



J. Ikono

ガラス箔のレーザ3次元成形加工法

池野 順一*

1. まえがき

レーザ光によるガラスの加工は、昔からさまざまな手法が考案されており、切断、穴あけ、スミージングなど炭酸ガスレーザを用いた加工は実用技術として多用されている。また、フラットパネルディスプレイ分野では使用するガラスパネルを切り分けるためにレーザを使ってクラックの進展を誘導するレーザ割断法が精力的に研究開発され、一部の生産ラインでは導入された。機械的エネルギーではなく、熱加工に分類されるレーザ加工は、材料の硬脆性に無関係であり、ガラスのように割れやすい材料に対して有効に利用されてきたのである。

一方、ガラスは作業点で変形が可能であり、さまざまな形状に成形され、日用品を始め光学部品や電子部品などで多用されている。この成形では型にガラスを押し当てて成形する方法や、型に流し込む方法などが用いられている。ただし、これらはミリオーダーの厚みをもつガラス製品に対して有効な加工法である。もし厚み数十 μm のガラス箔に適用すれば、加熱時にガラスは球形に丸まり所望の成形は困難となる。

今後、製品の高機能／高付加価値化を実現するために、ガラス箔はMEMSの微細部品などさまざまな用途に使用される可能性がある。よって、ガラス箔の微細成形加工は将来必要な加工技術であると考えられる。そこで、本研究ではガラス箔を全体に加熱し軟化させるのではなく、レーザスポットで局部的に急熱急冷しスポットサイズ(ミクロンオーダー)での分解能で直接成形できないか検討することにした。

2. レーザ成形加工の検討

2.1 レーザフォーミングの原理

金属のレーザフォーミングは、中部大学の難波らによって世界で初めて提案され、その後金沢大学の上田ら多くの研究者によってメカニズムの解明や実用化のための研究が盛んになされてきた^{1) 2)}。これまでの研究によれば、加工メカニズムは図1のように説明できる。まず、金属材料表面にレーザ光線が吸収されるとレーザ照射面では急加熱による膨張が生じる。急加熱であるため裏面や周辺は常温であり、レーザ照射部には高い圧縮応力が生じることになる。高温下での金属材料は降伏応力が低下するため、

盛り上がりが生じて塑性変形する。レーザ照射後は材料裏面や周辺に伝熱されるため照射部の塑性変形した盛り上がり部は急冷されて熱収縮が始まる。この際に、表面は本来よりも小さくなり、引張応力の作用で金属はレーザ照射側に凹形状に屈曲することになる。これは温度勾配機構(TGM)と呼ばれるメカニズムである。今までの研究で熱膨張係数や温度差が大きいほど、また板厚が薄いほど屈曲角が大きくなり変形することが知られている²⁾。

一方、座屈機構(BM)と呼ばれる変形メカニズムはTGMとは逆方向に屈曲する現象を説明するメカニズムである。板厚が薄くレーザビーム径が大きく、レーザ照射面とその裏面での温度差が小さく熱応力が小さくなることで発生することが知られている³⁾。

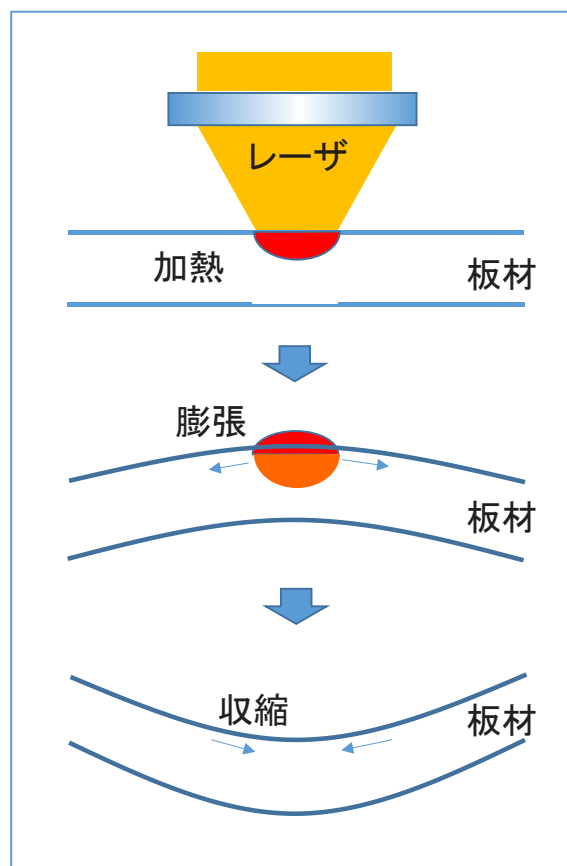


図1 レーザフォーミングの原理 (TGM)

* 埼玉大学 大学院理工学研究科 教授

2.2 ガラス箔のレーザフォーミングの可能性

本研究で対象とする材料は、板厚 $50\mu\text{m}$ のガラス箔である。ガラスはステンレスに比べ熱伝導率が $1/15\sim 1/20$ であるため、箔でもレーザ照射面とその裏面では温度差が生じやすく TGM によるフォーミングが可能ではないかと考えた。ここでは、まずガラスファイバ（直径 $9\mu\text{m}$ ）の成形加工を試み、微細なガラス素材でも TGM による成形が可能であるかを検証し、そのあとでガラス箔の成形加工を試みることにした。

3. ガラスファイバのレーザ成形基礎実験

3.1 実験方法及び条件

実験方法を図2に示す。図中、ガラスファイバ（直径 $9\mu\text{m}$ ）の先端から $220\mu\text{m}$ の位置でファイバの長手方向と垂直方向にレーザ光を走査させて、ファイバを横断する時間だけレーザ照射した。実験に用いたレーザは CW YAG レーザ（ $\lambda=1064\text{nm}$ ）である。また対物レンズには $\text{N.A.} = 0.46$ を用い、スポット径を約 $26\mu\text{m}$ に集束させた。実験条件は表1に示す。

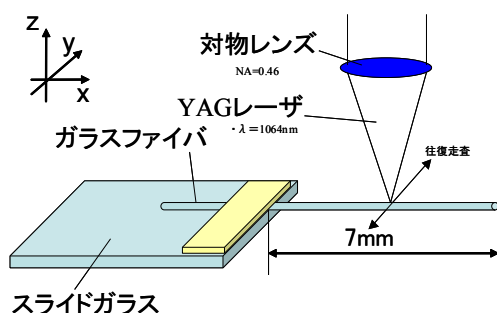


図2 ガラスファイバの加工実験

表1 実験条件

出力	0.37W～3.44W
走査速度	39.6mm/s
ファイバ径	$9\mu\text{m}$
ファイバの長さ	7mm

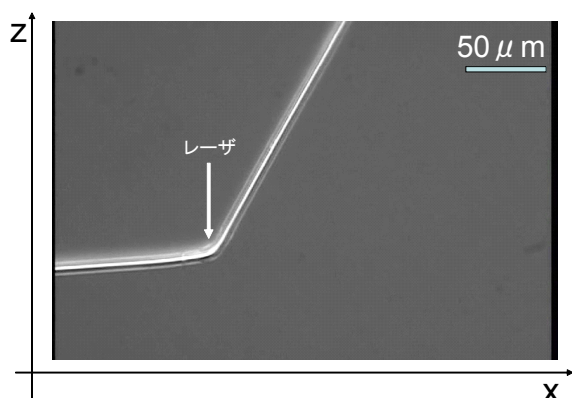


図3 ガラスファイバがレーザによって屈曲した様子

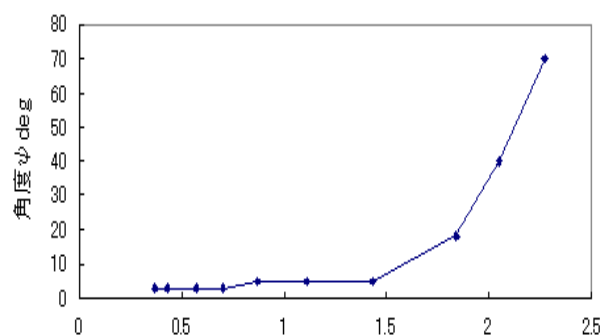
3.2 実験結果

実験結果を図3に示す。これにより、レーザ照射面側に屈曲させる TGM が可能であった。屈曲の限界角度 ϕ とレーザ出力の関係を図4に示す。これにより、ガラスファイバは出力が高いほど TGM によって屈曲角度が大きくなり、屈曲角度 $0^\circ \sim 70^\circ$ 程度まで広範囲にかつ正確に設定することが可能であることもわかった。

4. ガラス箔の成形基礎実験

4.1 実験方法及び条件

実験方法を図5、条件を表2に示す。ガラス箔は幅 1.5mm 、長さ 10mm 、厚さ $50\mu\text{m}$ のものを用い、スライドガラスに一端を固定し、レーザ照射面側にレーザ吸収剤を約 49nm 塗布した。レーザ照射は一定出力でガラス箔先端から 2mm 離れた位置で箔の幅方向に繰り返し直線走査させた。走査周波数は 1.38Hz であり、照射時間はとくに定めず角度の変化がなくなるまで続けた。実験で用いたものは前章同様に CW YAG レーザ（ $\lambda=1064\text{nm}$ ）、対物レンズ $\text{N.A.} = 0.46$ 、ビームスポット径 約 $26\mu\text{m}$ とした。



出力W

図4 屈曲角度とレーザ出力の関係

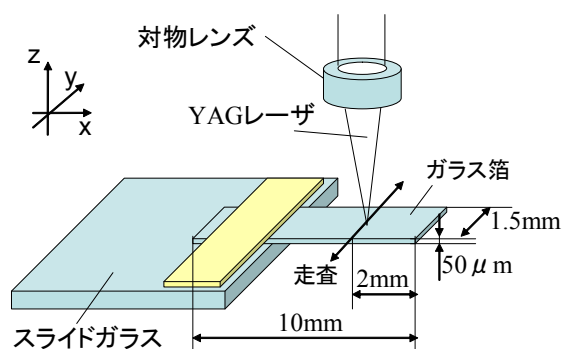


図5 ガラス箔の加工実験

表2 実験条件

出力	1.51W, 1.94W
走査周波数	1.38Hz
走査距離	1.5mm
吸収剤膜厚	49nm (照射面)

4.2 実験結果

照射実験の結果を図6に示す。図の上方からレーザを照射しており、レーザ照射面側に屈曲していることが確認された。屈曲部を詳細に観察した結果、図7(a)に示すようにレーザ照射部はわずかに盛り上がり、急加熱による照射部面の塑性変形が観察できた。一方、ガラス箱裏面の観察では同図(b)に示すように、割れの生じることなく、滑らかな面性状を保っていることがわかった。

4.3 屈曲角度制御性の検証

レーザによるガラス箱の屈曲が確認できたのでガラス箱の屈曲挙動の分解能について調査することにした。具体的には、レーザ照射時における屈曲角度 θ とレーザ照射時間の関係をレーザ出力ごとに調査した。主な条件は表2と同様に設定した。図8に屈曲角度 θ とレーザ照射時間の関係を示す。これにより、時間経過とともに次第に屈曲角度が大きくなり、90°程度まで曲がることがわかった。また、屈曲角度の変化量は始めのうちは大きく、30°～40°辺りでは小さく、60～70°辺りから再び大きくなるという傾向が見られた。

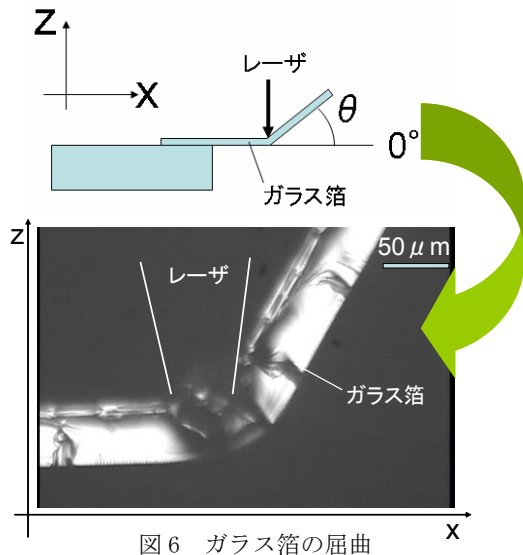
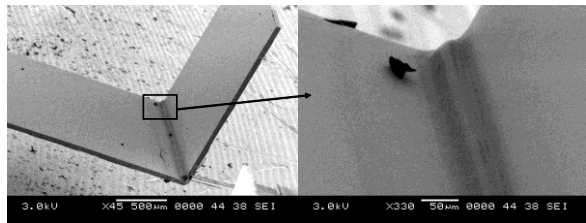
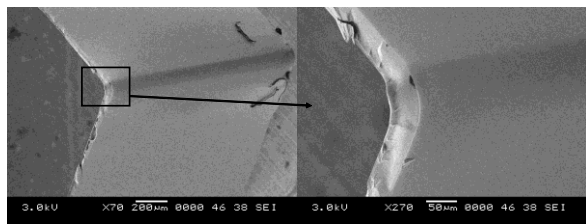


図6 ガラス箱の屈曲



(a) レーザ照射面



(b) 裏面

図7 屈曲したガラス箱のSEM観察結果

5. ガラス箱の屈曲方向制御実験

5.1 屈曲方向制御加工

ガラス箱でもTGMによってレーザ照射方向に比較的精密よく屈曲させることができた。しかし、TGMでは箱がレーザ照射側に屈曲してくるため、その屈曲した箱がレーザ光を遮断してしまって90°を越えて曲げることができないという課題が残った。そこで、座屈機構(BM)によってレーザ照射とは反対方向に屈曲させれば課題は解決できる。しかし、BMでは屈曲角度を精密よく制御することは困難と思われたため、ここではTGMでありながらレーザ照射方向やその逆方向にもガラス箱を屈曲させ90°以上の屈曲加工が可能となる手法を検討することにした。

本研究ではガラスを透過しやすい波長(1064nm)をもつレーザ光を使用している。したがって、ガラス箱の表裏いずれかを凹に屈曲させたい場合、その面にレーザ吸収剤を塗布しておけば、その面で格段にレーザ光は吸収され屈曲するのではないかと考えた。そこで図9に示すように、レーザ吸収剤をレーザ照射面の裏面に塗布した試料に対して複数箇所をレーザを走査した加工実験を試みた。その結果を図10に示す。塗布面側に屈曲することで、矩形の渦巻き状の成形が可能となった。

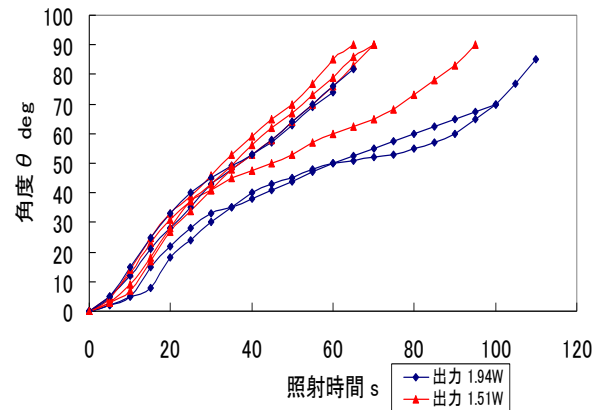


図8 屈曲角度とレーザ照射時間の関係

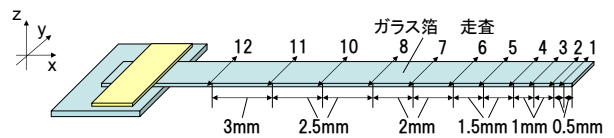


図9 吸収剤を裏面に塗ったガラス箱試料の加工

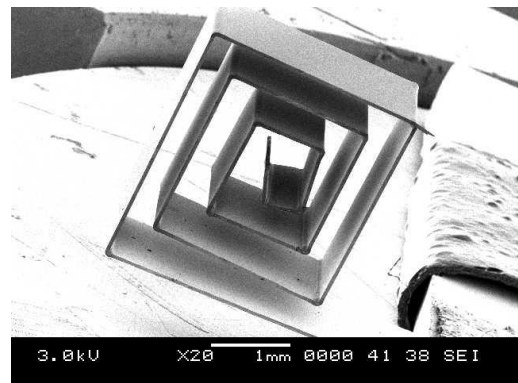


図10 矩形の渦巻き状に成形されたガラス箱

5.2 球面形状加工

ガラス箔はレーザー吸収剤の塗布面に凹となるように屈曲した。またレーザー走査軌跡に沿って屈曲することから、ガラス箔をもっと自在に3次元成形加工できるのではないかと考えた。そこで図11に示すようにガラス箔の1点を円の中心とし、その円周からこの中心に向けてレーザーを走査させた。円周上の走査開始点は次第にずらして行き、1周回転させて円の面積を全て塗りつぶすようにした。条件は出力0.42Wでこれを2周、次に0.96Wで同様に2周、最後に2.24Wで2周照射を行った。走査速度はいずれも2.97mm/s、円の半径は1.5mmである。なお、本加工では、ガラス裏面にレーザー吸収剤を49nm厚で塗布し、レーザーがガラスを透過し、裏面に対して凹形状に変形するように促した。図12に加工面形状の測定結果を示す。これにより、裏面が凹で曲率半径4mm~5mmの球面形状の創成が可能となった。ただし、この曲面加工では曲率半径をさらに小さくしようとすると、ガラス箔が2枚に剥離してしまった。この剥離現象のメカニズムを考えてみる。まず、急加熱によってレーザー吸収面では圧縮応力が生じ、塑性変形による盛り上がり形成される。さらに冷却時には熱収縮が生じて塑性変形分だけ屈曲が余計に生じ、レーザー吸収面では凹形状に屈曲する。このとき、レーザー吸収剤を塗布した面が屈曲しても裏面で温度上昇が不十分であったならば、十分に軟化していないため、この屈曲に反発するガラス内部での引張応力によってガラス箔は2枚に剥離してしまうことが考えられる。よって、剥離せずに曲率半径の小さな曲面形状加工を行うには、レーザー照射面に対してその裏面の温度管理が重要であると思われる。

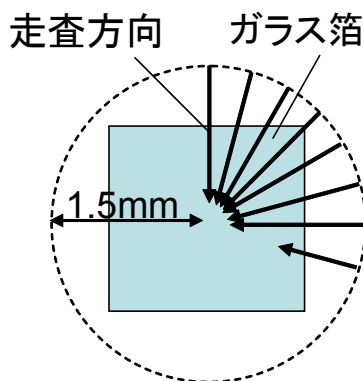


図11 ガラス箔の曲面加工方法

そこでガラス箔の表裏に膜厚を変えてレーザー吸収剤を塗布し、伝熱では不十分な裏面温度上昇をレーザー吸収で直接支援することを検討した。ここでは屈曲によって凸面となるレーザー照射面側に対しても軟化を支援するためのレーザー吸収剤を僅かに塗布することにした。レーザー照射実験の結果を図13に示す。これにより、ガラス箔の剥離もなく曲率半径を1~2mm程度まで小さくすることが可能になった。

6. おわりに

本研究では、まずガラスファイバについて成形加工実験を行い、TGMによる屈曲加工が可能であることを明らかにした。その後50μm厚のガラス箔に対し、レーザー微細成形加工を試み、精度良く屈曲加工が可能であることを、レーザーの透過性を利用した裏面の屈曲加工にも成功した。これを用いて曲面加工も可能であることを示すことができた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) 難波義治・片山卓也：精密工学会誌，65-9(1999)，1330.
- 2) 上田隆司・山田啓司・及川志郎・細川 晃：精密工学会誌，67-2(2001)，300.
- 3) 千徳英介・上田隆司・山田啓司・細川 晃・田中隆太郎：2005年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，529.

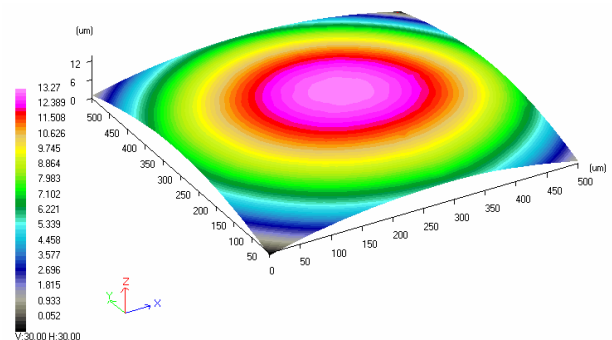


図12 裏面のみに吸収剤を塗った試料での加工結果

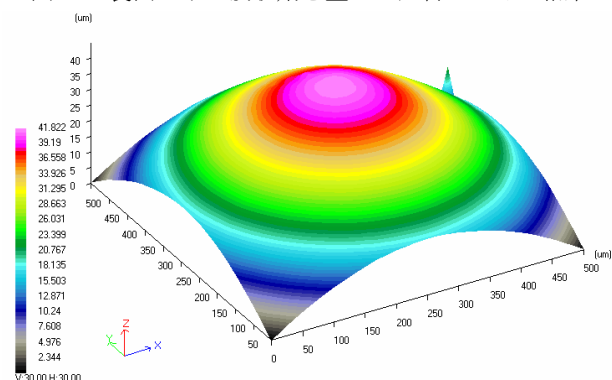


図13 表面にも薄く吸収剤を塗った試料での加工結果