

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630023

研究課題名(和文) 強ねじれエンドミルによる傾斜切削と発生ガス分析によるCFRPの高品位加工

研究課題名(英文) High-quality machining of CFRP by means of inclination milling with high helix end mill and in-process heat-induced gas monitoring

研究代表者

細川 晃 (HOSOKAWA, AKIRA)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：40199493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の高品位加工を実現することを目的として、高ねじれエンドミルによる傾斜切削法を提案している。強ねじれエンドミルでは刃先角が小さい鋭利な切れ刃による傾斜切削になるため、炭素繊維のはがれや層間剥離のない滑らかな加工面が得られ、切れ刃の摩耗も小さい。しかしながら、切削抵抗合力が試料を押し上げる方向に作用するため、試料上端面に毛羽立ちが発生する。そこで、切削抵抗の作用方向に試料(エンドミル)を傾ける“傾斜切削法”を提案し、良好な仕上げ面性状を維持したまま、毛羽立ちの低減に成功した。また、切削熱による樹脂の熱変質に起因する発生ガスの検知に臭気センサを用いて成功した。

研究成果の概要(英文)：Side milling tests of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) without coolant are carried out by DLC (Diamond-Like Carbon) and diamond coated carbide end mills. The surface integrity is evaluated in terms of 3D profiles of the machined surface, generation of fluffing, delamination and pull-out of the carbon fiber. The cutting force and tool wear with respect to the fiber orientation are also examined. The inclination milling with high helix angle end mill is proposed in which the end mill is tilted in such a way that the resultant cutting force acts parallel to feed direction. This unique approach enables to reduce tool wear and to improve surface integrity of machined surface of CFRP. Gases generated by thermal alteration of plastic in CFRP can be detected with an odor sensor.

研究分野：精密加工学

キーワード：CFRP エンドミル加工 強ねじれ角 DLCコーティング においセンサ デラミネーション 毛羽立ち
傾斜切削法

1. 研究開始当初の背景

CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は軽量・高強度・高弾性であることから航空機部品を中心として需要が拡大し、その機械加工の重要性が増加している。しかし、CFRPは高強度の炭素繊維と高温で収縮・変質しやすい樹脂からなる複合材料であるため工具摩耗が著しく、また、繊維の破壊・抜け、層間剥離等による損傷が部品の強度を損ねる原因となっている。そのため、CFRPの高効率・高品位加工技術の確立が急務となっている。

CFRPの切削加工については、現在はダイヤモンドコーティングのルータービットなどの特殊な工具を用いているが、コストが高く、また、高切削抵抗に起因する繊維の損傷や樹脂の熱変質を抑制できないのが現状である。

このような状況の下、(1)比較的安価な汎用的なエンドミルを用い；(2)工具への負荷が小さい新しい切削手法を開発し；(3)樹脂の熱変質を何らかの方法で検知・抑制することができれば、CFRPの高品位切削加工の高効率化が飛躍的に進むことが期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、CFRPの高効率・高品位加工を実現することを目的として、『強ねじれ角を有するエンドミルによる傾斜切削法』と『加工中に樹脂から発生する微量の気体を検知するガスセンシング法』を提案する。は常に鋭い切れ刃を維持するとともに切削抵抗の作用方向を制御して、いわば繊維を“スパッと切る”手法であり、は切削熱によって化学反応する際に樹脂から発生する種々のガスを検知して熱損傷(変質)のない加工面を得る方法である。具体的な研究目的は下記の通りである。

- (1) “強ねじれ角エンドミルによる傾斜切削法”の有効性を明らかにする。
- (2) 樹脂の加熱による発生ガスの高感度インプロセスセンシング技術を開発する。
- (3) 加工点温度と樹脂の変質形態の関連を明らかにし、高品位加工面を創成する。

3. 研究の方法

具体的な研究方法は以下の通りである。

(1) エンドミルのねじれ角が切削特性に及ぼす効果の解明

種々のねじれ角を有するエンドミルを用いて側面切削を行い、ねじれ角-加工条件(工具傾斜角、切削速度等)が切削抵抗の大きさ・方向・波形に及ぼす影響を詳細に検討する。

(2) 傾斜切削の有効性の検討

(1)の結果を元にCFRPの傾斜切削を行い加工条件が炭素繊維の剥がれ、毛羽立ち、層間剥離等に及ぼす影響を明確にし、これら損傷がCFRPの強度に及ぼす影響も明らかにする。

(3) 発生ガスのインプロセス測定

加工時に発生するガスをIn-situにて高感度で検知・分析するセンサを構築する。ここで、

測定する気体はCO₂、CO、NO_x、SO_x、H₂Sなどが考えられる。まずは、樹脂の変質と発生ガスとの関係を調べ、加工熱と熱損傷に密接に関連するガスを同定する。

(4) 加工面性状および加工変質層がCFRP強度に及ぼす影響の解明

切削加工面品位や樹脂の熱変質がCFRPの強度に及ぼす影響を引張り試験により明らかにし、最終的にはガスセンシングを用いた傾斜切削法の有効性を実証する。

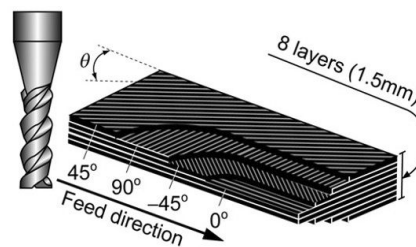
4. 研究成果

(1) CFRPの積層構造

本実験では熱硬化性のエポキシ樹脂を炭素繊維に浸透・硬化させた航空機用CFRPを使用する。図1にCFRP板材の積層構成を示す。本研究では送り方向と炭素繊維がなす角を繊維切削角 θ と定義する。使用したCFRPは積層毎に配向角(繊維切削角)を45°ずつ変化した擬似等方材料で、第4、5層を中心に上下対称の構造となっている。試料の切削方向長さは30 mm、厚みは1.5 mmである。

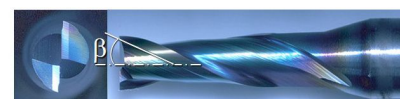
(2) 実験方法

本研究では超硬2枚刃エンドミルにダイヤモンド(DIA)とDLC(Diamond-Like Carbon)をコーティングしたものを使用する。図2に示すように、工具形状は汎用のねじれ角 $\beta=30^\circ$ と高ねじれの $\beta=60^\circ$ である。工具に施したコーティングの膜厚 t はDIAコーティングが10 μm 、DLCコーティングは0.1、0.3、0.5 μm の3種類である。図3に実験装置の概略図を示す。実験はCFRP板材の側面切削を行い、切削抵抗、3次元粗さ、SEM画像、毛羽立ちより加工特性を総合的に評価した。切削抵抗の測定には圧電式3分力センサ(KISTLER 9251A)を組み込んだ動力計を使用した。試料は金属板材で挟み込む2面拘束とし、突出し長さを極力小さくして切削による試料の振動の影

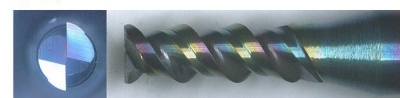


(b) Structure of CFRP plate

図1 CFRPの積層構造と繊維切削角



(a) $\beta=30^\circ$



(b) $\beta=60^\circ$

図2 エンドミル

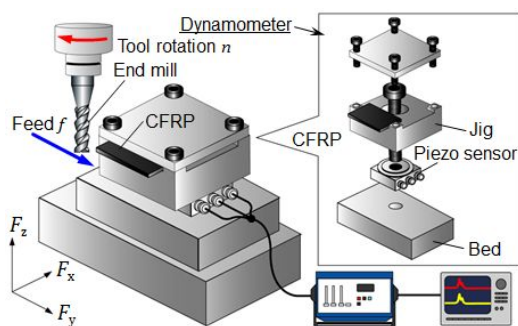


図3 実験装置

表1 実験条件

工作物 (ファイバ / 樹脂)	CFRP (T800S* / 3900-2B)	
切削工具	DLC, DIA (2-flute)	
径	d_t [mm]	4
ねじれ角	β [°]	30, 60
膜厚	t [μm]	DLC (0.1, 0.3, 0.5) DIA (10)
切削速度	v [m/min]	25 75
送り	f [mm/tooth]	0.025 0.010
傾斜角	ϕ_w [°]	18 - 38 10 - 30
半径方向切込み	a_p [mm]	0.25
切削形式	アップカット, 乾式	

* 航空機用熱硬化性CFRP

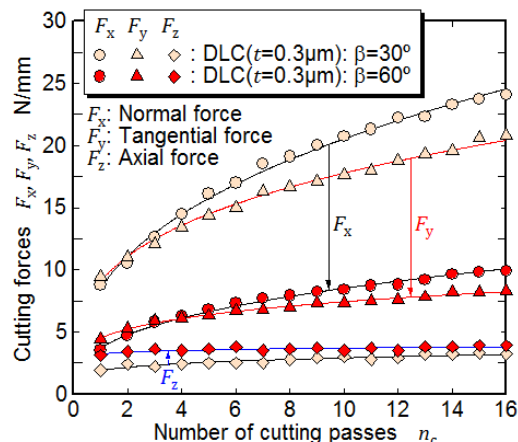


図4 ねじれ角と切削抵抗の関係

響を排除している．実験条件を表1に示す．

(3) 実験結果

切削抵抗

切削回数と切削抵抗の関係を図4に示す．図にみるように，ねじれ角 $\beta=30^\circ$ と比較して $\beta=60^\circ$ では切削抵抗接線分力 F_y と法線分力 F_x が大幅に減少し，切削回数に伴う切削抵抗の増加も抑制されていることがわかる．これは強ねじれによって実質刃先角が減少し，工作物へのくい付きが向上したためである．また，工作物と干渉する切れ刃長が増加し，摩耗が分散されたためと考えられる．しかしながら，軸方向分力 F_z は増加しており，最上面の毛羽立ち発生への影響が懸念される．

工具摩耗

図5に工具逃げ面摩耗の反射電子画像を示す．白色の部分が摩耗面で，超硬母材が露出

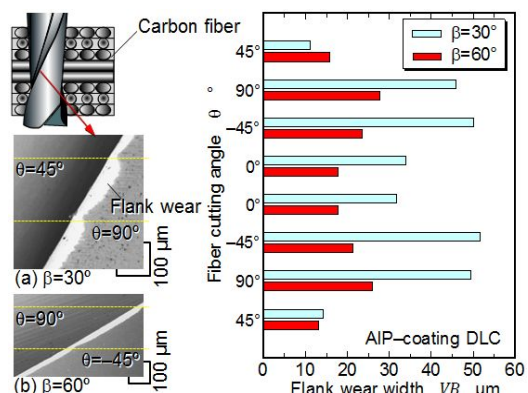


図5 実験装置

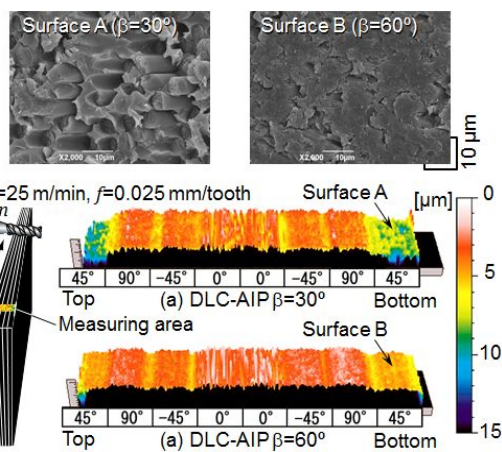


図6 仕上げ面性状

している．図より，逃げ面摩耗幅は炭素繊維の切削角に大きく依存していることがわかる．図の棒グラフは繊維切削角 θ と逃げ面摩耗幅 VB の関係を示したものであるが，すべての繊維切削角において，高ねじれエンドミル($\beta=60^\circ$)の摩耗幅が通常のもの($\beta=30^\circ$)に比べおよそ1/2に減少していることがわかる．繊維切削角の影響をみると， $\theta=90^\circ$ と $\theta=-45^\circ$ で逃げ面摩耗が大きくなっている．これは，切削時曲げられた後破損した炭素繊維が弾性回復して逃げ面をこすためである．

仕上げ面性状

図6に切削面の3次元粗さプロファイルを示す． $\beta=30^\circ$ では最上下層の繊維切削角 $\theta=45^\circ$ 層で繊維の抜け落ちによる凹みが多くみられる．これは $\theta=45^\circ$ では繊維を刃先がせん断できずに大きく曲げ変形させた後に切削面よりも深部で破断し，脱落するためだと考えられる．これに対し， $\beta=60^\circ$ では最下層の繊維の抜け落ちが減少しており，強ねじれ角による裁断性の高さを示している．図に示したSEM画像をみると両者の差は歴然としており， $\beta=30^\circ$ では繊維の抜けが観測されるのに対し， $\beta=60^\circ$ では極めて平滑な加工面となっている．

一方，内部の凹凸を比較すると， $\beta=60^\circ$ では層間段差も小さく，全体にわたって良好な切削面が得られていることがわかる．

毛羽立ち

図7にねじれ角と毛羽立ち量の関係を示す．

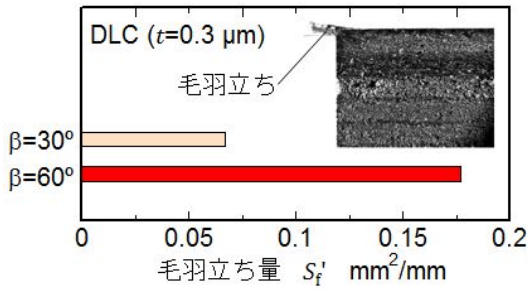


図7 ねじれ角と毛羽立ち量の関係

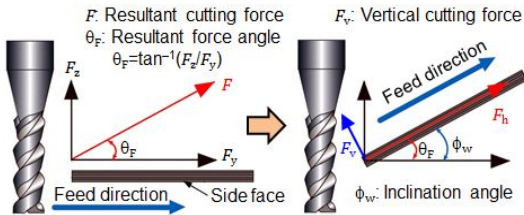


図8 ねじれ角と毛羽立ち量の関係

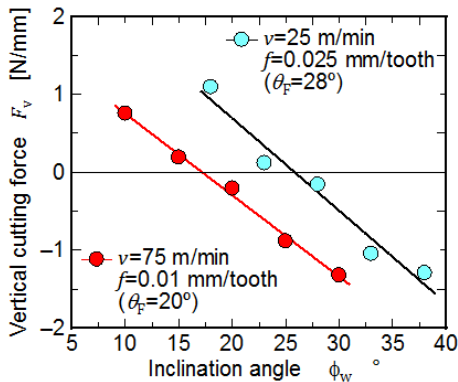


図9 傾斜角と切削抵抗法線方向分力

なお、毛羽立ちとは図7に示すように切り残した炭素繊維である。図より、 $\beta=30^\circ$ と比較して $\beta=60^\circ$ では毛羽立ち量が2倍以上となっている。これは前述したとおり、強ねじれ角では軸方向分力 F_z が増加し、最上層の繊維を持ち上げるためである。

以上の結果を総括すると、高ねじれエンドミルの使用によって、切削抵抗、工具摩耗、層間剥離(デラミネーション)や層間段差、繊維の抜けが低減し、仕上げ面粗さは良好になる。その一方、試料表面の毛羽立ちが大幅に増加する。したがって、高ねじれエンドミルの切れ味を維持したまま、毛羽立ちを抑制できれば、高品位加工が実現できる。

(4)高ねじれエンドミルによる傾斜切削 傾斜切削の原理

図8は切削断面に作用する切削抵抗 F_y と F_z を示したものであるが F_y と F_z の合力 F が試料上面を押し上げるように作用していることがわかる。そこで、切削抵抗の合力角 θ_F に沿ってCFRP板材を傾斜させ、板材に沿って切削すれば、切削合力 F は試料上下表面に平行に作用することになり、最外層の毛羽立ちの低減が期待できる。

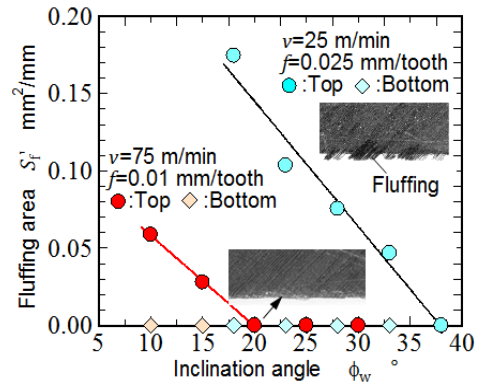


図10 傾斜角と毛羽立ち量の関係

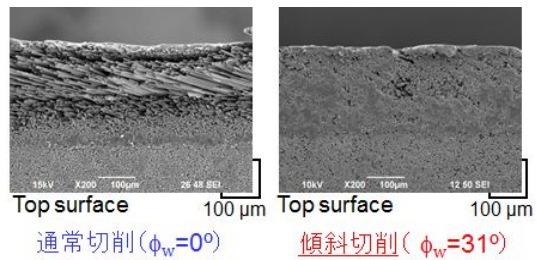


図11 ダイヤモンド工具による毛羽立ちの消失

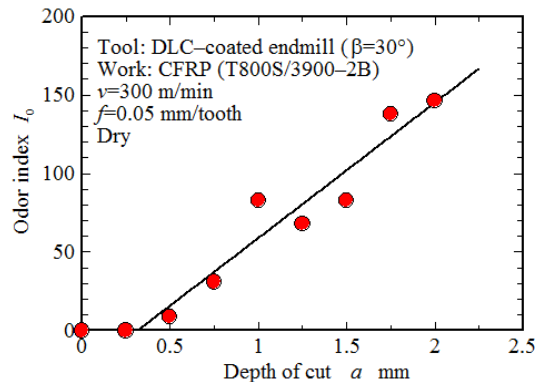


図11 切込みと“におい値”の関係

切削抵抗

図9は試料の傾斜角度 ϕ_w と垂直方向分力 F_v (試料表面に垂直な成分)の関係を示したものであるが、合力角 θ_F に近い傾斜角において F_v がほぼ0となることが確認できる。

毛羽立ち

図10は試料傾斜角度 ϕ_w と上下最外層の毛羽立ち量の関係を示す。予想に反して合力角 θ_F より大きい角度ではあるが、上下端面の毛羽立ちが完全に消失している。図11に示すように、このような傾斜切削における毛羽立ちの消失はDLCに比べて繊維の破碎や抜けが顕著なダイヤモンドコーティング工具においても観測され、“強ねじれエンドミルによる傾斜切削”の有効性が確認できた。

(5)樹脂の熱変質によるガスの検知

CFRPの切削加工では、切削熱によって加工面表面層の樹脂が熱変質し、樹脂と炭素繊維が局部的に剥離することが考えられる。このようなわずかな損傷は仕上げ面形状には直接現れないが、CFRPの部材として強度低下を引

き起こすことが考えられる。したがって、何らかの手段によって樹脂の熱変質を検知することができれば、変質を生じない臨界切削条件での加工が可能になる。そこで、切削時に樹脂の熱変質に起因する発生ガスの検知を試みた。図11はCFRP切削時における切込みと臭気センサの“におい値”の関係を示したものである。図にみるように、切込みがある一定値を超えると臭気が検知され、切込みの増加とともに臭気値も増加していることがわかる。このことより、樹脂の熱変質をインプロセスで計測できることが明らかになった。なお、発生するガスは極微量なためガスセンサでは検知できず、ガスを特定することはできなかった。今後は、発生ガスとCFRP試料の強度の関連性を検討する予定である。

(6)研究のまとめ

高ねじれエンドミルを用いたCFRPの傾斜切削を提案し、以下の結果を得た。

高ねじれエンドミルを使用することによって、切削抵抗接線分力 F_y と法線分力 F_x が大幅に低下する。軸方向分力 F_z は増加する。高ねじれエンドミル($\beta=60^\circ$)の逃げ面摩耗は通常のエンドミル($\beta=30^\circ$)の約1/2である。高ねじれエンドミルでは極めて平滑な仕上げ面が得られ、層間剥離(デラミネーション)や繊維の抜けもみられない。しかしながら、試料上端面に毛羽立ちが顕著になる。これは、試料の上方向に働く軸方向分力 F_z が繊維を持ち上げるためである。

そこで、試料切削面に作用する抵抗(F_y と F_x の合力 F)が試料の長手方向に作用するように試料(実用上はエンドミル)を傾ける“傾斜切削”を提案する。

高ねじれエンドミルを用いた傾斜切削では、層間剥離、炭素繊維の抜け、毛羽立ちのない平滑な高品位加工面が実現できる。CFRPの切削において、切込みの増加によって“におい値”が増加することから、臭気センサを用いることで樹脂の熱変質を抑制した加工条件を設定できる。

引用文献

- Teti, R., Machining of Composite Materials, Annals of the CIRP, Vol.51, Issue 2, 2002, pp. 611-634.
- Dransfield, K., Baillie, C., Mai, Y.-W., Improving the Delamination Resistance of CFRP by Stitching -A Review, Composites Science and Technology, Vol.50, No.3, 1994, pp.305-317.
- Karpat, Y., Polat, N., Mechanistic Force Modelling for Milling of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Double Helix Tools, Annals of the CIRP, Vol.62, Issue 1, 2013, pp.95-98.
- E. Brinksmeier, E., Fangmann, S., Rentsch, R., Drilling of Composites and Resulting Surface Integrity, Annals of the CIRP, Vol.60, Issue 1, 2011, pp.57-60.

Pecat, O., Rentsch, R., Brinksmeier, E., Influence of Milling Process Parameters on the Surface Integrity of CFRP, Procedia CIRP, Vol.1, 2012, pp.466-470.

Hosokawa, A., Shimamura, K., Ueda, T., 2012, Cutting Characteristics of PVD-coated Tools Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering Method, Annals of the CIRP, Vol.62, Issue 1, 2013, pp.95-98.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hosokawa, A., Ueda, T., Hirose, N., Furumoto, T., High- quality machining of CFRP with high helix end mill, Annals of the CIRP, 査読有, Vol.63, Issue 1, 2014, pp.89-92.
(doi:10.1016/j.cirp.2014.03.084)

〔学会発表〕(計 2 件)

廣瀬直也 細川 晃, 上田隆司, 古本達明, 小谷野智広, CFRPのエンドミル加工 - DLC-コーティング工具による傾斜切削-, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 2014年9月17日, 鳥取市.
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会論文集, 2012年9月16日, 北九州市.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.me.se.kanazawa-u.ac.jp/lab/04.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

細川 晃 (HOSOKAWA AKIRA)
金沢大学・機械工学系・教授
研究者番号: 40 199493

(2)研究分担者

古本達明 (FURUMOTO TASTUAKI)
金沢大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 60432134

(3)研究分担者

小谷野 智広 (KOYANO TOMOHIRO)
金沢大学・機械工学系・助教
研究者番号: 20707591