

## 超音波振動援用研削による CFRP の高精度微細溝加工

山崎剛史<sup>\*1</sup>, 閻 紀旺<sup>\*2</sup>

High-precision micro-grooving of CFRP by ultrasonic vibration-assisted grinding

Takeshi YAMASAKI and Jiwang YAN

切削による CFRP の溝加工において層間剥離による加工精度低下や、炭素繊維と工具の摩擦による工具摩耗が問題となっている。本研究では、CFRP に対する新たな微細溝加工技術として、超音波振動援用研削を試みた。研削工具に超音波振動を付加することにより切りくずの排出性が向上し、工具目づまりが抑制されることを確認した。また、研削抵抗や加工点温度の上昇も抑えることができた。その結果、超音波振動付加によって溝エッジに発生する層間剥離を著しく低減することができた。

Key words: CFRP (carbon fiber-reinforced plastic), composite material, grinding, grooving, ultrasonic vibration

## 1. 緒言

Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) は比強度や比剛性が高いという特徴から、近年航空機や自動車において需要が拡大している<sup>1)</sup>。例えば、ボーイング787においては機体重量の約50%がCFRPで構成されており、従来と比較して約20%の軽量化に成功している<sup>2)</sup>。CFRPを構造材として利用する際は、穴あけ加工や溝加工などが必要不可欠であり、従来は切削加工が多く用いられてきた。しかし、CFRPの切削加工にはさまざまな問題が生じることが知られている。まずIliescuらによって、切り残された炭素繊維と工具の摩擦によって工具摩耗が著しく発生することが報告されている<sup>3)</sup>。工具摩耗は、工具消耗による加工コスト増加や工具交換による加工効率低下を引き起こす。また、Davimらによって、加工時の切削力によって層間剥離が発生し、加工精度が低下することが報告されている<sup>4)</sup>。以上のような問題から、CFRPの利用拡大が妨げられていることが現状である。

著者らは前報において、超音波振動援用研削によってCFRPの穴あけ加工を行い、超音波振動が繊維破壊を促進し、より高精度な穴あけ加工が可能であることを報告した<sup>5)</sup>。しかし、CFRPを構造材として利用するための微細溝加工に関する研究は非常に少ない。そこで本報では、CFRPに対して3次元複雑形状の高精度微細加工を目指して超音波振動援用研削による溝加工を試みた。研削抵抗測定、加工後のCFRP表面や工具の観察、加工点の温度計測などを行い、超音波振動援用研削によるCFRP溝加工のメカニズムを検討した。

## 2. 被削材, 実験装置および方法

## 2.1 被削材

本研究で使用した CFRP (茨木工業 (株) 製) は、母材である熱硬化性エポキシ樹脂に PAN (ポリアクリロニトリル) 系の炭素繊維を複合させて成形したものである。炭素繊維の引張弾性率は 230GPa, 引張強度は 4.9GPa, 繊維径は約 5~7 $\mu$ m となっており、繊維束本数は約 3000 本である。また、表面は平織構造、内部は一方向繊維層が 90°ずつ回転しながら 7 層積層した構造となっており、被削材全体の厚みは 2mm である。

## 2.2 超音波振動援用研削加工装置

4 軸同時制御リニアステージ ((株) ソディック製 L4S-300 型) に超音波スピンドル (シーグ (株) 製 DUS-311 型) を取り付けて研削加工を行った<sup>5)</sup>。スピンドル内部には振動子として piezo 素子が内蔵されており、さらに超音波振動ホーンが接続されている。この piezo 素子に、超音波発振器 ((株) ソニックテクノロジー製 GSD20AT 型) を用いて交流電圧を印加することで、超音波振動を発生させている。そして、piezo 素子の振動とホーンが共振を起こすことによって、ホーン先端において超音波振動が増幅される。このホーン先端に研削工具を取り付けることによって、超音波振動を付加した研削加工を可能としている。超音波振動は工具軸方向に発生しており、周波数は 25.5kHz, 振幅は 3.0~3.5 $\mu$ m, 最大振動速度は約 260mm/s となっている。研削工具はニッケル電着ダイヤモンド砥石を使用し、粒度は #120, 直径は 3mm である。また、研削抵抗の測定には水晶圧電型 3 分力切削動力計 (キスラー (株) 製 9119AA2 型) を用い、ステージに取り付けて測定を行った。

## 2.3 実験方法

超音波振動を付加して図 1(a) のように CFRP に溝加工を行うことで、超音波振動が加工に与える影響について調査した。本報では超音波振動なしの加工を慣用研削、超音波振動ありの加工を超音波振動援用研削と呼ぶことにする。また

\*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  
Keio University

\*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: 2016年 7月 11日)  
(採録決定日: 2016年 10月 25日)

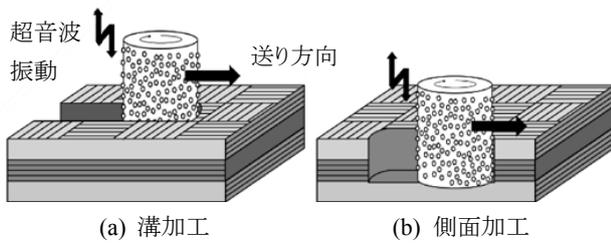


図1 実験概略図

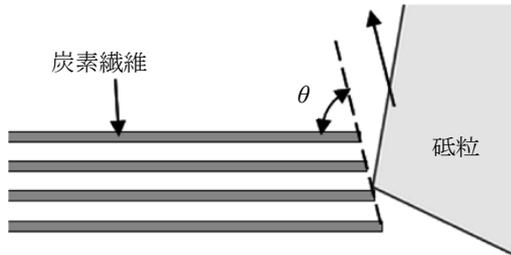


図2 繊維角度の定義

加工雰囲気湿式として実験を行う際には、水槽内に万力を取り付けて CFRP を固定し、水溶性研削液を満たした中で加工を行った。観察および評価に関しては、工具の接線と繊維がなす角度(繊維角度  $\theta$ )を考慮したうえで行った。繊維角度  $\theta$  の定義は図 2 に示す。繊維角度  $\theta$  を考慮する理由としては、笹原らの報告にもあるように、CFRP は繊維角度によって加工面性状が変化するためである<sup>6)</sup>。実験条件を表 1 に示す。観察には走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いた。

また、加工現象解明のために研削加工中の加工点温度測定を行った。測定には赤外線サーモグラフィ(FLIR Systems 社製 T660 型)を用い、放射率は先行研究の値を参考にし、0.85 とした<sup>7)</sup>。溝加工においては図 1(a)からわかるように工具側面の試料が妨げとなり、加工点を直接観察することができない。そのため、図 1(b)のように側面加工を行い、加工面を横から観察することにより加工点温度の測定を行った。実験条件は表 1 と同様である。側面加工実験の際は、まず被削材方向に送り速度 0.1mm/s で切り込んでいき、切込み深さが 1mm になったところで、設定した送り速度で側面加工を行った。温度を測定する際、加工雰囲気を湿式の状態で行うと研削液が外乱となってしまう、加工点の温度を正確に計ることができない。そこで、温度測定の際には乾式で実験を行った。乾式では湿式の場合と比べて切りくずの排出性が悪く、送り速度が速い状態では安定した加工が困難である。そのため、送り速度は 0.1mm/s、0.3mm/s と低速にして実験を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 工具の観察

図 3, 4 は慣用研削、超音波振動援用研削によって加工を 10mm 行った後の工具端面、工具側面の SEM 画像である。慣用研削では工具端面、工具側面において切りくずによる目づまりが発生しているのに対し、超音波振動援用研削においてはほとんど発生していない。つまり、超音波振動には工具の目づまりを抑制する効果があることがわかった。慣用研削の

表 1 加工条件

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)
送り速度 mm/s	1
回転数 rpm	3000
加工雰囲気	水溶性研削液, 乾式
工具径 mm	3
加工深さ mm	1
超音波振動周波数 kHz	25.5
超音波振動振幅 $\mu\text{m}$	3.0~3.5

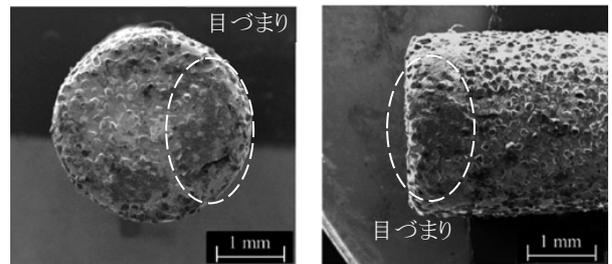


図3 慣用研削後の工具 SEM 画像

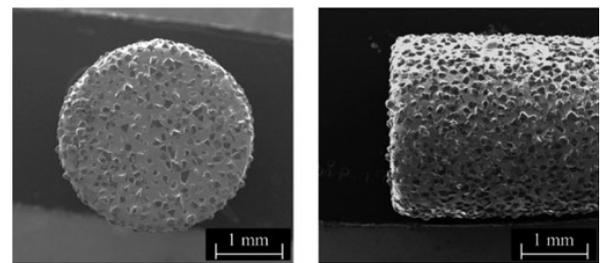


図4 超音波振動援用研削後の工具 SEM 画像

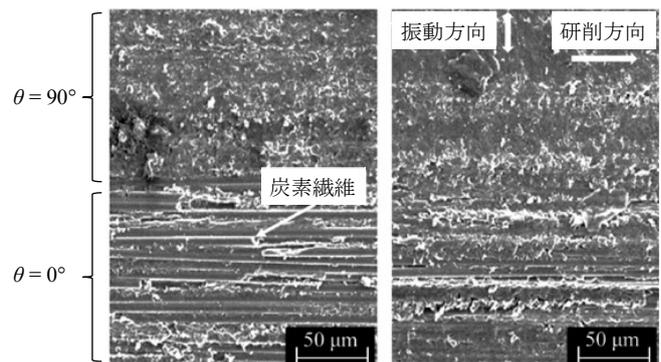


図5 溝側面 SEM 画像

場合、研削液の流れは工具回転方向のみに発生するため、溝底面に溜まった切りくずをうまく排出することができず、目づまりを起こしやすくなってしまふ。一方、工具に超音波振動を付加すると、振動によって研削液中に工具軸方向の流れが発生し、切りくずの排出が促される。また、工具が上下振動することによって、切りくずが工具から振り払われるため、切りく

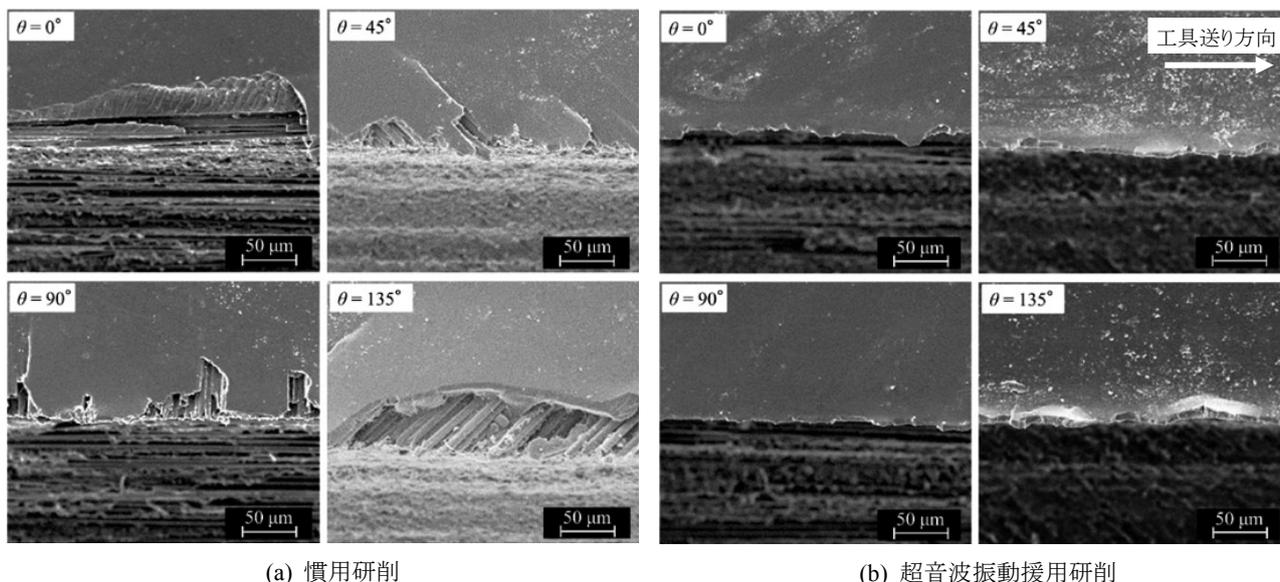


図 6 溝エッジ SEM 画像

ずの付着も防止できると考えられる。工具端面においては、軸方向の振動によって周期的に加工点から工具が離れ、切りくずが排出されやすくなったために目づまりを抑えることができたと考えられる。

このようにCFRPの溝加工においては、超音波振動付加によって工具端面、側面の目づまりが抑制されることがわかった。しかし、前報において穴あけ加工を行った際は、端面において目づまりが促進されるという結果になった<sup>5)</sup>。これは溝加工と穴あけ加工における切りくずの排出性の違いが影響していると考えられる。溝加工においては切りくずが工具送り方向の反対側から排出されるため、端面に切りくずは残留しない。一方、穴あけ加工では端面に残った切りくずを排出する経路がないことに加えて、工具振動による押し込みでプラスチックの付着が起こる。そのため、目づまりが発生してしまったと考えられる。以上より、超音波振動を援用する場合、工具の目づまりに関しては溝加工と穴あけ加工で現象が異なることがわかった。

### 3. 2 溝側面の観察

図 5 は慣用研削、超音波振動援用研削によって加工を行ったあとの側面の SEM 画像である。同図の上部が繊維角度  $\theta = 90^\circ$  部分、下部が  $\theta = 0^\circ$  部分となっている。同図より  $\theta = 90^\circ$  部分においては、超音波振動の有無に関わらず繊維の抜け落ちはなく、良好な加工面が得られることがわかった。 $\theta = 0^\circ$  部分の場合、慣用研削では繊維の抜け落ちによって、加工面上に加工されていない繊維が観察された。一方、超音波振動援用研削では繊維の抜け落ちはなく、比較的平坦な面が得られた。

これらの現象は炭素繊維のせん断強度が方向によって変化することが関係していると考えられる。炭素繊維は繊維長さ方向のせん断強度は高いが、繊維直角方向のせん断強度は著しく低いため、主に直角方向の力によるせん断破壊で加工される<sup>8)</sup>。つまり、繊維直角方向に作用する力が炭素繊維の加工においては重要な因子となる。 $\theta = 90^\circ$  部分においては、工具回転による研削力が繊維直角方向に加わることになる。そのため、超音波振動の有無に関わらず炭素繊維が容易に

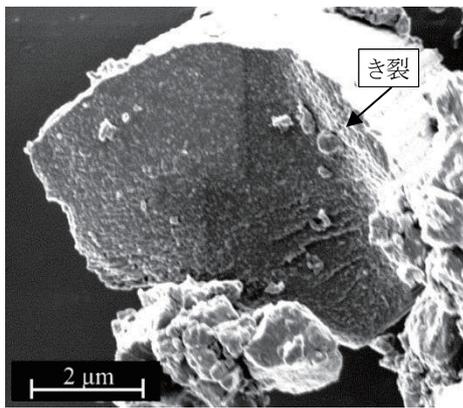
破壊され、良好な加工面が得られたと考えられる。一方、 $\theta = 0^\circ$  部分においては研削方向が繊維長さ方向と一致することになる。慣用研削では研削力のみで加工を行うため、繊維直角方向にほとんど力が作用しない。そのため繊維が十分に加工されず、抜け落ちてしまったと考えられる。一方超音波振動援用研削では、工具軸方向の超音波振動によって繊維に直角方向の衝撃力が周期的に作用することになる。そのため繊維が容易に破壊され、除去することができたと考えられる。

### 3. 3 溝エッジの観察

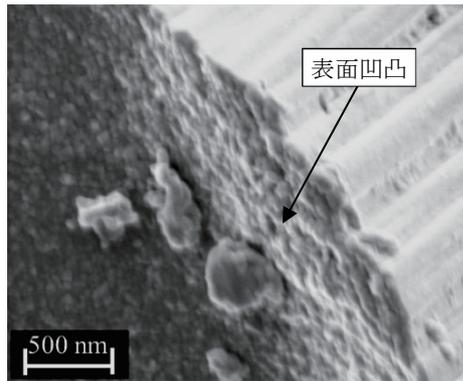
図 6 は慣用研削、超音波振動援用研削で加工した後の溝のエッジを繊維角度毎に観察した SEM 画像である。まず、慣用研削においては材料剥離によるエッジ破壊が発生していた。剥離形態が繊維角度毎に特徴があることから、エッジの破壊は炭素繊維に起因するものと考えられる。そして、超音波振動を付加するとこのような剥離が低減されることがわかった。そこで、超音波振動の影響について詳細な検討を行うために、まず炭素繊維の破断面の観察を行い、繊維の破断メカニズムについて考察を行った。

図 7 は超音波振動援用研削を行った際の切りくずの破断面の SEM 画像である。炭素繊維の表面付近に一箇所のき裂が観察できるが、他の箇所は平坦な表面になっている。平坦な表面は脆性破壊面に表れる特徴である。また図 7(b)より、き裂表面は平坦ではなく、凹凸があることがわかる。つまり、き裂は一気に発生したのではなく、繰り返し衝撃を受けて徐々に進展していったと考えられる。したがって炭素繊維の破断メカニズムは、繰り返し衝撃によって進展したき裂が応力集中源となり、脆性破壊することで一気に破断に至るものと考えられる。そして、繰り返し衝撃によるき裂発生が繊維破壊において重要な因子であるといえる。

以上の炭素繊維破断メカニズムに基づいて、超音波振動の効果について考察する。CFRPの溝加工における繊維破壊は、図 8 のように考えられる。前述したように炭素繊維は繊維長さ方向のせん断強度が高いため、研削方向が繊維長さ方向と一致する箇所では繊維の加工は困難である。そのため、



(a) 炭素繊維の破断面



(b) き裂部の拡大画像

図 7 炭素繊維切りくずの SEM 画像

慣用研削において、図 8(a)の矢印で示したような領域では繊維はうまく加工されずに大きく変形する。この変形の蓄積によって、溝エッジ部分で剥離を起こしたと考えられる。一方超音波振動援用研削では、図 8(b)のように、研削方向と繊維長さ方向が一致する箇所においても、工具軸方向の振動によって個々の砥粒から繊維直角方向に衝撃が作用する。また、振動が高周波であるため多くの繰り返し衝撃が繊維に作用し、き裂の発生と進展が促されることで繊維が加工される。具体的に、本実験条件では、工具を炭素繊維 1 本分送る間に約 128 回振動するため、繊維はそれだけの砥粒による繰り返し衝撃を受けていたことになる。したがって超音波振動援用研削では、繊維に変形の蓄積が生じることなく加工がなされ、エッジの剥離が防止できたと考えられる。

### 3.4 溝底面の観察

図 9 は慣用研削、超音波振動援用研削によって加工を行った後の溝底面の SEM 画像である。慣用研削においては繊維の抜け落ちが見られているのに対し、超音波振動援用研削においては繊維が抜け落ちずに加工されている様子が観察できる。超音波振動を付加すると工具が溝の底面側に周期的に衝撃力を与えるため、繊維が細かく加工されたと考えられる。

### 3.5 研削抵抗

図 10 に慣用研削と超音波振動援用研削において、それぞれ 60mm 溝加工を行った際の送り方向の研削抵抗を測定した結果を示す。慣用研削においては加工初期から研削抵抗が徐々に上がり始め、8mm 加工したあたりから研削抵抗が急

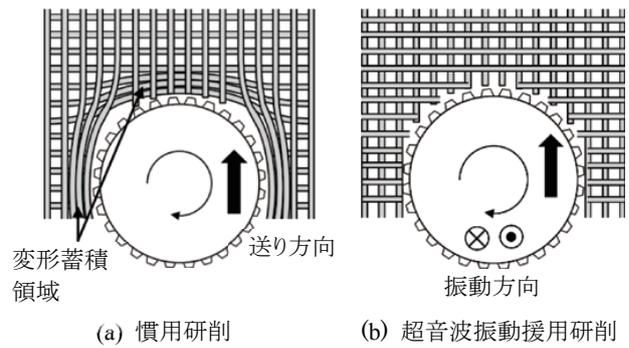
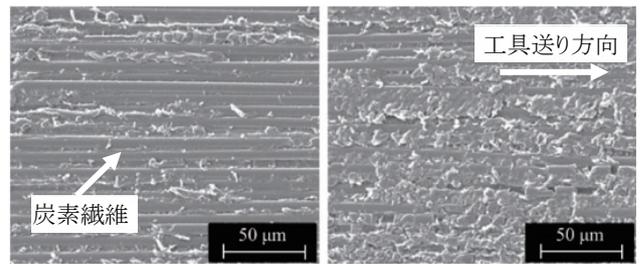


図 8 CFRP の溝加工における繊維破断モデル



(a) 慣用研削 (b) 超音波振動援用研削

図 9 溝底面 SEM 画像

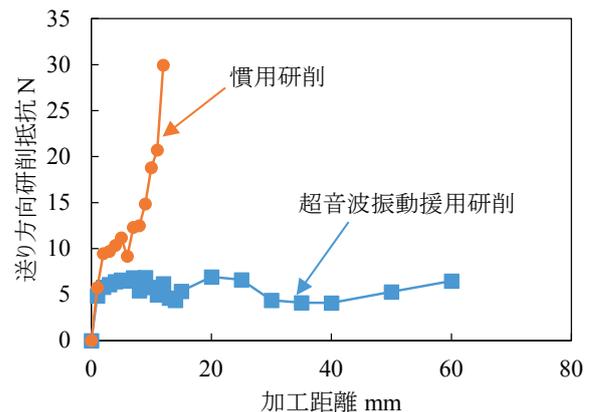


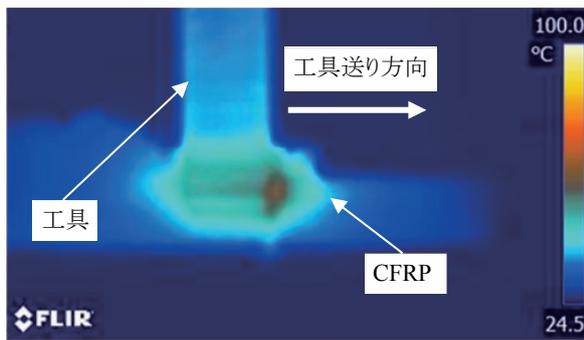
図 10 超音波振動有無による研削抵抗変化

上昇した。そして 12mm 以上は、過大な研削抵抗が工具のたわみを引き起こすために加工を中断した。研削抵抗の急増は工具の目づまりが原因であると考えられる。前述したように慣用研削においては目づまりが発生しやすく、目づまりが起ると図 3 のように砥粒の突出しがなくなっていく。そのため砥粒による切削が困難になり、研削抵抗が上昇してしまったと考えられる。一方、超音波振動援用研削においては慣用研削の 5 倍加工が進行しても研削抵抗が上昇することなく、安定して加工がなされた。これは、超音波振動によって工具目づまりが抑制され、砥粒による切削が安定して行われたためであると考えられる。

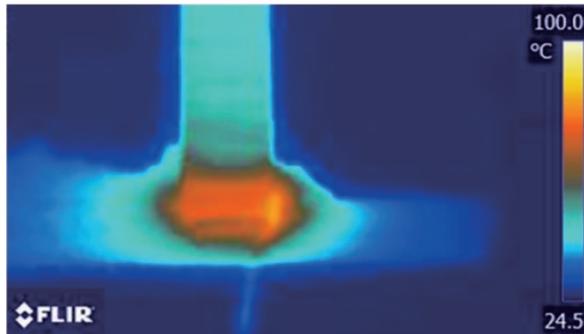
### 3.6 加工点温度

#### 3.6.1 送り速度の影響

図 11 は慣用研削において送り速度 0.1mm/s、0.3mm/s で側面加工した際のサーモグラフィ画像である。図 11 より、送り速度が大きい方が高い温度となっていることがわかる。これは、送りを大きくしたことによって工具一回転あたりに除去される

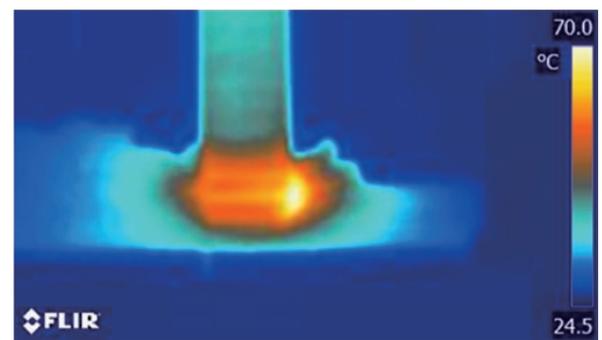


(a) 送り速度 0.1mm/s

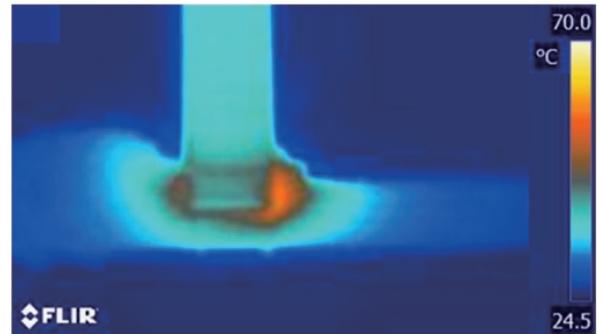


(b) 送り速度 0.3mm/s

図 11 温度分布における送り速度の影響



(a) 慣用研削



(b) 超音波振動援用研削

図 12 温度分布における超音波振動有無の影響

材料の体積が増え、加工による発熱量が増加したためであると考えられる。

### 3. 6. 2 超音波振動の効果

図 12 は慣用研削、超音波振動援用研削によって側面加工した際のサーモグラフィ画像、図 13 は加工点の温度変化をプロットした結果である。図 12 では、温度変化を見やすくするために図 11 とは異なる温度スケールを用いている。図 12, 13 より超音波振動付加によって加工点温度が低下していることがわかった。超音波振動を付加すると砥粒切削長さの増加に伴い、切削断面積が減少することが報告されている<sup>9)</sup>。また、切削断面積の減少によって研削抵抗も低減するため、その分加工時に被削材に与える負荷が減少する。そして、加工時の被削材への負荷は材料表面の塑性変形を引き起こす要因となり、加工熱の発生につながる。以上より、超音波振動を付加したことで研削抵抗が低減し、被削材の塑性変形量が減少したことで加工温度の上昇を抑えることができたと考えられる。

ここで切削断面積の減少についてより詳細な検討を行う。超音波振動援用研削では振動によって砥粒の切削距離が長くなりその分切削断面積が減少するが、その切削長さ  $l_g$  ならびに切削断面積の減少率  $\eta$  は野村らの報告によると、次のように算出できる<sup>9)</sup>。

$$l_g = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{2A\pi f}{V_g} \cos \frac{2\pi f}{V_g} x\right)^2} dx \quad (1)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{l}{l_g}\right) \times 100 \quad (2)$$

$A$  は振幅、 $f$  は周波数、 $V_g$  は工具回転方向の砥粒速度であり、積分区間は  $[0, l]$  としている。また、超音波振動なしの時は  $l_g = l$  となる。ここで  $l = V_g / f$  とし、式(2)を用いて減少率  $\eta$  を数値計算によって求めた結果、 $\eta = 7.5$  となった。つまり、超音波振動を付加することで切削断面積が 7.5% 減少していることがわかった。

また、切削断面積が減少した分だけ研削抵抗も低減することが知られているため<sup>9)</sup>、切削断面積の減少率と研削抵抗の低減率の比較を行った。図 14 は側面加工時の送り方向の研削抵抗を測定した結果である。加工初期において低減率が 9% となっており、切削断面積の減少率と近い値になることがわかった。このように切削断面積が小さくなった分だけ研削抵抗が低減したという結果から、切削断面積の減少が加工に確かな影響を与えていることが確認できた。

また、慣用研削において加工点温度は徐々に上昇していく傾向にあるが、超音波振動援用研削では温度上昇が抑制されている。研削抵抗についても同様の傾向があることから、研削抵抗の上昇が加工点温度を高くした要因であるといえる。つまり研削抵抗が大きくなったことで被削材の塑性変形量も多くなり、加工時の発熱量が増加したと考えられる。

### 3. 7 形状測定

図 15, 16 に超音波振動援用研削によって加工を行った溝とその断面プロフィールを示す。慣用研削では工具目づまりによって加工の進行が困難であったが、超音波振動援用研削では持続的な加工を行うことができた。また溝エッジの層間剥離が全く見られず、高精度の断面プロフィールを得ることができ、本提案手法の有効性が確認できた。

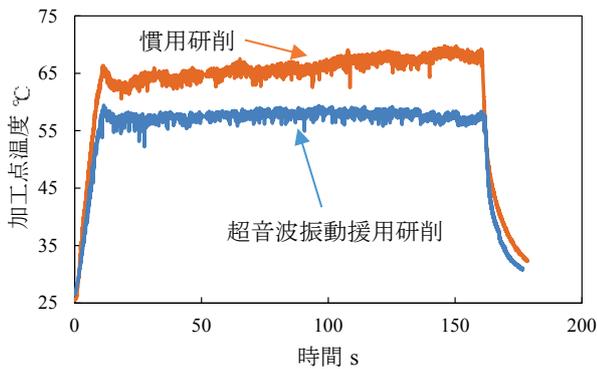


図 13 温度測定

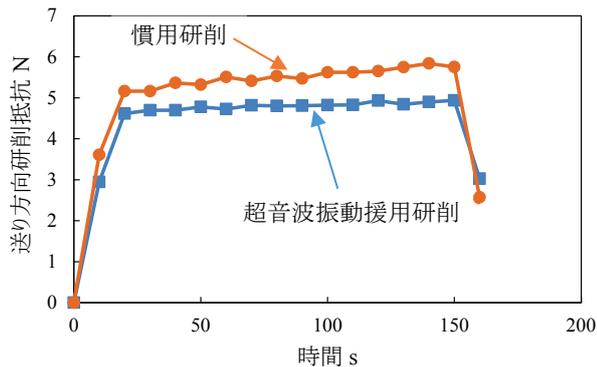


図 14 研削抵抗

#### 4. 結言

CFRP に対して超音波振動援用研削による溝加工を試みた。慣用研削と比較することによって、超音波振動の効果について以下の結論を得た。

- 1) 工具端面および側面の目づまりを抑制できる。
- 2) 溝側面においては、振動による衝撃力が炭素繊維の直角方向に作用することで、繊維の抜け落ちが減少する。
- 3) 繊維変形の蓄積が生じることなく繊維が加工されることで、溝エッジ部分の層間剥離を低減することができる。
- 4) 溝底面においては、工具振動による衝撃の影響で繊維が細かく加工される。
- 5) 慣用研削では研削抵抗が急上昇するが、超音波振動を加えることで研削抵抗の上昇を抑えることができる。
- 6) 切削断面積が減少することで加工における発熱量が少なくなり、加工点温度を低下させることができる。

#### 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。ここに謝意を表します。

#### 5. 参考文献

- 1) W.L.Cong, Z.J.Pei and C.Treadwell: Preliminary study on rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks, *Ultrasonics*, 54, 6, (2014) 1594.
- 2) F.D.Ning, W.L.Cong, Z.J.Pei and C.Treadwell: Rotary ultrasonic machining of CFRP: A comparison with grinding, *Ultrasonics*, 66, (2016) 125.
- 3) D.Iliescu, D.Gehin, M.E.Gutierrez and F.Girot: Modeling and tool wear in drilling of CFRP, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 2, (2010) 204.

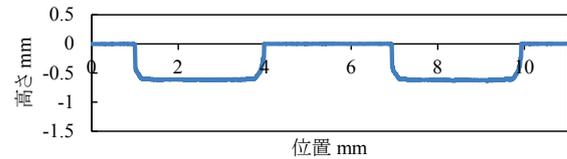
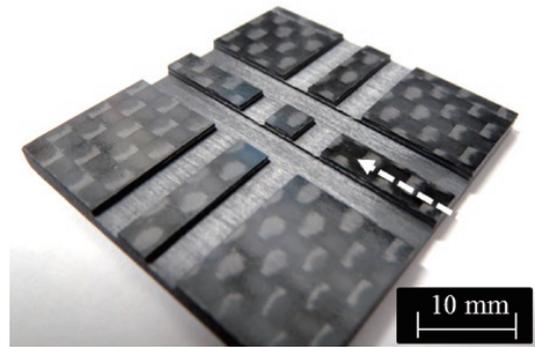


図 15 超音波振動援用研削後の交差溝断面プロフィール

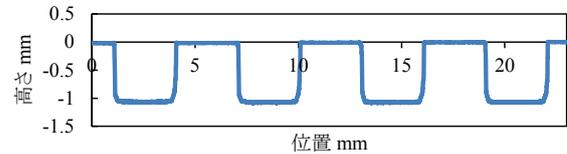
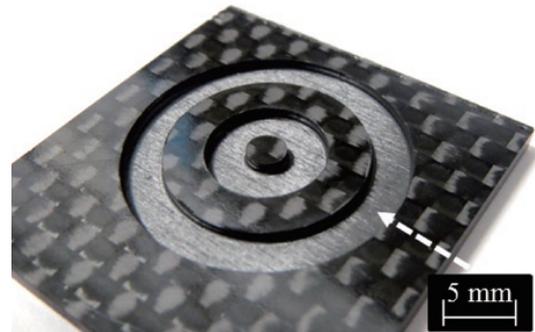


図 16 超音波振動援用研削後の同心円溝断面プロフィール

- 4) J.P.Davim and P.Reis: Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures*, 59, 4, (2003) 481.
- 5) T.Yamasaki and J.Yan: High-precision drilling of CFRP by ultrasonic vibration-assisted grinding, *Journal of the Japan Society for Grinding Engineers*, 59, 12, (2015) 699 (in Japanese).
- 6) 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.
- 7) V.P.Vavilov: Dynamic thermal tomography: Recent improvements and applications, *NDT&E international*, 71, (2015) 23.
- 8) S.Hanasaki and M.Nomura: Analysis of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Cutting Mechanism by Finite-Element Method (Fracture Behavior of Fiber at Entry of Cutting), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 61, 583, (1995) 1163 (in Japanese).
- 9) M.Nomura, Y.Wu, M.Kato, T.Tachibana and T.Kuriyagawa: Study of internal ultrasonic vibration assisted grinding of small bore -Mechanism of grinding force reduction due to ultrasonic vibration-, *Journal of the Japan Society for Grinding Engineers*, 49, 12, (2005) 691 (in Japanese).