

平成21年度成果報告書

省エネルギー革新技術開発事業／挑戦研究（事前研究）／
革新的材料（CFRP）加工技術の事前研究

平成22年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
（委託先）国立大学法人大阪大学
財団法人レーザー技術総合研究所
独立行政法人産業技術総合研究所
財団法人製造科学技術センター

まえがき

日本では、地球規模の温暖化防止のため、種々の省エネルギーの取組みがされている。特に、自動車業界・輸送業界においては、軽量化を計ることが最重要課題となっている。その中で、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、最軽量で強度（比強度）が高く、F1車での使用から一般車への利用も検討されはじめている。

ただ、現在、CFRPは製造コストが高く、切断・切削加工が困難であるのが難点であり、自動車等への適用を考えた製造方法および加工法の改善・改良が必要である。一方、レーザーは、高パワー密度で短時間制御が可能であり、加工法として最も期待される光源である。

航空機等に利用されている軽量・高強度材であるCFRPの切断は、通常、機械加工やウォータージェットによって行われているが、工具の摩耗や加工に時間がかかるなどの課題がある。また、CFRP同士の接合は、接着または機械的結合とこれらの組合せで行われる。一方、レーザーには、高出力の連続発振のレーザー、短波長化したパルスレーザー、極短時間照射のフェムト秒レーザー、ピコ秒レーザーなどがある。

そこで、本研究では、材料特性の異なる種々のCFRPに対して、大阪大学接合科学研究所では連続発振の高出力・高輝度レーザーを用い、レーザー技術総合研究所（レーザー総研）ではフェムト秒レーザーおよびピコ秒レーザーを用い、また、産業技術総合研究所（産総研）では短波長ナノ秒レーザーを用いて、レーザー切断を行い、レーザー切断性に及ぼすレーザーの種類の影響を評価している。さらに、大阪大学接合科学研究所では、今後の展開を考慮して、金属とCFRP（熱可塑性PA基）とのレーザー直接接合を試みている。

CFRPは、日本の製造業が優位性を維持している数少ない分野であるため、CFRPの利用を考えた各業界から委員が参加し、各種レーザーによるCFRPの切断・接合加工技術の研究を行ったことは重要である。特に、各種CFRPのレーザー切断性とそれに及ぼす各種レーザーの種類の影響を定性的に評価できた点は非常に有意義であり、今後の更なる展開を期待したい。

目 次

まえがき	1
目次	2
概要（Ⅰ．和文、Ⅱ．英文）	3
本編	4
第1章 本事前研究に係る目的・体制・内容	5
1. 1 目的	5
1. 2 委員会の設置と運営	6
1. 3 経緯（スケジュール）	8
1. 4 事業内容	11
第2章 革新的材料（CFRP）の現状と製品使用例および課題・問題点	13
2. 1 炭素繊維強化樹脂複合材料（CFRP）の現状について	13
2. 2 CFRP拡大のための課題と対策	21
2. 3 本事業における材料の選定	23
第3章 実証試験の内容と結果	24
3. 1 高出力レーザー切断・接合（大阪大学）	24
3. 2 フェムト・ピコ秒レーザー切断・穴あけ等（レーザー総研）	38
3. 3 紫外レーザー切断・穴あけ等（産総研）	49
3. 4 現状技術切断・穴あけ等（NC加工・ウォータージェット：産総研）	57
3. 5 実験結果の総括	65
第4章 産業応用分野の要求・課題等	68
4. 1 公的研究機関の取組	68
4. 2 CFRP産業・実用化に関する現状と将来ビジョン	70
4. 3 まとめ	75
第5章 複合材料対応次世代レーザー加工プロセス設計	76
5. 1 光源開発を中心としたレーザー加工プロセスの検討等	76
第6章 結び	79
6. 1 総括及び結論	79

要約（和文・英文）

日本の製造業が優位性を維持強化していくために不可欠なレーザー加工技術は、金属・ポリマーや複合材等の切断・接合技術が挙げられる。とくに、アプリケーション側である産業ニーズから、CFRP（炭素繊維強化複合材料）を中心とした複合材料の精密切断・接合の強い要望がある。これは、自動車における各種材料による重量軽減効果が、CFRPでは現状製造コストが高いものの重量軽減には最も効果的であることに由来する。本研究では、将来の日本製品の高信頼化・軽量化に寄与し、もって省エネルギーに資することを目的とする。本報告書では、現在のレーザー装置を使った加工性能評価結果を報告し、必要なレーザー加工システムのスペックの具体的な数値化検討ならびに各種CFRP材料に関してのベンチマーキングを行った。結論として、現在のレーザー装置では性能不足だが、高出力・高品位モード性ならびに波長選択制御性が実現すれば、革新的な製造技術として高精度なレーザー切断やレーザー接合が可能であることが判明した。

Laser materials processing for the industrial applications is significant for the cutting and joining of metals, polymers and composite materials. Especially, the needs of an industrial side strongly demand the high precision cutting and joining of CFRP (carbon fiber reinforced plastic), because CFRP, which is expensive at the moment though, is expected to be the most effective materials to reduce the weight of transportation vehicles among the other promising materials. It turns out by the investigation that materials processing utilizing a laser with a prospective high-power, high-beam-quality and high-wavelength-selectivity is fascinating for the advanced materials processing, whereas the performance of the current laser equipments is not satisfactory for these applications. The next generation lasers will be applicable to not only motor vehicles but also aerospace, vessels, electronics and electrical engineering. In this chapter, benchmarking is actively performed to define the specifications of the lasers for applications to the joining of metals and plastics or dissimilar plastics, or to the cutting of CFRP, etc.

本 編

第1章 本事前研究に係る目的・体制・内容

1.1 目的

日本の製造業が優位性を維持強化していくため、製品製造の観点からは、高強度、軽量素材を活用し、その素材を安価に、容易に加工できる新たな加工法を模索していく必要がある。日本の製造業を代表する自動車産業等においては、環境面、省エネルギー面から、軽量化について以前より取り組みがなされてきている。ただ、モジュール的な軽量化は既に極限まで成熟し、今後は素材を含めた軽量化が必要な段階に来ている。また、自動車だけでなく、各種製品製造においては、革新的材料・製造・加工を横断的に考えていかなければならない状況にある。

具体的には、素材としてCFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic：炭素繊維強化プラスチック）等の複合材料を活用し、新たな加工法を用いて製品製造を行うことが必須となっている。現在、CFRPの切断、穴あけ等には、ウォータージェットやレーザーを活用した加工が考えられているが、実用化までには至っていない。一方、アプリケーション側である各種産業界からは、CFRPを中心とした複合材料の精密切断、接合の強い要望がある。これは、CFRPは製造コストが高いものの、重量軽減効果が非常に大きいことに由来する。

現在のレーザー装置に対して、より高出力・高品位なもの、波長選択可能なものが実現すれば、革新的な製造技術として高精度・高品位なレーザー切断やレーザー接合が可能であることが判明している。ただ、高精度・高品位な切断、接合を行うためには、その現象を把握し、素材がどのような状態にあるかを適切に判断する必要があるとともに、様々な材質や条件で試験加工した切断面、接合面の評価を行う必要がある。また、適切な材質を利用することで、材料コスト削減に繋がる可能性も高い。

本研究では、航空機、自動車、造船、電機・電子等の主要産業において、日本が得意とする製品製造を主軸として、材料選定（適性評価）、最適加工法（次世代レーザー等）の模索、生産技術としての信頼性評価を行う。将来の日本製品の高信頼化、軽量化に寄与し、もって省エネルギーに資することを目的とする。

本研究で得られた成果を自動車に適用し、CFRPを自動車車体の構造部に使用することにより、2020年までに国内自動車の1/2が置き換わることを想定した場合、省エネルギー効果量は原油換算で400万Kl/年（2,000万台×重量低減400kg/台）が見込まれる。

1. 2 委員会の設置と運営

①CFRP等複合材料の現状把握と産業応用への課題抽出(製造科学技術センター)

高強度、軽量素材として開発が進められてきたCFRP等複合材料について、現在どのようなバリエーションがあり、産業別にどのような加工方法や素材が要求されているかをユーザー企業からヒアリングし、ニーズの収集、分析を行う。さらに、それぞれの材料に最適な加工法を模索し、コスト低減、タクトタイム短縮を図る上で解決すべき課題を明確化する。産業分野としては、航空機、造船、自動車、家電等を対象とする。

川上(素材メーカー)、川中(装置メーカー)、川下(ユーザー)の主要産業の企業と実証試験及び評価試験を担当した組織からなる委員会を構成し、実験や評価結果に基づき、材料(種類、板厚等)、レーザー加工条件、加工品質に関するデータベース(マトリックス表フォーマット)を整備する。

②CFRP等複合材料の切断・接合等実証試験及び分析(高出力レーザー)

(大阪大学)

熱硬化性および熱可塑性の各種CFRPを購入し、シングルモードファイバーレーザー(借用:2kW)、高輝度シングルモードファイバーレーザー(既設:10kW級)、ディスクレーザー(既設:16kW級)などによる切断実験を種々の条件で行い、各種板厚における切断可能速度を確認する。また、切断面の品質に及ぼす各種因子(ノズルの有無、ノズル形状、ガスの種類、ガス圧、ガス流量、レーザーモード、レーザー集光ビーム径など)の影響を評価する。切断部については、切断試験片を実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡で観察し、品質評価のデータを得る。穴あけ加工にもトライし、他の穴あけ法との比較を行う。さらに、既設の半導体レーザー等を用いて、CFRP同士の接合実験やCFRPと金属材料との接合実験も実施する。

③CFRP等複合材料の切断・穴あけ等実証試験及び分析(フェムト・ピコ秒レーザー)

(レーザー技術総合研究所)

産業用として使用されている複数種類のCFRP試料片を購入し、既設のパルス幅100フェムト秒~10ナノ秒の短パルスレーザーを用いて切断・穴あけ実験などを行い、試料表面の性状を観察する。レーザーで加工したサンプルは、実体顕微鏡および走査型電子顕微鏡で表面を観察する。また、一部試料片に対しては、波長変換ユニットを用いて400nm~1064nmの範囲でレーザー光の波長変換を行い、CFRP加工のレーザー波長依存性を調べる。これらの結果からCFRP切断に最適なレーザー光源選定のためのデータベースを提供する。

④CFRP等複合材料の切断・穴あけ等実証試験及び分析(紫外レーザー)

(産業技術総合研究所)

既設の波長355nmのナノ秒パルス紫外レーザー装置等を用い、産業用として使用されている複数種類のCFRP試料片に対して切断や穴あけ加工を行う(CFRP試料片や試料保持具は消耗品として購入)。このとき、焦点距離の異なるレンズ光

学素子類（消耗品として購入）を使うことで、加工速度、加工深度、切り幅等の加工因子の相関を明らかにする。加工後の試料面の形状観察は、SEM観察、長深度レーザー顕微鏡観察、レプリカ法等を駆使して、レーザー照射条件が切断面に与える影響について精密に分析評価を行う。これらの結果から、高品位かつ高スループットなレーザー切断加工の必要スペックを明確化する。また、9月に開催予定の応用物理学会秋季講演会（富山大学）に出張し、レーザー装置と応用技術の最新成果について調査を行う。

⑤NCマシニング加工・ウォータージェット加工との特性比較・評価

（産業技術総合研究所）

NCマシニングやウォータージェットによる切断・穴あけ加工を行ったCFRP試料を購入し、包埋樹脂等を用いて加工面を保護後、切断・研磨することで加工部周辺への熱影響の有無を調べる。これらの結果と②、③、④の加工試料との比較を相互に行い、精度や切断面、加工時間等を明確にした特性比較評価を行う。

⑥各産業分野への複合材料製品の適用分析

（製造科学技術センター）

CFRP等複合材料を加工したときの加工条件、切断面観察結果等のデータを収集、整理し、レーザーの波長、出力、モード、パルス幅等が切断面の性状に及ぼす影響を分析・評価する。加工形状劣化や経年劣化の予測を行うとともに、製品加工等の産業に適用した場合の信頼性、ロバスト性、コスト等について分析・評価を行う。分析・評価は、川上（素材メーカー）、川中（装置メーカー）、川下（ユーザー）の主要産業の企業と実証試験及び評価試験を担当した組織からなる委員会において行う。

また、各産業分野においてCFRP等複合材料が導入されていくためのシナリオ、技術マップ、ロードマップを作成することで、2015年、2025年等の将来にわたった、CFRP等複合部材の切断、穴あけ、接合等の加工に関するマーケティング仮説を行う。

⑦複合材料対応次世代レーザー加工プロセスの設計

（製造科学技術センター）

レーザー光源や加工システムの専門家及び各産業をリードする企業からなる委員会を構成し、上記の分析・評価に基づき、CFRP等複合材料の加工ツールとしてのレーザー加工プロセスの設計を行う。その設計に基づき、レーザー加工プロセスを実現するための技術開発要素を明確にする。また、それらがもたらす省エネルギー効果を算出し、製品製造を幅広い視点で捉え、幅広い産業への展開を考慮する。技術の進歩や産業への応用例を考慮すると、高出力で波長選択が可能なファイバーレーザーや半導体レーザーが主な候補になると予想されるが、他の技術への波及効果やイノベーション創出効果等も考慮した提案を行う。

1. 2. 1 体制

事前調査の内容及び体制に関しては、主に実験を大阪大学接合科学研究所、レーザー総研、産総研で行い、それらの結果を基に各種委員会で検討、分析を行い、2回行った実験に関しても、その内容に関して委員会委員の意見を取り入れ行った。

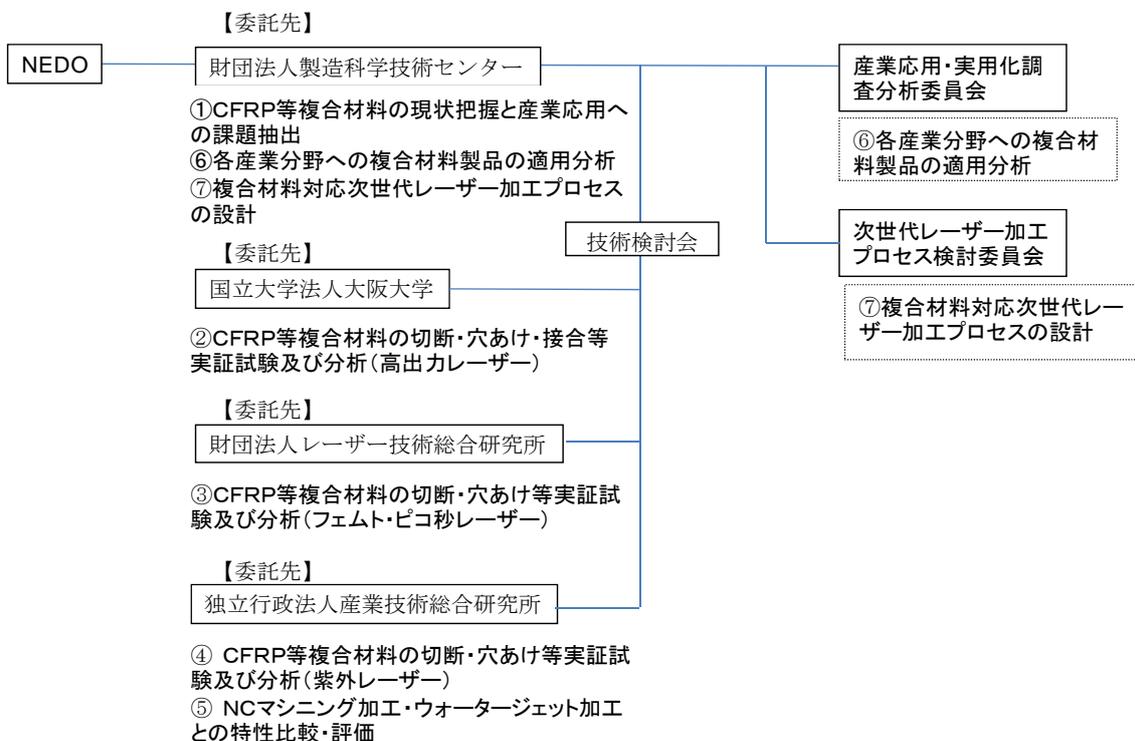


図 1.2.1 事前調査体制図

1. 3 経緯 (スケジュール)

本事前調査委員会では、CFRPを産業応用・実用化調査分析委員会として、素材メーカー、加工メーカー、ユーザーメーカーを中心に組織し、素材の現状と今後の製品化の方向性、加工メーカーとしては、どのような加工方法があるか、又は有効なのかの現状技術等からの視点での検討。また、最終的には製品やその部品としての利用に関する問題点や課題等をユーザーメーカーより意見聴取・分析を行った。

また、次世代レーザー加工プロセス検討委員会では、製造業に利用されるレーザー加工技術の光源側からの視点でどのような光源が必要かの検討を行った。

1. 3. 1 産業応用・実用化調査分析委員会

- ・机上検討による市場将来動向の検討、開発技術必要スペックの抽出を実施
- ・委員会における討議内容は、適時、実験を行う3組織（大阪大、レーザー総研、産総研）にフィードバックし、現状のレーザー加工技術によってどの程度実現

可能であることを検証

- ・ 委員：三菱重工、IHI、トヨタ自動車、三菱電機、パナソニック電工、ミヤチテクノス、新日本工機、アルバック、東レ、三菱化学、東成エレクトロビーム、レーザックス、大阪大、レーザー総研、産総研、岡山県工業技術センター
- ・ 全6回開催
 - 第1回（6月26日）@MSTC
 - 第2回（9月29日）@産総研つくば ※見学：産総研第5事業所
 - 第3回（11月18日）@大阪大 ※見学：レーザー総研／
阪大レーザー研
 - 第4回（12月9日）@大阪大 ※見学：接合研
 - 第5回（1月18日）@三菱化学(株)本社 ※見学：ケミストリープラザ
 - 第6回（3月16日）@MSTC

1. 3. 2 2次世代レーザー加工プロセス検討委員会

- ・ レーザー光源システム側からの開発技術必要スペックの妥当性評価や国内外の最先端レーザー技術のベンチマークを実施
- ・ 委員：三菱電機、東芝、浜松ホトニクス、古河電工、ミヤチテクノス、新日本工機、アルバック、東レ、三菱化学、アスペクト、光創成大、大阪大、電通大、慶応大、中央大、大阪府大、レーザー総研、産総研
- ・ 全3回開催
 - 第1回（10月26日）@MSTC
 - 第2回（11月13日）@都内（真福寺ビル）
 - 第3回（12月21日）@MSTC

平成21年度 革新的材料(CFRP)加工技術の事前調査

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	
産業応用・実用化調査分析委員会	H21.6.26 13:30～17:00 委員会 MSTC第1	H21.9.29 13:00～16:30 見学・委員会 産総研(つくば)	H21.11.18 13:00～18:00 見学・委員会 阪大(レーザー研)	H22.12.9 13:00～18:00 見学・委員会 阪大(接合研)	H22.1.18 13:00～17:00 委員会 三菱化学	H22.3. 13:00～18:00 委員会 MSTC	
次世代レーザー加工プロセス検討委員会	H21.10.26 13:30～16:30 真福寺第2	H21.11.13 13:30～16:30 真福寺第2	H21.12.21 13:30～16:30 真福寺				

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
作業工程表	計画内容確認	実験詳細打ち合わせや内容等(メールでのやりとり)	切断・開孔・接合実験(阪大、レーザー総研、産総研)	実験結果・分析内容報告。再実験内容の確認	再実験(阪大、レーザー総研、産総研)	実験結果・分析内容報告。再実験内容の確認・纏め方検討	必要に応じて再再実験(阪大、レーザー総研、産総研)
委員会開催	○			○		○	○
							
	H22D 1月	2月	3月				
作業工程表	実験及び産業ニーズ分析・評価まとめの検討	原稿執筆	原稿読み合わせ(成果報告書作成)				
委員会開催	○		○				
							

委員会開催と実験・作業内容の確認表

1. 4 事業内容

現在、CFRP等の複合材料は、高剛性化、軽量化を目指して開発が進められており、素材としては国際的にトップレベルであり、日本の素材メーカーが世界シェアの7割を確保している。しかし、高精度・高品位な切断、接合技術は、まだまだ研究室レベルの技術となっている。そのため、CFRPの素材製造、加工、ならびに製品応用に関しては、当該分野の国内トップ企業から構成される産業応用・実用化調査分析委員会において、机上検討による市場将来動向の検討、開発技術必要スペックの抽出を行う。また次世代レーザー加工プロセス検討委員会を設置し、レーザー光源システム側からの開発技術必要スペックの妥当性評価や国内外の最先端レーザー技術のベンチマークを行う。産業応用・実用化調査分析委員会における討議内容は、適時、実験を行う3組織（国立大学法人大阪大学、財団法人レーザー技術総合研究所、独立行政法人産業技術総合研究所）にフィードバックし、現状のレーザー加工技術によってどの程度実現可能であるかを検証する。これらの協同作業により、現状の技術の壁（性能限界、適用限界）を明確化することで、本分野において真に必要かつ実現可能性の高い挑戦的な技術開発目標の設定を行い、次期最適加工システムの提言を行う。現状の加工技術は以下の通りであり、これを超えるスペックの実現を目指す。

CFRP加工に対する各種加工法比較（現状技術）

項目	切削	ウォータージェット	CO ₂ レーザー (既存の産業用金属加工)
最大切断可能板厚	制限なし	20mm	1mm
加工速度	1.3m/min (10mm ^t)	通常 0.2～ 0.3m/min 最大 1m/min (0.5mm ^t)	1m/min (1mm ^t)
寸法精度	<1μm	±0.15mm	不明
切断面品質	方位によりバリ、剥離有	良好	熱切断機構により切断面が炭化
切断幅	工具サイズによる	1mm	不明
切断経路	端部からの切断	端部からの切断	ピアッシングにより面内からの切断が可能

（出典：平成20年度産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査事業成果報告書財団法人製造科学技術センター）

本研究における目標を以下に示す。この目標に基づき次ステップの研究開発の提案を行った。

- ・CFRP等複合材料を切断・穴あけ加工したときの材料(種類、板厚等)、レーザー加工条件、加工品質に関するデータベース(マトリックス表フォーマット)を整備する。
- ・CFRP等複合材料を切断・穴あけ加工したときのレーザーの波長、出力、モード、パルス幅等が切断面の性状に及ぼす影響を分析・評価し、製品加工等の産業に適用した場合の信頼性、ロバスト性、コスト等について分析・評価する。
- ・CFRP等複合材料の加工ツールとしてのレーザー加工プロセスの設計を行う。その設計に基づき、レーザー加工プロセスを実現するための技術開発要素を明確にする。

上記を実現するため、具体的に以下を実施した。

- ② CFRP等複合材料の現状把握と産業応用への課題抽出
- ② CFRP等複合材料の切断・接合等実証試験及び分析(高出力レーザー)
- ③ CFRP等複合材料の切断・穴あけ等実証試験及び分析(フェムト・ピコ秒レーザー)
- ④ CFRP等複合材料の切断・穴あけ等実証試験及び分析(紫外レーザー)
- ⑤ NCマシニング加工・ウォータージェット加工との特性比較・評価
- ⑥ 各産業分野への複合材料製品の適用分析
- ⑦ 複合材料対応次世代レーザー加工プロセスの設計

第2章 革新的材料（CFRP）の現状と製品使用例および課題・問題点

2.1 炭素繊維強化樹脂複合材料（CFRP）の現状について

2.1.1 炭素繊維とは

炭素繊維とは衣料原料と同じポリアクリルニトリル繊維や、コールタールもしくは石油重質分を原料とするピッチ繊維を、特殊な環境のもと高温で炭化することにより繊維方向に非常に緻密で強固な黒鉛結晶構造を形成させた直径数 μm 程の繊維状材料であり、スチールやアルミなど従来の工業材料にはない軽さと強さをあわせ持ちながら、錆びない、耐薬品性や寸法安定性に優れる、導電性があるなどといった様々な特性を有する高機能材料である。中でも最大の特徴はその比強度、比弾性率の高さにあり、比重が1.6～1.8とアルミの2/3程度でありながら、強度は3～7GPa、弾性率は230～700GPaと非常に高い値を示す点にある(図2.1.1.1)。このような炭素繊維は1970年代初期に商業生産がスタートしており、その優れた特徴から特に軽量化要求の高い航空宇宙分野やスポーツ・レジャー分野を中心とした市場が創出され、以来、繊維そのものの強度や弾性率を改善した製品や繊維表面状態を用途や組み合わせる樹脂によって改質した製品、さらには樹脂コンパウンド用に長手方向に切断し、短繊維化、ミルド化した製品など様々な品種や形態が開発され市場が拡大してきており、現在では全世界で約4万トン/年の規模にまで成長している。また、さらにその市場の約70%を古くから合繊技術の発達していた日系企業が占めるという今や日本を代表する材料でもある。(図2.1.1.2)

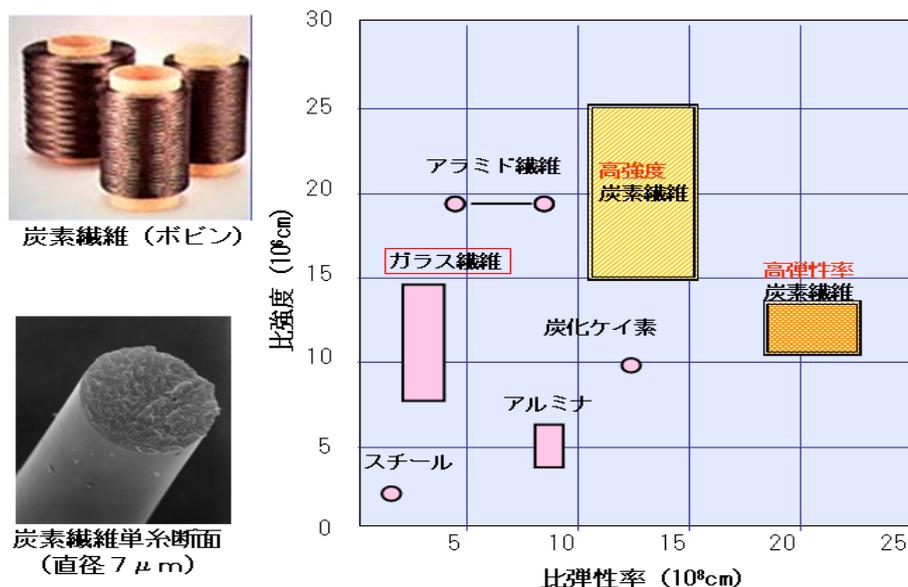


図 2.1.1.1 炭素繊維の比強度、比弾性率

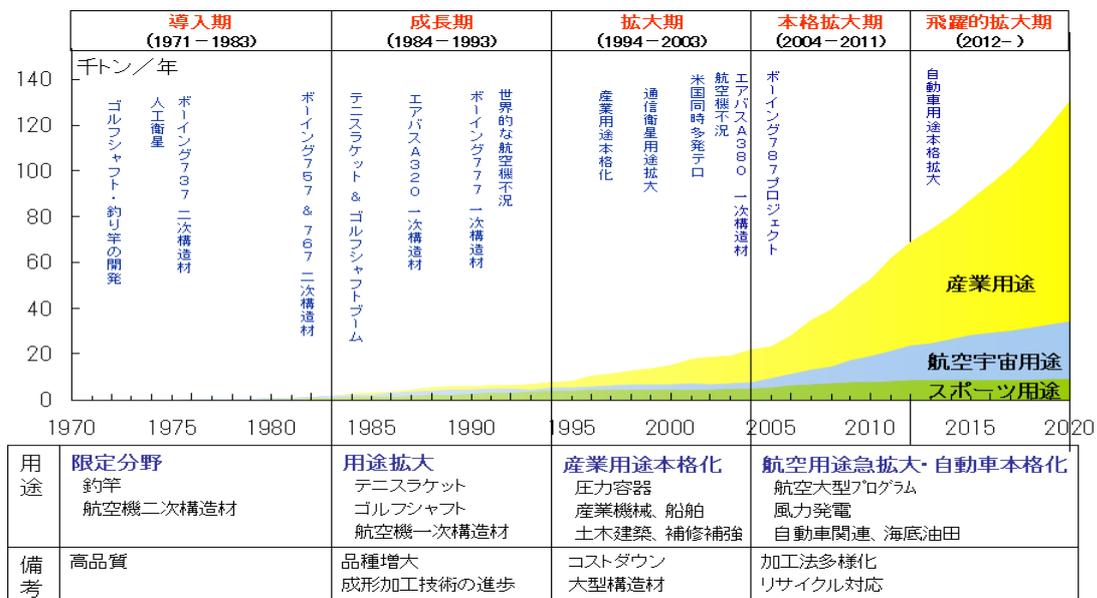


図 2.1.1.2 炭素繊維の世界市場動向

2. 1. 2 炭素繊維強化複合材料(CFRP)とは

炭素繊維強化樹脂複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP) とは、このような炭素繊維にエポキシやフェノールなどの熱硬化性樹脂や、ABSやPC、ナイロンなどの熱可塑性樹脂を様々な方法で含浸した後、この樹脂を硬化もしくは固化した材料であり、炭素繊維の持つ軽量、高強度・高剛性といった特徴に加え、樹脂材料との組合せによりさらに高い耐久性、耐薬・環境性や高疲労特性、高振動特性といった性能を合わせ持った材料である。また樹脂の中にどんな物性の繊維をどのような形態（連続繊維、短繊維、織物など）で、どの方向にどれだけの割合で配置、積層させるかによって材料全体の強度や弾性率などの特性をコントロールすることができ、これにプラスチック材料の成形上の最大の特徴である部分的、局所的な材料肉厚や形状の変更を組み合わせることにより、目的に応じた構造がより軽量、効率的に実現できる最適設計が可能なテーラーメイドな材料と言え、今後様々な産業分野において採用拡大が見込まれる次世代エンジニアリング材料である（図 2.1.2.1、図 2.1.2.2）。同様な材料にガラス繊維で強化した複合材料（GFRP）があるが、CFRPはGFRPに比較しても比強度、比弾性率の点で優れた材料である。CFRPと各種材料の特性値比較を表 2.1.2.1 に示す。

<CFRPの材料構成・組合せ>

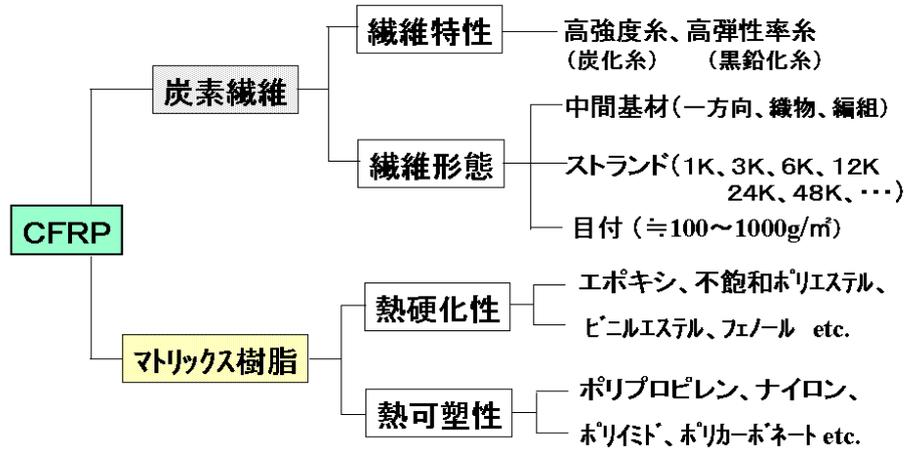


図 2.1.2.1 CFRP の材料構成 (例)

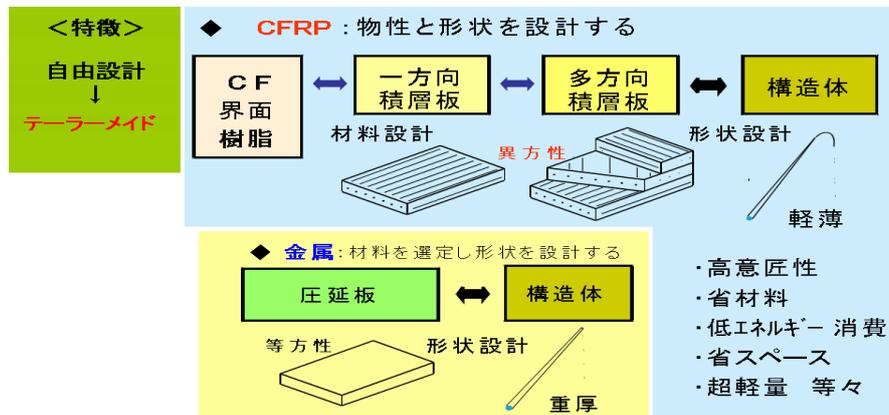


図 2.1.2.2 CFRP の材料設計

表 2.1.2.1 CFRP と他材料の特性比較

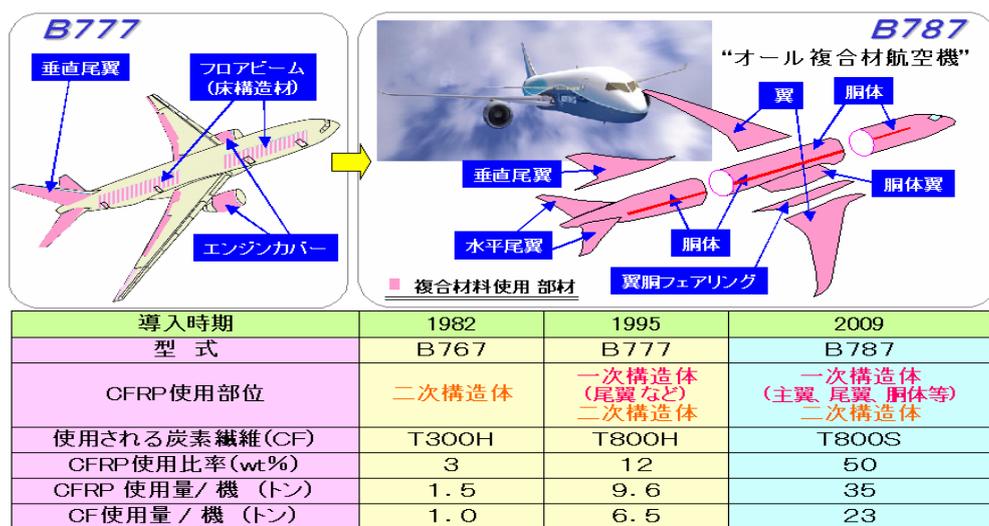
材 料	CFRP*	GFRP	アルミ合金	チタン合金	スチール
(比重)	(1.6)	(2.2)	(2.7)	(4.5)	(7.9)
比強度 (MPa/g/cm ³)	◎ (300)	○ (180)	△ (100)	△ (100)	△ (60)
比弾性率 (GPa/g/cm ³)	◎ (40)	△ (10)	○ (26)	○ (25)	○ (26)
疲労特性	◎	○	△	×	×
耐食性	◎	○	○~△	◎	△~×
接合	○~△	△	◎	◎	◎
耐熱性 (°C)	○~△ (80~150)	○~△ (80~150)	◎ (300)	◎ (600)	◎ (800)
電磁波遮蔽性	○	×	◎	◎	◎
寸法安定性 (線膨張係数 /°C)	◎ (1×10 ⁻⁶)	×	×	△ (8×10 ⁻⁶)	△ (13×10 ⁻⁶)
耐衝撃性	△	○	○	○	△

*: 炭素繊維織物(クロス)/エポキシ樹脂使用、繊維体積含有量60%時

2. 1. 3 CFRPの用途展開

CFRPは事業創生期より、その非常に高い軽量化ポテンシャルから重量の軽減が燃費や安全性などの性能向上に直結する航空・宇宙分野と、軽量で高い剛性が求められるスポーツ用品分野などで採用されてきた。スポーツ用途の代表例としては釣り竿やゴルフクラブ（シャフト部分）、テニスラケットなどが上げられるが、いずれも軽量性（スピード向上）とねじりや曲げ剛性（反発力）の両立がポイントであり、さらにこれらに加えてCFRPの持つ振動減衰特性による制振効果も採用理由のひとつである。

また、宇宙分野では人工衛星の構造物などで採用されているが、これは打ち上げ時の重量軽減とこれに伴う運搬能力（ペイロード）の向上とともに、炭素繊維の熱的安定性／線膨張係数が低いことを利用して日向と日陰で大きな温度差がある宇宙空間において寸法変化がほとんどない構造が実現できることも大きな理由である。またスペースシャトルなどではその高い耐熱性を生かし大気圏内へ再突入用の耐熱パネルにも使用されている（C/Cコンポジット）。一方で民間航空機分野では1980年初頭からエルロンやラダーといった二次構造部材での採用がスタートしている。その後、特にCAI（Compression After Impact）などに代表される耐衝撃荷重に対する材料改善が進んだことや、成形・加工方法などの発達により材料信頼性が向上したことによって、現在では主翼や尾翼、胴体など一次構造材部材にまで適用範囲が広がっている。ボーイングやエアバスの最新鋭機では機体重量の50wt%以上となる1機あたり35トンものCFRP材料が使われており、従来のアルミ合金を主体とした機体に対して20%以上の燃費向上を達成している（図2.1.3.1）。



B787の軽量化効果(ボーイング社発表値): 燃費20%向上、整備費30%低減

図 2.1.3.1 航空機での適用拡大

自動車分野でのCFRPの採用については、まずは極めて高い機械物性と軽量性を同時に要求されるフォーミュラーワン（F1）やWRCといったレーシングカーのボディーやサスペンション、外装部品などからスタートした。これらの車両では軽量化の他、強度、剛性の極めて高いCFRP製モノコック（応力外皮）構造を採用しており、横転や衝突時にも簡単に潰れないコックピット＝サバイバルゾーンが実現し、事故時のドライバーの致死傷率を低く抑えられ安全性が向上するといったメリットもある。

一般の乗用車でのCFRPの採用は、まだ一部の高級車やスポーツカーなどに限られてはいるが、航空機やF1での採用により材料認知度や信頼性が向上したことや、さらにはCO₂排出量削減につながる燃費向上対策の切り札として車体の軽量化ニーズが高まってきたことにより徐々に増え始めている。特に米国のCAFE（Corporate Average Fuel Efficiency）規制は、カーメーカ各社に対して自社で販売している全てのモデルの基準燃費（＝CO₂排出量）をその販売台数で加重平均して計算した企業平均燃費をある一定以下にするという内容であり、カーメーカは全ての車両を対象に燃費改善対策を行う必要に迫られているが、将来的にはエンジンの改良やEV化だけでは到底達成し得ないレベルの規制値が課せられる可能性があり、車体構造や材料の見直しによる軽量化が必須要件になってきている。このようなことからカーメーカ各社は航空機に使用されている物と同じ熱硬化性樹脂CFRP材料をボンネットフードやルーフ、リアスポイラーなどの外装部品や準構造部品のほか、プロペラシャフトやシャシフレームなど重要保安部品や構造部品にまで採用を拡大しており、さらに一部車種ではフロントエンドモジュールなど準構造部品で炭素繊維とポリプロピレン樹脂を組み合わせた射出成形材料を採用するなど成形性（タクトタイム短縮）やリサイクルの点で有利な熱可塑性樹脂を用いたCFRPを利用した事例も出はじめている（図2.1.3.2）。

■ 自動車分野でのCFRP採用例



図 2.1.3.2 自動車分野での採用例

この他CFRP材料は環境対策の観点から様々に技術開発が進んでいるエネルギー関連用途にも応用範囲が広がっており、例えばより深い海底から油田を汲み上げるため長尺化が進む油田掘削用のパイプ部材への適用や、風力を効率よくエネルギー変換するためより大型化している発電用風車(ブレード)、効率よくエネルギーを貯蓄するため軽量化が必要な発電用フライホイールや原子力発電用ウラン濃縮回転胴、さらには炭素繊維の多孔質性を応用した燃料電池用ガス拡散層や、軽量高強度を利用したCNG/CHGタンク(圧力容器)の補強用途にも適用されている。また一般産業用でも比剛性の高さが高制振特性を生かすことによる大型液晶パネル搬送用のロボットアーム部品や、炭素繊維のX線透過性を応用したX線CT天板などの医療用機器、電気伝導性による電磁波シールド特性を応用したパソコン用筐体やプロジェクターなどのエレクトロニクス機器、同じく通電することによるジュール発熱を応用した床暖房用の発熱体など住宅関連用途でも採用されている。

2. 1. 4 CFRPと環境対策(CO₂排出量とリサイクル)

上記の通り炭素繊維はPANやピッチ繊維を非常に高い温度で炭化して製造されるため、材料製造時に消費されるエネルギーが高く排出されるCO₂量も非常に多く環境負荷の高い材料との指摘がある。実際に平均的な乗用車(ガソリンエンジン、FF車、重量1.38トン、平均燃費9.8km/l)をモデルに従来の車両とCFRPを用いて軽量化した車両とで10年間、約10万kmの走行を行った場合にライフサイクルトータルで排出されるCO₂量を試算してみた。

まず上記モデル車両で材料製造から最終廃棄されるまでの各段階でどの程度のCO₂を排出するか計算すると、材料製造工程で12%、車両組立工程4%、走行83%、廃棄1%となることが分かる。つまりCO₂は圧倒的に走行時に排出される量が多く、車両を軽量化すれば燃費が向上し排出されるCO₂も低減されることが分かる(図2.1.4.1)。

次にCFRP化によりどの程度の軽量化の可能であるかを試算した結果を図2.1.4.2に示す。既に市場実績のあるボンネットやプロペラシャフトなどの他、ドアモジュールやフロア関連部品など全体重量の17%をCFRP化することにより車体重量の約30%に相当する400kgの軽量化が図られ、この結果燃費も22%程度改善される可能性がある。このような計算を基にCFRP車両と従来車両で10万kmの走行後に排出されるCO₂を比較すると、CFRP車両は走行時のCO₂排出削減効果が製造段階での排出量の増分を大きく上回るため、ライフサイクルトータルでは従来車両対比約5トンもの削減ができる計算になる。仮に日本国

内の乗用車、約4200万台全てが30%軽量化されるとすると、1年間で国内総排出量の1.5%に相当する約2100万トンのCO₂が削減される計算になる。(図2.1.4.3)。

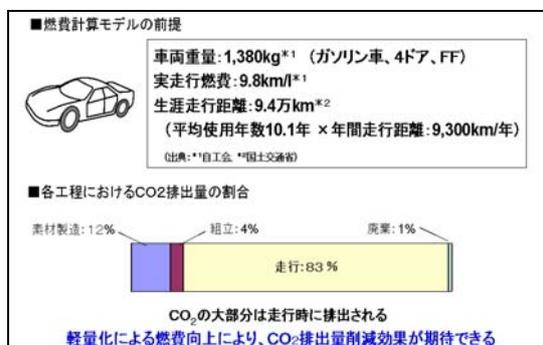


図 2.1.4.1 CO₂ 排出割合

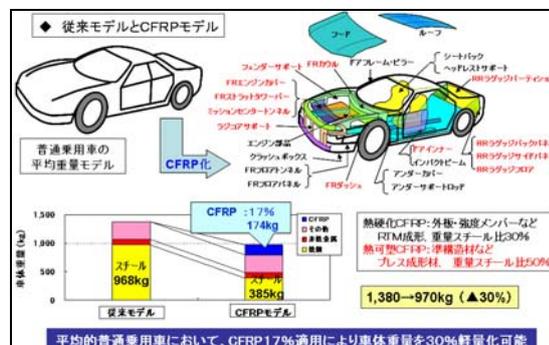


図 2.1.4.2 自動車の軽量化

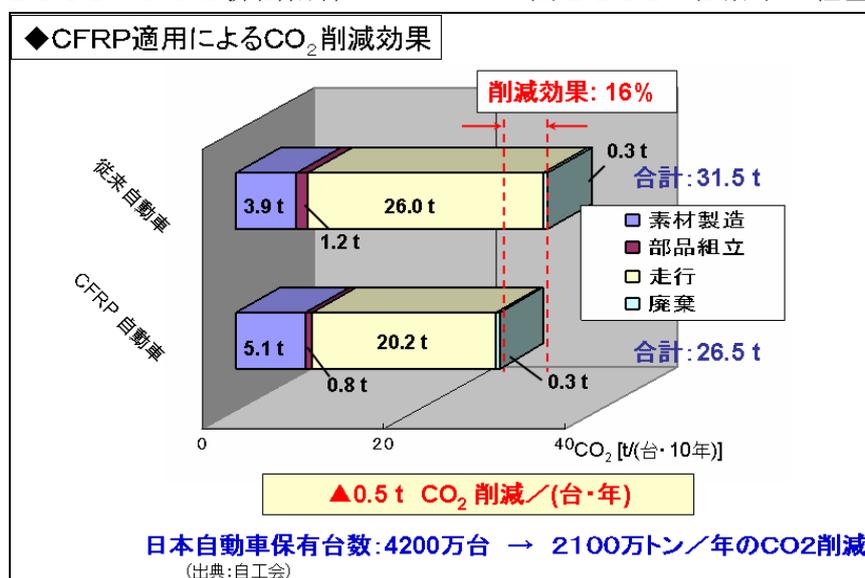


図 2.1.4.3 車両のライフサイクルでのCO₂ 排出量

一方、CFRPのリサイクル方法については、炭素繊維メーカーなどで構成される炭素繊維協会が中心となって技術開発が進められている。CFRPのマテリアルリサイクルとしては大まかに3つの方法に大別され、①CFRP成形品を大型のクラッシャーなどで切断、細かく粉砕してそのままコンクリートや非強化の熱可塑性樹脂の補強剤として用いる方法、②同じく粉砕して加熱炉等で樹脂を熱分解して炭素繊維のみを取り出し、これを再生炭素繊維としてとして再利用する方法(この場合、熱分解の課程で得られる熱エネルギーの利用も可能)、③CFRPの樹脂部分を科学的に分解して炭素繊維をそのまま取り出す方法などがある。それぞれ様々な用途での応用が可能で、既に実証試験プラントなども立ち上がっており、ここで得られたリサイクル品は一部自動車部品などとしての性能評価も完了している。また、この

ように熱分解して得られたリサイクル炭素繊維は原料から新生する炭素繊維と比較した場合、製造エネルギーが20分の1で済むといった試算もあり、将来的にCFRPの使用量が増えて各種インフラ整備が進めば、炭素繊維リサイクル事業の成立性は十分にあると考えられる（図2.1.4.4）

このようにCFRPはLCAやリサイクルといった観点からも、特に自動車分野では利用価値の高い材料と言え、国内外の関連企業が注目している。

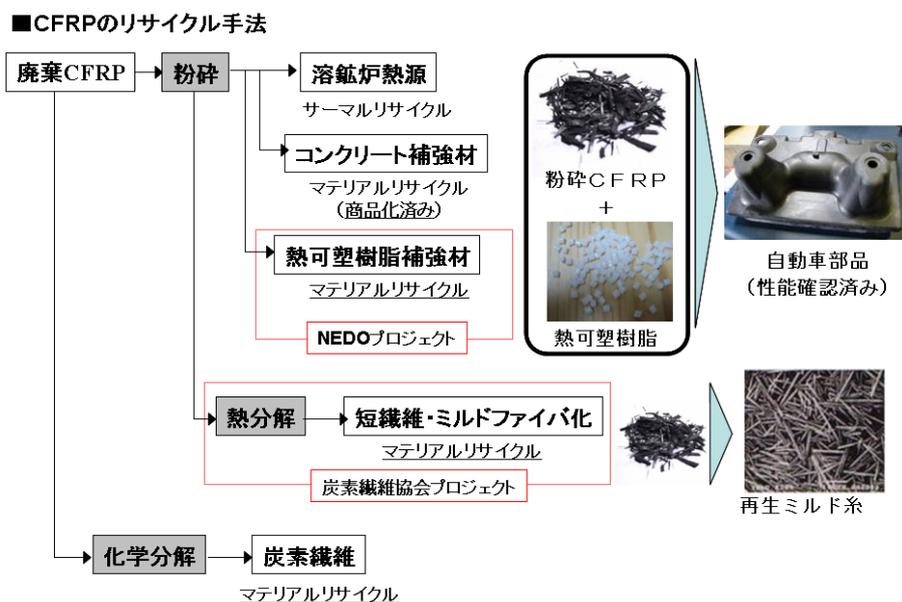


図 2.1.4.4 CFRPのリサイクル

2. 2 CFRP拡大のための課題と対策

2. 2. 1 CFRP拡大のための課題

上記の通り特に軽量化、環境の点で極めて高い性能を発揮するCFRPは、今後あらゆる分野で採用が大きく広がる可能性がある。ただし、そのためには設計手法の確立（一般化）や、長期耐久性やバラツキ低減など材料信頼性のさらなる向上、表面品位や内部欠陥（ボイド）の改善などいくつかの課題があるが、中でも最大の課題はコスト低減にあると考えられる。炭素繊維そのものの価格は需要量の増加に伴う、いわゆる規模拡大効果によって低下傾向にあるものの、製造段階で高いエネルギーを用いること、原料が石油由来成分であることなどから既存のスチールやアルミなどといった材料に比べればまだまだ高価な材料である。また、従来の航空機や自動車では信頼性や炭素繊維との接着性、相性の観点からエポキシやフェノールなど熱硬化性樹脂が中心として用いられてきたが、これら熱硬化樹脂は総じて硬化に時間がかかるため成形サイクル時間（タクトタイム）、金型占有時間が長く、成形費用はもちろん、金型面数を増やす必要があり設備投資費用も高価になることが多い。また一方で、炭素繊維自体は非常に硬い材料であることから、成形後の切断、トリミング、穴空けなどといった後加工についても、自動車や航空機部品の要求性能に見合うような品位で行うためには、ダイヤモンドツールなど特殊な工具を用い、なおかつ頻繁に交換やメンテナンスを行いながら低速で行う必要があり、これもCFRP部品のコストを押し上げる大きな要因となっている。

これら課題のうち成形方法については、NEDOプロジェクト「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」などにみられるような成形時間の短縮（ハイサイクル）化や、一度に成形する部品数を数多く取り込むための大型・一体成形などに関する技術開発が進められている。また、熱硬化性樹脂に比較して射出成形やプレス成形などにより短時間で賦形が可能な熱可塑性樹脂によるCFRPも開発が進んでおり、前出の自動車フロントエンドモジュール部品や、ノート型パソコンの筐体（ケース）などといった量産実績も出てきている。ただし、後加工に関しては、ウォータージェット加工など新しい加工方法の適用も進んではいるが、十分な加工速度が得られない、加工形状に制限があるなどといった問題がある。さらに自動車などでCFRPの適用部位や範囲を広げるためには金属など異種材料との接合が必須となるが、現段階で実用化されている接合技術はリベットやボルトといった機械締結や、構造用接着剤を用いた接着接合、もしくはこれらの併用が主流であり、一部熱可塑性樹脂製CFRPでは溶着接合の研究も進んでいるが、いずれの場合も接合にかかる費用、加工速度、信頼性の点で量産方法としては十分ではなく、高速、高品位接合方法の開発が必須になってきている。（図 2.2.1.1）

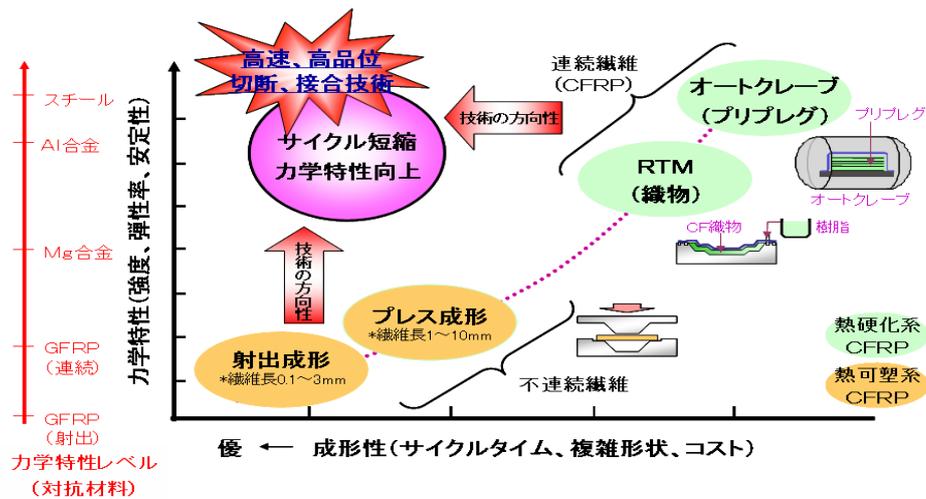


図 2.2.1.1 CFRP 技術課題マップ

2. 2. 2 CFRP 拡大のための対策

このように現在の環境問題、エネルギー問題を解決する手段として炭素繊維、CFRP はリサイクル性も含めて極めて有効な材料であるが、今後さらに採用を加速させるためには、材料自身の信頼性や特性の向上や、成形サイクルの短縮の他、高品位を確保しながら高速で切断、接合できる後加工技術の開発が極めて重要になってきている。特に熱可塑性樹脂製 CFRP は日本の基幹産業である自動車分野で軽量化対策の切り札としても期待されていることから、これら後加工技術の開発は急務であり、特にレーザーを用いた高速溶着接合や切断加工が可能になれば応用範囲は大幅に広がると考える (表 2.2.2.1)。

表 2.2.2.1 CFRP 材料拡大のための対応策

カテゴリー	内容・手段
設計	材料設計、構造設計手法の確立、一般化(CAE 応用)
材料・素材	材料信頼性の向上(バラツキ低減、長期耐久性能向上) 材料コストダウン(素材改良・改質、規模拡大など)
成形加工	ハイサイクル化、熱硬化樹脂によるタクトタイム短縮 高速・高品位切断、トリミング方法の確立 高速・高品強度接合方法、異種材接合方法の確立
環境・その他	リサイクルインフラの整備

レーザー応用

2.3 本事業における材料の選定

本CFRP加工技術の事前研究事業では、PAN系炭素繊維ならびにピッチ系炭素繊維から構成される種々のCFRP材料の中から、特に今後自動車分野や一般産業分野での適用が進むと思われる材料を中心に選定し、既存のレーザー装置を用いた切断加工を実施した。さらに、既存のNCマシニングやウォータージェットなどを用いた加工方法と、加工速度と加工後の品位の観点から比較検討を行った。検討結果の詳細は第3章に記載している。今回選定した材料とその主な特徴・用途例を表2.3.1に示す。

表 2.3.1 本事業CFRP材料の特徴と応用例

水準No.	材料構成				物性		特徴・用途例
	炭素繊維	樹脂	繊維形態	繊維含有量	強度	弾性率	
1	PAN系	エポキシ	織物	50%	1200 MPa	60 GPa	高品位・高物性。構造体、外板部品など。
2	PAN系	ナイロン6	一方向	50%	2400 MPa	120 GPa	高物性(異方性)、易成形性。構造材補強など。
3	PAN系	PPS	一方向	50%	2400 MPa	120 GPa	高物性(異方性)、高耐熱性。電装品補強材など。
4	PAN系	ナイロン6	ランダム	25%	350 MPa	17 GPa	高賦形・易成形性。構造部品など。
5	PAN系	ナイロン6	長繊維ベレット	20%	280 MPa	15 GPa	易成形性、耐熱性。準構造部品など。
6	PAN系	ポリプロピレン	長繊維ベレット	20%	130 MPa	14 GPa	易成形性、低比重。機能部品など。
7	PAN系	ABS	長繊維ベレット	20%	150 MPa	14 GPa	易成形性、高品位。外装部品など。
8	PAN系	PPS	短繊維ベレット	20%	200 MPa	15 GPa	易成形性、高耐熱性。電装小型部品など。
9	PAN系	ナイロン6	短繊維ベレット	20%	170 MPa	14 GPa	易成形性、耐熱性。機能小型部品など。
10	ガラス繊維	ナイロン6	短繊維ベレット	20%	180 MPa	8 GPa	比較材料
MP27	PAN/ピッチ併用	エポキシ	織物				
ME15	ピッチ系	ポリカーボネイト	短繊維ベレット	15%			
ME30	ピッチ系	ポリカーボネイト	短繊維ベレット	30%			

第3章 実証試験の内容と結果

3.1 高出力レーザー切断・接合（大阪大学）

3.1.1 はじめに

航空機等に利用されている軽量・高強度材であるCFRPの切断は、通常、機械加工やウォータージェットによって行われているが、工具の摩耗や吸水性による強度低下、加工に時間がかかるなどの課題がある。また、CFRP同士の接合は、接着または機械的結合とこれらの組合せで行われる。一方、レーザーには、高出力の連続発振のレーザー、短波長化したパルスレーザー、極短時間照射のフェムト秒レーザー、ピコ秒レーザーなどがある。特に、高出力レーザーによる切断・穴あけは、高パワー密度、非接触、高速生産性等の利点を有しており、CFRPに対して高速・高生産性の加工が期待できる。そこで、大阪大学接合科学研究所としては、連続発振の高出力・高輝度レーザーを用いて、材料特性の異なる種々のCFRPに対してレーザー切断を行った。なお、レーザー切断は、10 kWのパワーで1回で1枚板の切断の可能性について検討し、切断の評価を行った。また、高品質切断面を得るため、超高速・低入熱の条件で数10回照射して切断する方法を試みた。レーザー接合については、今後の展開を考慮し、金属との直接異材接合を試みた。

3.1.2 実験装置および実験方法

レーザー切断実験装置と切断状況の概略を図3.1に示す。本研究で使用したレーザー発振器は、最大出力10 kWのディスクレーザーで、コア径 $\phi 300 \mu\text{m}$ のファイバーにより加工ヘッドへ伝送され、焦点距離250 mmの集光レンズにより集光される。供試材には提供頂いた12種類のCFRPを使用した。使用した供試材の一例を表3.1.1に示す。

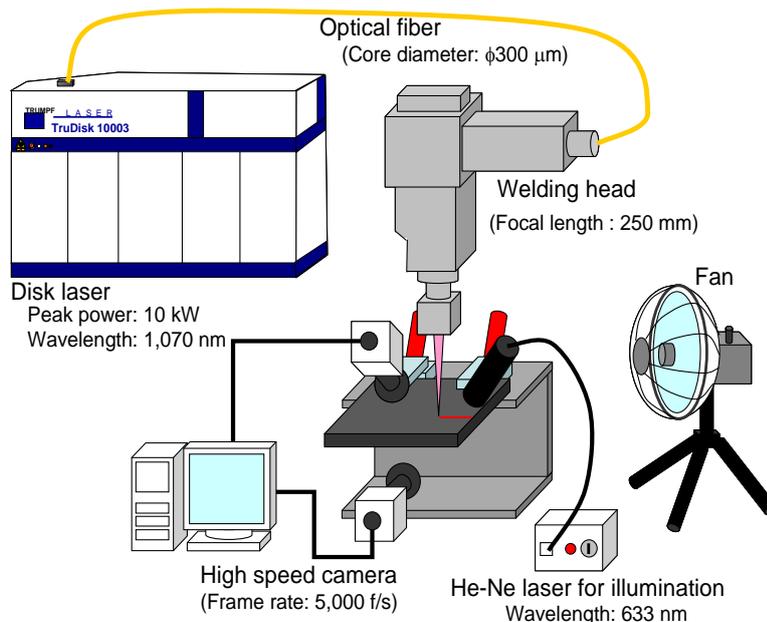


図 3.1.1 レーザー切断実験状況の模式図

表 3.1.1 使用した PAN 系 C F P R の一例

No.	繊維形態	Vf	樹脂	成形方法	厚み(mm)
1	クロス	50	エポキシ	RTM	1.3
2	一方向	50	PA6	プレス	2
3	一方向	50	PPS	プレス	3
4	ランダム	25	PA6	プレス	2
5	長繊維ペレット	20	PA6	射出	3
9	短繊維ペレット	20	PA6	射出	3

実験は、各供試材をステージに固定し、加工ヘッドを垂直または一部傾けた状態でレーザーパワー10 kW、切断速度 15 m/min または 18 m/min、試料表面を焦点位置としてレーザー切断を行った。ここで、レーザー切断時に発生するレーザー誘起ブルームとそれに伴った加熱空気がレーザーに干渉するのを防ぐため、切断方向後方よりファンを使用した。また、レーザー切断時のレーザー照射部およびレーザー誘起ブルームの挙動を観察するため、2 基の高速カメラを用いてレーザー照射部および試料側面をそれぞれ 5, 000 Frames/s で観察した。なお、レーザー照射部の観察の際には照明光源として He-Ne レーザー（最大出力 P_{max} : 50 mW、波長 λ : 633 nm）を使用した。

また、高品質切断部を作製するため、ディスクレーザーのパワーを 2 kW にし、切断速度を 75 m/min に速くしてレーザー照射を数回繰返す切断実験を行った。さらに、レーザーパワー1 kW をコア径 ϕ 50 μ m のファイバーによりスキャナー（P F O 3 3）に伝送し、焦点距離 345 mm の集光レンズによりビーム径 115 μ m に集光し、切断速度 5 m/s（300 m/min）で数 1 0 回照射を繰り返して切断実験を行った。

金属と C F R P とのレーザー直接接合実験も行った。その方法は、図 3.1.2 に示すように、板状の C F R P の上に SUS304 板を重ね、SUS304 表面が焦点はずし位置 fd 、+ 5 ~ 1 5 m の位置（プラス方向：板表面上方に焦点位置がある）となるように固定し、金属側からレーザーパワー2、3 または 4 kW で照射し、溶接速度を 5 mm/s ~ 15 mm/s で、金属と C F R P とのレーザー直接接合を行った。シールドガスはステンレス鋼熔融池後方から 30 度の角度で設置された口径 ϕ 16 mm のサイドノズルから Ar ガスを流速 30 L/min で供給している。さらに、得られたレーザー直接接合継手を 0.03 mm/s 引張速度で試験を行い、接合強度を評価した。

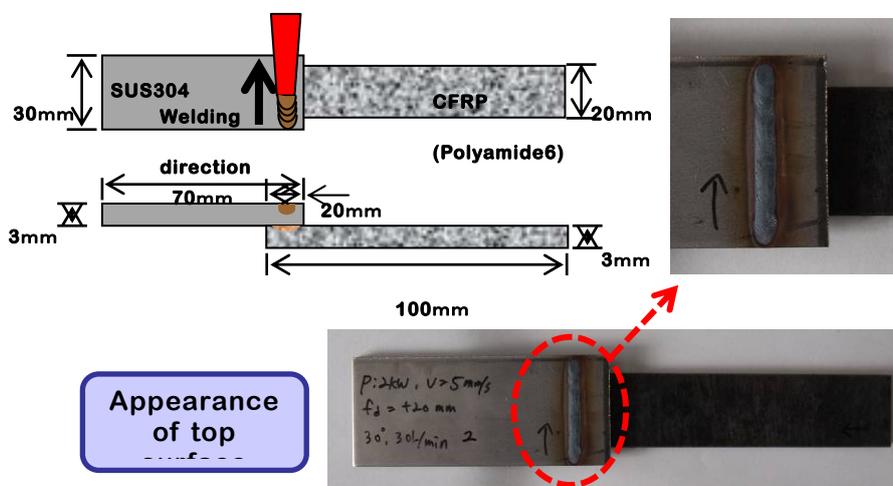


図 3.1.2 ステンレス鋼 SUS 304 と C F R P （試料 No. 5） とのレーザー接合状況の模式図

3. 1. 3 連続高パワーレーザーによる切断結果

レーザーパワー10 kW、切断速度 15 m/min、試料表面を焦点位置として各試料に対してレーザー切断を行った。切断部の外観および貫通切断の可否を図 3.1.2 に示す。耐熱性の高い PPS 母材の No. 3、レーザー透過性のある C F P R の No. 10 を除く全ての材料において、1 パスでレーザー切断を行うことが可能であることがわかった。一方、各試料において切断部周辺に熱影響部が広がっており、特に No. 5 および No. 9 では試料表面に熱影響部が大きく発生し、また、各試料の切断面はレーザーの入熱およびレーザー誘起プルームによって溶融していた。

Disk laser: 10 kW $v = 15\text{m/min}$ Fan_on

		Appearances	Closeup picture	Cutting
No. 1	Top			○
	Bottom			
No. 5	Top			○
	Bottom			
No. 6	Top			○
	Bottom			
No. 7	Top			○
	Bottom			
No. 8	Top			×
	Bottom			
No. 9	Top			○
	Bottom			
No. 10	Top			×
	Bottom			

図 3.1.3 PAN系CFRPのレーザー切断部の表面観察結果と貫通切断の可否

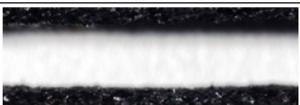
		Appearances	Close-up picture	Cutting
No. 11 ME 15	Top			○
	Bottom			
No. 12 ME 30	Top			○
	Bottom			
No. 13 MP 27	Top			○
	Bottom			

図 3.1.4 ピッチ系CFRPのレーザー切断部の表面観察結果と貫通切断の可否

10 kW 連続レーザーによる切断結果を表 3.1.2 にまとめて示す。GFRP、クロスおよびPPS基で切断が困難であることがわかる。16 kW レーザーによる切断でも同様の傾向が得られた。以上の結果より、(ピッチ系炭素繊維、パン系PA基短繊維カーボン、PA基長繊維カーボン、PPS基カーボン、エポキシクロス材、GFRPの順に切断が困難であることが確認された。

表 3.1.2 10 kW 連続レーザーによる切断結果 (10 kW、15 m/min、FAN-ON)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
切断可否	○	○	X	○	○	○	○	X	○	X	○	○	○

No. 5 の CFRP に対して、レーザービームの照射角度を変化させてレーザー切断実験を行った。その結果を図 3. 1. 5 に示す。レーザー貫通切断はいずれも可能であり、切断部の品質に及ぼす照射角度の影響は少ないことが判明した。

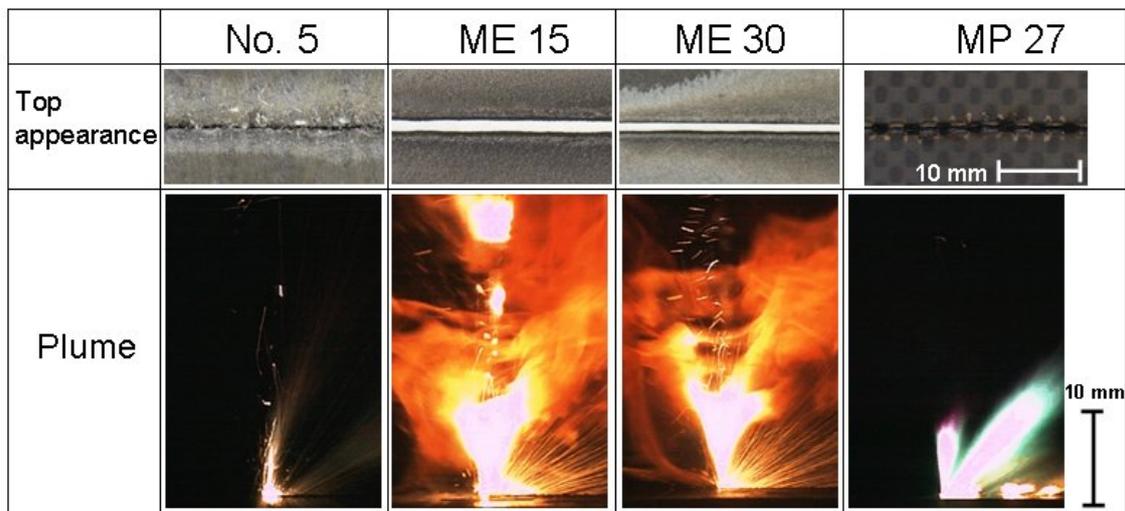
No. 5; Disk laser: 10 kW; $v = 15 \text{ m/min}$; $\alpha = -20^\circ \sim 0^\circ$; Fan_on

		Appearances	Closeup picture	Cutting
-20°	Top			○
	Bottom			
-10°	Top			○
	Bottom			
0°	Top			○
	Bottom			
+10°	Top			○
	Bottom			
+20°	Top			○
	Bottom			

図 3. 1. 5 レーザー切断性に及ぼすレーザービーム照射角度の影響

3. 1. 4 レーザー照射部およびプルームの観察結果

切断結果と切断現象との関連性を調査するため、切断時のレーザー照射部およびプルームの高速観察を行った。No. 5 およびピッチ系CFRPでの観察結果を図3.1.6に示す。レーザー照射部表面の観察結果から、レーザー照射部は非常に高温になり、蒸発した母材と共に試料内の炭素繊維が飛び出しているのが観察された。また、プルームの観察結果から、試料表裏面にプルームが激しく発生していることも確認された。また、いずれもプルームだけでなくレーザー照射部から後方にかけて主に試料表面で炎が発生し、長時間高温になっていることがわかった。特に、ピッチ系では、プルームの発生が激しいようであり、切断も十分されることがわかった。これらの結果から、レーザーの入熱が大きいと、レーザー照射部の試料が局部的に高温になり、切断面が熔融し、さらに、試料の熱伝導およびプルームによって照射部付近が加熱され、熱影響部が拡大したと考えられる。試料表面の熱影響部が広がったのは、発生したプルームと炎によって試料面が長時間加熱されたためと推察される。なお、熱影響は、表面のみであり、深さ方向への影響は小さい。



Disk laser: 10 kW; $v=15$ m/min; $\alpha=0^\circ$; Fan_on

図 3.1.6 レーザー切断部の表面外観と作製時のレーザー誘起プルームの観察結果

レーザー誘起プルームの生成に及ぼすレーザービーム照射角度の影響について検討した。その結果を図3.1.7に示す。

No. 5; Disk laser: 10 kW; $v = 15 \text{ m/min}$; $\alpha = -20^\circ \sim 20^\circ$; Fan_on

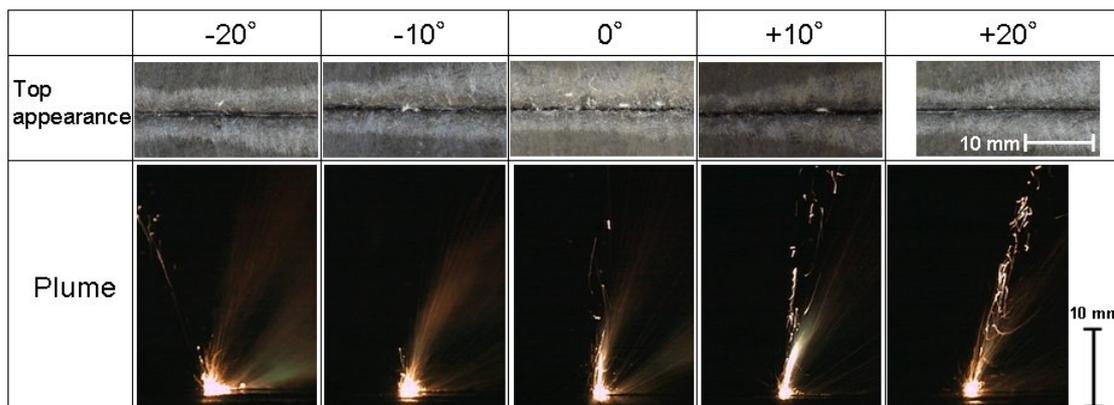


図 3.1.7 レーザー切断品質とレーザー誘起プルームの生成に及ぼす
レーザー照射角度の影響

3. 1. 5 低入熱レーザー切断結果

CFRP 試料へのレーザー入熱を低減させ、良好な切断部を得るため、レーザーパワーを 2 kW、切断速度を 72 m/min とし、熱影響の大きかった No.9 に対して 14 パスの低入熱レーザー切断を行った。その切断結果を図 3.1.8 に示す。No.9 の試料表面の切断幅と熱影響部が、低入熱レーザー切断により非常に狭くなることが確認された。この結果から、1 パス毎の試料への入熱を減少させることにより、切断面の溶融を抑え、切断幅を狭くでき、試料表裏面の熱影響部の小さい切断が可能であり、高品質な切断部を得られることがわかった。

そこで、さらに低入熱 (1 kW、5 m/s) でレーザー切断を試みた。その結果を図 3.1.9 および図 3.1.10 に示す。右側が高倍率であり、下側は走査型顕微鏡写真でさらに高倍率である。連続高速繰り返し照射の場合、1 秒休止してから行う方が良好な切断部が得られることがわかった。休止がない場合、熱が連続的な投入されたためとレーザー誘起プルームが存在するところにレーザー照射されるため、レーザーとプルームおよびその上方の低屈折率領域との相互作用が起こり、熱影響が顕著となったことが考えられる。

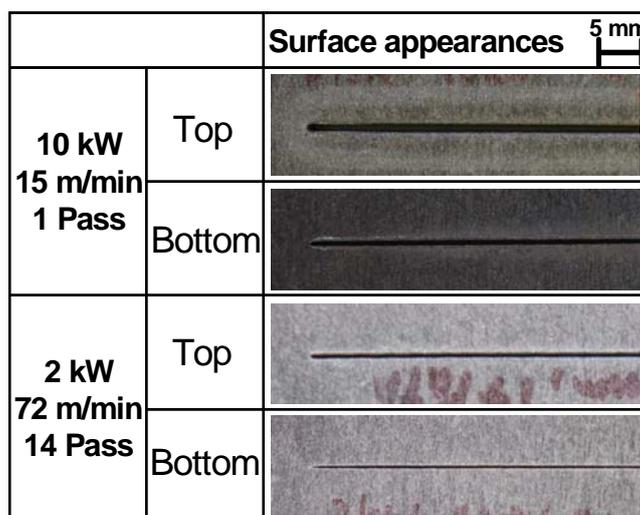
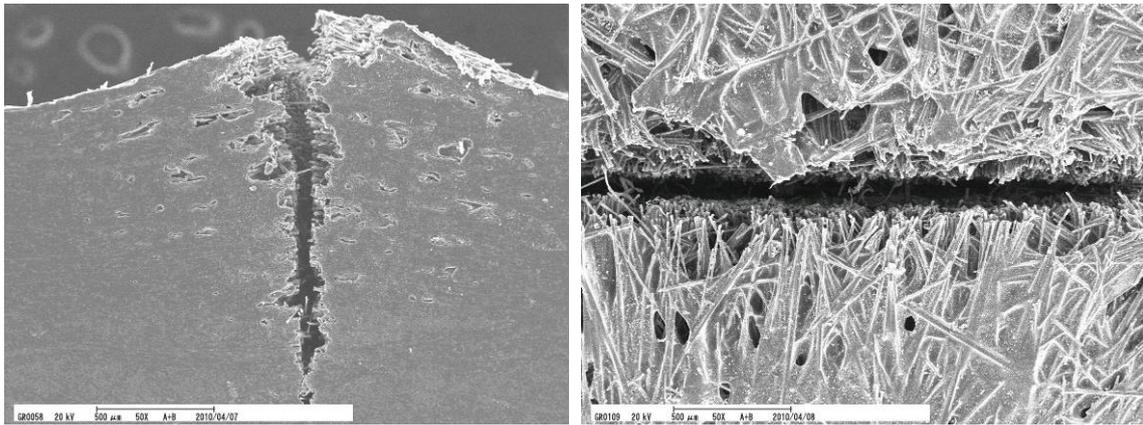
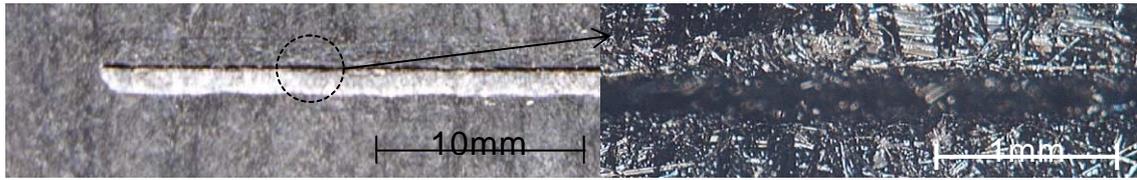
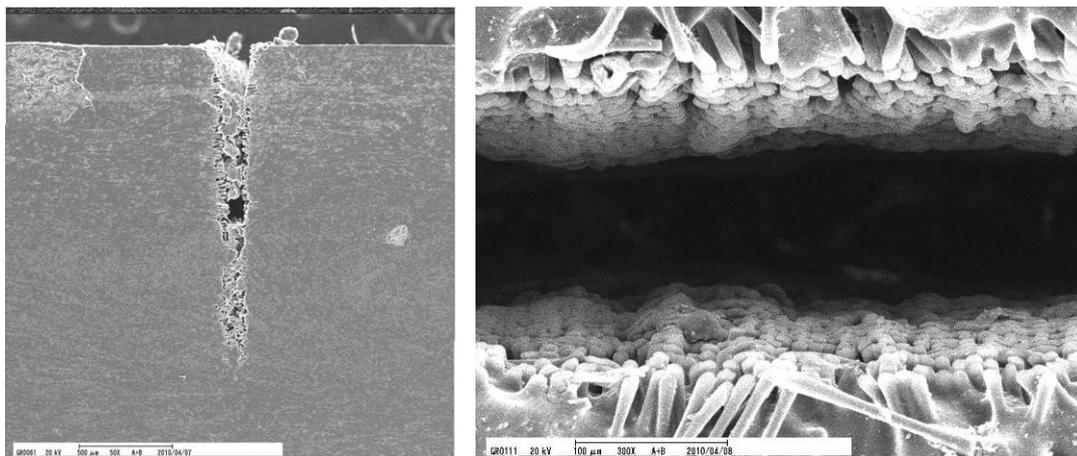
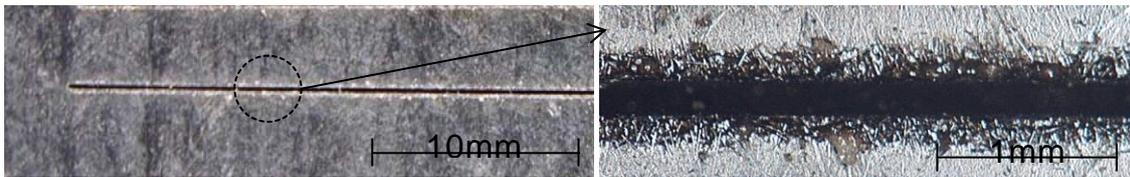


図 3.1.8 試料 No.9 における切断結果の比較



(a) 連続・高速繰返しによるレーザー照射； 上：光学顕微鏡、下：走査型顕微鏡



(b) 1秒休止による高速レーザー切断； 上：光学顕微鏡、下：走査型顕微鏡
 図 3.1.9 No.5 の試料での低入熱 (1 kW、5 m/s) レーザー切断結果におけるレーザー休止の影響

したがって、同一箇所を繰り返し照射する（ファン等でブルーム除去を行っていない）場合、1秒程度休止をすることにした。No.5の試料の場合、60回では部分貫通の切断であったが、80回では、図3.1.10に示すように、完全な貫通切断が可能であることがわかった。また、切断部は走査型電子顕微鏡（SEM）写真も比較的良好であることがわかる。レーザー切断幅は、約0.22mm（上表面）および0.16mm（裏面）であり、かなり狭いことも明らかとなった。

さらに、断面をSEMで高倍率で観察した結果を図3.1.11および図3.1.12に示す。熱影響により若干プラスチック母材が消失していることがわかる。今後、この点の改善を計る必要がある。

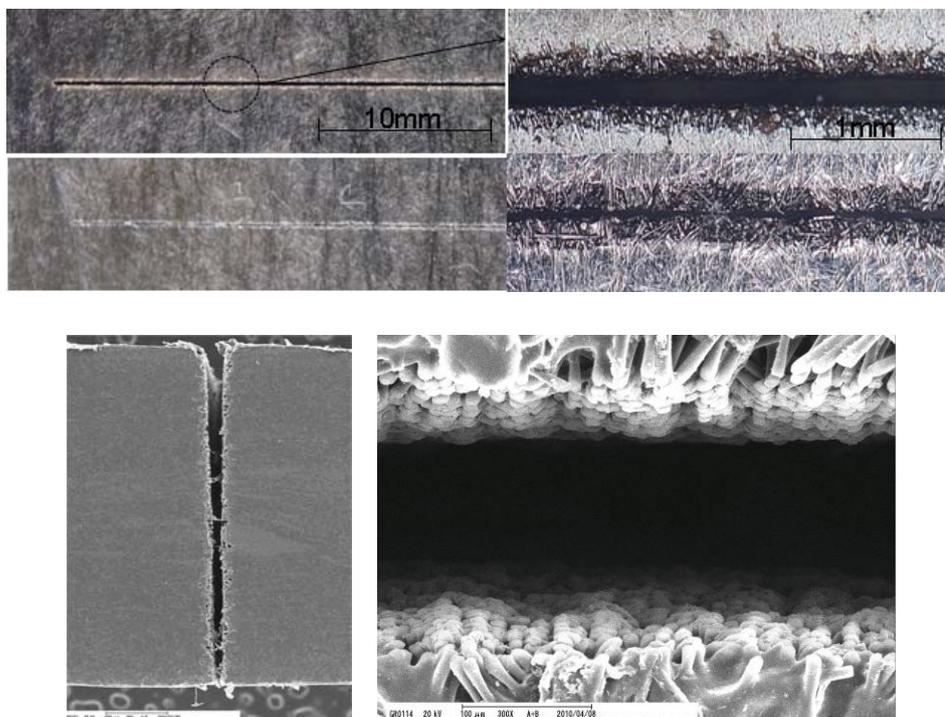


図 3.1.10 No.5 試料のレーザー切断部の観察結果
上：実体および光学顕微鏡写真、下：走査型顕微鏡写真

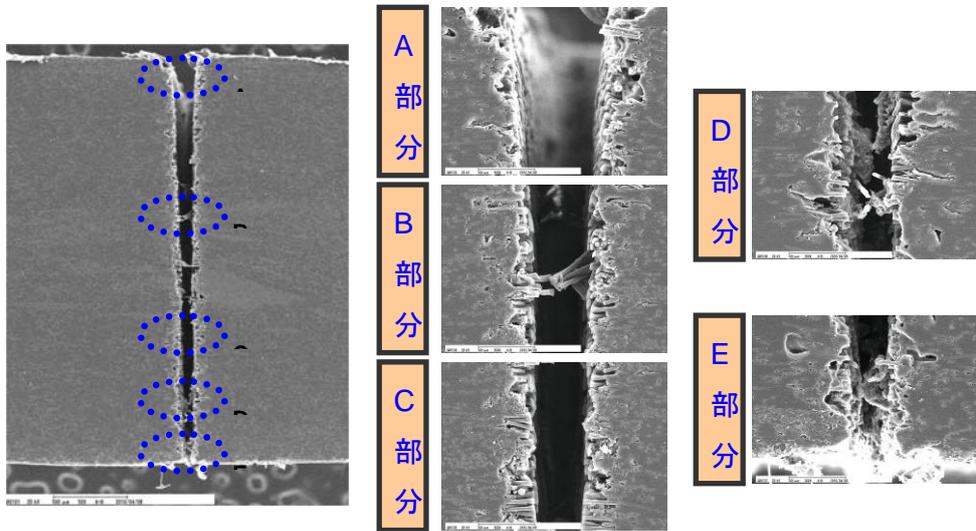


図 3.1.11 No.5 試料（板厚 3 mm）のレーザー切断部の横断面の高倍率観察

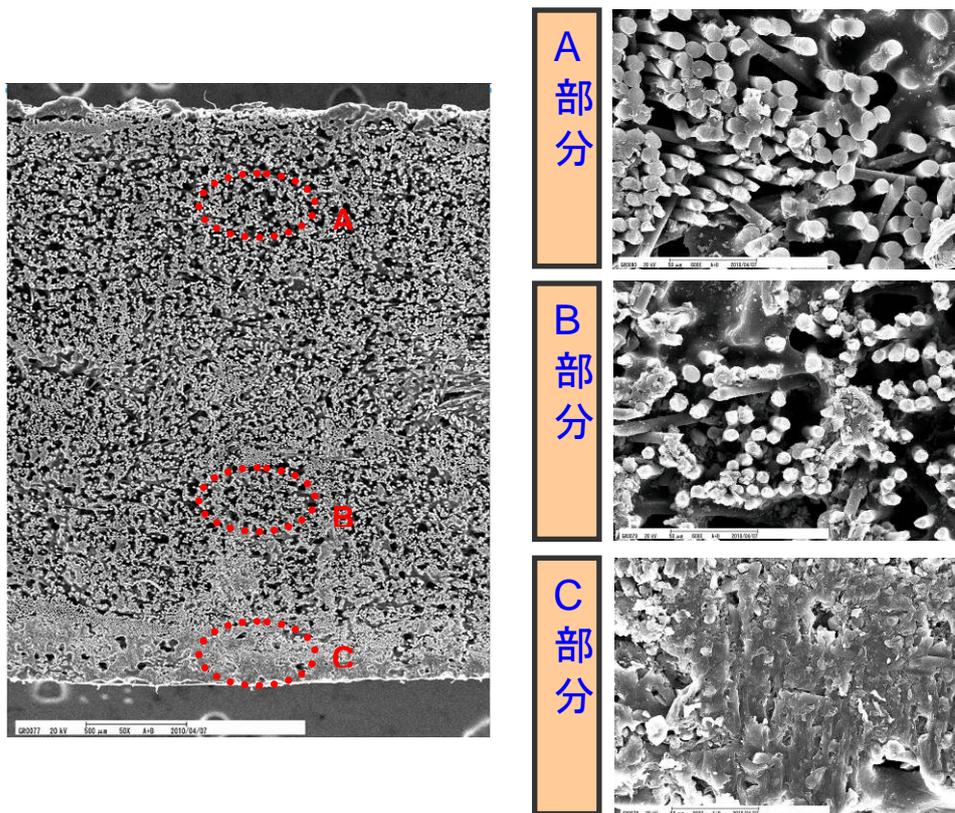
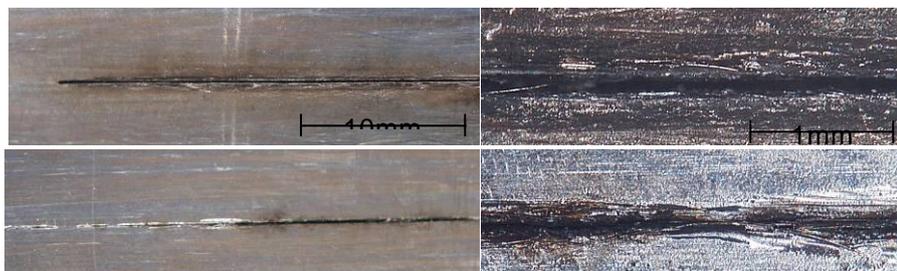
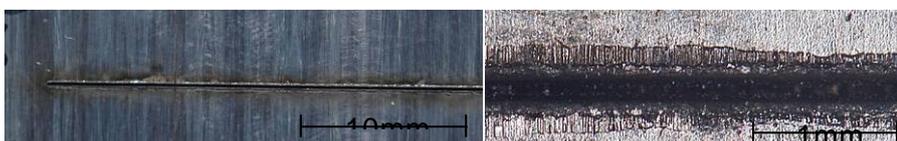


図 3.1.12 No.5 試料のレーザー切断断面の高倍率観察

炭素繊維が一方方向の試料 No.3 に対してレーザー切断を行ったところ、切断特性が炭素繊維の配列により異なり、レーザー切断は、炭素繊維に対して平行の方が容易で、垂直の方が困難であることが判明した。したがって、炭素繊維がクロスの場合、切断が若干困難になるものと考えられる。



(a) 一方向繊維の方向にレーザー切断



(b) 一方向繊維を横断する方向にレーザー切断

図 3.1.13 炭素繊維が一方方向の No.3 試料におけるレーザー切断方向の影響

3. 1. 6 金属とCFRPとのレーザー直接接合

最大出力 10 kW ディスクレーザーを用い、CFRP とステンレス鋼との重ね接合継手を作製して、引張せん断試験で接合強度を評価し、CFRP と金属との直接接合の可能性について検討した。

短および長炭素繊維型のCFRP試料（PA基複合材料）と SUS304 とのレーザー直接接合を実施した結果、接合継手が容易に作製できることがわかった。図 3.1.14 に溶接速度を 5 mm/s ($f_d=+20$ mm) で得られた（長繊維型）CFRP のレーザー直接接合継手の外観写真を示す。レーザー照射側である SUS304 の表面には溶融痕が見られ、CFRP と接する金属表面は溶融していないが変色し、非常に高温にまで加熱されていたと推察される。その結果、SUS 304 と接するCFRP表面が溶融して、溶融物が吹き出していた。なお、CFRP の裏面は、顕著な熱影響部は見られず、母材と同様であった。

次に、接合継手の引張せん断試験を行った。その結果を図 3.1.15 に示す。（長繊維型）CFRP では、板幅 20 mm・板厚 3 mm で、良好な条件では、3000 N を超える強固な接合強度を有する接合継手であることが判明した。破断は、CFRP 内で起

こり、SUS 304 界面にCFRPの付着が認められた。したがって、さらに高強度化は、接合部面積を広げることで達成できることが推察された。

今回、複合材料であるCFRPと金属とのレーザー直接接合が可能であることが判明したことから、今後、CFRPと金属とのレーザー直接接合法の展開が期待される。

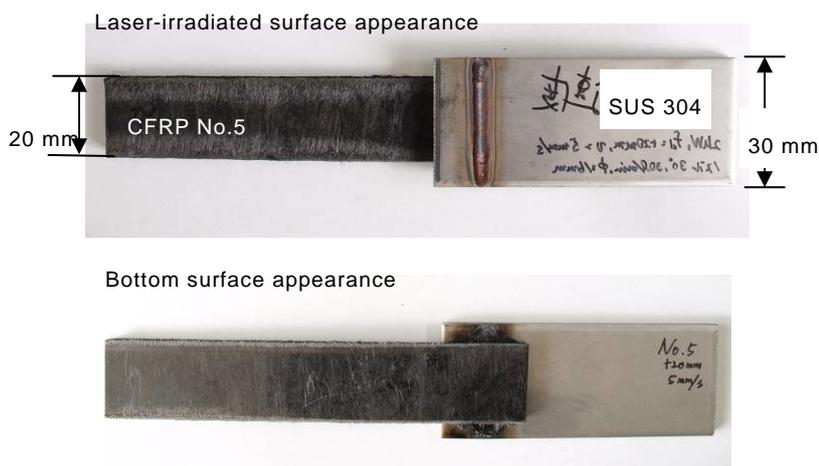


図 3.1.14 SUS304 とCFRPとのレーザー直接接合例

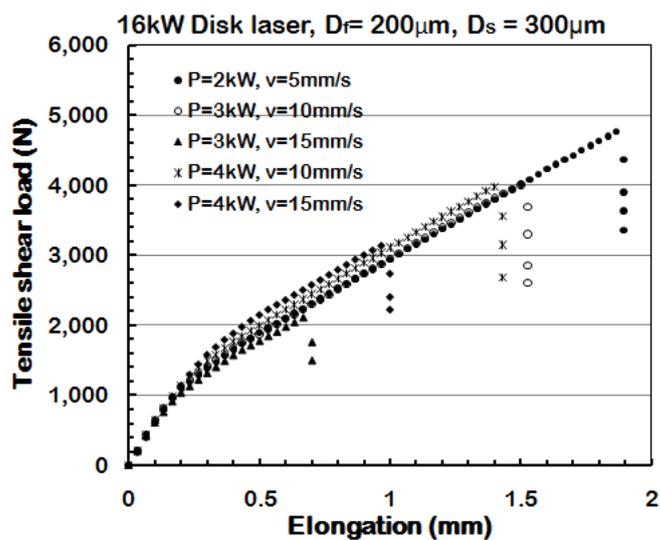


図 3.1.15 SUS 304 とCFRPとのレーザー直接接合継手せん断引張荷重（強度）

3. 1. 7 まとめ

- 1) レーザーパワー10 kW、切断速度 15 m/min では、ほとんどの CFRP に対して、1 パスでレーザー切断が可能であった。しかし、レーザー入熱およびレーザー誘起プルームの発生によって、切断面が溶融し、さらに熱影響部が生成することがわかった。
- 2) レーザーパワー2 kW、切断速度 72 m/min としたレーザー切断では、1 パスの入熱量が低いため、切断面の溶融および熱影響部の拡大を抑えた切断が可能であることがわかった。
- 3) レーザーパワー 1 kW、切断速度 5 m/s の超高速レーザー切断では、パス間で 1 秒休止し、入熱量を押さえることができると、切断面の溶融および熱影響部の拡大を抑えた比較的高品質な切断部の作製が可能であることがわかった。
- 4) CFRP (PA 基) と金属 (SUS 304) とのレーザー直接接合において、レーザーを金属側から照射した結果、高強度継手の作製が可能であることが確認された。

3. 2 フェムト・ピコ秒レーザー切断・穴あけ等（レーザー総研）

3. 2. 1 はじめに

本事業において、レーザー技術総合研究所はフェムト秒レーザーやピコ秒レーザーを中心とした短パルスレーザーによるCFRP切断、穴開け加工特性のパルス幅依存性ならびに波長依存性を調べた。パルス幅は100fs～200nsの間で、波長は400nm～1064nmの間で変化させ、切断・溝加工のレーザーパラメーター依存性を調べると共に加工部周囲の熱影響層を観察した。また、直線的なレーザー加工だけでなく試料に対してレーザー光を丸くスキャンして穴開け加工を行い、CWレーザーとフェムト秒レーザーでの加工特性の違いを調べた。

3. 2. 2 パルス幅依存性

水準1のCFRPサンプルに対してパルス幅を100fs（波長800nm）、200ps（800nm）、10ns（532nm）、50ns（1064nm）、200ns（164nm）と変化させて溝加工実験を行った。図3.2.2.1～図3.2.2.3にパルス幅100fs（波長800nm）、200ps（800nm）、10ns（532nm）の場合の溝加工試料の(a)断面、(b)表面、(c)裏面の光学顕微鏡写真を示す。用いた集光レンズは $f = 150\text{mm}$ で、掃引速度1000mm/分で加工を行った。

いずれの場合も、表面から観察する限りは溝加工が可能であったが、裏面を観察すると切断には至っておらず、ミシン目状態の貫通が確認できる。図3.2.2.1の100fsパルスの場合、照射の往復回数を300、600、800往復と変化させた。300往復と600往復を比較すると溝深さは往復回数にほぼ比例しているが、600往復と800往復で溝深さに大きな違いがなく、深溝加工が困難であることが分かった。図3.2.2.1(b)の溝周囲の黒化した部分はデブリの付着によるものである。

図3.2.2.2の200psパルスの場合、100fsの場合と比べるとレーザー出力がほぼ2倍であるために200～300往復で溝深さが2mmに達している。しかし、裏面を観察すると100fsの場合と同様に切断には至っていない。



図3.2.2.1 パルス幅100fs、波長800nm、繰り返し1kHz、出力200mWのレーザーを用いた溝加工試料の(a)断面、(b)表面、(c)裏面の光学顕微鏡写真。

3本の加工溝はレーザー光を（左）800往復（加工時間50分8秒）、（中）600往復（37分36秒）、（右）300往復（18分48秒）させた時の結果。

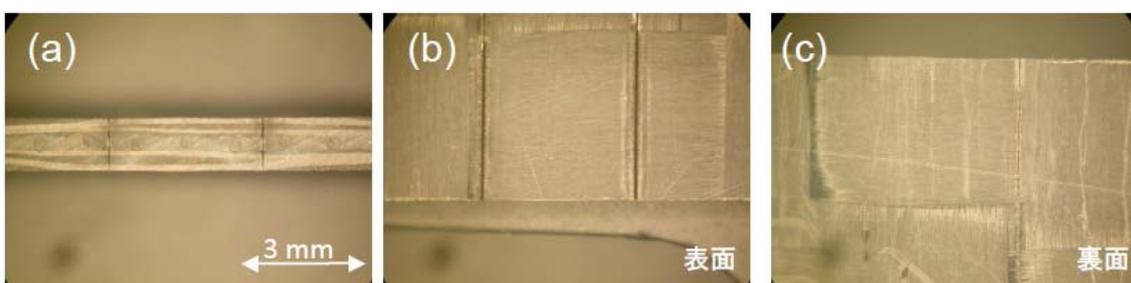


図3.2.2.2 パルス幅200ps、波長800nm、繰り返し1kHz、出力360mWのレーザーを用いた溝加工試料の(a)断面、(b)表面、(c)裏面の光学顕微鏡写真。

2本の加工溝はレーザー光を（左）200往復（加工時間12分32秒）、
（右）300往復（18分48秒）させた時の結果。

図3.2.2.3の10nsパルスの場合、波長が532nmであるために加工時にはプルームが観察された。図3.2.2.1や図3.2.2.2と直接の比較は困難であるが、出力2.2Wで5往復程度で溝深さが2mmに達していることが断面の観察(a)から確認できる。表面の観察(b)からは、溝周囲の樹脂の熔融状況が100fsや200psと比べて不安定であることが確認できる。これは、プルームの影響であると思われる。また裏面の観察(c)から、裏面への溝の貫通が炭素繊維方向に依存していることが分かる。図3.2.2.3(c)において、溝方向が炭素繊維方向と平行な部分でのみ裏面への貫通が確認できる。

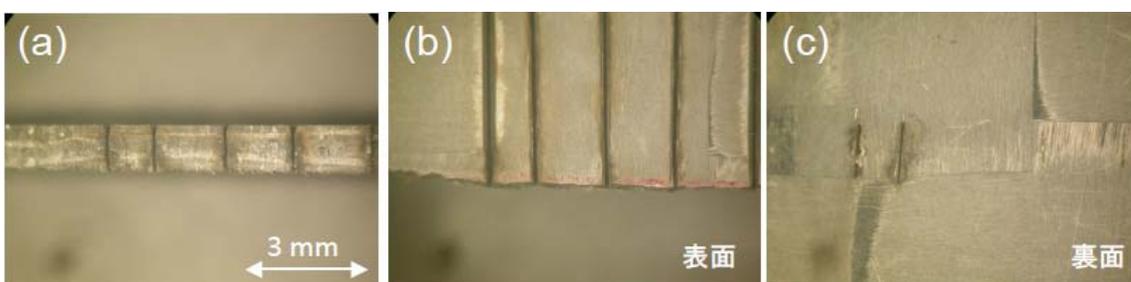


図3.2.2.3 パルス幅10 ns、波長532nm、繰り返し20kHz、出力2.2Wのレーザーを用いた溝加工試料の(a)断面、(b)表面、(c)裏面の光学顕微鏡写真。

4本の加工溝はレーザー光を

- (左) 15往復毎に0.15mmピッチで集光点を下げ1.65mmまで（加工時間11分16秒）、
 - (左中) 15往復毎に0.15mmピッチで集光点を下げ1.5mmまで（10分20秒）、
 - (右中) 5往復毎に0.1mmピッチで集光点を下げ1.5mmまで（5分8秒）、
 - (右) 5往復毎に0.15mmピッチで集光点を下げ1.5mmまで（3分29秒）
- 集光位置を変化させながら加工した時の結果。

図3.2.2.4～図3.2.2.5にパルス幅50ns（波長1064nm）、200ns（164nm）の場合の溝加工試料のSEM像を示す。用いた集光レンズは20倍の対物レンズで、掃引速度

100mm/sで加工を行った。低倍率観察(a)で顕著に見られる特徴は、炭素繊維方向が変化する部分で樹脂部のアブレーションが抑制されている点である。また、集光スポット径は約 $10\mu\text{m}$ 程度であったにもかかわらず、溝の周囲 $100\mu\text{m}$ 程度の範囲において樹脂がアブレーションされ炭素繊維の露出が観察される。この露出は炭素繊維の熱伝導が良いという特徴に起因しており、図3.2.2.4の(b)と(c)を比較すると炭素繊維方に垂直に加工した(b)の方が露出範囲が広い。図3.2.2.5の(c)から、炭素繊維の切断はシャープであることが分かる。

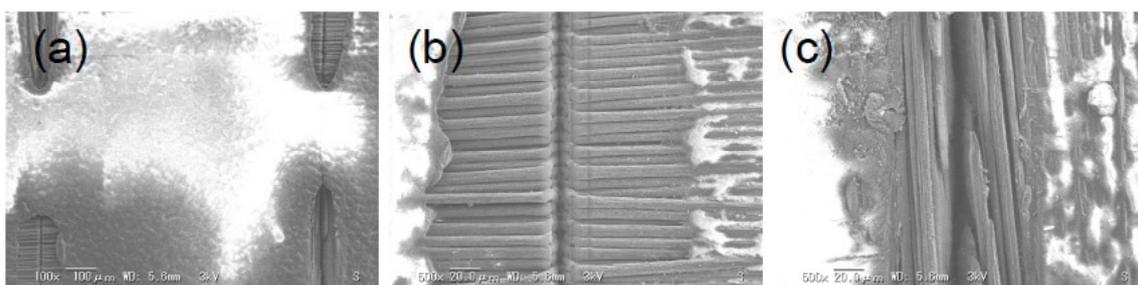


図3.2.2.4 波長1064nm、パルス幅50ns、繰り返し100kHz、出力2Wのレーザーを50往復させて溝加工した試料のSEM像。(a)低倍率観察、(b)炭素繊維に垂直方向を高倍率観察、(c)炭素繊維に平行方向を高倍率観察。

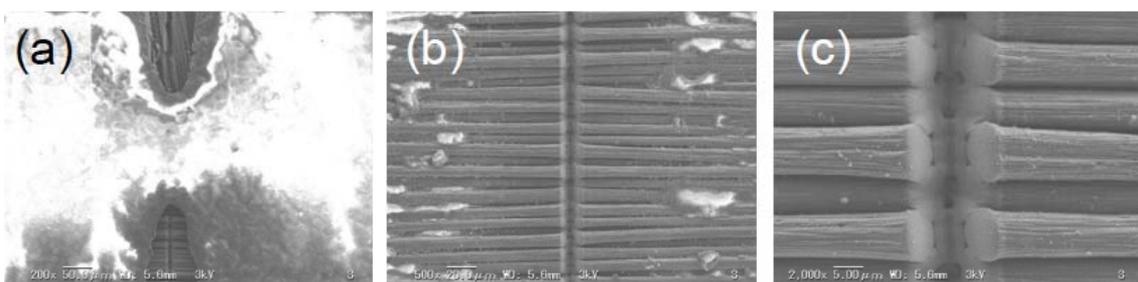


図3.2.2.5 波長1064nm、パルス幅200ns、繰り返し100kHz、出力2Wのレーザーを20往復させて溝加工した試料のSEM像。(a)低倍率観察、(b)、(c)炭素繊維に垂直方向を高倍率観察。

上記の結果から以下のパルス幅依存性が明らかとなった。

- ・水準1のサンプルは同一箇所を連続的にパルスレーザーで照射すると、加工溝が深くなるほど加工レートが低下し、貫通加工が困難となる。
- ・パルス幅が短いほど、シャープな加工が可能となるが、レーザー出力が小さいために切断に要する往復回数が増え、熱影響が発生する可能性がある。
- ・パルス幅が長いほど、加工レートが炭素繊維方向に依存しやすい。(炭素繊維に垂直方向の加工レートが小さい)
- ・数10ns以上のパルス幅で照射すると、炭素繊維の熱伝導の影響で樹脂部に熱影響

が顕著に現れる。

3. 2. 3 波長依存性

水準1のCFRPサンプルに対して波長800nm（パルス幅100fs）と400nm（100fs）のレーザー光を用いて溝加工実験を行った。図3.2.3.1に(a)波長800nm（パルス幅100fs）と(b)400nm（100fs）の場合の溝加工試料の断面の光学顕微鏡写真を示す。用いた集光レンズは $f = 300\text{mm}$ で、掃引速度1000mm/分でレーザー光を300往復させて加工を行った。波長400nmの場合は、波長変換によりレーザー出力が1/3以下に低下したために、切断には至らなかった。集光強度が大きく異なるため比較しにくい、波長が短いと集光径も小さくなるために400nmの場合は加工幅が狭い。また、レーザー出力が大きく異なるにもかかわらず同じ往復回数で同程度の溝深さが観察でき、短波長の方が加工レートが大きいと言える。

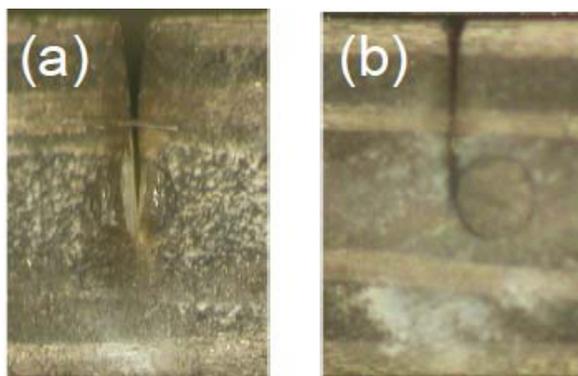


図3.2.3.1 (a) 波長800nm、パルス幅100fs、出力200mW、
(b) 波長400nm、パルス幅100fs、出力：60mW
のレーザーを300往復させて溝加工した試料の断面光学顕微鏡写真。

水準1のCFRPサンプルに対して波長532nm（パルス幅10ns）のレーザー光を用いて溝加工実験を行った。図3.2.3.2に溝加工試料のSEM像を示す。用いた集光レンズは20倍の対物レンズで、掃引速度20mm/sで加工を行った。溝周囲の樹脂に熱影響が見られるものの図3.2.2.4（波長1064nm、パルス幅50ns）の場合と比較すると、炭素繊維が完全に露出している範囲は炭素繊維に垂直な溝加工の場合（図3.2.3.2(a)、(b)）で $10\mu\text{m}$ 程度、平行な溝加工の場合（図3.2.3.2(c)）は数 μm 程度と狭くなっている。

これらの結果から、短パルスレーザーによるCFRPの切断においては、熱影響に関しては波長よりもパルス幅が大きく影響し、加工レートに関しては波長による違い（光吸収率の違い）が影響するものと考えられる。

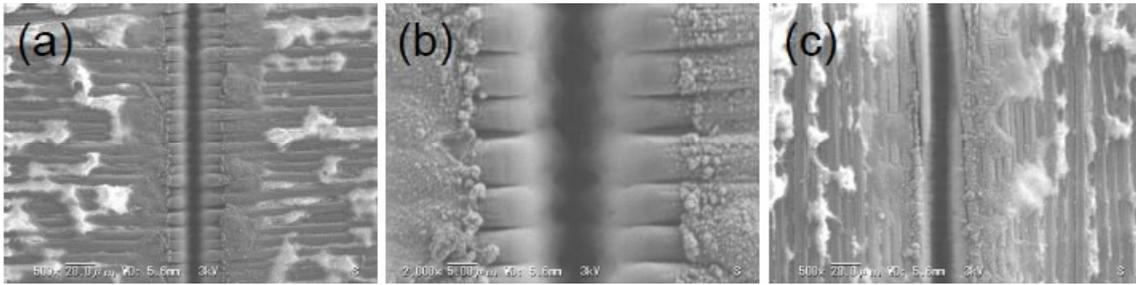


図3.2.3.2 波長532nm、パルス幅10ns、繰り返し20kHz、出力0.4Wのレーザーを50往復させて溝加工した試料のSEM像。(a)低倍率観察、(b)炭素繊維に垂直方向を高倍率観察、(c)炭素繊維に平行方向を低倍率観察。

3. 2. 4 熱変成層の抑制

100fsや200psパルスでの加工ではパルスエネルギーが小さく、サンプルを切断するために同じ場所で何度もレーザー光を往復させなければいけない。このため、超短パルスレーザー加工と言えども熱変性層が発生する可能性がある。また、溝が深くなると加工レートの著しい低下がみられ、さらに往復回数が増えるという悪循環が生じた。そこで、三次元的にビームを移動しながら同一箇所を照射する往復回数を減らし、且つレーザー光入射側の溝幅を広げて切断加工を行った。図3.2.4.1(a)に示すように同一箇所50往復の照射で形成される溝が重なるように集光点を水平方向 $50\mu\text{m}$ 、垂直方向 $300\mu\text{m}$ ずつ逆ピラミッド状に10回および6回、連続的に移動させた。図3.2.4.1(b)に断面の光学顕微鏡写真を示す。パルス幅100fs、波長800nm、繰り返し1kHz、出力200mWのレーザー光を $f = 150\text{mm}$ のレンズで集光して走査速度1000mm/分で加工を行った。この手法では、同一箇所の溝加工に比べてレーザー入射側の溝幅が広がってしまうが、溝が深くなってもレーザー光が溝底部まで届くため加工レートの飽和を防ぐことができ加工時間も短縮できた。

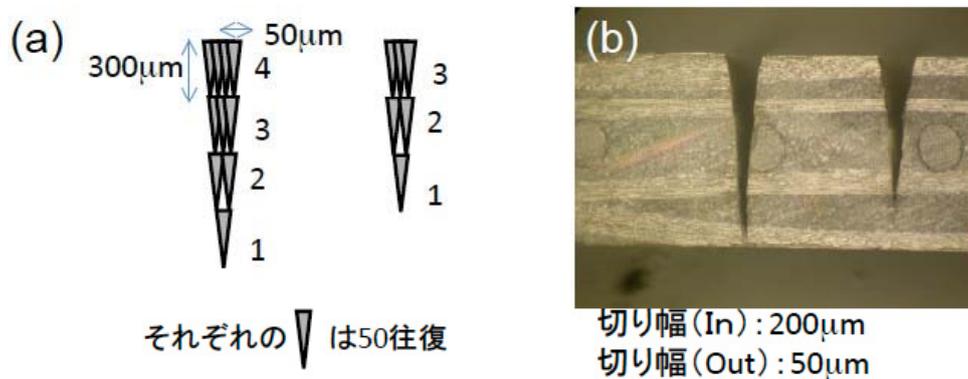


図3.2.4.1 逆ピラミッド状に照射位置を移動させながらサンプル水準1を切断した加工結果。(a)照射位置の移動方法、(b)加工サンプルの断面。

3. 2. 5 熱変成層の観察

逆ピラミッド状に加工した溝周囲の熱変性層を調べるために、岡山県工業技術センターの水戸岡氏に依頼し、水準5の加工サンプルの観察を行った。観察用に作成したサンプルを図3.2.5.1に示す。図3.2.5.1(a)に示すように同一箇所50往復の照射で形成される溝が重なるように集光点を水平方向 $50\mu\text{m}$ 、垂直方向 $400\mu\text{m}$ ずつ逆ピラミッド状に33回移動させ、パルス幅100fs、波長800nm、繰り返し1kHz、出力200mWのレーザー光を $f = 150\text{mm}$ のレンズで集光して走査速度1000mm/分でサンプル水準5に加工を行った。図3.2.5.1(b)に断面の光学顕微鏡写真を示す。右にある浅い溝は水平方向 $50\mu\text{m}$ ずつ4回移動して形成したものである。

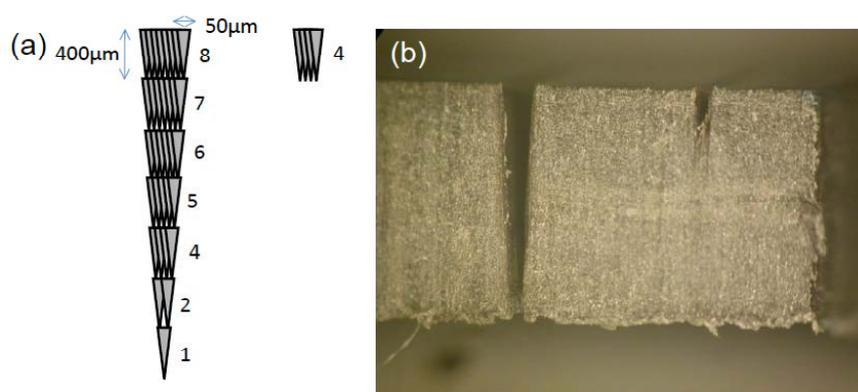


図3.2.5.1 逆ピラミッド状に照射位置を移動させながらパルス幅100fsのレーザーでサンプル水準5を切断した加工結果。

(a)照射位置の移動方法、(b)加工サンプルの断面。

図3.2.5.1に示す溝加工したサンプル水準5を樹脂で包埋しアルゴンイオンビームで断面を研磨しSEMで観察を行った。図3.2.5.2に観察結果を示す。(a)は溝の右肩部を拡大したSEM像、(b)はさらに拡大したSEM像、(c)は(b)より下の部分の溝側壁を拡大したSEM像、(d)は溝側壁近傍のサンプル内部を拡大したSEM像を示す。円形や楕円形をした炭素繊維の切断面が確認できる。いずれのSEM像においても炭素繊維と樹脂の間に顕著な剥離が見られず、熱影響層は無視できる程度である。図3.2.5.2(b)の溝の開口部右肩に樹脂がめくれあがった変性層らしき箇所が見られるが $10\mu\text{m}$ 程度と極めて浅い変性層であると言える。

パルス幅100fsと200psのレーザーによる溝加工の熱変成層を比較するために、図3.2.5.3に示すような加工サンプルをパルス幅200psのレーザーで作成した。図3.2.5.3(a)に示すように同一箇所20～25回往復の照射で形成される溝が重なるように集光点を水平方向 $30\mu\text{m}$ 、垂直方向 $400\mu\text{m}$ ずつ逆ピラミッド状に57回移動させ、パルス幅200fs、波長800nm、繰り返し1kHz、出力400mWのレーザー光を $f = 150\text{mm}$ のレンズで集光して走査速度1000mm/分でサンプル水準5に加工を行った。

図3.2.5.3(b)に断面の光学顕微鏡写真を示す。左右の溝はそれぞれ同一箇所を25往復、20往復レーザー照射して形成したものである。

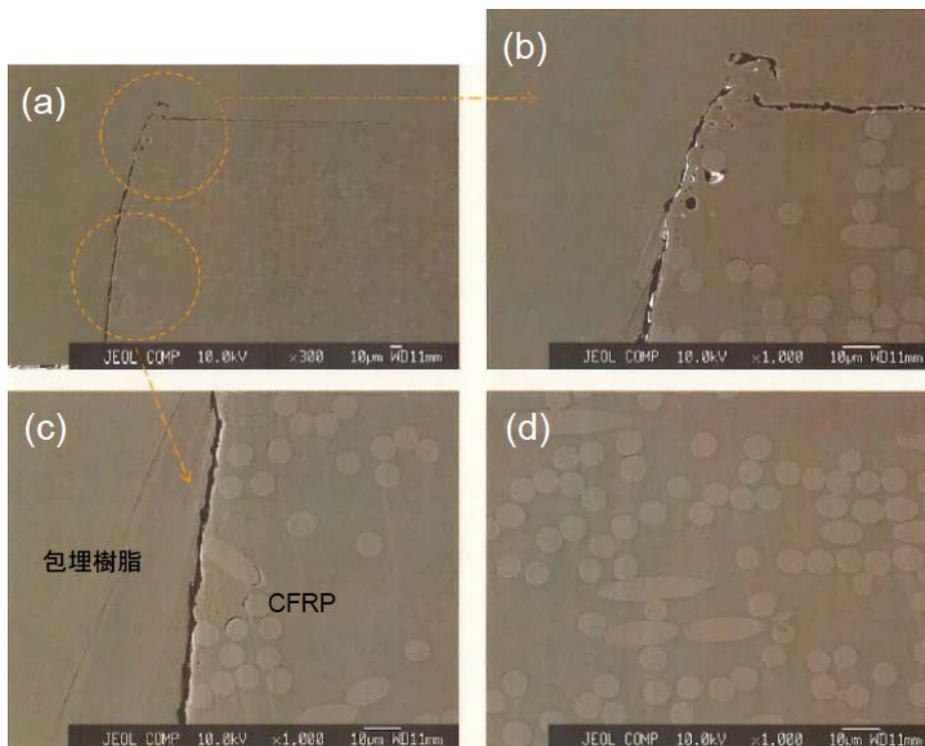


図3.2.5.2 図3.2.5.1のサンプルを樹脂で包埋しイオンビームで研磨後、断面を観察したSEM像。(a)は溝の右肩部、(b)は開口部、(c)は(b)より下の部分の溝側壁、(d)は溝側壁近傍を拡大したSEM像を示す。

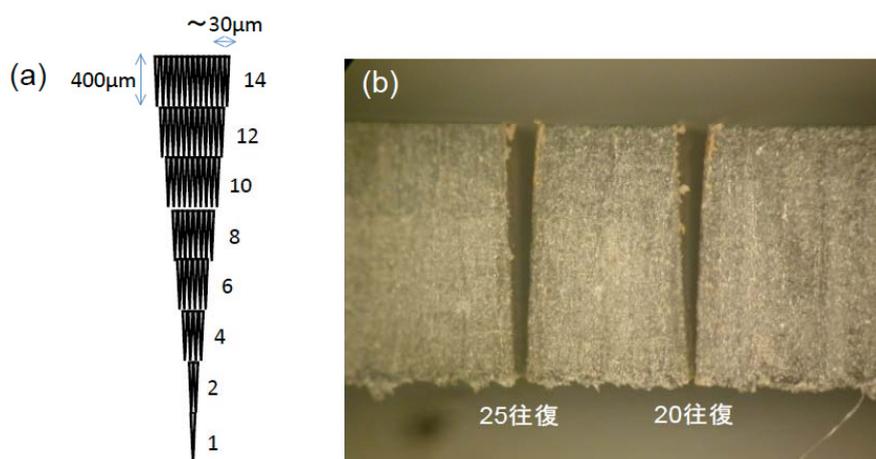


図3.2.5.3 逆ピラミッド状に照射位置を移動させながらパルス幅200psのレーザーでサンプル水準5を切断した加工結果。(a)照射位置の移動方法、(b)加工サンプルの断面。

図3.2.5.4に100fsパルス照射によるサンプル（図3.2.5.1(b)左）と200psパルス照射によるサンプル（図3.2.5.3(b)右）を包埋した後、厚さ数100 μm に薄片化し光学顕微鏡で観察した像を示す。図3.2.5.4(a)(b)は100fsパルスによる溝加工の開口部と側壁の拡大、(c)(d)は200psパルスによる溝加工の開口部と側壁の拡大である。熱変成の可能性がある部分が若干色濃く観察される。100fsパルス照射の場合は、最大で50 μm 程度（左側壁）、最小で5 μm 程度（右側壁）の変成層が確認できる。200psの場合は、両側壁ともに50 μm 程度の変成層が見られる。この変成層がどのような変成なのかは今後明らかにしていく必要がある。

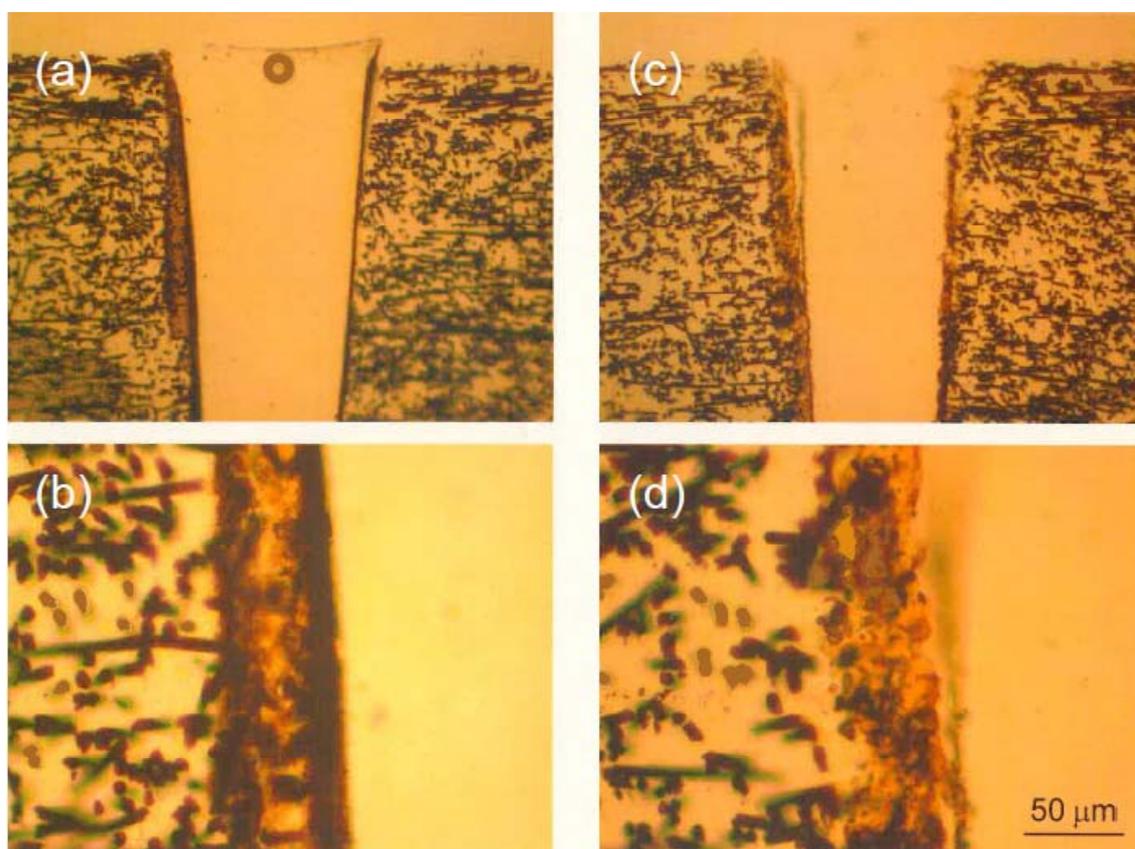


図3.2.5.4 溝加工されたサンプル水準5を包埋後、薄片化して観察した顕微鏡写真。
パルス幅100fsのレーザーによる溝加工の開口部(a)と側壁(b)、
パルス幅200psのレーザーによる溝加工の開口部(c)と側壁(d)。
それぞれの加工サンプルは図3.2.5.1と図3.2.5.3に対応。

3. 2. 6 ビームスキャン加工

直線的なレーザー加工だけではなく試料に対してレーザー光を丸くスキャンして穴開け加工（トレパニング）を行い、ピコ秒レーザーとCWレーザーでの加工特性の違いを調べた。炭素繊維がクロスに織り込まれたCFRP試料をトレパニング加工

する場合、レーザー光と炭素繊維が様々な角度で交わるため、不均一な加工となる可能性がある。

図3.2.6.1と図3.2.6.2にサンプル水準1とMP27をパルス幅200ps、波長800nm、繰り返し1kHz、出力0.4Wのレーザーで直径4mmのトレパニング加工した結果を示す。集光レンズは $f=150\text{mm}$ を用い、走査速度は1000mm/分、加工時間は約1時間であった。サンプル水準1の場合、図3.2.6.1(b)に示すように貫通した穴加工は困難であった。レーザー光の掃引方向と炭素繊維方向の交わる角度による規則的な依存性は確認できなかった。一方、サンプルMP27の場合、円柱状のCFRPサンプルを抜き出す加工ができた。図3.2.6.1(a)と図3.2.6.2(a)を比較すると、MP27の場合は熱影響部がほとんど確認できない。これは、メーカーによる製造方法の違いや、用いられた炭素繊維が水準1はPAN系、MP27はPAN/PITCH併用と異なるためであると考えられる。

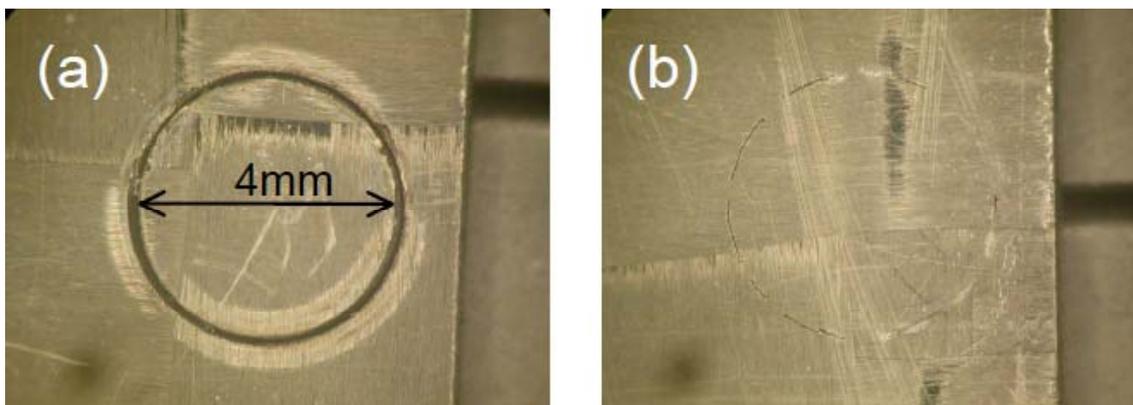


図3.2.6.1 サンプル水準1のトレパニング加工結果。(a)表面、(b)裏面。

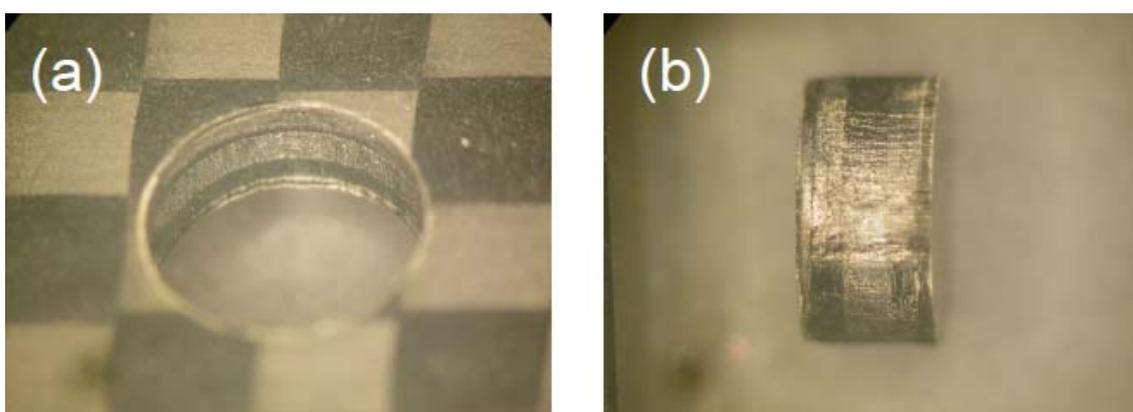


図3.2.6.2 サンプルMP27のトレパニング加工結果。(a)表面、(b)裏面。

図3.2.6.3と図3.2.6.4にサンプル水準1と水準5を2kWシングルモードファイバーレーザー（ファイバーコア径 $14\mu\text{m}$ ）で直径2mmのトレパニング加工した結果を

示す。図3.2.6.3はサンプル水準1を走査速度3333mm/sでレーザー出力と走査回数を変化させながらトレパニング加工した結果である。高出力で加工するよりもレーザーの出力を抑えて複数回走査した方が切断できた。ただし、繊維がクロスに織り込まれており、また複数回走査しているため切断表面、切断面は熱影響が大きかった。

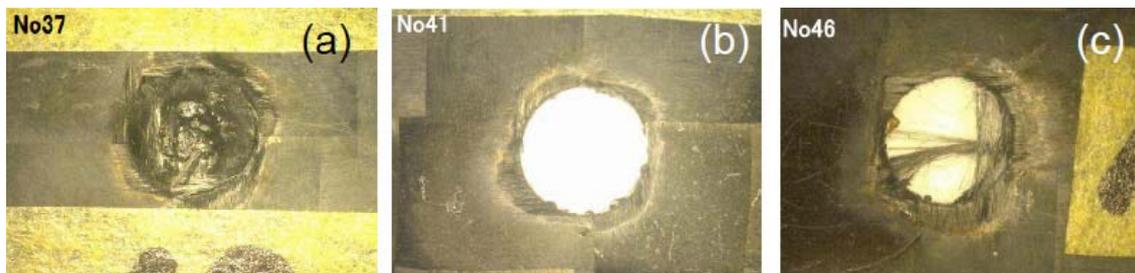


図3.2.6.3 サンプル水準No.1のトレパニング加工結果。

(a) 出力80%、20パス、(b) 出力50%、30パス、(c) 出力50%、40パス

図3.2.6.4はサンプル水準5を走査速度、レーザー出力、走査回数を変化させながらトレパニング加工した結果である。熱影響領域は切断の可否にかかわらず300～500 μ mであり、加工条件に対する顕著な依存は見られなかった。図3.2.6.4(b)は加工線幅が細いため貫通できているが抜け落ちていない。炭素繊維をクロス織り込みした水準1と比較して長繊維ペレットを射出成形した水準5は切断が容易であった。

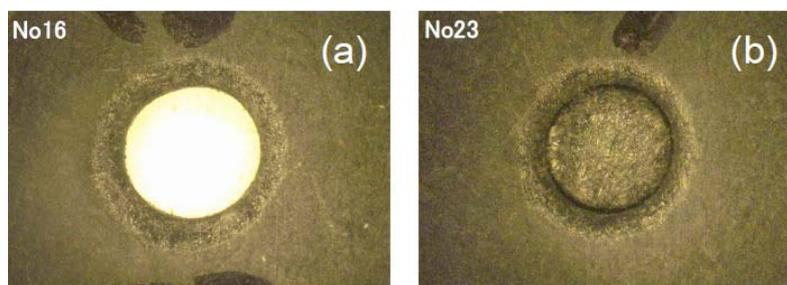


図3.2.6.4 サンプル水準No.5のトレパニング加工結果。

(a) 出力50%、833mm/s、焦点位置-1.5mm、20パス

(b) 出力100%、5000mm/s、焦点位置0mm、30パス

3. 2. 7 まとめ

フェムト秒レーザーやピコ秒レーザーを中心とした短パルスレーザーによるCFRP切断、穴開け加工特性のパルス幅依存性ならびに波長依存性を調べた。パルス幅は100fs~200nsの間で、波長は400nm~1064nmの間で変化させ、切断・溝加工のレーザーパラメーター依存性を調べると共に加工部周囲の熱影響層を観察した。

パルス幅依存性の実験結果から、

- ・ 水準1のサンプルは同一箇所を連続的にパルスレーザーで照射すると、加工溝が深くなるほど加工レートが低下し、貫通加工が困難となる。
- ・ パルス幅が短いほど、シャープな加工が可能となるが、レーザー出力が小さいために切断に要する往復回数が増え、熱影響が発生する可能性がある。
- ・ パルス幅が長いほど、加工レートが炭素繊維方向に依存しやすい。(炭素繊維に垂直方向の加工レートが小さい)
- ・ 数10ns以上のパルス幅で照射すると、炭素繊維の熱伝導の影響で樹脂部に熱影響が顕著に現れる。

ことが明らかとなった。

波長依存性の実験結果から、短パルスレーザーによるCFRPの切断においては、熱影響に関しては波長よりもパルス幅が大きく影響し、加工レートに関しては波長による違い(光吸収率の違い)が影響することが分かった。

熱変成を抑制する逆ピラミッド状の加工方法を考案し、熱変成層の確認を試みた。100fsパルス照射の場合は最大で50 μ m程度、最小で5 μ m程度の変成層が、200psの場合は両側壁ともに50 μ m程度の変成層が観察された。この変成層がどのような変成なのかは今後明らかにしていく必要がある。

また、ビームスキャンによるトレパニング加工を100fsパルスレーザーとCWレーザーを行った。100fsレーザーによる加工では熱影響は少ないもののCFRP素材に依存した加工結果が確認された。CWレーザーによる加工では、高出力で加工するよりもレーザーの出力を抑えて複数回走査した方が切断が容易であった。

3. 3 紫外レーザー切断・穴あけ等（産総研）

本節3.3では、紫外レーザー切断ならびに穴あけ加工を行った結果について述べる。レーザー装置として、波長355nmのナノ秒パルスLD励起3倍波固体レーザー装置を用いた。表3.3.1に照射条件の詳細を示す。ガルバノ鏡走査速度を100mm/sに設定し、重畳照射によって加工試験を行った。また、レーザービームの焦点位置は試料裏面側に設定し、切断距離は25mmとした。表2.3.1に掲載の試料13種を今回の加工検討試料とした。切断結果概要を表3.3.2に示す。入射側切り幅が0.1mm以下の加工が達成できたが、試料水準によって完全切断できた試料と未達成の試料とに実験結果はわかれた。現時点では部分切断の原因は不明である。

表 3.3.1 紫外レーザー照射詳細スペック

波長	355 nm
パルス幅	30 ns
パルス繰返し	30 kHz
平均出力	4. W (@30kHz, 150 μ J/pulse)
光学系	F θ レンズ、WD=150mm (WD : work distance)
ガルバノ鏡走査速度	100 mm/s
照射環境	大気中

切断面の品位を調べるために染色浸透探傷法を用いて、加工時のクラック発生の有無を調べた。染色浸透探傷法とは、(i)アゾ系油溶性染料を含む赤色浸透液を検査物の表面欠陥部に浸透させた後、(ii)ヘプタン洗浄液で余分の赤色浸透液を除去し、(iii)珪酸微粉末および炭酸カルシウム微粉末をからなる白色現像液で毛細管現象を応用して欠陥部に浸透している赤色浸透液を現像発色させる手法で、肉眼では容易に視認できない微細クラックなどの欠陥を発見することに効果的な方法である。検出感度は傷の中1 μ m、深さ10 μ mである。マイクロチェック（タイホーコーザイ製）を用いて検査を行ったところ、切断加工表面にクラックの発生は認められなかった。図3.3.1に、試料No.9とME30の結果を示す。

表3.3.2 切断結果概要

試料水準 ^a	完全切断	加工速度(mm/min) ^b	レーザー入射側切り幅(μm)
1	切断確認	37.5	30-40
2	切断確認 ^c	50	70
2	切断未確認 ^d	—	70
3	切断未確認	—	70
4	切断確認	33.3	70
5	切断確認	25	100
6	切断未確認	—	80
7	切断未確認	—	100
8	切断未確認	—	100
9	切断確認	30	80
10	切断未確認	—	50
MP27	切断未確認	—	70
ME15	切断確認	25	50
ME30	切断確認	25	70

^a 試料水準詳細は表2.3.1参照、^b 加工速度はレーザービーム走査速度を重畳照射の回数で割った数値、^c 繊維軸に平行照射、^d 繊維軸に垂直照射

水準 No. 9 (CF 短繊維 Vf=20 PA6 射出 t 3mm)

マイクロチェック処理後の切断面



←中央部の白色箇所がレーザー切断面

水準 No. ME 30 (PITCH 系繊維 30wt% PC 射出 t 3mm)



図 3.3.1 染色浸透探傷法によるレーザー加工表面の切断品位観察結果

さらに、直径 3mm ϕ の穴あけ加工を試みたところ、繊維束が良好に切断されている加工結果を得ている (図 3.3.2 : SEM 写真)。図 3.3.3 に切断加工試料の顕微鏡観察結果を示す。これは表 3.3.2 に示す加工結果の各試料の詳細観察である。図 3.3.3 には各試料水準に対応して補助番号を付与している。

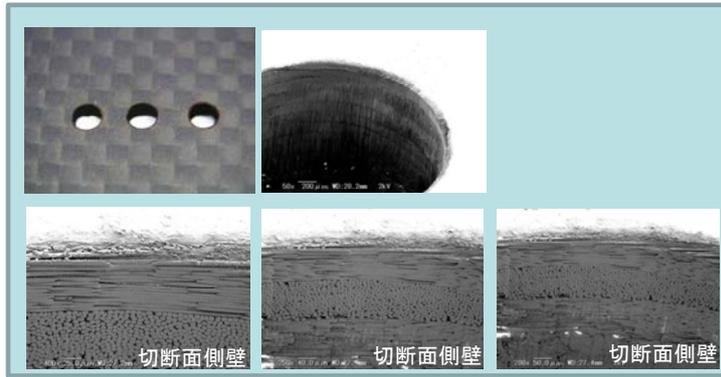


図 3.3.2 レーザー穴あけ加工の内部表面切断品位の SEM 観察結果 (試料厚:2mm)

水準 No. 1 (CF クロス Vf=50 エポキシ RTM 試料厚み t=1.3mm)

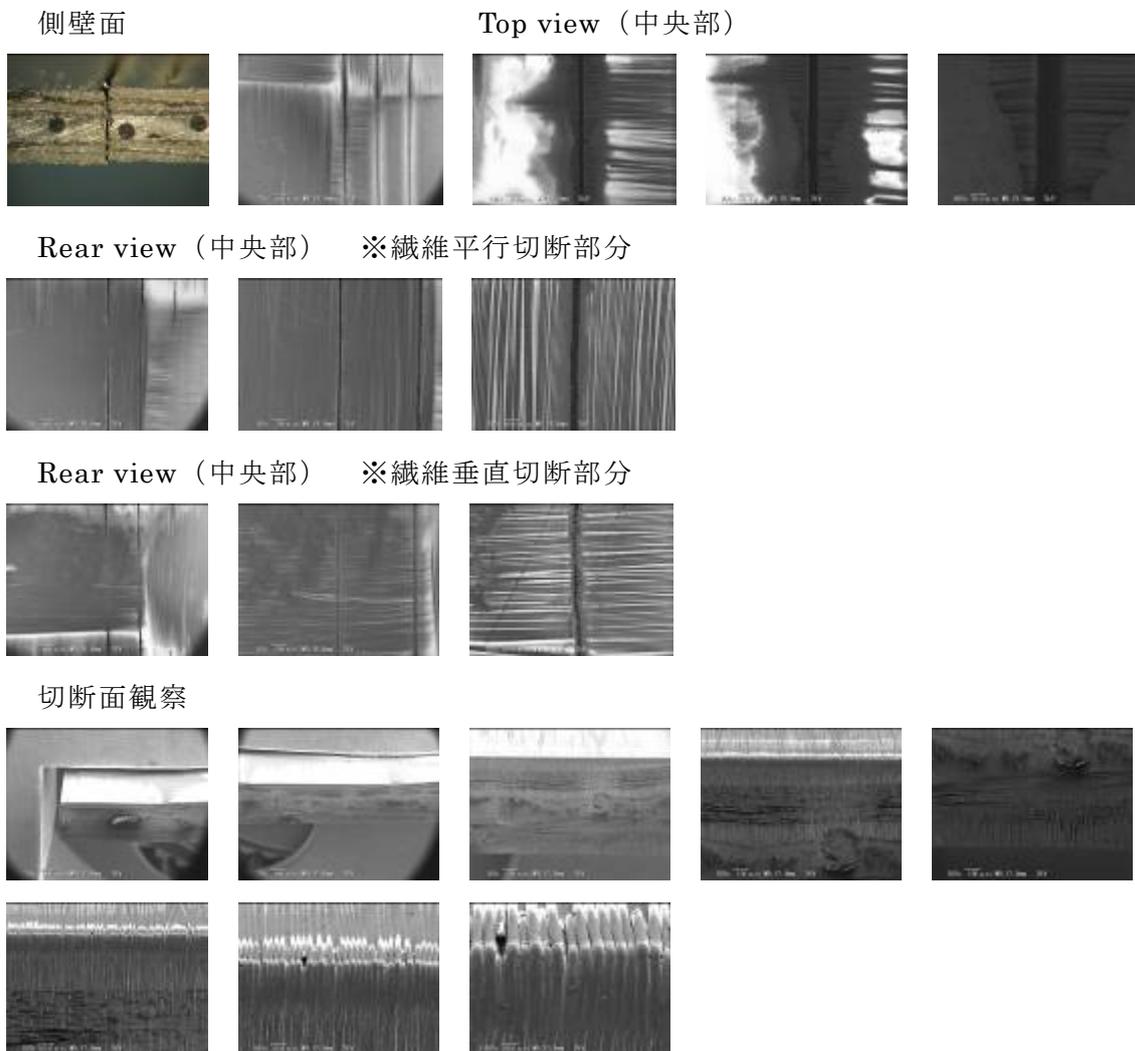


図 3.3.3.(1) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 1】(照射時間 20 秒後:裏面に透過光が観察(約 20%の領域で切断済)、40 秒後:全領域で切断完了)

水準 No. 2 (一方向 Vf=50 PA6 プレス t=2 mm)



図 3.3.3.(2) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 2】(照射時間【繊維軸に平行】30秒後：切断完了、【垂直】5分後：完全切断に至らず)

水準 No. 3 (一方向 Vf=50 PPS プレス t=3 mm)



図 3.3.3.(3) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 3】(照射時間【繊維軸に平行】120秒後：完全切断に至らず、【垂直】120秒後：完全切断に至らず)

水準 No. 4 (ランダム Vf=25 PA6 プレス t=2 mm)



図 3.3.3.(4) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 4】(照射時間 10 秒後：約半分の領域で切断完了、45 秒後：切断完了)

図 3.3.3 に示す切断加工試料の顕微鏡観察結果から、UV パルスによるアブレーション加工によって、低熱損傷の切断面品位が観測された。これは CFRP 樹脂部に対しても高吸収である紫外光の特質が作用したものと考えられる。しかしながら、一部試料においては、裏面までの完全切断に至らないケースもあった。現時点ではその原因は不明であるが、UV レーザー加工時一般の現象として、重畳照射でのレーザー照射時初期における加工速度と、後期における速度は大きく異なっていることが観測された。加工フロントが試料内部に進むに従い、加工速度は低下していく傾向

にある。加工部位に残留している炭素繊維束端が影響している可能性がある。

水準 No. 5 (CF 長繊維 Vf=20 PA6 射出 t=3mm)

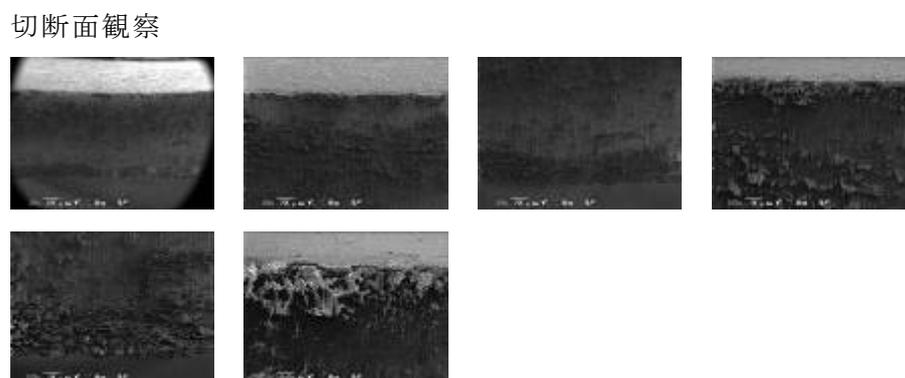
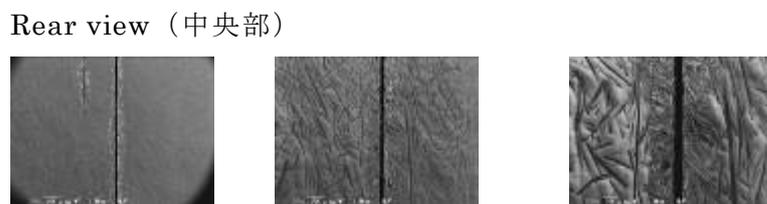
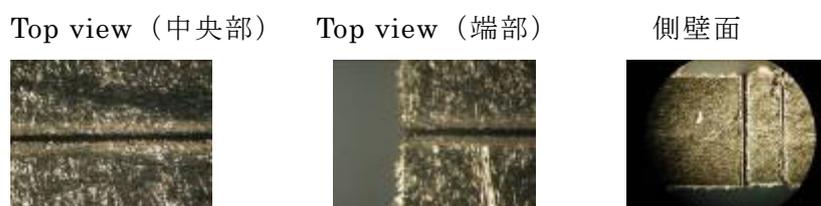


図 3.3.3.(5) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 5】(照射時間 60 秒後: 切断完了)

水準 No. 6 (CF 長繊維 Vf=20 PP 射出 t=3mm)

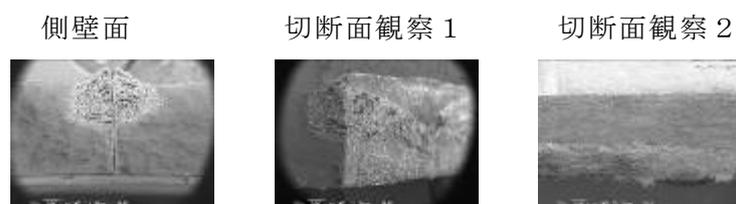
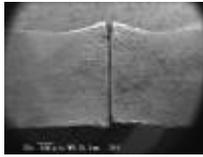


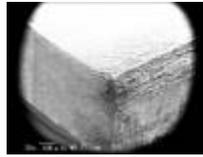
図 3.3.3.(6) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 6】(照射時間 150 秒後でも切断未達成(入射表面に熱損傷(膨張)発生))

水準 No. 7 (CF 長繊維 Vf=20 ABS 射出 t=3mm)

側壁面



切断面観察 1



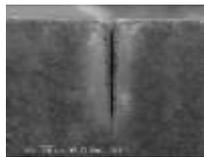
切断面観察 2



図 3.3.3.(7) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 7】(照射時間 60 秒後で切断一部未達成 (入射表面部に熱損傷))

水準 No. 8 (CF 短繊維 Vf=20 PPS 射出 t=3mm)

側壁面 1



側壁面 2

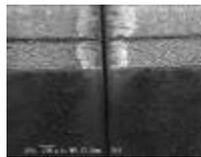
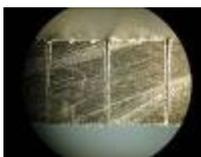


図 3.3.3.(8) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 8】(照射時間 180 秒後にても切断未達成(入射表面に熱損傷変質部位発生))

水準 No. 9 (CF 短繊維 Vf=20 PA6 射出 t=3mm)

側壁面



切断面観察 1



切断面観察 2



図 3.3.3.(9) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 9】(照射時間 50 秒後 : 全領域で切断完了)

水準 No. 1 0 (GF 短繊維 Vf=20 PA6 射出 t=3mm)

Top view



Top view 拡大図



側壁面



Top view (SEM)

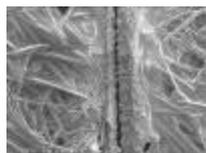
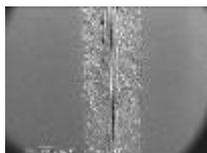


図 3.3.3.(10) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No. 1 0】(照射時間 120 秒後にも切断できず、表面黒化)

水準 No. MP 2 7 (PAN 系クロス/PITCH 系プリプレグ エポキシ t=2 mm)

側壁面



Top view (中央部)



Top view (端部)

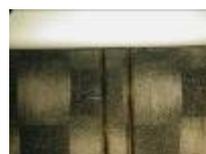


図 3.3.3.(MP27) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No.M P 2 7】(照射時間 60 秒後：裏面側に透過光が観察、5-25 分後：完全切断に至らず)

水準 No. ME 1 5 (PITCH 系フィラー 15wt% PC 射出 t=3 mm)

側壁面

(30s,60s,90s)



Top view

(端部 ; 90s,60s,30s)



Rear view

(端部 ; 30s,60s,90s)



図 3.3.3.(ME15) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No.ME 1 5】(照射時間 60 秒後：約半分の領域で切断完了(裏面側に熱荒れ発生)、90 秒後：完全切断に至らず(表面側にも熱荒れ発生))

水準 No. ME 3 0 (PITCH 系ファイバー 30wt% PC 射出 t=3 mm)

側壁面 Top view Rear view 切断面
(15s,30s,60s,90s) (端部 ; 90s,60s,30s,15s) (端部 ; 60s,90s)



図 3.3.3.(ME30) 切断加工試料の顕微鏡観察結果【水準No.ME 3 0】(照射時間 60 秒後 : 約半分の領域で切断完了 (裏面側に熱荒れ発生)、90 秒後 : 完全切断に至らず (裏面側熱荒れ領域が拡大))

また、本節の検討を行うに当たり、学術分野における当該分野ならびに関連周辺分野の研究動向を調査するために、2009 年 9 月に開催された応用物理学会秋季講演会 (富山大学) に参加し、レーザー装置と応用技術の最新成果について調査した。複合材料加工を含むレーザー加工の研究動向ならびにレーザ光源研究動向 (光学オプティクス制御分野および面発光レーザー素子分野) の研究発表を聴講し、当該分野の最新研究動向の調査を行った。

【3.3のまとめ】

波長355nmのナノ秒パルス紫外レーザー装置を用い、複数種類のCFRP試料片に対して切断や穴あけ加工を行った。このときの加工速度、加工深度、切り幅等の加工因子の相関を明らかにすることができた。加工後の試料面の形状観察は、SEM観察、長深度光学顕微鏡観察等を駆使して、レーザー照射条件が切断面に与える影響について精密に分析評価を行った。その結果、概ね紫外レーザー加工によって高品位な加工が実施できることが判明した。しかし、レーザー装置の平均出力が小さいことから、加工速度は数cm/min程度に留まった。また、一部試料においては、裏面までの完全切断に至らないケースもあった。現時点ではその原因は不明であるが、加工フロントが試料内部に進むに従い、加工速度は低下していく傾向にあった。

3.4 現状技術切断・穴あけ等（NC加工・ウォータージェット：産総研）

本節 3.4 では、紫外レーザー切断ならびに穴あけ加工を行った結果について述べる。従来工作手法として主流である、NCマシニング（産総研テクニカルセンターで実施、加工用ドリル刃は消耗品として購入）やウォータージェット（米山製作所で外注加工を実施）による切断・穴あけ加工を行ったCFRP試料を入手し、加工品位を 3.3 節と同様の方法で調べた。

○NC研削加工（加工速度：～0.1m/分、ドリル径φ6mm、φ5mm）

(D)ダイヤモンド（φ6mm、φ5mm、φ1mm）ナチ製 2DCEφ6.0、2DCEφ5.0、2DCEφ1.0

(S)超硬エンドミル（φ5mm、φ1mm）日立製ロング刃 HESL2050、HESL2010

1回の切削深さ：ミル径の半分以下（厚物試料には多重回走査で切断加工を実施）

最適切削速度： 100mm/min（φ5mm(6mm)、2400rpm）

30mm/min（φ3mm、4000rpm）

(D)と(S)の違い：(D)耐久性大

(S)価格 1/10 安価、加工時のバリがやや少ない(※刃先角度異なる)

NC研削加工における装置外観を図3.4.1に示すとともに、図3.4.2に各試料の研削加工結果を示す。外観観察結果からは一部試料で表面層でのバリの発生が認められるが、切断面内部には類似のバリ発生構造はなかった。研削内部表面の状態は、目視観察レベルでは良好な加工特性が認められたが、SEM観察によって高倍率に表面状態を観察すると、細かい炭素繊維束の断片が表面に付着していた。これはエア・ブローで除去可能であるものの、繊維束断片を除去した表面はやや荒れたような表面状態であった。この状況はクロス品試料において顕著に認められた。NC加工では長繊維をドリル刃で機械的に切断することから現れたと考えられる。したがって、短繊維を含有する射出品ではこれらの傾向は抑制されている。

装置概観 1



装置概観 2

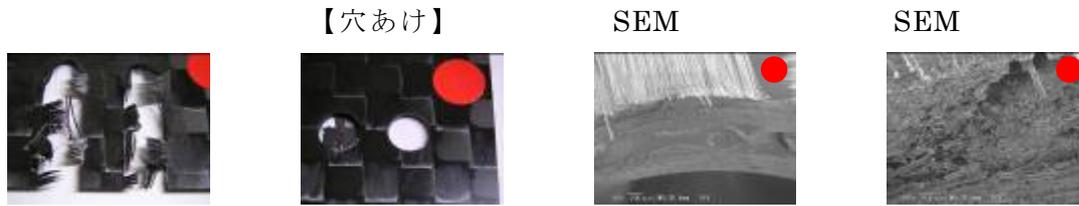


加工の様子(エア吹付け)



図 3.4.1 NC研削加工装置の外観および加工の様子

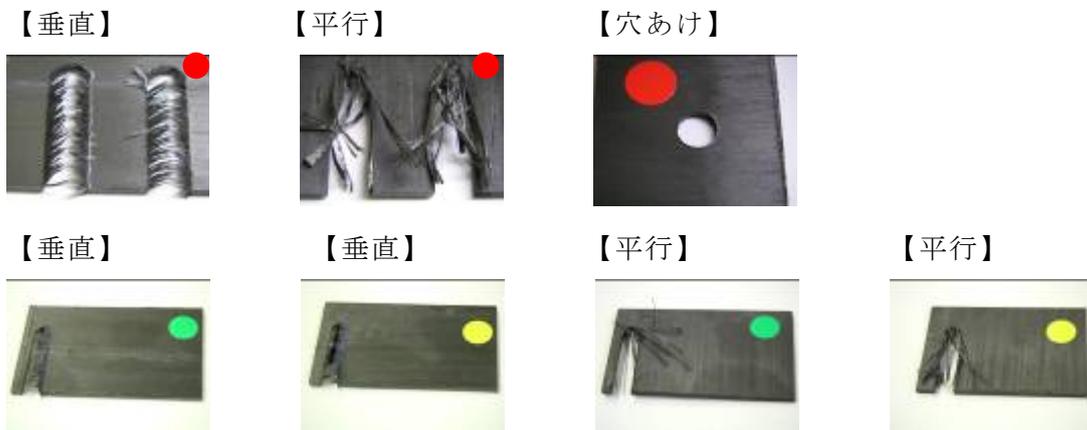
水準No.1 (ダイヤミルφ6mm:赤色印)



(ダイヤミルφ5mm:緑色印、超硬エンドミル:黄色印)



水準No.2



水準No.3



水準No.5

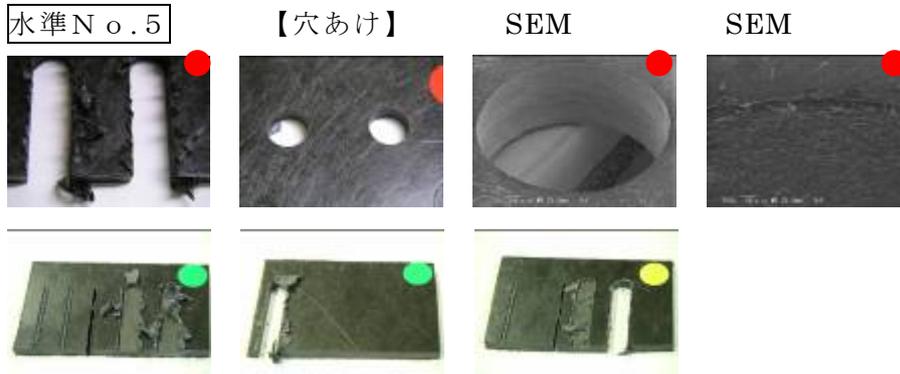


図 3.4.2 NC研削加工試料の外観観察および顕微鏡観察結果 (その1)

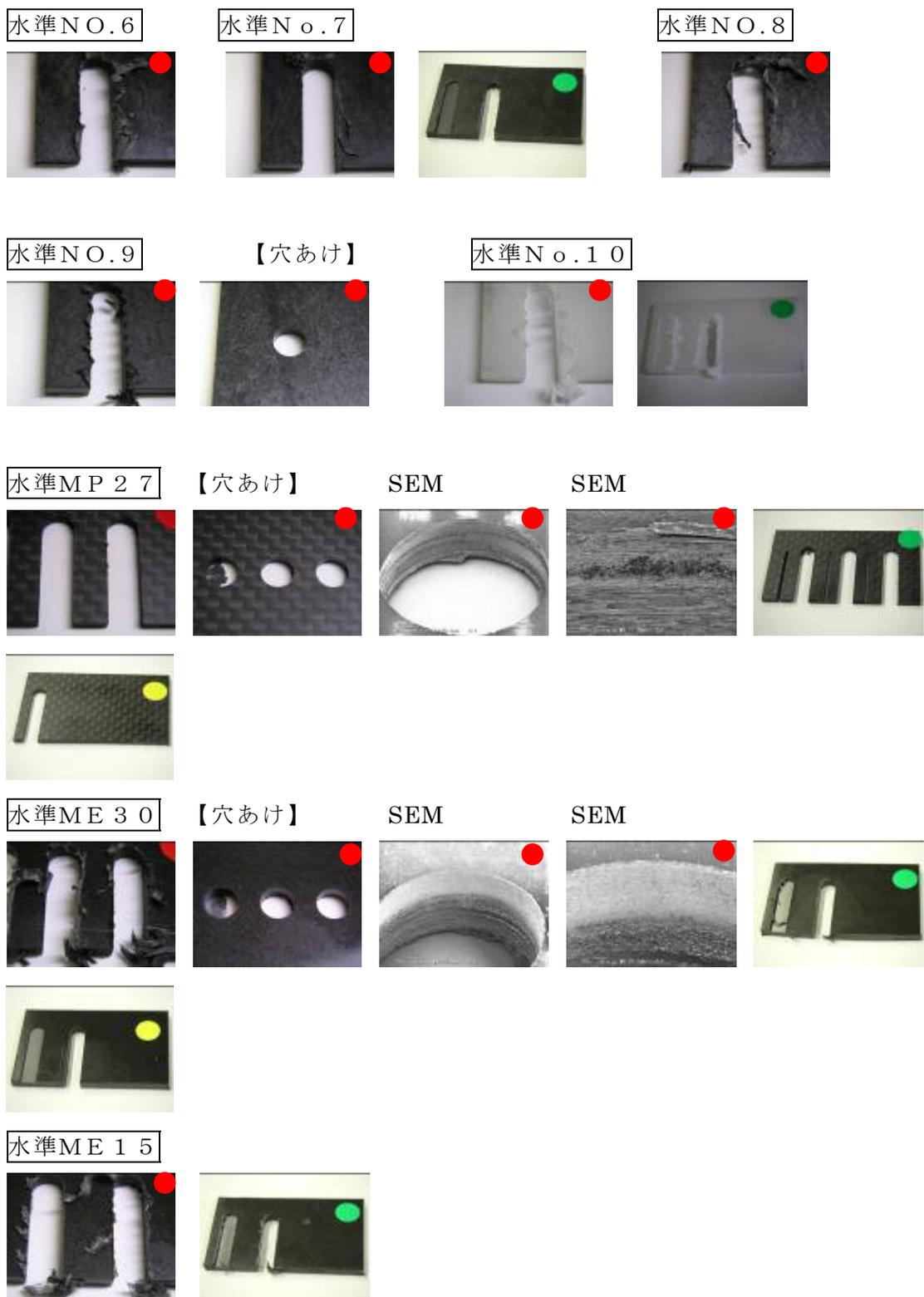


図 3.4.2 NC研削加工試料の外観観察および顕微鏡観察結果（つづき、その2）

さらに、ウォータジェット加工では、加工速度 0.3–1m/分での加工が実証できた。



図 3.4.3 ウォータジェット加工装置の外観

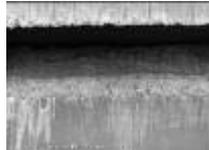
加工条件は以下のように設定した。

- ・装置名: 澁谷工業製 ワーク移動型ウォータジェット切断加工機 SWS1110R
 - ・砥粒: ガーネット (JIS120 番)
 - ・吐出圧力: 320MPa
 - ・ミキシングノズル (噴出口) 径: 0.8mm
 - ・ノズル先端から試料片表面までの設定距離: 2 mm
- ※外注加工依頼先 (米山製作所) での合格判定基準:

テーパー0.2 (Kerf(In/Out)=1.0/0.8)

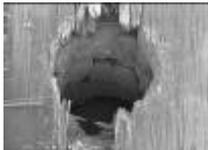
水準 No. 1

切断面の SEM 写真



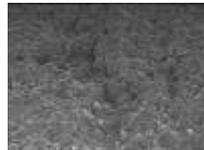
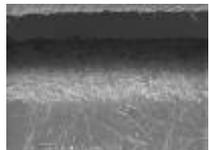
ピアシング加工

加工面の SEM 写真



水準 No. 5

切断面の SEM 写真



ピアシング加工

加工面の SEM 写真

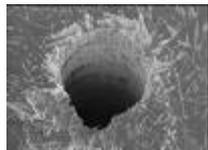


図 3.4.3 ウォータジェット加工試料の外観観察および顕微鏡観察結果 (その 1)

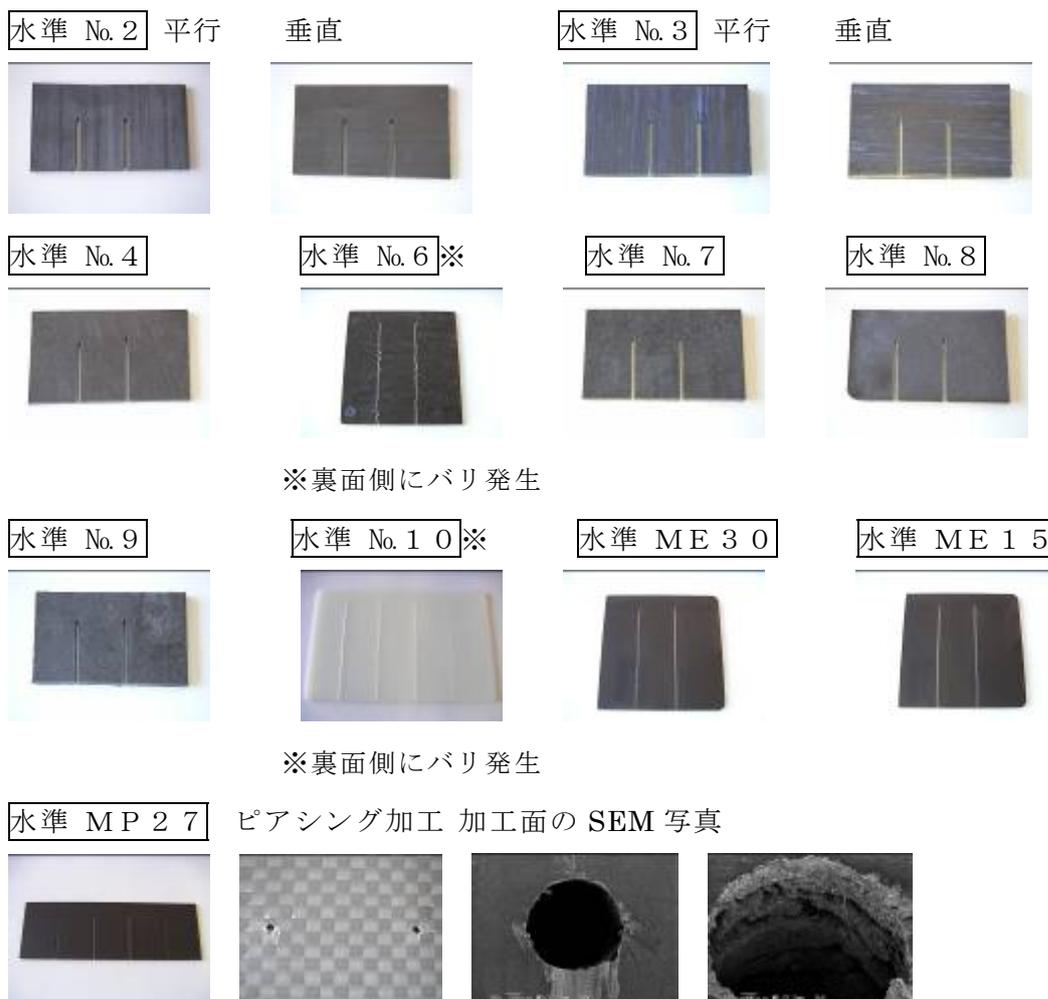


図 3.4.3 ウォータジェット加工試料の外観観察および顕微鏡観察結果（続き、その 2）

ウォータジェット加工の課題として、一般的に以下の問題点が指摘されている。

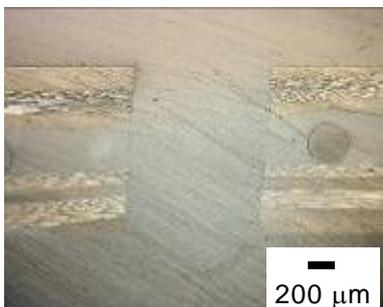
- ・現状以上の高速化は困難
- ・砥粒液による試料表面汚染
- ・ピアッシング（穴あけ）加工ができない

→加工時に滞留する砥粒液によって試料内で層間剥離が発生する

今回の検討から、加工面内部の平坦性にもやや問題があることが判明した。これは、ウォータジェット加工で CFRP を加工する場合、必ず砥粒を使う「アブレイシブ加工」を使用することに起因すると考える。NC加工と同様であるが、加工機構としては砥粒と炭素繊維の機械的な摩擦（接触）によって加工が進行するため、例えば、水だけの噴流では CFRP 内の炭素繊維束が加工できないことからこの考察は支持される。

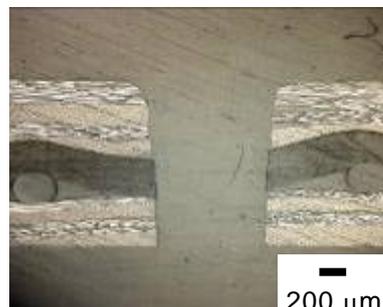
水準 No. 1 (試料厚 : 1.2mm)

○NCマシニング



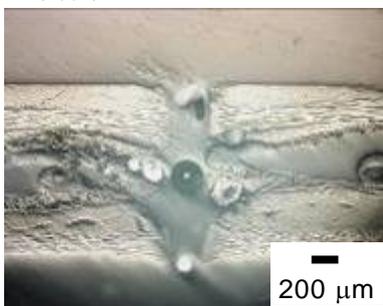
10mm/分 (ダイヤドリル φ 1mm, 0.5mm 深を重畳 3回)

○ウォータージェット

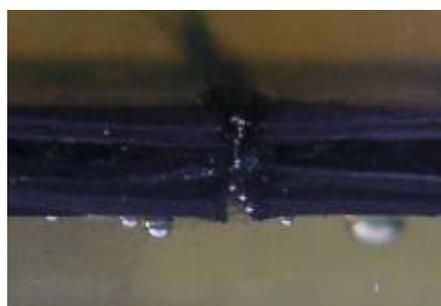


1.0m/分

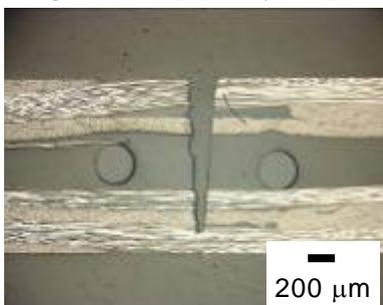
○高出力レーザー



10kW, 15m/min, fd=0

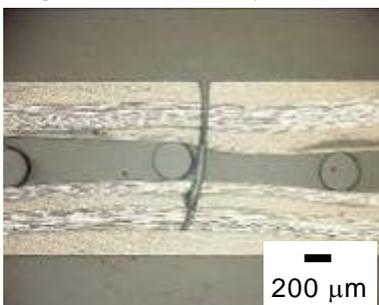


○フェムトレーザー I



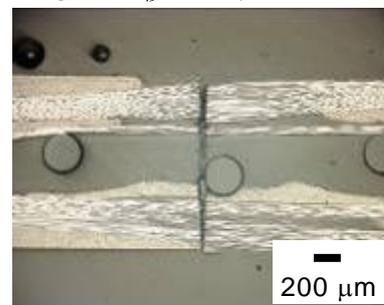
7-6-5-4-3-2-1 30 往復

○フェムトレーザー II



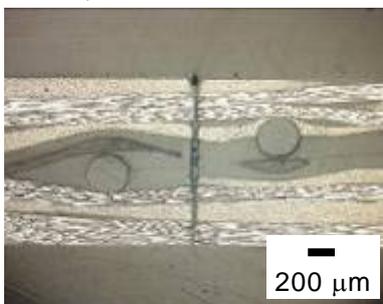
800 往復

○ピコ秒レーザー



300 往復

○紫外レーザー

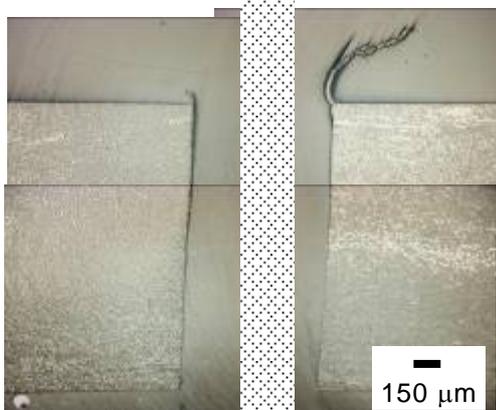


355nm, 4.5W, 37.5mm/min

図 3.4.4 各種加工処理試料の断面顕微鏡観察結果 (水準 No.1)

水準 No.5 (試料厚 : 3mm)

○NCマシニング



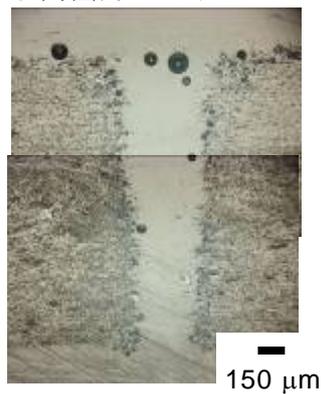
100mm/分 (ガイドリルφ6mm, 重畳1回)

○ウォータージェット

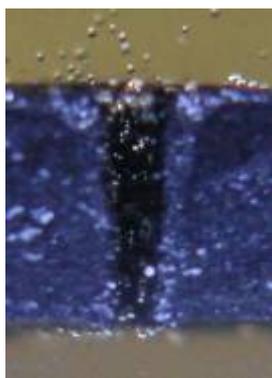


0.3m/分

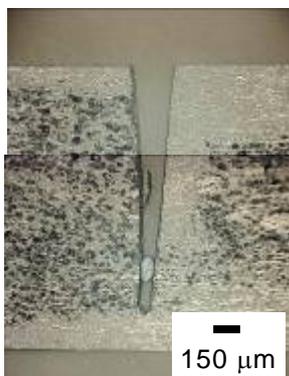
○高出力レーザー



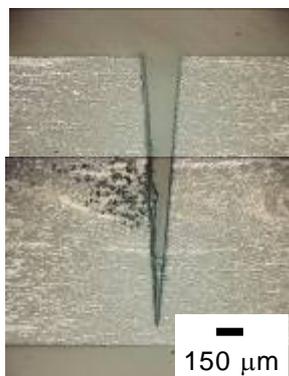
10kW, 15m/min, fd=0



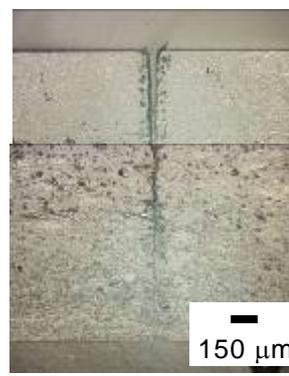
○フェムトレーザー



○ピコ秒レーザー



○紫外レーザー



7-6-5-4-3-2-1

14-12-10-8-6-4-2-1 25 往復

355nm, 4.5W, 25mm/min

図 3.4.5 各種加工処理試料の断面顕微鏡観察結果 (水準 No.5)

図 3.4.4 および図 3.4.5 に各種加工処理試料の断面顕微鏡観察結果を示す。NC 加工およびウォータージェット加工では熱損傷部位の存在は認められてない。また、フェムトレーザー、ピコ秒レーザー、紫外レーザーにおいても、本方法による観察では同様に、熱損傷部位は観察されなかった。しかしながら、高出力レーザー照射（出力：10kW）では、レーザービーム走査速度 15m/min であるが、試料 2 種（水準 No. 1 および No. 5）ともに熱損傷部位が観察されている。熱損傷は樹脂部に起こりやすいことを勘案すると、波長 1 μm の kW 級 CW レーザー照射では加工品位に問題が残っていることが判明した。レーザーからの基材へのエネルギー注入を熱損傷が起こらないように設計する必要がある。

【3.4 のまとめ】

従来工作手法として主流である、NC マシニングならびにウォータージェットによる切断・穴あけ加工を行った CFRP 試料を入手し、包埋樹脂等を用いて加工面を保護後、切断・研磨することで加工部周辺への熱影響の有無を調べた。これらの結果とレーザー加工の加工試料（大阪大学の高出力レーザー、レーザー技術総合研究所のフェムト・ピコ秒レーザー、産総研の紫外レーザー、の 3 種）との比較を相互に行い、精度や切断面、加工時間等を明確にした特性比較評価を行った。これらの結果から、高品位かつ高スループットなレーザー切断加工の必要スペックを明確化することができた。

3. 5 実験結果の総括

3.1 節から 3.4 節において得られた実験結果を表フォーマット形式にまとめたものを表 3.5.1 に示す。ポイントとして、

- ・高出力レーザーでは、切断速度は 10m/min が実証された。ただし、加工品位に課題を残している。
- ・フェムト・ピコ秒レーザーおよび紫外レーザーは、高品位な加工ができる。現在のレーザー装置自体の出力値が小さいことから、加工速度が小さい
- ・NC マシニング加工ならびにウォータージェット加工では低熱損傷の加工ができるが、加工速度は各々0.1/min、1m/min が限界値で（試料厚 3 m m程度するとき）、現状技術ではこれ以上の高速化は相当に困難な状況である。

ことが判明した。また、レーザー加工においては

- ・クロス品と射出品を比較した場合、射出品の方が容易かつ早く加工が進行する。との傾向が認められている。今回の検討では課題の解決策を見出す検討まで十分に行うことができなかつたが、既設のレーザー装置を使った場合の加工特性の性能値を確認にする第一目的は達成し、問題点を明確にすることができた。

表 3.5.1 CFRPをレーザー加工したときの材料、加工条件、加工品質に関するマトリックス表フォーマット(1/5)

【事業内容】 CFRP等複合材料の 切断・穴あけ・接合等 実証試験及び分析	レーザー装置	水準 No. 1 クロス Vf=50 エキシ RTM t1.3mm				水準 No. 2 一方向 Vf=50 PA6 プレス t2mm			
		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	
②高出力レーザー (阪大接合研)	シングルモードファイバーレーザー(レンタル) 波長: 1.07 μm 出力: 2 kW (CW) 光学系: 1:1 (14 μm→20 μm), 1:3 (14 μm→50 μm)	光学系 1:1 3	0.3→0.6	貫通したが、繊維が残り未切断		In:	Out:	切断可能	
		10	0.4→×	一部貫通					
	ディスクレーザー 波長: 1.04 μm 出力: 10 kW (CW) 光学系: ビーム径 0.48 mm	15	In: 0.9 Out: 0.6	切断可能 繊維のはづれが目立つ	大きなブルームの発生・炭素繊維焼損	15	In: 0.6 Out: 0.5	切断可能 切断面粗い	
		18		切断不可		18	In: 0.5 Out: 0.4	切断可能 切断面粗い	
③フェムト・ピコ秒レーザー (レーザー総研)	フェムト秒レーザー 波長: 800nm, パルス幅: 100fs, 繰返し: 1kHz 出力: 0.5W 光学系: f=50mm(予定)	1	In: 0.1 Out: 0.05		貫通まで 800 往復 (50 分 8 秒)	1	In: 0.1 Out: 0.02		貫通まで 300 往復 (18 分 48 秒)
	ピコ秒レーザー 波長: 800nm, パルス幅: 200ps, 繰返し: 1kHz 出力: 0.8W 光学系: f=50mm(予定)	1	In: 0.06 Out: 0.02		貫通まで 300 往復 (18 分 48 秒)				貫通まで 25 分 4 秒)
	グリーンレーザー 波長: 532nm, パルス幅: 100ns, 繰返し: 20kHz 出力: 8W 光学系: f= mm	1	In: 0.1 Out:	貫通せず	最大15往復: 繊維方向依存性				
④紫外レーザー (産総研)	LD 励起 3 倍波固体レーザー 波長: 355nm, パルス幅: 20ns, 繰返し: 30kHz 出力: 4.5W (@30kHz, 150μ J/pulse) 光学系: Fθ レンズ WD=150mm, ガルバノ鏡走査	37.5	In: 30~40 Out: 5~10	良好	ビーム定常速度: 100mm/秒 繊維軸と平行 50mm/min ±垂直不良	In: 70μ m Out: 15μ m ↑ In: 70μ m (30:3/4 に到達)	【平行】 良好	ビーム定常速度: 100mm/秒	
⑤他手法との比較 (産総研・外注)	NCマシニング加工 (D)ダイヤミル(φ 5mm, φ 1mm) (S)超硬エンドミル(φ 5mm, φ 1mm) ※刃先角度異なる	100mm/分(D)5mm, 2400rpm 30/2mm/分(D)1mm, 4000rpm 100mm/分(S)5mm, 2400rpm 30/2mm/分(S)1mm, 4000rpm		繊維束/φ多(1回走査) 繊維束/φ多(3回走査) 繊維束/φ多(1回走査) 繊維束/φ少(3回走査)	上面直 100mm/分(D)5mm, 2400rpm 7/平行 100mm/分(D)5mm, 2400rpm	繊維束/φ多 (0.5ともに1回走査) 先端部のみ/φ多 (0.5ともに1回走査)			
	ウォータージェット加工(アプレシブジェット加工)	1.0	In: 1.0 Out: 0.8	良好	0.3	In: 1.0 ↓ 1.1 // Out: 0.8 ↓ //			

表 3.5.1 CFRPをレーザ加工したときの材料、加工条件、加工品質に関するマトリックス表フォーマット(2/5)

	レーザー装置	水準 No. 3 一方向 Vf=50 PPS プレス t3mm			水準 No. 4 ランダム Vf=25 PA6 プレス t2mm			水準 No. 5 長繊維ハレット Vf=20 PA6 射出 t3mm			
		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	
②高出力 レーザー (最大結合研)	シングルモード ファイバーレーザー	光学系 1:1 3 10	In: 0.5→0.5 Out: 0.3→×	切断面に繊維 が立立つ 未貫通	光学系 1:1 3 10	In: 0.7→0.5 Out: 0.2→×	繊維が目立ち、熱影響部 が大きい 一部貫通	光学系 1:1 3 10	In: 0.5 Out: 0.5	切断可能 繊維が目立つ 熱影響部が大きい	大きなブルームの発生 が熱影響部の原因
			ディスクレーザー 10 kW								
	18	In: 0.8 Out: 0.8		18	In: 0.8 Out: 0.8	切断容易 切断面粗い					
	③フェムト-ピコ秒 レーザー (レーザー研研)	フェムト秒レーザー	In: 1 Out: 0.02-0.1		貫通せず 〜3時間 でも貫通 せず		1	In: 0.2 Out: 0.02	51分42秒	1	In: 0.4 Out: 0.02-0.1
ピコ秒レーザー		In: 0.4 Out: 0.02-0.1	1	In: 0.1 Out: 貫通せず		最大25往復					
グリーンレーザー		In: 0.1 Out: 貫通せず									
④紫外レーザー (産総研)	LD 励起 3 倍波 固体レーザー	切断未達成 In: 70μm Out: 100mm/分	ビーム歪歪 速度: 100mm/分	33.3 mm/min	In: 70μm Out: 10μm	良好	ビーム歪歪 速度: 100mm/分	In: 100 (300-700μm) Out: 50 (400)μm	良好	ビーム歪歪 速度: 100mm/分	
⑤他手法との比較 (産総研・外注)	NCマシニング加工	上側直 100mm/分(D5mm,2400rpm) /平行 100mm/分(D5mm,2400rpm)	繊維束バリ多	100mm/分(D5mm,2400rpm)	バリ有		100/2mm/分(D5mm,2400rpm) 33.3/5mm/分(D11mm,4000rpm) 100/2mm/分(D5mm,2400rpm) 33.3/5mm/分(D11mm,4000rpm)	繊維束バリ多(2回走査) 上(6回走査) 繊維束バリ有(2回走査) 上(6回走査)			
	ウォータージェット 加工	0.3 In: 1.0 L. // Out: 0.8 L. 0.5 //		0.3 In: 1.0 Out: 0.8			0.3 In: 1.0 Out: 0.8	良好			

表 3.5.1 CFRPをレーザ加工したときの材料、加工条件、加工品質に関するマトリックス表フォーマット(3/5)

	レーザー装置	水準 No. 6 長繊維ハレット Vf=20 PP 射出 t3mm			水準 No. 7 長繊維ハレット Vf=20 ABS 射出 t3mm			水準 No. 8 短繊維ハレット Vf=20 PPS 射出 t3mm		
		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面 の特徴
②高出力 レーザー (最大結合研)	シングルモード ファイバーレーザー	光学系 1:1 3 10	In: 0.4→0.4 Out: 0.3→×	切断面に繊維 が立立つ 一部貫通	光学系 1:1 3 10	In: 0.4→0.5 Out: 0.4→×	切断面が薄のよう になっている 熱影響部大	光学系 1:1 3 10	In: 0.3→0.2 Out: 0.1→×	良好 未貫通
			ディスクレーザー 15							
	フェムト秒レーザー	In: 0.4 Out: 0.02-0.1		1時間 11分27秒	In: 0.4 Out: 0.02-0.1	1時間 11分27秒 茶色 に変色	In: 0.4 Out: 0.02-0.1	1時間 29分19秒		
		グリーンレーザー	In: 0.4 Out: 0.02-0.1							
③紫外レーザー (産総研)	LD 励起 3 倍波 固体レーザー	切断未達成 In: 80μm Out: 100mm/分	90°照射で 入射面に熱損傷 発生	切断未達成	In: 100μm Out: 100mm/分	長波照射で 入射面に熱損傷 発生	切断未達成	In: 100μm Out: 100mm/分	長波照射 で熱損傷 発生	
⑤他手法との比較 (産総研・外注)	NCマシニング加工	100/2mm/分 (D5mm,2400rpm)	バリ有(2回走査)	100/2mm/分 (D5mm,2400rpm)	バリ有(2回走査)	100/2mm/分 (D5mm,2400rpm)	バリ有(2回走査)			
	ウォータージェット 加工	0.3 In: 1.0 Out: 0.8	裏面に バリ発生	0.3 In: 1.0 Out: 0.8		0.3 In: 1.0 Out: 0.7				

表 3.5.1 CFRPをレーザ加工したときの材料、加工条件、加工品質に関するマトリックス表フォーマット(4/5)

	レーザー装置	水準 №9				水準 №10(ガラスファイバ)						
		短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm	短繊維ヘレット VF=20 PA6 射出 t3mm			
		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面の特徴					
②高出力レーザー (廠大接合研)	シングルモードファイバーレーザー	光学系 1:1	3 0.9→0.7	良好	光学系 1:1	3 0.5→x	未貫通	光学系 1:1	3 0.3→x	未貫通		
		10 0.5→x	未貫通	10 0.3→x		未貫通						
	ディスクレーザー	光学系 1:3	3 0.7→0.9	切替できなが、Out面での熱影響部大	光学系 1:3	3 0.5→x	未貫通	光学系 1:3	3 0.4→x	一部未貫通		
		10 0.6→x	未貫通	10 0.4→x		一部未貫通						
		15	In: 0.9 Out: 0.6	良好	15	In: 0.5 Out: x	表面未貫通					
③フェムト・ピコ秒レーザー (レーザー総研)	フェムト秒レーザー		In:0.4 Out:0.02-0.1		1時間43分23秒	1	In: 0.4 Out:0.02-0.1		1時間43分23秒	黄色変色		
	ピコ秒レーザー		In: 0.4 Out:0.02-0.1		1時間11分27秒	1	In: 0.4 Out:		貫通せず	変色はないが、3時間ですら		
	グリーンレーザー		In: Out:			1	In: 0.15 Out:		貫通せず	表面溶けるだけ		
④紫外レーザー (産総研)	LD 励起3倍波固体レーザー	30 mm/min	In: 80 (200µm) Out: 30 (100µm)	良好 ミクロチップ結晶も良好	ビーム走査速度: 100mm/秒	切断未達成 (10mm/min以下)	In: 50 (350µm) Out:		表面黒化			
⑤他手法との比較 (産総研・外注)	NCマシニング加工	100/2mm/分 (D5mm,2400rpm)		バリ有(2回走査)		100/2mm/分 (D5mm,2400rpm)		バリ有(2回走査)				
	ウォータージェット加工	0.3	In: 1.0 Out: 0.8			0.3	In: 0.9 Out: 0.6		溝底面にバリ発生			

表 3.5.1 CFRPをレーザ加工したときの材料、加工条件、加工品質に関するマトリックス表フォーマット(5/5)

	レーザー装置	水準 № MP27			水準 № ME15			水準 № ME30			
		PAN系90s/PITCH系アプレグ Eボキシ t2mm	PITCH系アプレグ 15wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 15wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	PITCH系アプレグ 30wt% PC 射出 t3mm	
		切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面の特徴	切断速度 (m/min)	切り幅 (mm)	切断面の特徴	
②高出力レーザー (廠大接合研)	シングルモードファイバーレーザー		In: Out:			In: Out:			In: Out:		
	ディスクレーザー 10 kW	15 m/min	In: 0.7 Out: 0.6	切断可能 繊維方向の影響有り	15 m/min	In: 2 mm Out: 1.3 mm	切断容易 幅広い 溶融 熱影響大	15 m/min	In: 1.7 mm Out: 1 mm	切断容易 幅広い 溶融 熱影響大	
③フェムト・ピコ秒レーザー (レーザー総研)	フェムト秒レーザー		In: Out:			In: Out:			In: Out:		
	ピコ秒レーザー		In:0.05 Out:0.01		1時間2分36秒	In:0.4 Out:0.02-0.1		1時間29分19秒	In:0.4 Out:0.02-0.1		1時間29分19秒
	グリーンレーザー		In: Out:			In: Out:			In: Out:		
④紫外レーザー (産総研)	LD 励起3倍波固体レーザー	切断未達成 裏面に部分的に透過光あり	In: 70µm Out:		25 mm/min	In: 50 (400µm) Out: 20µm	ビーム走査速度: 100mm/秒	25 mm/min	In: 70 (400µm) Out: 30µm	やや寛れて いるようだが、 ミクロチップ エック結晶 良好	ビーム走査速度: 100mm/秒
⑤他手法との比較 (産総研・外注)	NCマシニング加工 (D)ダイヤミル (φ 5mm, φ 1mm) (S)超硬エンドミル (φ 5mm, φ 1mm)	100/2mm/分(D5mm,2400rpm) 30/2mm/分(D1mm,4000rpm) 100/2mm/分(S5mm,2400rpm) 10/2mm/分(S1mm,4000rpm)		バリ 無し(1回走査) バリ 無し(4回走査) バリ 皆無(1回走査)		100/2mm/分(D5mm,2400rpm)	バリ有(2回走査)		100/2mm/分(D5mm,2400rpm)	バリ有(2回走査)	
	ウォータージェット加工	0.3	In: 1.0 Out: 0.8		0.3	In: 1.1 Out: 0.7		0.3	In: 1.2 Out: 0.7		

第4章 産業応用分野の要求・課題等

4.1 公的研究機関の取組

CFRP は比強度・比剛性が高く、軽量化に優れた材料である。そのため、公的研究機関においても、積極的に研究開発が行われている。ここでは、加工法に限定せず、公的研究機関が行っている CFRP 関連の研究について、学協等での発表例を中心に紹介する。

第34回複合材料シンポジウム

フェムト秒レーザーによる CFRP への高精度穴あけ加工

浜松工業技術支援センター

CFRP では、コスト高が課題となっており、高効率・高品質な加工法の確立が要求されている。浜松工業技術支援センターでは、フェムト秒レーザー再生増幅光（中心波長 802 nm、パルス幅 70 fs、パルス繰返周波数 1 kHz、平均出力約 500 mW）を用いた CFRP の穴あけ加工に関する研究が行われている。上記シンポジウムでは、厚さ 0.5 mm、2 層の CFRP に対しては穴径 2~4 mm、厚さ 0.75 mm、3 層の CFRP については穴径 6 mm の、溶融痕およびバリの発生のない貫通穴あけが報告されている。

第34回複合材料シンポジウム

薄層化 CFRP の断面観察による衝撃損傷モデルの構築

福井県工業技術センター、金沢工大

積層構造を有する CFRP は衝撃を受けると、層間はく離や亀裂等の外部からは確認の難しい損傷が発生し、その強度が著しく低下する。しかしながら、内部損傷の確認は、非破壊検査による観察が主流であり、詳細なメカニズムの解明は行われていない。福井県工業技術センターは、薄層化 CFRP の内部損傷を断面観察に基づきモデル化する研究を行っている。

第34回複合材料シンポジウム

薄層 CF/PA6 積層板の力学特性と損傷進展・修復評価

福井県工業技術センター、金沢工大

積層構造を有する CFRP は衝撃を受けると、層間はく離や亀裂等の外部からは確認の難しい損傷が発生し、その強度が著しく低下する。福井県工業技術センターでは、CFRP の母材に熱可塑性樹脂、強化基材に開繊炭素繊維を使用することで、耐損傷性を向上させつつ内部損傷を修復することができる CFRP の作製を行っている。

成形加工シンポジウム'09

炭素繊維含有ポリプロピレンの衝撃特性

東京都立産業技術研究センター

プラスチックは、炭素繊維などのフィラーを複合することにより高強度にはなるが、脆くなるという難点がある。プラスチックは、変形速度が速くなると延性的な破壊から脆性的な破壊へ破壊形態が変化する。東京都立産業技術研究センターでは、速い変形速度で行われる衝撃破壊に着目した研究が行われている。

石川県工業試験場研究報告 No.58(2009)

組紐技術を用いた CFRP 製品の開発

石川県工業試験場、丸井織物、金沢工業大学、石川県産業創出支援機構

組紐は、製品の長手方向に対して、二群の繊維（組糸）が交互に軸対象に傾斜配向し、繊維が切断されることなく交差することによって形成されたもので、平打ちと呼ばれる平板形状と、丸打ちと呼ばれる円筒形状がある。石川県工業試験場では、組紐の製造技術を CFRP の強化材、即ち、先進複合材料用の基布製造手法に適用し、曲げ剛性が高い筒型長尺部品である産業用ロボット腕の開発を行っている。

成形加工シンポジウム'09

四軸織物複合材料の力学的評価

岡山県工業技術センター、明大株式会社

四軸織物は、タテ糸、ヨコ糸、及びタテ糸とヨコ糸に対して $\pm 45^\circ$ 方向に斜め糸を有する織物であり、従来の二軸織物と比較して、引張強さや弾性率の力学的等方性、および耐引裂性に優れた特徴を有する。現在、その優れた形態保持性を活かして、ゴルフクラブのシャフト、テニス・卓球ラケットなどのスポーツ用品分野、耐震補強材としての建築分野に用途展開されており、今後さらに自動車分野への応用が期待されている。しかしながら、四軸織物を複合化した四軸織物複合材料の物性については、十分に明らかにされていない。

岡山県工業技術センター、四軸織物複合材料の力学物性の評価を進めている。

表 四軸織物の特徴

項目	二軸織物との比較	外観
① 形態安定性 クワ強度/バイアス強度	1/20以下	
② 耐引裂性	2倍以上	
③ 耐衝撃性	4倍以上	
④ 耐クリープ性	1/2以下	
⑤ 曲面形成、張り強度		

その他の着目すべき研究

<http://www.pref.hiroshima.lg.jp/page/1201589124895/index.html>

炭素繊維複合材料利用研究会

広島県立総合技術研究所、マツダ他

炭素繊維材料を使った自動車部品の開発に取り組むために設立された研究会（2010.03.22）で、繊維の状態からCFRPに低コストで成形加工する量産技術を探ることを目的としている。5年後を目処に部品の製品化し、自動車の10-20%の軽量化を狙う。

4. 2 CFRP産業・実用化に関する現状と将来ビジョン

製品製造分野においては強くて軽い素材というものは、特に運用する製品（例えば、航空機や自動車等）では、到達点のない素材開発や加工法を検討せねばならず、堅く丈夫な上での難加工を成形加工するということは、これこそ“矛盾”という言葉で地味でいっているに他ならない。

現在、高剛性、軽量素材のトップをいくCFRPは、10数年前より、素材の高価、難加工故に理想とされつつも量産生産には不向きとされ、高価な製品に使用されるようになっており、今もこれは代わることはない。ただ、素材開発も進歩し、スペック的には落ちるが、製品性能を維持できるだけの品質で量産性の優れた素材も開発されつつあり、徐々にではあるが適用範囲も広がりつつある。

本調査では、素材開発とともに重要な製品製造の要でもある加工（切断、接合）を従来の技術ではない新しい技術、非接触加工で、CFRPを高速処理できる次世代の加工法を“レーザー”という分野で実現し、環境によい製品製造のパラダイムシフトをおこすことを目標に、現存技術をいかに高めるかの検討を現存技術の各種実験から導き出してきた。また、それらを定量的に捉えることで夢を追い続けるのではなく、足下から徐々に技術を上げていく方法が、新たな製品製造へ向けての地道ではあるが近道であることが判明した。

今回、これら現存技術における新素材の加工実験を通して、得られた知見から、素材メーカー、加工メーカー（ジョブショップ含む）、ユーザーの委員会において自由討論という形式で、産業（製品製造）展開や素材特性等の検討を行った内容を以下に記載する。

本分野は、技術的に先端分野に属するため、本文中には具体的な製品名や企業特定を行えるような記述は回避している。

4. 2. 1 CFRP素材の展開

CFRPの最大限の特徴は、高剛性、軽量化であるが、樹脂と繊維の織りこみや成型方法で素材が持つスペックにかなりの幅を持つことになる。また、代表的な素材としては、PAN系とピッチ系（第2章参照）があり、汎用的にはPAN系が普及している。ピッチ系は高弾性機能や熱伝導率が優れているため、今後その特長を活かした製品設計をすることで、高機能な製品を生み出すことが可能となる。

具体的には、ピッチ系は弾性率が極めて高く（PAN系の10倍程度）、熱伝導率も良好である（50に対して650）。デメリットとしては、価格が高い、原料の確保が課題で、石炭系ならびに石油系のピッチ原料がある。

環境面では、素材開発段階だけの観点で考えるとCO₂削減はかなりの困難性を伴うが、製造された製品（この場合、自動車）が軽量化による得られるCO₂効果は、製品製造のマイナス面を大きく上回ることになるため、トータルで試算すれば、環境重視、低炭素化社会実現への有用な素材となる。

具体的には、金属材料からCFRPに変えると材料製造段階ではCO₂排出は多くなるが、製品の使用時に自動車重量の軽量化によるCO₂の削減効果が出てくる。これらをトータルで考えると自動車1台あたり約5tonのCO₂削減に繋がることからLCAの試算から判明している。

また、様々な製品にCFRPは多用化されつつあるが、具体的には航空機、自動車の割合が高い。その他、今後の日本の産業展開を考えると原子力分野や医療機器分野が期待されている。また、OA分野にも適用が可能となっている。ただ、製品製造全体がCFRPに置き換われれば正確な需要予測も可能であるが現段階では、産業用途と大括りになっており、細かい部品レベル等は把握できていない。現時点の産業用途の市場予測として、2020年で12万トン、13万トンのCFRの使用を予測。10万トン位が産業用途と想定されている。斬新なアイデアに基づく産業界としての活用、ニーズを抜き出すようにしたい。特に日本発の事例を数多く生み出していきたいと考えている。その他、加工手法として切断が主流に思われているが、他異種材の接合も日本の技術優位性にとって重要な技術開発項目と言える。

現在利用されているピッチ系の製品は、大型のガラス基材を搬送するロボットアームや宇宙衛星の太陽電池フレーム部分等に利用されている。汎用の民生製品で主要部分はPAN系が使用されている。高弾性、熱伝導率、剛直な素材、ヤング率5倍くらいの用途に対しては、ピッチ系材料を使う複合的な利活用を設計時点に遡って考えていくことが重要と考える。

4. 2. 2 CFRP活用製品の加工・製造時の問題点とポイント

現在のCFRPの加工手法は、超鋼工具を利用した工作機械か、ウォータージェットの活用が製造現場で実際に使用されている。それらの加工法では様々な仕様が考えられるが、現在最も期待度が高いのはウォータージェット加工である。しかし本法は、水を利用している観点から製品や部品加工時に、基材が濡れてしまい、乾燥工程が必要となることからコスト増要因となってしまう。また、自動車のようなタクトタイムが短くすることが要求される製造工程の場合は、それら乾燥にかかわる工程を付加することは難しい。一方、航空機に関しては厚さ25mmの加工が可能であることが強く要求されており、これが実現できないと実用化はかなり困難である。その他、製品安全性等の観点から各種認定制度があり、その認証手続きを考えると新技術を活用した加工法の実用化には10年近くかかってしまう状況がある。したがって、今すぐ早急に製品製造現場に新しい加工技術を導入する観点では、かなりの障壁が存在している。また、製造コストや素材スペック以外にも、加工後の製品製造や部品の信頼性（切断面や接合強度等）も重要な要素になっている。

また、穴あけ加工のような場合は、ウォータージェット法によるピアッシング加工は、絞り込みの難しさ故、最初の1打で部材内部の界面層剥離をおこしてしまい、製品として活用は難しい。熱損傷の不具合を解消することができれば、将来的にはレーザー加工はその他の加工法と比べ優位なポイントが多々存在する。

社会環境も無視できない。環境対応自家用車として、ハイブリッド100万台といわれており、社会の流れは化石燃料自動車からの脱却が既定路線になりつつある。

製品のパラダイムシフトがおこる今こそ、新たな技術の導入時期としては最も適切だと考えられる。例えば、電気自動車（EV）とCFRPの親和性に関しては、EVではエンジンがなくなり、高熱部が無くなり、軽量化も進むので好都合である。車体設計そのものも変化していく。その他製品応用としては、

- －福祉ロボット
- －医療機器
- －パソコン
- －携帯の筐体
- －3次元の測定加工機
- －工作機械

などが挙げられる。

ニーズの観点からは、航空機を例にとると、航空機のCFRPの活用はエンジン部分。それらの加工には、穴空け5～10mm以上。共穴を空ける要望が高い。飛

行機の場合は、大量生産要求はないため、現時点の解決方法として低速度の加工手法でも導入することは可能ではあるが、極力タクトタイムを短くしてコストを下げするためには、穴あけ作業を一度に複数個、高品質で空ける必要性がある。また、ウォータージェットの加工のように、穴にクラックがあると破損の基点になる。それらが解決するのであればレーザー加工はかなり現実味を帯びてくる。ただ、CWレーザー加工の場合は、発熱の問題があるので、熱以外での加工（例えば、光加工等）が出来ることが望ましい。現在はボール盤利用しているところに導入を考えたときに、ボール盤加工はコストが安いので、コスト対比での勝負になる。レーザー装置としては、2000万円位であると導入可能性が検討される。最終的には投資対効果から設備投資を導き出されるので、これでしかできない独自技術か。相対的に安価な製造設備かを考慮したうえで判断される。

4. 2. 3 CFRP加工のレーザー加工に望むこと

製品加工の製品側から見たレーザー加工にはどのような要求があるのか。を中心に以下の様な検討を行った。

- ・表面の品質を上げたい。成形の地肌まではいかなくても材料の特性を引き出す所までいきたい。その後、信頼性をあげたい。また、それを保証する内容が出来たら好都合。その上でフィードバックが出来ると普及するのではないかと考えている。
- ・第1のポイントとして、レーザー加工でいろいろなことが出来ると巷間言われるが、経営者から見るとレーザー主体ではなく、一つの加工方法に過ぎない。第2のポイントとして、レーザー加工の優位性を明示し、企業活動に使えることを明確にすることが必須。日本独自のレーザーのあり方を追求する必要がある。例えば、ポータブルで持ち運べて、自動制御等が出来るような装置を開発する、など。外国ではレーザー装置に合った製品製造設備を作っている。これは日本では出来ないところが問題。生産に直結した考えでレーザー活用を考えていないのでは。日本の造船が儲かるのは、信頼性の向上のための熟練技術を極限まで育てているからで、他の観点では日本の生産に関して徹底的にシミュレーションを高めていく仕組みを考えていく必要がある。そのような仕組みで日本の技術立国をする必要がある。第3のポイントとして、日本のレーザーのアドバンテージのポイントが見えない。外国に負けているのであれば、それを凌駕するような発振器を作らなければならない。
- ・CFRPの切断加工に特化した話で考えると、樹脂とカーボンという熱特性の違う材質を同時に熱加工すること自体無理な工程である。それを無理にやろうとする

と低速度の繰り返しで切断するしかない。これでは産業実用化は無理である。もっと手先部分でのさらなる工夫が必要ではないかと考える。

- ・ファイバーレーザー開発が立ち上がるのであればピコ秒を立ち上げないと片手落ちになる可能性がある。2桁パルス幅のピコ秒でパワーのあるレーザー装置を立ち上げた方が良く考える。うまくやれば1/10のエネルギーで切断が出来る。

特性をいかした手法を考えていくことを検討する必要がある。

- ・レーザーは非接触加工が可能であることが大きな特徴。機械加工のような接触抵抗はないという利点がある。高速でビーム走査することが可能。外国メーカー製装置の性能を超える国産のレーザー加工装置の出現を期待している。

- ・CFRPの加工要求からレーザー装置の構成を考えたが、ダイレクトの10m/分で切ろうと思うとかなり厳しいスペックになる。穴あけだけであればコストを下げたやり方があると考え。

- ・あくまでも世の中に出る装置を目指した研究開発を進めることを考えて欲しい。

- ・難削材であるCFRPの利用シチュエーションを考えるべき。

- ・今回はCFRPが対象となっているがレーザー加工がメイン。すでに確立した加工手法がある分野では、新技術はなかなか入り込めない(コストや部材の点で)。そのため、加工の生産性を上げる観点での工夫をもっと進めていくべきではないかと考えている。光でないと出来ないことを考え、そのためのレーザー装置を考えていく必要がある。

- ・日本のレーザー加工は、初期投資が高いと言われて、大量には使われない現状がある。しかし、ニーズや利用シチュエーションの種はかなりある。そのために是非国プロでは格安にして提供できる製品技術開発を考えて欲しい。又、周辺技術との成熟が出来ていない。回りの技術動向を考慮しながら研究開発を実施する必要がある。

- ・レーザー発振器本体と周辺技術とユーザ側の使用技術の3つが揃わないと機能しない。CFRP加工では高ピーク、高繰り返しが理想と考える。その後には短パルスの高出力・高繰り返しが実現できるレーザー加工装置が必要。実現するためにデブリが出ない加工技術開発を目指す必要がある。

- ・レーザーの性能を規制するパラメーターもあるが、ビームのコヒーレンシーも重要な観点。光が持つ性能をバランス良く展開し、高いスループットが実現していく方策が必要と確信している。

- ・まずはやってみないとわからない。出来ないと言われてそのままに放置したら発展は一切ない。まず、やってみたら出来ることも多々あるし、その時に新たな問題点も明確になっていく。今回も昔のレーザーでは出来ないが、今のレーザー技術で

あれば出来るようになってきている。将来的には解決するであろう方策を模索する必要はある。

- ・基本的には産業用のレーザー装置として使えるものを完成して欲しい。使える、使えない、という判断をしながら、研究開発を考えて欲しい。また、日本のレーザーの何を世界のTOPに持って行くのかを明確にしていくべき。重要な視点と考える。

- ・すべての根源を、発振器の開発を行うことだけではリスクを感じる。

- ・現実的な解としては大型ピコ秒レーザー装置が欲しい。CFRPも太陽電池にも利用できる。

4.3 まとめ

今回、レーザー開発及び加工プロセス開発の2つの視点で検討を行ってきたが、CFRPという具体的な素材をベースに考えると以下の様にまとめることができる。

- ・ 新素材としての剛性を高めたチャンピオン素材（クロス材等）に関しては、加工は困難→CFRPの利点を失わない加工しやすい素材必要
- ・ 現在、汎用素材として開発が進んでいるCFRP素材は条件が整えばレーザー加工の有効性はかなり期待できる。
- ・ レーザー加工に関しても、単なる高出力より多波長の繰り返しによるある程度の出力が得られれば十分産業としての活用が可能
- ・ 今後より精緻な分析を行い、品質確保とコスト等の観点での検討が重要

第5章 複合材料対応次世代レーザー加工プロセス設計

5.1 光源開発を中心としたレーザー加工プロセスの検討等

第3章における既設レーザー装置の加工特性検討結果から得られたベンチマーク値を用いて、加工ユーザーが希望する加工スペック値に外挿することで、今後必要とされるレーザー装置システムの性能を検討した。

自動車製造分野に CFRP 部材を導入するには、製造ラインのタクトタイム 1 min 以内を最重要視する必要がある。このとき、大型の部材はルーフやフードであるので、外周トリミング加工を行うには普通乗用車を想定すると 1 回の加工で約 6 m を処理する必要がある (1.5m 長の合計四辺)。したがって、タクトタイム内における基材搬送時間も考慮して、実質の加工時間を勘案することで、

a. CFRP の加工スペック (試案)

目標：切断速度 10m/min 以上 (基材厚み 4mm 以上)

を設定した。このとき、競合技術となるウォータージェット加工では、参考データ (精密工学会誌、75 巻 8 号 p.945(2009).) によると試料厚 4 mm のとき、約 1m/min が報告されているので、現行のウォータージェット加工では大型部品を加工するために自動車製造ラインに導入することは困難である。

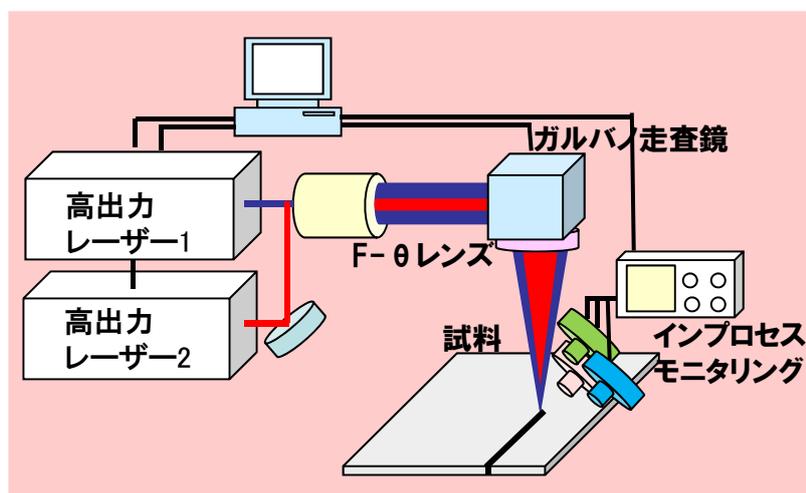


図 5.1 複合材料対応次世代レーザー加工システムの提案

一方、第3章の実験データからレーザー装置への要求スペック試算するとき、CW レーザー装置では本質的に基材への熱損傷を回避できるかどうか、現時点では解決策が不明であることから、パルス発振方式の装置構成を提案する。このとき、ベンチマーク値から外挿して、

基本波パルス： ～ 10 kW

(水準 No.1,5,6,7,9 試料: 15m/min x 3/4 = 11.3m/min)

3倍波パルス： > 1.5 kW

(No.9 試料: 30mm/min x 3/4 x 400 = 9m/min、4.5W x 400 = 1,800W)

が算出される。この2つの試算値は各々レーザーを単独で用いた時に要求される値であるので、仮に多波長型で複数のレーザー装置を重畳して加工システムを構成する場合には、各々のレーザー装置に要求される性能出力値はこの値よりも低減される。加えて、重畳照射の場合はレーザービームの重なり方法にも自由度を持たせた最適化状態で照射を実施することが期待される。これは、レーザーパワーと加工速度の単純な直線補間の関係ではなく、重畳照射による加工効率化係数が作用因子として機能すれば、各レーザー装置からの総出力値を低減させても、同等の加工速度が得られることを想定している。図 5.1 に示すように2台の高出力レーザーを導入することで、複合材料対応の次世代レーザー加工システムが構成される。

切断・接合加工技術の進歩において、加工速度と加工品位の両立は必須であるものの、両者は往々にしてトレードオフの関係にあることが多いために、その技術的解決は困難を伴うことが多い。しかしながら、レーザー加工では、加工に作用する時空間を巧妙かつ精密に制御することができるので、新型光源装置の開発とともに歩調を合わせてプロセス技術も進歩していくことで、加工速度と加工品位の両立を図れることに大きな関心が集まっている。

以下に、CFRP 材料のレーザ加工に関わる論文リストを示す。これは、ISI 社データベース等を用いた検索結果である。

著者 1 : R. Negarestani, L. Li, H.K. Sezer, D. Whitehead, J. Methven

タイトル 1 : Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases

誌名等 1 : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
(印刷中 (web 公開)、DOI 10.1007/s00170-009-2431-y)

著者 2 : Z.L. Li, P.L. Chu, H.Y. Zheng, G.C. Lim

タイトル 2 : Process development of laser machining of carbon fibre reinforced plastic composites

誌名等 2 : SIMTech technical reports, vol.10(1) pp.10-14 (2009).

著者 3 : D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier, H. Haferkamp

タイトル 3 : Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP

誌名等 3 : International Journal of Machine Tools & Manufacture,
vol.48(12-13), pp.1464-1473 (2008).

著者 4 : T.M. Young

タイトル 4 : Impact of Nd-YAG Laser Drilling on the Fatigue Characteristics
of APC-2A/AS4 Thermoplastic Composite Material

誌名等 4 : Journal of Thermoplastic Composite Materials vol.21(6),
pp.543-555 (2008).

著者 5 : F.A. Al-Sulaiman, B.S. Yilbas, M. Ahsan

タイトル 5 : CO₂ laser cutting of a carbon/carbon multi-lamelled plain-weave
structure

誌名等 5 : Journal of Materials Processing Technology vol.173(3), pp.345-351
(2006).

著者 6 : A.A. Cenna, P. Mathew

タイトル 6 : Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre
reinforced plastics (FRP) composite materials

誌名等 6 : International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.42(1),
pp.105-113 (2002).

著者 7 : C.T. Pan, H. Hocheng

タイトル 7 : Evaluation of anisotropic thermal conductivity for
unidirectional FRP in laser machining

誌名等 7 : Composites: Part A, vol.32(11) pp.1657-1667 (2001).

著者 8 : A.A. Cenna, P. Mathew

タイトル 8 : Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastic-A review

誌名等 8 : International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.37(6),
pp.723-736 (1997).

著者 9 : H.Niino, M. Nakano, S. Nagano, H. Nitta, K. Yano, A. Yabe

タイトル 9 : Excimer laser ablation of polymers and carbon fiber composites

誌名等 9 : Journal of Photopolymer Science and Technology, vol.3(1) pp.53-56
(1990).

著者 10 : V. Tagliaferri, A Di Ilio, I.C. Visconti

タイトル 10 : Laser cutting of fibre-reinforced polyesters

誌名等 10 : Composites, vol.16(4) pp.317-325 (1985).

第6章 結び

6.1 総括及び結論

第1章では、本事前研究に係る目的として、革新的材料（CFRP）の加工の必要性が述べられている。そして、研究遂行のために実施された委員会の体制と運営について記されている。

第2章では、革新的材料（CFRP）の現状と製品使用例、環境対策等の課題および問題点とその対策についてまとめられている。

第3章では、実証試験の内容と結果について報告されている。

まず、大阪大学においては、レーザーパワー10 kW、切断速度15 m/minでは、ほとんどのCFRPに対して、1パスでレーザー切断が可能であることを明らかにしている。レーザー入熱およびレーザー誘起プルームの発生によって、切断面が溶融し、さらに熱影響部が生成することを示している。低パワーでの超高速レーザー切断では、入熱量を押さえることができると、切断面の溶融および熱影響部の拡大を抑えた比較的高品質な切断部の作製が可能であることを明らかにしている。さらに、CFRP（PA基）と金属（SUS 304）とのレーザー直接接合において、レーザーを金属側から照射した結果、高強度継手の作製が可能であることを明らかにしている。

レーザー総研においては、フェムト秒レーザーやピコ秒レーザーを中心とした短パルスレーザーによるCFRP切断、穴開け加工特性に及ぼすパルス幅依存性および波長依存性について明らかにされている。パルス幅は100fs～200nsの間で、波長は400nm～1064nmの間で変化させ、切断・溝加工のレーザーパラメーター依存性を調査すると共に加工部周囲の熱影響層が狭いことを観察されている。

産総研においては、波長355 nmのナノ秒パルス紫外レーザー装置を用い、複数種類のCFRP試料片に対して切断や穴あけ加工を行い、加工速度、加工深度、切り幅等の加工因子の相関を明らかにされている。加工後の試料面の形状について、SEM観察、長深度光学顕微鏡観察等を駆使して、レーザー切断面に与える照射条件の影響について分析評価を行い、紫外レーザー加工によって高品位な加工が実施できることを明らかにされている。しかし、レーザー装置の平均出力が小さいことから、加工速度は数cm/min程度に留まっている。また、一部試料においては、裏面までの完全切断に至らないケースもあり、今後の課題となった。また、他の加工法の結果も評価されている。

第4章では、産業応用分野での溶融や課題がまとめられている。

第5章では、次世代レーザー加工プロセス設計の指針を示している。