

修士論文

液体窒素雰囲気中における ドリル・砥石一体型工具を用いた CFRP の穴あけに関する基礎的検討

指導教官 中西 栄徳 准教授

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

本鍋田 幸太郎

目次

1 緒言	1
2 加工方法	3
2.1 加工の概要	3
2.2 ステップ加工	4
2.3 材料	5
2.4 実験装置	5
3 ドリル加工時の条件の検討	8
3.1 実験目的	8
3.2 実験条件	9
3.3 実験結果と考察	10
4 砥石加工時の条件の検討	12
4.1 実験目的	12
4.2 実験条件	14
4.3 加工穴と砥石の観察	14
4.4 スラスト力の比較	18
4.5 加工穴精度	23
5 結言	25
参考文献	26
謝辞	27

1 緒言

炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP）とはFRPの一種であり、プラスチック（樹脂）を母材(マトリックス)とし、そこに炭素繊維（カーボンファイバー）を強化材として加えた、複合材料（コンポジット）である。CFRPの主な特徴としては軽量、比強度が高いなどがあり、もともとはゴルフシャフトやテニスラケット、釣り竿などに用いられてきた。しかし、CFRPにはその他にも材料として優れた特徴が多くあり、近年では航空宇宙、自動車、医療などの分野にも広く活用されている。例えば自動車産業ではCFRPの軽量、高強度という特徴に加え振動減衰性という特徴も注目され、F1レーシングカーのボディをはじめ、乗用自動車への量産展開も期待されている¹⁾。また、CFRPは環境問題の改善に大きな効果があると期待されている。1つは、地球温暖化の原因である二酸化炭素排出量の削減である。現在、日本の二酸化炭素排出量の約20%は自動車によるものである²⁾。そこで、CFRPを用いることにより自動車が軽量化され、燃費の向上が進めば二酸化炭素排出量も減少すると考えられる。もう一つは風力発電への活用である。現在、日本の電力は火力発電に大幅に偏っており、石炭、石油などを燃焼させているため、二酸化炭素の排出量が多い。そこで、風力発電などのクリーンエネルギーの発展が必要である。CFRPを風力発電のブレードに使用することでブレードを大きくすることができる。また、風向の変化に伴いブレードの方向も変えなければならないが、その際に必要なエネルギーや、ブレーキに必要なエネルギーも少なくすることができる³⁾。このようにCFRPの実用例は多くあり、これからも広い分野での活用が期待される。

しかし、CFRPは穴あけ加工などの二次加工が必要となるが、難削材であるため様々な問題がある。CFRPには母材となる樹脂の違いによって熱硬化性のもの

（CFRTS）と熱可塑性のもの（CFRTP）がある。本研究ではCFRTPに着目したが、CFRTPの場合、切削熱により樹脂が溶け、工具に溶着する。さらに、CFRPは積層構造であり、横方向には強度があるが、縦方向には樹脂の接着力のみで保持しているため、工具で縦方向に力を加えると層間剥離が起こりやすい。また、複合材料であるため加工穴出口側にバリ（繊維の切り残し）が発生しやすい。現在のCFRPの穴あけ加工には、ドリル加工、エンドミル加工、AWJ加工などがある。ドリル加工、エンドミル加工は工具の摩耗が早く、穴出口の剥離やバリが発生しやすい、AWJ加工は装置と研磨剤が高価、剥離やバリが発生するといったような問題がある⁴⁾。ゆえに、それぞれドリル加工後に砥石での仕上げ加工が必要となる場合がある。

本研究では、CFRTPの穴あけ加工について、これらの問題を解決するため、図1.1のようなドリルと砥石の一体型工具の作成を目標とした。また現在は、ドリルと砥石別々で実験し、ドリルの直径や砥石の形状、加工時の回転数などの検討を行った。



Fig. 1.1 Integrated drill with grinding tool

2 加工方法

2.1 加工の概要

本研究で行う穴あけ加工は、液体窒素雰囲気中におけるステップ加工である。CFRPの穴あけ加工ではドリルによる穴あけ加工後、砥石で仕上げ加工をするという流れが一般的である。そこで、ドリル・砥石一体型工具で穴あけを行うことで、ドリル加工と仕上げ加工を1度に行うことができ、加工工程を省略することができると考えた。現在は一体型工具作成に向け、基礎データを収集しており、図2.1.1のようにドリルで穴あけした後、砥石に付け替えて加工穴を仕上げるという方法で実験している。また、工具には比較的安価なHSSドリルとGC砥石を使用することで、高価な専用工具を必要とするCFRPの穴あけ加工の低コスト化も実現することができる。そして、CFRTPの穴あけ加工では、加工熱により樹脂が軟化して工具に溶着することが予想される。そのため、冷却油剤として液体窒素を用いた。液体窒素は沸点が77K (-196°C)と非常に冷たい液体であるため、冷却油剤として十分な冷却効果があり、加工熱の低減が期待できる。液体窒素中に5分以上浸して十分に冷却した時、樹脂が硬化し研削抵抗が大きくなることが研究で示されている^{5) 6)}。ため、実験時には材料と工具を5分間液体窒素に浸した後加工を始めた。また、室温では常時沸騰していることから、切り屑の粉塵化防止と排出性の向上にも効果が期待できる。さらに、冷却効果と切り屑の排出性を向上させるためにステップ加工を用いた。

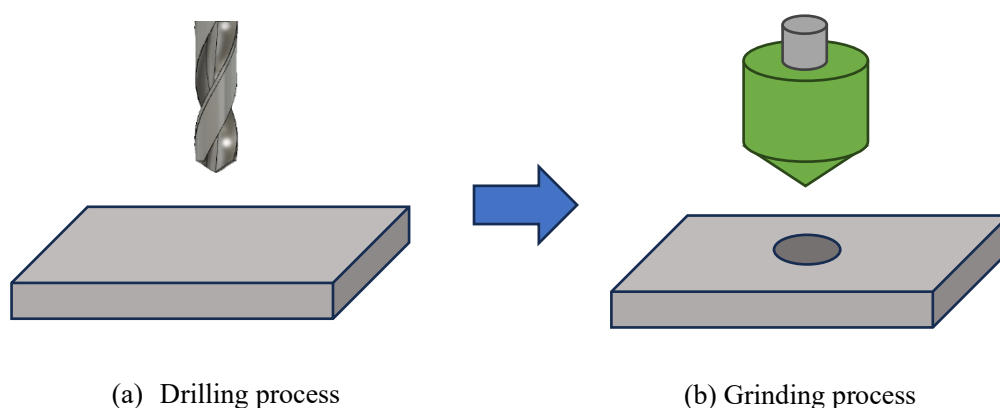


Fig. 2.1.1 Experimental method

2.2 ステップ加工

本研究では、加工中の冷却効果と切り屑の排出性を十分に持たせるために、ステップ加工を用いた。ステップ加工とは図 2.2.1 に示すような加工方法である。工具底面を初期位置 R 点に置き、1 回目は R 点から切り込み量 Q だけ下に切り込み、一度 R 点に戻った後、加工面まで戻る。2 回目は加工面から切り込み量 Q だけ下に切り込み、一度 R 点に戻った後、また加工面まで戻る。これを繰り返し、R 点から加工面までの距離が 1mm 超えたところ (n 回目) からは切り込み量 Q だけ下に切り込んだ後、1mm 上昇し、また 1mm 下降して加工面に戻るといような加工を行う。初期位置 R 点から 7.5mm 下降した時、プログラムが終了し、材料への穴あけが完了する。加工中は工具が 1 回 1 回材料から離れるため、液体窒素が流れ込み、冷却効果と切り屑の排出性が得られる。

本研究では、切り込み量 Q を 0.05mm、切削送り速度 0.05mm/s、早送り速度 2mm/s と制御し加工を行った。ステップの制御にはマイコン (Arduino NANO) を使用した。

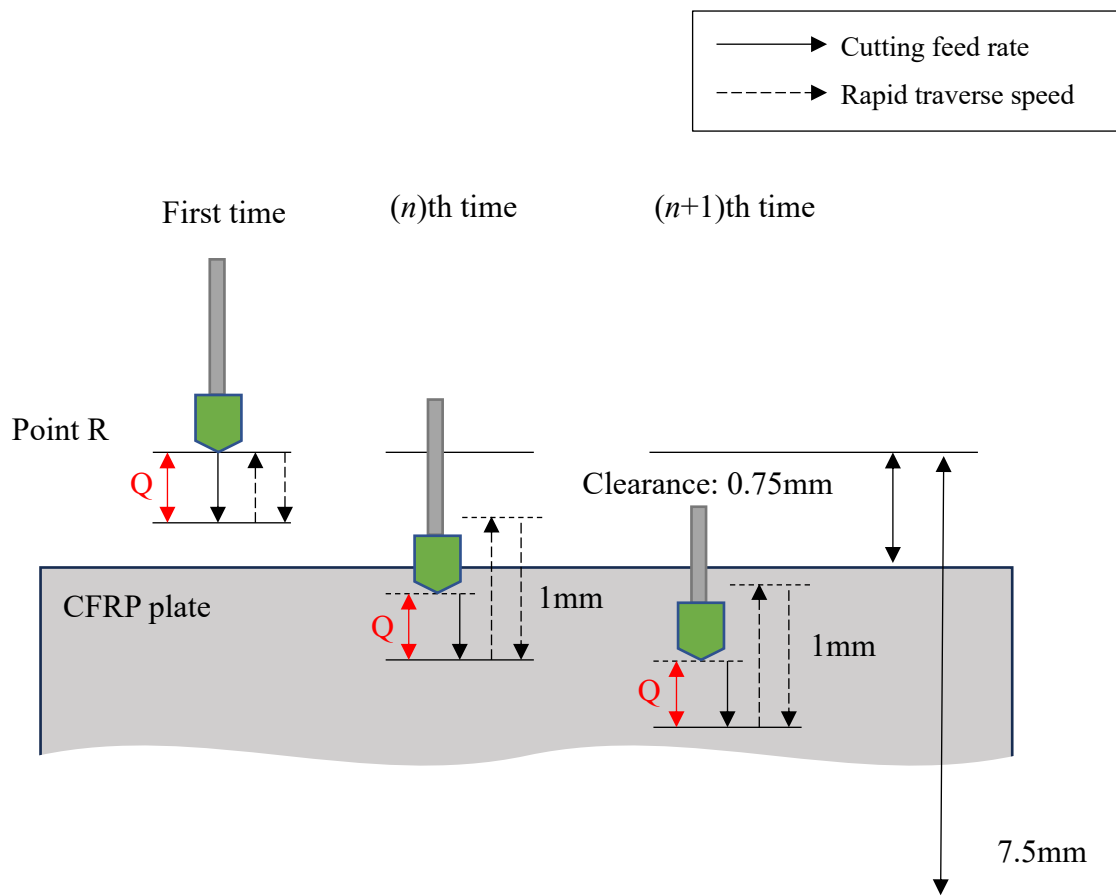


Fig. 2.2.1 Move of tool in step processing

2.3 材料

本研究では板厚 2.0mm, 大きさ 20mm×25mm の母材に PC (ポリカーボネード) を使用した CFRTP を用いた。加工熱が高くなることが予想されるので, PE (ポリエチレン) や PP (ポリプロピレン) などの汎用プラスチックよりも, 機械的強度や耐熱性に優れたエンジニアリングプラスチックの中で特に耐熱性に優れた PC を選定した。PC の耐熱温度は 120°C~130°C⁷⁾ である。

2.4 実験装置

本実験で使用した実験装置を図 2.4.1 に示す。電動ドリル (0~12,000rpm) を有効ストローク 300mm のステッピングモータ (TEN-HIGH NEMA17) の固定具に装着してステップ加工を行った。ただし, ドリルが 9,000rpm を超えると装置が強く振動するため, 9,000rpm 以上での実験は行っていない。工具はドリルチャックに取り付ける。電動ドリルの回転数の測定には非接触型レーザー式デジタルタコメーター (FOCUSMART FMTDT2234C) を用いた。加工層の材料には液体窒素に耐えられるテフロンを採用し, 図 2.4.2 のようにその中に材料を取り付けた。また, 加工荷重を測定するために, リニアブッシュを取り付けたアルミ板に加工層を固定し, アルミ板を支える形でロードセル (0~500N) を取り付けた。さらに, 実験中の工具の変位を測定するため, ポテンショメータ (0~20mm) を取り付けた。実験中マイコンは PC と繋がっており, 加工荷重と加工時間, 工具の変位を計測することができる。2.1.1 で用いたステップ回数 n は液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display : LCD) に表示させた。ドリルの回転速度はロータリスイッチで変更した。

加工の流れとしては, 工具を初期位置に設定し, その状態のまま液体窒素を注ぎ込み, 5 分間材料と工具を冷却する。このときの荷重を初期荷重とする。その後ステップ加工を開始し, ポテンショメータの測定値が初期位置から 7.5mm 進んだところでプログラムが終了する。

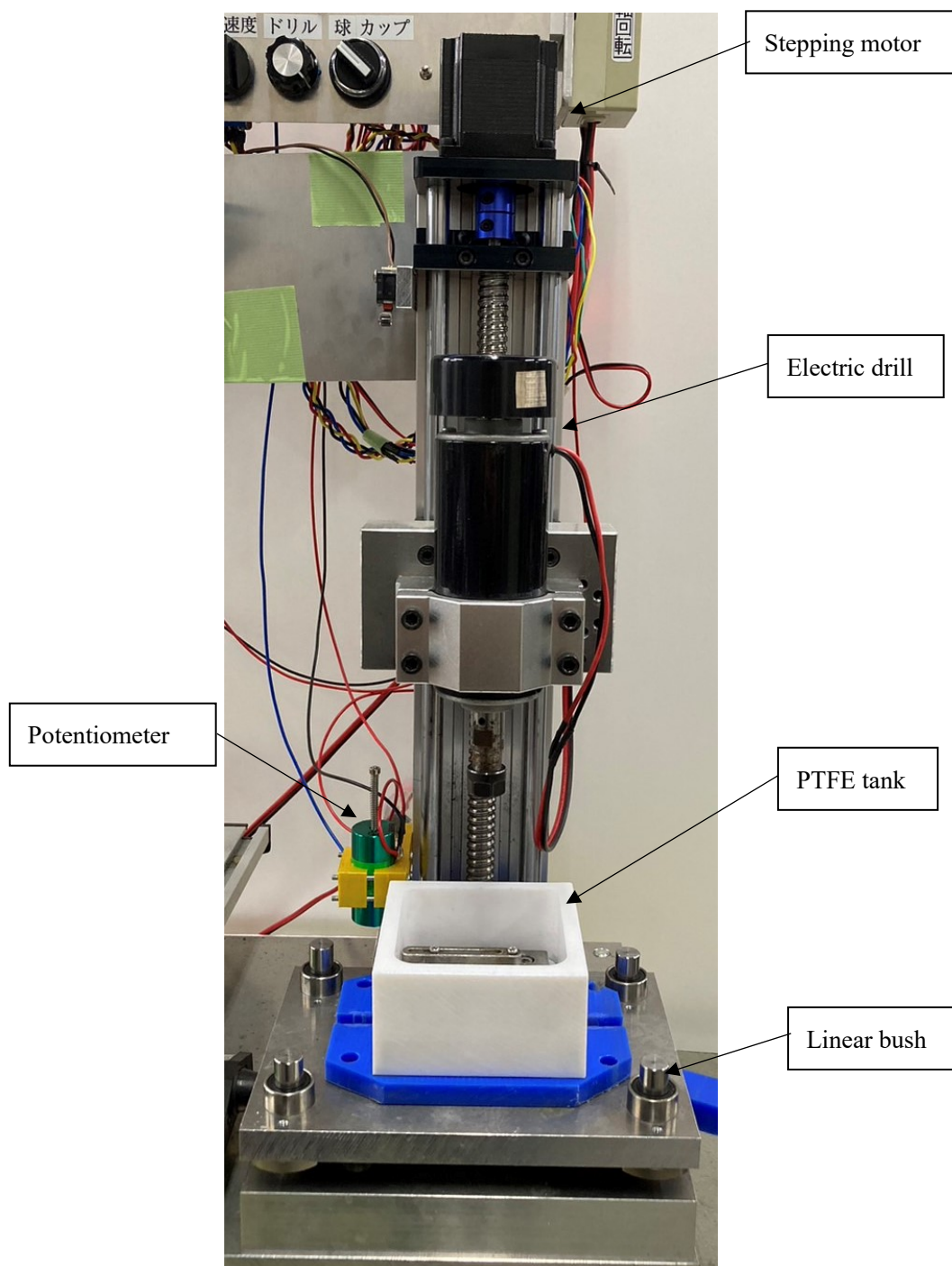


Fig. 2.4.1 Experimental equipment

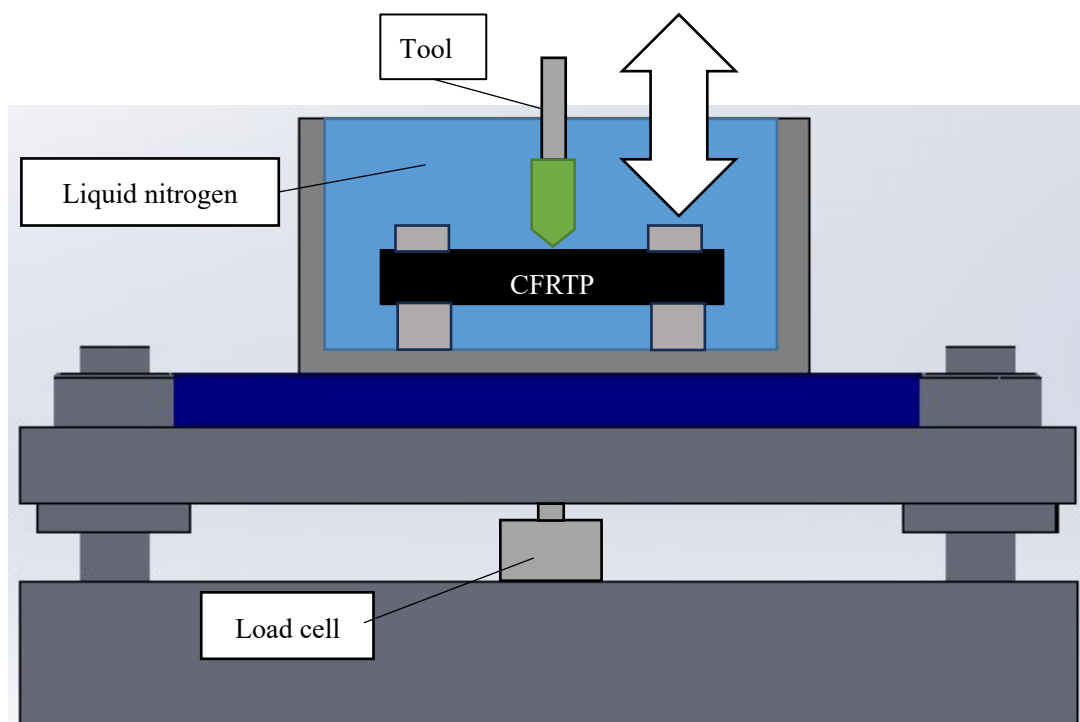


Fig. 2.4.2 Processing tank

3 ドリル加工時の条件の検討

3.1 実験目的

CFRP は炭素繊維と樹脂の複合材料であるため、一般的なドリルで穴あけ加工を行うと加工穴出口側にバリが発生しやすい。図 3.1.1 に直径 4.5mm の HSS ドリルを用いて穴あけした加工穴の出口側の様子を示す。この図からわかるように、本研究の条件においてもドリル加工時点で大きくバリが発生してしまっている。一般的に仕上げ加工時の研削代は少ない方が好ましいため、ドリル直径はできるだけ砥石直径（本研究では 6mm）に近い値にしたいが、このバリの影響範囲が砥石直径を超えてしまうと、仕上げ加工でバリをすべて取り除くことができなくなってしまう。そこでバリの影響範囲を測定し、砥石直径以内に収まるような最適なドリル直径及び回転数の検討を行った。

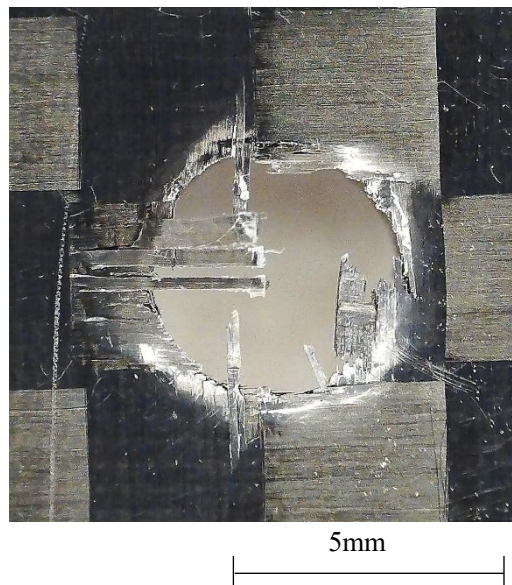


Fig. 3.1.1 Exit side of machined hole by using a drill in 4.5 diameter

3.2 実験条件

下記の条件でドリル穴を開け，図 3.2.1 のように加工穴と同心円になるように，出口側に発生した最も大きなバリの影響範囲を測定した。

- ・ドリル

材質：HSS

直径：3.0, 3.5, 4.0, 4.5mm

- ・回転数：1,000, 3,000, 6,000, 9,000rpm

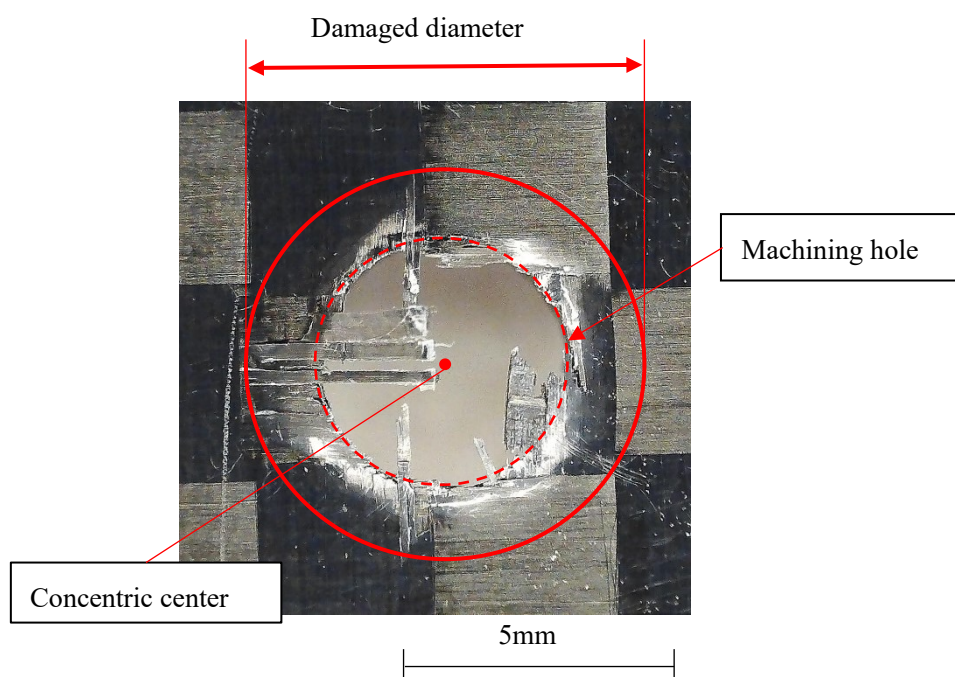


Fig. 3.2.1 Measuring method of damaged diameter

3.3 実験結果と考察

ドリル加工時のバリの影響範囲直径を測定した結果を図 3.3.1 に示す。また、回転数 1,000rpm では z 軸方向のトルクが足りず、加工中にステッピングモータが脱調している様子が見られ、試験片を貫通させることができなかった。

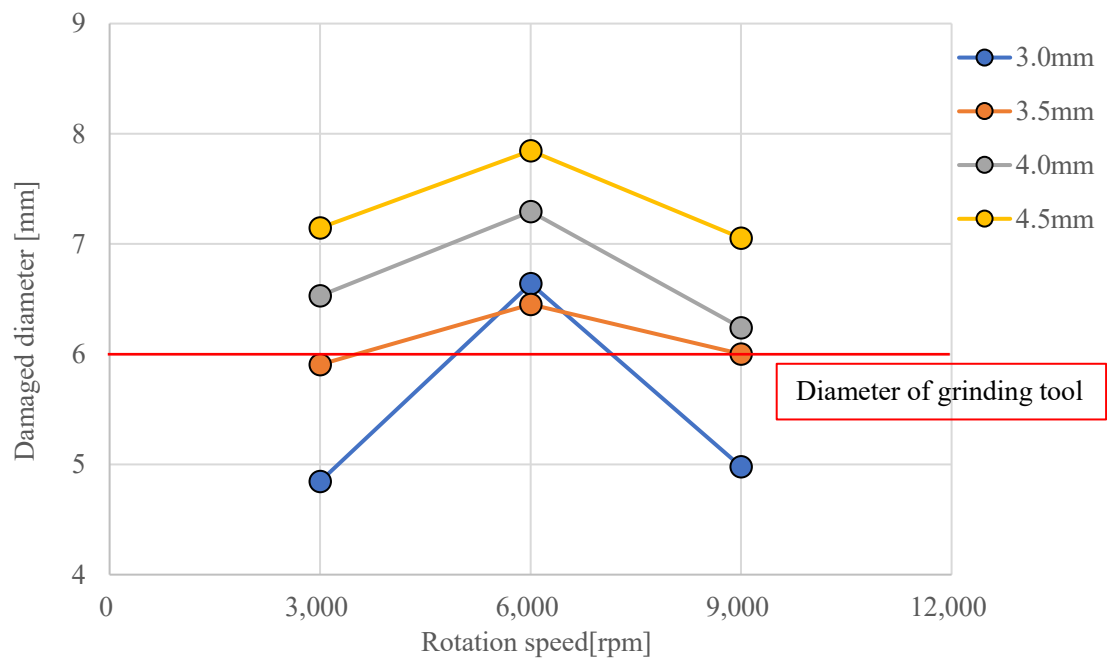


Fig. 3.3.1 Damaged diameter of burrs and delamination

図 3.3.1 よりどのドリル直径においても、回転数 6,000rpm でバリの影響範囲が大きくなっていることがわかる。これは回転数 6,000rpm が装置の固有振動数に近い値であり、工具が大きく振動したためだと考える。また、バリの影響範囲が砥石直径 6mm 以内に収まる条件は、ドリル直径 3.0, 3.5mm の回転数 3,000, 9,000rpm である。しかし、本研究では、ドリル要因のバリが、砥石での仕上げ加工後にも発生してしまうという状況は確実になくしたい。そのため、以降の実験では余裕をもってドリル直径 3.0mm で回転数 3,000rpm 及び 9,000rpm とした。また、ドリル直径 3.0mm で加工した時の最大スラスト力の比較を図 3.3.2 に示す。スラスト力とは試験片に対して垂直方向に加わる力であり、積層構造である CFRP において、バリや層間剝離を発生させる要因である。各回転数の最大スラスト力は 3,000rpm : 60N, 6,000rpm : 53N, 9,000rpm : 42N であり、回転数が高くなるほどスラスト力は低くなっていることがわかる。したがって、ドリル加工時においては、直径 3.0mm, 回転数 9,000rpm が最適な条件であるといえる。

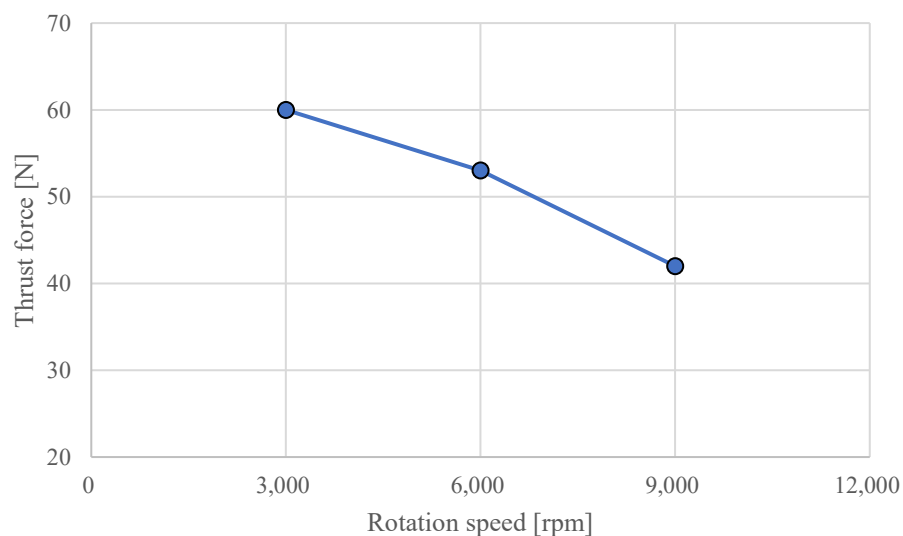


Fig. 3.3.2 Thrust force during processing by 3.0mm drill

4 砥石加工時の条件の検討

4.1 実験目的

ドリル直径 3mm, 回転数 3000, 9000rpm で加工した穴に対して, 図 4.1.1 のような軸付き砥石を用いて同じ回転数で仕上げ加工を行った. 軸付き砥石は直径 6mm, 高さ 10mm, 粒度 #60, 砥粒 GC (緑化炭素ケイ素) の円筒型砥石を卓上ボール盤とやすりを用いて自分で成形した. 成形方法は図 4.1.2 に示すように卓上ボール盤に円筒型砥石を取り付け, 回転させながらやすりを用いて少しずつ削った. このとき, 砥石の先端角度 θ を 120, 90, 60° と決められるように治具を作成した. 粒度は加工中の切り屑の排出性を少しでも良くするために低いものを選定した. 砥粒にはアルミナや炭化ケイ素などの一般砥粒とダイヤモンドや CBN (立方晶窒化ホウ素) などの超砥粒に分類されるが, 比較的安価である一般砥粒の中で, 熱伝導と硬度に優れた GC を選定した.

この実験では砥石先端角度及び回転数が, 加工穴やスラスト力及び加工穴精度に与える影響について調べた.

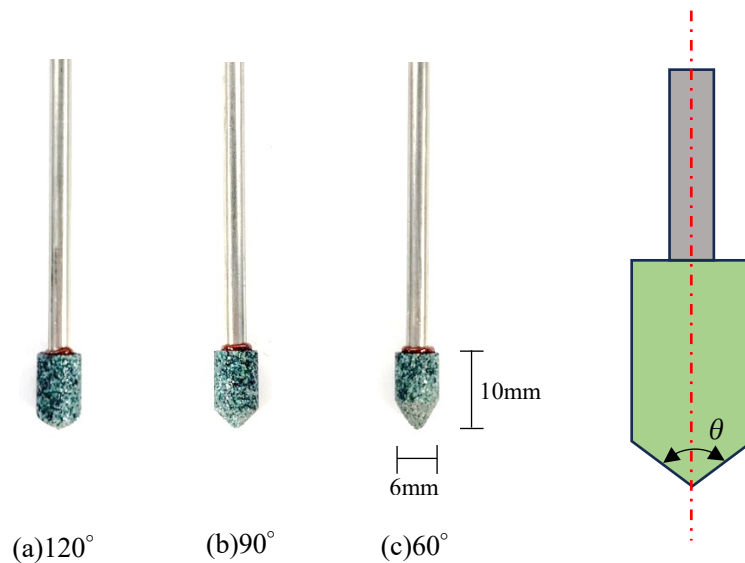


Fig. 4.1.1 Grinding tool

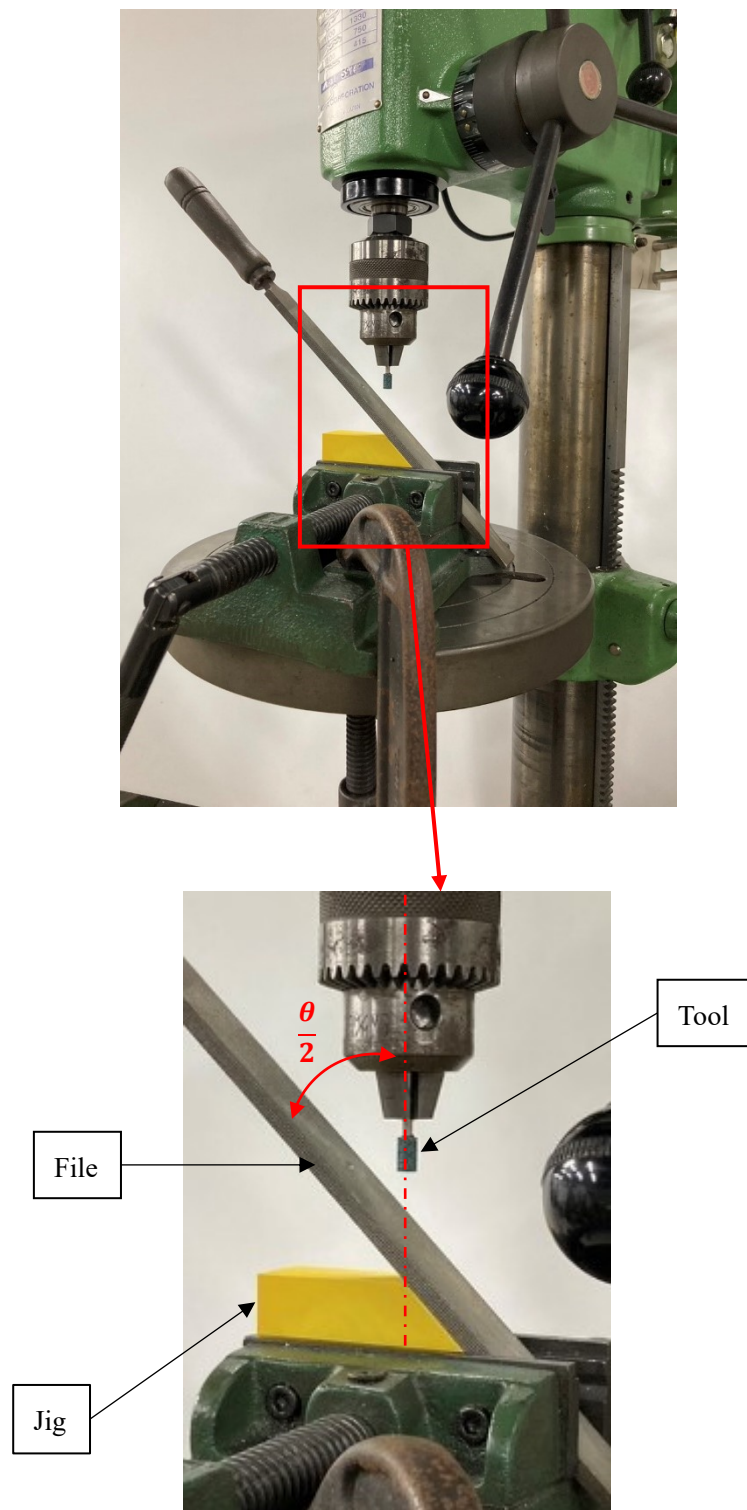


Fig. 4.1.2 Grinding tool molding method

4.2 実験条件

下記の条件で実験を行った.

- ・ドリル

材質：HSS

直径：3.0mm

- ・砥石

材質：GC

直径：6mm

粒度：#60

先端角度：120, 90, 60°

- ・回転数：3,000, 9,000rpm

4.3 加工穴と砥石の観察

回転数 3,000rpm の加工穴の様子を図 4.3.1 に、回転数 9,000rpm の加工穴の様子を図 4.3.2 に示す。また、加工後の砥石の様子を図 4.3.3 に示す。これらの結果より、回転数 3,000rpm ではどの先端角度においても砥石への溶着は見られず、比較的きれいな加工穴を開けることができた。一方、回転数 9,000rpm ではどの先端角度においても砥石への溶着が見られ、加工穴出口側で大きくバリや層間剥離が発生してしまった。この原因としては、回転数が高くなることで加工時の摩擦熱が発生しやすくなり、樹脂が溶融してしまったためであると考えられる。砥石へ溶着してしまうと、研削能力が低下するため加工穴出口側に大きくバリが発生してしまった。また、回転数 3,000rpm において、先端角度 120° のときは加工穴出口側全体に小さなバリが見られる。一方、先端角度 90, 60° においては比較的バリが少なく、120° に比べてきれいな穴を開けることができている。これはスラスト力が要因だと考えており、次でスラスト力の比較を行った。

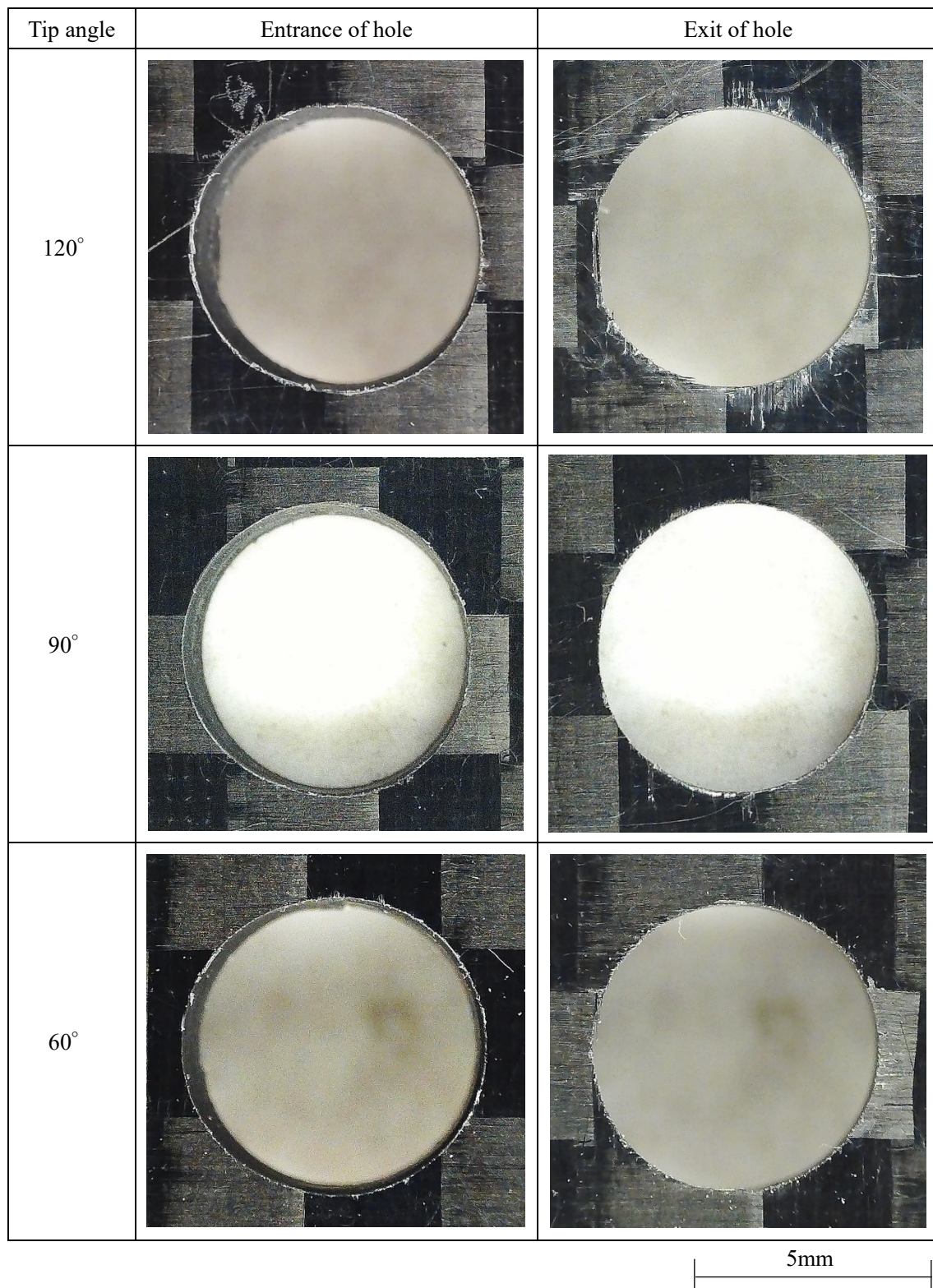


Fig. 4.3.1 Appearance of machined hole (3,000 rpm)

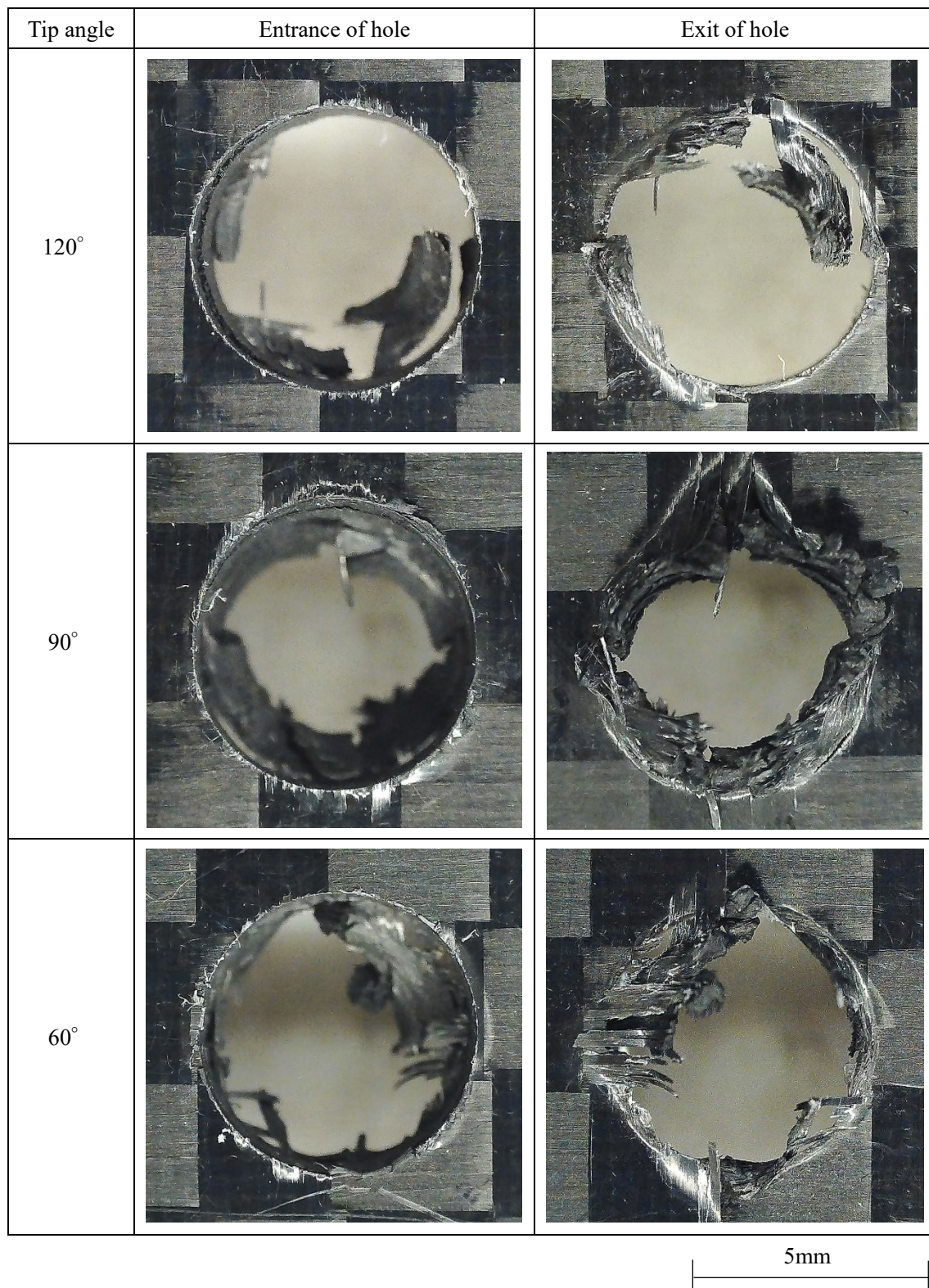


Fig. 4.3.2 Appearance of machined hole (9,000 rpm)

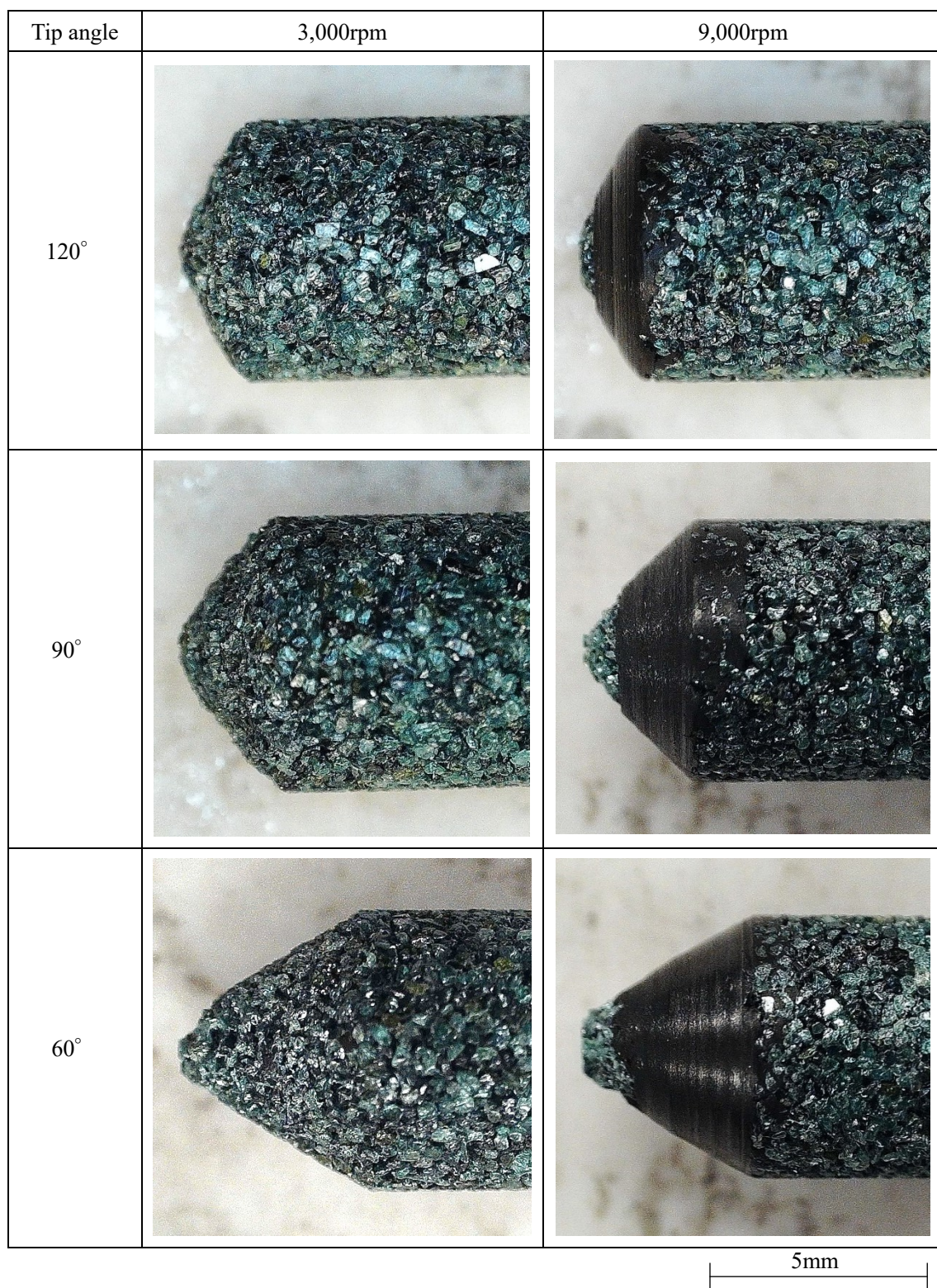


Fig. 4.3.3 Grinding tool after processing

4.4 スラスト力の比較

図 4.4.1 に回転数 3,000rpm, 図 4.4.2 に回転数 9,000rpm の加工中のスラスト力の測定結果を示す。また, グラフのピーク付近のデータの平均値を最大荷重とし, 比較したものを図 4.4.3 に示す。具体的な数値としては, 回転数 3,000rpm では 120° : 51N, 90° : 38N, 60° : 35N, 回転数 9,000rpm では 120° : 39N, 90° : 31N, 60° : 28N である。これにより, どちらの回転数においても, 砥石の先端角度を鋭角にするほどスラスト力は減少していることが分かる。これは図 4.4.4 に示すように, スラスト力は加工荷重の垂直方向の分力であり, 先端角度を鋭角にすることで減少するためである。また, 先行研究において, 先端角を小さくすることにより, 垂直方向に作用する切削抵抗のスラスト力を減少すると穴出口の剥離発生が防止できることがわかっている⁸⁾。図 4.4.5 のように加工穴出口側において先端角度が鈍角 (120°) になると, スラスト力が加わる部分(斜線部分)へのモーメントが大きくなるため, バリや剥離が発生しやすい。ゆえに, 加工穴出口側に発生するバリとスラスト力は関係しており, 砥石先端角度を鋭角にすることで, スラスト力は減少し, 加工穴出口側に発生するバリを抑えることができるといえる。

したがって, 4.3 の結果と合わせると, 回転数 3,000rpm において, 先端角度 120° のときに加工穴出口付近で小さなバリが多く発生してしまったのは, スラスト力が原因だと分かる。

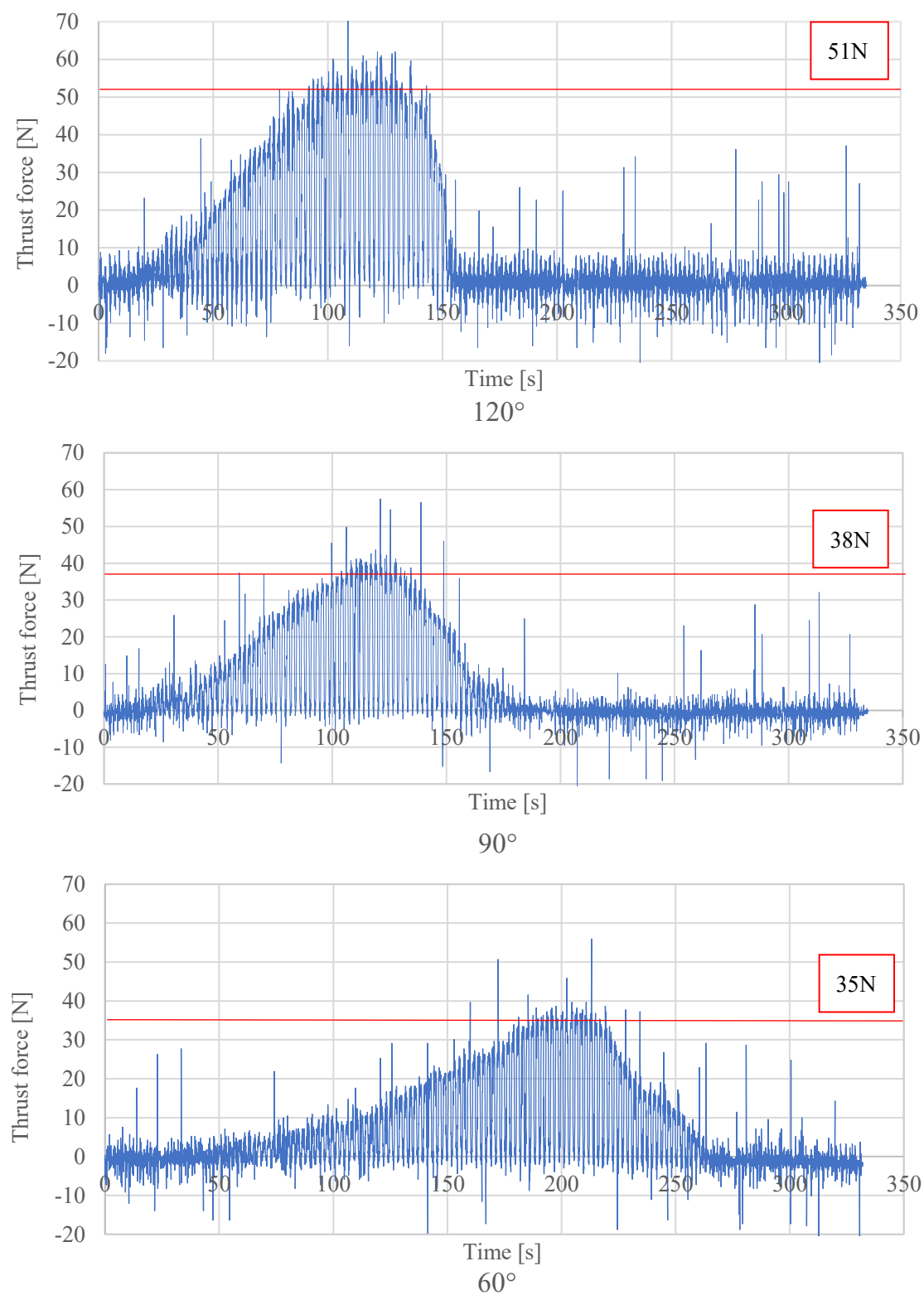


Fig. 4.4.1 Thrust force (3,000 rpm)

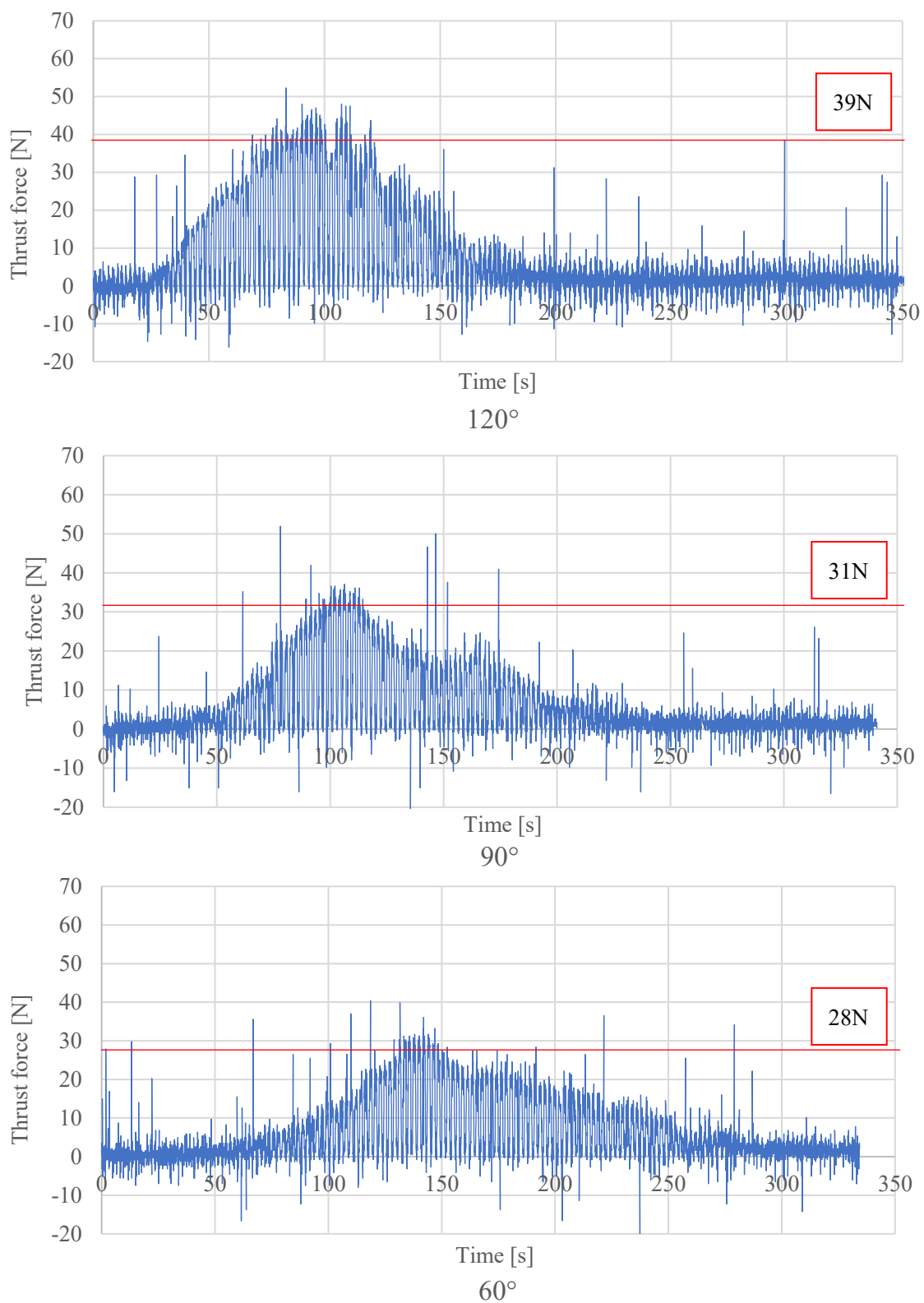


Fig. 4.4.2 Thrust force (9,000 rpm)

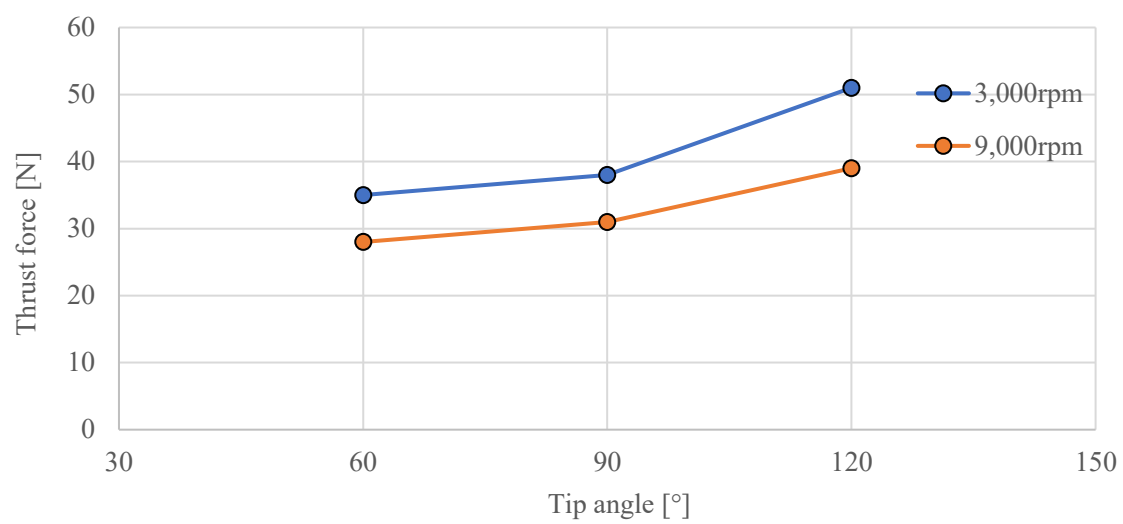


Fig. 4.4.3 Thrust force with tip angle

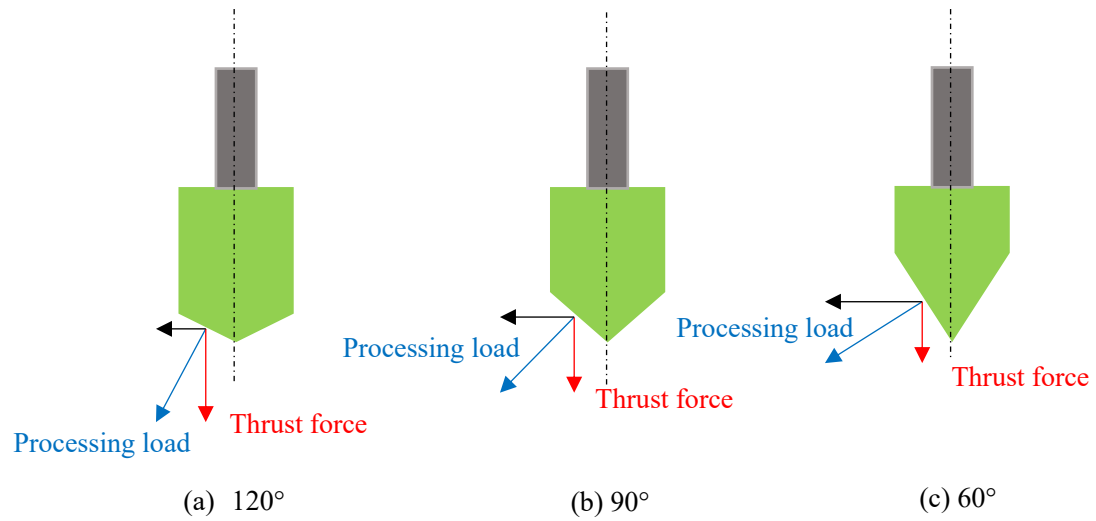


Fig. 4.4.4 Difference in thrust force due to tip angle

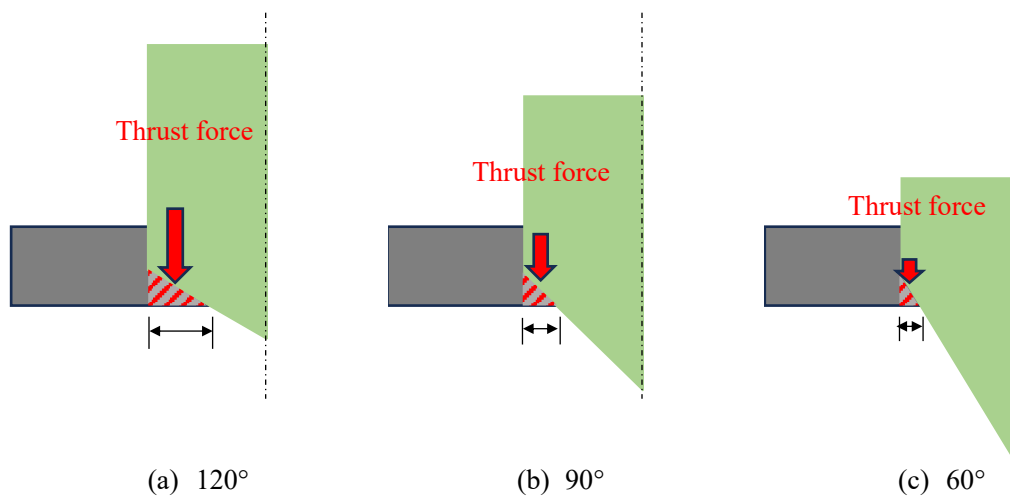


Fig.4.4.5 Factors causing burrs on the exit side of the machined hole

4.5 加工穴精度

加工穴の評価方法として直径の比較を行った．図 4.5.1 に示すように，加工穴の入口側，出口側の直径を 4 か所測定し，その平均値を加工穴の直径とした．先端角度で比較したグラフを図 4.5.2 に示す．どの先端角度においても，出口側に比べて入口側のほうが加工穴直径は大きくなっていることがわかる．これは入口側では工具を左右から拘束するものがなく，工具が振れやすくなるが，出口側では試験片が工具の振れを抑制しているためであると考ええる．また，図 4.5.2 の結果より， 90° ， 120° はほとんど差がなく， 60° はほかに比べて加工穴精度はよくなるということがわかる．

これらの結果より，砥石での仕上げ加工時においては，先端角度 60° ，回転数 3,000rpm が最適な条件であるといえる．

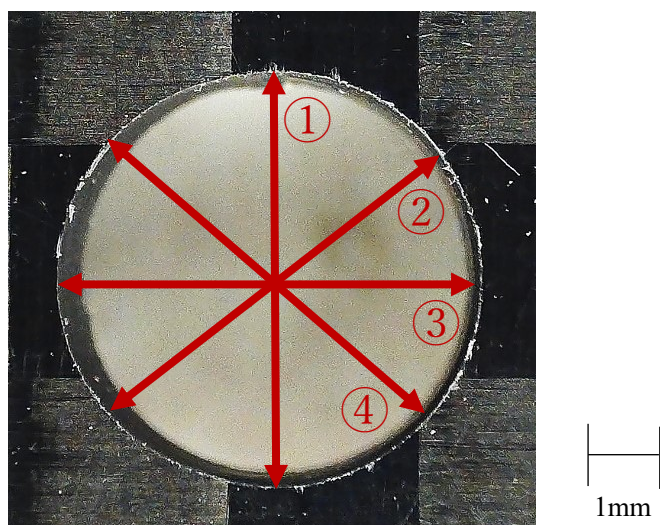


Fig. 4.5.1 Measuring the diameter of the hole

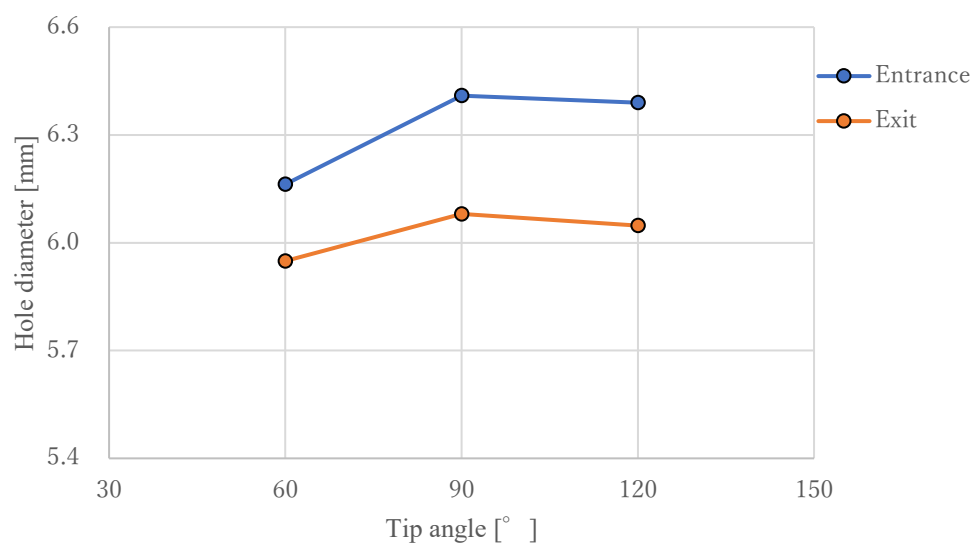


Fig. 4.5.2 Hole diameter with tip angle

5 結言

本研究では、ドリル・砥石一体型工具の作成を目標とし、液体窒素雰囲気中における CFRTP の穴あけ加工を行った。本実験で用いたステップ加工の条件において、ドリル、砥石による穴あけ加工の基礎的データを収集し、工具形状、回転数などの検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1)ドリル直径 3.0mm での加工において、回転数 3,000, 9,000rpm では、加工穴出口側に発生するバリなどの影響範囲を砥石直径である 6mm 以内に抑えることができる。また、スラスト力は回転数が高くなるほど低くなる。
- (2)砥石加工時において、回転数 3,000rpm では砥石への溶着は見られず、比較的きれいな穴を開けることができた。一方、回転数 9,000rpm では砥石への溶着が見られ、加工穴出口側に大きくバリが発生した。
- (3)砥石加工時において、先端角度を鋭角（60°）にするとスラスト力は減少し、加工穴出口側のバリの発生を抑えることができた。また、加工穴精度においてもほかの角度に比べて 60°の条件が最もよくなった。
- (4)本研究の実験条件では、一体型工具のドリル部での加工時は 9,000rpm、砥石部での仕上げ加工時は 3,000rpm となるように回転数を切り替えて加工を行うのが最適であると考ええる。

参考文献

- 1) 東レ・カーボンマジック株式会社：「CFRP とは？ 特徴や用途から成形方法の選び方まで詳しく解説」 (<https://www.carbonmagic.com/cfrp/>)
- 2) 全国地球温暖化防止活動推進センター：「日本の部門別二酸化炭素排出量（2019 年度）」 (<https://www.jccca.org/download/13335>)
- 3) 井形健太郎：「炭素繊維複合材料がもたらす地球環境の改善と科学技術の発展」 上智大学大学院 理工学研究科
- 4) 株式会社先進技術研究所：「CFRP の機械加工」
(<https://sengiken.jp/2019/10/08/cfrp%E3%81%AE%E6%A9%9F%E6%A2%B0%E5%8A%A0%E5%B7%A5/>)
- 5) 日開野輔：「CFRTP の極低温切削加工特性に関する研究」, 砥粒加工学会誌, (2015)
- 6) 大橋一仁：「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）」, 日本機械学会文集（C 編）, 79 巻, 808 号（2013-12）
- 7) 金井日出夫：「プラスチック材料から見た精密成形」, 精密工学会誌, 52 巻, 2 号（1986）
- 8) 柳下福蔵：「CFRP の切削加工」, (2014)

謝辞

本研究を遂行するにあたりあたり，終始適切な助言を賜り，また丁寧に指導して下さった 中西 栄徳 准教授に深く感謝いたします。また，多岐にわたり多くのご助言をご協力いただきました 高橋 裕 教授，ならびに論文作成にあたりご査読いただきました 中村 裕一 准教授に深く感謝いたします。さらに実験の遂行に際して多くのご協力をいただきました 中川 浩希 技術専門職員，ならびに集積加工システム研究室の皆様方に深く感謝いたします。

最後に，幾多のご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ともに，謹んで御礼申し上げます。