

レーザーによる炭素繊維強化プラスチックの加工

沓名宗春*、井上裕喜*

Laser Materials Processing for CFRP Composites

Muneharu KUTSUNA*, Hiroki INOUE*

(Received on March 31,2014)

The applications of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites is now growing in aerospace and automotive industry. However, some issues restrict the applications to limited area. The price of CFRP composite is high and material processing is not easy. It makes production cost higher. In the present work, a fundamental investigation in developing a new laser machining of CFRP composites has been carried out using a ultra short pulsed laser(Q-switch YAG laser). Thermoplastic- and thermoplastic matrix CFRP composites was cut by Q-switch Nd:YAG laser with the wave length of 532nm and the pulse duration of 8ns. The cut surface was observed using a laser microscope. The quality of cut surface was excellent without burning of plastic resin, carbon fiber charring and getting untied. Kurf Width was about 0.21mm, when the beam diameter was 0.2mm. This laser machining process is not thermal cutting, but is laser ablation process. Laser cutting and drilling carried out by a SM fiber laser.

Key words : CFRP composite, Q switch YAG laser cutting, drilling, nano-second pulsed laser

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック(以下CFRPと略す)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¹⁾。すでに、ボーイングのB787旅客機では主翼をはじめ、構造部材の約50%にCFRP材が適用されている。自動車産業でも、比重1.6で鋼材の4分の1で引張強度が10倍のCFRP材を適用する試みが始まっている。輸送機器産業へのCFRP部材の適用を考えると、素材が高価であるばかりでなく、このCFRP材の加工が困難で、高価なダイヤモンドカッターを用いたり、ウォ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。そこで、著者らはより簡便な加工方法の1つとしてナノ秒パルスのQスイッチYAGレーザーまたは高輝度のSMファイバーレーザーを用いたCFRP材のレーザー加工法(特許第4734437号)を提案・開発したので紹介する。

* (株)最新レーザー技術研究センター 〒446-0026 愛知県安城市安城町広美40-7、Advanced Laser Technology Research Center Co.,Ltd, 40-7, Hiromi, Anjo-cho, Anjo-shi, Aichi-ken, JAPAN,

2. 超短パルスレーザーの特徴と基礎実験

2.1 超短パルスレーザーの特徴

ここでは「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。これに対して「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ぶ。Fig.1はこれらのパルスレーザーのパルス幅と各種レーザー加工を示す。なぜこのような分類をしかたか?それは断熱的なレーザー加工現象がほぼ数10ナノ秒のパルス幅を境に大きく異なるからである。

ご存じのようにレーザー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ー切断に関する研究は、これまではCO₂レーザーおよびNd:

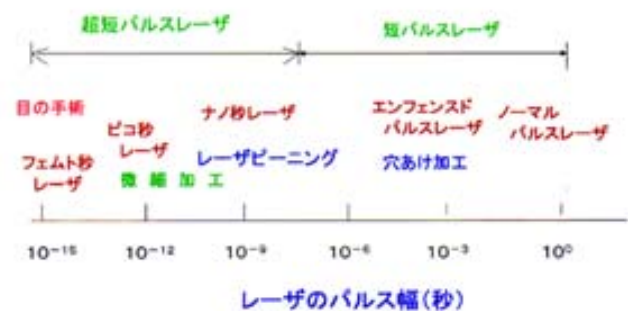


Fig. 1 Laser Materials processing using a short pulse laser.

YAGレーザを中心になされており²⁾、加工条件の最適化³⁾、モデル化⁴⁾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^{5) 6)}。

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のアブレーション加工を行い、その現象について考察するとともに、切断部の品質をレーザ顕微鏡などで観察し、高品質な切断加工が可能かどうか検討した。

超短パルスレーザのパルス幅が数10ナノ秒より短いパルスレーザでは、高出力密度のレーザが照射された際、レーザ照射された加工面は極めて短時間であるので深さ数 μm の部分のみが加熱されるため、表面層のみが約 $10,000^\circ\text{C}$ 以上にもなり、超短パルスレーザのパルス幅が数10ナノ秒より短いパルスレーザでは、高出力密度のレーザが照射された際、レーザ照射された加工面は極めて短時間であるので深さ数 μm の部分のみが加熱されるため、表面層のみが約 $10,000^\circ\text{C}$ 以上にもなり、**Fig.2**に示すように、プラズマ化が数10ナノ秒に起こり、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、ピコ秒パルスレーザ、ナノ秒パルスレーザを用いると、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。

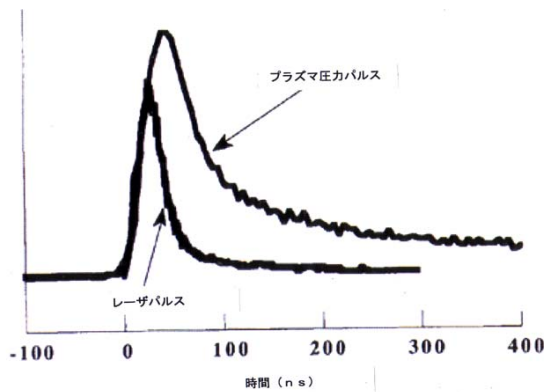


Fig.2 Laser pulse and plasma pressure during nano-pulse laser irradiation²⁾

2.2 レーザアブレーション加工の基礎実験

まず、定格平均出力30W、最大パルスエネルギー5mJ、最大繰返し数50kHz、パルス幅10~80nsのナノ秒パルスYAGレーザを用いて、**Fig.3**に示すようなレーザアブレーション装置によるCFRP部材や複合材料のレーザアブレーション加工を行った。

Fig.4は透明樹脂と不透明樹脂にサンドイッチされた金属フィルムを示すが、これを50~100mm/s

の速度でレーザアブレーション加工した断面マクロを**Fig.4 (b)**に示す。このように融点が約 300°C の樹脂と融点も反射率も高い金属箔を同時にレーザ切断できるのもレーザアブレーション加工の特徴である。約20~30nsとパルス幅が短いので金属の熱で樹脂が損傷を受けることなく切断できている。まさに、断熱加工が可能である。

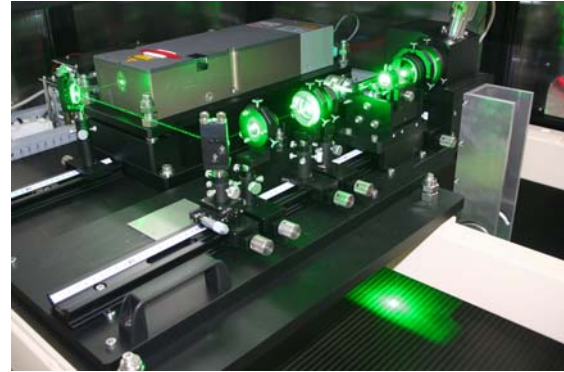


Fig.3 Laser ablation processing system (Beam spot diameter: $30\sim45\mu\text{m}$)

次に、熱硬化性樹脂のCFRP複合材料にナノ秒パルスレーザを適用したアブレーション加工を紹介する。供試材として板厚1.2mmのCFRP材を用いた。532nmの波長（グリーン色）のパルス繰返し数5kHzのQ-switch YAGレーザを用いた。



a) polymer—metal composite b) cross section
図4 Laser cutting of polymer-AL—polymer

Composite film (thickness: $250\mu\text{m}$)

6.5mm径の穴あけを約200mm/s~400mm/sの走行速度で、200パスから400パス繰り返して21秒から23秒で1個の穴を開けた部材の外観写真を**Fig.5**に示す。穴あけ部の周辺の樹脂は表面・裏面ともにダメージやバリがないことが確認できた。また、カーブ幅は約 $60\mu\text{m}$ であった。

さらに板厚3.5mm厚のCFRP材を穴径6.5mmでレーザアブレーション加工した。平均出力14Wで、パルス周波数5kHzで、100m/sのスキャン速度で、500パスを要した。28分で1個の穴を開け

[テキストを入力してください]

た。6.5mm厚の熱可塑性 CFRP 材に 20mm径の穴あけに約 1 時間を要した場合と比較するとより長時間を要した。さらに、板厚 11.5mm の CFRP 材に 10mm径の穴あけをした例を Fig.6 に示す。1つの穴あけに約 2 時間を要した。

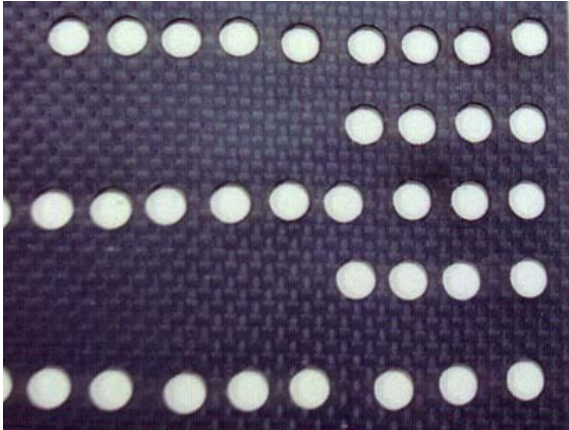


Fig.5 Laser drilling of thin CFRP (t=1.2mm)

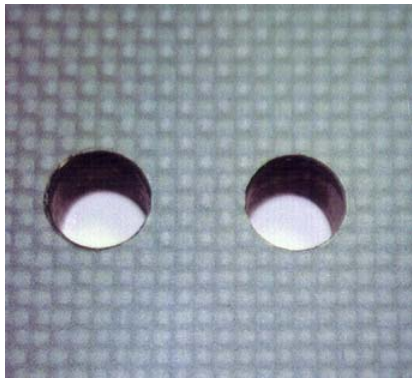


Fig.6 Laser drilling of thick CFRP (t=11.5mm)

Fig.7 にビーム径 30 μ m の Q-スイッチ YAG レーザによる熱可塑性 CFRP 材の切断部の断面顕微鏡写真を示す。レーザアブレーション加工では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



Fig.7 Cross section of thermoplastic CFRP Cut by Q-switch YAG laser

おらず、うなぎを包丁でそいだように良好な切

断面が得られた。このことから熱可塑性 CFRP においても Q-スイッチ YAG レーザ切断により高品質な切断が可能であることが確認できた。

以上の基礎実験では、CFRP 材の種類では熱可塑性の複合材料の方が加工し易いこと、ビームのスポット径が 30 μ m から 45 μ m になり、板厚が厚いと非常に加工時間が長くなることが明らかになった。

3. シングルモードファイバーレーザによるレーザ切断実験

最近、ファイバーレーザやディスクレーザの開発が進み、そのビーム品質も非常に良くなっている。そこで、ここでは 3kW のシングルモードファイバーレーザを用いて、1.2mm の熱可塑性樹脂の CFRP の切断実験を行った。レーザ出力 300W, 焦点はずし距離 0.5mm, 走行速度 20m/min で切断したところ、切断回数 8 回から 10 回で切断できた。その切断面のレーザ顕微鏡写真を Fig.8 に示す。この断面には炭素繊維が 1 本 1 本輪切りされていることが確認できた。

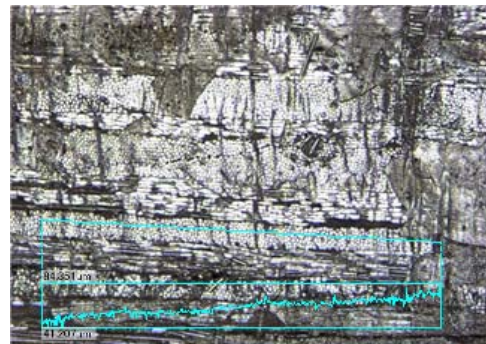


Fig.8 Micro photograph of CFRP cut by Q-switch YAG laser (x400)

4. レーザアブレーション加工の開発事例

このように高精度で CFRP 複合材料をレーザアブレーション加工する技術をどのように応用できるか 2, 3 の事例について検討した。

熱可塑性樹脂の CFRP 製自動車ハンドル (板厚: 6.5mm) に Fig.9 に示すように 6.5mm 径の穴と 20mm 径の穴を開ける実験を行った。6.5mm の穴は約 17 分で加工出来たが、20mm の穴は約 1 時間を要した。穴内面の切断状況をレーザ顕微鏡で観察すると良好な切断面が観察された。

次に、自動車のバッテリーケースの軽量化を図るために、重量 270g の CFRP 製ケースをホットプレスで成形した後、レーザトリミングおよび穴あけ加工した例を Fig.10 に示す。

[テキストを入力してください]



Fig.9 CFRPT Car Handle has 7 holes made by laser ablation



Fig.10 CFRPT Car Battery Case trimmed by CW single mode Fiber laser and drilled by Q-switch YAG laser

この場合、ケースの4辺の直線部分はSMのファイバーレーザーで切断、4つのコーナー部および穴あけは超短パルスYAGレーザーでアブレーション加工を行った。SMファイバーレーザーで切断した断面はFig.7に示したようにファイバー1本1本が丸く切断されていた。

将来、構造部材も超軽量が要求される部材が現れることを考え、ここではCFRP製H形材を製作し、これをレーザーアブレーション加工により穴

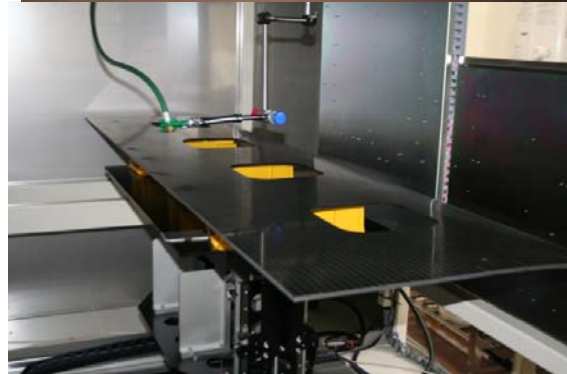


Fig.11 Laser ablation of CFRPT H-beam

あけ、切断した。Fig.11にレーザー加工後のH形材を示す。板厚はフランジもウェブも5mmとした。連結用の穴(6.5径)はレーザー加工とした。さら

に小型飛行機のスキンパネルの窓枠をトリミングした例をFig.12に示す。加工精度は寸法200mmの窓枠に対して $\pm 10 \mu m$ の精度であった。取付け用の穴(径6.0mm)もレーザーで穴開けした。

(a) Making windows on skin panel of CFRP



(b) Laser ablation for skin panel for airplane (thickness : 6.7mm)

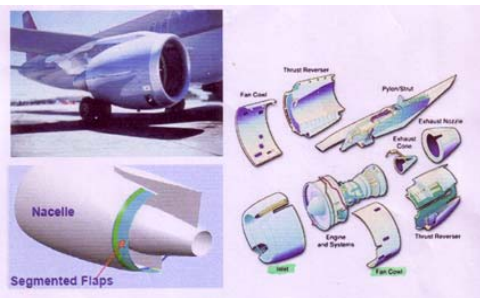
Fig.12 Laser ablation for skin panel for airplane

さらに、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、熱硬化性CFRP(板厚:1.2mm)を用い、突合せモザイク継手(特開2011-056583)の開先加工を行った。切断及び穴あけ後の外観写真をFig.13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。引張試験で破断強度はあて板有り母材強度(520MPa)の66%であった。現在90%の目標値を目指している。

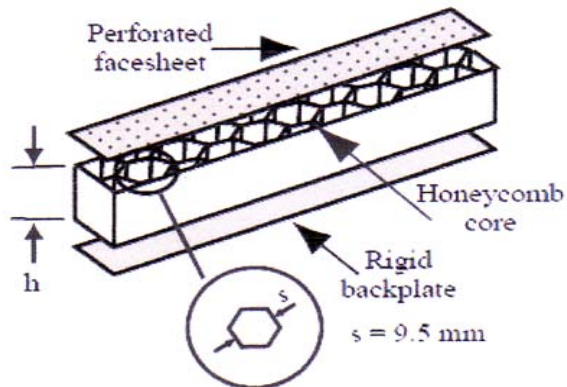
Fig.13 レーザアブレーション加工されたモザイク継手



Fig.13 Mosaic Joint of CFRP prepared by laser Ablation



(a) Acoustic liner used for Nacelle⁷⁾



(b) Structure of acoustic liner

Fig.14 Laser drilling of acoustic liner of CFRP⁸⁾

現在米国ではジェットエンジンのナセルの部分にCFRP部材を利用する研究が Fig.14 に示すようになされているが、本技術を使えば、CFRP板の穴あけ加工が容易に行える。

そこで、Fig.15 に示すようにアラミド樹脂製ハニカムパネルの上下に熱硬化性樹脂のCFRP材（板厚保8mm）を配し、上板のみレーザー穴あけをレーザーアブレーション加工で実施した。穴径は1.0mmと1.5mmで25個をあけた。1.0mm径の穴あけに例を Fig.15(b)に示す。加工時間は135秒と1つの穴加工に5.4秒を要するのみであった。



(a) Acoustic liner composed of CFRP and Aramid resin



(b) Laser drilling of CFRP panel for acoustic liner (dia. of hole : 1 mm)

Fig.15 Laser drilling of CFRP panel for acoustic liner

5. まとめ

ナノ秒パルス Q-Switch YAG レーザおよび3kWシングルモードファイバーレーザを用いたCFRPの切断および穴あけ加工の特性とその応用部材について開発事例を紹介した。

1.2mm以下の薄板のCFRPの除去加工についてはかなり速い加工が可能であることが確認できた。しかし、3mm以上の厚板についてはまだ加工時間が長いという問題がある。現在平均出力が15W~20Wと小さいので、厚板の切断にはより高出力の装置を用いる必要がある。

非常に高品質な切断、穴あけ加工ができることから、板厚の薄い部材から適用が進むものと思われる。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。

謝 辞

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、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行っている。本報告はその研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 1) 杓名、井上；溶接技術 Vol.58 No.3(2010), pp96-100
- 2) G.Caprino, Fabbro ほか Int. J. Mach. Tool Manufact., vol.35(6), pp. 831-840, (1995).
- 3) E.Uhlmann, G. Spur, ほか；Int. J. Mach. Tool Manufact., vol. 39, pp. 639-650 (1999).
- 4) F.C.Campbell；Manufacturing processes for advanced composites, Elsevier, UK, pp. 442.
- 5) B.Denkens, F.Volkermeier ほか；J. Appl. Prod.Technol, APT'07, Bremen, Germany, pp. 99-105 (2007).
- 6) Z.L. Li, P.L. Chu ほか；Proc. of 27th ICALEO2008, Temecular, CA, USA, 20-23 Oct.2008, pp. 222-230.
- 7) G.Bielak, A.Hersh ほか；NASA/CR-2002-211672
- 8) P.French, M.Naeem ほか；Proc.of ICALEO 2010, Sept.26-30, Anaheim, CA, paper#902,