

# 炭酸ガスレーザーを用いた繊維強化プラスチックの レーザーフォーミングに関する研究

崇城大学 工学部 機械工学科  
教授 北田 良二  
(2018年度 一般研究開発助成 AF-2018221-B3)

キーワード：レーザーフォーミング，熱可塑性炭素繊維強化プラスチック，炭酸ガスレーザー

## 1. 研究の目的と背景

低炭素社会の実現において，自動車や航空機の燃費向上と軽量化は重要な取り組みであり，軽金属や炭素繊維強化プラスチックの普及が急速に進んでいる。しかしながら，熱硬化性プラスチックをマトリクス材とした炭素繊維強化プラスチックは，高コストでリサイクルが困難である。一方，熱可塑性プラスチックをマトリクス材とした熱可塑性炭素繊維強化プラスチック（CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic）は，低コスト，リサイクルおよび二次成形が可能といった特徴があり，今後の実用展開が期待されている<sup>1)</sup>。したがって，CFRTPの実用化において高能率な塑性加工法を提案することは重要な取り組みとなる。

レーザーフォーミングは，試作や多品種少量生産に適する加工方法であり，金型を使用せずに容易に成形加工が可能である。一般的には金属の板材に適用されることが多く，プラスチック材料への適用例は少ない<sup>2)</sup>。したがって，レーザーフォーミングをCFRTPへ適用できれば，高能率に試作や二次成形が可能となる。

本研究は，炭酸ガスレーザーによるCFRTP板材のレーザーフォーミングについて実験的に取り組み，レーザー光走査条件がフォーミング特性に及ぼす影響を検討した。また，レーザー光走査法を検討することでCFRTP板材の曲げ加工を試みた。

## 2. レーザーフォーミング法

### 2.1 熱可塑性炭素繊維強化プラスチック（CFRTP）

CFRTP板材には，東レプラスチック精工製のトップファイブ CF を使用した。本実験では，30×60×厚み 1.0 mm のCFRTP 板材表面に炭酸ガスレーザー光を走査することでフォーミング特性を評価した。CFRTP 板材の主な仕様と物性値を表 1 に示す。マトリクス材は熱可塑性プラスチックのナイロン 6 である。炭素繊維の含有量は 20 wt.%，繊維径は 7  $\mu\text{m}$ ，繊維長さは 0.3~0.4 mm である。CFRTP 板材の炭素繊維には配向があるため，短辺 30 mm に対して平行に炭素繊維が配向するように試験片を製作した。

プラスチック材料は，水分含有量によって，物理的特性や曲げ強度などの機械的特性が変化するため，試料の水分量はレーザーフォーミング特性を議論する上で重要因子となる<sup>3)</sup>。そこで，本実験では，送風定温恒温器（ヤマト科

学，DKM400）により，CFRTP 板材を 120  $^{\circ}\text{C}$  で 6 時間乾燥処理して，試験片に含まれる水分量を一定に管理した。乾燥処理した CFRTP 板材に対して 3 点曲げ試験（長辺 60 mm に対して，支持間距離を 40 mm として，長辺の中心位置を短辺全体に垂直方向へ 5 mm 圧縮）を実施した結果，その最大曲げ荷重が約 35 N に統一されていることを確認した。

表 1 CFRTP 板材の仕様

マトリクス材	ナイロン6 (PA6)
炭素繊維	直径: 7 $\mu\text{m}$ 長さ: 0.3~0.4 mm 含有量: 20 wt.%
密度	1220 kg/m <sup>3</sup>
熱伝導率	0.3 - 0.4 kcal/(m $\cdot$ hr $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$ )
融点	225 $^{\circ}\text{C}$
ガラス転移温度	50 $^{\circ}\text{C}$

### 2.2 レーザーフォーミング実験装置

レーザーフォーミング実験装置の模式図を図 1 に示す。本研究では，市販の炭酸ガスレーザー加工機（Great Computer Corporation, SPIRIT GLS, 波長 10.6  $\mu\text{m}$ ）を用いて CFRTP 板材のレーザーフォーミングを試みた。ピーク出力 100 W のパルスレーザーを  $\square 5\text{ mm}$  のマスクを通過させて  $\square 5\text{ mm}$  のビーム形状に成形して，CFRTP 板材表面へ走査することでレーザーフォーミングを行った。

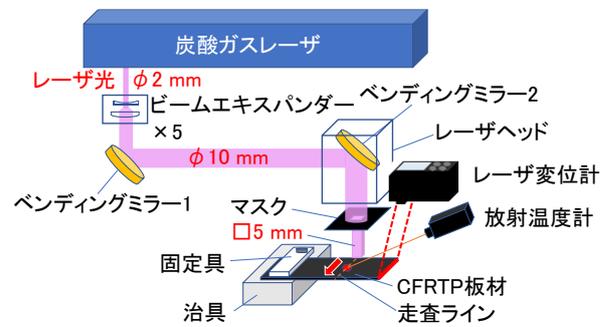


図 1 レーザーフォーミング実験装置

### 2.3 レーザー光走査法

CFRTP 板材表面へのレーザー光走査方法を模式的に図 2

に示す。CFRTP 板材を片持ち梁状にステージ上へ水平に固定して、試験片端部から 20 mm の位置にレーザー光を等速走査することでフォーミングした。本実験では、CFRTP 板材の短辺 30 mm に対して平行に配向した炭素繊維と平行にレーザー光を 1 回のみ走査した。レーザー光の走査速度を 4.2 mm/s (測定値) に固定し、平均出力 (設定値) が 1, 2, 3 W の場合において、レーザーパルスの重なり率であるオーバーラップ率 (設定値) を変化させることで CFRTP 板材のレーザーフォーミング特性を評価した。

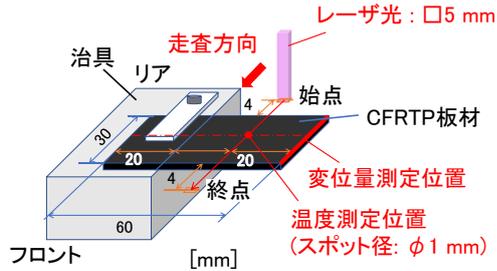


図 2 レーザ光走査法

#### 2・4 フォーミング特性評価

レーザーフォーミング特性は、試験片先端の形状を形状測定センサ (オプテックス・エフエー, LS-100CN) にて、図 1 に示すように CFRTP 板材の真上から非接触で測定した。そして、レーザー光走査前後の形状測定センサの形状データを比較して変位量を求めた。また、放射温度計 (ジャパセンサ, TMHX-CSE0500) により、レーザー光走査時の CFRTP 板材表面の温度変化を測定した。レーザー光走査線上の中心位置における CFRTP 板材表面の最高温度とレーザーフォーミング特性との相関について検討した。

レーザーフォーミングは熱応力によりレーザー光照射面方向へ変形する。したがって、実験後の CFRTP 板材表面および側面を光学顕微鏡 (松電舎, FZR350PC2) により観察することで、レーザー光走査痕や曲げ角度をそれぞれ評価した。

### 3. レーザフォーミング特性

#### 3.1 オーバラップ率がフォーミングに及ぼす影響

オーバーラップ率 (設置値) に対する CFRTP 板材先端の変位量を図 3 に示す。いずれの平均出力 (設定値) におい

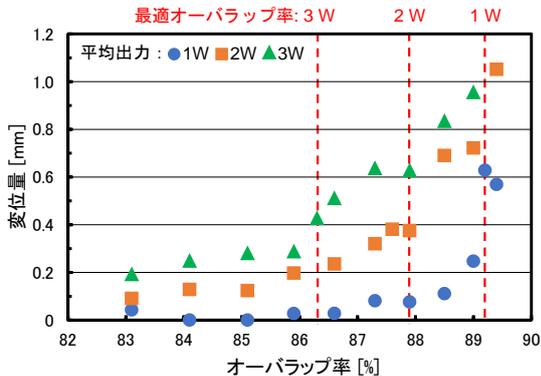


図 3 変位量とオーバーラップ率の関係

ても、オーバーラップ率を増加させると変位量が大きくなる傾向であることがわかる。また、同じオーバーラップ率においては、平均出力が高くなるほど変位量は大きくなることがわかる。したがって、オーバーラップ率および平均出力を大きくすることで、より大きな変位量を得られることが明らかとなった。

次に、オーバーラップ率に対する CFRTP 板材表面の最高温度を図 4 に示す。いずれの平均出力においても、オーバーラップ率が大きくなるにつれて最高温度は高くなる傾向がある。また、同じオーバーラップ率においては、平均出力が高くなるほど最高温度は高くなることがわかる。

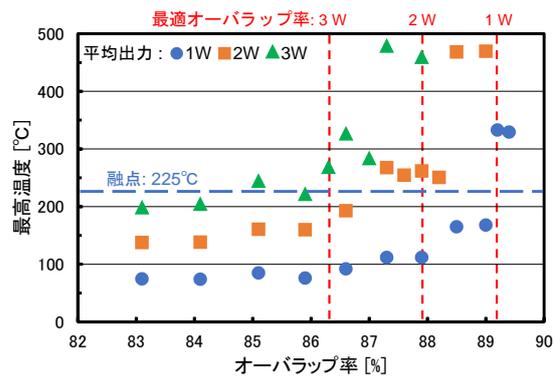


図 4 CFRTP 板材表面の最高温度とオーバーラップ率の関係

#### 3.2 オーバラップ率の最適化

良好なレーザーフォーミングを得るためには、レーザー光走査による CFRTP 板材への熱的なダメージが小さく、より大きな変位量となるレーザー光走査条件を検討する必要がある。そこで、図 3 および図 4 の結果から、CFRTP 板材表面の最高温度が CFRTP マトリクス材の融点温度 225 °C 付近であり、より大きな変位量を得られるレーザー光走査条件を、レーザーフォーミングの最適条件として抽出した。その結果、平均出力 1 W (設定値) の場合はオーバーラップ率 (設定値) が 89.2 %、2 W の場合は 87.9 %、3 W の場合は 86.3 % となり、平均出力が大きくなるほど、レーザーフォーミングに適するオーバーラップ率は低くなることが明らかとなった。

レーザーフォーミングの最適条件として抽出したレーザー光走査条件における CFRTP 板材のフォーミング結果を図 5 に示す。

平均出力 [W]	1	2	3
オーバーラップ率 [%]	89.2	87.9	86.3
レーザー光照射表面			
レーザー光走査入口側			
レーザー光走査出口側			

図 5 最適平均出力と最適オーバーラップ率における CFRTP 板材のフォーミング結果

いずれの平均出力においても同等なフォーミングが得られることがわかる。これらの結果より、平均出力とオーバーラップ率のバランスにより、良好なフォーミングが得られることが明らかとなった。

### 3.3 パルス波形がフォーミングに及ぼす影響

レーザフォーミング特性の高精度化・安定化と制御性を高めるためには、パルスレーザのパルス波形とフォーミング特性の相関を考察する必要がある。そこで、図6に示すアッテネータによりパルスレーザのピーク出力を制御して、パルス波形とCFRTP板材のフォーミング特性の相関について検討した。図7にパルス波形の模式図を示す。レーザ加工機の平均出力（設定値）によりパルス幅を、アッテネータの透過率（設定値）によりピーク出力をそれぞれ変化させることでパルスエネルギーを制御した。

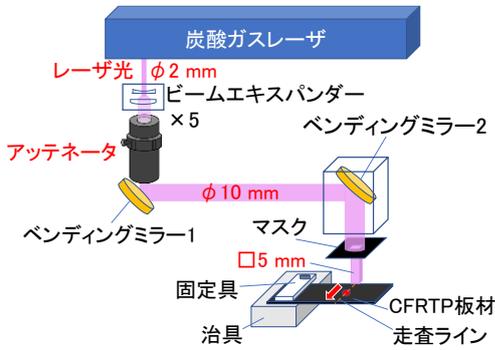


図6 アッテネータを使用したピーク出力制御におけるレーザフォーミング法

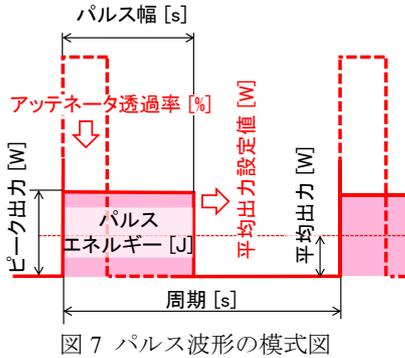


図7 パルス波形の模式図

オーバーラップ率は3.2節の結果に基づき、各平均出力における最適値の平均である87.3%に固定した。パルス幅が1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.6 msの場合において、アッテネータ透過率を変化してピーク出力を制御することでパルス波形を変化させてフォーミング特性との相関を検討した。

CFRTP 板材先端の変位量とピーク出力との関係を図8に示す。いずれのパルス幅においても、ピーク出力が大きくなるほど変位量が大きくなる傾向であることがわかる。また、パルス幅が長くなるほど変位量は大きくなった。

次に、CFRTP 板材表面の最高温度とピーク出力の関係を図9に示す。いずれのパルス幅においても、ピーク出力

が大きくなるにつれて最高温度は高くなる傾向があることがわかる。また、パルス幅が長くなるほど最高温度は高くなった。なお、パルス幅およびピーク出力が大きくなると試料表面に溶融や燃焼が確認された。

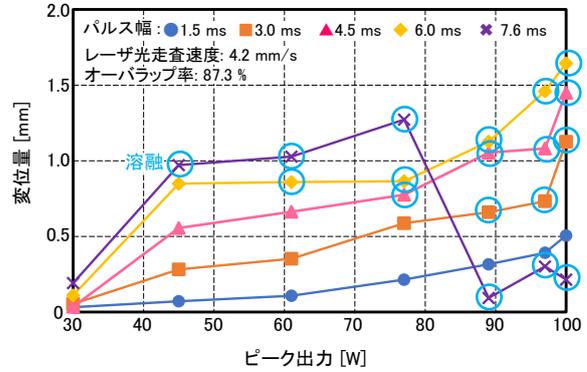


図8 変位量とピーク出力の関係

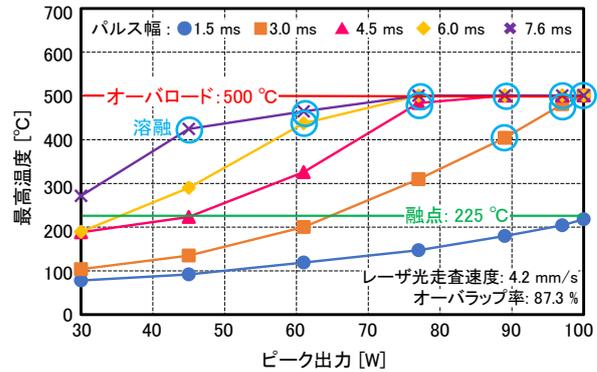


図9 CFRTP 板材表面の最高温度とピーク出力の関係

### 3.4 パルス波形の最適化

図8および図9の結果から、CFRTP 板材表面の最高温度がCFRTP マトリクス材の融点温度225°C付近であり、より大きな変位量が得られるレーザ光走査条件を、レーザフォーミングの最適条件として抽出した結果を図10に示す。熱的なダメージが小さく、最大変位量が得られるパルス幅は6.0 msであることがわかった。

パルス幅 [ms]	1.5	3.0	4.5	6.0	7.6
ピーク出力 [W]	100	77	61	45	30
レーザ光照射表面					
レーザ光走査出口側					
変位量 [mm]	0.51	0.59	0.66	0.85	0.19
最高温度 [°C]	217.9	309.5	325.9	289.8	271.4

図10 最適パルス幅と最適ピーク出力におけるCFRTP 板材のフォーミング結果

抽出した図 10 の最適条件におけるレーザパルス波形の模式図を図 11 に示す。パルス幅およびピーク出力によりパルスエネルギーを算出した結果、より大きな変位量を得られるレーザフォーミングに最適なパルスエネルギーは約 0.25 J であることがわかった。また、レーザフォーミングにより最適なパルス波形は、図 10 の結果より、パルス幅が長く、ピーク出力が低いパルス波形であると考えられる。

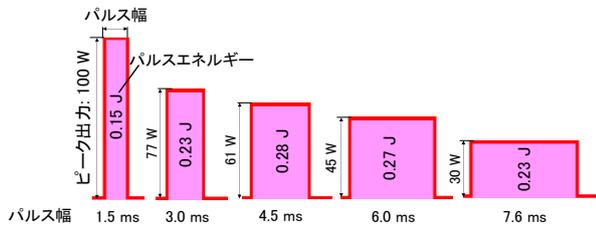


図 11 最適条件におけるパルス波形の模式図

#### 4. レーザフォーミングによる曲げ加工

##### 4.1 曲げ加工の実験方法と評価法

第 3 節により、レーザ光走査条件とフォーミング特性の相関が明らかとなった。次に、CFRTP 板材に対するレーザ光走査法を検討することで、より大きな変位量を得られる曲げ加工を試みた。

曲げ加工実験におけるレーザ光走査条件を表 2 に示す。これらは 3.4 節より得られたレーザ光走査時の CFRTP 板材表面温度がマトリクス材の融点である 225 °C 程度となり熱的なダメージが小さく、より大きな曲げ角度が得られる最適条件として抽出されたものである。

レーザフォーミングは、熱応力により板材がレーザ光照射面方向へ変形するため、図 12 に示すようにレーザ光走

表 2 曲げ加工におけるレーザ光走査条件

レーザ光走査速度	4.2 mm/s
オーバーラップ率	87.3 %
パルス幅	6.0 ms
ピーク出力	45 W

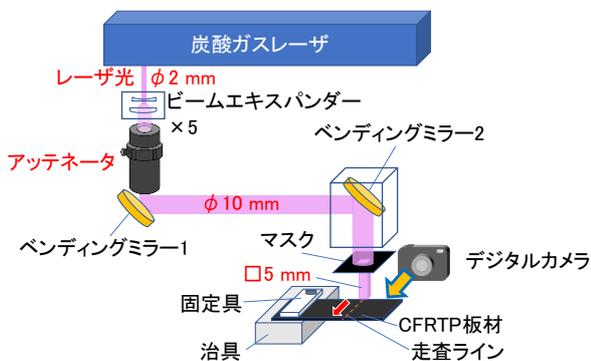


図 12 曲げ加工の評価法

査入口側の板材側面にデジタルカメラを設置することでフォーミング状態の変化を動的に観察した。また、フォーミング後の CFRTP 板材を光学顕微鏡 (松電舎, FZR350PC2) により観察することで、レーザ光走査痕や曲げ角度をそれぞれ評価した。

##### 4.2 重ね走査法によるフォーミング特性

CFRTP 板材表面にレーザ光を重ね走査することで、熱応力による変位を累積させる曲げ加工を試みた。同一ライン上の走査を繰り返すレーザフォーミング法を重ね走査と定義し、その模式図を図 13 に示す。板材の固定側の端から 40 mm の位置にレーザ光を重ね走査した。そして、レーザ光重ね走査の間隔において 60 s の冷却時間を設け、最大 15 回まで重ね走査実験を行った。

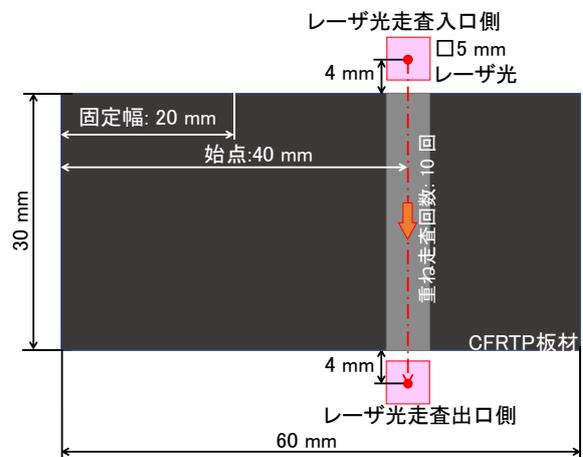


図 13 重ね走査法の模式図

デジタルカメラにて観察した動画から重ね走査回数に対するフォーミングの変位量を評価した結果を図 14 に示す。変位量はレーザ光入口側からみた板材先端の挙動を意味しており、同一条件で 3 回の実験を行った。全ての実験において重ね走査回数が増加するにしたがって変位量が大きくなり、重ね走査回数 10 回以上においては変位量が

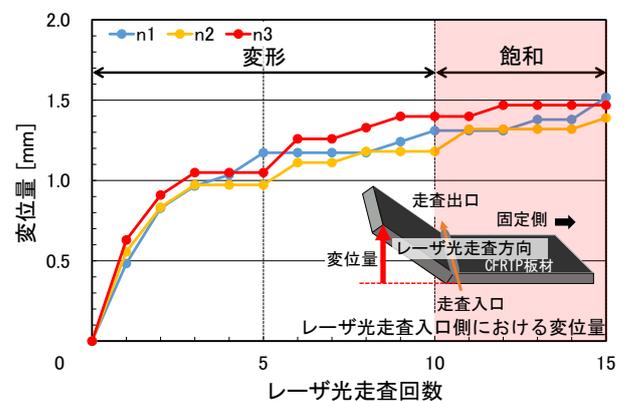
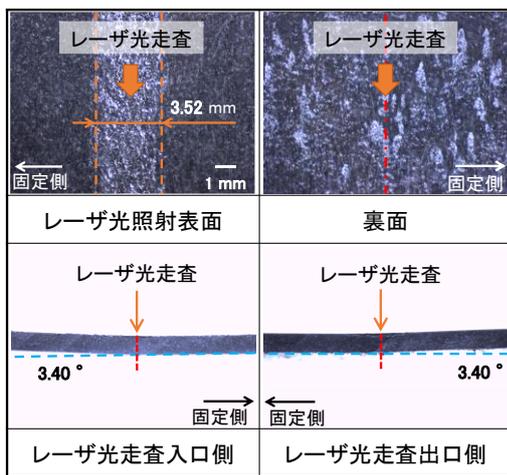


図 14 重ね走査法における変位量とレーザ光走査回数との関係

飽和していることがわかる。したがって、レーザー光走査による CFRTP 板材表面への熱的なダメージが小さく、より大きな変位量を得られる重ね走査回数は 10 回であると考えられる。一方、重ね走査回数 10 回以上において変位量が飽和した主な原因としては、炭素繊維による復元力が熱応力よりも強く作用したことが考えられる。

重ね走査回数 10 回における CFRTP 板材のフォーミング状態を光学顕微鏡で観察した結果を図 15 に示す。レーザー光走査の入口側および出口側ともに曲げ角度は  $3.4^\circ$  であり、ねじれない曲げ加工が得られていることがわかる。これはレーザー光を複数回重ね走査することで、熱応力による曲げ加工がレーザー光走査ライン上で均一化された結果であると考えられる。また、レーザー光照射痕はレーザー光照射側の板材表面のみであり、その裏面においては熱的な変質は確認されていない。したがって、レーザー光を複数回照射する重ね走査においても、レーザー光が板材を透過することなく主に板材表面でレーザー光は吸収されているものと考えられる。



重ね走査: 10 回

図 15 重ね走査法による曲げ加工結果

#### 4.3 シフト走査法によるフォーミング特性

重ね走査によるフォーミング特性を評価した結果、重ね走査回数 10 回における変位量は約 1.5 mm であった。しかしながら、CFRTP 板材のレーザーフォーミングによる曲げ加工を検討するにあたり十分な変位量は得られていない。そこで、レーザー光をシフト走査して曲げ加工を累積することで、より大きな変位量を得ることを検討した。走査ライン位置を平行移動するレーザーフォーミング法をシフト走査と定義し、その模式図を図 16 に示す。レーザー光走査位置を一定量ずつ移動させるシフト幅を 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 mm と変化させて、図中のシフト ①, ②, ③, ④, ⑤の順にレーザー光を走査させた。シフト幅 5 mm の場合、 $\square 5$  mm のレーザー光が接する状態となり、シフト幅 1, 3, 4 mm においてレーザー光が重なる状態、シフト幅 6, 7, 9 mm においてはレーザー光が離れる状態となる。同一走査ライン

における重ね走査回数は 4.2 節の結果に基づき 10 回として、シフト走査回数は 5 回に固定した。板材の固定側の端から 10 mm のレーザー光走査ラインであるシフト⑤を曲げ加工の最終ラインとして統一したため、フォーミング開始ラインであるシフト①の位置はシフト幅に応じてそれぞれ異なる。また、重ね走査およびシフト走査におけるレーザー光走査間隔において 60 s の冷却時間を設けた。

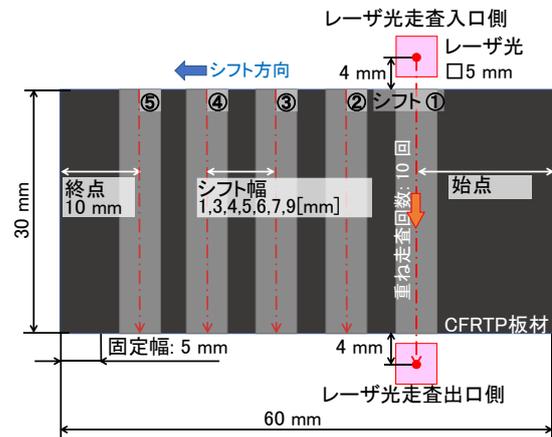
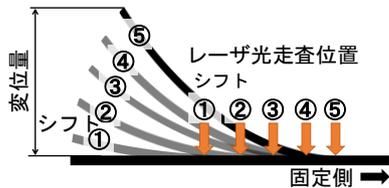


図 16 シフト走査法の模式図

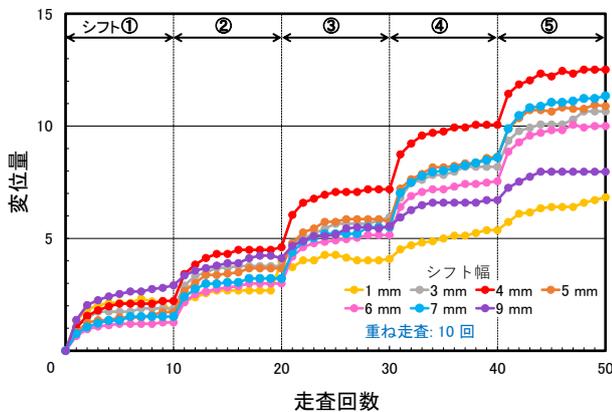
図 14 と同様にして、デジタルカメラにて観察した動画から、シフト幅に対するフォーミングの変位量を評価した結果を図 17 に示す。重ね走査回数 10 回毎にシフト走査させた全てのレーザー光走査回数に対する変位量をプロットしたグラフである。いずれのシフト幅においても、重ね走査の範囲では緩やかな変位量の増加し、シフト走査によって階段状に変位量が大きく増加していることがわかる。また、シフト幅 4 mm の場合において、最大変位量 12.5 mm が得られることがわかった。そして、シフト幅 4 mm の変位量を最大として、シフト幅 4 mm よりも小さい場合、大きい場合ともに変位量は小さくなる傾向となった。シフト幅 4 mm よりも小さいシフト幅の場合、 $\square 5$  mm のレーザー光がシフト走査により重なるため、図 14 の重ね走査の結果に基づき変位量は飽和したものと考えられる。一方、シフト幅 4 mm よりも大きいシフト幅の場合、 $\square 5$  mm のレーザー光がシフト走査により離散的となり、緩やかな曲げ角度が累積することで変位量は大きく増加しなかったものと考えられる。したがって、より大きな変位量を得られるシフト幅は  $\square 5$  mm のレーザー光が接するシフト幅 5 mm であると理論的には考えられる。しかしながら、実際にはレーザー光強度はガウス分布であるため、レーザー光が 1 mm 幅で重なるシフト幅 4 mm の場合に最も大きな変位量になったものと推測される。

最大変位量が得られたシフト幅 4 mm における CFRTP 板材のフォーミング後の状態を図 18 に示す。レーザー光走査の入口側の曲げ角度は  $12.2^\circ$  であり、より大きな曲げ加工が得られていることがわかる。レーザー光走査側の板材表

面には図 15 と同様のレーザ光照射痕が全面に確認できることから、レーザ光が板材表面に均一に照射された結果であると言える。また、図 17 および図 18 の結果より、シフト幅 4 mm にて重ね走査とシフト走査を繰り返すことで、CFRTP 板材の変位量は飽和することなく、より大きな曲げ角度を持った曲げ加工が可能であると考えられる。

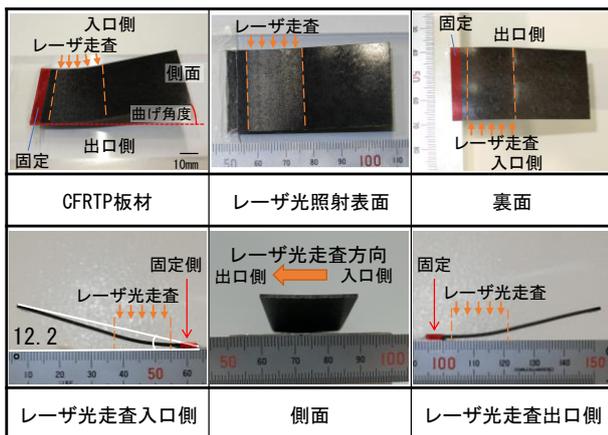


(a) レーザ光走査入口側における変位量



(b) レーザ光走査回数に対する変位量

図 17 シフト走査法における変位量とレーザ光走査回数の関係



シフト幅: 4 mm, 重ね走査: 10 回

図 18 シフト走査法による曲げ加工結果

## 5. まとめ

炭酸ガスレーザによる CFRTP 板材のレーザフォーミン

グについて実験的に組み合わせた結果、高能率な試作や二次成形の可能性を示すことができた。

レーザ光走査条件がフォーミング特性に及ぼす影響について得られた成果を以下に挙げる。

- (1) オーバラップ率を大きくするにつれて、レーザ光走査時の CFRTP 板材表面の最高温度が高くなり、板材先端の変位量が大きくなる。
- (2) 平均出力が大きいほど、CFRTP 板材表面の最高温度が高くなり、変位量が大きくなる。
- (3) レーザ光走査条件の最適条件を検討した結果、平均出力が大きくなるほど、レーザフォーミングに適するオーバラップ率は低くなる。
- (4) 各平均出力において、アッテネータ透過率を大きくするにつれて、レーザ光走査時の CFRTP 板材表面の最高温度が高くなり変位量が大きくなる。
- (5) レーザフォーミングの最適条件を検討した結果、平均出力が大きくなるほど、アッテネータ透過率は小さくなる。また、最適なパルスエネルギーは約 0.25J であると考えられる。
- (6) レーザフォーミングに最適なパルス波形は、パルス幅が長く、ピーク出力が低い波形であると考えられる。また、レーザ光走査法を検討して曲げ加工を試みた結果、以下の成果を得ることができた。
- (7) 熱応力による変位を累積させる重ね走査では、重ね走査回数が増えるにしたがって変位量は増加するが、重ね走査回数 10 回以上においては変位量が飽和する。
- (8) レーザ光走査位置を一定量ずつ移動させるシフト走査では、いずれのシフト幅においても、シフト走査によって階段状に変位量が大きく増加する。
- (9) 重ね走査 10 回とシフト幅 4 mm のシフト走査を繰り返すことで、効果的に CFRTP 板材の曲げ加工が可能である。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団（レーザプロセッシング一般研究開発助成 AF-2018221-B3）の研究助成を受けて行われたものであり、ここに深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 馬場俊一：連続繊維熱可塑性材料 CFRTP・GFRTP と市場動向, 精密工学会誌, Vol.81, No.6 (2015), pp.503-506.
- 2) 岡本康寛, 宮本勇, 宇野義幸: YAG レーザによるプラスチックのレーザフォーミング, 高温学会誌, Vol.30, No.1 (2004), pp.47-54.
- 3) 加藤木秀章, 竹村兼一: 炭素繊維強化複合材料の曲げ強度及びクリープ特性に及ぼす吸水の影響, 日本複合材料学会誌, Vol.35, No.6(2009), pp.233-240.