

# 高出力レーザー加工を用いた炭素繊維強化複合材料の劣化・損傷機構

## Degradation and Damage Mechanisms of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) using High-power Laser Cutting Process

|                                                     |                |                                     |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| 筑波大学大学院[学]<br>産業技術総合研究所<br>技術研究組合次世代レーザー<br>加工技術研究所 | 川井 恭平<br>原田 祥久 | Kyohei KAWAI<br>Yoshihisa HARADA    | Student Member |
| 産業技術総合研究所<br>技術研究組合次世代レーザー<br>加工技術研究所               | 鈴木 隆之          | Takayuki SUZUKI                     | Member         |
| 筑波大学大学院<br>三菱化学<br>技術研究組合次世代レーザー<br>加工技術研究所         | 寺本 徳郎<br>西野 充晃 | Tokuo TERAMOTO<br>Michiteru NISHINO | Member         |
| 産業技術総合研究所<br>技術研究組合次世代レーザー<br>加工技術研究所               | 新納 弘之          | Hiroyuki NIINO                      |                |

Carbon fiber-reinforced plastics (CFRP), which is expected to reduce the weight or increase the efficiency of transportations and energy products, was cut by an CO<sub>2</sub> gas laser (10.6μm, 800W, 20kHz, 8μs, 1m/min), CW single-mode fiber laser (1.07μm, 300W, 2000W, CW single-mode, 1m/min, 7m/min) and machining with milling. Although the high-power laser cutting processes make it possible to improve cutting rate of CFRP, the laser-cut specimens clearly showed a thermal damage with a heat-affected zone (HAZ) identified by micro X-ray CT. These specimens were lower tensile strength and fatigue strength than the milling-cut specimen. The Young's modulus in fatigue for laser-cut specimen exhibited large reduction to that of milling-cut specimen, depending on the crack propagation. The acoustic emission analysis was useful to measure the degradation and damage process during fatigue test.

**Keywords:** CFRP, laser cutting, degradation, damage mechanism, HAZ, tensile test, fatigue test, micro X-ray CT, AE analysis

## 1. 諸言

近年、地球温暖化問題における CO<sub>2</sub>削減やエネルギー問題への対策として、エネルギー・輸送機器の軽量化・高効率化・低燃費化が重要となっている。これらの構造材料候補として、鋼やチタン、アルミニウム等の金属より比重が小さく、高強度の炭素繊維強化複合材料(CFRP)が注目されている[1]。CFRP は風力発電・旅客航空機・自動車等の構造材料への導入量が近年急速に増加している。これらの製造工程では、ダイヤモンド被覆等の超硬工具による機械加工や砥粒を混入させたウオータージェ

ット加工が用いられ高品位加工が実現している[2]。しかしながら、現状の技術水準では十分な加工速度が得られていない、工具摩耗が速い等の問題が指摘されている。

一方、最近注目されている加工にレーザー加工が挙げられる。レーザー加工は、非接触加工で、加工に作用する時空間を制御することが可能であるため、加工の高速化や自動化を行うことができ、高度部材製造を支える重要技術としてエネルギー・輸送機器等へ適用範囲を拡大しつつある。CFRP のレーザー加工については、近年各国において研究[3]が盛んに行われているが、現状の技術では切断加工端部に熱影響を生じるため、十分な加工品位を保つことができず、結果として材料寿命短縮や強度低下が懸念される[4,5]。この問題に対し、熱影響を低減さ

連絡先:原田祥久、〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1  
産業技術総合研究所、機能・構造予測検証研究グループ、  
E-mail: harada.y@aist.go.jp

せるレーザー加工技術の新たな開発が必要であると同時に、加工を施した CFRP の信頼性を確保するための強度特性評価が必要不可欠である。

そこで本研究では、赤外および近赤外等の高出力レーザーによって切断加工を施した CFRP 試験片を用いて引張・疲労試験を行い、その強度特性について調べた。また、劣化・損傷モニタリング技術(マイクロ X 線 CT、アコースティックエミッション測定等)を用いて加工後の CFRP の劣化・損傷機構の検証を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

本研究で用いた CFRP は、PITCH 系炭素繊維を長手方向に対して 0°方向と 90°方向に交互に積層させたクロスプライ材である。マトリックスにはエポキシ硬化性樹脂を用いた。厚さは 2mm とした。

### 2.2 レーザー切断加工法

レーザー加工には、赤外レーザーおよび近赤外レーザーを用いた。赤外レーザーには、波長 10.6 $\mu\text{m}$  の CO<sub>2</sub> レーザー加工(以下 CO<sub>2</sub>)を用いた。平均出力 800W、繰り返し周波数 20kHz、パルス幅 8 $\mu\text{s}$ 、スポット径 134 $\mu\text{m}$ 、加工速度 1m/min の条件下で窒素ガスを吹き付けて行った。近赤外レーザーには、波長 1.07 $\mu\text{m}$  の 300W ファイバーレーザー加工(以下 300W FL)および 2000W ファイバーレーザー加工(以下 2000W FL)を使用した。両レーザーともに連続照射(CW)でかつ Yb シングルモードの高ビーム品質であり、スポット径は約 20 $\mu\text{m}$  であった。300W FL では出力 300W、加工速度は 1m/min で、2000W FL では出力 2000W で加工速度を 7m/min とし、窒素ガスを吹き付けて加工した。

比較のため、ダイヤモンド工具を使用した機械加工(以下、MC)を実施した。幅 1mm のダイヤモンド砥石を用いた平面研削盤を使用し、バリや剥離の発生しない最大切断速度 0.12mm/min で行った。

### 2.3 試験片

本研究では、CFRP 板を各切断加工法によって平板状に切り出し試験片とした。Fig.1 に疲労試験片の形状を示す。幅 25mm、長さ 200mm の形状とした。一方、引張試験片を幅 25mm、長さ 250mm の形状とした。これらは JIS K7083、JIS K7164 の標準規格に準拠して行った[6,7]。また、試験片つかみ部の端部補強用タブ材には厚さ 2mm の

ガラス繊維を用いたエポキシ樹脂積層板(利昌工業製 ES3350N)を使用し、貼付にはエポキシ樹脂系化学反応形接着剤を用いて 1~2 日程度加圧圧縮して接着した。

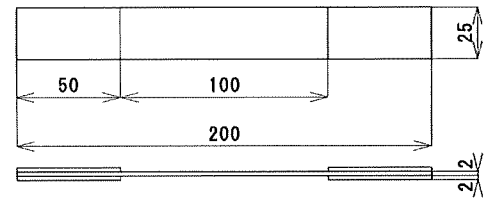


Fig.1 Geometry of fatigue test specimen

## 2.4 引張および疲労試験

本試験では、電気油圧サーボ式材料強度評価試験装置(MTS 製 810 システム)を使用した。同装置の最大引張荷重は 100kN である。油圧式のつかみ具を用いて試験片両端のつかみ部を一定圧力でつかみ、引張試験では、変位速度を 1mm/min に設定し、試験片が破断に至るまで荷重、変位、ひずみを測定した。一方、疲労試験では、荷重制御で繰返し速度を 5Hz とし、応力比  $R=0.1$  の引張-引張疲労試験を行った。試験片が破断に至るまでの荷重、変位、ひずみ、繰返し数を測定した。

## 2.5 加工・劣化損傷評価

加工後の試験片および破面の観察には、光学顕微鏡(キーエンス製 VHX-1000)および走査型電子顕微鏡(キーエンス製 VE7800)を用いた。加工面付近の内部構造の観察には X 線 CT(ヤマト科学製 TDM1000H-S $\mu$ )を用いた。

試験時の劣化損傷評価には、アコースティックエミッション(Acoustic Emission:AE)による同時計測を行った。試験時に約 80mm の間隔で試験片に取り付けた 2 個の AE センサ(Physical Acoustics 製 PICO, 500kHz 共振)によりプリアンプを介して AE 波を検出した。AE 計測については AE システム(Physical Acoustics 製 PCI-2, AEWin)にてデータを取得し解析を行った。計測時のアンプ総利得は 20dB、しきい値は 42dB とした。

## 3. 結果と考察

### 3.1 材料強度試験

#### 3.1.1 最大引張強度

本研究で用いたクロスプライ CFRP の引張挙動は、金属のような塑性域が見られず、ある応力に達すると急速に破断するという特徴を有する。そこで、破断応力を最大引張強度  $\sigma_{UTS}$  と定義した。Fig.2 には各種加工後の引張試験結果を示す。この結果から、機械加工試験片(MC)の

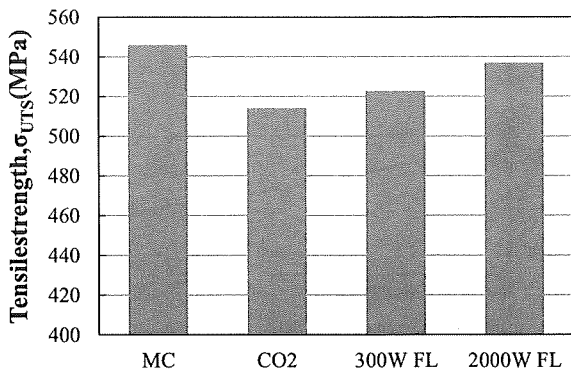


Fig.2 Tensile strength,  $\sigma_{UTS}$  as a function of several cutting process

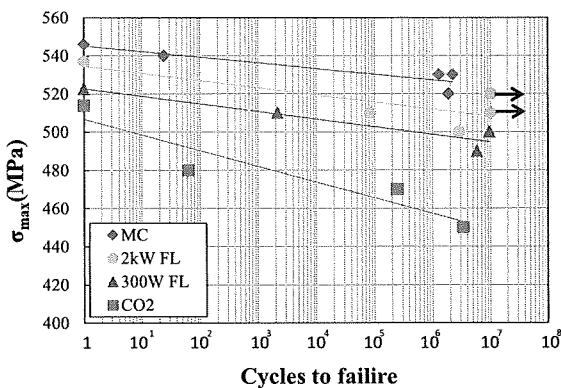


Fig.3 S-N diagram in the analysis of fatigue test for several cutting specimens

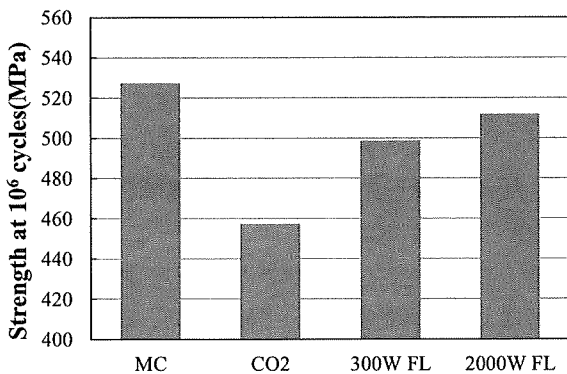


Fig.4 Fatigue strength at 10<sup>6</sup> cycles for several cutting specimens

データと比較して、レーザー加工試験片では、CO<sub>2</sub>、300W FL、2000W FLの順に強度低下の割合が大きい。すなわち、レーザー加工において、波長が短く、加工速度が速い程、強度低下が抑制できることがわかる。

### 3.1.2 疲労寿命と時間強度

Fig.3には各種加工後の疲労試験により得られたS-N線

図を示す。この結果から、機械加工試験片(MC)が最も疲労寿命が長く、レーザー加工試験片ではCO<sub>2</sub>、300W FL、2000W FLの順に疲労寿命が短くなるという傾向が見られる。また、Fig.4に示すように10<sup>6</sup>サイクル時の時間強度を比較した結果、機械加工(MC)と比較した各レーザー加工の時間強度の低下率は、最大引張強度における強度低下よりも大きい傾向が見られる。

## 3.2 劣化・損傷機構

### 3.2.1 マイクロX線CTによる劣化・損傷評価

レーザー加工試験片には、加工端部において熱影響部(Heat Affected Zone:HAZ)が確認できる。これは、レーザー加工時にCFRPに熱が加えられ、加工端部の樹脂が融解することにより、炭素繊維がむき出しになったと考えられる。そこで、より詳細に加工端部の内部への熱影響を調べるためにマイクロX線CTを用いて観察した。Fig.5に各種加工法におけるX線CT画像を示す。画像において、左右方向が引張主軸に対して90°方向繊維、奥行き方向が引張主軸に対して0°方向繊維である。この結果から、CO<sub>2</sub>、300W FL、2000W FLの順にHAZの領域が大きいことがわかる。また、表層より内部積層間に大きな範囲の変化が見られ、加工端部から一様でない熱伝達・劣化損傷が起こっているのがわかる。これは、炭素繊維の高熱伝導性から、レーザー切断加工時の熱が90°方向繊維を介することでより試験片の内部に伝わりやすくなったためと考えられる。加えて試料内部では熱が外部に拡散しにくいことも影響していると考えられる。

次に、マイクロX線CTにより得られたHAZ領域の大きさと引張強度比(レーザー加工試験片の強度/機械加工試験片の強度)の関係を整理したところ、Fig.6に示すように、引張強度比はHAZ領域の大きさに比例していることがわかる。このことから、レーザー加工試験片ではHAZ領域の測定によって、引張強度を定量的に求めることが可能となる。

### 3.2.2 クラック成長観察

Fig.7には機械加工試験片(MC)と2000Wファイバーレーザー加工試験片(2000W FL)の疲労試験前および470MPaで10<sup>5</sup>サイクル時のクラック観察結果を示す。画像において、左右方向が引張主軸に対して0°方向繊維、奥行き方向が引張主軸に対して90°方向繊維である。10<sup>5</sup>サイクル後の試料では各加工法とも、0°方向繊維層にトランスバースクラックが生じる。また、レーザー加工試験片の方が機械加工試験片よりも多くのトランスバース

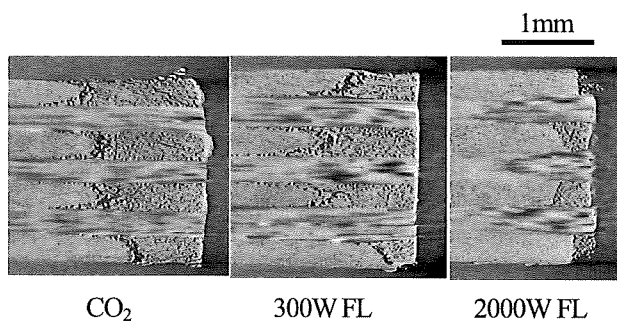


Fig.5 Observation of the cross-section of cutting surface by micro X-ray CT of CFRP

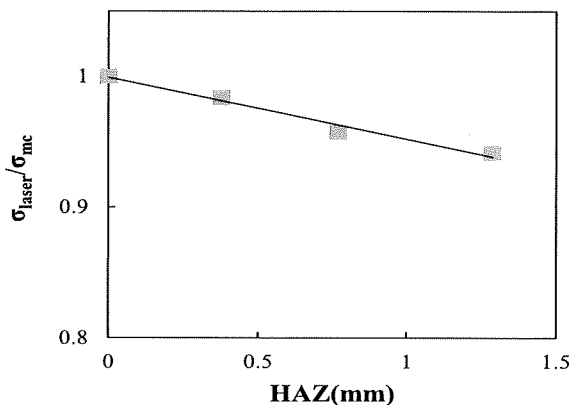
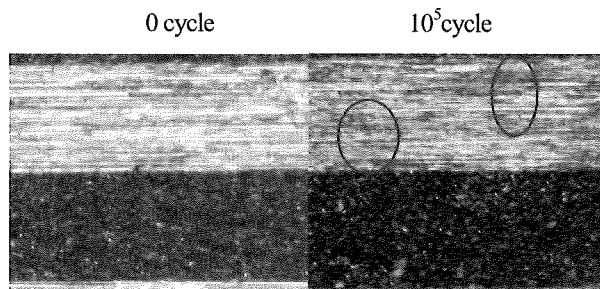
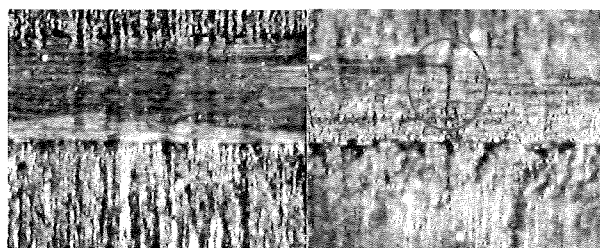


Fig.6 Stress ratio of laser cutting to machining in tensile test, depending on HAZ extension



Machinig-cut specimen



2000W FL-cut specimen

200μm

Fig.7 Cracks in cross-section at 0 cycle and 10<sup>5</sup> cycles for Machinig-cut and 2000W FL-cut specimens

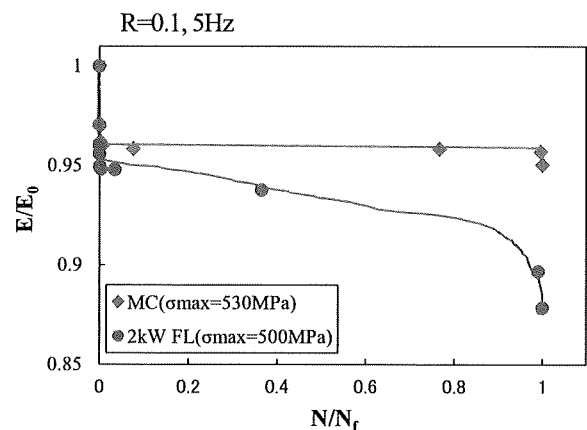


Fig.8 Young's modulus in fatigue test, depending on cycle

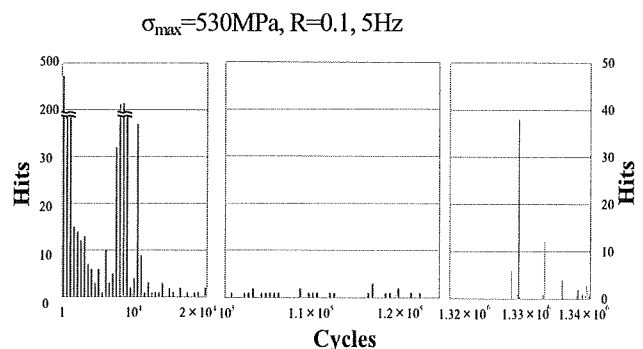


Fig.9 AE count per 500 cycles for Machinig-cut specimen

クラックが見られた。

Fig.8 に機械加工試験片(MC)と 2000W ファイバーレーザー加工試験片(2000W FL)の疲労試験時のヤング率の変化について示す。機械加工試験片と比較すると、レーザー加工試験片では大きなヤング率の低下が見られる。これはクラック成長の影響であると予測される。

### 3.2.3 AE センサを用いた劣化・損傷解析

CFRP の損傷時には、ひずみエネルギーによる弾性波が生じる。この弾性波を AE センサによって測定し、CFRP の疲労による損傷機構について検証した。Fig.8 に機械加工試験片における疲労破断までの各 500 サイクル数毎の AE ヒット数(しきい値を超えた弾性波が生じた回数)を示す。この結果から、疲労初期(~10<sup>4</sup> サイクル程度)に多くの信号が観察される。これは、疲労初期において CFRP のクラック損傷が生じていると考えられる。また、疲労中期(10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> サイクル)ではほとんど AE 信号が見られず、破断直前になって多くの信号が観測された。このことから、中期ではクラックが少しずつ成長していき、破断前に急速にクラックが進展して破断に至ると考えられる。このように疲労試験時に AE を用いた同時計測を行うことによって、劣化・損傷過程の同定が可能となる。

#### 4. 結言

本研究では、高出力レーザー切断技術によって加工されたクロスプライ CFRP を用いて、引張・疲労試験を行い、マイクロ X 線 CT や AE 測定等の非破壊モニタリング技術に基づいて、劣化・損傷機構の検証を行った。その結果から、レーザー加工試験片において、最大引張強度、疲労寿命、時間強度は、短波長で加工速度の速いレーザーが強度低下や寿命の短縮を抑制できることがわかった。マイクロ X 線 CT はレーザー加工時に生じる劣化・損傷を定量的に求めることが可能であり、その強度低下の割合は HAZ 領域の大きさに比例することがわかった。疲労試験により得られたヤング率の変化は、レーザー加工試験片では機械加工試験片よりも大きな変化が見られ、クラック成長の影響であることが予測された。また、疲労試験時に AE を用いた同時計測を行うことによって、劣化・損傷過程の同定が可能となることがわかった。

#### 謝辞

本研究の一部は NEDO プロジェクト「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の委託により行われた。

#### 参考文献

[1] 前田豊、「炭素繊維の最先端技術」、シーエムシー出版、2007.

- [2] 「革新的材料(CFRP)加工技術の事前研究」、新エネルギー・産業技術総合開発機構平成 21 年度成果報告書、2010.
- [3] D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier, H. Haferkamp, “Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.48, 2008, pp.1464-1473.
- [4] Y. Harada, K. Kawai, T. Suzuki, T. Teramoto, “Evaluation of Cutting Process on the Tensile and Fatigue Strength of CFRP Composites”, *Materials Science Forum*, Vol.706-709, 2012, pp.649-654.
- [5] Y. Harada, K. Kawai, M. Nishino, H. Niino, T. Suzuki, T. Teramoto, “Effect of Fiber Orientation on Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) using Laser Cutting Process”, *Proceeding of 12<sup>th</sup> Japan International SAMPE Symposium & Exhibition*, 東京、2011.
- [6] 「JIS K 7083; 日本工業規格 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張一引張疲れ試験方法」、日本工業規格、1993.
- [7] 「JIS K 7164; 日本工業規格 プラスチック一引張特製の試験方法—第 4 部:等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件」、日本工業規格、2005.  
(平成 24 年 6 月 18 日)