

ガラス箔のレーザ 3次元成形加工法

埼玉大学大学院 理工学研究科
教授 池野順一

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010204)

キーワード：レーザ加工、ベンディング、成形加工、熱応力、ガラス箔。

1. 研究の目的と背景

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、スム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切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(マイクロオーダー)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、その後金沢大学など多くの研究者ら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。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は急冷されて熱収縮が生じる。こ

の際に、塑性変形した盛り上がり分だけ、表面の長さは本来よりも小さくなり引張応力が作用して金属はレーザ照射側に凹形状に屈曲することになる。これは温度購買機構(TGM)と呼ばれるメカニズムである。

一方、座屈機構(BM)と呼ばれるメカニズムは板厚が薄いときに生じる現象で、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のが原因で TGM とは逆に屈曲することが知られている。

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 ミクロンのガラス箔である。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、熱を溜めやすく 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 ミクロン)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。

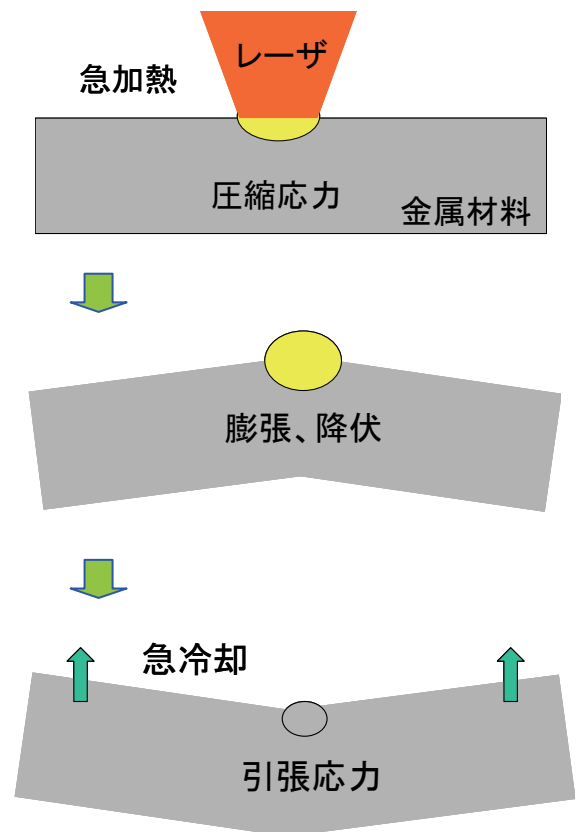


図 1 レーザフォーミングプロセス

3. ガラスファイバによるレーザ成形の基礎実験

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ミクロン）の先端から220ミクロン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は照射されるようにした。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N.A.=0.46を用い、スポット径を約26ミクロンに集束させた。実験条件は表1に示す。

3.2 実験結果

実験結果を図3に示す。これにより、レーザ照射方向に屈曲させることが可能であった。屈曲は出力により限界があったため、屈曲の限界角度 ψ とレーザ出力の関係を調査した。その結果を図4に示す。以上より、ガラスファイバはBMではなくTGMによって屈曲し、出力が高いときほど屈曲角度は大きくなることがわかった。なお、屈曲角度は 0° から 70° 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。

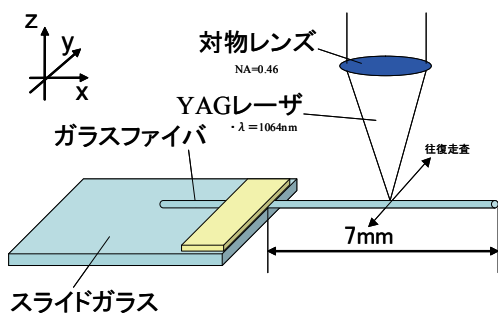


図2 ガラスファイバの加工実験

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 μm
ファイバの長さ	7mm

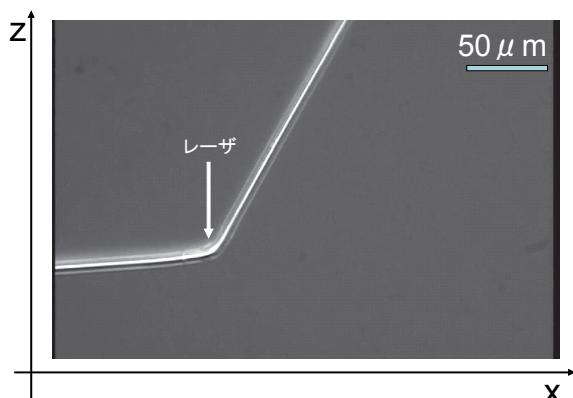


図3 ガラスファイバの屈曲実験の様子

4. ガラス箔の成形基礎実験

4.1 屈曲方向制御法の提案

ガラスファイバにレーザ光を照射し、TGMによってガラスファイバを曲げることが可能であった。ただし、実験では透過エネルギーが大きいため、光学顕微鏡下でレーザ焦点とファイバ表面を厳密に一致させてから照射していた。そこで、透過するレーザ光線を選択的にガラス表面で吸収できれば、レーザ照射方向は一定でも、凹に屈曲する面は自在に選択できると考えた。すなわち、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ため、ガラス箔の表裏いずれかを凹に屈曲させたい場合は、その面にレーザ吸収剤を塗布し、格段にレーザ光を吸収させればよいのではないかと考えた。そこで図5に示すように、屈曲させたい面側にレーザ吸収剤を塗布し、レーザ光を吸収させて凹に屈曲させることを試みることにした。この方法によって、TGMでも金属ではできなかった照射面の凸状屈曲が可能になるものと期待される。

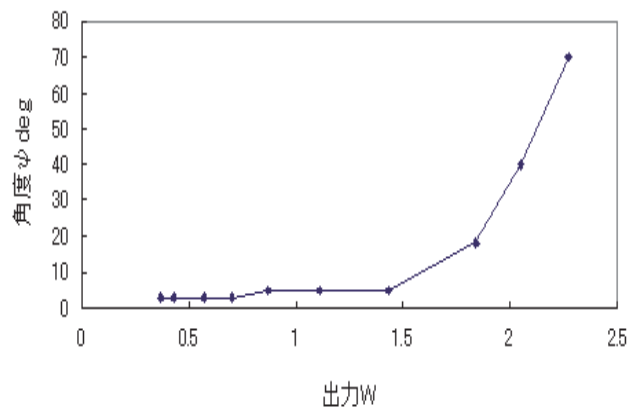


図4 屈曲角度とレーザ出力の関係

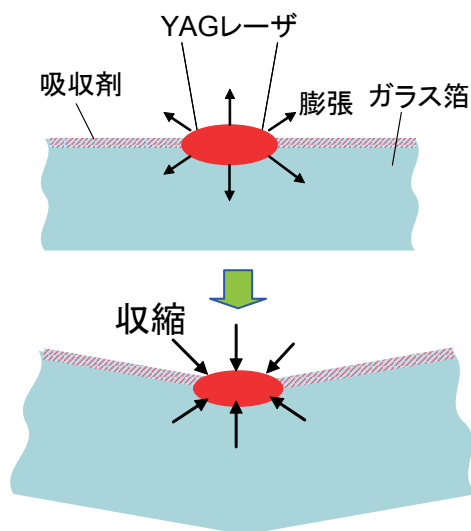


図5 レーザ吸収剤を利用したガラス箔のレーザ成形

4.2 実験方法及び条件

実験方法を図6、条件を表2に示す。ガラス箔は幅1.5mm、長さ10mm、厚さ50ミクロンのものを用い、スライドガラスに固定し、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、ガラス箔先端から2mm離れた位置にガラス箔の幅方向に一定出力で繰り返し直線走査させた。走査距離はガラス箔幅と同じ1.5mmである。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。用いたレーザはCW YAGレーザ($\lambda=1064\text{nm}$)であり、対物レンズによって、ビームスポット径を約26ミクロンに集束させた。

4.3 実験結果

照射実験の結果を図7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8(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生じていたことがわかった。一方、ガラス箔裏面の観察では同図(b)に示すように、割れが生じることなく、なめらかな面を保っていることが確認できた。すなわち、成形加工メカニズムとしては、まず、レーザ照射面で急加熱による圧縮応力によってガラスは塑性変形する。次に急冷による熱収縮が生じ引張応力と伝熱による裏面の軟化によって、ガラス箔は割れることなく屈曲したと考えられる。

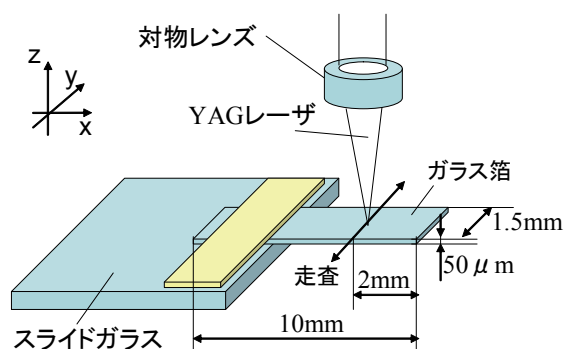


図6 ガラス箔の実験方法

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)

5. ガラス箔の成形本実験

5.1 屈曲角度制御性の検証

レーザによるガラス箔の屈曲が確認できたので、本加工法によるガラス箔の屈曲挙動の分解能を調査した。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。

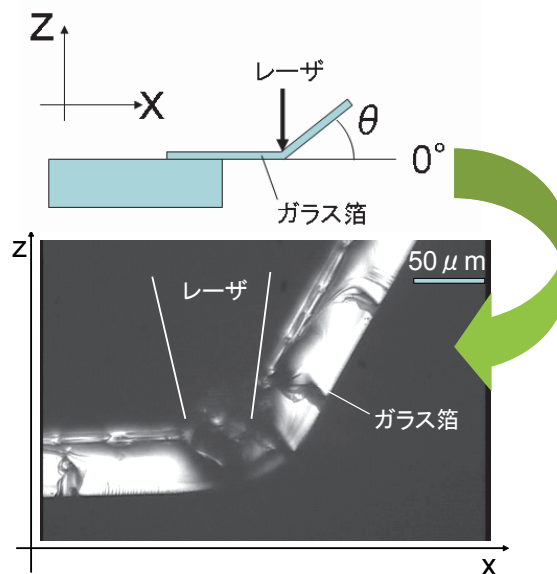
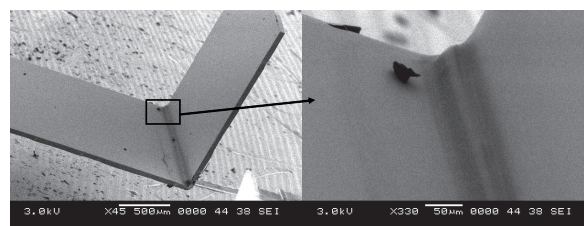
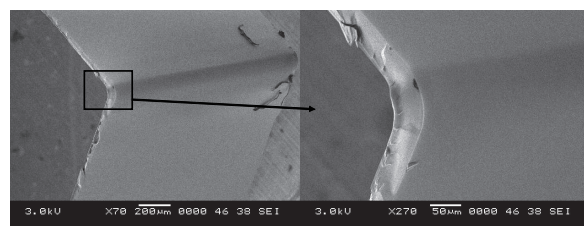


図7 ガラス箔の屈曲した様子



(a) レーザ照射面



(b) 裏面

図8 ガラス箔の屈曲部分のSEM観察結果

図9に屈曲角度 θ とレーザー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° 程度まで曲がるのがわかった。また、屈曲角度の変化量は始めのうち大きく、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 辺りでは小さく、 $60 \sim 70^\circ$ 辺りから再び大きくなるという傾向が見られた。

5.2 球面形状の成形実験

ガラス箱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、ガラス箱をもっと自在に3次元成形加工できるのではないかと考えた。そこで図10に示すようにガラス箱の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11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、ガラス箱が2枚に剥離してしまった。

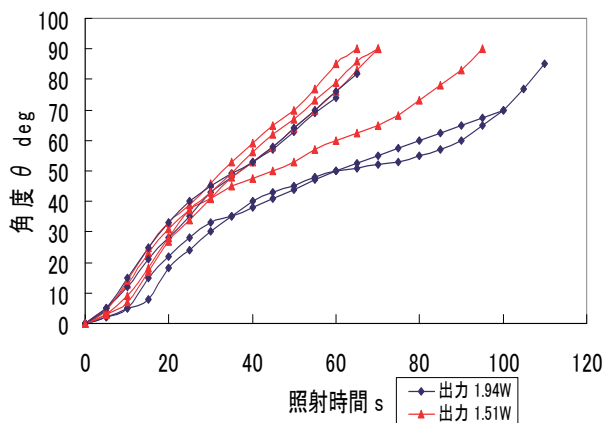


図9 屈曲角度 θ とレーザー照射時間の関係

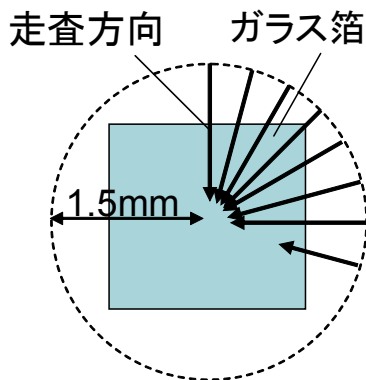


図10 レーザによる球面形状の成形法

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箱は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。

そこでガラス箱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12に示す。これにより、ガラス箱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。

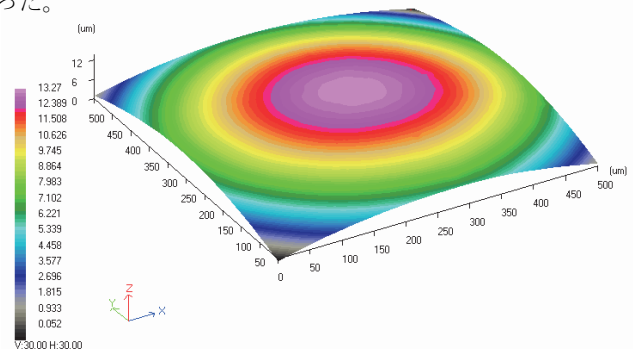


図11 曲率半径4mm~5mmの球面成形結果

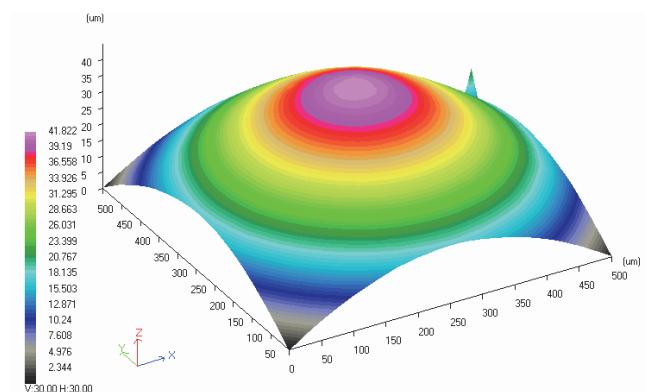


図12 曲率半径4mm~5mmの球面成形結果

6. 結言

本研究では、 50μ 厚のガラス箱に対し、レーザー微細曲げ加工を試み、屈曲加工、3次元形状の成形が可能であることを見出した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり公益財団法人天田財団から研究助成を頂戴しました。ここに厚く御礼申し上げます。