

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「CFRP複合材料部材の新レーザー溶接技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成24年 3月

委託者 中部経済産業局
委託先 財団法人 名古屋産業科学研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 新溶接方法によるモザイク溶接継手のレーザ溶接技術の確立	10
2-1-1 3次元駆動治具を用いた CFRP 部材の開先加工、 微細切断（トリミング）および穴あけ技術の開発	10
2-1-2 レーザ溶融法による各種3次元 CFRP 部材の溶接技術の開発	12
2-1-3 モザイク溶接継手の加熱接着法の接合条件の最適化検討	16
2-1-4 3次元モザイク継手の環境劣化評価試験	17
2-2 3次元的 CFRP 部材のレーザ加工法の量産化技術	20
2-2-1 曲面を持つ CFRP 部材のレーザ加工法の量産化技術	20
2-2-2 CFRP 製超軽量サンドイッチパネルの製作	22
2-2-3 3次元駆動治具を用いた量産化 CFRP 部材の レーザ加工システムの性能評価	24
2-3 事業化の検討	25
第3章 全体総括	26
3-1 成果の総括	26

第1章 研究開発の概要

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

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

以上の研究を踏まえ、航空機や自動車に実際に用いられている3次元形状のCFRP材をレーザ切断、穴あけおよび溶接を行い、加工精度や強度等を評価した。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

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

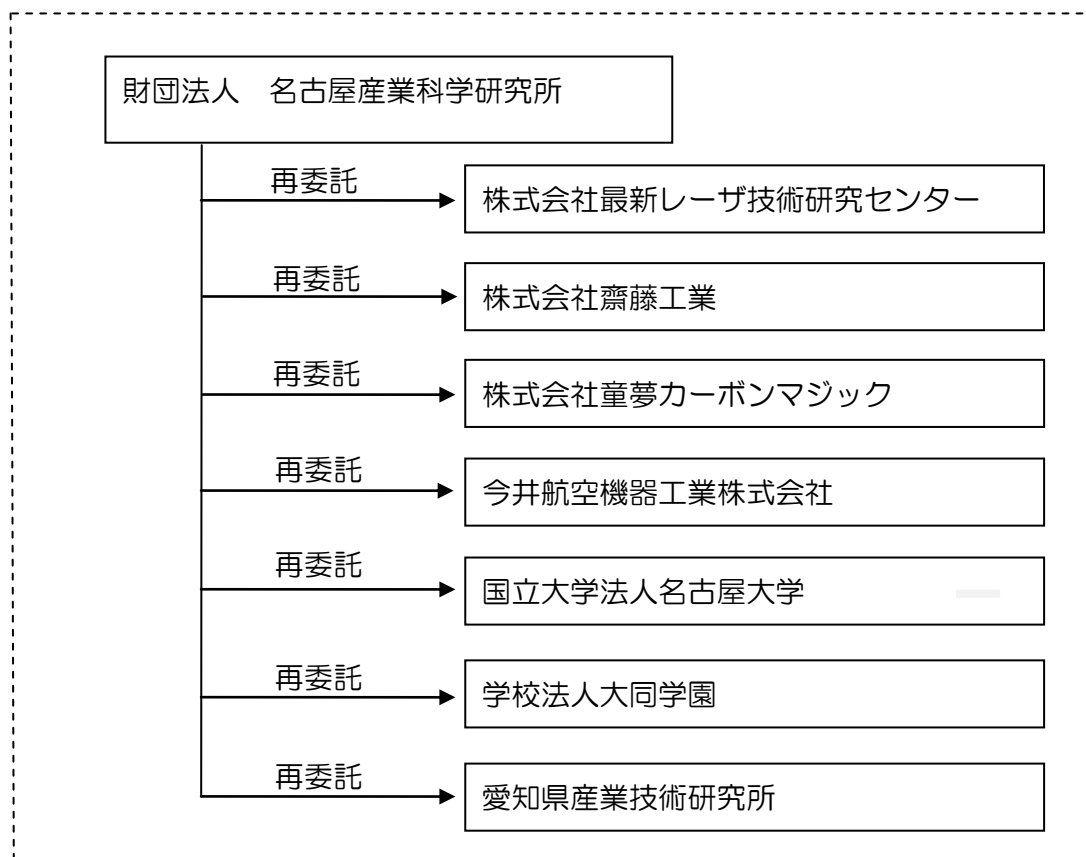
[目標]

- 複雑形状の開先加工に係る切断幅：0.2mm以下
- レーザ切断速度：2m/min以上
- 切断加工精度：航空機用CFRP：±0.1mm以内
自動車用CFRP：±0.1mm以内
- 溶接速度：2m/min以上
- 突合せ継手の継手効率(※)：90%以上（合せ板付き）

(※)母材の引張強度と溶接部の引張強度の比

1-2 研究体制

1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（PL）

株式会社最新レーザ技術研究センター

代表取締役 沓名 宗春

副総括研究代表者（SL）

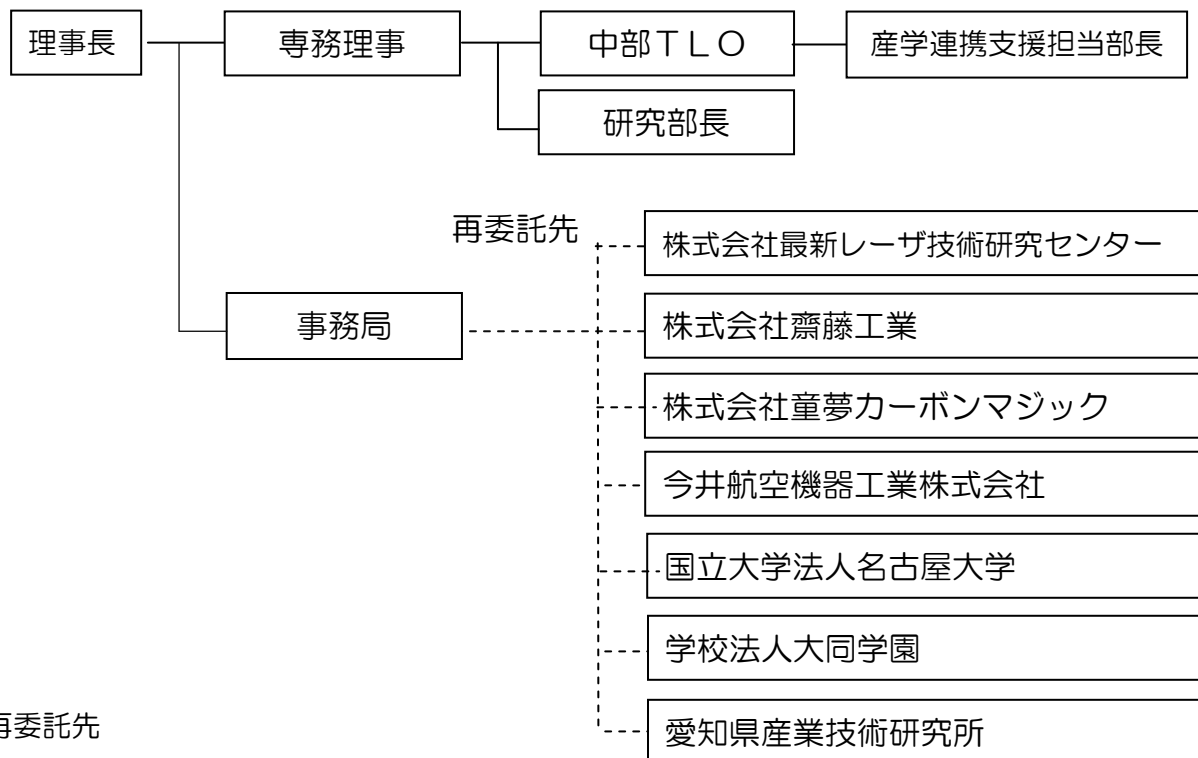
株式会社齋藤工業

代表取締役 齋藤 清隆

2) 管理体制

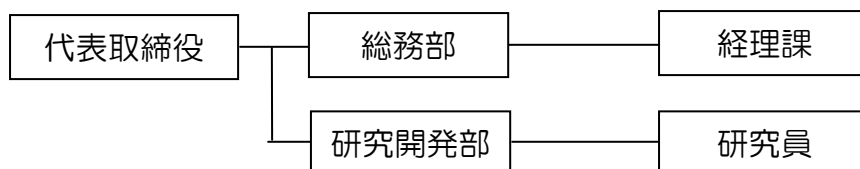
① 事業管理者

財団法人 名古屋産業科学研究所

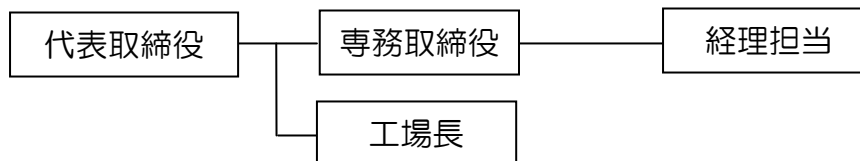


② 再委託先

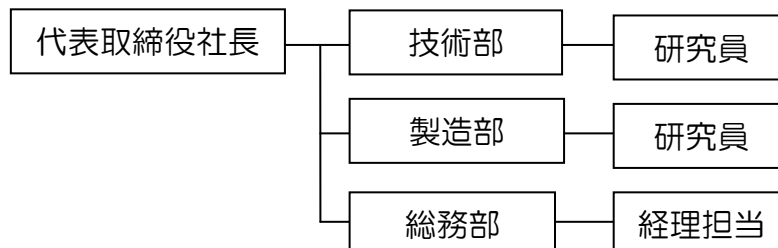
株式会社最新レーザ技術研究センター



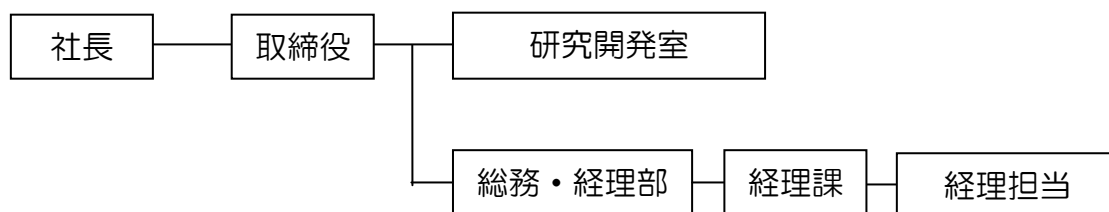
株式会社齋藤工業



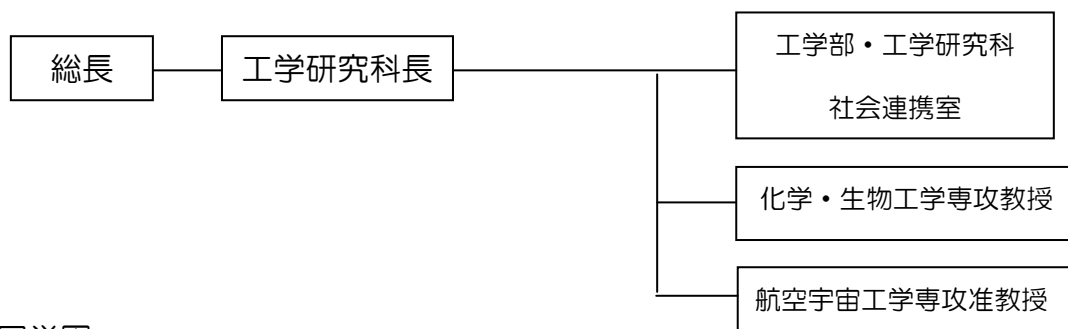
株式会社童夢カーボンマジック



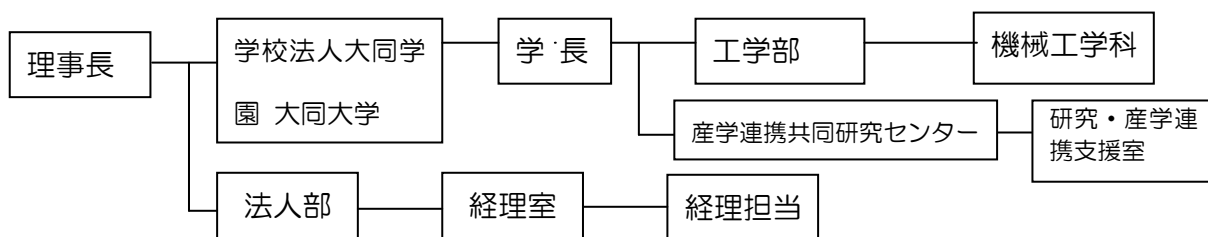
今井航空機器工業株式会社



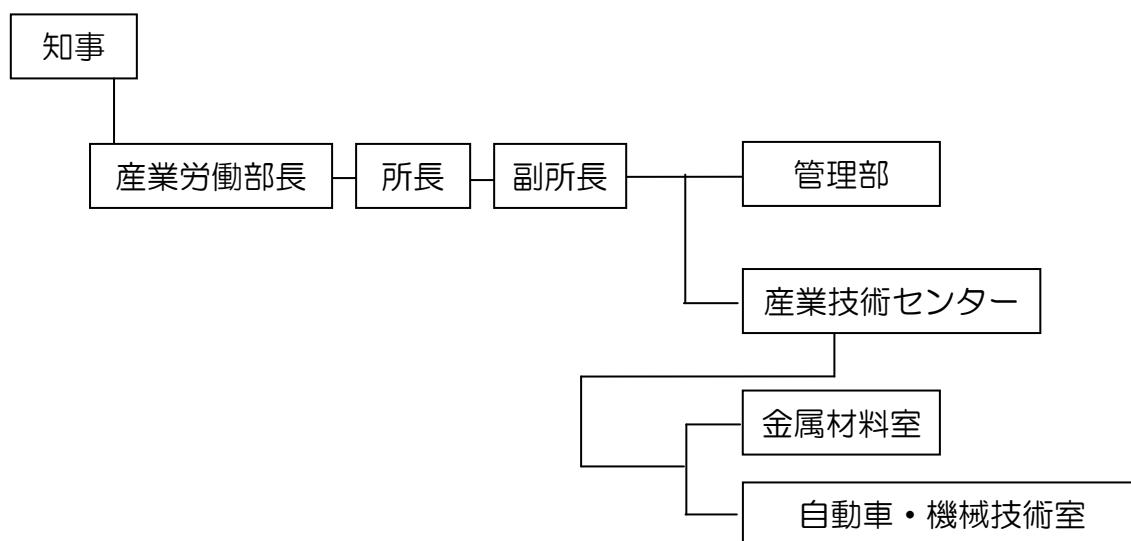
国立大学法人名古屋大学



学校法人大同学園



あいち産業科学技術総合センター



3) 研究者氏名

株式会社最新レーザ技術研究センター

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
沓名 宗春	代表取締役	①②③
井上 裕喜	研究員	①②③

株式会社齋藤工業

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
齋藤 清隆	代表取締役	①②③
岩川 健一	工場長	①②③

株式会社童夢カーボンマジック

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
白波瀬 徹	技術部マネージャー	①②③
足立 岳志	製造部マネージャー	①②③

今井航空機器工業株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
長尾 誠	取締役	①②③

国立大学法人名古屋大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
田邊 靖博	工学研究科化学・生物工学専攻 教授	①②
酒井 武治	工学研究科航空宇宙工学専攻准教授	①②

学校法人大同学園

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
平 博仁	大同大学 工学部総合機械工学科教授	①②

愛知県産業技術研究所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
石川 和昌	産業技術センター自動車・機械技術室主任	①②
河田 圭一	産業技術センター自動車・機械技術室 主任研究員	①②
天野 和男	産業技術センター金属材料室 主任	①②

4) 協力者

アドバイザー

氏 名	所属・役職
関戸 俊英	東レ株式会社アドバンスドコンポジットセンター所長
山口 泰弘	KYC-Japan 代表
近藤 靖彦	社団法人中部航空宇宙技術センター専務理事
小宮 巖	福井ファイバーテック(株)技術開発グループリーダー

5) 事業管理機関（財団法人名古屋産業科学研究所）

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
野崎 駿吉	中部TLO 産学連携支援担当部長	④
三浦 眞	中部TLO 事務員	④
田中 恭子	中部TLO 事務員	④

1-3 成果概要

1-3-1 研究目的および達成度

本研究では、超短パルスレーザと高出力ファイバーレーザを利用した新レーザ加工法により、CFRPの微細切断、穴あけおよび溶接を高精度かつ高速に行う技術の確立を目的として、従来より、低コストで高品質なCFRP加工品を航空機および自動車関連産業に提供できるようにするため、目標を立てて実施した。その結果は突合わせ継手の継手強度が合せ板付で77%と目標未達成であるが、他の項目は達成できた。

〔目標と達成度〕

- 複雑形状の開先加工に係る切断幅：0.2mm以下 → 0.01mm
- レーザ切断速度：2m/min以上 → 2m/min
- 切断加工精度：航空機用CFRP：±0.1mm以内 → ±0.01mm
自動車用CFRP：±0.1mm以内 → ±0.01mm
- 溶接速度：2m/min以上 → 2m/min
- 突合せ継手の継手効率(※)：90%以上（合せ板付き） → 77%

(※)母材の引張強度と溶接部の引張強度の比

1-3-2 主な研究成果

【1】新溶接方法によるモザイク溶接継手のレーザー溶接技術の確立

【1-1】3次元駆動治具を用いたCFRP部材の開先加工、微細切断（トリミング）および穴あけ技術の開発

（株式会社最新レーザー技術研究センター）

平成22年度3次元駆動治具を導入し、3次元加工が可能となったことにより、3次元形状の被加工材料の加工速度の向上を目指してレーザーアブレーション加工の研究をさらに進めた。平成23年度はレーザー加工時に発生するプラズマの除去についての検討を進め、加工速度のさらなる向上を図った。

本年度は熱可塑性 CFRP のレーザー加工速度の向上に努めた。また 0.8mm 厚みの熱硬化性 CFRP 材の場合、レーザーアブレーションの切断の速度は平均のレーザー出力が、14W で 40mm/min と低く、今後、よりレーザー出力の高い（150W～200W 級の）装置を用いた CFRP の加工が必要であることがわかった。

【1-2】レーザー溶融法および加熱法による各種 3 次元部材の溶接技術の開発

（株式会社最新レーザー技術研究センター）

突合せ継手の継手効率の目標値 90%に対して、モザイク形状の設計、継手の改良を行った。モザイク形状の改良、あて板の有無などのより、平成22年度の実績 66%を上回るべく検討を行った。

最新レーザー技術研究センターでは本年度航空機エンジンに使われるナセルの防音材作成を前提に CFRP パネルに微細な穴あけ加工を試みた。Q-スイッチ YAG レーザを使って、0.5、1.、1.5mm 径の 3 種の穴をレーザー加工し、良好の条件を得た。ただ CFRP 薄板の穴はプレスによるパンチングであけられている。加工スピードと寸法精度の比較でどちらの加工法を採用するか判断が重要である。加工した穴については、今井航空機器工業で寸法精度、仕上がり状態を調査し、良好の結果を得た

10mm の CFRP 材について、切断スピードを上げるため、スポット径が大きく、パルスエネルギーが高い Q-スイッチ YAG レーザで調査した結果、プラズマが発生するが、高エネルギーレーザーが有効であることがわかった。

名古屋大学において、一昨年導入したレーザー穴あけ実験チャンバー中に 3 次元自動ステージを置き、レーザーの焦点を加工表面より 1.5mm 上方と下方にセットしてレーザーアブレーションを調査した。この場合レンズの保護のためにプラズマの発生するところにアルゴンガスを噴きつけ行っている。

（愛知県産業技術研究所(現：あいち産業科学技術総合センター・産業技術センター)）

平成 22 年度はさまざまなモザイク形状の継手接合強度を測定した。本年度は、その継手形状のうち高強度形状品を使い、接着剤の有無、突合せ接合、合せ板付接合と条件を変えて試料を作成し、引張強度を測定した。

（名古屋大学）

名古屋大学では、昨年度開発した接着剤を使用した熱可塑性樹脂（福井ファイバーテック製）で、良好の強度を得たが、同じ接着剤を他の熱可塑性樹脂（TenCate 社製）2 種

(PPS 及び N66) の材料では、強度が出ないことがわかった。上記 2 種の材料については別系の接着剤を開発し、昨年度と同レベルの強度を得た。また、この接着剤を熱硬化性 CFRP のモザイク継手部に使用し、同等の強度を得た。これら接着剤単体での水分劣化およびオゾン劣化を大同大学において調査した。

【1-3】モザイク溶接継手の加熱接着法の接合条件の最適化検討

(最新レーザ技術研究センター・名古屋大学・大同大学)

最新レーザ技術研究センターでは、2 種類の接着剤を使用し、合せ板付のモザイク継手の引張強度を測定し、母材の 77%の強度を得ることができた。

名古屋大学で良好の強度を得た接着剤 2 種について接合条件(温度と時間)を変え、最適条件を見出した。これを使用し突合せ状態および合せ板付きの継手強度を測定した。同じものを大同大学で環境試験を行った。

(齋藤工業)

齋藤工業では、平成 23 年度導入したホットプレス装置と予備成型型を使用し接着剤のあるもの、ないもの 2 種のホットプレスによる接合を試みた。引張せん断強度で最大 15MPa の強度を得られた。

【1-4】3 次元モザイク継手の環境劣化評価試験

(大同大学)

大同大学において、①接着剤そのものの環境試験、②CFRP 母材の各種環境試験、③オゾン環境下での曲げ負荷試験、④エポキシ樹脂 CFRP のせん断接着継手の強度と環境特性、⑤溶接モザイク継手の環境強度特性の評価を行った。

その結果、環境履歴後、熱可塑性樹脂 CFRP はマトリックスは強度劣化がある。特にナイロン 66 は吸湿による劣化が大きいことがわかった。

【2】 3 次元的 CFRP 部材のレーザ加工法の量産化技術の確立

【2-1】曲面を持つ CFRP 部材のレーザ加工法の量産化技術

(齋藤工業)

齋藤工業では、溶接テストを行うモデル部品製作のため、ホットプレス装置を設置、平成 23 年度製作したリチウム電池バッテリーケースの金型および本年度製作の熱可塑性樹脂温間プレス絞り金型を使い、主に熱可塑性 CFRP を使ったモデル部品(電池ケース)の成形を行なった。

最新レーザ技術研究センターでは、昨年度課題となっていた CFRP 材のレーザ照射部にプラズマが発生し、加工の阻害となる問題に対し、発生するプラズマを主にアルゴンガスを用いて除去することを試み、最適噴射角度と流量を実験で求めた。また、シングルモードファイバーレーザ(ビームスポット径：約 40 μm)の出力を 100W~300W の範囲で 20m/min の高速切断をすると、比較的良好な切断が可能となったことから、上記齋藤工業で製作したモデル部品の端面切断加工を高速で行なった。

【2-2】CFRP 製超軽量サンドイッチパネルの製作

（最新レーザ技術研究センター・今井航空機器工業）

最新レーザ技術研究センターでは今井航空機器工業と共同で航空機のエンジン部分の防音を図るため、CFRP 多孔板のレーザ穴あけを実施し、航空機の防音壁の製造について検討した。また穴あけしたCFRP材料をアルミニウム製ハニカム及びアラミド系ハニカムと接合し、航空機用サンドイッチパネルの製作を行なった。上下面にCFRP材料をセットしその間に先に述べたアルミ、アラミド2種いずれかのハニカムを挟む。接着は、航空機用パネルに使用されている接着シートなど2種を使用した。今井航空機器工業ではあけた穴のピッチ、仕上がり具合を調査した。

【2-3】3次元駆動治具を用いた量産化CFRP部材のレーザ加工システムの性能評価

（最新レーザ技術研究センター・今井航空機器工業）

最新レーザ技術研究センターで加工したサンドイッチパネル(吸音パネル)の強度試験を実施した。今井航空機器工業では、吸音パネルの加工時、レーザ加工で要した時間とドリル加工で要した時間を試験して、比較した。

（産業技術センター）

産業技術センターでは、レーザ加工の優位性を証明するため、ドリル加工面とレーザ加工面を精査した。

【3】事業化の検討

童夢カーボンマジックでは自動車用部品として、CFRPと樹脂との接合体が、今後必須になることを前提に、熱硬化性CFRP材料と数種のプラスチック材料との接着材による接合及びレーザによる接合の2条件で前提に引張せん断試験片を作成し、その強度測定を行なった。

齋藤工業ではホットプレス装置を用いて昨年度製作したものより、より深絞りの効いたリチウム電池ケースを試作し、そのレーザトリミング加工および穴あけ加工を行った。材料は熱可塑性アクリル樹脂を使用している。

以上の結果から、「目標」に対して、ほとんどの項目は達成したが、唯一突合せ継手の継手効率90%以上を達成できなかった。現在のレベルは、継手形状の改善により合せ板付で77%まで達成できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(株)最新レーザ技術研究センター 代表取締役 峯名 宗春

電話：0566-91-2281、FAX：0566-91-2282

E-mail：altrec-kutsuna@nifty.com

第2章 本論

2-1 新溶接方法によるモザイク溶接継手のレーザー溶接技術の確立

2-1-1 3次元駆動治具を用いた CFRP 部材の開先加工、微細切断（トリミング）および穴あけ技術の確立

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

（1）状況

平成22年度導入した設備により3次元加工が可能となったことより、平成23年度は3次元形状の被加工材料の加工速度の向上を目指して、レーザーアブレーション加工の研究をさらに進めた。

最新レーザー技術研究センターと今井航空機器工業で、平成22年度は、航空機用大型パネルの穴加工を平成23年度は航空機用大型部品ナセルの上板（CFRP 製）のレーザー加工技術の確立とその信頼性評価を行い、加工面粗度、精度（角度、位置、径）、欠陥（むしれなど）について機械加工と比較し、レーザー加工の優位性を確認した。平成22年度から検討を進めていた産業技術センターでは、レーザープロセッシングシステムアクセサリーを使い、段付きなどの複雑形状に対するレーザー加工条件を調査し、加工精度向上試験を行った。また平成23年度は最新レーザー技術研究センターでは厚板の CFRP 材をレーザー加工時に発生するプラズマの除去、パルス照射条件などの因子の検討を進め、加工速度の更なる向上を検討した。

以下に、最新レーザー技術研究センターに導入された、3次元駆動治具およびそれで加工した航空機パネル、厚板(11.5mm)および吸音パネルに必要な小径（1.5mm）の穴加工を示す。

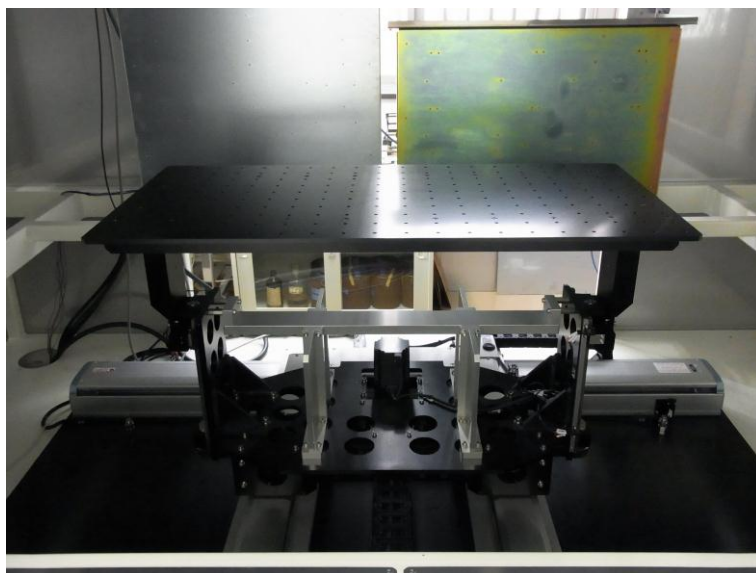


図 2-1-1 3次元駆動治具

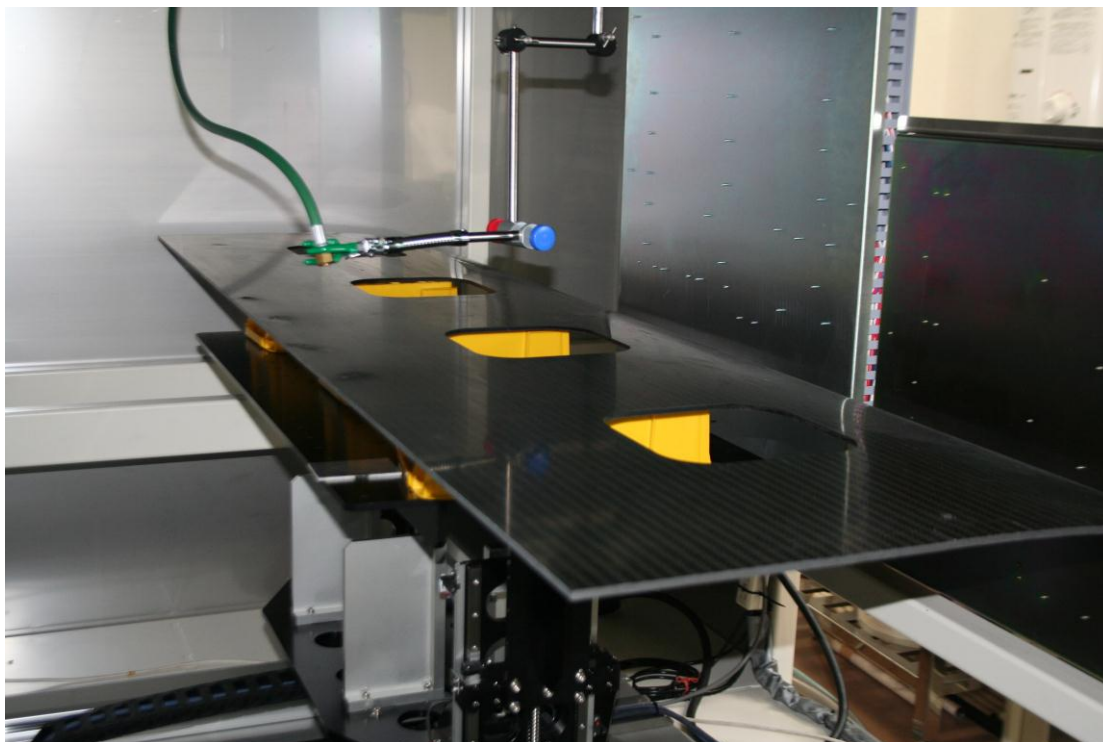


図 2-1-2 航空機スキンパネルの4つの窓のレーザトリミング加工

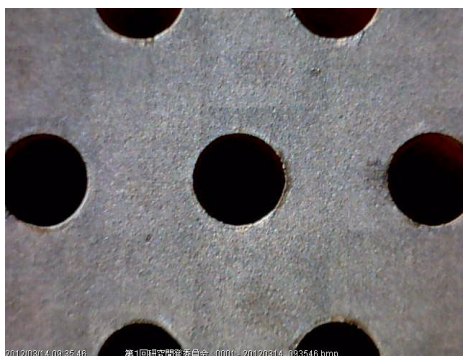


図 2-1-3 直径 1.5 mm に
穴あけされたCFRP
部材

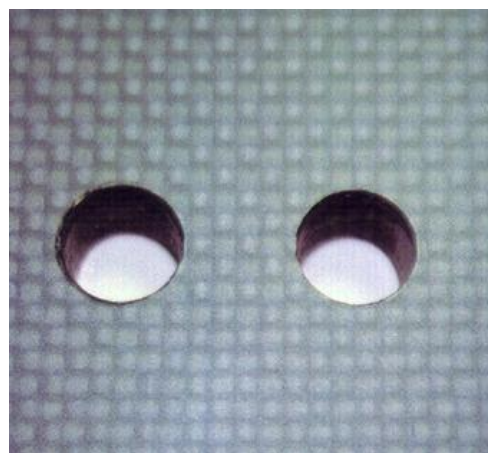


図 2-1-4 CFRPの穴あけ
(板厚：11.5mmに 10mm の穴)

(2) CFRP のレーザ加工アブレーション加工の良加工条件検討

名古屋大学では、22 年度 23 年度と CFRP のレーザ加工アブレーションの理論的解析を行っている。本年度は特にレーザ加工の良加工条件を探索することを目的とする。本年度は、異なる波長の単パルスを CFRP に照射した時に発生するアブレーション力積と加工深さを計測し、結果を比較する。さらに、高速な CFRP のレーザ穴あけ加工を実現しうる条件を見つけることを目的とし、高繰り返しでのトレパニング加工と、単パルスの繰り返しでのパーカッション加工を行った結果について報告する。特に 3 次元的な良加工条件の基礎特性を把握するためデフォーカスに対する影響に

ついて調べた。

本年度の結果から、材料表面上側にレーザー集光位置を置いた場合の加工速度の上昇の可能性を示すことができた。ただし、そのような傾向は、繰返し周波数およびパルスあたりのエネルギーを含むレーザー照射条件に強く依存していると考えられ、今後の検討課題となった。本実験条件の範囲内では、532nmと1064nmでのレーザーアブレーション特性に大きな違いは見られなかった。

2-1-2 レーザ溶融法による各種 3 次元 CFRP 部材の溶接技術の開発

(株式会社最新レーザー技術研究センター、国立大学法人名古屋大学、学校法人大同学園大同大学、産業技術センター)

継手強度目標値に対して、モザイク形状の設計、継手の改良を愛知県の産業時技術センターと最新レーザー技研センターが行った。名古屋大学で開発した溶加材を用いて、接合条件を決定すべき、モデルテストを進めた。また、溶加材の粘性と接合性を調査し、レーザー加熱による熱的、力学的性能を調査する。産業技術センターでは合せ板のついたCFRP平板モザイク溶接継手の引張試験を行い、モザイク継手形状との関係を見た。

(1) モザイク形状の検討 (産業技術センター)

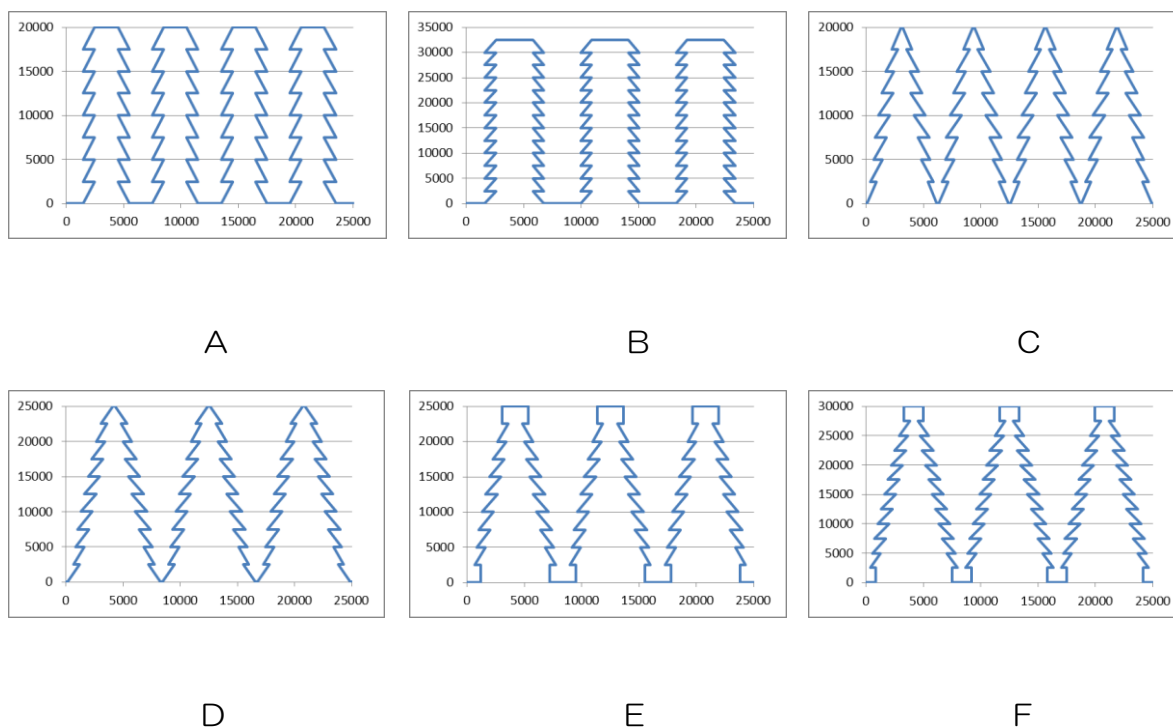


図 2-1-5 産業技術センターが検討したモザイク継手形状

図 2-1-5 に評価したモザイク形状。図 2-1-6 に引張試験結果、また各試験結果から求めた母材強度比を図 2-1-7 に示す。図 2-1-8 に引張試験後の試料の写真を示す

表 2-1-1 引張試験結果

	最大荷重 (kN)	破壊箇所
T300-A	3.1	継手根元
T300-B	3.3	継手根元
T300-C	4.5	継手中央
T300-D	4.4	かみ合い部
T300-E	4.7	かみ合い部
T300-F	5.2	継手中央

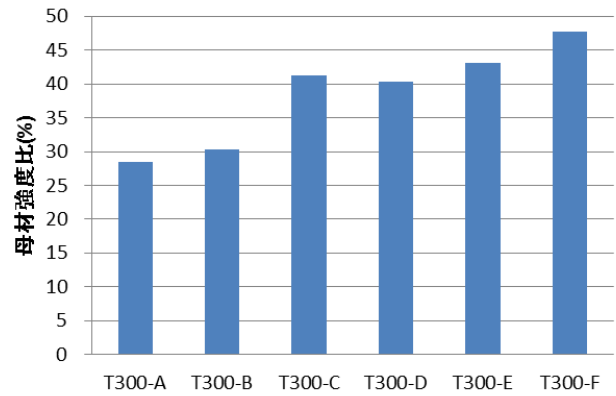


図 2-1-7 継手形状と母材強度比

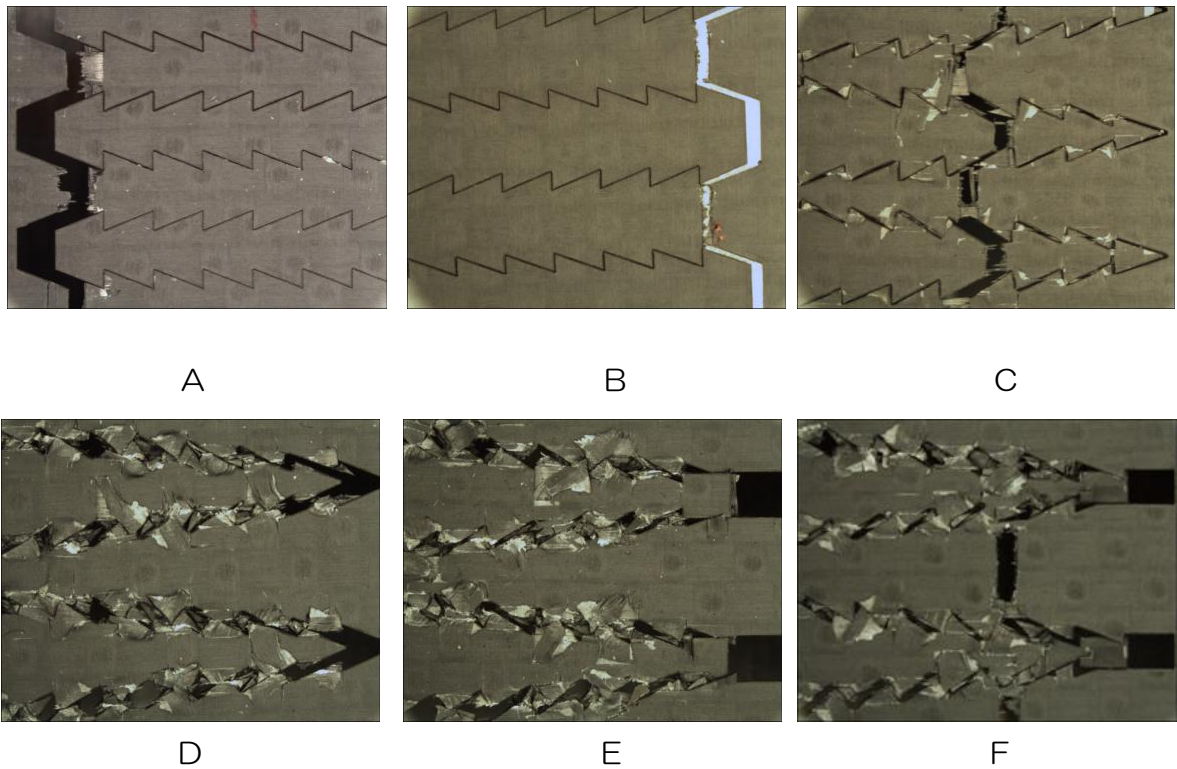


図 2-1-8 引張試験後の継手

A と B の試験結果から継手本数を減らして、継手一本あたりの幅を大きくすることで最大荷重は増加することが確認できた。A と C の結果から継手形状をクリスマスツリーとすることで最大荷重が大きく上昇することが確認できた。C と D の結果から A と B でみられた継手幅を大きくすることによる最大荷重の上昇はみられなかったが、引張試験後の観察画

像から継手のかみ合い部が破壊していることが確認でき、このため最大荷重の上昇がみられなかったと考えられる。DとEの結果から先端形状の変更が最大荷重増加に寄与していることが確認できた。EとFの結果から継手長さを伸ばしてかみ合い部の個数を増やすことで、かみ合い部の破壊が抑制され、最大荷重が上昇することが確認できた。本試験結果からモザイク継手形状の改良により最大荷重が上昇することがわかり、T300-Aで28%であった母材強度比はT300-Fで48%まで向上した。

ここで、選ばれたT300-Fでモザイク継手＋合わせ板の試料の引張強度を測定した。この場合、母材強度比は78%であった。

（２）モザイク形状のレーザ加工(最新レーザ技術研究センター)

突合せ継手の継手効率の目標値（90%以上）に対して、モザイク形状の設計、継手の改良を愛知県産業技術センターと協力して行った。その結果、図 2-1-9 に示すようなモザイク形状にすることがより継手強度を高めることを確認した。このような形状に超短パルスレーザで加工し、3種類の接着剤で接着し、継手強度を調べた。

また、この材料を名古屋大学で開発した接着剤を使用して引張強度測定および環境劣化評価試験を行った。

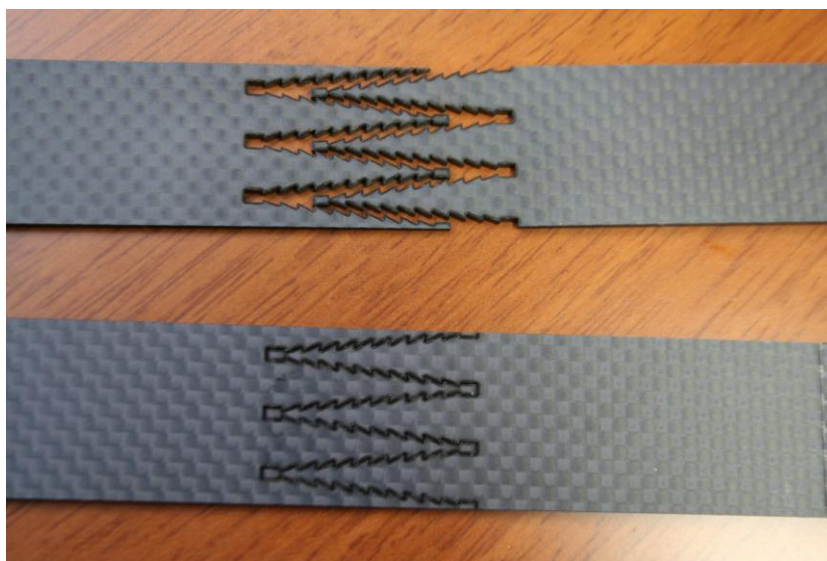


図 2-1-9 クリスマスツリー状モザイク継手のレーザ開先加工

T300：熱硬化性CFRP(板厚0.8mm)

（３） 外部加熱による最適接合条件(名古屋大学)

熱可塑性樹脂は外部加熱することで、軟化あるいは熔融する。そこで、接着剤を用いずに外部加熱と加圧のみでの接着可能性と最適条件について検討。平成22年度に接着剤の開発と最適接合条件で用いたのと同様に TenCate 製ナイロン系マトリックス複合材および PPS 系マトリックス複合材を用いて調査することを目的とした。

結果は、今回の試験では期待した効果が得られなかった。熱可塑性マトリックス複合材料の接合には、接着剤を用いた方法が簡便で好ましいと考えられる。しかし、構造用途を目指す場合、さらなる引っ張り剪断強度の向上が望まれる。

荷重 [kgf]	最大圧力 [MPa]	PPS 系マトリックス 平均強度[MPa] (括弧内は標準偏差)	Nylon 系マトリックス 平均強度[MPa] (括弧内は標準偏差)
600	9.8	3.518 (1.536)	1.046 (0.581)
1200	19.6	4.330 (0.883)	3.068 (1.439)
2400	39.2	5.005 (1.679)	4.046 (0.260)

表 2-1-2 名古屋大学で開発した接着剤の開先加工CFRP接合強度

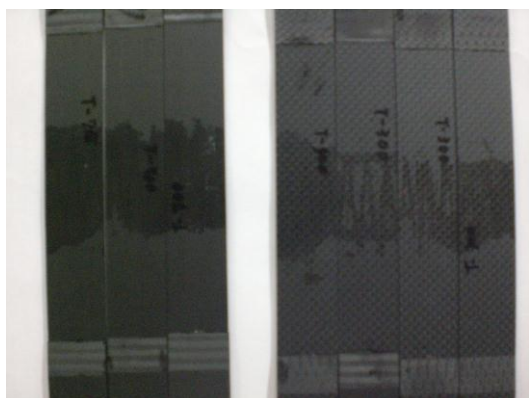
(3) 名古屋大学で開発した接着剤の開先加工CFRP接合への応用

(目的)

前項で熱可塑性 CFRP 用に開発した接着剤をレーザ開先加工した CFRP の接合に応用展開し、接着剤の開先加工接合性能を評価することを目的とした。本実験で用いた試料は、本プロジェクトで開先加工技術が確立した熱硬化性マトリックス樹脂系（エポキシ系）CFRP である。

両試料において類似の接合強度が得られていることから、開先加工の形状と接着剤を吟味することとで、CFRP 自身が剪断する高い接合強度を得ることが分かった。狭い開先加工の溝にも浸透して流れでない、適正な粘度の接着剤の開発が今後の課題である。

(なおこの試料は、2-1-4 項 3次元モザイク継手の環境評価試験に使用された)



左：図 2-1-10 接着剤接合後の試料（左 3 本 T700 系、右 4 本 T300 系）

右：図 2-1-11 接着剤引張試験後の試料（左 2 本 T300 系、右 2 本 T700 系）

表 2-1-3 開先加工接着剤接合試料の引張強度

試料番号	最大荷重 [kN]	最大応力 [MPa]
T300-6	8.51	284
T300-7	8.43	281
T700-1	5.64	188
T700-3	7.27	242

(4) CO₂レーザーを使ったレーザー溶接

名古屋大学では平成 22 年度、波長 10.6・m の CO₂レーザーを使って熱可塑樹脂含浸炭素繊維複合材料の樹脂部分を熔融し、複合材料どうしを接合する実験を 1ply の材料を用いて行った。平成 23 年度は前年度と同じ実験系を使い、4ply の接合実験を行い接合強度について検討する。特に、材料裏面の温度履歴、X 線 CT スキャン装置での内部状態観察により、より引張強度が高くなるレーザー照射条件に関する指針を得ることを目的とした。

表 2-1-4 溶接実験条件と引張強度結果のまとめ

材質	レーザーパワー W	ステージ速度, mm/s	溶接可否	引張強度(標準偏差) MPa
CF/PPS	88	1.25	○	7.9 (1.2)
		2.50	○	3.7 (-)
	125	1.25	○	11.2 (1.4)
		2.50	-	-
CF/Nylon66	88	1.25	○	7.7 (5.7)
		2.50	×	-
	125	1.25	○	5.4 (2.0)
		2.50	-	-

強度は破断荷重をレーザー照射面積で除したものである。結果 CF/PPS と CF/Nylon66 両供試体とも接合部が剥離することで破断した。概ね CF/PPS の方が強度が高く、125W で 11MPa 程度であった。CF/Nylon66 の場合は接合試料間での標準偏差が大きい。88W の場合については、CF/PPS の強度よりも高い結果が得られた。

(5) モザイク溶接継手の加熱溶着法の接合条件の最適化検討

(株式会社最新レーザー技術研究センター、株式会社齋藤工業)

最新レーザー技術研究センターでは、T700CFRP 製あて板 (25×40mm) を両面から当て、2種の接着シートで接着し、120℃で1時間加熱後、冷却し、継手効率の改善を図った。また、表 2-1-5 に引張試験結果を示す。

表 2-1-5 モザイク継手の引張試験結果

試験片No.	最大荷重 (kN)	最大引張強さ	破断伸び (mm)	接着シート
T300-1	8.0	268.15	4.5	プレプリグ用
T300-2	7.296	243.23	3.0	プレプリグ用
T300-3	7.825	264.0	2.5	プレプリグ用
T300-4	10.51	257.46	3.0	ハニカム用
T300-5	11.41	399.49	4.1	ハニカム用

T300-4および5の溶接継手は非常に高い最大荷重を示した。特に、T300-5は母材部にくびれが生じ、板幅が23.8mmから23.5mmになった。この母材に対する比強度は76.8%であり、目標の90%には達しなかったが、今までの最高の比強度を示した。

2-1-4 3次元モザイク継手の環境劣化評価試験

(株式会社最新レーザ技術研究センター、学校法人大同学園大同大学)

平成22熱硬化性樹脂CFRP材料を中心に吸湿試験及びオゾン劣化試験を行った。平成23年度は環境劣化試験用サンプルとして、最適化を図った溶接モザイク継手を開先加工および接合を行い、継手を製作した。最新レーザ技研ではクリスマスツリー状モザイク継手を図2-1-2-9のように製作し、それを名古屋大学の田邊先生のもとで接着していただいたものを大同大学の平先生に送り、そこで環境劣化評価試験を実施した。また熱可塑性樹脂CFRPを追加した。

2-1-4-1 実施項目

- [1]候補接着剤そのものの環境試験
- [2]CFRP母材の各種環境履歴試験
- [3]熱可塑性樹脂マトリックスのオゾン環境特性
- [4]エポキシ樹脂CFRPのせん断接着継手の強度および環境特性
- [5]溶接モザイク継手の環境強度特性

[3] 吸湿およびオゾン環境履歴後の強度

(1) 実施内容

以前オゾン環境履歴で、PPS樹脂マトリックスCFRPではマイクロクラック発生することを報告したが、オゾンおよび吸湿履歴後のPPS樹脂/N66樹脂マトリックスCFRPのボ材の強度特性を評価した。

①供試体 (図2-1-12 参照)

・材質

・PPSマトリックスCFRP (織物4ply) 繊維 T300 樹脂含有率 50%

・N66マトリックスCFRP (織物4ply) 繊維 T300 樹脂含有率 50%

なおエポキシCFRPも実施したが、高強度過ぎて、破壊させることができなかった。

・試験片形状と方向

試験片の方向 0° および 45°

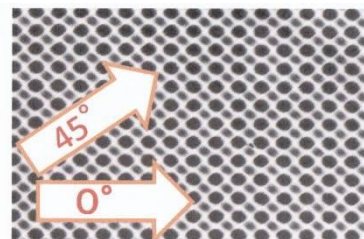
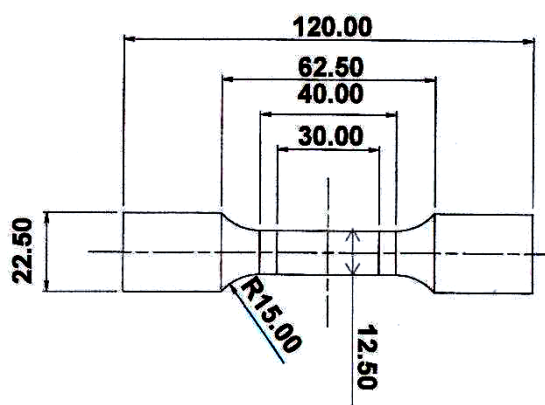


図 2-1-12 引張試験片形状

②環境履歴条件

- ・受入のまま
- ・低濃度オゾン ($5\text{g}/\text{m}^3$) 1h
- ・高濃度オゾン ($100\text{g}/\text{m}^3$) 1h
- ・高温水 (100°C) 浸漬 6h
- ・高温高湿環境負荷 ($85^\circ\text{C}\times 95\%\text{RH}$) 6h

(2) 試験結果

それぞれの材質について、ケース A/ケース B の破断強度の結果を、環境履歴なし、オゾン環境もしくは高温水浸漬のみの環境と比較した。

PPS-CFRP の結果を図 2-1-6、ナイロン 66 の結果を図 2-1-7 に示す。

図より以下のことが判明した。

- ・ PPS マトリックスの CFRP では、オゾン環境曝露の後、吸湿させても、オゾン曝露履歴のみの強度は変わらないが、凍結させることで少し強度が低下する。
- ・ ナイロン 66 マトリックスの CFRP では、オゾン環境曝露の後吸湿させてもまたその後凍結させても、破断強度は吸湿のみのものとほとんど変わらない。

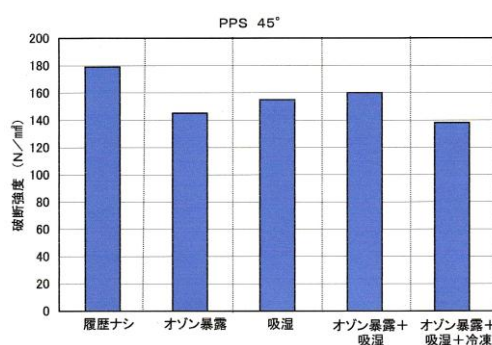


図 2-1-6 PPS マトリックス CFRP 材の複合環境履歴の影響 (左)

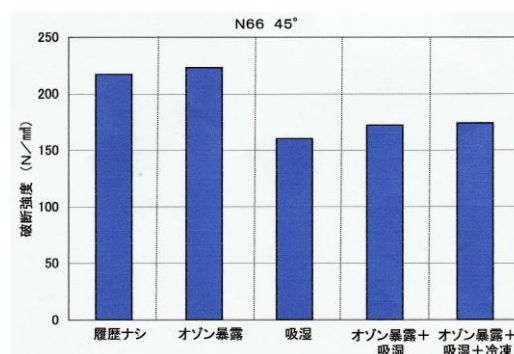


図 2-1-7 N66 マトリックス CFRP 材の複合環境履歴の影響 (右)

1. 4. 2. 3 オゾン環境下での曲げ負荷試験

(1) 実施内容

平成 22 年度に PPS マトリックス CFRP のオゾン環境下のマイクロ割れの原因を評価する目的で、ナイロン 66 と PPS 樹脂板を曲げ負荷を与えた状態でオゾン環境に曝露し、前者は割れないこと、また PPS は割れることを確認した。

今年度は、熱可塑性樹脂 CFRP のマトリックスとして、ナイロン 66 や PPS と同様に使われることの多いアクリル樹脂および PEI (ポリエーテルイミド) 樹脂を対象として、同様の試験を実施した。

①供試体 ポリエーテルイミド 5mmt およびアクリル材 5mmt

②試験片形状

ともに 20mm 幅× 100mm 長

③試験方法

図 2-1-8 に示すような 3 点曲げの治具に試験体を取り付け、中央部を押すことによって曲げ変位を生じさせる。両側の支点間距離は 83mm である。曲げ変位を種々調整し、5% までのオゾン濃度の環境に 30 分曝露し、履歴後の割れの有無を調べる。

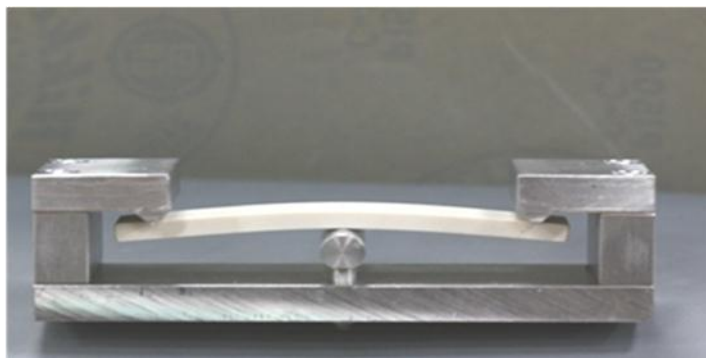


図 2-1-8 オゾン曝露環境下の曲げ負荷方法

(2) 試験結果

2 種類の熱可塑樹脂の試験結果を、前年度の PPS 樹脂試験結果とともに示す。

図 2-1-9 が PEI の結果、図 2-1-10 がアクリルの結果、である。なお PEI およびアクリルともに弾性率は約 3.0GPa であり、

図より、2 種類の樹脂ともに大きな曲げ負荷を与えて高濃度オゾン環境に曝露すると、破断する特性を持っていて PPS の特性に似ており、割れないナイロン 66 とは異なる。PPS を加えた 3 種の樹脂で比較すると、PPS が最もオゾンに鋭敏で小さな曲げ変位で割れ、その次にアクリル、そして PEI であり、この順にオゾンに対する鋭敏さが小さくなっていることとなる。なお PEI の CFRP を 5%、オゾン環境に曝露すると PPS と同様にミクロ割れを生じ、複合材料製造時に樹脂に引張の残留応力が生じていると推定される。(PPS のデータは略)

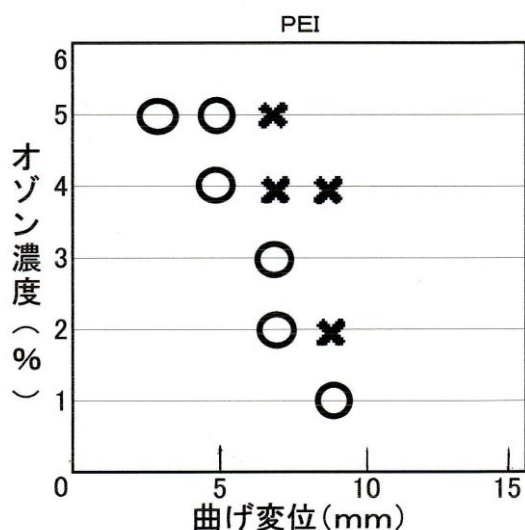


図 2-1-9 PEI をオゾン環境中で曲げ負荷した場合の破断の有無

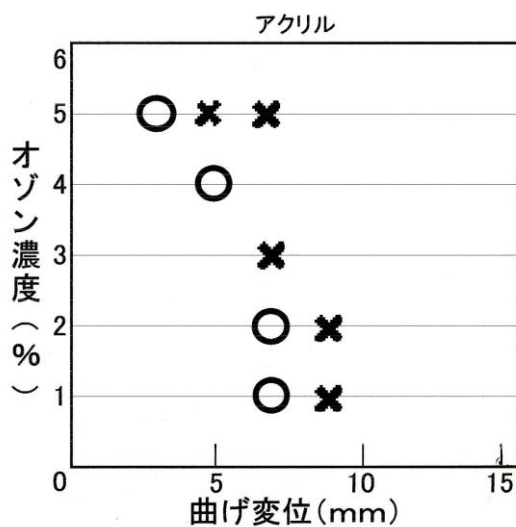


図 2-1-10 アクリルをオゾン環境中で曲げ負荷した場合の破断の有無

2-2 3次元CFRP部材のレーザ加工法の量産化技術の確立

2-2-1 曲面を持つCFRP部材のレーザ加工法の量産化技術

(株式会社最新レーザ技術研究センター、株式会社齋藤工業、今井航空機器工業株式会社)

2-2-1-1 ホットプレス装置を用いた熱可塑性CFRP製バッテリーケースの成形

(1) 目的

齋藤工業では熱可塑性樹脂をマトリックスとしたCFRP（以下CFRTPという）特徴を生かした3次元形状を成形できる熱可塑性樹脂温間プレス絞り金型を設計製作し、本年度導入したホットプレス装置を使用して、3次元形状のCFRTPモデル部品として、リチウム電池ケースの製作を報告する

(2) ホットプレス装置の導入

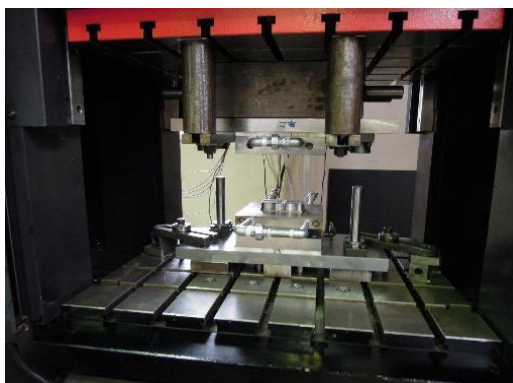
昨年度、熱可塑性CFRP材料を加熱・加圧成形し、リチウム電池バッテリーケースの成形を行った。この成形では、40トンの油圧プレス機に金型をセットし、その上下面にヒーターを挿入、温度を上げていたが、プレスの加圧・減圧コントロール、温度のコントロールとも、試行錯誤で行ったが、再現性がなく、一発勝負的な成形を行っていた。

平成23年度導入したホットプレス装置（アマダ製SDH-40）は、油圧サーボ駆動で圧力をコントロールし、また温度も加熱冷却、いずれも可能というCFRTPの成形には必須という40トンプレス機である。今回この設備を使用し、缶形状の深絞り成形を行った。



(a) 外観図

図 2-2-1 ホットプレス装置



(b) 金型セット（前面）



(c) 金型セット（後面）

試料：

- 1) TW2000(Baycomp 社製炭素繊維 100%綾織プリプレグ)
 - 2) TW1000(Baycomp 社製炭素繊維 50%ガラス繊維 50% 綾織プリプレグ)
- サイズはいずれも 150×105×0.7

成形条件：(略)

2-2-1-2 3 kWSMファイバーレーザによる高速トリミング

成形されたバッテリーケースを3 kWSMファイバーレーザにより、図 2-2-2-7 にしめすように20m/minの高速でレーザトリミングを行った。



(a) トリミング前



(b) レーザトリミング後

図 2-2-2 バッテリーケースのレーザトリミング

2-2-1-3 まとめ

以上の結果を、まとめると成形性の面では、TW1000 材が最適である。TW1000 材でのベストの成形条件が決定された。

またリチウム電池用ケースとしても、様々な色の製品ができることから、識別等に適している。

図 2-2-4 に実際に A123 リチウム電池を格納したものを示す。



図 2-2-3 平成 22 年度製作したリチウム電池

バッテリーケース



図 2-2-4 本年度製作したケースに実際にリチウム電池を格納した状態

2-2-2 CFRP製軽量サンドイッチパネルの製作

(株式会社最新レーザ技術研究センター・今井航空機器工業株式会社・株式会社齋藤工業)

ここでは、超軽量構造部材として2種類（アルミハニカムとアラミドハニカム）のサンドイッチパネルをCFRP部材の組み合わせにより製作した。まず、図 2-2-2-1 に示すような航空機エンジンナセル用防音壁部材の試作について、開発を進めた。

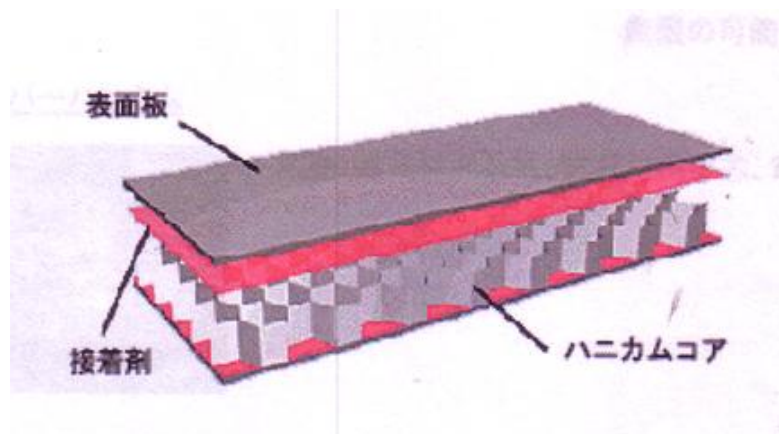


図 2-2-5 航空機エンジンナセル用防音壁部材（以下、吸音パネル）

（1）CFRP部材の穴あけ

1) 実験結果

1-6 まで条件を変えて効果的な加工方法を検討したその結果

接着シート側からビームを照射し、スキャン速度を下げることで加工時間短縮に有効であったため、さらにスキャン速度を下げてスキャン速度を 25mm/s とした。加工時間を一定とするため、スキャン速度の低下に伴いパス数は 50 パスとした。その結果、25 点全てで穴があいた。この条件で約 1600 点の穴あけを行うとすると加工時間は約 4 時間 50 分となる。ワーク裏面の CFRP に一部焦げが見られたため、これ以上スキャン速度を下げるとワークに損傷が生じる可能性がある。

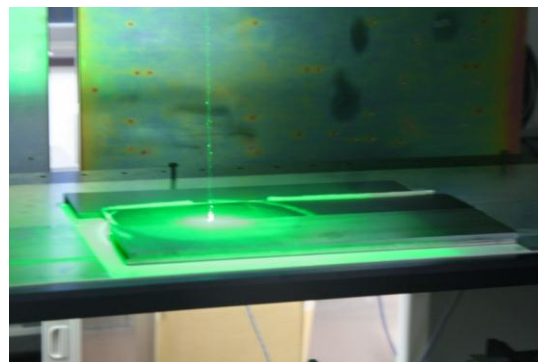
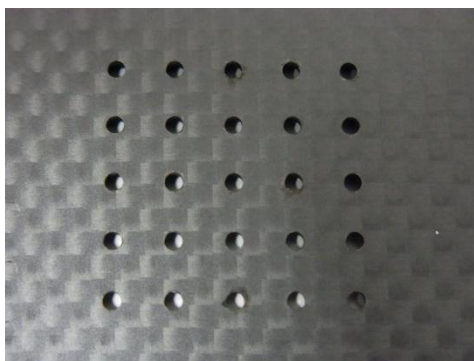


図 2-2-6 加工後の外観写真（最適条件）

図 2-2-7 CFRP板のレーザ穴あけ状況

2) 吸音パネルの強度測定

試作した吸音パネルが 従来のアルミハニカム使用吸音パネルの強度と比較して、十分な強度があるか愛知県産業技術センターのインストロン万能試験機で圧壊試験により評価した。その状況を図 2-2-8 に示す。圧縮荷重は60mm x 70mmの面積で負荷した。

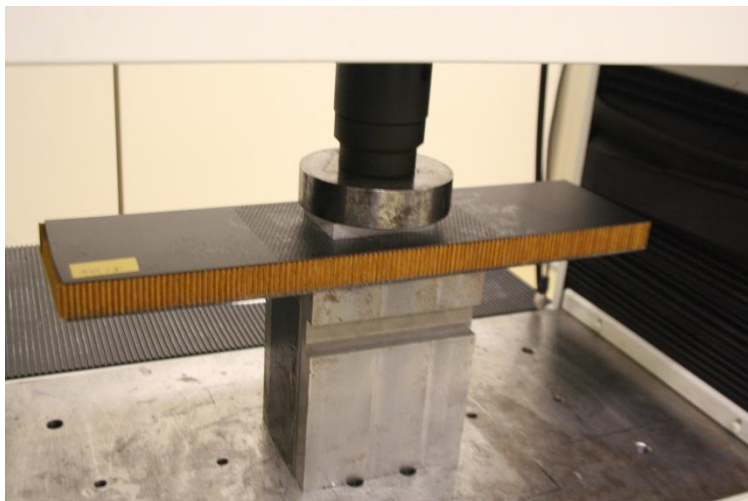


図 2-2-8 吸音パネルの圧破試験の状況

これらの試験結果を図 2-2-9、表 2-2-1 に示す。

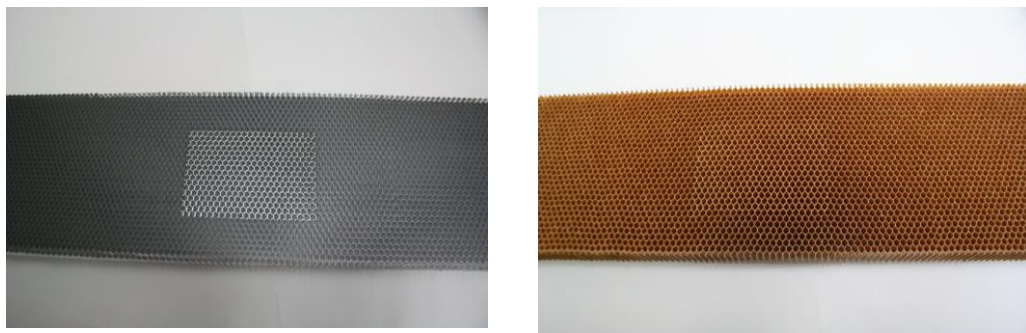


図 2-2-9 アルミハニカムコア（左） アラミドハニカムコア（右）の圧破試験状況

表 2-2-1 ハニカムコアおよびパネルの圧破試験結果

試験体	最大圧縮荷重	最大圧縮応力
アルミハニカムパネル	9.80 kN	2.80 N/mm ²
アルミハニカムパネル (従来品)	10.36 kN	2.96 N/mm ²
アルミハニカムコア	12.24 kN	3.40 N/mm ²
アラミドハニカムコア	7.35 kN	2.10 N/mm ²
CFRP-アルミ吸音パネル	13.63 kN	3.89 N/mm ²
CFRP-アルミ吸音パネル	9.80 kN	2.82 N/mm ²
CFRP-アラミド吸音パネル	10.81 kN	3.09 N/mm ²
CFRP-アラミド吸音パネル	8.96 kN	2.56 N/mm ²

CFRP-アラミド吸音パネルはCFRP-アルミ吸音パネルに比べて、すこし圧縮強度が低下していた。

(2) 試作パネルの防音性能評価試験

現在、この吸音パネルの防音性能評価試験を実施する機関、方法について検討中である。

2-3 事業化の検討

(株式会社最新レーザ技術研究センター、株式会社齋藤工業、株式会社童夢カーボンマジック、今井航空機器工業株式会社)

平成23年度は事業化を目指し、前年度までに試作した自動車用ハンドル、リチウム電池バッテリーケース、航空機用機体パネル、H型型材などの試作品の量産化について次の項目を検討中である。

- ・ 企業化したときの参画企業の分担、製造コストなどについて検討する。
- ・ 量産品のユーザ評価を得るために、展示会での技術PRや川下ユーザへの紹介、および試作対応など積極的に行う。

2-3-2 今後の事業化の検討結果

(1) 加工した製品及び部品の製造販売

自動車用ハンドル

- ・ リチウム電池用バッテリーケース
- ・ 自動車用ギアボックス
- ・ 自動車用車体パネル
- ・ 自動車用座席シート

軽量サンドイッチパネルの製造

(2) ジョブショップ（レーザ加工請負）

航空機機体パネルの穴加工

航空機機体パネルの溶接

航空機用ナセルの防音加工

(3) 特許使用料による収益

特願 2011-56622

「レーザ加工方法およびレーザ加工装置」

レーザ加工時の分解生成物を気体又は液体で除去し、照射部深部へ照射エネルギーを浸透させ、加工速度を向上させる。

第3章 全体総括

3-1 成果の総括

3-1-1. 新溶接方法によるモザイク溶接継手のレーザー溶接技術の確立

3-1-1-1. 3次元駆動治具を用いた CFRP 部材の開先加工、微細切断（トリミング）および 穴あけ技術の開発

- (1) 微細穴あけ加工が可能となった。
- (2) アルゴンガスを流すことにより、加工時に発生するたプラスマを飛ばし、加工速度を更に上げることができた。
- (3) 厚みのある CFRP 材料に対してはレーザー加工の焦点を移動させることが有効であるが、その位置は狙いの位置よりも□□mm マイナス側にしたほうが、切断面の損傷を抑えることができる。
- (4) 微細穴加工では、トレパリングによる加工方法が有効である
これらの、結果から、曲面を有する3次元形状の航空機エンジン用ナセルの吸音効果に有効な、微細穴の高精度の加工が可能となった。

なお、名古屋大学では、この現象をモデル的に調査するため、昨年導入したレーザー穴あけ実験チャンバー中に自動ステージを置き、3次元的な動きの中で、レーザーアブレーションがどのような力積により生じるかの知見を得た。

3-1-1-2. レーザ溶融法および加熱法による各種3次元部材の溶接技術の開発

名古屋大学では CO2 レーザを用い、CFRP 同士のレーザー溶接を試みた。また最新レーザー技術研究センターでは、レーザー・ロール溶接機を使うことにより、CFRP と各種樹脂との接合を行なった。更に斉藤工業のホットプレス装置を用い、溶加材で接着した CFRP 同士の加熱加圧接合を行い、レーザー溶接の信頼性向上の確認を行なった。

3-1-1-3. モザイク溶接継手の加熱接着法の接合条件の最適化検討

- (1) 溶加材は、CFRP 材によって有効であるものと有効でないものがある。すなわち現時点では CFRP 材料の成分によって、一品一様の溶加材が必要である。
- (2) 加熱接着時にホットプレス手法が有効か、あるいはレーザー加熱による方が有効かの判断は付かなかった。ただ今後、三次元形状の接合、あるいは現場での接合ではレーザー溶接手法が必要である。（ホットプレスでは型を作って、接合する必要がある）

3-1-1-4. 3次元モザイク継手の環境劣化評価試験

- (1) ナイロン 66 など吸湿しやすい樹脂と、PPS やエポキシのように吸湿しにくい樹脂があり、CFRPマトリックスとしてなにが使われているか、用途別に検討する必要がある。
- (2) また、曲げ負荷環境下で樹脂のオゾン暴露試験等を実施し、オゾン環境で割れが発生しやすい鋭敏な PPS や PEEK に対し、鈍感なナイロン 66 といった樹脂に傾向があることがわかった。そして PPS の CFRP のミクロ割れは残留応力によるものということがわかった。
- (3) 樹脂の環境劣化後も強度を維持できるかどうかは、繊維の配向に依存する。実際に使用する場合に応力がどうかかるか。あるいは繊維の配向をランダムにするなどの工夫が必要となる。

3-1-2. 3次元的CFRP部材のレーザー加工法の量産化技術の確立

3-1-2-1. 曲面を持つCFRP部材のレーザー加工法の量産化技術

本年度、ホットプレス装置を使用し、リチウム電池ケースを深絞り金型で製作した。昨年度と違い、8本入りの既存の電池を前提としたものです。図 2-2-1-8 に示すような複雑な曲面を有するバッテリーケースを、レーザーを用いて、切断、穴加工、あるいは溶接することにより、所定の形状に、加工することが出来た。

3-1-2-2. CFRP製超軽量サンドイッチパネルの製作

航空機用サンドイッチパネルを試作した。

CFRPとハニカム構造のアルミニウム材及びアラミド系材料を先に挙げた溶加材を使い、接着及び接着後、ホットプレスすることにより、接合強度を測定した。CFRPの下にハニカムのある部分をトレースして上面からレーザーで溶接することは出来なかった。また、航空機のエンジン部分の防音を図るため、CFRP多孔板のレーザー穴あけを実施し、航空機の防音パネル（ナセル）を製作した。この場合、レーザーによる無数の微細穴あけ加工は非常に有効であるが、現状、プレスを使ったパンチングにより穴あけが行われていることから、生産性で優位に立つ必要がある。