

補助事業番号 2024M-443

補助事業名 2024年度 炭素繊維強化プラスチックの高品位ソフト加工法の開発 補助事業

補助事業者名 大阪大学 大学院工学研究科物理学系専攻 精密工学コース 大参 宏昌

1 研究の概要

輸送機の軽量化と省エネ化が期待される炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の高品位加工に向け、本研究では、廉価な酸素や空気ガスからなる高密度プラズマ中で生成される反応性ラジカルを用い、CFRPの穿孔加工への適用を世界で初めて試みた。種々のプラズマ生成パラメータ(加工時間、投入電力、圧力、酸素濃度、プラズマパルス変調等)が、加工速度、加工形状等に与える影響を明らかにするとともに、高密度プラズマによるCFRPのドライ加工のメカニズムを考察するため、プラズマ加工による揮発性反応生成物を赤外吸収分光法により明らかにした。研究の結果、本手法を用いて良好な加工形状を得るためのプロセス設計の指針が得られた。

2 研究の目的と背景

自動車、無人飛行体(ドローン等)を含む航空機など、軽量かつ堅牢な構造材料が必要とされており、これを実現する材料としてCFRPが注目され一部の機器で導入が進んでいる。今後、低炭素化社会の実現に向けた動きは一層強まることが必至であり、CFRPが適用された輸送機の普及を爆発的に進める必要がある。このためには、CFRP素材自体の低コスト化のほか、従来の加工法では実現できないCFRP加工を実現する加工技術が必要である。CFRPは、優れた機械的特性を持つ一方で、材料特性の異なる複合材料かつ難加工材料であるため、複雑多種の加工工程が必要、また工具損耗が激しいなど種々の問題がある。具体的には、CFRPを機械加工する際には、層間剥離、繊維抜け、亀裂、バリなどの加工欠陥が発生するため、加工後のバリ除去処理や、層間剥離を防ぐための処理が必要となる。また工具損耗抑制のためダイヤモンド等の硬質皮膜工具が用いられているが、このような高価な工具を用いても損耗は不可避であり、加工コストの上昇要因となっている。このため、省資源・低環境負荷にCFRPを高精度・無歪みに加工可能な技術が求められている。本研究では、この従来の機械加工による高品位加工が難しい炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に着目し、申請者がこれまで独自に開発してきた非平衡・高密度プラズマにより生成される高密度ラジカル反応場を用いて、CFRPを省資源、低環境負荷に高品位加工する技術を確立することを最終目標としている。このため、本研究事業では、酸化ラジカルを生成可能な高密度プラズマによるCFRPの加工挙動を各プラズマ生成パラメータに対して系統的に調べ、CFRP加工の支配因子を世界で初めて明らかにするとともに、プラズマ中で生成される反応性ラジカルとCFRP表面の反応過程を明らかにすることを目的とする。

3 研究内容

① CFRP加工量の加工パラメータ依存性の検証(<http://www-ms.prec.eng.osaka-u.ac.jp/jpn/jka.html>)

高密度プラズマを生成可能なCFRP加工装置を立ち上げた(図1)。各種加工パラメータについて、

加工時間、投入電力、圧力、酸素濃度が加工速度に与える影響を検討した。CFRPの加工現象には、二つの放電モード(グロー放電と火花放電)が関係することが明らかになった(図2)。この様な火花放電とグロー放電の複合生成により絶縁体と導電体からなるCFRPの高速加工が可能になることが明らかとなった。O₂濃度を調整し、加工速度の酸素濃度依存性を調べた結果、酸素濃度の低下と共に加工速度が減少し、酸素濃度0%、すなわちAr100%の雰囲気では、一切CFRPの加工が進行しないことが分かった(図3)。このことから、酸素プラズマ中で生成された酸化種が、樹脂ならびにカーボンファイバを酸化揮発除去することで、CFRPの加工が進行していることが明らかになった。

② CFRP加工時の生成揮発性ガス種の解明
 空気プラズマでPA66-CFRPを加工した場合、メタン(CH₄)、アセチレン(C₂H₂)、エチレン(C₂H₄)、一酸化窒素(NO)、一酸化炭素(CO)、一酸化二窒素(N₂O)が主たる生成ガスであることが示唆された。この結果から、空気プラズマによるPA-CFRPの加工は、COや安定な炭化水素ガスの生成を伴って加工が進行していることが示唆される。また、PA66-CFRPを酸素プラズマに曝露した際には、N₂Oのピークが顕著に確認され、ほかにCO₂、CO、CH₂O、H₂O、さらにわずかなC₂H₄起因のピークが確認された(図4)。PA66樹脂シートとPA66-CFRPの両者ともに、生成ガスにアルデヒドが認められることから、高分子樹脂を構成する炭素鎖を酸素ラジカルが優先的に切断し、揮発性ガスを生成すると同時に、炭素の一部は完全酸化により除去されていること、さらに炭素繊維は主にCOとして揮発除去されていることを示唆する結果を得た。

③ プロセスパラメータが加工形状に及ぼす影響の検討



図 1. 本助成で整備した CFRP 加工機

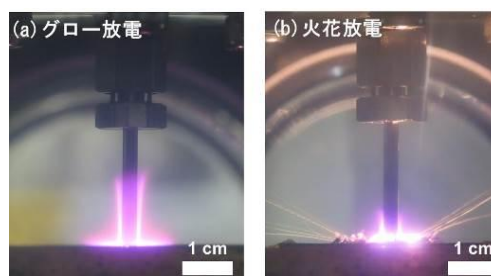


図 2. CFRP 加工時の放電モード

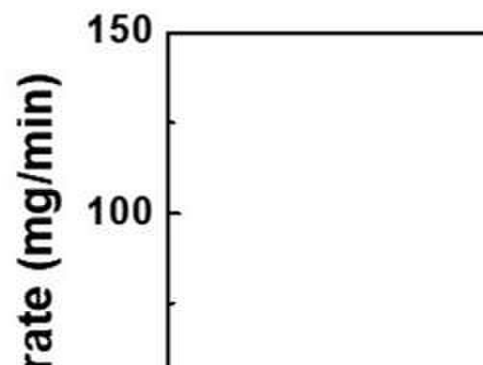


図 3. CFRP 加工速度の酸素濃度依存性

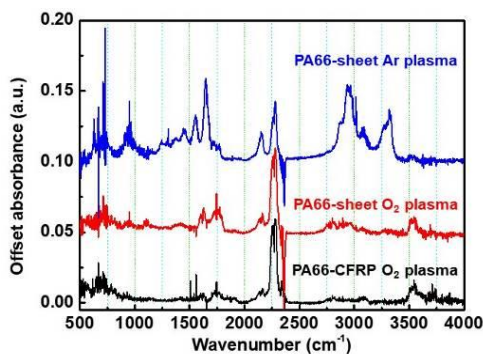


図 4. CFRP を O₂ プラズマ曝露した際の生成ガスの FTIR スペクトル

加工雰囲気の高圧化は加工領域の局在・高速化にとって重要なパラメータであることが分かった(図5)。また加工マスクの効果調べたところ、適切なマスク材を選択することで良好な加工領域制御ができることが分かった。これにより、開口の形状サイズに近い穿孔サイズが得られ、熱損傷領域も大きく減少することが分かった(図6)。また、マスク処理とパルス変調を併用することで、加工範囲の広がり制御され、熱損傷が大幅に抑制されることが明らかとなった(図7)。

④ 加工後CFRP表面性状の検討

プラズマ加工されたカーボンファイバは、ファイバ先端が針状にテーパ状に細くなっていることが明らかとなった(図8)。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

CFRPは輸送機の軽量化に向けて不可欠な材料として注目を浴びている。本研究では、高密度プラズマを用いてCFRPの穿孔加工が可能であることを世界で初めて実証した。本研究の推進により、提案する加工法では、通常の加工条件において電極消耗がほとんど無く、極めて廉価な酸素や空気のみが必要な加工法であることがわかり、一般的な機械加工では工具損耗が激しく生じてしまうCFRP素形材に対する環境負荷の低い加工法としての活用が期待できる。また、CFRPを高密度プラズマ処理した際の生成ガス種が明らかになり、この知見は大量普及した後のCFRPを化学的に分解処理する際の防毒・除害指針を与える基礎的知見として活用されると考えている。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者は、これまで独自開発した高密度プラズマ源を用い、シリコンやダイヤモンドなどの半導体薄膜を低環境負荷に形成する手法の開発、ならびに水素だけで金属ドライエッチングを実現する技術の開発、さらにはオンサイトで機能性加工ガスを生成する技術など、エレクトロニクス分野でのプロセス開発を行ってきた。今回の研究では、独自の高密度プラズマ源を機械材料の加

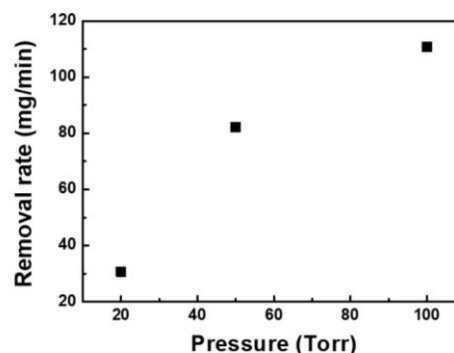


図5. 加工速度のプロセス圧力依存性

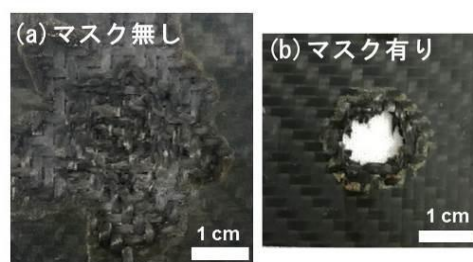


図6. 加工マスクによる加工領域制御

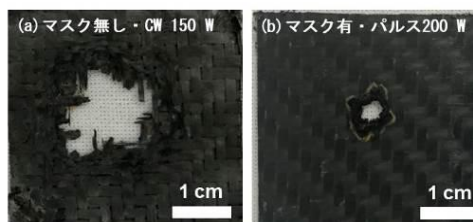


図7. 加工マスクとパルス変調による加工領域制御



図8. CFRPをO₂プラズマ加工前後のカーボンファイバの外観

工に応用展開することを目指して実施したものであり、得られた成果は本技術を発展させるに十分な先駆的なデータが多数得られた。CFRP加工技術の深化に向け、今後の研究課題の抽出もできたことから、プラズマプロセスの研究歴の中で新たな研究展開へ向けた先駆的な研究として位置づけられる。

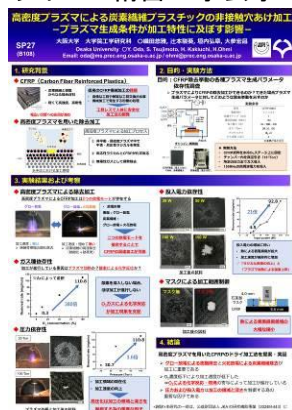
6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- [1] 織田悠雅、辻本駿葵、垣内弘章、大参宏昌、高密度プラズマによる炭素繊維プラスチックの非接触穴あけ加工—プラズマ生成条件が加工特性に及ぼす影響—、2025年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2025） p.150.
- [2] 大参宏昌、織田悠雅、辻本駿葵、垣内弘章、反応性高密度プラズマ曝露処理におけるCFRTPからの生成ガス種、2025年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集（2025） p.465.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

以下の 精密工学会学生研究発表会用 発表ポスター



(2)(1)以外で当事業において作成したもの
特になし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 大阪大学 大学院工学研究科(オオサカダイガク ダイガクインコウガクケンキュウカ)

住 所： 〒565-0871

大阪府吹田市山田丘2-1

担 当 者： 准教授 大参宏昌(オオミヒロマサ)

担 当 部 署： 物理学系専攻 機能材料研究室(ブツリガクケイセンコウ キノウザイリョウケンキュウシヨ)

E - m a i l : ohmi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

U R L : <http://www-ms.prec.eng.osaka-u.ac.jp/jpn/>