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 —

宇野義幸** 岡本康寛** 柴田隆義*** 大久保雅史† 難波義治††

Study on Laser Forming of Plastic by YAG Laser
- Effect of Specimen Thickness on Deformation Characteristics -

Yoshiyuki UNO, Yasuhiro OKAMOTO, Takayoshi SHIBATA, Masashi OHKUBO and Yoshiharu NAMBA

In this study, the effect of specimen thickness on machining characteristics and deformation mechanism of laser forming for plastic material with YAG laser were made clear by the experimental analysis. Each specimen with different thickness can be bent to 90 degrees under proper machining conditions. The optimum laser power, in which bending angle takes a maximum under the same feed condition, increases with an increase of specimen thickness. In the case of thick specimen, the deformation occurs without a delay between the beginning point and the end one of irradiation just after finishing of laser scan. On the other hand, thin specimen is deformed from the beginning point of irradiation during laser scan at a small number of laser scan, since the rigidity of thin specimen is lower compared to that of thick specimen. Consequently, the bending angle per one laser scan is small in the case of thin specimen. However, the bending angle per one laser scan becomes larger at a large number of laser scan. Because it is considered that the increase of rigidity of specimen leads to the stable deformation, since the hardness of irradiated area increases with an increase of laser irradiation.

Key words: laser forming, plastic, thermal stress, YAG laser, deformation

1. 緒 言

従来、プラスチック材料の成形には金型を用いた射出成形や圧縮成形が多く用いられている。これらの加工法は多数個取りができ、成形サイクルが短いことから成形能率が高く、大量生産には非常に有効である。しかし、各種形状に対して専用の金型を必要とするため段取り作業に多くの時間を要し、複雑かつ高精度な金型は高価なものになる。また、製品の大きさに比べて大規模な装置を必要とし、機上でのみ成形が可能である¹⁾。さらに、スプリングバックや反りなどにより精密な変形の調整が難しく、歩留まりを低下させる要因の一つでもある。

ところでレーザ光は微小領域を短時間で加熱できることから、材料表面をスキャンさせることによって局部的に温度勾配を発生させることができる。そのとき材料内部には熱応力が生じており、これを利用して材料を塑性的に変形させることが可能である。また発振条件を変化させることにより入熱量を広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、したがって、変形量をコントロールすることが可能になる。また、工具の温度上昇や摩耗を考慮する必要がなく^{2), 3)}、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ものと考えられる。このように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⁴⁾は試作や多品種少量生産に迅速かつ柔軟に適応できる⁵⁾。また、組み立て後の製品に対しても適応可能なことから、精密位置決めへ着目したものも多く報告されている^{6)~8)}。しかし、これらは金属を対象としたもの

が多く、プラスチック材料に着目したものは見当たらない。ところで、一般に 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がある^{9), 10)}。そこで筆者らは YAG レーザ光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を行ってきた。前報¹¹⁾では、プラスチックのレーザフォーミングにおける基本的な特性について検討し、プラスチックに対してもレーザフォーミングが可能であることを明らかにした。本報では、試料厚さが変形特性に及ぼす影響を実験的に検討した結果について報告する。

2. 実験方法

図 1 に本研究で用いた実験装置の模式図を示す。発振器には定格出力 15W の Nd:YAG レーザを用いた。ポンピングはクリプトンアークランプによって行われ、連続波として出力される。ビームは試料上での直径約 5mm のガウスモードである。ビームクオリティを向上させるために発振されたビームをアパーチャで整形している。直線曲げ加工実験では、集光レンズは用いず、そのままの状態を試料に直接照射した。加工中は、ステージに固定したレーザ式変位センサ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、加工用レーザ光との干渉を避けるため、加工用レーザ光軸に対して斜めに設置して測定を行った。また温度測定には赤外線放射温度計を用い、ステージの運動と同期させることにより任意の一点における試料表面の温度を測定した。なお測定される温度は直径 5mm の円内の表面平均温度である。変位および温度の変化はデジタルレコーダに記録した。

* 原稿受付 平成 13 年 7 月 16 日

** 正 会 員 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)

*** 側ニデック (愛知県蒲郡市拾石町前浜 34-14)

† 学生会員 岡山大学大学院 (岡山市津島中 3-1-1)

†† 正 会 員 中部大学工学部 (春日井市松本町 1200)

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Laser beam irradiation method

図2は直線曲げ加工実験におけるレーザ光の走査方法を模式的に示したものである。試料には幅30mm、長さ60mmの高密度ポリエチレンを用いた。この材料は熱膨張率が金属の約4倍と大きい¹⁾。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。ため、あらかじめ試料表面にレーザ光の吸収体となる黒色のアクリル樹脂塗料を塗布した。塗料の膜厚はできる限り均一なほうが望ましいことから浸漬法を用いた。これにより波長1064nmにおける吸収率が50%から97%に向上し(分光光度計、島津社製 UV-3100PCにより測定)、曲げ加工の再現性が得られた。加工は試料をX-Yステージに片持ちで水平に保持し、端部から20mmの位置に試料に対して垂直にYAGレーザ光を照射しながらNCステージコントローラによって所定の送りを与えて行った。ストロークの幅は試料の幅よりも大きく設定してあるため、試料にレーザ光が照射されているときは加熱され、照射されていないときは自然冷却されている。この加熱溶融と冷却硬化のサイクルが交互に繰り返されることによって試料は変形する。なお本報告においては、曲げ角は上向きに曲がる方向を正としている。

3. 直線曲げ加工実験

図3は、厚さの異なる5種類の試料に対して送り速度一定の下、曲げ角90°が得られるまでもしくは最大10回レーザ光走査を行ったときの、曲げ角とレーザ出力の関係を示したものである。なお、安定した変形を得るためには照射後の自然冷却による収縮を十分に引き起こすことが重要であるため¹⁾、試料にレーザ光が照射されていない休止時間を60秒に設定している。また、試料に対して垂直にレーザ光を照射している関係上、曲げ

Fig.3 Relationships between bending angle and laser power using various kinds of specimen thickness

角の物理的上限は90°となるが、90°以上の曲げ角が得られている場合もある。これは曲げの進行が主にレーザ光照射後の冷却過程において生じることから¹⁾、曲げ角が90°弱の状態からさらにレーザ光が照射されることにより変形が進行したためである。その上、プラスチック試料の場合、厚さによってはレーザ走査回数10回未満で曲げ角90°が得られており、金属材料にレーザフォーミング法を適用した場合⁴⁾と比較して走査一回あたりの変形量は非常に大きい。このことからプラスチック材料においては、弾性体の熱応力による変形とは異なり、冷却時における試料の状態変化が変形機構に大きく影響しているものと考えられる。つまり、表面近傍の材料が凝固収縮することにより、周囲の材料を引き寄せながら変形していくものと考えられる。

図3から明らかなように、いずれの厚さの試料に対しても、それぞれ最も大きな曲げ角が得られる最適な出力が存在していることがわかる。レーザ出力が小さい場合、試料に吸収される熱エネルギーが少ないため熱影響領域が小さくなる。そのため、試料が収縮することにより周囲の材料を引き寄せる力も小さくなるため曲げ角は小さい。一方、レーザ出力が大きくなると、熱エネルギーが増加して熱影響領域も大きくなる。そのため、試料が収縮することにより周囲の材料を引き寄せる力も大きくなるため曲げ角が大きくなる。しかしながら、ある出力をこえると試料裏側まで熱が伝わり、試料の表面から裏面までが熱影響領域となるために、曲げ角は減少する。したがって、曲げ角はレーザ出力に対して図のような極値をもつ曲線となる。また、試料が0.3mmと薄い場合、最大曲げ角は70°程度となっている。試料が薄いほど大きな曲げ角が得られる出力範囲は小さく、少しでも出力が大きくなると試料全体が熱影響領域となり、反対に出力が小さくても大きな曲げ角が得られない。したがって試料が薄い場合にはレーザの出力を厳密にコントロールする必要がある。今回の実験に使用している装置では厳密な出力調整が困難であり良い結果が得られなかったが、安定性の良いレーザ発振器を用いれば、試料が薄い場合においても走査回数10回以内で90°まで曲げることは可能であるものと考えられる。一方、試料厚さ2.0、3.0mmの試料では、それぞれ曲げ角78°、45°が上限であった。これは試料厚さの増加にともない、厚さに対する熱影響領域の比率が小さくなるためである。これらの場合においても後述のように、走査回数を増加させれば90°まで変形

Fig.4 Section of specimen during formation

Fig.5 Relationship between optimum power and specimen thickness

させることは可能である。

図4は、試料が薄い場合と厚い場合の収縮時における断面の様子を模式的に示したものである。試料が薄い(a)の場合、レーザ光照射部では、試料厚さに対して熱影響領域の占める割合が大きく、見かけ上試料の剛性が低くなっているために変形しやすい状態にあると考えられる。これに対して試料が厚い(b)の場合は、レーザ光照射部においては試料厚さが小さいときに比べて試料厚さに対する熱影響領域の占める割合が小さいことから、非熱影響領域が変形を抑制する状態になっているものと考えられる。したがって、図3の様に試料が厚い場合には最大曲げ角が小さくなったものと考えられる。

次に最大曲がり角が得られる最適出力と試料厚さの関係を図5に示す。試料厚さが大きくなるにしたがい、最適出力も増加している。これは先程述べたように、試料が厚いほど変形を抑制する力が大きいために、より大きな熱応力を必要とするためである。

図6は厚さ1mmの試料に対して最適レーザ出力(2.5W)で曲げ角90°が得られるまで加工を行ったときのレーザ光照射部の試料表面および断面の写真を示したものである。表面写真から、レーザ光照射部には気泡が生じた痕跡が認められる。このことから、加工中の試料表面は一部熔融状態となっていることが予想される。したがって、加工仕上がり方を考慮するとあまり大きい出力で加工を行うことは望ましくない。また、試料断面では厚さ方向に150μm程度の熱影響層が確認できる。後述のレーザ光照射後の表面硬さ増加とあわせると考えると、レーザ光の照射により試料が熔融、凝固して材料の状態が変化しているものと考えられる。状態変化を好まない場合には本方法を適応することは難しいが、加工後は強度が増大していることから、適切な条件を選択することにより十分に適応できるものと考え

Fig.6 Photographs of specimen after laser forming

Fig.7 Relationships between bending angle and number of laser scan

られる。しかしながら、この点については今後さらに検討する必要がある。

前述の様に、厚い試料ほど変形しにくく、試料によってはレーザ光走査回数10回までに90°まで曲げることはできなかった。しかし、走査回数を増やすことによって、厚い試料も曲げ角90°が得られることが考えられる。そこで、3種類の厚さの試料に対して送り速度1.0mm/sの下、各試料における最適出力で90°に変形するまで加工を行い、曲げ角の推移を測定した。図7はそのときの曲げ角とレーザ光走査回数の関係を示したものである。厚さ0.5mmの試料が最も少ない走査回数で90°まで曲がっており、次に厚さ1.0mm、そして厚さ2.0mmの試料も走査回数12回目で90°まで曲げることが可能であった。このことより、厚い試料でも走査回数を増やすことにより最大曲げ角90°を得ることが可能であることが明らかとなった。ところで、走査回数5回目までに着目すると、厚さ0.5mmの試料よりも厚さ1.0mmの試料の方が大きい曲げ角が得られており、6回目以降ではその傾向は逆転している。特に厚さ0.5mmの試料における1回目の走査における曲げ角が小さいことがわかる。そこで、試料厚さによって変形機構が異なることが予想されるので、加工中の試料の状態を観察した。

図8は厚さ1.0mmの試料を送り速度1.0mm/sで試料厚さにおける最適レーザ出力(2.5W)で加工したときの、加工開始から50秒間における試料先端部の変形の推移を示したものである。これらは、試料先端部を正面から観察したもので、手前側が試料先端部、奥側が試料保持部である。照射前の試料先端部の位置を黒色波線で、各時刻における位置は白線で示している。したがって、黒色波線と白線の間隔が変位量となる。また、レーザ光は図の右から左へ照射しており、試料にレーザ光が照射されている時間は加工開始から30秒間である。厚さ1.0mmの

Fig.8 Deformation process of specimen during laser beam irradiation in the case of 1.0mm specimen

Fig.9 Deformation process of specimen during laser beam irradiation in the case of 0.5mm specimen

試料では、試料にレーザ光が照射されている間、試料先端部の変位は若干の上昇が見られるが、ほぼ停滞している。そして、照射が終了する 30 秒以降において試料は歪みを生じることなく左右均等に上昇していることがわかる。

図 9 は先程と同様、厚さ 0.5mm の試料を試料厚さにおける最適レーザ出力 (1.5W) で加工したときの加工開始から 50 秒間における試料先端部の変形の推移を示したものである。前述の試料厚さ 1.0mm とは異なり、この場合は、加工時間 10 秒のときに照射開始点において既に変位が上昇している。そして、照射終了時 (30 秒) には照射開始点側では変位が大きく上昇しており、試料は歪みを生じている。その後、レーザ光が試料に照射されなくなると、照射終了点側の変位も上昇し、試料は上向きに屈曲している。以上のように、厚い試料では照射終了直後に全幅にわたって一斉に変形するのに対して、薄い試料ではレ

ーザ光走査中に照射開始側から徐々に変形が進行し、試料は大きく歪みを生じながら変形することが明らかになった。

この変形機構の違いの原因を明らかにするために、図 10 に示すようにレーザ光を左から右に各試料厚さにおける最適出力で照射したときの試料左端表面同一地点の温度測定を行った。図中、ハッチング部はレーザ光が試料に照射されている区間を、横の太線は試料の熱変形温度範囲を示している。厚さ 0.5mm の試料では照射直後の試料左端の表面は約 120℃ まで上昇し、照射が終了するころには約 70℃ まで冷却され、ほぼ熱変形温度以下となっている。次に、厚さ 1.0mm では、照射終了直後でも照射開始の左端で約 80℃ と熱変形温度内にある。さらに厚さ 2.0mm の試料は最高で約 350℃ まで加熱されており、照射が終了する頃になっても照射開始点は 120℃ 程度と軟化状態にあることがわかる。

Fig.10 Temperature at left point of specimen surface

ところで変形に与える影響として試料の剛性の変化も大きく影響することが考えられる。今回の実験では剛性そのものを測定することが困難であったことから、レーザ光照射部における試料表面の硬さ測定を行うことにより試料の剛性について検討を行った。そこで、プラスチックなどの柔らかい試料でも測定可能な微小表面材料特性評価システム（アカシ社製 MZT-4）を用いて押し込み硬さを測定した。得られる硬さは試料極表面の値である。測定に用いた圧子は、ビッカース圧子に比べ先端部が鋭く、軸心に対する面角度が68度の三角錐圧子である。その圧子を基準荷重 F_0 にて試料に押し込んだ点の深さをゼロ点とし、その後試験荷重 F_1 を負荷して押し込み、最大変位量 h_2 を測定して式(1)により押し込み硬さ HUT[68]を求めた。

$$HUT[68] = 2.972 \frac{(\sqrt{F_1} - \sqrt{F_0})^2}{(h_2)^2} \quad (1)$$

また、実際に曲げ加工を施した試料では、レーザ光照射部は大きく湾曲しているために硬度測定が困難なことから、硬さ測定用試験片として厚さ1.0mmの試料中央部に長さ5mmだけ部分的にレーザ光を照射したものを用意した。そのときの加工条件は、送り速度1.0mm/s、試料厚さ1.0mmに対する最適出力である。図11はレーザ光照射部表面の押し込み硬さ HUT[68]とレーザ光走査回数の関係を示している。なお、硬さは5回の平均値としている。図から明らかなように、レーザ光走査回数の増大にともなって押し込み硬さも増加している。このことより、本試料ではレーザ光が照射されるにしたがって試料表面の硬さが増加し、剛性が増していると考えられる。したがって、図7に示したように厚さ0.5mmの試料が3回目以降の照射において、変位量が安定して増加するのは、剛性が増加することによって試料が左右で歪みを生じにくくなったためと考えられる。以上

Fig.11 Relationship between hardness of specimen surface and number of laser scan

Fig.12 Effect of specimen thickness on formation

の実験結果をもとに、試料厚さの違いによって生じる変形過程の違いについて考察する。

図12は、各厚さの試料におけるレーザ光照射中の様子を模式的に示したものである。(a)に示す試料厚さ0.5mmの場合、レーザ光走査回数が少ないときには先述述べたように試料の剛性が低いため、レーザ光通過後に試料は照射開始点側から熱収縮によって徐々に上向きに変形していく。一方、照射が終了する時点では、照射終了点側は熔融および熱膨張過程にあり、下向きに変形するために試料は大きく歪みを生じる。さらに、照射終了点側が上向きに変形し始めるときには、既に照射開始点側の温度は図10で示したように約70℃まで減少して熱変形温度以下になっているため、レーザ光走査線上の試料全体が同時に変形する時間はほとんどない。したがって、厚さ0.5mmの試料では照射開始点側から歪みを生じながら徐々に変形していくこととなり、特に走査回数の少ない場合にはこの傾向は顕著となる。しかし、走査回数が増すにしたがい硬度の増加によって試料の剛性が増大するため、歪みをともなった変形が生じにくくなり、安定した変形が可能となる。したがって、走査回数が増えると図7に示したように走査一回当たりの変形量が大きくなったものと考えられる。

一方、図12(b)に示す厚さ1.0mmの場合、照射開始点側は厚さ0.5mmの試料と同様、照射が終了する前に若干変形する。しかし、試料の剛性が高いため照射開始点側で発生する上向きの

力は、レーザ光未照射領域の試料の剛性によって抑制され、変形は停滞する。その後、照射終了点までレーザ光が照射されるが、このとき照射開始点の温度は図 10 に示すように熱変形温度以上であるため、レーザ光走査線上における試料はすべて変形可能温度域にあることになる。また、照射終了点側では熱膨張による下向きへの力が発生するが、照射開始点側ではすでに熱収縮が始まっているために試料が下向きに変形することはない。そして照射終了側が熱収縮過程となると、試料全体に上向きへの力が発生し、試料は左右均等に一斉に変形する。

最後に図 12(c)に示す厚さ 2.0mm の場合には、図 10 の様に照射終了時でも照射開始点側は融点である 120℃ 以上であるため、照射開始点から照射終了点までのレーザ光走査線上全体が軟化状態となっているものと考えられる。したがって、レーザ光照射中は溶融、熱膨張過程であるために下向きの変形が起こり、照射が終了すると冷却、収縮過程となり上向きに変形する。このことも厚い試料の走査 1 回当たりの変形量が少ない要因と考えられる。

4. 結 言

本研究では、YAG レーザ光を用いて厚さの異なるプラスチック材料に対してレーザフォーミングを行い、試料厚さが変形特性に及ぼす影響について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) レーザ光照射条件を適正に設定することにより、厚さの異なる試料に対しても 90° まで変形させることが可能である。
- (2) 試料厚さの増大にともない、最大曲げ角が得られる最適レーザ出力も増加する。
- (3) 試料厚さが小さい場合、レーザ光走査中に照射開始側から変形が進行する。一方、試料が厚い場合には、照射終了時に一斉に変形する。
- (4) 試料にレーザ光が照射されるにしたがって、照射部に

おける試料表面の押し込み硬さは増大する。これにより試料が薄い場合には変形が安定し、走査 1 回あたりの変形量が増大する。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実験装置に多大な便宜を図っていた日立建機（株）技術研究所に謝意を表する。

また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金奨励研究 (A) 課題番号 12750098 の交付を受けて行われたことを付記する。

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) 難波義治：レーザ・フォーミング，機械と工具，31, 7, (1987) 40.
- 3) M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel : Microforming, Annals of the CIRP, 50, 2, (2001) 1.
- 4) Y. Namba : Laser Forming in Space, Proc. Int. Conf. Lasers '85, Las Vegas, (1986) 403.
- 5) John A. Varccari : The promise of Laser Forming, American Machinist, 137, 6, (1993) 36.
- 6) Manfred Geiger, Burkhard Müller : Process Characterization of Laser Adjustment with an Excimer Laser, Production Engineering, 7, 1, (2000) 41.
- 7) Burkhard Müller : Virtual Engineering Helps to Get Adjustment Industrially Accepted, First International Symposium on Laser Precision Microfabrication (Proc. of SPIE vol.4088), (2000) 164.
- 8) 竹田次郎, 田口 滋, 浜田史郎：ハードディスク用磁気ヘッドスライダのクラウニング加工装置の開発—(第 1 報) Nd:YAG レーザによるスライダのクラウニング加工方法—, 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2000) 320.
- 9) 宮崎俊行, 宮沢 肇, 村上正夫, 吉岡俊郎：レーザ加工技術, 産業図書, (1991) 14.
- 10) M. Geiger : Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming, Annals of the CIRP, 43, 2, (1994) 563.
- 11) 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.

編 集 後 記

最近の科学技術業界は、右を向いても左を向いてもナノテクノロジーの時代である。ここ何十年における半導体製造技術の発展を考えると当然の流れともいえるが、政策的な要因も大きいだろう。アメリカの前政権において「各砂糖一個の中に国会図書館が全部記録できる技術」を開発するという目標の下に、ナノテクノロジー研究開発の推進を国家事業として進めたのが発端である。日本では総合科学技術会議が重点 4 分野にナノテクノロジーを選んだことからブームに火が付いたといえる。最近のあるシンポジウムで、最近政府に提案される研究プロジェクトの 7 割にナノという言葉が含まれている、と述べた方がいたがこれこそまさに現在の状況を象徴していると言えよう。

さて、今回の特集であるがそのブームに便乗してナノテクノロジーについてのものである。紙面が限られているということもあり、またそれ以上に編集者の知識不足ということもあり、ナノメ

トロジーに限定して特集を組んでみた。

私が計測工学を専門にしているという手前味噌でもあるが、計測があって初めて科学技術の進展がある。ナノテクノロジー然り

で、ナノメトロロジーはすべてのナノテクノロジーを支える根幹技術である。特に今回の特集で多く含まれている標準関係の記事はその最たるものであろう。そういう意味で今回の特集が多くのナノテクノロジー関係者の参考になれば幸いである。

そういいながらここで急に逆の主張になるが、私は現在のナノテクノロジー全盛というう勢に危惧も抱いている。ナノテクノロジー自体は革新をもたらす技術であり、科学技術分野のみならず現在の低迷する経済状態や世界情勢をも打開する可能性を秘めていることは否定しない。しかしながら、それ以外のこれまで長年かけて培ってきた技術がともすればないがしろになりがちであるということも、皆が感じていることではなかろうか。研究資源のばら撒きは慎むべきであり、重点投入は必要であろうが、地道に進めていくべき分野も厳然として存在する。絶妙なバランスを保ちつつすべての科学技術が発展することを期待し、そして私自身もその一翼を担うべく努力したい。

(高辻利之)