

曲げ加工における反りのレーザによる矯正

岡山大学 工学部 機械工学科

助手 岡本康寛

(平成12年度奨励研究助成 AF-2000021)

キーワード: ベンディング, プラスチック, レーザ

1. 研究の目的と背景

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に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, 成形時に生ずる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. この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²⁾は試作や多品種少量生産に迅速かつ柔軟に適応できる³⁾. また, 組み立て後の製品に対しても適応可能であることから, 精密位置決めへ着目したのも多く報告されている^{4)~6)}. しかし, これらの報告は金属材料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^{7), 8)}. さらに, レーザフォーミングはその原理上, 金型を必要としないことから, 工具の温度上昇や摩耗を考慮する必要がない^{9), 10)}. また, 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り, 曲げ加工における反りの矯正にも適応でき, 歩留まりの向上にもつながるものと考えられる. そこで, 反りの矯正を行うための基礎的実験として, YAG レーザを用いてプラスチック材料へのレーザフォーミングを行い, その加工特性と変形機構について検討した. また, 曲げ加工および, プラスチック材料の特性を応用して様々な形状の創成について試みた結果についても報告する.

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, そのままの状態ですべて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, レーザ光の進行と同期させることにより試料表面のレーザ照射部の温度を, また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それぞれ測定した. 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.

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, 厚さ 1mm 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ので, あらかじめ試料表面にレーザ光の吸収体を塗布した. 吸収体にカーボン粉末と黒色のアクリル

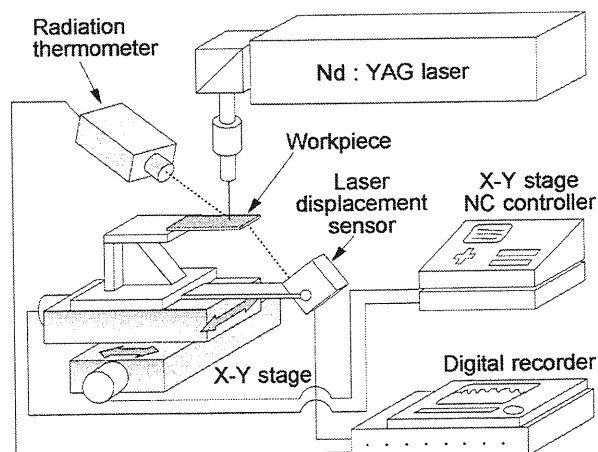


図1 実験装置の模式図

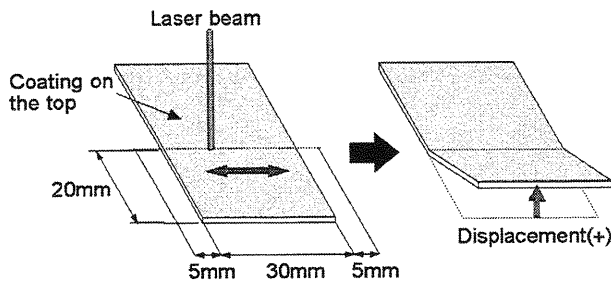


図2 レーザ光の走査方法

樹脂塗料を用いて曲げ加工の再現性を検討したところ、アクリル樹脂塗料の方が優れていた。また、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。その結果、波長 1064nm における吸収率が塗料塗布前の 50% から 97% に向上し（分光光度計、島津社製 UV-3100PC により測定）、曲げ加工の高い再現性も得られた。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。この加熱熔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は試料先端部中心の変位量およびレーザ光照射部の表面温度と加工時間の関係を示したものである。これは良好な曲げ加工が行われたときの一例であり、約 45° の曲げ角が得られている。レーザ光照射部の表面温度は最高で 200° C 前後に達しているが、レーザ光が試料に照射されていない間は照射部の温度が測定できていないため、図中で示す温度はそのつど室温に戻っている。したがって、温度曲線の1周期が1回の照射と休止のサイクルに対応している。一方変位は、試料にレーザ光が照射されている加熱過程で停滞もしくは減少し、照射されていない冷却過程で大きく正方向に増加している。このことからプラスチックのレーザフォーミングにおいても基本的には薄板金属の場合と同様に^{2) 9)}、レーザ光照射時に塗料を塗った試料表面側が局部的に加熱されて熱膨張した後、自然冷却による熱収縮が発生することにより試料が正方向に変形したものと考えられる。したがって、大きな変形量を得るためには、適切な温度域まで加熱した後、冷却過程における収縮を効果的に引き起こすことが重要となる。そのためレーザフォーミングにおいては試料の温度が加工結果を決定する大きな因子の一つにな

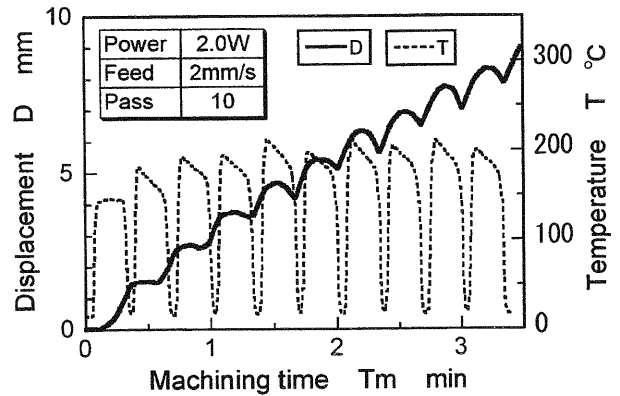


図3 試料先端の変位とレーザ光照射部の表面温度

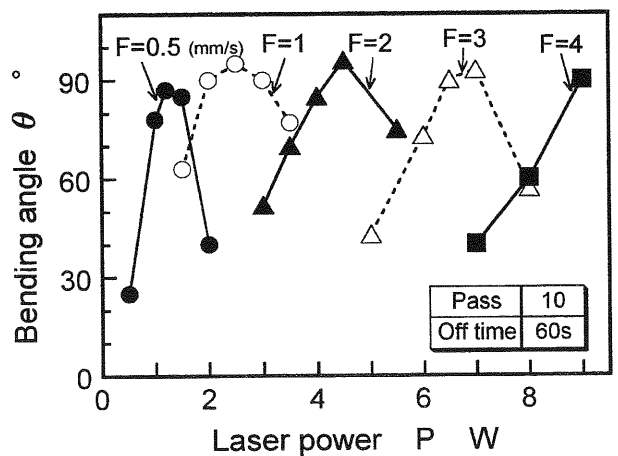


図4 曲げ角とレーザ出力の関係

る。また同図より、表面温度はピークにおいて右下がりの曲線となっていることがわかる。これは試料の送りが往復運動であるため照射終了側が次の照射開始側となり、熱が散逸する前に次の照射が開始されるためである。このような状態では収縮が完全に終了する前に次の加熱が始まることから、変形の精密な制御は困難である。そのため、プラスチックのレーザフォーミングにおいて変形の精密な制御を行うためには、照射が終了した領域の材料が十分に冷却された後に次の照射を行うことが望ましいと考えられる。

図4は各送り速度においてそれぞれ10回ずつ照射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。この場合は照射後の自然冷却による収縮を十分に引き起こすために、試料にレーザ光が照射されていない休止時間を約60秒に設定している。同図から明らかなように、各送り速度において大きな曲げ角を得るのに最適な出力が存在し、その条件のもとでは約90°まで容易に曲げることが可能である。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

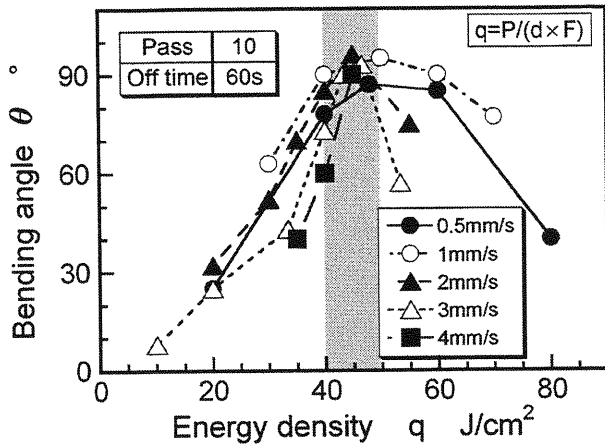


図5 曲げ角とエネルギー密度の関係

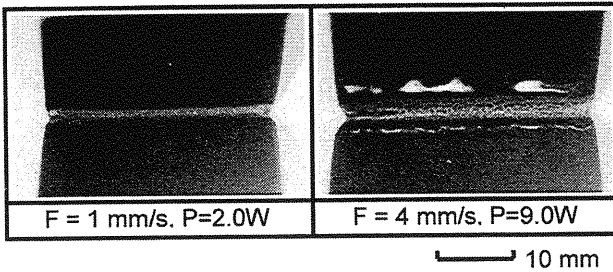
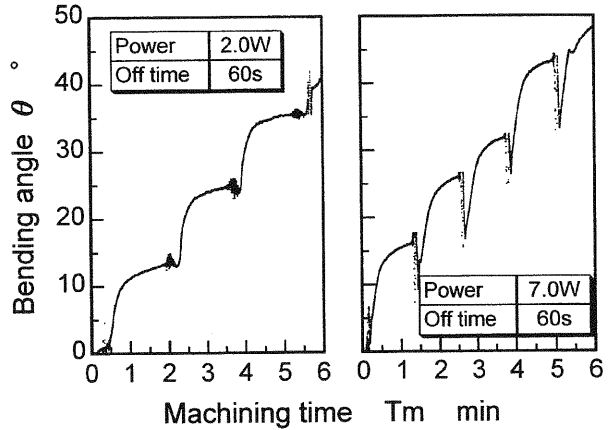


図6 レーザ光照射部の試料表面状態

て生じることから、曲げ角が 90° 弱の状態からさらにレーザー光が照射されることにより熱収縮が生じたためである。また、送り速度が大きくなるにしたがって、最適な出力も大きくなっていることがわかる。これは送り速度が大きくなると、同等のレーザー出力では単位時間に単位面積あたりに投入される熱量が減少するため、その分だけレーザー出力を大きくする必要があるからである。次にこの関係をエネルギー密度で整理してみると、図5のようになる。ここでのエネルギー密度 q はレーザー出力 P をビーム直径 d と送り速度 F の積で除したものとしている。いずれの送り速度においても試料表面のエネルギー密度が $40\sim 50 \text{ J/cm}^2$ 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。このようにほぼ一定のエネルギー密度において最大の曲げ角が得られるが、その加工状態には大きな差が認められた。

図6は加工後のレーザー光照射部の写真であり、どちらの場合も約 90° の曲げ角が得られたときのものである。送りが遅い 1mm/s の場合、出力は小さくてよいので、このように照射部の熱影響は小さく加工仕上がりが美しくなる。しかし送りが速い 4mm/s の場合、同等のエネルギー密度を得るためには出力を大きくする必要があるため、右側の写真にみられるように照射部の熱影響が大きく、気泡を生じた痕跡が認められる。これはレーザー光照射に



(a) $F = 1 \text{ mm/s}$

(b) $F = 3 \text{ mm/s}$

図7 送り速度による変形の違い

より過度の熱が加えられたためである。したがって、加工仕上がりを考慮すると、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、加工後も試料は変形状態を維持しており、適切な条件を選択すれば材料強度の変化は少ないと思われるが、この点については今後検討する必要があるものと考えられる。

図7は送り速度の違いによる曲げ角の推移の違いを示したものである。どちらも約 90° の曲げ角が得られたときのものである。送りが遅い(a)の場合、1回の照射ごとに階段状に増加しており、加工中に変位が減少することはない。しかし、送りが速い(b)の場合、1回の照射ごとに変位はいったん減少し、それから大きく上向きに増加している。このように送りが速い場合には1回の照射ごとにいったん下向きに変位する現象が起きるため変位量が不安定となる。前述の加工仕上がりと合わせて考慮すると、プラスチックのレーザーフォーミングにおいては、レーザー出力が小さく送りができるだけ遅い条件が適しているものと考えられる。また、このようにほぼ同等のエネルギー密度であっても、送り速度の違いによって変形形態が大きく異なることがわかる。そこで次にこの原因について検討を行った。

図8に示すように、レーザー光を左から右へ照射したときの試料先端の変位と試料左端の温度測定を行った。(a)、(b)はそれぞれ送り速度の小さい場合と大きい場合を表している。同図中、実線は試料の変位を、また破線は試料左端の温度を、さらにハッチング部分はレーザー光が試料に照射されている区間を示している。試料の変位は前述したように、送りが遅い(a)の場合にはレーザー光照射が終了すると同時に急激に上昇している。しかし、送りが速い(b)の場合には、照射終了直後にいったん下向きに大きく変位し、それから約3秒後に急激に上昇している。一方、試料左端の温度は、送りが遅い(a)の場合、レーザー光照射が終了するころには約 70°C 前後となっているが、送りが速い(b)の場合は約 90°C 前後までしか下がって

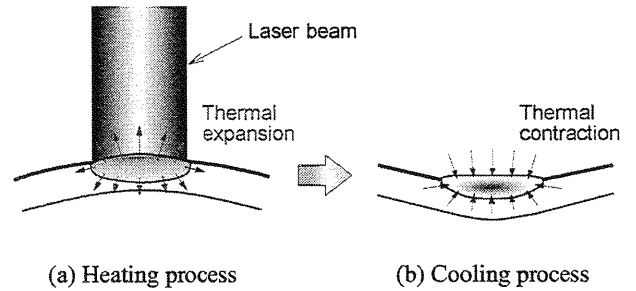
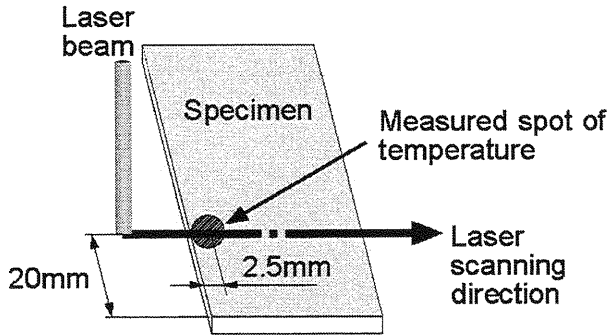
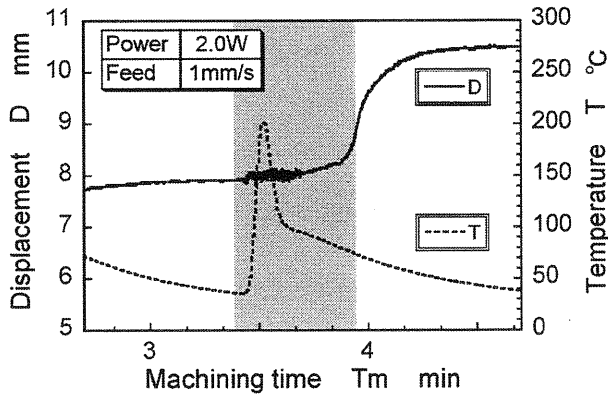
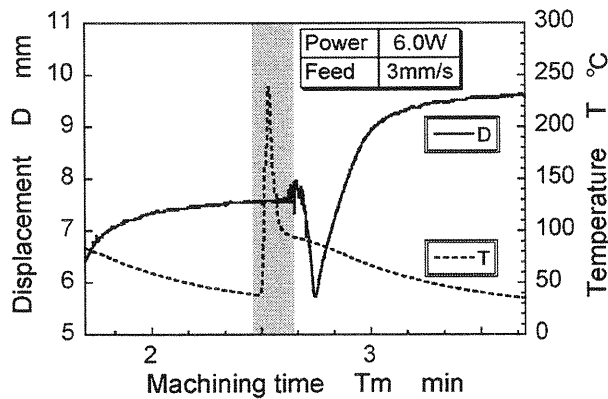


図9 レーザ照射中の試料断面の模式図



(a) F: slow



(b) F: fast

図8 試料先端の変位と左端の温度変化

おらず、送りが遅い(a)の場合と比べると 20°C 近く高いことがわかる。以上のことから送り速度の違いによる変位形態の違いは以下のように考えられる。

図9はレーザー光が照射されている試料の断面を模式的に示したものである。レーザー光照射部は、温度の上昇とともに熱膨張している。このとき、試料内部方向への膨張は周囲の材料によって妨げられるが、上方へは自由膨張している。したがって、試料は(a)のように上に凸型に変形しようとする。しかし、レーザー光が通過した後の加熱部分は、試料内部へ熱が伝達されて冷却が進むことにより熱収縮が発生するため表面に引張応力が生じ、試料は(b)のように上に凹型の塑性変形を引き起こす。この点をふまえて先程の送り速度の違いによる変形形態の違い

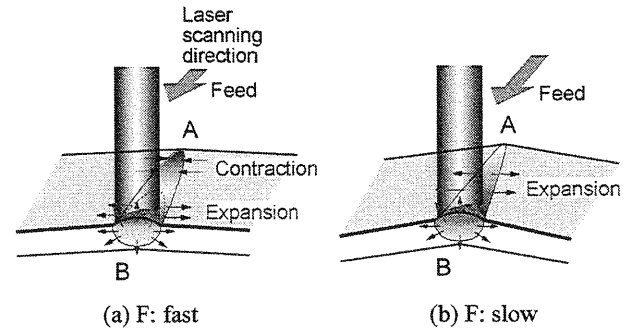


図10 送り速度による試料表面温度分布の違い

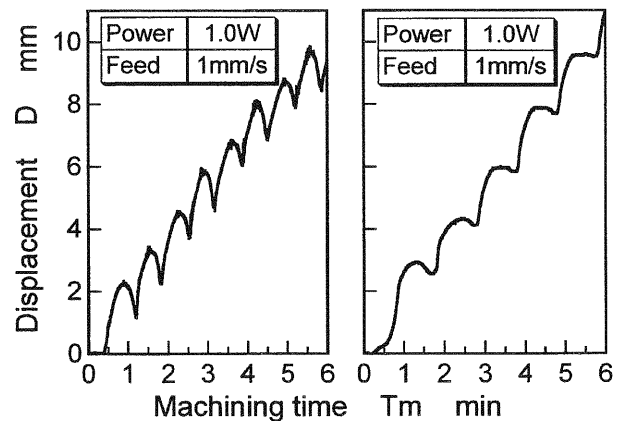


図11 試料幅による変位の違い

は図10に模式的に示したように考えられる。すなわち送りが遅い(a)の場合、熱源移動のスピードが遅く試料はゆっくりと加熱されるため、レーザー光通過後の熱膨張過程にある領域の割合は試料の幅に対して小さくなっている。そのため照射が終了するころには奥のA点側はある程度冷却が進んでおり、既に収縮作用が始まっているものと考えられる。つまり、手前のB点側が膨張しようとしているのに対し、奥のA点側では収縮しようとしているため試料の変形が抑制され、変位が停滞しているものと考えられる。一方(b)のように送りが速い場合、熱源移動のスピードが速いため試料の幅に対して熱膨張過程にある領域の割合は相対的に大きくなる。そのため照射が終了するころになっても奥のA点側ではまだ収縮作用が始ま

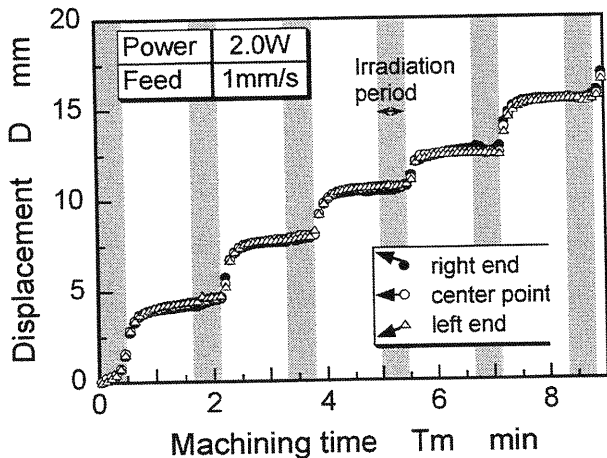


図 12 試料先端 3 点の変位

っていないものと考えられる。また先に述べたように、送りが速い(b)の場合には過度の入熱がみられるため、AからBまでが熔融状態となっていることも考えられる。つまりAからBまでが熔融、熱膨張過程にあるため試料はいったん下向きに変位してしまうものと考えられる。送り 1mm/s、出力 2.0W の条件で幅 30mm の試料を加工した場合、図 8 に示したように照射中および照射後も変位は減少することなく増加している。しかし試料の幅が 30mm よりも小さい 10mm および 20mm の場合は図 11 に示すように、出力が 1.0W と低いにもかかわらず照射終了直前にいったん下向きに変位する現象が確認できる。これは試料の幅が 30mm の場合と異なるために熱膨張領域と冷却収縮領域の割合が変化し、変形の抑制が起こらずいったん下向きに変位したものと考えられる。このことから先程述べた送り速度の違いによる変位形態の違いを説明することができる。しかし上述のようなことが生じているとなると、試料の変形が各部分ごとに違うのではないかという問題が考えられる。そこで試料の両端と中央の 3 点の変位測定を行った。図 12 はそのときの変位と時間の関係を示したものである。ハッチングを施している部分はレーザー光を照射している区間を、その他の区間は休止時間を示している。同図より、照射終了直後の休止時間における急激な変形において 3 点の変位の時間的遅れは無く、ほぼ同時に変形が進行していることが確認できる。また全体の変形量に対してこの急激な変形の占める割合が大きいこともわかる。一方急激な変形の後休止時間における試料の変形をみると 3 点の変位進行に若干の差が確認できる。これはレーザー光走査線上の試料の温度分布が一樣でないために生じたものと考えられる。微視的にとらえればこのように 3 点で変形の違いが生じているが、本方法において変形の大部分を占める急激な変形においては変位の時間的遅れは無く、巨視的にとらえれば同時に変形が進行していると考えられる。このことから本方法における試料の変形は、レー

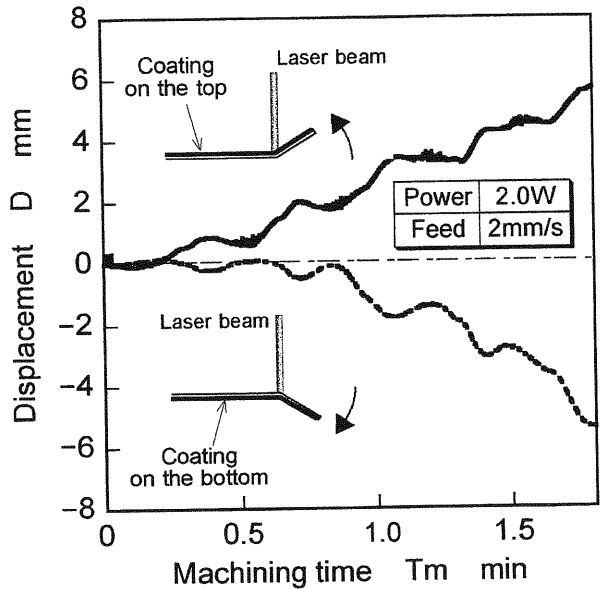


図 13 表裏に塗料を塗布した状態での試料の変位

ザ光走査線上において材料が熱変形の境界値を越えると一気に進行するものと考えられる。また、変位は階段状に進行しており照射回数により曲げ角を制御できることもわかる。

以上のように、レーザー光を用いたプラスチックの成形では、適切なレーザー光の照射条件を選択することにより局所的に所望の変形を得ることが可能である。したがって、成形時に生ずる反りの矯正に対しても微小な変形の集積により適応可能であるものと考えられる。

4. 各種形状のレーザーフォーミング

次にレーザー光の吸収体となる塗料の塗り方について検討した。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ーフォーミングを試みた。図 13 はそのときの変位と時間の関係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変位を実線で、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変位が進行している。この負方向への変位は、レーザー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ー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。レーザーフォーミングでは通常、レーザー光のエネルギーが材料に吸収さ

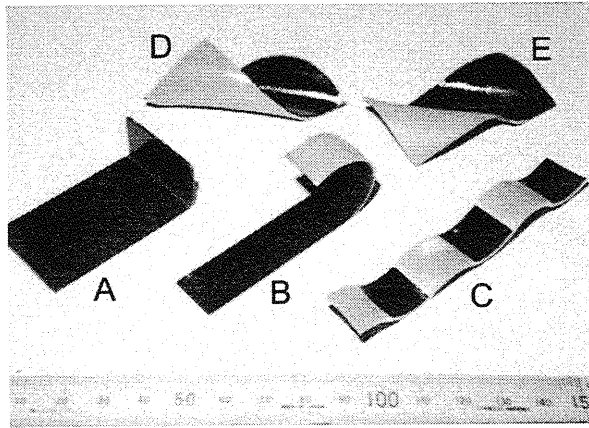


図 14 レーザフォーミングによる加工例

れて加工が進行することから、吸収率の良好なことが重要とされているが、本方法はそれと相反する透過性をも逆に利用できる加工法である。しかし、同図からも明らかかなように、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試料の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。

そこで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図14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のような形状の創成も可能となる。このようにプラスチックのレーザフォーミングでは、塗料の塗り方やレーザ光の走査方法を工夫することにより、一方向からのレーザ光照射で様々な形状の創成が可能であることが明らかになった。

5. 結言

本研究では反りの矯正を行うための基礎的実験として、YAG レーザを用いてプラスチック材料へのレーザフォーミングを行い、その加工特性と変形機構について検討した。得られた主な結論は以下のようなものである。

(1) 曲げの進行は、レーザ光照射終了後の冷却過程において急激に起こる。

- (2) 曲げ角は、試料上でのエネルギー密度がある一定値で最大となる。
- (3) 同等のエネルギー密度であっても、送り速度によって変形形態が異なる。送り速度が大きいときよりも小さいときのほうが安定して加工が進行する。そのため精密な変形のコントロールを行うには、送り速度を適切な値に設定してレーザ出力の小さい条件で加工を行うことが望ましい。
- (4) プラスチックにおいては吸収体を塗布した面でレーザ光が吸収されることで熱が発生することから、一方向からのレーザ光照射で上下に曲がる方向を制御できる。
- (5) 吸収体の塗布やレーザ光の走査方法を工夫することによって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) Y. Namba: Laser Forming in Space, Proc. Int. Conf. Lasers '85, Las Vegas, (1986) 403.
- 3) John A. Varccari: The promise of Laser Forming, American Machinist, 137, 6, (1993) 36.
- 4) Manfred Geiger, Burkhard Müller: Process Characterization of Laser Adjustment with an Excimer Laser, Production Engineering, 7, 1, (2000) 41.
- 5) Burkhard Müller: Virtual Engineering Helps to Get Adjustment Industrially Accepted, First International Symposium on Laser Precision Microfabrication (Proc. of SPIE vol.4088), (2000) 164.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) M. Geiger : Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming, Annals of the CIRP, 43, 2, (1994) 563.
- 9) 難波義治：レーザ・フォーミング，機械と工具，31, 7, (1987) 40.
- 10) M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel: Microforming, Annals of the CIRP, 50, 2, (2001) 1.