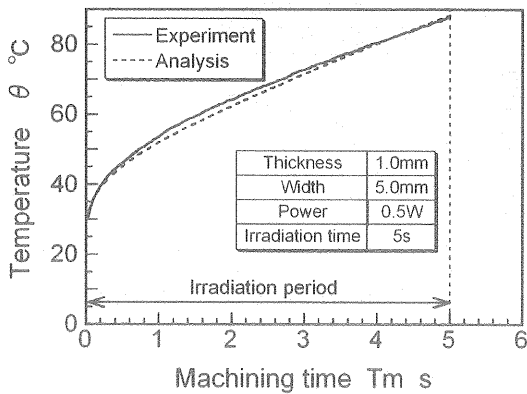


Fig. 7 Comparison of analytic result with experimental result

4. 解析結果の検討

本研究では $5 \times 5\text{mm}$ に成形した強度分布が比較的均一なレーザ光を用いているが、平面内において完全に一樣なわけではない。そこで、解析値の妥当性を検証するためにレーザ光照射部中央 $3 \times 3\text{mm}$ における試料上面の平均温度を、赤外線熱画像装置の測定値と比較検討した結果をFig. 7に示す。図から明らかなように、解析結果は実験値と良く類似した結果を示しており、レーザ光の照射とともに試料表面の温度が上昇し、照射終了時($T_m = 5\text{s}$)で約 90°C 程度となる。この解析結果から試料の温度場を検証した。

Fig. 8にレーザ出力 $0.5W$ 、照射時間5秒の条件にて解析を行った場合の、レーザ光照射終了時($T_m = 5\text{s}$)における試料内部の等温線図を示す。熱源中心から放射状に温度分布が発生し、試料表面の温度は約 90°C 、試料裏面では 68°C であった。このように試料表面(x方向)では最高で約 60°C の温度差が発生しているが、試料表裏面(y方向)では約 20°C 程度の温度差しか生じていない。このように発生する温度差は小さいが、本解析条件であるレーザ出力 $0.5W$ 、照射時間5秒で実際に実験を行ったところ、Fig. 5で示したように1回のレーザ光照射で曲げ角 0.8° が得られた。

Fig. 9は、Fig. 1に示す解析モデルにおける試料上面中央節点T (Top)、厚さ方向中心節点C (Center) および試料下面中央節点B (Bottom)の温度の時間的変化を示したもので、レーザ出力 $1.0W$ 、照射時間5秒における解析結果であ

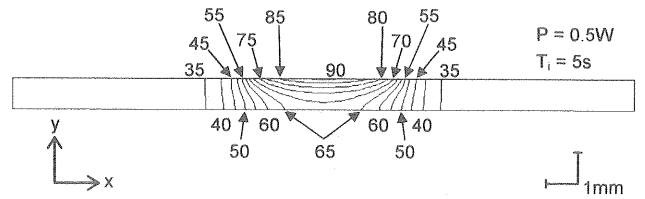


Fig. 8 Temperature distribution in specimen ($P = 0.5W$, $T_m = 5\text{s}$)

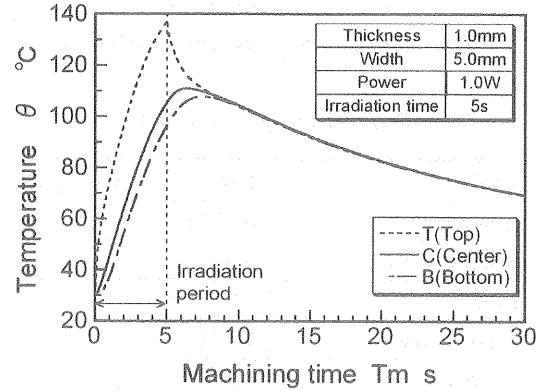


Fig. 9 Temperature change of each point ($P = 1.0W$)

る。照射終了3秒後($T_m = 8\text{s}$)で厚さ方向の温度差がほとんど消滅し、照射終了4秒後($T_m = 9\text{s}$)で表裏の温度はほぼ一致している。その後は試料表裏面の温度は同一の時間経過を示す。すなわち、照射終了4秒($T_m = 9\text{s}$)以降において、試料内部での温度勾配はy方向(板厚方向)には存在せず、x方向(長さ方向)のみとなる。前述のFig. 6の結果と合わせて考えると、照射終了直後は板厚方向の温度勾配により試料はレーザ光照射方向と逆向きに変形する。そして、照射後4秒経過すると、温度勾配は板厚方向には生じておらず、長さ方向のみとなる。しかしFig. 6で示したように、この時も曲げは進行しており、照射後13秒($T_m = 18\text{s}$)程度まで続いている。したがって、この段階では冷却にともなう試料は長さ方向に収縮し、照射後初期段階に変形した方向にさらに曲げが進行するものと考えられる。以上のように、プラスチック材料では発生する温度差が小さくても変形可能であり、照射後における長さ方向の収縮が変形に大きく寄与していると考えられる。

5. 一括照射法とスキャン照射法

5.1 一括照射法における変形

Fig. 10はFig. 3およびFig. 4にて示した一括照射法にて、それぞれ10回のレーザ光照射を行った後の各出力における曲げ角とレーザ光照射時間の関係を示したものである。レーザ光を試料に照射している時間は図中に示すように光照射時間 T_i だけであり、パルス状に繰り返している。いずれの出力においてもレーザ光照射時間が長くなるにつれ曲げ角は増加し、出力が大きいほどその増加の割合も大きい。しかし、いずれの出力でも試料表面に大きなダメージを与えることなく大きな変形量を得ることはできなかった。な

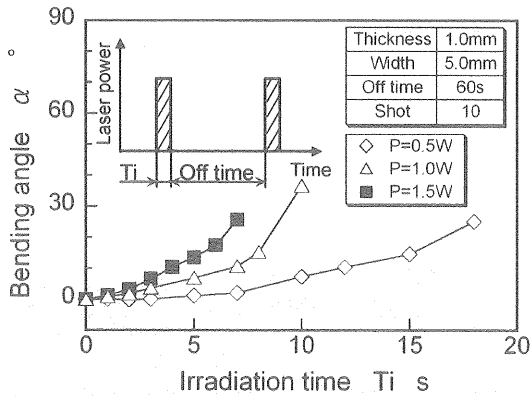


Fig. 10 Relationships between bending angle and irradiation time by area irradiation method

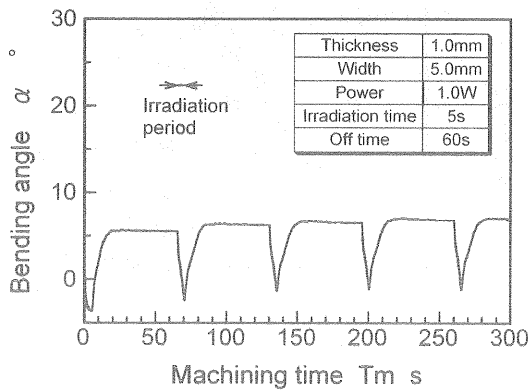


Fig. 11 Change of bending angle with machining time by area irradiation method

お、各出力において図にプロットした以上の照射時間になると試料のレーザー光照射部表面に大きなダメージが確認され、試料の表面状態が著しく変化していたことから、それ以上の照射時間についてはプロットしていない。

Fig. 11 にレーザー出力 1.0W、照射時間を 5 秒とした時の一括照射法における曲げ角の推移を示す。図中、縦のハッチングはレーザー光が試料に照射されている期間を示している。レーザー光が照射されることによって照射部は急激に温度上昇する。しかし、周囲の低温部によって自由な体積膨張を抑制されて圧縮の応力状態となり、試料はレーザー光照射直後から負方向へと変形を生ずる。照射後は周囲への熱の拡散によって加熱部の温度が低下し、収縮応力により試料は正方向へと変形し、さらに長さ方向に試料が収縮することにより曲げが進行する。しかし、2 回目以降の照射でも、試料全幅で熱膨張による体積増加にともなって発生する圧縮応力が作用することから、レーザー光照射中に曲げ角が一旦減少し、照射終了後に再び増加する。その結果、曲げ角の増加量から減少量を差し引いた量が小さいため、最終曲げ角は小さなものとなる。

5.2 スキャン照射法における変形

5.2.1 実験方法

Fig. 12 はスキャン照射法を模式的に示したものである。試料には幅 30mm、長さ 60mm、厚さ 1mm の高密度ポリエ

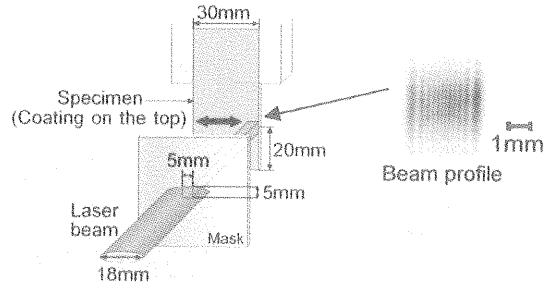


Fig. 12 Schematic illustration of line scan irradiation method

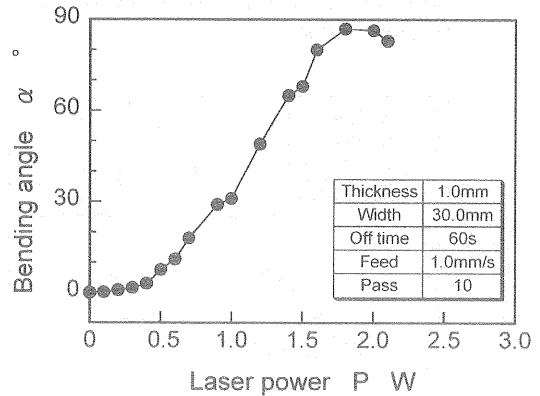


Fig. 13 Relationship between bending angle and laser power by scan irradiation method

チレンを用い、鉛直下向きに保持した。一括照射法における実験と同様に Fig. 3 で示した実験装置を用い、試料の先端から 20mm の位置に 1mm/s の送りを与えながら 5×5mm に成形したレーザー光の照射と休止を繰り返した。本照射方法ではストロークの幅を試料の幅よりも大きく設定し、一括照射法と同様、1 回のレーザー光照射終了後に 1 分間の休止時間を与えた。また、一括照射法と比較検討するため、スキャン照射法のエネルギー密度と同等になるように出力を変化させた。この時のエネルギー密度は式(7)より求めた。

$$q = \frac{PT_i/S}{\quad} = \frac{P/dF}{\quad} \quad (7)$$

(一括照射法) (スキャン照射法)

ここで q はエネルギー密度、 P はレーザー出力、 T_i はレーザー光照射時間、 S はレーザー光照射部面積、 d はビーム幅、 F は送り速度である。

5.2.2 実験結果および考察

Fig. 13 はスキャン照射法において 10 回レーザー光走査を行ったときの、曲げ角とレーザー出力の関係を示したものである。試料に対して垂直にレーザー光を照射している関係上、曲げ角の物理的上限は 90° となる。レーザー出力は、送り速度 1mm/s の条件の下、前述の Fig. 10 におけるプロットとエネルギー密度が同一となるように式(7)から求めたものを用いた。図から明らかなように、レーザー出力が高くなるにつれ曲げ角も増加しており、レーザー出力 1.8W の時に最大曲げ角 87° を得ている。このように本スキャン照射方法では、走査回数 10 回で曲げ角の物理的上限となる 90° 程度を容易に得ることができる。

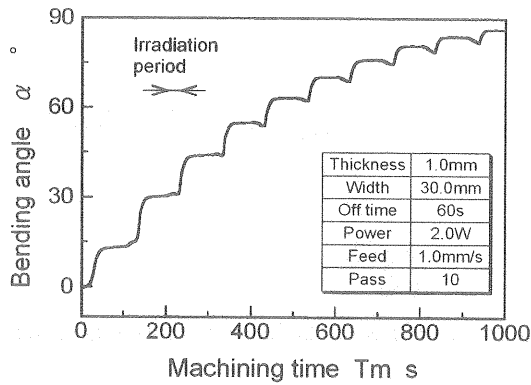


Fig. 14 Change of bending angle with machining time by scan irradiation method

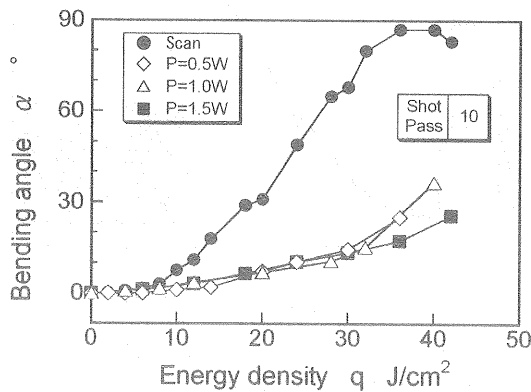


Fig. 15 Influence of irradiation method on bending angle

Fig. 14 はレーザー出力 2.0W でスキャン照射法によって加工を行ったときの曲げ角の推移を示したものである。図中、縦のハッチングはレーザー光が試料に照射されている期間を示している。一括照射法とは異なり、本スキャン照射法では 1 回のレーザー光照射ごとに曲げ角は大きな減少を示すことなく増加し、最終的に 90° 程度の曲げ角が得られている。

5.3 一括照射法とスキャン照射法の比較検討

Fig. 15 は一括照射法とスキャン照射法の両レーザー照射方法における曲げ角とエネルギー密度の関係を示したものである。一括照射法ではいずれのレーザー出力でもエネルギー密度が同じであれば同程度の曲げ角を得ており、エネルギー密度が高くなるにつれて曲げ角も増加している。よって、一括照射法における曲げ角はエネルギー密度によって整理できる。一方、スキャン照射法では、エネルギー密度 8J/cm² 未満においては一括照射法とほぼ同等の曲げ角であるが、エネルギー密度 8J/cm² 以上では一括照射法よりスキャン照射法の方が大きな曲げ角を得ている。このように、同等のエネルギー密度における曲げ角は一括照射法よりスキャン照射法の方が大きい。これは、前述のように変形過程に大きな差があるためである。

一括照射法では試料幅全域にレーザー光照射が行われるため、試料幅全域において熱膨張が生じる。そのため、Fig. 11 で示したようにレーザー光照射中に曲げ角が減少する。これに対して、スキャン照射法ではレーザー光照射中に必ず照射が行われていない箇所があるため、熱膨張による曲げ角の

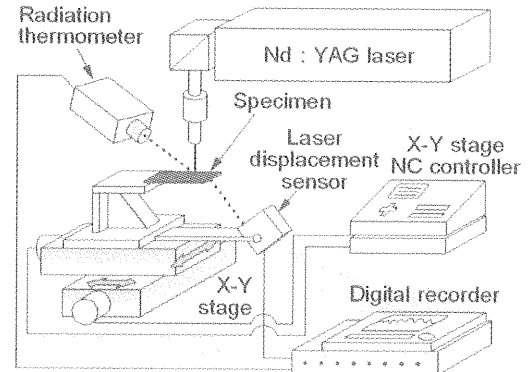


Fig. 16 Schematic diagram of experimental setup

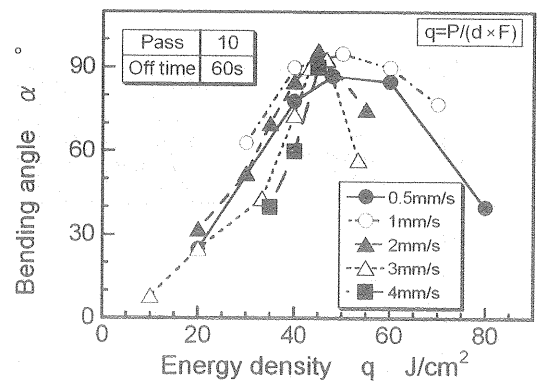


Fig. 17 Relationships between bending angle and energy density

減少を抑制する効果がある。また、レーザー光の照射が走査方法に進むにつれ、既に照射が終了した箇所では冷却過程にあるため収縮が生じ、熱膨張によって発生する応力とは反対方向の応力を生じている⁵⁾。そのためスキャン照射法では Fig. 14 で示したように曲げ角は大きな減少を示さないことから、最終的に大きな曲げ角が得られたと考えられる。以上のことから、プラスチック材料のレーザーフォーミングにおいて大きな曲げ角を得るためには、レーザー光を一様に照射する方法ではなく、変形を生じさせたい箇所にレーザー光をスキャンする方法が有効であると考えられる。

6. スキャン照射法による曲げ加工

Fig. 16 はこれ以降の実験で用いた実験装置の模式図である。これまでとは異なり、試料を水平方向に保持し、発振器から出力されたままの直径 5mm のガウスモードのレーザー光を試料先端から 20mm の位置に照射し、スキャン照射法による曲げ加工の詳細な検討を行った。

Fig. 17 は各送り速度において 10 回ずつ照射を行ったときの曲げ角とエネルギー密度の関係を示したものである。いずれの送り速度でも 90° まで曲げることが可能であり、試料表面のエネルギー密度が 40~50 J/cm² で曲げ角が最大となっている。このことから、最大の曲げ角が得られるときのレーザー出力と送り速度の間には比例関係があることがわかる。先の一括照射法でもエネルギー密度によって曲げ角が整理できたことから、エネルギー密度は曲げ角を決め

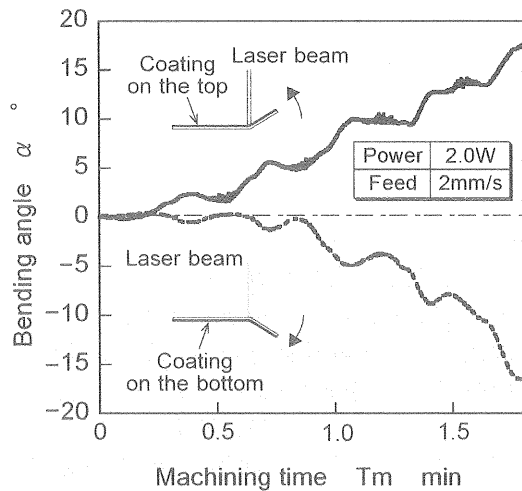


Fig. 18 Control of bending direction by selective coating

る重要な指標になるものと考えられる。

7. 各種形状のレーザフォーミング

本方法では、YAG レーザ光が試料の表面に塗布した塗料で吸収されることによって熱が発生して変形する。そこで、塗料を試料の表面と裏面に別々に塗布し、同一条件下でレーザフォーミングを試みた。Fig. 18はそのときの曲げ角の時間的变化を示したものであり、塗料を試料の表面に塗布した場合の曲げ角を実線で、裏面に塗布した場合を破線で示している。同図から明らかなように、吸収体が表面に塗布された試料は正方向へ、裏面に塗布された試料は負方向へ曲げが進行している。この負方向への曲げは、レーザ光の吸収が試料裏面で起こることにより、試料裏面で局所的に加熱膨張と冷却効果のサイクルが繰り返されて曲げ加工が進行したことを意味している。このように吸収体を試料の表面と裏面に塗り分けることにより、一方向からのレーザ光照射で試料を上向きと下向きに曲げ分けることが可能となる。これはプラスチックが YAG レーザ光を透過しやすい特性を有していることによって可能となる方法であるといえる。しかし、同図からも明らかなように、全く同じ条件で加工を行ったにもかかわらず、2つの試料の変形量は異なっている。これには光の透過率や自重などが影響しているものと考えられ、今後の更なる検討が必要である。

次に、前述の手法も取り入れ、レーザフォーミングにより様々な形状の創成を試みた例を Fig. 19 に示す。これらはすべて試料上面、一方向からのレーザ光照射により得られたものである。Aのような直線の折り曲げ加工ばかりでなく、レーザ光を試料に往復照射する際にその位置を垂直方向に移動させることによってB、Dのような連続的な曲面形状の創成も可能である。さらに、先程述べたように塗料を表面と裏面に塗り分けることによりC、Eのような波形状の創成も可能となる。

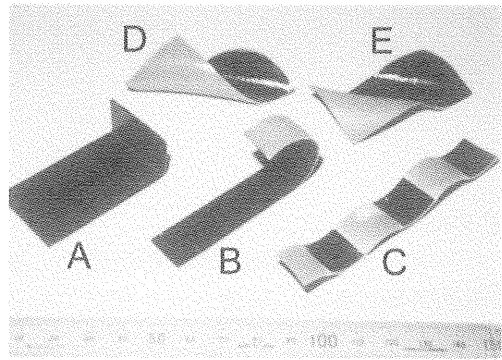


Fig. 19 Examples of laser forming

8. おわりに

プラスチック材料は金属材料と異なり小さな熱応力にて変形可能であることから、一括照射法のように変形させる部位に繰り返し照射する方法ではレーザ光照射中の曲げ角の減少量が大きいために注意を要する。一方、スキャン照射法のように変形させたい箇所だけにレーザ光を走査する方法を用いれば、レーザ光照射中の減少量を少なくできる。それにより金属材料に比べて非常に大きな変形量を得ることが可能となることから、短時間で形状創成が可能となる。また、プラスチックのレーザフォーミングでは、レーザ光の透過性と吸収体の塗布方法を工夫するとレーザ光の進行方向に変形を生じさせることが可能となることから、レーザ光の走査方法と組み合わせることにより、一方向からの照射で様々な形状の創成が可能である。

参考文献

- 1) 桜内雄二郎:プラスチック材料読本, 工業調査会, (1971) 108, 311.
- 2) 実用プラスチック事典編集委員会:実用プラスチック事典材料編, 産業調査会, (1993) 764.
- 3) Namba Y.: Laser Forming in Space, Proc. Int. Conf. Lasers '85, Las Vegas, (1986) 403.
- 4) Geiger M., Kleiner M., Eckstein R., Tiesler N., Engel U.: Microforming, Annals of the CIRP, 50, 2, (2001) 1.
- 5) 岡本康寛, 宇野義幸, 太田健一郎, 柴田隆義, 窪田真一郎, 難波義治:プラスチックの精密レーザフォーミングに関する研究, 精密工学会誌, 66, 6, (2000) 891.
- 6) 岡本康寛, 宇野義幸, 柴田隆義, 大久保雅史, 難波義治:プラスチックのレーザフォーミングに関する研究—試料厚さが変形特性に及ぼす影響—, 精密工学会誌, 68, 3, (2002) 466.
- 7) 矢川元基, 宮崎則幸:有限要素法熱応力クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, (1985) 131.
- 8) 廣恵章利, 本吉正信:成形加工技術者のためのプラスチック物性入門, 日刊工業新聞社, (1972) 88, 285, 308.
- 9) 旭化成アミダス株式会社「プラスチック」編集部:プラスチック・データブック, 工業調査会, (1999) 7, 28, 51, 61, 120.