

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRP等複合材料の高能率
・高精度ハイブリッドレーザ加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年3月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 株式会社最新レーザー技術研究センター
国立大学法人岐阜大学

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

地球環境問題の1つであるCO₂ガス排出の抑制に非常に効果があるCFRP複合材料の利用拡大をするためには、CFRP製品の成形技術及び加工技術の早急な開発が国際的課題になっている。現在、ダイヤモンドコートされた切削工具による切断等は、CFRP部材の加工に利用されているが、工具が高価であったり、刃の摩耗が速く、摩耗してくると剥離やケバが生じたり、加工面粗さが悪化する。切断速度が遅いこと、微細な加工ができないこと、粉じんが人体によくないことなど問題が多い。ウオータージェット切断機は非常に高価で、ランニングコストも高く、3次元加工が難しいことや、研磨剤と水との分離などに問題がある。

本研究開発はこの加工を高精度を維持しながら生産性向上を図るために、CW発振で高輝度のファイバレーザと超短パルスQスイッチYAGレーザを試作するビーム分岐合成光学系で分岐・合成・集光・スキャン操作したハイブリッドレーザ加工システムを試作し、従来のレーザ加工システムより約10倍高速化した高能率・高精度のレーザ加工法を開発する。

(1) 研究開発の背景

現在、地球環境問題で大きく問題になっているのはCO₂排出問題である。主に輸送機器からのCO₂排出が問題視されていることから、これらの輸送機器の構造部材を軽量化して、30%重量を低減することができれば、かなりCO₂の排出が低減できる。また、将来CFRP材料を輸送機器の部材として適用できれば、航空機及び自動車の軽量化、燃費向上、CO₂ガスの排出量の低減などの課題を解決することができる。しかし、このCFRP材の切削加工は高価なダイヤモンドカッターや高価なウオータージェット切断機などを用いるため、CFRP製品がより高価になり、その適用が限定されているのが現状である。自動車産業でもすでにCFRP部品が一部適用されているが、高価な自動車に適用が限られている。しかし、平成26年4月にBMW社はCFRP製EV車を量産製品として、発売を始めている。また、CO₂ガス排出量を抑えたボーイング787型機は機体の52%にCFRPを採用している。今後ますます、CFRP複合部材は工業的製品の各所に利用が期待されている。このようにCFRP複合材料の工業的利用は拡大しているが、この新材料を高精度で、高能率で、人体に安全な形で加工する技術が世界各国で開発されつつある。そこで、レーザアブレーション現象を用いて安全にレーザ加工する方法を開発することが期待されている。ドイツでもCFRPのレーザ加工の研究・開発が盛んに行われている。

(2) 研究目標

1) 航空機分野に関する事項

① 川下製造業者等の特有の課題およびニーズ

イ. 信頼性向上

ウ. 軽量化、ネットシェイプ化

エ. 燃費向上

オ. 新材料(CFRP等)加工対応

② 高度化目標

本開発目標 板厚10mmのCFRP材の切断加工速度を100mm/minに高速化する。
加工(切断)品質の目標値として寸法精度: $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下、
切断面粗さ: $\pm 3 \mu\text{m}$ 以下とする。

2) 自動車分野に関する事項

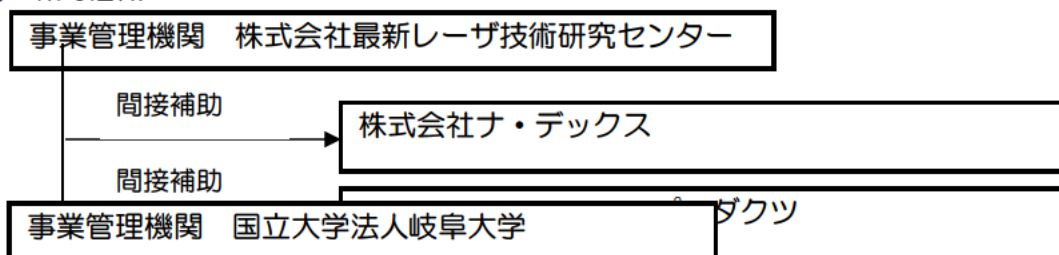
① 川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

- イ.軽量化
 - エ.燃費向上
 - ③ 高度化目標
 - ア. 衝撃を吸収するために工夫された構造と素材に対応した加工技術の構築
- 本開発目標 板厚10mmのCFRP材の切断加工速度を100mm/minに高速化する。
加工（切断）品質の目標値として寸法精度:±10 μm以下、
切断面粗さ:±3 μm以下とする。

地球環境問題の1つであるCO2ガス排出の抑制に非常に効果があるCFRP複合材料の利用拡大をするためには、CFRP製品の成形技術及び加工技術の早急な開発が国際的課題になっている。本研究開発はこの加工を精度を維持しながら生産性向上を図るために、CW共振高輝度レーザーと超短パルス共振レーザーを特殊光学系で合成し、従来の約10倍高速化した高能率・高精度のレーザー加工法を開発することが目的である。

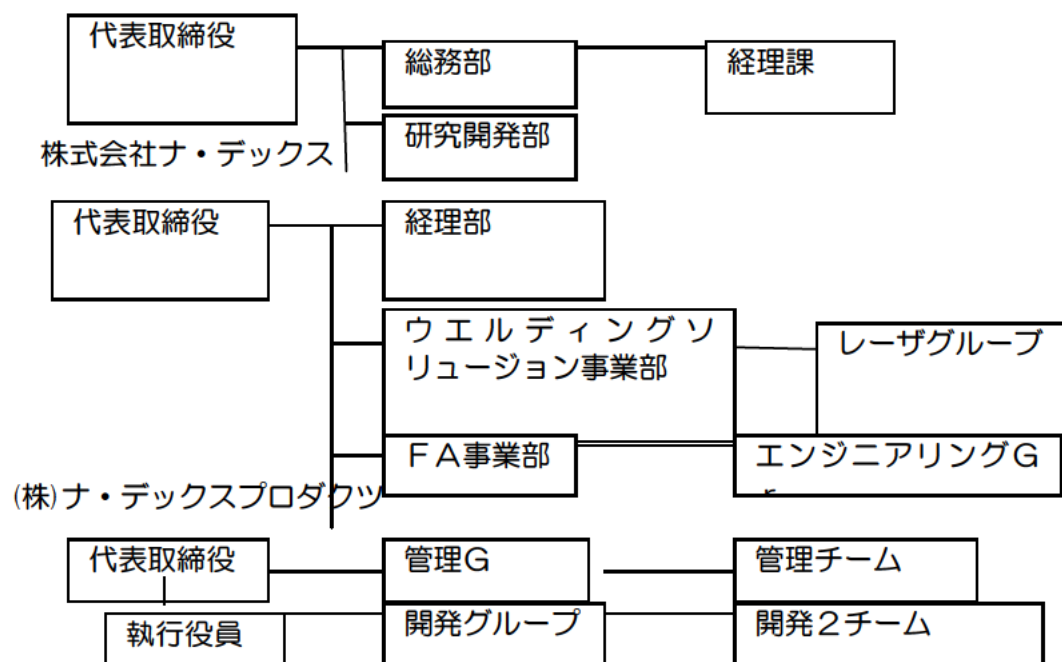
1-2 研究体制

1. 研究組織

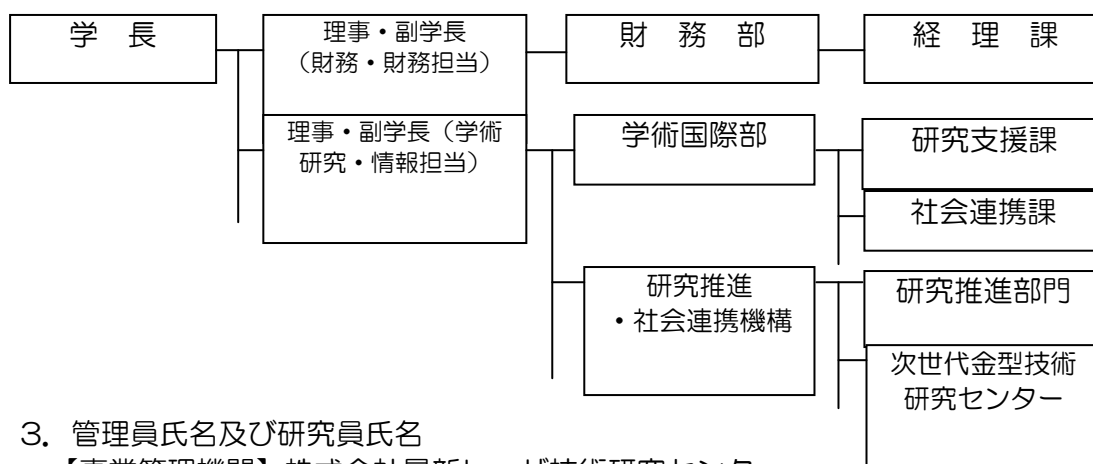


2. 研究体制

①株式会社最新レーザー技術研究センター



②国立大学法人岐阜大学



3. 管理員氏名及び研究員氏名

【事業管理機関】株式会社最新レーザ技術研究センター
管理員

氏 名	所属・役職
沓名 宗春	代表取締役
沓名 祥子	総務部長兼経理課長

研究員

氏 名	所属・役職
井上 裕喜	研究開発部 研究員
岩瀬 和久	研究開発部 研究員

【間接補助事業者】

研究員

株式会社 ナ・デックス

氏 名	所属・役職
田中 康二	ウエルディングソリューション事業部 レーザグループ 課長
山崎 滝	FA事業部 エンジニアリングG 係長

株式会社 ナ・デックスプロダクツ

氏 名	所属・役職
中塚 好寿	開発グループ、開発2チームリーダー
花田 芳樹	開発グループ、開発2チーム研究員

国立大学法人 岐阜大学

氏 名	所属・役職
深川 仁	次世代金型技術研究センター 特任教授

4. 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社最新レーザ技術研究センター

(経理担当者) 総務部 経理担当課長 沓名 祥子

(業務管理者) 研究開発部長 沓名 宗春

(間接補助事業者)

株式会社ナ・デックス

(経理担当者) 経理部長 城谷 啓介

(業務管理者) ウェルディングソリューション事業部長 本田 信之

株式会社ナ・デックスプロダクツ

(経理担当者) 管理 G 管理 T チームリーダー 今井 智宏

(業務管理者) 執行役員 高橋 理

(事業管理機関)

国立大学法人 岐阜大学

(経理担当者) 社会連携課 課長補佐 岡田 章宏

(業務管理者) 研究推進・社会連携機構産官学連携推進本部 准教授 中川 勝吾

1-3 成果概要

初年度はハイブリッドレーザ加工システム全体のうち、①ビーム分岐・合成光学系の設計・試作、②平均出力150Wの超短パルスレーザであるQスイッチYAGレーザの導入、③高エネルギー・高精度ハイブリッドレーザ加工システムの設計・試作、④ハイブリッドレーザ加工システムの制御・運転に関するソフトの開発を行った。この中で、①の光学系を試作したところ、試作した光学系に不具合が確認され、H28年度にこの設計をやりなして、試作した。再度評価試験をしたところ、高出力のグリーン（波長：532nm）を伝送する光ファイバーが十分な性能がなく、装置を完成することができなかった。H27年度にはCWで高輝度の500WSM（シングルモード）のファイバーレーザを導入するとともに、スキャナーシステムも導入した。システム制御ソフトの設計・試作も進めた。そこで、最終年度のH28年度には、今年度はハイブリッドレーザ加工システム全体を完成させることに力を入れ、①500Wシングルモードファイバーレーザの導入・システム化、②デジタルスキャナーを用いたビーム分岐・合成・集光光学系の設計・試作、③高ピーク出力密度に耐えられるファイバー伝送系の設計・試作、④アッテネータの導入による、超短パルスレーザの安定な出力調整、⑤ロボットのアームにビーム分岐・合成・集光光学系を装着、⑥ハイブリッドレーザ加工システム全体の制御盤の完成およびシステム制御ソフトの設計・試作、⑦安全柵の導入によるレーザ装置の安全対策等を行った。ほぼ、市販できるハイブリッドレーザ加工システムを完成できた。H26年度およびH27年度にできなかった2種類のレーザを合成した（ハイブリッド）レーザ加工システムでいろいろと評価実験ができた。その結果、超短パルスレーザを高速度でスキャンした条件では、切断面が完璧にアブレーション加工されており、加工精度（面粗さ）は3μm以下になり、高精度の加工ができることが確認できた。また、多数の穴あけ加工実験では、16ヶの穴を65.7秒で加工できた。直線の切断速度は300mm/minと従来の15Wの超短パルスレーザで加工したときに比べて、6倍の加工速度であった。機械的特性を有孔引張試験により比較評価した結果もハイブリッドレーザ加工の試験片はドリル加工よりも高い値を示した。全体を完成させることに力を入れ、①500Wシングルモードファイバーレーザの導入・システム化、②デジタルスキャナーを用いたビーム分岐・合成・集光光学系の設計・試作、③高ピーク出力密度に耐えられるファイバー伝送系の

設計・試作、④アッテネータの導入による、超短パルスレーザの安定な出力調整、⑤ロボットのアームにビーム分岐・合成・集光光学系を装着、⑥ハイブリッドレーザ加工システム全体の制御盤の完成およびシステム制御ソフトの設計・試作、⑦安全柵の導入によるレーザ装置の安全対策等を行った。ほぼ、市販できるレーザ加工システムを完成できた。H26年度およびH27年度にできなかった2種類のレーザを合成した（ハイブリッド）レーザ加工システムで評価実験ができた。その結果、超短パルスレーザを高速度でスキャンした条件では、切断面が完璧にアブレーション

加工されており、加工精度（面粗さ）は $3\mu\text{m}$ 以下になり、高精度の加工ができることが確認できた。また、多数の穴あけ加工実験では、16ヶの穴を65.7秒で加工できた。直線の切断速度は 300mm/min と従来の15Wの超短パルスレーザーで加工したときに比べて、6倍の加工速度であった。機械的特性を有孔引張試験により比較評価した結果もハイブリッドレーザー加工の試験片はドリル加工よりも高い値を示した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(株)最新レーザー技術研究センター

代表取締役 沓名 宗春

電話：0566-91-2281、FAX：0566-91-2282

E-mail：altrec-kutsuna@nifty.com

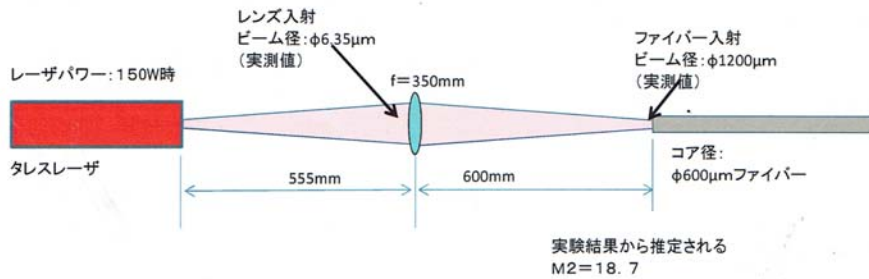
第2章 — 本論 —

(1) ビーム分岐合成光学系の設計・試作

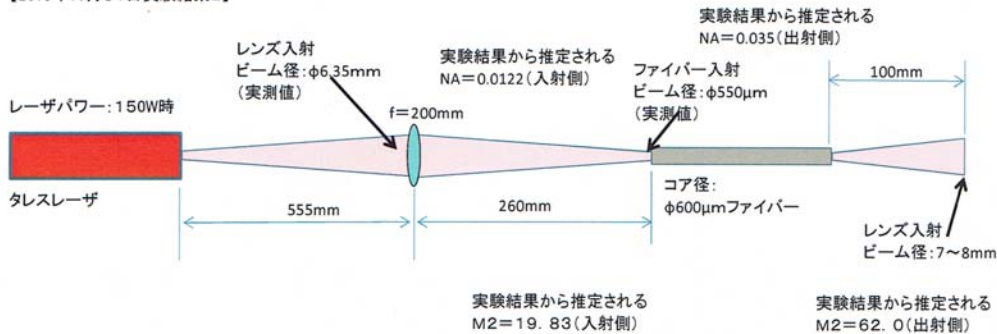
(1-1) ビーム分岐合成光学系の設計・試作

昨年度設計・試作したビーム分岐・合成光学系は高ピーク出力密度のレーザービームの伝送系に問題があったので、この問題を解決するために、伝送用ファイバーのコア径を $200\mu\text{m}$ のものから $600\mu\text{m}$ のものに変更し、設計を再度おこない、試作した。ビーム分岐・合成光学系に導光するファイバー伝送系の光学設計図を図 3.1.1 に示す。この対策により、150Wの超短パルスYAGレーザーのビームが伝送できるようになった。図 3.1.2 は最終的に集光されたレーザービームのビーム径（設計値）を示す。ファイバー伝送系でレーザー発振器より

【2016年10月31日実験結果1】



【2016年10月31日実験結果2】



【対策案】赤矢印

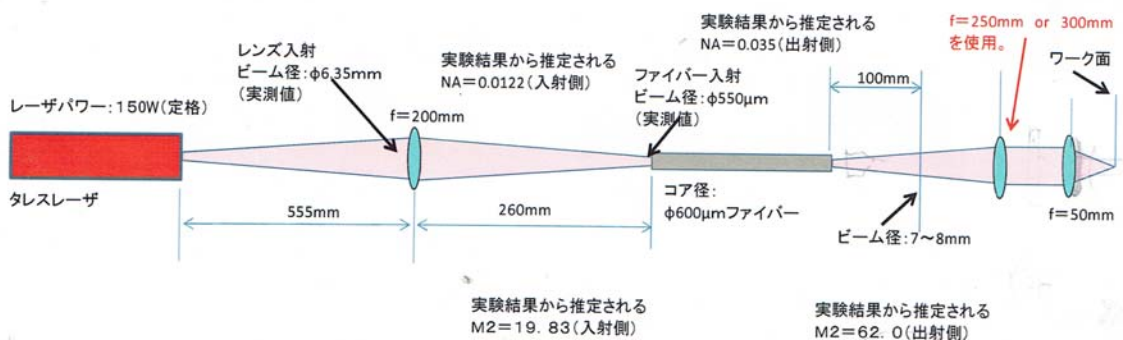


図 3.1.1 ファイバー伝送系の改良を示す光学設計図

のビーム径（設計値）を示す。ファイバー伝送系でレーザ発振器よりビーム分岐・合成光学系に伝送され、最終的にはスキャナーでこのビームはワークの表面に照射される。このレーザビームはDOE（回折光学素で4分岐され、モーターで高速回転し、SMファイバーレーザの外周部を回転するように設計されている。よって、CFRPの切断、穴あけでは常に超短パルスレーザで仕上げ加工がなされる。図 3.1.3 はDOEを用いて回転してビーム照射したときのCFRPの表面を示す。

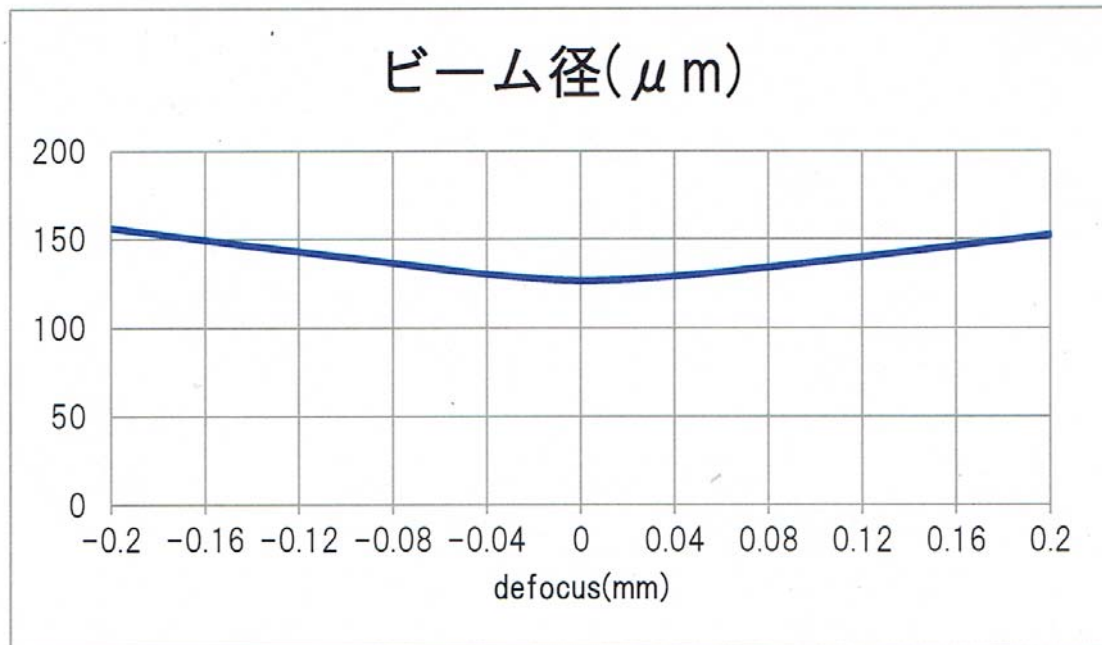


図 3.1.2 最終的に集光されたレーザービーム径（設計値）と焦点はずし距離の関係

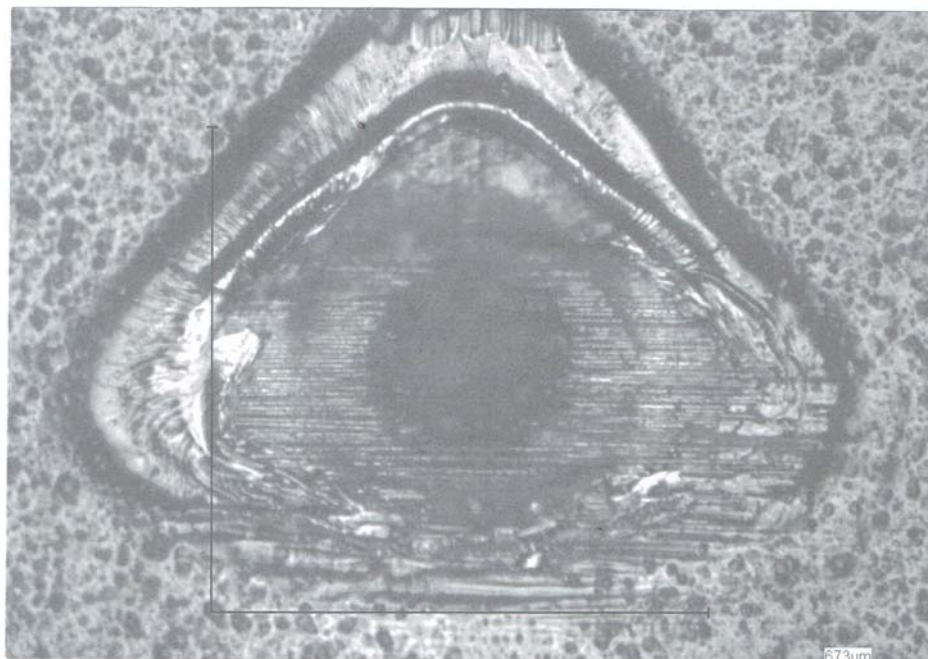


図 3.1.3 DOEを,回転してビーム照射したときのCFRPの表面(穴径：268 μm)

なお、改良前のコア径200 μmのファイバーで伝送して、伝送状況を調査した実験条件を表 3.1.1 に、加工状況を図 3.1.4 に示す。パルスレーザーの出力が20Wと低く、シングルモードのCWファイバーレーザーの出力が数100Wと高いので、アブレーション加工とはならず、切断部がかなり損傷している。ファイバーレーザーで燃えた可能性もある。

表 3.1.1 コア径200 μmのファイバーで伝送して、伝送状況を調査した条件

試験片No.	アッテネータ調整出力 P_n (W)	アッテネータ通過後の出力 (W) $P_n \times 0.75$	DOE回転数 N	SMファイバーレーザー出力 (W)	スキャン速度または (mm/s)	焦点はずし距離 (mm)	ロボット走行速度	シールドガス及び流量	スキャン回数
S-11	150	20W	100	100	400	0		N2 0.3MPa	
S-12	150	20W	100	100	300	0		N2 0.3MPa	
S-13	150	20W	100	200	400	0		N2 0.3MPa	
S-14	150	20W	100	200	300	0		N2 0.3MPa	
S-15	150	20W	100	200	200	0		N2 0.3MPa	

CFRPの有孔引張試験片の穴あけ（板厚＝2.5mm）

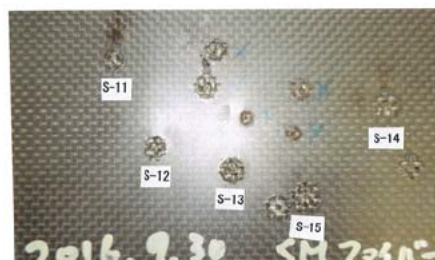
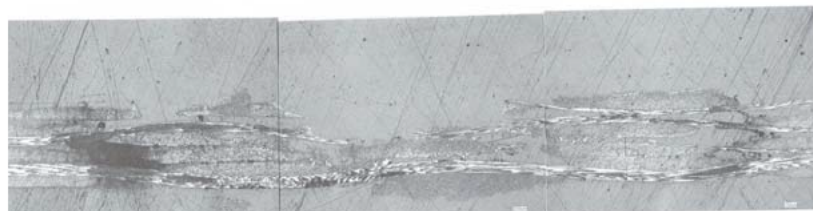


図 3.1.4
径 $200\mu\text{m}$ の
イバーで伝送し
加工したときの状



コア
ファ
て、
況

スキャナー

SMファイバーレーザー

超短パルスレーザー

ノズル

DOE

3.1.5 に完成した
ム分岐合成光学系
す。

（1-2）高出力

短パルスレーザー装置の導入 （ナ・デックス、最新レーザー技研）

平成26年度に導入した平均出力150Wの高出力超短パルスレーザー（波長：532nm）をの特性として、120W～140Wの範囲で不安定になり、出力の制御に問題があることが分かった。すなわち、図3.1.6に示すように、120W以上で、負荷電流とレーザー出力の相関が直線的でなくなっている。そこで、この問題を解決するため、今年度は図1.5に示したアッテネータ（偏光を利用した出力調整装置）を導入し、10W～150Wまで調整した。この時の出力低下は25%であった。9月20日以降の実験はこの装置を用いた。

図
ビー
を示

の超

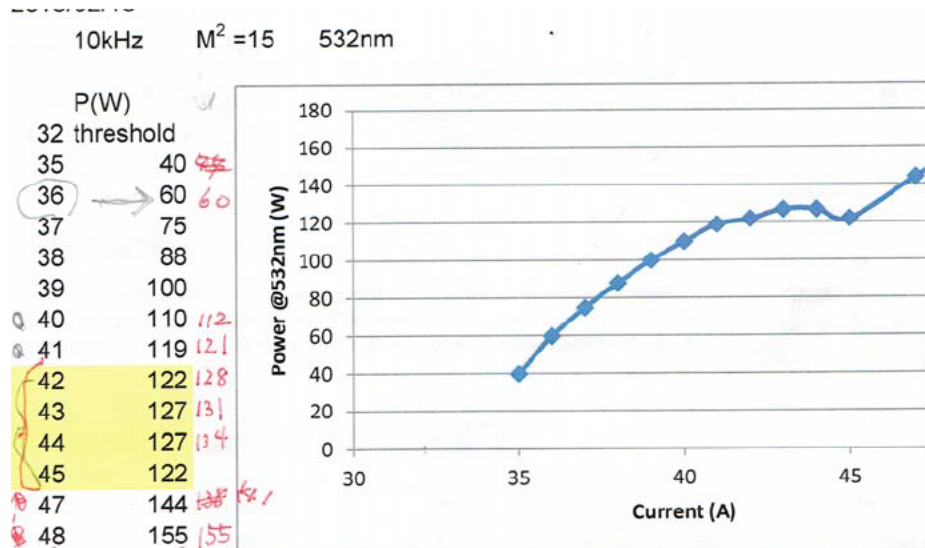


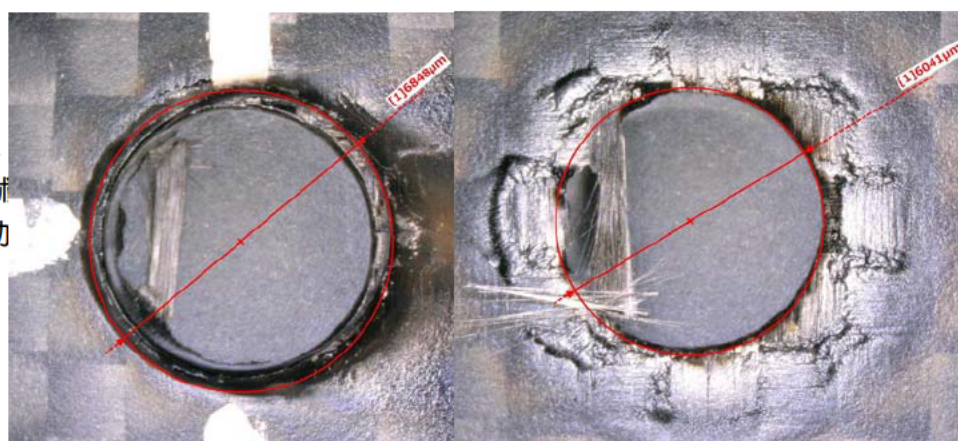
図 3.1.6 大出力超短パルスレーザー装置の負荷電流とレーザー出力の相関関係

この改善により 発振されるグリーン超短パルスレーザーを150Wまで、ビーム分岐合成光学系までファイバー伝送系で導光するシステムの確立を行った。このような報告は世界的にも報告されていた成果であり、今後、3次元の加工システムを製造する上で、大きな成果と評価できる。

(1-3) 試作したビーム分岐合成光学系の性能評価

昨年度までの研究から、ファイバーレーザーとQスイッチYAGレーザーは、共に材料表面（レーザー入口側）に対して、裏面（レーザー出口側）の切断幅（ギャップ寸法）が小さくなること等が判っている。ファイバーレーザー50WとQスイッチYAGレーザー100Wを合成したハイブリットレーザーでも同様に、表面（レーザー入口側）に対して、裏面（レーザー出口側）は、切断幅（ギャップ）が小さいこと等が図 3.1.7 より明らかとなった。

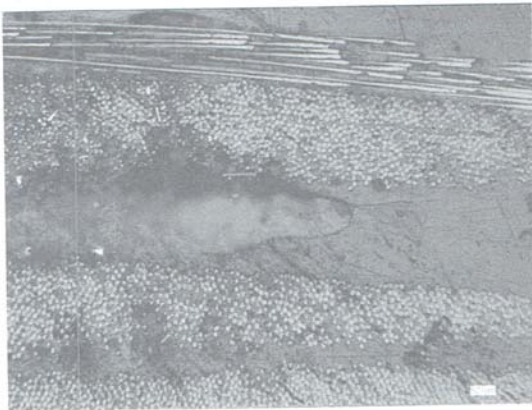
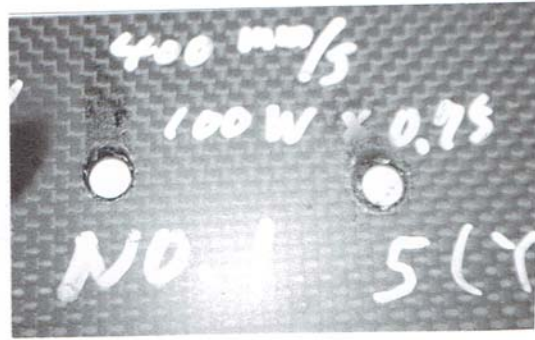
図 3.1.2
最新レーザー技術
表 3.1.2 にその加工
表 3.1.2



試験片 No.	アッテネータ調整 出力 P n (W)	アッテネータ通過後の出力 (W) P n x 0.75	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザー 出力 (W)	スキャン速度 (mm/s)	ノズルから Work までの距離 (mm)	ロボット走行速度	シールドガス及び流量	スキャン回数 1回は約30秒
No. 1	100	75	4000	0	400	5.5		エア	2
2	60	45	4000	0	400	5.5		エア	2
3	100	75	4000	0	400	5.5		エア	1
4	100	75	4000	0	1000	5.5		エア	2
5	100	75	4000	100	1000	5.5		エア	2
6	30	22.5	4000	0	1000	5.5		エア	2
7	0	0	4000	100	1000	5.5		エア	1
8	100	75	4000	100	1000	5.5		エア	2
9	100	75	1000	0	4000	5.0		N2-0.2MPa.	2
10	100	75	1000	0	4000	6.0		N2-0.2MPa.	2
11	100	75	1000	0	4000	5.5		N2-0.2MPa.	2
12	80	60	200	0	4000	5.5		N2-0.2MPa.	2
13	80	60	1000	0	4000	5.5		N2-0.2MPa.	3
14	80	60	1000	0	4000	5.5		N2-0.2MPa.	4
15	100	75	1000	50	4000	5.5		N2-0.2MPa.	2
16	100	75	1000	100	4000	5.5		N2-0.2MPa.	2
17	100	75	1000	100	4000	5.5		N2-0.2MPa.	1

表 3.1.2 有孔引張試験片の穴あけ加工の実験条件（その2）

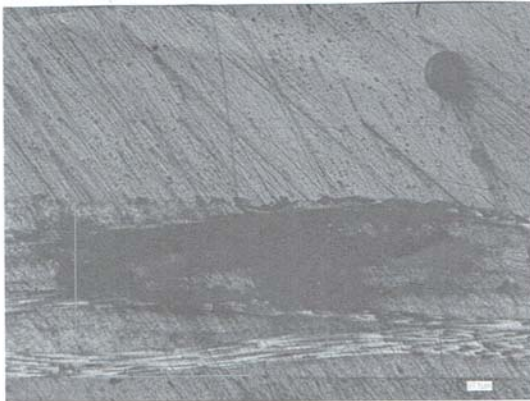
[illegible]



NO-5

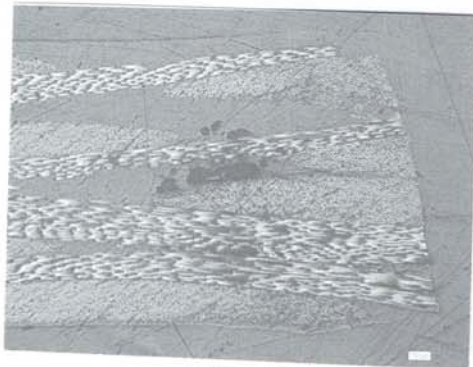
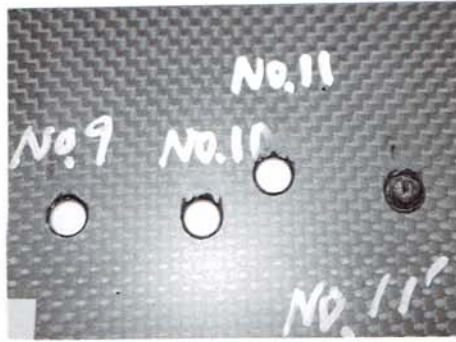


NO-5

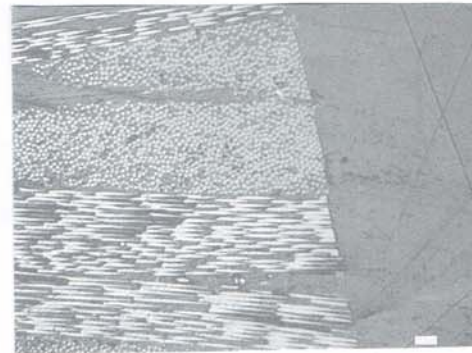


NO-5

図 3.1.8 有孔引張試験片の穴あけ加工の実験結果（その1）



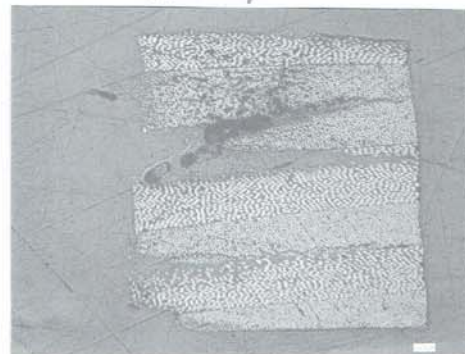
ND-9 X200



ND-9 X400



ND-10 右 X200



ND-11 右 X200



ND-12 右 X200

図 3.1.9 有孔引張試験片の穴あけ加工の実験結果（その2）

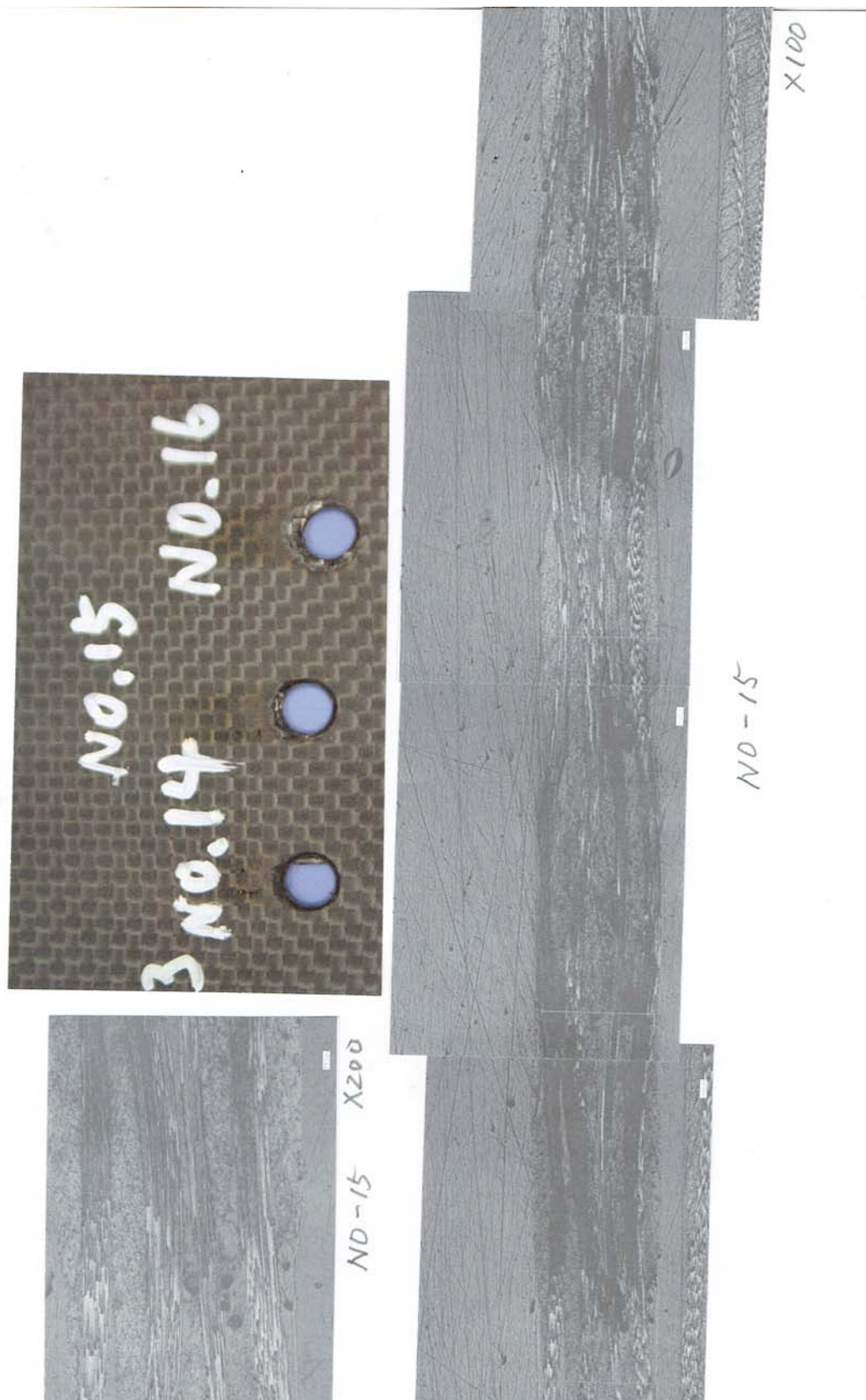
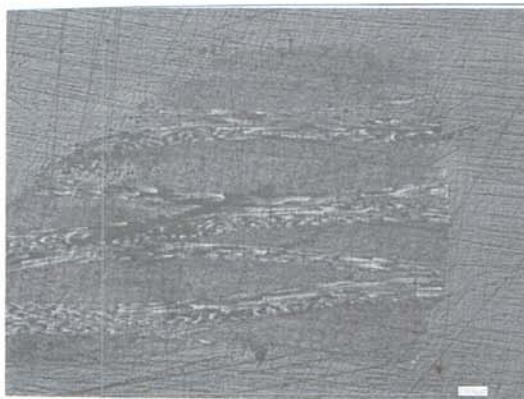


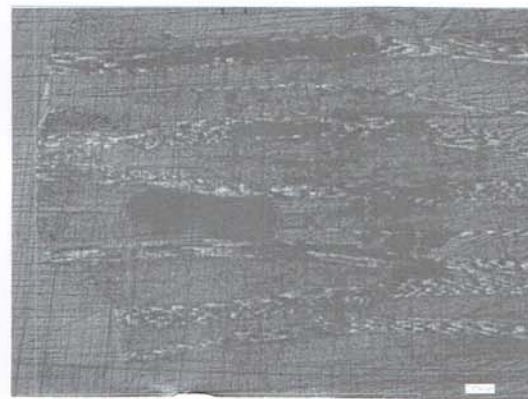
図 3. 1. 10 有孔引張試験片の穴あけ加工の実験結果（その3）



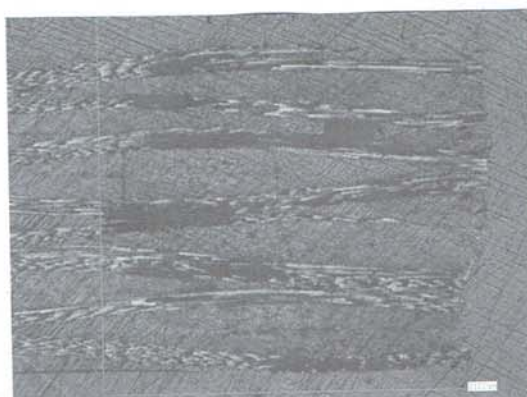
加工した穴 外観



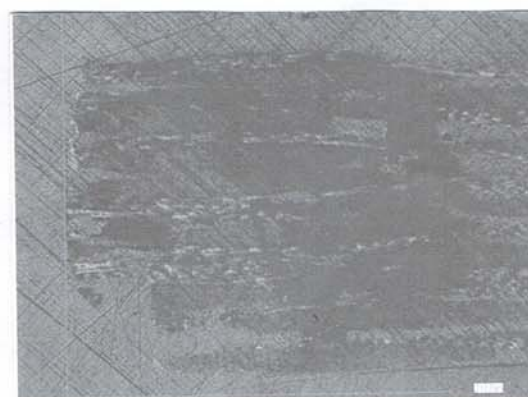
NO-28 左



NO-28 右



NO-29 左



NO-29 右

図 3.1.11 有孔引張試験片の穴あけ加工の実験結果（その4）

これらの結果を見ると、加工条件の違いにより、大きく結果が変わっている。No. 5の条件の試験片は図 3.1.8 に示すように、アシストガスがエアのためか、燃焼がCFRP表

面で起こっているため、内部まで樹脂が損傷を受けている。また、図 3.1.9 に示すように、No. 12 試験片はDOEを回転しない場合で、良好なアブレーション加工が起こっていない、それに対して、試験片NO. 9、No. 10およびNO11はSMファイバーレーザを使っていないので、長短パルスレーザによるレーザアブレーションが生じており、切断面が非常にきれいに（直線的に）加工されている。ただ、切断面より約0.5mm内部に入ったところが、樹脂が変質して黒色となっているところがある。No15の試験片も同様な個所がみられる。ただ、これが強度にどのように影響するかは不明である。NO. 28とNo. 29についても樹脂の損傷が認められる。スキャン速度が400mm/s と遅いことが影響していると思われる。

さらに、最適なレーザ穴あけ条件を見つけるために、スキャナー速度を1200mm/sまで高めて、実験を行った。表 3.1.3にその加工条件を示す。

さらに、実験結果を図 3.1.12 ～ 3.1.17 に示す。図 3.1.12 は試験片ALT-12～14を示す。12は切断断面がきれいに切断されている。スキャン速度が1200mm/s と早いためと考える。ALT-13は切断回数が2回と少ないため、穴あけ深さが不十分であるが、

切断断面はシャープに切れている。ALT-14も穴深さが不十分である。図 3.1.13 はこれら試験片の外観を示す。条件により、穴のエッジが異なることがわかる。

図 3.1.14 にALT-19と-20の外観と断面マクロ写真を示す。超短パルスレーザの出力が75Wと高いためか、熱影響部の樹脂が黒く変色しているのがわかる。図 3.1.15 に

表 3.1.3 レーザ穴あけ加工の最適化実験の条件（その1）

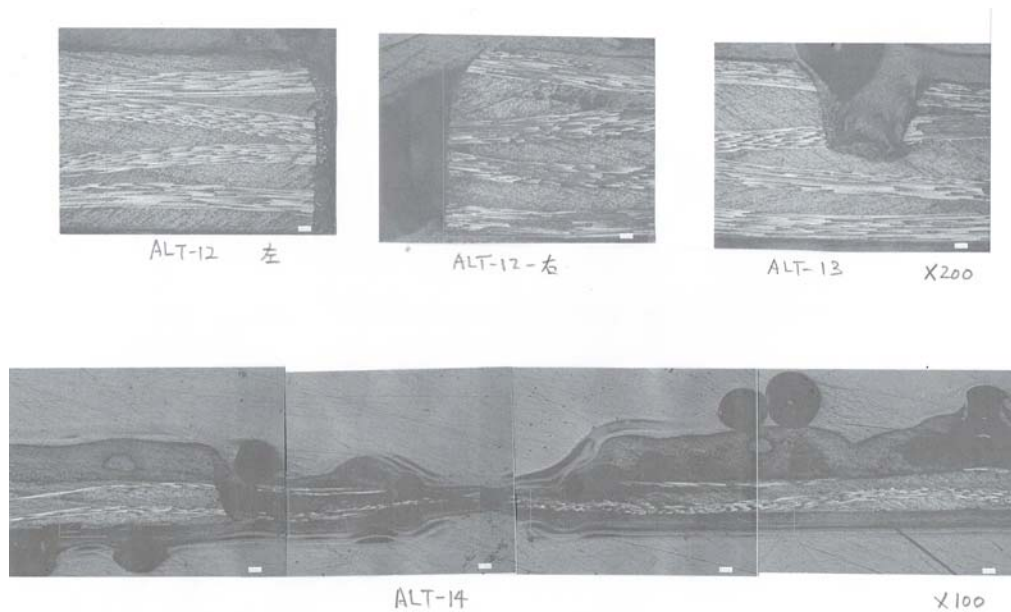


図 3.1.12 レーザ穴あけの最適化実験の結果（その1）

ALT-23と-24の外観と断面マクロ写真を示す。いずれもハイブリッドレーザ加工システムで穴あけしたものである。超短パルスレーザの出力を60Wと低くしたためか、いずれの試験片も非常にシャープに切断されている。とくに、ALT-24は見事にアブレーション現象で加工されている。この断面を1000倍まで拡大して観察すると、図 3.1.16 に示すように直径7 μm の炭素繊維の真ん中で切断されている繊維も多く観察される。これがアブレーション加工の特徴であり、今回開発した装置では間違いなく超短パルスレーザの加工特性であるアブレーション現象が起こっていることが確認できた。

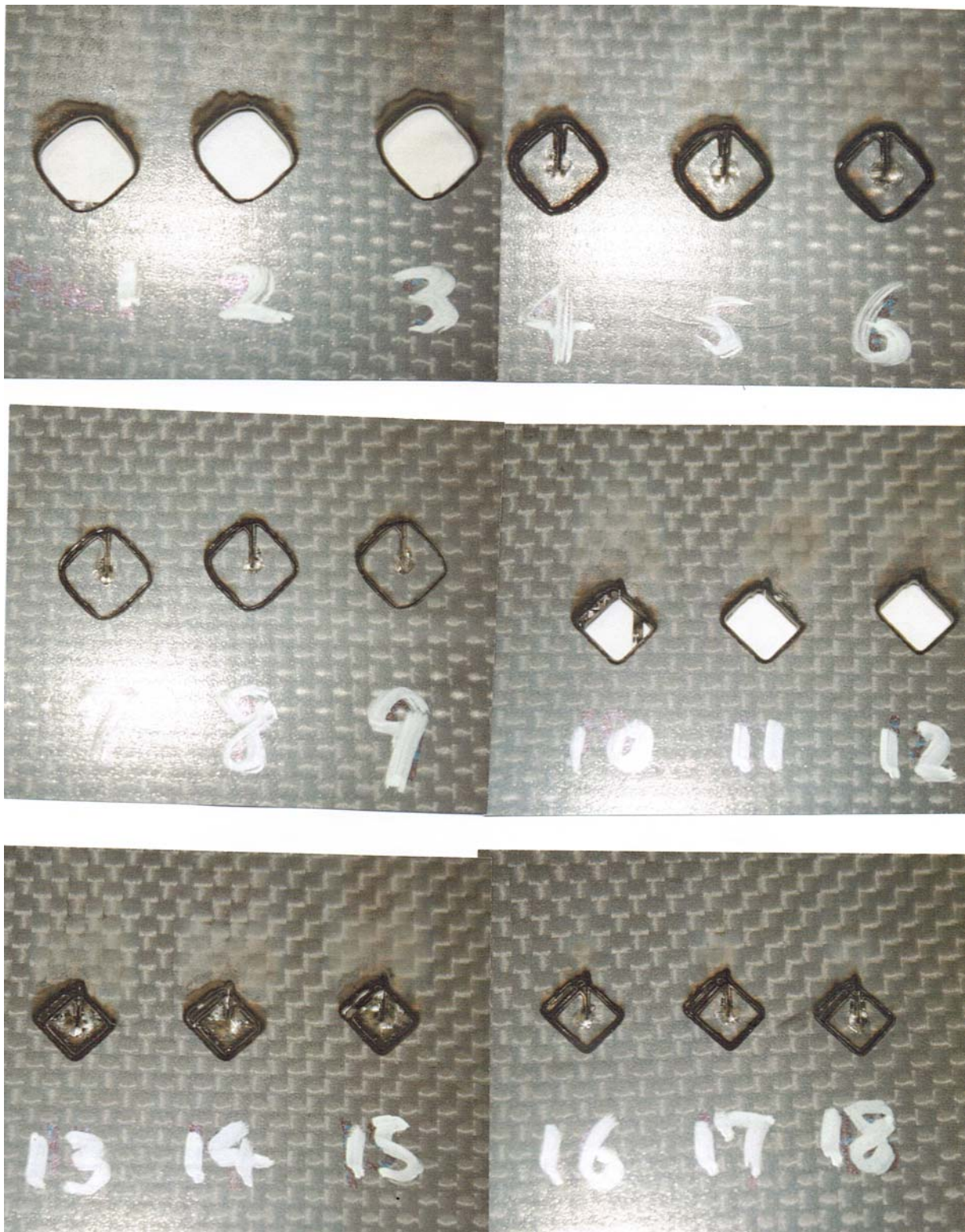
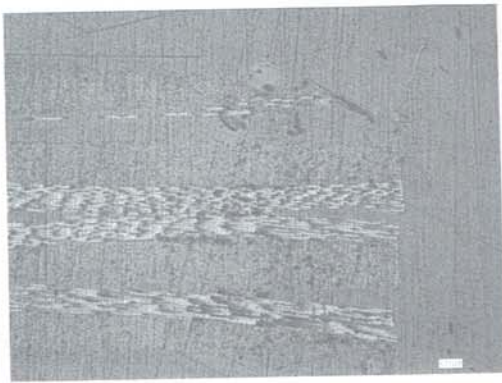
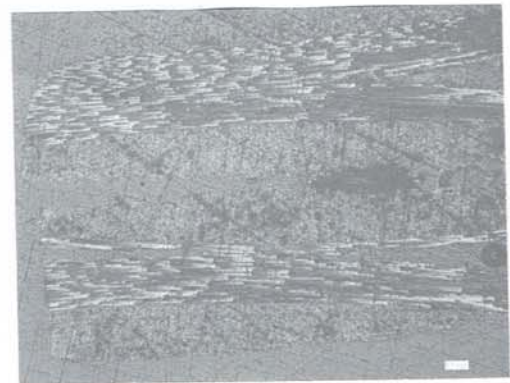


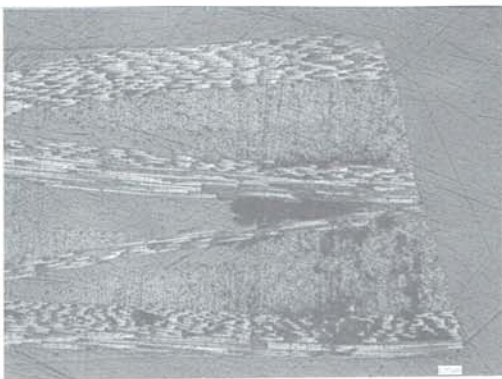
図 3. 1. 13 レーザ穴あけの最適化実験の結果（その 2）



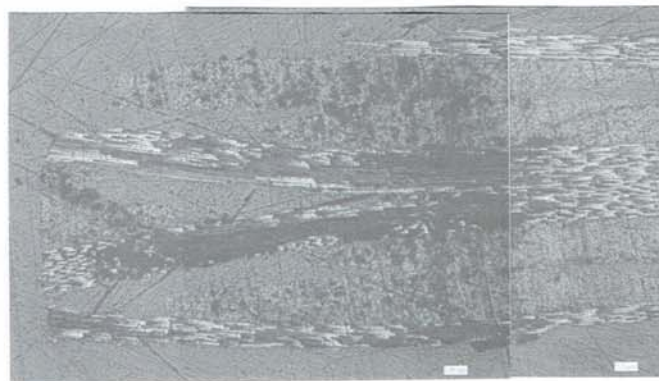
ALT-19 左



ALT-19 右

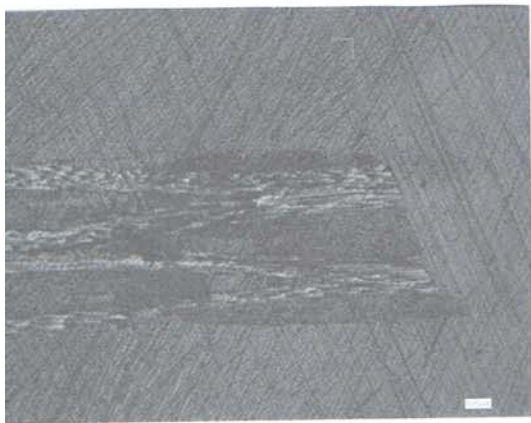


ALT-20 左

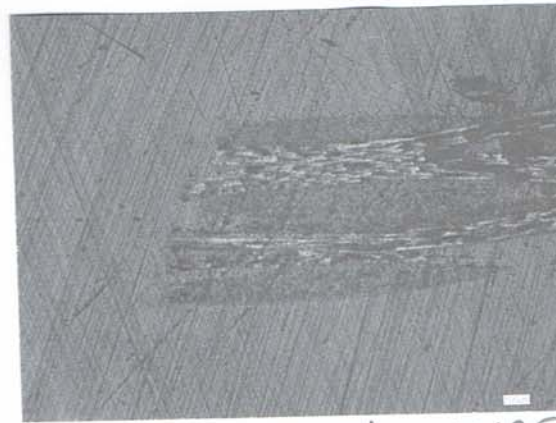


ALT-20 右

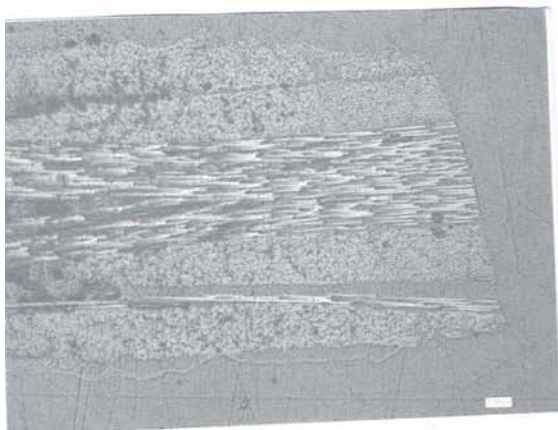
図 3.1.14 レーザ穴あけの最適化実験の結果（その 3）



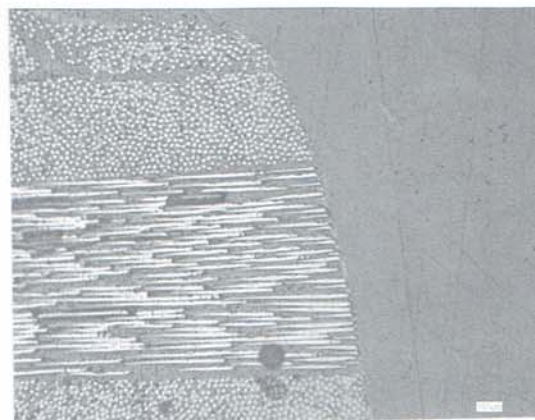
ALT-23 左 X100



ALT-23 右 X100



ALT-24-1 X200



ALT-24-1 X400

図 3.1.15 レーザ穴あけの最適化実験の結果 (その 4)

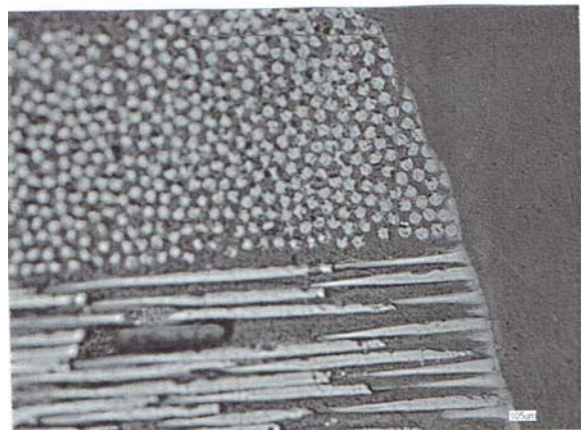
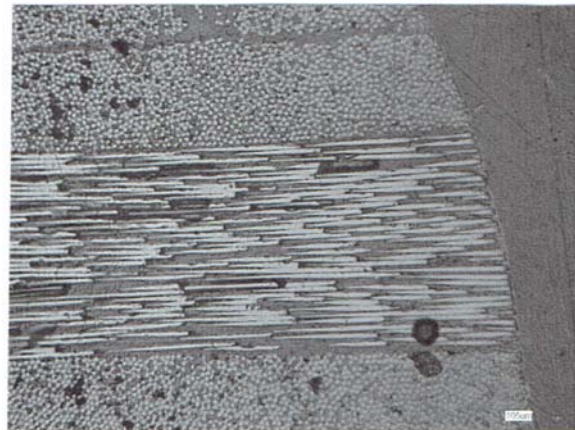
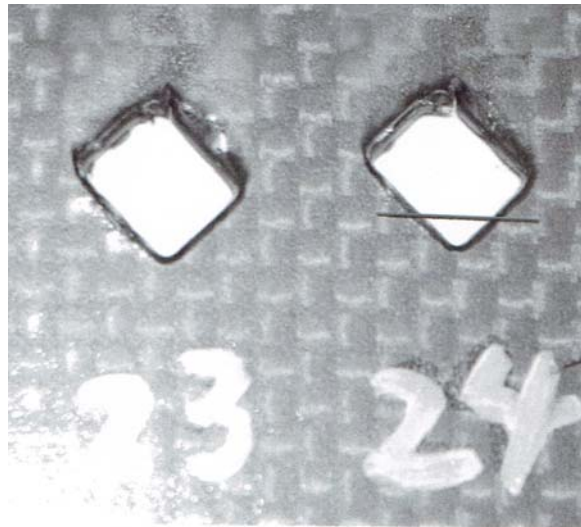


図 3.1.16 レーザ穴あけの最適化実験の結果（その 5）

（2） CFRP等用の高能率・高精度ハイブリッドレーザ加工システムの設計・試作

（2-1） 高能率・高精度ハイブリッドレーザ加工システムの設計・試作

（最新レーザ技研、ナ・デックス、ナ・デックスプロダクト）

3次元の被加工物（CFRP等）を高精度で高能率に加工するため、CW高輝度ファイバーレー

ザと超短パルスレーザをハイブリッド化することが必要であることから、このようなレーザビームを6軸ロボット及びビームスキャナーを用いて、ワークに効率的に照射するとともに、ファイバー伝送方式によるハイブリッドレーザ加工システムの設計・試作を初年度及び2年目に実施した。しかし、ファイバー伝送系が問題で、大出力の超短パルスレーザをビーム分岐合成光学系に伝送できないという問題に直面した。この問題については前述の(1-1)および(1-2)項で示したように解決ができた。そして、図 3. 2. 1 に示すように高能率・高精度ハイブリッドレーザ加工システムを完成できた。

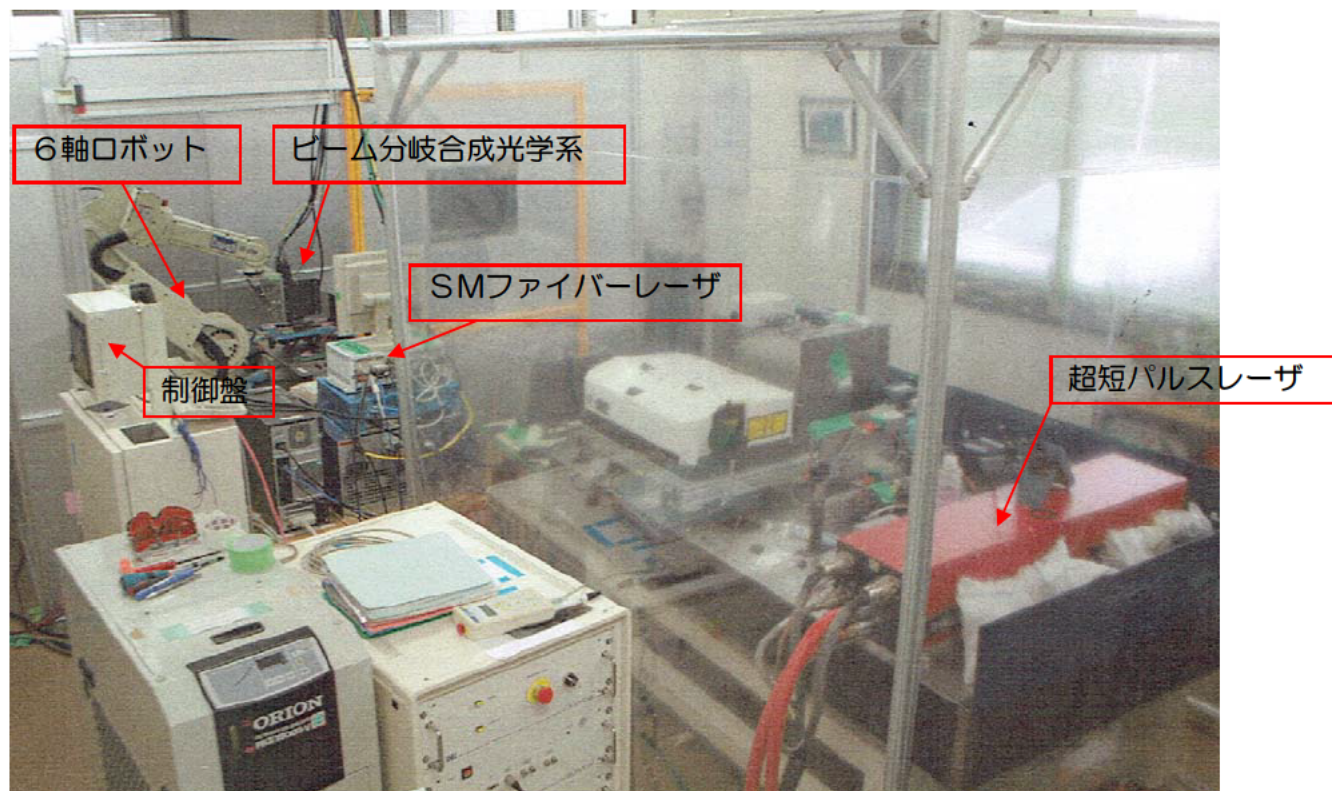


図 3. 2. 1 完成した高能率・高精度ハイブリッドレーザ加工システムの全景

図 3. 2. 2 はこのハイブリッドレーザ加工システムによりCFRPを加工している状況を示す。

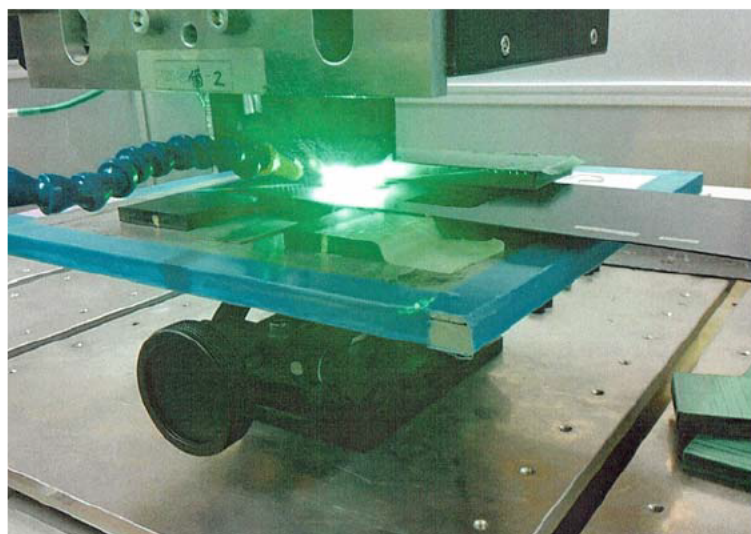


図 3. 2. 2 ハイブリッドレーザ加工システムによるCFRPの加工

（2－2）ハイブリッドレーザ加工システムの制御・運転に関するソフトの開発

（（株）ナ・・デックス、（株）ナデックスプロダクツ、最新レーザ技研）

完成に近い加工システムをより安全に運転できる装置とするために、全体のシステムの制御システムを構築することを（株）ナ・デックスプロダクツが中心となり実施し、安全柵の構築を（株）ナ・デックスが実施した。図 3. 2. 3 に完成した制御システムを示す。

（ 省 略 ）

図 3. 2. 3 完成した制御システム

また、 図 3. 2. 4 に制御盤の内部を示す。

2-2. H28 年度成果

● 制御盤

- ① PLC I/O 追加
- ② リレー追加
- ③ その他機器間接続のための配線追加

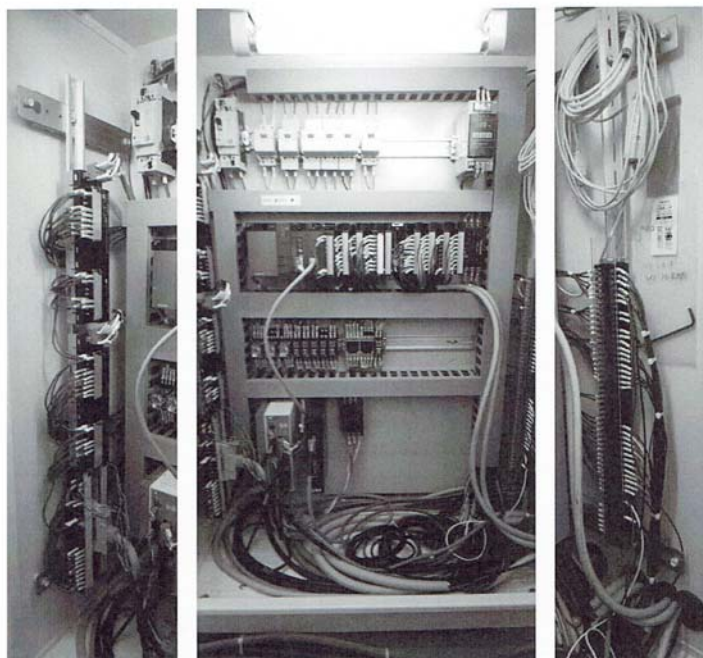


図 3. 2. 4 制御盤の内部

● 中継ボックス

① レーザ制御切替用リレー

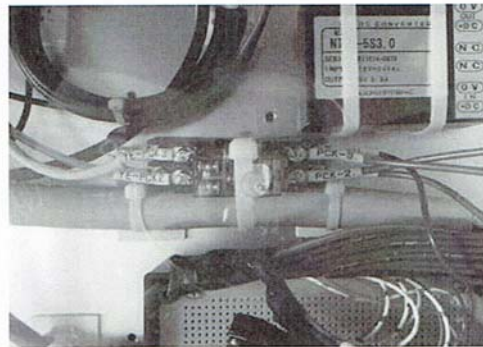
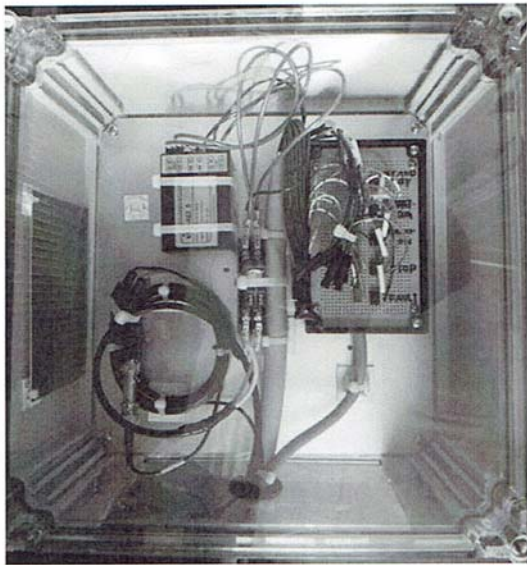


図 3.2.5 中継ボックスの内部

中継ボックスの中にレーザ制御切替用リレーを設置した。
さらに、操作版および操作画面を図 3.2.6 に示すようにした。

3-2.H28 年度成果

- ① スキャナ操作画面追加
- ② 複合運転機能の機能追加
- ③ その他不具合改善



図 3.2.6 完成した操作版および操作画面

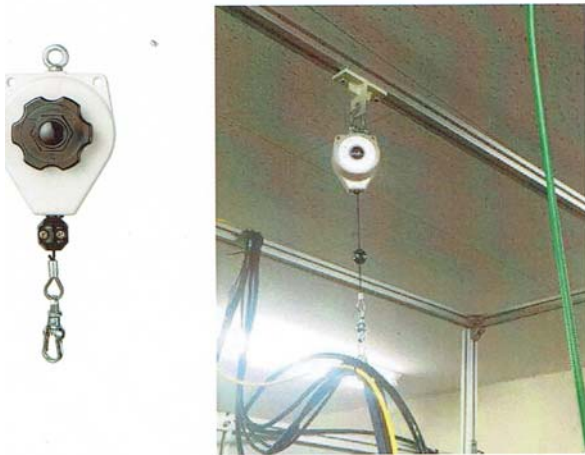
もちろん、制御盤の取扱説明書も作成された。

次に、安全柵の構築については、まず、設計図を作成、検討した。最終的な設計図を図 3.2.7 に示す。

(省 略)

図 3.2.7 安全柵の設計図

付帯工事として、図 3.2.8 に示す 4 点を付けた。図 3.2.9 に完成した安全柵を示す。



① バランサー



② セイフティドアスイッチ



③ セーフティーラゲ



④ レーザ遮光ドア

図 3.2.8 安全柵の付帯工事品



図 3.2.9 完成した安全柵

(2-3) 試作したハイブリッドレーザ加工システムの性能評価

完成したハイブリッドレーザ加工システムの性能評価として、まず、CFRP製有孔引張試験片の穴あけ加工に適用し、現状のドリル加工と比較するなどの評価試験を実施した。

表 3.2.1 に示す条件でCFRP製有孔引張試験片を6体を加工し、岐阜大学で実験を行った。

表 3.2.1 有孔引張試験片の穴あけ加工条件

試験片No.	アッテネータ調整出力 P n (W)	アッテネータ通過後の出力 (W) $P n \times 0.75$	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザー出力 (W)	スキャン速度 (mm / s)	ノズルから Work までの距離 (mm)	シールドガス及びガス圧 (MPa) .	スキャン回数
本-1	100	75	4000	50	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 4
本-2	100	75	4000	50	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 4
本-3	100	75	4000	50	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 4
本-4	100	75	4000	50	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 4
本-5	100	75	4000	0	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 8
本-6	100	75	4000	0	400	4.5	N2-0.2MPa.	2 x 12

有孔引張試験片の穴あけ加工（穴径：6.35mm、CFRP板厚：2.5mm）

昨年度、超短パルスレーザー（Q スイッチ YAG レーザ）装置、および 500W 以上の高輝度連続発振ファイバーレーザーなど導入した装置を用いて、CFRP 板のレーザー切断面の HAZ を、顕微鏡を使って詳細に観察した。これら結果により得られた最適切断条件を用いて、CFRP の引張強度などを従来加工法と比較評価した。このために、ASTM D5766 の規格により試験片中央に 6.35mm 径の孔をあけた、有孔引張試験片を製作し試験を実施した。

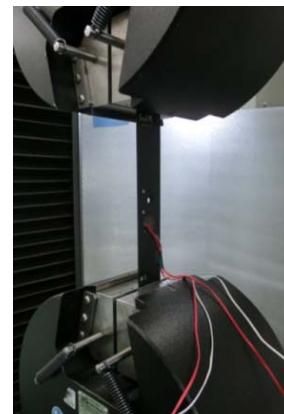
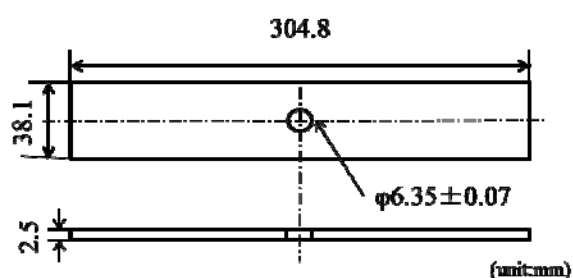


図 3.2.10 有孔引張試験片 (ASTM D5766 準拠) 図 3.2.11 有孔引張試験 (Instron 5958 型)

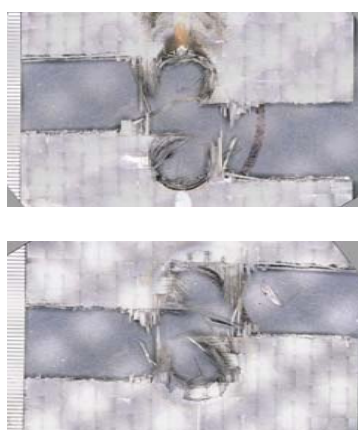


図 3.2.12 破断した引張試験片 (左) と破断部拡大 (右) (表側：右 裏側：左)

図 3.2.10 に有孔引張試験片の形状、図 3.2.11 に有孔引張試験の状況を示す。

図 3.2.12 に破断後の試験片の例を示すが、これらの観察により、孔周りから破壊が始まっていることが判り、孔周辺の HAZ が破壊の起点になっている。

引張試験の結果を表 3.2.2、図 3.2.13、図 3.2.14 に示す。引張強度は、500W ファイバーレーザ（新規導入）、Q スイッチ YAG レーザ、1kW ファイバーレーザ（既存品）、ドリル（従来品）の順となり、従来加工法に比べレーザ加工による CFRP への強度低下影響が小さいことが明らかとなった。なお、H28 年度は完成したハイブリッドレーザと最適条件で加工した Q スイッチ YAG レーザ（パルスレーザ）の評価を H27 年度までのデータに追加した。図 3.2.13 に示す結果より、ファイバーレーザと Q スイッチ YAG レーザを合成したハイブリッドレーザの引張強度は、ファイバーレーザによる熱影響が大きいいためか、明らかな向上は見られなかった。なお、図 3.2.14 よりハイブリッドレーザとパルスレーザでは引張弾性率がほかの加工結果よりも高い値を示した。これら 2 つのデータは、試験に用いる試験片の提供が 2 体と少なかったために、データのばらつきの可能性があることと、ハイブリッドレーザでは加工時のレーザ集光が十分でなかったことから、今後の追加試験が求められる。

表 3.2.2 有効引張試験結果まとめ

使用した レーザ等の種類	最大荷重 (kN)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	加工条件
ドリル	29.2	515.9	84.0	2650min ⁻¹ 超硬ドリル使用
Q スイッチ YAG レーザ	30.2	542.0	84.5	14W 100mm/sec 500pass
ファイバーレーザ 1kW	28.8	526.7	83.6	1kW 27.8mm/sec 4pass
ファイバーレーザ 50kW	31.9	572.6	85.1	50W 800mm/sec 14324.8pass
ハイブリッドレーザ	30.4	544.5	92.9	ファイバーレーザ：50W パルスレーザ：100W 400mm/sec 16pass
パルスレーザ	32.3	578.0	93.3	パルスレーザ：100W 400mm/sec 24pass

以上、有孔引張試験の結果では新たに完成したハイブリッドレーザ加工システムで加工した試験片の破断強度および引張弾性率は ドリル加工したものに比べて、幾分高い値を示した。

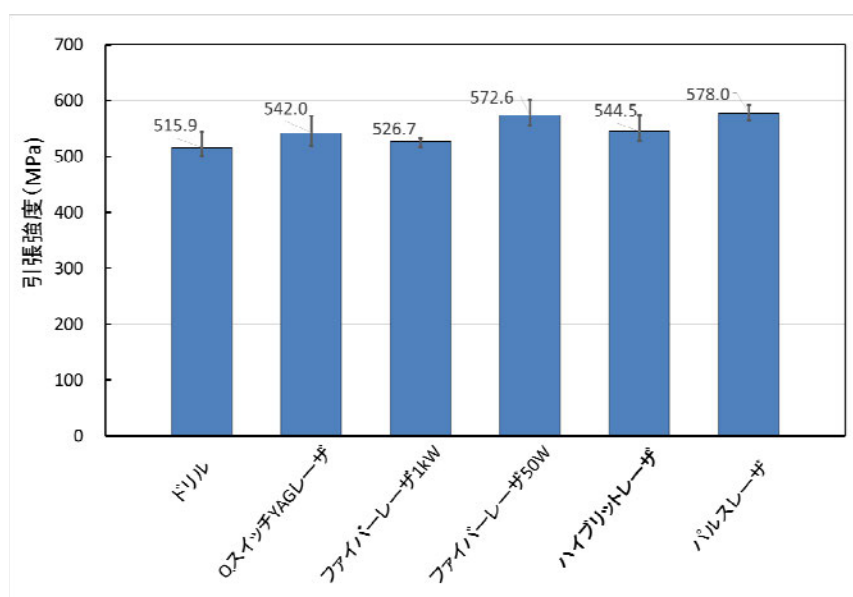


図 3.2.13 有孔引張り試験の引張強度

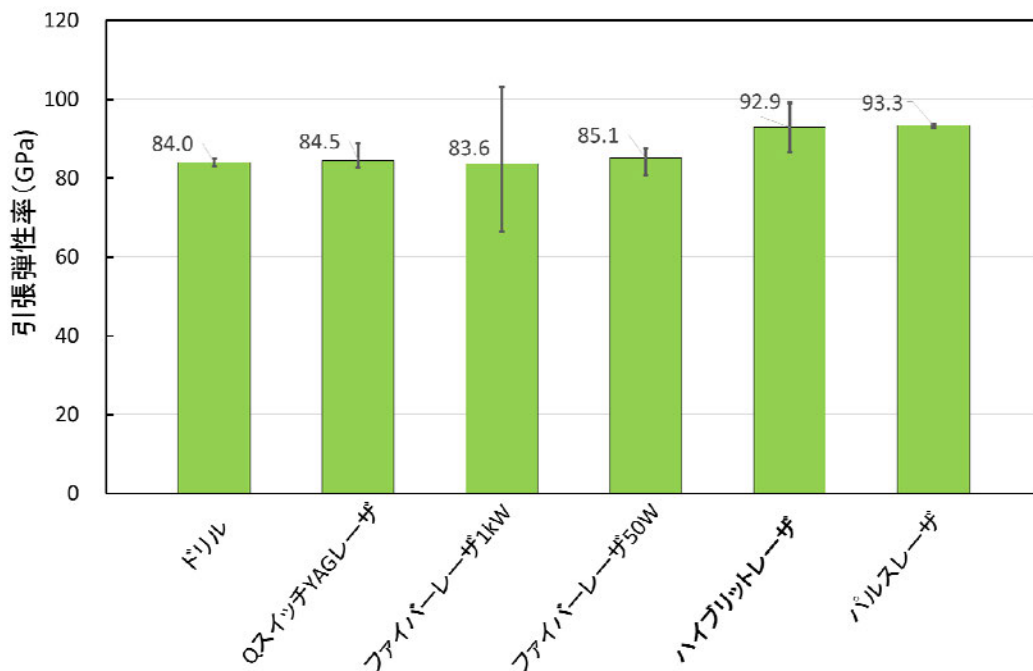


図 3. 2. 14 有孔引張り試験の引張弾性率

次に、ファイバーレーザー、Q スイッチ YAG レーザ、およびハイブリットレーザー断面形状の比較観察を行った。CFRP 板をレーザー加工した試験片をラボカッターにて切出した（図 3. 2. 15(a)、(b)）。このとき、レーザーが貫通したものではレーザー切断面が端部にくるよう、また未貫通の場合はレーザー加工部が中央にくるようマイクロ試験片を作り研磨した（図 3. 2. 16）。マイクロ試験片は図 3. 2. 17 に示すようにデジタルマイクロスコープを使い HAZ の状態を観察し、艶と色差からデジタル処理して面積を求め、HAZ の平均幅を計算で求めた。さらに、レーザー加工付近の CFRP 板の HAZ 部を表面粗さ計（ハンディサーフ E41-A）を用いて測定した。

表 3. 2. 3 に各試験片のレーザー加工条件、表 3. 2. 4 に断面形状の顕微鏡写真、平均 HAZ 幅、表面粗さを示す。なお、ハイブリッドレーザーの平均 HAZ 幅は中心で切断したと仮定し、総面積の半分を板厚で割り予測値を求めた。その結果、ファイバーレーザーでは約 $1300\mu\text{m}$ 幅の HAZ が明確に観察されが、Q スイッチ YAG レーザの約 $97\mu\text{m}$ 幅と比べて、約 14 倍であった。また、ハイブリッドレーザーでは、ファイバーレーザーの強度に比例して HAZ 幅が増加していることから、HAZ はファイバーレーザーに主に起因するものと考えられる。

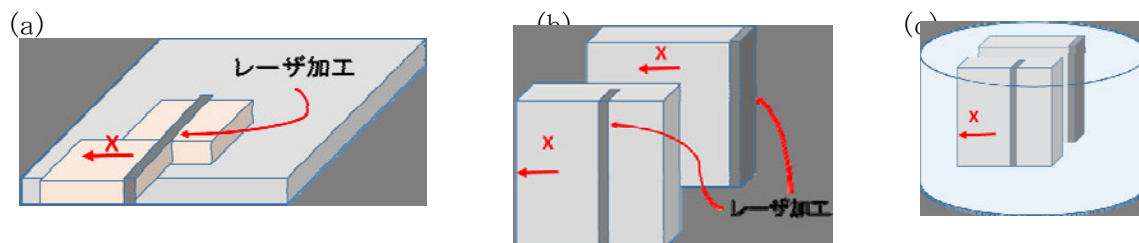


図 3. 2. 15 試験片の切り出し位置とマイクロ試験片への封入方法
(a) 切り出し部分 (b) 切り出した試験片 (c) マイクロ試験片の研磨面

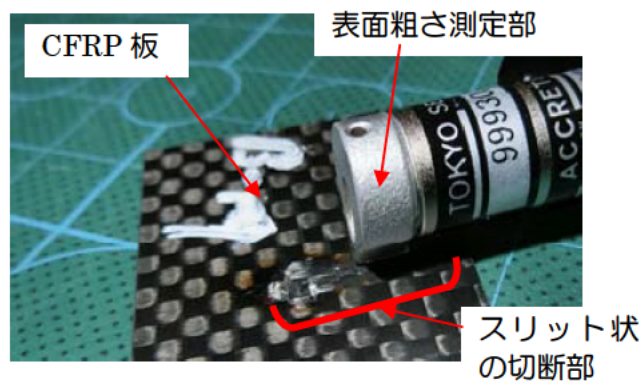


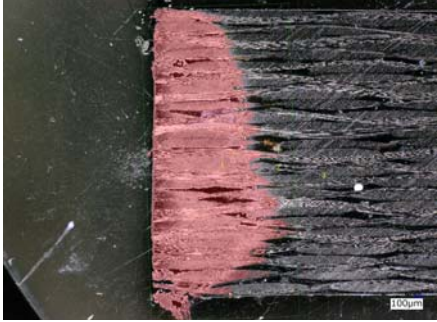
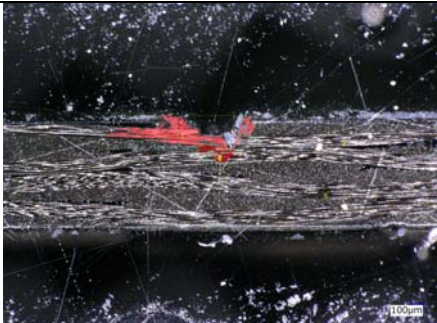
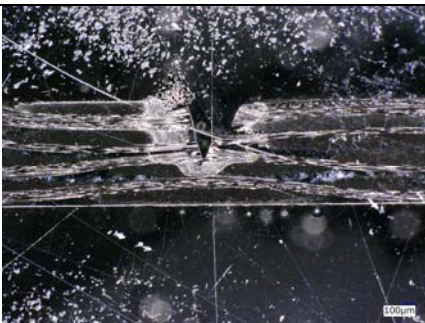
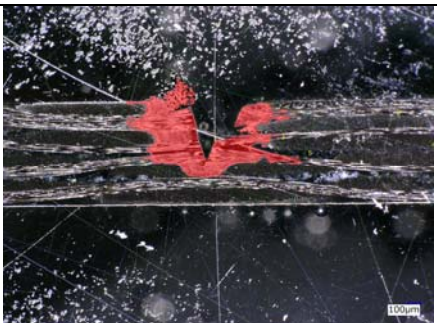
図 3.2.16 レーザ切断部のマイクロ試験片

図 3.2.17 レーザ切断部の表面粗さ測定状況

表 3.2.3 CFRP試験片のレーザ加工条件

試験片名	加工条件	測定倍率
ファイバーレーザ	2.4kW 40mm/sec	50 倍
Qスイッチ YAG レーザ	14W 100mm/sec 50pass	
ハイブリッドレーザ 1	ファイバー：50W Qスイッチ YAG：80W 送り速度 100m/sec	100 倍
ハイブリッドレーザ 2	ファイバー：100W Qスイッチ YAG：80W 送り速度 100m/sec	
ハイブリッドレーザ 3	ファイバー：200W Qスイッチ YAG：80W 送り速度 100m/sec	

表 3. 2. 4 レーザ加工法と HAZ の関係

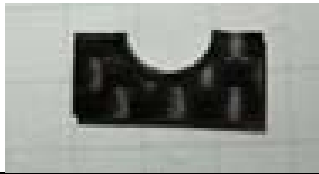
試験片名	顕微鏡写真	HAZ を赤色で強調	HAZ 平均幅 / μm	表面粗さ Ra
ファイバレーザ			1354	0. 526
Qスイッチ YAG レーザ			97	0. 088
ハイブリッドレーザ 1			69	0. 547
ハイブリッドレーザ 2			245. 0	0. 480
ハイブリッドレーザ 3			1210	2. 106

次に、非破壊検査を用いて内部の様子を詳しく調べるため、X 線 CT（東芝 IT コントロールシステム(株)社製 TOSCANER-32252 μ hd9：名古屋市工業技術研究所所有）を用いて、加工部を 3D 観察した。表 3. 2. 5 に試料の加工条件、図 3. 2. 18 に測定部位の模式図を示す。また表 3. 2. 6 に測定結果を示す。

その結果、炭素繊維の層間剥離と熱影響による配向の乱れが観察された。ファイバーレーザー加工での HAZ 発生がもっとも著しく、Q スイッチ YAG レーザは他の加工法に比べ HAZ が最も少なかった。

なお、ファイバーレーザーの試験片はマイクロ試験片と同じサンプルを使用しているが、観察される HAZ を比較すると、断面マイクロ試験では平均 1354 μ m であった所が、X 線 CT 画像から求めた平均 HAZ は 1343 μ m であり、非常によく観察結果が一致していることがわかり、マイクロ試験という破壊試験法と試験片製作の手間隙をかけずとも、精度の高い X 線 CT があれば十分 HAZ を観察できることがわかる。

表 3. 2. 5 各試験片の加工条件

試験片名	加工条件	試験片
ファイバーレーザー	2.4 kW scan 40mm/sec	
Qスイッチ YAG レーザ	Qスイッチ YAG：100W scan 4000m/s×2	
ハイブリッドレーザー 4	ファイバー：50W Qスイッチ YAG：100W scan 4000m/s×2	
ハイブリッドレーザー 5	ファイバー：100W Qスイッチ YAG：100W scan 4000m/s×2	

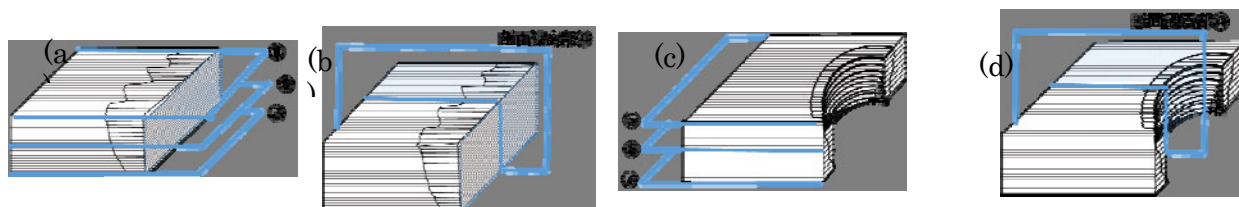
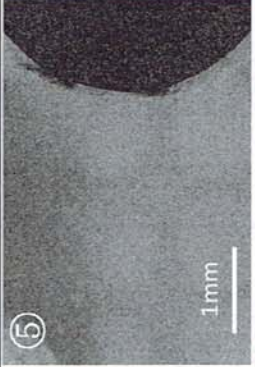
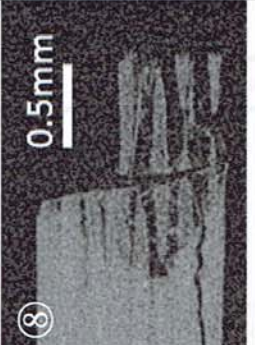
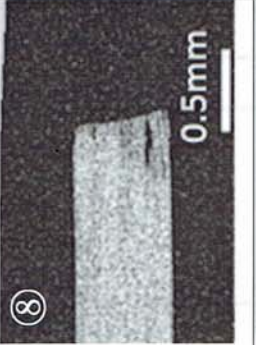
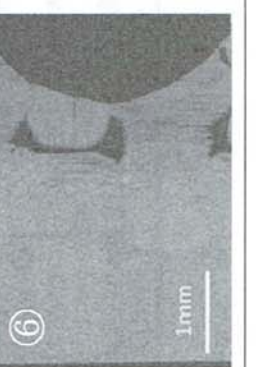
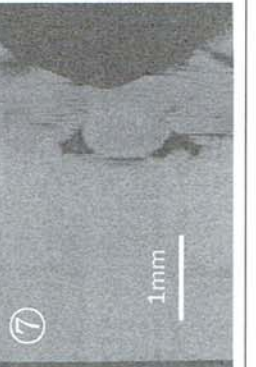
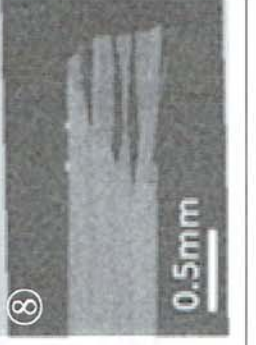


図 3. 2. 18 X 線 CT の観察場所を示す模式図
直線加工サンプル (a) (b)、孔加工サンプル (c) (d)

表 3.2.6 X線CTによるHAZの観察結果

	Top	Middle	Bottom	断面図
ファイバー レーザー	① 	② 	③ 	④ 
Q ス イ ッ チ YAG レーザ	⑤ 	⑥ 	⑦ 	⑧ 
ハイブリッド レーザー 4	⑤ 	⑥ 	⑦ 	⑧ 
ハイブリッド レーザー 5	⑤ 	⑥ 	⑦ 	⑧ 

有限要素法によるシミュレーション

以上のハードウェアの実験の裏づけと理論的補完を図るため、有限要素法を用いたシミュレーションの試みを、構造強度解析と伝熱解析の面で行った。構造解析では、引張試験片をモデリングし、HAZ のない孔と HAZ が生じた孔周りの応力集中という観点から解析した。伝熱解析では、レーザでの熱負荷が、孔周りにどう拡散して HAZ を引き起こすかという観点から、時刻暦解析を用いての伝熱シミュレーションを行った(図 3. 2. 19, 3. 2. 20, 3. 2. 21)。CFRP の材料特性は X-Y 軸方向(面内)と Z 軸方向(板厚)では異なるヤング率や熱伝導係数の物理的乗数を与えた直交異方性材料としてモデル化した。なお、シミュレータには ANSYS MECHANICS ADPL Ver. 17.1 を用いた。本来、複合材は非線形解析を行い、また熱伝達には熱源が刻々と移動し、加工進展と共に断面形状が変わり、熱作用点異なるモデルをシミュレートする連成解析や定常非線形伝熱解析まで行いたかったが、解析モデル作成にかかる膨大な時間と研究者の能力の限界から、今回は便宜上、一定モデル形状での定常線形解析にとどまった。今後、ハイブリッドレーザのハードウェア上の加工条件や、レーザの動きや出力条件が固まってきた時点で、これら課題に挑戦していきたい。

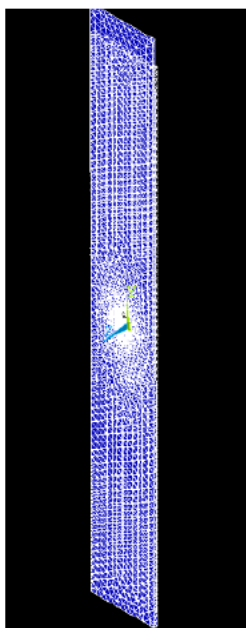


図 3. 2. 19 有孔引張試験片のモデル

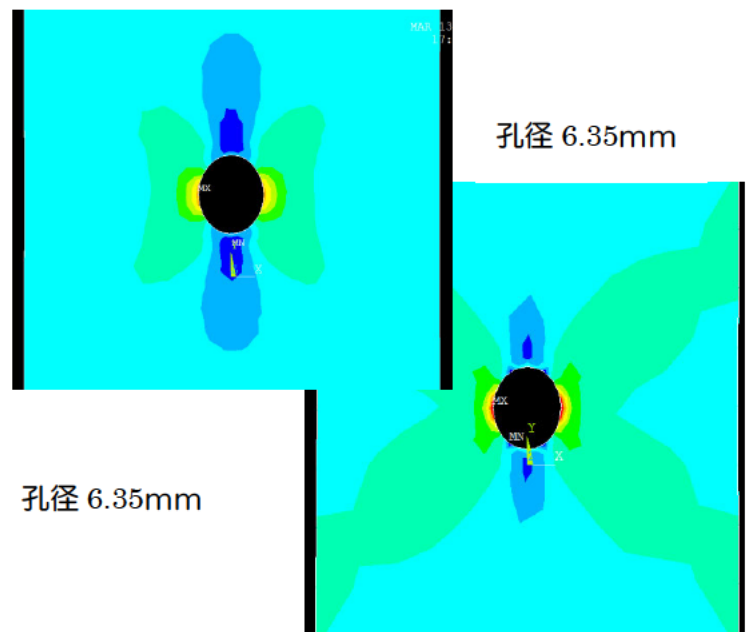


図 3. 2. 20 有孔引張り試験の HAZ 有無の応力集中の違い

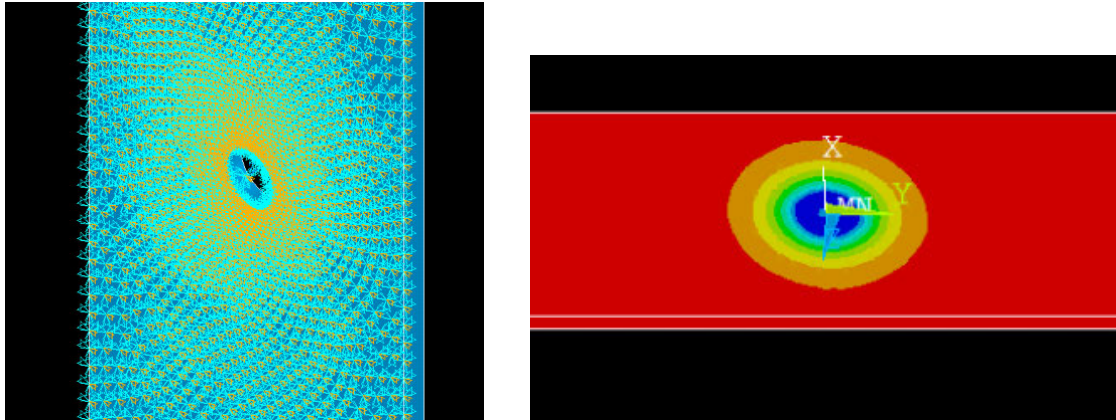


図 3.2.21 熱伝達解析の例 (孔径 6.3mm 周りへレーザで 1000℃の熱を 5 秒かけた例) 応力ベクトルメッシュ例(左)と加熱 5 秒後の孔周りの温度分布例(右)

(3) 自動車薄板部材の高精度ハイブリッドレーザ加工の実証試験

(3-1) 自動車フードのハイブリッドレーザ加工

(最新レーザ技研、ナ・デックス、ナ・デックスプロダクツ)

試作した自動車リアパネルのレーザトリミング加工を6軸ロボットを用いたハイブリッドレーザ加工システムを用いて加工するための予備実験と実験を実施した。

まず、スライダ上には、1.0mm厚のCFRP平板を置き、スライダー速度を変化させて、80mm長さ加工した。その加工条件を表 3.3.1 に示す。

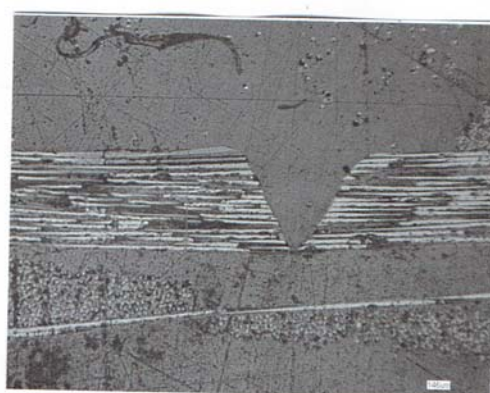
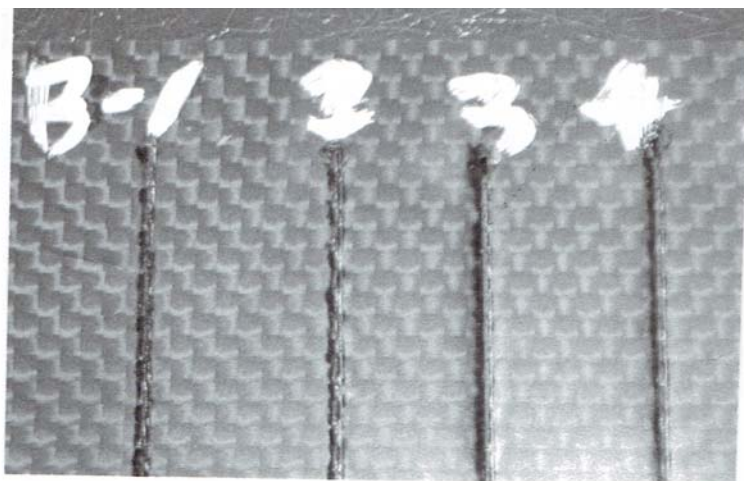
表 3.3.1 自動車のCFRP製薄板パネルのハイブリッドレーザ加工条件

試験片No.	アッテネータ調整出力 P _n (W)	アッテネータ通過後の出力(W) P _n × 0.75	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ出力 (W)	スライダ速度 (mm/s) 距離: 80mm	ノズルから Work までの距離	ロボット走行速度	シールドガス及び流量	スキャン回数
B-1	80	60	4000	50	50	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-2	80	60	4000	50	100	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-3	80	60	4000	50	200	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-4	80	60	4000	50	300	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-5	80	60	4000	50	400	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-6	80	60	4000	100	50	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-7	80	60	4000	100	100	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-8	80	60	4000	100	200	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-9	80	60	4000	100	300	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-10	80	60	4000	100	400	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-11	80	60	4000	200	50	5.5		N2, 20L/min.	5 往復 300mm/分 で切れる
B-12	80	60	4000	200	100	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-13	80	60	4000	200	200	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-14	80	60	4000	200	300	5.5		N2, 20L/min.	5 往復
B-15	80	60	4000	200	400	5.5		N2, 20L/min.	5 往復

その結果、試験片B-11は切断が加工であった。すなわち、分速300mmで切断できた。H21～23年度のサポイン事業で開発した加工システムでは毎分50mmで切断できたが、今回はその6倍の速度で、直線の切断ができた。

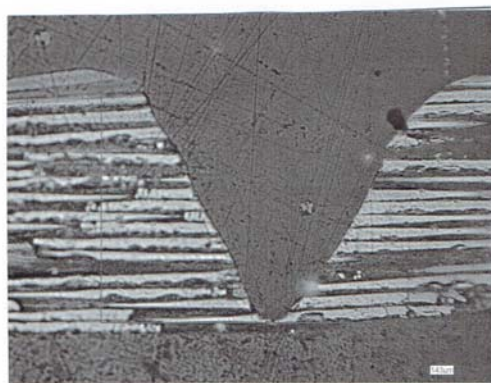
これらの切断部の断面マクロ写真を図 3.3.1 および 図 3.3.2 に示す。試験片B-2の断面を観察すると SMファイバーレーザの出力が50Wと低い場合は切断面が非常にシャープできれいである。アブレーション加工となっている、加工条件で 切断溝の深さが異なることもわかる。

図 3.3.3 に示す試作した自動車リアパネル（板厚：1.2mm）をロボットを用いて、ハイブリッドレーザ加工システムでトリミングするために、その基礎実験を実施した。その条件を表 3.3.2 に示す。その実験結果を図 3.3.4 ～図 3.3.6 に示す。試験片C-10に見られるように、ロボットの走行速度を400mm/s に高めると、切断面もシャープになっている。全体的に切断部の品質が悪い。この原因はロボットが高速で移動するため、アシストガス（窒素）の吹付けが不十分で CFRPがレーザ照射により空気中の酸素と反応して燃えてしまうことによることが分かった。これについては、今使用しているノズルの口径が約18mmと大きく、ガス流速が遅いことが問題である。今後、ロボットを用いた3次元加工ではこの点を改良する必要があることが分かった。



B-2

X400



X1000

図 3,3,1 スライダーを用いたハイブリッドレーザ加工の結果（その1）

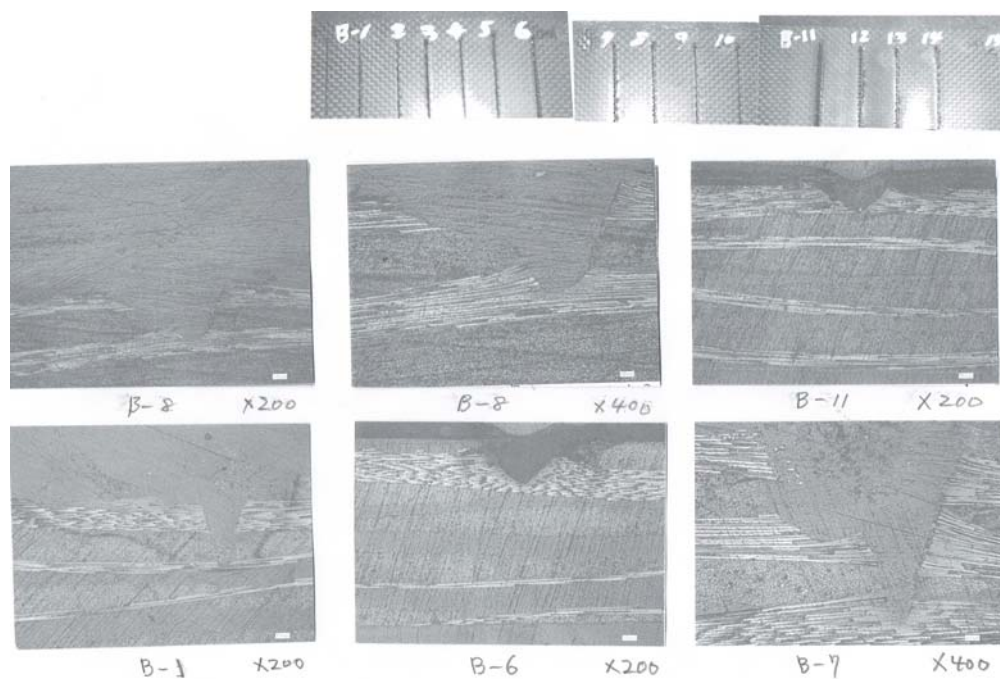


図 3.3.2 スライダーを用いたハイブリッドレーザ加工の結果（その2）

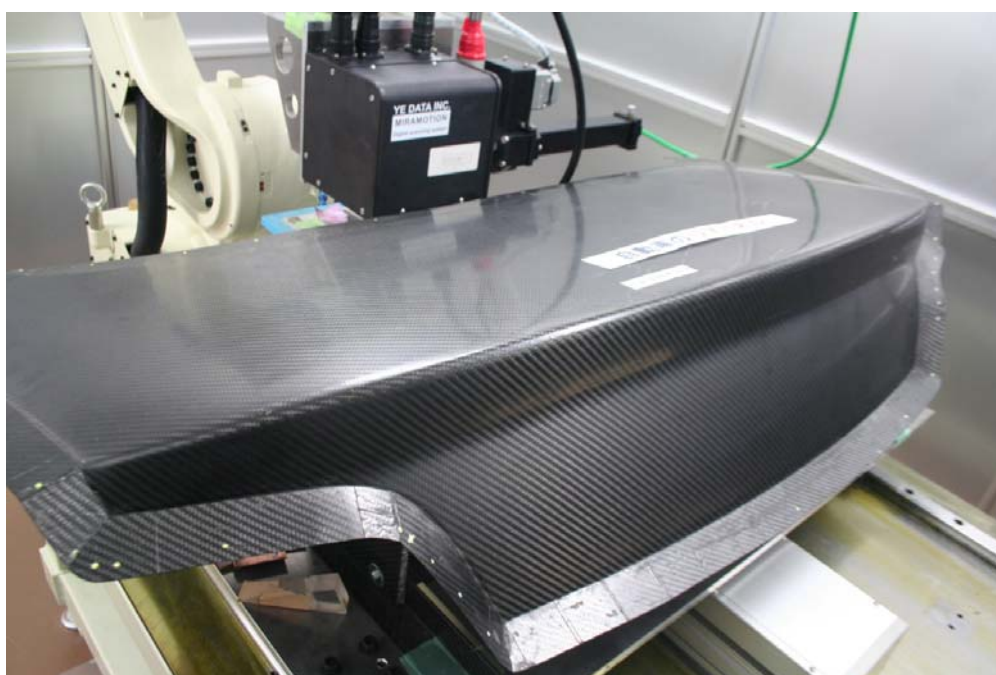


図 3.3.3 自動車パネルのCFRP製リアパネルの外観

表 3.3.2 リアパネルのトリミングの基礎実験の加工条件

試験片No.	アッテネータ調整 出力 P_n (W)	アッテネータ通過後 の出力 (W) $P_n \times 0.75$	DOE 回転数 N	SMファイ バーレーザー 出力 (W)	スキャン速度 (mm/s)	ノズルから Work まで の距離	ロボット走 行速度 (mm/s)	シールドガス 及び流量	スキャン回 数
C-1	80	60	4000	50		5.5	50	N2, 20L/min.	5
C-2	80	60	4000	50		5.5	100	N2, 20L/min.	5
C-3	80	60	4000	50		5.5	200	N2, 20L/min.	5
C-4	80	60	4000	50		5.5	300	N2, 20L/min.	5
C-5	80	60	4000	50		5.5	400	N2, 20L/min.	5
C-6	80	60	4000	100		5.5	50	N2, 20L/min.	5
C-7	80	60	4000	100		5.5	100	N2, 20L/min.	5
C-8	80	60	4000	100		5.5	200	N2, 20L/min.	5
C-9	80	60	4000	100		5.5	300	N2, 20L/min.	5
C-10	80	60	4000	100		5.5	400	N2, 20L/min.	5
C-11	80	60	4000	200		5.5	50	N2, 20L/min.	5
C-12	80	60	4000	200	100	5.5	100	N2, 20L/min.	5
C-13	80	60	4000	200	200	5.5	200	N2, 20L/min.	5
C-14	80	60	4000	200	300	5.5	300	N2, 20L/min.	5
C-15	80	60	4000	200	400	5.5	400	N2, 20L/min.	5

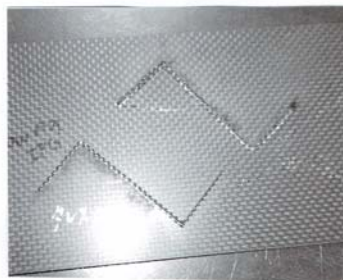
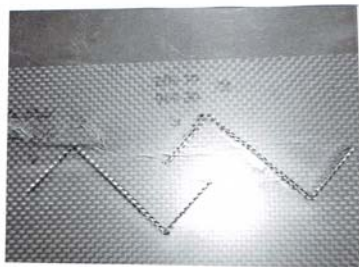
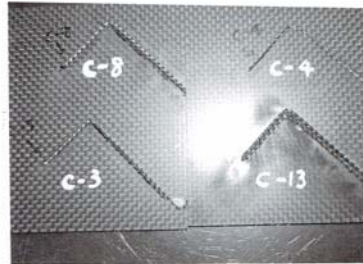
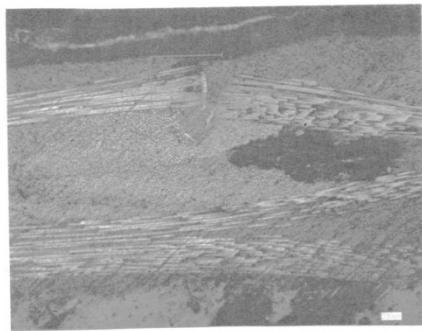
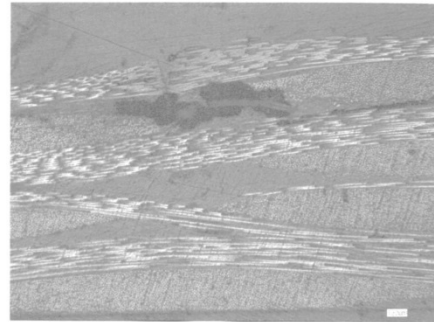


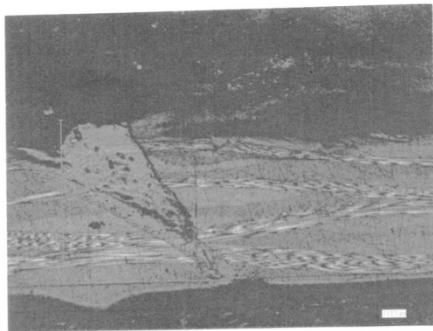
図 3.3.4 ロボットを用いたトリミング加工の加工部の外観



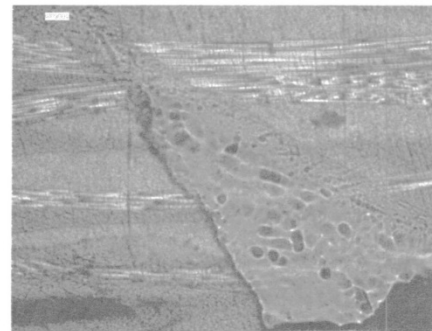
C-1



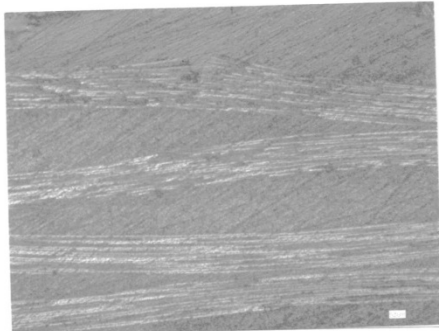
C-2



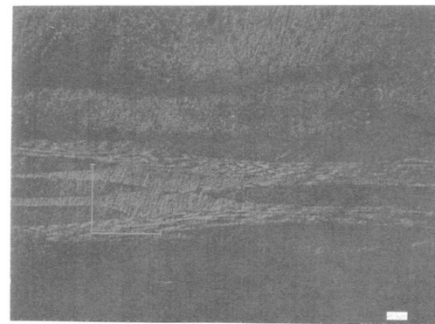
C-4 X100



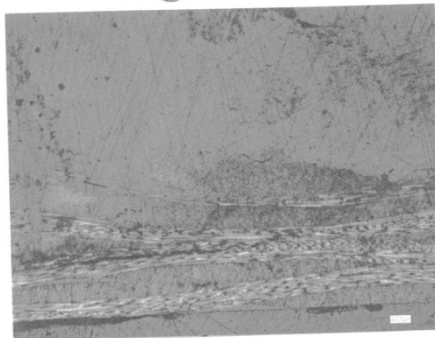
C-4 X200



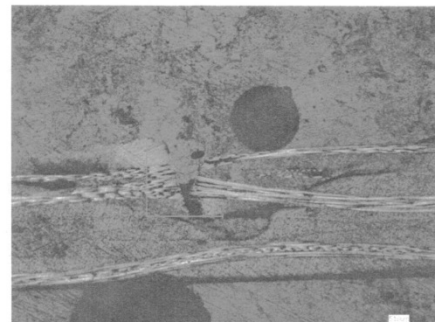
C-5



C-6



C-7



C-8

図 Cシリーズ試験片の断面マクロ写真

図 3.3.5 ロボットを用いたトリミング加工の加工部の断面マクロ写真（その1）

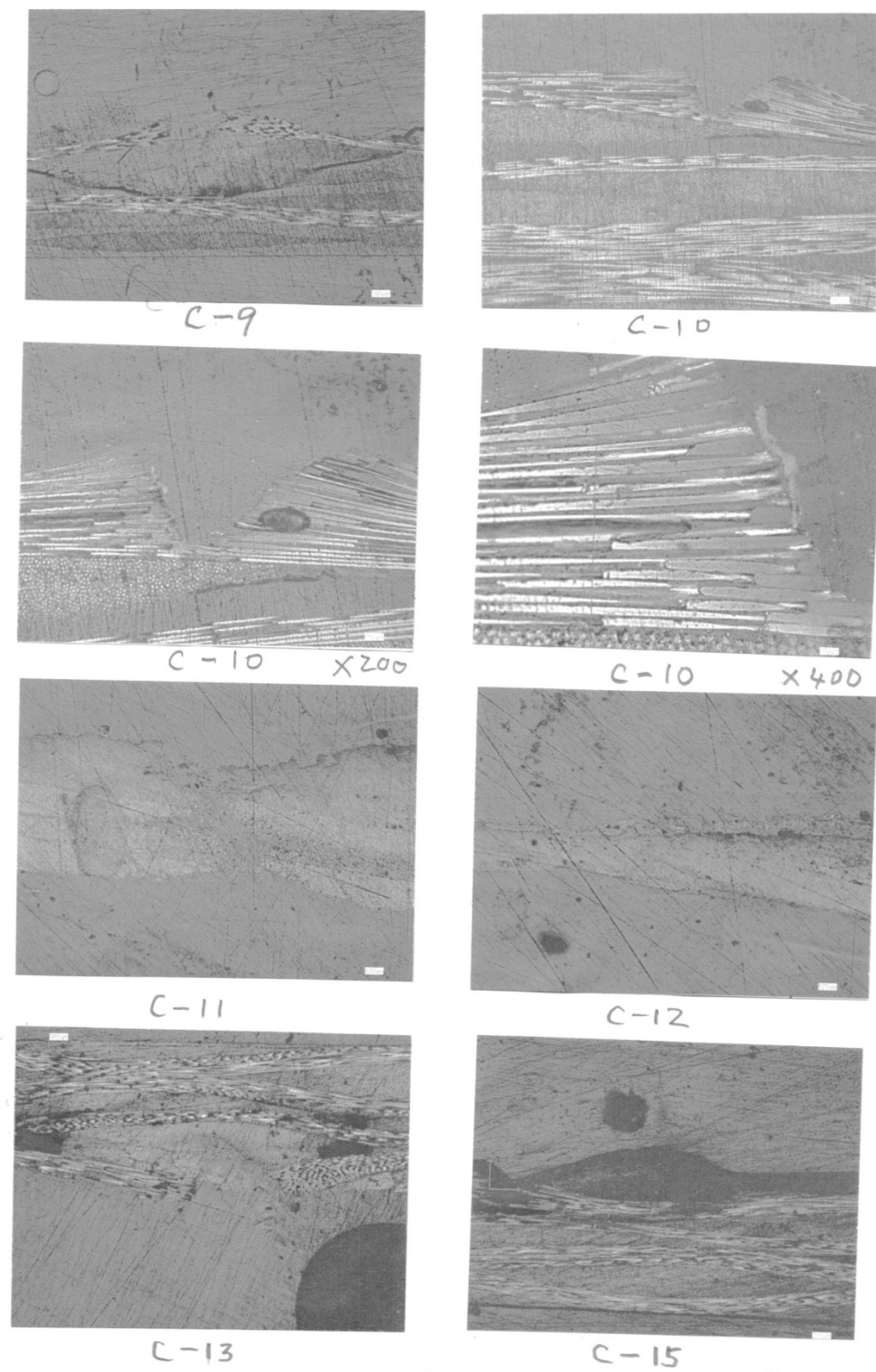


図 Cシリーズ試験片の断面マクロ写真

図 3.3.6 ロボットを用いたトリミング加工の加工部の断面マクロ写真（その2）

【3-2】EV車用モノコック部材のハイブリッドレーザ加工と評価

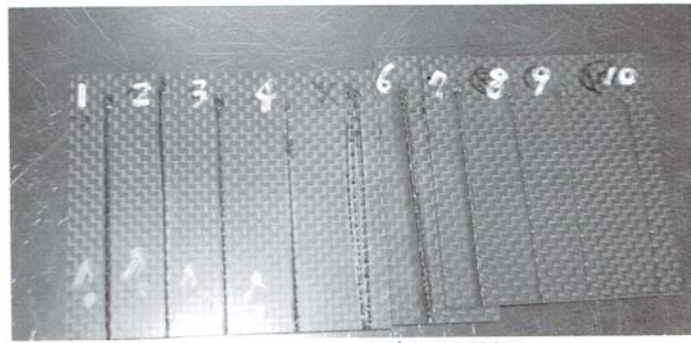
(最新レーザ技研、ナ・デックス、ナ・デックスプロダクツ)

EV車用モノコック部材のショックアブソーバの加工を実施した。

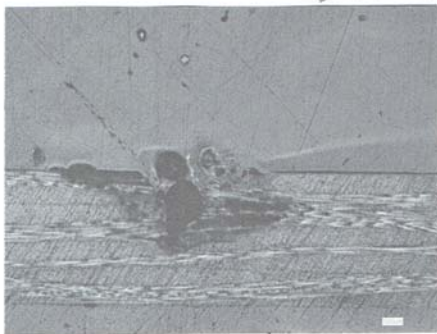
特に、分岐レーザの出力と加工速度の関係を明確にし、レーザ穴あけ加工についてもその被加工物の性能の評価を行った。特に、レーザ出力と加工速度の制御を安定的に実施するために制御システムも組み込んだ。まず、スライダを用いて基礎実験を表 3.3.3 に示す条件で行い、その切断部の断面マクロ写真を撮った。その結果を図 3.3.7 に示す。スライダの速度が速く、加工溝の深さが浅いものが多い結果となった。

表 3.3.3 ショックアブソーバーのレーザ切断の基礎実験条件

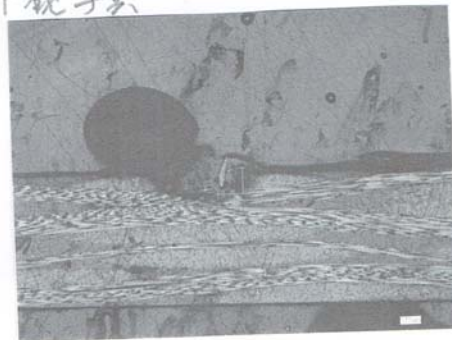
試験片No.	アッテネ ータ調整 出力 P n (W)	アッテネ ータ通過後 の出力(W) P n x 0.75	DOE 回転数 N	SMファイ バーレーザ 出力 (W)	スライダ ー速度 (mm/s) 距離 : 80mm	ノズルから Work まで の距離	ロボット走 行速度	シールドガス 及び流量	スキャン回 数
D-1	80	60	4000	50	50	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-2	80	60	4000	50	100	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-3	80	60	4000	50	200	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-4	80	60	4000	50	300	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-5	80	60	4000	50	400	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-6	80	60	4000	100	50	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-7	80	60	4000	100	100	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-8	80	60	4000	100	200	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-9	80	60	4000	100	300	5.5		N2, 20L/min.	10 往復
D-10	80	60	4000	100	400	5.5		N2, 20L/min.	10 往復



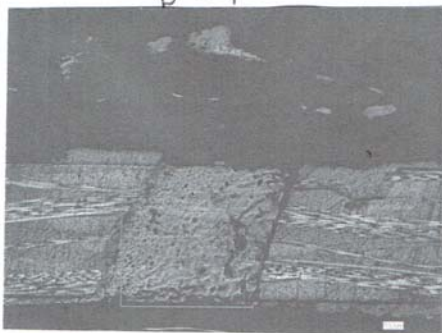
Dシリーズ 外観写真



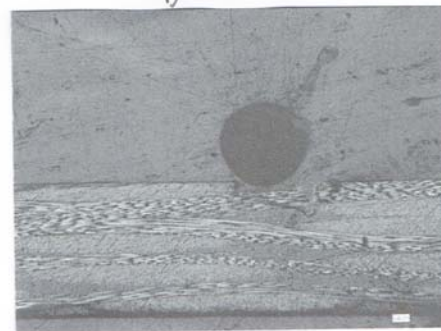
D-1



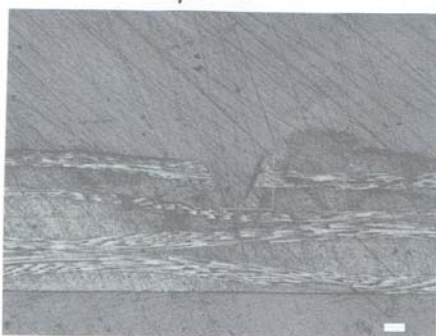
D-2



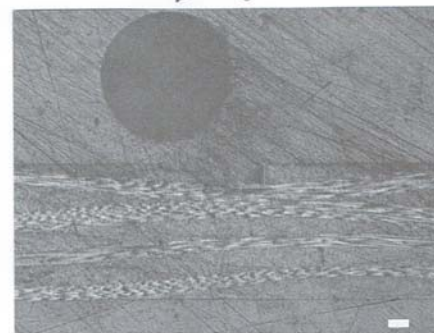
D-3



D-5



D-6



D-10

図 Dシリーズ 切断試験片の断面写真

図 3.3.7 ショックアブソーバーのレーザ切断の基礎実験結果

(4) 航空機器厚板部材の高精度ハイブリッドレーザ加工の実証試験

(4-1) スキンパネルのハイブリッドレーザ加工 (最新レーザ技研、岐阜大学)

高出力の超短パルスレーザビームと連続発振の高輝度ファイバーレーザビームを岐阜・合成した加工光学系を用いて、10mm以上の板厚のCFRP材を高精度で高速レーザ加工する方法及びその制御技術の開発のために解析プログラムを導入し、この研究ををH28年度は実施した。薄板であれば比較的良好な加工ができるが、厚板になるほど、加工に時間がかかり、内部に熱が蓄積しやすくなり、さらに加工物自体の影ができることから垂直断面の加工が難しくなるなど加工品質上の課題が生じてくる。これらの課題を解決するために、内部の熱伝導状態を分析するために、有限要素法を用いた解析プログラムを導入し、加工のシミュレーションをすることにより、より最適な加工条件を追求した。このシミュレーションの基礎データが必要であるので、表3.4.2に示す条件でハイブリッドレーザ加工システムで加工実験を実施した。その結果を図3.4.7.および図3.4.8に示す。

表 3.4.2 シミュレーションのための加工実験の条件

試験片No.	アッテネータ調整 出力Pn (W)	アッテネータ通過後の出力(W) $P_n \times 0.75$	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ 出力(W)	スキャン速度 (mm/s)	ノズルから Workまでの距離 (mm)	ロボット走行速度	シールドガス 及び流量	スキャン回数
A-40	100	75	4000	100	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-41	100	75	4000	200	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-42	100	75	4000	300	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-43	100	75	4000	400	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-44	100	75	4000	500	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-45	100	75	4000	100	800	5.5		N2,0.1MPa	5
A-46	100	75	4000	200	800	5.5		N2,0.1MPa	5
A-47	100	75	4000	300	800	5.5		N2,0.1MPa	5
A-48	100	75	4000	400	800	5.5		N2,0.1MPa	5
A-49	100	75	4000	500	800	5.5		N2,0.1MPa	5
A-50	100	75	4000	100	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-51	100	75	4000	200	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-52	100	75	4000	300	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-53	100	75	4000	400	1200	5.5		N2,0.1MPa	5
A-54	100	75	4000	500	1200	5.5		N2,0.1MPa	5

(書 略)

図 3.4.7 シミュレーション用の基礎実験の加工結果 (その1)

試験片A-42は比較的良好に切断されている。試験片A-45はかなり熱影響部が損傷を

受けている。外観写真を見ても、熱影響部が観察される。

(省略)

図 3.4.8 シミュレーション用の基礎実験の加工結果 (その2)

(4-2) CFRP 製消音パネルの製作と評価 (最新レーザ技研、岐阜大学)

i) 試験片の製作

GH クラフト社製 (東邦テナックス 3K-平織り 4 枚積層: 厚さ 1mm) に、Q スイッチ YAG レーザを用いて多孔加工を施した CFRP 板と、厚さ 20mm の昭和飛行機工業社製 ノーメックスハニカムコア (3B1901175CG-SAH1/4-1.5) (図 3.4.9) を用いて、消音パネル (吸音パネルとも呼ぶ) を接着組立てにより製作した。CFRP 板とハニカムコア材を接着する際、フィルム接着剤を用いるが、この接着剤には、AXIOM 社製 (AX2114-N-0.060) を用いた。

オートクレーブにて接着・成形した消音パネルを図 3.4.10 に示す。

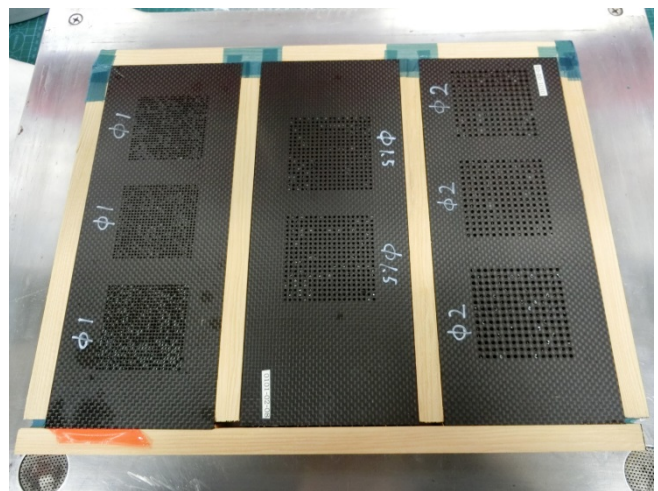
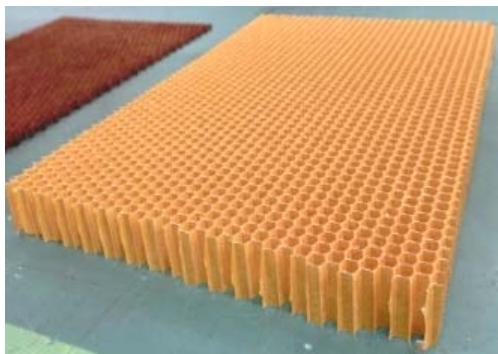


図 3.4.9 ノーメックスハニカムコア材 図 3.4.10 オートクレーブ成形した直後の消音パネル (20mm 厚) 木枠は成形治具 (左から直径 1.0、1.5、2.0mm 孔)

オートクレーブ成形後、樹脂による孔の詰まり具合を確認したところ、孔径が 2.0mm では樹脂詰まりは少なく孔総数に対し 7% 程度であった、孔径が 1.0mm では樹脂詰まりが多

く、孔総数の 30%程度発生した（図 3. 4. 11）。なお、この現象は、孔の下に来るハニカムコアのセルフランジの位置とも関係するのと、孔径が小さい程、接着剤が軟化した際の表面張力が大きくなる傾向にある。

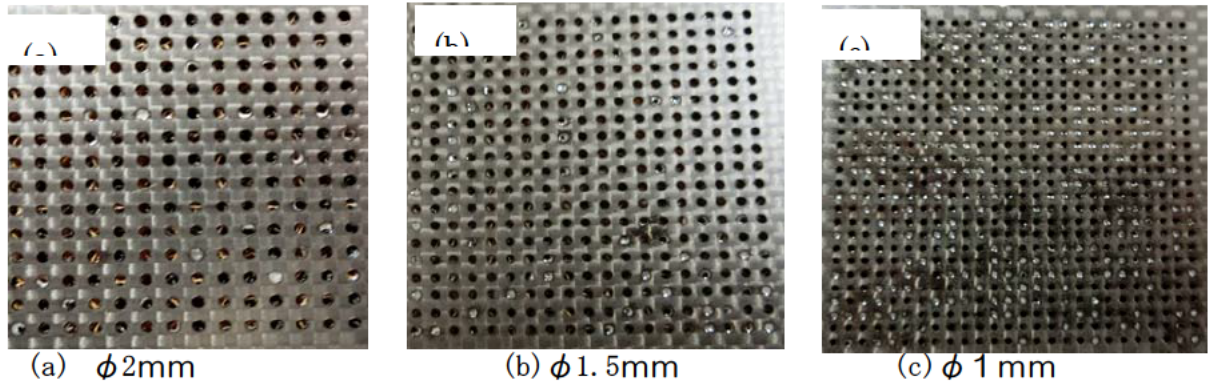


図 3. 4. 11 オートクレーブ成形後のCFRP多孔板

ii) 吸音率の測定

ヘルムホルツ型吸音パネルの性能を評価するために本研究で製作したCFRP製吸音パネルを用いて、インピーダンスチューブ試験用の試験片をNC加工にて切り出した（図 3. 4. 12）。試験片形状は図 3. 4. 13 に示す円形で直径 29.0mm とした（利用するインピーダンス試験機の鉄管の内径が 29mm）。

次に各試験片における開口率を求めた。なお、孔に樹脂が埋まっている部分もあるため、真の開口率を同時に求めた。開口率は下記の（1）式より求めた。ここで、 Or_1 は開口率、 S は試験片の表面積、 s は孔の面積、 N は孔の個数を表す。

次に、真の開口率は樹脂の詰まり具合と孔形状を考慮し、（2）式より有効係数を求めた。このとき I は有効係数、 N は全孔数、 n_1 は有孔数、 n_2 は半樹脂埋まり、 n_4 は端部半円有孔数を示す。（2）式と下記の（3）式より真の開口率を求めた。ここで Or_2 は真の開口率、 S は試験片の表面積、 s は孔の面積、 I は有効係数を示す。

$$Or_1 = \frac{s \times N \times 100}{S} \quad (1)$$

$$I = \frac{n_1 + (0.5 \times (n_2 + n_4))}{N} \quad (2)$$

$$O_{r2} = \frac{s \times I \times 100}{S} \quad (3)$$

すべての試験片において、開口率と真の開口率を比較すると差があり、吸音パネルの吸音率を測定する場合、樹脂の詰まり具合を考慮して、開口率は真の開口率を用いる必要がある。各試験片の開口率を表 3. 4. 3 に示す。

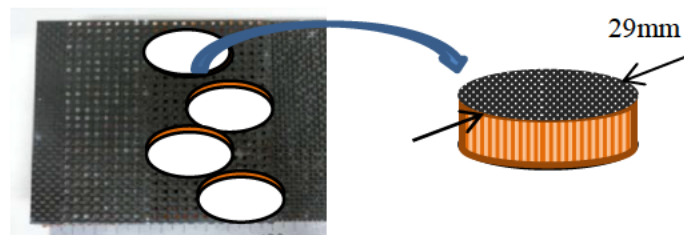


図 3. 4. 12 NC 加工で切り出した模式図



図 3. 4. 13 NC 加工後のインピーダンスチューブ試験用の試験片

(左から $\phi 2\text{mm}$, 1.5mm , 1mm)

吸音率の測定は、名古屋市工業技術研究所にてインピーダンスチューブ方式の音響測定装置（ブリュエル・ケアー社製：Type4206）を用いた。試験条件のサンプリング周期は 10Hz にてピーク周波数と垂直入射吸音率（ASTM E1050-12、ASTM E2611-09 準拠）の測定の装置の模式図を図 3. 4. 14 に、試験装置の写真を図 3. 4. 15 に示す。

吸音率と周波数の平均値を表 3. 4. 4 にまとめた。また、図 3. 4. 16 には孔径 $\phi 2.0\text{mm}$ 、図 3. 4. 17 には孔径 $\phi 1.5\text{mm}$ 、図 3. 4. 18 には孔径 $\phi 1.0\text{mm}$ のときの、全試験片

のピーク周波数と垂直入射吸音の結果を示す。この結果から、最も消音効果の高い孔径は $\phi 1.0\text{mm}$ であった。またその周波数から航空機のエンジンの高周波音の減少に効果が期待されるものとする。

表 3. 4. 3 各試験片に対する開口率と吸音率測定結果

No.	全孔数 [N]	有孔数 [n ₁]	半樹脂埋まり [n ₂]	樹脂埋まり [n ₃]	端部半円有孔数 [n ₄]	有効係数 [$=n_1+(0.5 \times (n_2+n_4))/N$]	円盤の面積 [$S=\pi d^2/4$]	孔の面積 [$S=\pi d^2/4$]	開口率 [$O_1=s \times N \times 100/S$]	真の開口率 [$O_2=s \times 1 \times 100/S$]	周波数 [Hz]	吸音率
$\phi 2$	1	44	33	2	1	8	33.11	3.23	21.56	16.23	2864	0.564
	2	44	30	6	2	6	30.14		21.56	14.77	2952	0.673
	3	44	32	3	1	8	32.13		21.56	15.74	2912	0.587
	4	45	35	2	3	5	35.08		22.05	17.19	2664	0.535
	5	45	32	1	4	8	32.10		22.05	15.73	2848	0.585
	6	43	30	6	3	4	30.12		21.07	14.76	2632	0.512
$\phi 1.5$	7	78	54	8	5	11	54.12	1.74	38.22	14.29	2400	0.455
	8	75	54	5	6	10	54.10		36.75	14.28	2832	0.443
	9	78	60	3	3	12	60.10		38.22	15.86	2472	0.438
	10	74	47	7	11	9	47.11		36.26	12.44	2272	0.517
$\phi 1$	11	167	69	25	51	22	69.14	0.79	81.83	8.22	2168	0.652
	12	165	69	27	50	19	69.14		80.85	8.22	2600	0.714
	13	166	82	18	49	17	82.11		81.34	9.76	2072	0.769
	14	162	70	19	56	17	70.11		79.38	8.34	2568	0.775
	15	165	81	26	38	20	81.14		80.85	9.65	2456	0.712
	16	167	64	26	56	21	64.14		81.83	7.63	2488	0.7

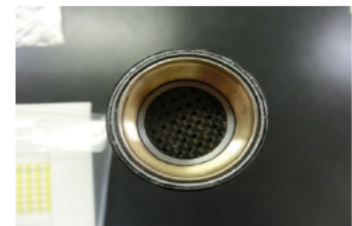
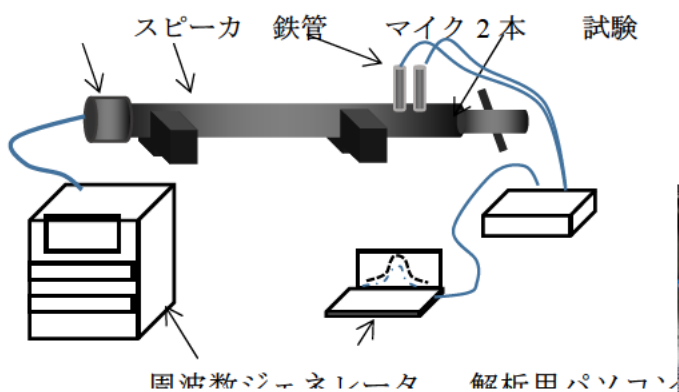


図 3. 4. 14 インピーダンスチューブ方式の 図 3. 4. 15 音響測定装置外観（下）と
音響測定装置模式図 試験片を吸音管に入れた状態（上）

表 3.4.4 各孔径に対する測定結果の平均値

多孔径 (mm)	平均値		
	周波数 (Hz)	吸音率	真の開口率 (%)
ϕ 2.0	2812	0.576	15.73
ϕ 1.5	2494	0.463	14.22
ϕ 1.0	2392	0.720	8.64

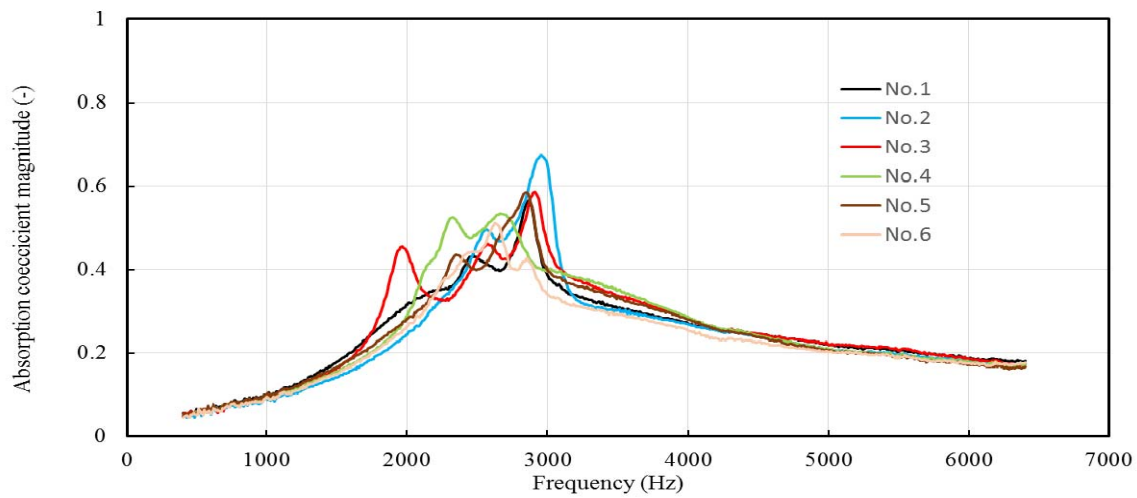


図 3.4.16 ϕ 2.0mmのピーク周波数と垂直入射吸音

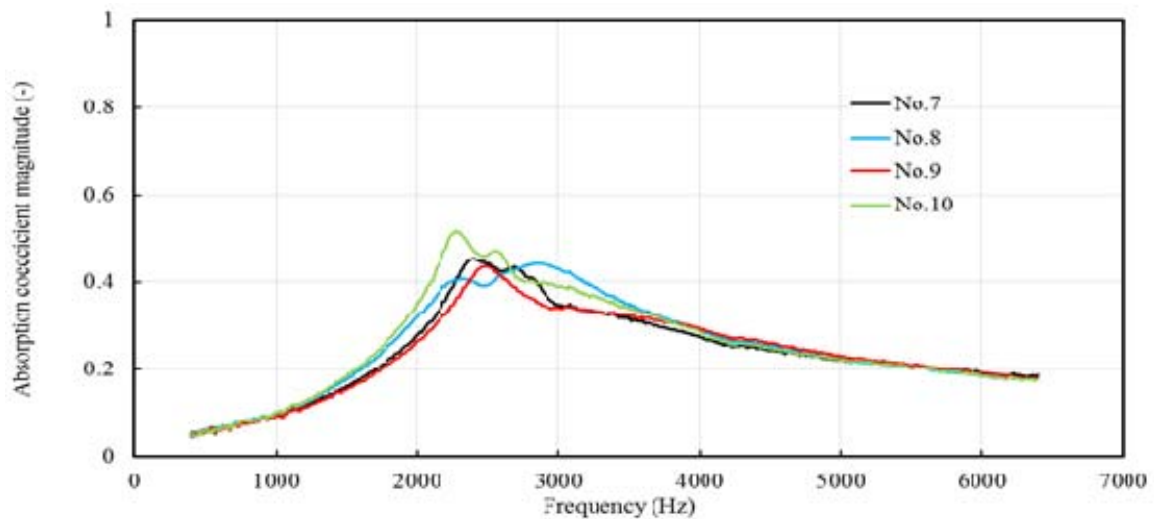


図 3.4.17 ϕ 1.5mmのピーク周波数と垂直入射吸音

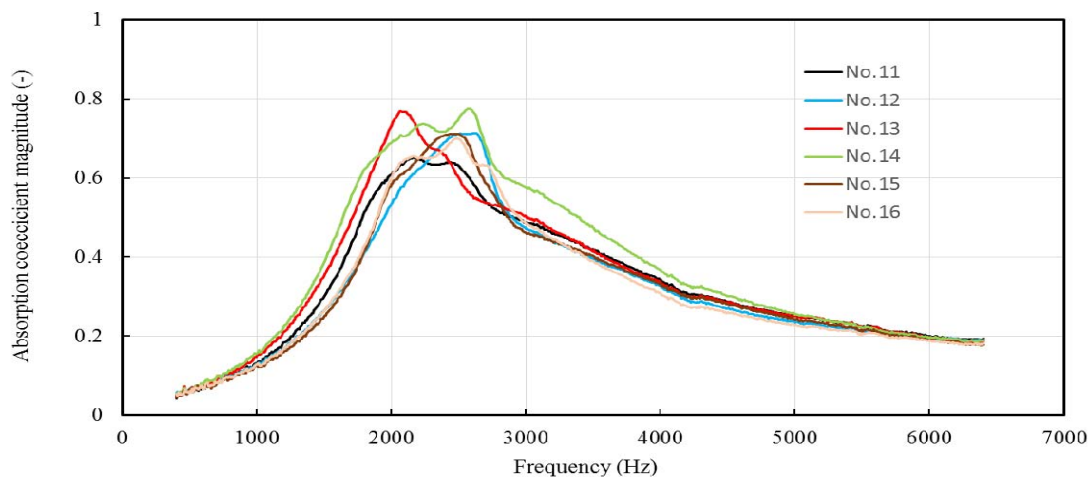


図 3.4.18 $\phi 1.0\text{mm}$ のピーク周波数と垂直入射吸音

iii) ハイブリッドレーザを用いての多孔板加工

CFRP に開発間際のハイブリッドレーザを用いて、多孔板を加工する実験を行った。何とかロボットを用いた多孔加工プログラムも作動し、孔加工はできたが、まだレーザの焦点設定や、最適条件だしが十分ではないために、孔が密集した構造に対しての、熱影響が蓄積し、HAZ の影響が高かったことから、材料に毛羽が発生したことから、吸音パネルへの応用までにはいたらなかった（図 3.4.19）。しかしながら、今後、レーザ焦点が改善され、加工条件が決まりさえすれば、Q スイッチ YAG レーザ以上に高効率の孔加工が成り立つと考えるので、装置の光学系改良が今後の課題と考える。



図 3.4.19 $\phi 1.0\text{mm}$ の穴を256個あけたCFRP消音パネル上板

消音パネルの穴あけ加工条件の検討

ジェットエンジンの音を消音する消音パネルをCFRPとアラミドハニカムを用いて製作すると大きな軽量化ができる。そこで、試作したハイブリッドレーザ加工システムで多数の穴あけ加工を実施する場合の加工条件を検討した。表 3.4.5 は従来のスキャナーの制御ソフトを用いて1個または16個の穴あけ実験したときの条件を示す。その結果を図 3.4.20 に示す。16個の穴をあける順序がおかしく、試験片O-10およびO-11に示されるように中心点に戻って、それぞれの穴があげられる順序になっていた。そこで、このソフトのプログラムの変更を行ったが、試験片-12やO-13にみられるように、穴から穴へと移動する際もレーザが発振しており、キズができていた。この不具合をスキャナーのメーカーであるYEデータに連絡し、ソフトの修正を後日行った。プログラムを修正した上、さらに16穴の穴あけ加工の条件出しを表 3.4.6 に示す条件で行った、実験結果を図 3.4.21 3.4.24 に示す。

表 3.4.6 修正したプログラムでの16穴同時加工の条件出し実験の条件（その1）

試験片No.	アッテネータ調整 出力Pn (W)	アッテネータ通過後 の出力(W)	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ 出力(W)	スキャン速度 (mm/s)	ノズルから Workまでの 距離	ロボット走行速度	シールドガス 及び流量	スキャン 回数
P-1	40	30	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-2	40	30	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-3	40	30	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-4	30	22, 5	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-5	30	22, 5	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-6	30	22, 5	4000	50	300	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-7	20	15	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-8	20	15	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-9	20	15	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-10	40	30	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-11	40	30	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-12	40	30	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-13	30	22, 5	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-14	30	22, 5	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-15	30	22, 5	4000	50	300	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-16	20	15	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-17	20	15	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-18	20	15	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5

外観を見ると、熱影響部も狭く、良好に見える。断面マクロ写真を見ると、試験片2およ

び4は切断面がシャープである。試験片5および6も鋭い見度として溝加工されている。
熱影響部も見られない。ただ、条件によっては試験片P-11やP-30のようによくな
いものもある。

表 3.4.6 修正したプログラムでの16穴同時加工の条件出し実験の条件（その2）

試験片No.	アッテネ ータ調整 出力P _n (W)	アッテネ ーター通 過後の出 力(W)	DOE 回転数 N	SMファ イバーレ ーザ 出力(W)	スキャン速度 (mm/s)	ノズルから Workまで の距離	ロボット 走行速度	シールドガス 及び流量	スキャン回 数
P-19	40	30	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-20	40	30	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-21	40	30	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-22	30	22, 5	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-23	30	22, 5	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-24	30	22, 5	4000	50	300	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-25	20	15	4000	50	100	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-26	20	15	4000	50	200	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-27	20	15	4000	50	400	5.5		N2, 0.1MPa	5
P-28	40	30	4000	0	1200	5.5		N2, 0.1MPa	5 x 5
P-29	40	30	4000	0	1200	5.5		N2, 0.1MPa	5 x 6
P-30	40	30	4000	0	1200	5.5		N2, 0.1MPa	5 x 7
P-31	40	30	4000	0	1200	5.5		N2, 0.1MPa	10 x 10

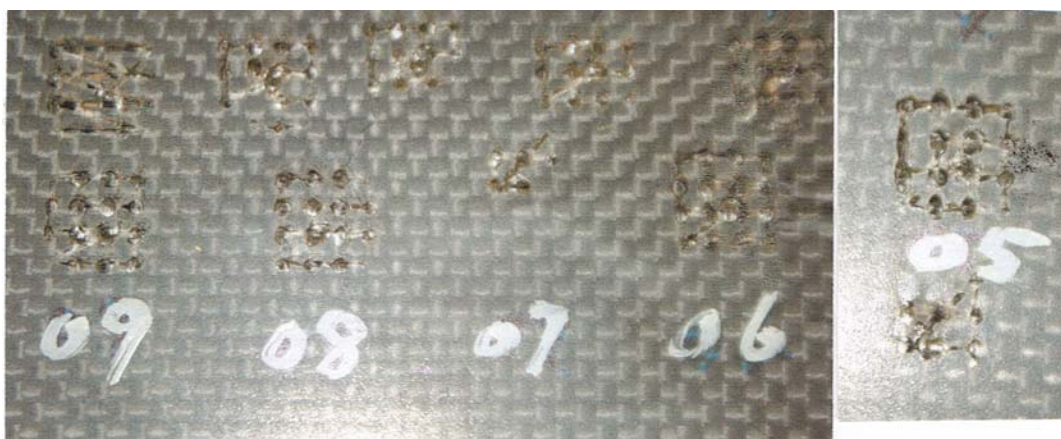
CFRPに明けた穴径は

P-1 ~ P-9 は1.0mm径

P-10 ~ P-18は2.0mm径

P-19 ~ P-27は1.5mm径

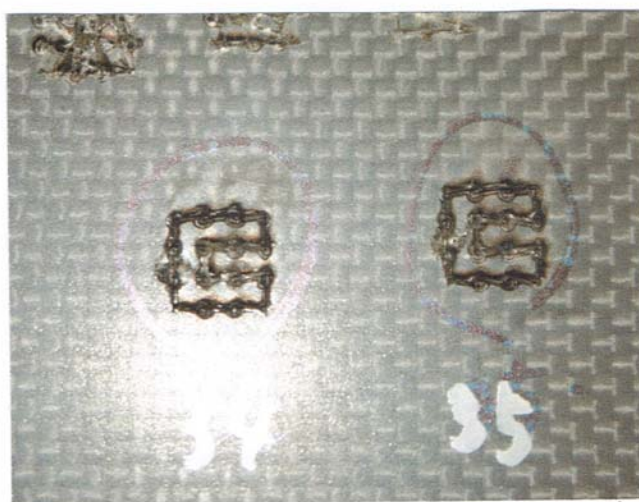
なお、試験片P-10 ~ P-27は SP-10 ~ SP-27とも表現している、



P-05 ~ P-09 外観写真



P-30 と P-31 の外観写真



SP-34 と SP-35 の外観

図 3. 4. 21 修正したプログラムでの16穴同時加工の条件出し実験結果（その1）

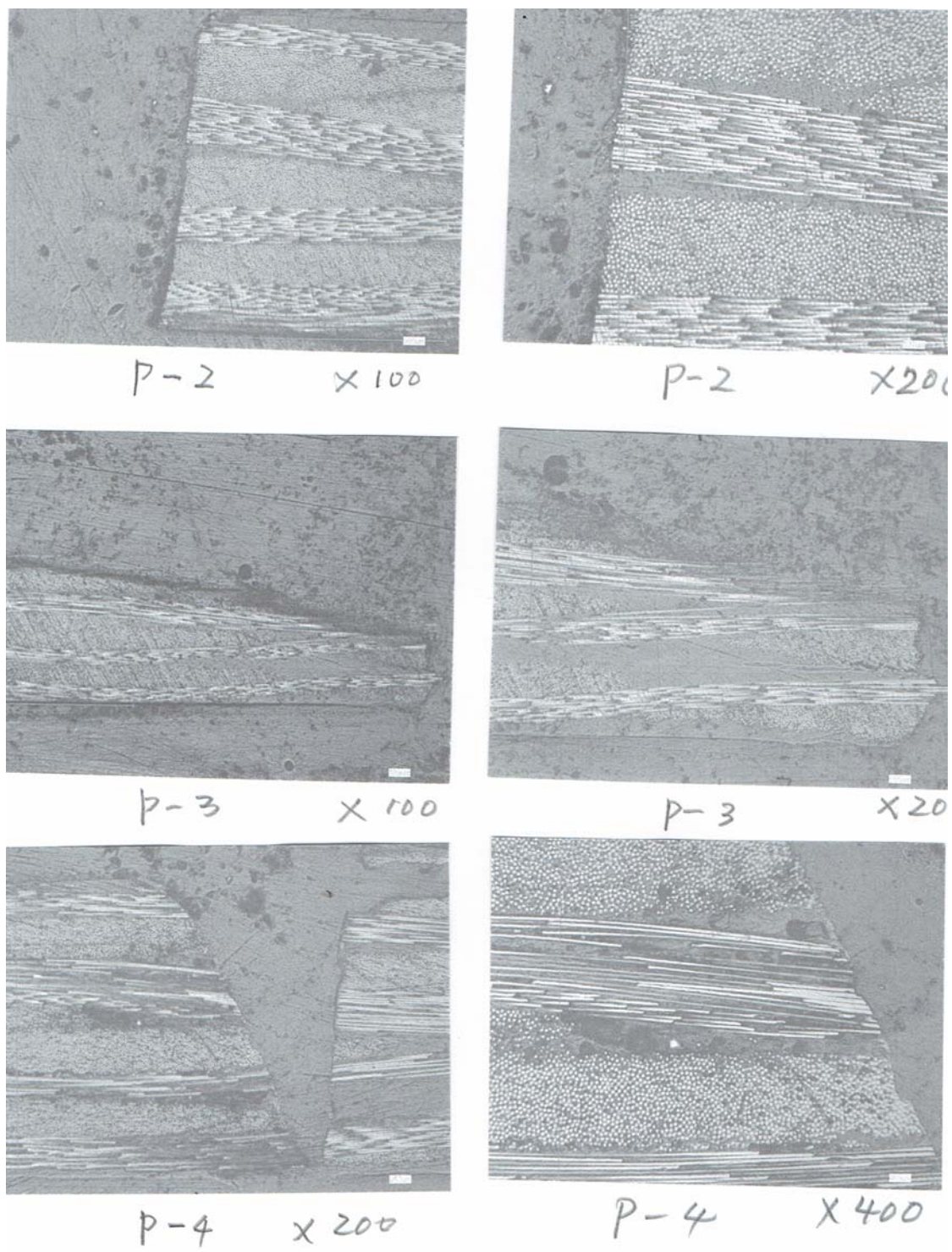


図 3.4.22 修正したプログラムでの16穴同時加工の条件出し実験結果（その2）

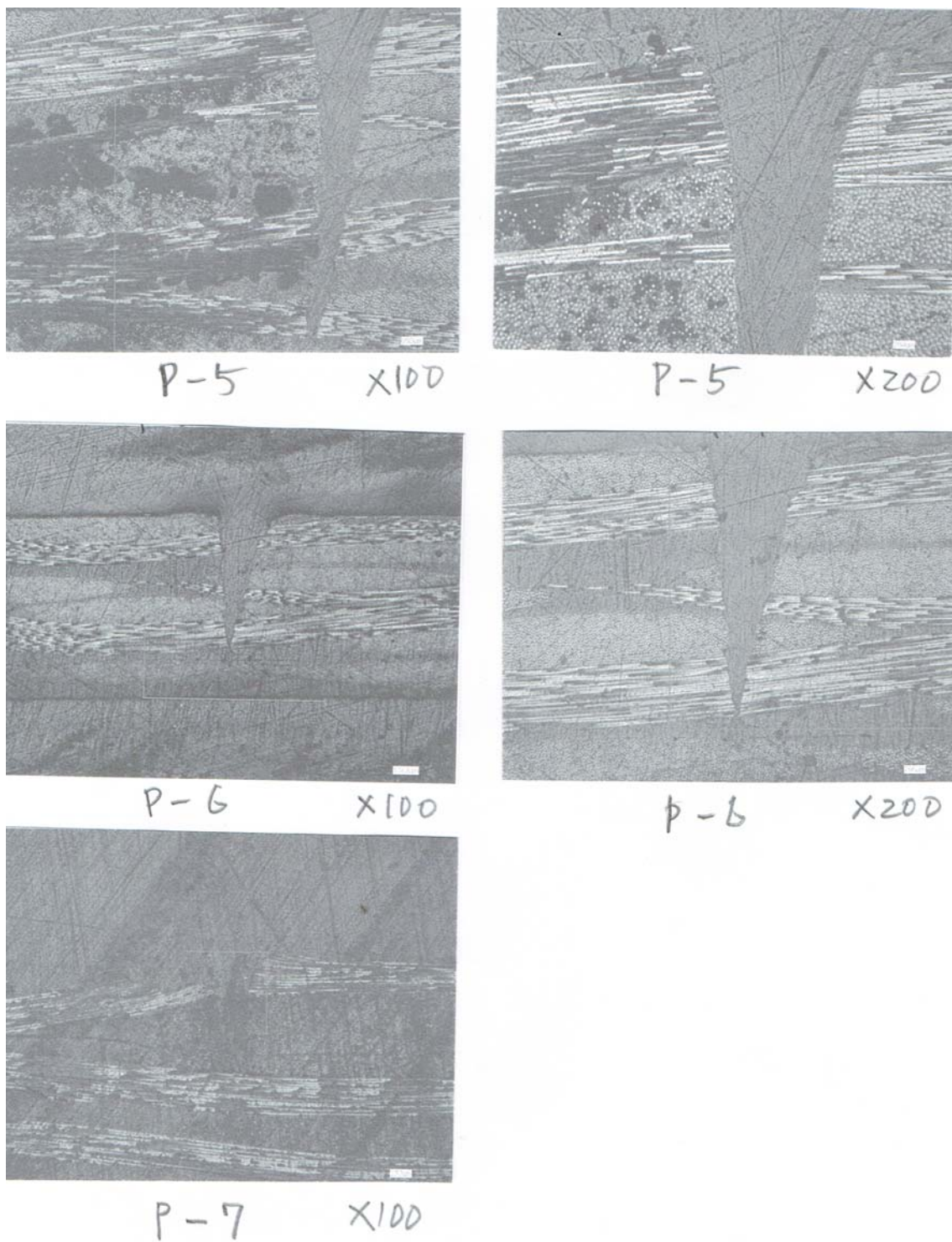


図 3. 4. 23 修正したプログラムでの16穴同時加工の条件出し実験結果（その3）

（ 省略 ）

図 3. 4. 24 修正したプログラム での16穴同時加工の条件出し実験結果（その4）

試験片P-2、P-4、P-5、P-6は切断面がシャープでアブレーション加工となっている。次に、スキャナーの制御ソフトを修正し、穴と穴の間でレーザが発振しないように修正した。修正前と修正後の加工条件を表3.4.7に示す。図3.4.25にその結果を示す。試験片K-1は修正前の結果であり、試験片N-1は改善後の結果である。このように、16個の穴が同時に加工された。

表 3.4.7 スキャナーの制御ソフトを修正する前（K）と後（N）の加工条件

試験片No.	アッテネータ調整 出力 P _n (W)	アッテネータ通過後 の出力(W) P _n × 0.75	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ 出力 (W)	スキャン 速度 (mm/s)	ノズルから Work までの 距離	穴形状	シールドガス 及び流量	スキャン回 数
K-1	100	75	4000	0	1200	5.5	□ 穴	N2, 0.3MPa	
K-2	100	75	4000	0	400	5.5	16 穴	N2, 2.0L/min.	
K-3	100	75	4000	100	400	5.5	□ 穴	N2, 20L/min.	
K-4	0	0	4000	50	1200	5.5	□ 穴	N2, 20L/min.	
K-5	0	0	4000	100	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	
N-1	100	75	4000	300	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	
N-2	0	0	4000	100	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	
N-3	100	75	4000	0	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	
N-4	100	75	4000	100	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	
N-5	100	75	4000	300	400	5.5	16 穴	N2, 20L/min.	

K-1～5は 修理前

N-1～5は修理後の16穴加工である。

CFRPは1.0mm厚

さらに、16穴の穴あけ加工の条件出し実験を行った。表3.4.8はその加工条件を示す。

表 3.4.8 はその加工条件を示す。

表 3.4.8 16穴の穴あけ加工の条件出し実験条件

試験片No.	アッテネータ調整 出力 P _n (W)	アッテネータ通過後 の出力(W) P _n × 0.75	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ 出力 (W)	スキャン 速度 (mm/s)	ノズルから Work までの 距離	ロボット走 行速度	シールドガス 及び流量	スキャン回 数
G-1	100	75	4000	0	400	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-2	100	75	4000	0	400	5.5		N2, 20L/min.	5回
G-3	100	75	4000	0	400	5.5		N2, 20L/min.	10回
G-4	100	75	4000	100	400	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-5	100	75	4000	100	400	5.5		N2, 20L/min.	5回
G-6	100	75	4000	100	400	5.5		N2, 20L/min.	10回
G-7	100	75	4000	300	400	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-8	100	75	4000	300	400	5.5		N2, 20L/min.	5回
G-9	100	75	4000	300	400	5.5		N2, 20L/min.	10回
G-10	100	75	4000	300	100	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-11	100	75	4000	300	200	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-12	100	75	4000	300	300	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-13			4000	100	100	5.5		N2, 20L/min.	1回
G-14			4000	100	100	5.5		N2, 20L/min.	5回
G-15			4000	100	100	5.5		N2, 20L/min.	10回
G-16			4000	200	100	5.5		N2, 20L/min.	5回
G-17			4000	200	100	5.5		N2, 20L/min.	10回
G-18			4000	200	100	5.5		N2, 20L/min.	20回
本番	100	75	4000	300	100	5.5		N2, 20L/min.	5回

(省 略)

図 3. 4. 25 スキャナー制御ソフトの修正前語の加工結果

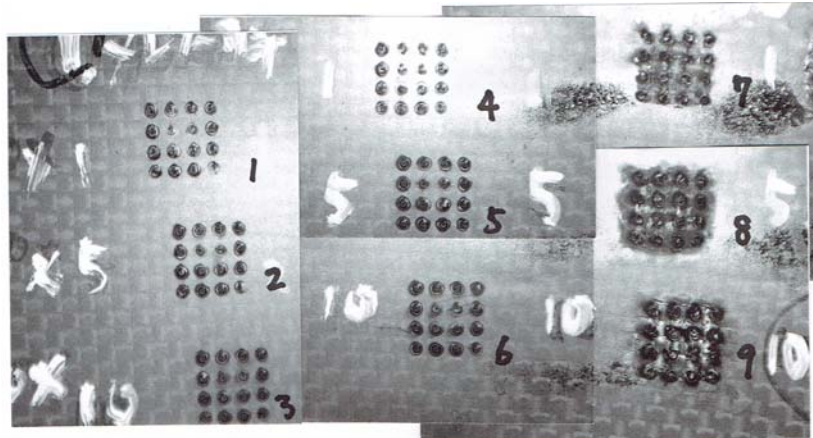


図 3. 4. 26 消音パネルの穴あけ (Gシリーズ) の外観

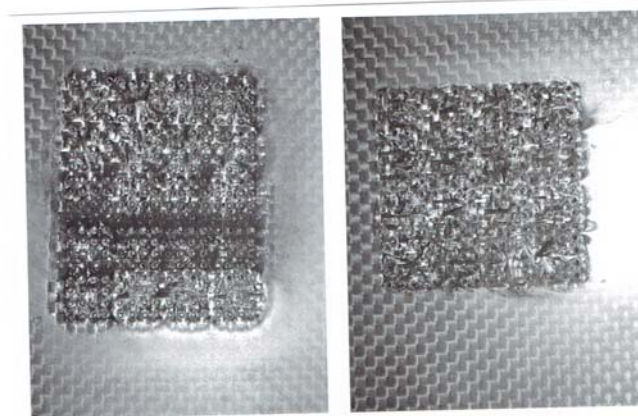


図 3. 4. 26 1 6穴の穴あけ加工の条件出し実験結果

(下図右は最終的に2 5 6穴加工したパネルの外観)

なお、このパネルは消音パネルの吸音率の計測に適用できないとの判定があり、その対応として、1 5 Wの超短パルスレーザを用いて、消音パネル上板の穴あけを実施した。その時の条件は表 3. 4. 9 に示す。その結果を図 3. 4. 27 に示す、非常にシャープにアブレーション加工されている。

表 3. 4. 9 15W超短パルスレーザを用いた消音パネル上板の穴あけ条件

CFRP消音パネルの加工条件

使用装置: 平均出力15WのQスイッチパルスYAGレーザ

焦点位置	平均出力 W	周波数 Hz	スキャン速度 mm/s	パス数 passes
ジャストフォーカス	10	7	50	200~250

* $\phi 1$ 、1.5、2ともに同じ条件で加工

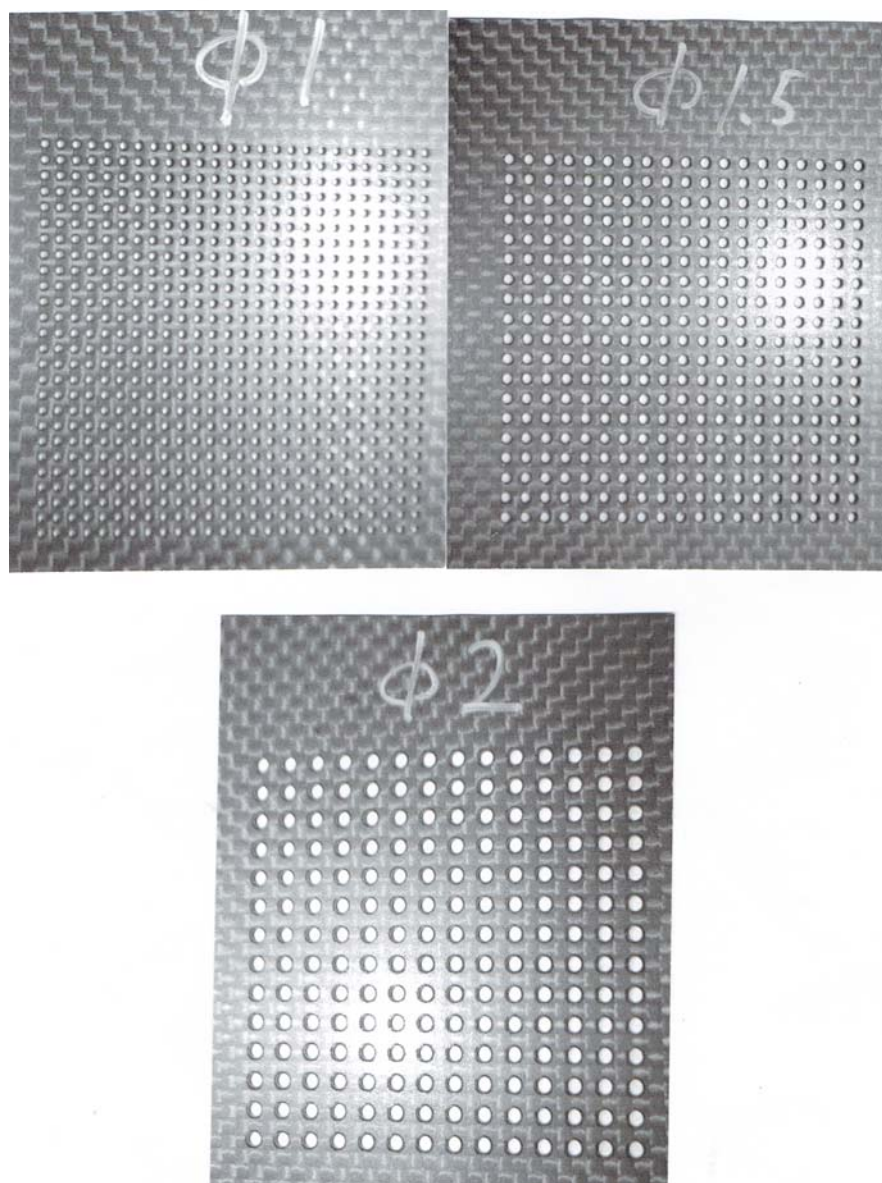


図 3. 4. 27 15W超短パルスレーザで加工された消音パネル上板の穴

開発したハイブリッドレーザ加工システムを用いて、どうしても消音パネルを加工したく、再度 表 3. 4. 10 に示す加工条件で パネルの1. 0mm径の穴あけを実施した。そして、F－3の条件で256穴の加工をして、岐阜大学に送付したが、このパネルも吸音率を計測するには不十分の品質であった。ただ加工時間は 15Wの超短パルスレーザによる加工に比べて、約5分の1の時間で加工できた。穴あけの品質を高めるために、今後は加工中のアシストガスについても十分検討する必要がある。

表 3. 4. 10 ハイブリッドレーザ加工システムによる消音パネルの加工条件

試験片No.	アッテネータ調整 出力 P_n (W)	アッテネータ通過後の出力(W) $P_n \times 0.75$	DOE 回転数 N	SMファイバーレーザ 出力 (W)	スキャン速度 または (mm/s)	焦点はずし 距離 Df (mm) Work までの距離	ロボット走行速度	シールドガス 及び流量	スキャン回数
F－1	100	75	4000	250	400	5. 5		N2, 20L/min.	10回
F－2	100	75	4000	250	200	5. 5		N2, 20L/min.	20回
F－3	100	75	4000	250	100	5. 5		N2, 20L/min.	5回

本番は F－3の加工条件で 16穴 x 16エリア = 256穴 あけた。

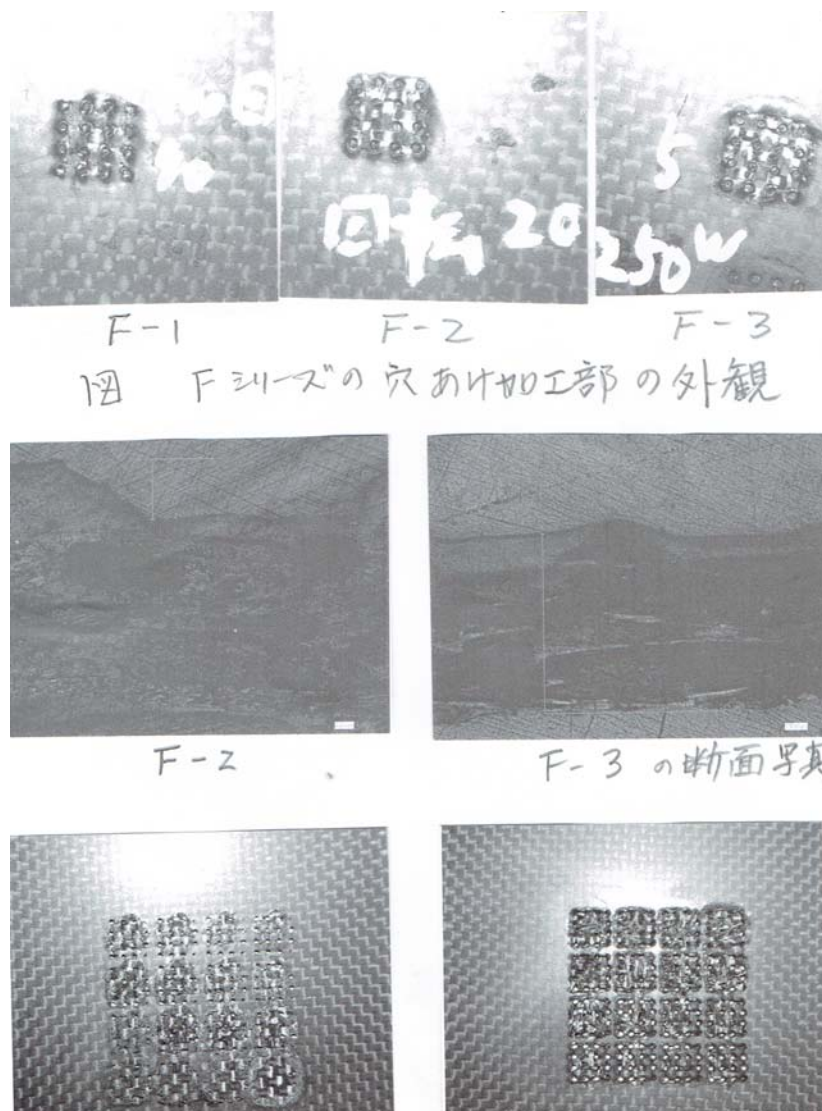


図 3. 4. 27 ハイブリッドレーザ加工システムによる消音パネルの加工

下図が穴あけしたパネル

(2-5) プロジェクトの管理・運営

事業運営をスムーズに進めるために、補助事業者が主体となり間接補助事業者と共に研究開発委員会を開催し、研究共同体の意思決定・計画見直し等のサポート及び、各種事務処理を行った。

年度	委員会等名	日時	場所
平成 26 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 26 年 12 月 19 日（金） 13 時 30 分から 15 時 30 分	国立大学法人 岐阜大学
	第 2 回研究開発委員会	平成 27 年 3 月 12 日（木） 13 時 30 分から 15 時 30 分	株式会社最新 レーザ技術研究 センター
平成 27 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 27 年 11 月 27 日（金） 14 時 00 分から 16 時 00 分	株式会社最新 レーザ技術研究 センター
	第 2 回研究開発委員会	平成 28 年 2 月 24 日（金） 14 時 00 分から 16 時 00 分	株式会社最新 レーザ技術研究 センター
平成 28 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 28 年 9 月 8 日（木） 14 時 00 分から 16 時 00 分	株式会社最新 レーザ技術研究 センター
	第 2 回研究開発委員会	平成 29 年 2 月 2 日（木） 13 時 30 分から 15 時 30 分	株式会社最新 レーザ技術研究 センター

上記委員会の開催や定期的な進捗状況の報告の他に、プロジェクトメンバーと随時打ち合わせを行い、研究開発の進捗状況及び経費執行状況についての確認を行った。

第3章 全体総括

3. 1 複数年の研究開発成果

（1－1）ビーム分岐合成光学系の設計・試作

平均レーザ出力、150Wの超短パルスレーザをビーム分岐合成光学系に導光し、500Wのシングルモードファイバーレーザと合成し、スキャナーで1200mm/sの高速でスキャンすることができるようになった。このビーム分岐合成光学系をロボットに装着して3次元加工も可能になった。

（1－2）高出力の超短パルスレーザ装置の導入

平均出力150WのQスイッチYAGレーザ（波長：532nm）から発振されるグリーンの超短パルスレーザをアッテネータで出力調整を安定にできるようになったので、CFRPの加工を安定して実施できると思う。ビーム分岐合成光学系まで伝送する伝送用ファイバーも開発できたので、今後、ロボットを用いたハイブリッドレーザ加工システムで3次元加工も可能となる。

（1－3）試作したビーム分岐合成光学系の性能評価

この光学系の性能評価を検討したところ、ドリルで穴あけした試験片よりも高い破断強度を示したことで、ハイブリッドレーザ加工品の品質が保証された。

（2－1）高能率・高精度ハイブリッドレーザ加工システムの設計・試作

2次元および3次元の被加工物（CFRP等）を高精度で高能率に加工する高輝度ファイバレーザと超短パルスレーザを世界で初めてハイブリッド化したハイブリッドレーザ加工システムを設計。試作できた。光ファイバー伝送方式による3次元加工システムである。これらの機器を一元的に制御する制御盤が完成できたので、市販されやすくなった。

（2－2）ハイブリッドレーザ加工システムの制御・運転に関するソフトの開発

- ・レーザ加工システム各機器の制御・操作に関して、制御システムを完成するとともに操作盤も完成させ、その取扱い説明書を作成した。
- ・非常停止等の安全措置をもつ安全柵を製作した。
- ・スキャナーも制御盤から一元制御できるようにした。これらのことは市販するときに重要なことで、企業化へ一歩前進できた。

（2－3）試作したハイブリッドレーザ加工システムの性能評価

全体の装置が完成したので、CFRPの切断および穴あけ加工を行ない、加工部の評価を、外観写真、断面マクロ写真、マイクロスコープなどによる観察、有孔引張試験などにより、詳細に調査した。その結果、従来の超短パルスレーザによる加工に比べて、直線加工で6倍の加工速度で、16穴加工で約5倍の加工速度を達成した。また、アブレーション加工が生じており、切断断面は非常にシャープで有孔引張試験ではドリル加工した試験片よりも高い破断強度を示した。

（3）自動車薄板部材の高精度ハイブリッドレーザ加工の実証試験

（3－1）自動車フードのハイブリッドレーザ加工

開発した高精度ハイブリッドレーザ加工システムを用いて、板厚1～4mmのCFRP部材を、レーザ切断する加工条件を実験により求めた。20m/分以上のスキャン速度でアブレーション加工して、高品質の自動車用CFRP部品を加工する方法および装置を検討した。準備した自動車のリアパネル（板厚：1.5mm）のトリミング加工を行うときの加工条件を求めることができたが、アシストガスの問題があり、トリミングはできなかった。直線的トリミング加工では目標値の500mm/minは達成できなかったが、300mm/minの速度を達成した。

（3－2）EV車用モノコック部材のハイブリッドレーザ加工と評価

EV車用モノコック部材のショックアブソーバの加工を行うための基礎実験を実施した。その結果、SMファイバレーザのレーザ出力およびスライダーの速度と加工速度（ここでは溝の深さ）の関係を明確にした。レーザ穴あけ加工についてもその被加工物の性能を

評価できた。

その結果、アシストガスのノズルをもっと工夫する必要があることが判明した。

(4) 航空機器厚板部材の高精度ハイブリッドレーザ加工の実証試験

(4-1) スキンパネルのハイブリッドレーザ加工

高出力の超短パルスレーザビームと連続発振の高輝度ファイバーレーザビームを分岐・合成した加工光学系を用いて、10mm以上の板厚のCFRP部材を高精度で高速レーザ加工する方法および制御技術を開発するために、解析プログラムを導入し、この研究をH28年度は実施した。薄板であれば比較的良好な加工ができるが、厚板になるほど、加工に時間がかかり、内部に熱が蓄積しやすくなり、さらに加工物自体の影ができることから垂直断面の加工が難しくなるなど加工品質上の課題が生じてくる。これらの課題を解決するために、内部の熱伝導状態を分析するために、有限要素法を用いた解析プログラムを導入し、加工のシミュレーションをすることにより、より最適な加工条件を追求した。検討した。今後板厚の厚いCFRPをレーザ加工するときに加工条件を推定できるようになった。

(4-2) CFRP製消音パネルの製作と評価

超軽量の消音パネル（CFRP＋アラミドハニカム製）の穴あけ加工をハイブリッドレーザ加工システムを用いて短時間で行なう加工法として、1個1個穴をあけるのではなく、1度に数10個の穴を明けることが有効であることが判明した。板厚1.0mmのCFRP板に1個の穴をレーザ加工する時間を従来の5.4秒から約1.0秒とほぼ目標値を達成した。1.0mmの穴あけでは72%の吸音率が観測された。これらのことから、この消音パネルの加工にハイブリッドレーザ加工システムが有用であることが確認できた。

3.2 研究開発後の課題・事業化展開

(1) 研究開発後の課題

研究開発後の課題としては、次の課題がある。

1) 開発したハイブリッドレーザ加工システムのノズル部分の

改良が必要である。スキャナーを用いるときと、ロボットで3次元加工するときでは、ノズルの構造を改良する必要がある。

2) 今回の評価実験では、2種類のレーザの出力が高くなると、速度は高くなるが、加工部

の品質が悪くなっている。今後は、最大出力を用いても、品質が確保できる工夫が必要である。

- 3) さらに、加工速度を高める必要があるが、そのために 加工ソフトを開発する必要がある。

(2) 事業化展開

以上の研究開発の成果により、問題点を解決し、今後 ハイブリッドレーザ加工装置を市販できるよう改良し、平成30年度より事業化していく予定である。