

令和 3 年 10 月 22 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06088

研究課題名(和文)放電援用ブラシ効果による工具摩耗制御を用いたCFRP切削の高品位化技術の開発

研究課題名(英文) Development of High Quality Cutting technique for CFRP by Controlling Tool Wear Using Discharge-Assisted Brush Effect.

研究代表者

田中 秀岳 (Tanaka, Hidetake)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：10422651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：CFRPは強化材として含まれている炭素繊維の影響により工具摩耗が発生しやすく、バリや仕上げ寸法の悪化が問題となっている。本研究では通電、放電現象による工具摩耗の低減に効果的な加工方法の追求と、残存繊維の抑制が可能であるかを検討した。窒素雰囲気化にすれば発火は抑え放電によるファイバーの切断が可能である。CFRPSの棒材を既存の形彫り放電加工機を用いて加工した場合、特に炭素繊維の毛羽立ちなどもなく工具先端の形状が転写されていた。最適な放電距離は10 μ m以内であることが分かった。旋盤でうまく放電させるためには放電距離を常に微調整させる機構が必要であるということが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機能性プラスチックのCFRPは強化材として含まれている炭素繊維の影響により工具摩耗が発生しやすく、バリや仕上げ寸法の悪化が問題となっている。工具摩耗の影響を避けることを考えた場合、旋削加工ではなく、工具が工作物に触れない非接触加工が適しているように考えられるが、非接触加工では精密な加工を行うことが難しい。特に医療機器分野においてCFRPを用いた微細加工品の需要が高まっているため、旋盤による加工を行う必要がある。本研究では通電、放電現象による工具摩耗の低減に効果的な加工方法の追求と、残存繊維の抑制が可能であるかを検討した結果、切削と放電加工を組み合わせることによりバリを抑制できる事を確認した。

研究成果の概要(英文)：CFRP is susceptible to tool wear due to the influence of carbon fibers in the reinforcing material, resulting in burrs and degradation of finish dimensions. In this study, we investigated the possibility of reducing the tool wear due to electric discharge and electric current and the possibility of reducing the residual fibers. When CFRPS rods were machined using an existing EDM, the shape of the tool tip was transferred without any fluffing of carbon fibers. The optimum discharge distance was found to be within 10 μ m. It was found that a mechanism to constantly fine-tune the discharge distance is necessary to discharge well on a lathe.

研究分野：精密加工

キーワード：CFRPS 炭素繊維強化プラスチック 放電加工 バリ 工具摩耗 機能性樹脂材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機能性プラスチックとは、強度、弾性率、耐熱性、各種耐久性が優れ、機械の構造体や機械部品材料として使用されるような高性能プラスチックの総称である。また、機能性プラスチックの中に位置する炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は金属と比べるとはるかに比強度が高いため、航空機や自動車のボディなど、金属の代替材料としての需要が拡大している。しかし、CFRP は強化材として含まれている炭素繊維の影響により工具摩耗が発生しやすく、バリや仕上げ寸法の悪化が問題となっている。工具摩耗の影響を避けることを考えた場合、旋削加工ではなく、工具が工作物に触れない非接触加工が適しているように考えられるが、非接触加工では精密な加工を行うことが難しい。特に医療機器分野において CFRP を用いた微細加工品の需要が高まっているため、旋盤による加工を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では CFRTP の旋盤加工において工作物のバリの発生を無くし、工具摩耗が進行しても一定の寸法精度が維持できる加工方法の提案と CFRTP の種別における加工特性の把握が目標である。

1. 旋盤等に影響を与えない絶縁構造を持った切削工具と放電援用ブラシ効果による鋭利な切れ刃の維持
2. CFRTP 加工時にパルス電流を通電することにより、工具逃げ面と炭素繊維が断続的に擦れる作用を利用して逃げ面を選択的に消耗させて刃先形状を鋭利に保つ。放電加工における炭素電極と工作物の超硬合金との関係となる。繊維の逃げ面へのブラシ効果を継続させるために工作物の軟化を少なくする必要がある。これは切削液の連続的な供給により工作物の切削熱による軟化を低減し、かつ工具先端が液中放電状態となる。
3. 工具逃げ面消耗に伴う刃先高さの変化の補正
工具逃げ面が形状創製され、それに伴いすくい面の自折作用により刃先角が常に鋭利に保たれるが刃先高さが増えるため、刃先高さの変化をインプロセスでモニタリングし、切り込み量を動的に補正することで寸法精度を維持する。

3. 研究の方法

CFRP の通電による切削への影響

先行研究による炭素繊維への通電によって加熱された炭素繊維の強度が低下するという結果が得られている。その結果をもとに、長繊維 (連続繊維) の CFRTS および、短繊維 (不連続繊維) の CFRTP の棒材に対して通電させ加熱させることで炭素繊維の強度低下を狙ったものである。しかし、ただ棒材に通電させるだけでは棒材全体の樹脂が温まり、棒材全体が弱くなってしまうため意味がない。通電実験の目的は、最終的に通電装置を旋盤に組み込み、加工中に通電を行うことで炭素繊維の強度を低下させ加工することで炭素繊維のブラシ効果を少なくすることである。そこで、工具 (チップの先端) と棒材が接触する部分で通電させ、狭い範囲で加熱を行い、部分的に炭素繊維の強度を低下させることが可能か判断するための通電実験を行った。

使用した棒材はビニルエステルがマトリックスである連続繊維の CFRTS の棒材である。また、NC 旋盤は高松機械工業株式会社の GSL-10 を使用した。これらは以前、通電せずに行った実験で使用したものと同一のものである。切削条件とボルトスライダの電圧値は以下の表に示す。

表 1. 通電実験条件

| | |
|-----------------------|--|
| Tip(lathe) | Cemented carbide tip(TNGA160408 TH10) |
| Work material | CFRTS(Matrix:Vinyl ester) |
| Original Diameter(mm) | 20 |
| Feed(mm/rev) | 0.116 |
| Depth of cut(mm) | 0.5 |
| Cutting speed(m/min) | 200 |
| Voltage value(V) | 11~15,20 |

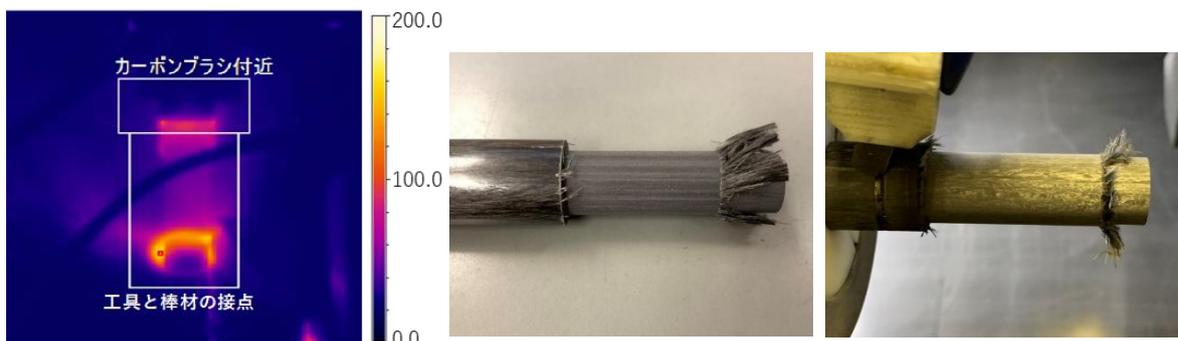


図 1. 通電時の工作物の温度分布(左)、通常旋削結果(中)及び通電切削結果(右)

通常旋削時の最高温度よりも通電旋削時の最高温度の方が温度が高いことから、通電による加熱が行われていることが分かる。しかし、通電旋削後の棒材の状態を確認すると通常旋削時のものとほぼ変わらず残存繊維が多く発生していることが分かる。また、工具が最後に加工した部分(残存繊維の根元部分)を見ると樹脂の溶融が起き、樹脂が欠落していることが分かった。これは、通電による熱が、樹脂には大きな影響を与えるが残存繊維を抑制する方向には働かないということになる。また残存繊維の抑制が行われないということは工具摩耗の低減も見込めず、通電旋削による加工の改善はあまり見られないという結論に至った。

放電によるカーボンファイバーの絶縁破壊

放電による絶縁破壊を用いて炭素繊維を断ち切ることを目標にし、通常の工具を用いた旋削加工と組み合わせることで残存繊維の抑制や、工具摩耗低減につなげていくこととした。

図2左に示すように、電圧を可変にするためにボルトスライダ(山菱電機 S-130-20)を組み込んだ回路を設計し、耐電圧が160Vのコンデンサーを使用した。また、大電流が流れた際にボルトスライダを保護するために20Aのヒューズを取り付けた。

放電後の棒材の状態を図2右上に示す。一部の繊維が絶縁破壊により切断されているのが分かる。また、放電した瞬間に一瞬ではあるが発火するために、窒素(N₂)を用いて実験を行った。

実験後のチップの先端をレーザー顕微鏡(Olympus LEXT OLS4100)を用いて確認した画像を図2右下に示す。橙色の円で囲った部分が溶融しているように見える。しかし、下のグラフの赤線は画像上の赤線の場所の表面の凹凸を示しているが、これを見ると一部が欠落しているどころか、何かが付着し飛び出していることが分かる。これは放電によって棒材側の樹脂が付着したと考えられる。よって、工具側の溶融は防ぐことができた。

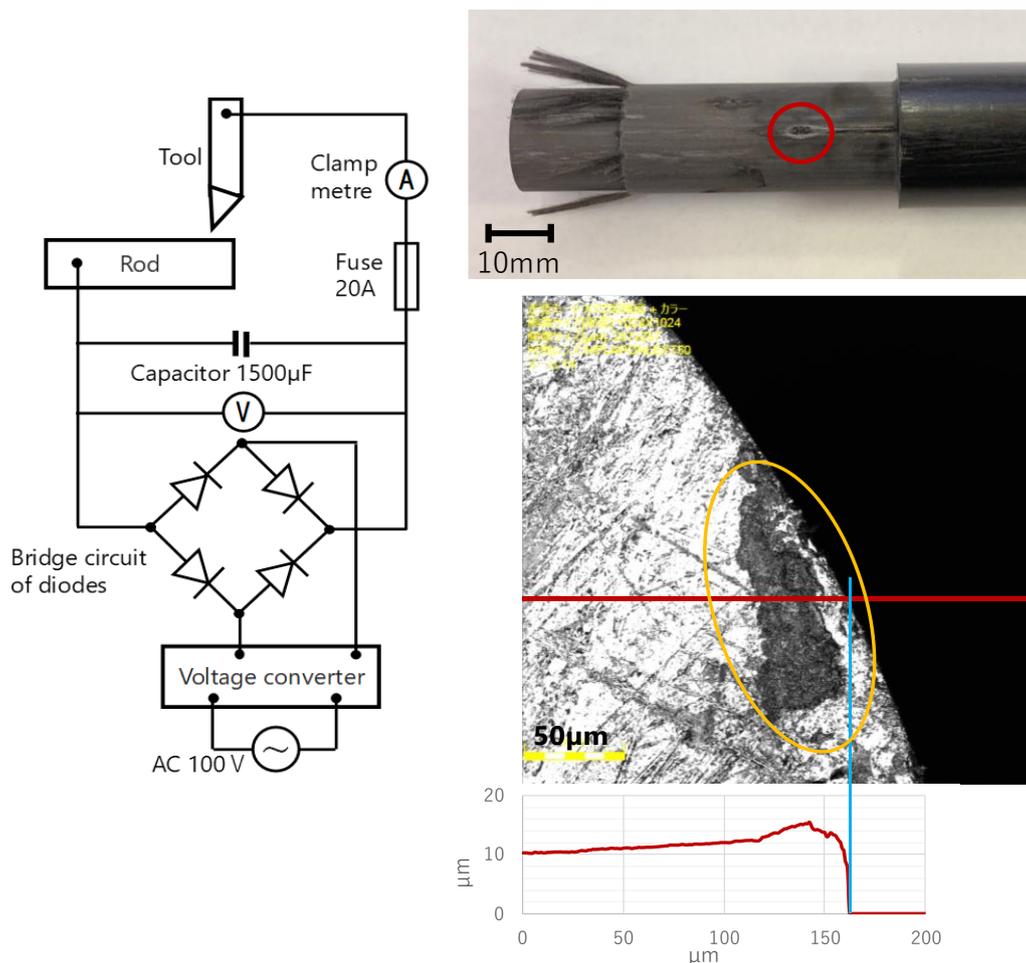


図2. 放電回路(左)、放電加工後の工作物(右上)及び放電加工後の工具先端観察結果(右下)

形彫り放電加工機による放電実験

CFRTSの棒材を既存の形彫り放電加工機を用いて加工した場合、工具刃先の形状が転写されながら加工されるのかの検証に加え、放電距離の確認を行った。オークマ株式会社の形彫り放電加工機(ED-S302)のテーブルに万力を用いてCFRTSの棒材を固定し、加工ヘッドに工具を固定した。この状態で棒材と工具が油の中に浸され加工ヘッドが下方向に進むことで棒材の側面を加工する。図3に示すように、放電加工により工具刃先の形状を比較的きれいに棒材側に転写することが可能であると判明した。連続的に放電させ続けるためには常に放電距離を微調整する必要がある。

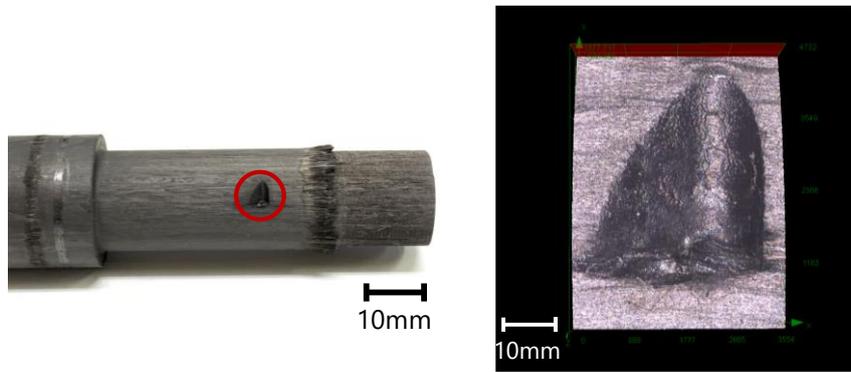


図 3. 放電加工機による工作物加工結果(左)及びその拡大写真(右)

旋盤による連続放電援用加工実験

基礎実験の結果を踏まえ、新たな放電回路を設計製作し、連続放電援用加工実験を行った。回路図を図 4 に示す。

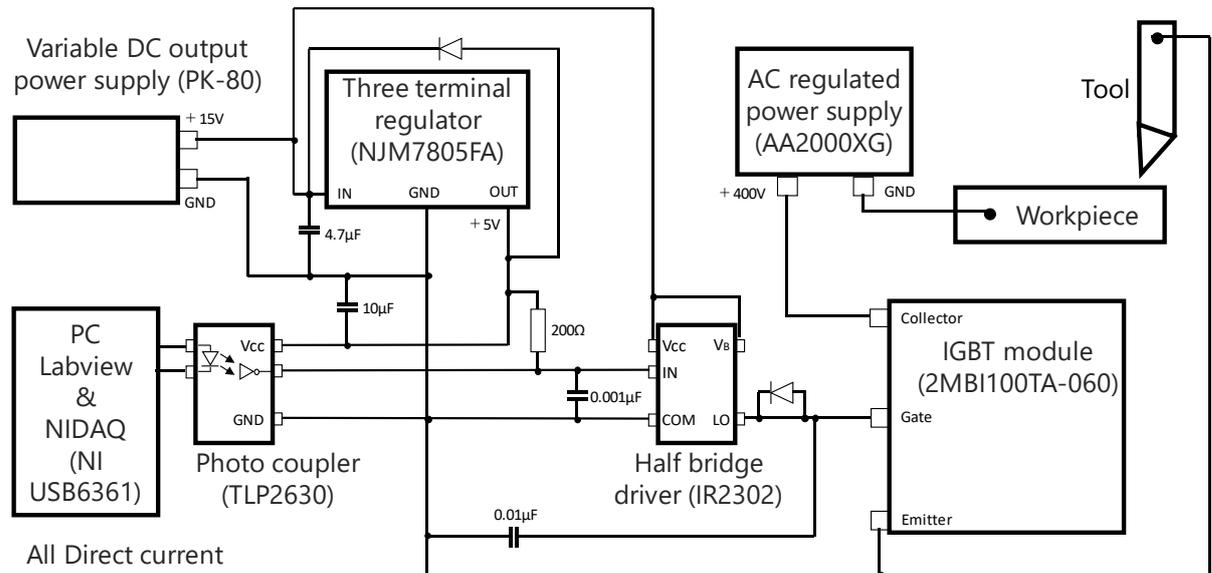


図 4. 改良型放電回路

周速一定速度 1.5m/min の放電旋削加工を 150 周分行った後の被削材の様子を図 7 に示す。これから分かるように被削材の表面が放電加工されている。図 5 は放電加工された部分の一部を 5 μ m ずつの切り込み量で通常旋削加工を行い、最終的に 35 μ m の切り込み量まで行ったものである。これを行った理由として、放電による被削材への影響の深さを調べるとともに、放電加工された部分を通常旋削加工した際の残存繊維の抑制の効果の検証を行うためである。

結果として、最終的に切り込み量 35 μ m で通常旋削加工を行った結果、被削材の表面に放電による影響が見られなくなった。したがって、放電旋削加工を行うと、被削材中心方向へ 35 μ m の深さまで放電加工されるということが判明した。

残存繊維の抑制効果に関しては、通常旋削加工を行った際、残存繊維の発生は確認されなかった。したがって CFRTS の旋削加工を行う際、放電旋削加工と通常旋削加工を組み合わせることで、残存繊維の抑制が可能であることが判明した。

放電に関するパラメーターを制御しやすくし、安定的な放電を可能にするため、放電回路の改良を行った。改良型放電回路を用いて放電ギャップと電圧の関係や、放電エネルギーと放電時間の関係など放電に関するいくつかの理論の証明を行い、同時に放電旋削加工に向けた条件の検証も行った。

改良型放電回路に接続した工具と被削材を NC 旋盤に固定し、放電旋削加工実験を行った。その結果、被削材に放電旋削加工を施し、そこをさらに通常旋削加工することで被削材の残存繊維を抑制することが可能であることが判明した。

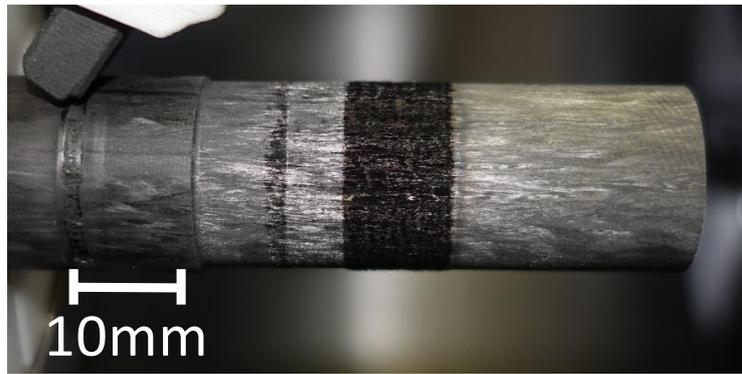


図 5. 放電援用加工実験結果

4. 研究成果

本研究では、CFRTS の棒材への旋削加工を行う上で、旋削加工と通電や放電加工をそれぞれ組み合わせ、被削材の残存繊維の発生を抑制できる加工方法の確立を目的とした。通電と旋削加工を組み合わせたものを通電旋削加工とし、放電加工と旋削加工を組み合わせたものを放電旋削加工とした。それぞれを実行するために必要な回路やジグの設計、製作を行い、残存繊維の抑制に対する有用性の検証実験を行った。それぞれの加工方法について得られた知見を以下に記載する。

(1) CFRTS の通電旋削加工

通電旋削加工を行うための回路とジグを設計、製作し、NC 旋盤に組み込むことで通電旋削加工実験を行った。結果として、通電によって工具先端と被削材の接点での局所的な加熱を実現できたが、加熱は被削材の樹脂への影響が大きく、炭素繊維への影響はほぼないということが判明した。したがって、被削材の残存繊維の抑制はできなかつたため、通電旋削加工では CFRTS の旋削加工時の問題である、残存繊維の抑制にはつながらないという結果が得られた。

(2) CFRTS の放電旋削加工

CFRTS に対する放電加工が可能であるかの検証を行うために、基礎的な放電回路を設計し、放電実験を行うためのジグの製作を行い、それらを用いて放電基礎実験を行った。その結果、工具と被削材間での放電が確認され、CFRTS への放電によって炭素繊維の切断が可能であることが示された。しかし、放電に成功する回数が極端に低いことが問題であった。

放電に関するパラメーターを制御しやすくし、安定的な放電を可能にするため、高電圧出力とパルス波出力を可能とした改良型放電回路を製作した。改良型放電回路を用いた実験によって、放電ギャップと電圧の関係はパッシェンの法則に従うことが示された。また、放電エネルギーと放電時間の関係は放電エネルギーの式に従うことが示された。

放電旋削加工に向けた条件の検証も行い、放電による被削材への影響をできるだけ小さくし、放電をコントロールしやすくするためには、パルス放電の放電時間はできるだけ短くし、デューティー比は 0.2 未満が望ましいことが示された。

以上を踏まえ、改良型放電回路に接続した工具と被削材を NC 旋盤に固定し、放電旋削加工実験を行った。その結果、被削材に放電旋削加工を施し、そこをさらに通常旋削加工することで被削材の残存繊維を抑制することが可能であると判明した。

8. 今後の展望

今後の展望として、放電旋削加工を行った際に条件設定を 1 種類しか行っていない。したがって、今回の実験結果は良好であったが、放電時間、放電電圧および放電ギャップ、放電電流のすべての条件において実験計画法を用い、追加実験を行うことで、より良い放電旋削加工の条件を定めることが必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hidetake TANAKA |
| 2. 発表標題 Fundamental study of electro-discharge assisted hybrid cutting for UD CFRP |
| 3. 学会等名 The 10th international conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|