

超音波振動援用研削による CFRP の高精度穴あけ加工

山崎剛史*1, 閻 紀旺*2

High-precision drilling of CFRP by ultrasonic vibration-assisted grinding

Takeshi YAMASAKI and Jiwang YAN

CFRP の穴あけには切削加工が多く用いられてきたが、層間剥離やバリによる加工精度の低下、そして工具摩耗が問題となっている。本研究では、CFRP に対して超音波振動援用研削による穴あけ加工を試みた。研削加工に超音波振動を付加することで、振動の衝撃により炭素繊維に微細な傷をつけ加工を容易にする効果が確認された。これにより、繊維方向による加工性の差異の低減や穴エッジの層間剥離防止が可能となった。さらに、超音波振動によって加工初期の研削抵抗が約 70%低減された。

Key words : CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), composite material, grinding, drilling, ultrasonic vibration

1. 緒言

Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) は、母材のエポキシ樹脂に炭素繊維を複合させることで比強度や比剛性を向上させた材料である¹⁾。機体や車両の軽量化による燃費の向上、高強度化による高い安全性から、近年航空機や自動車において利用が拡大している。この場合、成形された状態で使用されることは少なく、穴あけ加工などの二次加工が必要になる。しかし、CFRP は繊維方向によって機械的性質に著しい異方性を持ち、それが加工後の形状や寸法精度に影響を与えるため、高精度の加工が非常に困難な材料である²⁾。CFRP の穴あけには切削加工やレーザ加工を用いる方法がある。切削加工においては層間剥離やバリによる加工精度の低下、また切り残された繊維と工具の摩擦によって引き起こされる工具摩耗が問題となっている³⁾。一方でレーザ加工は加工後の穴にこげや加工変質層が生じるなど、加工品質に問題があることが報告されている⁴⁾。

そこで、本研究では、CFRP に対して超音波振動援用研削を試みる。研削加工は、多数の砥粒切れ刃によって交互に微小切削が行われるため工具摩耗や層間剥離の低減が可能である。また、研削工具に超音波振動を付加することで、次の 3 つの効果が得られると考えられる。1 つめは振動の衝撃により被削材表面に微細な傷をつけ、材料除去を容易にする効果である。この効果により、研削抵抗の低減や表面粗さの向上が可能である⁶⁾⁷⁾。とくに CFRP 中の炭素繊維は脆性材料であるため、振動によって切りくずが細かく分断されやすくなると

考えられる。2 つめは超音波振動の作用によって加工液中で微細な気泡を発生させ、この気泡が崩壊する際の大きな衝撃で切りくずの排出性を高める効果である⁸⁾。このように微細な気泡が発生と消滅を繰り返す現象はキャビテーションと呼ばれている。一般に穴あけにおいて穴底面に残る切りくずは加工の妨げとなり加工精度や加工能率に影響するが、キャビテーションによる切りくず排出性の向上は加工の安定性に大きく寄与すると考えられる。3 つめは工具が被削材と衝突・離脱を繰り返す際、離脱の際に加工点に研削液が供給されることによる冷却効果や流体流れの促進による工具表面の洗浄効果である⁹⁾。

以上の観点から、本研究は研削工具に超音波振動を付加することで CFRP の穴あけ加工の更なる高精度化と高能率化を目指す。本論文では、超音波振動が加工穴の表面性状に及ぼす影響について調査を行った。また、研削抵抗測定や加工後の工具観察などから超音波振動援用研削による CFRP の穴あけ加工のメカニズムについて検討を行った。

2. 実験装置および方法

2.1 加工機および被削材

本研究では、シーグ(株)製超音波スピンドル DUS-311 をソディック(株)製 4 軸同時制御セラミックニアステージ L4S-300 に取り付け、研削による CFRP の穴あけ加工を行った。超音波スピンドルの外観写真を図 1 に示す。(株)ソニックテクノロジー製超音波発振器 GSD20AT からスピンドル内のピエゾ素子に交流電圧を印加し、超音波振動を発生させている。ピエゾ素子には超音波振動ホーンが接続されており、ホーンがピエゾ素子の振動に対して共振を起こすことで工具先端において超音波振動を得ている。超音波振動は工具の軸方向に発生しており、振動周波数は 25.5 kHz、振幅は 3~3.5 μm である。図 2 に、実験装置全体の概略図を示す。超音波スピンドルに取り付ける研削工具として、粒度 #120/140、直径 3 mm のニッ

*1 慶應義塾大学大学院 理工学研究科:〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

*2 慶應義塾大学理工学部 機械工学科:〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1

(学会受付日:2015年 7月 10日)
(採択決定日:2015年 9月 28日)

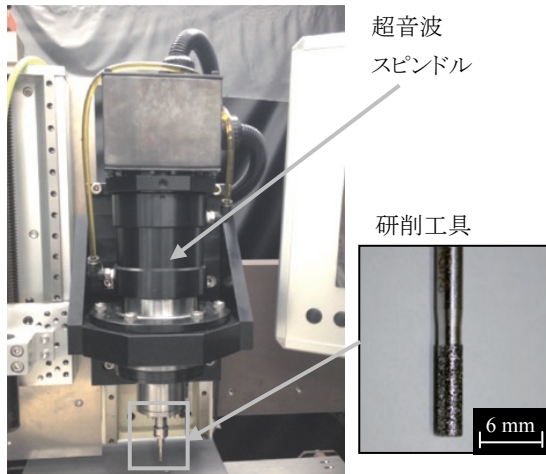


図1 超音波スピンドルおよび研削工具の外観写真

ケル電鍍ダイヤモンド砥石を使用した。研削工具の写真は併せて図1に示している。

実験に使用した茨木工業(株)製 CFRP は表面が 0.25 mm の平織 CFRP 層でカバーされており、内部は一方向繊維層が 90°ずつ回転しながら7層積層した構造である。母材には熱硬化性エポキシ樹脂を用いており、炭素繊維は PAN(ポリアクリロニトリル)系で、繊維束本数は 3000 本である。試料の厚さは 2 mm であり、炭素繊維の平均径は 5~7 μm となっている。

2.2 各繊維角度における研削加工実験

CFRP の研削加工において、CFRP の繊維角度 θ が材料除去機構および研削抵抗に与える影響を調べた(実験 1)。ここで繊維角度 θ は図3に示すように加工点における工具の接線と繊維がなす角度と定義した。加工の模式図を図4に、実験条件を表1に示す。繊維角度による材料除去機構の変化を調べるため、一方向繊維層の側面のみを沿わせるように加工を行い、(株)キーエンス製高速度カメラ VW-9000 を用いて加工中における切りくずの挙動を観察した。回転数は超音波スピンドルの安定最大回転数である 6000 rpm を用い、送り速度は高速度カメラでの観察を容易にするため、0.1 mm/s とした。また各繊維角度における工具軸方向(Z 方向)、直角方向(X 方向)の研削抵抗の測定も行った。研削抵抗の測定にはキスラー(株)製水晶圧電型3分力切削動力計 9119AA2 を使用した。

2.3 超音波振動の効果検証実験

超音波振動を付加させた状態で CFRP に穴あけを行い、超音波振動が加工に与える影響について調べた(実験 2)。本論文では振動無付加時を慣用研削、振動付加時を超音波振動援用研削と呼ぶことにする。実験条件を併せて表1に示す。高精度加工においては回転数を上げることが望ましいと考えられるが、本実験は超音波振動が加工に与える影響を検出しやすくするために、低回転数で実験を行った。これにより、一回転あたりに工具が振動する回数が増えるため、振動の効果がより観察しやすくなると考えられる。本実験では水槽内に万力を取り付けて CFRP を固定し、研削液を満たした中で加工を行った。

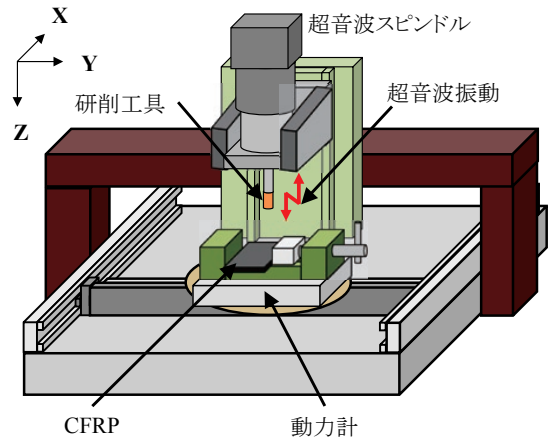


図2 実験装置全体の概略図

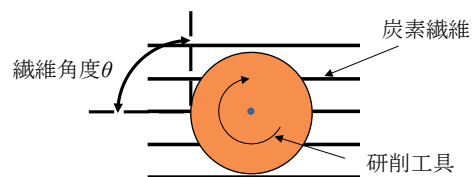


図3 加工における繊維角度の定義

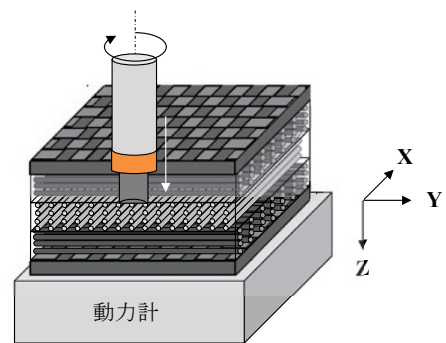


図4 異なる繊維角度における加工実験の模式図

表1 研削加工条件

	実験 1	実験 2
被削材	直交積層板(表面平織)	
研削工具	電着ダイヤモンド砥石 (#120/140)	
送り速度 mm/s	0.1	0.2
回転数 rpm	6000	3000
加工雰囲気	乾式	水溶性研削油
工具径 mm	6	3
超音波振動周波数 kHz		25.5
超音波振動振幅 μm		3~3.5

超音波振動が加工穴の表面性状に与える影響を調査するため、穴のエッジと側面の観察を行った。観察には走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いた。CFRP の加工においては繊維角度によって加工面性状が変

化することが知られているため¹⁰⁾、繊維角度も考慮した上で観察および評価を行った。また、穴あけ加工時に工具軸方向の研削抵抗の測定も行った。最後に、超音波振動の有無で連続的に穴あけ加工を行い、加工後の研削工具のSEM観察を行った。連続加工穴数は45個とし、加工穴深さは1.5 mmとした。実験の効率化のために送り速度は0.2 mm/sとしており、超音波振動の実験においてはすべて同様の送り速度を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 繊維角度が研削穴あけ加工に与える影響

3.1.1 材料除去形態

図5は繊維角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ における材料除去の様子を高速度カメラで撮影したものである。 $\theta = 0^\circ$ においては、繊維が形を保ったまま欠落しているのがわかる。一方、 $\theta = 45^\circ$ においては繊維の抜け落ちは観察されず、粉状に破碎されている。また、 $\theta = 90^\circ, 135^\circ$ においても $\theta = 45^\circ$ と同じように繊維が加工される様子が観察された。

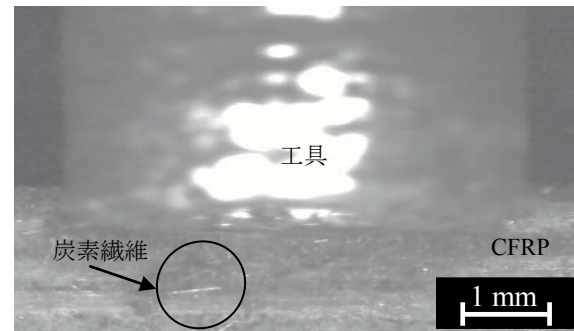
3.1.2 研削抵抗

図6は各繊維角度における研削抵抗のピーク時の測定結果である。直角方向(X方向)、工具軸方向(Z方向)ともに研削抵抗は $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ が最も大きく、順に $0^\circ, 90^\circ$ と小さくなる関係であることが確認された。

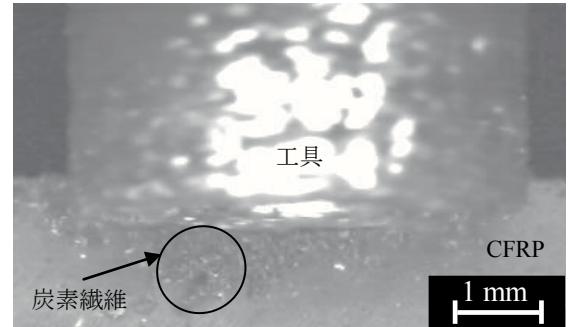
3.1.3 各繊維角度における加工機構の考察

各繊維角度における材料除去形態(図5)と研削抵抗(図6)の変化から、加工メカニズムを考察する。図7に各繊維角度における加工模式図を示す。まず、 $\theta = 0^\circ$ において研削力は主に繊維長さ方向に加わり、 $\theta = 90^\circ$ では繊維直角方向に加わる。また、 $\theta = 45^\circ$ においては研削力が繊維角度の影響で繊維長さ方向と直角方向に分解される。炭素繊維はグラファイトの構造から繊維長さ方向の強度は高いが直角方向の強度は低いため、主に直角方向の力によるせん断破壊で加工される¹¹⁾。したがって、炭素繊維の加工においては繊維直角方向に作用する研削力が加工機構を支配する重要な因子であると考えられる。この観点から、 $\theta = 0^\circ$ 付近において研削力は繊維直角方向にほとんど作用しないため、繊維は破壊されにくく、図5(a)に示したように繊維がほとんど加工されずに形を保ったまま欠落したと考えられる。これに対し、 $\theta = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ においては繊維直角方向に力の作用が強くなっているため、図5(b)に示したように繊維が細かくせん断破壊されている。

次に、研削抵抗について考える。 $\theta = 0^\circ$ の場合、図7(a)に示すように、繊維直角方向にほとんど力は作用しないため、繊維は破壊されずに大きな形を保ったまま抜け落ちる。そのため、繊維変形に消費されるエネルギーが少なく、研削抵抗が小さいと考えられる。一方、 $\theta = 90^\circ$ において、図7(b)に示すように、研削力のほとんどが繊維直角方向に作用するため繊維が容易に加工され、研削抵抗が小さくなったと考えられる。 $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ においては図7(c)のように研削力は繊維長さ方向と直角方向に分解されるため、繊維直角方向に作用する力が $\theta = 90^\circ$ の場合に比べて相対的に小さくなる。そして、このとき繊維は斜めにせん断されるため、せん断破壊を発生さ

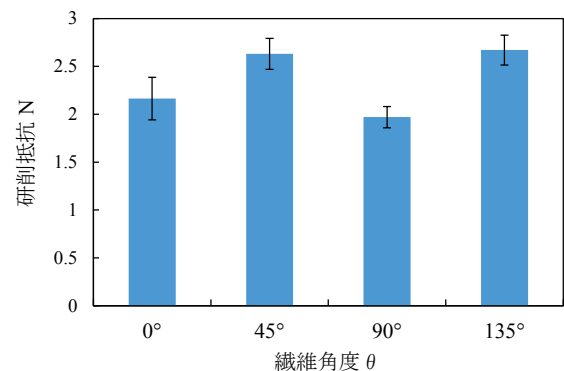


(a) 繊維角度 $\theta = 0^\circ$

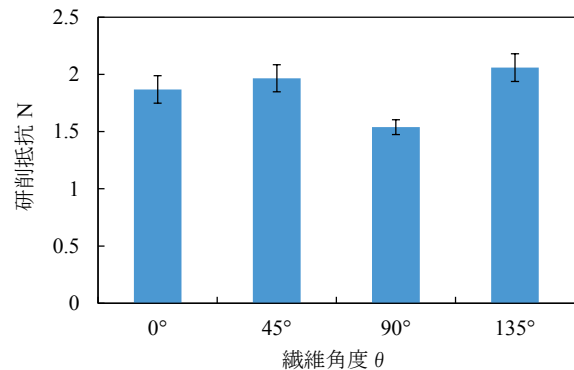


(b) 繊維角度 $\theta = 45^\circ$

図5 繊維角度による材料除去形態の変化



(a) 直角方向(X方向)の研削抵抗



(b) 工具軸方向(Z方向)の研削抵抗

図6 繊維角度による研削抵抗の変化

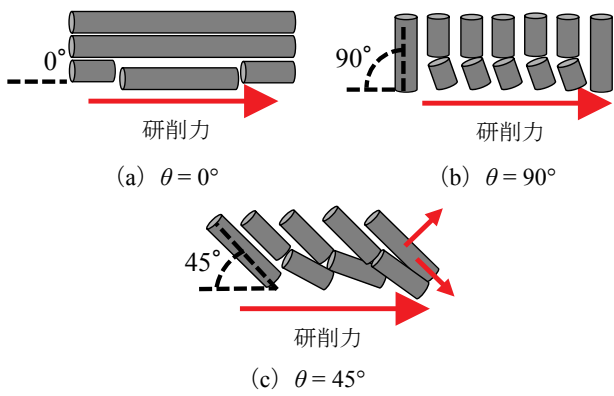


図7 各繊維角度における加工メカニズム

θ	慣用研削	超音波振動援用研削
0°		
10°		
20°		
30°		
45°		
90°		

図8 各繊維角度における穴側面観察

せるためには $\theta = 90^\circ$ よりも大きな変形エネルギーが必要になる。その結果、研削抵抗が高くなったと考えられる。

3.2 超音波振動の効果

3.2.1 穴側面の形態

慣用研削と超音波振動援用研削によって加工した穴の側面を各繊維角度において SEM で観察した結果を図8に示す。 $\theta = 0^\circ$ においては、どちらも繊維の抜け落ちが観察された。前述のように炭素繊維は繊維直角方向の力によって加工されるが、 $\theta = 0^\circ$ においては研削方向が繊維長さ方向と完全に一致

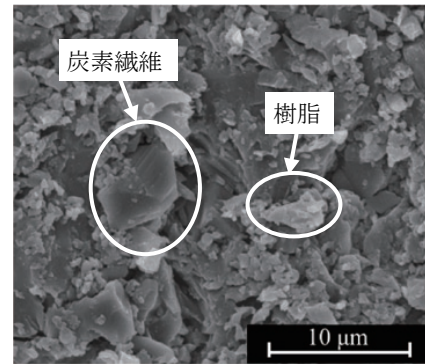
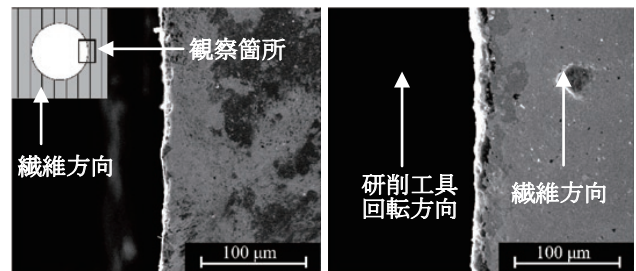
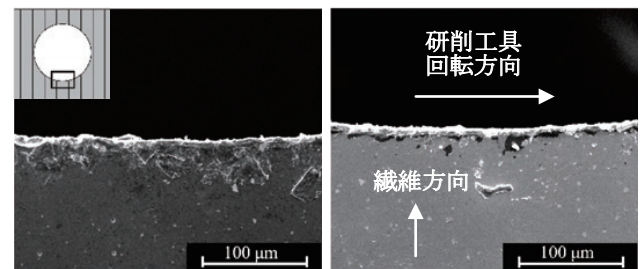


図9 超音波振動援用研削加工後の穴側面の高倍率観察 ($\theta = 90^\circ$)



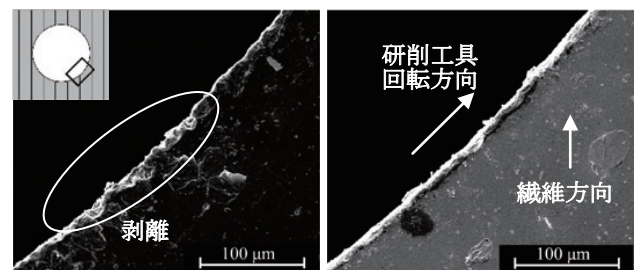
(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図10 穴エッジのSEM画像 ($\theta = 0^\circ$)



(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図11 穴エッジのSEM画像 ($\theta = 90^\circ$)



(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図12 穴エッジのSEM画像 ($\theta = 45^\circ$)

するため、繊維直角方向にほとんど力が作用しない。したがって、一部の繊維が抜け落ちるが、抜け落ちない繊維は加工されず表面に残り、表面凸凹が激しくなる。

$\theta = 10^\circ$ の場合、慣用研削では繊維が加工されず表面に残っているのに対し、超音波振動援用研削では繊維の抜け落ちはほとんど観察されなかった。慣用研削では、主に工具回

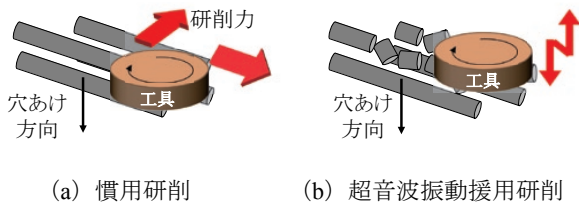


図 13 超音波振動有無による加工メカニズムの差異 ($\theta = 45^\circ$)

転方向の力で加工するため $\theta = 10^\circ$ においては繊維をせん断破壊するに十分な直角方向の力が得られず、繊維の多くが抜け落ちてしまったと考えられる。一方、超音波振動を付加した場合、工具軸方向の超音波振動によって繊維に直角方向の力が周期的に作用する。したがって、繊維が比較的容易に破壊され、除去されたと考えられる。

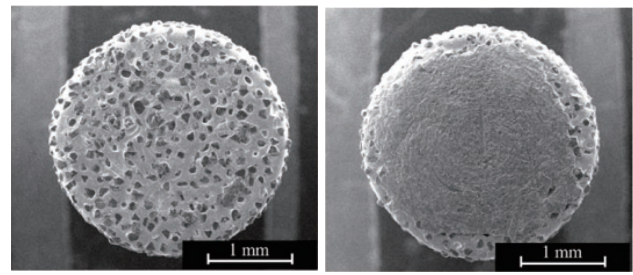
$\theta = 30^\circ$ 以降においてはどちらの加工法においても、繊維の抜け落ちはなくなると同時にほぼ均一な表面が得られた。図 9 に、 $\theta = 90^\circ$ のときの穴側面を高倍率で観察した結果を示す。加工面は切りくずと思われる樹脂や繊維の破片に覆われている。これは加工点で発生した切りくずが排出される際に、工具によって穴側面に押し付けられた結果であると考えられる。

3. 2. 2 穴エッジの形態

図 10, 11, 12 は繊維角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 部分の穴エッジの SEM 画像である。図 10, 11 に示すように、 $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ においては超音波振動の有無にかかわらずエッジにおける層間剥離は確認されなかった。一方、図 12 に示すように、 $\theta = 45^\circ$ において慣用研削ではエッジの層間剥離が観察されたが、超音波振動援用研削では剥離のないエッジを形成することができた。図 13 に各加工法による繊維加工の概略図 ($\theta = 45^\circ$) を示す。 $\theta = 45^\circ$ 部分は研削力が分解されることにより図 6 に示すように研削抵抗が大きくなるため、エッジに大きな負荷がかかってしまう。そのため、エッジの層間剥離が発生してしまったと考えられる。一方、超音波振動を付加すると、研削力だけではなく工具軸方向の振動の衝撃が繊維に対して直角方向に作用し、繊維を破壊する。また、破壊された繊維は容易に除去されるため、繊維角度による材料除去メカニズムの差異が小さくなる。その結果、 $\theta = 45^\circ$ 部分においても層間剥離の発生が抑制されたと考えられる。

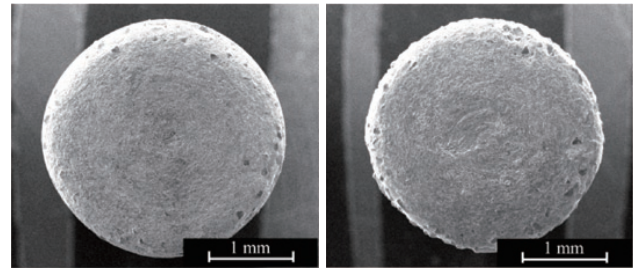
3. 2. 3 工具の観察

図 14 は慣用研削、超音波振動援用研削において 20 個の穴を加工した後の工具端面、図 15 は 45 個の穴を加工した後の工具端面、図 16 は 45 個の穴を加工した後の工具側面の SEM 画像である。工具端面について、穴 20 個加工後では超音波振動援用研削のみで目づまりが発生しており、慣用研削においてはほとんど目づまりを起こさなかった (図 14)。また、穴 45 個加工後ではどちらの条件でも端面が目づまりを起こした (図 15)。したがって、工具端面においては超音波振動を付加した方が目づまりしやすいことがわかった。また、超音波振動援用研削で穴 20 個加工後の工具端面において、目づまりを起こしていない箇所の拡大 SEM 画像を図 17 に示す。同図より、ダイヤモンド砥粒には樹脂のみが付着しており、炭素繊維は付着していないことがわかる。したがって、超音波振動援



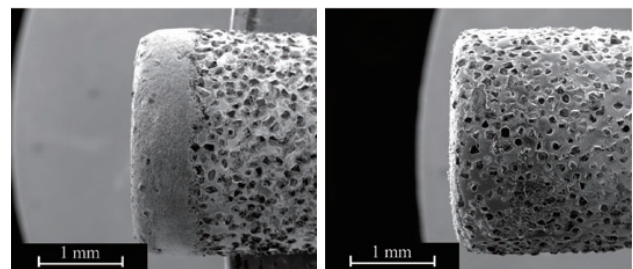
(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図 14 工具端面 SEM 画像 (加工穴数 20)



(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図 15 工具端面 SEM 画像 (加工穴数 45)



(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図 16 工具側面 SEM 画像 (加工穴数 45)

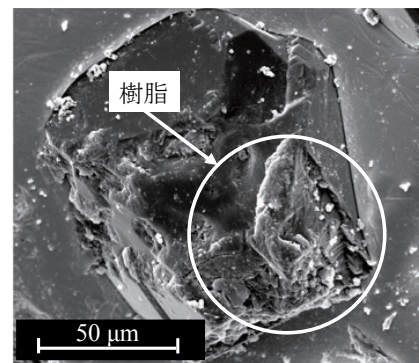


図 17 加工後の砥粒 SEM 画像 (超音波振動援用研削)

用研削においては、樹脂がダイヤモンド砥粒に付着することで目づまりを起こすと考えられる。超音波振動による衝撃は脆性材料である炭素繊維に対しては微細破壊を起こし加工を容易にするが、延性材料である樹脂に対しては超音波振動によって工具が衝突しても破壊は起こらず塑性流動のみが発生する。その結果、超音波振動子の伸長時に工具が樹脂に押し付けられる形となり、工具端面に樹脂が付着しやすくな

たと考えられる。

工具側面については、慣用研削では工具側面に切りくずが詰まり、ほとんど砥粒の突き出しが見られないが、超音波振動を付加することで側面の目づまりがほとんど発生しなくなることが観察された(図16)。慣用研削の場合、加工時に発生する切りくずを穴の外に排出する推進力がないため、穴の底に切りくずが溜まりやすく側面で目づまりを起こしてしまう。しかし、超音波振動を付加することにより研削液中で振動方向の流体流れが促進され、切りくずが排出されやすくなったと考えられる。また、工具側面においては工具端面のように振動による樹脂の押し付けの影響がほとんどないため、樹脂の付着も発生しにくい。そのため、超音波振動によって工具側面の目づまりが抑制されたと考えられる。

3. 2. 4 研削抵抗

図18は慣用研削、超音波振動援用研削で深さ1.5 mmの穴あけ加工をした際の、工具軸方向の研削抵抗測定結果である。同図より、超音波振動によって加工初期の研削抵抗が約70%低減されることがわかった。これは、脆性材料である炭素繊維が振動の衝撃によって破壊され、穴あけ加工が容易になったためであるといえる。加工開始時に一時的に研削抵抗が大きくなるのは、CFRPの表面が平織構造になっているためであると考えられる。平織構造は繊維同士が拘束しあうため、内部の層と比較して強度が高くなっている。また、超音波振動援用研削において、加工が進むにつれて研削抵抗が上昇し、慣用研削の研削抵抗に近づいていく。これは、加工深さの増大につれて切りくずが加工点と工具端面の間に溜まり、超音波振動の衝撃が阻害されることで繊維破壊の効果が低減されたためであると考えられる。したがって、工具端面に切りくずが残らないようにするため、研削液を高圧かつ高流量で加工点に供給することや、ヘリカル送りで加工を行うなどの対策が必要になるといえる。これにより研削抵抗の上昇を抑制し、超音波振動の効果をさらに高めることができると考えられる。

4. 結言

超音波振動援用研削によりCFRPの穴あけ加工を試みた。慣用研削と比較することで超音波振動が加工穴の表面性状や工具表面状態、研削抵抗に与える影響について調査を行った。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 超音波振動なしの場合、繊維角度 θ により材料除去機構が大きく変化する。また、研削抵抗は $\theta = 45^\circ, 135^\circ$ が最も大きく、順に $0^\circ, 90^\circ$ と小さくなる。
- 2) 超音波振動によって炭素繊維に直角方向の衝撃力を与えることで、穴側面における繊維抜け落ちが減少する。
- 3) 超音波振動の衝撃によって炭素繊維の微小破壊を引き起こすことで、繊維角度 θ による材料除去機構の差異が小さくなり、穴エッジに発生する層間剥離が抑制される。
- 4) 超音波振動を付加することで工具側面の目づまりを防止できる。一方、工具端面は振動による樹脂の塑性流動と付着の影響で目づまりが起こる。

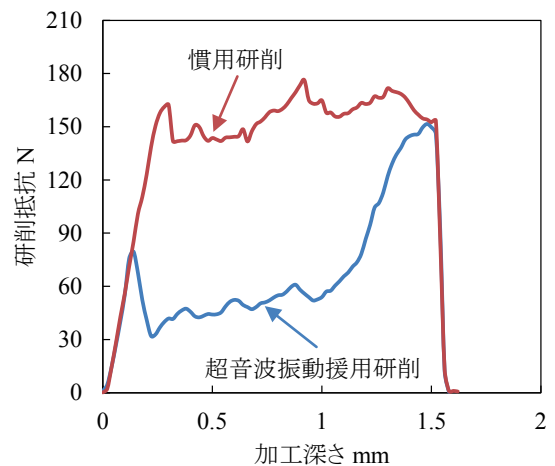


図18 振動有無による研削抵抗変化の差異

- 5) 超音波振動により、加工初期で工具軸方向の研削抵抗が約70%低減される。また、加工深さが増大するに従って、研削抵抗は慣用研削のそれに近づく。

謝辞

本研究の遂行において、(株)ソディックより援助をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

5. 参考文献

- 1) C. Weilong, P. Zhijian and T. Clyde: Preliminary study on rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks, *Ultrasonics*, 54, 6, (2014) 1594-1602.
- 2) Y. Quan and W. Zhong: Investigation on drilling-grinding of CFRP, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 4, 1, (2009) 60-63.
- 3) J. Kim and E. Lee: A study of the ultrasonic-vibration cutting of carbon-fiber reinforced plastic, *Journal of Materials Processing Technology*, 43, 2-4, (1994) 259-277.
- 4) H. Wang, J. Sun, J. Li and W. Li: Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 1-4, (2014) 257-266.
- 5) D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier and H. Haferkamp: Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 12-13, (2008) 1464-1473.
- 6) D. Geng, D. Zhang, Y. Xu, F. He and F. Liu: Comparison of drill wear mechanism between rotary ultrasonic elliptical machining and conventional drilling of CFRP, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33, 9, (2014) 797-809.
- 7) F. Makhadmeh, V. A. Phadnis, A. Roy and V. V. Silberschmidt: Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fiber-reinforced plastics, *Journal of Sound and Vibration*, 333, 23, (2014) 5939-5952.
- 8) H. Ogawa, M. Masuda and A. Mizobuchi: Effect of cavitation of cutting fluid in micro drilling (1st Report)-researches on applying ultrasonic vibration on machining fluid-, *The Japan Society for Precision Engineering*, 72, 5, (2006) 626-630 (in Japanese).
- 9) 森北肇: 超音波応用加工, (2004) 41-42, 森北出版
- 10) H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu and Y. Yao: Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel, *Precision Engineering*, 38, 4, (2014) 775-782.
- 11) M. Nomura and S. Hanasaki: Analysis of carbon-fiber-reinforced plastic cutting mechanism by finite-element method (fracture behavior of fiber at entry of cutting), *The Japan society of Mechanical Engineers*, 61, 583, (1995) 427-432 (in Japanese).