

## CFRP 複合材料のレーザーアブレーション加工

(株)最新レーザー技術研究センター 杵名宗春、井上裕喜

### 1. はしがき

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）複合材料の適用の分野は航空機、船舶、スポーツ用品、自動車分野など広い応用が期待されている。CFRPは軽量で比強度や剛性が高い。よって、旅客機に適用すれば、その重量を30%も低減できる。その結果CO<sub>2</sub>ガス排出量の低減効果があり、年間1機当たり2700トンの削減が可能である。すでに、B787などでは図1に示すように構造部材の約50%がCFRPになっている。自動車産業でも17%のCFRPの適用で、車体の重量が約30%も軽減できる。例えば、1370kgの車体が970kgになる。CO<sub>2</sub>の排出削減を削減するには非常に有効な手段となる。すでに、F1レース用の車体は図2に示すように適用されている。ここではこのような航空機産業や自動車産業のような輸送機器産業へのCFRPを一層適用を考えると、素材が高価であるばかりでなく、このCFRP材の加工が高価なダイヤモンドカッターやウオータージェット切断機などを用いるため、CFRP製品が高価になり、その適用が限定されているのが現状である。そこで、その加工コストの低減と加工品質の向上を図る手法として、著者はより簡便な加工方法の1つとしてナノ秒パルスレーザーを用いたレーザーアブレーション加工法（特許申請中）を提案・開発したので紹介する。

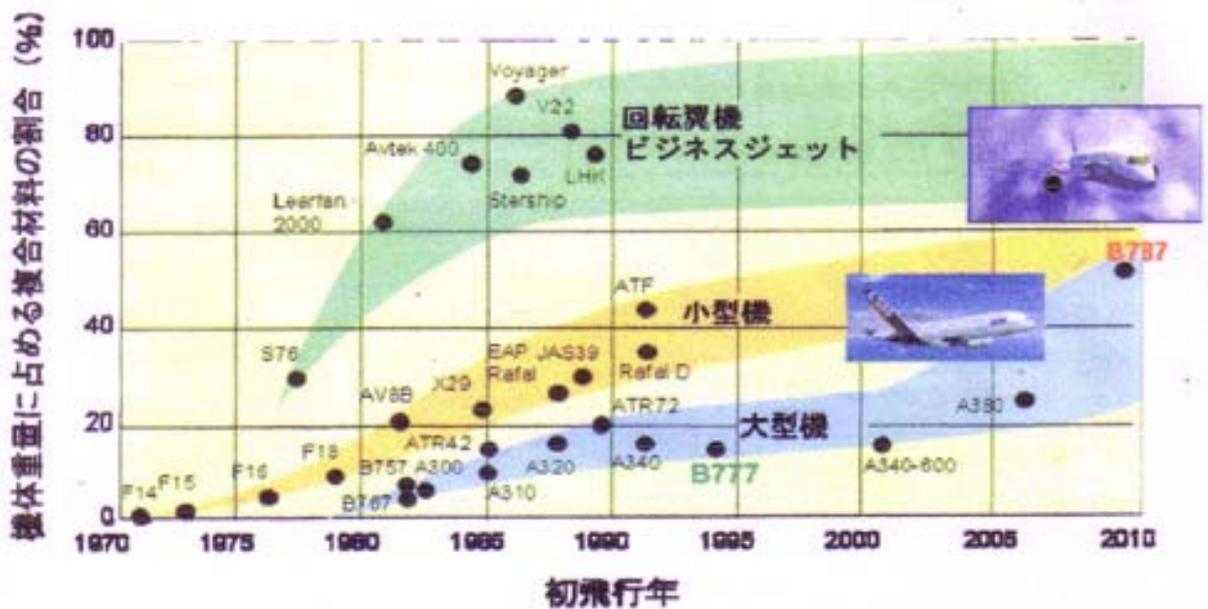


図 1 航空機機体への複合材料の適用状況<sup>1)</sup>



図 2 F I レーシングカーへの CFRP の適用例<sup>2)</sup>

## 2. 超短パルスレーザーの特徴とその応用

図 3 はパルスレーザーの種類とそのパルス幅を示す。

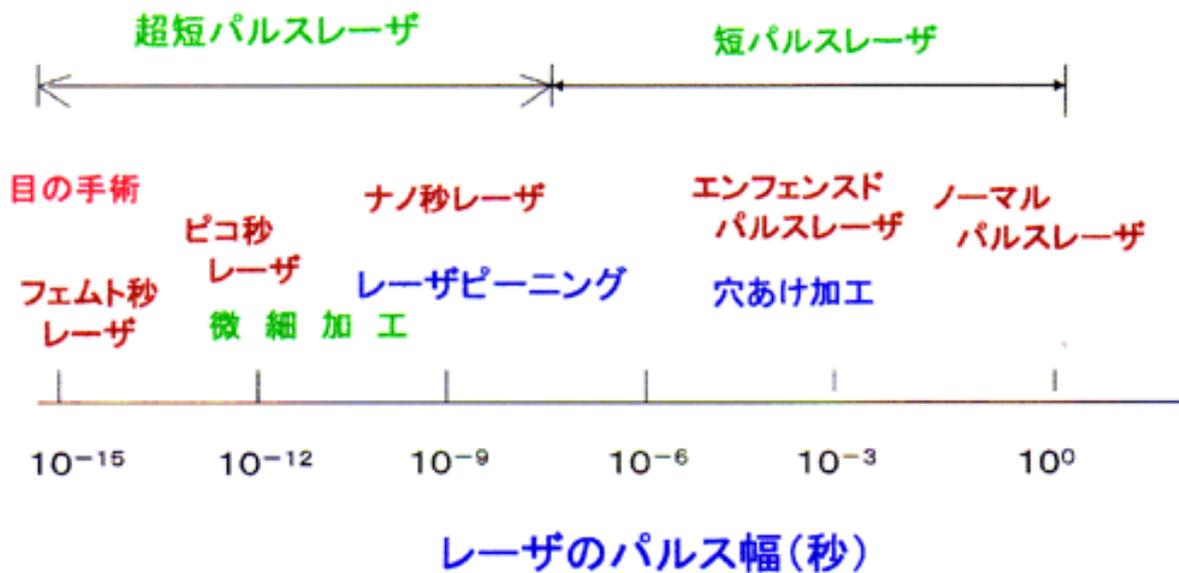


図 3 パルスレーザーの種類とそのパルス幅

超短パルスレーザーとはパルス幅がナノ秒からフェムト秒のパルスレーザーを総称して呼ぶ。短パルスレーザーとはミリ秒からマイクロ秒のレーザーを呼んでいる。すでに、アト秒 ( $10^{-18}$  秒) パルスレーザーも出現しているが、加工用ではないので省略する。

## 2. 1 超短パルスレーザーの特徴

超短パルスレーザーのパルス幅と加工部の熱的影響について述べる。数10ナノ秒より短いパルスレーザーではレーザーが照射された際に、加工面に生じた熱が被加工物内部に伝導する時間が極めて短時間であるので、この表面層のみ加熱され、10、000℃以上にもなり、図4に示すように加熱・蒸発・プラズマ化が瞬時に起こり、材料の分解・除去加工が可能となる。これをアブレーション加工と呼ぶ。よって、フェムト秒パルスレーザー、ピコ秒パルスレーザー、ナノ秒パルスレーザーを用いると、金属、ポリマー、無機物、ガラスなどの微細な除去加工が可能になる。



(a) 加熱・蒸発 (b) 蒸発・プラズマ化 (c) 粒子の飛散  
 図4 アルミニウム合金のレーザーアブレーション現象  
 (4000分の1コマで撮影)

また、ピコ秒パルスレーザーによる各種材料の除去加工例を図5に示す<sup>3)</sup>。熱の影響を照射部以外には基板に与えないことから、熱衝撃による割れを発生することなく加工されている。

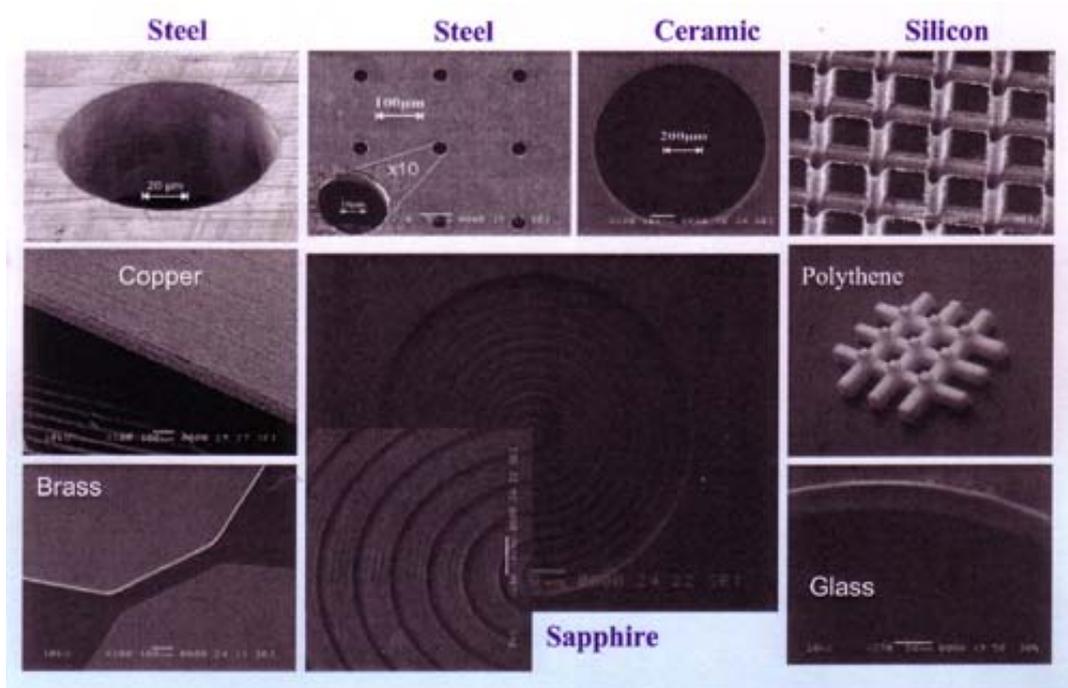


図5 各種材料のピコ秒レーザーによる加工例<sup>3)</sup>

著者はすでにナノ秒パルスによる特殊レーザピーニング加工を開発し、ストンスカート表面のディンプル生成加工や溝加工について開発してきている。このでは、CFRP複合材料にナノ秒パルスレーザ加工の開発例を紹介する。

レーザ加工は非接触プロセスであり、自動化も容易であるため、CFRPの切断に有効なプロセスである。繊維強化複合材料のレーザ切断に関する研究は、これまでCO<sub>2</sub>レーザおよびNd-YAGレーザを中心になされており<sup>4)</sup>、加工条件の最適化<sup>5)</sup>、モデル化<sup>6)</sup>など様々な研究がなされている。また、近年では短パルスUV固体レーザによるCFRPの切断の研究などもなされている<sup>7)</sup><sup>8)</sup>。

本技術では、Q-Switch YAGレーザおよびシングルモードファイバーレーザによりCFRPの切断を行い、その切断現象について検討した。切断部のレーザ顕微鏡観察を行い、材料の炭化、炭素繊維層のはく離などについて調査し、高品質な切断加工が可能かどうか検討した。

供試材として板厚0.7mmの熱硬化性樹脂のCFRP材及び板厚1.2mmの熱可塑性樹脂のCFRP材を用いた。レーザには最大出力2kWのシングルモードファイバーレーザと、最大パルスエネルギー650mJ、パルス幅8ns、パルス繰り返し数20HzのQ-switch YAGレーザを用いた。Q-switch YAGレーザは第2高調波の532nmの波長（グリーン色）のものを用いた。

## 2.2 熱硬化性樹脂のCFRP材のレーザ加工

### 2.2.1 シングルモードファイバーレーザによる切断

出力を200及び300W、切断速度を2.5～10m/minと変化させ、シングルモードファイバーレーザにより熱硬化性CFRPの切断を行った。出力を200W、切断速度を10m/minとした場合の切断部表面の外観写真を図6に示す。

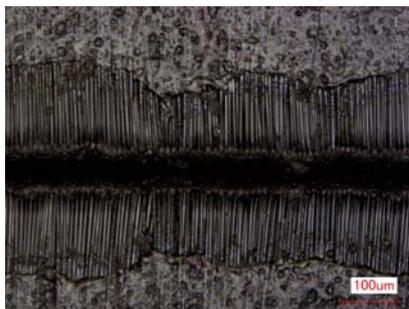
連続波レーザでは断続的に熱が加えられるため、試験片に熱がたまり、表面の樹脂が蒸発し炭素繊維がむき出しになっていた。カーフ幅を測定したところ、カーフ幅は約60μmであった。また、一度溶解した炭素繊維が凝固することにより、炭素繊維の先端が炭化、粗大化し、マッチ棒のようになっていることが分かった。このような切断結果は今までのCFRP材のレーザ切断結果と同様である。熱に伝達によりこのような熱切断となる。

### 2.2.2 Q-switch YAGレーザによる熱硬化性CFRPの切断

#### (1) 出力の表面ダメージへの影響の調査

そこで、1億分の1秒に近い8ns（ナノ秒）の超短パルスレーザ（Q-switch YAGレーザ）を用いて、表1に示す条件にて熱硬化性CFRPの切断した。その切断部の写真を図7に示す。レーザ出力の品質への影響を見ると、その外観写真から、出力が高くなると、樹脂の分解領域が拡大している。出力を6.5mJ、32mJとした場合には

切断部周辺の樹脂に損傷は見られなかった。本研究で用いたレーザーのパルス幅が8nsと短く、低出力では1パルス照射したときの材料への入熱が非常に小さいためだと考えられる。



(a) 切断部表面顕微鏡写真



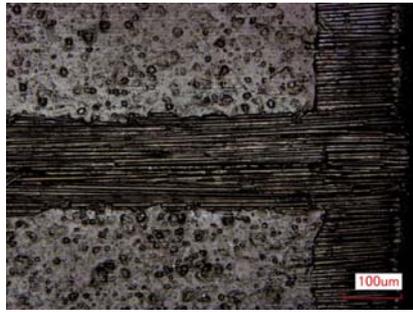
(b) 炭素繊維先端の拡大写真

図 6 SM ファイバーレーザー切断部表面の外観写真 (200W、10m/min)

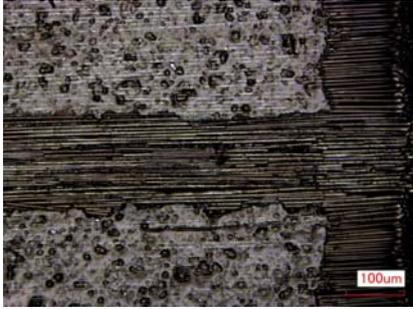
表 1 切断条件

スポット径 $\mu\text{m}$	200
出力 mJ	6.5 ~ 500
パワー密度 GW/cm <sup>2</sup>	2.5 ~ 200
周波数 Hz	20
パス数	1

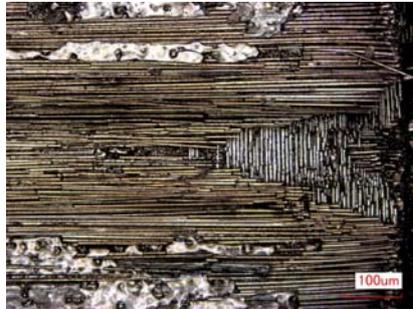
出力を125mJ、500mJと大きくした場合では、材料表面の樹脂が広い領域で分解していることが分かる。これにより、レーザーとCFRPの反応時間の短い超短パルスレーザーに比べて、より低出力で切断することが望ましいと分かった。これは1パスでの除去加工であり、表面の除去深さは数マイクロンである。これを多パスで加工すると0.7mmおよび1.2mmのCFRPの切断が可能となる。



( a ) 6 . 5 m J



( b ) 3 2 m J



( c ) 1 2 5 m J



( d ) 5 0 0 m J

図 7 Q-スイッチ YAG レーザ 切断 部 の 外 観 写 真

表 2 に 示 す よ う に 多 パ ス 切 断 条 件 に て , 熱 硬 化 性 C F R P の 切 断 を 行 っ た 。 切 断 部 表 面 の 外 観 写 真 を 図 8 に , 断 面 顕 微 鏡 写 真 を 図 9 に 示 す 。 図 8 よ り , 切 断 部 の 周 辺 の 樹 脂 に は ほ と ん ど ダ メ ー ジ を 受 け て い な い こ と が 確 認 で き た 。 ま た , カ ー フ 幅 は 約  $205 \mu m$  で あ っ た 。 図 9 よ り , 炭 素 繊 維 が 繊 維 の 方 向 を 変 え な が ら 積 層 さ れ て い る 様 子 が は っ き り 観 察 で き た 。 ま た , 炭 素 繊 維 の 先 端 が 炭 化 , 粗 大 化 し て お ら ず , シ ャ ー プ な 形 状 と な っ て い た 。 こ れ は , Q-ス イ ッ チ YAG レ ー ザ を 用 い た 加 工 で は , 短 時 間 に 高 エ ネ ル ギ ー の パ ル ス レ ー ザ を 照 射 す る た め , 炭 素 繊 維 を 図 4 に 示 す よ う に 瞬 時 に 蒸 発 プ

化し飛散させることができるためであると考えられる。よって、これはレーザ切断と言うよりも「レーザアブレーション加工」と呼ぶ方がふさわしい。以上より Q-Switch YAG レーザにより熱硬化性 CFRP の高品質な切断が可能であることが分かった。

表 2 多パス切断の条件

スポット径 $\mu\text{m}$	200
出力 mJ	6.5
パワー密度 GW/cm <sup>2</sup>	2.5
周波数 Hz	20

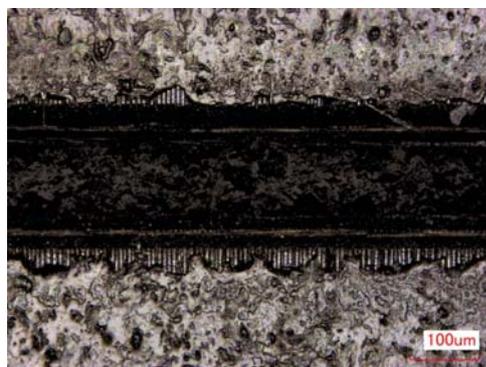


図 8 熱硬化性 CFRP のナノ秒パルスレーザによる加工外観写真

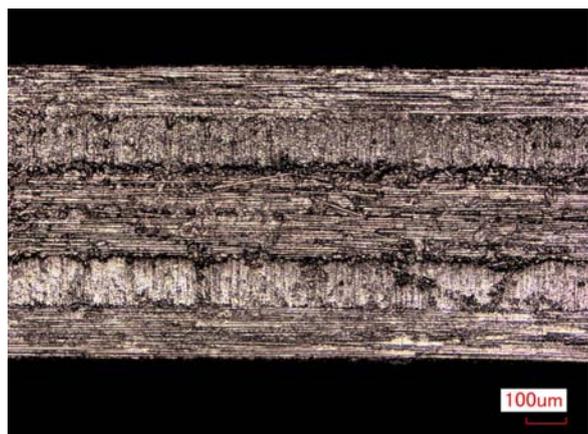


図 9 (a) 切断断面写真 (b) 断面の拡大写真  
Q スイッチ YAG レーザによる熱硬化性 CFRP のレーザアブレーション加工の断面写真

2.3 熱可塑性樹脂の CFRP 材のレーザ加工  
Q-スイッチ YAG レーザを用いて熱可塑性 CFRP の切断を行った。切断条件は表 2 に示した条件で行った。図 10 に切断部表面の外観写真を示す。熱硬化性 CFRP と同様に、熱可塑性 CFRP においても切断部周辺の樹脂にダメージを与えることなく切断を行うことができた。また、カーフ幅は約  $197\mu\text{m}$  であった。

図 11 に Q-スイッチ YAG レーザによる切断部の断面顕微鏡写真を示す。ダイヤモンドカッターによる切断したものでは図 12 に示すように切断面に樹脂が付着しており、切断面における炭素繊維先端の様子を観察することができない。一方、Q-スイッチ YAG レーザにより切断したものでは、



図 1 0 熱可塑性 CFRP の ナノ秒パルスレーザーによる加工外観写真

樹脂が付着していないきれいな切断面が得られた。切断面における炭素繊維先端の形状も粗大化しておらず、うなぎをか包丁でそいだように良好な切断面が得られた。このことにより高品質な切断が可能であることが確認できた。



図 1 1 Qスイッチ YAGレーザーによる熱可塑性 CFRP のレーザー加工断面の拡大写真

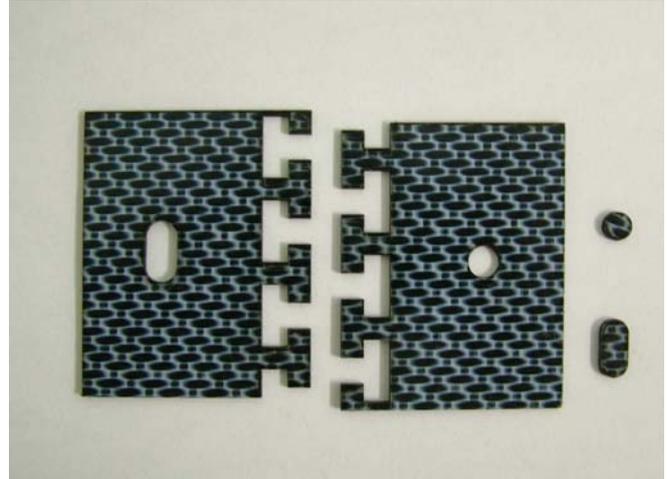
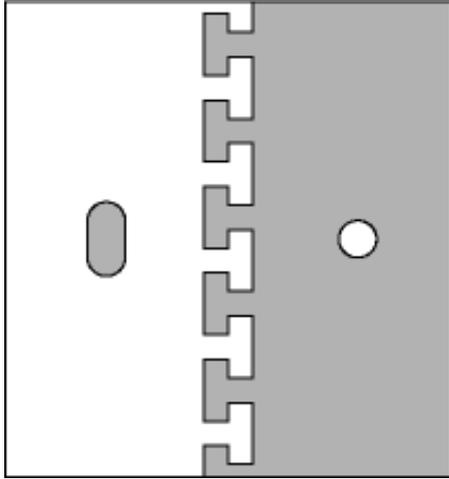


図 1 2 ダイヤモンドカッターによる熱可塑性 CFRP の切断断面の拡大写真

### 3. CFRP 複合材の突合せモザイク継手

#### 3.1 Q-スイッチ YAG レーザによる開先加工

超短パルスの Q スイッチ YAG による微細なアブレーション加工の特徴を生かして図 1 3 (a) に示すような複雑なモザイク形状の切断および穴あけができることを利用して、熱可塑性 CFRP (板厚: 1.2 mm) を用い、表 2 に示す条件下で突合せモザイク継手 (特許申請中) の開先加工を行った。後の外観写真を図 1 3 (b) に示す。直線部分、曲線部分、角部いずれも正確に加工することが可能であった。



(a) 模式図

(b) 加工結果

図 1 3 モザイク継手の加工例

#### 3.2 CFRP 材のモザイク継手の利用

開先加工した継手を図 1 4 のように組合せれば、CFRP 材の突合せ継手ができる。この I 型開先部に接着樹脂を入れて硬化させれば、溶接継手が作製できる。

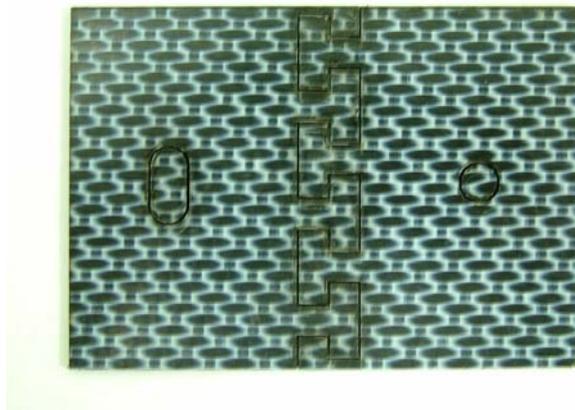


図 1 4 CFRP 材のモザイク継手の例

#### 4 . ま と め

シングルモードファイバーレーザー及び Q-Switch YAG レーザを用いた CFRP のレーザー切断の行い，高品質な切断ができるかどうかを調査した。

シングルモードレーザー切断では，切断部周辺の試験片表面の樹脂が蒸発し，炭素繊維がむき出しになるとともに，炭素繊維先端が粗大化していた。

Q-スイッチ YAG レーザによるアブレーション加工では熱硬化性 CFRP と熱可塑性 CFRP のいずれにおいても試験片表面の樹脂がほとんど蒸発せず，炭素繊維先端も粗大化しない高品質な切断が可能であった。また，複雑な形状のモザイク継手の開先加工も容易で、モザイク突合せ継手を製作できることが明らかになった。

そこで、現在、著者らはこの技術をさらに工業的レベルで発展させるために、経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業に応募し、平成 21 年度の開発テーマに採択され、航空機産業および自動車産業への CFRP 適用の拡大を支援する努力を続けている。

#### 参 考 文 献

- 1) 東レ 技術資料, 2009
- 2) 童夢カーボンマジック、製品カタログ、2008
- 3) Y. Zhao; Prof. of LPC2009, Shanghai, March 16-18, 2009
- 4) G. Caprino, ほ か Int. J. Mach. Tool Manufact., vol. 35(6), pp. 831-840, (1995).
- 5) E. Uhlmann, G. Spur, ほ か ; Int. J. Mach. Tool Manufact., vol. 39, pp. 639-650 (1999).
- 6) F.C. Campbell; Manufacturing processes for advanced composites, Elsevier, UK, pp. 442.
- 7) B. Denkena, F. Volkermeier ほ か ; J. Appl. Prod. Technol, APT'07, Bremen, Germany, pp. 99-105 (2007).
- 8) Z.L. Li, P.L. Chu ほ か ; Proc. of 27th ICALEO2008, Temecular, CA, USA, 20-23 Oct. 2008, pp. 222-230.

以上