

CFRP の異方性を考慮した高精度・高能率加工に関する研究

加賀 忠士

Study on high-precision and high-efficient machining of CFRP with considering anisotropic material property

Tadashi Kaga

エンドミルによる CFRP のトリミングにおいて、剥離を防ぐ方向に力が働くような工具姿勢を選ぶことで、加工能率と工具寿命を飛躍的に向上する”2分割傾斜エンドミル加工法”を提案した²⁾。そして、従来条件に対し数十倍の加工能率の向上および十倍程度の工具寿命の延長を示す研究成果を得るに至っている。本研究では、”2分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗および工具摩耗に与える影響について検討した。その結果、次のことがわかった。リード角が大きくなると、主分力および背分力の比切削抵抗は低くなることから、切削速度増加による能率向上の可能性がある。また、リード角が大きくなると、工具摩耗量が減少することから、材料の異方性の影響がある。

1. はじめに

近年、航空機は環境適合性および高性能化の要求にともない、これまで主要材料として適用されていたアルミ合金に比べ、比強度（重量当たりの強度）および比弾性率（重量当たりの弾性率）の高い炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP）の使用率が、増加の一途をたどっている¹⁾。

この CFRP を部品として使用するためには、一体成形した後、切削、穴あけなどの二次加工が必要となる場合が多い。しかし、工具摩耗が非常に激しいことや、単一材とは異なる材質のため、その切削機構も金属材料とは異なることから、良好な仕上げ面が得にくいといった問題がある。

これらの問題に対し、著者らはエンドミルによる CFRP のトリミングにおいて、剥離を防ぐ方向に力が働くような工具姿勢を選ぶことで、加工能率と工具寿命を飛躍的に向上する”2分割傾斜エンドミル加工法”を提案している。そして、従来条件に対し数十倍の加工能率の向上および十倍程度の工具寿命の延長を示す研究成果を得るに至っている²⁾。この研究において、図1に示すように工具進行方向に対し工具を傾斜する実証試験を行う中で、工具姿勢変化（積層方向に対する切削方向の角度の変化）により切削抵抗に異方性があることを把握した（図2）。

高能率加工を目指し単純に切削速度を上昇させることは、CFRP 樹脂部の軟化を誘発し、その結果工具に樹脂が付着し切削不良を引き起こす。この工具への樹脂付着については、切削による発生熱が主要因と考えられ、これは切削プロセスで発生する熱量に比例する。この熱量は、単位時間あたりに消費されるエネルギー（切削動力）に等しく、切削運動の方向の力と切削速度の積で表わされる。ここで、CFRP が工具姿勢（積層方向に対する切削方向の角度）により切削抵抗に異方性があることに着

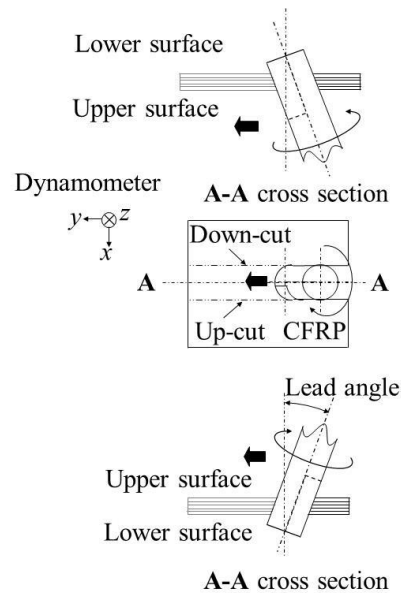


図1 工具傾斜実験方法

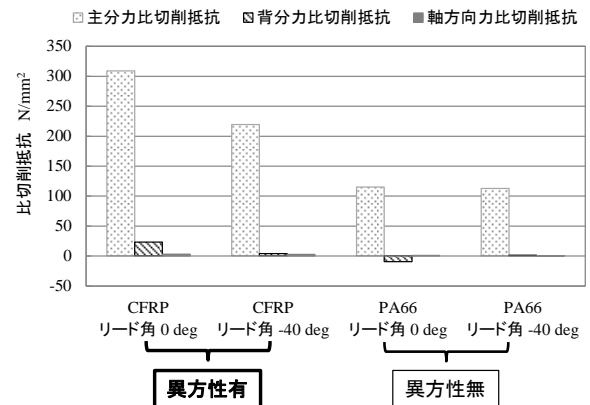


図2 比切削抵抗の異方性 ($\phi 12$ エンドミル, 外周すくい角 12 deg, ねじれ角 0 deg, 回転数 6000min⁻¹)

目すると、より切削抵抗が低くなる姿勢を選択すれば、切削速度を増加することで能率向上が期待される。

一方、工具の機械的摩耗にも直接的に材料の異方性の影響があると予測され、これを明らかにする必要がある。

本研究では、“2分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗に与える影響および工具の機械的摩耗に与える影響を検討した。

2. 実験

2. 1 実験装置および実験方法

被削材の CFRP としては、180 °C 硬化樹脂を炭素繊維に含浸させた一方向プリプレグ 28 層とガラス繊維のクロス材プリプレグをその最外層に積層し硬化させた長方形板 (厚 5.5×44×55 mm) を準備した。この被削材は 3 成分切削動力計 (キスラー製 9257B) を介し、5 軸マシニングセンター (ヤマザキマザック製 VARIAXIS630-5XII) 上に固定し、1 枚刃コーティング無し超硬エンドミル (直径 12 mm) を用いて、図 1 に示すように加工実験を行った。半径方向切込みはエンドミル直径と同じ 12 mm (スロットイング)、板厚方向切込みは被削材の板厚と同じ 5.5 mm (完全にエンドミルを貫通)、回転数 9000 min⁻¹、エンドミルの進行方向に対する前傾および後傾の角度 (リード角 γ) -40 ~ 0 deg (後傾から垂直まで)、エンドミル回転軸を紙面に垂直に見たとき、紙面に投影される送り量 C_γ を 0.6 mm/tooth とし、それらの影響について検討した。実験の様子を図 3、実験条件を表 1 に示す。

3. 結果及び考察

3. 1 切削力

本実験において、切削力を測定している。この結果をもとに、各切削条件における工具の比切削抵抗値を求めた。今回の計算では、繊維方向による異方性は考慮せず、刃の削り始めの工具回転角度 ϕ を 0 deg とし、切り取り厚さ h を、一刃あたりの送り量 C_γ と工具回転角度 ϕ の \sin

表 1 実験条件

被削材	CFRP
エンドミル名	直刃エンドミル
工具材質	超硬(コーティング無し)
刃数	1
外周すくい角 deg	0
ねじれ角 deg	0
送り C_γ mm/tooth	0.6
工具回転数 min ⁻¹	9000
径方向切込み量 mm	12
板厚方向の切込み量 mm	5.5(完全にエンドミルを貫通)
リード角 γ deg	-40, -20, 0

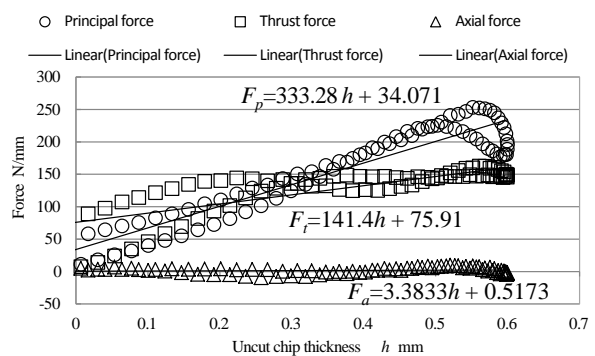


図 4 切削力解析結果 (工具回転数 9000 min⁻¹、リード角 $\gamma=0$ deg、送り量 $C_\gamma=0.6$ mm/tooth)

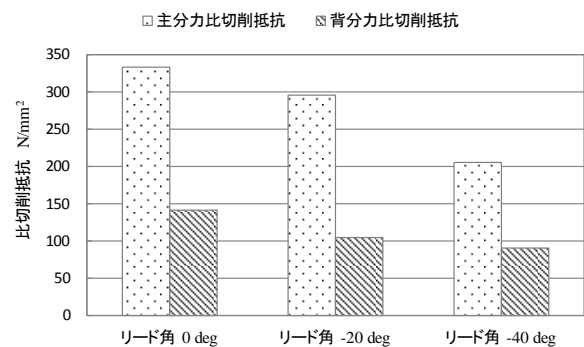


図 5 リード角変化における各成分の比切削抵抗

関数の積で近似 ($h \doteq C_\gamma \sin \phi$) している³⁾。そして、各工具回転角から切削力測定で得られた x 、 y 、 z の 3 方向の平均の力を主成分、背成分、軸方向力に変換し、切り取り厚さ h と各成分の切削力の関係をグラフ化した。一例として工具回転数 9000 min⁻¹、リード角 $\gamma=0$ deg、送り量 $C_\gamma=0.6$ mm/tooth の時の結果を図 4 に示す。この結果から、主成分/背成分/軸方向力の比切削抵抗はそれぞれ 333.28/141.4/3.3833 N/mm² と求めた。ただし、軸方向力に関しては、本実験では、ねじれ角ゼロを用いているため、軸方向の比切削抵抗は非常に小さく、ここで

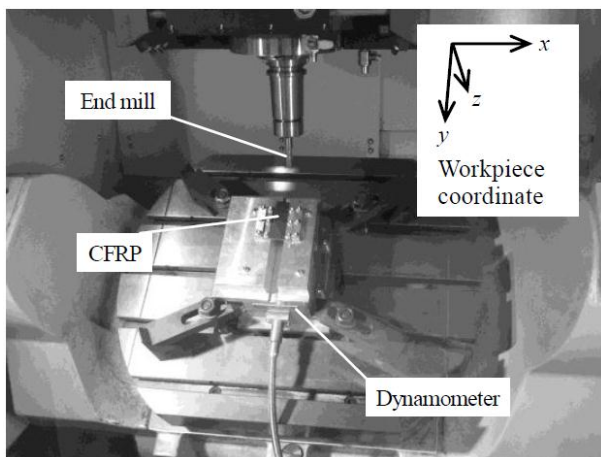


図 3 実験の様子

は評価しない。

送り量 $C_v=0.6 \text{ mm/tooth}$ の各切削条件における主分力および背分力の比切削抵抗の結果を図5に示す。主分力および背分力の両方とも、リード角が大きくなると比切削抵抗が低くなっていることがわかる。

3. 2 工具摩耗

CFRP 板 1 枚の加工後、エンドミルの逃げ面摩耗の観察を行い、図6に示すように、最大の逃げ面摩耗幅を測定した。

リード角変化における逃げ面工具摩耗量の結果を図7に示す。この結果をみると、リード角が大きくなると工具摩耗量が減少していることがわかる。CFRP の切削では、切り残された繊維が切れ刃の下に弾性変形し、工具逃げ面を擦過することで工具摩耗が進行する⁴⁾との報告があることから、比切削抵抗の結果と合わせると、リード角が大きくなることにより、工具を押さえつける繊維の力が弱くなったために工具摩耗が抑制されたと考えられる。

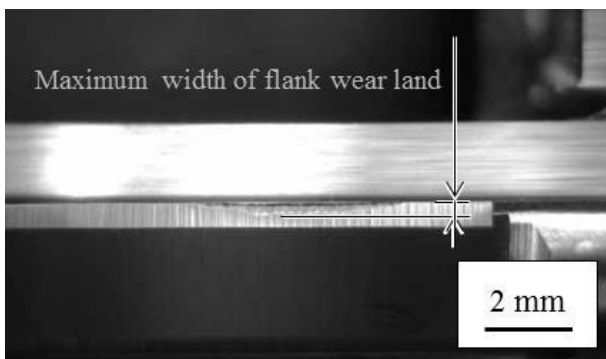


図6 エンドミルの逃げ面摩耗測定の様子

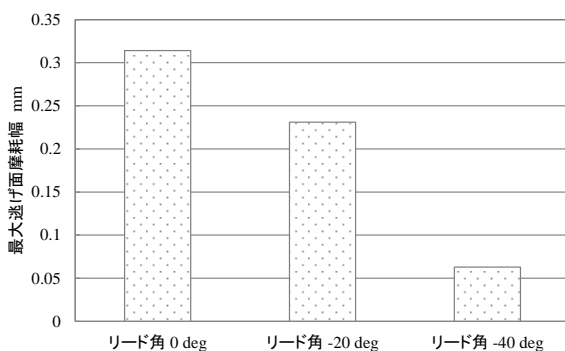


図7 リード角変化における工具摩耗量

4. まとめ

”2 分割傾斜エンドミル加工法”の更なる高能率化を目指し、工具姿勢変化が切削抵抗および工具の機械的摩耗に与える影響について検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) リード角が大きくなると、主分力および背分力の比切削抵抗が低くなる。このことにより、切削速度増加による能率向上の可能性はある。
- (2) リード角が大きくなると工具摩耗量が減少する。このことにより、材料の異方性の影響がある。

【謝 辞】

本研究を遂行するにあたり、名古屋大学大学院工学研究科 社本英二教授のご指導を頂き、厚くお礼申し上げます。

本研究は公益財団法人マザック財団の助成により行われました。

【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 No.75,Vol.8,pp941-944,2009
- 2) 加賀忠士ら,CFRP の高能率トリミングを実現する 2 分割傾斜エンドミル加工法,精密工学会誌 No.80,Vol.2, pp183-190,2014
- 3) 社本英二,切削機構を理解しよう,日本機械学会講習会テキスト,pp1-14,2008
- 4) 佐久間敬三ら,炭素繊維強化プラスチックの切削における工具摩耗 (工具材種の影響),日本機械学会論文集(C編)No.49,Vol.10,pp656-666,1985