湿式条件での超硬エンドミルによる CFRP の切削加工特性に関する研究*

日 開 野 輔** 青 山 藤 詞 郎** 小 川 仁***

Study on End Milling of CFRP with Coolant and Cemented Carbide End Mill

Tasuku HIGAINO, Tojiro AOYAMA and Hitoshi OGAWA

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) is a composite material with strong anisotropy. Direction of carbon fibers influences tool life and surface integrity, machining accuracy. In this study, side milling tests are carried out with coolant and uncoated cemented carbide end mill. Cutting force, cutting temperature, surface integrity and tool wear are examined and the influences of using coolant and carbon fiber direction are analyzed. Under wet condition, the occurrence of burrs is suppressed and the surface integrity improves. It is also found that there is no significant difference on tool wear between dry condition and wet condition. Tool wear milled the layer that carbon fiber direction is perpendicular to feed direction is almost equal to the layer that carbon fiber direction is parallel to feed direction. The cutting temperature on wet condition is lower than that on dry condition. Carbon fiber direction and coolant change magnitude of cutting force. The condition that carbon fiber direction is perpendicular to feed direction on down milling presents the lower cutting forces.

Key words: CFRP, wet machining, end mill, fiber direction, cutting force, tool wear

1. 緒 言

航空機や自動車用部材として炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP)が注目されている。CFRP は軽量かつ比強度の優れた材料特性を有しており、輸送機の燃費向上に果たす役割は大きい。また、その優れた材料特性から、輸送機以外の一般産業部品にも用途は広がっており、特に、電子基板やガラス等の搬送装置においては、機械装置の軽量化と共に搬送時の振動抑制にも効果を示すことから、従来のアルミニウム合金や鉄鋼材料からの転換が進んでいる。

一般的に CFRP 部品は切削や研削等の機械加工により所定の形状に仕上げる事が多い。しかし、高強度である炭素繊維の切断では短い工具寿命が課題となっている。また、炭素繊維の抜け・脱落、層間剥離等の不良は加工面性状や寸法精度を悪化させ、さらに、炭素繊維の切残しやバリは、その後手作業による修正を必要とするなど能率においても課題を残している。これら CFRP の機械加工における課題の多くは、素材特有の異方特性に起因したものであると考えられる。炭素繊維とマトリクス樹脂の複合材料である CFRP は、繊維方向によって強度や熱伝導性が異なり、本特性が機械加工時の工具摩耗の偏りや加工不良の要因になると考えられる。

一方、CFRP の切削加工に関する研究としては、二次元切削等の基礎的な研究から、穴あけ加工やエンドミル側面切削等の各種機械加工まで広く研究が行われているが、乾式加工による研究がほとんどである^{1)~6)}。乾式加工では加工時には炭素繊維

の粉塵が発生し、作業員への対策のほか、炭素繊維は導電性を有しているため工作機械電気系統への悪影響が懸念される。湿式加工を適用できれば、炭素繊維の粉塵の発生も抑えられ、作業員や工作機械への悪影響も軽減される。CFRP を湿式で加工する場合の問題点としては、切りくずが切削油剤の槽内で沈殿するため後処理が困難とも考えられるが、研削加工と同様にフィルタ等を用いた後処理方法を適応することで解決可能である。この他、マトリクス樹脂の吸湿劣化などが考えられるが、既に、ウォータージェット加工によるトリミング加工や研究も行われており、機械加工程度の時間であればその影響は少ないと考えられる^{7)~9)}。特に、CFRP は薄いプリプレグ材等を積層して成形されるため、材料の厚さが薄いものも多く、加工時間の長い曲面加工などが少なく、穴あけ加工や輪郭加工、トリミング加工がほとんどであるため、多くの場合、加工時間が短い。

そこで、本研究では予め炭素繊維の種類や積層構造が明らかな CFRP を用い、湿式のエンドミル側面切削加工を行い、乾式加工との比較し、加工条件や繊維方向の違いなどが加工面性状や工具寿命に及ぼす影響について検討した。

2. 冷却油剤の使用による効果

2.1 実験方法及び条件

切削加工への冷却油剤を用いた湿式加工の適用は、冷却性や潤滑性が向上するため、工具寿命や加工面性状を改善できる。CFRP の切削加工において、高い安全性や信頼性を要求される航空機産業向け製品では、湿式加工時に受ける材料の吸湿劣化が懸念されるため乾式加工が主となっている。しかし、一般産業機械等で切削加工時間が短い製品であれば、必ずしも乾式加工で行う必要がなく、湿式加工を適用できると考えられ、工具寿命や加工面性状の改善効果が期待できる。そこで、CFRP の切削加工への湿式加工適用による加工面性状や工具寿命改善効果を乾式加工と比較検討した。

* 原稿受付 平成 26 年 1 月 21 日

掲載決定 平成 26 年 11 月 27 日

** 正 会 員 慶應義塾大学大学院 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

*** 正 会 員 徳島県立工業技術センター (徳島県徳島市雑賀町西開 11-2)

Table 1 Material property of prepreg sheet

Tensile strength of carbon fiber	GPa	4.9
Elastic modulus of carbon fiber	GPa	230
Density of carbon fiber	kg/m ³	1800
Thickness	mm	0.12
Resin content	wt%	24
Resin		Epoxy

Fig.1 Setup for experiment

Table 2 Machining condition upon changing coolant

Workpiece material	Carbon Fiber Reinforced Plastics
Cutting tool	Uncoated cemented carbide end mill
Cutting speed	m/min
Feed	mm/tooth
Radial depth of cut	mm
Axial depth of cut	mm
Tool diameter	mm
Number of flute	
Helix angle	degree
Cutting direction	Down milling
Coolant	Dry, Wet

Fig.2 Measurement of cutting temperature

本研究の切削加工実験で使用する CFRP をオートクレーブ法により成形した。表 1 に示すとおりプリプレグを用い、一方方向繊維からなるプリプレグを所定の板厚と積層構造になるように積層し、真空バッキングした後オートクレーブにて成形圧を 0.4MPa とし、130℃で 2 時間加熱した。なお、CFRP の積層は、20 枚のプリプレグを一塊とし、それを 90°配列を変えた 4 層とした。成形後の板厚は 8.2mm となり、2.05mm 間隔で積層構造が変化する。

切削油剤の有無による加工特性の違いを把握するために、エンドミル側面切削試験において、乾式加工と湿式加工の比較を行った。乾式加工はエアブローとし、湿式加工はエマルジョンタイプの水溶性切削油剤を用いた。エアブローの供給圧力は 0.5MPa、水溶性切削油剤(20%希釈)の流量は 6.4 ℓ/min とし、工具および切削面に供給した。実験の概要と加工条件をそれぞれ図 1 および表 2 に示すとおりとし、切削方向は、これまでの研究¹⁰⁾からバリの発生が少ないダウンカットとした。幅 50mm の側面切削を 1 パスとし、切削距離が 10m に達するまで繰り返し加工した。被削材は 3 成分動力計に取付け、冷却方法の違いによる切削抵抗と切削温度、工具損傷、加工面性状について評

Fig.3 Behavior of cutting force (Cutting length: 2m)

Fig.4 Comparison of cutting force

Fig.5 Appearance of burrs

価した。加工面性状については、切削距離 2m 加工するごとに被削材を切断し、加工面性状を観察した。被削材厚さ方向の断面形状を測定した。ここで、工具送り方向と繊維方向が平行な場合を 0°と定義した。

また、乾式加工と湿式加工では切削加工中の温度に違いがあり、これが切削加工特性に影響を与えると考えられるため、切削加工中の被削材の温度測定を試みた。図 2 に示すとおり K 熱電対を挿入した被削材を別途作成した。CFRP の熱伝導率は異方性があり、炭素繊維の方向により異なるため、繊維方向が 0°層と 90°層のそれぞれの層に熱電対を配置した。加工条件は表 2 に示すとおりとし、CFRP のエンドミル側面切削加工を行い、切削距離 0.1m(2 パス目)加工時に、熱電対先端をエンドミル刃先が通過したときの温度を測定した。

2.2 実験結果および考察

図 3 に切削距離 2m 時の切削抵抗の各分力を示す。切削中は切削抵抗値が安定して推移している。径方向分力が他の分力に比べ最も高い値を示し、乾式加工よりも湿式加工における径方向分力が低い。送り方向分力および軸方向分力においても、乾

Fig.6 Appearance of finished surface

Fig.7 Profile of finished surface

式加工よりも湿式加工の抵抗値が低く、切削油剤の使用は、切削抵抗低減の効果が認められる。ここで切削抵抗値の切削距離の変化に伴う変化を示すために、切削距離ごとの各分力平均値を図4に示す。乾式加工および湿式加工の両条件において、切削距離の増加とともに切削抵抗が増加しており、工具摩耗が進行したものと考えられる。

図5に切削距離2m加工後と10m加工後の加工開始部付近のバリの発生の様子を示す。切削距離2mおよび10m加工後の両被削材において、乾式加工では繊維方向が90°の層にバリの発生が認められるが、湿式加工ではその発生が認められない。切削距離2m加工後よりも10m加工後のバリが大きく、工具摩耗が進行したためと考えられる。乾式加工では、加工熱によりマトリクス樹脂の弾性率が低下し、炭素繊維を保持する力が炭素繊維をせん断する力より小さくなったことにより、バリが発生したと考えられる。逆に湿式加工では、冷却油剤の使用により

Fig.8 Tool wear on dry milling and wet milling (Cutting length: 10m)

加工熱によるマトリクス樹脂の弾性率の低下が起こらず、炭素繊維の保持力が低下しなかったためにバリの発生が抑えられたと考えられる。

切削距離2mおよび10m加工後の仕上げ面の拡大図を図6に示す。繊維方向0°層において、切削距離2mで、乾式加工の場合、表面に切りくずの付着が見られる。マトリクス樹脂が切削された後、再付着したものと考えられる。一方、湿式加工においては、切りくずの付着は見られない。切削油剤の洗浄効果によって再付着が防止され加工面性状が良好に保たれたと考えられる。また、炭素繊維間もマトリクス樹脂が満たされており、乾式加工に比べ、良好な加工面が得られている。切削距離が10mになると、乾式加工および湿式加工の両方で、炭素繊維の脱落が認められた。切りくずの付着状況や、炭素繊維間のマトリクス樹脂の充満状況の傾向は、切削距離2m加工後の仕上げ面と同様であった。

繊維方向90°層においては、切りくずの付着状況は0°層と同様に、切削距離によらず、乾式加工の条件で認められ、湿式加工においてより平滑な面が得られている。切削距離10mでの加工面性状は2m加工時に比べ、加工面性状が悪化しており、窪みも見られる。これは乾式加工および湿式加工の両条件で確認できる。切削距離の増加とともに工具摩耗が進行したことに起因すると考えられる。図7に切削距離2mおよび10m加工後の被削材厚さ方向の断面曲線を示す。被削材繊維方向によって仕上げ面の粗さや凹凸の状況が異なる。乾式加工において、切削距離2mの断面曲線では、繊維方向の異なる層間に粗さの違い

Fig.9 Flank profile of tool (Cutting length: 10m)

Fig.10 Chip shape on dry milling and wet milling

Fig.11 Cutting temperature of workpiece

が認められるが、凹凸の差は少ない。しかし、切削距離 10m の断面曲線では、繊維方向が異なる層間の凹凸が切削距離 2m でのそれよりも大きく、繊維方向が 0°層が 90°層より約 30~60μm 低い。工具摩耗の進行に伴い、せん断能力が低下し、炭素繊維がせん断されずに引き剥がされたためと考えられる。湿式加工では、切削距離 2m 時から繊維方向 0°層が 90°層より突出している。0°層は工具径方向分力に対して、弾性率が低い方向であり被削材の弾性変形が発生したためと考えられる。さらに、一方向材の CFRP の熱膨張率は、繊維方向には、0 に近い値であるが、繊維方向に垂直な方向には、マトリクス樹脂の熱膨張が発生する。乾式加工では加工熱によりマトリクス樹脂の熱膨張が 0°層においてのみ発生したため、乾式加工と湿式加工では逆の凹凸形状が現れたと考えられる。切削距離 10m の断面曲線に

Fig.12 Setup for experiment

Table 3 Machining condition (Comparison of cutting force)

Workpiece material	Carbon Fiber Reinforced Plastics
Carbon fiber direction degree	0, 90
Cutting tool	Uncoated cemented carbide end mill
Cutting speed	m/min
Feed	mm/tooth
Radial depth of cut	mm
Axial depth of cut	mm
Tool diameter	mm
Number of flute	
Helix angle	degree
Cutting direction	Down milling
Coolant	Dry, Wet

において、湿式加工での凹凸形状の傾向は切削距離 2m 時と同様であり、繊維方向 0°層と 90°層との段差は拡大していない。湿式加工では冷却油剤の使用により温度上昇が抑えられたためと考えられる。図 8 は切削距離 10m 加工後の工具逃げ面およびすくい面の摩耗の様子である。未使用部との比較から、工具が摩耗し、刃先の後退が見られる。工具刃先の拡大図からは、乾式加工と湿式加工との工具摩耗の差は見られない。図 9 は、図 8 に示した工具の逃げ面の輪郭形状の測定結果である。刃先未使用部との比較から工具径方向の逃げ面の摩耗が確認できるが、乾式加工と湿式加工との差、繊維方向による差は認められない。切削距離 0.1m 時および 10m 時の切りくずの拡大図を図 10 に示す。切削距離 0.1m 時には、500μm 以上の切りくずが乾式加工および湿式加工の両条件で確認できる。切削距離 10m 時には切削距離 0.1m 時に比べ、切りくずの大きさが小さくなっている。工具摩耗が進行し、刃先が切りくずをすくい上げる角度が大きくなったために切りくずが小さく分断されたと考えられる。また、切りくずには、マトリクス樹脂から脱落した炭素繊維も確認でき、工具摩耗によりせん断能力が低下し、炭素繊維の引き剥がしが発生したと考えられる。

図 11 に切削加工中の温度測定結果を示す。乾式加工では、繊維方向 0°層と 90°層における温度の最大値はそれぞれ 38.3°C と 48.5°C であった。一方、湿式加工では、繊維方向 0°層と 90°層における温度の最大値はそれぞれ 25.1°C と 27.7°C であった。冷却油剤の使用による切削温度上昇の抑制効果が認められる。湿式加工では、温度上昇が 5°C 程度であり、被削材の熱膨張がほとんど発生していないと考えられる。乾式加工においては加工による温度上昇が認められるが、樹脂の温度は軟化点まで達しておらず、樹脂の軟化が加工面性状や工具寿命に与える影響は少ないと考えられる。繊維方向による影響も認められ、0°層よりも 90°層の温度が高い。繊維方向 90°層では、炭素繊維の方向と工具刃先の進行方向が直角に近いため、炭素繊維をせん断するが、0°層では、炭素繊維の方向と工具刃先の方向が平行に近く、炭素繊維の引き剥がしが発生しやすいため、90°層が 0°層よりも温度が高い結果となったと考えられる。また、切削温

Fig.13 Behavior of cutting force upon changing carbon fiber direction and coolant (Cutting length: 0.1m)

度は乾式加工でも最大 48.5°C であり、工具に損傷を与える高温に達していない。さらに、図 8 に示した工具摩耗について、乾式加工と湿式加工との差が認められないことから、工具摩耗は炭素繊維によるアブレシブ性が主因と考えられる。

3. 繊維方向が切削抵抗に及ぼす影響

3.1 実験方法及び条件

CFRP 被削材加工面の断面形状において、繊維方向が 0° と 90° の層間に段差が生じることが確認された。また、冷却油剤の使用の有無によっても、表面形状に差異が見られた。これは工具摩耗や繊維方向による影響と考えられるが、工具刃先の逃げ面摩耗の評価では、その要因が不明確であった。CFRP の切削現象は、繊維方向によって異なる¹¹⁾ため、図 12 に示すとおり繊維方向 0° 層および 90° 層の単一繊維方向の被削材の側面切削試験を行った。乾式加工と湿式加工との比較を行い繊維方向が切削抵抗に与える影響について調査した。被削材の厚さは 2.0mm で幅 50mm である。加工条件は表 3 に示すとおりとし、乾式加工ではエアブローを行い、その供給圧力は 0.5MPa とした。湿式加工では、水溶性切削油剤(20%希釈)を用い、その流量は 6.4 l/min とし、工具および切削面に供給した。

3.2 実験結果および考察

繊維方向が 0° および 90° の被削材での切削抵抗の 3 分力を図 13 に示す。送り方向分力に現れている切削加工前後の急激な切削抵抗の変化は、工作機械の動作によるものである。乾式加工において、 0° の場合は径方向分力が他の 2 分力に比べ高い。刃先の進行方向が繊維方向と平行に近くなるため、刃先が食いつきにくいと考えられる。送り方向分力については、刃先が隣り合う炭素繊維の間に入り、炭素繊維同士を引き剥がす現象が発生しやすいため径方向分力よりも低いと考えられる。軸方向分力については、軸方向の被削材の弾性率が低いため、切削抵抗が低い値を示したと考えられる。繊維方向 90° の被削材では、径方向分力が 0° に比べ低い。これは刃先の進行方向が炭素繊維方向に対し垂直に近く、繊維方向 0° の被削材に比べ、刃先が食いつき易いためと考えられる。 90° の被削材の送り方向および軸方向分力については、 0° の被削材よりも切削抵抗が高く、弾性率が高い方向であるためと考えられる。繊維方向が 0° の被削材において、乾式加工よりも湿式加工での径方向分力が低い。繊維方向が 90° の被削材における径方向分力についても同様の傾

Fig.14 Chip shape upon changing carbon fiber direction and coolant (Cutting length: 0.1m)

向である。繊維方向 0° と 90° の両被削材における送り方向分力と軸方向分力には、湿式加工の適用による切削抵抗低減の効果はほとんど見られない。また、切りくずの拡大図を図 14 に示す。繊維方向が 0° の被削材では、切断されていない炭素繊維が認められる。繊維方向が 90° の被削材と比較すると、切りくずが大きい。これは、繊維方向が 0° の場合は炭素繊維が送り方向と平行であり、切りくずに含まれる炭素繊維が切りくずの変形を抑えるためと考えられる。繊維方向が 0° の被削材において、図 14 右列の詳細な拡大図にも、炭素繊維が確認できるが、繊維方向が整列しておらず、引き剥がされた炭素繊維が切りくずに再付着したと考えられる。繊維方向 90° の被削材では、乾式加工および湿式加工の両条件において、分断されていない炭素繊維が認められない。刃先の進行方向と炭素繊維の方向が、直角に近く、刃先が食いつき易いためと考えられる。図 14 右列の詳細な拡大図においても、切りくず表面に繊維状の炭素繊維は認められず、炭素繊維の引き剥がしや脱落が発生せず、切れ刃により炭素繊維が切断されていることが確認できる。

4. 結 言

CFRP のエンドミル側面切削に水溶性切削油剤を用いた湿式加工を適応し、繊維方向や加工条件が加工面性状や工具摩耗に

与える影響について検討し、以下のことが明らかになった。

- (1) 湿式加工では乾式加工に比べ、バリの発生が抑制され、加工面性状を改善できる。
- (2) 切削距離 10m において乾式加工と湿式加工との工具摩耗量の違いが見られない。
- (3) 湿式加工では、加工面の 0°層と 90°層の境界に、段差が生じるが、切削距離の進行に伴う変化は乾式加工より小さい。
- (4) 湿式加工よりも乾式加工における切削加工温度が高く、0°層よりも 90°層の繊維方向において高い。
- (5) 繊維方向が単一の材料での切削加工試験では、繊維方向が 90°の被削材より 0°の被削材の切削抵抗が高く、乾式加工よりも湿式加工時の切削抵抗が小さい。
- (6) 繊維方向が単一の材料の切削加工試験では、繊維方向が 0°の被削材では、工具摩耗が進行していない加工初期段階から切りくず中に切断されていない炭素繊維が認められる。

参 考 文 献

- 1) A. Koplev, Aa. Lystrup and T. Vorm: The cutting process, chip, and cutting forces in machining CFRP, *Composites*, **14**, 4, (1985), 374.
- 2) 金枝敏明, 高橋正行: CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の切削機構に関する研究 (第 1 報), *精密工学会誌*, **55**, 8 (1989), 1456.
- 3) Shigehiko Sakamoto and Hiroki Iwasa: Effect of cutting revolution speed on cutting temperature in helical milling of CFRP composite laminates, *Key Engineering Materials*, **523**, (2012), 58.
- 4) 坂本重彦, 東二町圭介: CFRP (炭素繊維強化プラスチック) のドリル加工に関する研究—油穴付きドリルによる高精度穴あけ加工における圧縮空気の供給効果—, 2008 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集 (2008), 59.
- 5) Wolfgang Hintze, Dirk Hartmann, Christoph Schütte: Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) — An experimental study, *Composites Science and Technology*, **71** (2011), 1719.
- 6) 稲葉俊文, 細川晃, 上田隆司, 古本達明, 田中隆太郎: CFRP のエンドミル加工—強ねじれエンドミルによる高品位加工—, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集 (2012), 169.
- 7) 大橋一仁, 前野隼人, 藤原良平, 窪田真一郎, 吉川満雄, 塚本真也: CFRP の研削特性に及ぼす加工雰囲気の影響 (水溶性クーラントおよび液体窒素供給の効果), *日本機械学会論文集 C 編*, **79**, 808 (2013), 5068.
- 8) 岡部洋二, 武田展雄: 吸湿による CFRP 弾性率変化の超音波伝播特性による評価, *日本機械学会論文集 A 編*, **64**, 620 (1998) 1023.
- 9) 加藤木秀章, 竹村兼一: 炭素繊維強化複合材料の曲げ試験及びクリープ特性に及ぼす吸水の影響, *日本複合材料学会誌*, **35**, 6 (2009) 233.
- 10) 日開野輔, 青山藤詞郎, 小川仁: 積層構造を考慮した CFRP のエンドミル加工特性, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 (2013) 73.
- 11) 深見修平, 森田昇, 山田茂, 高野登: CFRP 材料の高エネルギー・高精度加工法に関する研究第 1 報: CFRP 材料の 2 次元切削における工具形状の影響, *砥粒加工学会誌*, **56**, 8 (2012) 545.