

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRP複合材料部材の新レーザー溶接技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 中部経済産業局
委託先 財団法人 名古屋産業科学研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザ複合加工システムの試作	10
2-1-1 レーザアブレーション特性の把握	10
2-1-2 超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザ複合加工システムの開発	12
2-2 複雑形状に対応した開先加工（切断）及び穴あけ技術の確立	13
2-2-1 超短パルスレーザによる微細切断及び穴あけ技術の開発	13
2-2-2 厚板CFRP材の2重レーザ切断法の開発	14
2-2-3 複雑なモザイク状開先加工法の開発	15
2-3 混合樹脂の溶加材を用いたモザイク溶接継手のレーザ溶接技術の確立	17
2-3-1 CFRP材のレーザ溶接用溶加材の検討	17
2-3-2 溶加材を用いたモザイク溶接における溶接条件の最適化検討	18
2-3-3 最適条件で溶接された溶接継手の吸湿性及びオゾン劣化の評価	19
2-4 コスト削減及び軽量化に対応したCFRP部材のレーザ加工法の確立	20
2-4-1 航空機用CFRP製パネルの革新的レーザ加工技術の適用	20
2-4-2 自動車用CFRP製パネルの革新的レーザ加工技術の適用	22
第3章 全体総括	26

第1章 研究開発の概要

10ナノ秒オーダーの超短パルスレーザを用いた各種炭素繊維強化プラスチック（以下「CFRP」という）材の微細切断および穴あけ加工技術を開発し、厚板CFRP材には超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを組み合わせることにより、切断・加工速度を高める。これらの加工材に対する強度評価を行い、複雑なモザイク状開先加工法を開発した。

次に、複雑なモザイク状開先を持つ各種CFRP材の溶接継手に適した混合樹脂の溶加材を研究開発した。この溶接継手および母材について、強度評価を行った。また吸湿、オゾンによる劣化について調査した。

以上の研究を踏まえ、航空機や自動車に実際に用いられている仕様等でのCFRP材をレーザ切断、穴あけおよび溶接を行い、加工精度や強度等を評価した。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

航空機及び自動車関連産業においては、燃費向上や二酸化炭素ガス排出抑制に大きく寄与する軽量な材料が求められている。従来の金属材料に代わる軽量材料の代表として、CFRPが挙げられるが、その加工に高価なダイヤモンドカッターや高価なウォータージェット切断機等を用いるため、CFRP製品が高価となり、航空機や自動車の限定的な箇所にのみ用いられているが現状である。本研究では、超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを利用した新レーザ加工法により、CFRPの微細切断、穴あけおよび溶接を高精度かつ高速に行う技術の確立を目的とし、もって従来より低コストで高品質なCFRP加工品を航空機及び自動車関連産業に提供できるようにする。

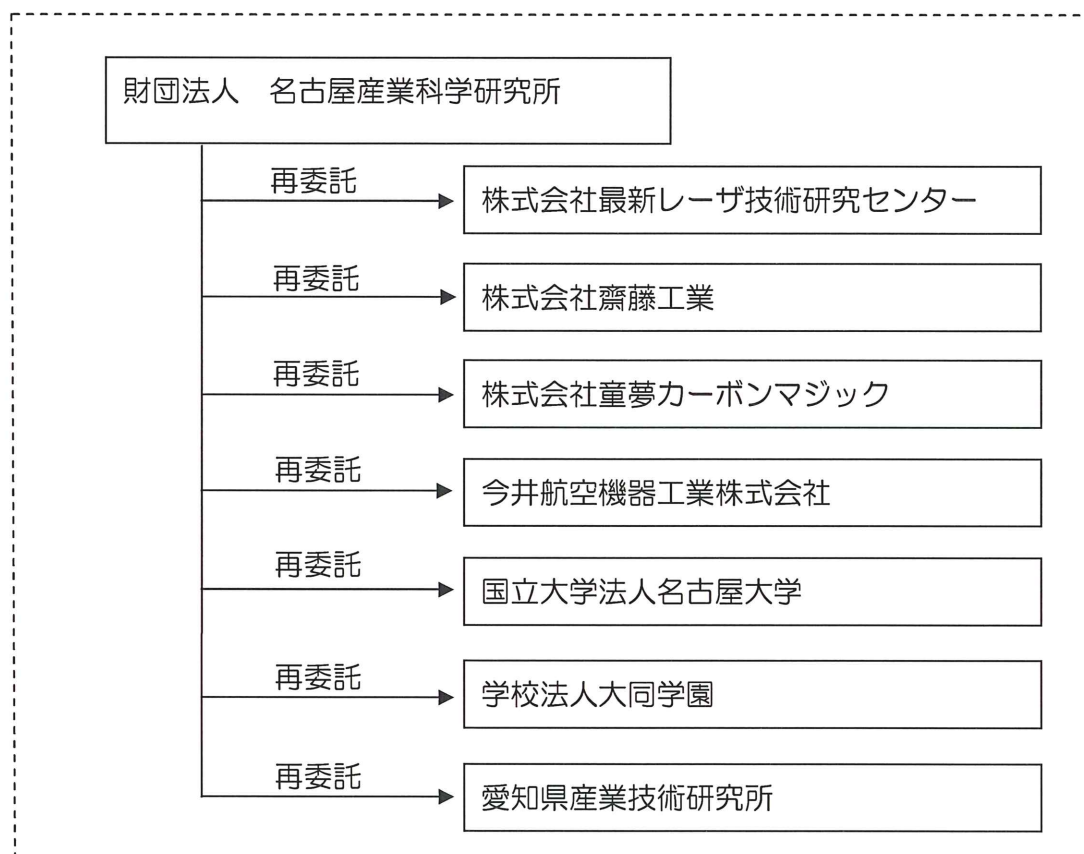
[目標]

- ・ 複雑形状の開先加工に係る切断幅：0.2mm以下
- ・ レーザ切断速度：2m/min 以上
- ・ 切断加工精度：航空機用CFRP：±0.1mm以内
自動車用CFRP：±0.1mm以内
- ・ 溶接速度：2m/min 以上
- ・ 突合せ継手の継手効率(※)：85%以上（合せ板付き）

(※)母材の引張強度と溶接部の引張強度の比

1-2 研究体制

1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（PL）

株式会社最新レーザ技術研究センター

代表取締役 沓名 宗春

副総括研究代表者（SL）

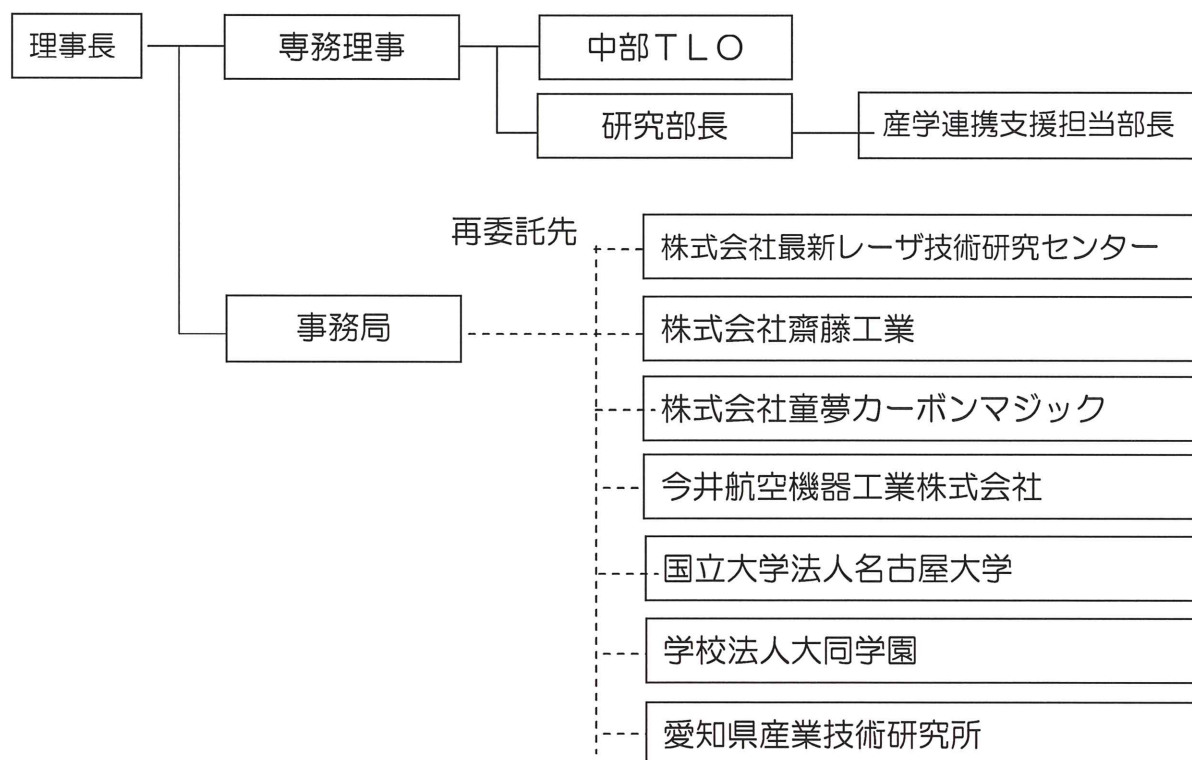
株式会社齋藤工業

代表取締役 齋藤 清隆

2) 管理体制

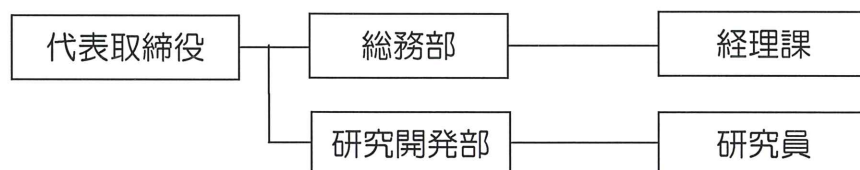
① 事業管理者

財団法人 名古屋産業科学研究所

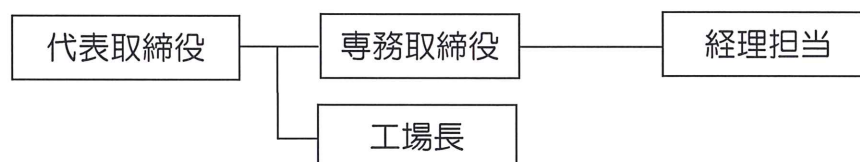


② (再委託先)

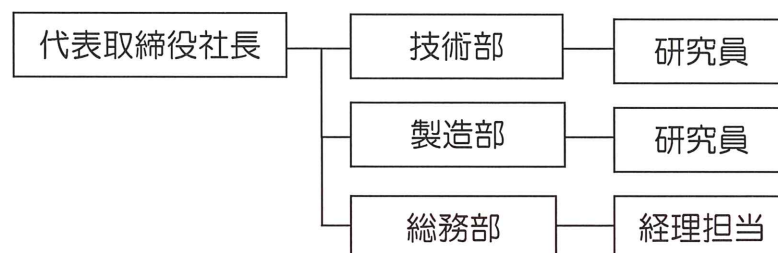
株式会社最新レーザ技術研究センター



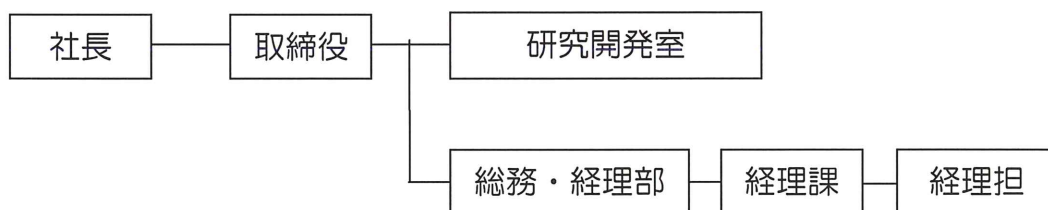
株式会社齋藤工業



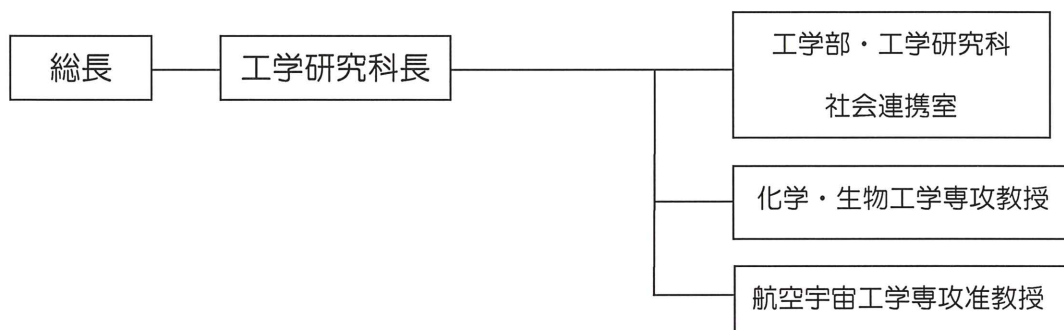
株式会社童夢カーボンマジック



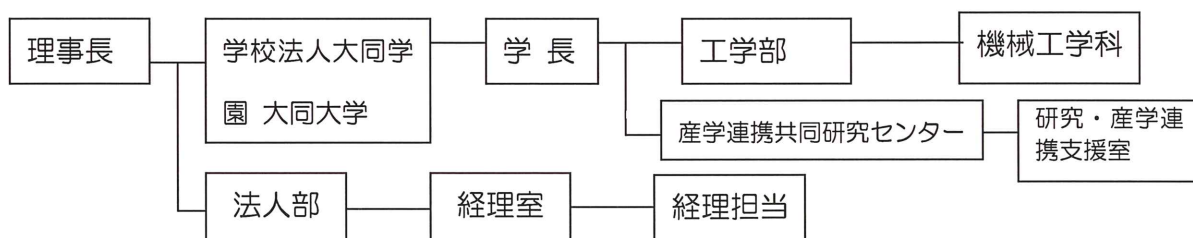
今井航空機器工業株式会社



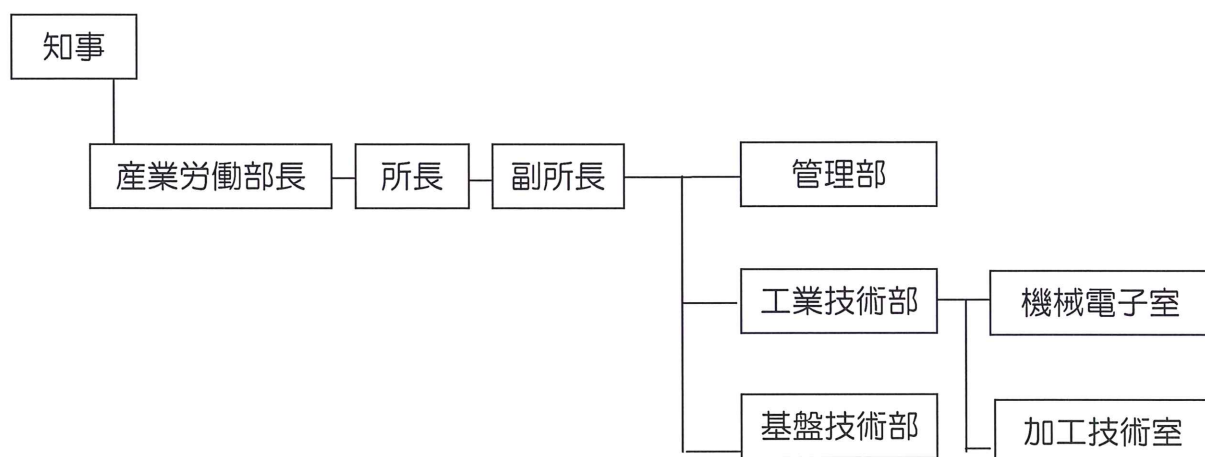
国立大学法人名古屋大学



学校法人大同学園



愛知県産業技術研究所



3) 研究者氏名

株式会社最新レーザ技術研究センター

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
沓名 宗春	代表取締役	①②③④
井上 裕喜	研究員	①②③④

株式会社齋藤工業

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
齋藤 清隆	代表取締役	②③④
岩川 健一	工場長	②③④

株式会社童夢カーボンマジック

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
白波瀬 徹	技術部マネージャー	②④
足立 岳志	製造部マネージャー	②④

今井航空機器工業株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
長尾 誠	取締役	②④

国立大学法人名古屋大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
田邊 靖博	工学研究科化学・生物工学専攻 教授	②③
酒井 武治	工学研究科航空宇宙工学専攻 准教授	①

学校法人大同学園

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
平 博仁	大同大学 工学部 教授	③

愛知県産業技術研究所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
石川 和昌	基盤技術部 技師	②
河田 圭一	基盤技術部 主任研究員	②
島津 達哉	工業技術部 機械電子室 技師	②
天野 和男	工業技術部 加工技術室 主任	②
伊藤 俊治	工業技術部 機械電子室 室長	②

4) 協力者

アドバイザー

氏 名	所属・役職
関戸 俊英	東レ株式会社アドバンスドコンポジットセンター所長
山口 泰弘	KYC-Japan 代表

委員

氏 名	所属・役職
小宮 巖	福井ファイバーテック(株)技術開発グループリーダー

1-3 成果概要

本研究では、超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを利用した新レーザ加工法により、CFRPの微細切断、穴あけおよび溶接を高精度かつ高速に行う技術の確立を目的として、従来より、低コストで高品質なCFRP加工品を航空機および自動車関連産業に提供できるようにするため、下記の目標を立てて実施した

[目標]

- ・複雑形状の開先加工に係る切断幅：0.2mm以下
- ・レーザ切断速度：2m/min以上
- ・切断加工精度：航空機用CFRP：±0.1mm以内
自動車用CFRP：±0.1mm以内
- ・溶接速度：2m/min以上
- ・突合せ継手の継手効率(※)：85%以上(合せ板付き)

(※)母材の引張強度と溶接部の引張強度の比

この目標を達成するために、具体的に、次の研究開発項目を掲げ、10月5日より実施した。

① 超短パルスレーザと高出力固体レーザ複合加工装置の試作

CFRP材の超短パルスレーザ加工は基本的にはレーザアブレーション現象を利用するものであるため、まず、レーザ照射によるターゲット加熱とアブレーションジェットが膨張する過程を時間発展的に解いて、レーザアブレーション現象を数値シミュレーションした。次に、超短パルスのQ-スイッチYAGレーザと高出力（3kW）シングルモードファイバーレーザの複合加工システムを加工光学系とともに設計・試作し、以下の実験に使用し、成果を上げた。

② 複雑形状に対応した開先加工（切断）および穴あけ技術の確立

②-1 超短パルスレーザによる微細切断および穴あけ技術の開発

20～40ナノ秒の超短パルスレーザ装置（繰返し数：20kHz）による各種CFRP材の微細切断および穴あけ加工技術が実施可能となった。また、低パルスエネルギーのナノ秒パルスレーザ装置（波長：349nm）によるCFRP材の微細切断および、穴あけ加工技術の開発を行い、ドリル、エンドミル加工をしたCFRP材とナノ秒パルスレーザ加工をしたCFRP材の強度評価試験を実施し強度比較を行い、レーザ加工の切断品質の高さを証明できた。

②-2 厚板CFRP材の2重レーザ切断法の開発

0.8mm～6.8mm厚のCFRPを超短パルスのQ-スイッチYAGレーザでレーザ切断および穴あけ加工し、その品質の高さを証明できた。また、3kWシングルモードファイバーレーザ装置を導入し、Q-スイッチYAGレーザによる切断と性能比較した。シングルモードファイバーレーザのビームスポット径は約30μmと微小で、8.4mm（1.2mm材×7枚同時）CFRP材を12m/minで切断できることを確認できた。また、両レーザ装置を複合加工システムとして構築し、高速で切断する2重レーザ切断法の実施できるようにした。

②-3 複雑なモザイク状開先加工法の開発

複雑なモザイク状の開先をより高速で高精度に加工するレーザ加工法の開発、各種CFRP材を実際にQ-スイッチYAGレーザで開先加工し、接着剤でモザイク部を接合した後、引張試験を行った。その結果、はめ合の度合いが10%と低く、その部分で引張試験中に継手がはずれてしまい、継手としての十分な強度を測定できなかった。開先加

工の形状および溶加材を総合して選択する必要がある。

③ 混合樹脂の溶加材を用いたモザイク溶接継手のレーザ溶接技術の確立

③-1 C F R P材のレーザ溶接用溶加材の検討

C F R P材をレーザ切断によりモザイク開先加工した継手を異なる接着剤で接合し、その強度を引張試験により調査した結果、強度が高く、接着性能に優れた溶加材を用いることが重要であることが分かった。

③-2 溶加材を用いたモザイク溶接における溶接条件の最適化検討

C F R Pの板材をモザイク状に開先加工した後、一方向繊維プレス成形品と4軸繊維プレス成形品のC F R P材2種を適正な接着剤種類のC F R P材を接合するときの最適溶接条件を検討した。

③-3 最適条件で溶接された溶接継手の吸湿性及びオゾン劣化の評価

吸湿によるC F R P材の劣化およびオゾンによるC F R P材の劣化について、標準的方法により本プロジェクトで使用している代表的なC F R P材について調査した。レーザ加工溶接継手についてはその実施の問題点を抽出できた。母材について調査した。その結果、樹脂は吸湿する。特に、ナイロンは大きく膨潤し寸法変化を伴う。その変化量は、複合材化や他物質の添加によって異なる。自然環境にさらされる場合では、塗装をしても長期間の吸湿は避けられない。その結果、継手を作る場合には、吸湿による内部応力が発生しないように、母材と溶加材の組み合わせを考える必要がある。

オゾン環境に対して、熱硬化樹脂であるエポキシ樹脂マトリックスのC F R Pは劣化しても表面のみであり、塗装で対応できる。熱可塑樹脂の場合、条件によっては樹脂のミクロ割れが発生し、強度はやや低下する。

④ コスト削減および軽量化に対応したC F R P部材のレーザ加工法の確立

④-1 航空機用C F R P製パネルの革新的レーザ加工技術の適用

航空機用C F R P製スキンパネル試作品について開発したレーザ切断および穴あけを実施した。切断品質は寸法精度および切断面は非常によく、当初の精度を満足できるものである。ただ、板厚6mmの材料に対しては、3.5mmまでの加工は達成したが、6mmは未達成である。今後、このような厚い材料については複合加工システムの加工条件を十分検討する必要がある。

④-2 自動車用C F R P製パネルの革新的レーザ加工技術の適用

自動車用C F R P製ギヤボックスの開発のために、その基礎的データをとるために、

モザイク開先加工を行った結果、破断というより、モザイクの頭部と首部の寸法差が不十分のために、外れてしまった。この継手形状の検討を行い、評価する必要がある。

さらに、自動車用CFRP製ハンドルの穴あけを行い、寸法精度および切断面品質が満足いくものであることを確認した。このハンドル加工においては、すでに購入を希望する顧客が出てきた。

以上の結果から、「目標」に対して、突合せ継手の継手効率85%以上を達成できなかったが、継手形状の改善により65%~70%までは達成できると確信する。加工速度については 板厚が約1mmであれば 達成できる。6mmでは達成が困難な値であった。加工精度および品質についてはすべて満足できるものであった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(株)最新レーザ技術研究センター 代表取締役 沓名 宗春

電話：0566-91-2281、FAX：0566-91-2282

E-mail：altrec-kutsuna@nifty.com

第2章 本論

2-1 超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザ複合加工システムの試作 (株式会社最新レーザ技術研究センター、国立大学法人名古屋大学)

2-1-1 レーザアブレーション特性の把握

ナノパルスレーザを繰返し照射するレーザアブレーション加工では、材料に固有な閾値以上のレーザ光エネルギーが材料表面に照射・吸収された際に、極短時間でおこるアブレーション過程を利用する。CFRP は炭素繊維クロスとエポキシ樹脂で構成され、それぞれの構成要素材は、レーザ光波長・パルス幅・雰囲気気圧などの照射パラメータに対する干渉特性が異なることが予想される。従って、構成要素材、それぞれのレーザアブレーション特性を解明することが、加工精度の向上やエネルギーコスト抑制のためには不可欠であると考ええる。本実験では、このような観点から、Nd:YAG レーザを使用し、CFRP 構成要素のレーザアブレーション特性を調べた。

2-1-1-1 実験系

(a) 実験装置の構成

実験装置全体の概略図を図 2-1-1 に示す。

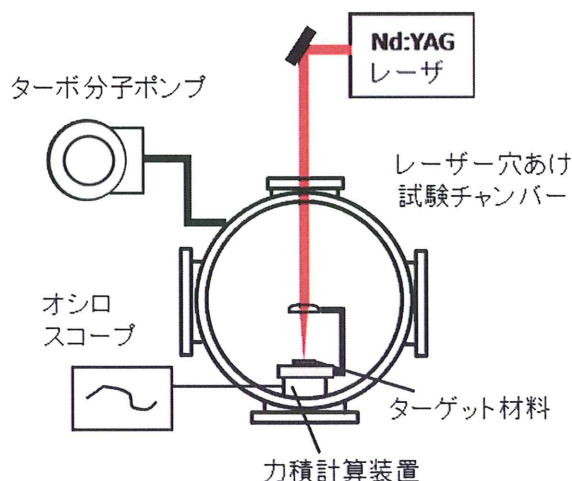
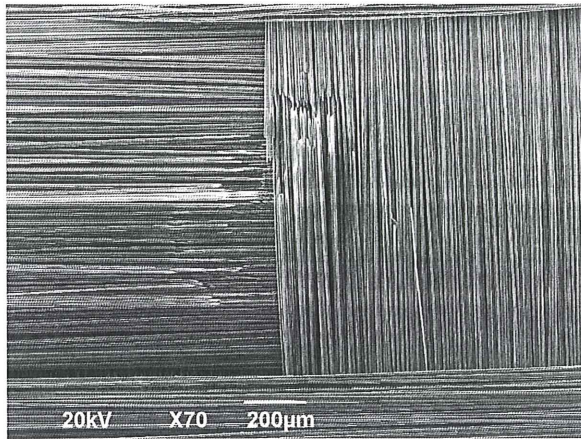


図 2-1-1 レーザ穴あけ試験チャンバー加工実験系

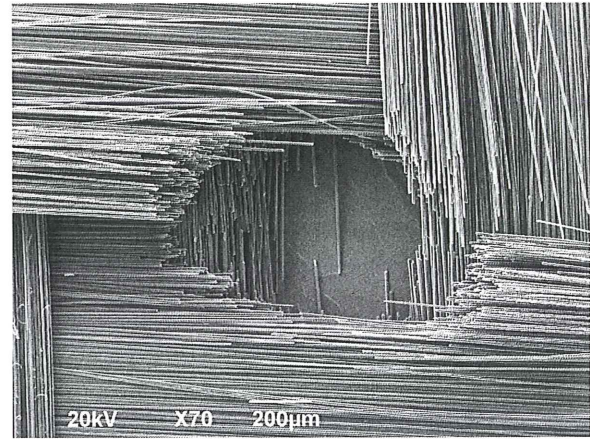
2-1-1-2 実験結果および考察

真空中での結果を図 2-1-2 に示した。材料表面ダメージは、大気圧での同フルーエンス条件での結果と比べると、やや強く出ていることが見て取れる。特に、高フルーエンスとした約 $16\text{J}/\text{cm}^2$ での条件で顕著であり、雰囲気空気のレーザエネルギー吸収特性の違いによるものと考えられる。力積計算装置のシミュレーションは、小球落下時の力を測定して行った。

フォースセンサー校正実験の模式図および力の変化を図 2-1-3、および 4 に示す



(a)低フルーエンス($1.44\text{J}/\text{cm}^2$)



(b)高フルーエンス($16.5\text{J}/\text{cm}^2$)

図 2-1-2 真空中でのレーザ照射した炭素繊維クロスの電子顕微鏡写真(20 回照射)

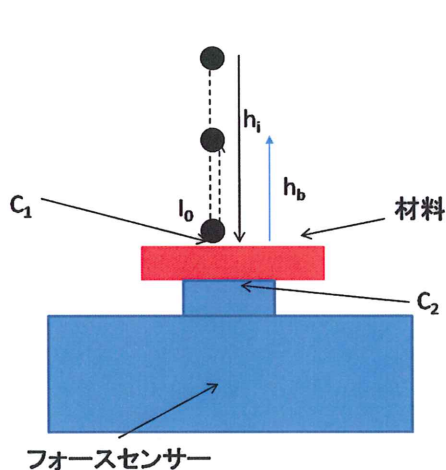


図 2-1-3 フォースセンサー校正実験

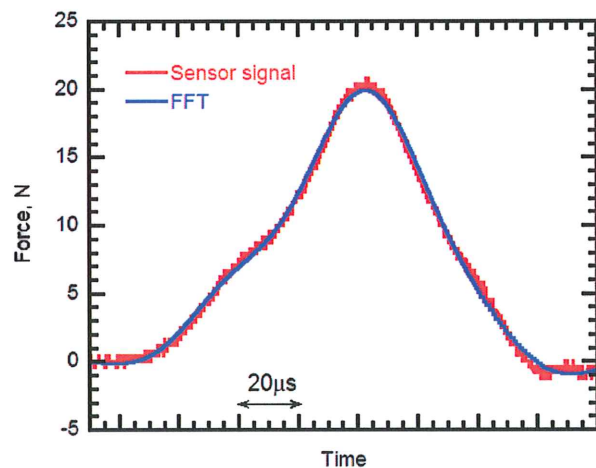


図 2-1-4 小球落下した時の力の時間変化

2-1-1-3 まとめ

CFRP の質量計測とエポキシ樹脂の力積計測を行った。定量的な議論が尽くされていないが、定性的な観察結果より、炭素繊維とエポキシ樹脂では 1064nm に対するレーザ光干渉特性が、かなり異なることが予想される。異なる光学的特性を有する材料のアブレーション特性を、シミュレーションとの融合解析を含めた本アプローチ方法の妥当性を検証することが今後の課題である。ただし、エポキシ樹脂の場合、 1064nm のレーザ光透過特性が高く、特に真空中ではフォースセンサーに熱的なダメージを与える可能性があり、実験方法を工夫する必要があることもわかった。

2-1-2 超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザ複合加工システムの開発

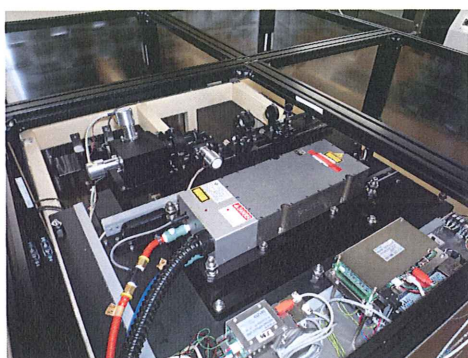
2-1-2-1 加工光学系付QスイッチYAGレーザ（超短パルスレーザ）の開発

(a) Q-スイッチYAGレーザ装置

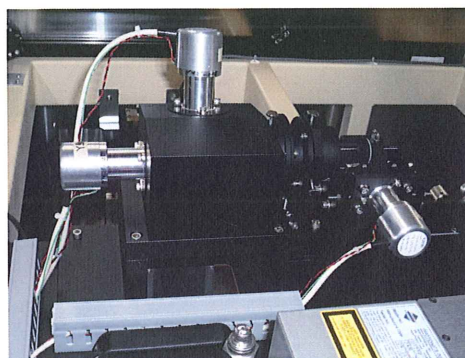
CFRP材を高品質にレーザ加工するにはQ-スイッチYAGレーザを用いたレーザアブレーション加工が最適である。そこで、高能率な加工ができる加工装置を設計・試作した。導入された装置の写真を図 2-1-5 に示す。



(a) Q-スイッチYAGレーザ装置全体



{b} YAGレーザ発振器



(c) ガルバノ・スキャナー

図 2-1-5 Q-スイッチYAGレーザ加工システム

2-1-2-2 高出力シングルモードファイバーレーザの導入

超短パルス（Q-スイッチ）YAGレーザ単独では 加工時間の短縮が困難である。そこで、高出力（3 kW）のSM（シングルモード）ファイバーレーザの導入を図り、これによる厚板CFRPの高速切断を実現することを検討した。

導入されたSMファイバーレーザー装置を図2-1-6に示す。3kW SM（シングルモード）ファイバーレーザーの発振ファイバーのコア径は $13\mu\text{m}$ と非常に微細で、そのビームを加工光学系でコリメートして、それを集光レンズで集光して、ワークに照射するシステムとなっている。これら2種類のレーザーを同時に用いる複合加工システムが開発できた。



図2-1-6 日本初の3kW SMファイバーレーザー装置

2-2 複雑形状に対応した開先加工（切断）及び穴あけ技術の確立

2-2-1 超短パルスレーザーによる微細切断及び穴あけ技術の開発

（株式会社最新レーザー技術研究センター、愛知県産業技術研究所、株式会社童夢カーボンマジック、今井航空機器工業株式会社）

愛知県産業技術研究所は保有している超短パルスレーザー装置（パルスエネルギー： $120\mu\text{J}$ 未満）を用いて、薄板CFRP材の微細切断および穴あけ加工試験を行い、ドリル、エンドミルにより加工したCFRP材と強度比較評価試験（引張試験等）を行った。

2-2-1-1 超短パルスレーザーによる微細切断及び穴あけ技術の開発

レーザー加工およびドリル加工により中心部に穴（ $\phi=6\text{mm}$ ）をあけた引張試験片を作製して、引張試験を行った。その試験結果の一例を図2-2-1に示す。試験結果の値のバラツキを考慮すると、加工方法による引張強度の明確な違いはないと考えられる。

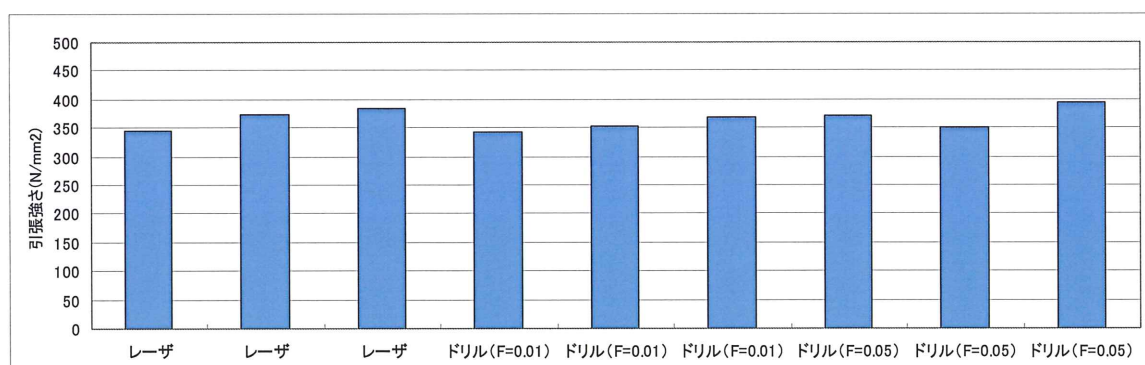


図2-2-1 引張試験結果（T300）

2-2-1-2.超短パルスレーザーによるCFRP材の微細切断及び穴あけ加工試験

Q・スイッチYAGレーザーによる4種類のCFRP材の穴あけ加工を行った。その結果を図2-2-2に示す。

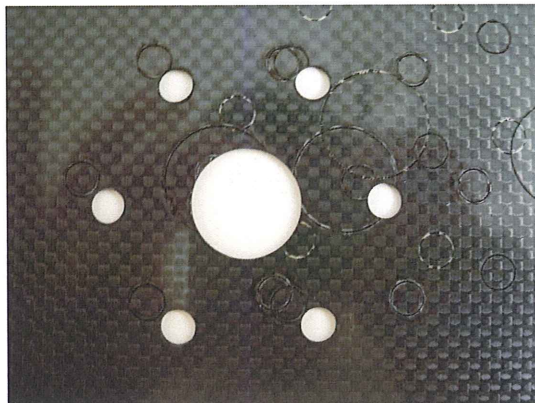
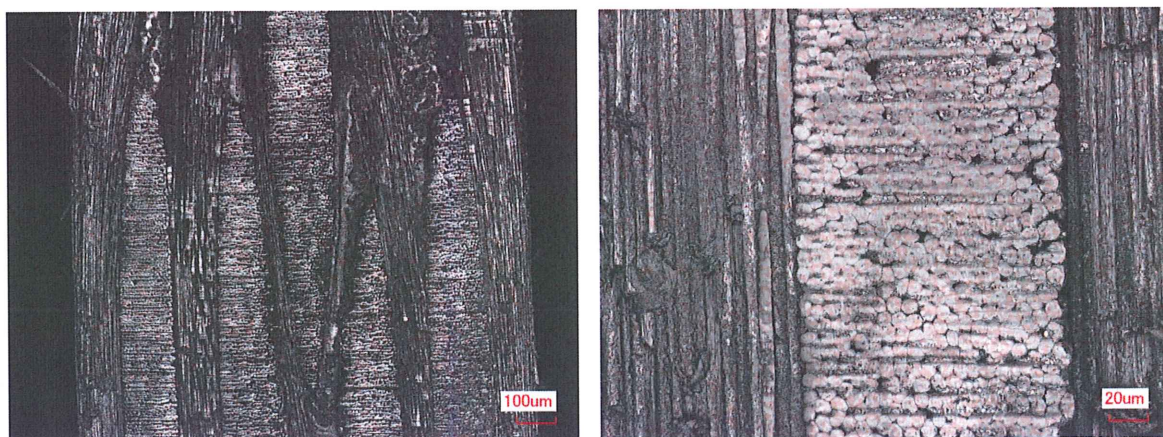


図2-2-2 1.1 mmのCFRP材のアブレーション結果

30 μ m のスポット径で微細で 精密な穴あけが確認できた。この切断面の品質を図2-2-3に示す。



(a) 全板厚を示す断面マクロ写真

(b) 断面の拡大写真

図 2-2-3 綾織りCFRP材の切断面

パルス幅 8 ns のQ・スイッチYAGレーザーでアブレーション加工した時に比べ、炭素繊維の切断面がボケた状態であるが、大差はない。

2-2-2 厚板CFRP材の2重レーザー切断法の開発

(株式会社最新レーザー技術研究センター、愛知県産業技術研究所、株式会社齋藤工業、株式会社童夢カーボンマジック)

齋藤工業で製作された板厚の異なるCFRP材(平織材、綾織材)を超短パルスQ・スイッチYAGレーザーを使用し、レーザーアブレーション加工を行った。その結果、20mm穴1つと6.5m

mの穴6個をあけるのに約17時間かった。板が厚くなると、ビームの焦点の位置をどこにするかによっても切断速度が変わる。今後、最適条件を探してこの10分の1以下の時間で出来ると思われる。

次に高出力シングルモードファイバーレーザーによる厚板の熱切断をおこなった。4種類のCFRP材（板厚1.2mm）の6枚～7枚の重ね切りを行い、厚板切断能力を調査した。

CFRPの熱切断には 熱硬化性樹脂とT300、T700、T800ファイバーのCFRP材を6枚または7枚重ねてアルゴンガスをアシストガスとして次のレーザー照射条件で熱切断した。

その結果、図 2-2-4 に示すように、8.4mm のものが切断できた。

レーザー出力 ： 2kW
切断速度 ： 6m/min



図 2-2-4 熱硬化性樹脂とT300のCFRP材の切断結果(正面)

よく見ると切断面近傍は炭素繊維がほぐれている。

これらのCFRP材をウォータージェット切断やダイヤモンドカッターで切断するとT700 やT800は切削しにくい、レーザー切断では材質による切断性に大きな違いはなかった。

2-2-3 複雑なモザイク状開先加工法の開発

(株式会社最新レーザー技術研究センター、国立大学法人名古屋大学、愛知県産業技術研究所、株式会社童夢カーボンマジック、今井航空機器工業株式会社)

高速で精度の高い複雑なモザイク状開先をレーザー加工で実現するには、素性の明らかな繊維とマトリックス樹脂とで構成された複合材料を用いて、その特性にあわせた詳細条件の確立が不可欠である。そこで、まず、力学特性を制御したエポキシ樹脂をマトリックスとし、弾性率が高く機械加工が難しい高弾性炭素繊維織物クロスで強化した複合材料を作製し、その機械加工性とレーザー加工性とを比較検討するための基礎的な検討を行った。レーザー加工の特徴を機械加工と比較するため、成形、加工時に試料に負荷される力を測定した。

一例として、φ5ドリルで850rpm、0.3mm/s 送りで穴あけ加工した時のスラスト力の時間変化を図2-2-5に示す。複合材料Bの方が、最大スラスト力が若干大きい。マトリックス樹脂の性質と推察される。そこで、マトリックスとして使用した樹脂について同じ条件下でのスラスト力

を測定した。図2-2-5 にあわせて結果を示す。CFRPと比較すると低く、約5～6割のスラスト力である。さらに、樹脂Bは樹脂Cと比較して、スラスト力が高い。これらのことから、機械加工時の穴あけにかかるスラスト力には繊維の影響が大きいものの、マトリックス樹脂の影響も無視できないことが分かった。

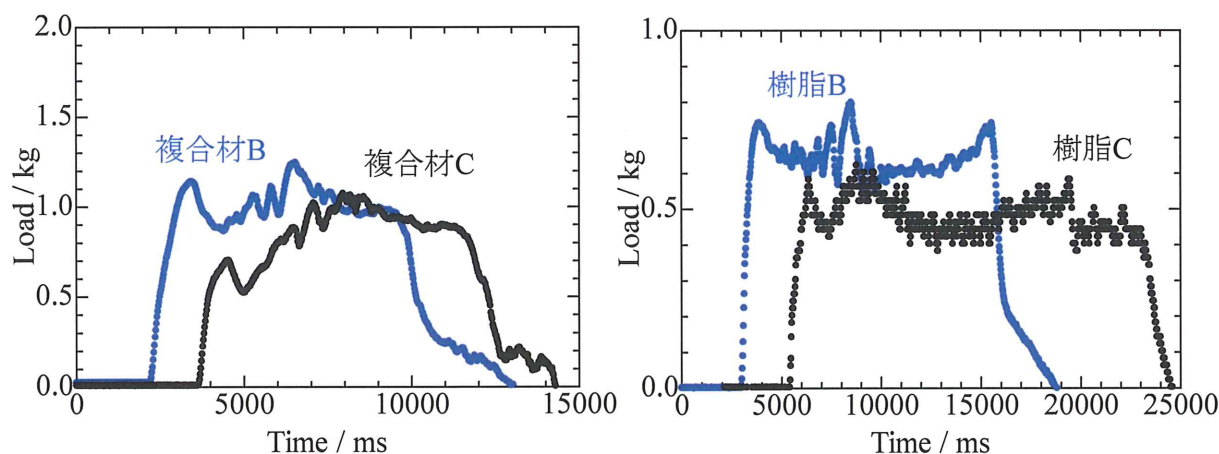


図2-2-5 切断加工の基礎研究に用いたCFRPおよび樹脂の機械加工
(φ5穴あけ) 時に試料に負荷されるスラスト力の時間変化

モザイク継手の開先加工

レーザアブレーション加工により、モザイク継手の開先加工を行い、その継手の加工特性と継手強度を調査した。

図2-2-6 に示すようなモザイク形状の継手を開先加工としてアブレーション加工した。その結果を図2-2-7 に示す。

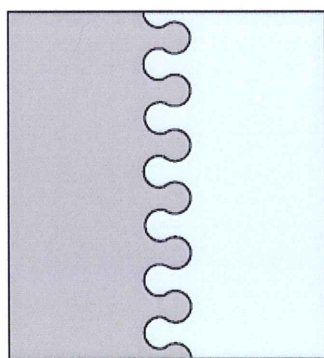


図2-2-6 モザイク継手の一例

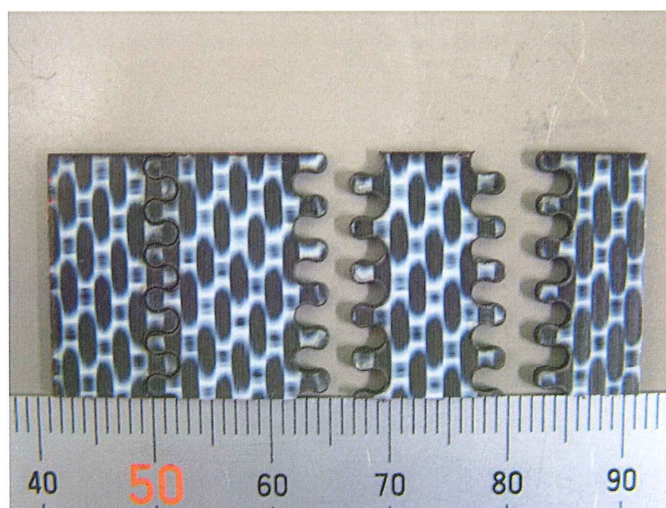


図2-2-7 モザイク継手の開先加工結果
(左から 100パス、200パス、150パス)

ビームスポット径は $30\mu\text{m}$ であるが、切断溝幅は約 $50\sim 60\mu\text{m}$ となった。
そのため、頭部（ 2.0mm を想定）と首部の寸法差が $140\mu\text{m}$ を下回るようになり、
継手としての強度が心配される。切断に要した時間は約6分であった、走行距離は約
 65mm である。よって 10mm に10分かかっている計算になる。

2-3 混合樹脂の溶加材を用いたモザイク溶接継手のレーザ溶接技術の確立

2-3-1 CFRP材のレーザ溶接用溶加材の検討

熱可塑性樹脂をマトリックスとするCFRPは、突き合わせ溶接について検討するために
PA66複合材料、一般的な熱可塑性樹脂PA6（ナイロン6）、PEEK、ポリエチレン、なら
びに溶加材としての展開を念頭にいたナイロン6にカーボンを混練した材料（CB/PA6）、
およびポリエチレンにカーボンを混練した資料（CB/PE）について、大気圧雰囲気下で、波長
が $1\mu\text{m}$ 程度のNd:YLFパルスレーザで溶化（軟化あるいは熔融）する条件を探索した。しかし実
験を行ったいずれの条件においてもPA66複合材料は煙を上げて燃えた。PA6、PA66材
は泡立ちが観察された。ポリエチレンにいたっては、 5mm 厚試料をレーザ光が透過したと考え
られ、表面部では熔融していないにもかかわらず、裏面部での熔融が観察された。質量損失なら
びに外観観察結果を表2-3-1、図2-3-1に示す。これらを総合して、波長が $1\mu\text{m}$ 程度
のNd:YLFパルスレーザでは、熔融条件を確定することは難しいと判断した。

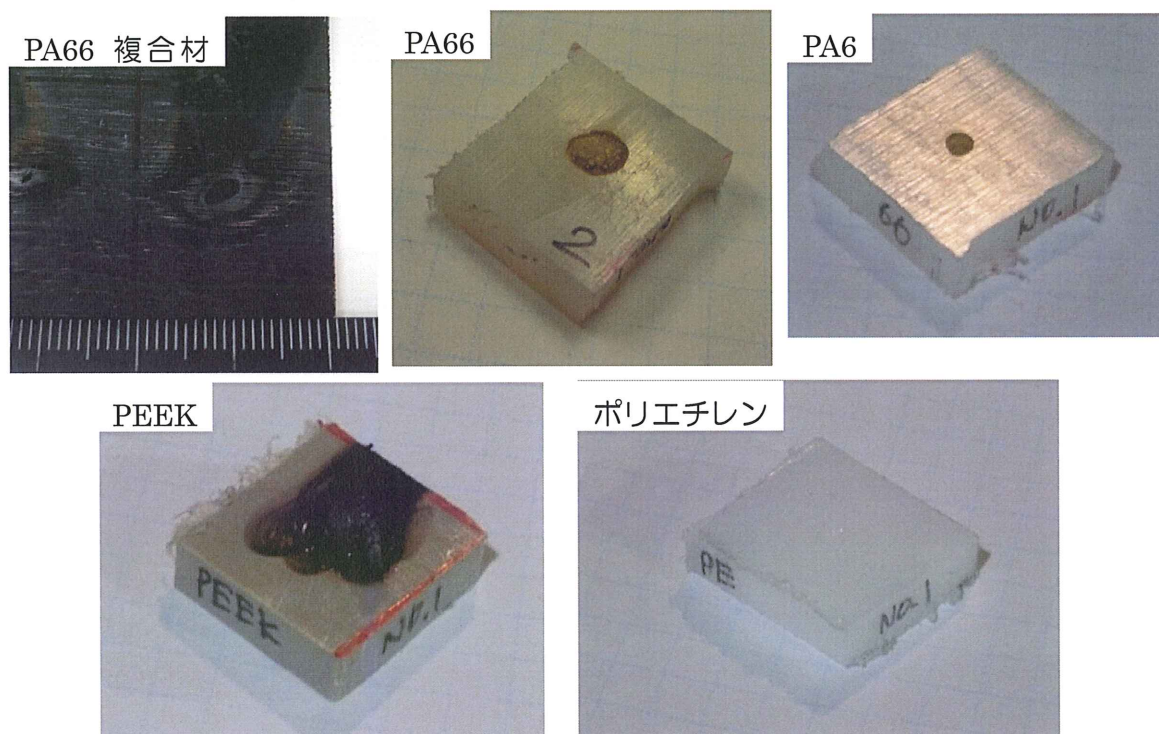


図2-3-1 パルスレーザを用いた溶接基礎実験後の外観

表2-3-1 Nd:YLF レーザによる質量損失

試料	パワー	フルーエンス	質量損失
PA66 複合材料	76.8W	0.064 J/cm ²	-23.5mg
PA66	77.0W	0.064 J/cm ²	-1.3 mg
PA6	57.6W	0.443 J/cm ²	0.3 mg
PEEK			-7.4 mg
Polyethylene			-0.1 mg

本実験のまとめ

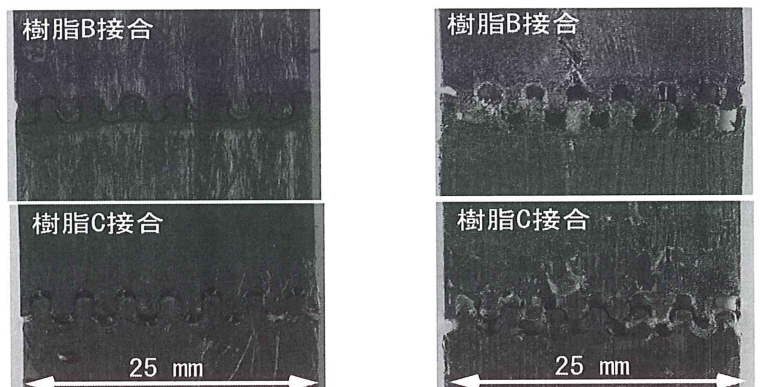
レーザーは、試料に大きな荷重負荷をかけることなく試料を切断できるだけではなく、熱可塑性樹脂複合材料の溶接（接合）をも可能とする優れた手法であることが分かった。さらに、カーボンを混練したナイロンを溶加材として用いることで、CFRP同士を接合できる可能性が示された。溶加材を利用した本手法を応用することで、CFRPの修復に欠かせない、部材同士の固定化処理法として大きな役割を果たすことが期待される。

2-3-2 溶加材を用いたモザイク溶接における溶接条件の最適化検討

図2-3-2に一方向炭素繊維引抜成形品の引張り軸に垂直な方向の歪みを示す。樹脂C接合では垂直方向にも正の歪みが生じている。これは、開先部を開こうとする力が働いていることを示唆しており、興味深い。

レーザー開先加工部が小さいため荷重負荷時に頭部が摩耗したと同時に、開先部を開く変形が生じたと推察される。さらに、完全な平面での溶接が行えていなかったために曲げ成分が印加され、これら摩耗や変形を増長した可能性は否定できないが、開先加工形状が接合部の特性に重要な因子になっていることが推察される。さらに、接合部の歪み（変形）は溶加材の性質に影響を受けること、接合部での力学特性がレーザー開先加工部の巾や長さの影響を受けることが示唆された。

図2-3-2 除荷後の溶接部の様子（左：一方向炭素繊維引抜成形品、右：4軸炭素繊維プレス成形品）



2-3-3 最適条件で溶接された溶接継手の吸湿性及びオゾン劣化の評価

ここでは、CFRPの母材、及び溶加材の候補になると考える材料を対象とする劣化試験を行った。なおCFRPの吸湿劣化試験は、航空機機体へこの材料を適用しようとする場合、劣化程度を評価するために必ず実施される。またオゾン曝露試験は、大同大学が提案している試験で長期間の紫外線環境の曝露に似た状況が短時間で得られる利点がある。

(1) 恒温恒湿槽

新規に設置された恒温恒湿槽の外観を図 2-3-3、装置の仕様を表 2-3-2 に示す。



表 2-3-2 恒温恒湿槽 仕様

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・試験温度範囲：-40～150℃・試験湿度範囲：30～95%RH・内形寸法：300mm×250mm×300mmH・9 ステッププログラム運転可能 |
|---|

図 2-3-3 恒温恒湿槽外観



表 2-3-3 オゾン曝露実験装置 仕様

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・オゾン発生量：最大 10g/H・オゾンガス吐出圧力：0.08MPa・原料ガス：内蔵・オゾン濃度計設置<ul style="list-style-type: none">・測定範囲：0～300g/m³(N)・ガス加湿系付（安全対策） |
|---|

図 2-3-4 オゾン曝露実験装置外観

(2) オゾン曝露実験装置

新規設置されたオゾン曝露実験装置の外観を図 2-3-4、装置の仕様を表 2-3-3 に示す。なお設備設置が遅れたので、その間住友精密工業本社内の実験装置も借用して実験を行った。装置中ではオゾンは、オゾナイザ中にて酸素雰囲気中に放電することで形成され、安全のために加湿器を経由し、オゾンモニターで濃度を計測された後に試験片が入っている反応容器に導かれる。その後オゾンはオゾンキラーで O₂ に分解され外界に放出される。

(3) 実験まとめ

熱硬化樹脂系 CFRP、熱可塑樹脂系 CFRP、また熱可塑樹脂 CFRP を選定した場合の溶加材

となると考える熱可塑樹脂を対象に、吸湿環境およびオゾン環境に曝露して特性の変化を調べ、レーザ溶接継手を製作した場合の課題を検討した結果は以下のとおりである。

1. 樹脂は吸湿する。特に今回の実験対象では、ナイロンは大きく膨潤し寸法変化を伴う。その変化量は、複合材化や他物質の添加によって異なる。

自然環境にさらされる場合では、塗装をしても長期間の吸湿は避けられない。よって継手を作る場合には、吸湿によってそこで内部応力が発生しないように、母材と溶加材の組み合わせを考える必要がある。

2. オゾン環境に対して、熱硬化樹脂であるエポキシ樹脂マトリックスの CFRP は劣化しても表面のみであり、塗装で対応できる。熱可塑樹脂の場合、条件によっては樹脂のミクロ割れが発生し、強度はやや低下する。このミクロな割れは、樹脂と繊維との複合化によって樹脂に内在する引張の残留応力によるものと考えられる。溶接自体も残留応力を発生する工程であるので、注意が必要である。

2-4 コスト削減及び軽量化に対応したCFRP部材のレーザ加工法の確立

2-4-1 航空機用 CFRP 製パネルの革新的レーザ加工技術の適用

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）材料に対する従来法であるエンドミル加工では、工具摩耗が激しく、鉄鋼材料等に比べて極めて短い工具寿命となる。しかも、仕上げ面は繊維の毛羽立ち等が発生する為、高品位の仕上げ面を得ることが難しいのが現状である。

しかしこの材料に対する航空宇宙産業の要求は高強度/軽量化の観点から高くなっており、形状加工技術の確立が急務となっている。

本研究では(株)最新レーザ技術研究センターにてレーザトリミング加工をレーザアブレーション加工で実施した。供試体は材料の特性を表 2-4-1 に表す。また供試体外観を図 2-4-1 に示す。

表 2-4-1 CFRP 材料の特性

メーカー	川崎航空機株式会社製
PLY 数	17PLY+2PLY（外表面保護層）
積層構成	0° /45° /90° /-45° の繰り返し
サイズ	650 mm×2050 mm 板厚：6.35 mm



図2-4-1 供試体外観

レーザ加工実験後、レーザトリミング加工によって得られた切断面及び形状について評価した。三次元測定機によりレーザトリミング加工された形状について評価する。



図2-4-2 レーザ切断四角窓形状

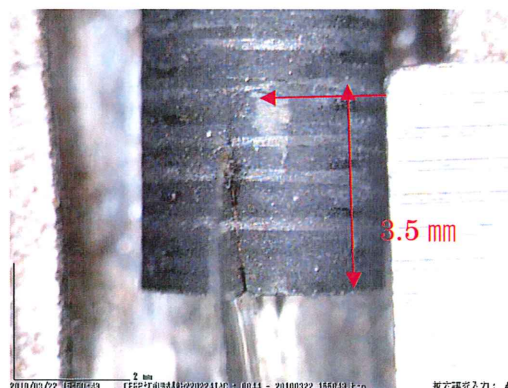
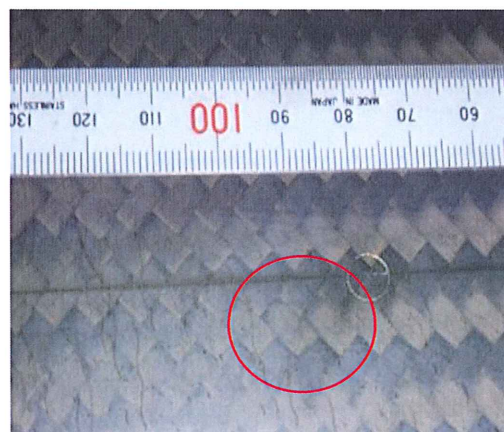


図 2-4-3 切断深さ

レーザ切断された部分をコア状に抜き取って、厚さ 0.03 mm の隙間ゲージを挿入し、切断深さを測定した結果、深さ 3.5 mm まで切断されていることが判った。残念ながら、外形曲面に対して切断された面が直角になっているかの評価は、切断深さが足りない為に実施できなかった。しかし、図 2-4-2 の四角窓形状を測定した結果、 200 ± 0.5 mm に対して 199.9~200.1 mm で加工されて、形状寸法についての要求は満足している。次に穴について評価する。



航空機用 CFRP 供試体に $\phi 6.5$ mm の穴あけ加工を行っ

図 2-4-5 $\phi 6.5$ mm 穴レーザ入力側

た。約1時間以内で貫通した。しかし、貫通時に下面にあったアルミ板をも切断されていなく、反射があったが、CFRP切断隙間が十分連続して切断されないで装置が中断されたため、穴のコアが抜けられない状態となってしまった。(図2-4-5)

実験まとめ

レーザトリミング加工によって得られた形状の評価は外表面曲面形状に対して直角に切断される事が理想であるが、現在スキャナーミラーによる方向を制御した切断方法では、航空機部品の品質要求は満足しているものの、切断部に僅かなテーパーが出来てしまう。これについてはミラーから製品表面までの距離を長く取ることによって解決できるが、今後の研究課題となっている。

また今回は、YAGレーザ発振器本来の出力が出ず、約1/3の10W程度での試験となった事で、1周714mmを×10,000回、約48時間かかって深さ3.5mmまでしか切断できなかった。しかし、切断面及び形状に関しては航空機部品の品質要求を満足しており、特に切断加工後のバリ・毛羽立ち等が発生しないことは、従来までの人の手による仕上げ工程がなくなることで将来、コストダウンに繋がる可能性は高い。

2-4-2 自動車用CFRP製パネルの革新的レーザ加工技術の適用

2-4-2-1 (1) 自動車用CFRP製パネルの革新的レーザ加工技術の適用 (その1)

従来CFRP製の自動車用ギヤボックスの製法としては、設計データよりマスターモデルや成形型を製作し、それらにCFRPプリプレグ等を積層することにより製作を行っている。

この工法では、設計者の意図する仕様の製品化が忠実に行えるものの、型成形や積層工程に多くの工数やコストが発生するデメリットもあり、CFRP製のギヤボックスを普及させる為にはコスト面での大々的な改善が必要となる。

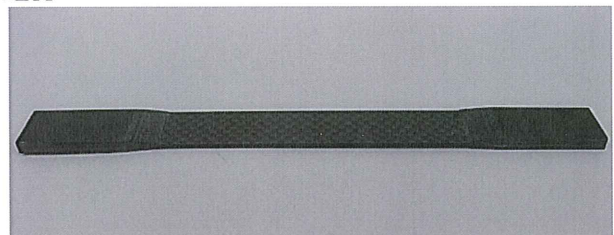
そこで次のような初期の基礎的な強度検討を行った。

- ①レーザを用いてモザイク状に加工された開先部分の強度の確認
- ②開先部分に通常CFRPの接合に用いられる接着剤を塗布した場合の強度の確認
- ③カットしていない通常の試験体での強度の確認

上記3パターンでの強度試験を実施する。

引張試験片の形状は次の図のとおりである。

図2-4-6 . 試験体形状



引張試験結果（１）通常試験体（カットされていない試験体）の引張試験結果

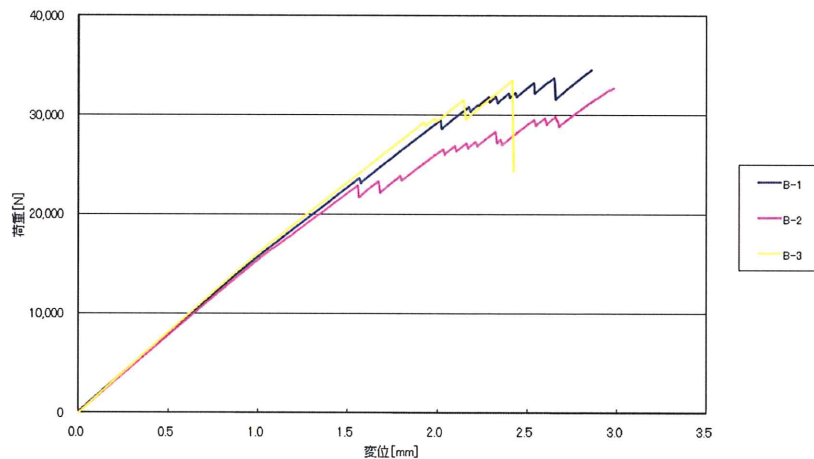


図 2-4-7 . 通常試験体（12K）の引張試験結果

引張試験結果（２） 最新レーザ技研でモザイク状にカットされた試験体の引張試験結果

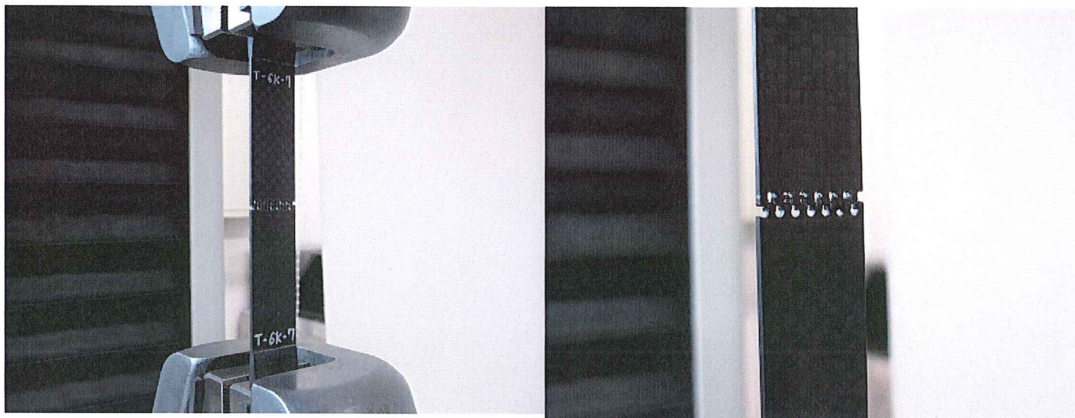


図 2-4-8. モザイク状にカットした試験体（12K）の引張試験

引張試験結果について考察

試験結果より明らかになったことは、下記 2 点である。

- ・モザイク状にレーザ加工された試験体（接着無し）と、通常の試験体を比較した場合、レーザ加工で切断したものは約 1/20 程度にまで強度が下がる。
- ・加工部分を接着した場合でも多少引張強度が改善される程度で、通常の試験体の 1/17 程度しか強度が無い。

以上の結果より、レーザ加工された開先形状の接合だけでは CFRP 繊維の持つ強度に遠く及ばない為、高負荷のかかるギヤボックスの製作を最終的な製品目標とした場合、より強固にパネル間を接合できる技術が必要であることが明らかである。

2-4-2-1 (2) 自動車用 CFRP 製パネルの革新的レーザ加工技術の適用 (その2)

もう1つの自動車部品として CFRP 製ハンドルの製造を実用化製品として検討した。

図2-4-9 自動車用モデル部品 (ハンドル形状) の取付部穴加工仕様

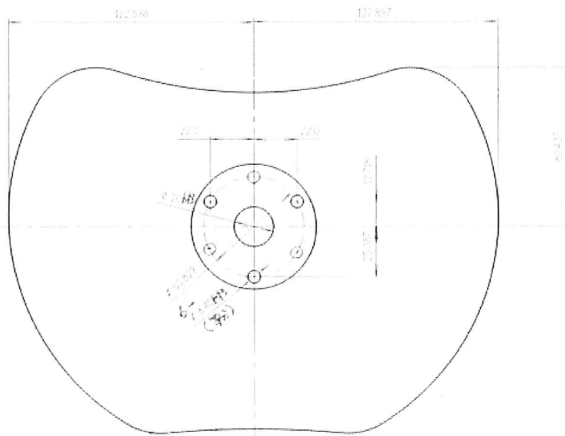


図2-4-10 CFRP 製ハンドルの形状

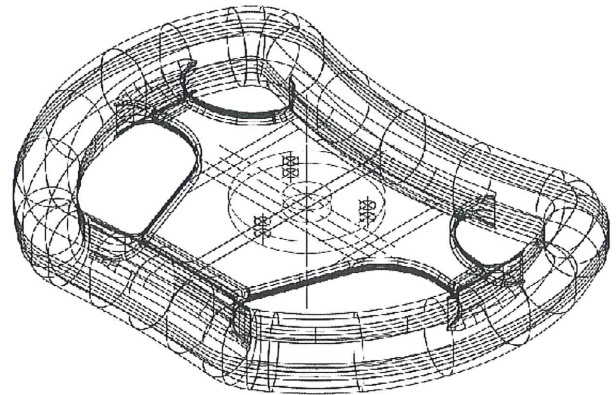


図2-4-11 穴あけ前のハンドル(平織：左、綾織：下、ケブラー：右)

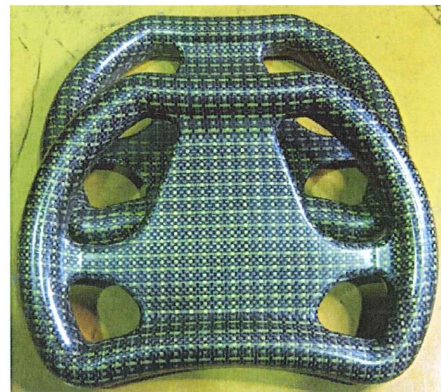




図2-4-12、ハンドル穴あけ加工用取付治具の製作



図2-4-13 レーザ穴あけされたハンドル

レーザ穴あけされたハンドルの加工精度は非常に高く。顧客を満足させるものであった。市販された場合、購入希望者がすでにでたとのことである。

第3章 全体総括

航空機及び自動車関連産業においては、燃費向上や二酸化炭素ガス排出抑制に大きく寄与する軽量な材料が求められている。従来の金属材料に代わる軽量材料の代表として、炭素繊維強化プラスチック（以下「CFRP」という。）が挙げられるが、その加工に高価なダイヤモンドカッターや高価なウォータージェット切断機などを用いるため、CFRP製品が高価となり、航空機や自動車の限定的な箇所にのみ用いられているのが現状である。また、炭素粉体の飛散など健康上の問題がある。本研究では、超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを利用した新レーザ加工法により、CFRPの微細切断、穴あけ及び溶接を高精度かつ高速に行う技術の確立を目的とし、もって従来より低コストで高品質なCFRP加工品を航空機及び自動車関連産業に提供できるようにする。

図3-1に示すような10ナノ秒オーダーの超短パルスレーザを用いて、各種CFRP材の微細切断及び穴あけ加工を研究・開発した。厚板CFRP材には超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを組み合わせることにより切断・加工速度を高める。これらの加工材に対する強度評価等を行い、図3-2に示すようなモザイク状の開先加工法を開発した。

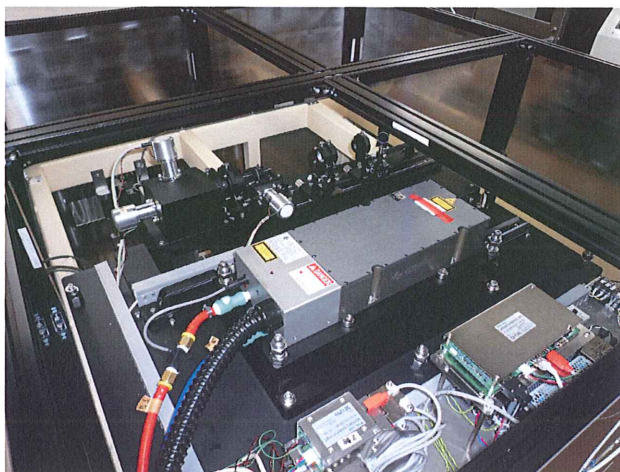


図3-1 超短パルスレーザ加工装置

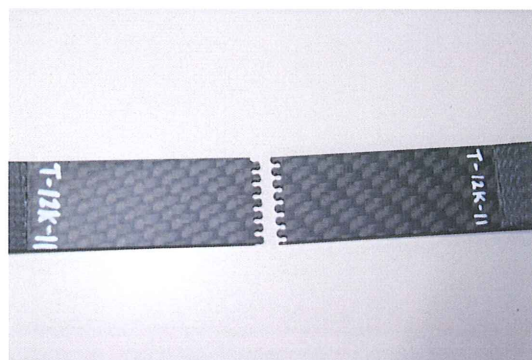


図3-2 モザイク継手の開先加工

次に、複雑なモザイク状開先を持つ各種CFRP材の溶接継手に適した、溶着技術を開発した。以上の研究を踏まえ、航空機や自動車にて実際に用いられている仕様でのCFRP材をレーザ加工する技術を開発した。

まず、超短パルスレーザと高出力固体レーザ複合加工システムの開発を行い、CFRP材の超短パルスレーザ加工の基本特性を調べた。CFRPをレーザアブレーション加工するとその切断面は炭素繊維の剥離もなく、高品質の切断が可能であった。次に、高出力（3kW）シングルモードファイバーレーザの加工特性を調べた。8mm厚さのCFRP材も毎分12mまたは

16mで行っても熱切断できることがわかった。しかし、炭素繊維がむき出し、切断品質が悪い。よってこれらの欠点を複合化することで、これらを解消できないか調べた。

超短パルスレーザーによる微細切断および穴あけ技術の開発

20～40ナノ秒の超短パルスレーザー装置（繰返し数：20kHz）による各種CFRP材の微細切断および穴あけ加工技術が実施可能となった。また、低パルスエネルギーのナノ秒パルスレーザー装置（波長：349nm）によるCFRP材の微細切断および、穴あけ加工技術の開発を行い、ドリル、エンドミル加工をしたCFRP材とナノ秒パルスレーザー加工をしたCFRP材の評価試験を実施し強度比較を行い、レーザー加工の切断品質の高さを証明できた。

また、厚板CFRP材の2重レーザー切断法の開発として0.8mm～6.8mm厚のCFRP材を超短パルスのQスイッチYAGレーザーでレーザー切断および穴あけ加工し、その品質の高さを証明できた。また、3kWシングルモードファイバーレーザー装置を導入し、Q-スイッチYAGレーザーによる切断と性能比較した。SMファイバーレーザーのビームスポット径は約30μmと微小で、8.4mm（1.2mm材×7枚同時）CFRP材を12m/minの高速で切断できることを確認できた。今後、このように加工速度の違うものをいかに複合化していくべきか課題もみつかった。両レーザー装置を複合加工システムとして、高速で切断する2重レーザー切断法の実施できるようにした。ただ、Q-スイッチYAGレーザーの搬入の遅れにより、2重レーザー切断法の評価試験を十分実施できなかった。

複雑なモザイク状継手の開先加工法の開発において、開先をより高速で高精度に加工するレーザー加工法の開発し、各種CFRP材を実際にQスイッチYAGレーザーで開先加工し、接着剤でそのモザイク部を接合した後、引張試験を行った。その結果、はめ合の度合いが

10%と低く、その部分で引張試験中に継手がはずれてしまい、継手としての十分な強度を測定できなかった。開先のモザイク形状および溶加材を最適化する必要がある。強度を高めるには、円頭部形状を大きく、接着剤の硬度を高める必要がある。

混合樹脂の溶加材を用いたモザイク溶接継手のレーザー溶接技術の確立のためCFRP材のレーザー溶接用溶加材の検討を行った。

CFRP材をレーザー切断によりモザイク開先加工した継手を異なる接着剤で接合し、その強度を引張試験により調査した結果、強度が高く、接着性能に優れた溶加材を用いることが重要であることが分かった。

溶加材を用いたモザイク溶接継手における溶接条件の最適化検討においてCFRPの板材をモザイク状に開先加工した後、一方向繊維プレス成形品と4軸繊維プレス成形品

のCFRP材2種を適正な接着剤種類のCFRP材を接合するときの最適溶接条件を検討した。

最適条件で溶接された溶接継手の吸湿性及びオゾン劣化の評価

吸湿によるCFRP材の劣化およびオゾンによるCFRPの劣化について、標準的方法により本プロジェクトで使用している代表的なCFRP材について調査できたが、溶接継手についてはできなかった。現在、継手ができたので進めている。ただ、レーザ加工溶接継手についてはその実施の問題点を抽出できた。その結果、樹脂は吸湿する。特に、ナイロンは大きく膨潤し寸法変化を伴う。その変化量は、複合材化や他物質の添加によって異なる。自然環境にさらされる場合には、塗装をしても長期間の吸湿は避けられない。よって、継手を作る場合には、吸湿によってそこで内部応力が発生しないように、母材と溶加材の組み合わせを考える必要がある。

オゾン環境に対して、熱硬化樹脂であるエポキシ樹脂マトリックスのCFRPは劣化しても表面のみであり、塗装で対応できる。熱可塑樹脂の場合、条件によっては樹脂のミクロ割れが発生し、強度はやや低下する。

最後に、実用化を目指し、コスト削減および軽量化に対応したCFRP製品のレーザ加工法の確立において、航空機用CFRP製パネル、自動車ギヤボックス、および自動車用ハンドルについてこの革新的レーザ加工技術の適用を検討した。その結果、航空機用CFRP製スキンパネル試作品についてのレーザ切断および穴あけではCFRP材の板厚が6.5mmと厚く、加工面積も大きく、出力と時間の設定が不十分であったためか、貫通穴あけができなかった、切断品質は寸法精度および切断面は非常によく、当初の精度を満足できるものであった。

自動車用CFRP製ギヤボックスの開発のために、その基礎的データをとるために、モザイク開先加工を行った結果、破断というよりモザイクの頭部と首部の寸法差が不十分のために外れてしまった。この継手形状は改善することにより、十分な強度が得られる。今回、自動車用CFRP製ハンドルの穴あけを行った結果、図3-3に示すように、寸法精度および切断面品質が満足いくものであることを確認した。このハンドル加工においては、すでに購入を希望する顧客が出てきた。上の結果から、「目標」に対して、突合せ継手の継手効率85%以上を達成できなかったが、継手形状の改善により65%~70%までは達成できると確信する。また合わせ板を用いたレーザ溶接効果で、85%以上の強度となる。加工速度については板厚が約3.5mmまで加工可能となり。条件の変更により6mmの達成は容易と考える。加工精度および品質についてはすべて満足できるものであった。今年度は、研究自身が世界初のことであり、多くの困難もあったが、さらに、各種CFRP製品の実用化に向けて、開発を進める予定である。



図3-3 レーザアブレーション加工で高精度穴加工された自動車ハンドル