

修士論文

大きな切込み量の上向き研削による CFRP の仕上げ加工

指導教員 高橋 裕 教授

令和 5 年度

三重大学 大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

岡本 洸輝

目次

1 緒言	1
2 実験装置外部装置	4
2.1 制御部	5
2.2 外部装置	7
2.3 軸付き円柱砥石	8
2.4 試験片	9
2.5 加工槽	10
3 上向き研削	12
4 研削による CFRP の仕上げ加工	12
4.1 実験概要	13
4.2 実験方法	14
4.3 条件変化による比較実験	16
①工具角度 0° の基礎的実験	16
②工具を傾斜させた研削での実験	20
5 実験結果の考察	27
6 結言	30
参考文献	31
謝辞	32

1 緒言^{1)~14)}

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) とは、樹脂に炭素繊維を含有させて固化、成形される複合材料である。炭素繊維は繊維状態のままで使用されることはなく樹脂と合わさった複合材料として主に構造材料に使用される。構造材料は単位重量当たりの特性を重要視される。炭素繊維は他の材料である鉄と比較して比重約 1/4、比強度 10 倍、比弾性率 7 倍と非常に高い力学的特性を持っている。また、他の特性として耐食性、耐熱性、耐薬品性が高く、電気伝導性や X 線透過性などの機能的な特徴がある。さらに複合材料にすることで耐疲労性、振動減衰性、寸法安定性が向上する。母材として用いられる樹脂は熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂の 2 つに分けられ、それに伴い CFRP も炭素繊維強化熱硬化性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastics : CFRTS)、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics : CFRTTP) に分けられる。CFRTS の母材は主にエポキシ樹脂 (EP、力学的特性・硬化収縮小)、不飽和ポリエステル樹脂 (UP、易成形性・速硬化・安価) などが使われる。加熱硬化前は複雑な成形が可能。熱や溶剤に強く、CFRTTP に比べ機械的性質が高い。CFRTTP の母材は主にポリプロピレン樹脂 (PP、耐熱性・耐薬品性) やポリアミド樹脂 (PA、耐衝撃性・耐摩耗性)、ポリカーボネート樹脂 (PC、寸法安定性・耐衝撃性) などが使われる。成形後に加熱することで軟化する。靱性が高く、CFRTS に比べ成形時間の短さや材料費、リサイクル性に優れる。また、CFRTS が冷蔵保管場所を必要とするのに対し、常温での保管が可能となっている。このことから熱可塑性の CFRTTP が様々な業界で注目されている。

現在地球温暖化が深刻化しており、世界的に脱炭素に向けた取り組みが行われている。日本でも 2050 年までに温室効果ガスの排出をゼロにする、カーボンニュートラルを目指す¹⁾と掲げられた。日本の場合、温室効果ガスの中でも約 91 %を二酸化炭素が占めている。2019 年の日本での二酸化炭素直接排出量は合計で 11 億 794 万トンである。そのうちの 39.1 %がエネルギー転換部門 (発電)、17.9 %が運輸部門である。総排出量 50%以上となっている分野から削減するのは重要であり、CFRP も関係してくる。

CFRP は近年世界的に風力発電用のブレードや本体カバーへの利用が増えている。風力発電は再生可能エネルギーの中で最も経済性や効率に優れており、二酸化炭素排出量が少なく持続可能エネルギーなことから注目され、世界的に年率 20 %以上の拡大をしている。それに伴い風車の大型化が進められており、従来の GFRP (ガラス繊維) より比強度や比剛性に優れた CFRP も併せて研究開発されている。また、潮流や海流を利用した発電用のブレードにも同様に使用されている。

自動車業界では車体重量が制動性や燃費に大きく影響するため CFRP が活用、研究されている。主にボディやシャフト、ステアリングホイールに使用されており、燃料電池車では水素ガスを貯蔵するタンクにも使われている。近年増加が激しい電気自動車にも電池の重量が重く、航続距離延長には軽量化が必須である。2017 年時点では剛性が高いことや接

着剤による接合強度が高いことから CFRTS が多く採用されている。CFRTS は高価であり、成形に時間がかかることから高級車やレーシングカーに活用されることが多い。しかし、急速に広がる地球温暖化に歯止めを掛ける、リサイクル性が良く再利用に期待できる CFRTS を採用する動きが活発になってきている。多量生産車まで採用を広げるにあたって、両者を比較したときに安価で冷蔵保管場所が不要、1 分で成形（CFRTS は早くても 10 分）されサイクルタイムに優れた CFRTS が向いている。CFRTS のボディへの構造設計技術が未だ確立されてはいないが研究開発が進んでおり、今後重要となってくる。

CFRP の特徴を最大限に活用しているのは航空宇宙産業である。新型コロナウイルスによってダメージを受けているが、2024 年時点では十分に回復してきている。それ以前は世界的に年率約 5 %の拡大が続いており、日本でも 2011 年から 2015 年の 4 年間で航空機の売上が 2 倍になっている。航空機は機体の重量が増加するとエンジン出力を上げる必要があり、エンジン重量の増加を招く。その上、燃費消費が増加し大量の燃料を積載するためにタンク構造の重量増加につながる。このように航空機では機体重量が全体に影響を及ぼすため、軽量化することが必須になってくる。実際にボーイング 787 では重量比の 50 %が複合材料で構成されており、燃費が 20 %改善した。複合材料の大半は CFRP が占めている。

様々な業界で注目されている CFRP は成形後の端面部に素材の余剰部分ができるため、製品の形にするにはトリミングなどの二次加工が必要となる。しかし、CFRP は炭素繊維と樹脂による複合材料であることから、性質が全く異なる 2 種類の材料を同条件で加工しなければならない難削材とされている。加工が困難である要因として、1.積層構造であり剥離しやすい 2.炭素繊維の強度が非常に高く工具が摩耗しやすい 3.繊維が細かくしなやかであるため切断できない繊維が残る 4.強度の高い繊維と軟らかい樹脂との複合材であるため繊維の引抜きが発生するなどがあげられる。

既存のトリミング加工法はアブレイシブウォータージェット（AWJ）加工やエンドミル加工、レーザ加工、超音波振動カッタ加工、丸ノコ加工などが存在する。AWJ 加工は加工面から 1.0 mm 程に剥離や削り残り、微小なテーパの発生リスクが、エンドミル加工は加工面から 0.5 mm 程に剥離や削り残り、レーザ加工は加工面から 0.5 mm 程に熱的影響領域（HAZ）、丸ノコ加工は加工面から 0.5 mm 程に剥離や削り残りが生じる。また本研究室で取り組んでいる超音波振動カッタ加工は加工面から 1.4 mm 程に切削時の振動や熱影響から、盛り上がりが生じる。

そこで、本研究では最大影響範囲 1.5 mm の切込み量を可能な限り少ない回数で削る方法を考え、加工面上下エッジ部近傍のケバやバリ、剥離の無い加工面を目的に行っていく。一般的な研削による仕上げ加工は 0.01~0.1 mm である。仕上げ加工時に工具角度を付け、往路と復路で工具回転方向を変えることで常に被削材を板厚中心方向に押し込みながら研削していく（3 章上向き研削にて説明）。加工条件として工具回転数、工具角度、工具回転方向等を変化させ、加工面と加工面上下エッジ部を観察する。また、液体窒素を用いる

ことで加工時に生じる熱を抑制し、砥石への溶着を防ぐとともに、切屑集塵による工具摩耗や人体への影響の低減を図る。

2 実験装置外部装置

本研究で使用した実験装置を図 2.1 に示す。ステッピングモータ（ドライバー：DRV8825）によって X（最小移動量 $[\mu\text{m}]$ ：0.78）、Y（0.78）、Z（0.31）軸の移動が可能。実験中は X、Z 軸が自動で動き、仕上げ加工を行う。回転数 7,000～24,000 rpm のスピンドルモータを Z 軸に固定している。また、スピンドルモータの回転数の測定には非接触式レーザ測定タコメータ（FMTDT2234C）を用いた。試験片を固定するテフロン（PTFE）容器は X、Y 軸に移動可能な台の上に固定している。3 軸方向すべての動きはそれぞれのポテンシオメータによる制御で動くようプログラムされている。

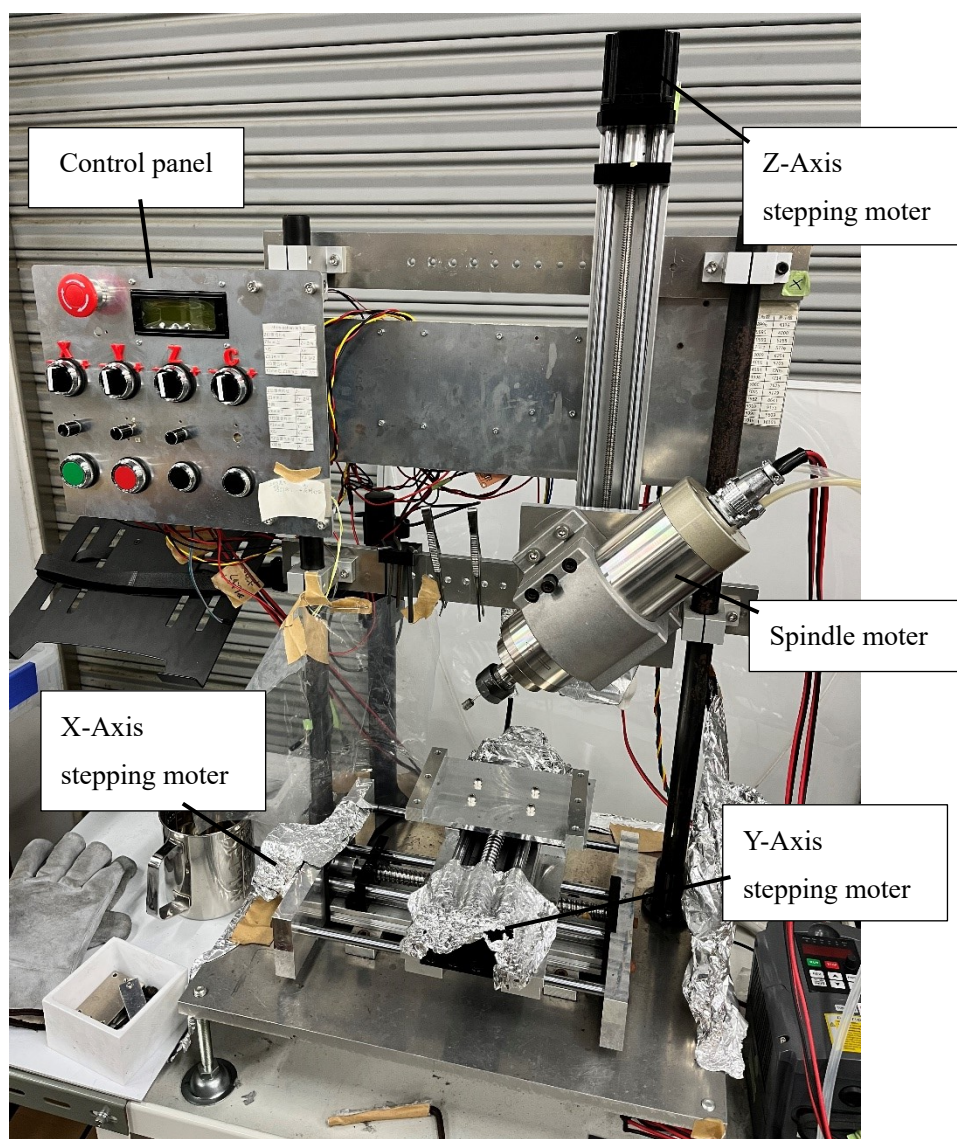


Fig.2.1 Overall view of the experimental equipment

2.1 制御部

本研究では1台のマイコンボード (Arduino NANO) によって X, Y, Z 軸のステッピングモータの制御を行う。図 2.2 のように X, Y, Z 軸の操作をパネルにまとめた (写っている C 軸は使用しない)。ステッピングモータの「移動方向」を決めるスイッチ、ステッピングモータが動く「速度と距離」を決めるポテンショメータ、動作を「開始」するボタンを設置している。緊急時には左上の赤いボタンを押すことで停止する。操作盤裏面と Arduino NANO は図 2.3, 2.4 に示す。

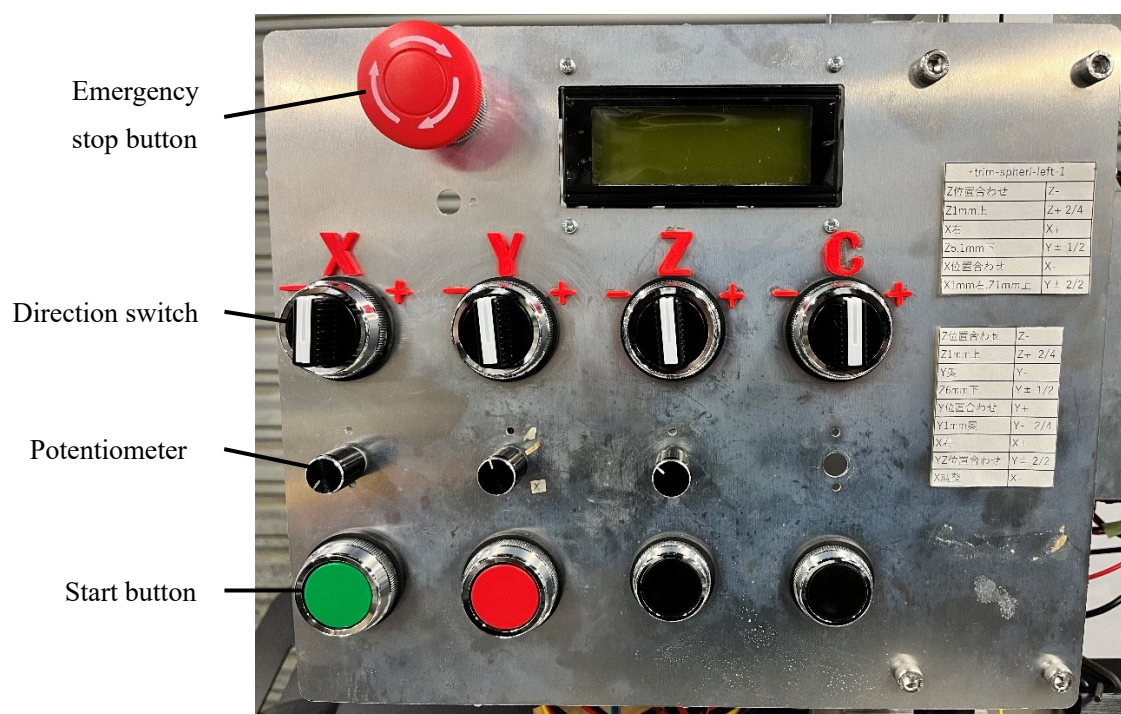


Fig.2.2 Control panel

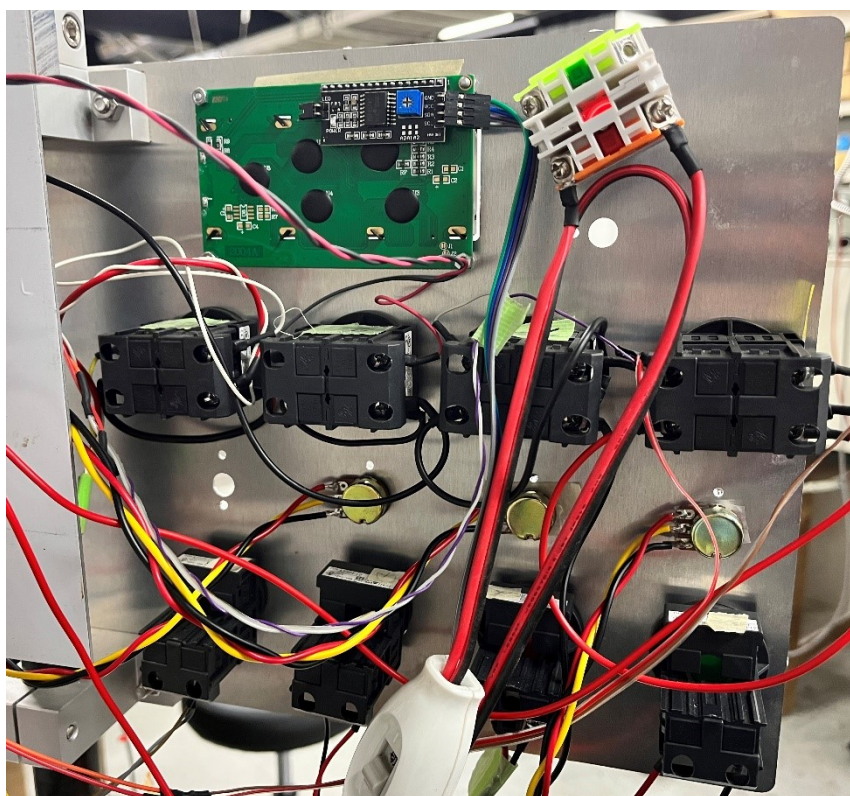


Fig.2.3 Overview of microcomputer board

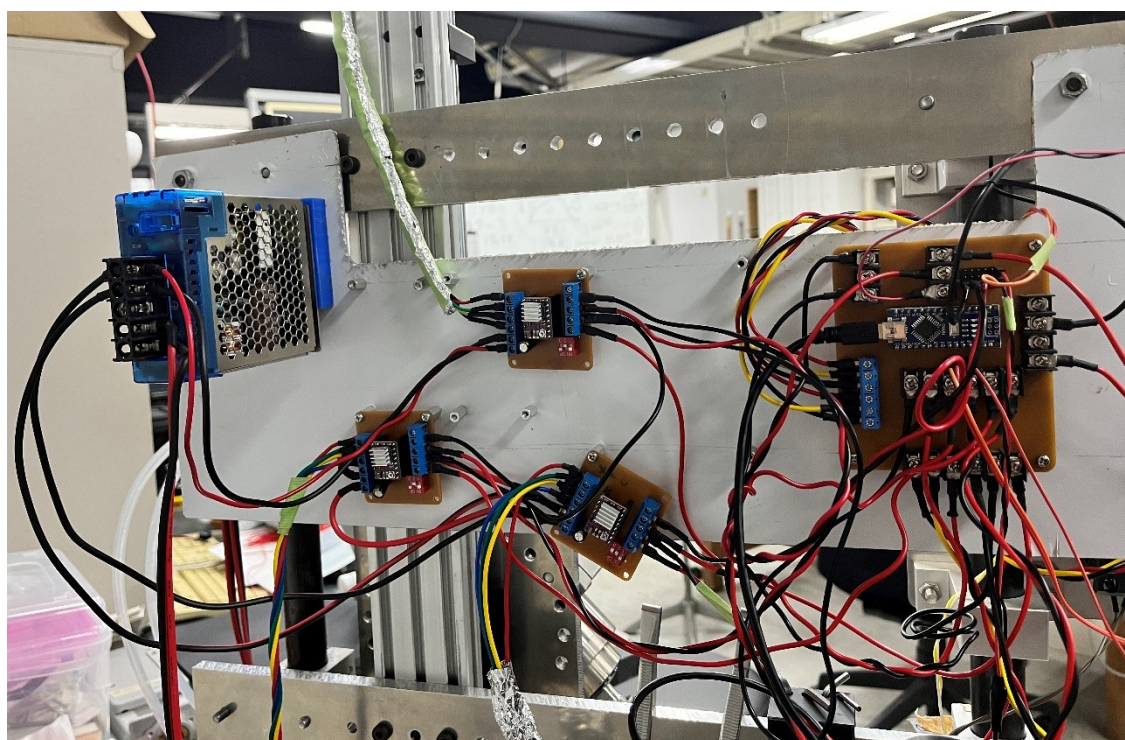


Fig.2.4 Backside of the control panel

2.2 外部装置

実験装置の他に図 2.5 のモータ制御装置と図 2.6 の冷却装置を扱う。モータ制御装置は砥石を取り付けているスピンドルモータの回転数（7,000～24,000 rpm）と回転方向を制御する。冷却装置は高速回転しているスピンドルモータの熱を除去するためのものである。水を入れた容器の中に置き電源を入れることで、スピンドルモータと繋がれたホースを介して水を循環させる。



Fig.2.5 Motor control unit



Fig.2.6 Cooling system

2.3 軸付き円柱砥石

本研究では図 2.7 に示すような円柱砥石を使用した。直径 8 mm，砥石長さ 10 mm の円柱状の電着ダイヤモンド粒度#200 工具（軸 2.35 mm）である。特徴として，研削力に優れており，今回研削する CFRP などの非金属の難削材加工に向いている。

実験の際には図 2.8 のように砥石を傾けて加工する。スピンドルモータがネジで固定されており，角度 $\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$ のいずれかに傾けることが可能。

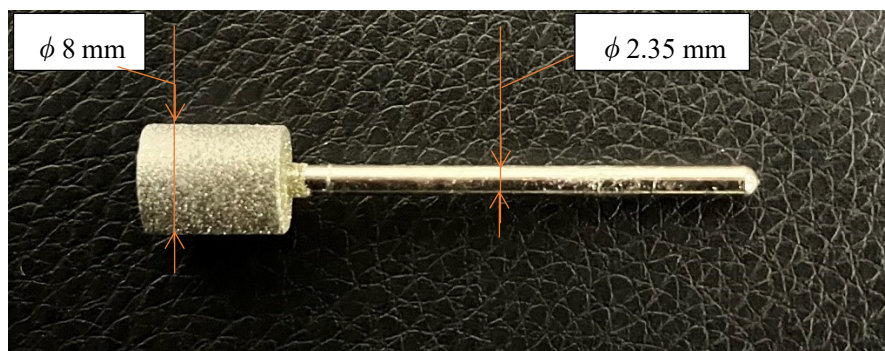


Fig.2.7 Grinding tool

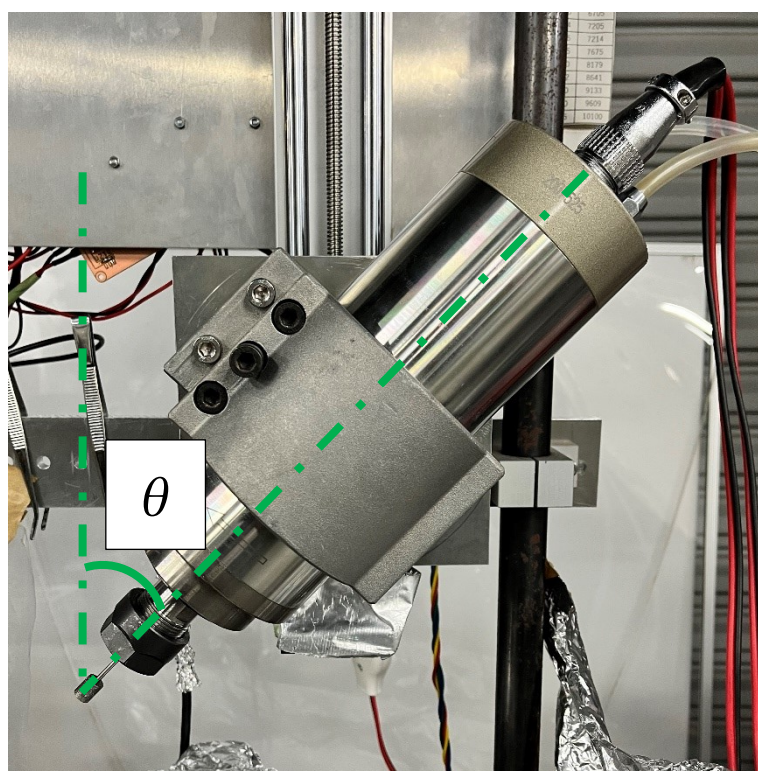


Fig.2.8 Angle of grinding tool ($\theta = 45^\circ$)

2.4 試験片

試験片はCFRTP（熱可塑性樹脂）を用いる．CFRTPの母材はポリカーボネート（PC）を使用．大きさは60×30 mm，板厚は2.2 mmである．図2.9の左端面から切込み量1.5 mm（赤破線部分：幅30 mm，厚さ2.2 mm）で仕上げ加工する．

CFRTPは加熱により軟化，冷却により固化する特徴がある．CFRTS（熱硬化性樹脂）に比べ成形時間が短く，靱性やコスト，リサイクル性に優れる．また，CFRTSが冷蔵保管場所を必要とするのに対し，常温での保管が可能となっている．このことから熱可塑性のCFRTPを用いた研究は有用性があると考えられる．

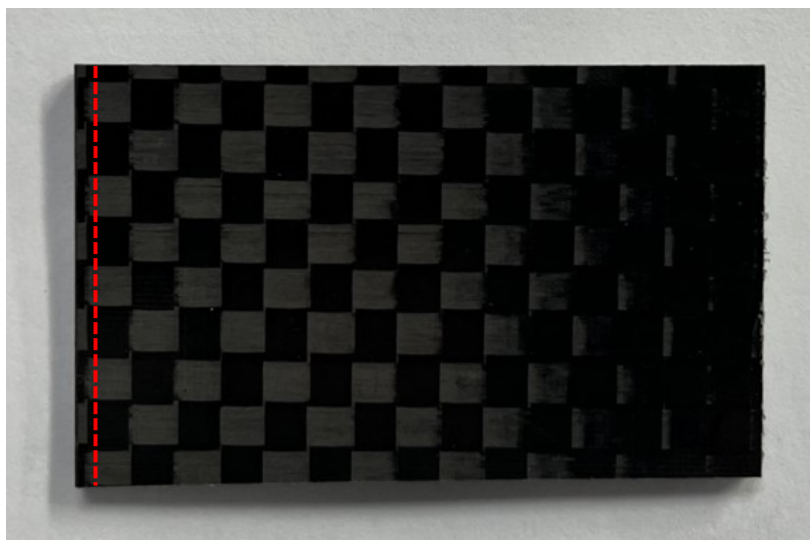


Fig.2.9 CFRTP specimen

2.5 加工槽

加工槽は実験中に扱う液体窒素による低温に耐性があるテフロン（PTFE）を使用した。

図 2.10 の 140×110×65 mm（ポケット加工 120×90×45 mm）の加工槽の中に図 2.11 のようにテフロン製下板 110×80×10 mm，アルミ製プレート 60×40×10 mm，アルミ製留め具 60×20×5 mm によって試験片を突き出し量 20 mm で固定する。実験装置に固定した様子は図 2.12 に示す。

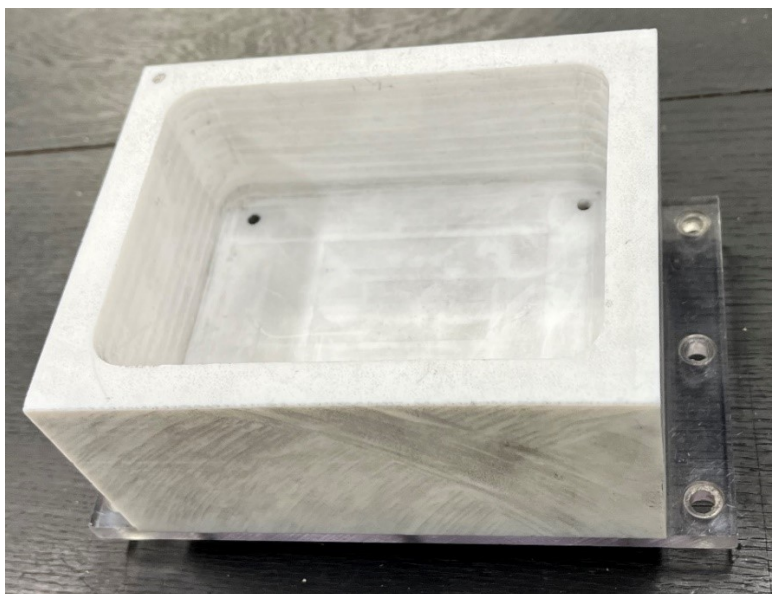


Fig.2.10 Processing tank (PTFE)

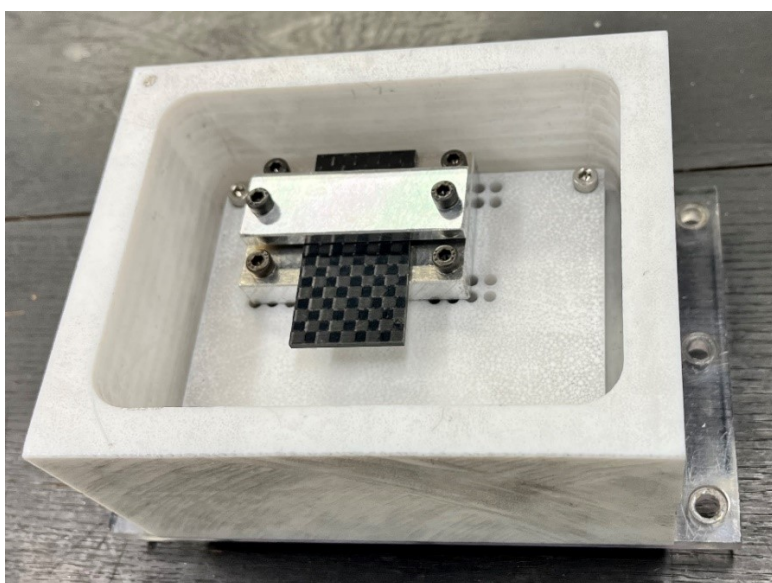


Fig.2.11 Processing tank after CFRP is installed

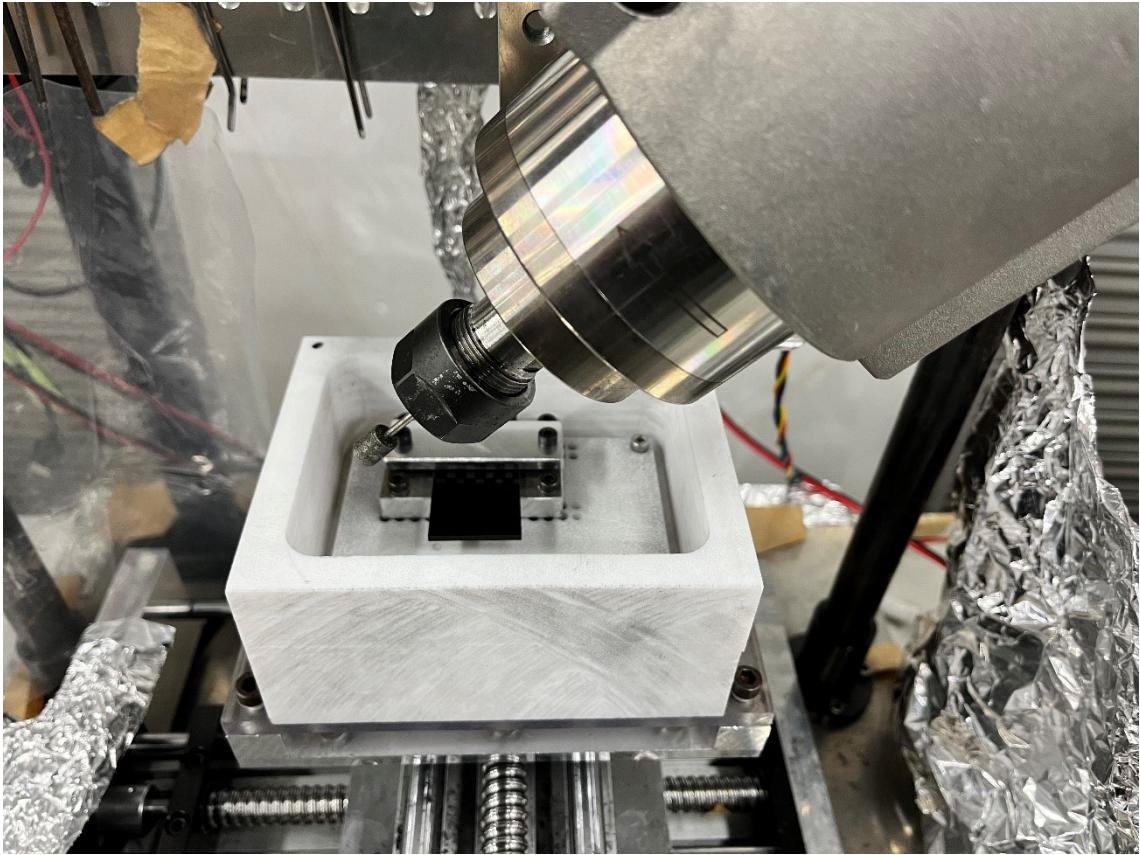


Fig.2.12 Experimental setup for grinding test

3 上向き研削

本研究で主に扱う仕上げ加工は、図 3.1 のように主軸を傾けた軸付き円柱砥石 ($\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$) による、液体窒素雰囲気下での上向き研削である。Z 軸に取り付けられているスピンドルモータを傾けることで工具角度を調整でき、CFRP の難加工材としての特徴である、繊維や樹脂の削り残りと層間剥離を抑制する狙いがある。図 3.2 のように砥石を傾斜させて往復に上向き研削することで、加工時に生じる砥石円周方向の力を板厚中心方向、つまり層を抑えつける力として利用する。砥石回転方向を往路と復路で逆にし、往路で層上側を研削、復路で層下側を研削するように分けることで可能としている。この際往路で層下側を全て削りきらないように研削最大半径は図 (a) 左の送り方向からの視点に示すように、層の 1/2 程の高さ (Z 軸) に設定してある。往路終了後の様子も図 (b) 左に示す。

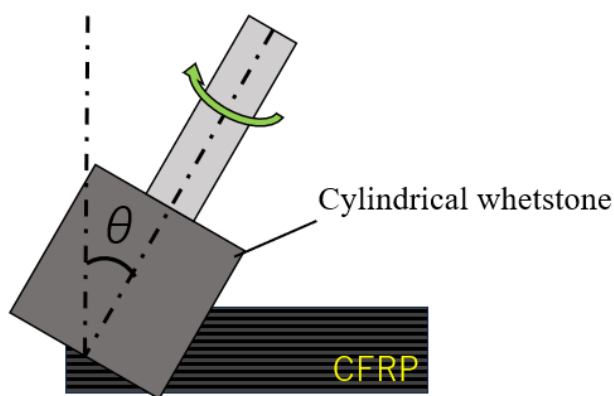


Fig.3.1 Tool angle

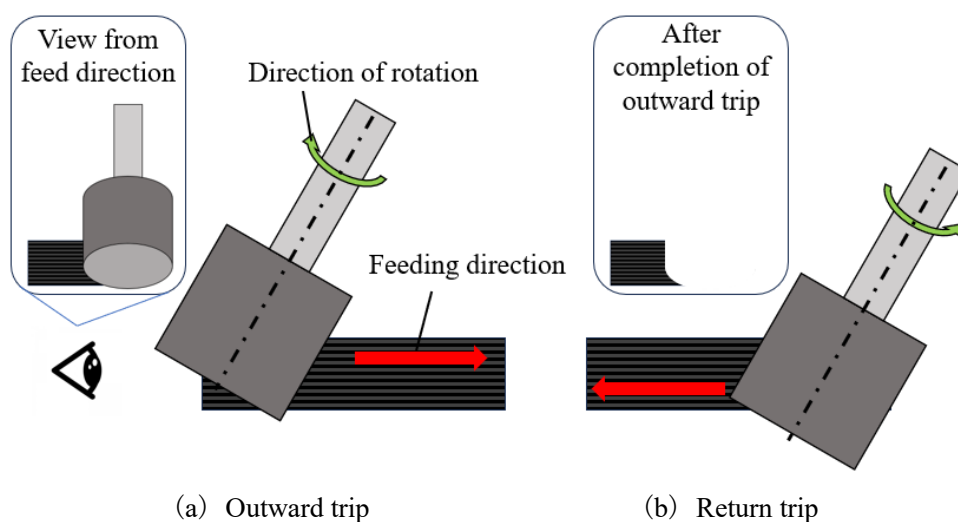


Fig.3.2 Up grinding

4 研削による CFRP の仕上げ加工

4.1 実験概要

実験では液体窒素を用いることで加工時に生じる熱を抑制し，砥石への溶着を防ぐとともに，切屑集塵による工具摩耗や人体への影響の低減を図る．

以下の①，②の条件で加工しケバやバリ，剥離を観察する．

① 工具角度 0° の基礎的実験

工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件を決定する．

加工は工具回転数 12,000 rpm，総切込み量 1.5 mm，送り速度 0.2 mm/s で一定にして行う．

(A) 切込み量が 1.5 mm で一定の往復研削における上向き研削，下向き研削の比較

(B) 上記の良い条件の方で，往復研削の切込み量を変化させ比較

② 工具を傾斜させた研削での実験

(C) 上向き研削，下向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30^\circ$ と①で決定した条件を比較

工具回転数 12,000 rpm，切込み量 1.5 mm，送り速度 0.2 mm/s で一定にして行う．

工具を傾斜させた研削と①で決定した工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件を比較し，工具傾斜に優位性があるのかを観察する．工具を傾斜させた研削の加工条件は上向き研削，下向き研削及び工具角度 $15, 30^\circ$ の計 4 パターンに分けた．

(D) 上向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30, 45^\circ$ 及び工具回転数 9,000, 12,000, 16,000 rpm で比較

切込み量 1.5 mm，送り速度 0.2 mm/s で一定にして行う．

次に，工具を傾斜させた上向き研削の加工条件をさらに細かくして実験を行う．工具角度 $15, 30, 45^\circ$ 及び工具回転数 9,000, 12,000, 16,000 rpm の計 9 パターンに分けた．最初は工具回転数 15,000 rpm を検討していたが，実験装置が共振動してしまっていたため 16,000 rpm で加工を行うことになった．

4.2 実験方法

①工具角度 0° の基礎的実験

(A) 切込み量が 1.5 mm 一定の往復研削における上向き研削，下向き研削の比較

工具角度 0° では片道研削をした場合工具が弾性変形してしまい，1.4 mm の切込み量となったため，往復研削での加工を行った。

加工は工具回転数 12,000 rpm，総切込み量 1.5 mm，送り速度 0.2 mm/s で一定にして行う。上向き研削，下向き研削の 2 パターンに分けて比較する。図 4.1 は上向き研削のパターンを表しており，このように往路と復路で工具回転方向を逆にすることで可能としている。下向き研削については工具回転方向を逆にして行う。

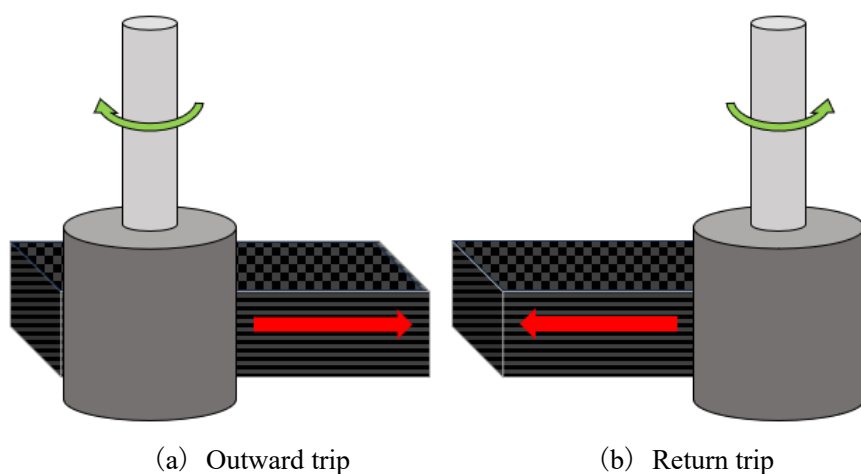


Fig.4.1 0° , Up grinding

(B) 往復研削の切込み量変更の比較

実験 (A) で良い結果が出た方の工具回転方向で行う。この実験によって工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件を決定する。

加工は工具回転数 12,000 rpm，総切込み量 1.5 mm，送り速度 0.2 mm/s で一定にして行う。切込み量を図 4.2 の (a) 1.5 mm で一定の往復，(b) 往路 1.0 [mm]+復路 0.5 [mm]，(c) 往路 1.25 [mm]+復路 0.25 [mm] の 3 パターンに分けて比較する。

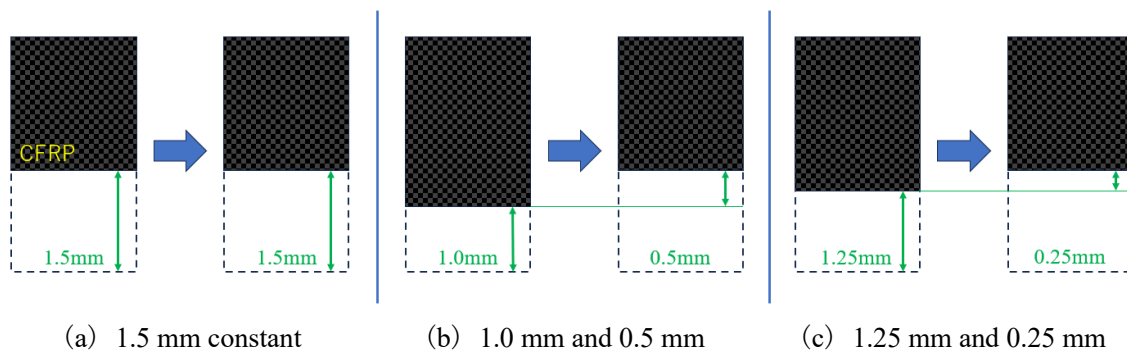


Fig.4.2 Condition of depth of cut

②工具を傾斜させた研削での実験

(C) 上向き研削, 下向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30^\circ$ と①で決定した条件の比較

(D) 上向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30, 45^\circ$ 及び工具回転数9,000, 12,000, 16,000 rpmで比較

加工方法と狙いは3章上向き研削に示す.

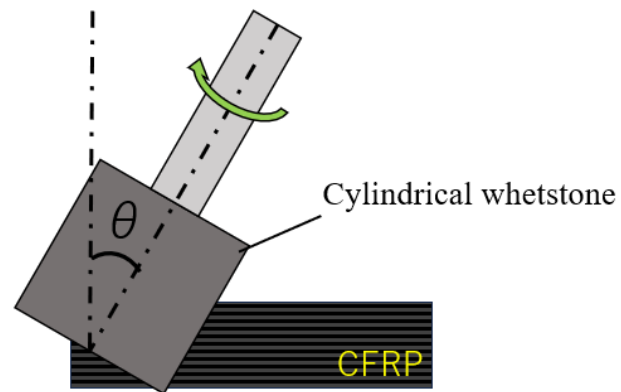


Fig.3.1 Tool angle

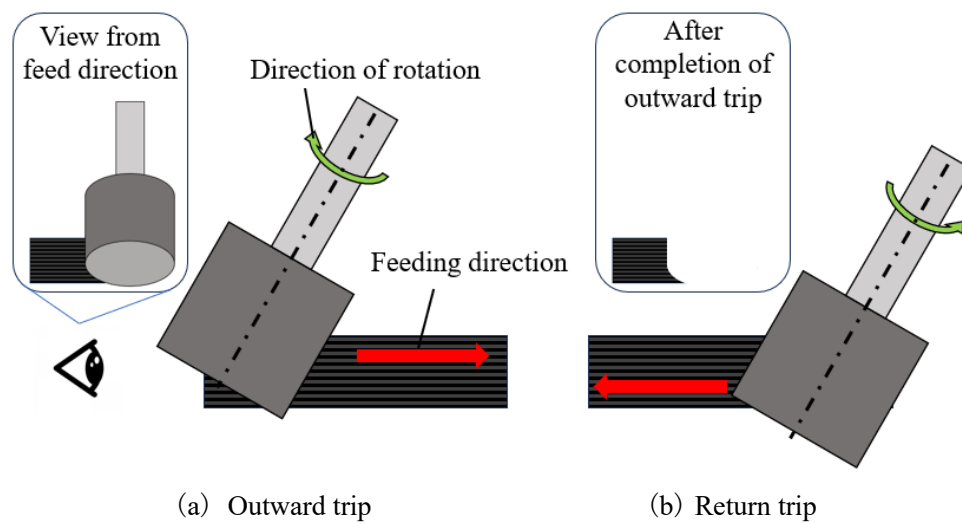


Fig.3.2 Up grinding

4.3 条件変化による比較実験

①工具角度 0° の基礎的実験

工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件を決定する．

(A) 切込み量が 1.5 mm で一定の往復研削における上向き研削，下向き研削の実験結果
上向き研削，下向き研削の2パターンに分けて比較．

Table4.1 Processing conditions

Tool rotation speed	12,000 [rpm]
Depth of cut	1.5 [mm]
Feed rate	0.2 [mm/s]

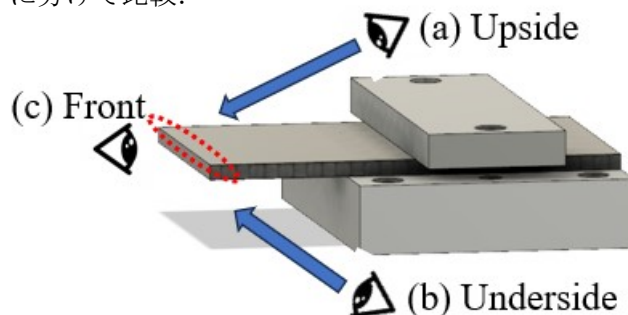


Fig.4.3 Observing direction

写真の見方の一例として，図 4.3 の赤い点線で囲んだ加工面上エッジ部近傍を (a) から見ているのが，図 4.4 の赤丸部分に対応している．

上向き研削と下向き研削どちらの条件も，加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた．剥離は上向き研削と下向き研削での違いは見られなかった．しかし，複数同条件実験を行った中で，図 4.5 に示す上向き研削下エッジ部近傍の表面層において，全体的に剥離して白くなっているのが見られた（赤矢印で示す）．

正面から見た写真ではどちらの条件もケバやバリの削り残り（緑丸）が生じていた．条件別に，下向き研削が 4 カ所，上向き研削が 3 カ所であった．上向き研削の削り残りの方がやや大きい結果となった．

これらの結果から，次の実験（B）は下向き研削によって加工を行った．

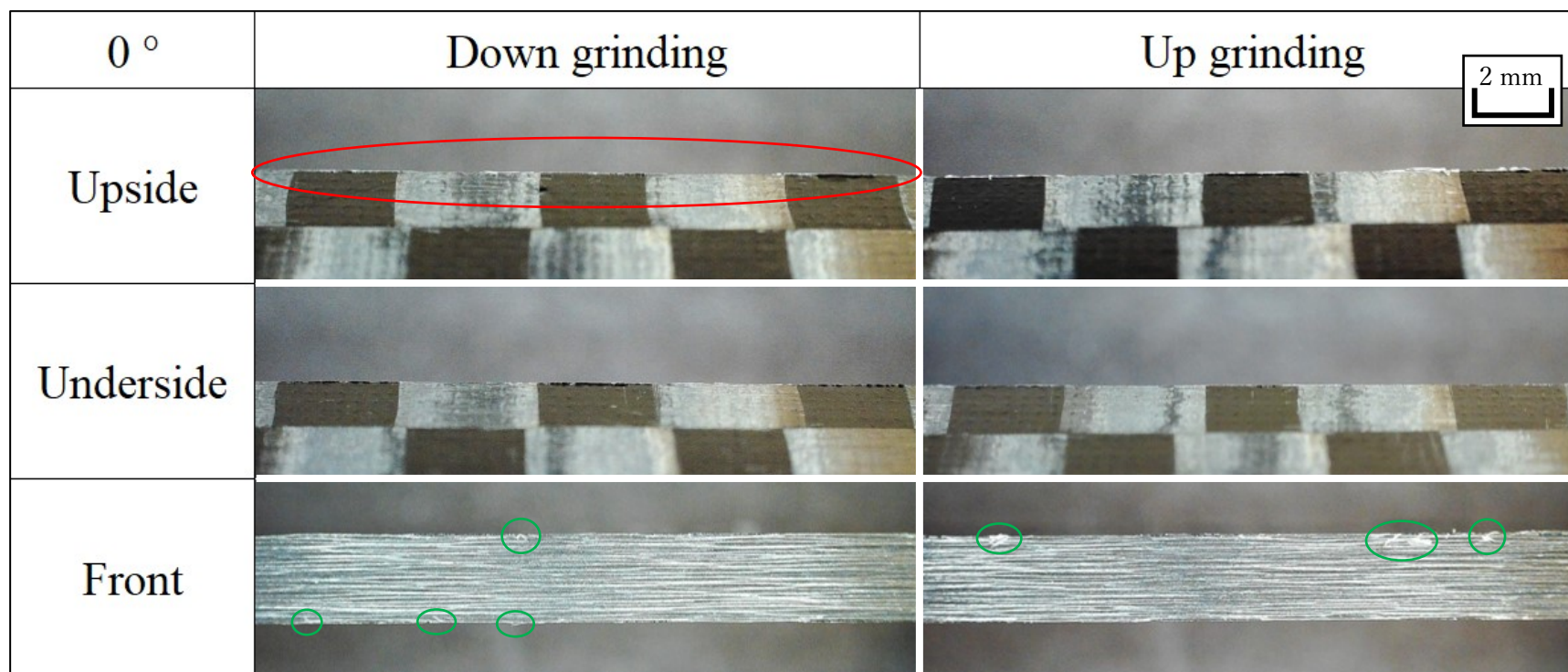


Fig.4.4 Grinding appearances ①-(A)



Fig.4.5 Up grinding, Perspective from (b)

(B) 往復研削時の切込み量変更の実験結果

実験 (A) で良い結果が出た下向き研削で行う。この実験によって工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件を決定する。

切込み量を 1.5 mm で一定の往復，往路 1.0 [mm] +復路 0.5 [mm] ，往路 1.25 [mm] +復路 0.25 [mm] の 3 パターンに分けて比較。

Table4.2 Processing conditions

Tool rotation speed	12,000 [rpm]
Total depth of cut	1.5 [mm]
Feed rate	0.2[mm/s]
Tool rotation direction	Down grinding

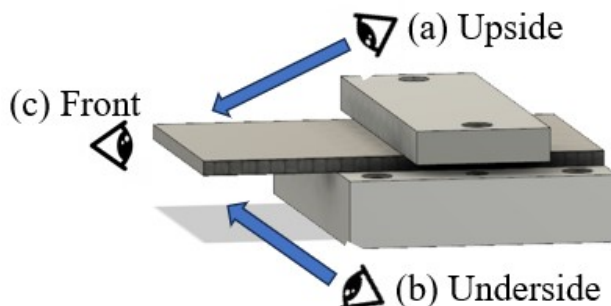


Fig.4.3 Observating direction

図 4.6 の 1.5 mm constant は実験 (A) 図 4.4 の 0° , Down grinding の実験結果と同じ写真である。

全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた。しかし，黄枠で示している，往路 1.0 [mm] +復路 0.5 [mm] と往路 1.25 [mm] +復路 0.25 [mm] の上エッジ部近傍の表面層においては，全体的に剥離して白くなっているのが見られた。

ケバやバリの削り残り（緑丸）は切込み量を分けた両条件で生じており，往路 1.0 [mm] +復路 0.5 [mm] が 3 カ所，往路 1.25 [mm] +復路 0.25 [mm] が 2 カ所であった。そしてどちらも 1.5 mm 一定と比較して削り残りが大きい結果となった。

これらの結果から，工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない条件は下向き研削の 1.5 mm 一定とし，実験 (C) を行った。

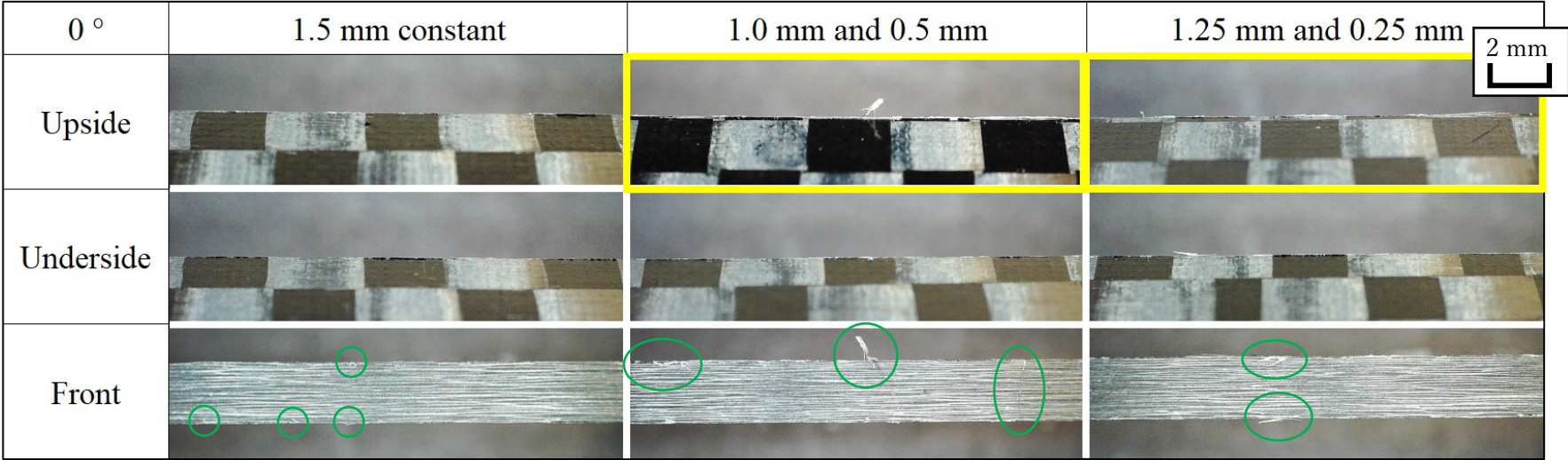


Fig.4.6 Grinding appearances ①-(B)

②工具を傾斜させた研削での実験

(C) 上向き研削，下向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30^\circ$ と①で決定した条件の実験結果

工具角度 0° でのケバやバリ，剥離の最も少ない下向き研削，1.5 mm 一定の条件と比較し，工具傾斜に優位性があるのかを観察する．

工具角度を 15, 30° の 2 パターン，工具回転方向を上向き研削，下向き研削の 2 パターンにし，計 4 パターンに分けて比較．

Tool rotation speed	12,000 [rpm]
Depth of cut	1.5 [mm]
Feed rate	0.2 [mm/s]

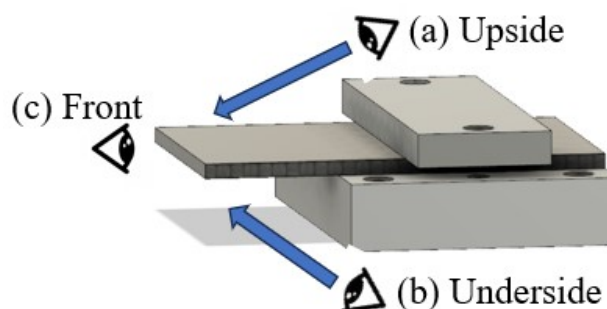


Fig. 4.3 Observing direction

図 4.7, 4.8 の 0° , Down grinding は実験 (A) 図 4.4 の 0° , Down grinding の実験結果と同じ写真である．

・工具角度 15° (図 4.7)

全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた．しかし，黄枠で示している， 15° ，下向き研削上エッジ部近傍の表面層においては，全体的に剥離して白くなっているのが見られた．

そして 15° の条件ではケバやバリの削り残り（緑丸）の無い実験結果が得られた．

・工具角度 30° (図 4.8)

全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた．しかし， 15° と同じように黄枠で示している， 30° ，下向き研削上エッジ部近傍の表面層においては，全体的に剥離して白くなっているのが見られた．

30° ，下向き研削ではケバやバリの削り残り（緑丸）が無い実験結果を得られたが，上向き研削では 1 カ所削り残りが生じていた．

工具角度 0° ，下向き研削，1.5 mm 一定の条件と比較して，工具を傾斜させた研削では削り残りが減少することが分かった．剥離については工具を傾斜させた下向き研削で加工面上エッジ部近傍の表面層において全体的に生じてしまう結果となった．このことから，工具を傾斜させた上向き研削が実験の目的通りケバやバリの削り残り，層間剥離の抑制に効果があることが分かった．次の実験 (D) では，さらに条件を分けて比較していく．

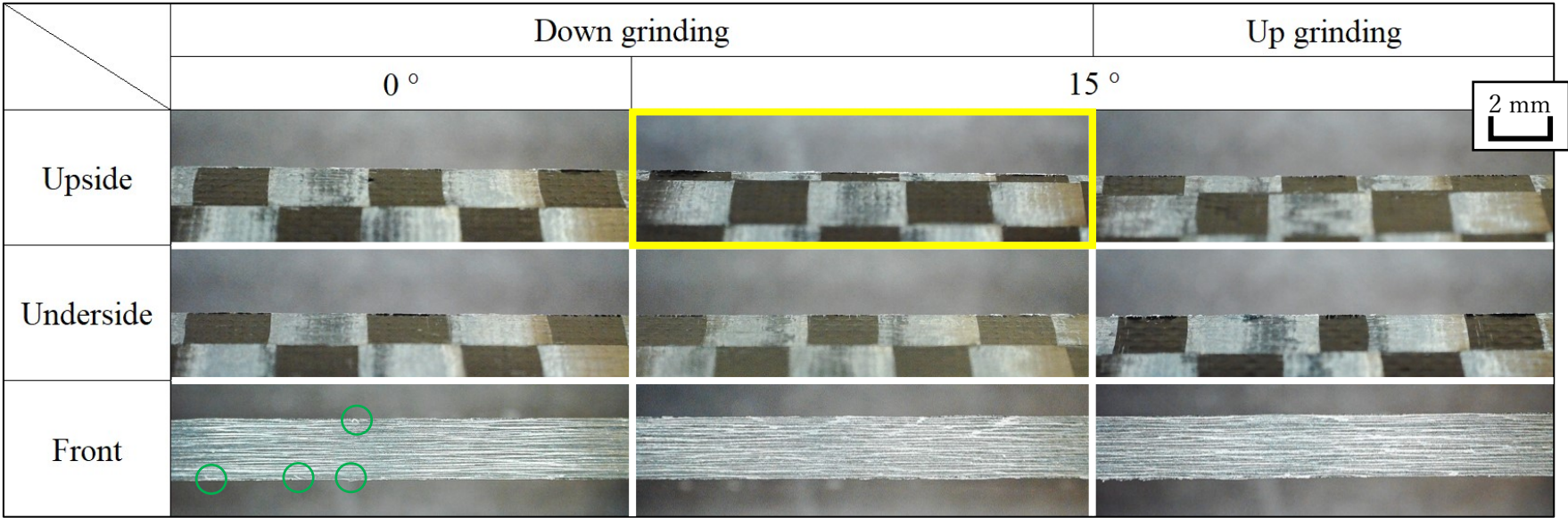


Fig.4.7 Grinding appearances ②-(C) 15 °

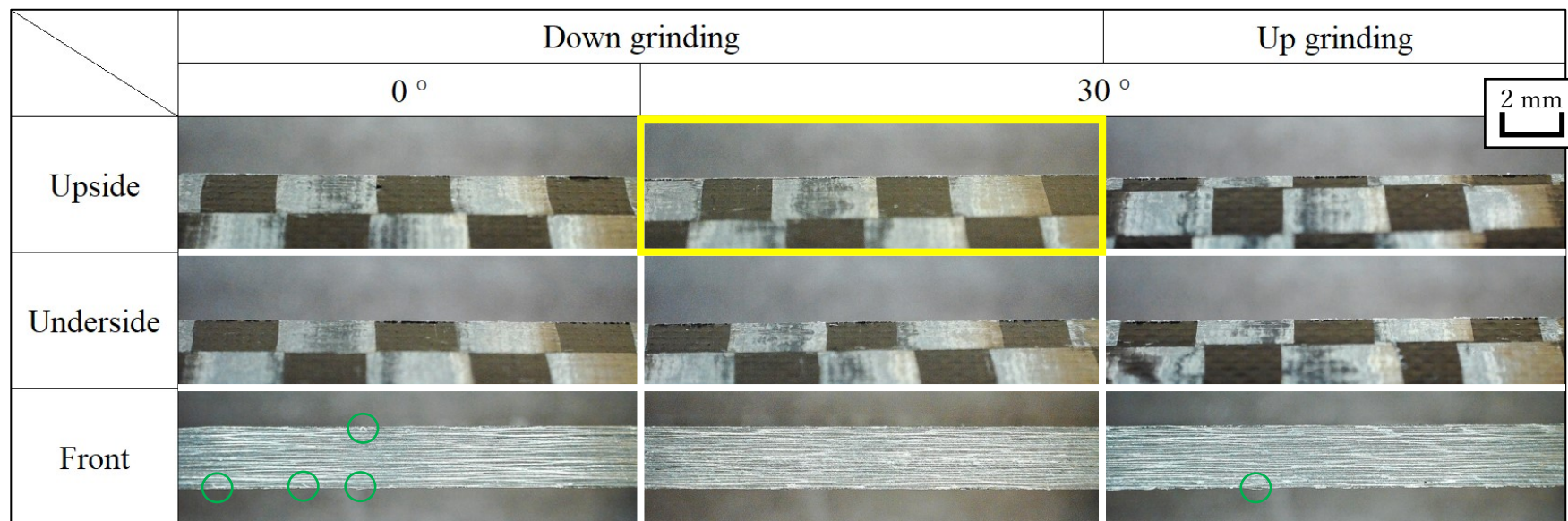


Fig.4.8 Grinding appearances ②-(C) 30 °

(D) 上向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30, 45^\circ$ 及び工具回転数 9,000, 12,000, 16,000 rpm の実験結果

工具角度を 15, 30, 45° の 3 パターン, 工具回転数を 9,000, 12,000, 16,000 rpm の 3 パターンにし, 計 9 パターンに分けて比較

Table 4.4 Processing conditions

Total depth of cut	1.5 [mm]
Feed rate	0.2 [mm/s]
Tool rotation direction	Up grinding

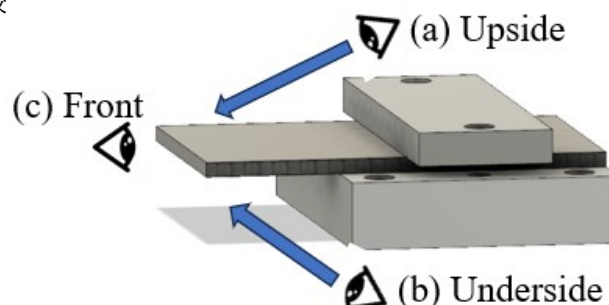


Fig. 4.3 Observating direction

・工具角度 15° (図 4.9)

図 4.9 の 12,000 rpm は実験 (C) 図 4.7 の 15° , Up grinding の実験結果と同じ写真である。全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた。しかし, 黄枠で示している, 9,000 rpm 上下エッジ部近傍の表面層においては, 全体的に剥離して白くなっており, 他の条件と見ても比較的大きいのが分かった。

削り残り (緑丸) は 9,000 rpm が 2 カ所, 12,000 rpm が 0 カ所, 16,000 rpm が 1 カ所であった。

・工具角度 30° (図 4.10)

図 4.10 の 12,000 rpm は実験 (C) 図 4.8 の 30° , Up grinding の実験結果と同じ写真である。全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた。しかし, 黄枠で示している, 9,000 rpm 上下エッジ部近傍の表面層においては, 全体的に剥離して白くなっているのが見られた。

削り残り (緑丸) は 9,000 rpm が 2 カ所, 12,000 rpm が 1 カ所, 16,000 rpm が 3 カ所であった。

・工具角度 45° (図 4.11)

全条件での加工面上下エッジ部近傍の表面層において部分的に剥離していた。しかし, 黄枠で示している, 全条件の下エッジ部近傍の表面層においては, 全体的な剥離により白くなっているのが見られた。

削り残り (緑丸) は 9,000 rpm が 3 カ所, 12,000 rpm が 1 カ所, 16,000 rpm が 2 カ所であった。

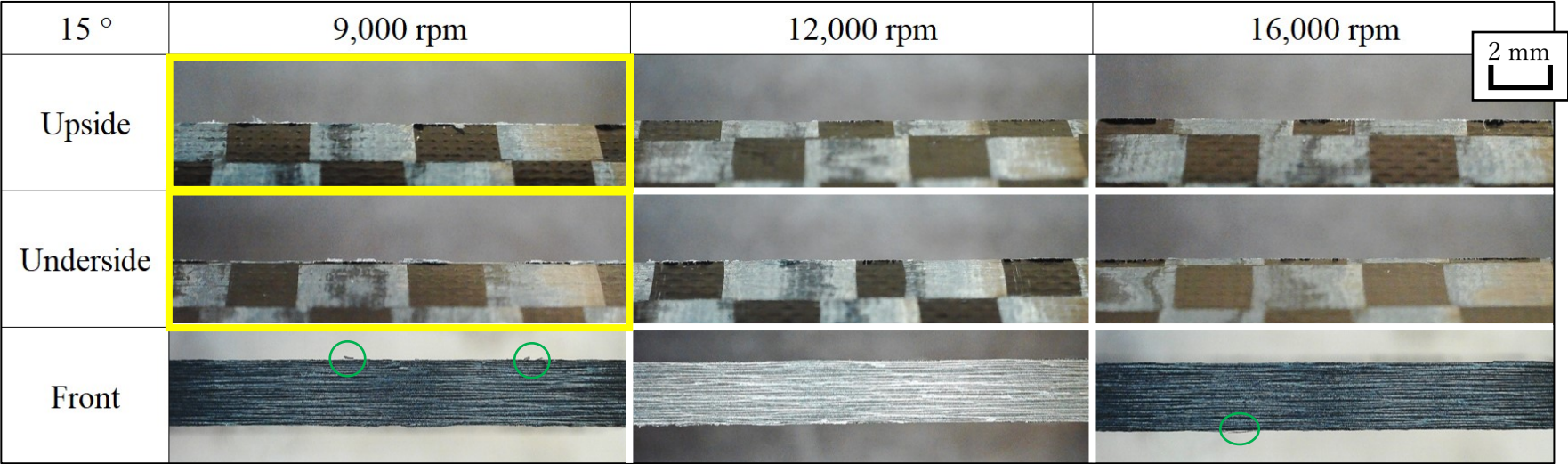


Fig.4.9 Grinding appearances ②-(D) 15 °

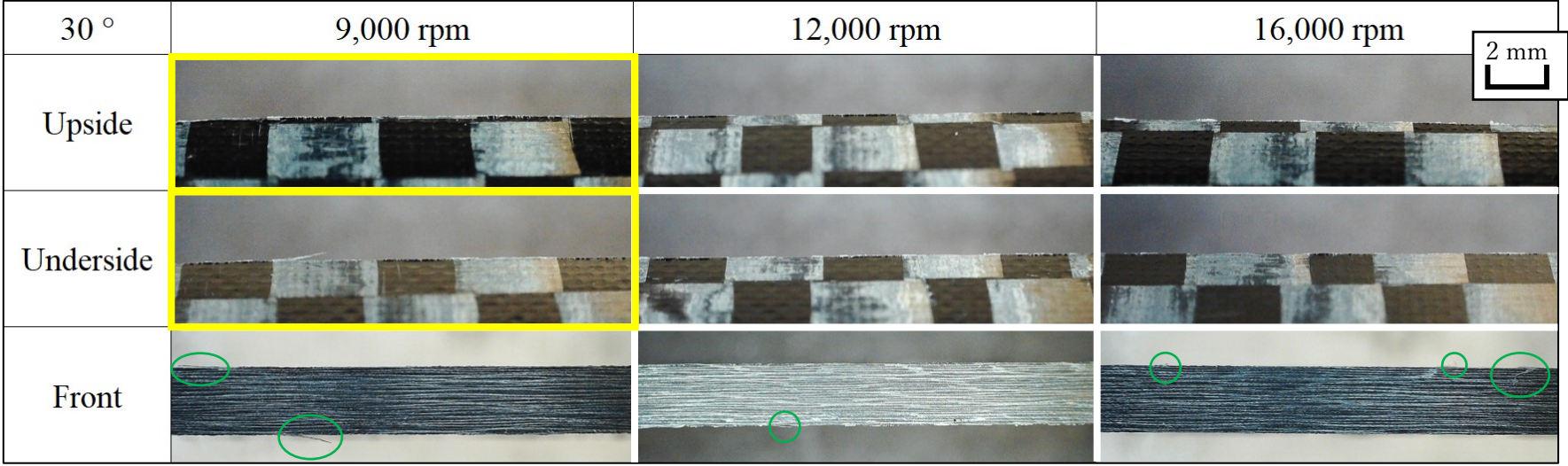


Fig.4.10 Grinding appearances ②-(D) 30 °

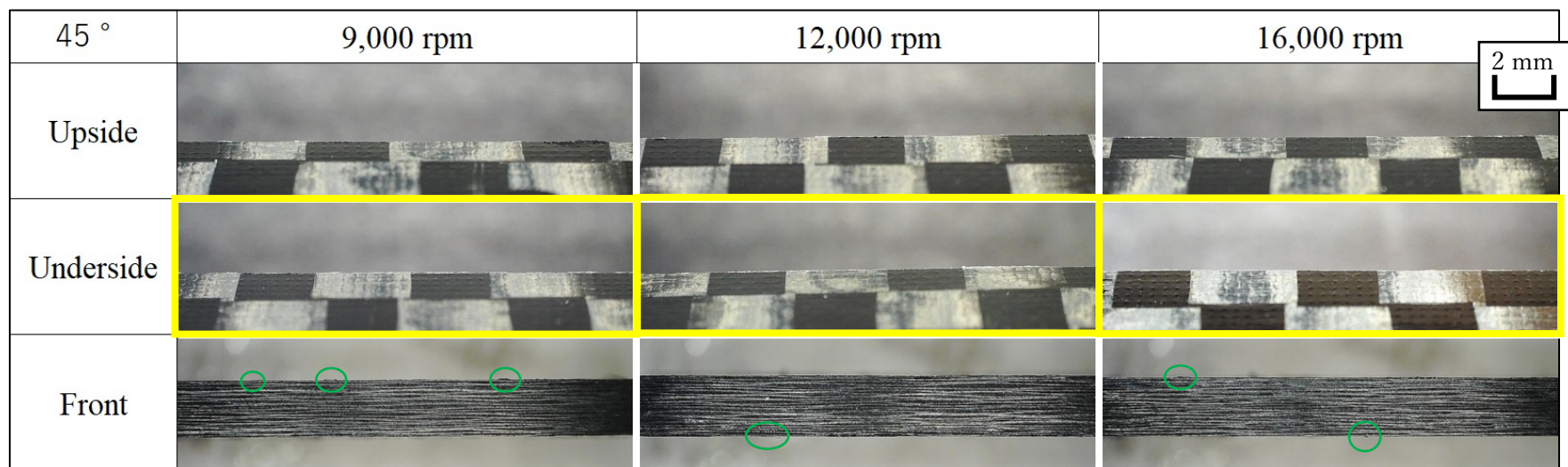


Fig.4.11 Grinding appearances ②-(D) 45 °

5 実験結果の考察¹⁵⁾

CFRP 表面の概略図を図 5.1 に示す。CFRP 表面は炭素繊維が垂直方向と水平方向に交互に並んでおり、これらは研削加工の実験結果に影響すると考えられる。特に、本研究での実験結果において、加工面上下エッジ部近傍表面層の部分的な剥離の多くは炭素繊維垂直方向で生じていた。これは緒言で加工が困難である要因として述べた、繊維が細かくしなやかであるため切断できない繊維が残るためと考えられる。炭素繊維の弾性変形の模式図を図 5.2 に示す。(a) 垂直方向の炭素繊維を研削する際、炭素繊維が大きく弾性変形するため削り残しやめくれ上がりが生じやすくなる。しかし、(b) 水平方向の炭素繊維を研削する際は、(a) よりも弾性変形が小さくなり、削り残しやめくれ上がりが生じにくくなる。

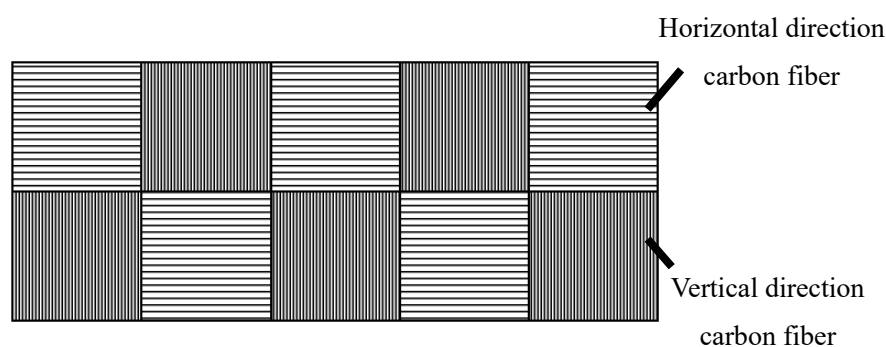


Fig.5.1 Schematic diagram of CFRP surface

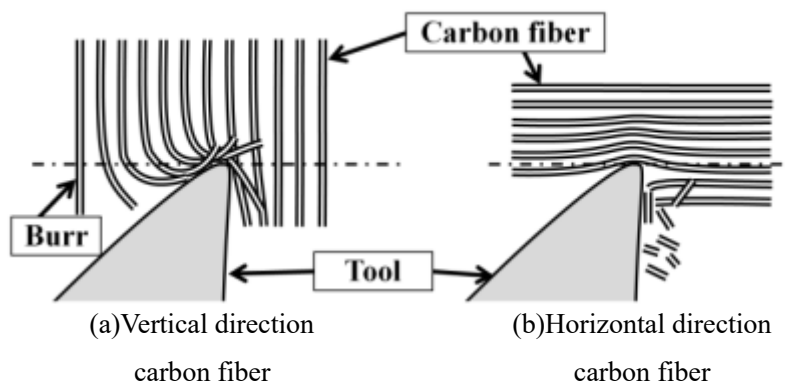


Fig.5.2 Elastic deformation of carbon fibers

①工具角度 0°の基礎的実験

(A) 切込み量が 1.5 mm で一定の往復研削における上向き研削，下向き研削の比較
加工条件は工具回転方向を上向き研削，下向き研削の 2 パターンに分けて比較した。

上向き研削の条件のみに，加工面下エッジ部近傍表面層の全体的な剥離が生じたが，これは炭素繊維水平方向が関係すると考えられる．上向き研削では水平方向の炭素繊維を引き剥がすような力が加わる研削をするため，削りきれなかった部分が剥離として残ってしまう可能性が高くなる．一方で下向き研削で水平方向の炭素繊維を研削する際は，繊維を引き剥がすのではなく試験片内に抑えながら削るため，剥離が生じる可能性が低くなると考えられる．

ケバやバリの削り残りでの大きな違いは見られなかったが，上向き研削の方がやや大きくなった要因としても，同様に繊維や樹脂を引き剥がす方向に力が加わるためだと考えられる．

これらの結果から，工具角度 0°では下向き研削の方がケバやバリ，剥離が生じにくい条件であると考えた．

(B) 往復研削時の切込み量変更の比較

加工条件は切込み量が 1.5 mm 一定の往復，切込み量を往路復路で分けた往路 1.0 [mm]+復路 0.5 [mm]，往路 1.25 [mm]+復路 0.25 [mm]の 3 パターンに分けて比較した．

切込み量を往路と復路で変化させた 2 条件のみに，加工面上エッジ部近傍表面層の全体的な剥離が生じ，ケバやバリの削り残りも大きい結果となった．これは復路の切込み量に関係すると考えられる．追加で切込み量 1.5 mm 往路（片道）のみの実験を行ったところ，実際に削れていたのは 1.4 mm 程で，加工面も往復で行った時より剥離や削り残りが生じていた．1.5 mm 一定の条件では剛性の問題から，往路で大部分を削りきり，復路で工具の弾性変形分の微小な切込み量を研削しているのが分かった．そして復路が 0.5, 0.25 mm の条件では，全体的な剥離が生じたことから，復路での切込み量が加工条件に対して大きいことが分かった．元々一般的な研削による仕上げ研削は 0.01~0.1 mm であり，これらの要因から，実験 (B) では切込み量一定の条件のみで，復路が 0.1 mm 程になり範囲に収まるため，比較した際に最も良好な加工面になったと考えられる．

これらの結果から，工具角度 0°でのケバやバリ，剥離が最も少ない条件は下向き研削，切込み量が 1.5 mm 一定であると考えた．

②工具を傾斜させた研削での実験

(C) 上向き研削，下向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30^\circ$ と①で決定した条件の比較

加工条件は工具角度を $15, 30^\circ$ の 2 パターン，工具回転方向を上向き研削，下向き研削の 2 パターンに分けて比較した。

工具角度 $15, 30^\circ$ とともに下向き研削の条件のみに，加工面上エッジ部近傍表面層の全体的な剥離が生じた。これは砥石円周方向の力に関係すると考えられる。元々本研究の狙いは，工具を傾斜させた上向き研削を行うことで，加工時に砥石円周方向の力を板厚中心方向，つまり層を抑えつける力として利用するというものであった。一方で下向き研削は逆向きの力，つまり層を剥離させる方向への力が加わるため，実験結果において全体的な剥離が生じたと考えられる。

工具を傾斜させた条件では 30° ，上向き研削にのみケバやバリの削り残りが生じ，他の条件では見られなかった。これは工具角度 0° の際には無かった，水平方向以外への砥石円周方向の力が生じることで，より研削力が増し，削り残りの減少に繋がったと考えられる。

これらの結果から，工具角度 0° よりも工具を傾斜させた方が，さらに上向き研削の方がケバやバリ，剥離の少ない条件であると考えた。

(D) 上向き研削の工具角度 $\theta = 15, 30, 45^\circ$ 及び工具回転数 9,000, 12,000, 16,000 rpm で比較

全ての工具を傾斜させた条件の 9,000 rpm において，加工面上下エッジ部近傍表面層（工具角度 45° は下エッジ部のみ）の全体的な剥離が生じた。これは条件の中で一番工具回転数の少ない 9,000 rpm に生じていることから，単純に研削力が足りていなかったことが原因だと考えられる。

ケバやバリの削り残りに関しても 12,000, 16,000 rpm の条件では少ない傾向にあり，工具角度 15° が最も少なかった。これらの結果は，工具角度の変化によって砥石円周方向の力が加工面上下エッジ部近傍を板厚中心方向に抑えつける力として働き，さらに工具角度 $30, 45^\circ$ と比較して試験片への砥石の接触長さが小さくなり，研削抵抗が減ったためだと考えられる。一方で工具角度 45° の 12,000, 16,000 rpm の加工面下エッジ部近傍表面層の全体的な剥離が生じたことについても，砥石の接触長さが最も大きいため，研削抵抗が増え，加工面に悪影響がでたのではないかと考えられる。

したがって，工具を傾斜させた上向き研削の条件では工具角度 15° ，工具回転数 12,000, 16,000 rpm が最もケバやバリ，剥離の少ない条件だと考えられる。

6 結言

以下に本研究で得られた知見を示す.

- ・工具角度 0° では下向き研削, 切込み量が 1.5 mm で一定の往復の条件が最もケバやバリ, 剥離が少ない. 加工面上下エッジ部近傍の繊維と樹脂を試験片内に抑える方向となる下向き研削であること, 往路で大部分を削りきり復路で工具の弾性変形分である微小な切込み量の最終的な仕上げ研削を行ったためだと考えられる.

- ・工具角度 0° と比較して, 工具を傾斜させた上向き研削を行った方がケバやバリが少なかった. 工具を傾斜させ上向き研削を行うことで加工時に砥石円周方向の力が加工面上下エッジ部近傍を板厚中心方向に抑えつける力として働いたためだと考えられる.

- ・工具角度 15° の $12,000$, $16,000\text{ rpm}$ の上向き研削がケバやバリ, 剥離が最も少なかった. 工具角度の変化によって砥石円周方向の力が加工面上下エッジ部近傍を板厚中心方向に抑えつける力として働き, さらに工具角度 30 , 45° と比較して試験片への砥石の接触長さが小さくなり, 研削抵抗が減ったためだと考えられる.

参考文献

- 1)平松徹：「トコトンやさしい炭素繊維の本」，(2012)
- 2)深信彦：「複合材料が一番わかる」，(2016)
- 3)全国地球温暖化防止活動推進センター：「日本の部門別炭素排出量（2019 年度）」，
(<http://www.jccca.org/download/13335>)
- 4)強化プラスチック協会：「基礎からわかる FRP—繊維強化プラスチックの基礎から実用まで」，(2016)
- 5)小松隆：「CFRP による自動車軽量化設計入門」，(2017)
- 6)柳下福蔵：「CFRP の切削加工」，(2014)
- 7)金子純一，須藤正俊，菅又信：「基礎機械材料学」，227~229 頁，(2011)
- 8)日刊工業新聞社：「機械技術 CFRP など難削材加工の現状と課題」，
Vol.66, No.12, 18~23 頁 (2018)
- 9)日刊工業新聞社：「機械技術 CFRP など難削材加工の現状と課題」，
Vol.66, No.12, 29~34 頁 (2018)
- 10)吉浦弘樹：「ウォータージェット加工」，(2020)，
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/86/7/86_537/_pdf/-char/ja)
- 11)M. El-Hofy, M. O. Helmy, G. Escobar-Palafox, K. Kerrigan, R. Scaife, H. El-Hofy :
「Abrasive Water Jet Machining of Multidirectional CFRP Laminates」，(2018)，
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117310508>)
- 12)京セラ株式会社 森田翔：「CFRP のエンドミル加工による表面粗さの研究」，(2019)
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2019S/0/2019S_207/_pdf/-char/ja)
- 13)仲間元，原田祥久，鈴木隆之，新納弘之，寺本徳郎，
「炭素繊維強化複合材料のレーザー加工による力学特性評価」(2014)
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmeibaraki/2014.22/0/2014.22_169/_pdf/-char/ja)
- 14)WANG XIN：「CFRP 板の超音波振動トリミング加工装置の開発」，
三重大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 令和 5 年度 修士論文.
- 15)熊本大院 坂本重彦，永田福人，
「CFRP 板のエンドミル加工に関する研究」，(2013)
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013A/0/2013A_311/_pdf/-char/ja)

謝辞

本論文の作成にあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さった高橋 裕 教授に深く感謝致します．また本研究を遂行するにあたり，終始丁寧なるご指導を賜りました中西 栄徳 准教授，ならびに論文作成にあたり御査読いただきました尾崎 仁志 助教に深く感謝致します．さらに実験を遂行するにあたり多くの御協力をいただきました中川 浩希 技術職員ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝致します．

最後に，幾多の御協力をいただきながら，ここに御氏名掲載できなかった方々に対してその失礼をお詫びすると共に，謹んで御礼申し上げます．