炭素繊維強化樹脂の放電加工の試みと加工現象の観察*

伊藤智泰** 早川伸哉*** 糸魚川文広*** 中村 隆***

Feasibility Study on Electrical Discharge Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastics
and Observation of Machining Phenomena

Akihiro ITO, Shinya HAYAKAWA, Fumihito ITOIGAWA and Takashi NAKAMURA

This paper investigates the machining phenomena in electrical discharge machining (EDM) of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in order to understand its machining process. Sinking EDM using deionized water for machining liquid and wire EDM were carried out, and machining properties, such as material removal rate and electrode wear ratio, were compared with those of EDM of metal. The waveforms of discharge current and gap voltage were also observed during the machining process, and the ratio of the short-circuiting was evaluated. Experimental results show that Sinking EDM and wire EDM of CFRP can be realized without using special machining method and equipment. It is found for the sinking EDM of CFRP that electrode wear ratio decreases with increasing the discharge current, and the ratio less than 1% can be achieved even when deionized water is used for the machining liquid. It is also found that the short-circuiting caused by the contact of carbon fibers that are fluffing on the machined surface with the tool electrode frequently occurs, and the short-circuiting contributes to material removal.

Key words: electrical discharge machining, carbon fiber reinforced plastics, deionized water, short-circuiting

1. 緒 言

炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics ; CFRP)は、一般的な金属材料と比較して比強度、比弾性率、疲労強度及び耐食性に優れているため、各種産業分野で機械構造用材料として利用され始めている¹⁾。しかしながら CFRP は除去加工することが難しい材料であることが知られており、現在 CFRP 加工の主流である切削加工においては仕上げ面での炭素繊維の抜けや激しい工具摩耗による工具寿命の短期化が問題となっている²⁾。また、層間の接合強度が弱い場合、穴あけ加工においては工具貫通時の層間剥離(デラミネーション)や炭素繊維のむしれが問題となっている³⁾。

ところで、放電加工は金属以外の機能性材料の加工にも適用できることが報告されている。例えば、脆性材料であるため切削加工することが難しいセラミックスの加工に放電加工を適用した福澤らの研究⁴⁾や、磁力による影響から切削、研削加工が難しい永久磁石の放電加工に関する武沢らの研究⁵⁾などは放電加工により良好な加工ができた例である。熱的加工であり、非接触で加工反力が小さいという特徴を有する放電加工を CFRP の加工に適用すれば、前述の切削加工の問題点が回避できて、加工品質の改善や加工コストの低減に寄与すると期待される。CFRP の放電加工は筆者ら⁶⁾や Wang ら⁷⁾によって試みられており、Wang らは CFRP を油中で放電加工したときの加工特性を報告している。一方、筆者らは航空機や自動車などに実用化されている大型の CFRP の加工を想定し、加工液のかけ流しによる放電加工が可能なイオン交換水を加工液として用いた場合について、CFRP への放電加工の適用を試みた。

イオン交換水中で CFRP を放電加工した例がこれまでないことから、本論文ではまずイオン交換水中での CFRP の放電加工の可否について検証を行い、CFRP の放電加工に特有な現象について金属を加工した場合と比較することで考察することを目的とした。特に、後述するように CFRP の放電加工中においては短絡が顕著に生じていたことから、CFRP の放電加工において短絡が生じる要因及び加工に与える影響について考察を行った。

2. CFRP の放電加工の可否

CFRP は高抵抗材料である炭素繊維と絶縁性材料である樹脂の複合材料であるため、放電が発生するかが懸念される。また、炭素繊維の配向方向と加工方向の関係によって放電加工特性に異質が生じることも懸念される。そこで、まずは CFRP に対する放電加工の可否を調べるために、CFRP の形彫り放電加工とワイヤ放電加工を試みた。

実験に用いた CFRP の特性を表 1 に示す。この CFRP は直径 $8\mu\text{m}$ の炭素繊維(抵抗率 $2\times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$)が一方に配向している厚さ 3.30mm の平板状の材料であり、炭素繊維の充填率を繊維配向に直交する断面における面積比として実測したところ約 90%であった。

この CFRP を形彫り放電加工では金属を加工する場合と同様な方法で(特別な工夫をせずに)放電加工機に取り付けて穴加工を行った。すなわち、平板状の材料の底面全体を加工テーブル上に密着させるように取り付けて板厚方向に加工した(図 1(a))。

一方、ワイヤ放電加工では繊維方向と平行な方向に加工テーブルから突き出すように固定し、加工テーブルから約 90mm の位置で直径 18.5mm の円形状を切り出す加工を行った(図 1(b))。一方に繊維が配向する CFRP をワイヤ放電加工する場合、炭素繊維の配向方向と加工方向の関係により、放電が生じる加工面の状態が図 2 に示すように異なる。アーク柱の直径が同じであると仮定した場合に、繊維に平行な方向に加工した場合(図

* 原稿受付 平成 23 年 4 月 26 日

** 学生会員 名古屋工業大学大学院(愛知県名古屋市中区御器所町)

*** 正 会 員 名古屋工業大学(愛知県名古屋市中区御器所町)

Table 1 Material properties

Thickness	3.30 mm
Fiber orientation	One direction
Fiber diameter	8 μ m

Table 2 Experimental conditions of sinking EDM for feasibility study

Tool electrode	Cu(ϕ 10mm)
Polarity	Tool electrode (+)
Open circuit voltage	85V
Discharge current (Setting value)	10A
Discharge current (Measured value)	5-7A
Discharge duration (Setting value)	4 μ s
Discharge duration (Measured value)	4-6 μ s
Pulse interval time	16 μ s
Dielectric fluid	Deionized water
Machining direction	Perpendicular to fibers

Table 3 Experimental conditions of wire EDM for feasibility study

Electrode material	Brass(ϕ 0.25mm)
Polarity	Wire(-)
Dielectric fluid	Deionized water
Open circuit voltage	85V
Discharge current (Setting value)	15A
Discharge current (Measured value)	8-10A
Discharge duration (Setting value)	0.3 μ s
Discharge duration (Measured value)	0.8-1.0 μ s
Pulse cycle time	4.0 μ s
Wire winding rate	4m/min

Table 4 Experimental conditions of sinking EDM for obtaining machining characteristics

Tool electrode	Cu(ϕ 10mm)
Polarity	Tool electrode (+)
Open circuit voltage	85V
Discharge current (Setting value)	8-28A
Discharge current (Measured value)	4-20A
Discharge duration (Setting value)	4-80 μ s
Discharge duration (Measured value)	4-86 μ s
Pulse interval time	16-128 μ s
Dielectric fluid	Deionized water
Machining direction	Perpendicular to fibers

Fig.1 Experimental setup **Fig.2** Model of discharge spot **Fig.3** Example of EDMed CFRP

2(a))の方が、直交する方向に加工した場合(図2(b))よりも電流が流れる繊維の本数が多く、電気抵抗が小さくなると考えられる。CFRPを円形に加工することで、繊維の配向方向と加工方向の関係が変化するため、繊維配向と加工方向の関係によって放電加工特性に異方性が現れるか否かが検証できる。

形彫り放電加工とワイヤ放電加工、どちらも加工液にイオン交換水を用いた。それぞれの代表的な実験条件を表2、表3に示す。なお、放電電流とパルス幅は、金属を放電加工した場合の値を設定値として示すとともに、CFRPを加工した場合の実測値を併記した。

実験の結果、形彫り放電加工、ワイヤ放電加工ともCFRPの

加工が可能であることがわかった。形彫り放電加工では加工中に加工部付近が激しく発光したり、炭素繊維が凝集した長大な加工くずが加工液の液面に浮遊したりする様子が観察された。しかし、表2に示す加工条件の加工面は、光学顕微鏡で観察すると加工部付近の熱影響や加工面での炭素繊維の毛羽立ちが少ない良好な加工面であった(図3(a))。なお、加工部付近での激しい発光と炭素繊維の毛羽立ちについては3章で考察する。

一方、ワイヤ放電加工では加工条件を適切に選択しないとワイヤの断線が頻発したが、表3の加工条件において安定した加工が可能であり、円形状を切り出すことができた(図3(b))。そして、繊維配向と加工方向の関係に起因する放電加工特性の異方

性は認められなかった。

3. CFRP の形彫り放電加工における加工特性

3.1 実験方法

前章において CFRP を放電加工することが可能であることが明らかとなったことから、イオン交換水中で CFRP を形彫り放電加工した場合の加工特性を評価するために、放電電流・極間電圧波形と加工面の観察を行うとともに、加工速度及び電極消耗率を測定して金属(S45C)を放電加工した場合と比較した。実験には2章の実験と同じ CFRP を用い、板厚方向(炭素繊維に対して直交する方向)に放電加工を行った。実験条件を表4に示す。

3.2 放電電流・極間電圧波形

CFRP および S45C を形彫り放電加工した際の放電電流・極間電圧波形を図4に示す。この実験では、S45C を加工した場合にピーク電流値が 24A となる条件を用いた。なお、CFRP の場合は後述するように短絡と思われる現象も頻発したが、図4には放電と思われるパルスの波形を示している。図4より S45C の場合の放電電流及び放電電圧は 24A、20V であるのに対し、CFRP の場合はそれぞれ 12A、50V であることがわかる。この結果は CFRP の内部抵抗及び CFRP と加工テーブルとの接触抵抗が S45C よりも大きいことに起因していると考えられるが、そのことが放電加工機の制御系を誤動作させて加工が行えなくなることはないことが確認された。

3.3 加工面の状態

形彫り放電加工した CFRP の加工面の状態を評価するために、加工面を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡を用いて観察した。その結果、図3(a)に示したように比較的良好な加工面が得られる場合がある一方、ピーク電流とパルス幅が大きく、休止時間が短い加工条件(ピーク電流値 20A、パルス幅 80 μ s、休止時間 16 μ s)では図5(a)のように炭素繊維の毛羽立ちが生じる場合もみられた。

Fig.4 Wave forms of discharge current and gap voltage

Fig.6 Material removal rate and electrode wear ratio

また、表4に示す条件では加工面の一部または全域において樹脂が消失し炭素繊維が露出していた(図5(b))。これは CFRP の成分である樹脂の熔融温度と炭素繊維の昇華温度が大きく異なるため、樹脂が選択的に除去されることに起因すると考えられる。また、ワイヤ放電加工した加工面で、樹脂が残留している場合においても、炭素繊維と密着していない様子が観察された⁸⁾(図5(c))。マトリックス樹脂と炭素繊維はぬれ性が悪く、CFRP 製造に用いられるオートクレープ法では高温高圧下で樹脂を繊維間に含浸させている⁹⁾。放電加工時にはいったん熔融した樹脂を炭素繊維間に再び含浸させる圧力が生じないため、加工面において炭素繊維が露出したと考えられる。以上のことに加えて、同条件で金属(S45C)を加工した場合には加工面全域で放電痕の累積が観察されるのに対し、CFRP の加工面には明確な放電痕の累積は観察されなかったことも特徴に挙げられる。

3.4 加工速度および電極消耗率

CFRP を形彫り放電加工した場合の加工特性として加工速度と電極消耗率を調査した。実験条件はパルス幅 4 μ s、休止時間 16 μ s とし、その下で放電電流値の影響を調べた。表1に示した炭素繊維が一方に配向した厚さ 3.30mm の CFRP を用い、板厚方向に 20 分間加工した。その後、加工部の直径と深さをノギスで測定して除去体積を求めた。工具電極の消耗量は加工前後の質量の差から求めた。比較のために S45C を同条件で加工した場合についても同様の測定を行った。

測定結果を図6に示す。電流の実測値が大きいほど加工速度が増大することは金属の場合と同様であるが、CFRP では電流値が2倍になっても加工速度は20%程度しか増大しなかった。この理由としては、電流値の増加に伴い短絡の割合が増加することが影響していると考えられる。後述するように、短絡でも樹脂の除去は進行するが、炭素繊維は放電によって除去されると考えられる。電流値が大きいほど短絡の割合が大きくなることを確認していることから、電流値の増加により1パルスの除去量が増加すること、短絡の割合が増加して加工効率が低下す

Fig.5 Machined surface of CFRP

Fig.7 Discharging surface of tool electrode

Fig.8 Overall view of machining situation

Fig.9 Experimental setup for evaluating

ることの差し引きにより、図 6 に示すような結果が得られたと考えられる。

油中で CFRP の放電加工を試みた Wang らは銅電極を陽極とし、電流値 20A、パルス幅 50 μ s、デューティーファクタ 33.3% という実験条件での加工速度を 0.4mm³/min と報告⁶⁾しているのに対して、イオン交換水を用いた本研究では電流値 20A、パルス幅 40 μ s、デューティーファクタ 20%の実験条件で、6.8 mm³/min 程度の加工速度が達成された。

一方、電極消耗率は 0.8~2.5%程度であり放電電流値が大きいほど減少した。実験後の工具電極の放電面を光学顕微鏡により観察すると黒い付着物が観察され、電流値 8A の場合と電流値 20A の場合を比較すると、20A の方が、付着が顕著に生じていた(図 7)。本実験では加工液にイオン交換水を使用しているため油中加工の場合のような加工液由来のカーボン被膜は生じないことから、この付着物は CFRP から除去された樹脂や炭素繊維の成分と考えられる。つまり CFRP の放電加工では CFRP から除去された樹脂や炭素繊維の成分が工具電極に付着することで油中加工の場合のカーボン被膜と同様な保護作用をしていることが考えられる。そして、電流値を大きく設定すると電極消耗率が 1%以下の低消耗加工が可能であることが明らかとなった。

4. 短絡が加工に及ぼす影響

4.1 加工状態の分類

CFRP の形彫り放電加工中の状態として図 8 に示す 2 種類の加工状態が観察された。図 8(a)に示す加工状態(状態 A)では加工部付近の断続的な激しい発光と高周波音が生じており、図 8(b)の加工状態(状態 B)では金属を放電加工した際と類似した極間隙

Table 5 Material properties in evaluating the ratio of the short-circuiting

Thickness	11.50 mm
Fiber orientation	0°, $\pm 45^\circ$, 90°
Fiber diameter	8 μ m

Table 6 Experimental conditions for evaluating the ratio of the short-circuiting

Tool electrode	Cu(ϕ 10mm)
Polarity	Tool electrode (+)
Open circuit voltage	85V
Discharge current (Setting value)	24A
Discharge current (Measured value)	11-13A
Discharge duration (Setting value)	32 μ s
Discharge duration (Measured value)	32-38 μ s
Pulse interval time	128 μ s
Dielectric fluid	Deionized water

Fig.10 Waveforms of machining situation

だけの発光とカリカリという加工音が生じていた。そこで、それぞれの場合に極間で何が起きており、それぞれが加工に及ぼす影響を明らかにするため、放電電流・極間電圧波形の観察を行った。

この実験に使用した CFRP は表 5 に示すように直径 8 μ m の炭素繊維が一方に配向しているプリプレグを、繊維の配向方向が様々となるように重ね合わせた板厚 11.5mm の平板状の材料である。この CFRP の繊維配向方向に直交する断面を観察し 1 つの層の炭素繊維の充填率を実測したところ約 90%であった。この CFRP に対してイオン交換水中でプリプレグに平行な方向に加工を行った(図 9)。実験条件を表 6 に示す。なお、2 章、3 章で用いた CFRP とは繊維配向が異なる材料を使用したことが本章で示す知見や本論文の結論に影響することはない。

状態 A と状態 B における放電電流・極間電圧波形をそれぞれ図 10(a)と(b)に示す。絶縁破壊時の電流の立ち上り及び極間電圧の立ち下りは状態 A の方が状態 B よりも急峻である。また、状態 A のピーク電流及び極間電圧の実測値はそれぞれ約 20A と約 25V であった。

一方、状態 B ではピーク電流の実測値が約 12A と小さく、パルスごとに ± 1 A 程度の変動がみられた。また状態 B の放電電圧の実測値は 45~50V であり状態 A よりも 20~25V 程度大きかった。

ところで、クロスをほどいて用意した炭素繊維に加工電源を接続し電流を流す別の実験を行ったところ状態 A において観察される強い発光に類似した発光現象が観察された。このことから図 8(a)は少数の炭素繊維に大電流密度で電流が流れた場合であると推定される。そして発光領域が図 8(b)に比べて大きいことは極間距離が大きいことを表していると考えられる。放電加

Fig.11 Debris of Carbon fibers

Fig.12 Discharge frequency and ratio of machining states

工では休止時間中の絶縁回復が十分ではない場合にも強い発光がみられるが（いわゆる異常アークの発光），図10(a)において各パルスに放電遅れ時間が生じていること，放電持続時間中の電流値が図10(b)の場合よりも大きく極間電圧は小さいことと考え合わせると，状態Aは異常アーク放電ではなく炭素繊維による短絡であると考えられる．一方，状態Bは加工中の様子が金属を放電加工した場合と類似していること，放電持続時間中の極間電圧が短絡と考えられる状態Aよりも約20V大きいことから放電が生じていると考えられる．以上の結果からCFRPを放電加工した場合の加工状態は放電及び炭素繊維による短絡の2種類に分類できると考えられる．

4.2 短絡を引き起こす要因

表6に示した実験条件で金属(S45C)を加工した場合とCFRPを加工した場合を比較すると，金属を加工した場合にはほとんど短絡が生じないのに対してCFRPを加工した場合には短絡の割合が高く，加工時間20分間で平均すると短絡の割合は約40%であった．そこでCFRPにおいて短絡が生じやすくなる要因について考察した．

CFRPの放電加工において短絡を引き起こす要因として，まず3章で示した加工面での炭素繊維の毛羽立ちが考えられる．加工面で毛羽立った炭素繊維が印加電圧による静電力によって¹⁰⁾工具電極と架橋することで短絡が生じることが考えられる．また，CFRPを放電加工した場合に特有な加工くず形態も関係している可能性が考えられる．表6に示す実験条件でCFRPを放電加工した後，加工液中に浮遊している加工くずを採取し走査型電子顕微鏡で観察した結果を図11に示す．この図に見られるように大きいものでは長さ500μm以上ある炭素繊維が単独あるいは塊として観察された．このように長大な炭素繊維が極間隙に存在すれば，印加電圧による静電力によって工具電極と工作物の間を容易に架橋して短絡が生じることが考えられる．2章と3章の実験に用いたCFRPでも同様に短絡が観察されたことから，

(a) From 4 to 8min

(b) From 12 to 16min

Fig.13 Servo feed fluctuation

炭素繊維による短絡は炭素繊維の配向方向によらずどのCFRPでも生じる現象であると考えられる．

4.3 短絡の加工への寄与

次に，炭素繊維による短絡が頻発することが加工の安定性や加工速度に及ぼす影響を調べるために，短絡の出現割合と主軸変位を調べた．短絡の割合は電流・電圧波形から求めた．また，主軸の変位は電気マイクロメータを用いて測定した．

表6に示した実験条件で加工開始から20分間におけるパルス頻度と短絡の割合を調査した結果を図12に示す．図12よりパルス頻度は約6000Hzで一定であるのに対し，短絡の割合は加工時間によって10%から60%まで大きく変化していることがわかる．このように短絡の割合の変動が大きい理由は次のように考えられる．安定した加工中にいったん短絡が始まると，樹脂のみが除去され長大な繊維が毛羽立つことで短絡の発生を助長するという悪循環に陥るため，短絡の割合が極端に大きくなると考えられる．一方，炭素繊維が除去されると毛羽立ちによる短絡は起こりにくく放電が安定して生じる好循環が続くと考えられる．

次に短絡の割合が10%である4-8分の4分間における主軸の変位と，放電の割合が40%である12-16分の4分間における主軸の変位を測定した結果を図13に示す．図13において短絡が生じ主軸が大きく引き上げられた後も同じ直線の延長線上に戻り，各時間の平均送り速度は短絡の出現割合によらず0.13mm/minと一定であることがわかる．佐伯らは高抵抗材料の放電加工においては工作物内部でのジュール発熱がかなりの割合で材料内部での温度上昇に関与することを報告している¹¹⁾．樹脂は炭素繊維よりもはるかに低い温度で除去されるので，短絡パルスでも炭素繊維のジュール発熱によって樹脂の除去が進行すると考えられる．これらのことから，CFRPの放電加工においては放電と短絡のどちらも加工に寄与すると考えられる．

5. 結 言

本研究では CFRP の放電加工を試み、イオン交換水中で加工した場合の加工特性を調査するとともに、CFRP に特有な加工現象について考察を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 形彫り放電加工、ワイヤ放電加工とも CFRP を加工可能である。
- (2) CFRP を放電加工した加工面では放電痕の累積が観察されず、電流値、パルス幅ともに大きい条件では加工面において樹脂の消失による炭素繊維の露出や毛羽立ちが生じる。
- (3) CFRP の放電加工においては電流値の増加に伴い電極消耗率が低下し、電極消耗率 1% 以下の低消耗加工も可能である。
- (4) CFRP の放電加工では炭素繊維による短絡が頻発するが、そのパルスも加工に寄与する。

参 考 文 献

- 1) 中島正憲：航空機機体の製造技術，精密工学会誌，**75**，8 (2009) 941.
- 2) 酒井康貴：CFRP・チタンおよび複合材料における穴あけ加工の革新技術，機械と工具 **53**，3 (2009) 10.
- 3) 坂本重彦：CFRP の高精度穴あけ加工技術，機械と工具 **54**，6 (2010) 17.
- 4) 福澤康ほか：絶縁性セラミックス材料の放電加工法，精密工学会誌，**72**，5 (2005) 541.
- 5) 武沢英樹：機能性材料に対する放電加工：ネオジウム磁石の放電加工特性，日本機械学会誌，**113**，1 (2010) 57.
- 6) 伊藤智泰ほか：放電加工による炭素繊維強化樹脂(CFRP)加工の試み，2010 年度精密工学会春季大会学術講演論文集，(2010) 577.
- 7) Hai Wang et al. : EDM Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic, Proc. 16th ISEM, (2010) 65.
- 8) 伊藤智泰ほか：炭素繊維強化樹脂のワイヤ放電加工における加工面の観察，2010 年度日本機械学会年次大会学術講演論文集，(2010) 213.
- 9) 藤田雄二郎：オートクレープ法，工業材料，**37**，11(1989) 61.
- 10) 石田尚志ほか：放電加工の極間における加工くず粒子の柱状化現象の解明，電気加工学会誌，**32**，1 (1998) 37.
- 11) 佐伯雄文ほか：高抵抗材料の放電加工におけるジュール発熱を考慮した工作物温度の非定常解析，精密工学会誌，**62**，3 (1996) 443.