

# 輸送機器用CFRP複合材料のレーザ加工

## Laser Materials Processing of CFRP Composites for Transportation Vehicles

(株) 最新レーザ技術研究センター  
 名 春、井上 裕喜

### 1. はじめに

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）複合材料の適用は炭酸ガス排出を抑制するために、地球環境の問題解決の方法として重要視されてきた。各種工業分野で部材や構造物の軽量化の1つとして検討されている。特に、航空機や自動車のような輸送機器の炭酸ガスの排出を抑制し、地球環境を保全するために、世界的にCFRP等複合材料の適用を検討し、実用化が進んでいる。CFRP複合材料はすでに、航空機、自動車、車両、船舶、産業機械、高速道路補強、スポーツ用品分野などで応用されている。その一例を図1に示す。航空機の翼、胴体、ヘリコプターの回転翼、人口衛星のパネル、H-IIロケットのフレアリング、コックピット構造体、新幹線車両構体や座席、自動車のモノコックなど、従来の構造に比べて、その重量を30%から50%低減できるので、燃費や炭酸ガスの排出量を低減する効果が大きい。高強度のCFRPは引張強さが約2000MPaで比重は約1.6である。アルミニウム合金やチタン合金以上に比強度が高い。これらは目的の形状に成形加工されたのち、組み立て加工のため、ダイヤモンドコーティングされた工具による切削。穴あけやウォータージェットによる切断、トリミングが行われている。

図2はトヨタ自動車が発売したレクサスFLA車とそのモノコックを示す。多くの部品にCFRP材が適用されている。BMW社もCFRP製自動車を2014年より発売すると発表した。

このような社会情勢を考慮して、現在、日本をはじめ、ドイツ、英国、米国、フランス、韓国、中国などで最新のレーザ技術を用いてCFRP材料を



図1 輸送機器・宇宙産業でのCFRPの適用例<sup>1)</sup>

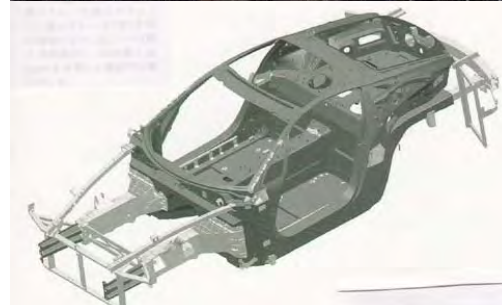


図2 CFRP製モノコックを採用したレクサスFLA車の例<sup>2)</sup>

加工する研究が盛んになってきた。著者らもナノ秒パルスのQスイッチYAGレーザまたは高輝度のSMファイバーレーザを用いたレーザ加工法を開発し

ている<sup>3)</sup>。

## 2. CFRP複合材料のレーザ加工の研究状況

レーザ加工に用いるレーザの種類により切断品質および切断速度は左右される。そこで、異なるレーザを用いたときの研究例をまず紹介する。

### 2.1 CWファイバーレーザによる加工

連続発振のファイバーレーザによる炭素繊維のレーザ切断部の状況を図3に示す<sup>4)</sup>。ファイバーレーザによる切断では、樹脂がなく、炭素繊維のみであれば、切断が可能である。

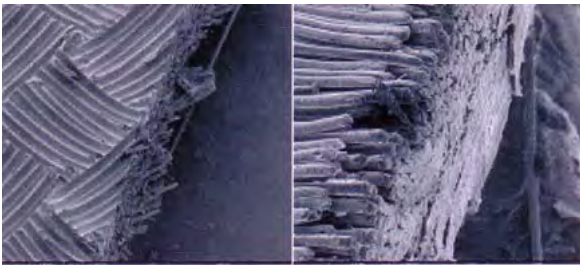


図3 ファイバーレーザによる炭素繊維の切断例

(左：機械切断、右：FL200による切断)<sup>4)</sup>

図4に6 kWのファイバーレーザで切断した場合の切断部の写真を示す<sup>5)</sup>。連続発振のレーザでは切断熱影響部に樹脂の損傷部1 mm以上の幅で見られる。これを極小にするために片山らは16 kWのディスクレーザを用いて3 mmのCFRPを5 m/sの高速で切断した。その結果を図5に示す<sup>6)</sup>。熱影響部も損傷を受けているが、その部分は高速化することにより50 μm以下になっていると報告された<sup>6)</sup>。

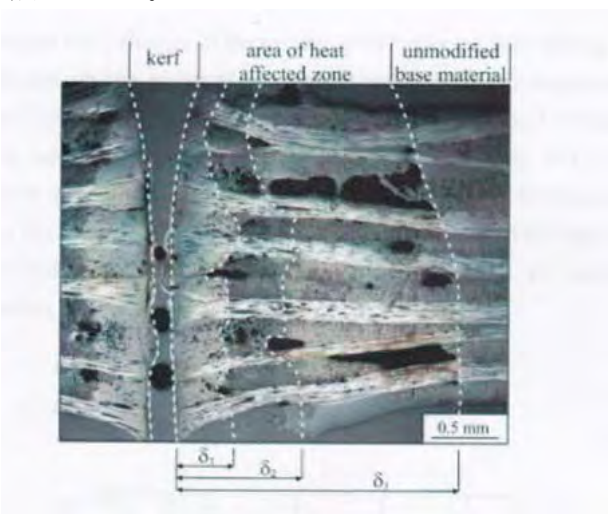


図4 ファイバーレーザによるCFRPの切断部<sup>5)</sup>

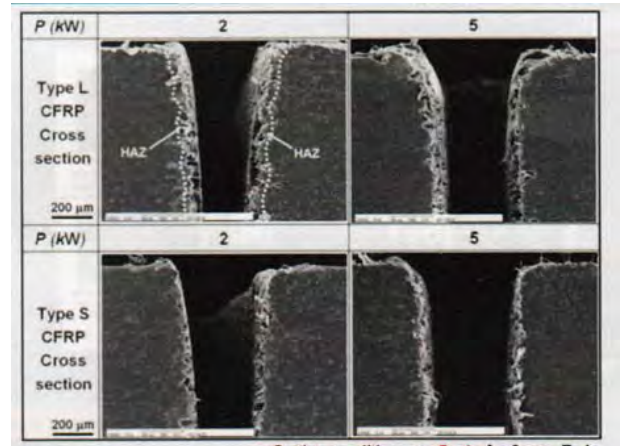


図5 CWディスクレーザによるCFRPの超高速切断部の断面写真<sup>6)</sup>

著者らは3 kWのシングルモードのファイバーレーザで1.2 mm厚の熱可塑性樹脂のCFRPを20 m/minで、レーザ出力を300 Wとして8パスで切断した。その場合の損傷は図6に示すように5 μm以下になっていた。このように連続発振のレーザを用いた場合、高速切断にしたり、シングルモードのように高エネルギー密度にすれば、切断品質は改善される。これらについては今後の開発に期待できる。



図6 高輝度のシングルモードファイバーレーザによるCFRPの高速切断断面<sup>3)</sup>

### 2.2 超短パルスレーザを用いた加工法

ピコ秒またはナノ秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザによりCFRPのアブレーション加工する技術が開発されている。図7は200フェムト秒パルス幅のレーザ及び100ピコ秒のパルス幅のレーザでCFRPを切断した時の断面および表面写真を示す。上部がフェムト秒レーザ下部がピコ秒レー

ザの場合である。ただ、切断品質は非常に良いが、

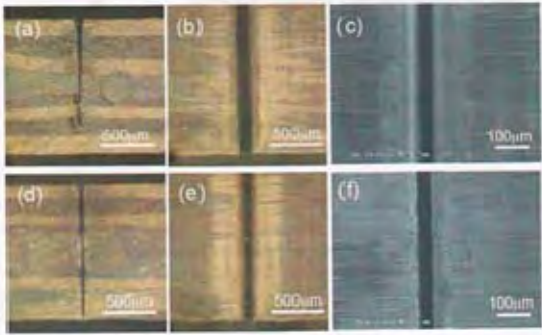
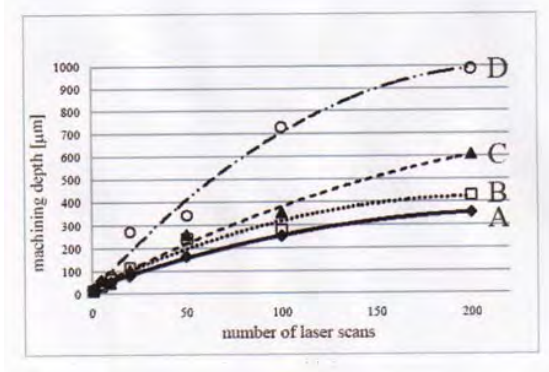


図7 フェムト秒レーザーおよびピコ秒レーザーによるCFRPの切断例<sup>8)</sup>

これらの切断には長時間を要するので切断速度の向上が問題となっている。図8はナノ秒(10<sup>9</sup>分の1秒)のパルスレーザーによりCFRP材をトレパニング切断する場合の重ね率を変えた時の除去深さを示す。より重ね率を大きくするとDの場合のように除去深さも大きくなることを示している<sup>9)</sup>。

	Overlapping condition	Spot interval [µm]
A		30
B		22.5
C		15
D		7.5

(a) スキャンの重ね率



(b) スキャン数と除去深さ

図8 ナノ秒パルスレーザーによるCFRP加工速度 (パルス幅: 4 ns)<sup>9)</sup>

著者らが熱可塑性樹脂のCFRPをナノ秒パルスレーザー(波長: 532 nm)により切断した断面写真を図9に示す。炭素繊維の直径が7µmであるが、

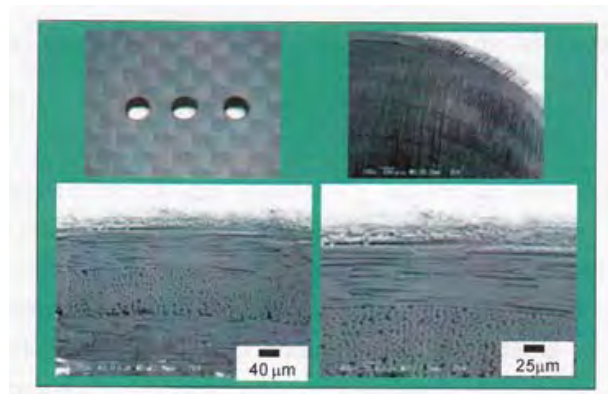
その中央でうなぎを削ぐように見事に切断されている。

図9 熱可塑性CFRP材のレーザー加工断面写真



さらに、波長が355nmのナノ秒(20 ns)レーザーによるCFRPの穴あけ加工例を図10に示す<sup>10)</sup>。

図10 ナノ秒レーザーによるCFRPの穴あけ(波長: 355nm)<sup>10)</sup>



この断面写真からも炭素繊維がうなぎを削ぐように、または大根を輪切りしたような切断パターンが典型的に見られる。

このようなレーザー加工技術を用いて、熱硬化性樹脂のCFRPレーザー加工の応用部材としてジェットエンジンの消音パネルの穴あけ加工例を図11に示す。1.5mmの径の穴を0.8mm厚のCFRPに1600点あけた。平均出力14Wのナノ秒パルスレーザーで1穴が約5秒で加工された。

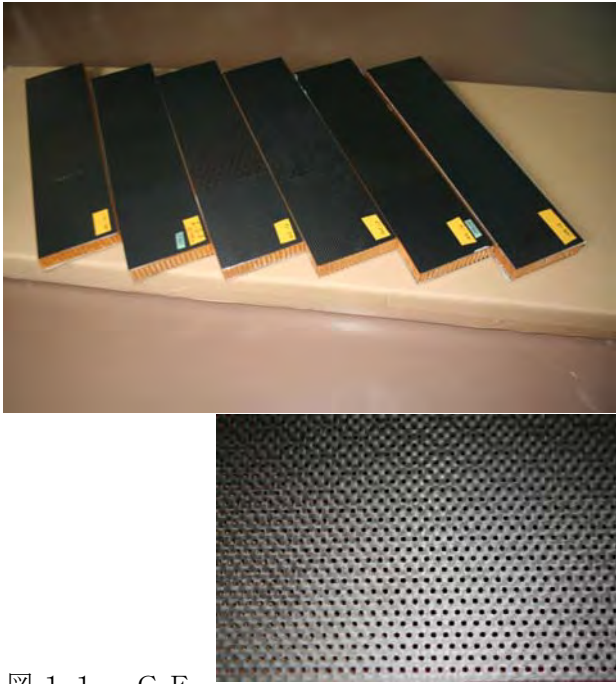


図 1 1 C F R P およびアラミドハニカム製  
軽量消音パネルとその穴あけ加工例<sup>1 1)</sup>

まだ、加工時間が長いという問題があるが、非常に高品質な切断、穴あけ加工ができた。このパネルは従来のアルミ合金製消音パネルに比べて、その重量は約半分であった。

さらに小型飛行機のスキンパネル（板厚：6.7 mm）の窓をレーザトリミングした例を図 1 2 に示す。パネルをレーザ加工装置内に入れ、スキャナーを用いて 2 0 0 mm X 2 0 0 mm の大きさの窓をレーザトリミングで製作した。この時の加工精度は寸法 2 0 0 mm の窓に対して ± 1 0 μ m の精度であった。取付け用の穴（径 6. 0 mm）もレーザで穴開けした。

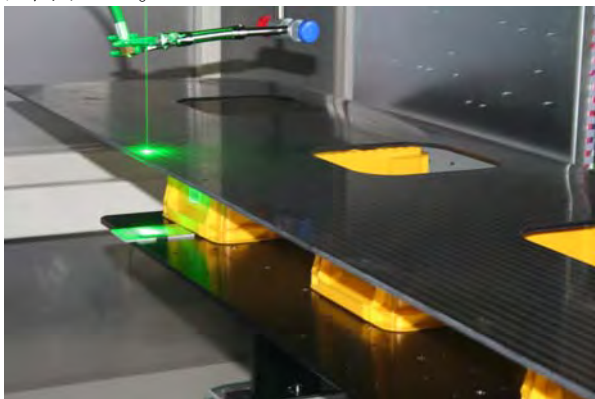


図 1 2 小型飛行機のスキンパネルの窓のレーザトリミングと穴あけ（AL T R E C 提供）

### 2. 3 レーザを用いたCFRPの溶接・補修

C F R P 材料の溶接や C F R P 材料の補修技術にもレーザを利用する方法が研究されている。C F R P 平板の突合せ継手として図 1 3 に示すようなモザイク継手を開発している<sup>1 1)</sup>。図 1 4 はその



図 1 3 ナノ秒パルスレーザによる開先加工および接着シートで接着した継手<sup>1 1)</sup>

引張試験後の破断状況を示す。母材を横切るように破断が起こり、継手効率は約 8 0 % に達している。



図 1 4 モザイク継手の引張試験後の破断状況（最高継手効率は約 8 0 %）

なお、モザイク継手の形状についても検討した。図 1 5 は 6 種類の形状について、ナノ秒レーザで開先加工した後、接着剤なしで、モザイク継手を組み合わせたままで引張試験した結果を図 1 6 に示す。F の形状のものは継手効率が約 4 7. 6 % であった。

さらに、レーザによる C F R P と金属の異材接合の L A M P 法の研究が片山らにより報告されている<sup>1 2)</sup>。また、図 1 7 に示すように、C F R P 部材の欠陥部をレーザ補修する方法がドイツのハノーバーレーザセンターから報告された<sup>1 3)</sup>。

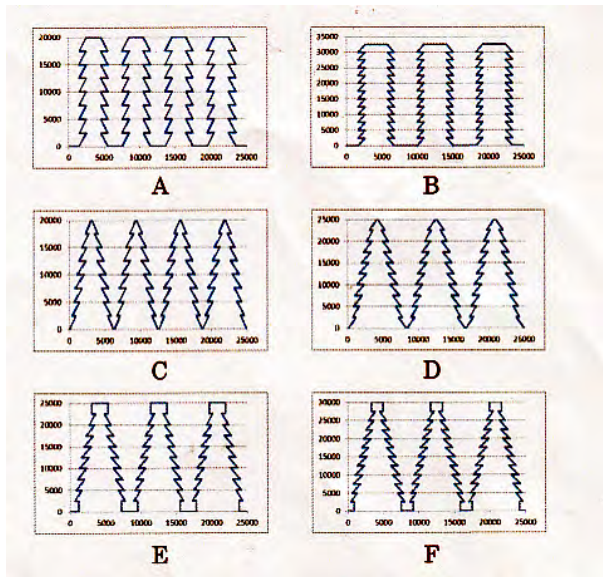


図15 試験に用いた各種モザイク継手の形状



Type of mosaic joint

図16 CFRPモザイク継手の引張強度比

レーザアブレーションで欠陥部を除去加工した後、グラファイト短繊維強化の熱可塑性樹脂を波長940nm近赤外レーザで溶融し補修する方法が採られている。

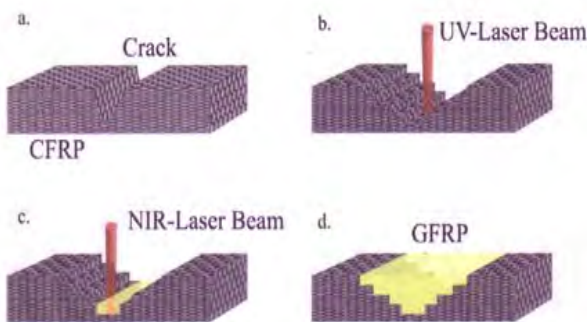


図17 CFRP部材のレーザ補修の手順<sup>13)</sup>

- a) CFRP部材の割れ (Crack)
- b) UVレーザによる割れ周辺の除去
- c) 近赤外レーザによる加熱
- d) GFRPによる溶融埋め立て

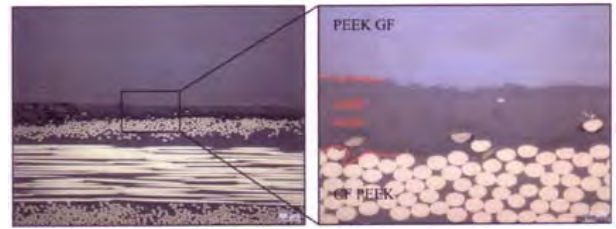


図18 レーザ補修後の補修部断面写真<sup>13)</sup>

その結果、図18に示すような補修が行われ、CFRPにGFRPが良好に肉盛された。

#### 4. まとめ

今、輸送機器の超軽量化を考慮したCFRP複合材料の加工に、各種レーザを用いたレーザ加工が研究開発されており、その開発最前線について紹介した。

この技術分野においてもドイツは技術開発を精力的に進めている。日本もますます、研究開発に力を入れる必要であると思う。

#### 謝辞

著者はこの技術をさらに工業的レベルで発展させるため、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21~23年度の開発テーマに「CFRP複合材料部材の新レーザ溶接技術の開発」として採択され、名古屋産業科学研究所の管理のもとで名古屋大学田邊研究室、佐宗研究室、大同大学平研究室、愛知県産業技術研究所、(株) 齋藤工業、(株) 童夢カーボンマジック、今井航空機器工業(株)、(株) 最新レーザ技術研究センターが共同研究を実施した。本報告はその研究成果も含めている。

#### 参考文献

- 1) H. Fukagawa: Proc. of LPCC2012, April, 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-2-3
- 2) 松田、萬澤ほか: Motor Fan, Vol.61(2011), p.60-61
- 3) 杓名、井上: 溶接技術、Vol.59, No.8(2011)、p.85-89
- 4) M. Naeem ほか; Proc. of LPCC2012, April, 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-2-1
- 5) P. Jaeschke, U. Stute ほか; Proc. of LPCC2012,

- April. 26-27 (2012), Yokohama paper#LPCC-4-1
- 6) 片山、川人ほか；日本溶接協会LMP委員会資料、LMP一本—09（H24年5月）
- 7) A. Klotzbach ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27, (2012), Yokohama, paper#LPCC-2-1
- 8) M. Fujita ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-5-1
- 9) Y. Kawata ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-5-3
- 10) H. Niino ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-4-5
- 11) M. Kutsuna ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-4-3
- 12) K.-W. Jung, S. Katayama ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama paper#LPCC-3-2
- 13) P. Jaeschke, V. Wippo ほか； Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-3-1